哈尔滨工业大学学报

第 58 卷　第 5 期　　2026 年 5 月 30 日出版

目　　次

定子永磁型双转子高速电机温度场分析及冷却结构设计

…… 严作光,吴绍朋,杨雨彬,黄梦婷,张　萌(1)

交替极混合磁路记忆电机多磁化状态优化设计及减振降噪

…… 张政昊,高锋阳,岳文瀚,高建宁,陈湛江(11)

隐私增强的安全联邦入侵检测方法

…… 金志刚,丁　禹,武晓栋,陈旭阳(25)

动态门控扩散去噪与跨层注意力的多模态图像融合网络

…… 邱　敬,霍婧婧,王鹤然,刘冀钊,廉　敬(33)

砂浆在冻融早期的空间损伤演化机理

…… 陈思远,林宝臣,张春良,肖会刚(45)

泰勒展开与复合注意力引导的红外与可见光图像融合

…… 杨艳春,李　毅(54)

融合信任值和身份标识验证的节点复制攻击检测策略

…… 滕志军,苗润升,孙铭阳,李纪奇,赵立权(63)

融合多尺度特征的敦煌壁画风格迁移

…… 曹　岩,郭炳森,冯丹丹,张　燚,辛子昊(73)

基于实测数据和等效脉冲模型的近断层地震动复原方法

…… 胡进军,狄啸展(83)

LPOA-MPC 的车辆横纵向轨迹跟踪协同优化控制方法

…… 李晓龙,黄　鹤,杨　澜,王会峰,高　涛(90)

融合改进 SAC-IA 与加权 ICP 的高效点云配准方法

…… 殷　果,王大庆,孙玉香,高理富(103)

基于反向遗忘的后门毒化样本检测

…… 闫雷鸣,尤剑飞(116)

基于自注意力多尺度空洞卷积网络的雷达工作模式识别

…… 张福群,何明浩,郁春来,冯明月,张逸楠,刘　康(126)

融合时空特征与孪生网络的风机叶片结冰预测

…… 韩华彬,高丙朋,蔡　鑫,孙　凯(138)

基于多维熵与优化 SVM 的调频引信抗干扰方法

…… 刘　冰,时明心,刘佳琪,郝新红,施文乐(149)

有理函数统一形式的结构性黏土弹黏塑性模型

…… 胡亚元,章　成,曾　甄,周　建,邢恩达,龚晓南(159)

基于变形动态预测的岩质边坡力学参数反演方法

…… 张荣洲,王述红,董福瑞,高晨翔,侯钦宽(168)

含外挂墙板装配式混凝土框架抗震及热工性能

…… 韩文龙,钱稼茹,肖　明,赵作周,吕晓晴,杨　璇(180)

钢筋煤矸石混凝土黏结性能试验研究与数值模拟

…… 赵卫平,钟　琳,张　珂,苏子帅,徐　旸,陈嘉龙(192)

期刊基本参数: CN 23-1235/T * 1954 * m * A4 * 204 * zh * P * ￥20.00 * 600 * 19 * 2026 – 05

责任编辑: 吕雪梅

终　　校: 丁晓清

Journal of Harbin Institute of Technology

Vol. 58 No. 5 2026 – 05 – 30

CONTENTS

Temperature field analysis and cooling structure design of the stator permanent magnet dual-rotor high-speed electrical machine

…… *YAN Zuoguang*, *WU Shaopeng*, *YANG Yubin*, *HUANG Mengting*, *ZHANG Meng*(1)

Multi-magnetization optimization design and vibration-noise reduction of consequent-pole hybrid magnetic circuit memory motor

…… *ZHANG Zhenghao*, *GAO Fengyang*, *YUE Wenhan*, *GAO Jianning*, *CHEN Zhanjiang*(11)

A privacy-enhanced secure federated intrusion detection method

…… *JIN Zhigang*, *DING Yu*, *WU Xiaodong*, *CHEN Xuyang*(25)

Dynamic gating diffusion denoising and cross-layer attention-based multimodal image fusion network

…… *DI Jing*, *HUO Jingjing*, *WANG Heran*, *LIU Jizhao*, *LIAN Jing*(33)

Evolution mechanism of spatial damage of mortar in the early freeze-thaw stage

…… *CHEN Siyuan*, *LIN Baochen*, *ZHANG Chunliang*, *XIAO Huigang*(45)

Infrared and visible image fusion guided by Taylor expansion and composite attention

…… *YANG Yanchun*, *LI Yi*(54)

Node replication attack detection strategy integrating node creditworthiness and identity authentication

…… *TENG Zhijun*, *MIAO Runsheng*, *SUN Mingyang*, *LI Jiqi*, *ZHAO Liquan*(63)

Style transfer of Dunhuang murals fusing multi-scale features

…… *CAO Yan*, *GUO Bingsen*, *FENG Dandan*, *ZHANG Yi*, *XIN Zihao*(73)

Near-fault ground motion reconstruction method based on observed data and equivalent pulse model

…… *HU Jinjun*, *DI Xiaozhan*(83)

Cooperative optimization of vehicle lateral and longitudinal trajectory tracking based on LPOA-MPC

…… *LI Xiaolong*, *HUANG He*, *YANG Lan*, *WANG Huifeng*, *GAO Tao*(90)

Efficient point cloud registration method integrating improved SAC-IA and weighted ICP

…… *YIN Guo*, *WANG Daqing*, *SUN Yuxiang*, *GAO Lifu*(103)

Backdoor poisoned sample detection via reverse forgetting

…… *YAN Leiming*, *YOU Jianfei*(116)

Radar working mode recognition based on self-attention multi-kernel dilated convolution network

…… *ZHANG Fuqun*, *HE Minghao*, *YU Chunlai*, *FENG Mingyue*, *ZHANG Yinan*, *LIU Kang*(126)

Prediction of ice accretion on wind turbine blades using spatiotemporal features and siamese networks

…… *HAN Huabin*, *GAO Bingpeng*, *CAI Xin*, *SUN Kai*(138)

An anti-jamming method for FM fuzes based on multidimensional entropy and optimized SVM

…… *LIU Bing*, *SHI Mingxin*, *LIU Jiaqi*, *HAO Xinhong*, *SHI Wenle*(149)

Elastic-viscoplastic model for structural clays based on a unified form of rational functions

…… *HU Yayuan*, *ZHANG Cheng*, *ZENG Zhen*, *ZHOU Jian*, *XING Enda*, *GONG Xiaonan*(159)

Inversion method for mechanical parameters of rock slopes based on dynamic prediction of deformation

…… *ZHANG Rongzhou*, *WANG Shuhong*, *DONG Furui*, *GAO Chenxiang*, *HOU Qinkuan*(168)

Seismic and thermal performance of precast concrete frame with precast facade panel

…… *HAN Wenlong*, *QIAN Jiaru*, *XIAO Ming*, *ZHAO Zuozhou*, *LÜ Wanqing*, *YANG Xuan*(180)

Experimental study and numerical simulation on bond performance of reinforced coal gangue concrete

…… *ZHAO Weiping*, *ZHONG Lin*, *ZHANG Ke*, *SU Zishuai*, *XU Yang*, *CHEN Jialong*(192)

DOI:10.11918/202506020

定子永磁型双转子高速电机温度场分析及冷却结构设计

严作光,吴绍朋,杨雨彬,黄梦婷,张 萌

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,哈尔滨 150001)

摘 要: 为解决定子永磁型双转子高速电机(stator permanent magnet dual-rotor high-speed electrical machine,SPMDR-HSEM)热源集中及高速运行引起的定子过热问题,本文提出一种二维-三维混合热网络法对电机温度场进行分析,并设计一种新型隔磁-冷却一体化结构对电机定子进行冷却,以提高电机散热能力。首先,介绍了SPMDR-HSEM拓扑结构,并分析其传热机理,确定该电机各部分导热系数及表面散热系数。其次,针对SPMDR-HSEM结构复杂、温度场难以快速准确计算的问题,建立了二维-三维混合热网络模型对电机额定及过载工况下主要零部件温升进行解析计算,并搭建实验平台进行实验测试,验证所提出二维-三维混合热网络模型的准确性。再次,针对SPMDR-HSEM热源集中及高速运行引起的定子过热问题,设计了一种隔磁-冷却一体化结构对电机定子进行冷却,研究其结构参数及入水口流速对电机散热效果的影响,确定最佳冷却结构,并采用仿真分析验证了所提出冷却结构的有效性及合理性。该研究结果可拓宽定子永磁型高速电机的应用领域,为定子永磁型高速电机温度场分析及先进冷却结构设计提供新思路。

关键词: 定子永磁型电机;定子过热;冷却结构;热网络模型;温度场分析

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)05-0001-10

Temperature field analysis and cooling structure design of the stator permanent magnet dual-rotor high-speed electrical machine

YAN Zuoguang, WU Shaopeng, YANG Yubin, HUANG Mengting, ZHANG Meng

(School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To resolve the stator overheat problem of the stator permanent magnet dual-rotor high-speed electrical machine (SPMDR-HSEM) due to its mustered heats source and high-speed operation condition, a 2D-3D hybrid thermal network model (HTNM) is built to analyze the temperature field of the electrical machine, and an integrated structure with magnetic isolation and cooling functions (IS-MIC) is proposed for accurately calculating the machine temperature and improving the machine heat dissipation capacity. Firstly, the topology of the SPMDR-HSEM is introduced, and its heat transfer mechanism is analyzed, as well as the conduction and convection heat coefficients are given. Secondly, for the problem of complex structure of the SPMDR-HSEM and the difficulty in calculating the temperature fast and accurately, the 2D-3D HTNM is proposed to analytically calculate the key components temperature rise of the SPMDR-HSEM under rated and overload conditions, its temperature distribution characteristics are summarized. And a test plat is established and the experimental tests are conducted, which verify the accuracy of the HTNM. Then, the IS-MIC is proposed to solve the heat dissipation problem of the SPMDR-HSEM, and the influence of the structure parameters and water flow velocity of the IS-MIC on the cooling effect is investigated, and the optimal structure of the IS-MIC is designed. And the finite element analysis is carried out to verify the effectiveness and rationality of the IS-MIC. It broadens the application field and provides a new temperature field analysis and cooling structure design method for the stator permanent magnet electrical machines.

Keywords: stator permanent magnet machine; stator overheat; cooling structure; thermal network model; temperature field analysis

近年来,兼具高功率密度、高机械强度及高耐热性能的定子永磁型电机广泛应用于航空航天、分布式发电机、精密制造以及飞轮储能等伺服和驱动领域[1-4]。然而,由于其绕组和永磁体均安装在定子

收稿日期: 2025-06-09;**录用日期:** 2025-07-18;**网络首发日期:** 2025-09-26
网络首发地址: https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250926.0945.002
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52377042);航空科学基金(20240040077004)
作者简介: 严作光(1995—),男,博士研究生;吴绍朋(1983—),男,教授,博士生导师
通信作者: 吴绍朋,wushaopeng@hit.edu.cn

上,热源比较集中,加之其高速运行工况,定子永磁型电机,特别是双转子定子永磁型电机,定子温度极易升高,过高的温升会对电机性能产生不利影响,甚至导致永磁体不可逆热退磁及绕组绝缘失效现象发生[5-6]。因此,为保证电机安全稳定运行,快速准确的温度场分析及先进冷却结构设计至关重要。

目前,常用的温度场分析方法主要包括有限元法和热网络法两种[7-8]。其中,有限元法可以模拟任意复杂结构电机及其热源分布,是目前最准确的温度场分析方法。然而,有限元法计算量大,耗时严重,且对计算资源性能要求较高,不适合在设计阶段使用[9-10]。作为一种快捷、高效的温度场分析方法,热网络法被广泛应用于电机设计阶段[11-12]。文献[13-16]基于二维热网络模型对电机主要零部件温度进行解析计算,简单、快速地计算出电机各主要零部件温升情况。然而,由于其仅考虑了电机轴向和径向之间的热传递,忽略了周向传热,导致其计算精度偏低。文献[17-20]采用一种三维热网络分析方法对电机温度场进行分析,该方法同时考虑了轴向、径向以及圆周方向的热传递,具有较高的计算精度,然而,该方法模型复杂,计算量大,计算效率较低。因此,热网络法存在计算速度和计算精度之间的矛盾。

当前,针对高速电机冷却方式的研究主要集中在风冷和水冷两个方面[21-22]。文献[23-26]基于风冷方式提出了风刺、通风孔以及散热筋等结构对高速电机进行冷却,有效降低了电机温升。然而,这种冷却方式效果有限,且对于真空等特殊环境并不适用。相较于风冷方式,水冷方式具有较强的冷却能力[27],且具有散热均匀、效率高、可靠性强以及噪声低等优点。此外,只要密封良好,该冷却方式可在任何环境中使用[28-29]。因此,目前通常采用水冷方式对电机,特别是高速、高功率密度电机进行冷却。

针对传统热网络分析方法以及风冷结构的不足,本文以一台定子永磁型双转子高速电机(stator permanent magnet dual-rotor high-speed electrical machine, SPMDR-HSEM)为研究对象,提出一种二维-三维混合热网络分析模型(2D-3D hybrid thermal network model, HTNM)对该电机温度场进行分析,并设计一种新型隔磁冷却一体化结构(integrated structure with magnetic isolation and cooling functions, IS-MIC)对其进行冷却,以提高电机散热能力,并采用仿真分析验证了所提出 HTNM 的准确性及 IS-MIC 的冷却效果,以期对同类电机的温度场分析及冷却结构设计起到一定的指导作用。

1　电机结构及传热机理

1.1　电机结构

本文所研究的 SPMDR-HSEM 如图 1 所示。该电机主要包括内转子、外转子以及中间定子 3 部分。其中:中间定子由内定子单元和外定子单元组成,内、外定子单元均包含一套独立绕组及永磁体结构。且其内、外定子单元分别与内、外转子组成内、外单元电机。内、外单元电机之间设置隔磁磁障,既使内、外单元电机形成统一整体,又可使两者之间磁路相互独立,方便电机设计与控制。电机性能参数如表 1 所示。

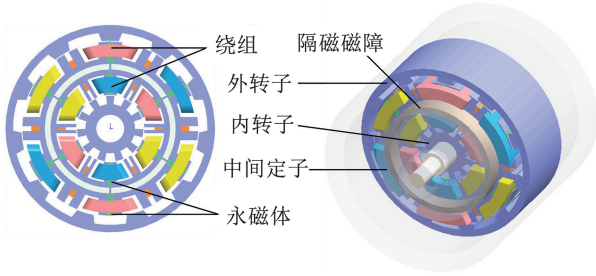


图 1　SPMDR-HSEM 电机结构示意图

Fig. 1　Topology of the SPMDR-HSEM

表 1　SPMDR-HSEM 主要参数

Tab. 1　Main parameters of the SPMDR-HSEM

外转子内径/mm	外定子外径/mm	内转子内径/mm	内定子内径/mm	轴向长度/mm	气隙长度/mm	外电机额定转速/(r·min^{-1})
190	188	71	73	80	1	15 000
内电机额定转速/(r·min^{-1})	**外电机额定电流/A**	**内电机额定电流/A**	**外电机过载转速/(r·min^{-1})**	**内电机过载转速/(r·min^{-1})**	**外电机过载电流/A**	**内电机过载电流/A**
30 000	60	60	10 000	20 000	180	180

1.2　传热机理

自然冷却情况下,SPMDR-HSEM 传热路径如图 2所示。其中,蓝色箭头代表对流传热路径,对流传热路径主要存在于电机外表面与外部空气之间以及电机各零部件与内部空气之间。白色箭头代表热传导路径,其主要集中于电机各零部件之间,具体为电机的中间定子、隔磁磁障、内转子、外转子、永磁体、电枢绕组以及转轴之间的热传递。黄色箭头代表热辐射,其主要考虑电机外表面与外部气隙之间的热辐射,由于电机内部有空气流动,主要考虑热对

流和热传导，忽略内部热辐射。

当两个相互接触的物体之间存在温差时，物体之间发生热传导，其热传导能量（q_{cond}）计算公式为

$$q_{cond} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \tag{1}$$

式中：A 为热流流过的导热面积；$\partial T/\partial x$ 为面积 A 法线方向的温度梯度；λ 为物体导热系数。

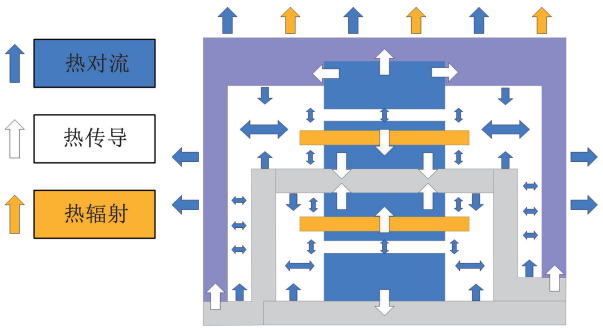


图 2　SPMDR-HSEM 电机传热机理

Fig. 2　The heat transfer mechanism of the SPMDR-HSEM

传导热阻（R_{cond}）可表示为

$$R_{cond} = \frac{L}{\lambda A} \tag{2}$$

式中 L 为热流流过的路径长度。

当两个相互靠近的物体之间存在温差时，对流换热发生，换热能量（q_{conv}）计算公式为

$$q_{conv} = \alpha A(T_s - T_\infty) \tag{3}$$

式中：T_s 为物体表面温度；T_∞ 为气隙上游温度；α 为对流换热系数。

对流热阻（R_{conv}）可表示为

$$R_{conv} = \frac{1}{\alpha A} \tag{4}$$

定转子气隙处换热系数（α_g）可表示为

$$\alpha_g = \frac{N_u \cdot k_{air}}{g} \tag{5}$$

其中：

$$\begin{cases} Ta_m = \dfrac{\rho^2 \omega r_a g^3}{\mu^2 F_g} \\ F_g = \dfrac{\pi^4 \left(\dfrac{2r_a - 2.304g}{2r_a - g}\right)}{1\,697\left[0.005\,6 + 0.057\,1\left(\dfrac{2r_a - 2.304g}{2r_a - g}\right)^2\right]\left(1 - \dfrac{g}{2r_a}\right)} \end{cases} \tag{6}$$

$$N_u = \begin{cases} 2, & Ta_m < 1\,700 \\ 0.128 Ta_m^{0.367}, & 1\,700 < Ta_m < 10^4 \\ 0.409 Ta_m^{0.241}, & 10^4 < Ta_m < 10^7 \end{cases} \tag{7}$$

式中：N_u 为努塞尔数；k_{air} 为空气热导率；μ 为气隙中介质的运动黏度；ω 为转子的圆周速度；r_a 为定转子之间平均半径；g 为气隙长度；Ta_m 为泰勒数；F_g 为形状系数。

转子端面对流换热系数（α_{rd}）可表示为

$$\alpha_{rd} = \frac{N_{ur} k_{air}}{r_r} \tag{8}$$

其中：

$$\begin{cases} N_{ur} = 1.67 Re_z^{0.385} \\ Re_z = \dfrac{2\pi r_r^2 n}{60\mu} \end{cases} \tag{9}$$

式中 r_r 为转子半径。

定子端面（α_{sd}）及电机外表面（α_{sh}）对流换热系数可表示为：

$$\alpha_{sd} = 15 + 6.5 v_r^{0.7} \tag{10}$$

$$\alpha_{sh} = 14(1 + 0.5\sqrt{\omega}) \sqrt[3]{\frac{T_o}{25}} \tag{11}$$

式中：Re_z 为定子端面的雷诺数；n 为转子转速；v_r 为转子表面线速度。

当物体温度高于绝对零度时可通过辐射电磁波传递能量，其辐射热功率可由式（12）计算。

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A F_g (T_1^4 - T_2^4) \tag{12}$$

辐射热阻可表示为

$$R_{rad} = \frac{1}{hA} \tag{13}$$

其中，

$$h = \frac{\sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \tag{14}$$

式中：q_{rad} 为辐射热功率；R_{rad} 为辐射热阻；σ 为斯蒂芬–玻尔兹曼常数；ε 为物体表面散热系数；h 为辐射系数；T_1、T_2 为物体表面温度和环境温度。

1.3　热源分析

SPMDR-HSEM 热源主要包括绕组铜耗、铁耗、永磁体涡流损耗以及机械损耗。其中，机械损耗主要由风摩损耗和摩擦损耗组成，通常采用以下经验公式计算：

$$P_v = K_v \left(\frac{\omega}{10}\right)^2 Q_0 \tag{15}$$

$$P_f = 0.15 \frac{F}{d} v \times 10^{-5} \tag{16}$$

式中：P_v 为风摩损耗；K_v 为系数，通常取 0.175 ~ 0.185；Q_0 为总风量；P_f 为摩擦损耗；F 为滚动轴承载荷；d 为滚动轴承直轻；v 为滚珠线速度。

计算电机铜耗时，需要考虑绕组电导率随温度的变化，引入交流电阻系数考虑温度对电机铜耗的影响，可得电机铜耗表达式为

$$P_{Loss_Cu} = \sum k_R i_i^2 \frac{l \rho_{T_0}}{S}[1 + \alpha_{Cu}(T - T_0)] \tag{17}$$

其中：

$$k_R = 1 + (k_{Rs} - 1)\frac{l_{slot}}{l} \tag{18}$$

$$\xi = h_c \sqrt{\frac{1}{2}\omega \mu_0 \sigma_{T_0} \frac{b_c}{b}} \tag{19}$$

$$k_{\mathrm{Rs}}=\xi\frac{\sinh 2\xi+\sin 2\xi}{\cosh 2\xi-\cos 2\xi}+2\xi\frac{\sinh \xi-\sin \xi}{\cosh 2\xi+\cos 2\xi}\cdot\frac{z_{\mathrm{t}}^2-1}{3} \tag{20}$$

式中：$P_{\mathrm{Loss\text{-}Cu}}$为绕组铜耗；$k_{\mathrm{R}}$为交流电阻系数；$i$ 为电流；l 为绕组总长度；l_{slot}为绕组在定子铁心内的长度；h_{c}为导线长度；z_{t}为导体层数；σ_{T_0}为 T_0时的斯蒂芬–玻尔兹曼常数；b_{c}为导线宽度；b 为定子槽宽；ρ_{T_0}为 T_0℃时铜的电导率；α_{Cu}为铜线的电阻温度系数；S 为铜线截面积。

电机铁耗由涡流损耗和磁滞损耗组成，其表达式为

$$P_{\mathrm{Loss_Iron}}=k_{\mathrm{h}}fB_{\mathrm{max}}^2+k_{\mathrm{e}}f^2B_{\mathrm{max}}^2 \tag{21}$$

式中：$P_{\mathrm{Loss_Iron}}$为电机铁耗；f 为电频率；k_{e}、k_{h}分别为涡流损耗和磁滞损耗系数；B_{max}为最大磁通密度。

永磁体涡流损耗可表示为

$$P_{\mathrm{Loss_PM}}=\sum\left(\int\frac{|J_{\mathrm{n}}|^2}{2\gamma}\mathrm{d}V\right) \tag{22}$$

式中：$P_{\mathrm{Loss_PM}}$为永磁体涡流损耗；J_{n}为涡流密度；γ 为永磁体电导率。

2　混合热网络模型建立

2.1　基本假设

SPMDR-HSEM 结构特殊且复杂，为简化计算，对该电机进行等效热网络分析和计算时，做出如下假设：

1）电机内部各点空气温度相同；

2）忽略电机内部热辐射，仅考虑电机外表面与外部环境之间的热辐射；

3）对电机零部件进行等效处理，将复杂形状零部件等效为规则的四方体或圆柱体进行处理。

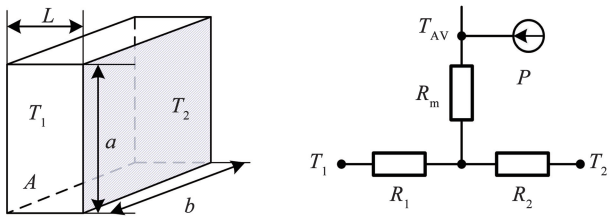
2.2　混合热网络模型

基于上述假设，根据 SPMDR-HSEM 结构特点及其传热机理，将电机分为机壳、定转子轭、定转子齿、隔磁磁障、电枢绕组端部和内部、永磁体、气隙、转轴以及端盖等部分。其中，转子齿和电枢绕组端部在周向分布不均匀，因此建立三维等效热网络模型，其余部分建立二维等效热网络模型。转子齿和电枢绕组端部分别考虑径向、轴向以及周向传热，其他部分仅考虑径向和轴向传热，忽略周向传热。

根据电机永磁体和定子齿结构特点，可将其等效为如图3所示的立方体T型等效热网络模型，其各等效热阻可表示为：

$$\begin{cases}R_1=R_2=\dfrac{L}{\lambda ab}\\ R_m=-\dfrac{R_1}{3}=\dfrac{-L}{3\lambda ab}\end{cases} \tag{23}$$

式中：R_1，R_2为相邻两节点之间的等效热阻；R_{m}为附加热阻；L 为沿热流方向的物体厚度；λ 为物体导热系数；a 和 b 分别为热流穿过的物体截面的宽度和长度。



(a) 立方体　　(b) 等效热网络模型

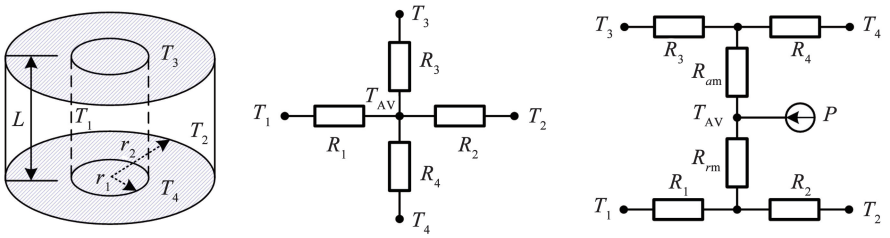
图3　T型热网络模型

Fig. 3　T-type thermal network model

将机壳、端盖、磁障、转轴、定、转子轭以及绕组内部等零件等效为如图4所示空心圆筒双T型等效热网络模型，其中，定、转子轭以及绕组内部有内热源，将其等效为如图4(c)所示有内热源的热网络模型，机壳、端盖、磁障、转轴等效为如图4(b)所示无内热源的热网络模型，图4中各等效热阻可表示为：

$$\begin{cases}R_1=-R_2=\dfrac{1}{4\pi\lambda_r L}\left[1-\dfrac{2r_1^2\ln\left(\dfrac{r_2}{r_1}\right)}{r_2^2-r_1^2}\right]\\ R_{rm}=\dfrac{-1}{8\pi\lambda_r L(r_2^2-r_1^2)}\left[r_1^2+r_2^2-\dfrac{4r_1^2r_2^2\ln\left(\dfrac{r_2}{r_1}\right)}{r_2^2-r_1^2}\right]\\ R_3=R_4=\dfrac{L}{2\pi\lambda_a(r_2^2-r_1^2)}\\ R_{am}=\dfrac{-L}{6\pi\lambda_a(r_2^2-r_1^2)}\end{cases} \tag{24}$$

式中：λ_a和 λ_r为沿轴向和径向的导热系数；r_1和 r_2为空心圆柱体的内外径。



(a) 立方体　　(b) 无内热源等效热网络模型　　(c) 有内热源等效热网络模型

图4　双T型热网络模型

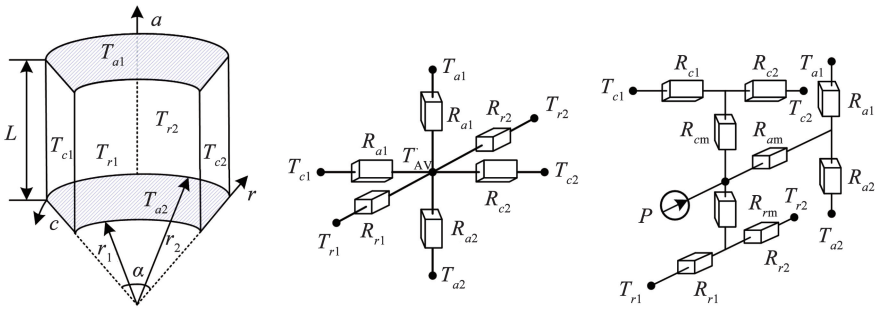
Fig. 4　Double T-type thermal model

将定子齿及绕组端部零件等效为如图 5 所示扇形三维等效热网络模型，各等效热阻可表示为：

$$\begin{cases} R_{a1}=R_{a2}=\dfrac{180L}{\alpha P_r \pi \lambda_a (r_2^2-r_1^2)} \\ R_{c1}=R_{c2}=\dfrac{P_r \alpha \pi (r_1+r_2)}{720\lambda_c L(r_2-r_1)} \\ R_{r1}=\dfrac{90}{P_r \alpha \pi \lambda_r L}\left[1-\dfrac{2r_1^2 \ln\left(\dfrac{r_2}{r_1}\right)}{r_2^2-r_1^2}\right] \\ R_{r2}=\dfrac{90}{P_r \alpha \pi \lambda_r L}\left[\dfrac{2r_2^2 \ln\left(\dfrac{r_2}{r_1}\right)}{r_2^2-r_1^2}-1\right] \\ R_{rm}=\dfrac{-45}{P_r \alpha \pi \lambda_r L(r_2^2-r_1^2)}\left[r_1^2+r_2^2-\dfrac{4r_1^2 r_2^2 \ln\left(\dfrac{r_2}{r_1}\right)}{r_2^2-r_1^2}\right] \\ R_{am}=\dfrac{-60L}{\alpha P_r \pi \lambda_a (r_2^2-r_1^2)} \end{cases} \tag{25}$$

式中：λ_a、λ_r 和 λ_c 为沿轴向、径向和周向的导热系数；r_1 和 r_2 为空心扇体的内外径；α 为扇形角度。

基于上述分析，建立如图 6(a)所示 2D-3D 混合热网络模型。根据前述相关公式，计算该混合热网络模型中各部分热阻及热源，对 SPMDR-HSEM 额定及过载工况下主要零部件温度进行解析计算，其分析结果如图 7 所示。观察可知，额定工况下，该电机最高温度为 66.54 ℃，其绕组和永磁体最高温度分别为 59.34 和 65.44 ℃，均远低于永磁体及绝缘材料耐温极限，可保证电机安全可靠运行。然而，过载工况下，电机最高温度为 168.68 ℃，其绕组最高温度高达 163.94 ℃，超出绝缘材料耐温极限(120 ℃)，会导致绝缘失效现象发生。此外，电机永磁体最高温度可达 155.38 ℃，接近永磁体耐温极限(180 ℃)，长期运行可能导致永磁体热退磁现象发生，影响电机安全运行。因此，需设计合理的冷却结构，提高电机散热能力，抑制电机温升。



(a)扇体　　(b) 无内热源等效热网络模型　　(c) 有内热源等效热网络模型

图 5　扇体三维热网络模型

Fig. 5　Fanning 3D thermal model

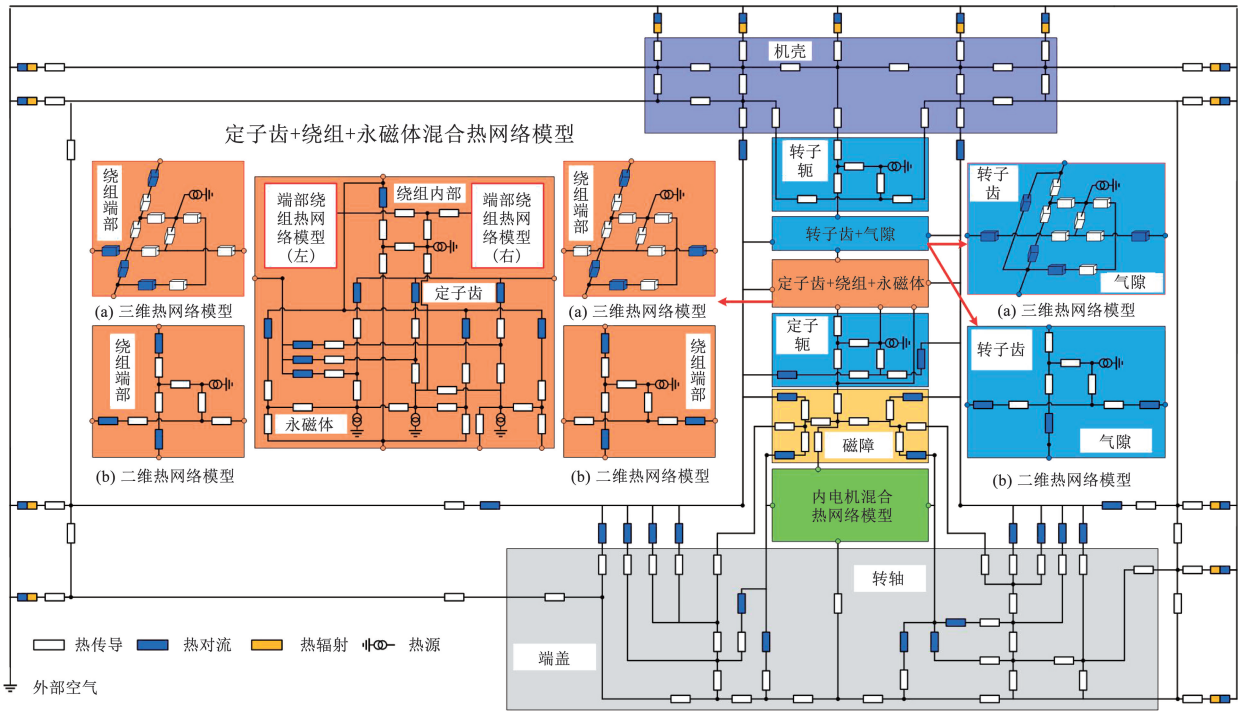


图 6　SPMDR-HSEM 热网络模型

Fig. 6　The thermal network model of the SPMDR-HSEM

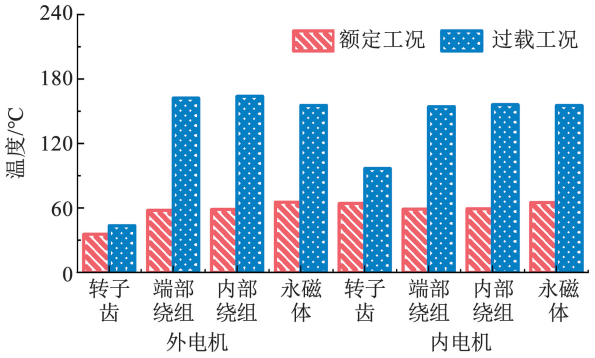


图 7　额定及过载工况下 SPMDR-HSEM 电机主要零部件温度

Fig. 7　The temperature of the main elements of the SPMDR-HSEM at rated and overload conditions

2.3　有限元验证

为验证所建立混合热网络模型的准确性及优越性，分别采用传统二维热网络法及有限元法对 SPMDR-HSEM 额定工况下主要零部件温度进行计算，并将其计算结果与所提出的 HTNM 结果进行比较分析。电机主要零部件温升有限元仿真结果如图 8所示，其仿真结果与二维热网络法及 HTNM 结果之间的误差对比分析如图 9 所示。由图 9 可以看出，所提出的 HTNM 在内、外转子齿部及内、外绕组端部的计算结果与有限元仿真结果吻合度更高，而传统二维热网络法计算误差较大。其计算结果最大相对误差为 8.99%（出现在内转子齿部），而所提出的 HTNM 最大误差为 1.87%（出现在外绕组端部），计算精度显著提高。这是因为二维热网络法忽略了绕组端部/转子齿与气隙之间的周向传热，从而忽略了绕组间隙/转子槽的影响，导致绕组端部/转子齿和气隙之间的热阻误差较大。HTNM 考虑了绕组端部/转子齿和气隙的三维传热，比二维热网络法更接近实际分布，因此具有更高的精度。表 2 对比分析了 3 种方法的温升计算时间，可以看出，与二维热网络法相比，HTNM 具有更高的精度和相当的计算速度。与有限元法相比，HTNM 具有更高的计算速度和相当的计算精度。综上可以认为，HTNM 具有较高的计算速度和计算精度，能够快速且准确地计算 SPMDR-HSEM 温升。

2.4　实验验证

为验证有限元分析及所提出的 HTNM 的准确性，根据表 1 所示电机主要参数，加工制造 SPMDR-HSEM 实验样机（图 10），搭建实验测试平台（图 11），对自然冷却工况下电机主要零部件温升进行实验测试。该样机实验测试平台采用电涡流制动器作为模拟负载。PT100 温度传感器安装于该电机永磁体表面、绕组内部及端部，用于测量永磁体及定子绕组温升。

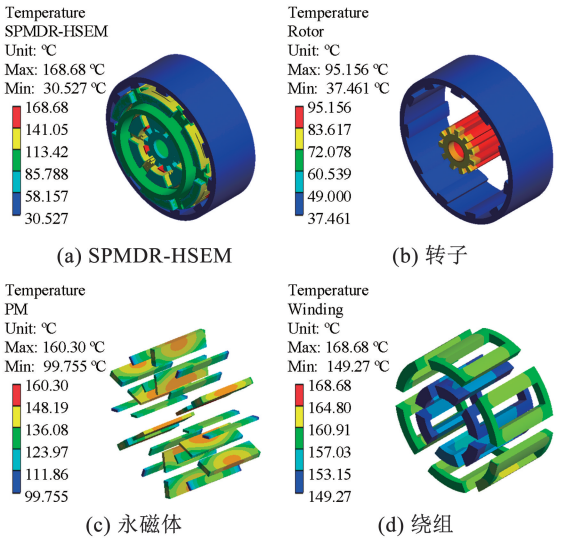


图 8　额定工况下 SPMDR-HSEM 电机主要零部件温度

Fig. 8　The temperature of the main elements of the SPMDR-HSEM at rated condition

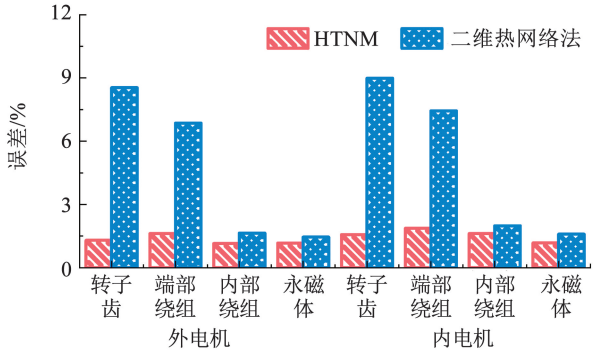


图 9　HTNM 和二维热网络法与有限元法误差

Fig. 9　The errors of the between the FEM and the HTNM or the 2D thermal network method

表 2　计算时间对比

Tab. 2　Comparison of the calculation time

计算方法	计算资源	计算时间/s
HTNM	12th Gen Intel(R)	27
二维热网络法	Core（TM）i7-12700F	31
有限元法	2.10 GHz	4 320



图 10　SPMDR-HSEM 实验样机

Fig. 10　Prototype of the SPMDR-HSEM

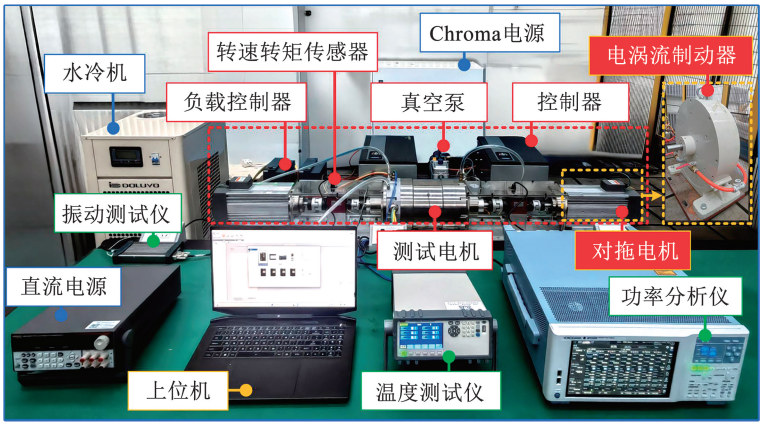


图 11　测试平台

Fig. 11　Test platform

当内、外绕组均通入 60 A 工作电流时，对电机各主要部件进行了温升实验，并将其结果与有限元仿真和 HTNM 计算结果进行了对比分析，结果如图 12所示。由图 12 可见，实验测试结果与有限元仿真及 HTNM 计算结果吻合良好，其最大误差分别为 6.12% 和 4.88%，验证了本文所采用有限元方法的可靠性，以及所提出的 HTNM 模型的准确性。

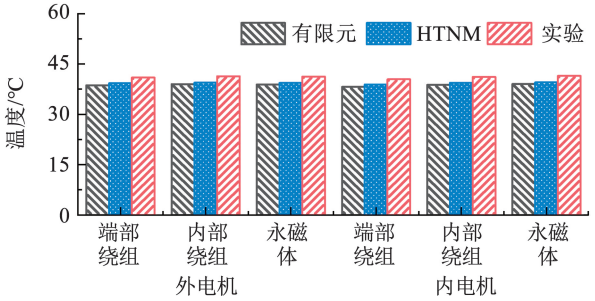


图 12　SPMDR-HSEM 电机主要零部件温升测试结果

Fig. 12　The temperature rises test results of the main elements of the SPMDR-HSEM

3　冷却结构设计

为防止 SPMDR-HSEM 过载工况下绕组绝缘失效及永磁体不可逆热退磁现象发生，根据该电机结构特点，本文提出一种新型 IS-MIC 结构对其进行冷却，以提高电机散热能力。

3.1　冷却结构

本文所提出的 IS-MIC 结构如图 13 所示，该一体化结构在采用槽内冷却方式对电机绕组进行冷却的基础上，通过在隔磁磁障中注入冷却液，形成隔磁-冷却桥，使其在保持隔磁效果的同时，对电机定子进行冷却，提高电机散热能力。

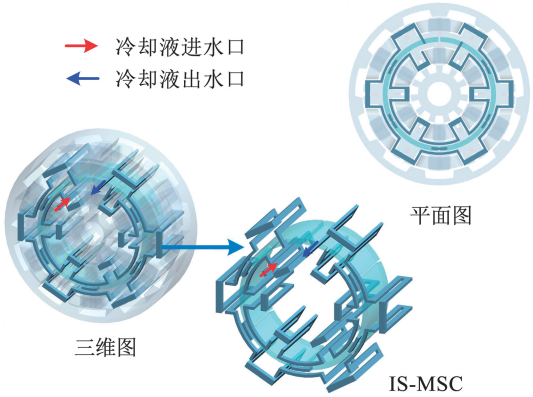


图 13　IS-MIC 结构示意图

Fig. 13　The structure of the IS-MIC

3.2　冷却液流速选择

采用 IS-MIC 对 SPMDR-HSEM 进行冷却时，冷却液从冷却管道进水口流入，流经冷却管道后从出水口流出。电机运行稳定后，假设损耗产生的热量全部由冷却液带走，冷却液流量可表示为

$$Q_0 = \frac{60kP_{\mathrm{Loss}}}{c_p \rho \Delta T} \tag{26}$$

式中：Q_0 为冷却液流量；P_{Loss} 为电机总损耗；c_p 为冷却液比热容；ρ 为冷却液密度；ΔT 为 IS-MIC 进出口温差。

水道截面积 A 为

$$A = \frac{Q_0}{v} \tag{27}$$

式中 v 为冷却液流速。

由式(26)和(27)可知，冷却液入水口流速对 IS-MIC 冷却效果具有较大的影响，因此，选择合适的入水口流速可有效增强 IS-MIC 冷却效果，提高电机散热能力。图 14 给出了不同入水口流速对电机绕组及永磁体温升的影响，可以看出，随着入水口流速增加，电机绕组及永磁体温度持续下降，IS-MIC 冷却效果增强。当流速从 0.1 m/s 增加到 0.5 m/s

时,绕组和永磁体最高温度分别由 105.18 和 103.66 ℃下降到 73.86 和 77.10 ℃,其温度随流速的增加急剧减小。然而,当流速从 0.5 m/s 增加到 1.2 m/s 时,绕组及永磁体温升变化逐渐趋于平缓。

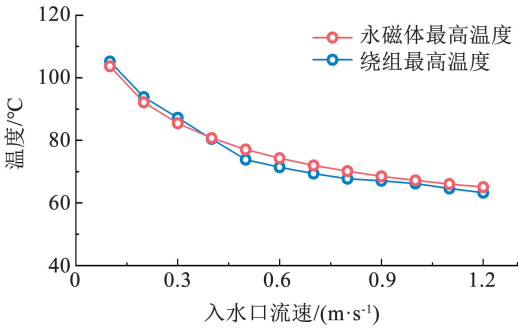


图 14　流速对电机温升的影响

Fig. 14　Effect of flow velocities on temperature rises

图 15 给出了 IS-MIC 进出水口压力随冷却液入水口流速的变化,可以看到,入水口流速越大,进出口压降增长的越快,需要水泵的功率越大,入水口流速小于 0.5 m/s 时,进出口压降缓慢增加,当入水口流速增加到 0.5 m/s 时,进出口压降开始显著增加。

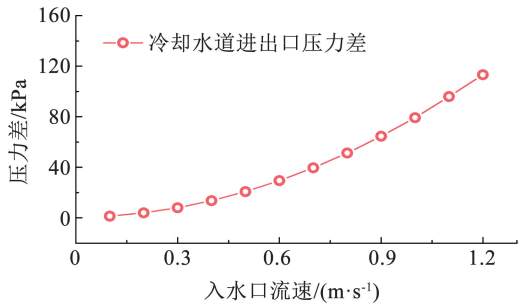


图 15　流速对 IS-MIC 进出口压降的影响

Fig. 15　Effect of flow velocities on inlet and outlet pressure drops of IS-MIC

综上所述,随着冷却液入水口流速增加,电机绕组及永磁体温升变化逐渐趋于平缓,电机温度下降逐渐进入饱和区,且随着入水口流速增加,IS-MIC 进出口压降迅速增大。因此,综合考虑电机温升及进出口压降,选择冷却液入水口流速为 0.5 m/s。

3.3　冷却效果分析

过载工况下采用 IS-MIC 冷却的 SPMDR-HSEM,主要零部件温升如图 16 所示,可以看到,采用 IS-MIC 冷却后,电机主要零部件温升显著下降。电机最高温度由初始的 168.68 ℃下降为 77.10 ℃。永磁体和绕组最高温度分别下降为 77.10 和 73.68 ℃,远低于材料耐温极限,冷却效果良好,验证了本文所提出的冷却系统的合理性及有效性。

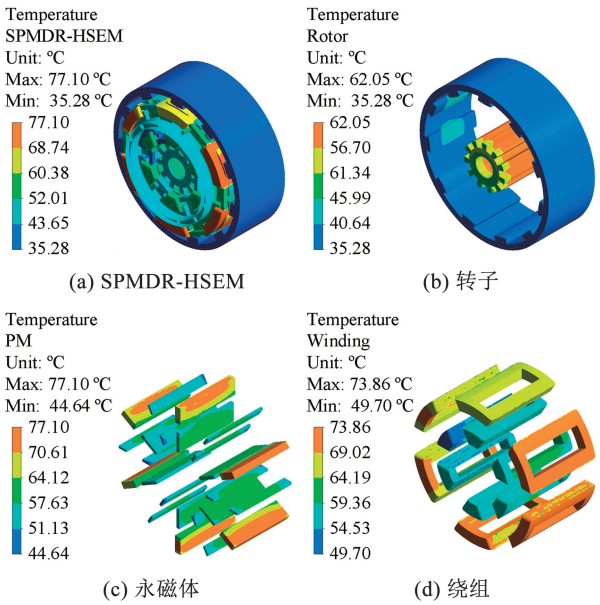


图 16　过载工况下 SPMDR-HSEM 电机主要零部件温度

Fig. 16　The temperature of the main elements of the SPMDR-HSEM at overload condition

3.4　隔磁能力验证

采用 IS-MIC 冷却的 SPMDR-HSEM 气隙磁密如图 17 所示。由图 17 可知,当外单元电机单独作用时,其磁力线主要集中在外电机气隙处,其内、外电机气隙磁密幅值分别为 0.02 和 0.79 T,内电机气隙磁密仅为外电机的 2.53%。当内电机单独作用时,其磁力线主要集中在内电机气隙处,外电机气隙磁密幅值仅为内电机的 2.04%。因此,表明 IS-MIC 在兼顾冷却效果的同时具有较好的隔磁能力。

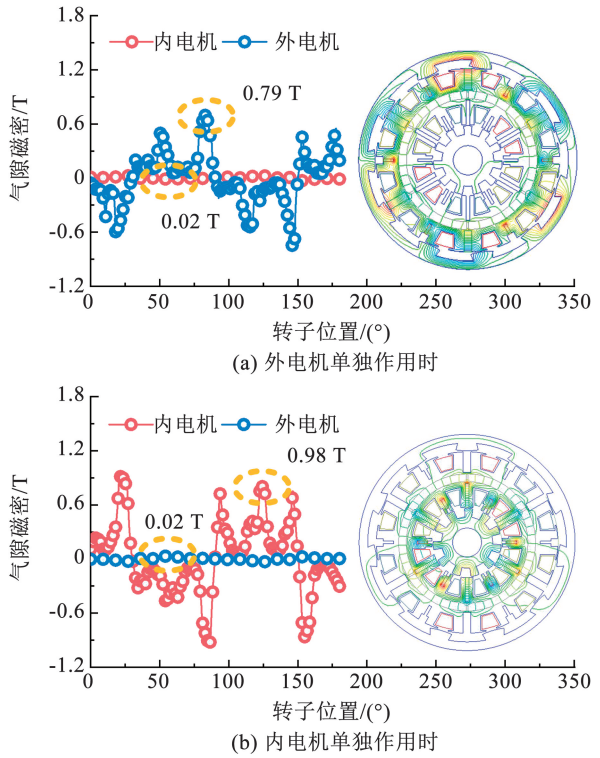


图 17　SPMDR-HSEM 电机气隙磁密

Fig. 17　The air gap density of SPMDR-HSEM

4　结　论

本文提出了一种 HNTM 及新型 IS-MIC 对 SPMDR-HSEM 进行温度场分析及冷却，并通过有限元法验证了本文所提出的 HNTM 的准确性及 IS-MIC 的有效性。主要结论如下。

1）HNTM 的温度场分析结果与有限元结果最大误差为 1.87%，在误差允许范围之内，验证了本文所提出的 HNTM 的准确性。

2）通过采用 IS-MIC，过载工况下，SPMDR-HSEM 温升显著降低，且其最高温升远低于永磁体及绝缘材料耐温极限，验证了 IS-MIC 的有效性。

3）IS-MIC 在兼顾冷却效果的同时具有较好的隔磁性能，验证了所设计的 IS-MIC 的合理性。

参考文献

[1]王道涵，王秀和. 新型永磁型磁通切换型磁阻电机齿槽转矩机理分析和解析分析模型[J]. 电工技术学报，2015，30(10)：77
WANG Daohan，WANG Xiuhe. Preliminary study for mechanisms and analytical model of cogging torque in novel permanent magnet flux switching machine[J]. Transaction of China Electrotechnical Society，2015，30(10)：77. DOI：0.3969/j.issn.1000－6753.2015.10.012

[2]刘畅，朱孝勇，杜怿，等. 基于电-热双向耦合的磁场调制型磁通切换电机设计与性能分析[J]. 中国电机工程学报，2017，37(21)：6237
LIU Chang，ZHU Xiaoyong，DU Yi，et al. Design and performance analysis of magnetic field modulated flux-switching permanent magnet machine based on electrical-thermal bi-directional coupling design method[J]. Proceedings of the CSEE，2017，37(21)：6237. DOI：10.13334/j.0258－8013.pcsee.171126

[3]SU Peng，WANG Yiwei，LI Yi，et al. Cogging torque reduction of axial-modular flux switching permanent magnet machine by module combination technique[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2024，10(1)：1947. DOI：10.1109/TTE.2023.3262845

[4]WANG Peixin，HUA Wei，ZHANG Gan，et al. Torque ripple suppression of flux-switching permanent magnet machine based on general air-gap field modulation theory[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2022，69(12)：12379. DOI：10.1109/TIE.2021.3137617

[5]苏鹏，夏玉佳，花为，等. 模块化多单元磁通切换电机设计与特性分析[J]. 中国电机工程学报，2023，43(9)：7669
SU Peng，XIA Yujia，HUA Wei，et al. Design and characteristics analysis of a modular elementary flux switching permanent magnet machine[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(9)：7669. DOI：10.13334/j.0258－8013.pcsee.221680

[6]YAN Zuoguang，WU Shaopeng，HUANG Mengting，et al. A stator-PM counter-rotating dual-rotor high-speed electrical machine for flywheel energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2026，73(3)：4506. DOI：10.1109/TIE.2025.3613633

[7]王晓远，高鹏. 等效热网络法和有限元法在轮毂电机温度场计算中的应用[J]. 电工技术学报，2016，31(16)：26
WANG Xiaoyuan，GAO Peng. Application of equivalent thermal network method and finite element method in temperature calculation of in-wheel motor[J]. Transaction of China Electrotechnical Society，2016，31(16)：26. DOI：0.3969/j.issn.1000－6753.2016.16.004

[8]张健，朱锡庆，张卓然，等. 电励磁双凸极无刷直流发电机热网络建模与热特性研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(1)：318
ZHANG Jian，ZHU Xiqing，ZHANG Zuoran，et al. Thermal network modeling and thermal characteristics analysis of doubly salient brushless DC generator with stator field winding[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(1)：318. DOI：10.13334/j.0258－8013.pcsee.212513

[9]王玉彬，林洋. 基于电磁热双向耦合的内置式永磁同步电机温度场等效模型及温度场分析[J]. 电工技术学报，2025，40(22)：7127
WANG Yubin，LIN Yang. Equivalent model of temperature field and temperature field analysis of interior permanent magnet synchronous motor based on electromagnetic-thermal bidirectional coupling[J]. Transaction of China Electrotechnical Society，2025，40(22)：7127. DOI：10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241947

[10]陈益广，郑军，魏娟，等. 舵机用永磁同步电机的设计与温度场分析[J]. 电工技术学报，2015，30(14)：94
CHEN Yiguang，ZHENG Jun，WEI Juan，et al. Design of PMSM for actuator and its temperature field analysis[J]. Transaction of China Electrotechnical Society，2015，30(14)：94. DOI：10.3969/j.issn.1000－6753.2015.14.013

[11]王小飞，代颖，罗建. 基于流固耦合的车用永磁同步电机水道设计与温度场分析[J]. 电工技术学报，2019，34(z1)：22
WANG Xiaofei，DAI Ying，LUO Jian. Waterway design and temperature field analysis of vehicle permanent magnet synchronous motor based on fluid-solid coupling[J]. Transaction of China Electrotechnical Society，2019，34(z1)：22. DOI：10.19595/j.cnki.1000－6753.tces.L80816

[12]SHAFIGN Nategh，OSKAR Wallmark，MATS Leksell. Thermal analysis of a PMaSRM using partial FEA and lumped parameter modeling[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion，2012，27(2)：477. DOI：10.1109/TEC.2012.2188295

[13]李立毅，潘东华，黄旭珍. 超精密短行程直线电机温度场分析及温升抑制[J]. 电工技术学报，2013，28(11)：112
LI Liyi，PAN Donghua，HUANG Xuzhen. Temperature field analysis and temperature rise suppression of ultra-precision short-stroke linear motor[J]. Transaction of China Electrotechnical Society，2013，28(11)：112. DOI：10.3969/j.issn.1000－6753.2013.11.015

[14]陈晨，王又珑. 基于效率及温升的轴向磁通永磁电机优化设计[J]. 中国电机工程学报，2016，36(6)：1686
CHEN Chen，WANG Youlong. Optimal design of axial-flux permanent magnet motors based on the efficiency and temperature rise[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(6)：1686. DOI：10.13334/j.0258－8013.pcsee.2016.06.025

[15]WALLSCHEID O，BOCKER J. Global identification of a low-order lumped-parameter thermal network for permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2016，31(1)：354. DOI:10.1109/TEC.2015.2473673

[16]DEMETRIADES G D，DELA PARRA H Z，ANDERSSON E，et al. A real-time thermal model of a permanent-magnet synchronous

motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2): 463. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2027905

[17] MO Lihong, ZHANG Tao, LU Qing. Thermal analysis of a flux-switching permanent-magnet double-rotor machine with a 3-D thermal network model [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1. DOI: 10.1109/TASC.2019.2892307

[18] RAN Xiaohe, SHANG Jing, ZHAO Meng, et al. Improved configuration proposal for axial reluctance resolver using 3-D magnetic equivalent circuit model and winding function approach [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 311. DOI: 10.1109/TTE.2022.3199538

[19] 佟文明, 孙静阳, 舒圣浪, 等. 不同数值方法在自扇冷永磁同步电机三维热分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2017, 32(z1): 151
TONG Wenming, SUN Jingyang, SHU Shenglang, et al. Application of different numerical methods in 3D thermal analysis for fan-ventilated permanent magnet synchronous machines [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2017, 32(z1): 151. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L70769

[20] 宋守许, 胡孟成, 杜毅, 等. 混合定子铁心再制造电机三维温度场分析[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(6): 33
SONG Souxu, HU Mengcheng, DU Yi, et al. Temperature field investigation of remanufacturing motor with mixed stator core[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(6): 33. DOI: 10.15938/j.emc.2020.06.005

[21] 贺景运, 边旭, 梁艳萍. 空冷水轮发电机定子冷却结构设计与分析[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 111
HE Jingyun, BIAN Xu, LIANG Yanping. Design and analysis for stator cooling structure of air-cooled hydrogenator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(12): 111. DOI: 10.7652/xjtuxb201912015

[22] 吴柏禧, 万珍平, 张昆, 等. 考虑温度场和流场的永磁同步电机折返型冷却水道设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2306
WU Baixi, WAN Zhenping, ZHANG Kun, et al. Design of reentrant cooling channel in permanent magnet synchronous motor considering temperature field and flow field [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2306. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171483

[23] 佟文明, 孙静阳, 吴胜男. 全封闭高速永磁电机转子结构对转子散热的影响[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 91
TONG Wenming, SUN Jingyang, WU Shengnan. Effect of rotor structure on rotor dissipation for totally-enclosed high-speed permanent magnet motor[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 91. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L70519

[24] FAN Xinggang, QU Ronghai, ZHANG Bin, et al. Ventilation and thermal improvement of radial forced air-cooled FSCW permanent magnet synchronous wind generator[C]//2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Pattaya, Thailand: IEEE, 2016: 1241. DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385229

[25] VANSOMPEL H, LEIJNEN P, SERGEANT P. Multiphysics analysis of a stator construction method in yokeless and segmented armature axial flux PM machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1): 139. DOI: 10.1109/TEC.2018.2862622

[26] 朱高嘉, 王晓远, 杜静娟. 应用 CFD 流固耦合热分析车用高功率密度电机的水冷系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 30
ZHU Gaojia, WANG Xiaoyuan, DU Jingjuan. Design and analysis of water-cooling system for HEVs high-power-density motor using CFD and thermal technology[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 30. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6753.2015.09.004

[27] WANG Yu, ZHU Ting, GENG Weiwei, et al. Cooling system analysis of an enclosed yokeless stator for high-power axial flux PM motor with distributed winding[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 2789. DOI: 10.1109/TIE.2023.3270540

[28] 武岳, 张志锋, 平佳齐. 高功率密度轴向磁通永磁电机新型水冷结构设计与温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8295
WU Yue, ZHANG Zhifeng, PING Jiaqi. New type water cooling structure design and temperature field analysis of high-power density axial flux permanent magnet motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8295. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211291

[29] WU Shengnan, HAO Daquan, TONG Wenming. Cooling system design and thermal analysis of modular stator hybrid excitation synchronous motor[J]. Cooling System Design and Thermal Analysis of Modular Stator Hybrid Excitation Synchronous Motor, 2022, 6(3): 241. DOI: 10.30941/CESTEMS.2022.00034

(编辑 吕雪梅)

DOI:10.11918/202504041

交替极混合磁路记忆电机多磁化状态优化设计及减振降噪

张政昊[1],高锋阳[1],岳文瀚[1],高建宁[2],陈湛江[1]

(1.兰州交通大学 自动化与电气工程学院,兰州 730070;2.东南大学 电气工程学院,南京 210000)

摘 要:针对记忆电机电磁特性调控与振动噪声抑制问题,本文提出新型复合拓扑结构:定/转子开辅助槽,采用NdFeB-AlNiCo混合型永磁体构建动态磁路,配合分段Halbach充磁构型。首先,建立记忆电机等效磁路解析模型及瞬态电磁-机械耦合有限元模型,求解振动噪声解析表达式;其次,针对多种磁化状态下的不同性能要求,设计基于参数灵敏度权重的极端工况分级优化策略,根据所提方法对拓扑结构参数进行优化;最后,进行电磁-结构-声学多物理场耦合仿真分析。电磁性能验证结果表明,优化后的电机在宽域调磁范围内保持稳定转矩输出特性。研究结果表明:与原型电机相比,改进方案在显著提升多磁化状态电磁性能的基础上,有效抑制了定子齿部的振动加速度峰值,降低了声压级,并可有效规避共振频率,从而实现了电机声振特性的整体优化。

关键词:电磁特性;混合磁路;记忆电机;径向电磁力;振动噪声

中图分类号:TM351 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0011-14

Multi-magnetization optimization design and vibration-noise reduction of consequent-pole hybrid magnetic circuit memory motor

ZHANG Zhenghao[1], GAO Fengyang[1], YUE Wenhan[1], GAO Jianning[2], CHEN Zhanjiang[1]

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210000, China)

Abstract: To address the challenges of electromagnetic characteristics regulation and vibration-noise suppression in memory motors, this paper proposes a novel composite topology structure. This design incorporates auxiliary slots in both the stator and rotor, utilizes NdFeB-AlNiCo hybrid permanent magnets to construct a dynamically reconfigurable magnetic circuit, and employs a segmented Halbach magnetization configuration. First, an equivalent magnetic circuit analytical model and a transient electromagnetic-mechanical coupled finite element model are established for the memory motor, enabling the derivation of analytical expressions for vibration and noise. Second, accounting for diverse performance requirements under multiple magnetization states, a hierarchical optimization strategy based on parametric sensitivity weighting is developed for extreme operating conditions. Using this method, the structural parameters of the proposed topology are optimized. Finally, multiphysics co-simulation integrating electromagnetic, structural, and acoustic domains is performed. Electromagnetic validation results demonstrate that the optimized motor maintains stable torque output characteristics across a wide flux-regulation range. Comparative studies reveal that compared to the baseline motor, the proposed design significantly enhances electromagnetic performance under multiple magnetization states while effectively suppressing peak vibration acceleration in stator teeth, reducing sound pressure levels, and achieving superior resonance frequency avoidance characteristics. This approach comprehensively optimizes the motor's vibroacoustic behavior.

Keywords: electromagnetic characteristics; hybrid magnetic circuit; memory machine; radial electromagnetic force; vibration noise

在电动汽车驱动系统领域,交替极(consequent-pole, CP)结构因低成本、高效率和高转矩密度等优点成为研究热点[1-2]。然而,传统交替极永磁电机采用高矫顽力永磁体作为励磁源,其磁通调节能力相对较弱。为了在高速区域实现弱磁,通常须持续施加过大的d轴电流,这将导致铜损增加和总效率

收稿日期:2025-04-14;**录用日期**:2025-06-21;**网络首发日期**:2025-08-29
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250829.0926.008
基金项目:国家自然科学基金(52267004)
作者简介:张政昊(2000—),男,硕士研究生;高锋阳(1970—),男,教授,博士生导师
通信作者:高锋阳,ljdgaofy@mail.lzjtu.cn

降低[3]。记忆电机采用低矫顽力(low coercive force, LCF)永磁体,因此,可以通过施加不同的电流脉冲来改变其磁化状态(magnetization state, MS),进而灵活调节气隙磁场。然而,由于 LCF 永磁体的磁能积非常低,仅以其作为励磁源的电机常具有较低的转矩密度且易发生负载退磁,限制了其在电动汽车领域的广泛应用。变磁通记忆电机(variable flux memory motor, VFMM)的提出成为解决宽速域下电机铜耗问题的一个新方案[4]。

为提升转矩密度并增强负载抗退磁能力,国内外学者相继提出了结合高矫顽力(high coercive force, HCF)永磁体与 LCF 永磁体的混合永磁 VFMM。根据 VFMM 磁路结构,可将其分为:串联磁路型[5-7]、并联磁路型[8]以及混合磁路型(hybrid magnetic circuit, HMC)[9-10]。诸自强等[5]提出一种双层"一 + V"型串联磁路结构,HCF 永磁体对 LCF 永磁体具有反向磁保护作用,使电机同时具备高转矩密度和良好的抗负载退磁能力,但调磁范围仍受到一定限制。在并联磁路结构中,HCF 永磁体和 LCF 永磁体的交叉耦合效应显著拓宽了调磁范围,但降低了其抗负载退磁能力,增加了意外退磁风险[8]。杨辉等[9]采用 HMC,但过多配置 HCF 永磁体会导致转子出现严重磁饱和现象,致使调磁范围过窄。林鹤云等[10]将可变漏磁通的设计思想引入记忆电机形成新型 HMC,使调磁范围显著上升,但转矩密度出现明显下降,影响了电机额定状态下的电磁性能。

在电动汽车用永磁同步电机设计中,振动性能已成为继高效率、低成本、宽速域之后的核心评价指标,其优化效果直接决定车辆 NVH(noise, vibration, harshness)表现,对乘客舒适性和城市噪声污染控制具有双重工程意义。电机振动噪声主要来源于电磁振动、机械振动以及空气振动。其中,由电磁振动引起的电机振动成为国内外学者研究热点[11-12]。任杰等[13]针对内置式永磁同步电机,提出了一种将有限元法与磁动势-磁导法相结合的电磁力波计算方法。陈斌等[14]分析了交替极电机中永磁极和铁芯极对径向电磁力的影响。Liang 等[15]提出了定子齿面调制的解析模型,直观地分析定子齿面调制对电磁径向力的影响。

通过合理优化电机结构参数以及永磁体充磁方式,可以提升电机的电磁性能。然而,仅考虑单一电磁场的性能,已无法满足电动汽车对驱动电机的需求。因此,随着电机设计中涉及的多物理场优化目标和参数不断增加,多目标优化已成为电机设计中的必要方法。王晨等[16]提出了一种聚磁式永磁轮毂电机,基于响应面法和改进布谷鸟算法进行电机结构多目标优化,改进后的算法具有更优收敛性和精确度,所提优化模型显著提升了电机转矩密度和弱磁范围。高建宁等[17]提出了一种结合参数敏感度分层和响应面法的拓扑协同优化方案,对电磁场等多物理场进行了多目标优化。上述电机优化研究方案仅针对传统永磁同步电机对于单一 MS 进行优化,但 VFMM 中 LCF 永磁体存在多种磁化状态,仅考虑单一磁化状态(MS)的优化,难以实现全局性能最优,亦无法充分体现 VFMM 的多磁化状态调控优势。

为此,针对 CPHMC-VFMM(consequent-pole hybrid magnetic circuit-Variable Flux memory motor)的振动噪声问题,本文提出一种基于敏感度分层的多极磁化状态分级优化方案。首先,针对记忆电机工作原理及电机的振动噪声进行理论分析,并构建电机有限元模型;其次,对拓扑结构参数采用多极端磁化状态分级优化方案;再次,分析电机在两种稳定磁化状态下的电磁性能;最后,将优化后的电机结构在多物理场中仿真分析振动噪声。

1 CPHMC-VFMM 结构及调磁分析

1.1 电机结构

图 1 所示为 CPHMC-VFMM 拓扑(参数详见表 1)通过"一型"并联与"V 型"串联混合布局实现双永磁体磁路耦合。该拓扑结构在保证良好调磁范围的同时,确保电机的基本电磁性能和抗负载退磁能力。此外,通过采用交替极结构和 Halbach 充磁技术,可显著缓解因永磁体过量配置引发的转矩密度衰减现象。

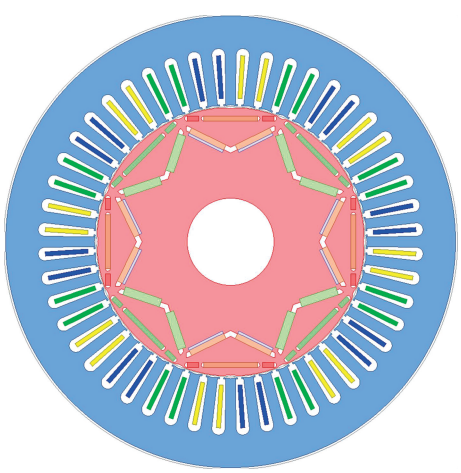


图 1 电机模型示意图

Fig. 1 Motor model schematic

表 1　电机参数

Tab. 1　Motor parameters

槽数	极对数	定子外径/mm	定子内径/mm	转子外径/mm	额定转速/(r · min^{-1})	永磁极材料	铁芯极材料
48	4	270	162	161	8 000	NdFe35/Alnico9	DW315

1.2　调磁分析

基于图 2 的 LCF 永磁体磁滞特性曲线进行调磁分析。将 LCF 永磁体的最大正向、反向以及被完全去磁磁化状态分别用 100% MS、－100% MS 和 0% MS 表示。在退磁过程中，假设 LCF 永磁体初始工作点在 P_1。当开始施加退磁脉冲电流时，永磁工作点将沿局部磁滞回线 M_1、M_2下降，并最终稳定在 M_2点。然后，工作点将沿着回复线 M_2–P_2移动，若此时去掉退磁脉冲电流，永磁体工作点稳定在 P_2。同样，在充磁过程中，假设初始工作点位于 P_2处，当施加再磁化脉冲电流时，工作点将沿着曲线 N_2–N_1上升并最终到达 N_1。然后，工作点将沿着回复线 N_1–P_1移动，若此时去掉再磁化电流脉冲，永磁体工作点最终稳定在 P_1。

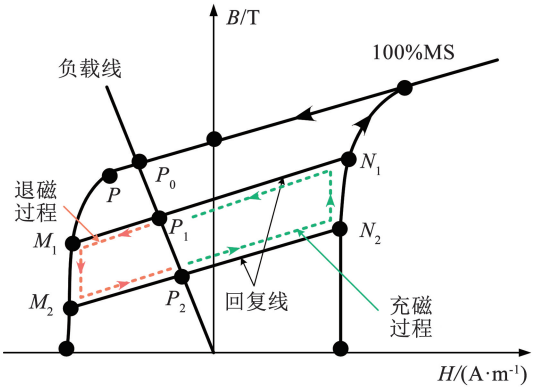


图 2　LCF 永磁体简化磁滞模型

Fig. 2　Simplified hysteresis model of LCF permanent magnet

如图 3 所示，在永磁同步电机的定子电流矢量轨迹中，A、B、C 三点分别表征了不同转速下电机运行状态及其弱磁能力核心特性，i_d为定子电流在磁场定向坐标系中与转子磁链同向的直轴分量，i_q为与转子磁链正交的交轴分量。点 A 对应转速 n_1，是电压极限椭圆与电流极限圆的交点，同时位于最大转矩电流比(MTPA)轨迹上，此时电机以最大恒定转矩运行，永磁体磁链(Ψ_m)处于饱和状态，反电动势与输入电压平衡，无需弱磁控制。当转速由 n_1增至 n_2时，定子电流矢量端点沿电流极限圆从点 A 移动至点 B，后者为最大转矩电压比(MTPV)轨迹与速度 n_2下电流极限圆的交点，标志着弱磁控制的启动；通过注入负直轴电流(i_d <0)削弱磁链以抵消反电动势的上升，从而在电压约束下扩展转速范围。随着转速进一步增至最大值 n_3，电流矢量端点沿最大转矩电压比(MTPV)轨迹由点 B 移动至点 C，此时直轴电流达到负向最大值，磁链被深度削弱，反电动势降至极限，但转矩输出显著受限。

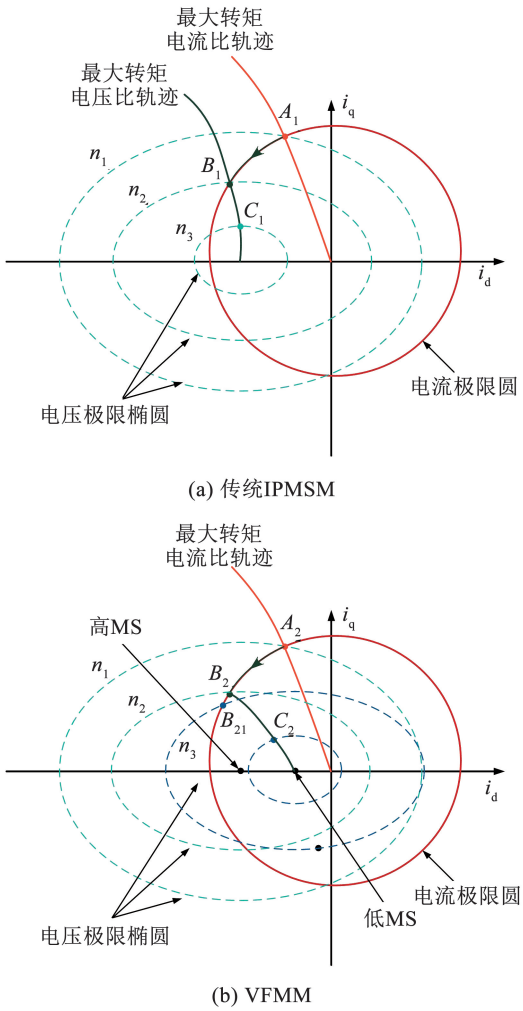


图 3　定子电流矢量轨迹

Fig. 3　Stator current vector trajectories

传统内置式永磁同步电机在不同转速下的电压极限椭圆呈现同心结构(图 3(a))，其弱磁能力取决于电压极限椭圆与电流极限圆的交互作用。相比之下，采用 LCF 永磁体的 VFMM 在高 MS 时，与传统 IPMSM 的电压极限椭圆特性一致，如图 3(b)所示。然而，当 LCF 永磁体处于低 MS 时，由于 Ψ_m的减少，电压极限椭圆的中心点向右移动，导致 MTPV 轨迹与电流极限圆的交点从 B_2点移动至 B_{21}点。这表明，VFMM 在低 MS 状态下，通过磁链的动态调节进一步增强了弱磁能力，其最大转速比(n_3/n_1)得以提升。通过电机结构参数设计与控制策略的协同，

有效提升了电机弱磁能力。

通过脉冲式磁化/退磁激励,使得 LCF 永磁的磁化状态发生改变,并且由于磁滞效应使其可以被“记忆”,从而实现对气隙磁通大小的灵活调节,使电压极限椭圆的圆心位置更趋近于电流极限圆,有效拓宽电机的运行速域。

1.3 磁路分析

如图 4 所示分别建立所提电机模型的 +100% MS 和 −100% MS 的等效磁路模型,分析其调磁性能。

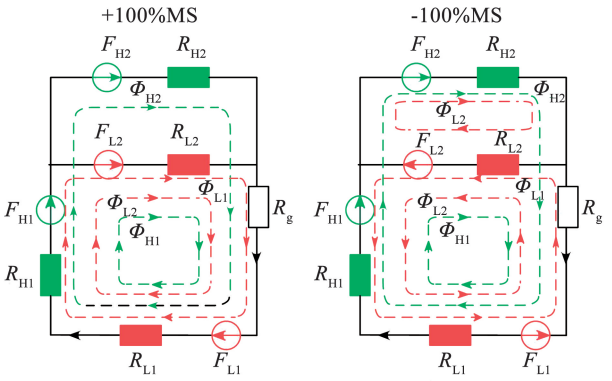


图 4 CPHMC-VFMM 等效磁路

Fig. 4 CPHMC-VFMM equivalent magnetic circuit

在两种 MS 下的空载峰值气隙磁通分别为:

$$\varphi_{g_100\%}=\frac{(F_{I2}+F_{L1}+F_{H1})(R_{I2}+R_{H2})}{R_{I2}^2+(R_{L1}+R_{H1}+R_{I2}+R_g)(R_{I2}+R_{H2})}-\frac{R_{I2}(F_{H2}-F_{I2})}{R_{I2}^2+(R_{L1}+R_{H1}+R_{I2}+R_g)(R_{I2}+R_{H2})} \tag{1}$$

$$\varphi_{g_-100\%}=\frac{(-F_{I2}-F_{L1}+F_{H1})(R_{I2}+R_{H2})}{R_{I2}^2+(R_{L1}+R_{H1}+R_{I2}+R_g)(R_{I2}+R_{H2})}-\frac{R_{I2}(F_{H2}+F_{I2})}{R_{I2}^2+(R_{L1}+R_{H1}+R_{I2}+R_g)(R_{I2}+R_{H2})} \tag{2}$$

式中:F_{H1} 和 F_{H2} 分别为位于不同位置的 HCF 永磁体所产生的等效磁动势;R_{H1} 和 R_{H2} 为其磁阻;F_{L1} 和 F_{L2} 分别为工作在不同位置的 LCF 永磁体所产生的等效磁动势;R_{L1} 和 R_{L2} 为其磁阻;R_g 为气隙磁阻。

结合式(1)与式(2),CPHMC-VFMM 的调磁性能 K_{FR} 可由 $\varphi_{g_100\%}$ 和 $\varphi_{g_-100\%}$ 比值表示为

$$K_{FR}=\frac{\varphi_{g_100\%}}{\varphi_{g_-100\%}}=\frac{(F_{I2}+F_{L1}+F_{H1})(R_{I2}+R_{H2})-R_{I2}(F_{H2}-F_{I2})}{(-F_{I2}-F_{L1}+F_{H1})(R_{I2}+R_{H2})-R_{I2}(F_{H2}+F_{I2})} \tag{3}$$

2 振动噪声原理

2.1 气隙磁通密度

通过磁动势−磁导法计算电机气隙磁密,首先分别推导电枢磁动势和永磁磁动势表达式;其次,计算在考虑定、转子电机开槽影响下的气隙磁导;最后,分别求解径向与切向气隙磁密分量。气隙磁通密度由电枢磁场与永磁磁场共同作用形成,且包含径向分量与切向分量。径向气隙磁密(B_r)和切向气隙磁密(B_t)分别表示为

$$\begin{cases}B_r=B_{ra}+B_{rp}\\B_t=B_{ta}+B_{tp}\end{cases} \tag{4}$$

式中:B_{ra}、B_{rp} 分别表示电枢磁场径向气隙磁密和永磁磁场径向气隙磁密;B_{ta}、B_{tp} 分别表示电枢磁场切向气隙磁密和永磁磁场切向气隙磁密。

电枢磁动势基于绕组函数法,并结合电枢绕组电流进行计算,其径向分量和切向分量分别为:

$$\begin{cases}F_{ra}=\sum_{v}^{\infty}F_v\cos(\omega t\pm vpa+\varphi)\\F_{ta}=\sum_{v}^{\infty}F_v\sin(\omega t\pm vpa+\varphi)\end{cases} \tag{5}$$

$$F_v=\frac{\sqrt[2]{2}}{v\pi}2qNk_{dv}k_{pv}I \tag{6}$$

式中:F_v 为 v 次电枢磁动势幅值;q 为每极每相槽数;N 为每槽导体数;k_{dv} 和 k_{pv} 分别为 v 次谐波定子绕组分布因数和节距因数;I 为线圈通入的电流;ω 为电流角频率;t 为时间;v 为磁动势谐波阶次,$v=6k\pm1$,k 为正整数;φ 为磁动势初相角;p 为极对数;a 为转子旋转机械角度。

忽略铁芯饱和,永磁体产生的永磁磁动势径向和切向分量分别为

$$\begin{cases}F_{rp}=\sum_{\mu}^{\infty}F_{r\mu}\cos\mu(pa-\omega t)\\F_{tp}=\sum_{\mu}^{\infty}F_{t\mu}\sin\mu(pa-\omega t)\end{cases} \tag{7}$$

式中:μ 为永磁磁动势谐波阶次;$F_{r\mu}$ 和 $F_{t\mu}$ 分别为 μ 次谐波径向与切向磁动势幅值;$\mu=2k-1$,k 为正整数。

考虑定、转子开槽和转子凸极影响下的气隙相对磁导表示为[18]:

$$\Lambda_g(\alpha,t)=\Lambda_0\lambda_g(\alpha,t) \tag{8}$$

$$\lambda_g(\alpha,t)=\lambda_{g1}(\alpha)\lambda_{g2}(\alpha,t) \tag{9}$$

$$\begin{cases}\lambda_{g1}(\alpha)=1+\sum_{k=1}^{\infty}A_k\cos(s_1k\alpha)\\\lambda_{g2}(\alpha,t)=1+\sum_{l=1}^{\infty}A_l\cos[s_2l(\alpha-\omega_1t)]\end{cases} \tag{10}$$

式中:λ_{g1}、λ_{g2} 分别为定、转子开槽引入的相对磁导函数;A_k、A_l 分别为开槽尺寸和气隙长度决定的气隙谐波相对磁导幅值;s_1 和 s_2 为导磁函数的空间周期系数;ω_1 为转子角频率;Λ_0 为气隙磁导率中常数分量;

α 为空间角，表示气隙圆周上的周向位置。

将式(5)、(7)和(10)带入式(11)中，即可分别得到径向和切向气隙磁密表达式

$$B(\alpha,t)=F(\alpha,t)\cdot\Lambda(\alpha,t) \tag{11}$$

2.2　电磁力波

电磁力波主要作用于定子齿部，具有明显的时空耦合特性，并随时间与空间发生周期性变化，其力的分量包括径向力与切向力。根据麦克斯韦应力张量法，径向和切向电磁力表示为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{r}}=\dfrac{B_{\mathrm{r}}^2-B_{\mathrm{t}}^2}{2\mu_0}\approx\dfrac{B_{\mathrm{r}}^2}{2\mu_0} \\ P_{\mathrm{t}}=\dfrac{B_{\mathrm{r}}B_{\mathrm{t}}}{\mu_0} \end{cases} \tag{12}$$

将式(11)带入式(12)中，得到的径向电磁力波由 6 部分组成，如表 2 所示。

$$P_{\mathrm{r}}(\alpha,t)=\frac{B_{\mathrm{r}}(\alpha,t)^2}{2\mu_0}=\frac{1}{2\mu_0}[F_{\mathrm{a}}(\alpha,t)+F_{\mathrm{p}}(\alpha,t)]^2\Lambda_{\mathrm{g}}(\alpha,t)^2 \tag{13}$$

表 2　径向电磁力分类

Tab. 2　Radial electromagnetic force classification

来源	空间阶次	频率
永磁磁场自身作用	$(\mu_1\pm\mu_2)p$	$(\mu_1\pm\mu_2)f$
永磁磁场与定子开槽相互作用	$(\mu_1\pm\mu_2)p\pm kz$ $(\mu_1\pm\mu_2)p\pm(k_1\pm k_2)z$	$(\mu_1\pm\mu_2)f$
永磁场与电枢磁场相互作用	$\mu p\pm v\alpha$	$(\mu\pm S_v)f$
永磁磁场、定子开槽与电枢磁场相互作用	$\mu p\pm v\alpha\pm kz$ $\mu p\pm v\alpha\pm(k_1\pm k_2)z$	$(\mu\pm S_v)f$
电枢磁场自身作用	$(v_1\pm v_2)\alpha$	$(S_{v1}\pm S_{v2})f$
电枢磁场与定子开槽相互作用	$(v_1\pm v_2)\alpha\pm kz$ $(v_1\pm v_2)\alpha(k_1\pm k_2)z$	$(S_{v1}\pm S_{v2})f$

2.3　定子模态

电机振动满足基本动力学方程

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{F}(t) \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；$\ddot{\boldsymbol{x}}$、$\dot{\boldsymbol{x}}$ 和 $\boldsymbol{x}$ 分别为加速度矢量、速度矢量和位移矢量；$\boldsymbol{F}(t)$ 为简谐激振力矢量，在无外部激励作用时，$\boldsymbol{F}(t)=0$。

将定子铁芯近似等效为一个圆环模型，求得定子铁芯 m 阶周向模态频率为

$$f_m=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_m}{M_m}} \tag{15}$$

式中 K_m 和 M_m 分别为定子系统的弹性模量和质量。

电机的各阶次模态频率为

$$\begin{cases} f_0=\dfrac{1}{\pi D_{\mathrm{c}}}\sqrt{\dfrac{E_{\mathrm{c}}}{\rho_{\mathrm{c}}k_i k_{\mathrm{md}}}} \\ f_1=\sqrt{\dfrac{6D_{\mathrm{c}}^2}{1+h_{\mathrm{c}}^2\dfrac{k_{\mathrm{mr}}}{k_{\mathrm{md}}}}}f_0 \\ f_{n\geqslant 2}=k_{\mathrm{a}}\dfrac{n^3-n}{\sqrt{n^2+1}}\cdot \\ \qquad\sqrt{1+\dfrac{h_{\mathrm{c}}^2(n^4-n^2)\left(4+\dfrac{k_{\mathrm{mr}}}{k_{\mathrm{md}}}\right)+\dfrac{3}{n^2}}{3(n^2+1)D_{\mathrm{c}}^2}}f_0 \\ k_{\mathrm{md}}=1+\dfrac{M_{\mathrm{t}}+M_{\mathrm{w}}+M_{\mathrm{i}}}{M_{\mathrm{c}}} \\ k_{\mathrm{mr}}=1+\dfrac{sc_{\mathrm{t}}L_{\mathrm{i}}h_{\mathrm{t}}^2}{\pi D_{\mathrm{c}}I_{\mathrm{c}}}\left(1+\dfrac{M_{\mathrm{w}}+M}{M_{\mathrm{t}}}\right)\cdot \\ \qquad(4h_{\mathrm{t}}^2+6h_{\mathrm{c}}h_{\mathrm{t}}+3h_{\mathrm{c}}^2) \\ I_{\mathrm{c}}=\dfrac{h_{\mathrm{c}}^2L_{\mathrm{i}}}{12} \end{cases} \tag{16}$$

式中：D_{c} 为定子平均直径，E_{c} 和 ρ_{c} 分别对应材料的弹性模量与密度特性；k_i 表征铁芯叠压工艺系数，k_{md} 为考虑位移场的等效质量系数。质量项包括绕组质量 M_{w} 及其绝缘材料质量 M_{i}，轭部质量 M_{c} 与齿部质量 M_{t}；s 为定子齿数，c_{t} 和 h_{t} 分别为定子齿宽和齿高，I_{c} 为以定子铁芯中心线为参考轴的转动惯量。k_{a} 为支撑系数。

2.4　电磁振动

电机振动的主要激励源包括径向电磁力及定子系统周向模态谐波。将电机外壳等效为一个单层圆环结构，在其受到径向电磁力作用时，第 m 阶周向模态的振幅 A_m 可表示为

$$A_m=\frac{F_m/M}{(f_m^2-f_r^2)^2+4\zeta_m^2f_m^2f_r^2} \tag{17}$$

式中：F_m 为第 m 阶力波幅值；M 为力波阶次；f_r 为 r 阶力波的振动频率；f_m 为 m 阶周向模态的固有频率；ζ_m 为 m 阶周向模态的阻尼比。

激振力作用产生的定子形变量

$$D_{\mathrm{s}}\approx\frac{F_m}{(M^2-1)^2}\left[1/\left(1-\left(\frac{f_r}{f_m}\right)^2\right)\right] \tag{18}$$

由式(18)可知，定子形变量与力波阶数的四次方成反比。因此，力波阶数越小，对电磁振动的影响越显著，为此将低阶径向电磁力波作为主要研究对象。

2.5　噪声分析

采用解析法对电机进行噪声分析，空气中电机定子辐射声功率表示为

$$W=\pi\rho cRL\omega_n^2Y_n^2I_0 \tag{19}$$

式中：I_0为相对声强辐射系数，ρ 为空气密度，c 为空气中声速，R 和 L 分别为电机定子的外半径和轴向长度，w_n为 n 阶振动角频率，Y_n为定子表面 n 阶振动形变。

假设定子质量分布均匀，并将定子视为无槽环型结构，此外，定子齿与绕组被等效为定子的附加质量，仅考虑定子轭部形变。计算可得 n 阶形变[19] Y_n为：

$$Y_0 = \frac{R_s R_y}{E h_y} P_0 \tag{20}$$

$$Y_{n=2} = \frac{12 R_s R_y^3}{E h_y^3 (m^2-1)^2} P_{n=2} \tag{21}$$

式中：R_s为定子轭内半径，R_y为定子轭平均半径，h_y为定子轭厚度，E 为定子铁芯弹性模量。

3 多 MS 协同分层优化

3.1 优化方案

为实现 CPHMC-VFMM 的全局最优性能，本文提出了如图 5 所示的结构参数分层优化设计流程。流程通过参数化建模、参数敏感度分析与多目标优化 3 个阶段实现。

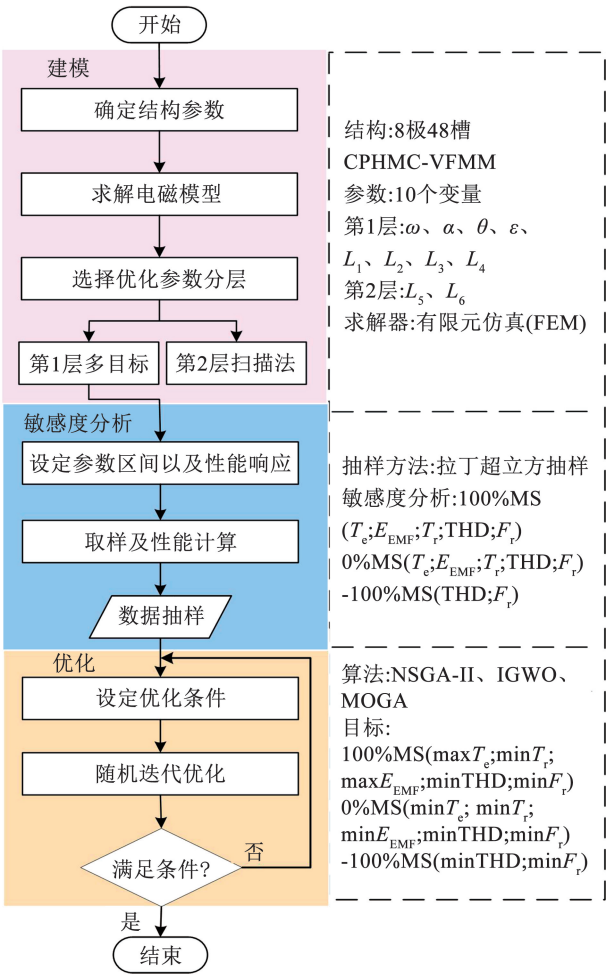


图 5 电机设计流程

Fig. 5 Motor design process

1）参数化建模

以 8 极 48 槽 CPHMC-VFMM 为研究对象，选取 10 个关键结构参数（第 1 层：ω、α、θ、ε、$L_1 \sim L_4$；第 2 层：L_5和 L_6）作为设计变量，建立变量间函数关系与参数交互模型。

2）参数敏感度分析

采用拉丁超立方抽样生成参数样本，确保各参数区间被均匀覆盖，减少抽样随机性对结果的影响，根据变量数量，在预设参数区间内抽取 720 个样本生成样本集，通过有限元仿真计算电磁转矩（T_e）、反电动势（E_{EMF}）、转矩脉动（T_r）、谐波畸变率（THD）及径向电磁力（F_r）等性能响应，量化变量对各指标的敏感性权重。

3）分层多目标优化

第 1 层：采用多目标优化算法（NSGA-II、MOIGWO、MOGA），以 T_e、T_r、E_{EMF}、THD 及 F_r 为目标，优化主设计参数；第 2 层：通过参数扫描法精细化调整参数（L_5和 L_6），确保全局最优解。

与仅采用 HCF 永磁体的传统永磁同步电机相比，VFMM 因其 LCF 永磁体的调磁能力，具备多磁化状态调控能力。故单磁化状态优化策略易导致调磁范围与负载转矩之间的矛盾。与此同时，定/转子拓扑的磁-力耦合特性以及不同拓扑参数之间的相互作用十分显著，传统单一的参数优化方法容易使优化目标最优解出现冲突，从而陷入局部最优解。因此，考虑到 VFMM 电机在多 MS 状态和多物理场作用下的复杂性，提出一种基于多 MS 协同分层的多目标优化方案。该方案首先选定优化参数，如图 6所示，进行电磁性能分析，并将多个参数进行分层处理。第 1 层采用多目标优化，第 2 层则采用基于第 1 层的优化结果，通过扫描法进一步优化。在第 1 层中，提出一种面向混合永磁记忆电机的多极端磁化状态分级优化方案。针对记忆电机在多种极端磁化状态下电磁性能的复杂耦合问题，创新性地引入敏感性主导的分阶优化策略，系统性地平衡转矩输出质量、反电动势波形正弦度以及振动噪声抑制需求，实施三阶段多物理场协同优化，具体如下。

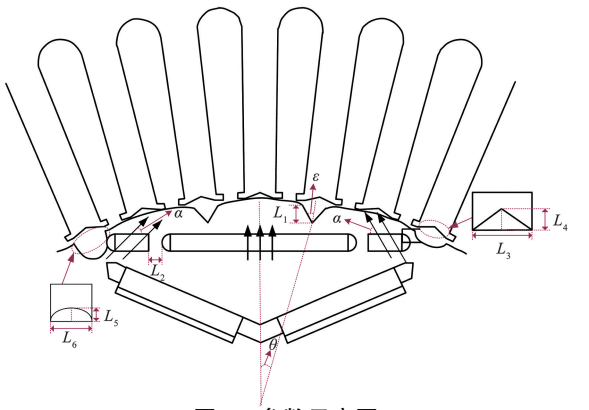


图 6 参数示意图

Fig. 6 Parameter diagram

1）基于图 7 的敏感度分布分析，敏感度数值越大代表参数对目标的影响权重越大，根据敏感度大小差异以及参数间相互作用将结构参数和目标分为 3 类：首先，以提升转矩综合性能为主要优化目标，其中“V 型”永磁体开口大小 ω，Halbach 充磁角度 α 以及“一型”永磁体间距 L_2 对两种磁化状态下的电磁转矩和转矩脉动敏感度均达到 30% 以上，ω 对 0% MS 的电磁转矩敏感度最大达到 38%，故将 ω、α 以及 L_2 作为初期优化阶段优化参数；其次，针对空载反电动势（back-EMF）特性展开优化，以增强电机运行的稳定性。相较于其他仍未优化变量，直轴槽所处位置 θ、扇形槽开口宽度 ε 对全 MS 的空载反电动势敏感度均达到 25% 以上，扇形槽深 L_1 仅在 100% MS 敏感度较小，但考虑 3 种参数的相互作用影响，因此将 θ、ε 以及 L_1 作为中期优化参数；最后，聚焦径向电磁力的抑制，旨在实现电机的减振降噪目标。剩余未优化变量中定子槽长 L_3 在全 MS 对径向电磁力敏感度均达到 35% 以上，100% MS 敏感度达到 40%，且考虑到定子槽长 L_3 以及定子槽深 L_4 的相互作用影响，将两者共同作为末期优化参数。

2）初期优化阶段以提升电磁转矩综合性能为核心目标，基于全局敏感性分析遴选转矩均值及转矩脉动在 100% MS 以及 0% MS 下的敏感性参数，结合 NSGA-Ⅱ算法求解高转矩密度–低转矩脉动协同优化解集。

3）中期优化阶段聚焦电机的空载特性，针对反电动势幅值与谐波畸变率之间存在冲突的敏感性参数，利用 Kriging 代理模型建立多项式响应面，以电机效率为约束条件，结合改进灰狼优化算法优选低 THD 下的最大化 100% MS 空载反电动势幅值以及最小化 0% MS 空载反电动势幅值方案，以实现最大的调速范围。

4）末期优化阶段面向 3 个典型极端磁势工况（–100% MS、0% MS、100% MS），采用 MOGA 算法，通过寻求最小径向电磁力幅值 F_r，最大程度地实现全工况下的最小振动噪声。

5）对筛选得到的解归一化并加权，以计算各个解综合评分，其中评分最高解作为最优解，计算公式为

$$S=\omega_1 A^*+\omega_2 B^*+\omega_3 C^*+\omega_4 D^*+\omega_5 E^*+\omega_6 F^* \tag{22}$$

式中：$A^*\sim F^*$ 为各个阶段优化目标的归一化后值，其中，T_e、E_{EMF} 最大值为 1，最小值为 0，T_r、THD 以及 F_r 最大值为 0，最小值为 1，$\omega_1\sim\omega_6$ 为加权系数。

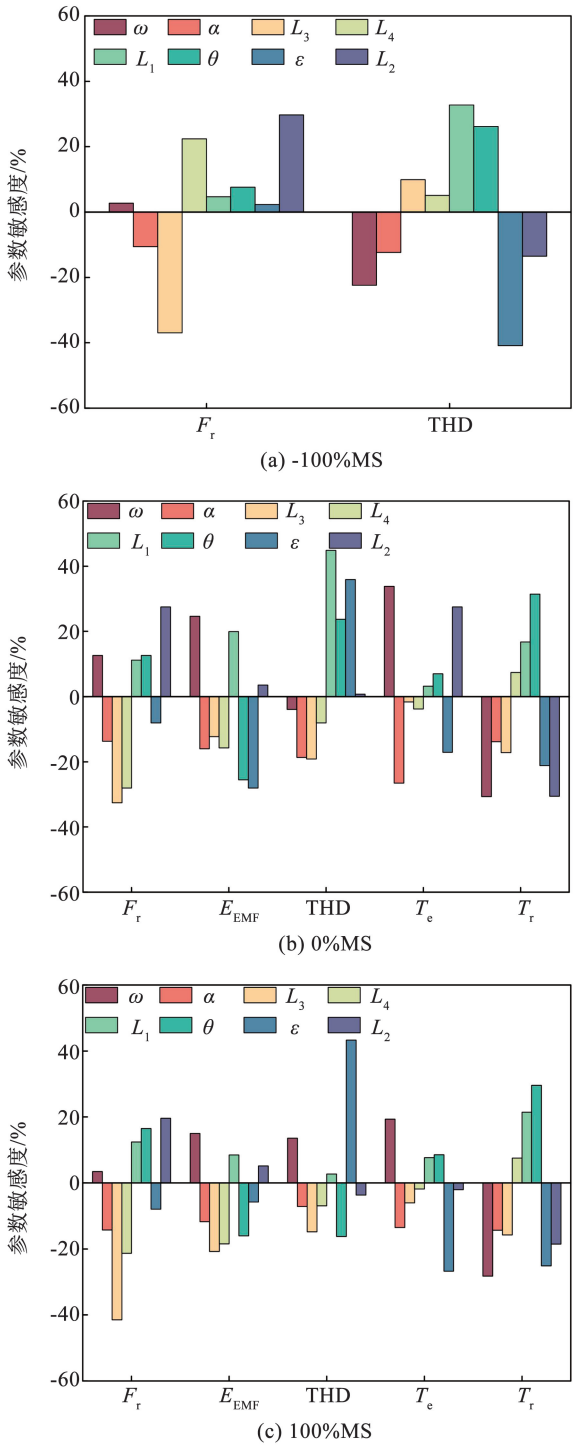


图 7　参数敏感度分析

Fig. 7　Parameter sensitivity analysis

3.2　改进灰狼优化算法

灰狼优化（grey wolf optimizer，GWO）算法是一种基于灰狼群体捕猎行为的群智能优化算法，其优化机制源于灰狼个体之间的协作与竞争关系，通过模拟灰狼在自然环境中追踪、包围及攻击猎物的过程来搜索问题的最优解。GWO 算法的核心流程涵盖灰狼社会等级划分、围捕猎物、攻击猎物以及搜寻猎物等多个环节，体现了自然界捕食策略在优化问题求解中的有效应用。

为克服 GWO 算法在种群多样性不足、开发与探索能力不平衡,以及过早收敛等问题,提出维度学习式狩猎(dimension-learning hunting,DLH)策略,该策略通过维度学习机制增强局部搜索和全局搜索之间的平衡性,使个体灰狼在狩猎过程中能够借助邻域个体的信息进行学习,从而提升算法的搜索能力并有效维持种群的多样性。

$$R_i(t) = \| \boldsymbol{X}_i(t) - \boldsymbol{X}_{i-\mathrm{GWO}}(t+1) \| \tag{23}$$

$$N_i(t) = \{ \boldsymbol{X}_j(t) \mid D_i(\boldsymbol{X}_i(t), \boldsymbol{X}_j(t)) \leqslant R_i(t), \boldsymbol{X}_j(t) \in \mathrm{Pop} \} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{X}_{i-\mathrm{DLH},d}(t+1) = \boldsymbol{X}_{i,d}(t) + \mathrm{rand} \cdot (\boldsymbol{X}_{n,d}(t) - \boldsymbol{X}_{r,d}(t)) \tag{25}$$

优先候选人通过比较 $\boldsymbol{X}_{i-\mathrm{GWO}}(t+1)$ 和 $\boldsymbol{X}_{i-\mathrm{DLH}}(t+1)$ 的适应度值来决定。

$$\boldsymbol{X}_i(t) = \begin{cases} \boldsymbol{X}_{i-\mathrm{GWO}}(t+1), f(\boldsymbol{X}_{i,\mathrm{GWO}}) < f(\boldsymbol{X}_{i-\mathrm{DLH}}) \\ \boldsymbol{X}_{i-\mathrm{DLH}}(t+1), \mathrm{else} \end{cases} \tag{26}$$

式中:$\boldsymbol{N}_i(t)$ 为 $\boldsymbol{X}_i(t)$ 的临近,$\boldsymbol{D}_i$ 为 $\boldsymbol{X}_i(t)$ 的欧式距离。

3.3 初期优化 M1 拓扑

以表 3 所列的转子结构参数为优化参数,包括“V 型”永磁体开口大小 ω,Halbach 充磁角度 α 以及“一型”永磁体间距 L_2。以 100% MS 和 0% MS 工况下最大转矩与最小转矩脉动为优化目标,采用 NSGA-Ⅱ算法进行多目标优化。

表 3 初期优化参数及取值范围

Tab. 3 Initial-stage design variables and corresponding ranges

参数取值边界	α/(°)	ω/(°)	L_2/mm
最小值	0	24.5	0
最大值	90	31.0	2

综合优化结果,选取开口尺寸 $\omega = 26.3°$、充磁角度 $\alpha = 82°$,以及永磁体间距 $L_2 = 1.5$ mm 作为最终优化结构参数。优化后负载特性如图 8 所示,可以看到:在 100% MS 工况下,电磁转矩 T_e 为 98 N·m,转矩脉动为 5%;在 0% MS 工况下,电磁转矩 T_e 为 49 N·m,转矩脉动为 6.4%。

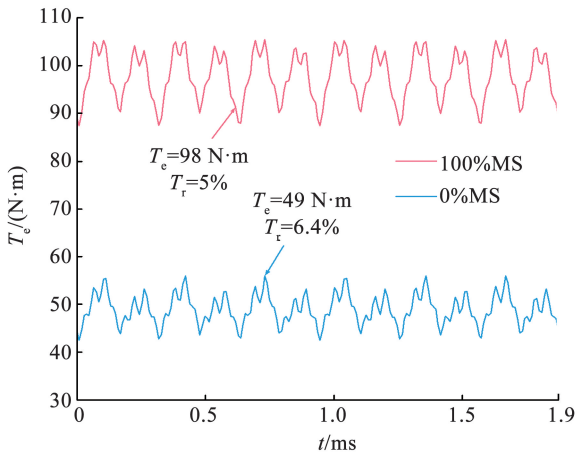


图 8 第 1 阶段转矩特性

Fig. 8 First stage Torque characteristics

3.4 中期优化 M2 拓扑

在 M1 型拓扑结构基础上,进一步在转子直轴附近引入扇形辅助槽结构,将直轴槽所处位置 θ、扇形槽开口宽度 ε 以及扇形槽深 L_1 设定为优化参数,参数取值范围见表 4,构建三工况优化矩阵:在 100% MS 状态下,最大 E_{EMF} 幅值与最小 THD 值;在 0% MS 状态下,最小 E_{EMF} 幅值与最小 THD 值;在 -100% MS状态下,最小 THD 值。该优化策略旨在实现最大调磁范围的同时,最大程度地保障电机在全工况下电磁性能的稳定性。

表 4 中期优化参数及取值范围

Tab. 4 Mid-stage design variables and corresponding ranges

参数取值边界	θ/(°)	ε/(°)	L_1/mm
最小值	0	0	0
最大值	7	10	2

综合优化结果,最终选取 θ 为 0.97°,ε 为 3.5°,L_1 为 0.60 mm 作为优化后的结构参数配置。空载反电动势优化结果如图 9 所示,可以看到:100% MS 下空载反电动势幅值为 273.4 V,总谐波畸变率为 9.5%;0% MS 下空载反电动势幅值为 146.2 V,THD 为 11.2%;-100% MS 下空载反电动势幅值为 4.8 V,THD 为 13.3%。转矩特性如图 10 所示,相较于第 1 阶段,通过第 2 阶段对空载反电动势 THD 值的优化,各 MS 下的转矩脉动均有所下降,但由于 d 轴附近引入辅助槽结构,导致电磁转矩同时也有所下降。100% MS 电磁转矩和转矩脉动分别下降至 92.9 N·m 和 2.7%,相较于优化前分别降低了 5% 和 46%。0% MS 电磁转矩与转矩脉动分别下降至 46.1 N·m 和 4.3%,分别降低了 6% 和 33%。上述结果表明,前两阶段的优化使得电机具有良好的电磁性能。

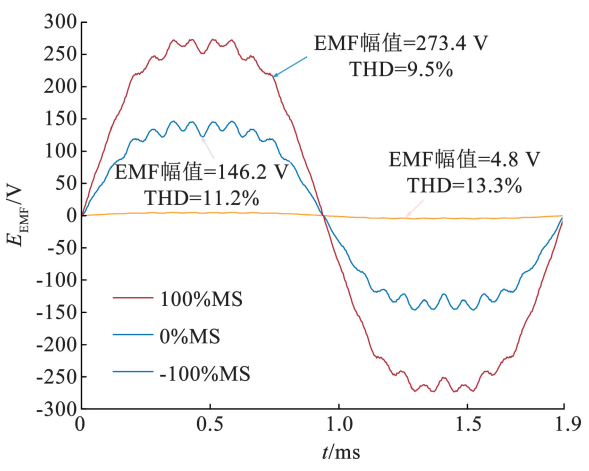


图 9 第 2 阶段空载反电动势

Fig. 9 Second stage no-load back EMF

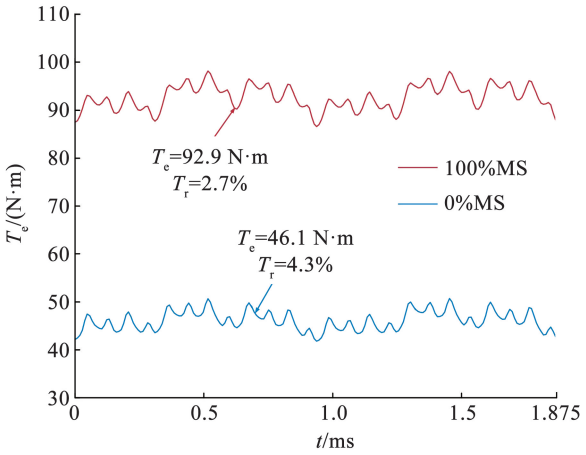


图 10　第 2 阶段转矩特性

Fig. 10　Second stage torque characteristics

3.5　末期优化 M3 拓扑

通过在电机定子齿部开设三角形辅助槽，并与转子槽配合，以实现 3 种磁化状态下的径向电磁力削弱。以 100% MS、0% MS 和 −100% MS 状态下的最小径向电磁力为优化目标，对定子槽长 L_3 以及定子槽深 L_4，寻求最优参数。参数取值范围见表 5。

表 5　末期优化参数及取值范围

Tab. 5　Final-stage design variables and corresponding ranges

参数取值边界	L_3/mm	L_4/mm
最小值	0	0
最大值	7	3.4

综合优化结果，最终选取 L_3 为 3.48 mm，L_4 为 0.78 mm 作为优化后的结构参数配置。径向电磁力优化结果如图 11 所示，100% MS 下径向电磁力幅值为 0.60 MPa；0% MS 下径向电磁力幅值为 0.57 MPa；−100% MS 下径向电磁力幅值为 0.54 MPa。

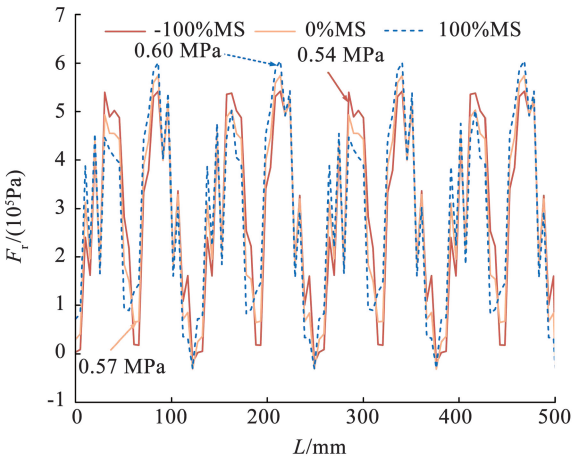


图 11　第 3 阶段径向电磁力

Fig. 11　Third stage radial electromagnetic force

图 12 为第 3 阶段转矩特性，可以看到，相较于第 2 阶段，第 3 阶段通过对径向电磁力的进一步优化，使各 MS 下的转矩脉动均得到不同程度抑制，但由于定子辅助槽的开设，电磁转矩亦出现一定下降。其中，100% MS 下的电磁转矩和转矩脉动分别降至 90.8 N·m 和 2.0%，较第 2 阶段分别下降 2.2% 和 35.0%；0% MS 下电磁转矩提高 6.2% 至 49.0 N·m，转矩脉动则下降18.0% 至 3.5%。综合来看，前 3 个阶段的优化在保持电机较优电磁性能的基础上，有效削弱了振动噪声的不利影响。

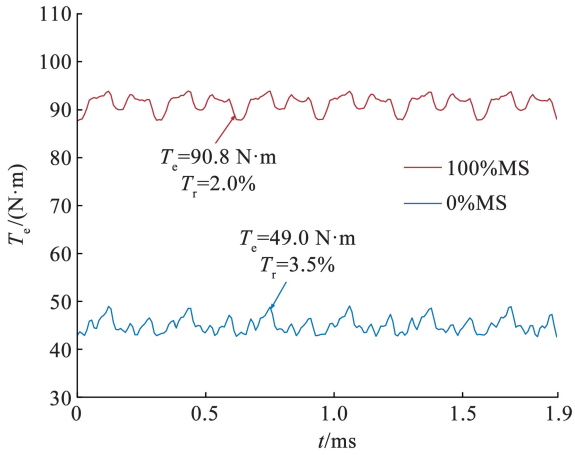


图 12　第 3 阶段转矩特性

Fig. 12　Third stage torque characteristics

3.6　多磁化状态协同优化结果

在完成第 1 层的 3 个多目标优化阶段后，对所提电机进一步进行第 2 层扫描法优化。图 13 展示了完成所有优化阶段后，各阶段的优化结果及最终电机拓扑结构的示意图。M1 结构完成电机转子永磁体布置及充磁优化；M2 结构在 M1 基础上，通过在转子 d 轴处开设辅助槽进行优化，旨在提升电机的电磁性能稳定性和调磁范围；M3 结构在 M2 基础上，确定定子辅助槽位置，以实现有效的减振降噪；M4 结构在多目标优化完成后进行第 2 层优化设计，于 q 轴方向布局椭圆形磁通调制槽，以进一步增强电机电磁性能和调磁范围。

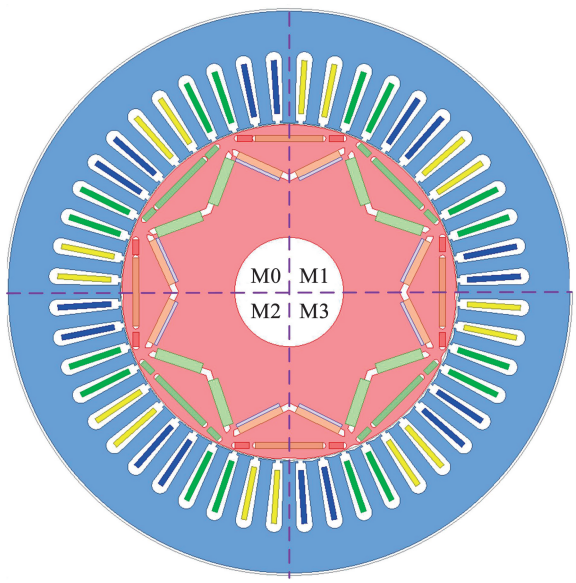


图 13　4 个阶段的电机拓扑结构

Fig. 13　Four-stages motor topology

各阶段在不同磁化状态下的电机性能见表 6 ~ 表 8。在 100% MS 下,M4 相较于 M0 电磁转矩基本保持不变,由 93.0 N·m 提高至 93.2 N·m,增幅约为 0.2%;转矩脉动降低 68.8%,空载反电动势下降 19.3%,空载反电动势 THD 值下降 61.3%,径向电磁力下降 23.5%。电机在极端增磁工况下仍具有良好的电磁性能和抗振噪能力。在 0% MS 下,电磁转矩由 44.0 N·m 提高至 45.3 N·m,增幅约为 3.0%;转矩脉动降低 61.5%,空载反电动势下降 11.4%,空载反电动势 THD 值下降 62.9%,径向电磁力下降 24.1%,表明电机在去磁工况下仍能够保持良好的综合性能。在 -100% MS 下,电机空载反电动势 THD 值下降 94.9%,径向电磁力幅值下降 29.1%;当电机中 LCF 永磁体因电枢电流过大而出现退磁问题时,电机依然能够维持稳定运行状态。

表 6 -100%MS 优化结果

Tab. 6 -100% MS optimization results

结构	空载反电动势 THD/%	径向电磁力/MPa
M0	227.0	0.86
M1	27.0	0.80
M2	13.3	0.81
M3	8.5	0.54
M4	11.5	0.61

表 7 0%MS 优化结果

Tab. 7 0% MS optimization results

结构	空载反电动势/V	转矩脉动/%	电磁转矩/(N·m)	空载反电动势 THD/%	径向电磁力/MPa
M0	141.0	26.0	44.0	24.0	0.83
M1	154.0	7.0	47.0	23.0	0.77
M2	146.2	4.3	46.1	11.2	0.79
M3	125.6	3.5	49.0	8.2	0.57
M4	124.9	10.0	45.3	8.9	0.63

表 8 100%MS 优化结果

Tab. 8 100% MS optimization results

结构	空载反电动势/V	转矩脉动/%	电磁转矩/(N·m)	空载反电动势 THD/%	径向电磁力/MPa
M0	300.0	16.0	93.0	23.0	0.85
M1	288.0	5.3	96.0	20.0	0.79
M2	273.4	2.7	92.9	9.5	0.75
M3	230.0	2.0	90.8	8.0	0.60
M4	242.0	5.0	93.2	8.9	0.65

4 电磁特性分析

为便于分析所提电机电磁特性,定义电机能够实现的最大正向磁化状态为 MS1,最大反向磁化状态为 MS2。分别分析电机处于两种极端磁化状态下的负载、空载性能。

4.1 空载特性

图 14 展示了电机在不同磁化状态下的空载磁场分布。相较于 MS1 工况,MS2 工况下的气隙磁密由 0.50 T 降低至 0.22 T,说明永磁体耦合进入气隙的有效磁通显著减小。MS2 工况能够有效降低电机的空载励磁强度与反电动势水平,因此更有利于实现宽速域运行。此外,两种极端 MS 下,电机的空载反电动势如图 15 所示,电机的调磁范围为 2.2,具有较大的宽速域运行范围。

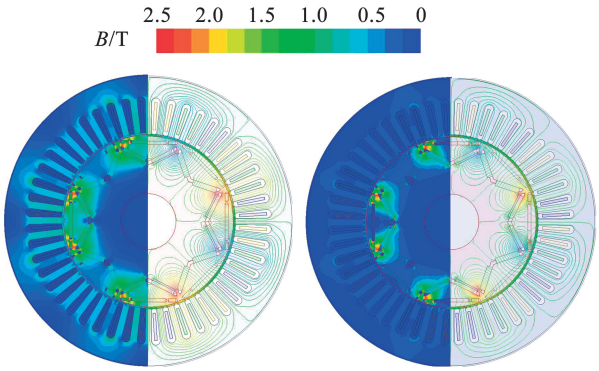


图 14 MS1 和 MS2 工况下的空载磁场分布

Fig. 14 No-load magnetic field distributions under MS1 and MS2

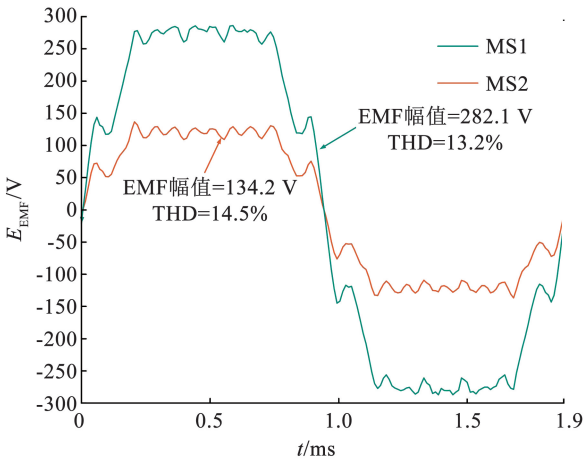


图 15 MS1 和 MS2 下的空载反电动势

Fig. 15 No-load EMF under MS1 and MS2

4.2 负载特性

在 MS1 下,图 16 显示了电机在额定电流下的转矩特性,可以看到,通过在电机 q 轴开辅助槽,提升了转子凸极比,提高磁阻转矩,从而补偿因在转子 d 轴处开槽造成的电磁转矩损失,且扩展弱磁范围,所提电机最大转矩对应的功角约为 30°。从图 17 可以看出,在最大功角处电机的稳态电磁转矩为 99.5 N·m,说明所提电机在实现较大转矩范围的同时,仍能够保持较好的转矩密度。

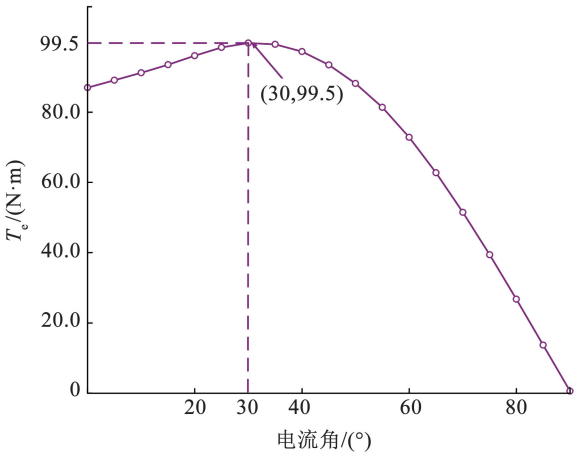


图 16　功角特性

Fig. 16　Power angle characteristics

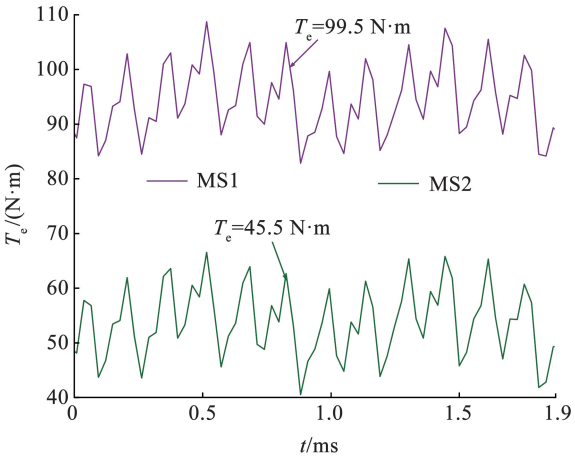


图 17　MS1 和 MS2 下的电磁转矩

Fig. 17　Electromagnetic torque under MS1 and MS2

选取调磁范围、转矩脉动以及转矩密度作为评价指标，分别与交替极混合永磁体记忆电机（CPHM-VFMM）[20]、双可变磁通记忆电机（D-VFMM）[21]以及双层永磁记忆电机（DLPM-VFMM）[6]进行对比分析，对比结果如表 9 所示。分析表 9 可得，本文所提出的 CPHMC-VFMM 具有更宽的调磁范围。相较于同类型交替极结构的 CPHM-VFMM，其调磁范围提升了 15.8%；相较于交替极 D-VFMM 和 DLPM-VFMM，分别提升了 15.8% 和 21.5%。在转矩性能方面，相较于同类型的 CPHM-VFMM，本文所提电机的转矩密度提升了 4.8 倍；此外，与 D-VFMM 相比提升了 11.4%，与 DLPM-VFMM 相比提升了 23.6%。交替极电机因其结构特性导致气隙磁密分布存在一定程度的非对称性，因而相较于 D-VFMM（2.15%）及 DLPM-VFMM（4.45%）转矩脉动略大，但相较于 CPHM-VFMM（37.9%）下降了 83.1%。综上，本文所提出的 CPHMC-VFMM 结构，在保证具有良好调磁范围和转矩密度的同时，进一步抑制了交替极电机引起的转矩脉动过大的问题。

表 9　不同拓扑结构对比

Tab. 9　Comparison of different topological structures

拓扑结构	增（去）磁 T_e/（N·m）	稳态转矩脉动/%	转矩密度/（kN·m·m^{-3}）	调磁范围
CPHM-VFMM	1.06（0.55）	37.90	2.85	1.90
D-VFMM	7.97（4.18）	2.15	12.40	1.90
DLPM-VFMM	7.19	4.45	11.18	1.81
CPHMC-VFMM	99.50（45.20）	6.42	13.82	2.20

5　多物理场分析

针对电机振动噪声特性研究，建立如图 18 所示的电磁-机械-声学多物理场耦合数值模型，并在此基础上分析通过多目标迭代优化后电机的振动噪声性能指标。首先采用时空二维傅里叶分解方法提取径向力波的时空耦合特性，通过场路联合求解实现电磁激励向定子齿部结构边界的能量加载。随后，基于模态叠加原理，获取整机振动频谱后，并进一步构建声学边界积分模型，以预测噪声能量的传播。最终，通过多目标优化方法获得振动噪声参数的全局最优解集。

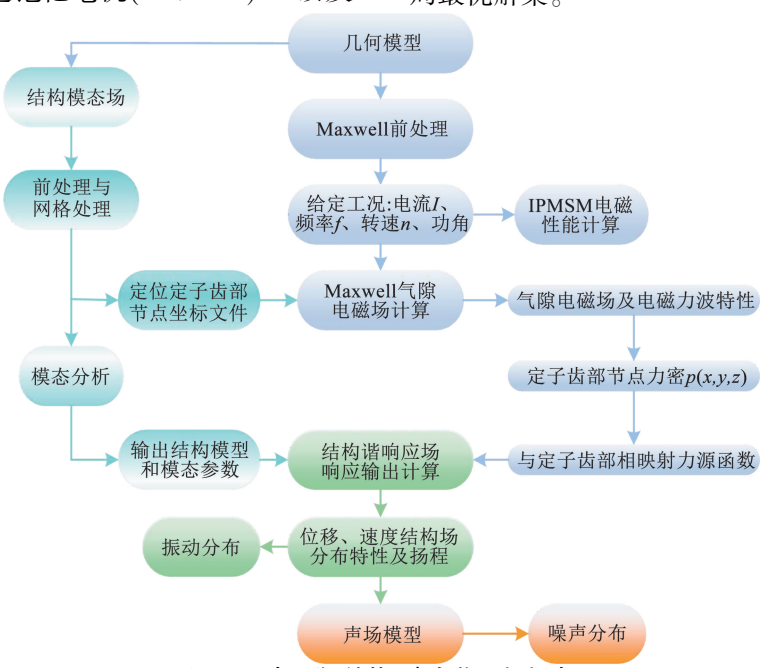


图 18　电-磁-结构-声多物理场耦合

Fig. 18　Electro-magnetic-structural-acoustic multi-physical field coupling

5.1 定子模态分析

通过建立定子结构在自由边界条件下模态分析模型(见表 10),提取其固有频率谱特征。随后,对电机进行振动频谱仿真分析,得到不同频率下定子振幅的变化,结果如图 19 所示,在 2 倍频时,振动主要由 8 阶径向电磁力 $F_r(8,2)$ 引起,振幅处于中低水平。当处于 4 倍频时,16 阶径向电磁力 $F_r(16,4)$ 成为主导振源,振幅显著升高。随着基频倍数进一步提升至 8 倍频以及 10 倍频,24 阶以及高阶次径向电磁力主导振动,振幅显著减小。这表明,低阶电磁力是引起电机振动的主要原因。由图 19 波形峰值可知,振幅较大的频率分别为 1 066.67、2 133.33、4 266.67和 5 333.33 Hz。将上述频率与电机各阶模态频率对比,两者均未发生重合。由于结构共振的产生条件为激励频率与模态频率相近或相等,而本文电机的主要激励频率均远离各阶模态频率,故可判定该电机结构设计合理,运行过程中不会产生共振现象。

表 10 定子总成各阶次固有频率

Tab. 10 Stator assembly inherent frequency of each order

阶次	频率/Hz	模态
2 阶	627.2	
3 阶	1 644.7	
4 阶	2 811.1	
0 阶	4 823.9	

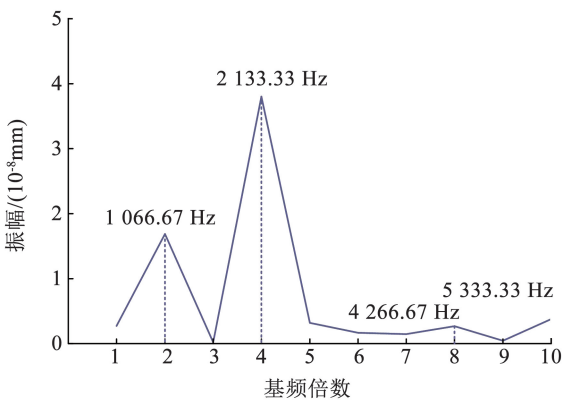


图 19 定子振动幅值

Fig. 19 Stator vibration amplitude

5.2 电机振动分析

径向电磁力的傅里叶分解结果如图 20 所示。尽管零阶时间分量呈现出显著的幅值特征,但因系统对直流力无谐响应,故 0 Hz 频率特性无法激发有效振动。主导激励由空间 0/8/16 阶模态与 2/4 次时间谐波构成,该参数组合形成主要振动激励源。

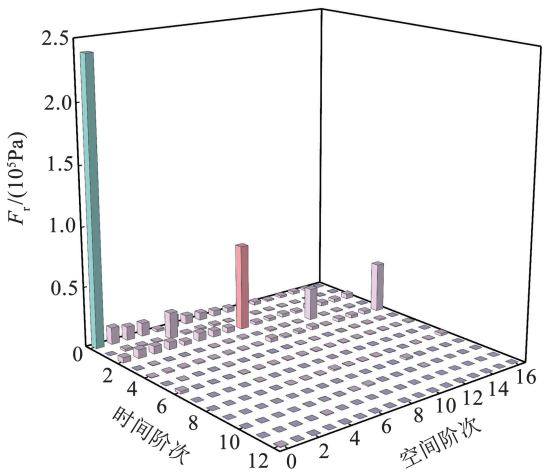


图 20 径向电磁力傅里叶分解

Fig. 20 Fourier decomposition of radial electromagnetic force

建立电机电磁–结构谐响应–声多物理场耦合数值计算有限元模型。在 2D 电磁场仿真模型中,得到电机各个齿部随时间变化的电磁力后,将其作为振动分析的激励映射至 3D 结构谐响应场模型中。在结构谐响应场中,利用模态叠加法对 CPHMC-VFMM 定子齿部振动谐响应特性进行计算,图 21 展示了优化前后电机振动加速度频谱的对比曲线。

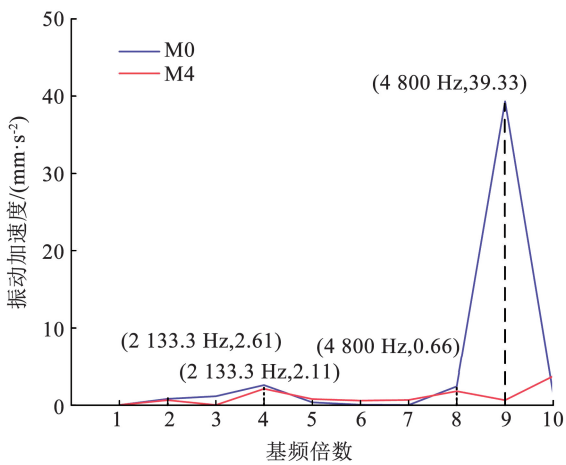


图 21 机壳振动加速度

Fig. 21 Vibration acceleration of motor casing

由图 21 可以看到,M4 电机结构在 2、4、8 及 10 倍频处振动加速度较大,振动加速度与振动幅值趋势相同。通过对比 M0 与优化后 M4 在不同频段的振动加速度,揭示了电磁力阶次与振动抑制的内在关

系。在 2 倍频时，M4 电机振动加速度由 M0 的 0.82 mm/s^{2}降至 0.65 mm/s^2，降幅达 20.7%；在 4 倍频时，M4 电机振动加速度由 M0 的 2.61 mm/s^2 降至 2.11 mm/s^2，降幅达 19.2%；在9 倍频时，M4 电机振动加速度由 39.33 mm/s^2 大幅降至 0.66 mm/s^2，降幅高达 98.3%。分析表明，优化后电机可实现全频段振动抑制。

5.3　噪声分析

建立直径为 1 m 的圆柱体声场求解域，其中圆柱体外圆采用辐射边界条件，而内圆与电机外壳接触。将 CPHMC-VFMM 定子振动加速度加载至求解域边界上，进行 CPHMC-VFMM 声场计算，结果如图 22所示，可以看到 M4 电机的噪声声压级传递明显小于 M0，两者的噪声平均值分别为 37.7、50.5 dB，下降了 25%，说明优化后的电机结构可实现降低噪声的目的。

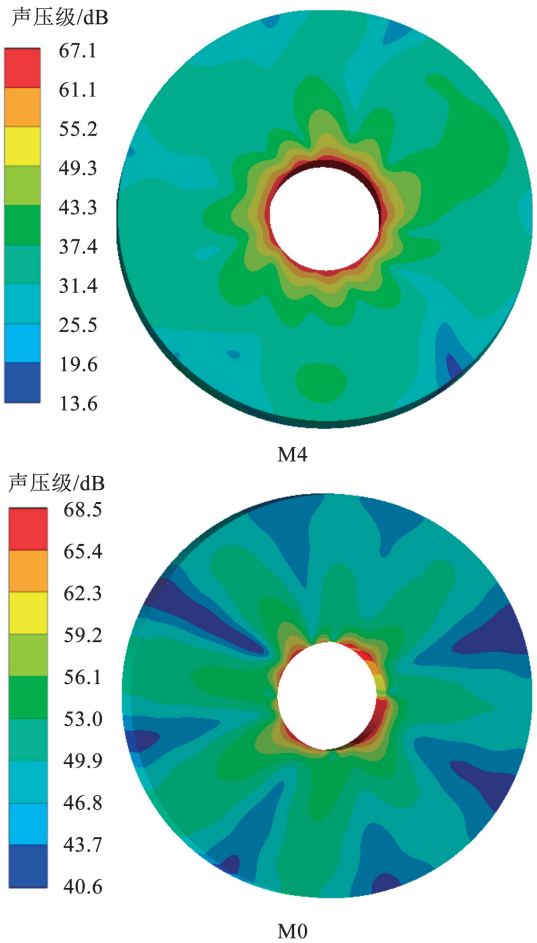


图 22　声压级对比

Fig. 22　Comparison of sound pressure level

6　结　论

1）本文提出了一种交替极混合磁路永磁同步记忆电机拓扑结构，并采用多极端磁化状态分级优化方案进行协同优化。与初始结构相比，所提结构在低转速增磁状态与高速去磁状态下均能够保持稳定转矩输出，电磁转矩分别提高 0.2% 和 3.0%；转矩脉动分别降低 68.8% 和 61.5%；空载反电动势分别下降 19.3% 和 11.4%；空载反电动势 THD 值分别下降 61.3% 和 62.9%。在电枢电流过大导致 LCF 永磁体退磁的工况下，电机空载反电动势 THD 值下降 94.9%，仍能够保持稳定运行。

2）所提出的 CPHMC-VFMM 与初始结构进行对比，3 种磁化状态下，径向电磁力幅值分别下降 31%、31%、37%。在 9 倍频处，振动加速度降低达到 98.3%。噪声声压级平均值下降至 37.7 dB，下降了 25%，实现了良好的减振降噪效果。

3）在保证基础电磁性能的前提下，通过分阶段多目标优化，实现了 2.2 倍的调磁范围，并展现出良好的抗 LCF 永磁体退磁能力。

所提出的多磁化状态分级优化方案，针对不同优化目标，采用 3 种多目标优化算法，可以广泛应用于各类记忆电机结构，提高记忆电机优化效率。

参考文献

[1] RASTOGI S K, SANKAR A, MANGLIK K, et al. Toward the vision of all electric vehicles in a decade[energy and security][J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2019, 8(2): 103. DOI:10.1109/MCE.2018.2880848

[2] 樊英，陈秋蒴，陈俊磊，等. 基于无人配送车辆运行工况的交替极游标轮毂电机优化设计[J]. 电工技术学报，2023，38(19)：5141
FAN Ying, CHEN Qiushuo, CHEN Junlei, et al. Optimal design of consequent-pole vernier hub motor based on unmanned delivery vehicle operating conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5141. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230335

[3] 甘醇，曲荣海，石昊晨，等. 宽调速永磁同步电机全域高效运行控制策略综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(7)：2496
GAN Chun, QU Ronghai, SHI Haochen, et al. A review of global high-efficiency control strategies for permanent magnet synchronous motors with wide speed regulation range[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2496. DOI: 10.13334/j.02588013.pcsee.222103

[4] OSTOVIC V. Memory motors[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2003, 9(1): 52. DOI:10.1109/MIA.2003.1176459

[5] WEI Qiang, ZHU Z Q, JIA Yan, et al. Electromagnetic performance analysis of variable flux memory machines with series-magnetic-circuit and different rotor topologies[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2024, 8(1): 3. DOI: 10.30941/CESTEMS.2024.00012

[6] 阳辉，王逸贤，郑昊，等. 新型双层串联混合永磁记忆电机设计优化与特性分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(24)：9042
YANG Hui, WANG Yixian, ZHENG Hao, et al. Design optimization and characteristic analysis of novel dual-layer series hybrid permanent magnet memory motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 9042. DOI: 10.13334/j.0258-8013.

pcsee.211841

[7]董婷, 曹磊, 王雪. 宽高效率区混合永磁同步磁阻记忆电机设计[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(5): 28
DONG Ting, CAO Lei, WANG Xue. Design of hybrid permanent magnet synchronous reluctance memory motor with wide high-efficiency region[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(5): 28. DOI:10.15938/j.emc.2023.05.004

[8]HU Yusheng, CHEN Bin, XIAO Yong, et al. Research and design on reducing the difficulty of magnetization of a hybrid permanent magnet memory motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1421. DOI:10.1109/TEC.2020.2989530

[9]YANG Hu, LYU Shukang, LIN Heyun, et al. A novel hybrid-magnetic circuit variable flux memory machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5258. DOI: 10.1109/TIE.2019.2931494

[10]ZHAO Xifang, LIN Heyun, ZHONG Yuxiang, et al. A novel hybrid-magnetic-circuit memory machine with variable-leakage-flux capability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(12): 15543. DOI:10.1109/TIE.2024.3401202

[11]ZHU Shengdao, ZHAO Wenxiang, JI Jinghua, et al. Generation mechanism and suppression measure of electromagnetic vibration in permanent magnet synchronous machine: A review [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(4): 9513. DOI:10.1109/TTE.2024.3360988

[12]赵文良, 王笔谈, 刁成武, 等. 永磁电机电磁振动分析与削弱方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 3214
ZHAO Wenliang, WANG Bitan, DIAO Chengwu, et al. Review of electromagnetic vibration analysis and mitigation methods for permanent magnet motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 3214. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.232816

[13]任杰. 变频器供电永磁同步电动机电磁-机械共振的研究[D]. 济南: 山东大学, 2022
REN Jie. Research on electromagnetic-mechanical resonance of inverter-fed permanent magnet synchronous motors[D]. Jinan: Shandong University, 2022

[14]CHEN Bin, XIAO Yong, SHI Jinfei, et al. Radial force characteristics of a consequent-pole permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(6): 6664. DOI:10.1109/TIA.2023.3302840

[15]LIANG Wenyi, WANG Jianfeng, LUK P C K. Analytical study of stator tooth modulation on electromagnetic radial force in permanent magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 11731. DOI:10.1109/TIE.2020.3029462

[16]王晨, 黄健, 江明, 等. 聚磁式永磁轮毂电机多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 1173
WANG Chen, HUANG Jian, JIANG Ming, et al. Multi-objective optimization design of flux-concentrating permanent magnet hub motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1173. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.223442

[17]高建宁, 徐炜, 王激尧, 等. 考虑振动噪声抑制的Halbach内置式永磁同步电机拓扑协同优化设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(S1): 37
GAO Jianning, XU Wei, WANG Jiyao, et al. Topology collaborative optimization design of Halbach interior permanent magnet synchronous motor considering vibration and noise suppression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(S1): 37. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L11031

[18]高锋阳, 岳文瀚, 高建宁, 等. 内置U型永磁电机电磁优化及振动噪声抑制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(4): 71
GAO Fengyang, YUE Wenhan, GAO Jianning, et al. Electromagnetic optimization and vibration noise suppression of interior U-shaped permanent magnet motor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(4): 71. DOI:10.11918/202309051

[19]WANG Shanming, HONG Jianfeng, SUN Yuguang, et al. Analysis of zeroth-mode slot frequency vibration of integer slot permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2954. DOI: 10.1109/TIE.2019.2910046

[20]TU Rui, YANG Hui, LIN Heyun, et al. Design and optimization of a novel delta-type consequent-pole hybrid magnet memory machine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(2): 1265. DOI:10.1109/TEC.2023.3341859

[21]ZENG Xianxian, LIN Heyun, ZHONG Yuxiang, et al. Design concept and performance analysis of dual-variable flux memory machines for traction drive [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(1): 2171. DOI: 10.1109/TTE.2024.3417693

(编辑 吕雪梅)

DOI:10.11918/202504085

隐私增强的安全联邦入侵检测方法

金志刚[1],丁 禹[1],武晓栋[2,3],陈旭阳[1]

(1.天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072;2.内蒙古工业大学 新能源学院,内蒙古 鄂尔多斯 017010;
3.内蒙古自治区新能源与储能技术重点实验室,呼和浩特 010051)

摘 要:入侵检测系统(intrusion detection system,IDS)面临着生成式模型逆向攻击的安全考验,而对于联邦式IDS,联邦GAN(generated adversarial network)攻击是其极为典型的数据安全威胁。为提升联邦式IDS的数据隐私安全,本研究提出通用的隐私增强的安全联邦入侵检测方法(privacy-enhanced federated intrusion detection,PEFID),并在多样化的攻防对抗仿真中验证其性能。PEFID从特征层面和模型层面共同增强数据隐私。在特征层面,提出改进的自适应隐私增强模块调整表征学习的泛化程度,权衡隐私保护与任务学习。此外,向中间层隐变量注入可控扰动,进一步弱化梯度的可追踪性。在模型层面,提出结合预测置信度的标签平滑策略以应对标签反转。各节点可根据预测置信度个性化调整软标签值,赋予受害者数据更加宽容的软标签值以阻止攻击深入。CICIDS2018和UNSW-NB15数据集上的验证实验表明:在多种网络场景中,PEFID均可有效防御联邦GAN攻击;与其他防御方案相比,PEFID能够在可控的时间复杂度下实现隐私与性能间的平衡;即使在单点防御失效时,PEFID仍能够保持优秀的防御效用。本文所提方法兼具通用性与轻量化,可适配于现有的联邦式入侵检测系统,以极小的性能代价显著增强数据隐私。

关键词:入侵检测系统;联邦学习;深度学习;模型逆向攻击;隐私保护
中图分类号:TP393.08 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0025-08

A privacy-enhanced secure federated intrusion detection method

JIN Zhigang[1], DING Yu[1], WU Xiaodong[2,3], CHEN Xuyang[1]

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Renewable Energy, Inner Mongolia University of Technology, Ordos 017010, China;
3. Inner Mongolia Key Laboratory of New Energy and Energy Storage Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Intrusion detection systems (IDS) face security challenges of generative model inversion attacks. And Federated GAN Attacks are the particularly characteristic data security threat to federated IDS. To improve data privacy in federated IDS, a universal privacy-enhanced federated intrusion detection (PEFID) method is proposed and is validated in diverse attack-defense simulation scenarios. PEFID jointly enhances data privacy at both the feature level and the model level. From the feature level, an improved adaptive privacy enhancing module is proposed to adaptively adjust the regularization degree of representation learning to balance privacy protection and task learning. Besides, controllable perturbations are injected into the hidden variables to further degrade the traceability of the gradient. From the model level, a label smoothing strategy combined with prediction confidence is proposed to deal with label inversion. Each client can individually adjust the soft label value according to the prediction confidence, assigning victim data a more lenient soft label value to mitigate the consistent attack. Experimental results on the CICIDS2018 and UNSW-NB15 datasets show that PEFID can effectively resist federated GAN attacks in various network scenarios. Compared with other methods, PEFID can better balance privacy and performance with controllable time complexity. It can still maintain superior defensive efficacy even in the case of single point penetration. The proposed method is both universal and lightweight, which can be adapted to existing federated IDS to significantly enhance data privacy with minimal performance cost.

Keywords: intrusion detection system; federated learning; deep learning; model inversion attack; privacy protection

“数字中国”战略的推进使得网络设备与网络数据爆发式增长,愈加猛烈的网络攻击也随之发生。入侵检测系统(intrusion detection system, IDS)可以实时监测和分析网络流量,识别潜在的攻击行为并

收稿日期:2025-04-30;**录用日期**:2025-06-04;**网络首发日期**:2025-07-24
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250723.1553.002
基金项目:国家自然科学基金(52471364)
作者简介:金志刚(1972—),男,教授,博士生导师
通信作者:金志刚,zgjin@tju.edu.cn

及时响应应急措施[1],是现代网络防御的重要一环。融合深度学习(deep learning,DL)的DL-IDS具有更强的特征捕捉与识别能力,极大提升了检测性能和检测速度[2]。在此基础上,联邦学习(federated learning,FL)[3]有效解决了DL-IDS的训练数据稀缺问题,进一步拓展了其应用前景。目前,以基于FL的DL-IDS为范式的协同入侵检测系统广泛应用于工业物联网[4]、车联网[5]等分布式网络,以提升其整体安全防护能力。

作为安全网关,IDS是流量必经之处,持有丰富的数据信息。因此,越来越多的网络攻击将矛头直指IDS本身,以窃取其拥有的数据隐私信息[6]。虽然FL-IDS避免了数据传输导致的直接泄露风险,但隐含在模型梯度中的数据信息仍有被敌手利用的可能。模型逆向攻击(model inversion attack,MIA)[7]便可通过窃取模型参数或联邦通信中的梯度信息逆向推理训练数据,不断优化拟造样本以重构目标数据[8]。其中,攻击性更强大的生成式模型逆向(generative model inversion,GMI)攻击[9]无需预训练就可以重构出更加准确的拟造样本。Hitaj等[10]提出的联邦GAN攻击(federated GAN attacks)是针对联邦学习的一类典型GMI攻击,其攻击者伪装成一个正常客户端加入联邦学习,在不用付出任何代价的条件下便能在本地重构目标数据。随着联邦学习的进行,其重构样本便能持续提升对于目标样本的拟合能力。

联邦GAN攻击是基于深度学习的FL-IDS面临的深度隐私推理攻击,然而目前的防御方案对IDS的安全需求与联邦GAN攻击的内在特征考量不足。首先,隐私、性能与效率间的矛盾是隐私保护的核心问题,有全时、实时、精确响应需求的IDS尤其重视其三元平衡。然而,目前的防御方案无法完全适配安全联邦IDS的设计需求。多数研究聚焦于GMI防御中的安全多方计算[11]、同态加密[12]和差分隐私(differential privacy,DP)[13]等技术。安全多方计算涉及由物理层至应用层的一系列安全协议,安全成本巨大,其在FL-IDS中的应用缺乏可行性;同态加密虽能提供优秀的隐私保护,但其复杂的加解密机制同样会带来大量的计算开销,对于时间敏感的IDS并不可行;组级DP[14]通过对梯度或模型加噪提升隐私,但以严重的性能受损为代价,需严格控制隐私预算。例如,高媛等[15]提出一种差分隐私联邦方法DP-FLAGD,结合本地视角与全局视角自适应分配隐私运算以提升系统性能。

其次,联邦GAN攻击有其独有特点,简单的泛化训练防御能力有限。虽然泛化训练控制是直接且有效的对抗MIA的手段[16],但联邦GAN攻击可通过独有的标签反转机制加剧受害者的本地过拟合,削弱其隐私保护。Scheliga等[17]设计了一个通用的隐私增强模块(privacy enhancing module,PRECODE),利用信息瓶颈的思路筛除数据的冗余特征,保留核心特征。在计算机视觉领域,Luo等[18]基于生成对抗网络(generative adversarial networks,GANs)重构训练图像,在保留分类特征的同时模糊视觉特征,有效减弱MIA的攻击性。马睿[19]提出一种基于小样本扩充的联邦学习数据保护方案,利用对抗训练的思路增强IDS的泛化能力。Struppek等[20]发现负标签样本平滑可有效防御基于样本优化的MIA,拓展了标签平滑的应用思路。

综上,为提升现有FL-IDS对于联邦GAN攻击的鲁棒性,本文提出隐私增强的安全联邦入侵检测方法(privacy-enhanced federated intrusion detection,PEFID),分别从数据特征层面与网络模型层面增强入侵检测系统隐私,避免敏感信息泄露。在数据特征层面,提出改进的自适应隐私增强模块模糊表征学习,根据历史训练信息自适应调整特征泛化程度,并通过可控扰动注入弱化梯度优化过程的可追踪性。在网络模型层面,设计结合预测置信度的标签平滑策略泛化模型训练。各节点可根据模型的预测置信度个性化调整软标签,受攻击的标签将被赋予更加宽容的软标签值以阻止攻击的进一步深入。最后,结合多场景的攻防模拟实验探究本文所提方法的有效性和鲁棒性。

1 威胁模型

为方便分析,考虑一个仅有双方参与的联邦场景(图1),其中攻击者A拥有$\{a,b\}$类数据,受害者V拥有$\{a,c\}$类数据。攻击者试图窃取其未拥有的c类数据,联邦GAN攻击流程如下。

1)联邦学习预期执行。当达到预定通信轮次或全局模型性能满足某一阈值时,转至下一步。

2)攻击者A启动本地预部署的GANs。鉴别器D拷贝收到的全局模型参数$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{g}}$,并依此训练本地生成器G。

3)生成器生成一批次c类数据,并将数据标签设置为b。

4)生成数据与A的原始数据共同训练本地模型,上传攻击者模型参数$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{A}}$至服务器。

5)受害者V正常训练并上传模型参数$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{V}}$至服务器。服务器聚合最新的全局模型,并广播至所有节点。

6)若未达到联邦学习最大通信轮次,跳转至2)。

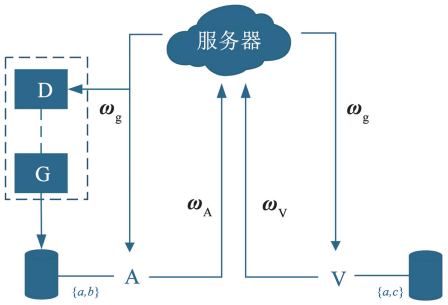


图 1　联邦 GAN 攻击流程

Fig. 1　Attack process of federated GAN attacks

上述联邦 GAN 攻击流程可推广至任意多实体联邦学习框架中。作为联邦学习的半诚实参与者，攻击者拥有网络结构、数据标签的全部信息，隶属于白盒攻击。联邦 GAN 攻击的成功依赖于全局模型中隐含的数据信息，这也是深度学习模型的普遍困扰。此外，攻击步骤 3）中的标签反转会持续诱导受害者模型过拟合，用以不断促使其提供更加精细的数据特征。对抗生成技术允许生成器在更广泛的特征空间内搜寻目标向量，而无需公开数据集的预训练或是对目标类的先验知识[21]。

分析可知，联邦 GAN 攻击的防御有两个关键。1）干扰全局模型的输出反馈，破坏生成器训练收敛。敌手生成器依靠全局模型的反馈优化训练，受干扰的输出反馈可提供错误的梯度下降方向阻止生成器收敛。2）遏制标签反转的负面影响，阻止隐私的持续泄露。标签反转诱使受害节点过拟合，导致数据特征不断精细。遏制标签反转的影响以阻止攻击的持续深入。

2　PEFID 整体设计

2.1　自适应隐私增强模块

为防止联邦学习中的梯度泄露，Scheliga 等[17]提出即插即用的隐私增强模块 PRECODE，通过对数据特征变分建模以模糊梯度中蕴含的原数据信息。PRECODE 的核心思想是通过引入信息瓶颈（information bottleneck，IB）使信息传递过程中只有最重要的信息能够通过。具体说来，对于输入向量 $\boldsymbol{x}$ 和输出向量 $\boldsymbol{y}$，信息瓶颈理论寻找中间隐变量 $\boldsymbol{z}$ 使得

$$\max[I(\boldsymbol{x};\boldsymbol{z})-\beta I(\boldsymbol{z};\boldsymbol{y})] \tag{1}$$

式中：β 为权重系数，$I(\cdot)$ 为互信息熵。在神经网络中互信息熵难以计算，可利用变分自编码器构建变分瓶颈以近似信息瓶颈，其优化目标为

$$\min L(\theta)=L_{\text{task}}(\boldsymbol{y},\hat{\boldsymbol{y}})+\beta\cdot D_{\text{KL}}(N(\mu_z,\sigma_z),N(0,1)) \tag{2}$$

式中：θ 为神经网络参数，$\hat{\boldsymbol{y}}$ 为预测向量，L_{task} 为任务损失，D_{KL} 为隐变量 $\boldsymbol{z}$ 与标准正态分布间的 KL 散度，用来衡量 $\boldsymbol{z}$ 的泛化程度。PRECODE 允许模型捕捉和保留有用的特征而抑制无关的噪声。对于网络流量，协议、时序、统计等元数据信息会被重点关注，而数据包内容将被相对模糊。

β 控制着 PRECODE 的泛化程度，权衡着性能与泛化间的关系，需要根据对任务的先验知识进行调整，无法适应动态变化的网络环境。此外，固定的 β 缺乏任务弹性，无法在学习过程中灵活调整。因此，本文提出改进后的自适应隐私增强模块（adaptive PRECODE，A-PRECODE），可面向不同的任务自适应调整权重系数，其结构如图 2 所示，其中 CE(·) 为交叉熵损失函数。首先，在原基础上添加自适应的权重调整策略，根据历史训练情况动态调整 β，以平衡数据隐私与模型性能间的关系，即

$$\beta^t=\left(1+\eta\frac{L_{\text{task}}^{t-1}-L_{\text{task}}^{t}}{L_{\text{task}}^{t}}\right)\cdot\beta^{t-1} \tag{3}$$

式中：η 为调整步长，t 为本地训练轮次。在任务性能优秀时，A-PRECODE 更加关注隐私问题，进而提升模型泛化程度；在任务表现差时，其将着力于任务学习。此外，A-PRECODE 额外向重构隐变量 $\boldsymbol{z}$ 注入可控的微小噪声，进一步弱化梯度的可追踪性，干扰敌手生成器的反馈训练以增强隐私，即

$$\boldsymbol{z}=\mu_z+\boldsymbol{\varepsilon}\cdot\sigma_z+\boldsymbol{n} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{\varepsilon}\sim N(0,1)$，$\boldsymbol{n}\sim N(0,s^2)$ 为额外的高斯扰动，s^2 为控制注入噪声的强度。

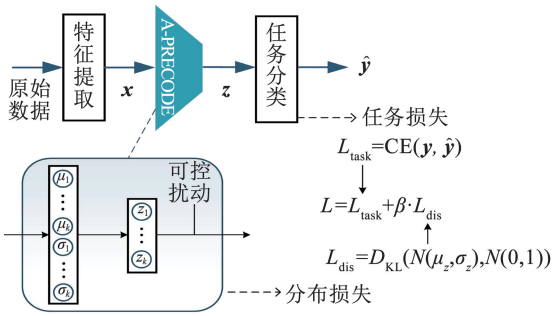


图 2　A-PRECODE 结构

Fig. 2　Structure of A-PRECODE

2.2　结合预测置信度的标签平滑策略

标签平滑是一项正则化技术，通过平滑硬标签提升模型泛化能力，避免过拟合。有研究证明[16]，采用独热标签训练会导致模型对训练数据过拟合，数据信息将隐含在模型参数中，更容易遭受推理攻击。对于类别数为 M 的硬标签 $\boldsymbol{y}_i=\mathbf{e}_i\in\mathbb{R}^M$（$M$ 维空间的标准基向量），标签平滑结果为

$$\boldsymbol{y}^{\text{LS}}=\left[1-\frac{M}{M-1}\alpha\right]\cdot\boldsymbol{y}_i+\frac{\alpha}{M-1}\cdot\mathbf{1},\mathbf{1}\in\mathbb{R}^M \tag{5}$$

式中:$\alpha \in [0,1]$为平滑系数。

联邦 GAN 攻击的攻击者通过标签反转诱导受害者不断提供样本信息,促使其对于训练数据的过拟合。本文提出结合模型预测置信度的标签平滑策略,通过全局模型在本地数据集的预测置信度向量 $\boldsymbol{C} \in \mathbb{R}^M$ 周期性调整软标签向量,具体为

$$\boldsymbol{y}_t^{\mathrm{LS}} = \left(\cdots, \frac{[1 - \Delta \boldsymbol{C}(i)] \cdot \boldsymbol{y}_{t-1}^{\mathrm{LS}}(i)}{\sum_{i=1}^{M} [1 - \Delta \boldsymbol{C}(i)] \cdot \boldsymbol{y}_{t-1}^{\mathrm{LS}}(i)}, \cdots \right)^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^M \tag{6}$$

式中,$\Delta \boldsymbol{C} = \boldsymbol{C}_{t-1} - \boldsymbol{C}_t$ 为预测置信度差分。结合预测置信度的标签平滑策略允许每个客户端对其拥有的每类标签独立计算平均置信度,拥有独立的软标签向量。对于受害者,个性化标签平滑允许适当增加被执行反转标签的样本的软标签值以降低本地过拟合,防止隐私泄露的不断深入。为降低计算开销,每 5 轮全局通信,执行一次标签更新。结合预测置信度的标签平滑策略实施细节见如下伪代码。其中:节点 k 的数据总条数为 n_k,标签为 i 的数据条数为 n_k^i,其构成的数据子集为 D_k^i。

伪代码:结合预测置信度的标签平滑策略

输入:训练轮次 T,客户端数量 N,数据集 $D_{k \in N} = \{\boldsymbol{x}_r, \boldsymbol{y}_r\}^{r \in n_k}$,客户端模型 $\boldsymbol{\omega}_k$,历史标签平滑向量 $\boldsymbol{y}_{t-1,k}^{\mathrm{LS}}$,历史预测置信度向量 $\boldsymbol{C}_{t-1}^{k,i}$

输出:更新后的标签平滑向量 $\boldsymbol{y}_{t,k}^{\mathrm{LS}}$,更新后的预测置信度向量 $\boldsymbol{C}_t^{k,i}$

For t in T:
  For 所有客户端 **parallel do**:
    模型进入测试模式
    For i in M:
      $\boldsymbol{C}_t^{k,i} = \frac{1}{n_k^i} \sum_{i \in M}^{n_k^i} \mathrm{Softmax}(\boldsymbol{\omega}_k, D_k^i)$
    End for
    由式(6)计算更新后的 $\boldsymbol{y}_{t,k}^{\mathrm{LS}}$
  End for
End for
Return $\boldsymbol{y}_{t,k}^{\mathrm{LS}}, \boldsymbol{C}_t^{k,i}$

3 实验概况

3.1 数据集

本文选择适用于联邦式 IDS 的 CICIDS2018[22] 和 UNSW-NB15[23] 入侵检测数据集。由于本文仅研究数据隐私问题,考虑数据重构的可能性,因此并不关注数据本身的良恶性。CICIDS2018 数据集共包含 7 类数据,对其中数据量较多的 Benign、Infiltration、Dos、Bot 与 Brute-Force 类作欠采样以保持较为平衡的数据分布,用于模拟一个节点一类数据的简单情形。此时,联邦 GAN 攻击的受害者节点仅有 1 个。UNSW-NB15 数据集共有 10 类数据,本文使用官方发布的 UNSW-NB15-training 训练集与 UNSW-NB15-testing 测试集。同样,本文舍弃其中数据量较少的后 4 类数据:Analysis、Backdoor、Shellcode 和 Worms。UNSW-NB15 数据集用于模拟实际网络中数据量不平衡的情形。具体数据分布详见表 1。

表 1 数据集样本分布

Tab. 1 Distribution of dataset samples

数据集	标签	类别	训练集/条	测试集/条
UNSW-NB15	0	Normal	50 000	37 000
	1	Generic	40 000	18 871
	2	Exploits	33 393	11 132
	3	Fuzzers	18 184	6 062
	4	Dos	12 264	4 089
	5	Reconnaissance	10 491	3 496
CICIDS2018	0	Benign	23 852	5 123
	1	Infiltration	23 989	6 010
	2	Dos	24 127	5 872
	3	Bot	24 127	5 932
	4	Brute-Force	24 067	5 998
	5	DDos	1 641	434
	6	Web	568	164

原始数据特征需经最大最小归一化映射至[0,1]。其中,UNSW-NB15 数据集样本共 46 个特征,需剔除其中的 3 个非数值特征:proto、service 和 state。而 CICIDS2018 数据集样本的 80 个特征均为数值特征,无需额外处理。

3.2 实验环境与评价指标

实验在 Windows 11 操作系统,Python3.8 和 PyTorch1.13.0 版本下进行。实验硬件环境为 CPU:12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H 2.30 GHz,GPU:NVIDIA GeForce RTX 3060 LapTop。

本文评价指标有检测准确率 *Acc*(accuracy)、攻击准确率 *Raa*(attack accuracy rate)、性能下降率 *Rpd*(performance degradation rate)与响应时间 *Rt*(response time)。*Acc* 衡量 IDS 的检测性能,由深度学习混淆矩阵计算,即

$$\text{检测准确率} = \frac{T_{\mathrm{P}} + T_{\mathrm{N}}}{T_{\mathrm{P}} + F_{\mathrm{N}} + T_{\mathrm{N}} + F_{\mathrm{P}}} \tag{7}$$

式中:T_{P} 与 T_{N} 分别为真阳样本和真阴样本,即正确分类的恶意样本与良性样本,F_{P} 与 F_{N} 分别是假阳样本与假阴样本。*Raa* 评价联邦 GAN 攻击的成功程度,为重构样本被集中训练模式下的代理 IDS 模型正确分类的比例。代理模型的网络结构和训练条

件与实验所用一致。需要注意，Raa 仅从特征层面关注重构代表样本向量与真实样本向量间的相似性。样本层面的评估还需进一步的逆向特征工程，涉及敌手先验知识评估、域间关系约束等。但特征的差异增大也同样会增大样本复原的难度。Rpd 为隐私增强前后的模型性能下降程度，即

$$\text{性能下降率} = \frac{|\Delta \text{ 检测准确率}|}{\text{检测准确率}} \tag{8}$$

式中，分子为检测模型添加防御前后的检测准确率绝对差值。Rt 为完整训练一个全局轮次所需的平均时间，反映算法复杂度。

3.3　攻防设置

实验设置一个中央服务器和数个子节点。实验开始前，选择其中一个子节点为潜在的攻击节点，并指定攻击重构的目标类数据。在联邦学习进行至预设轮次的 50% 时，攻击节点发动联邦 GAN 攻击。每次实验，攻击节点有唯一的目标类重构数据。攻击开始后，攻击节点会生成 1 000 条重构数据并与本地数据集融合用于训练本地模型。重构数据集会在每个全局轮次中优先于本地训练更新。

每组实验设置与数据标签相匹配的节点数量，每个节点仅拥有一类流量数据，节点编号与其拥有的数据标签一致。基线入侵检测网络为多层感知机模型，其主体由 4 层全连接网络组成，神经元数量为[128，256，64，32]。自动编码器与解码器网络分别用于原始网络流量特征的转化输入与最终的决策分类。基线模型采用 SGD 优化器训练，学习率为 0.01，衰减因子为 0.998。敌手采用条件生成器 CGAN(conditional GAN)结构，通过一维卷积层拟合时序特征间的依赖关系，而后通过 3 层全连接层依次重构数据特征。生成器模型采用 Adam 优化器，学习率为 0.005。鉴别器模型接受自全局模型参数，无本地优化过程。实验的部分超参数设置为：权重系数 $\beta = 0.5$，调整步长 $\eta = 0.05$，噪声强度 $s^2 = 0.01$，标签平滑系数 $\alpha = 0.1$。

3.4　防御效用分析

为全面研究 PEFID 在多样的联邦场景、数据分布与攻防目标下针对联邦 GAN 攻击的防御效用，在 UNSW-NB15 与 CICIDS2018 数据集开展本实验，实验结果如表 2 所示。其中，基线表示未添加任何隐私保护策略，PEFID 表示添加本文所提出的隐私增强方法。

据表 2 可知，与基线相比，本文所提方法实现了显著的隐私提升与可控的性能下降。整体看出，在多种攻防场景中，PEFID 的攻击准确率 Raa 较基线模型明显下降，且性能下降率 Rpd 不高于 6.02%。这说明 PEFID 中的 A-PRECODE 模块能够根据不同的训练任务与难度，自动调整隐私程度，实现安全保护下的最好检测效果。观察细节，可以得出以下结论。1)联邦 GAN 攻击的成功多依赖于全局模型性能。以 UNSW-NB15 数据集为例，标签为 1 的流量数据量远多于 4 和 5，模型学习更加深刻，联邦 GAN 攻击的重构效果更好，即实验组 5-1(攻击节点 5，受害节点 1。若无特殊说明，为简化表达后文依此表示)的 Raa 明显高于 2-4 与 2-5。2)由于 CICIDS2018 的数据量更少，模型对于训练数据过拟合更加严重，联邦 GAN 攻击防御难度更大。3)联邦 GAN 攻击所执行的伪样本生成与标签反转会对全局模型收敛产生一定的负面影响。特别在 CICIDS2018 数据集的实验组 2-5 中，伪样本与原始样本的比例接近于 0.6，基线 Acc 降幅达 1%；而 UNSW-NB15 数据集样本量更大，联邦 GAN 攻击并未对全局模型收敛性能产生明显影响，攻击隐蔽性更强。此外，基线模型 3 个实验组的 Acc 均能够稳定收敛在51.16%，攻击难以察觉。

表 2　PEFID 防御效用结果

Tab. 2　Defensive efficacy results of PEFID

数据集	攻击节点	受害节点	Raa/%		Acc/%		Rpd/%
			基线	PEFID	基线	PEFID	
UNSW-NB15	5	1	63.44	6.62	**51.16**	48.59	5.02
	2	4	47.85	5.87		49.53	3.19
	2	5	37.87	0.36		50.13	2.01
CICIDS2018	6	1	77.21	12.17	63.38	59.82	5.62
	6	3	74.39	14.35	63.17	59.37	6.02
	2	5	39.75	6.82	62.57	60.65	3.07

为深入探究 PEFID 的隐私增强机制，本文在实验组 5-1 的基础上观察生成器训练损失与标签平滑效用。图 3 展示了敌手生成器自联邦 GAN 攻击启动后的训练损失情况，直观反映了联邦 GAN 攻击的失败。由图 3 可以看到，在基线模型中敌手生成器训练过程稳定，并于 30 轮次后(联邦学习第 80 轮

次)收敛。然而,受 PEFID 保护下的敌手生成器训练一直处于震荡状态且无法收敛至最佳。这是因为 A-PRECODE 模块改变了网络的表征学习,潜在变量的随机状态与可控扰动的叠加使得敌手生成器无法依据全局模型的反馈持续获得可信的梯度下降方向,从而破坏其训练。

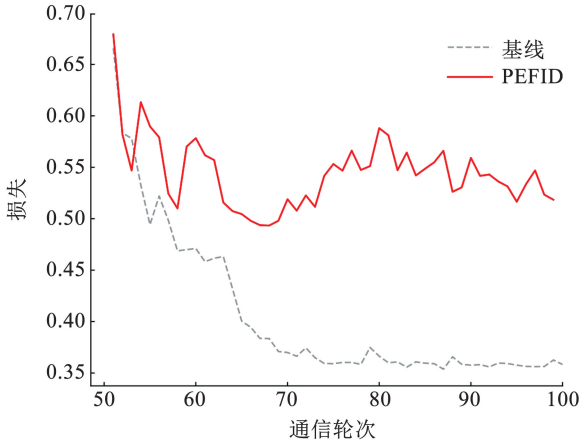


图 3 生成器损失曲线

Fig. 3 Generator loss curve

图 4 为实验组 5-1 训练结束时攻击节点与受害节点的标签平滑结果,纵轴经对数变换以突显差异。实验设置初始标签平滑系数 $\alpha = 0.1$,标签平滑值下限为 0.01。由图 4 可以看到,受害节点标签 5 的软标签值由初始的 0.02 上升至 0.16;对应地,目标类标签值由 0.9 降至 0.71。这表明为防止联邦 GAN 攻击标签反转诱使受害节点本地过拟合,结合预测置信度的标签平滑策略可动态分配各标签平滑值,为受害类与被反转类标签给予更加宽容的平滑值。

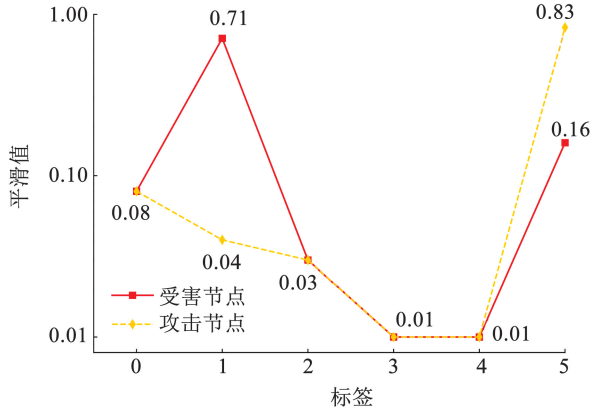


图 4 个性化标签平滑结果

Fig. 4 Result of personalized label smoothing

在实际网络中,流量多以非独立同分布形式存在,各节点数据在特征空间均有不同程度的重叠。此时任何拥有部分目标类数据的节点均为联邦 GAN 攻击的受害节点,且攻击节点可通过搭便车行为在自身无任何数据的情况下无代价发动联邦 GAN 攻击。为模拟在非独立同分布场景中敌手利用搭便车行为发动的联邦 GAN 攻击,本文开展如下攻防仿真:数据集 UNSW-NB15 经狄利克雷采样(采样参数为 1.0)[24],并分配给 6 个良性节点(编号 0 ~ 5),攻击节点 6 号无任何本地数据,通过搭便车行为加入联邦学习,在首轮全局通信中随机生成模型参数并上传。实验结果见表 3。

表 3 搭便车行为下的 PEFID 防御效用结果

Tab. 3 Defensive efficacy results of PEFID under free-riding

攻击节点	目标数据	*Raa*/%		*Acc*/%		*Rpd*/%
		基线	PEFID	基线	PEFID	
6	1	78.73	17.53	72.05	68.42	5.04
6	4	53.81	11.94	72.46	71.18	1.77

由表 3 结果可知,在非独立同分布场景中,联邦 GAN 攻击的威胁更大,防御难度也更大。这是因为单节点单数据的分布可视为最极端的非独立同分布场景,全局模型的聚合存在巨大困难。而在经狄利克雷采样后,全局模型聚合效果有所提升,联邦 GAN 攻击的成功率相应提升。且受害节点范围增加,提升了联邦 GAN 攻击的防御难度。然而,PEFID 仍能保持不错的性能表现,其 *Rpd* 仍与表 2 结果基本相当。这说明本文所提方法拥有优秀的通用性和适应性。面对多样化的联邦学习设置与攻防对抗,PEFID 可动态调整隐私保护强度,尽可能维持高效的检测性能,自主适配学习任务。

3.5 对比实验

本文对比了两类常用的防御方案,差分隐私与对抗训练,实验结果见表 4。其中,差分隐私为 OPACUS 开源库的 DPAVG 算法。作为组级差分隐私策略,DPAVG 为本地模型参数提供噪声保护。ε 为隐私预算,越小的预算拥有越好的隐私保护能力,而代价是更为严重的性能受损。对抗训练设置基于文献[19],于本地部署 GAN 执行对抗训练以扩充训练数据集,提升模型泛化能力。p 为对抗样本占原始样本的比例。对比实验使用数据集为 CICIDS2018,实验组为 6-1。

观察表 4 可知,本文所提 PEFID 在隐私增强和性能表现方面更加全能均衡,且额外引入的响应时间也在可接受范围之内。对比结果显示,DPAVG 在隐私预算 $\varepsilon = 0.1$ 时取得了最低的 *Raa*,然而代价是剧烈的性能受损,*Rpd* 跃升至 12.73%。在 $\varepsilon = 0.7$ 时 DPAVG 获得了较好的检测性能,但隐私保护能力却随之下降;对抗训练方案中,*Raa* 受 p 变化影响微小,而 *Rt* 和 *Acc* 变化更加敏感:一方面,随着样本量的增加,对抗训练所需的响应时间显著增加;另一

方面，对抗样本增多导致模型泛化程度愈高，*Acc* 反而呈下降趋势。

与之相比，PEFID 的最大优势是自适应性。DPAVG 与对抗训练均需要不断调试其参数以取得理想的隐私能力和检测性能。而凭借 A-PRECODE 模块的自适应特性，PEFID 可在学习过程中动态调整训练策略，权衡隐私和性能。通过设置结合预测置信度的标签平滑策略的更新周期，PEFID 的整体训练时间也可实现控制，以有限成本增强 FL-IDS 的隐私安全。

表 4　对比实验结果

Tab. 4　Results of comparison experiment

模型		*Raa*/%	*Acc*/%	*Rpd*/%	*Rt*/s
基线		77.21	63.38		26.3
DPAVG	$\varepsilon=0.1$	**9.17**	55.31	12.73	26.8
	$\varepsilon=0.7$	16.95	59.28	6.47	26.7
对抗训练	$p=0.2$	15.74	**61.42**	3.09	41.9
	$p=0.5$	14.65	57.81	8.79	**52.6**
PEFID		12.17	59.82	5.62	29.4

3.6　白盒场景防御实验

作为一种白盒攻击，联邦 GAN 攻击的防御方案势必需要考虑到敌手能力之内的破防手段。本文所提出的 PEFID 部署在节点本地，攻击者可对其结构与机制非法篡改以削弱防御。具体来说，对于 A-PRECODE模块，攻击者可忽略式(3)中的分布损失(即 $\beta=0$)，同时不添加额外扰动用于精细化本地学习；对于结合预测置信度的标签平滑策略，攻击者可拒绝执行软标签训练与个性化标签的动态更新，采用硬标签训练以最大化操纵受害节点的训练。在 CICIDS2018 数据集下，白盒场景中的攻防模拟结果如表 5 所示，Partial-PEFID 表示攻击者本地防御失效后的白盒攻击模型。

表 5　白盒场景防御实验结果

Tab. 5　Defense experiment results in white-box scenario

攻击节点	受害节点	模型	*Raa*/%	*Acc*/%	*Rpd*/%
		基线	77.21	63.38	
6	1	PEFID	12.17	59.82	5.62
		Partial-PEFID	13.53	59.68	5.83
		基线	39.75	62.57	
2	5	PEFID	6.82	60.65	3.07
		Partial-PEFID	7.41	60.33	3.58

由表 5 可知，与 PEFID 相比，Partial-PEFID 防御方案下的联邦 GAN 攻击成功率有一定上升，但 *Acc* 基本不受影响。在敌手破解本地防御后，其本地的 A-PRECODE 退化为简单的全连接层，失去了特征模糊效用，且硬标签训练无法阻止标签反转导致的类别混淆。但受 PEFID 保护的其他节点仍能高效防范隐私泄露。这是因为敌手依靠全局模型反馈输出优化生成器，而单一节点的防御漏洞不足以影响全局模型的隐私保护。全局模型参数依然由绝大多数节点经 A-PRECODE 模糊后的表征学习训练所得，且个性化的标签平滑策略仍能够在本地有效缓解过拟合。实验结果表明，即使遭遇敌手破除部分的本地防御，PEFID 在特征层面与模型层面的防御效用仍然出色，具备在开放联邦框架中的实用性。

4　结　论

本文通过深入研究联邦 GAN 攻击特点，提出了隐私增强的安全联邦入侵检测方法，以提升现有 FL-IDS 的数据隐私，得到如下结果。

1)联邦 GAN 攻击的威胁根源为模型的过拟合，标签反转是其关键手段。数据量、数据分布、模型聚合方式均会影响联邦 GAN 攻击的攻击强度。

2)本文所提出的隐私增强的安全联邦入侵检测方法 PEFID，可自主调整特征模糊和任务学习权重，权衡隐私保护和检测性能，具有通用性、鲁棒性和轻量化特点。

3)实验证明，PEFID 可有效提升现有联邦入侵检测系统的安全鲁棒性，增加敌手的数据复原难度。

参考文献

[1]武晓栋，金志刚，陈旭阳，等. 对抗学习辅助增强的增量式入侵检测系统[J]. 哈尔滨工业大学学报，2024，56(9)：31
WU Xiaodong，JIN Zhigang，CHEN Xuyang，et al. Adversarial learning-augmented incremental intrusion detection system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2024，56(9)：31. DOI：10.11918/202403066

[2]金志刚，刘凯，武晓栋. 堆叠循环卷积和头部注意力的工业互联网入侵检测[J/OL]. (2024-06-24). https://afffgc1d129f57bb244a4hcc6ncwqfk90x6opofgfy.eds.tju.edu.cn/kcms/detail/23.1235.t.20240622.1013.002.html
JIN Zhigang，LIU Kai，WU Xiaodong. Stacked recurrent convolutions and head attention for industrial internet ntrusion detection[J/OL]. (2024-06-24). https://afffgc1d129f57bb244a4hcc6ncwqfk90x6opofgfy.eds.tju.edu.cn/kcms/detail/23.1235.t.20240622.1013.002.html

[3]MCMAHAN B，MOORE E，RAMAGE D，et al. Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data[C]// Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. Fort Lauderdale：PMLR，2017(54)：1273

[4]RUZAFA-ALCÁZAR P，FERNÁNDEZ-SAURA P，MÁRMOL-CAMPOS E，et al. Intrusion detection based on privacy-preserving federated learning for the industrial IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics，2023，19(2)：1145. DOI：10.1109/TII.2021.3126728

[5] LI Yang, MOUBAYED A, SHAMI A. MTH-IDS: A multitiered hybrid intrusion detection system for internet of vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 616. DOI:10.1109/JIOT.2021.3084796

[6] 肖雄, 唐卓, 肖斌, 等. 联邦学习的隐私保护与安全防御研究综述[J]. 计算机学报, 2023, 46(5): 1019
XIAO Xiong, TANG Zhuo, XIAO Bin, et al. Survey on privacy protection and security defense of federated learning[J]. Chinese Journal of Computers, 2023, 46(5): 1019. DOI:10.11897/SP.J.1016.2023.01019

[7] RIGAKI M, GARCIA S. Asurvey of privacy attacks in machine learning[J]. ACM Computing Surveys, 2024, 56(4): 1. DOI:10.1145/3624010

[8] LEWIS C, VARADHARAJAN V, NOMAN N, et al. Mitigation of gradient inversion attacks in federated learning with private adaptive optimization[C]//2024 IEEE 44th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Jersey, NJ: IEEE, 2024: 833. DOI:10.1109/ICDCS60910.2024.00082

[9] ZHANG Yuheng, JIA Ruoxi, PEI Hengzhi, et al. The secret revealer: Generative model-inversion attacks against deep neural networks[C]// 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle, WA: IEEE/CVF, 2020: 250. DOI:10.1109/CVPR42600.2020.00033

[10] HITAJ B, ATENIESE G, PEREZ-CRUZ F. Deep models under the GAN: Information leakage from collaborative deep learning[C]// Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. New York: CCS, 2017: 603. DOI:10.1145/3133956.3134012

[11] XU Runhua, BARACALDO N, ZHOU Yi, et al. HybridAlpha: An efficient approach for privacy-preserving federated learning[C]// Proceedings of the 12th ACM Workshop on Artificial Intelligence and Security. New York: ACM, 2019: 13. DOI: 10.1145/3338501.3357371

[12] ZHANG Li, XU Jianbo, VIJAYAKUMAR P, et al. Homomorphic encryption-based privacy-preserving federated learning in IoT-enabled healthcare system[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2023, 10(5): 2864. DOI:10.1109/TNSE.2022.3185327

[13] WANG Tianhao, ZHANG Yuheng, JIA Ruoxi. Improving robustness to model inversion attacks via mutual information regularization[C]//Proceedings of the 35th AAAI Conference on Artificial Intelligence. California: AAAI Press, 2021: 11666. DOI:10.1609/aaai.v35i13.17387

[14] 唐湘云, 王伟, 翁彧, 等. 联邦遗忘学习隐私安全与算法效率研究综述[J]. 计算机学报, 2025, 48(9): 2064
TANG Xiangyun, WANG Wei, WENG Yu, et al. A survey on privacy security and computation efficiency in federated unlearning[J]. Chinese Journal of Computers, 2025, 48(9): 2064. DOI:10.11897/SP.J.1016.2025.02064

[15] 高媛, 石润华, 刘长杰. 自适应差分隐私的联邦学习方案[J]. 智能系统学报, 2024, 19(6): 1395
GAO Yuan, SHI Runhua, LIU Changjie. Federated learning scheme with adaptive differential privacy[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2024, 19(6): 1395. DOI:10.11992/tis.202306052

[16] AHMED F, SÁNCHEZ D, HADDI Z, et al. MemberShield: A framework for federated learning with membership privacy[J]. Neural Networks, 2025, 181: 106768

[17] SCHELIGA D, MÄDER P, SEELAND M. PRECODE-a generic model extension to prevent deep gradient leakage[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). Waikoloa, HI: IEEE/CVF, 2022: 1849

[18] LUO Xinjian, ZHANG Xianglong. Exploiting defenses against GAN-based feature inference attacks in federated learning[J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD), 2025, 19(3): 1. DOI:10.1145/3719350

[19] 马睿. 基于联邦学习的协同入侵检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023
MA Rui. Research on collaborative intrusion detection technology based on federated learning[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023

[20] STRUPPEK L, HINTERSDORF D, KERSTING K. Be careful what you smooth for: label smoothing can be a privacy shield but also a catalyst for model inversion attacks[PP/OL]. (2023-10-10)[2025-04-18]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.06549

[21] 王冬, 秦倩倩, 郭开天, 等. 联邦学习中的模型逆向攻防研究综述[J]. 通信学报, 2023, 44(11): 94
WANG Dong, QIN Qianqian, GUO Kaitian, et al. Survey on model inversion attack and defense in federated learning[J]. Journal on communications, 2023, 44(11): 94. DOI:10.11959/j.issn.1000-436x.2023209

[22] THAKKAR A, LOHIYA R. A review of the advancement in intrusion detection datasets[J]. Procedia Computer Science, 2020, 167: 636

[23] MOUSTAFA N, SLAY J. UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set)[C]//2015 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS). Canberra: IEEE, 2015: 1

[24] JIN Zhigang, DING Yu, WU Xiaodong, et al. Federated dual correction intrusion detection system: efficient aggregation for heterogeneous data[J]. Computer Networks, 2025, 259: 111116. DOI:10.1016/j.comnet.2025.111116

(编辑 吕雪梅)

DOI:10.11918/202507016

动态门控扩散去噪与跨层注意力的多模态图像融合网络

邸 敬[1],霍婧婧[1],王鹤然[1],刘冀钊[2],廉 敬[1]

(1.兰州交通大学 电子与信息工程学院,兰州 730070;2.兰州大学 信息科学与工程学院,兰州 730000)

摘 要:针对去噪扩散模型在图像融合任务中难以适应不同噪声水平、普通残差块对特征的筛选能力有限的问题,本文构建了一种动态门控扩散去噪与跨层注意力的多模态图像融合网络。首先,设计并引入4组专家卷积核至动态特征提取器模块,根据输入内容动态组合出最优卷积核,对输入特征实现自适应处理;其次,提出了一种改进的门控特征选择模块来生成门控信号抑制无关信息,提升模型在不同噪声水平下的扩散去噪能力,实现对特征的精准控制;最后,使用R-Transformer块进行特征调整,通过构建的全局-局部空间注意力模块实现跨层特征融合,以生成纹理信息丰富、色彩保真度高的融合图像。在MSRS、RoadScene和Harvard三个数据集上的实验结果表明,与近年来图像融合领域中9种具有代表性的重要方法相比,本文方法的7种客观评价指标平均提升了5.11%~15.93%。本文方法在纹理细节保持及解剖结构完整性保留等方面均优于其他方法,符合人眼视觉特性,能够很好地处理各种光照环境场景和医学影像诊断场景下的多模态图像融合任务。

关键词:多模态图像融合;扩散模型;门控特征选择模块;跨层注意力融合模块;专家卷积核

中图分类号:TP391 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0033-12

Dynamic gating diffusion denoising and cross-layer attention-based multimodal image fusion network

DI Jing[1], HUO Jingjing[1], WANG Heran[1], LIU Jizhao[2], LIAN Jing[1]

(1. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To address the challenges that denoising diffusion models struggle to adapt to varying noise levels and conventional residual blocks have limited feature selection capability in image fusion tasks, this paper constructs a multimodal image fusion network integrating dynamic gating diffusion denoising and cross-layer attention. Firstly, four groups of expert convolution kernels are designed and incorporated into the dynamic feature extractor module. The optimal convolution kernels are dynamically assembled based on input content, enabling adaptive processing of input features. Secondly, an improved gated feature selection module is proposed to generate gating signals that suppress irrelevant information, enhance the model's diffusion denoising capability under different noise levels, and achieve precise feature control. Finally, R-Transformer blocks are adopted for feature adjustment. A global-local spatial attention module is constructed to realize cross-layer feature fusion, thereby generating fused images with rich texture information and high color fidelity. Experimental results on the MSRS, RoadScene, and Harvard datasets demonstrate that compared with 9 representative state-of-the-art methods in the field of image fusion in recent years, the proposed method achieves an average improvement of 5.11% to 15.93% across 7 objective evaluation metrics. The proposed method outperforms other counterparts in texture detail preservation and anatomical structure integrity maintenance, conforms to human visual perception characteristics, and can effectively handle multimodal image fusion tasks in scenarios such as various lighting environments and medical image diagnosis.

Keywords: multimodal image fusion; diffusion models; gated feature selection module; cross-layer attention fusion module; expert convolutional kernels

图像融合技术旨在通过特定算法将多幅来源不同、模态不同的图像信息进行结合,生成一幅包含更多互补信息、更符合人类视觉感知的新图像。其核心目标是整合源图像中的互补信息与重复出现的相

收稿日期:2025-07-08;**录用日期**:2025-08-19;**网络首发日期**:2025-11-06
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251106.1008.004
基金项目:甘肃省自然科学基金(24JRRA231);国家自然科学基金(62061023);甘肃省科技计划重点研发计划(24YFFA024)
作者简介:邸 敬(1979—),女,副教授,硕士生导师
通信作者:霍婧婧,Hbingcheng@126.com

似信息,提升图像的清晰度、语义丰富度和诊断分析价值[1-5]。图像融合的典型应用场景分为红外与可见光图像融合[6-8]和医学图像融合[9-10]。其中,红外与可见光图像融合的目标是融合红外图像的热辐射信息与可见光图像的纹理细节,为安防、军事侦察、道路交通等提供便利;医学图像融合的目标为融合医学影像的内部结构信息与功能代谢信息,以辅助肿瘤定位、病情诊断。

基于深度学习的图像融合算法因其强大的特征提取能力获得了广泛应用,算法模型架构主要包括卷积神经网络(CNN)模型、基于 Transformer 结构的模型和生成对抗网络(GAN)模型等。CNN 通过局部感受野机制实现图像层级特征的高效提取,这一特性也使其拥有了良好的空间建模能力。Prabhakar 等[11]提出深度特征融合网络 DeepFuse,该网络是利用深度卷积网络从源图像的亮度通道中提取信息,因未充分提取源图像信息,融合图像效果不佳。Transformer 类的深度学习算法擅长建模长距离依赖关系,通过自注意力机制捕捉全局上下文信息。Ma 等[12]提出 SwinFusion 网络,其跨域注意力设计可捕获整合同模态长距离依赖、感知连接跨模态语义关联,以提升多模态融合效果,但在模态差异极大的场景中融合图像会出现细节模糊等问题。GAN 通过生成器和判别器的对抗训练,实现高质量数据生成。Xi 等[13]提出了一种结合多尺度注意力网络与期望最大化算法的红外-可见光图像融合生成对抗网络(generative adversarial network with multiscale attention network and expectation maximization algorithm, EMA-GAN)用于图像融合,EM 算法有助于解决红外与可见光图像融合中标签缺失的问题,但 GAN 面临训练不稳定的挑战,并且生成效果易受数据分布影响。

近年来,去噪扩散概率模型备受关注,其具有良好的数学可解释性,且图片生成过程稳定可控,在图像融合领域得到广泛应用。Zhao 等[14]提出了多模态图像融合去噪扩散模型(denoising diffusion model for multi-modality image fusion, DDFM),该模型借助去噪扩散概率模型(denoising diffusion probabilistic models, DDPM)的生成先验和 EM 算法推理,解决了 GAN 训练不稳定和可解释性不足的问题,但此模型依赖预训练生成模型,导致模型泛化能力差。为解决现有红外与可见光图像融合方法无法直接处理多通道数据的问题,Yue 等[15]提出了基于扩散模型的红外-可见光高色彩保真度图像融合模型(toward high color fidelity with diffusion models, Dif-Fusion),通过隐空间多通道扩散过程直接聚合红外与可见光的多源特征,显著提升色彩保真度与纹理强度的保留效果,但在低光照可见光图像或者高噪声红外图像中,扩散过程可能出现过度平滑细节的问题。为解决扩散模型在图像融合中缺乏真实标签、难以直接应用的问题,Yi 等[16]提出了基于融合知识先验扩散模型的多模态图像融合模型(multi-modality image fusion via diffusion model with fusion knowledge prior, Diff-IF),该模型可有效保留视觉信息与弱纹理细节,但其依赖目标搜索确定的先验分布,对复杂或未见模态组合泛化性不足。现有多模态图像融合方法无法处理源图像中的曝光异常以及目标显著性不足,Zhang 等[17]提出了基于文本调制扩散模型的交互式多模态图像融合框架(interactive multi-modal image fusion framework based on text-modulated diffusion model, Text-DiFuse),通过扩散过程集成特征级信息融合,但该模型依赖文本输入的准确性与零样本模型的泛化能力,对无文本描述或语义模糊的融合场景处理效果不佳。Gao 等[18]提出了基于相位转移扩散模型的光学错觉隐藏图像生成模型(free lunch for generating optical illusion hidden pictures with phase-transferred diffusion model, PTDiffusion),其通过在去噪过程中移植扩散特征的相位谱,生成具有隐藏视觉线索的视错觉图像,但由于免训练特性,对复杂图像的处理受限。Wei 等[19]提出了基于一步扩散模型的多模态图像配准模型(multimodal image registration based one step diffusion model, OSDM-MReg),通过一步扩散以及多尺度配准网络来融合特征,但在极端场景适应性上存在局限。

针对以上扩散模型在图像融合任务中难以适应不同噪声水平及普通残差块对特征的筛选能力有限的问题,本文提出一种动态门控扩散去噪与跨层注意力的多模态图像融合网络。通过动态门控扩散去噪模块提取图像特征,对输入特征进行自适应处理,以增强这些特征的表达并保留细节信息。同时,本文采用残差连接的方式缓解梯度消失问题,从而提取更全面的全局语义信息和局部细节特征。通过跨层注意力模块进行多阶段的特征融合和重建,逐步增强图像细节并抑制噪声,生成既包含丰富纹理信息又突出热辐射目标的高质量融合图像。

1 图像融合方法

1.1 网络总体框架

在 UNet 结构中,传统卷积层参数固定,难以适应不同噪声水平和复杂特征分布,且普通残差块对特征的选择能力有限,对信息流的控制效果不佳。因此,本文提出一种动态门控扩散去噪与跨层注意

力的多模态图像融合网络，网络总体架构见图 1。首先，将 4 组专家卷积核引入动态特征提取器模块，通过 1×1 卷积门控网络生成专家权重，根据输入内容动态组合最优卷积核，对输入特征实现自适应处理。其次，利用门控特征选择模块生成的门控信号过滤无关特征，增强关键信息的提取与保留能力。最后，通过跨层注意力模块中的 R-Transformer 块进行特征调整，并利用全局–局部空间注意力机制实现全局与局部特征的有效融合，从而避免高频信息丢失，生成兼具底层细节与高层语义特征的融合图像。

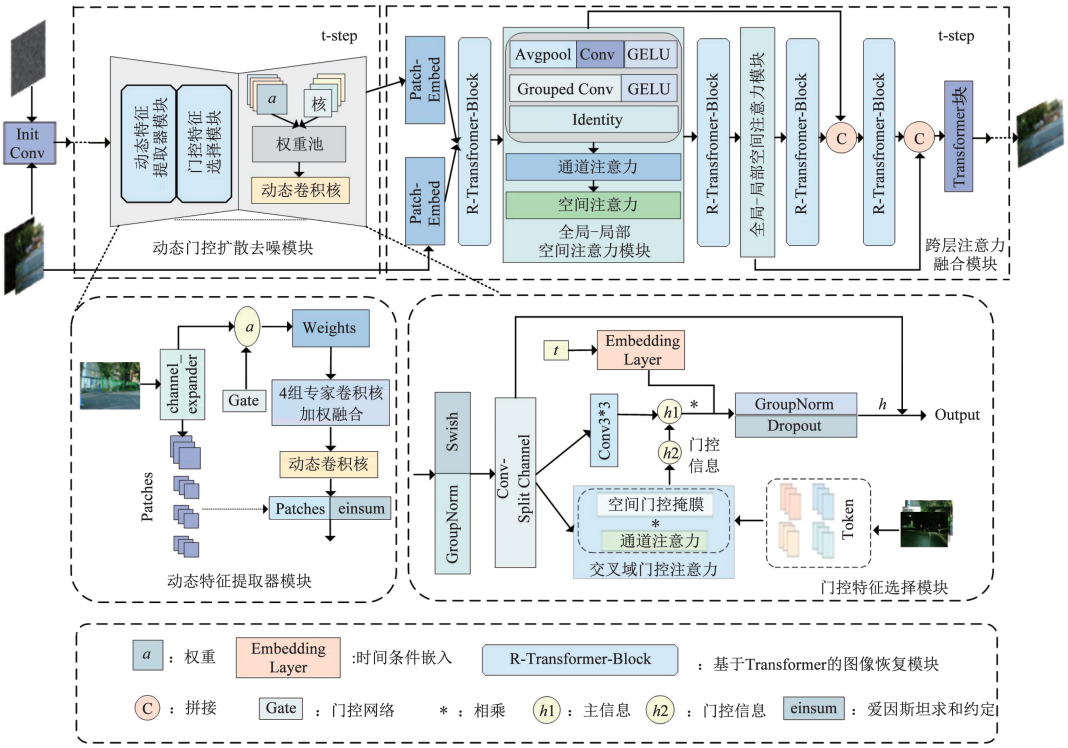


图 1　网络总体架构

Fig. 1　General network framework diagram

1.2　动态门控扩散去噪模块

在扩散模型中，数据生成过程被建模为逐步加噪的反向去噪过程。前向过程通过高斯扰动将干净图像 x_0 扩散为不同噪声水平下的中间状态 x_t，其计算公式为

$$x_t = \sqrt{\bar{\alpha}_t}x_0 + \sqrt{1-\bar{\alpha}_t}\varepsilon,\ \varepsilon \sim N(0,1) \tag{1}$$

式中 $\bar{\alpha}_t = \prod_{i=1}^{t}\alpha_i$ 控制噪声随时间的积累。反向过程目标是通过神经网络 $\varepsilon_\theta(x_t,t)$ 预测噪声，并逐步恢复数据，其计算公式为

$$x_{t-1} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_t}}\left(x_t - \frac{1-\alpha_t}{\sqrt{1-\bar{\alpha}_t}}\varepsilon_t(x_t,t)\right) + \sigma_t z,\ z \sim N(0,I) \tag{2}$$

由于 x_t 在不同时间步 t 的特征分布变化不同，且包含不同程度的噪声扰动，因此网络 ε_θ 需具备动态适应性，以结合当前时间步信息实现更精准的噪声去除。

为此，本文提出了动态门控扩散去噪模块，图 2 为动态门控扩散去噪模块内部结构。首先，输入图像进入动态特征提取器模块，其使用权重融合后的卷积核动态适应不同时间下的特征处理需求，以选择重要特征通道；然后，进入门控特征选择模块，该模块通过门控信号对特征通道进行加权选择，强调关键信息并过滤无关特征。如图 2(b)动态门控扩散去噪模块所示，上采样和下采样过程各包含 4 个阶段，每个阶段均由一个动态特征提取器模块和一个门控特征选择模块顺序组成，在编码路径的最深层，包含一个门控特征选择模块，进一步处理下采样的最深层次特征，为后续上采样提供基础。通过动态特征提取器与门控特征选择模块，该结构自适应地增强了网络从局部细节到全局结构的特征提取与建模能力，提升了扩散过程中不同噪声水平下的去噪能力以及特征提取能力。

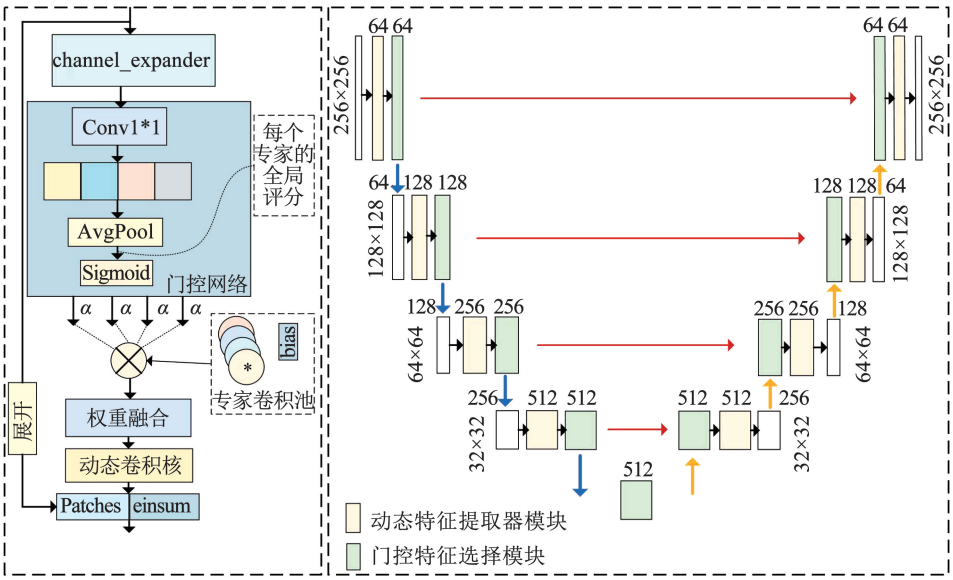
1.2.1　动态特征提取器模块

普通卷积的通道变换依赖固定设计且卷积核权重固定，难以处理复杂噪声分布和多尺度特征，对图像特征提取效果不佳。动态特征提取器的核心思想是引入多个专家卷积核，根据输入内容为每个样本自适应生成一组专属的卷积权重，从而增强模型的特征提取能力。

如图 2(a)动态特征提取器模块所示,首先,通过通道变换层将输入特征图统一投影到特定通道,形成统一维度便于后续不同专家共享处理。随后,门控模块(Gate)通过卷积层和全局平均池化对各专家进行评分以确定权重,结合 softmax 函数得到每个样本在不同专家上的概率分布。在此基础上,利用已知的专家权重对多个专家卷积核实施加权融合,最终得到适配每个样本的动态卷积核,其计算公式为

$$W^{(b)} = \sum_{m=1}^{M} \alpha_{b,m} \cdot W^{(m)} \tag{3}$$

式中:$W^{(b)}$ 为第 b 个样本所使用的最终动态卷积核;M 为专家块数量,该网络使用的专家块数量为 $M=4$,每个专家拥有一套独立的卷积核;$\alpha_{b,m}$ 为第 b 个样本对第 m 个专家的权重系数,表示该样本在融合卷积核时,对第 m 个专家的信任度;$W^{(m)}$ 为第 m 个专家的卷积核参数,维度与 $W^{(b)}$ 相同。



(a) 动态特征提取器模块 (b) 动态门控扩散去噪模块

图 2 动态门控扩散去噪模块内部结构

Fig. 2 Internal architecture of the dynamic gated diffusion denoising module

得到动态卷积核后,将输入特征图展开为一系列小块,即局部感受野区域,而后使用 einsum 将每个样本与其专属的卷积核实现逐位置滑窗卷积,其计算公式为

$$y_l^{(b)} = \sum_{c,i,j}^{e} (W_{o,c,i,j}^{(b)} \cdot x_{l,c,i,j}^{(b)}) + b_o^{(b)} \tag{4}$$

式中:$y_l^{(b)}$ 为第 b 个样本的第 l 位置的输出,表示输出特征图上一个像素点的某个通道值,$\sum^{e}$ 表示对输入通道 c 及卷积核空间位置 (i,j) 进行求和,$b_o^{(b)}$ 为第 b 个样本的第 o 个输出通道的偏置项。而后使用式(5)和式(6)恢复卷积输出格式:

$$H_{\text{out}} = \frac{H + 2 \cdot \text{pad} - K}{\text{stride}} + 1 \tag{5}$$

$$W_{\text{out}} = \frac{W + 2 \cdot \text{pad} - K}{\text{stride}} + 1 \tag{6}$$

式中:H,W 为输入特征图的高、宽,K 为卷积核的尺寸,pad 为对输入边缘的补零像素数(pad = $K//2$),保持输入输出大小一致。

最后将所有局部结果拼接得到输出特征图。通过以上步骤,每个样本根据内容选择专家,对多个专家卷积核线性加权融合,再选择重要特征通道,增强模型对不同输入的适应能力与表达力,提高特征提取能力。

1.2.2 门控特征选择模块

输入特征经动态特征提取器模块处理后进入门控特征选择模块,通过门控机制抑制无关特征,每个 Token 都有一个对应的门控信号,用于控制这个 Token 的输出是否被放大、抑制或归零。门控特征选择模块如图 3 所示,该模块首先对输入张量进行分组归一化,提升训练稳定性;而后通过卷积层将通道数扩展为 2 倍,并沿通道维度将特征拆分为两部分,第 1 部分经 3×3 卷积后作为主信息 h_1,第 2 部分使用深度可分离卷积生成空间门控掩膜,以此来关注重要区域,同时使用全局平均池化和全连接层生成通道注意力,而后将空间信息与通道信息相乘,再经 Sigmoid 函数压缩生成门控权重,得到门控信息 h_2,h_1 和 h_2 逐元素相乘实现门控单元的特征筛选。将噪声时间嵌入 t_{emb} 通过仿射变换调整特征,对门控后的特征进行缩放和平移,注入噪声条件信息,如公式(7)所示

$$h=\gamma(t_{\text{emb}})\cdot h+\beta(t_{\text{emb}}) \tag{7}$$

然后对结果再次分组归一化并应用 Dropout 正则化防止过拟合，通过卷积层恢复原始输出通道数，完成特征提取。最后将处理后的特征与输入进行残差相加，解决梯度消失问题，输出计算公式为

$$\text{Output}=h+W_{\text{residual}}(x) \tag{8}$$

动态门控扩散去噪模块动态选择重要特征通道，过滤无关特征，有效缓解了高层语义建模中特征选择粗糙、关键信息易被噪声干扰的问题，提升了特征表达的针对性与有效性。

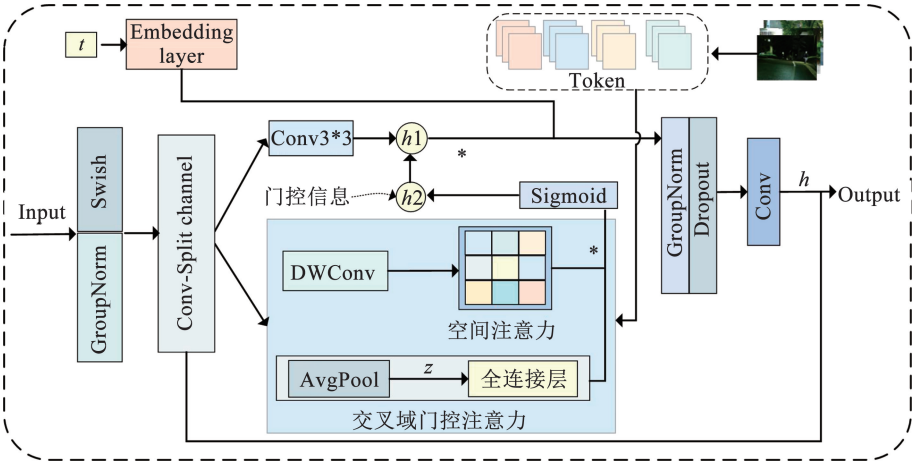


图 3　门控特征选择模块

Fig. 3　Gated feature selection module

1.3　跨层注意力融合模块

为提取更全面的全局语义信息和局部细节特征，本文设计了跨层注意力融合模块，如图 4 所示。双分支输入图像使用带有步长小于卷积核大小的卷积层（Patch-Embed 层），使得提取的图像块之间存在重叠区域，从而更好地捕捉局部信息。模型采用双阶段的逐步增强策略，第 1 阶段中，输入图像通过带有条件调制的 R-Transformer 块进行初步特征提取与调整，以捕获多模态图像间的浅层结构信息，而后通过全局–局部空间注意力模块实现跨分支的特征交互与融合，动态分配不同模态的重要性权重。在第 2 阶段，融合后的特征被进一步送入新的 R-Transformer 块中，强化深层语义信息的建模能力，而后再次通过全局–局部空间注意力模块进行特征整合，从更大的感受野中融合结构与上下文信息，使模型从浅层到深层逐步提升对多模态图像的理解与表达能力。同时，通过位置编码与多层感知机处理时间步长信息可得到噪声嵌入向量，该向量通过双阶段逐步增强中 R-Transformer 块后的条件特征变换模块（FeatureWiseAffine），在时间步嵌入向量 $\boldsymbol{T}$ 对特征图缩放与偏移的控制下，实现对噪声条件的感知。两个R-Transformer块通过自注意力，增强跨层拼接的多尺度特征表达。第 1 次拼接将上采样后的高级语义特征与第 1 阶段的低级细节特征拼接，使得特征兼具语义深度与细节精度；第 2 次拼接将解码器输出特征与初次融合并调整尺寸的特征拼接，强化特征表达并保留中间信息，以恢复图像细节。最后，通过 Transformer 块对融合特征进一步优化，输出同时保留多模态细节信息与热辐射特征的高质量融合图像。

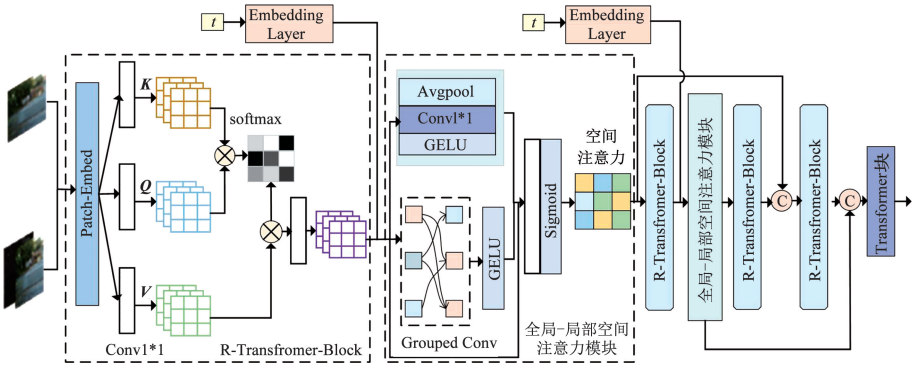


图 4　跨层注意力融合模块

Fig. 4　Cross-layer attention fusion module

传统方法对不同层次的特征直接拼接或相加，未考虑通道和空间维度的重要性差异。跨层注意力融合模块实现轻量级多尺度特征融合，通过全局–局部双路特征提取、通道注意力校准和空间注意力

增强三阶段处理,融合来自不同层的特征图。阶段1通过全局平均池化压缩空间信息,1 × 1 卷积降维,上采样提取全局信息,而后通过分组卷积和 GELU 激活函数增强非线性以提取局部特征,具体如式(9) ~ (11)所示:

$$F_{\text{global}} = \text{Upsample}(\text{Conv}_{1\times1}(\text{GAP}(F_t))) \quad (9)$$

$$F_{\text{local}} = \text{GELU}(\text{GroupConv}(F_t)) \quad (10)$$

$$F_{\text{concat}} = \text{Concat}(F_t, F_{\text{global}}, F_{\text{local}}) \quad (11)$$

式中 F_t 为原始输入特征。拼接原始、全局、局部特征后,阶段 2 通过 1 × 1 卷积和 Sigmoid 生成通道注意力图,对原始特征进行通道注意力加权,来完成通道校准,如式(12)和式(13)所示:

$$M_{\text{c}} = \sigma(\text{Conv}_{1\times1}(F_{\text{concat}})) \quad (12)$$

$$F_{\text{channel}} = M_{\text{c}} \odot F_t \quad (13)$$

式中:M_{c} 为注意力权重,σ 代表 Sigmoid 函数,$\odot$ 表示逐通道加权。阶段 3 在对融合特征应用多头自注意力后,与原始特征进行残差相加,实现空间注意力增强。如式(14) ~ (16)所示:

$$\text{Attn}(F_{\text{channel}}) = \text{softmax}\left(\frac{F_{\text{channel}}W_Q\,(F_{\text{channel}}W_K)^{\text{T}}}{\sqrt{d_{\text{k}}}}\right)\cdot F_{\text{channel}}W_V \quad (14)$$

$$F_{\text{spatial}} = \text{Norm}(F_{\text{channel}} + \text{Attn}(F_{\text{channel}})) \quad (15)$$

$$F_{\text{output}} = F_{\text{spatial}} \quad (16)$$

全局–局部空间注意力模块融合局部与全局信息,避免了高频信息丢失,通道注意力抑制噪声主导的通道,空间注意力强化有效区域,通过轻量级多尺度特征融合与注意力机制,在细节恢复与计算效率方面,优于传统卷积和普通 Transformer 架构。

2 实验结果与分析

2.1 实验概况与数据说明

2.1.1 实验平台及参数设置

实验硬件平台操作系统为 Windows11,硬件配置为3th Gen Intel(R) Core(TM) i9-13900HX 2.20 GHz 处理器和 RTX 4070Ti 16G GPU。实验训练阶段和测试阶段均在 Pytorch 框架下实现,软件环境为 PyTorch 1.13.1 + cu117、CUDA 12.7。训练过程中,优化器采用 Adam,初始学习率为 0.000 1,动态特征提取器模块中专家卷积块的数量为 $N = 4$。

2.1.2 数据集

在训练阶段,采用多光谱道路场景 MSRS 数据集中的 1 083 对数据作为训练集。在测试阶段,分别从 Harvard 数据集、MSRS 数据集和 RoadSence 数据集中选择93 对、361 对和 30 对图像进行实验验证。

2.1.3 对比算法及评价指标

为验证本文融合网络的性能,选择了 9 种典型的深度学习算法与其进行对比,即 SeAFusion[20]、MUFusion[21]、U2Fusion[22]、DDFM、MetaFusion[23]、GIFusion[24]、BTSFusion[25]、SDCFusion[26] 和 MLFuse[27] 融合算法。

为评价网络模型的有效性,选择了 7 种客观评价指标来衡量融合结果,包括信息熵[28](EN)、互信息[29](MI)、基于结构相似性[30](SSIM)、峰值信噪比[31](PSNR)、空间频率[32](SF)、边缘强度[33]($Q^{\text{AB/F}}$)及相关系数[34](CC)。其中,EN 是衡量图像信息量的重要指标,数值越大说明融合图像包含信息越丰富。MI 反映融合图像和源图像之间的信息重叠度,互信息越大,融合质量越好。SSIM 用于评估融合图像和源图像的结构一致性,数值越接近 1,融合效果越好。PSNR 通过衡量图像有效信息与噪声之间的比率来反映图像是否失真,数值越大,图像融合质量越好。SF 用于衡量图像灰度的变化,数值越大,图像越清晰,融合质量越好。$Q^{\text{AB/F}}$ 用于量化边缘信息传递能力,数值越大,边缘保留越完整。CC 用于衡量融合图像与源图像的空间线性相关程度,其值越接近 1 或者 –1,表示融合图像包含源图像信息越多,融合效果越好。

2.2 图像融合对比实验

2.2.1 MSRS 数据集实验验证

在 MSRS 数据集中选取白天和夜间共 6 组具有代表性的红外与可见光图像场景,对 10 种方法进行主观和客观比较。图 5 为 MSRS 数据集 6 组场景的融合结果,场景一、场景二、场景三、场景四为白天景象,场景五、场景六为夜间景象。通过图 5 可以看到,SeAFusion 算法引入边缘注意力机制,更好地保留了可见光图像中的边缘和纹理细节信息,但当图像中不同区域之间的亮度、颜色差异较小时,易导致目标与背景难以区分,如场景二的树木部分。U2Fusion 算法可以捕捉图像细节信息,但存在纹理细节模糊的问题,使图像色彩保真度严重降低。MUFusion 算法虽然信息融合全面,但对边缘细节纹理的保护效果不佳,如场景五灯的边缘。DDFM 算法融合后图像具有目标凸显性,但合成图像视觉上较暗,导致融合图像缺失部分信息。MetaFusion 算法对图像中的小目标或存在遮挡的场景处理存在不足,融合结果的目标显著性下降,如场景三中的广告牌。GIFusion 算法使用的对抗训练容易陷入模式崩溃,导致融合结果出现色彩失真,如场景四中的楼房。BTSFusion 算法未能有效保留红外图像中较微弱的热辐射信息,对场景六中的指示牌边缘处理不够清晰。SDCFusion 算法对分割任务依赖严重,分割网络的滞后可能导致融合结果与实际场景的时间错位,场景四中对移动的车辆融合效果不佳。MLFusion 算法聚焦于像素层面的特征融合,却对物体类别等高层语义信息的利用不够充分。本文算法无论在白天还是夜间场景,融合图像均能自适应保

留有效信息，目标与背景的边界过渡平滑，无明显伪影或色彩断层，关键目标如车辆、行人的热信号被精准强化，即使处于树林、阴影等复杂背景中仍能够快速被识别。



图 5　MSRS 数据集 6 组场景的融合结果

Fig. 5　Fusion results of six scenarios from the MSRS dataset

6 组源图像的融合结果表明,本文提出的融合网络生成的图像兼具高层语义信息与底层纹理细节,色彩还原度高且贴近真实场景。为了使融合结果更具说服力,本文进一步选取 MSRS 数据集中 30 对图像客观评价指标的均值对融合结果进行分析。表 1 展示了不同融合算法在 MSRS 数据集上的定量结果比较,可以看到,本文算法在 EN、MI、SSIM、PSNR、SF、$Q^{AB/F}$ 和 CC 等客观评价指标中均取得了较好的结果,在 MI、PSNR、$Q^{AB/F}$、CC 上取得最优结果,最优的 MI 结果表明,融合算法有效提取了可见光图像的纹理细节和红外图像的热目标信息,整合了这些互补信息,提升了图像的综合可读性。最优的 PSNR 结果说明,融合算法在保留源图像细节的同时,有效抑制了噪声、模糊或伪影等失真。最优的 $Q^{AB/F}$ 表明,融合算法能够有效提取出源图像中的轮廓、纹理、边界信息。最优的 CC 结果表明,融合图像保留了源图像的整体亮度、对比度和结构特征,视觉效果更佳。因此,通过主观评估与客观指标分析,本文算法的融合图像在纹理细节、边缘分布等底层特征,结构、语义等高层特征方面优于其他对比算法。

表 1 不同融合算法在 MSRS 数据集上的定量结果比较

Tab. 1 Quantitative comparison of different fusion algorithms on the MSRS dataset

算法	EN	MI	SSIM	PSNR	SF	$Q^{AB/F}$	CC
SeAFusion[20]	7.065 4	4.358 8	0.631 0	21.205 4	13.032 7	0.655 0	0.984 2
MUFusion[21]	5.408 1	1.562 5	0.588 7	16.167 0	11.212 7	0.383 0	0.765 3
U2Fusion[22]	5.629 0	1.932 5	0.596 0	17.011 9	9.367 5	0.326 2	0.733 9
DDFM[14]	6.667 0	2.900 3	0.636 3	17.460 0	9.030 1	0.434 9	0.952 6
MetaFusion[23]	6.652 0	1.690 9	0.533 3	15.698 4	13.249 6	0.353 1	0.879 2
GIFusion[24]	6.756 0	2.760 9	0.653 7	17.617 3	12.156 6	0.602 8	0.953 5
BTSFusion[25]	6.734 7	2.372 8	0.585 5	17.128 3	**13.950 4**	0.500 1	0.926 0
SDCFusion[26]	**7.090 3**	4.237 0	0.629 7	21.013 3	13.565 7	0.645 0	0.982 3
MLFuse[27]	6.740 6	3.131 8	0.637 8	18.269 1	12.071 9	0.560 9	0.970 0
Ours	7.078 7	**4.582 1**	**0.641 1**	**21.550 2**	13.642 9	**0.655 2**	**0.984 4**

2.2.2 Harvard 数据集实验验证

为了进一步验证本文算法的优越性,从 Harvard 测试集中选取 30 组包含 MRI-CT、MRI-PET 和 MRI-SPECT 的具有代表性的脑部医学图像进行分析,医学图像融合目标是整合 CT/MRI 的解剖结构与 PET/SPECT 的代谢功能的互补信息,提升病灶辨识度、诊断准确性,为临床提供更全面的决策依据。图 6为不同融合算法在 Harvard 数据集上的定性结果比较,通过图 6 可以看出,U2Fusion、MUFusion、SwinFusion 算法淡化了微小病灶边缘、纹理,无法有效突出 CT 中高密度对比增强区域。DDFM 算法融合后细节易模糊,对不同模态特征权重分配不够合理,过度强化 CT 的轮廓信息,导致 MRI 中软组织纹理细节被弱化,无法清晰呈现病灶与周围软组织的关系。MetaFusion 算法融合后微小结构边缘模糊,与周围组织对比度降低,不利于分析病灶。GIFusion 算法无法保留原始图像的强度分布,色彩保真度欠佳,丢失了部分结构信息。TarDAL 算法[35]难以精准权衡代谢功能信息与解剖结构信息,使得 MRI 图像里软组织的纹理、边界等关键特征被弱化。SDCFusion 算法对脑部微小血管、神经纤维等精细结构处理不佳,融合后易出现细节模糊、丢失。MLFusion 算法的动态调整能力不足,对于解剖结构复杂的部位,MRI 的细节信息被 PET 的代谢信号干扰,导致解剖结构显示不清。而本文算法有效抑制了噪声与伪影,保留了关键解剖信息与代谢功能信息,在细节纹理、边缘清晰度及信息保真度上均优于其他对比算法。此外,选取了 EN、MI、SSIM、PSNR、SF、$Q^{AB/F}$ 和 CC 对这些先进方法进行定量评估,表 2 为不同融合算法在 Harvard 数据集上的定量结果比较。如表 2 所示,本文方法在所有对比算法的大多数评价指标上均取得了最优或次优结果,优于其他对比方法,且在指标 MI、SSIM、$Q^{AB/F}$、CC 上取得最优结果,表明本文方法在细节纹理、边缘信息保留以及可视化方面优于其他模型方法。

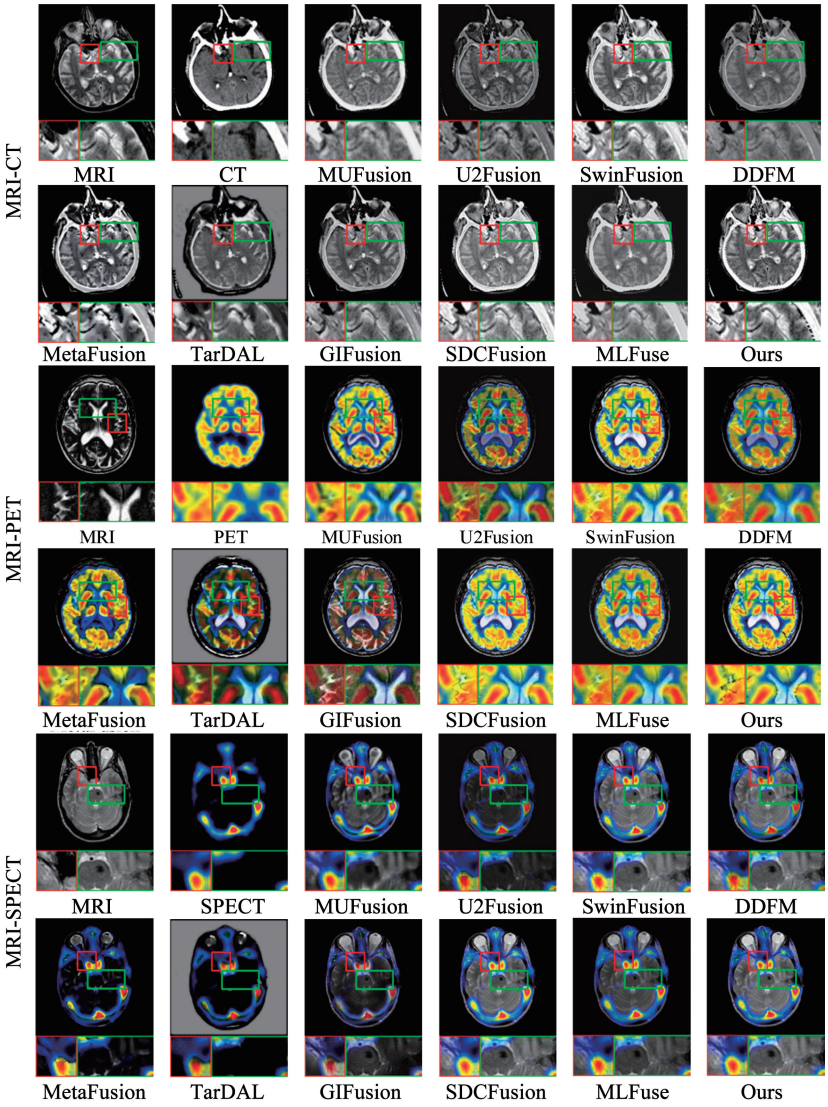


图 6　不同融合算法在 Harvard 数据集上的定性结果比较

Fig. 6　Qualitative comparison of different fusion algorithms on the Harvard dataset

表 2　不同融合算法在 Harvard 数据集上的定量结果比较

Tab. 2　Quantitative comparison of different fusion algorithms on the Harvard dataset

算法	EN	MI	SSIM	PSNR	SF	$Q^{AB/F}$	CC
MUFusion[21]	5.068 5	2.498 5	0.515 8	14.801 9	37.006 1	0.151 2	0.850 1
U2Fusion[22]	4.690 5	2.453 3	0.188 7	15.247 0	33.289 5	0.167 2	0.831 0
SwinFusion[12]	5.064 8	2.896 6	0.581 0	13.645 1	46.276 1	0.304 0	0.785 2
DDFM[14]	4.410 8	2.760 0	0.642 8	15.200 7	36.875 3	0.257 5	0.767 8
MetaFusion[23]	4.318 7	2.165 8	0.631 7	15.170 5	30.272 4	0.138 4	0.836 7
GIFusion[24]	5.283 9	2.317 0	0.552 5	15.724 7	45.651 7	0.316 6	0.711 8
TarDAL[35]	5.242 9	2.003 9	0.231 5	8.339 0	39.382 1	0.101 2	0.834 9
SDCFusion[26]	**5.343 5**	2.988 5	0.353 3	13.418 9	**56.909 5**	0.313 0	0.816 1
MLFuse[27]	4.950 4	2.672 4	0.390 6	14.320 2	40.101 5	0.205 2	0.850 1
Ours	5.268 3	**3.022 3**	**0.646 5**	**15.285 9**	56.192 3	**0.319 6**	**0.851 9**

2.2.3　RoadScene 数据集主客观评价

本文选取 RoadScene 数据集中的 20 组源图像进行泛化性测试，图 7 为不同融合算法在 RoadScene 数据集上的定性结果比较，可以看到 SeAfusion、MetaFusion 算法亮度表现良好，但其可见光图像的纹理细节、结构边缘等信息未能清晰展现，如树叶边

缘。U2Fusion、DDFM、GIFusion、MLFusion 算法过度侧重红外图像信息,可见光图像中的关键细节,如树叶、山脉的轮廓信息模糊。MUFuison 算法纹理细节模糊,汽车边缘识别不清。SDCFusion、BTSFusion 算法呈现了可见光图像的纹理细节以及红外图像的显著信息,整体效果较好,但融合图像色彩欠佳。从视觉对比结果可以看出,本文算法在清晰还原场景纹理细节的同时,有效保留了源图像的色彩信息,在整体视觉质量上展现出显著优势。表 3 为不同融合算法在 RoadScene 数据集上的定量结果比较,可以看到,本文算法在 MI、SSIM、$Q^{AB/F}$、CC 等指标上均表现优异,EN、SF、PSNR 偏低,是因为本文方法更关注红外显著信息和可见光细节纹理细节,但 EN 指标主要衡量图像的亮度信息,SF 指标则反映图像中像素灰度值的变化,而 PSNR 主要关注图像整体的像素值差异。对比分析可知,本文融合算法纹理清晰,色彩保真度高,在目标显著性和整体视觉效果方面均表现更优。

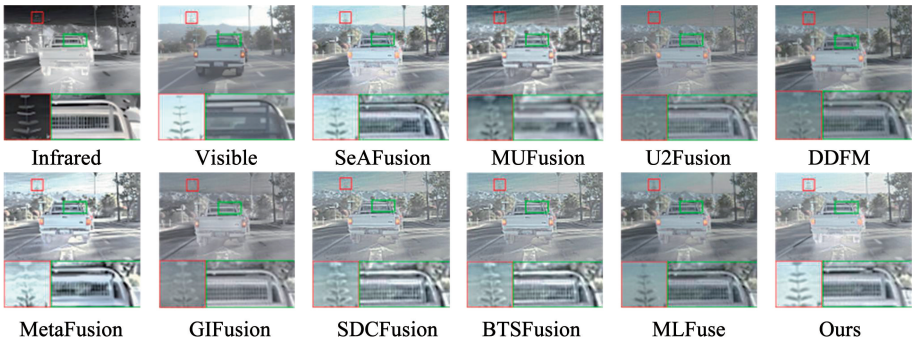


图 7 不同融合算法在 RoadScene 数据集上的定性结果比较

Fig. 7 Qualitative comparison of different fusion algorithms on the RoadScene dataset

表 3 不同融合算法在 RoadScene 数据集上的定量结果比较

Tab. 3 Quantitative comparison of different fusion algorithms on the RoadScene dataset

算法	EN	MI	SSIM	PSNR	SF	$Q^{AB/F}$	CC
SeAFusion[20]	7.433 1	3.121 0	0.650 0	14.059 8	18.485 9	0.118 0	0.661 3
MUFusion[21]	**7.438 0**	2.096 0	0.609 4	15.602 8	13.211 7	0.120 0	0.416 0
U2Fusion[22]	7.009 7	2.882 5	0.694 3	**15.982 3**	13.762 4	0.106 9	0.382 5
DDFM[14]	7.299 8	1.936 2	0.327 8	13.698 3	13.071 6	0.067 5	0.484 6
MetaFusion[23]	7.179 6	2.154 4	0.564 1	12.866 0	21.212 1	0.113 1	0.666 9
GIFusion[24]	7.222 4	1.863 4	0.338 1	14.953 5	16.585 9	0.064 3	0.347 9
BTSFusion[25]	7.300 7	2.237 6	0.608 3	15.735 0	**22.758 9**	0.092 6	0.612 3
SDCFusion[26]	7.362 9	2.727 7	0.655 4	15.420 0	18.001 6	0.122 0	0.661 4
MLFuse[27]	7.274 0	3.010 2	0.685 5	15.364 7	15.270 6	0.116 5	0.629 0
Ours	7.426 6	**3.667 8**	**0.738 1**	15.801 9	17.725 6	**0.124 1**	**0.690 1**

2.3 消融实验

为验证本文算法所提各个模块的有效性,选取 Harvard 数据集中 20 组图像进行验证,设计了 6 组消融实验。去掉全局-局部空间注意力模块,其余模块不变,记为 DFE + GCFS;去掉门控特征选择模块,其余模块不变,记为 DFE + GLSA;去掉动态特征提取器模块,其余模块不变,记为 GCFS + GLSA;将动态特征提取器模块使用的专家卷积块设置为 $N=3$,其余模块不变,记为 DFE_3;将动态特征提取器模块使用的专家卷积块设置为 $N=5$,其余模块不变,记为 DFE_5。实验验证了使用专家卷积块 $N=4$ 效果最佳。使用动态特征提取器模块提取特征,门控特征选择模块增强特征表达,全局-局部空间注意力模块生成融合图像,用于观察完整模型架构下的融合图像,记为 ALL。

为直观对比不同模块对融合效果的影响,本文随机选取 Harvard 数据集两组典型场景的融合结果进行主观分析,图 8 为上述 6 种消融实验的定性结果对比。由图 8 可以看出:去掉全局-局部空间注意力模块(DFE + GCFS),融合图像纹理细节信息模糊;去掉门控特征选择模块(DFE + GLSA),图像变暗,可以看到融合图像背景细节信息丢失;去掉动态特征提取器模块(GCFS + GLSA),导致网络关注显著信息的能力下降;将动态特征提取器模块使用的

专家卷积块设置为 $N=3$（DFE_3），融合图像变暗，红外信息缺失；将动态特征提取器模块使用的专家卷积块设置为 $N=5$（DFE_5），融合图像对比度不佳。综上所述，本文所提模型有效保留了纹理细节信息，同时视觉效果更佳。此外，选取 EN、MI、SSIM、PSNR、SF、$Q^{AB/F}$ 和 CC 指标作为消融实验的客观评价指标，表 4 为消融实验中 6 种不同网络结构的客观评价指标。由表 4 可以看到，本文算法在融合图像中既很好地保留了显著目标，同时又增强了图像中的细节和纹理信息，且更符合人眼视觉。

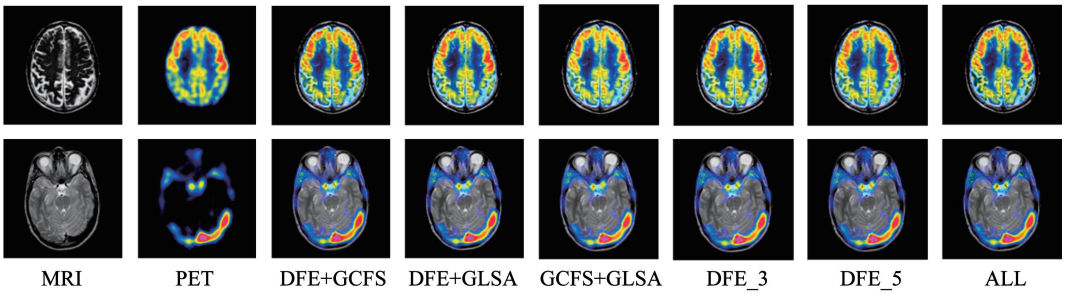


图 8　消融实验中 6 种不同网络结构的定性结果比较

Fig. 8　Qualitative comparison of six different network structures in ablation experiments

表 4　消融实验中 6 种不同网络结构的客观评价指标

Tab. 4　Objective evaluation metrics for six different network structures in ablation experiments

模型	EN	MI	SSIM	PSNR	SF	$Q^{AB/F}$	CC
DFE + GCFS	3.592 6	2.107 1	0.745 6	15.802 1	47.258 7	0.296 3	0.812 0
DFE + GLSA	3.220 5	1.970 1	0.748 2	16.451 2	44.973 5	0.275 1	0.887 8
GCFS + GLSA	3.404 5	2.073 2	0.530 2	15.468 1	46.841 0	0.267 0	0.816 1
DFE_3	3.384 5	2.068 4	0.764 0	16.113 9	51.178 4	0.251 0	0.872 5
DFE_5	3.172 7	1.985 9	0.756 8	16.344 0	45.127 8	0.294 4	0.878 7
ALL	**3.674 7**	**2.436 4**	**0.756 6**	**15.221 1**	**45.890 4**	**0.297 7**	**0.891 4**

3　结　论

1）本文设计了一种动态门控扩散去噪与跨层注意力的多模态图像融合网络，通过动态门控扩散去噪模块增强关键信息的提取能力，采用跨层注意力融合模块融合跨层信息，有效提升扩散过程中不同噪声水平下的去噪能力以及特征提取能力，实现了高质量多模态图像融合。

2）设计了动态特征提取器和门控特征选择模块，利用动态特征提取器中动态卷积核实现输入特征自适应处理，利用门控特征选择模块产生的门控信号控制信息流，增强关键信息的提取与保留能力，完成图像的特征提取任务。

3）构建了跨层注意力融合模块，通过全局-局部空间注意力模块进行跨层特征提取和融合，融合局部与全局信息，避免了高频信息丢失。

4）在 MSRS 和 RoadScene 以及 Harvard 数据集上的实验结果表明，本文方法在 EN、MI、SSIM、PSNR、SF、$Q^{AB/F}$ 和 CC 等客观评价指标上，相较于其他 9 种高水平方法平均提高了 5.11%、52.84%、16.77%、13.90%、8.58%、29.66%、15.93%，证明本文算法不仅保留了丰富的纹理细节信息以及完整的解剖结构信息，同时还拥有高清晰度，展现出较强的泛化能力，能够很好地处理各种光照环境场景和医学影像诊断场景下的图像融合任务。

参考文献

[1] ZHOU M, ZHANG Y, XU X, et al. Edge-enhanced dilated residual attention network for multimodal medical image fusion[C]//2024 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM). Lisbon, Portugal: IEEE, 2024: 4108. DOI: 10.1109/BIBM62325.2024.10821967

[2] ZHU Y, XIAO M, ROBBINS D, et al. Walking representation and simulation based on multi-source image fusion and multi-agent reinforcement learning for gait rehabilitation[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2024, 156: 102945. DOI: 10.1016/j.artmed.2024.102945

[3] TANG L, XIANG X, ZHANG H, et al. DIVFusion: Darkness-free infrared and visible image fusion[J]. Information Fusion, 2023, 91: 477. DOI: 10.1016/j.inffus.2022.10.034

[4] ZHANG W, LU Y, ZHENG H, et al. MBRARN: Multibranch residual attention reconstruction network for medical image fusion[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2023, 61(11): 3067. DOI: 10.1007/s11517-023-02902-2

[5] TIAN J, SUN D, GAO Q, et al. A novel infrared and visible image fusion algorithm based on global information-enhanced attention network[J]. Image and Vision Computing, 2024, 149: 105161. DOI: 10.1016/j.imavis.2024.105161

[6] SHI Y, SHI C, WENG Z, et al. CrossFuse: Learning infrared and

visible image fusion by cross-sensor top-k vision alignment and beyond[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2025, 35(8): 7579. DOI:10.1109/TCSVT.2025.3544746

[7]MA W, WANG K, LI J, et al. Infrared and visible image fusion technology and application: A review [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2023, 23(2): 599. DOI:10.3390/s23020599

[8]王瑾春, 马萍, 张宏立, 等. 基于语义驱动的红外与可见光图像交互融合[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(9): 56
WANG Jinchun, MA Ping, ZHANG Hongli, et al. Semantic-driven interactive fusion of infrared and visible light images[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(9): 56. DOI:10.11918/202406056

[9]MERGIN A A, PREMI M S G. Convolutional neural networks (CNN) with quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO)-based medical image fusion[J]. International Journal of Image and Graphics, 2024, 24(5): 2340005. DOI:10.1142/S0219467823400053

[10]ZHOU Y, YANG X, LIU S, et al. Multimodal medical image fusion network based on target information enhancement[J]. IEEE Access, 2024, 12: 70851. DOI:10.1109/ACCESS.2024.3402965

[11]RAM PRABHAKAR K, SAI SRIKAR V, VENKATE BABU R. DeepFuse: A deep unsupervised approach for exposure fusion with extreme exposure image pairs [C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice, Italy: IEEE, 2017: 4724. DOI: 10.1109/ICCV.2017.505

[12]MA J, TANG L, FAN F, et al. SwinFusion: Cross-domain long-range learning for general image fusion via swin transformer[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(7): 1200. DOI:10.1109/JAS.2022.105686

[13]XI X, JIN X, JIANG Q, et al. EMA-GAN: A generative adversarial network for infrared and visible image fusion with multiscale attention network and expectation maximization algorithm [J]. Advanced Intelligent Systems, 2023, 5(11): 17. DOI: 10.1002/aisy.202300310

[14]ZHAO Z, BAI H, ZHU Y, et al. DDFM: Denoising diffusion model for multi-modality image fusion [C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Paris, France: IEEE Computer Society, 2023: 8082. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.00742

[15]YUE J, FANG L, XIA S, et al. Dif-fusion: Toward high color fidelity in infrared and visible image fusion with diffusion models[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2023, 32: 5705

[16]YI X, TANG L, ZHANG H, et al. Diff-IF: Multi-modality image fusion via diffusion model with fusion knowledge prior [J]. Information Fusion, 2024, 110: 102450. DOI:10.1016/j.inffus.2024.102450

[17]ZHANG H, CAO L, MA J. Text-DiFuse: An interactive multi-modal image fusion framework based on text-modulated diffusion model[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2024, 37: 39552

[18]GAO X, YANG S, LIU J. PTDiffusion: Free lunch for generating optical illusion hidden pictures with phase-transferred diffusion model [C]//Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference. Nashville, TN, USA: Computer Vision Foundation, 2025: 18240

[19]WEI X, GUO W, YU W, et al. OSDM-MReg: Multimodal image registration based one step diffusion model [J]. arXiv: 2504.06027. DOI: 10.48550/arXiv.2504.06027

[20]TANG L, YUAN J, MA J. Image fusion in the loop of high-level vision tasks: A semantic-aware real-time infrared and visible image fusion network[J]. Information Fusion, 2022, 82: 28. DOI:10.1016/j.inffus.2021.12.004

[21]CHENG C, XU T, WU X-J. MUFusion: A general unsupervised image fusion network based on memory unit [J]. Information Fusion, 2023, 92: 80. DOI:10.1016/j.inffus.2022.11.010

[22]XU H, MA J, JIANG J, et al. U2Fusion: A unified unsupervised image fusion network[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 44(1): 502. DOI:10.1109/TPAMI.2020.3012548

[23]ZHAO W, XIE S, ZHAO F, et al. Metafusion: Infrared and visible image fusion via meta-feature embedding from object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2023: 13955. DOI:10.1109/CVPR52729.2023.01341

[24]WANG W, DENG L J, VIVONE G. A general image fusion framework using multi-task semi-supervised learning[J]. Information Fusion, 2024, 108: 102414. DOI:10.1016/j.inffus.2024.102414

[25]QIAN Y, LIU G, TANG M C R. BTSFusion: Fusion of infrared and visible image via a mechanism of balancing texture and salience[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 173: 107925. DOI:10.1016/j.optlaseng.2023.107925

[26]LIU X, HUO H, LI J, et al. A semantic-driven coupled network for infrared and visible image fusion[J]. Information Fusion, 2024, 108: 102352. DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102352

[27]LEI J, LI J, LIU J, et al. MLFuse: Multi-scenario feature joint learning for multi-modality image fusion[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2025, 27: 3880. DOI: 10.1109/TMM.2025.3535355

[28]VENKATESAN B, RAGUPATHY U S. An investigation on multimodal brain image fusion in the time-frequency domain using wavelet transforms[J]. IETE Journal of Research, 2024, 70(6): 11. DOI:10.1080/03772063.2023.2280670

[29]LIU J, WU G, LIU Z, et al. Infrared and visible image fusion: From data compatibility to task adaption[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024, 47(4): 2349. DOI: 10.1109/TPAMI.2024.3521416

[30]XU S, ZHAO Z, BAI H, et al. Hipandas: Hyperspectral image joint denoising and super-resolution by image fusion with the panchromatic image [C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2025: 12002. DOI:10.1109/CVPR52729.2023.01341

[31]DU S, ZOU Y, WANG Z, et al. Unsupervised hyperspectral and multispectral image fusion via self-supervised modality decoupling[EB/OL]. (2024-12-06)[2026-04-29]. arXiv:2412.04802. DOI: 10.48550/arXiv.2412.04802

[32]ZHONG Y, HE J, LIANG Z, et al. Medical image fusion for high-level analysis: A mutual enhancement framework for unaligned PAT and MRI[EB/OL]. (2024-07-04)[2026-04-29]. arXiv:2407.03992. DOI: 10.48550/arXiv.2407.03992

[33]CHENG C, XU T, WU X J, et al. TextFusion: Unveiling the power of textual semantics for controllable image fusion [J]. Information Fusion, 2025, 117: 102790

[34]JIANG C, LIU X, ZHENG B, et al. HSFusion: A high-level vision task-driven infrared and visible image fusion network via semantic and geometric domain transformation [EB/OL]. (2024-07-13)[2026-04-29]. arXiv:2407.10047. DOI:10.48550/arXiv.2407.10047

[35]LIU J, FAN X, HUANG Z, et al. Target-aware dual adversarial learning and a multi-scenario multi-modality benchmark to fuse infrared and visible for object detection[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). New Orleans, LA, USA: IEEE Computer Society, 2022: 5802. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00571

(编辑 吕雪梅)

DOI:10.11918/202504073

砂浆在冻融早期的空间损伤演化机理

陈思远[1],林宝臣[1,2],张春良[2],肖会刚[1]

(1.哈尔滨工业大学 土木工程学院,哈尔滨 150090;2.黑龙江省黑建一建筑工程有限责任公司,哈尔滨 150090)

摘 要:受温度与水分传递方向的影响,砂浆在冻融早期的损伤发展呈现出空间特征。然而,现有冻融损伤监测方法多聚焦于试件整体的平均性能,忽略了局部损伤演化的差异性。为定量评估空间位置对砂浆冻融早期损伤的影响,并深入揭示其演化机制,本文提出一种基于布拉格光纤光栅传感器的实时、原位应变监测方法,并测试了冻融早期砂浆内部不同空间位置的应变。结果表明,在冻融早期阶段,砂浆上层区域应变幅值高于中层;随着冻融循环次数的增加,峰值应变持续上升,残余应变出现;微观形貌分析结果验证了以残余应变判断冻融损伤空间差异的可靠性。基于此,本文进一步构建了考虑空间位置的早期冻融损伤发展模型。由宏观性能测试与局部应变对比分析结果可知,砂浆在冻融早期的损伤以表层开裂为主,虽然该现象对宏观性能弱化的影响较小,但能够为环境水分进入砂浆内部提供新的传输通道,进一步加剧冻融损伤的演化。

关键词:冻融早期;空间特征;FBG 测试;局部应变;损伤发展

中图分类号:TU528 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0045-09

Evolution mechanism of spatial damage of mortar in the early freeze-thaw stage

CHEN Siyuan[1], LIN Baochen[1,2], ZHANG Chunliang[2], XIAO Huigang[1]

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Heilongjiang Province Construction Engineering Group Co., Ltd., Harbin 150090, China)

Abstract: Affected by the direction of temperature and moisture transfer, the damage development of mortar in the early freeze-thaw (F-T) stage exhibits spatial characteristics. However, existing F-T damage monitoring methods mostly focus on the overall average performance of specimens, ignoring the differences in local damage evolution. To quantitatively evaluate the influence of spatial position on the early F-T damage of mortar and further reveal its evolution mechanism, this paper proposed a real-time and in-situ strain monitoring method based on fiber bragg grating sensors and tested the strain at different spatial positions inside mortar during the early F-T stage. Results show that the strain amplitude in the upper layer of mortar is higher than that in the middle layer during the early F-T stage; with the increase of F-T cycles, the peak strain continues to rise, and residual strain appears; micro-morphology analysis results verify the reliability of using residual strain to judge the spatial difference of F-T damage. Based on this, this paper further established an early F-T damage evolution model considering spatial position. The comparative analysis results of macroscopic performance tests and local strain show that the damage of mortar in the early F-T stage is dominated by surface cracking. Although this phenomenon has little effect on the degradation of macroscopic performance, it can provide new transmission channels for environmental moisture to enter the interior of mortar, further aggravating the evolution of F-T damage.

Keywords: early freeze-thaw stage; spatial characteristic; FBG test; local strain; damage development

我国东北、华北、西北及青藏高原与川西等地区地域辽阔,负温季节漫长,水泥基材料的冻融损伤是基础设施面临的主要耐久性问题之一。自 1945 年 Powers[1-3] 提出静水压、渗透压等冻融损伤理论后,关于水泥基材料冻融损伤的研究日渐深入,并形成了较为成熟的抗冻性能检测方法及判别依据。例如,Bumanis 等[4-6] 使用抗压强度损失率作为冻融损伤评估参数,其研究表明随着冻融循环次数的增加,试件的抗压强度下降。与之相似,Alrashed 等[7-9] 使用动弹性模量作为冻融损伤评估参数,并基于相对动弹模建立了水泥基材料在冻融过程中的损伤演化模型。此外,Hassan 等[10-11] 根据试件表层剥落特征,使用质量损失率来表征混凝土冻融损伤程度。

收稿日期:2025-04-26;**录用日期**:2025-06-12;**网络首发日期**:2025-06-17
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250617.1240.005
基金项目:国家自然科学基金联合基金(U24A20165)
作者简介:陈思远(1995—),女,博士研究生;肖会刚(1977—),男,教授,博士生导师
通信作者:肖会刚,xiaohg@hit.edu.cn

上述研究从宏观层面探究了水泥基材料冻融损伤的演化过程,并在一定程度上解决了寒区工程的选材和应用问题,但这些方法聚焦于试件的整体性能变化。由热传导及水分传输路径可知,空间位置对冻融损伤存在影响,如试件表层与环境之间的热交换最直接。此外,由于负温抽吸作用[12-13],环境水最先抵达试件表层并对其进行水分补给,使其率先达到局部临界饱和度并发生冻融损伤。因此,以试件"平均性能"表征冻融损伤的方法,在一定程度上忽视了损伤演化的空间差异性。尤其是在冻融早期,试件表层损伤的出现,对其整体性能丧失的影响并不显著,但表层的冻融损伤可为后续冻融过程中的水分传输提供新通道。因此,定量表征不同空间位置的冻融损伤,对深入探究寒区水泥基材料的抗冻耐久性具有重要意义。

应变是一个无量纲参数,可用于描述载荷作用下的局部相对变形,进而反映材料的局部损伤情况[14]。由于温度可以被视作一种环境载荷,因此,可以使用应变评估砂浆在冻融循环过程中的空间损伤演变过程。目前,在冻融过程中,多数研究采用应变片进行应变监测[15-17],但该方法存在一定的局限性:一方面,应变片本身因温度变化引起的误差无法避免;另一方面,应变片易发生漂移,在长期测试过程中不稳定。为了保证冻融过程中应变测试数据的可靠性,迫切需要一种高稳定性、高精度的应变测试方法。布拉格光纤光栅测试(fiber bragg grating, FBG)作为一种新型无损监测技术[18],其依靠光信号传递来监测应变和温度[19-20],具有高分辨率、高灵敏度、高稳定性和高精度[21-22]。因此,适合用于长期耐久性问题的监测。

然而,由于 FBG 尺寸较小且脆弱,在浇筑过程中,嵌入的 FBG 极易损坏[23]。目前,关于 FBG 传感器在水泥基材料中的应用大多需要进行特殊处理。例如:李建新等[24]通过外部固定 FBG 传感器的方式监测了混凝土三点弯曲开裂;Kesavan 等[25]采用封装 FBG 的方式测试了混凝土在压缩荷载下的应变响应;Paul 等[26]在小尺寸试件(横截面 25 mm × 25 mm)内部嵌入 FBG 传感器,并对高强砂浆的热膨胀系数进行了测试。值得注意的是,以上测试方法均限制了 FBG 的应用场景。利用小尺寸 FBG 对砂浆内部进行多点应变测试,在应用层面上仍存在困难。为此,本文提出一种先埋后拔的传感器安装方法,通过预埋空心钢管对 FBG 传感器进行防护,待灌注成型后将钢管拔出,从而实现 FBG 传感器在砂浆内部的精准埋设。在此基础上,对冻融早期砂浆试件开展基于空间位置的损伤演化机理研究;同时,结合强度试验、质量测试与微观形貌观测,分析冻融早期砂浆局部损伤与整体性能演化之间的联系,以期为深入揭示砂浆冻融损伤机制提供参考与支撑。

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

本研究使用亚太水泥厂生产的 P. O 42.5 水泥作为胶凝材料,选择标准砂作为细骨料。水泥、水和细骨料的质量比为 1∶0.4∶1.08,使用聚羧酸复合型引气减水剂(PCE)提高砂浆的流动度,使砂浆能够全方位、紧密地包裹 FBG 传感器,以保证测试数据的准确性。其中,PCE 的用量为水泥质量的 0.31%。

1.2 FBG 传感器原理及构造

FBG 传感器的光栅能够从宽带光源中选择满足栅区布拉格波长(如式(1))的光信号进行反射[27-29]。由于光栅选择的反射波长会随温度及应变的变化而发生改变。因此,FBG 既可以被用作温度传感器,也可以被用作应变传感器。

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中:λ_B 为光栅的特定布拉格波长;n_{eff} 为光栅的有效折射率;Λ 为光栅周期。

本研究使用的 FBG 传感器运用了波分复用技术[30],即在同一传感器内设计两个布拉格光栅。光栅长度为 10 mm,两栅区中心间隔 50 mm。由于传感器的外包软管与水泥基材料之间的黏结性较差,因此,为提高 FBG 传感器与测点位置之间的协同变形,传感器嵌入试件内的部分选用裸栅形式,FBG 传感器的详细构造如图 1 所示。

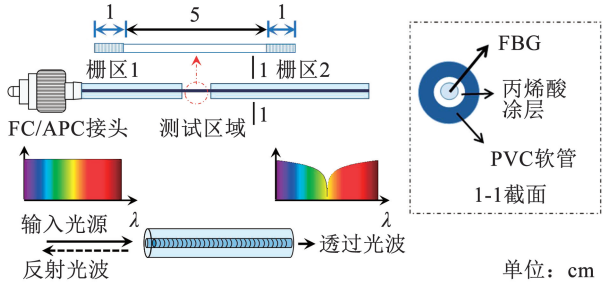


图 1 FBG 传感器工作原理及构造

Fig. 1 Working principle and structure of FBG sensor

1.3 FBG 安装方法及试件制备

根据试验需要将试件分为两种,边长 70.7 mm 的立方体试件用于测试砂浆强度、质量以及形貌变化,直径 150 mm,高 150 mm 的圆柱体试件用于监测冻融早期的局部应变。需要说明的是,选用圆柱体可以减少冻融过程中水分和温度传递的边角效应。所有试件固化 24 h 后脱模放入(20 ± 2)℃的标准养护室中养护 24 d,随后放入水中浸泡 4 d。

FBG 传感器的定位如图 2 所示。根据测点所在高度将截面分为 Up-layer 和 Mid-layer，其中 Up-layer 距离试件顶面 15 mm，Mid-layer 距离试件顶面 75 mm。每个测试截面内分布两个测点，1# 位于截面圆心，2# 位于截面内的任一直径上且距离圆周 5 mm。为便于后续表述，将 Up-layer 内的 1# 测点命名为 1#up，2# 测点命名为 2#up；将 Mid-layer 内的 1# 测点命名为 1#mid，2# 测点命名为 2#mid。

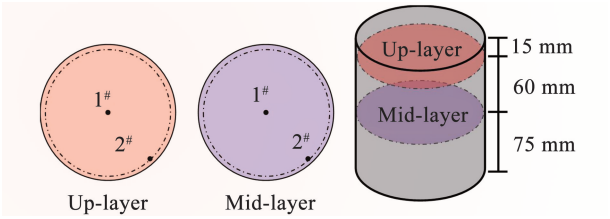


图 2　FBG 传感器位置设计

Fig. 2　Position design of FBG sensors

FBG 在直接嵌入的过程中极易受损，因此，为了保证 FBG 传感器在试件内部的成活率，本研究提出了一种“先埋后拔”的安装方式，具体如图 3 所示。首先，按照 FBG 传感器的投影定位对模具进行钻孔加工，然后预先埋置空心钢管。当试件浇筑、振捣完成后，将 FBG 传感器插入空心钢管。最后，固定 FBG 的 FC/APC 接头后拔出空心钢管。试验证明，在 7 次安装测试中（每次 FBG 安装数量不少于 12 个），该安装方式可保证 FBG 存活率高达 88.9%。

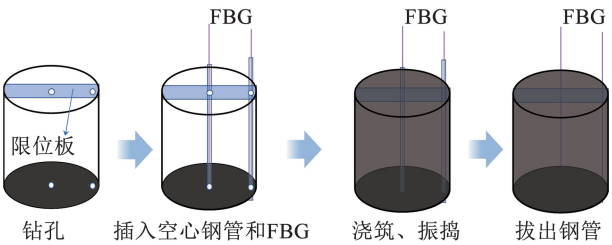


图 3　FBG 传感器在砂浆内部的安装

Fig. 3　Installation of FBG sensors inside mortar

1.4　试验方法

本研究的测试类型分为冻融测试、强度测试、质量测试、形貌测试以及应变测试 5 个类型。

1）冻融测试。冻融介质的温度设置参考了漠河市（我国最北的城市）1981 ~ 2010 年最冷月以及最热月累年月平均气温数据；而单循环时长的确定参照国标 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》[31] 中快冻法的冻融时间。使用高低温试验箱进行 15 次冻融测试，测试过程中的环境介质温度以及试件温度如图 4 所示。为了保证试件在测试过程中始终存在环境水分补给，定制了直径为 160 mm、高度为 170 mm 的不锈钢铁桶用于盛装试件和水。

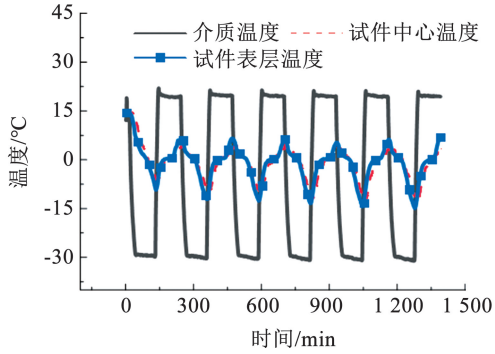


图 4　冻融过程中的温度制度及试件温度

Fig. 4　Temperature regime and specimen temperature during freeze-thaw process

2）应变测试。本研究采用 FBG 传感器进行砂浆冻融过程中的局部应变监测。为了保证测试数据的准确性，同步采集了 FBG 测点位置处的温度数据，并按照式（2）对 FBG 波长变化进行温度补偿。其中，温度测试及应变测试的采集时间间隔均采用 0.5 s。

$$\Delta\varepsilon_{FBG}=(\Delta\lambda-K_T\cdot\Delta T_{FBG}\cdot\lambda_B)/K_S \qquad (2)$$

式中：$\Delta\varepsilon_{FBG}$ 为光栅轴向的应变；$\Delta\lambda$ 为光栅波长变化；K_T 为光栅的温度敏感系数；ΔT_{FBG} 为测点位置的温度改变量；K_S 为应变敏感系数。

3）宏观性能测试。该测试类型包括抗压强度测试以及质量测试，测试每隔 5 次冻融循环进行 1 次，每次测试以 3 个试件为 1 组。其中，抗压强度测试使用立方体试件的非成型面作为加载面进行加载，加载速率为 1.5 kN/s；质量测试使用量程为 1 kg，精度为 0.01 g 的电子秤进行称量，每次称量前使用纸巾擦去试件表面的多余水分。抗压强度测试及质量测试是为了监测冻融早期砂浆试件的整体性能退化。

4）形貌测试。本研究中的形貌测试分为宏观观测和微观 SEM 测试。其中，宏观观测每隔 5 个冻融循环观测 1 次，旨在监测砂浆试件的表层剥落状态。

采用型号 VEGA3 XMU 的扫描电子显微镜（SEM），对试件表层及中心区域微裂缝的开展状态进行观测。选择冻融前以及经过 5 次冻融循环的砂浆试件进行该试验，循环次数确定的理由如下：当试件进行足够多次冻融循环后，试件表层及中心位置的微观损伤将趋于一致，这可能会减弱冻融损伤发展过程的空间差异性。

SEM 测试前的准备工作及观测的具体流程如下：首先，随机取 3 个试件，使用虎口钳将距离试件外表面 5 mm 深度范围内（尽量取面中心位置的样本）的样品以及试件中心 20 mm 范围内的样品剪成

黄豆粒大小,并尽可能保留两个平行面;然后,将相同位置的待测样品混合,并随机挑选 8 块放入冻干机进行干燥处理;而后,使用双面导电胶带将干燥后的样品粘在方形铝片上,并放入 60 ℃的鼓风干燥箱继续干燥 12 h;最后,对观测的样品进行喷金处理,并在 30 kV 的加速电压下观察拍照。

2 冻融早期的宏观性能变化

2.1 质量变化及表层剥落状态

快冻法规定[31],当试件质量下降超过 5% 时,抗冻能力丧失。按照式(3)计算可知,经过 15 次冻融循环后,砂浆试件的质量损失率小于 1%。因此可以认为,此时砂浆试件处于冻融损伤的早期阶段。此外,如图 5 所示,砂浆试件在 15 次冻融循环内的质量变化呈现出分段现象。阶段 1 中试件的质量增加,平均质量增量为 1.12 g。根据图 6 可知,该阶段试件表层以点状剥落为主,剥落量极小。此外,该阶段试件的质量变化还受到吸水作用的影响,该作用将导致试件质量增加。基于质量增量为正值这一测试结果可知,阶段 1 中试件的吸水质量大于表层剥落质量。阶段 2 中试件质量几乎维持恒定。根据图 6的表层形貌变化可知,该现象是由于吸水作用减缓及剥落现象增强导致的。阶段 3 表现为试件的质量下降,这表明表层剥落质量大于试件吸水质量。此时,试件表层的点状剥落逐渐连接成小区域的块状剥落。从试件的质量变化过程可以看出,受吸水作用的影响,冻融早期的质量变化无法准确反映砂浆冻融损伤的发展过程。需要注意的是,环境对自然浸泡饱和试件的水分补给作用会增大试件内的饱和度,进而增大冻融损伤出现的风险。

$$\Delta m_{ci}=\frac{m_{c0}-m_{ci}}{m_{c0}}\times 100\% \tag{3}$$

式中:Δm_{ci}为砂浆试件的质量损失率;m_{c0}为冻融前砂浆的质量;m_{ci}为经过 i 次冻融循环后的质量。

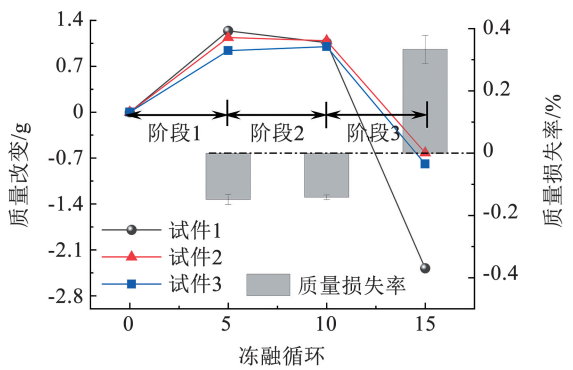


图 5 冻融早期砂浆的质量变化

Fig. 5 Mass change of mortar in early freeze-thaw stage

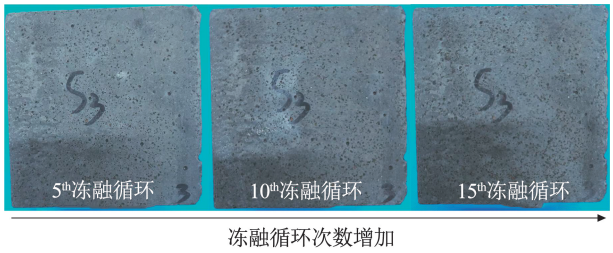


图 6 冻融早期砂浆的表层剥落情况

Fig. 6 Surface spalling of mortar in early freeze-thaw stage

2.2 抗压强度变化

如图 7 所示,砂浆的抗压强度随着冻融循环次数增加而逐渐下降。根据式(4)计算获得的抗压强度损失率可知:经 5 次冻融循环后,试件抗压强度平均下降 1.94%;经 10 次冻融循环后,抗压强度平均下降 5.63%;经 15 次冻融循环后,试件抗压强度平均下降 12.97%。由于试件的吸水过程对砂浆抗压强度的影响较小,因此,以该参数为指标能够较为准确地反映冻融过程中试件整体的损伤演化。根据 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》[31]的规定可知,当抗压强度下降达到 25% 时,可以认为该试件已经冻融破坏。因此,该测试结果表明,遭受 15 次冻融循环后的砂浆试件处于冻融损伤的早期阶段。

$$\Delta f_{ci}=\frac{f_{c0}-f_{ci}}{f_{c0}}\times 100\% \tag{4}$$

式中:Δf_{ci}为抗压强度损失率;f_{c0}为冻融前砂浆的抗压强度;f_{ci}为经过 i 次冻融循环后的抗压强度。

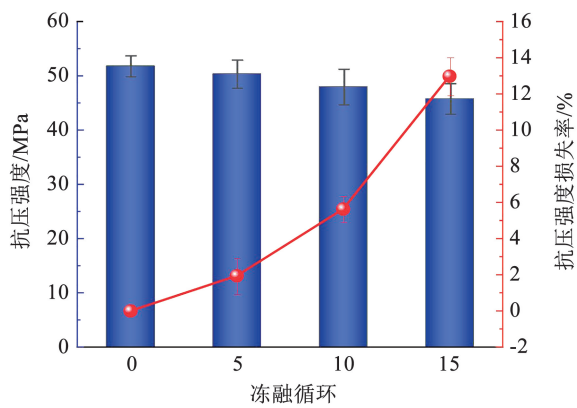


图 7 冻融早期试件的抗压强度及其损失率变化

Fig. 7 Variations of compressive strength and its loss rate of specimens in early freeze-thaw stage

2.1 节与 2.2 节的内容反映了以整体平均性能作为评价指标的损伤参数,在冻融早期的退化并不明显。这可能是因为砂浆表层损伤对整体性能降低的影响权重较小。但是,表层损伤能够增加冻融过程中的水分传输路径。因此,在冻融早期对砂浆试件进行不同空间位置的损伤监测,有助于及时发现

表层损伤并通过修补的方式减缓冻融损伤发展。

3　冻融早期的应变空间演化特征

冻融过程的主要环境特征是正负温交替往复，因此砂浆试件内的应变也随之出现往复现象，且该现象随着冻融循环次数的增加逐渐发生变化。

3.1　单次冻融循环中应变的空间发展特征

以第 5 次循环为例绘制了冻融过程中试件内部不同空间位置的应变-温度曲线，结果如图 8 所示。图 8 曲线中的应变方向与 FBG 传感器一致，且正值代表拉应变、负值代表压应变。由于温度传递具有方向性，因此，为了形成准确的温度-应变关系，曲线中的横坐标使用测点位置的实测温度值绘制。

从曲线形貌可知：图 8(a)与(b)的曲线较为相似，且形状饱满；图 8(c)与(d)的曲线较为相像，曲线形状较为扁平。其中，1# up 测点应变-温度曲线围成的面积是 1# mid 测点的 22.17 倍；2# up 测点应变-温度曲线围成的面积为是 2# mid 测点的 13.52 倍。这说明在同一次冻融循环中，测点沿应变方向向表层移动，单次冻融过程的应变幅值显著增大。此外，从图 8 可以看出，温度降低至 0 ℃与升温至 0 ℃之间存在应变差异，且该差异也随测点位置向上表层的移动而增加。

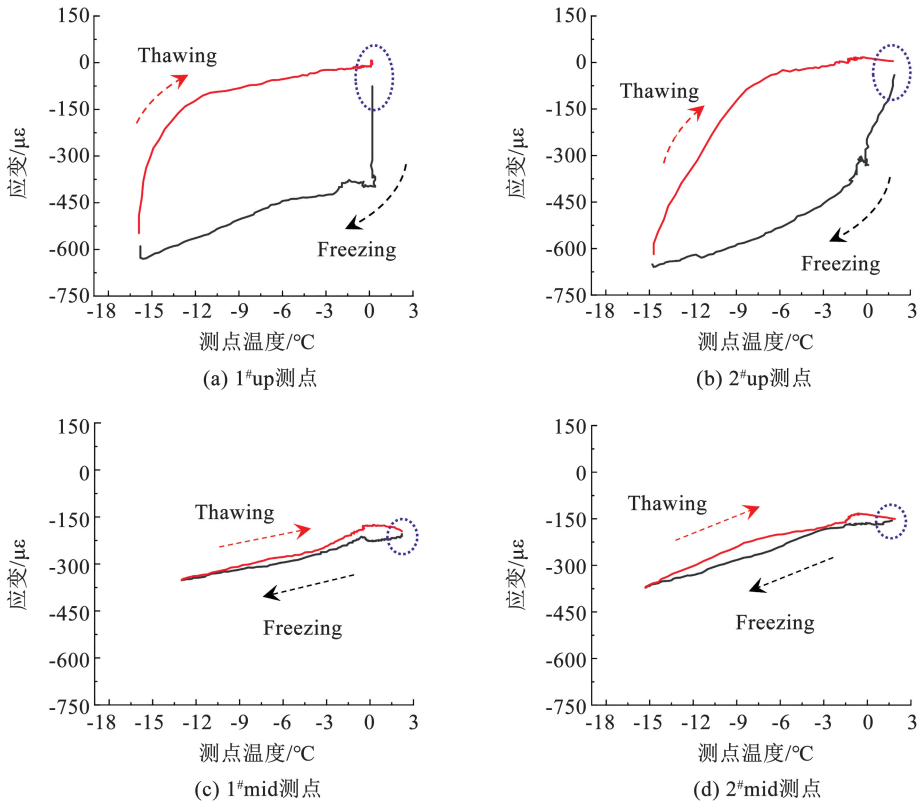


图 8　应变-温度曲线(5th cycle)

Fig. 8　Strain-temperature curves (5th cycle)

从图 8 曲线随温度的变化过程可以看出，降温过程中测点位置的压应变逐渐增大，而升温过程中压应变减小。对压应变的产生机理进行分析(图 9)：单次冻融循环内应变的发展主要与试件内的温度变化、孔溶液迁移以及结冰过程相关。降温过程中基体冷缩表现为压应变。此外，由于试件浸泡饱和，气孔内处于水-气平衡状态。该状态下，孔内溶液体积占比小于 91.7%，这意味着结晶压对孔壁产生的拉应力有限，且结冰膨胀促使溶液外排产生的静水压力相对较小，因此形成的拉应变较小。此外，在渗透压的作用下，小孔内的溶液向较大的气孔中迁移，该过程不仅造成部分基体失水收缩，也减轻了小孔内液体结冰膨胀对基体冷缩的抵消作用。最终，当孔内溶液结冰膨胀在降温过程中无法完全抵消冷缩及失水收缩作用时，测点位置表现出收缩状态，且该收缩会随着温度的降低而增大。需要注意的是，该收缩受到冷缩、水分迁移以及孔溶液结冰膨胀的综合作用，不能将压应变的出现简单归因于测点位置基体的冷缩。

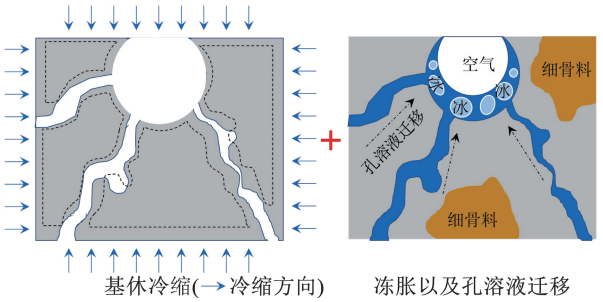


图 9　压应变产生的机理

Fig. 9　Generation mechanism of compressive strain

3.2　峰值应变的时空演化特征

冻融过程中环境温度条件分为升温和降温两个阶段,在升温过程中测点的峰值应变为正温峰值应变,在降温过程中测点位置出现的峰值应变为负温峰值应变。图 10 统计了不同测点位置在冻融早期的正、负温峰值应变随冻融循环的发展,其中正、负号的定义与 3.1 节一致。

根据图 10 中应变形式可知,1#up 测点和 2#up 测点位置的正温峰值应变在 5 次冻融循环后由压转拉,在遭受 10 次冻融循环后,1#up 测点的拉应变甚至超过 100 με;而 1#mid 测点和 2#mid 测点位置的正温峰值应变,在测试阶段内始终表现为压应变。根据水泥基材料抗压不抗拉的特点可知,测点位置出现拉应变后,微观结构更容易出现开裂。因此,沿应变方向越靠近表层的位置,在冻融早期越容易开裂。此外,所有测点位置的负温峰值应变均为压应变,表明在冷冻过程中测点位置的冻胀作用对 FBG 栅区范围内的变形影响较小。

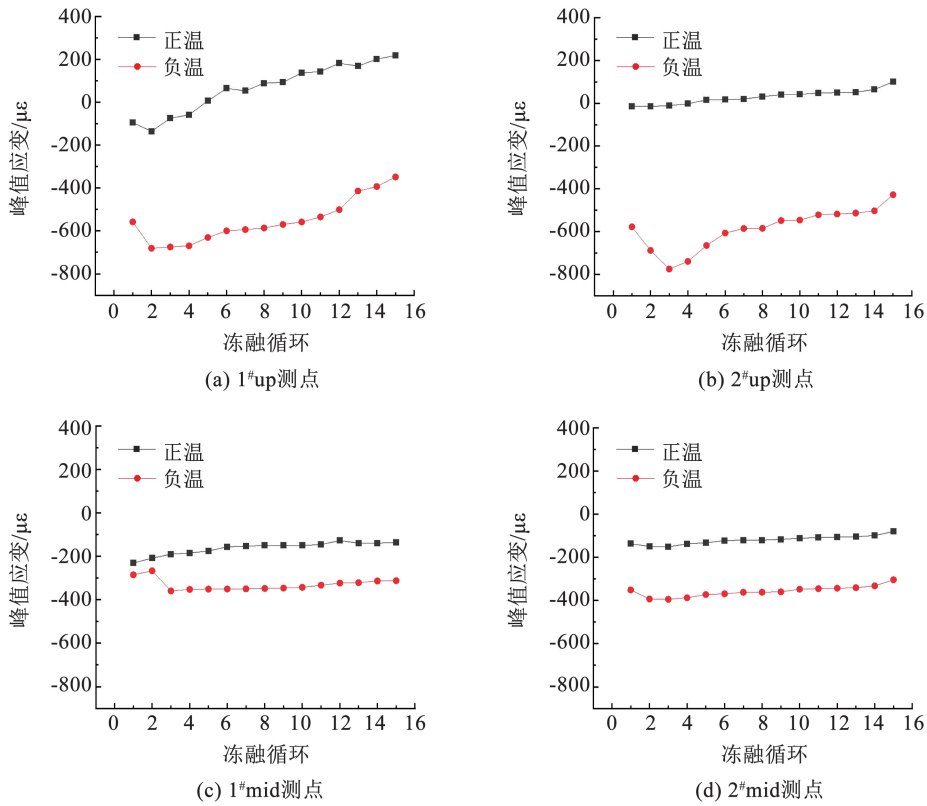


图 10　峰值应变演化

Fig. 10　Evolution of peak strain

分析图 10 中的曲线发展趋势可知,正、负温峰值应变曲线均随着冻融循环次数的增加而逐渐上升,但不同测点的曲线上升趋势有所不同。这表明应变的时域演化具有空间性。其中,1#up 测点和 2#up测点的峰值应变曲线上升趋势显著大于 1#mid 以及 2#mid 测点。以正温峰值为判断依据可知:15 次冻融循环后,1#up 的峰值应变增量是 1#mid 的 3.33 倍;2#up 的峰值应变增量是 2#mid 的 2.04 倍。以负温峰值为判断依据可知:15 次冻融循环后 1#up 的峰值应变增量是 1#mid 的 6.98 倍;2#up 的峰值应变增量是 2#mid 的 4.01 倍。可以看出,以正、负温峰值为应变演化判断依据的结果表现出一致性。综上分析可知,越靠近表层的位置,在冻融早期应变发展越快速,而靠近中心位置的测点应变发展相对较为缓慢。

3.3　基于空间位置的冻融损伤发展

残余应变是已经进入塑性阶段的材料在卸载至初始状态后,其变形无法回到初始状态而保留下来的应变。材料力学中通常使用残余应变表征损伤。在冻融过程中,试件内的升降温过程可以被认为是

温度作用的加载以及卸载阶段。将第 1 次降温至 0 ℃的测点应变作为初始状态，计算各个测点的残余应变，并绘制了冻融前期的残余应变演化过程，结果如图 11 所示。根据式(5)可知，图 11 中的纵坐标代表经过 i 次冻融循环后残余应变累计增长量，可以看出，随着冻融循环次数的增加，测点位置的残余应变累计量逐渐增大且表现出与 3.2 节一致的空间分布特征。经 15 次冻融循环后，1#up 测点位置的残余应变是 1#mid 位置的 5.51 倍；2#up 测点位置的残余应变是 2#mid 位置的 2.82 倍。

$$\varepsilon_{rei} = \varepsilon_{ci} - \varepsilon_{c1} \tag{5}$$

式中：ε_{rei} 为经过 i 次冻融循环后的残余应变；ε_{ci} 为第 i 次冻融循环过程中温度降低至 0 ℃时的应变值；ε_{c1} 为第 1 次冻融循环过程中温度降低至 0 ℃时的应变值。

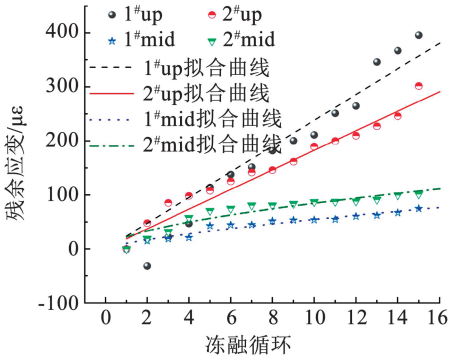


图 11　残余应变发展

Fig. 11　Development of residual strain

既有研究[32-33]通常使用试件整体的平均性能作为冻融损伤评估参数，并根据损伤力学理论计算损伤度，最后建立损伤度与冻融循环次数之间的数学关系。这种方法能够较好地反映试件整体冻融损伤的发展规律。值得注意的是，砂浆的冻融损伤受水分传输通道的影响显著，这意味着试件在冻融过程中的损伤演化受制于微裂纹的延伸与联通。因此，研究不同空间位置的冻融损伤发展，对精准预防砂浆进一步冻融劣化具有促进作用。由于整体平均性能无法反映局部冻融损伤，因此，建立基于残余应变的冻融损伤劣化模型，在精准预测冻融损伤路径发展方面具有重要作用。根据残余应变的增长趋势，使用幂函数的形式($y = Ax^B$)建立了冻融早期不同测点位置处的损伤演化模型。其中，“残余应变增长趋势”的幂函数形式如图 11 中拟合线所示，拟合参数 A 与 B 如表 1 所示。根据拟合参数可知，1#up测点以及 2#up 测点的拟合线幂指数近似为 1，这表明 up 层在冻融早期的损伤以线性模式发展。随着测点位置向试件中层移动，拟合曲线的幂指数降低，损伤发展趋势减缓。

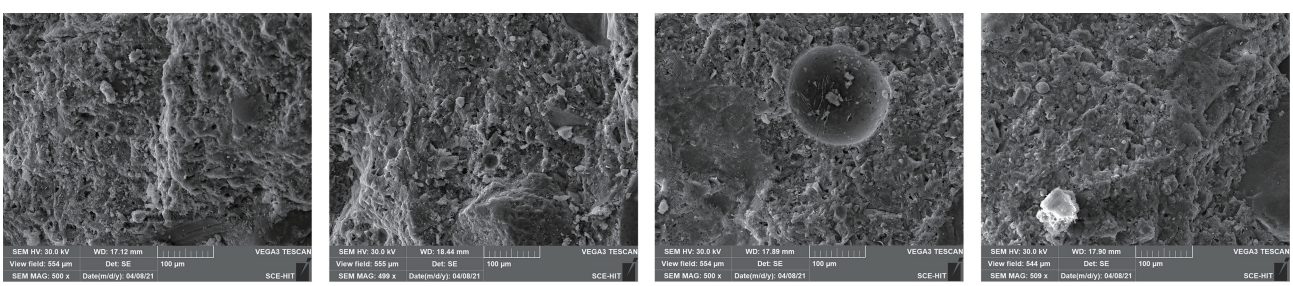
表 1　基于残余应变的冻融早期损伤演化模型

Tab. 1　Early freeze-thaw damage evolution model based on residual strain

拟合曲线	A	B	R^2/%
1#up	23.83	1.00	94.13
2# up	18.71	0.99	95.86
1#mid	10.24	0.73	93.72
2# mid	22.29	0.58	87.81

4　冻融早期砂浆微观形貌变化

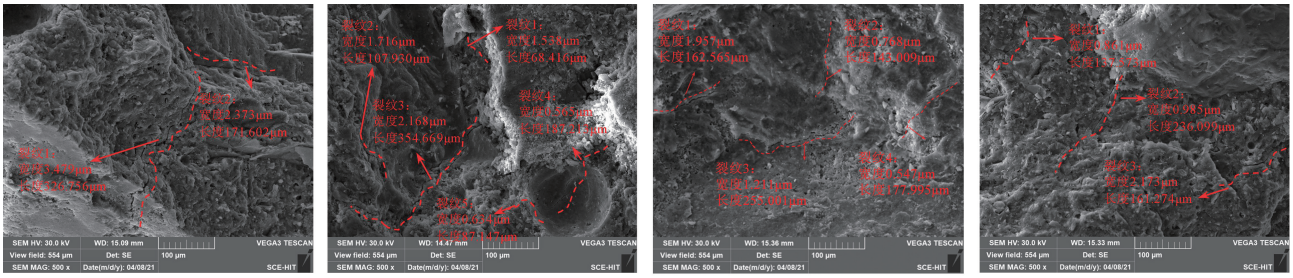
图 12 和图 13 分别展示了经过 5 次冻融循环后，试件中心以及表层范围内的典型微观形貌(典型微观形貌出自 4 个样品)。对比可知，冻融早期微观结构开裂主要发生在试件表层，而试件中心几乎无微裂缝发展。3.2 小节及 3.3 小节中，1#up 以及 2#up 位置处拉应变的出现，以及残余应变的快速发展均能够与 SEM 图像中微裂纹的开展形成良好对照。基于该对比结果可知，应变测试结果能够反映砂浆的开裂情况。为了从 SEM 图像中获取更多细节，进一步定量描述冻融早期试件微裂纹的开展状态，本文对所有表层测试样品的微裂纹图像进行了统计分析，结果如图 14 所示，可以看到：在观测视野内，表层微裂纹数量(图 14(a))处于 2 ~ 5 条；裂纹的典型宽度(图 14(b))为 1.5 μm，典型长度(图 14(c))介于 50 ~ 200 μm。



(a) 样品1　(b) 样品2　(c) 样品3　(d) 样品4

图 12　5 次冻融循环后试件中心的微观形貌

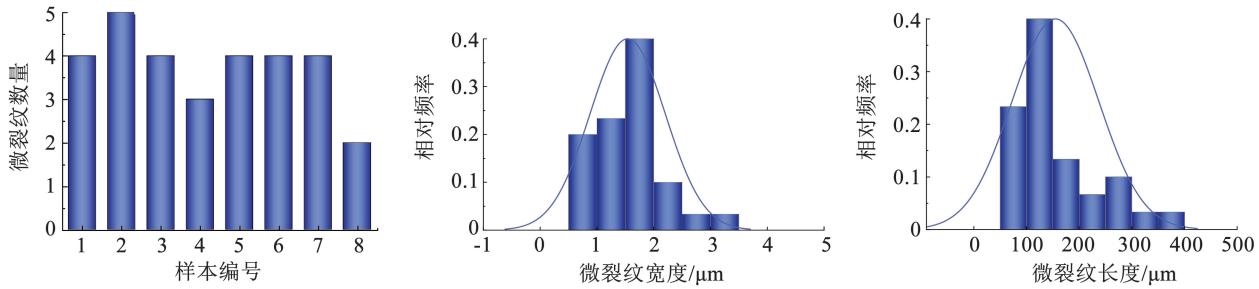
Fig. 12　Microscopic morphology of specimen center after five freeze-thaw cycles



(a) 样品1 (b) 样品2 (c) 样品3 (d) 样品4

图 13 5 次冻融循环后试件表层的微观形貌

Fig. 13 Microscopic morphology of specimen surface layer after five freeze-thaw cycles



(a) 裂纹数量 (b) 裂纹宽度 (c) 裂纹长度

图 14 微裂纹信息统计

Fig. 14 Statistics of micro-crack information

结合 2.1 小节与 2.2 小节可知,当试件表层出现明显微裂纹时,试件的宏观性能演化并不显著。这意味着在冻融早期,砂浆的损伤主要体现在表层微裂纹的开展。该现象虽然对试件的整体性能变化影响较弱,但微裂纹的扩展连通能够促进复杂水分传输网络的形成,为环境水分进入试件内部提供更多通路,并有效提高试件饱和度。根据冻融损伤与试件饱和度的关系可知,表层微观开裂对后续冻融过程中宏观性能的衰减具有促进作用。

5 结 论

本研究发明了一种“先埋后拔”的安装方式,提高了 FBG 在水泥基材料中的安装成活率。运用 FBG 传感技术,对砂浆冻融早期损伤的空间演化过程展开研究,并在微观层面对应变的评估结果进行了证明。通过对比局部损伤与宏观性能之间的关系可知,早期冻融损伤以表层开裂为主,虽不足以产生严重的宏观性能变化,但可为环境水分向试件内部传输提供有效的新路径。

1)在冻融早期,经浸泡饱和的砂浆试件,其孔溶液体积占比小于 91.7%,测点在冷冻过程中主要表现为受压变形。此外,应变分布呈现显著的空间差异性,随着测点位置向表层移动,单次循环内的应变幅值增大。

2)随着冻融循环次数的增加,各测点的峰值应变呈上升趋势。该趋势随着测点位置向表层靠近而更加明显。随着应变曲线的上升,试件中心层始终表现为压应变,而表层区域内的应变形式由压转拉,拉应变的出现对试件表层的开裂具有促进作用。

3)在冻融早期,试件内部出现了残余应变。根据残余应变的演化特征建立了冻融早期损伤的空间发展模型。其中,表层范围内的冻融损伤以线性模式发展;随着测点位置向试件内部移动,冻融损伤演化减缓。

参考文献

[1] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1945, 16(4): 245

[2] POWERS T C. Air requirement of frost-resistant concrete [J]. Highway Research Board Proceedings, 1949, 29: 184

[3] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume change in hardened portland cement pastes during freezing[J]. Proceedings of the Highway Research Board, 1953, 32: 285

[4] BUMANIS G, DEMBOVSKA L, KORJAKINS A, et al. Applicability of freeze-thaw resistance testing methods for high strength concrete at extreme −52.5 ℃ and standard −18 ℃ testing conditions [J]. Case Studies in Construction Materials, 2018, 8: 139. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.01.003

[5] 洪锦祥, 缪昌文, 刘加平, 等. 冻融损伤混凝土力学性能衰减规律[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 173
HONG Jinxiang, MIAO Changwen, LIU Jiaping, et al. Degradation law of mechanical properties of concrete subject to freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 173

[6] 吴泽媚, 崔鑫溦, 郑新颜, 等. 早期受冻混凝土及其防冻技术研

究进展[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(2): 471
WU Zemei, CUI Xinwei, ZHENG Xinyan, et al. Research progress on early frost-affected concrete and anti-freeze technologies[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(2): 471. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20240563

[7] ALRASHED R, ALJABARI M. Concrete protection by combined hygroscopic and hydrophilic crystallization waterproofing applied to fresh concrete[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00635. DOI:10.1016/j.cscm.2021.e00635

[8] 高矗, 申向东, 王萧萧, 等. 应力损伤轻骨料混凝土抗冻融性能[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(10): 1247
GAO Chu, SHEN Xiangdong, WANG Xiaoxiao, et al. Freeze-thaw resistance of lightweight aggregate concrete with stress damage[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(10): 1247. DOI:10.7521/j.issn.0454-5648.2014.10.06

[9] 孙科科. 冻融循环条件下地聚合物混凝土劣化规律及机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021
SUN Keke. Research on the deterioration regularity and damage mechanism of geopolymer concrete under freeze-thaw cycles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021

[10] HASSAN A A A, LACHEMI M, HOSSAIN K M A. Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(6): 801. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013

[11] 关姬, 龙行, 丁莎, 等. 冻融作用下活化煤矸石粉混凝土损伤劣化规律[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(1): 144
GUAN Xiao, LONG Hang, DING Sha, et al. Damage and deterioration law of activated coal gangue powder concrete under freeze-thaw[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(1): 144. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20221223.001

[12] GONG F, JACOBSEN S. Modeling of water transport in highly saturated concrete with wet surface during freeze/thaw[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 115: 294. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.08.013

[13] JACOBSEN S. Calculating liquid transport into high-performance concrete during wet freeze/thaw[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(2): 213. DOI:10.1016/j.cemconres.2004.04.029

[14] BAZANT Z P, PRAT P C. Microplane model for brittle-plastic material[J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 1989, 114: 1672

[15] BISHNOI S, UOMOTO T, Strain-temperature hysteresis in concrete under cyclic freeze-thaw conditions[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30: 374. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2008.01.005

[16] 王阵地, 姚燕, 王玲. 冻融循环与氯盐侵蚀作用下混凝土变形和损伤分析[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1133
WANG Zhendi, YAO Yan, WANG Ling. Deformation and deterioration analysis of concrete exposed to freeze-thaw cycles and chloride salt attack[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(8): 1133. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2012.08.007

[17] 高金麟. 基于变形的混凝土受冻损伤评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019
GAO Jinlin. Research on the evaluation of frozen damage of concrete based on deformation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019

[18] MAASKANT R, ALAVIE T, MEASUTES R M, et al. Fiber-optic bragg grating sensors for bridge monitoring[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19: 21. DOI:10.1016/s0958-9465(96)00040-6

[19] MELTZ G, MOOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fibres by a transverse holographic method[J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823. DOI:10.1364/OL.14.000823

[20] CZARNEK R, GUO Y F, BENNETT K D, et al. Interferometric measurements of strain concentrations induced by optical fiber embedded in a fiber reinforced composite[J]. Optical Engineering 1989, 16: 43

[21] MAJUMDER M, GANGOPADHYAY T K, CHAKRABORTY A K, et al. Fibre bragg gratings in structural health monitoring-present status and applications[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2008, 147: 150. DOI:10.1016/j.sna.2008.04.008

[22] HABEL W R, KREBBER K, Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering[J]. Photonic Sensors, 2011, 1: 268. DOI:10.1007/s13320-011-0011-x

[23] MEASURES R M. Structural monitoring with fiber optic technology[J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 55(9): 1609

[24] 李建新, 朱伟, 任建乔, 等. 基于 FBG 传感技术的混凝土开裂损伤研究[J]. 传感器与微系统, 2025, 44(4): 17
LI Jianxin, ZHU Wei, REN Jianqiao, et al. Research on concrete cracks damage based on FBG sensing technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2025, 44(4): 17. DOI: 10.13873/j.1000-9787(2025)04-0017-04

[25] KESAVAN K, RAVISANKAR K, PARIVALLAL S, et al. Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete[J]. Measurement, 2010, 43(2): 157. DOI:10.1016/j.measurement.2009.08.010

[26] CHILDS P, WONG A C L, GOWRIPALAN N, et al. Measurement of the coefficient of thermal expansion of ultra-high strength cementitious composites using fibre optic sensors[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(5): 789. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.02.015

[27] PARK S, PARK T, HAN K. Real-time monitoring of composite wind turbine blades using fiber bragg grating sensors[J]. Advanced Composite Materials, 2011, 20(1): 39. DOI: 10.1163/092430410X504198

[28] DAVIS M A, BELLEMORE D G, KERSEY A D. Distributed fiber bragg grating strain sensing in reinforced concrete structural components[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(1): 45. DOI:10.1016/S0958-9465(96)00042-X

[29] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647

[30] LIANG Z, LIU D, WANG X, et al. FBG-based strain monitoring and temperature compensation for composite tank[J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 127: 107724. DOI: 10.1016/j.ast.2022.107724

[31] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2024[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024
Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2024[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2024

[32] 刘卫东, 苏文悌, 王依民. 冻融循环作用下纤维混凝土的损伤模型研究[J]. 建筑结构学报, 2008(1): 124
LIU Weidong, SU Wenti, WANG Weimin. Research on damage model of fibre concrete under action of freeze-thaw cycle[J]. Journal of Building Structures, 2008(1): 124. DOI: 10.14006/j.jzgxb.2008.01.018

[33] 商怀帅, 宋玉普, 覃丽坤. 普通混凝土冻融循环后性能的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2005(2): 9
SHANG Huaishuai, SONG Yupu, TAN Likun. Experimental study on the properties of ordinary concrete after freeze-thaw cycles[J]. China Concrete and Cement Products, 2005(2): 9. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2005.02.003

（编辑　吕雪梅）

DOI:10.11918/202509025

泰勒展开与复合注意力引导的红外与可见光图像融合

杨艳春,李 毅

(兰州交通大学 电子与信息工程学院,兰州 730070)

摘 要:为解决深度学习融合算法中存在的忽略像素间相关性,导致融合结果丢失重要全局纹理,以及难以平衡目标突出与场景增强的问题,本文提出了一种泰勒展开与复合注意力机制引导的红外与可见光图像融合算法。首先,设计了一种泰勒展开网络,将输入图像分解为映射层与导数层,从而实现对图像多层次特征信息的有效提取;其次,采用双分支特征提取网络,其中平行卷积网络负责捕获局部细节特征,SwinTransformer模块则专注于提取全局上下文信息,确保局部与全局特征的高效保留;再次,引入复合注意力机制来进一步提升特征融合的精度,该机制通过轴向注意力融合空间维度特征,同时利用通道注意力强化通道间的特征响应,以实现更精细的特征选择与融合。最后,通过图像重建得到融合图像。在公开数据集MSRS和RoadScene进行了相关实验,结果表明,本文方法融合图像不仅在纹理细节保持与全局信息保留方面更完整,而且在客观指标中取得显著优势。该研究结果可为深度学习图像融合领域提供新的思路。

关键词:红外与可见光图像融合;泰勒展开网络;SwinTransformer;双分支特征提取;复合注意力机制

中图分类号:TP391;TN29 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0054-09

Infrared and visible image fusion guided by Taylor expansion and composite attention

YANG Yanchun, LI Yi

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to solve the problems of ignoring the correlation between pixels in the deep learning fusion algorithm, which leads to the loss of important global texture in the fusion results, and the difficulty of balancing target highlight and scene enhancement, this paper proposed an infrared and visible image fusion algorithm guided by Taylor expansion and composite attention mechanism. Firstly, a Taylor expansion network was designed to decomposition the input image into a mapping layer and a derivative layer, so as to effectively extract the multi-level feature information of the image. Secondly, a dual-branch feature extraction network was used, in which the parallel convolutional network was responsible for capturing local detail features, and the SwinTransformer module focused on extracting global context information to ensure the efficient retention of local and global features. Then, the composite attention mechanism is introduced to further improve the accuracy of feature fusion. This mechanism fuses spatial dimensional features through axial attention, and uses channel attention to strengthen the feature response between channels, so as to achieve more refined feature selection and fusion. Finally, the fused image was obtained by image reconstruction. Experiments are carried out on the public datasets MSRS and RoadScene. The results show that the proposed method is not only more complete in maintaining texture details and global information, but also achieves significant advantages in objective indicators. The research results can provide new ideas for the field of deep learning image fusion.

Keywords: infrared and visible image fusion; Taylor expansion network; SwinTransformer; dual-branch feature extraction; compound attention mechanism

近年来,红外与可见光图像融合技术在计算机视觉领域受到了广泛关注,其目标是通过整合同一场景下多模态图像的信息,生成表达更全面、准确的场景表示。红外传感器通过捕捉场景中的热辐射信息,能够有效反映目标物体的热特征,即使在低光照、遮挡或目标隐藏等复杂条件下,仍可稳定检测出人、车辆等红外目标。然而,红外图像通常空间分辨率较低,缺乏丰富的纹理细节[1]。相比之下,可见

收稿日期:2025-09-07;**录用日期**:2025-10-13;**网络首发日期**:2025-11-14
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251113.1517.004
基金项目:国家自然科学基金(62462043,62067006);甘肃省重点研发计划(25YFGA047);甘肃省自然科学基金(23JRRA847,21JR7RA300)
作者简介:杨艳春(1979—),女,副教授,硕士生导师
通信作者:李 毅,1544726016@qq.com

光图像依靠物体反射光成像，具有较高的空间分辨率和清晰的纹理信息，更符合人眼的视觉感知习惯，但其成像质量容易受到雨、雾等环境因素的干扰，稳定性较差。红外与可见光图像融合通过集成来自同一场景中多个传感器的互补信息，生成更符合人类感知或计算机处理需求的融合结果，提升图像信息的可用性与可理解性，目前，这种融合技术被广泛应用于军事侦察、遥感与目标检测等领域[2-4]。

当前的图像融合技术主要分为传统方法和基于深度学习的融合方法两大类。传统方法依赖于图像处理工具提取源图像的多类特征，例如多尺度变换[5]、稀疏表示[6]、子空间法[7]、显著性检测[8]等，随后通过对这些特征进行逆变换生成融合图像。尽管传统方法在一定程度上是有效的，但也存在一些局限性，其像素活动水平的计算和融合规则的设计通常依赖于人工经验，难以应对复杂多变的图像场景。

深度学习方法具有强大的特征提取能力和解决非线性过拟合的能力，能够提高网络模型的泛化能力。常见的深度学习的方法包括基于自动编码器（auto-encoder，AE）、基于卷积神经网络（convolutional neural network，CNN）、基于生成对抗网络（generative adversarial network，GAN）和基于 Transformer 方法。在 AE 方法中，Li 等[9]通过注意力模型突出空间和通道的重要性，增强了多尺度深度特征融合；Zhao 等[10]提出一种自监督特征自适应融合方法，通过注意力机制解码重建源图像以保留关键信息，并引入图像增强模块提升低质场景下的融合鲁棒性；Zhao 等[11]通过算法展开将优化模型转化为可训练网络，实现两尺度特征分离与融合，在测试阶段通过专用融合层与解码器生成优越的融合图像。但 AE 方法通常需要手工设计融合策略，而 CNN 方法通过其层次化的卷积结构，能够从数据中自动学习出最优的融合规则。在 CNN 方法中，Li 等[12]创新性地融合了 CNN 与图神经网络，首先通过 CNN 提取多尺度特征，再借助图交互模块将特征转换为图结构，以实现有效的跨模态融合；Yue 等[13]通过多通道扩散特征与专用损失函数，在提升纹理与强度保真度的同时，显著提高了色彩还原能力；Yang 等[14]利用交叉卷积模块提取多向细节，结合局部显著性注意力网络生成权重图优化特征融合，并通过自适应像素损失提升训练效果。但在 CNN 方法中由于网络模型深度的增加，源图像的细节不可避免地会丢失。GAN 方法通过鉴别器与生成器对抗博弈，有效加强了对图像细节的保留能力。在 GAN 方法中，Zhou 等[15]提出语义监督双鉴别器生成对抗网络，通过信息量判别模块和双鉴别器机制，实现红外与可见光图像的高层语义感知融合，有效保留热辐射与纹理细节特征；Yin 等[16]在生成器中采用金字塔分解路径与剩余注意力融合规则整合多尺度特征，结合跨尺度金字塔注意力模块及双鉴别器优化分布逼近，实现多级特征高效解码与重构；Wang 等[17]通过小波变换分解多频带特征，结合混合频率聚合模块和双重鉴别器，有效解决传统方法忽略频域信息的问题，显著提升多模态图像融合质量。但 GAN 方法忽略了图像中远程相关性的提取，导致融合结果中丢失了重要的全局纹理。Transformer 方法通过自注意力机制有效建模长程依赖，弥补了这一缺陷。在 Transformer 方法中，Yi 等[18]开发语义文本网络框架，集成文本语义编码器与融合解码器，利用自然语言描述引导多模态特征对齐，实现交互式可控融合；Liu 等[19]创新性引入视觉语言模型的提示学习范式，通过语义提示向量动态调节融合权重，同步优化目标识别置信度与视觉质量指标；Tang 等[20]提出 Y 形动态 Transformer 融合方法，通过动态转换器模块同步提取局部特征与上下文信息，利用 Y 形网络结构协同保持红外热辐射与可见光纹理细节，显著提升融合效果。

上述深度学习融合算法虽然取得一定的融合效果，但这些方法忽略了像素之间的相关性，致使融合结果中丢失了重要的全局纹理，难以兼顾目标凸显与场景整体感知的平衡。针对上述问题，本文提出了一种泰勒展开与复合注意力的红外与可见光图像融合算法，引入泰勒展开网络与损失函数，以建模像素间深层次相关性；设计双路径特征提取网络，确保全局重要纹理不丢失；构建复合注意力融合网络，实现特征的精细筛选与保留。

1　本文方法

1.1　网络框架

本文提出的算法总体结构如图 1 所示。该网络架构由泰勒展开网络、特征提取、特征融合和特征重建 4 部分组成。首先，输入红外图像和可见光图像，通过泰勒展开网络将输入图像分解成为基础映射层与导数层，从而得到多层次的深度特征图。其次，将得到的特征图输入到由 PCN 和 SwinTransformer 的双分支特征提取网络来增强特征的表征能力，提高图像特征的局部与全局信息。最后，利用复合注意力进行特征融合，经过图像重建得到融合图像。

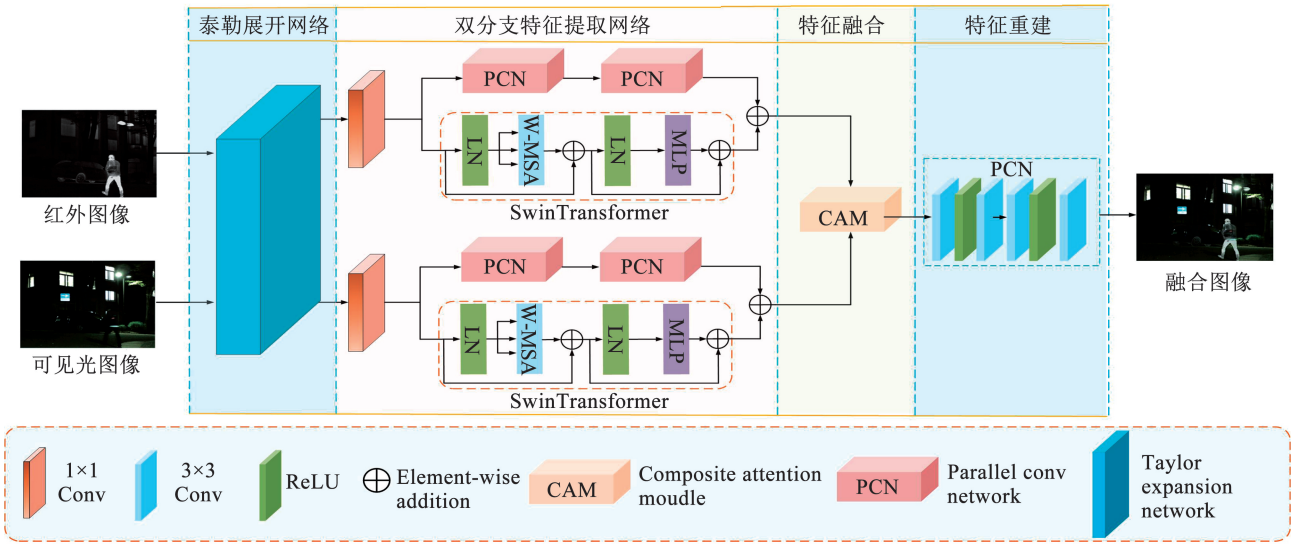


图 1 整体网络框架

Fig. 1 Overall network framework

1.2 泰勒展开网络

泰勒展开作为一种重要的数学工具，已广泛应用于计算机视觉任务中，根据泰勒展开定理，当$f(x)$ $(x\in(a,b))$具有 n 阶导数时，其可以在 $x_0(x_0\in(a,b))$处展开如下：

$$f(x)=f(x_0)+\frac{f'(x_0)}{1!}(x-x_0)+\cdots+\frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n=f(x_0)+\sum_{k=1}^{n}\frac{f^{(k)}(x_0)}{k!}(x-x_0)^k \tag{1}$$

式中：$f(x)$、$f(x_0)$和 $\sum_{k=1}^{n}\frac{f^{(k)}(x_0)}{k!}(x-x_0)^k$ 分别为源可见光图像或红外图像、基本大尺度特征图和导数特征。从式(1)可以看出，其各层次之间的特征映射具有密切的相关性，这将有助于网络将全局多结构从原始图像转移到融合结果。为了充分提取图像特征图，使用一个映射网络来近似基础层，同时使用一个共享的导数网络来处理导数特征。

在公式(1)中，泰勒展开网络(Taylor expansion network，TEN)需要估计的主要有两个部分，包括基础层$f(x_0)$及其导数层如$(f^k(x_0),k\in[1,n])$。为了充分提取其特征，采用映射网络 $\phi_b(\cdot)$来计算基础层(可以表示为$f(x_0)=\phi_b(f(x))$和一个导数网络 $\phi_d(\cdot)$来处理每个导数分量。由式(1)可知，其邻域导数分量具有密切的相关性。除后者是前者的导数外，还有附加项$(x-x_0)$，其与$f(x)$和$f(x_0)$有关。将$f(x)$和$f^k(x_0)$，$k\in[1,n]$连接到 ϕ_d 中作为推理的输入，可以表示为

$$f(x)=\phi_b(f(x))+\sum_{k=1}^{n}\frac{\phi_d(\mathrm{Concat}(f^{(k-1)}(x_0),f(x)))}{k!} \tag{2}$$

1.2.1 映射网络

映射网络主要用于从图像中提取全局信息，以防止大规模细节的丢失，可以看出，其是由 1 个核大小为 5 × 5 的卷积层和 3 个 ResBlock 组成的。ResBlock 的具体框架如图 2(a)所示，包括 3 个核大小为 1 × 1 的卷积层、1 个核大小为 3 × 3 的卷积层，以及每个卷积层后的 4 个 LReLU 层以增强网络稳定性，同时保持梯度活性与非线性。

1.2.2 导数网络

导数网络由两个卷积层组成，包括 5 × 5 的卷积层和 3 个 ResDBlock。ResDBlock 的具体框架如图 2(b)所示。为了在特征提取过程中保留尽可能多的精细特征，ResDBlock 中加入了密集连接和 Mish 激活函数。

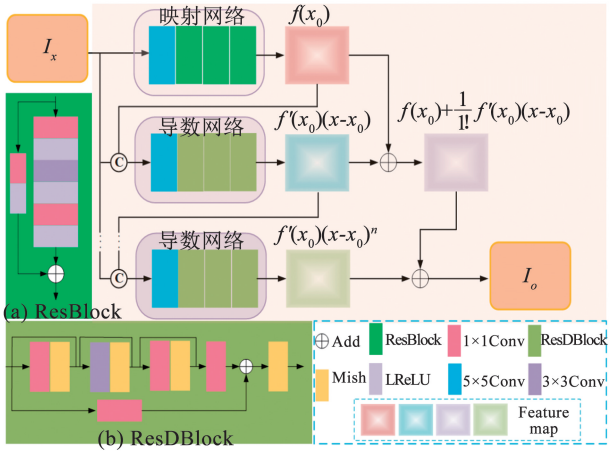


图 2 泰勒展开网络

Fig. 2 Taylor expansion network

1.3 双分支特征提取网络

如图 1 所示，双分支特征提取网络包括 1 × 1 卷积层、SwinTransformer(ST)和平行卷积网络(parallel

convolutional network，PCN）。ST 主要包含两个阶段：基于窗口的多头自注意（window-based multi-head self-attention，W-MSA）和多层感知器（multi-layer perceptron，MLP）。ST 模块通过其独特的双阶段结构有效整合多模态图像特征，W-MSA 阶段用于捕捉输入图像序列中的依赖关系，使模型能够关注图像序列中的不同位置，实现模态间特征的动态交互与增强。MLP 阶段则通过非线性变换对融合后的特征进行深度加工，学习跨模态的高阶特征表示，从而提升融合图像对原始双模态信息的保留能力。为优化特征融合过程，每个阶段前均引入 LayerNorm（LN）层进行特征分布标准化，确保多模态输入在统一特征空间中进行对齐。PCN 网络由 3×3 卷积层和 ReLU 构成，对于红外图像分支，输入特征被送到 ST 中以捕获长范围全局特征依赖性，而由 PCN 处理以学习局部特征依赖性。可见光图像分支以类似的方式生成。

1.4　复合注意力融合机制

为了从双分支特征提取网络中融合特征，本文设计了一种新的复合注意力融合策略（compound attention，CA），以进一步提高通用多模态图像融合模型的融合精度。具体的 CA 模块如图 3 所示。复合模块主要由两个自注意模块、一个通道注意模块和辅助连接模块组成。轴向注意模块可以提取特征的空间信息。通道注意模块进一步实现特征沿通道方向的适应性，平衡 CNN 支路特征和 Transformer 支路特征。辅助连接模块融合轴向注意信息和通道注意信息，最终实现全局信息和局部信息的整合。轴向注意模块具有全局性特点，其体现在高度和宽度轴同时使用上。对于多模态特征映射，在特征的宽度轴和高度轴上定义了具有位置敏感和可调参数的轴向注意层。轴向注意层采用多头注意机制，利用轴向注意模块，通过输入多模态表征 $\boldsymbol{r}_1$ 和 $\boldsymbol{r}_2$，得到空间增强的中间表征 $\boldsymbol{f}_1$ 和 $\boldsymbol{f}_2$。通道注意力模块的计算过程如式(3)～式(5)所示。在图 3 中，通过两个中间层特征的输入，通道注意力机制的最终输出结果可由式(5)计算。

$$\boldsymbol{a}_1 = o[\mathrm{pool}(\boldsymbol{f}_1)] \tag{3}$$

$$\boldsymbol{a}_2 = o[\mathrm{pool}(\boldsymbol{f}_2)] \tag{4}$$

$$\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{f}} = \xi(\boldsymbol{a}_1)\cdot\boldsymbol{f}_1 + \xi(\boldsymbol{a}_2)\cdot\boldsymbol{f}_2 \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{a}_1$，$\boldsymbol{a}_2$ 为归一化特征结果；$\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{f}}$ 为通道注意力机制的最终输出特征；pool 为全局池化操作，本文使用最大池化；o 为归一化算子；ξ 为维数恢复操作。复合注意力融合模块的最终总体策略可由式(6)计算得出。

$$\boldsymbol{r} = 0.5\times[(\boldsymbol{f}_1+\boldsymbol{f}_2)+\tilde{\boldsymbol{f}}_{\mathrm{f}}] \tag{6}$$

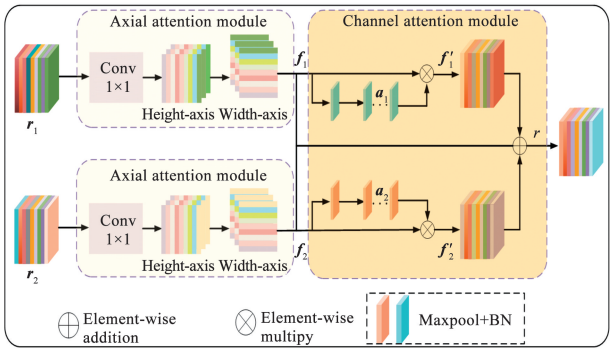


图 3　复合注意力

Fig. 3　Compound attention

1.5　损失函数

1.5.1　泰勒损失

为了得到期望的泰勒展开特征映射，本文采用泰勒损失对泰勒展开网络进行优化，定义为：

$$L_{\mathrm{T}} = L_{\mathrm{pixel}} + \lambda L_{\mathrm{grad}} \tag{7}$$

式中：L_{pixel} 和 L_{grad} 分别为像素损失和梯度细节损失；λ 为约束其幅度差的超参数。像素损失 L_{pixel} 在像素级度量两幅图像之间的差异，定义为：

$$L_{\mathrm{pixel}} = \frac{1}{HW}\|\boldsymbol{I}_x - \boldsymbol{I}_o\|_1 \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{I}_x$ 和 $\boldsymbol{I}_o$ 分别表示泰勒展开网络的输入图像和输出图像。H 为图像的高度，W 为图像的宽度，$\|\cdot\|_1$ 表示 L_1 范数。梯度细节损失定义为：

$$L_{\mathrm{grad}} = \frac{1}{HW}\|\,|\nabla\boldsymbol{I}_o| - \max(|\nabla\boldsymbol{I}_x|,|\nabla\boldsymbol{I}_n|)\,\|_1 \tag{9}$$

式中：∇、$|\cdot|$ 和 $\max(\cdot)$ 分别表示 Sobel 操作、绝对值操作和最大值操作，$\boldsymbol{I}_n$ 表示由导数网络分解的特征图。

1.5.2　融合损失

本文利用 MS-SSIM 损失函数 $L_{\mathrm{ssim}}^{\mathrm{ms}}$ 来保持融合图像更清晰的强度分布，定义为：

$$L_{\mathrm{ssim}}^{\mathrm{ms}} = (1-\mathrm{SSIM}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{fus}},\boldsymbol{I}_{\mathrm{ir}})) + (1-\mathrm{SSIM}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{fus}},\boldsymbol{I}_{\mathrm{vis}})) \tag{10}$$

式中，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{ir}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{vis}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{fus}}$ 分别为红外图像、可见光图像和融合图像，为了促进纹理细节的恢复，本文建立了梯度分布损失，定义为：

$$L_{\mathrm{JGrad}} = \|\max(\nabla\boldsymbol{I}_{\mathrm{ir}},\nabla\boldsymbol{I}_{\mathrm{vis}}),\nabla\boldsymbol{I}_{\mathrm{fus}}\|_1 \tag{11}$$

为使融合图像具有更清晰的纹理细节，融合图像的梯度被强制接近红外图像和可见光图像梯度之间的最大值。此外，为了保留两幅图像的显著性目标，使用自适应视觉显著性图来构建新的损失 L_{svs}：

$$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{ir}} = \boldsymbol{S}_{\mathrm{fir}}/(\boldsymbol{S}_{\mathrm{fir}}-\boldsymbol{S}_{\mathrm{fvis}}) \tag{12}$$

$$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{vis}} = 1-\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{ir}} \tag{13}$$

$$L_{\mathrm{svs}} = \|(\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{ir}}\otimes\boldsymbol{I}_{\mathrm{ir}} + \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{vis}}\otimes\boldsymbol{I}_{\mathrm{vis}}),\boldsymbol{I}_{\mathrm{fus}}\|_1 \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{S}$ 为显著性矩阵，$\boldsymbol{\omega}_{ir}$ 和 $\boldsymbol{\omega}_{vis}$ 分别为红外图像和可见光图像的权重图。总融合损失计算公式为：

$$L_{fus}=\lambda_{ssim}L_{ssim}^{ms}+\lambda_{JG}L_{JGrad}+\lambda_{svs}L_{svs} \tag{15}$$

式中，λ_{ssim}、λ_{JG} 和 λ_{svs} 为权重系数，分别设置为 1.0、20.0 和 5.0 来计算总融合损失。

2 实验结果与分析

2.1 实验设置

本实验框架基于 PyTorch 实现。在训练阶段，使用 MSRS 数据集中的训练集进行模型训练，并采用其验证集进行模型验证与调参。为提升数据多样性，对训练图像进行随机裁剪，生成 256 × 256 的图像块，每个训练批次包含 8 个图像块。测试阶段使用 RoadScene 数据集中的 121 幅图像进行性能评估。实验在 NVIDIA GeForce RTX 4060 GPU 上进行。优化器选用 Adam，初始学习率设为 0.001，训练共进行 300 个周期，且学习率保持不变。

2.2 对比实验与分析

本文选取了 9 种具有代表性的先进融合方法进行对比研究，包括 DenseFuse[21]、FusionGAN[22]、GANMcC[23]、PMGI[24]、SeAFusion[25]、U2Fusion[26]、SDCFusion[27]、IMF[28] 和 T2EA[29]。为客观评价融合效果，实验采用了 6 个质量评价指标：空间频率 F_S、平均梯度 G_A、互信息 I_M、视觉信息保真度 F_{VI}、峰值信噪比 P_S、结构相似性 S_S。上述评价指标的数值与融合质量呈正相关关系，即指标值越大，表明融合效果越好。

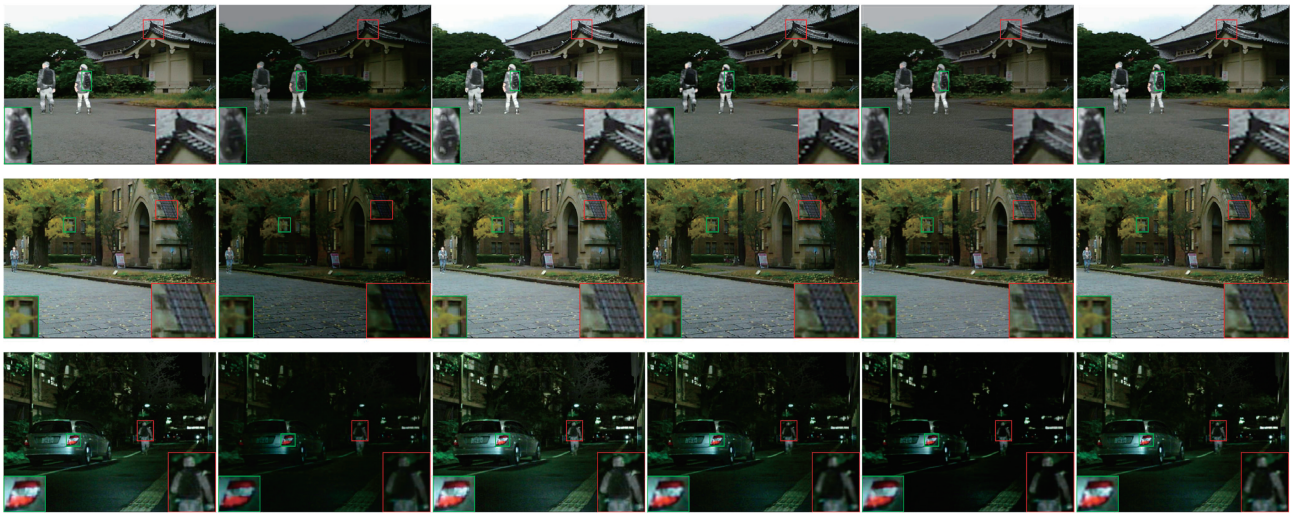
2.3 MSRS 数据集对比实验

2.3.1 主观评价

本文在 MSRS 数据集中选取了 3 组图像进行主观评价，结果如图 4 所示，其中，红框和绿框标示了图像的局部放大区域。



(a) IR (b) VI (c) DenseFuse (d) FusionGAN (e) GANMcC (f) PMGI



(g) SeAFusion (h) U2Fusion (i) SDCFusion (j) IMF (k) T2EA (l) Ours

图 4 MSRS 数据集不同算法融合结果

Fig. 4 The fusion results of different algorithms in the MSRS dataset

如图 4 所示可以看到，在第 1 组和第 2 组的白天场景中，DenseFuse、FusionGAN、GANMcC、U2Fusion 受光谱污染影响，导致融合图像的颜色偏暗且均偏向于红外图像，缺失了源可见光图像的细节信息。PMGI 出现了颜色失真，导致融合质量的视觉效果较差，SeAFusion 与 IMF 虽然亮度尚可，但出现了树木边缘模糊。SDCFusion 较好地保留了可见光的纹理，但红外背景细节略有丢失。T2EA 的颜色亮度较为偏暗，在第 3 组黑夜场景中，DenseFuse、FusionGAN、GANMcC 在黑暗背景中引入可见光噪声，导致目标边缘出现重影，PMGI 与 T2EA 对人物红外辐射强度估计不足，目标暗淡。SeAFusion、IMF 与 SDCFusion 虽提升了红外对比度，却在车灯高光区域产生过曝。与其他方法相比，本文方法获得的图像纹理清晰且无伪影，整体亮度均衡、无颜色偏移。

2.3.2　客观评价

表 1 给出了在 MSRS 数据集 20 组融合图像的平均值，其中，粗体表示最优值，通过对 MSRS 数据集的 6 项关键指标评估，本文方法展现出较好的综合性能。具体而言，在 F_S、G_A、F_{VI}、P_S、S_S的 5 项核心指标上，本文方法均位列第一，比其他方法分别平均提高 72.18%、66.68%、22.15 %、0.79%、3.36%，在 I_M上排名第 3，但仍优于多数对比方法。F_S最优，说明融合图像具有更高的整体清晰度和更丰富的纹理细节，这得益于本文设计的双分支特征提取网络保留了局部信息与全局信息；G_A最优，说明融合图像细节更突出；F_{VI}最优，说明融合图像保留了最多的来自源图像的可感知信息；P_S最优，说明融合图像具有非常高的保真度，这是因为本文设计的泰勒展开网络提取多层次特征信息，同时保留更多精细特征；S_S最优，说明融合图像更好地保留了源图像的结构信息。I_M排名仅次于 SeAFusion 与 SDCFusion，说明融合图像对于源图像信息也有不错的保留。

表 1　MSRS 数据集 20 组融合图像的平均值

Tab. 1　The average of 20 groups of fused images in the MSRS dataset

Method	F_S	G_A	I_M	F_{VI}	P_S	S_S
DenseFuse	0.023 5	2.004 3	2.662 5	0.676 7	66.677 4	0.931 0
FusionGAN	0.017 7	1.520 2	2.053 8	0.500 0	64.708 6	0.831 9
GANMcC	0.024 8	2.229 0	2.547 1	0.675 9	65.244 8	0.915 9
PMGI	0.032 4	2.935 2	2.170 6	0.674 6	60.299 3	0.931 5
SeAFusion	0.043 6	3.575 4	**4.102 7**	0.960 9	63.763 6	0.975 5
U2Fusion	0.024 3	1.888 4	2.292 6	0.562 4	65.972 3	0.899 1
SDCFusion	0.046 0	3.844 6	3.679 0	0.971 6	63.571 7	0.940 0
IMF	0.035 2	2.888 4	2.931 3	0.769 8	65.455 4	0.926 9
T2EA	0.033 0	2.844 4	2.604 6	0.729 5	65.797 0	0.939 8
Ours	**0.052 5**	**4.580 5**	2.994 4	**0.972 9**	**68.224 7**	**0.981 6**

2.4　RoadScene 数据集对比试验

2.4.1　主观评价

本文在 RoadScene 数据集中选取 3 组图像进行主观评价，以验证算法的泛化性能。其中，红框和绿框标示了图像的局部放大区域，如图 5 所示，在第 1 组的白天场景中，DenseFuse 整体对比度不足，车辆轮廓边缘模糊；FusionGAN 与 GANMcC 在引擎盖区域出现明显光谱伪影，颜色失真；PMGI 对路面标识的保持较弱，细节被平滑；SeAFusion 亮度尚可，但后车窗纹理被过度增强，产生亮斑；U2Fusion 与 SDCFusion 在树木边缘处均出现轻微重影；IMF 与 T2EA 整体偏灰，缺乏饱和度。在第 2 组、第 3 组的夜晚场景中，DenseFuse 整体亮度不足，道路标线几乎不可辨；FusionGAN 与 GANMcC 边缘出现伪影，灯光细节信息丢失；PMGI 整体色调偏冷，绿色植被失去原有饱和度；SeAFusion 与 SDCFusion 均出现过度曝光；U2Fusion 与 T2EA 缺失了路灯细节；与其他方法相比，本文方法主观观感最接近可见光源图像，同时保留了红外目标的显著性。

2.4.2　客观评价

表 2 给出了在 RoadScene 数据集 20 组融合图像的平均值，其中，粗体表示最优值，通过对 RoadScene 数据集的 6 项关键指标评估，本文方法展现出较好的综合性能。具体而言，在 F_S、G_A、I_M、F_{VI}四项核心指标上，本文方法均位列第 1，说明本文方法在纹理细节保留与视觉显著性方面取得较好的效果，这得益于本文设计的泰勒展开网络与双分支特征提取网络充分提取到多层级特征并保留了全局特征信息。在 P_S、S_S指标排名第 3，这是因为本文使用 MSRS 数据集作为训练集，而 RoadScene 数据集作为测试集，导致指标出现下降。整体上，本文在 RoadScene 数据集取得较好的效果。



图 5 RoadScene 数据集不同算法融合结果

Fig. 5 The fusion results of different algorithms in the RoadScene dataset

表 2 RoadScene 数据集 20 组融合图像的平均值

Tab. 2 The average of 20 groups of fused images in the RoadScene dataset

Method	F_S	G_A	I_M	F_{VI}	P_S	S_S
DenseFuse	0.034 6	3.439 3	3.058 1	0.651 8	**62.029 7**	0.879 7
FusionGAN	0.038 5	3.814 3	2.973 1	0.579 2	59.015 4	0.751 9
GANMcC	0.040 1	4.277 3	2.795 3	0.723 8	59.229 8	0.862 4
PMGI	0.046 6	4.863 6	3.329 4	0.773 7	59.977 9	**0.901 4**
SeAFusion	0.049 2	4.416 1	3.163 0	0.832 0	59.646 0	0.876 3
U2Fusion	0.035 2	3.743 2	2.277 2	0.723 8	61.529 0	0.864 0
SDCFusion	0.071 8	7.280 3	2.680 3	0.722 6	59.883 3	0.899 7
IMF	0.043 3	4.572 9	3.009 4	0.732 9	60.536 2	0.836 0
T2EA	0.052 9	5.565 1	2.566 6	0.673 8	59.485 5	0.887 4
Ours	**0.075 2**	**7.420 3**	**3.878 0**	**0.862 2**	60.609 3	0.888 6

2.5 消融实验

本文对完整模型(Ours)进行了消融实验,分别移除 TEN、PCN、ST 以及 CA 模块,分析了对应的模型变体(Model1、Model2、Model3、Model4)。如表 3 与图 6 所示,完整模型在 MSRS 数据集上的融合性能优于各消融策略下的模型,证明了其融合效果的优越性。Model1 因缺少 TEN 模块导致图像细节丢失,各项指标下降。Model2 移除 PCN 模块后,人物边缘与场景信息保持欠佳,G_A、I_M等指标显著降低。Model3 与 Model4 分别移除 ST 与 CA 模块,均表现出在边缘、纹理等细节融合上的不足,并导致 F_{VI}、P_S、G_A 等关键指标下滑。上述实验结果验证了 TEN、PCN、ST 和 CA 模块对于提升融合图像的细节质量与客观指标均具有不可替代的重要作用。

表 3　消融实验结果

Tab. 3　Ablation experimental results

模型	TAN	PCN	ST	CA	F_S	G_A	I_M	F_{VI}	P_S	S_S
Model1		√	√	√	0.035 2	3.672 3	2.368 4	0.901 7	66.459 8	0.914 8
Model2	√		√	√	0.045 1	3.845 5	2.528 7	0.917 6	66.741 8	0.925 4
Model3	√	√		√	0.046 9	3.989 2	2.635 9	0.954 8	66.588 2	0.899 7
Model4	√	√	√		0.047 6	3.865 1	2.954 8	0.971 3	68.015 7	0.971 6
Ours	√	√	√	√	**0.052 5**	**4.580 5**	**2.994 4**	**0.972 9**	**68.224 7**	**0.981 6**



(a) IR　(b) VI　(c) Model1　(d) Model2　(e) Model3　(f) Model4　(g)Ours

图 6　MSRS 数据集消融实验结果

Fig. 6　Ablation experiment results of the MSRS dataset

2.6　计算复杂度分析

本文对算法的计算复杂度进行分析，核心指标包括参数量与计算效率。由表 4 可知，本文方法的参数量排名第 4，模型结构相对轻量。在融合效率方面，本文方法在 MSRS 和 RoadScene 数据集上的单位融合时间分别位列第 2 和第 3，表现出优异的计算效率。实验结果表明，本文方法在参数量和平均运行时间上取得较好的效果。

表 4　参数量和平均运行时间

Tab. 4　Parameter quantity and average running time

Method	Params/M	Time/s	
		MSRS	RoadScene
DenseFuse	**0.075 9**	0.035 4	0.021 5
FusionGAN	0.925 6	1.893 4	1.265 4
GANMcC	1.865 6	2.364 7	1.935 1
PMGI	0.651 8	0.579 3	0.268 7
SeAFusion	0.167 7	0.167 9	0.043 4
U2Fusion	0.653 8	1.617 9	0.827 9
SDCFusion	0.565 4	0.196 7	0.056 4
IMF	0.736 3	**0.015 1**	**0.015 2**
T2EA	0.296 4	0.546 6	0.154 6
Ours	0.449 4	0.025 4	0.025 0

3　结　论

本文提出了一种泰勒展开与复合注意力的红外与可见光图像融合网络，通过大量实验验证，得出以下主要结论。

1）通过泰勒展开网络将源图像分解为映射层与导数层，以充分提取多层级特征，有效避免了细节丢失并保留细微结构。在此基础上，构建了双分支特征提取结构，保留了局部特征与全局上下文信息。

2）为进一步提升融合性能，引入复合注意力机制，从空间与通道两个维度协同优化，显著提升了多模态图像融合的精度与鲁棒性。

3）与其他融合方法相比，在 MSRS 数据集测试中，本文方法在 F_S、G_A、F_{VI}、P_S、S_S 五项核心指标方面，均位列第 1，比其他方法分别平均提高 72.18%、66.68%、22.15%、0.79%、3.36%。同时，在 RoadScene 数据集中也取得了较好的结果。证明了本文方法能够保障融合图像的整体清晰度、全局纹理的丰富度，并在目标与背景的平衡上表现出卓越的细节保持能力。

参考文献

[1] LIU Jinyuan, WU Guanyao, LIU Zhu, et al. Infrared and visible image fusion: From data compatibility to task adaption[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024, 47(4): 2349. DOI: 10.1109/TPAMI.2024.3521416

[2] 张洲宇，曹云峰，丁萌，等. 采用多层卷积稀疏表示的红外与可见光图像融合[J]. 哈尔滨工业大学学报，2021，53(12)：51
ZHANG Zhouyu, CAO Yunfeng, DING Meng, et al. Infrared and

visible image fusion via multi-layer convolutional sparse representation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(12): 51. DOI:10.11918/202005038

[3]史文云, 任晓明, 颜楠楠. 基于 Schatten-p LatLRR 的电力设备红外与可见光图像融合[J]. 激光技术, 2025, 49(1): 67
SHI Wenyun, REN Xiaoming, YAN Nannan. Fusion of infrared and visible light images of power equipment based on Schatten-p LatLRR[J]. Laser Technology, 2025, 49(1): 67. DOI:10.7510/jgjs.issn.1001 - 3806.2025.01.011

[4]李秋恒, 邓豪, 刘桂华, 等. 基于多尺度及多头注意力的红外与可见光图像融合[J]. 红外技术, 2024, 46(7): 765
LI Qiuheng, DENG Hao, LIU Guihua, et al. Infrared and visible images fusion method based on multi-scale features and multi-head attention[J]. Infrared Technology, 2024, 46(7): 765

[5]CHEN Jun, LI Xuejiao, LUO Linbo, et al. Multi-focus image fusion based on multi-scale gradients and image matting [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2021, 24: 655. DOI:10.1109/TMM.2021.3057493

[6]WANG Haozhe, SHU Chang, LI Xiaofeng, et al. Two-stream edge-aware network for infrared and visible image fusion with multi-level wavelet decomposition[J]. IEEE Access, 2024, 12: 22190. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3364050

[7]LI Yonghua, LIU Gang, BAVIRISETTI D P, et al. Infrared-visible image fusion method based on sparse and prior joint saliency detection and LatLRR-FPDE[J]. Digital Signal Processing, 2023, 134: 103910. DOI:10.1016/j.dsp.2023.103910

[8]LI Jun, SONG Minghui, PENG Yuanxi. Infrared and visible image fusion based on robust principal component analysis and compressed sensing[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 89: 129. DOI: 10.1016/j.infrared.2018.01.003

[9]LI Hui, WU Xiaojun, DURRANI T. NestFuse: An infrared and visible image fusion architecture based on nest connection and spatial/channel attention models [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(12): 9645. DOI:10.1109/TIM.2020.3005230

[10]ZHAO Fan, ZHAO Wenda, YAO Libo, et al. Self-supervised feature adaption for infrared and visible image fusion [J]. Information Fusion, 2021, 76: 189. DOI:10.1016/j.inffus.2021.06.002

[11]ZHAO Zixiang, XU Shuang, ZHANG Jiangshe, et al. Efficient and model-based infrared and visible image fusion via algorithm unrolling[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 32(3): 1186. DOI:10.1109/TCSVT.2021.3075745

[12]LI Jiawei, CHEN Jiansheng, LIU Jinyuan, et al. Learning a graph neural network with cross modality interaction for image fusion[C]// Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia. Ottawa: ACM, 2023: 4471. DOI:10.1145/3581783.3612135

[13]YUE Jun, FANG Leyuan, XIA Shaobo, et al. Dif-Fusion: Toward high color fidelity in infrared and visible image fusion with diffusion models[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2023, 32: 5705. DOI:10.1109/TIP.2023.3322046

[14]YANG Yong, ZHOU Na, WAN Weiguo, et al. MACCNet: Multiscale attention and cross-convolutional network for infrared and visible image fusion[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(10): 16587. DOI:10.1109/JSEN.2024.3385638

[15]ZHOU Huabing, WU Wei, ZHANG Yanduo, et al. Semantic-supervised infrared and visible image fusion via a dual-discriminator generative adversarial network [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2021, 25: 635. DOI:10.1109/TMM.2021.3129609

[16]YIN Haitao, XIAO Jinghu, CHEN Hao. CSPA-GAN: A cross-scale pyramid attention GAN for infrared and visible image fusion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1. DOI:10.1109/TIM.2023.3317932

[17]WANG Zhishe, ZHANG Zhouqun, QI Wuqiang, et al. FreqGAN: Infrared and visible image fusion via unified frequency adversarial learning[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2025, 35(1): 728. DOI:10.1109/TCSVT.2024.3460172

[18]YI Xupeng, XU Han, ZHANG Hao, et al. Text-IF: Leveraging semantic text guidance for degradation-aware and interactive image fusion[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE, 2024: 27026. DOI:10.48550/arxiv.2403.16387

[19]LIU Jinyuan, LI Xingyuan, WANG Zirui, et al. PromptFusion: Harmonized semantic prompt learning for infrared and visible image fusion [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 12(3): 502. DOI:10.1109/JAS.2024.124878

[20]TANG Wei, HE Fazhi, LIU Yu. YDTR: Infrared and visible image fusion via Y-shape dynamic transformer[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2022, 25: 5413. DOI: 10.1109/TMM.2022.3192661

[21]LI Hui, WU Xiaojun. DenseFuse: A fusion approach to infrared and visible images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 28(5): 2614. DOI:10.1109/TIP.2018.2887342

[22]MA Jiayi, YU Wei, LIANG Pengwei, et al. FusionGAN: A generative adversarial network for infrared and visible image fusion [J]. Information Fusion, 2019, 48: 11. DOI:10.1016/j.inffus.2018.09.004

[23]MA Jiayi, ZHANG Hao, SHAO Zhenfeng, et al. GANMcC: A generative adversarial network with multiclassification constraints for infrared and visible image fusion [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1. DOI:10.1109/TIM.2020.3038013

[24]ZHANG HAO, XU Han, XIAO Yang, et al. Rethinking the image fusion: A fast unified image fusion network based on proportional maintenance of gradient and intensity[C]//34th AAAI Conference on Artificial Intelligence. New York: AAAI, 2020: 12797. DOI: 10.1609/AAAI.V34i07.6975

[25]TANG Linfeng, YUAN Jiteng, MA Jiayi. Image fusion in the loop of high-level vision tasks: A semantic-aware real-time infrared and visible image fusion network[J]. Information Fusion, 2022, 82: 28. DOI:10.1016/j.inffus.2021.12.004

[26]XU Han, MA Jiayi, JIANG Junjun, et al. U2Fusion: A unified unsupervised image fusion network [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(1): 502. DOI:10.1109/TPAMI.2020.3012548

[27]LIU Xiaowen, HUO Hongtao, LI Jing, et al. A semantic-driven coupled network for infrared and visible image fusion [J]. Information Fusion, 2024, 108: 102352. DOI:10.1016/j.inffus.2024.102352

[28]WANG Di, LIU Jinyuan, MA Long, et al. Improving misaligned multi-modality image fusion with one-stage progressive dense registration[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2024, 34(11): 10944. DOI: 10.1109/TCSVT.2024.3412743

[29]HUANG Zhenghua, LIN Cheng, XU B, et al. T2EA: Target-aware Taylor expansion approximation network for infrared and visible image fusion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2025, 35(5): 4831. DOI:10.1109/TCSVT.2024.3524794

(编辑 吕雪梅)

DOI:10.11918/202504063

融合信任值和身份标识验证的节点复制攻击检测策略

滕志军[1,2],苗润升[2],孙铭阳[3],李纪奇[2],赵立权[1,2]

(1.现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学),吉林 132012;
2.东北电力大学 电气工程学院,吉林 132012;3.中国电信股份有限公司吉林分公司,长春 130022)

摘 要:为抵御无线传感器网络中的节点复制攻击,保障网络的安全与稳定,本文提出了一种融合信任值和身份标识验证的节点复制攻击检测策略(node replication attack detection strategy integrating node creditworthiness and identity authentication, NRADS-NC&IA)。该方法首先建立模糊综合信任评价模型,在直接信任模块中引入信誉维护函数、异常弱化因子及奖惩因子,综合通信属性、数据属性、网络属性和物理属性影响因素计算待评估节点的直接信任值,并采用滑动时间窗口机制实现节点信任值的动态更新,有效提升评估的时效性与准确性,在此基础上应用支持度函数评估节点可信度,从而有效过滤节点的欺骗行为得到更为可靠的节点间接信任值,最终的节点综合信任值由直接信任值与间接信任值加权求和得到;采用动态自适应阈值筛选可疑节点,并在可疑节点中进行节点ID比对,以确定副本节点。仿真实验表明,NRADS-NC&IA在无需依赖节点空间位置信息的情形下,静态和移动无线传感器网络的检测率保持在97%和94%以上,具有较强的环境适应性,可有效应对复杂动态环境中的无线传感器网络安全问题。

关键词:无线传感器网络;信任值;身份标识验证;节点复制攻击;模糊权重
中图分类号:TN92 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0063-10

Node replication attack detection strategy integrating node creditworthiness and identity authentication

TENG Zhijun[1,2], MIAO Runsheng[2], SUN Mingyang[3], LI Jiqi[2], ZHAO Liquan[1,2]

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China;
2. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
3. China Telecom Corporation Limited Jilin Branch, Changchun 130022, China)

Abstract: To defend against node replication attacks in wireless sensor networks and maintain network security and stability, this paper proposes a node replication attack detection strategy integrating node creditworthiness and identity authentication (NRADS-NC&IA). The approach begins by establishing a fuzzy comprehensive trust evaluation model. In the direct trust module, reputation maintenance function, anomaly attenuation factor and reward and punishment factor are introduced. The direct trust value of the node to be evaluated is calculated by comprehensively considering the influencing factors of communication attributes, data attributes, network attributes and physical attributes. A sliding time window mechanism is adopted to dynamically update node trust value, significantly enhancing the timeliness and accuracy of the evaluation. On this basis, a support function is applied to evaluate the credibility of nodes, effectively filtering out the deceptive behaviors of nodes and obtaining more reliable indirect trust values of nodes. The final comprehensive trust value of nodes is derived from the weighted summation of its direct and indirect trust values. Dynamic adaptive thresholds are adopted to screen suspicious nodes, and node ID comparisons are conducted among the suspicious nodes to obtain the determined replica nodes. Simulation results show that NRADS-NC&IA achieves detection rates of over 97% and 94% in static and mobile wireless sensor networks without relying on the spatial position information of nodes. The strategy exhibits strong environmental adaptability and can effectively deal with the security problems of wireless sensor networks in complex dynamic environments.

Keywords: wireless sensor network; trust value; identity verification; node replication attack; fuzzy weight

收稿日期:2025-04-22;**录用日期**:2025-09-04;**网络首发日期**:2025-10-11
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251010.1333.002
基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61501107)
作者简介:滕志军(1973—),男,教授,硕士生导师
通信作者:赵立权,230666801@qq.com

21 世纪开始,无线通信、集成电路、传感器和数字电子等技术的发展促进了基于大量传感器节点协同工作组成的无线传感器网络(wireless sensor networks,WSNs)的快速发展[1],其广泛用于环境监测、灾害预警、智慧城市等物联网的数据感知阶段。无线传感器网络具有无标度特性,传感器节点通常被部署在开放且无人监管的环境中[2],极易遭受攻击,造成整个网络瘫痪[3],需要通过识别及检测不可信节点来确保自身安全,应对各种潜在攻击,并进行准确数据分析和预测[4]。节点复制攻击是一种常见的攻击方式,攻击者试图捕获传感器节点并提取加密信息,生成副本节点后进一步引入内部攻击,而这些副本很难去除,对整个网络造成巨大威胁[5]。

针对节点复制攻击的检测机制,目前大多集中在静态网络中,基于位置信息和身份信息采用分布式检测法或混合检测法进行识别。周晖等[6]提出基于分簇的节点复制攻击入侵检测方案,结合集中检测和分布检测,在分簇网络中利用簇头和基站传递节点的地理位置和 ID 信息。马锐等[7]提出了基于位置声明信息的分布式节点复制攻击检测方案,通过多重映射机制实现对单一证人节点的验证,但若副本节点不产生声明信息则无法检测该副本节点。Rani 等[8]提出基于唯一身份和定位的副本节点检测,其采用定位技术检测副本节点,需要精准的节点地理位置信息,具有自身局限性。

无线传感器网络并非始终保持静态,对于移动网络中的节点复制攻击检测,Mojtaba 等[9]提出基于看门狗节点的三步机制检测副本节点,看门狗节点监视网络流量并侦听信道,利用邻居信息进行副本节点检测,存在检测效率与资源消耗的矛盾。李峰等[10]提出了一种针对移动异构无线传感器网络的密钥管理策略,利用节点移动前后的位置数据、时间戳及速度上限等识别节点复制攻击。Ebrahim 等[11]提出了一种分布式签名协议,使用签名生成、交换和验证机制来检测移动网络中具有相同 ID 的副本节点,但其检测效率可能受网络规模和节点密度的限制,导致较大的通信开销和延迟。

在利用信任模型检测节点复制攻击方面,Rikli 等[12]提出了一种基于信任的集中式模型检测异常行为,收集与邻居通信相关的统计数据以执行信任功能。Amudha 等[13]提出了一种结合位置信息和信任的检测方法,用于识别无线传感器网络中的节点复制攻击。Anitha 等[14]提出了 SACOP 算法,利用直接和间接信任评估模型对节点的信任值进行估计,从而识别出网络中的副本节点,但间接信任评估模型中无过滤欺骗节点。

目前,对于节点复制攻击的检测方案存在以下问题:1)在实际应用场景中,准确获取每个节点的位置信息难度较大,且采用定位算法及 GPS 定位存在能耗,应设计不依赖节点位置信息的检测方案;2)对于移动网络的节点复制攻击检测存在显著的资源消耗及对位置信息的高依赖性等;3)信任体现主观看法,而现存方案在评判指标体系的构建上多存在单一性,针对复杂的攻击后果需要更客观全面的评判指标体系。

针对上述问题,本文提出了一种融合信任值和身份标识验证的节点复制攻击检测策略 NRADS-NC&IA。建立了模糊综合信任评价模型,计算待评估节点的直接信任值并引入滑动时间窗口动态更新,采用支持度函数衡量节点可信度得到间接信任值,加权求和得到综合信任值,用动态自适应阈值筛选可疑节点并进行节点 ID 比对。

1 系统模型

节点复制攻击网络拓扑图如图 1 所示,黑色实线为正常路径,红色线是节点复制攻击引发的路径和数据流变化。其中红色“·”线表示副本节点之间的虫洞隧道,红色“–”线表示副本节点吸引周围节点流量,红色粗实线表示选择性丢弃数据包、篡改数据包等异常数据流。副本节点可能引发黑洞攻击、虫洞攻击、DOS 攻击、选择性转发攻击以及数据异常等,而对于这些攻击后果可以通过转发指数、邻居节点数、数据发送率、处理延迟、剩余能量、信号强度等指标来检测。

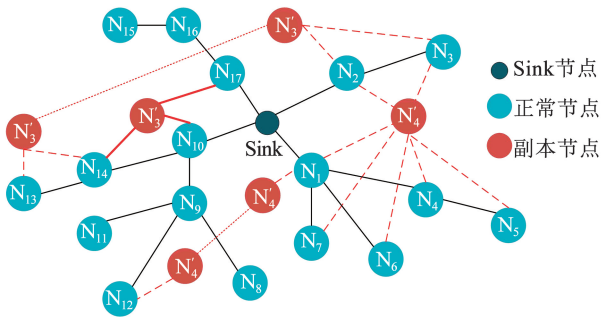


图 1 节点复制攻击网络拓扑图

Fig. 1 Topology of the node replication attack network

检测节点复制攻击的核心思想是确定哪些节点拥有相同 ID,而检查所有节点会消耗大量能量且效率低。因此,本文采用经典的无线传感器网络架构,其中 Sink 节点作为信息汇总中心,资源充裕且具备高度安全性,可保障与网络中节点通信而不受干扰。普通节点则在其通信覆盖范围内实现双向交互通信,利用最短路径算法将采集的数据高效传输至

Sink 节点[15]，建立信任模型并基于节点信任阈值筛选出可疑节点，最终在可疑节点名单中进行身份验证，拥有相同 ID 的节点即被判定为副本节点。

2　信任评估模型

2.1　直接信任

2.1.1　通信行为信任

由于 WSN 部署环境特殊，网络中存在一定的入侵因素，Ganeriwal 等[16]提出了一种适用于资源受限无线传感器网络的信誉评估机制（reputation-based framework for sensor networks，RFSN），利用贝叶斯公式与 Beta 分布对信誉分布进行拟合，通过计算其期望值来得到节点的信任值。然而原始的贝叶斯信任模型忽略了节点故障、环境干扰等异常因素的影响，可能导致很高的误检率。为解决这一问题，引入异常弱化因子，以减少因网络内部故障触发的误报行为检测；加入信任维护函数和奖惩因子，并在直接信任中对异常数据进行过滤，对原有信任模型进行调整。

利用 Beta 分布[17]对节点的信任进行拟合，信任分布符合 Beta($\alpha+1,\beta+1$)。用信任分布的统计期望来表示节点的通信行为信任 $\mathrm{DTB}_{ij}(t)$，其计算公式为：

$$\mathrm{DTB}_{ij}(t)=\frac{\omega\alpha_{ij}+1}{\omega\alpha_{ij}+\lambda\omega\beta_{ij}+2}\times\mathrm{RP} \tag{1}$$

$$\omega=\frac{\theta}{\alpha_{ij}+\beta_{ij}} \tag{2}$$

$$\lambda=\frac{F_i}{F_{\mathrm{d}}} \tag{3}$$

$$\mathrm{RP}=\frac{\alpha_{ij}}{\alpha_{ij}+\varepsilon\beta_{ij}} \tag{4}$$

$$\varepsilon=\frac{\alpha_{ij}+\rho_{ij}}{\alpha_{ij}} \tag{5}$$

式中：α_{ij}为节点 i 与节点 j 的历史正常通信次数；β_{ij}为节点 i 与节点 j 的历史异常通信次数；ω 为信任维护函数，作用是维护现阶段节点行为对信任值的影响，并削弱历史行为；θ 为固定维护值，用来设定维护函数的作用范围，参考 TS-BRS 模型将参数 θ 取值为 150[18]。$\lambda\in[0,1]$为异常弱化因子；F_i为因入侵因素导致的节点异常通信次数；F_{d}为网络中异常通信总次数。RP 为奖惩因子，用于激励正面行为，惩罚负面行为；与静态网络相比，移动网络多存在突发性异常，$\varepsilon(\varepsilon>1)$为突发性异常惩罚权重，对突发性异常行为设置额外惩罚权重，其中 ρ_{ij}为节点 i 与节点 j 的历史突发性异常通信次数，使其均适用于静态和移动网络。

分析节点收集的数据，基于数据的一致性和相关性采用异常数据筛选机制过滤异常数据[19]，若某节点收集数据 x_i 与其邻节点收集数据 x_j 的差值小于数据异常允许误差阈值 A_{th}，则该节点被视为正常；反之，则视为异常。节点数据异常允许误差阈值 A_{th} 的计算公式为

$$A_{\mathrm{th}}=\frac{1}{|N_i|}\sum_{j\in N_i}\left|x_j-\frac{x_i+\sum_{j\in N_i}x_j}{|N_i|+1}\right| \tag{6}$$

式中：N_i为节点 i 邻居节点的集合，$|N_i|$为节点 i 邻居节点个数。若通信行为正常且数据误差在允许范围则为成功交互，否则为异常交互。

2.1.2　模糊权重

由于节点复制攻击中的副本节点会进一步引入许多内部攻击，因此需要更客观全面的评判指标体系。本文在信任模型的输入中综合考虑了多种因素，其权重采用层次分析法及模糊综合评价[3]加以确定，旨在对复杂的攻击后果进行全面评估。为确保评判指标体系的客观性，对多种信任要素进行分层处理，以减少单次权重涉及的信任要素数目，并可防止因信任要素过多而引起权重分配系数偏低的情况。

结合无线传感器网络的特点，建立系统的梯阶层次结构，使用多层级模糊综合评价机制分析每个信任因素，实现对每个节点信任评估的准确性和公平性的多维评价，信任要素层次结构如图 2 所示。

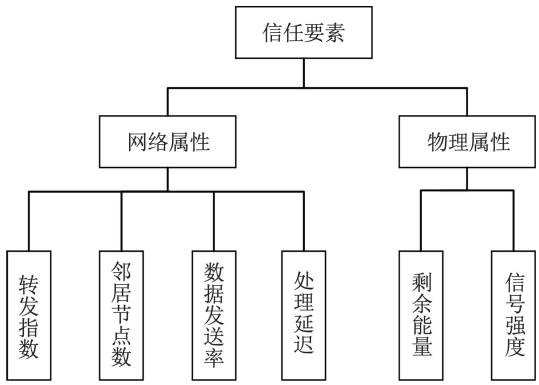


图 2　信任要素层次结构

Fig. 2　Hierarchy structure of trust factors

建立信任因素集：一级信任因素集 $U=\{U_1,U_2\}$，其中 U_1 和 U_2 分别表示网络属性和物理属性；二级信任因素集 $U_1=\{U_{11},U_{12},U_{13},U_{14}\}$，其中 U_{1m}（$m=1,2,3,4$）分别表示转发指数、邻居节点数、数据发送率、处理延迟，$U_2=\{U_{21},U_{22}\}$，其中 U_{2p}（$p=1,2$）分别表示剩余能量和信号强度；建立信任评判集 $E=\{e_1,e_2,e_3,e_4\}$，e_n（$n=1,2,3,4$），其中 e_1 代表不可信，e_2 代表低可信，e_3 代表中可信，e_4 代表高可信。

建立权重分配模糊向量：一级权重分配模糊向量 $\boldsymbol{A}=\{a_1,a_2\}$，且 $a_1+a_2=1$，采用三标度法[3]判断各节点信任要素的相对重要性，建立判断尺度表，可求得 $a_1=0.75$，$a_2=0.25$；建立二级权重分配模糊向量 $\boldsymbol{A}_1=\{a_{11},a_{12},a_{13},a_{14}\}$，$\boldsymbol{A}_2=\{a_{21},a_{22}\}$，采用三标度法建立判断尺度表，可求得 $a_{11}=0.564$，$a_{12}=0.263$，$a_{13}=0.118$，$a_{14}=0.055$，$a_{21}=0.75$，$a_{22}=0.25$。

各因素归一化到[0,1]后，将评价因素作为输入变量，代入梯形隶属度函数，得到隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$，图 3 展示了梯形隶属度函数。

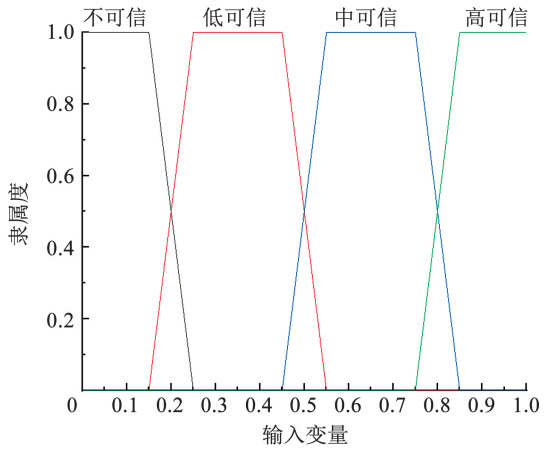


图 3 梯形隶属度函数图

Fig. 3 Ladder membership function diagram

二级模糊综合评判：建立单因素评价矩阵，对网络属性 U_1 和物理属性 U_2 的二级因素进行模糊评判，分别得到隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}_1$ 和 $\boldsymbol{R}_2$，如公式(7)、(8)所示。

$$\boldsymbol{R}_1=\begin{bmatrix} r_{111} & r_{112} & r_{113} & r_{114} \\ r_{121} & r_{122} & r_{123} & r_{124} \\ r_{131} & r_{132} & r_{133} & r_{134} \\ r_{141} & r_{142} & r_{143} & r_{144} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{R}_2=\begin{bmatrix} r_{211} & r_{212} & r_{213} & r_{214} \\ r_{221} & r_{222} & r_{223} & r_{224} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：r_{1mn} 为网络属性 U_1 中的第 m 个二级指标对评价集 E 中 e_n 的隶属度，r_{2pn} 为物理属性 U_2 中的第 p 个二级指标对评价集 E 中 e_n 的隶属度。

分别将隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}_1$ 和 $\boldsymbol{R}_2$ 与评价权重集合 $\boldsymbol{A}_1$ 和 $\boldsymbol{A}_2$ 做模糊合成运算，得到的二级模糊综合评价结果向量 $\boldsymbol{B}_1$ 和 $\boldsymbol{B}_2$ 分别为：

$$\boldsymbol{B}_1=A_1\circ\boldsymbol{R}_1=(b_{11}\quad b_{12}\quad b_{13}\quad b_{14}) \tag{9}$$

$$\boldsymbol{B}_2=A_2\circ\boldsymbol{R}_2=(b_{21}\quad b_{22}\quad b_{23}\quad b_{24}) \tag{10}$$

式中：“∘”为模糊综合评判中的合成算子，b_{1n} 为网络属性 U_1 对评价集 E 中 e_n 的隶属度，b_{2n} 为物理属性 U_2 对评价集 E 中 e_n 的隶属度。

一级模糊综合评判：合成 $\boldsymbol{B}_1$ 和 $\boldsymbol{B}_2$，并与一级权重分配模糊向量 $\boldsymbol{A}$ 做模糊合成运算，得到一级模糊综合评价结果向量 $\boldsymbol{B}$ 为

$$\boldsymbol{B}=A\circ\begin{pmatrix}\boldsymbol{B}_1\\ \boldsymbol{B}_2\end{pmatrix}=(b_1\quad b_2\quad b_3\quad b_4) \tag{11}$$

式中 b_n 为被评价节点整体对评价集 E 中 e_n 的隶属度。

节点的直接信任 $\mathrm{DT}_{ij}(t)$ 计算公式为

$$\mathrm{DT}_{ij}(t)=\frac{\sum_{n=1}^{4}c_nb_n}{\sum_{n=1}^{4}b_n}\mathrm{DTB}_{ij}(t) \tag{12}$$

式中 c_n 为信任等级，根据模糊向量单值法将评价集 E 中 e_1、e_2、e_3、e_4 的 4 个信任等级进行定义[17]，分别为 $c_1=0.1$，$c_2=0.35$，$c_3=0.65$，$c_4=0.9$。

2.1.3 信任值更新

为了突显信任值本身具有的动态性和时效性，增强节点近期交互结果对整体信任评估的影响，采用时间滑动窗口机制[20]更新节点信任值。如图 4 所示，时间窗口的大小设为 d 个交互周期，用于记录节点近期的交互数据。



图 4 时间滑动窗口

Fig. 4 Time sliding window

使用指数衰减函数对时间窗内的每一个时间槽赋予权值，得到新的信任值：

$$\mathrm{DT}_{ij}(t_\mathrm{new})=\sum_{h=1}^{d}\chi_h\mathrm{DT}_{ij}(t_h) \tag{13}$$

式中：χ_h 为以 h 为时间槽索引的权重，$\mathrm{DT}_{ij}(t_h)$ 为相对应时间槽的信任值，$h=1,2,\cdots,d$。权重 χ_h 的计算公式为

$$\chi_h=\frac{\mathrm{e}^{-\kappa(d-h)}}{\sum_{h=1}^{d}\mathrm{e}^{-\kappa(d-h)}} \tag{14}$$

式中：κ 为指数衰减系数，$(d-h)$ 为时间槽 h 相对于窗口终止点的偏移量。

2.2 间接信任

节点 i 为了得到被评估节点 j 的间接信任值，向两者的公共邻居节点(即推荐节点)广播查询信息。而推荐节点本身也可能存在不可信的现象，为了提高推荐信任评估的可靠性和准确性，本文利用支持

度函数计算推荐节点传递数值的偏差情况，并为各推荐节点分配相应的权重。当节点 i 收到来自多个推荐节点的直接信任值时，根据每个推荐节点的权重对这些信任值进行加权平均，从而得到对节点 j 的间接信任值。

支持度函数用于量化两个节点之间的相似性或接近程度，由于 Sigmoid 函数的平滑性和可调整性，本文选择 Sigmoid 函数作为支持度函数 sup 的具体形式，原始 Sigmoid 函数为

$$\sup(\mathrm{DT}_{fj}(t),\mathrm{DT}_{gj}(t)) = 2\times e^{\frac{-1}{|\mathrm{DT}_{fj}(t)-\mathrm{DT}_{gj}(t)|+c}} - 1 \tag{15}$$

其中推荐节点 = {节点 1、…、节点 f、节点 g、…、节点 q}，参数 c 是一个足够小的正常数，用于避免分母为零导致的计算中断。两个推荐节点得到的直接信任差异越大，支持度绝对值越小；直接信任差异越小，支持度绝对值越大。因此推荐节点 f 的综合支持度 $\sup_f$ 计算公式为

$$\sup_f = \sum_{l=1}^{q}\sup(\mathrm{DT}_{fj}(t),\mathrm{DT}_{lj}(t)) \tag{16}$$

推荐节点的综合支持度越小，信任程度就越低，计算间接信任时将此类推荐节点筛掉，因此设置阈值 τ_{th}，将综合支持度 $\sup_f$ 大于 τ_{th} 的推荐节点滤除，设筛掉此类节点后的推荐节点集合为集合 C，推荐节点 f 仍属于集合 C。

根据综合支持度计算归一化权重 w_f 计算公式为

$$w_f = \frac{\sup_f}{\sum_{f\in C}\sup_f} \tag{17}$$

综合上述公式，计算间接信任值 $\mathrm{IT}_{ij}(t)$ 为

$$\mathrm{IT}_{ij}(t) = \sum_{f\in C} w_f \times \mathrm{DT}_{if}(t) \times \mathrm{DT}_{fj}(t) \tag{18}$$

2.3　信任积聚

为得到更客观且全面的信任评估，本文采用基于权重的积聚方式[21]计算综合信任，并采用变异系数法分别为直接信任和间接信任分配动态权重 φ_1、φ_2。基于数据的内在变异性（即离散程度）自动调整权重，数据离散程度越大，权重越高。综合信任 $\mathrm{CT}_{ij}(t)$ 计算公式为

$$\mathrm{CT}_{ij}(t) = \varphi_1\mathrm{DT}_{ij}(t) + \varphi_2\mathrm{IT}_{ij}(t) \tag{19}$$

假设有 n 个节点，分别计算变异系数 $\mathrm{CV_d}$、$\mathrm{CV_{ind}}$，计算公式如下：

$$\mathrm{CV_d} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\mathrm{DT}_{ij}(t) - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\mathrm{DT}_{ij}(t)\right)^2}}{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\mathrm{DT}_{ij}(t)} \tag{20}$$

$$\mathrm{CV_{ind}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\mathrm{IT}_{ij}(t) - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\mathrm{IT}_{ij}(t)\right)^2}}{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\mathrm{IT}_{ij}(t)} \tag{21}$$

采用 Softmax 函数，通过参数 τ 控制权重的平滑程度。为了既不过于尖锐地放大变异系数的差异，也不过于平滑地抹平差异，选择 $\tau = 0.5$ 作为适中的缩放程度，有助于在综合信任计算中保持不同信任源的相对重要性，得到 φ_1、φ_2 计算公式如下：

$$\varphi_1 = \frac{e^{\frac{\mathrm{CV_d}}{\tau}}}{e^{\frac{\mathrm{CV_d}}{\tau}} + e^{\frac{\mathrm{CV_{ind}}}{\tau}}} \tag{22}$$

$$\varphi_2 = \frac{e^{\frac{\mathrm{CV_{ind}}}{\tau}}}{e^{\frac{\mathrm{CV_d}}{\tau}} + e^{\frac{\mathrm{CV_{ind}}}{\tau}}} \tag{23}$$

最终得到综合信任值 $\mathrm{CT}_{ij}(t)$ 为

$$\mathrm{CT}_{ij}(t) = \frac{e^{\frac{\mathrm{CV_d}}{\tau}}}{e^{\frac{\mathrm{CV_d}}{\tau}} + e^{\frac{\mathrm{CV_{ind}}}{\tau}}}\mathrm{DT}_{ij}(t) + \frac{e^{\frac{\mathrm{CV_{ind}}}{\tau}}}{e^{\frac{\mathrm{CV_d}}{\tau}} + e^{\frac{\mathrm{CV_{ind}}}{\tau}}}\mathrm{IT}_{ij}(t) \tag{24}$$

2.4　动态阈值

为提高信誉模型在不同环境和条件下的适应性和准确性，本文采用基于聚类分析的动态阈值调整反馈机制。利用基于划分的聚类方法划分节点群体，根据节点综合信誉度划分为 k 簇，并明确 k 为 2，将节点划分为正常类和异常类。为避免局部最优和副本节点异常信誉的干扰，使用 k-mediods 来选择初始聚类中心[22]，$\mathrm{CT_{malicious}}$ 为恶意节点综合信任值，$\mathrm{CT_{normal}}$ 为正常节点综合信任值，将两类边界节点信任值的平均值作为初始阈值，初始阈值 $K_1(t)$ 计算公式为

$$K_1(t) = \frac{1}{2}\{\max[\mathrm{CT_{malicious}}(t)] + \min[\mathrm{CT_{normal}}(t)]\} \tag{25}$$

统计实际副本节点数 M 与评估副本节点数 M'，计算两者之间差值 $|M-M'|$，当差值 $|M-M'|$ 与实际副本节点数的比值大于 ξ（ξ 取极小值）时，启动反馈机制来动态优化模型的阈值设置。得到最终阈值 $K(t)$ 后，当 $\mathrm{CT}_{ij}(t) \leqslant K(t)$ 时，节点被判定为可疑节点并列入可疑节点名单，反之则为正常节点。

3　NRADS-NC&IA 算法

在可疑节点名单中进行 ID 身份验证，有相同 ID 的节点为副本节点，NRADS-NC&IA 算法流程图如图 5 所示。

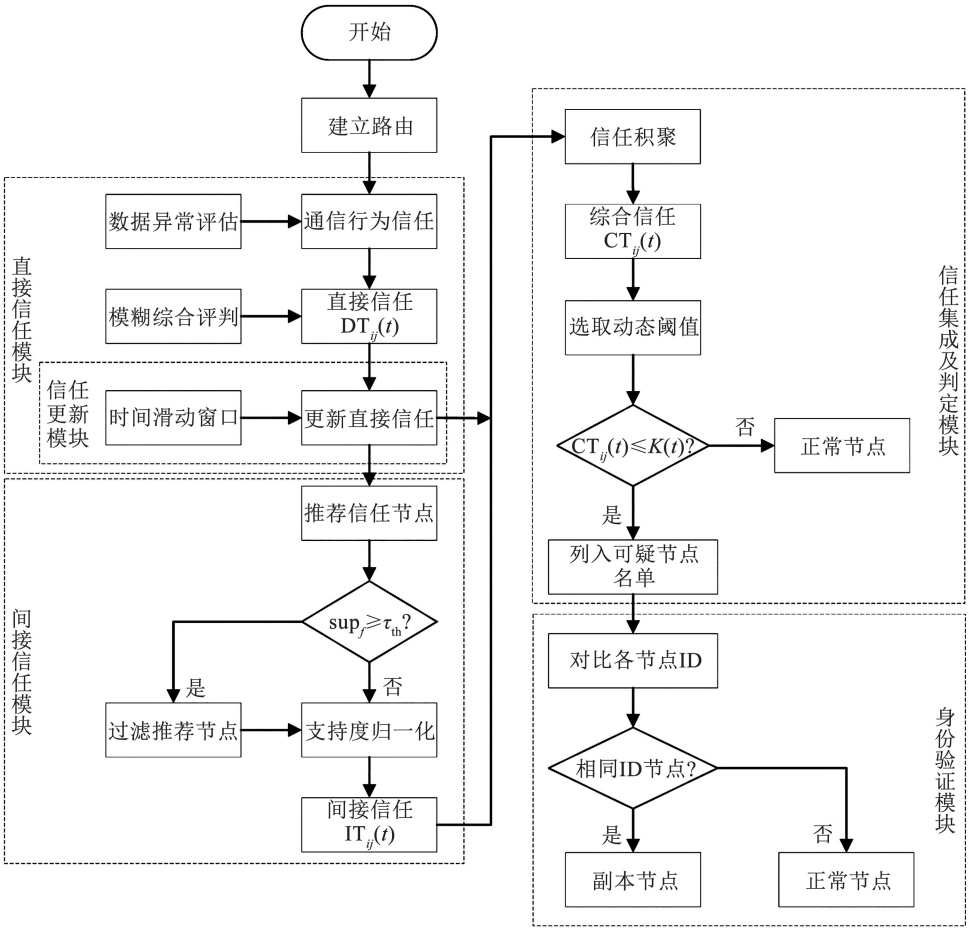


图 5 NRADS-NC&IA 算法流程图

Fig. 5 NRADS-NC&IA algorithm flow chart

NRADS-NC&IA 算法运行的主要步骤如下：

Step 1：利用最短路径算法构建全局路由，并进行通信，为后续的信任评估体系建立基础网络；

Step 2：利用 Beta 分布对节点信任进行拟合，根据公式(1)计算节点通信行为信任 $DTB_{ij}(t)$，并采用异常数据筛选机制进行数据异常评估；

Step 3：在信任模型的输入中综合考虑网络属性中的转发指数、邻居节点数、数据发送率、处理延迟和物理属性中的剩余能量及信号强度，结合层次分析法和模糊综合评判法计算直接信任 $DT_{ij}(t)$，并通过利用指数衰减函数的时间滑动窗口机制更新节点信任值；

Step 4：选定邻居节点和推荐节点，利用支持度函数计算推荐节点传递数值的偏差情况得到推荐节点的综合支持度，根据公式(18)计算节点间接信任；

Step 5：采用变异系数法分别为节点的直接信任和间接信任分配动态权重，根据公式(19)积聚信任得到综合信任 $CT_{ij}(t)$，全域综合信任发送给 Sink 节点；

Step 6：Sink 节点根据基于聚类分析的动态阈值调整反馈机制评估各节点是否可信，节点综合信任值大于阈值时被判定为正常节点，反之则为可疑节点被广播全网并列入可疑节点名单；

Step 7：筛选不受信节点加入可疑节点列表，列表内节点通过比对 ID 验证是否为副本节点。

4 仿真实验与分析

本文采用 MATLAB 来搭建仿真环境，假设无线传感器网络的覆盖范围为边长 100 m 的正方形区域，随机部署近似均匀分布的 100 个传感器节点，通信半径为 10 m，网络中普通节点正常转发数据包，副本节点以 50% ~90% 概率丢弃数据包，以 60% ~80% 概率篡改数据包，每迭代一次更新节点信任值，详细仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

仿真区域/m	节点总数/个	通信半径/m	初始能量/J	初始信任值	数据包大小/bit	迭代次数
100 × 100	100	10	2	0.5	800	50

在网络中随机抽取不同比例的正常节点，模拟节点复制攻击场景，被捕获节点复制出多个 ID 相同副本节点，当副本节点集合为{3,6,30,45,79}，即占比 5% 时的模型图如图 6 所示。

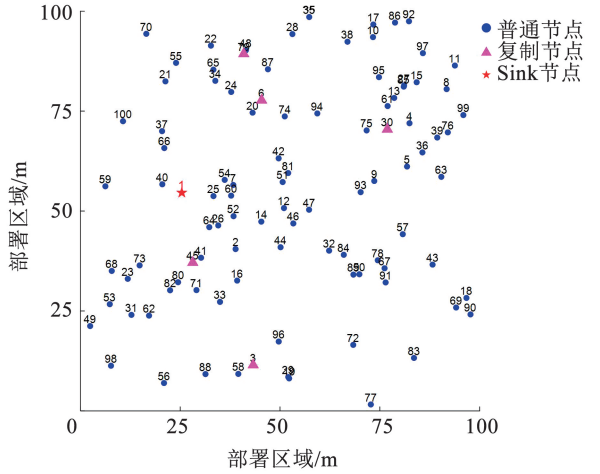


图 6　节点复制攻击模型(副本节点占比 5%)

Fig. 6　Node replication attack model (5% proportion of replica nodes)

4.1　节点信任值分析

如图 7 所示，将全域副本节点信任值在每个时间段取平均值进行可视化分析。随着迭代次数的增加(即恶意行为次数随之增加)，副本节点信任值整体呈现下降趋势，同时，随着恶意节点比例的增加，信任值的下降速度加快。

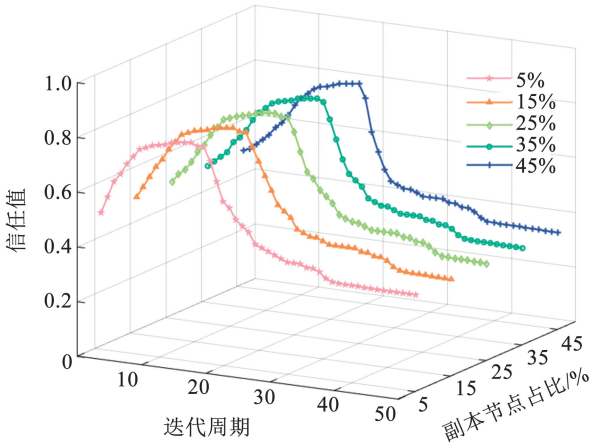


图 7　副本节点信任值变化曲线

Fig. 7　Trust value evolution curve of replica nodes

将本文提出的信任模型与 DTAM 算法[19]、ETERS 算法[23]、TSRP 算法[24]所提信任模型作比较，分析不同信任模型对正常节点和副本节点的信任值影响。

如图 8、图 9 所示，本文信任模型与文献[19]、文献[23]中信任模型均加入奖惩因子，激励正向行为、惩罚恶意行为，信任值变化速度相比文献[24]更快，而本文引入信任维护函数和异常弱化因子，是为保护节点信任值不受偶发性非入侵因素影响，给予节点信任值一定的“缓冲”，起到防止其因个别不良表现遭受过重惩罚，因此信任值下降速度较缓慢。

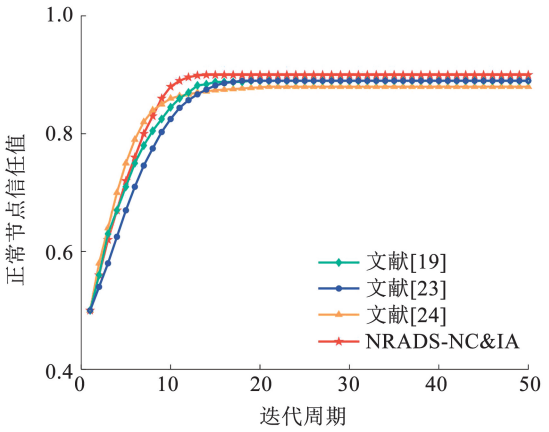


图 8　正常节点信任值对比

Fig. 8　Comparison of trust values of normal nodes

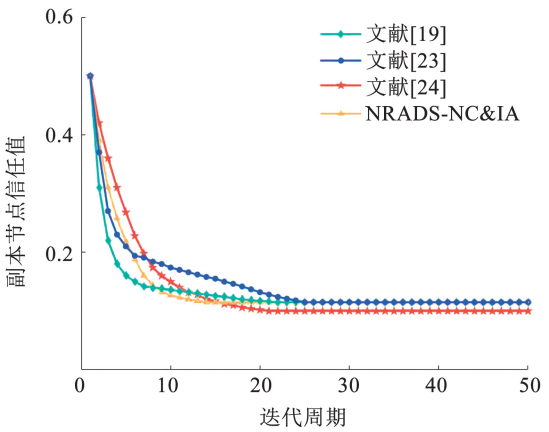


图 9　副本节点信任值对比

Fig. 9　Comparison of trust values of replica nodes

4.2　不同算法性能对比分析

4.2.1　静态网络中算法性能对比分析

将本文的 NRADS-NC&IA 算法与 SACOP 算法[14]、DTAM 算法[19]、ETERS 算法[23]、TSRP 算法[24]和组合加权 k 近邻分类算法[25]对比，证明本文算法在静态网络中的有效性。

由图 10 和图 11 结果可知，由于本文算法对副本节点行为后果有较全面的分析，在不依赖节点位置信息的同时加入欺骗过滤、异常维护等机制，使得副本节点占比增加到 45% 时检测率仍能够保持在 97% 以上，而文献[14]、[19]、[23]、[24]较为单一的评判指标在检测率和误检率方面均表现较差。文献[25]因加入节点空间位置信息，而检测率相较本文算法略高，但未考虑通信过程中的欺骗节点行为，误检率随副本节点占比增加而升高。

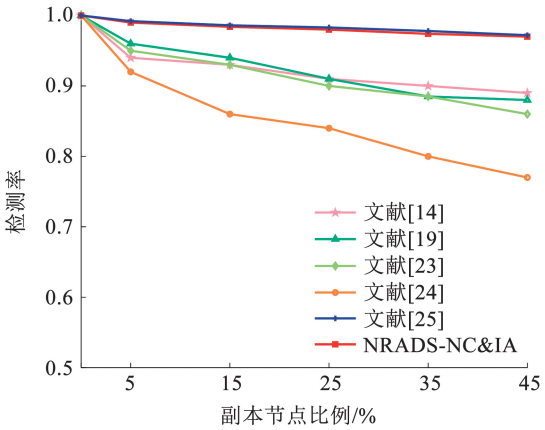


图 10 副本节点检测率

Fig. 10 Detection rate of replica nodes

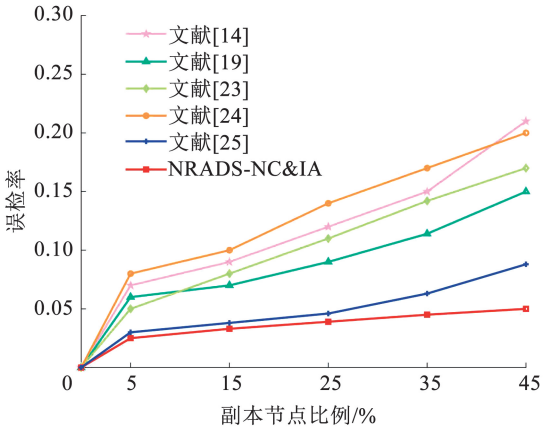


图 11 副本节点误检率

Fig. 11 False detection rate of replica nodes

图 12 为不同算法下的丢包率对比，可以看到，节点复制攻击导致的网络丢包率随副本节点占比增加而增加，由于本文提出的 NRADS-NC&IA 算法对副本节点具有高检测率，可实现较低丢包率，因而可保障网络数据包的稳定传输，有效降低了数据丢失的可能性。

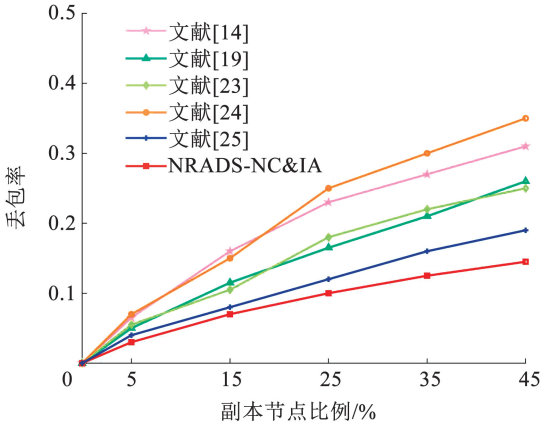


图 12 不同算法丢包率对比

Fig. 12 Comparison of packet loss rate of different algorithms

图 13 为不同算法端到端时延比较，随着网络中副本节点占比增加，副本节点发起的攻击频次增多，文献[14]、[19]、[23]、[24]检测性能下降，进而引发端到端时延的大幅上升；文献[25]虽检测率与本文算法相近，但端到端时延性能表现亦不及本文算法。

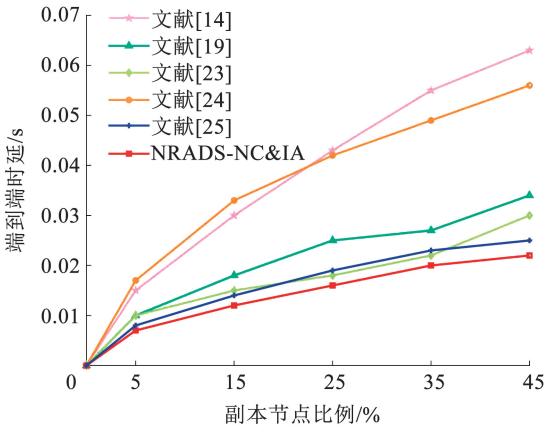


图 13 不同算法端到端时延比较

Fig. 13 Comparison of end-to-end delay of different algorithms

4.2.2 移动网络中算法性能对比分析

将本文的 NRADS-NC&IA 算法与基于邻居信息的检测算法[9]、移动异构密钥管理算法[10]和 FEC 算法[26]对比，证明本文算法在移动网络中的有效性。

由图 14 和图 15 可知，由于本文算法不依赖节点位置信息、节点速度等，因此，在移动网络能够保持较高检测率和较低误检率。

文献[9]中，若节点由于环境因素或能量消耗而减少移动，其被看门狗节点遇到的机会也会减少，导致算法对副本节点的检测率下降。若因看门狗节点的不均匀分布而频繁遇到某些节点，那么这些节点可能会被错误地认为是副本节点，导致误检率增加。文献[10]因对节点位置信息进行加密，副本节点的检测率较高，故误检率较低。文献[26]依赖节点位置信息计算节点移动速度，在检测率和误检率方面均表现较差。

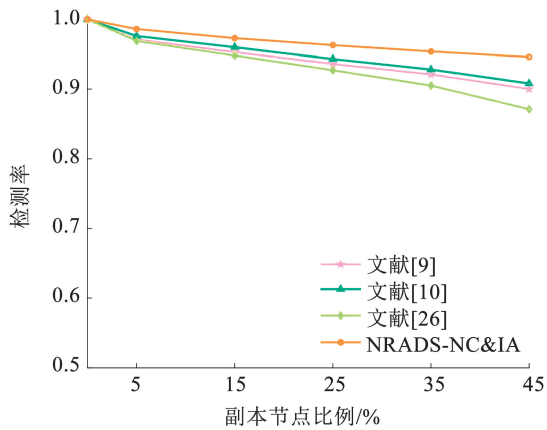


图 14 移动网络中的副本节点检测率

Fig. 14 Detection rate of replica nodes in mobile networks

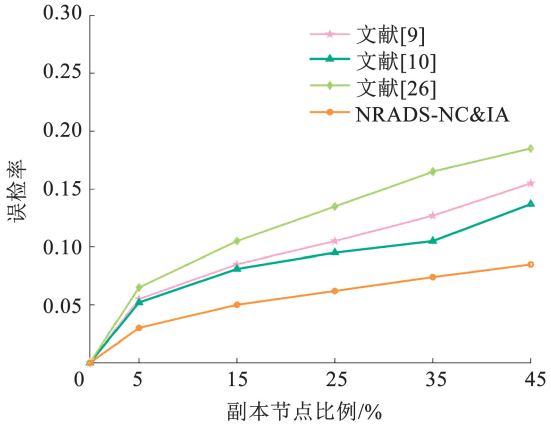


图 15　移动网络中的副本节点误检率

Fig. 15　False detection rate of replica nodes in mobile networks

图 16 和图 17 为移动网络中不同算法下的丢包率和平均剩余能量对比，可以看到，文献[9]需要看门狗节点持续监控网络流量和信道，文献[10]采用加密算法上传移动节点位置信息，文献[26]依赖节点实时的位置信息计算节点移动速度，因此在能耗方面均表现较差。本文算法通过信誉模型先筛选再判定，在移动网络中能耗较低，对副本节点具有高检测率且可实现较低丢包率。

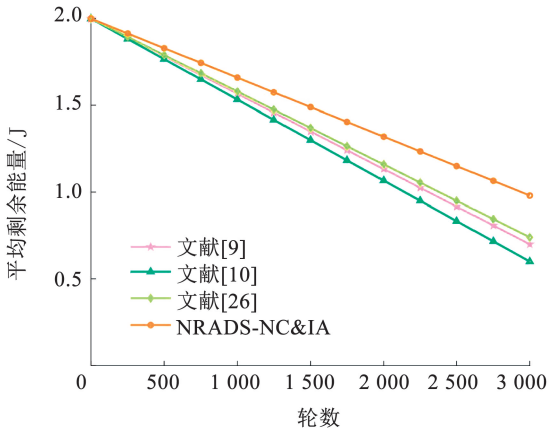


图 16　移动网络中的不同算法平均剩余能量对比

Fig. 16　Comparison of average residual energy of different algorithms in mobile networks

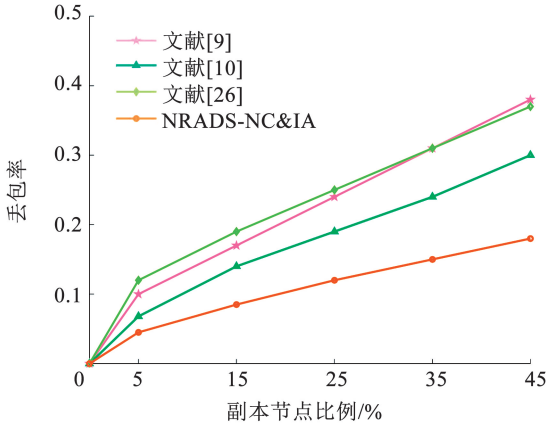


图 17　移动网络中的不同算法丢包率对比

Fig. 17　Comparison of packet loss rate of different algorithms in mobile networks

5　结　语

本文提出了一种融合信任值和身份标识验证的节点复制攻击检测策略，建立模糊综合信任评价模型，计算待评估节点的直接信任值并引入滑动时间窗口动态更新直接信任值；采用支持度函数衡量节点可信度得到间接信任值，加权求和得到综合信任值；采用动态自适应阈值筛选可疑节点并进行节点 ID 比对，从而确定副本节点。仿真实验表明，本文提出的 NRADS-NC&IA 算法建立了更客观全面的评判指标体系，在无需依赖难以获取的节点空间位置信息情形下，静态和移动网络的检测率保持在 97% 和 94% 以上，可有效应对复杂动态环境中的无线传感器网络安全问题。检测无线传感器网络节点复制攻击仍存在挑战，下一阶段将重点研究分簇式结构网络，提高副本节点识别速度，进一步降低节点能耗，优化算法性能。

参考文献

[1] ZHANG Yong, ZHANG Zhen, LIU Dengzhi, et al. Adaptive learning FOA algorithm with energy consumption balancing for coverage optimization in WSNs[J]. Ad Hoc Networks, 2025, 178: 103958. DOI :10.1016/j.adhoc.2025.103958

[2] 火久元, 杨继广, 穆聪, 等. 基于多目标徒步旅行优化的 WSN 安全成簇路由算法[J]. 兰州交通大学学报, 2025, 44(3): 29
HUO Jiuyuan, YANG Jiguang, MU Cong, et al. WSN secure clustering routing algorithm based on multi-objective hiking optimization[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2025, 44(3): 29. DOI: 10.3969/j.issn.2096-9066.2025.03.004

[3] 姚雷, 王东豪, 梁璇, 等. 无线传感器网络多层次模糊信任模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1606
YAO Lei, WANG Donghao, LIANG Xuan, et al. Research on multi-level fuzzy trust model of wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7): 1606. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2014.07.022

[4] 王晨宇, 张钊, 侯佳龙, 等. 基于密度峰值聚类和改进 LWLR 的短期电力负荷预测[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(4): 113
WANG Chenyu, ZHANG Zhao, HOU Jialong, et al. Short-term power load forecasting based on density peak clustering and improved LWLR[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2024, 44(4): 113. DOI: 10.19718/j.issn.1005-2992.2024-04-0113-08

[5] LUO Shiyao, LAI Yingxu, LIU Jing. Selective forwarding attack detection and network recovery mechanism based on cloud-edge cooperation in software-defined wireless sensor network[J]. Computers & Security, 2023, 126: 103083. DOI: 10.1016/j.cose.2022.103083

[6] 周晖, 朱立庆, 杨振, 等. 基于分簇的节点复制攻击入侵检测方法[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(5): 129
ZHOU Hui, ZHU Liqing, YANG Zhen, et al. Intrusion detection method for node replication attacks based on clustering[J]. Transducer and Microsystems Technologies, 2014, 33(5): 129. DOI:10.13873/j.1000-97872014.05.029

[7]马锐，朱天保，马科，等. 基于单证人节点的分布式节点复制攻击检测[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2017，57(9)：909
MA Rui，ZHU Tianbao，MA Ke，et al. Detection of distributed node replication attacks based on document holder nodes[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition)，2017，57(9)：909. DOI：10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.26.039

[8]RANI T P，JAYAKUMAR C. Unique identity and localization based replica node detection in hierarchical wireless sensor networks[J]. Computers & Electrical Engineering，2017，64：148. DOI：10.1016/j.compeleceng.2017.08.010

[9]JAMSHIDI M，SHEIKH ABOOLI POOR S，ARGHAVANI A，et al. A simple，lightweight，and precise algorithm to defend against replica node attacks in mobile wireless networks using neighboring information[J]. Ad Hoc Networks，2020，100，102081. DOI：10.1016/j.adhoc.2020.102081

[10]李峰，李亚平，张志军，等. 移动场景下异构无线传感器网络密钥管理方法[J]. 数据采集与处理，2021，36(5)：1020
LI Feng，LI Yaping，ZHANG Zhijun，et al. Key management method for heterogeneous wireless sensor networks in mobile scenarios[J]. Data Acquisition and Processing，2021，36(5)：1020. DOI：10.16337/j.1004－9037.2021.05.017

[11]ALRASHED E A，KARAATA M H，HAMDAN A A. Malicious replica quarantining protocol for Mobile Wireless Sensor Networks using replica detection and identification[J]. Internet of Things，2024，27，101289. DOI:10.1016/j.iot.2024.101289

[12]RIKLI N E，ALNASSER A. Lightweight trust model for the detection of concealed malicious nodes in sparse wireless ad hoc networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks，2016，12(7)：1. DOI：10.1177/1550147716657246

[13]AMUDHA G，NARAYANASAMY P. Distributed location and trust based promising detection in wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications，2018，102：3303. DOI：10.1007/s11277－018－5369－2

[14]ANITHA S，JAYANTHI P，LALITHA K，et al. Secured ant colony optimization based on energy trust system for replica node attack detection[J]. International Journal on Emerging Technologies，2020，11(2)：104

[15]滕志军，于沥博，李明哲，等. 融合交互信誉度与RSSR的WSNs女巫攻击检测策略[J]. 吉林大学学报(工学版)，2025，55(7)：2455. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230919
TENG Zhijun，YU Libo，LI Mingzhe，et al. WSNs witch attack detection strategy integrating interactive reputation and RSSR[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2025，55(7)：2455. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230919

[16]GANERIWAL S，BALZANO L K，SRIVASTAVA M B. Reputation-based framework for high integrity sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Network，2008，4(3)：15：1. DOI：10.1145/1362542.1362546

[17]滕志军，李梦，谷金亮，等. 融合多指标的WSN动态信任评估预测模型[J]. 郑州大学学报(工学版)，2023，44(3)：76
TENG Zhijun，LI Meng，GU Jinliang，et al. Dynamic trust evaluation and prediction model for WSN integrating multiple indicators[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering and Technology Edition)，2023，44(3)：76. DOI：10.13705/j.issn.1671－6833.2022.06.014

[18]滕志军，郭力文，吕金玲，等. 基于时序信息分析的WSN贝叶斯信誉评价模型[J]. 郑州大学学报(工学版)，2019，40(1)：38
TENG Zhijun，GUO Liwen，LV Jinling，et al. Bayesian reputation evaluation model of WSN based on time series information analysis[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering and Technology Edition)，2019，40(1)：38. DOI：10.13705/j.issn.1671－6833.2019.01.007

[19]朱子豪，刘光杰. 一种面向物联网节点的动态信任评估模型[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2022，36(7)：188
ZHU Zihao，LIU Guangjie. A dynamic trust evaluation model for internet of things nodes[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)，2022，36(7)：188. DOI:10.3969/j.issn.1674－8425(z).2022.07.024

[20]李莉，王小龙，张之欣，等. 新型电力系统分布式家庭光伏采集场景下的信任评估模型[J]. 通信学报，2023，44(7)：197
LI Li，WANG Xiaolong，ZHANG Zhixin，et al. Trust evaluation model in distributed household photovoltaic collection scenarios of the new power system[J]. Journal of Communications，2023，44(7)：197. DOI:10.11959/j.issn.1000－436x.2023137

[21]王田，张广学，蔡绍滨，等. 传感云中的信任评价机制研究进展[J]. 通信学报，2018，39(6)：37
WANG Tian，ZHANG Guangxue，CAI Shaobin，et al. Research progress of trust evaluation mechanism in sensor cloud[J]. Journal of Communications，2018，39(6)：37. DOI：10.11959/j.issn.1000－436x.2018098

[22]CHEN Xiying，LIU Caihui，LIN Bowen，et al. AHA-3WKM：The optimization of K-means with three-way clustering and artificial hummingbird algorithm[J]. Information Sciences，2024，672：120661. DOI：10.1016/j.ins.2024.120661

[23]KHAN T，SINGH K，HASAN M H，et al. ETERS：A comprehensive energy aware trust-based efficient routing scheme for adversarial WSNs[J]. Future Generation Computer Systems，2021，125：921. DOI：10.1016/j.future.2021.06.049

[24]韩优佳，胡黄水，姚美琴. 基于信任感知的无线传感器网络安全路由协议[J]. 计算机工程，2021，47(9)：145
HAN Youjia，HU Huangshui，YAO Meiqin. Trust-aware secure routing protocol for wireless sensor networks[J]. Computer Engineering，2021，47(9)：145. DOI：10.19678/j.issn.1000－3428.0058217

[25]赵晓峰，王平水. 基于组合加权k近邻分类的无线传感网络节点复制攻击检测方法[J]. 传感技术学报，2024，37(6)：1056
ZHAO Xiaofeng，WANG Pingshui. Detection method of node replication attack in wireless sensor networks based on combined weighted k-nearest neighbor classification[J]. Journal of Sensor Technology，2024，37(6)：1056. DOI:10.3969/j.issn.1004－1699.2024.06.016

[26]SUJIHELEN L，SENTHILSINGH C. Detect the replica node in mobile wireless sensor networks[C]//2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). Piscataway：IEEE，2021：265. DOI：10.1109/ICICCS51141.2021.9432285

(编辑　吕雪梅)

DOI:10.11918/202504011

融合多尺度特征的敦煌壁画风格迁移

曹 岩,郭炳森,冯丹丹,张 燚,辛子昊

(兰州交通大学 电子与信息工程学院,兰州 730070)

摘 要: 为解决现有风格迁移技术在处理敦煌壁画时遇到的因高饱和度矿物颜料、精细纹理及层次结构复杂导致的色彩失真、细节模糊、层次结构失调问题,本文提出多尺度敦煌风格迁移网络,改进循环生成对抗网络来实现高质量敦煌壁画风格迁移。通过引入自适应局部膨胀卷积网络,结合可变形卷积动态捕捉细节纹理边缘和膨胀卷积增强纹理远距离关联性,有效恢复深层特征捕捉壁画笔触细节。设计双域网络,通过全局注意力分支建模壁画整体色调协调性,局部分组卷积分支强化笔触细节,解决迁移过程中的信息丢失和色彩层次弱化问题。提出路径融合网络,利用多膨胀率深度可分离卷积并行处理与动态门控融合机制,优化元素间逻辑关系与比例协调。研究表明,本文所提方法在 FID、LPIPS 和 L2 损失指标上分别降低了 5.81%、4.36% 和 5.73%,而 SSIM 提升了 8.12%。用户调研显示,其在内容保真度、风格匹配度和视觉吸引力方面表现突出。本文方法有效解决了迁移敦煌壁画时色彩层次、纹理细节与空间布局的保留难题,可为敦煌壁画艺术的数字化保护与创新传播提供新的思路。

关键词: 深度学习;风格迁移;生成对抗网络;多尺度特征;敦煌壁画

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)05-0073-10

Style transfer of Dunhuang murals fusing multi-scale features

CAO Yan, GUO Bingsen, FENG Dandan, ZHANG Yi, XIN Zihao

(School of Electronic & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To address color distortion, detail blurring, and structural incoherence in existing style transfer techniques when processing Dunhuang murals——caused by highly saturated mineral pigments, intricate textures, and complex layered structures——this paper proposes a Multi-scale Dunhuang Style Transfer Network based on an improved Cycle-Consistent Generative Adversarial Network for high-quality artistic style transfer. We introduce an adaptive local dilated convolutional-net that dynamically captures detailed texture edges using deformable convolution and enhances long-range texture dependencies through dilated convolution, thereby restoring deep features to preserve brushstroke details. A dual scope net is designed to mitigate information loss and color-layer weakening during style transfer, employing a global attention branch to model overall tonal harmony and a local grouped convolution branch to reinforce stroke details. Additionally, a pathwise fusion net optimizes logical relationships and proportional coordination between elements using multi-dilation-rate depthwise separable convolutions for parallel processing and a dynamic gated fusion mechanism. Experimental results show that the proposed method achieves reductions of 5.81%, 4.36%, and 5.73% in FID, LPIPS, and L2 loss, respectively, and an improvement of 8.12% in SSIM. User studies confirm its superiority in content fidelity, style consistency, and visual appeal. This approach effectively resolves challenges in preserving color layers, texture details, and spatial layouts in Dunhuang murals transfer, offering a novel approach for Dunhuang murals digitization and innovative dissemination.

Keywords: deep learning; style transfer; generative adversarial network; multi-scale features; Dunhuang murals

敦煌壁画作为墙壁上的视觉艺术表现形式,构成了世界艺术宝藏中的重要部分,其因悠久的历史、丰富多样的绘画内容以及卓越的艺术价值而著称[1]。然而,由于其存在形式的独特性与创作过程的复杂度,使得敦煌壁画艺术相较于油画和水墨画等其他艺术形式更难以普及。此外,自然因素及人为活动导致的剥落等多种破坏,使其保存和传承变得越来越迫切。因此,实现敦煌壁画艺术形象的自动化创作,对于保护并推动敦煌壁画艺术的发展具有至关重要的意义。

收稿日期: 2025-04-03;**录用日期:** 2025-06-06;**网络首发日期:** 2025-09-01
网络首发地址: https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250901.1446.005
基金项目: 甘肃省自然科学基金(23JRRA913,25JRRA177);中央引导地方科技发展资金(25ZYJF001)
作者简介: 曹 岩(1982—),男,副教授
通信作者: 郭炳森,17335382899@163.com

图像风格迁移技术是一种计算机视觉技术,其目的是将一幅风格图像的纹理与色彩等特征应用于另一幅内容图像上,同时保持内容图像的主要结构和语义内容不变[2]。将敦煌壁画艺术风格与其他图像相结合,为艺术作品的二次创作提供了新思路,也促进了中华优秀传统文化的创造性转化与创新性发展[3-4]。

Gatys 等[5]首次将卷积神经网络引入到图像风格转移中,通过最小化内容和风格损失,实现了从一张图像到另一张图像的风格转移。单模型多风格方法[6],通过单一网络实现多样式输出。例如,Dumoulin 等[7]采用条件实例归一化技术,通过调整归一化参数实现多风格适配;Zhang 等[8]设计的多风格生成网络,利用风格图像的二阶统计特征驱动迁移过程。然而,此类方法因风格表征共享易导致特征混淆,特定风格细节(如笔触独特性)可能被弱化。单模型单风格方法[9],则为每种艺术形式独立构建专用网络。例如,Johnson 等[10]通过引入感知损失函数优化网络参数,实现高精度快速迁移;Zhang 等[11]针对动漫风格开发残差 U-net 架构。Hu 等[12]提出一种基于细节特征提取融合的中国山水画风格迁移网络,该网络主要针对山水画的独特风格,较大程度地保留山水场景的特征。因此,相比之下,在对敦煌壁画进行风格迁移时采用单模型单风格迁移的方法更具说服力。

除基于卷积神经网络的模型外,生成对抗网络[13]提供了一种通过对抗性训练实现跨域图像转换的有效范式,使输入图像具有目标域的特定风格。Cheng 等[14]引入潜在扩散模型(latent diffusion model,LDM),在此基础上进行内容反转和概率融合,但对自然图像的影响并不显著,在某些情况下可能很难生成预期的风格化图像。为了解决这一问题,一些方法引入了循环一致性约束,如 CycleGAN 模型[15]和 DualGAN 模型[16],通过将生成图像与反向变换后的原始输入进行比较,以保持输入图像的内容不变。Wang 等[3]提出了一种基于改进对比学习框架的 DunhuangGAN 模型,该模型通过优化特征对齐和风格判别机制,显著增强了敦煌壁画艺术风格迁移的准确性和视觉保真度。Gui 等[4]提出了基于 CycleGAN 的融合 CBAM 注意力机制的敦煌壁画风格迁移方法,生成的敦煌壁画风格图像在视觉效果和艺术性上得到提升。

近年来,随着对比语言-图像预训练和潜在扩散模型的发展,基于示例到图像的生成模型因其卓越的生成能力而受到广泛关注。Zhang 等[17]提出了一种基于反转的扩散模型 InST,通过优化文本嵌入空间实现细粒度的示例驱动风格迁移。Wang 等[18]提出了 StyleDiffusion 模型,基于扩散模型的特征解耦策略,以增强对图像内容与风格的可控编辑能力。Huang 等[19]提出的 QuantArt 模型提升了风格迁移视觉保真度,但仍面临生成准确性的挑战。针对这一问题,Chung 等[20]提出 StyleID,一种基于预训练扩散模型的风格迁移方法,通过替换自注意力机制中的键和值实现风格适配,无需额外优化或文本监督。此外,Huang 等[21]提出了一种免训练的注意力驱动风格迁移框架,通过替换自注意力层键值适配参考风格,实现高效的风格特征融合。

本文以 CycleGAN 模型[15]为基线架构,对敦煌壁画这一独特艺术形式进行针对性优化。敦煌壁画以矿物颜料为主,色彩饱和度高且具有独特的古朴质感。在进行风格迁移任务时,处理高饱和度颜色可能会导致色彩失真或褪色无法准确复现壁画中矿物颜料的层次感和历史沉淀感。且壁画中的山水、人物和建筑元素具有丰富的细节和纹理,在迁移过程中可能会丢失这些精细的特征导致生成图像显得模糊或失真。敦煌壁画注重层次感和空间布局,山水、人物和建筑元素之间具有明确的比例协调性,模型往往难以理解壁画中元素的层次关系,可能导致生成的山水背景呈现扁平化或杂乱堆砌。针对以上问题,本文提出一种新的多尺度敦煌风格迁移网络(multi-scale Dunhuang style transfer network)来实现从目标图片到敦煌壁画风格的迁移任务。

1 多尺度敦煌风格迁移网络

1.1 整体网络架构

选择 CycleGAN[15]模型作为本文敦煌壁画迁移模型的骨干网络,所提出的迁移模型如图 1 所示,其由两个互为镜像的生成对抗网络构成闭环系统,包括两个改进后的生成器和两个判别器。两个方向的转换路径均配备了改进后的生成器和判别器,形成双向对称的对抗训练机制。

改进的生成器借鉴深度级联设计思想,由编码器、转换器和解码器构成,编码器的结构由初始卷积层、两个下采样块和双域网络(dual scope net,DSNT)组成。解码器结构包括另外一个双域网络、两个上采样块、自适应局部膨胀卷积网络(adaptive local dilated convolutional-net,ALDC-NT)和输出卷积块。在编码器和解码器之间的连接区域是转换器,由残差模块组和相同数量的路径融合网络(pathwise fusion net, PFNT)并联而成,负责恢复和增强数据信息,保留更多输入图像的内容特征。其中,初始卷积层、下采样块与上采样块均采用统一的构建范式,即 Conv2d 和 ConvTranspose2d 后依次接实例归一化(InstanceNorm2d)与 ReLU 激活,分别简记为 CIR 与 DIR;最终输出卷积层单独采用 Tanh 激活。判别器的结构使用 PatchGAN[15]的设计,对输入的图像进行卷积、归一化和激活操作。

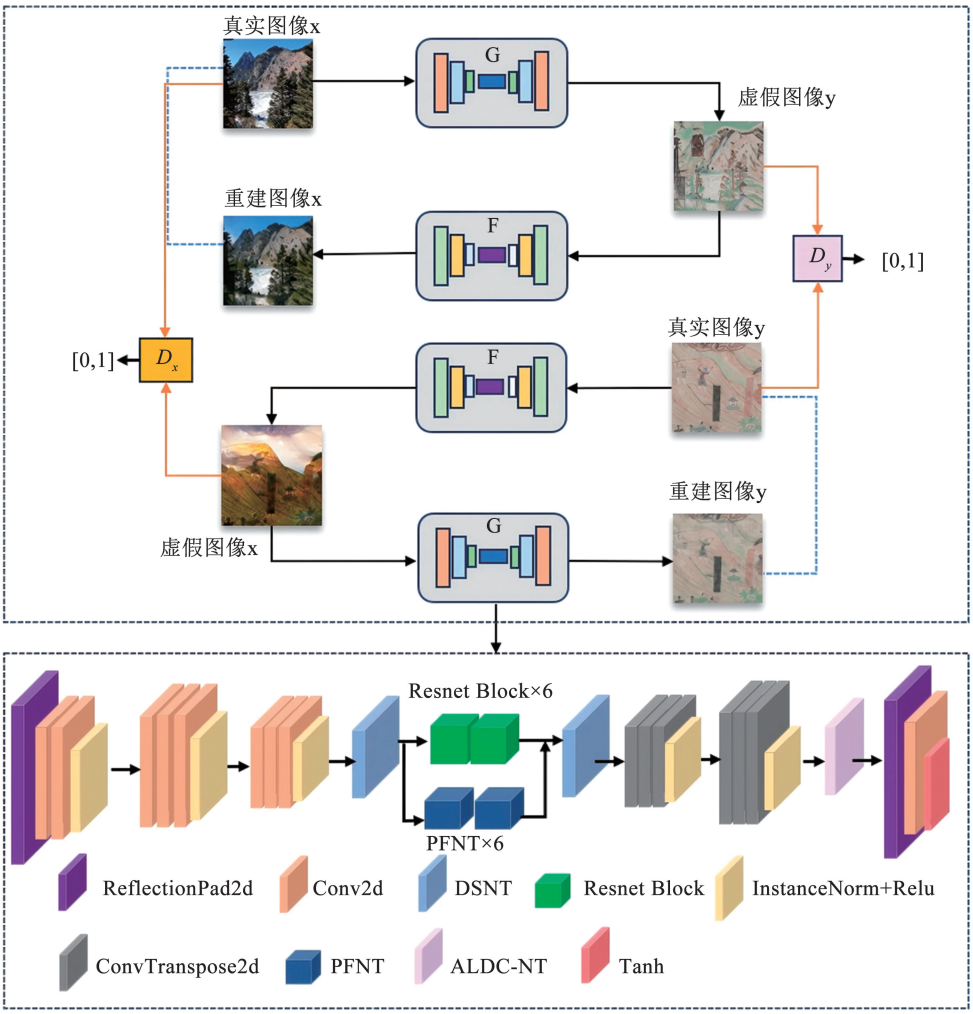


图 1　总体模型框架

Fig. 1　Overall model framework

1.2　双域网络 DSNT

针对生成器下采样过程中特征图空间压缩导致的结构信息丢失和色彩层次弱化问题，本文提出双域网络 DSNT，如图 2 所示，其核心思想是通过局部分支与全局分支的协同建模，局部分支通过细粒度特征提取，有效保留了壁画独特的笔触细节和纹理特征，而全局分支则通过长程依赖建模，确保了色彩分布的协调性与风格一致性。

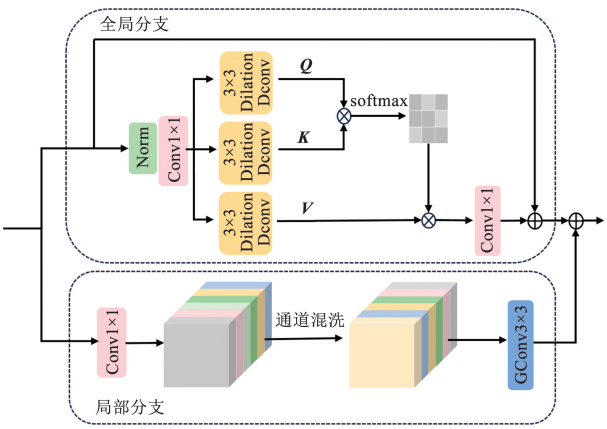


图 2　双域网络

Fig. 2　Dual scope net

在 DSNT 的局部分支中，首先使用 1×1 卷积来调整通道维度，将输入特征映射到目标通道数，以减少后续计算冗余。随后执行通道混洗操作以进一步混合通道信息，通道混洗将输入张量沿通道维度划分为组，其中每组采用深度可分离卷积来诱导通道混洗。而后将每组得到的输出张量沿通道维度连接，生成新的输出张量。最后利用分组数为 2 的 3×3分组卷积（grouped convolution，GC）增强局部特征提取能力，在减少参数量的同时增加局部特征多样性，促进特征多样性以及与全局分支互补。局部分支表述为

$$L = \mathrm{G}_{\mathrm{C}_{3\times3}}(\mathrm{S}(\mathrm{C}_{1\times1}(U))) \tag{1}$$

式中：L 为局部通道的输出，$\mathrm{G}_{\mathrm{C}_{3\times3}}$ 为卷积核大小为 3×3的分组卷积，S 为通道混洗操作，$\mathrm{C}_{1\times1}$ 为 1×1 的卷积，U 为输入特征。

在 DSNT 的全局分支中，首先通过层归一化、1×1卷积和膨胀率为 2 的 3×3 的膨胀卷积进行特征规范化与映射，生成查询（$\boldsymbol{Q}$）、键（$\boldsymbol{K}$）和值（$\boldsymbol{V}$）3 个形状为 $H\times W\times C$ 的张量。随后 $\boldsymbol{Q}$ 被重塑为

$\boldsymbol{Q}_1 \in \mathbb{R}^{HW\times C}$，$\boldsymbol{K}$ 被重塑为 $\boldsymbol{K}_1 \in \mathbb{R}^{C\times HW}$。使用 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{K}$ 的点积计算注意力分数，显著降低了计算复杂度。全局分支表述如下：

$$F = \mathrm{C}_{1\times1}\mathrm{Attention}(\boldsymbol{Q}_1,\boldsymbol{K}_1,\boldsymbol{V}_1) + U \tag{2}$$

$$\mathrm{Attention}(\boldsymbol{Q}_1,\boldsymbol{K}_1,\boldsymbol{V}_1) = \boldsymbol{V}_1\mathrm{Softmax}(\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{Q}_1/\alpha) \tag{3}$$

式中：F 为全局通道的输出，$\mathrm{C}_{1\times1}$ 为卷积核大小为 1×1的卷积，α 为一个可学习的缩放参数，用于在应用 Softmax 函数之前控制 $\boldsymbol{Q}_1$ 和 $\boldsymbol{K}_1$ 的矩阵乘法的大小。整体模块计算的输出计算为

$$\mathrm{Out} = L + F \tag{4}$$

在生成器的关键下采样模块之后加入该网络，用于补偿空间压缩导致的信息损失，并在上采样模块前提前建模跨区域的色彩关联性，避免高频细节在插值过程中被平滑。这种互补式结构能够在生成过程中精确维持敦煌壁画的艺术特质，包括其独特的色彩层次表现、历史沉淀形成的质感以及整体美学风格。

1.3 路径融合网络 PFNT

针对生成器中转换器的残差块在敦煌壁画风格迁移中结构层次建模不足、多尺度特征缺失等问题，本文设计路径融合网络 PFNT，如图 3 所示，通过多膨胀率深度可分离卷积并行处理与动态门控融合机制，实现多层次特征的自适应提取与融合。

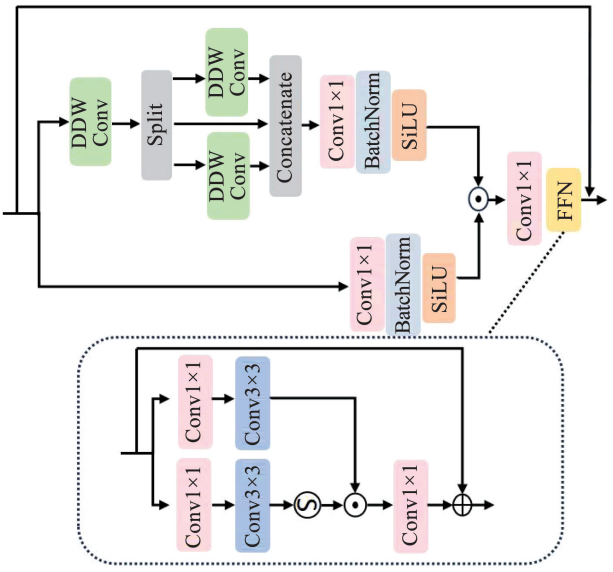


图 3 路径融合网络

Fig. 3 Pathwise fusion net

该网络使用 3 个具有膨胀比 $d \in \{1,2,3\}$ 的不同 DWConv 层来捕获低、中和高阶间的相互作用。给定输入 $x_e \in \mathbb{R}^{C_e\times HW}$ 首先经过 $\mathrm{DW}_{5\times5,d=1}$ 提取低阶特征，并沿通道维度分为 3 组：$\boldsymbol{x}_a \in \mathbb{R}^{C_a\times HW}$，$\boldsymbol{x}_b \in \mathbb{R}^{C_b\times HW}$，$\boldsymbol{x}_d \in \mathbb{R}^{C_d\times HW}$。随后，$\boldsymbol{x}_a$，$\boldsymbol{x}_d$ 分别分配给 $\mathrm{DW}_{5\times5,d=2}$，$\mathrm{DW}_{7\times7,d=3}$ 扩大感受野以捕捉纹理连续性，建模元素间远距离空间关系，而 $\boldsymbol{x}_b$ 用作原始信息通路，保持映射不变。而后将 $\boldsymbol{x}_a$，$\boldsymbol{x}_b$，$\boldsymbol{x}_d$ 的输出连接形成多阶上下文，表示为 $\boldsymbol{Y} = \mathrm{Concat}(\boldsymbol{Y}_a,\boldsymbol{Y}_b,\boldsymbol{Y}_d)$，并通过 1×1 逐点卷积融合来自所有分支的多阶特征，BatchNorm 和 SiLU 激活函数用于值分支和门控分支。随后将得到的特征与另一高层次特征分支进行通道间的信息交互。最后将融合后特征通过 1×1 卷积和 FFN（前馈网络）进一步非线性变换增强模型的表达能力，加入跳跃连接优化过程中的稳定性和收敛速度。整体模块的输出如式（5）、式（6）所示：

$$M = \mathrm{SiLU}(\mathrm{BN}(\mathrm{Conv}_{1\times1}(\boldsymbol{x}_e))) \odot \mathrm{SiLU}(\mathrm{BN}(\mathrm{Conv}_{1\times1}(\boldsymbol{Y}))) \tag{5}$$

$$T = \mathrm{FFN}(\mathrm{C}_{\mathrm{onv}_{1\times1}}(M)) + x_e \tag{6}$$

将多尺度特征提取模块与生成器的残差连接组并联集成，通过层次化特征融合机制增强模型对图像语义的理解能力。显著提升模型在处理敦煌壁画时对层次感和空间布局的理解能力，保留山水、人物和建筑元素之间的明确逻辑关系且比例协调，减少了生成图像出现扁平化或杂乱堆砌的问题。

1.4 自适应局部膨胀卷积网络 ALDC-NT

改进后的生成器上采样模块可能无法有效恢复深层特征，如敦煌壁画的细节笔触、纹理，导致生成图像边缘模糊或细节失真。为了更精细地处理这些深层特征，本文设计了 ALDC-NT 网络，如图 4 所示，其中，可变形卷积动态捕捉纹理细节边缘，膨胀卷积则增强纹理的远距离关联性。

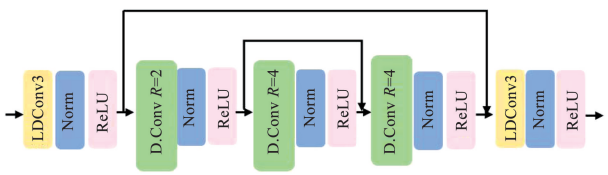


图 4 自适应局部膨胀卷积网络

Fig. 4 Adaptive local dilated convolutional-net

ALDC-NT 是一个 U 形结构，由两个线性可变形卷积（linear deformable convolution，LDC）[22] 层和膨胀率 R 为 2、4 和 4 的膨胀卷积层组成。首先对输入 $\boldsymbol{x}$ 应用可变形卷积操作进行批量归一化和 ReLU 激活得到 $\boldsymbol{x}_1$。然后，将输出经过膨胀率为 2 和 4 的膨胀卷积，并进行批量归一化和 ReLU 激活得到特征 $\mathbf{dx}_1$，$\mathbf{dx}_2$，其中膨胀率为 2 的分支聚焦局部笔触细节，膨胀率为 4 的分支建模复杂纹理关系。其次，将 $\mathbf{dx}_1$，$\mathbf{dx}_2$ 在通道维度上拼接，并对该结果再次应用膨胀率为 4 的膨胀卷积，得到 Dconv_3 而后将 $\boldsymbol{x}_1$ 和 Dconv_3 在通道维度上拼接，以防止卷积操作造成的信息丢失。再次，应用可变形卷积操作，动态调整卷积核的位置，以适应不同区域的特征变化，确保壁画

中的细腻线条和复杂纹理被精确再现。最后进行批量归一化和 ReLU 激活输出 F_{out}。网络的前向传播见式(7)。

$$F_{out}=\mathrm{LD}_{\mathrm{Conv}_2}(\mathrm{Concat}(\boldsymbol{x}_1,\mathrm{D}_{\mathrm{Conv}_3}(\mathrm{Concat}(\mathbf{dx}_1,\mathbf{dx}_2)))) \tag{7}$$

式中：$\mathrm{D}_{\mathrm{Conv}_3}$是将 $\mathbf{dx}_1$，$\mathbf{dx}_2$ 在通道维度上拼接，并对该结果应用膨胀率为 4 的膨胀卷积操作，$\mathrm{LD}_{\mathrm{Conv}_2}$是 $\boldsymbol{x}_1$ 和 $\mathrm{D}_{\mathrm{Conv}_3}$在通道维度的拼接后应用可变形卷积操作。

将 ALDC-NT 加入模型上采样模块后，充分利用了网络深层特征的特点，前 3 个层通过不同扩张率的膨胀卷积层，使得模型能够捕捉从局部到全局的多尺度特征，使用跳跃连接机制允许网络直接传递底层的高分辨率信息至输出层，减少深层次信息丢失，从而有效地保留壁画中的原始细节，避免因多次上采样导致的图像模糊或失真现象。

1.5　损失函数

本文将对抗性损失(adversarial loss)[15]应用于两个映射函数。对于生成器 G 有如下映射关系 G：$X\rightarrow Y$，对应判别器 D_y，X 和 Y 分别为源域和目标域，目标损失表示为

$$L_{\mathrm{GAN}}(G,D_y,X,Y)=E_{y\sim p_{\mathrm{data}(y)}}[\log D_y(y)]+E_{x\sim p_{\mathrm{data}(x)}}[\log(1-D_y(G(x)))] \tag{8}$$

式中：G 为生成与 Y 域中图像相似的图像；D_y 为判断生成的图像 $G(x)$ 与真实图像 y 之间的差异性；E 为取得样本的平均值。另外一个生成器 F 及其对应的判别器 D_x，目标函数的构建过程完全镜像对称。

引入循环一致性损失(cycle consistency loss)[15]，确保生成的图像能够保留原始图像的重要特征。具体来说，如果将一个图像 x 从 X 域通过生成器 G 转换到 Y 域，然后再通过 F 生成器转换回 X 域，那么最终得到的图像应该与原始图像 x 非常接近。同样，这个原则也适用于从 Y 域到 X 域再到 Y 域的转换。循环一致性损失表示为

$$L_{\mathrm{cyc}}(G,F)=E_x[\|F(G(x))-x\|_1]+E_y[\|G(F(y))-y\|_1] \tag{9}$$

引入本体映射损失(identity loss)，这一部分的损失确保当输入图像已经是生成器目标域中的图像时，生成器不会对这幅图像做出不必要的改变或转换。如果输入是目标域 Y 中的一个真实样本 y，则希望 $G(y)\approx y$，即生成器 G 应当尽量不改变输入图像。这可以通过最小化 $G(y)$ 与 y 之间的差异来实现。同理，如果输入是源域 X 中的一个真实样本 x，则期望 $F(x)\approx x$。本体映射损失如式(10)所示。

$$L_{\mathrm{identity}}(G,F)=E_y[\|G(y)-y\|_1]+E_x[\|F(x)-x\|_1] \tag{10}$$

综上所述，可以得到如下总体目标损失函数：

$$L(G,F,D_x,D_y)=L_{\mathrm{GAN}}(G,D_y,X,Y)+L_{\mathrm{GAN}}(F,D_x,Y,X)+\lambda L_{\mathrm{cyc}}(G,F)+\gamma L_{\mathrm{identity}}(G,F) \tag{11}$$

式中，λ 和 γ 为控制不同损失函数相对重要性的权重系数。$\lambda=10$、$\gamma=0.5$，与 CycleGAN 中的权重设置一致。

2　实验概况及结果分析

2.1　实验环境和数据集

本文实验环境为 Windows11 操作系统，硬件环境为 Intel Core i5-13400F 处理器，16.0 GB 系统内存，采用 NVIDIA 显存 16GB 的 GeForce RTX4060TI GPU，对比实验均在相同环境下进行。针对敦煌壁画高分辨率线条与剥落纹理的保留需求，本文采用 batch size = 1 小批次训练，为抑制梯度噪声、提升细节保真度并保障实验公平，基线与改进模型统一使用 AdamW 优化器。训练 epoch 设为 200，损失连续 10 轮波动小于 0.005 时判定收敛，全程无过拟合。

敦煌壁画融合了中原汉文化、印度佛教艺术、波斯文化以及西域各民族的艺术风格，形成了独特的多元文化特征，其整体色调既华丽又和谐，展现了高超的色彩运用技巧。线条流畅而有力，山石的轮廓线清晰，树木的枝叶描绘细腻。山水布局注重远近层次的表现，近景的山石、树木刻画细致，远景的山峰则逐渐虚化，形成深远的空间感。经许可，数据集中的一些图像来自敦煌研究所的公共在线资源和专有数据，如图 5 所示，数据集包含各种类别和分辨率的图像，对于敦煌艺术研究人员，自然图像的风格迁移任务具有重要意义，因此本文在内容图中选择了更多山脉和自然风景的内容图像，并在风格图中尝试选择了自然风景的敦煌壁画，共 4 100 张内容图和风格图，其中内容图 2 800 张，风格图 1 300 张。将输入图像的大小统一调整为 224 × 224，使用8:2拆分将其分成训练集和测试集。此外，为了提高模型的训练效率与生成图像效果，还进行了旋转、裁剪等必要的数据增强处理，确保输入模型的图像数据均匀和规范化。



图 5　敦煌壁画数据集

Fig. 5　Dunhuang mural dataset

2.2　风格迁移结果定性分析

为了验证本文方法的有效性，本文在定性分析中将其与 7 种流行的风格迁移方法进行了比较，结果如图 6 所示。由图 6 可以看出，CycleGAN[15]能够在没有成对训练数据的情况下学习两个不同域之间的映射关系，但在图像转换过程中可能会错误地解

读内容图像,导致细节区域出现不自然的纹理和块状结构,色彩失真或褪色,层次和空间布局欠佳。AdaAttN[23]利用自适应注意力归一化实现特征分布的一致性,然而在保持内容完整性方面仍有限制,导致生成图像时可能出现结构细节丢失和颜色块匹配不佳的情况。CAST[24]通过替代二阶损失的方式保留了大部分的风格特征,使得颜色接近于目标样式,但在内容结构方面存在学习不稳定的问题。AesPA-Net[25]专注于增强注意力机制,在内容保真度方面表现良好,但色彩饱和度不足且细节纹理还原较弱。基于扩散模型的方法 InST[17]和 IP-Adapter[26]能够创造出生动的图像,但这些方法往往对原始图像的语义和内容进行了大量的修改,难以维持风格与内容之间的平衡。StyleID[20]是一种基于预训练扩散模型的风格迁移方法,能够较好地保留内容语义,但其风格迁移结果偏向油画质感,与敦煌壁画的矿物颜料颗粒感存在显著差异。本文所提网络生成的结果图像具有高质量和较为真实的敦煌壁画风格。在风格特征上提取到接近原风格图像的色彩、细节特征和层次关系,并完整地呈现内容图像的语义特征。在针对不同类型的敦煌壁画风格进行风格迁移时,均可输出高质量、未丢失语义且风格鲜明的图像。



图 6 对比实验

Fig. 6 Comparative experiment

2.3 风格迁移结果定量分析

为分析模型迁移后图像的质量,本文采用的迁移后图像定量分析的指标有以下 4 种。1)FID。FID 关注图像的全局特征,适用于评估生成图像集合的整体质量和多样性。在敦煌壁画风格迁移中,FID 能够反映生成图像的全局整体质量。2)L2 损失。L2 损失主要用来评估生成图像与原始内容图像之间的像素级差异。在敦煌壁画风格迁移中,用于评估图像在多大程度上保留了原始内容图像的内容信息。3)结构相似性 SSIM。SSIM 用于比较原始图像和目标图像的亮度分布、对比度和结构信息。首先在各个方面都得到一个相似性得分,然后综合得出整体的相似度评分,证明迁移后壁画的艺术完整性。4)学习感知图像块相似度 LPIPS。LPIPS 主要关注图像的局部和细节特征,更加符合人类视觉系统对图像质量的感知。在相同参数和实验环境下,针对每种方法选取相同数量的内容图片和风格图片进行指标的分析,从测试集随机选取 200 张图片进行指标测试,结果如表 1 所示。通过指标对比可以发现,相比其他方法本文提出的模型在迁移敦煌壁画风格的实验中,生成的结果图像在全局特征、局部特征细节、整体结构层次、亮度分布和对比度等

方面均有优异表现，较好地还原了敦煌艺术特有的高饱和矿物颜料、精细纹理和复杂层次结构。为对比不同模型生成图片的时间效率，在相同环境和参数下，对单幅 224 ×224 图像端到端风格迁移平均时长进行比较，结果如表 1 所示。由表 1 可以看到：CycleGAN 和 CAST 基于对抗训练的域映射，相比其他对比实验更轻量化；相对的，AdaAttN 和 AesPA-Net 依赖注意力机制复杂度升高；StyleID、InST 和 IP-Adapter 为扩散模型，其生成过程依赖多步迭代的去噪范式，生成速度通常较慢；本文方法专注多尺度风格解耦，虽相对原模型生成图片时间增加，但与其他对比实验相比更可满足实际需求。

表 1　定量分析指标结果对比

Tab. 1　Comparison of quantitative analysis index results

模型	FID	LPIPS	L2	SSIM	生成时长/s
CycleGAN	387.294	0.551	0.489	0.628	0.434
AdaAttN	354.266	0.543	0.465	0.645	0.553
CAST	377.450	0.665	0.578	0.396	**0.421**
StyleID	**353.901**	0.533	0.481	0.667	4.278
AesPA-Net	366.284	0.547	0.492	0.621	1.432
InST	460.316	0.672	0.504	0.351	1.899
IP-Adapter	478.531	0.688	0.623	0.317	3.521
Ours	364.787	**0.527**	**0.461**	**0.679**	0.449

本研究针对敦煌壁画艺术风格迁移效果进行了系统性用户调研。实验共招募 329 名具有多元化专业背景的参与者，其中艺术领域从业者占比 38.6%（含美术教育、文物保护等方向），非艺术领域参与者占比 61.4%（涵盖计算机科学、人文社科等学科），最终回收有效问卷 289 份。评估体系由 3 个核心指标构建，分别是内容保真度、风格匹配度、视觉吸引力。内容保真度：量化生成图像与源图像在主题元素、物体构成及场景布局层面的相似性。风格匹配度：评估生成图像与目标敦煌壁画在笔触特征、色彩体系及艺术表现手法方面的一致性。视觉吸引力：从美学维度衡量图像在构图平衡、视觉舒适度及艺术感染力方面的综合表现。实验采用被试间随机分组评测范式：每位参与者被分层随机分配至单一模型与单一评价指标组合，观看单张生成图像并依据 0 ~3.00 分连续滑块完成对应维度评分。对收集到的分数进行平均数和标准差计算，结果见表 2 和图 7。

表 2　用户投票评分

Tab. 2　User voting ratings

模型	内容保真度	风格匹配度	视觉吸引力
CycleGAN	2.39 ±0.33	2.48 ±0.31	2.33 ±0.21
AdaAttN	2.54 ±0.29	2.41 ±0.35	2.38 ±0.24
CAST	2.33 ±0.27	2.44 ±0.25	2.27 ±0.16
StyleID	2.59 ±0.30	2.47 ±0.28	2.31 ±0.19
AesPA-Net	2.22 ±0.32	2.53 ±0.24	2.36 ±0.15
InST	1.37 ±0.43	1.45 ±0.36	2.53 ±0.14
IP-Adapter	0.85 ±0.45	1.27 ±0.40	2.06 ±0.22
Ours	2.54 ±0.24	2.58 ±0.23	2.71 ±0.11

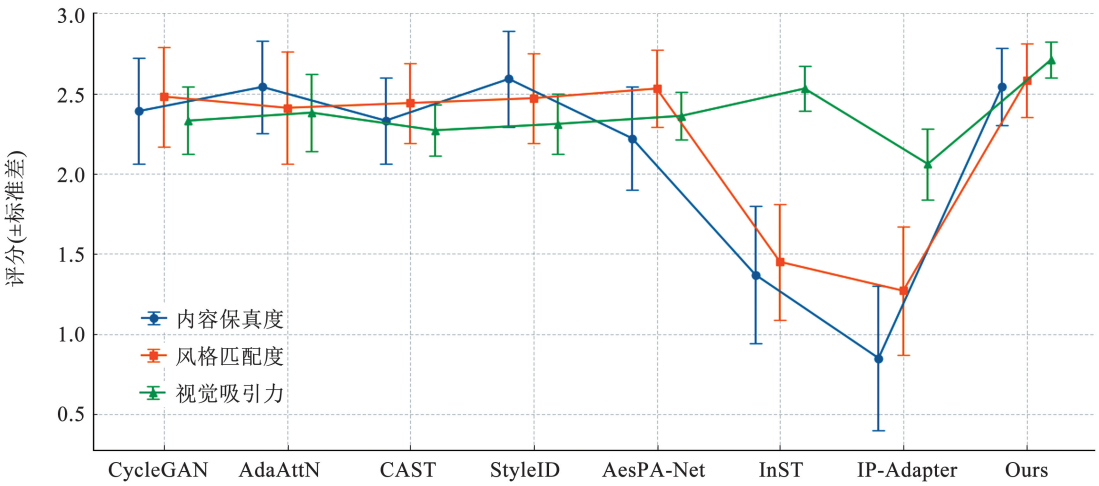


图 7　用户分数均值和标准差统计折线图

Fig. 7　Line plot of user score mean and standard deviation statistics

本文提出的方法在 3 个评估维度均取得显著优势，具体表现为：内容保真度均值 2.54（σ =0.24）、风格匹配度均值 2.58（σ =0.23）、视觉吸引力均值 2.71（σ =0.11）。实验结果验证了本方法在敦煌艺术风格迁移任务中的有效性，不仅实现了源图像语义特征的高保真度留存，同时也精准捕捉了敦煌壁画特有的矿物颜料色域，说明该方法在内容完整性、风格准确性与审美价值之间达到了优化平衡，符合

大众对数字敦煌艺术的审美期待。

2.4 消融实验

对本文模型进行消融实验得到的风格迁移图像如图 8 所示。

图 8 中第 3 列为 CycleGAN 原模型生成的风格图像。(a)列图为在生成器中加入 PFNT 模块的效果,该模块在保持分辨率的同时提取多尺度的信息,可解决原模型在生成图像时,山体、天空和人物等常见元素之间逻辑关系和比例协调不足和失真问题,确保图像内容的和谐统一,但仍存在局部纹理模糊,色彩协调性欠缺;(b)列图是在(a)列基础上加入 DSNT 模块,该模块可增强图像全局和局部特征的建模,使得生成图像可以更好地捕捉壁画的整体结构和局部色彩分布,使得树枝、天空及山顶等元素的迁移色彩更加自然且生动,增强视觉表现力,但局部纹理不太清晰;(c)列图是在(a)、(b)列基础上加入 ALDC-NT,可进一步捕捉壁画中山水、枝叶等元素的精细笔触,使得生成图像中山体的轮廓更加清晰,树枝、叶片等细微纹理特征条理清晰,与风格图像特征更为贴合,整体青绿山水的青绿色色调统一协调,图像整体结构、元素逻辑关系也与壁画风格图像有较好的匹配,内容图像中的结构在迁移后的风格图像中均保留了原始细节。



图 8 消融实验

Fig. 8 Ablation experiments

表 3 是加入不同模块后的指标变化,可以看到,本文所提方法在 FID、SSIM、LPIPS 和 L2 损失上均有较大提高,由此体现出生成图像在全局特征、局部特征细节和整体结构层次、亮度分布和对比度等方面均有出色的提升。

表 3 消融实验结果指标对比

Tab. 3 Comparison of indicators of ablation experiment results

模型	FID	LPIPS	L2	SSIM
CycleGAN	387.29	0.551	0.489	0.628
(a)	374.03	0.547	0.481	0.633
(b)	368.75	0.530	0.474	0.657
(c)	**364.78**	**0.527**	**0.461**	**0.679**

2.5 其他数据集的实验

为验证本文方法在不同艺术风格上的泛化能力,本文在中国水墨画和梵高油画两种差异显著的艺术风格上进行了迁移实验。实验采用与敦煌壁画相同的网络结构和训练参数,仅替换风格图像数据集,以验证模型对多样化艺术风格的适应能力。中国水墨画以黑白灰为主色调,强调笔触的流动性和画面的留白意境。由图 9 第 3 列结果可以看到:本文方法成功捕捉了水墨画的晕染效果和笔触特征,生成的山水图像呈现出典型的水墨渐变层次;在细节保留方面,模型较好地处理了水墨特有的飞白效果,树枝和山石的轮廓线自然流畅。梵高油画以鲜艳的色彩和独特的笔触著称。由图 9 的第 6 列可以看到:本文方法有效学习了梵高标志性的漩涡状笔触特征与强烈的色彩对比,在严格保持内容图像结构的基础上,成功再现了油画颜料的厚重质感,且色彩过渡自然,无显著色块分割现象。



图 9　其他数据集实验

Fig. 9　Experiments on other datasets

实验结果验证了本文方法在多个数据集上的有效性和可行性，同时体现了模块的理论价值，并证明了本文模型具有良好的泛化能力。

3　结　语

本文针对敦煌壁画风格迁移任务中存在的色彩失真、纹理模糊及层次结构失调等问题，提出了一种改进 CycleGAN 的多尺度敦煌风格迁移网络。设计 ALDC-NT 网络，该网络是线性可变形卷积组合和膨胀卷积组合组成的 U 型结构，加入该网络可进一步捕捉壁画中山水、人物和建筑等元素的精细笔触。提出卷积和注意力组合 DSNT，该网络可增强图像全局和局部特征的建模，使得模型可以更好地捕捉敦煌壁画的整体结构和局部色彩分布。提出 PFNT，该网络在保持分辨率的同时提取多尺度的信息，更好地保留山水、人物和建筑元素之间的层次逻辑关系且比例协调。实验结果表明，本文所提方法在 FID、SSIM、L2 损失、LPIPS 指标和生成图片速度方面表现优异，用户调研显示其在内容保真度、风格匹配度与视觉吸引力方面表现突出，验证了模型在艺术特征保留与生成质量上的优势。本研究可为敦煌壁画的数字化保护与创新传播提供技术支撑，其设计思路可扩展至其他传统艺术风格的自动化创作。但模型引入多尺度网络导致参数量增加，训练时单次迭代耗时增多，DSNT 的全局注意力权重与 PFNT 门控信号缺乏直观语义解释，难以定位错误迁移区域。未来工作将聚焦于轻量化模型设计、跨域风格解耦与可解释性增强，进一步推动传统艺术数字化保护的实用化进程。

参考文献

[1] ROMÃO X, BERTOLIN C. Risk protection for cultural heritage and historic centres: Current knowledge and further research needs[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 67: 102652. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102652

[2] ISOLA P, ZHU Junyuan, ZHOU Tinghui, et al. Image-to-image translation with conditional adversarial networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE, 2017: 1125. DOI: 10.1109/CVPR.2017.632

[3] WANG Weining, LI Yifan, YE Huan, et al. Dunhuang GAN: A generative adversarial network for Dunhuang mural art style transfer[C]// 2022 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). Taipei: IEEE, 2022: 1 DOI:10.1109/ICME52920.2022.9859987

[4] 贵向泉，曹磊，李立. 融合 CBAM 注意力机制的敦煌壁画风格迁移[J]. 计算机系统应用，2025，34(4)：276
GUI Xiangquan, CAO Lei, LI Li. Style transfer of Dunhuang murals with CBAM attention mechanism[J]. Computer System Application, 2025, 34(4): 276. DOI:10.15888/j.cnki.csa.009848

[5] GATYS L A, ECKER A S, BETHGE M. Image style transfer using convolutional neural networks [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE, 2016: 2414. DOI: 10.1109/CVPR.2016.265

[6] GAO Wei, LI Yijun, YIN Yihang, et al. Fast video multi-style transfer[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. Snowmass: IEEE, 2020: 3222.

DOI: 10.1109/WACV45572.2020.9093420

[7] DUMOULIN V, SHLENS J, KUDLUR M. A learned representation for artistic style [PP/OL]. V1 (2016-10-24) [2025-03-21]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.07629

[8] ZHANG Hang, DANA K. Multi-style generative network for real-time transfer [C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops. Munich: ECCV, 2018: 349. DOI: 10.1007/978-3-030-11018-5_32

[9] CHEN Dongdong, YUAN Lu, LIAO Jing, et al. Stylebank: An explicit representation for neural image style transfer [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE, 2017: 1897. DOI: 10.1109/CVPR.2017.296

[10] JOHNSON J, ALAHI A, LI Feifei. Perceptual losses for real-time style transfer and super-resolution [C]//Computer Vision-ECCV 2016. Amsterdam: Springer International Publishing, 2016: 694. DOI: 10.1007/978-3-319-46475-6_43

[11] ZHANG Lvmin, JI Yi, LIN Xin, et al. Style transfer for anime sketches with enhanced residual U-net and auxiliary classifier GAN[C]//2017 4th IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR). Nanjing: IEEE, 2017: 506. DOI: 10.1109/ACPR.2017.61

[12] 胡景浩, 耿国华, 熊美均, 等. 基于细节特征提取融合的中国山水画风格迁移[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(1): 98
HU Jinghao, GENG Guohua, XIONG Meijun, et al. A style transfer method for chinese landscape painting based on detail feature extraction and fusion[J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(1): 98. DOI:10.12454/j.jsuese.202300295

[13] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial networks[J]. Communications of the ACM, 2020, 63(11): 139. DOI: 10.1145/3422622

[14] CHENG Bin, LIU Zuhao, PENG Yunbo, et al. General image-to-image translation with one-shot image guidance[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Paris: IEEE, 2023: 22736. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.02078

[15] ZHU Junyan, PARK T, ISOLA P, et al. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Venice: IEEE, 2017: 2223. DOI: 10.1109/ICCV.2017.244

[16] YI Zili, ZHANG Hao, TAN Ping, et al. Dualgan: Unsupervised dual learning for image-to-image translation[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Venice: IEEE, 2017: 2849. DOI: 10.1109/ICCV.2017.310

[17] ZHANG Yunxin, HUANG Nisha, TANG Fan, et al. Inversion-based style transfer with diffusion models[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Vancouver: IEEE, 2023: 10146. DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.00978

[18] WANG Zhizhong, ZHAO Lei, XING Wei. StyleDiffusion: Controllable disentangled style transfer via diffusion models[C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Paris: IEEE, 2023: 7677. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.00706

[19] HUANG Siyu, AN Jie, WEI Donglai, et al. QuantArt: Quantizing image style transfer towards high visual fidelity[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Vancouver: IEEE, 2023: 5947. DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.00576

[20] CHUNG J, HYUN S, HEO J P. Style injection in diffusion: A training-free approach for adapting large-scale diffusion models for style transfer[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE, 2024: 8795. DOI: 10.1109/CVPR52733.2024.00840

[21] HUANG Bo, XU Wenlu, HAN Qizhuo, et al. AttenST: A training-free attention-driven style transfer framework with pre-trained diffusion models [PP/OL]. V1 (2025-03-11) [2025-03-21]. https://doi.org/10.48550/ arXiv.2503.07307

[22] ZHANG Xin, SONG Yingze, SONG Tingting, et al. LDConv: Linear deformable convolution for improving convolutional neural networks[J]. Image and Vision Computing, 2024, 149: 105190. DOI: 10.1016/j.imavis.2024.105190

[23] LIU Songhua, LIN Tianwei, HE Dongliang, et al. Adaattn: Revisit attention mechanism in arbitrary neural style transfer [C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Montreal: IEEE, 2021: 6649. DOI: 10.1109/ICCV48922.2021.00658

[24] ZHANG Yuxin, TANG Fan, DONG Weiming, et al. Domain enhanced arbitrary image style transfer via contrastive learning [C]//ACM SIGGRAPH 2022 Conference Proceedings. New York: ACM, 2022: 1. DOI:10.1145/3528233.3530736

[25] HONG K, JEON S, LEE J, et al. AesPA-Net: Aesthetic pattern-aware style transfer networks[C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Paris: IEEE, 2023: 22758. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.02080

[26] HU Ye, ZHANG Jun, LIU Sibo, et al. Ip-adapter: Text compatible image prompt adapter for text-to-image diffusion models[PP/OL]. V1 (2023-08-13)[2025-03-21]. https://doi.org/10.48550/ arXiv.2308.06721

(编辑 吕雪梅)

DOI:10.11918/202505059

基于实测数据和等效脉冲模型的近断层地震动复原方法

胡进军[1,2],狄啸展[1,2]

(1.地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所),哈尔滨 150080;
2.地震灾害防治应急管理部重点实验室,哈尔滨 150080)

摘 要:近断层地震动是判断震害程度的重要依据,但一次地震中获取的近断层地震动记录数量往往较少。为解决近断层区域工程结构的震害评估问题,特别是补充近断层区域无观测台站处的地震动,本文提出一种基于近断层实测数据和等效脉冲模型的近断层地震动复原方法。该方法通过近断层实测地震动反应谱的插值来生成近断层区域无观测台站处的地震动,再利用经验等效脉冲模型恢复地震动的速度脉冲和永久位移特征。以我国台湾集集地震为例给出了近断层区域两个典型位置的地震动复原示例,通过与实测地震动记录进行对比,验证了本文方法的有效性和合理性。研究表明,本文方法能够构造具有近断层脉冲型地震动特征的地震动,并能够复原近断层区域无实测数据的站点处的地震动,可为近断层区域缺失实测数据的地震动的需求提供一种实用方法。

关键词:近断层地震动;地震动合成;反应谱插值;等效脉冲模型;集集地震
中图分类号:P315.9 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0083-07

Near-fault ground motion reconstruction method based on observed data and equivalent pulse model

HU Jinjun[1,2], DI Xiaozhan[1,2]

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration (Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: Near-fault ground motions are critical for assessing seismic damage. However, recorded near-fault ground motion during an earthquake is often limited. To address the challenge of evaluating seismic damage to engineering structures in near-fault regions, particularly for supplementing ground motion at sites without observing stations in near-fault regions, this study proposed a near-fault ground motion reconstruction method based on observed data and an equivalent pulse model. The method initially generated ground motion at sites without observing stations in near-fault regions by interpolating response spectra from observed near-fault ground motion. Subsequently, it employed an empirical equivalent pulse model to recover velocity pulses and permanent displacements of ground motion. By taking the Chi-Chi earthquake in Taiwan, China as an example, examples of ground motion reconstruction at two typical locations in the near-fault region were provided. By comparing them with the observed ground motion data, the effectiveness and rationality of the method were validated. The results demonstrate that the method effectively reconstructs ground motions with near-fault pulse-like characteristics and ground motion at sites without observed data in near-fault regions. This offers a practical approach to meet the need for ground motion in near-fault regions where observed data are lacking.

Keywords: near-fault ground motion; ground motion synthesis; response spectrum interpolation; equivalent pulse model; Chi-Chi earthquake

随着川藏铁路等重大基础设施在西部地震区的建设,越来越多的大型工程结构不可避免地受到地震活动断层威胁,工程设计时需要考虑近断层地震动的特殊影响。然而,地震中实测的近断层地震动记录往往数量很少且位置分布不均匀。因此,复原近断层区域的地震动可为近断层区域工程结构的震害评估提供依据。

区别于远场地震动,断层附近的地震动更容易

收稿日期:2025-05-26;**录用日期**:2025-08-28;**网络首发日期**:2025-11-21
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20251120.1716.003
基金项目:国家自然科学基金(52478568);国家重点研发计划(2021YFC3100701,2022YFC3003503)
作者简介:胡进军(1978—),男,研究员,博士生导师
通信作者:胡进军,hu-jinjun@163.com

受到断层破裂过程的影响,地震动时程更复杂、更随机、更具有破坏性[1-2]。通常,方向性效应和滑冲效应是近场速度脉冲的两个主要原因。当断层破裂速度近似于剪切波速时,出现断层破裂方向性效应[3]。其通常表现为大幅值、长周期的双向速度脉冲,且由于断层辐射模式的影响,法向分量通常比水平分量更加强烈[4-6]。近断层区域地震动的另一个特征是滑冲效应导致的单向速度脉冲,在位移时程中表现为位移的"阶跃"[7-8]。这是由断层相对错动产生的构造位移引起的,这种地面不可恢复位移通常发生在走滑断层的走向方向和倾滑断层的倾向方向上[3]。对于走滑断层,通常认为滑冲效应脉冲和方向性脉冲相互解耦,并且断层两侧的地震动时程具有"等幅反向"的特征。但对于倾滑断层,滑冲效应脉冲和方向性效应脉冲的耦合方式十分复杂[3,9],直接解耦十分困难。一些研究表明,近断层地震动特征可以通过等效脉冲模型进行模拟,并可以应用于跨断层工程结构输入地震动的模拟中[7,10-11]。Makris 等[12]根据断层区域地震记录的脉冲特征将其分为3类脉冲,并通过这3类脉冲分别模拟滑冲效应脉冲以及永久位移效应。Abrahamson[13]提出以简单的脉冲函数模拟近断层地震动的永久位移,Kamai 等[14]在此基础上对模型进行了进一步改进并以实测记录进行了验证。但这些方法仅限模拟地震动的低频分量,并且依赖于实测的真实地震动记录。为解决上述问题,有研究人员提出了基于扩展震源物理模型的方法,这种方法具有明确的物理机制,且不依赖于实测的地震动记录,可以模拟任何类型断层破裂时产生的地震动,但这种方法对断层滑动模型高度依赖[15],且模拟一次地震所需时间较长,不便于工程应用。

为此,本文以等效脉冲模型理论为基础,通过反应谱插值补充所需要的近断层地震动记录,以1999年我国台湾集集地震为例,收集并处理近断层区域上下盘的地震动数据。在此基础上,提出一种基于实测数据插值和等效脉冲模型的近断层地震动复原方法,通过该方法复原了近断层地震动加速度、速度、位移时程,并与真实近断层地震动记录进行对比分析,验证此方法复原近断层地震动的有效性。

1 近断层地震动的复原方法

研究表明[11-12,14],简化的等效脉冲模型可以模拟近断层脉冲型地震动的显著特征,但这些方法在一些地震动缺失的场景下应用困难。Lu 等[16]提出了一种基于地震动记录的区域地震动模拟方法,该方法能够依靠有限的真实地震动记录,模拟目标区域的地震动记录,但由于真实地震动记录不可避免地需要进行基线校正等数据处理过程,故以该方法模拟的地震动记录无法包含近断层区域所需要的滑冲效应脉冲特征。为此,在这两种方法的基础上,本文提出了一种基于实测数据插值和等效脉冲模型的地震动复原方法。

1.1 基于反应谱插值的地震动模拟方法

基于反应谱插值的地震动模拟方法能够依靠有限的真实记录模拟所需目标区域的地震动记录,并且因为使用了真实记录,模拟得到的记录能够保留区域地震动的原始特征。该方法主要包含下两部分:反距离加权插值(inverse-distance-weighted,IDW)方法和连续小波变换(continuous wavelet transform,CWT)方法。

1.1.1 IDW 方法

IDW 方法可以利用目标位置周围的数据来生成目标位置处的地震动参数[17-18]。因此,在计算出各台站的反应谱后,可以通过 IDW 方法生成目标位置反应谱,其计算公式为:

$$\hat{S}_0(T_j) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^p} S_i(T_j)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^p}} \tag{1}$$

式中:$\hat{S}_0(T_j)$ 为目标位置在 T_j 周期的地震动预测反应谱;$S_i(T_j)$ 为第 i 站在 T_j 周期的地震动反应谱值;d_i 为目标位置到第 i 站点的距离;p 为指数,设为2[17,19];n 为目标位置周围用于插值的站点数,考虑到台站分布以及误差要求,建议使用 $n=4$。

在选择台站组时参考 Lu 等[16]的选择要求:1)目标台站应被选择的周围台站包围;2)震中不应位于插值站点所组成的平面覆盖范围内;3)站点间的高程差应小于150 m。

对于近断层区域,由于上、下盘地震动差异性过大,在上述条件的基础上选择台站时还需保证选择的插值站点组不在断层两侧。

1.1.2 CWT 方法

在得到目标位置地震动反应谱后,利用 CWT 方法对目标位置距离最近的台站记录进行校正,从而得到目标位置的地震动时程[20]。这种方法不仅可以产生与目标位置反应谱相似的地震动,还能够保留目标位置周围地震动的原始特征,减少后续分析的不确定性[21]。该方法分为以下4个步骤。

步骤1:选取目标位置附近的一条地震动记录作为种子地震动,然后确定种子地震动的小波系数,小波系数由公式(2)确定。

$$C(s,p) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{s,p}^{*}(t)\,\mathrm{d}t = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\,\frac{1}{\sqrt{s}}\psi^{*}\left(\frac{t-p}{s}\right)\mathrm{d}t \quad (2)$$

式中：s 和 p 分别用于对小波进行缩放和平移，$\psi(t)$ 表示小波函数，t 为时间，* 表示复数共轭。本文采用了广泛使用的脉冲响应小波[22-23]，由公式(3)确定：

$$\psi(t) = \mathrm{e}^{-\zeta\Omega|t|}\sin(\Omega t) \quad (3)$$

式中：ζ 和 Ω 分别用于控制小波的衰减和随时间的变化，对于上一个小波函数，比例因子 s 和周期 T 的关系由公式(4)确定：

$$T = \frac{2\pi}{\Omega}s \quad (4)$$

步骤 2：计算目标反应谱与历史记录在周期 T 的响应谱之比，记为 $R(T)$。

步骤 3：将每个小波系数乘以相应的比值 $R(T)$，利用逆 CWT 生成地震动，由公式(5)确定。

$$f(t) = \frac{1}{K_{\psi}}\int_{0}^{+\infty}\left(\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{1}{s^{2}}R(T)C(s,p)\psi_{s,p}(t)\,\mathrm{d}p\right)\mathrm{d}s = \frac{1}{K_{\psi}}\int_{0}^{+\infty}\left(\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{1}{s^{2}}R\left(\frac{2\pi}{\Omega}s\right)C(s,p)\psi_{s,p}(t)\,\mathrm{d}p\right)\mathrm{d}s \quad (5)$$

步骤 4：计算生成地震动的反应谱，并与目标反应谱进行比较，重复步骤 1 ~ 3，直至达到期望的匹配水平或达到最大迭代次数[20]。

上述地震动生成方法通常采用目标插值台站周边的 4 个台站的三向记录作为插值地震动。在应用 CWT 方法时，通常将距离最接近目标台站的地震动作为种子地震动[16]。

1.2　基于等效脉冲模型的滑冲效应叠加方法

Kamai 等[14]基于 Graves 和 Pitarka[24]的方法提出了考虑空间滑移、破裂速度和时间的脉冲模型，该模型将滑冲效应参数化为单周期的正弦波，由式(6) ~ (8)给出：

$$a_{\mathrm{f}}(t) = \begin{cases} 0, & t \leqslant t_1 \\ \dfrac{2\pi D_{\mathrm{site}}}{T_{\mathrm{f}}^{2}}\sin\left[\dfrac{2\pi}{T_{\mathrm{f}}}(t-t_1)\right], & t_1 < t < (t_1+T_{\mathrm{f}}) \\ 0, & t \geqslant (t_1+T_{\mathrm{f}}) \end{cases} \quad (6)$$

$$v_{\mathrm{f}}(t) = \begin{cases} 0, & t \leqslant t_1 \\ \dfrac{D_{\mathrm{site}}}{T_{\mathrm{f}}} - \dfrac{D_{\mathrm{site}}}{T_{\mathrm{f}}}\cos\left[\dfrac{2\pi}{T_{\mathrm{f}}}(t-t_1)\right], & t_1 < t < (t_1+T_{\mathrm{f}}) \\ 0, & t \geqslant (t_1+T_{\mathrm{f}}) \end{cases} \quad (7)$$

$$d_{\mathrm{f}}(t) = \begin{cases} 0, & t \leqslant t_1 \\ \dfrac{D_{\mathrm{site}}}{T_{\mathrm{f}}}(t-t_1) - \dfrac{D_{\mathrm{site}}}{2\pi}\sin\left[\dfrac{2\pi}{T_{\mathrm{f}}}(t-t_1)\right], & t_1 < t < (t_1+T_{\mathrm{f}}) \\ D_{\mathrm{site}}, & t \geqslant (t_1+T_{\mathrm{f}}) \end{cases} \quad (8)$$

式中：D_{site} 为永久位移幅值；T_{f} 为周期；t_1 为滑冲效应开始的时间，通过 S 波到时来确定。永久地面位移 D_{site} 是关于 M_{w} 和断层距的函数。

滑冲效应脉冲区别于其他类型脉冲的一个显著特点是其位移时程包含一个显著的永久位移，但目前针对该领域的研究较少，通常情况下地面永久位移 D_{site} 可以通过断层挖槽、地质测绘、钻探等方法获得，当这些地质勘察数据缺失时，可以使用 D_{site} 和 M_{w} 之间的经验关系来确定[14,25-26]，这里 D_{fault} 采用 Wells 和 Coppersmith[25]提出的式(9)确定：

$$\ln(D_{\mathrm{fault}}) = 1.15M_{\mathrm{w}} - 3.28 \quad (9)$$

D_{site} 采用 Kamai 等[14]提出的方法，由式(10)确定：

$$\log\left(\frac{D_{\mathrm{site}}}{D_{\mathrm{fault}}}\right) = \begin{cases} \log a_0 + a_2\log\left(\dfrac{R_{\mathrm{rup}}+a_3}{a_3}\right), & R_x < 0 \\ \log(a_0+a_4) + a_2\log\left(\dfrac{R_{\mathrm{rup}}+a_3}{a_3}\right), & R_x > 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中：a_0 为 $R_{\mathrm{rup}}=0$ 处断层下盘的位移，a_4 为 $R_{\mathrm{rup}}=0$ 断层上盘与断层下盘位移的差值，a_2 为线的斜率或衰减速率，a_3 为衰减的曲率，R_x 为到断层面水平走向的法向距离，用于区分上下盘，$R_x<0$ 为下盘，$R_x>0$ 为上盘。

滑冲效应脉冲的周期 T_f 计算公式为

$$\ln(T_{\mathrm{f,Rev}}) = 0.7M_{\mathrm{w}} - 3.54 \quad (11)$$

Kamai 等[14]同时提出了对 T_{f}、t_1 的修改公式，对于不同的地震 T_{f}、t_1 与 T_{f2}、t_2 对复原时程的效果不同，通常情况下 T_{f2}、t_2 的效果更好，少数情况下 T_{f}、t_1 效果更好。本文方法选择使用文献[14]推荐的 T_{f2}、t_2。具体由式(12)和式(13)确定：

$$\ln(T_{\mathrm{f2}}) = 0.645M_{\mathrm{w}} - 1.45 \quad (12)$$

$$t_2 = t_1 - 0.5(T_{\mathrm{f2}} - T_{\mathrm{f}}) \quad (13)$$

在叠加滑冲效应时，需要分别对得到的滑冲效应脉冲和原始记录进行互补滤波，从而避免在叠加时重复计算[14]导致的偏差。

1.3　近断层地震动的复原

实际记录的近断层地震动记录在进行基线校正等处理过程中，可能会导致滑冲效应脉冲在处理后出现丢失现象[14]。因此，在使用实测记录进行地震动复原时需要考虑这一缺失。首先通过基于反应谱

插值的地震动生成方法,在保留其他地震动信息的基础上生成指定位置的地震动时程。然后通过等效脉冲方法补充丢失的滑冲效应脉冲。最后,在生成的地震动时程上叠加丢失的滑冲效应脉冲,从而复原指定位置的具有完整近断层地震动特征的地震动。本方法的研究思路如图 1 所示,具体过程如下。

1)选择目标位置周围的 4 个站点基线校正处理后的真实记录,通过对地震动进行 IDW 方法,利用选定站点的地震动反应谱插值生成目标位置的地震动反应谱。

2)通过 CWT 方法,使用得到的目标位置地震动反应谱生成目标位置地震动时程。

3)将生成后的地震动时程进行三维坐标旋转,见图 1 的步骤 4,以断层走向为 x 轴,垂直断层走向为 y 轴,断层法向为 z 轴。将东西、南北和竖向三向地震动时程分别旋转到新的 x、y、z 轴方向,并在新的 x-y 平面内找到位移最大方向,将这个方向作为断层滑动方向。

4)对滑冲效应脉冲和生成的目标位置地震动记录进行互补滤波,然后分别添加滑冲效应的脉冲到最大位移方向和 z 轴方向,从而得到所需的带有滑冲效应脉冲的目标位置地震动时程。

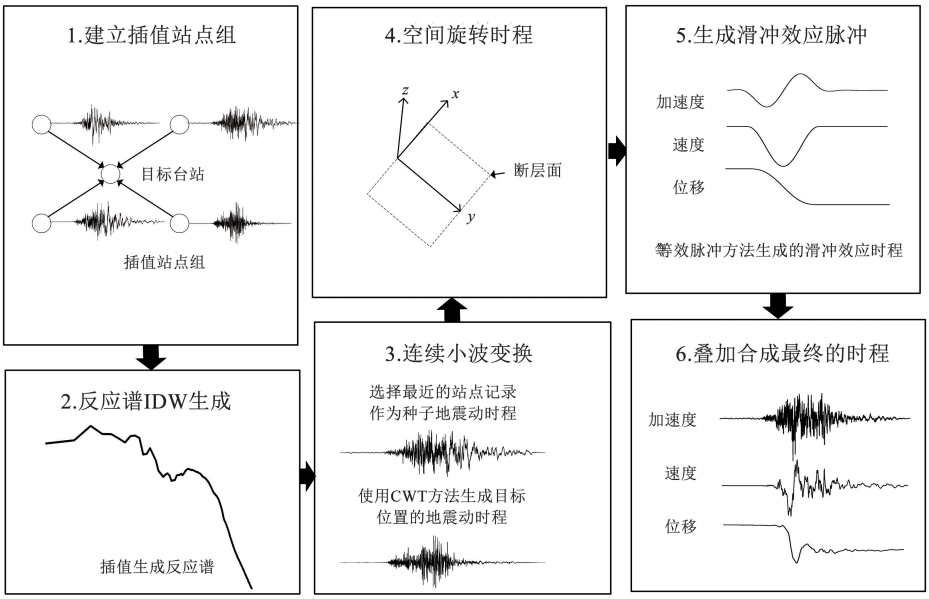


图 1 基于实测记录插值和等效脉冲模型的近断层地震动复原方法

Fig. 1 Near-fault ground motion reconstruction method based on observed data interpolation and equivalent pulse model

2 方法验证和应用

2.1 集集地震介绍

1999 年 9 月 21 日我国台湾省集集发生 M_w7.6 地震,这次地震由南北走向逆冲断层的剧烈活动引起,造成南北长约 105 km、东西宽近 50 km 的地表破裂,断层的倾角为 30°[27-28]。地表破裂起始于断层中部偏南位置,分别向南北方向延伸。此次地震中记录到较多的近断层地震动,为本文方法的验证和应用提供了数据。

2.2 基于实际观测地震动的方法验证

在图 2 中下盘选取插值站点组进行近断层地震动复原。选择 TCU051 站点作为目标插值站点,选择符合要求的 4 个站点组成插值站点,表 1 中给出了集集地震中下盘部分台站的位置情况,表 2 给出了插值权重,选择距离 TCU051 最近的 TCU054 的地震动记录作为种子地震动。使用 IDW 方法,根据选取站点组生成目标站点的三向加速度反应谱,如图 3所示。在此基础上,使用 CWT 方法,根据生成的三向加速度反应谱得到目标站点处的三向加速度、速度、位移时程,图 4 是经过 CWT 得到的 TCU051 站点的地震动时程与经过滤波和基线校正后不含滑冲效应的真实记录的对比。

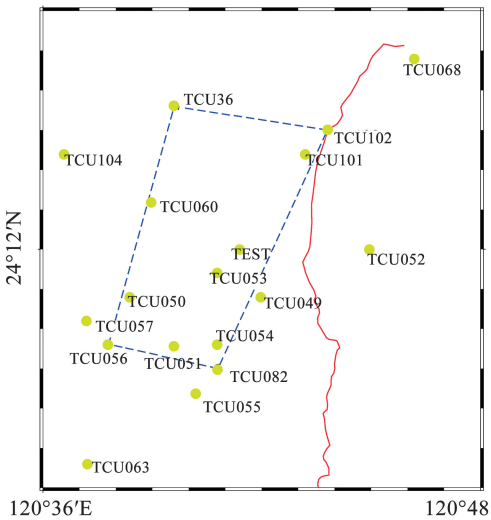


图 2 中国台湾集集 M_w7.6 地震断层地表破裂和部分台站分布图

Fig. 2 Fault surface rupture and distribution of selected stations during Chi-Chi M_w 7.6 earthquake in Taiwan, China

表 1　1999 年中国台湾集集M_W7.6 地震下盘部分强震动台站位置

Tab. 1　Locations of strong motion stations on footwall during 1999 Chi-Chi M_W7.6 earthquake in Taiwan, China

台站	东经/(°)	北纬/(°)	高程/m	断层距/km	与目标站点距离/km
TCU102	120.73	24.25	231	1.49	12.678
TCU136	120.66	24.26	176	8.27	11.119
TCU048	120.61	24.18	192	13.53	5.988
TCU056	120.63	24.16	77	10.48	3.335
TCU050	120.64	24.18	100	9.49	3.145
TCU082	120.68	24.15	89	5.16	2.486
TCU054	120.68	24.16	97	5.28	2.223
TCU051	120.66	24.16	96	7.64	0

表 2　插值站点组各台站权重

Tab. 2　Weights of each station in interpolation site group

台站编号	TCU102	TCU136	TCU082	TCU056
插值权重	0.023	0.030	0.608	0.380

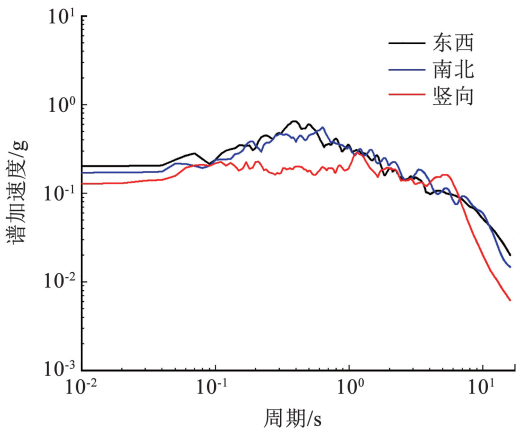


图 3　IDW 方法得到的 TCU051 台站三向反应谱

Fig. 3　Three-directional response spectra of TCU051 station by using IDW method

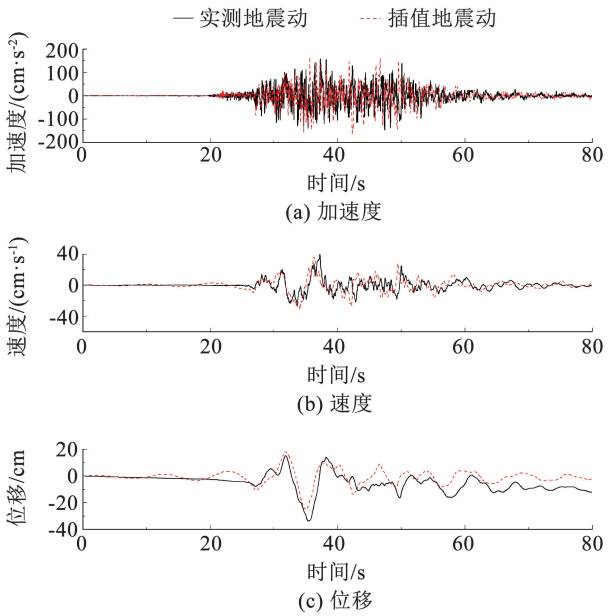


图 4　IDW 方法得到的 TCU051 台站地震动记录与实测地震动记录(无滑冲效应)对比

Fig. 4　Comparison between IDW-derived ground motions and observed ground motions of TCU051 station (without fling-step)

最终通过等效脉冲方法生成滑冲效应脉冲的加速度、速度、位移时程。图 5 为三向加速度时程的傅里叶谱，图 6 是使用 Kamai 等[14]的方法生成的滑冲效应脉冲的加速度、速度、位移时程。图 7 为最终叠加了滑冲效应后的 TCU051 站点的加速度、速度、位移时程和加速度反应谱，与带有滑冲效应脉冲的真实地震动记录进行的对比结果。

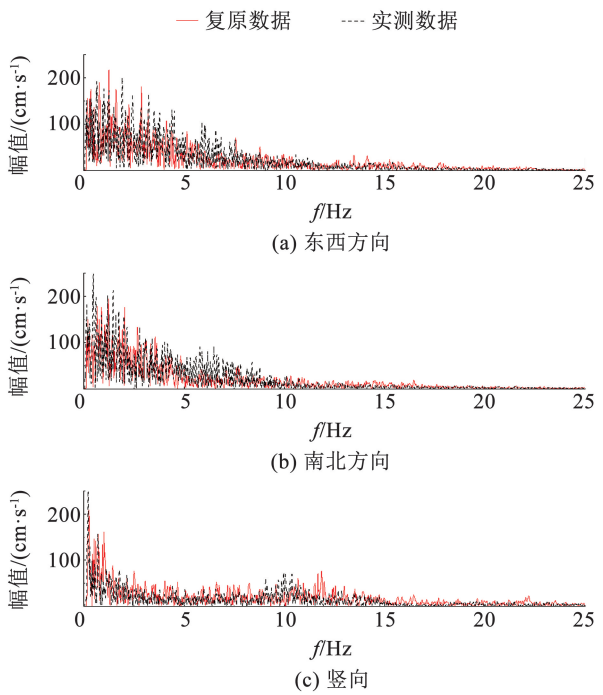


图 5　TCU051 台站反应谱插值后的加速度傅里叶谱图

Fig. 5　Acceleration Fourier spectrum after response spectra interpolation at station TCU051

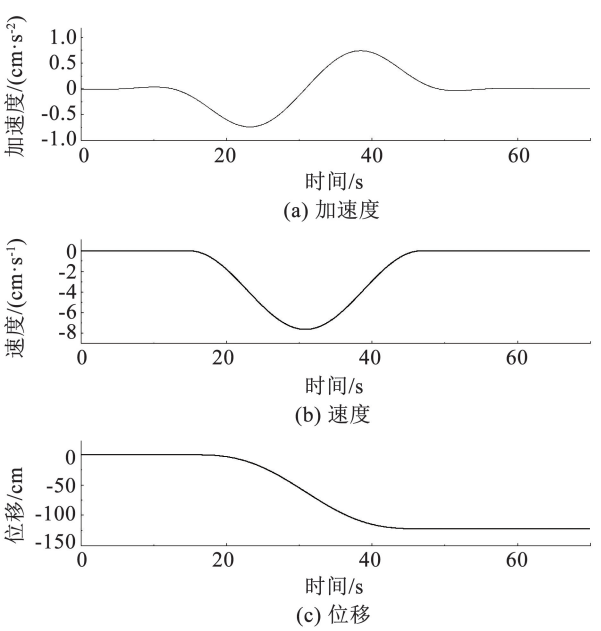


图 6　TCU051 台站滤波后滑冲效应的时程

Fig. 6　Filtered time history of fling-step of TCU051 station

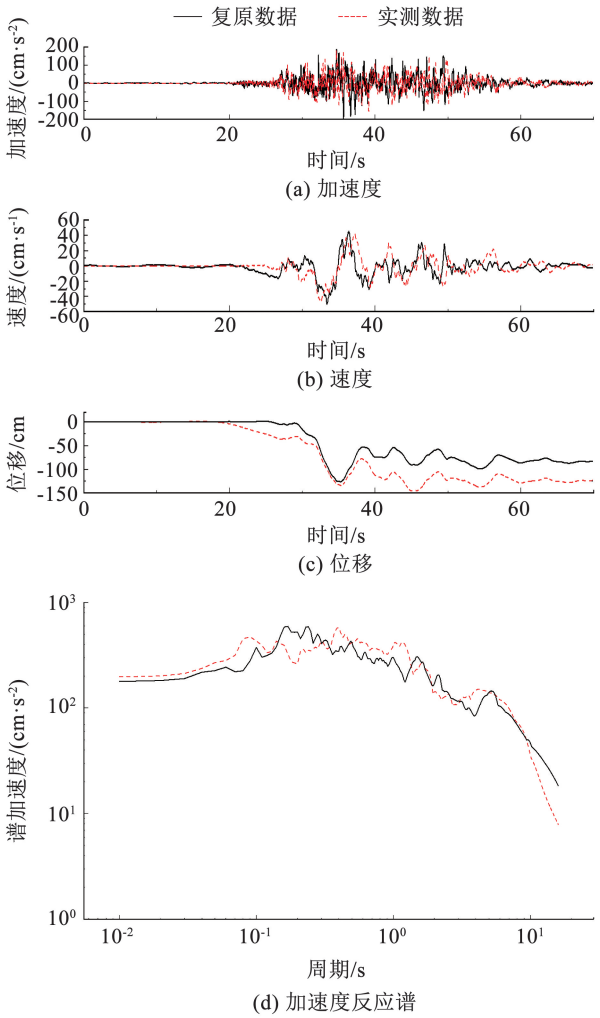


图 7 TCU051 台站叠加滑冲效应后记录与实测地震动记录(含永久位移)对比

Fig. 7 Comparison between records with superimposed fling-step and observed ground motion of TCU051 station (with permanent displacement)

从图 4 可以看出反应谱插值和 CWT 得到的加速度、速度和位移时程与真实记录吻合良好,误差为 22.625%。从图 5 可以看出,经过反应谱插值得到的加速度时程与真实记录在频谱上比较接近,东西方向和南北方向的频谱在 5 ~ 10 Hz 区间内与真实情况有一些差距,竖向频谱与真实情况吻合良好。将生成的地震动时程进行三维坐标旋转,并在断层面内最大位移方向叠加滑冲效应脉冲,结果如图 7 所示,可以看出,最终复原的地震动时程与恢复了永久位移的真实地震动时程特征相似,最大互相关系数为 0.587,但在残余位移上复原结果与实测情况尚存在一定差距。

2.3 预测无实际观测地震动的应用

本文方法同样可以适用于近断层区域无观测台站处地震动的合成,示例站点位置由图 2 给出,具体坐标为东经 120.69°,北纬 24.20°。选择 TCU102、TCU136、TCU082、TCU056 共 4 个站点构成插值站点组,经过计算,选择距离目标站点最近的 TCU053 的地震动记录作为种子地震动,复原结果如图 8 所示。复原的记录在时程上具有近断层脉冲型地震动的特点,并包含了工程上所需要的永久位移。

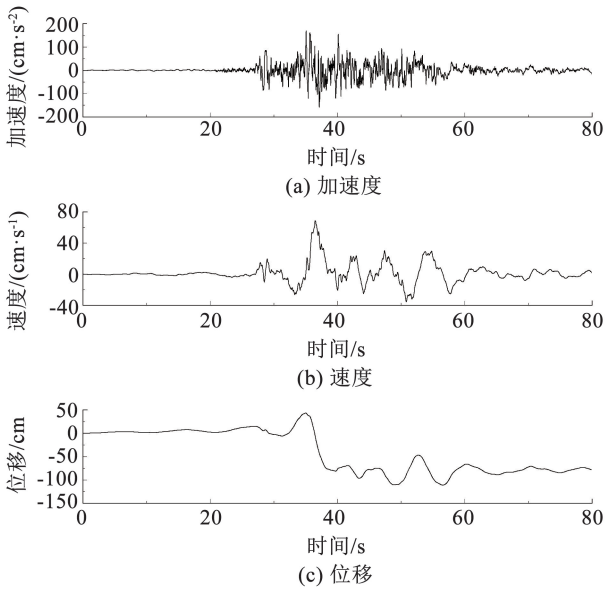


图 8 无实测地震动站点处复原的记录

Fig. 8 Reconstructed records at sites without observed ground motion data

2.4 结果分析

通过对比 TCU051 台站的复原地震动时程与实测地震动时程,表明复原的加速度、速度时程和反应谱与实测记录吻合良好。复原的位移时程在幅值上与真实记录接近,但残余位移与真实记录存在一定误差,造成这种误差的主要原因与使用回归的经验公式有关。本文采用的断层参数D_{fault}是由经验公式确定的,与真实的断层情况存在一定差异。残余位移在本文方法中主要是由参数D_{site}确定,其是由D_{site}与D_{fault}的经验公式控制的,其中所需的参数是由地震动数值模拟出来的记录进行回归得到的,使用这些参数生成的某一次地震事件的滑冲效应脉冲势必会与真实情况存在一定偏差,对于参数D_{site},后续可以考虑更多元的数据,如将 GPS 同震位移纳入考虑,从而降低使用经验公式导致的偏差。

3 结 论

本文提出了一种基于实测数据插值和等效脉冲模型的近断层地震动复原方法,并验证了方法的合理性,得到如下结论。

1)基于实测数据插值和等效脉冲模型的方法生成的近断层地震动,在时程和反应谱上与真实情况吻合良好。

2)本文方法使用目标位置周围的真实地震动

记录进行 IDW，可较好地反映目标地区的原始特征，更合理地复原目标区域的地震动。

3）本文方法可以应用于断层距小于 15 km、高程差小于 150 m 的无实测记录的位置，可为近断层工程结构的震后评估提供地震动输入参考。

参考文献

[1] 陈笑宇，王东升，付建宇，等. 近断层地震动脉冲特性研究综述[J]. 工程力学，2021，38(8)：1
CHEN Xiaoyu，WANG Dongsheng，FU Jianyu，et al. State-of-the-art review on pulse characteristics of near-fault ground motions[J]. Engineering Mechanics，2021，38(8)：1. DOI：10.6052/j.issn.1000－4750.2020.08.0582

[2] 胡进军，靳超越，张辉，等. 匹配多目标参数的地震动合成方法[J]. 工程力学，2022，39(3)：126
HU Jinjun，JIN Chaoyue，ZHANG Hui，et al. A ground motion synthesis method for matching multi-objective parameters [J]. Engineering Mechanics，2022，39(3)：126. DOI：10.6052/j.issn.1000－4750.2021.01.0095

[3] SOMERVILLE P. Characterizing near-fault ground motion for the design and evaluation of bridges [C]// Proceedings of the 3rd National Seismic Conference and Workshop on Bridges and Highways. Portland，OR：MCEER，2002：137

[4] HEATON T H，HALL J F，WALD D J，et al. Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical M_w 7.0 blind thrust earthquake[J]. Science，1995，267(5195)：206. DOI：10.1126/science.267.5195.206

[5] 胡进军，李琼林，邬迪，等. 基于 PSHA 的核电厂近断层抗震设计谱构建方法[J]. 工程力学，2019，36(5)：192
HU Jinjun，LI Qionglin，WU Di，et al. Construction method of the near fault seismic design spectrum for nuclear power plants based on PSHA[J]. Engineering Mechanics，2019，36(5)：192. DOI：10.6052/j.issn.1000－4750.2018.04.0242

[6] 谢俊举，李小军，温增平. 近断层速度大脉冲对反应谱的放大作用[J]. 工程力学，2017，34(8)：194
XIE Junju，LI Xiaojun，WEN Zengping. The amplification effects of near-fault distinct velocity pulses on response spectra [J]. Engineering Mechanics，2017，34(8)：194. DOI：10.6052/j.issn.1000－4750.2016.09.0680

[7] 李爽，谢礼立. 近场问题的研究现状与发展方向[J]. 地震学报，2007，29(1)：102
LI Shuang，XIE Lili. Study on the current status and development trends of near-field issues [J]. Acta Seismologica Sinica，2007，29(1)：102

[8] BAKER J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2007，97(5)：1486. DOI：10.1785/0120060255

[9] OGLESBY D D. Fault geometry and the dynamics of the 1999 Chi-chi (Taiwan) earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2004，91(5)：1099. DOI：10.1785/0120000714

[10] 田玉基，杨庆山，卢明奇. 近断层脉冲型地震动的模拟方法[J]. 地震学报，2007，29(1)：77
TIAN Yuji，YANG Qingshan，LU Mingqi. Study on the simulation method of near-fault pulse-type ground motions [J]. Acta Seismologica Sinica，2007，29(1)：77. DOI：10.1007/s11589－007－0080－5

[11] 盛兆琦，胡进军，谢礼立. 跨断层工程输入地震动模拟及其应用研究进展[J]. 地震工程与工程振动，2023，43(1)：1
SHENG Zhaoqi，HU Jinjun，Xie Lili. Progress in simulation and application of cross-fault engineering input ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics，2023，43(1)：1. DOI：10.13197/j.eeed.2023.0101

[12] MAKRIS N，CHANG S P. Effect of viscous，viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics，2000，29(1)：85. DOI：10.1002/(SICI)1096－9845(200001)29：1＜85::AID－EQE902＞3.0.CO；2－N

[13] ABRAHAMSON N A. Velocity pulses in near-fault ground motions[C]// Proceedings of the UC Berkeley—CUREE Symposium in Honor of Ray Clough and Joseph Penzien. Berkeley，CA，USA，2002：40

[14] KAMAI R，ABRAHAMSON N，GRAVES R. Adding fling effects to processed ground-motion time histories [J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2014，104(4)：1914. DOI：10.1785/0120130272

[15] ZHANG Fan，LI Shuai，WANG Jinquan，et al. Effects of fault rupture on seismic responses of fault-crossing simply-supported highway bridges[J]. Engineering Structures，2020，206：110104. DOI：10.1016/j.engstruct.2019.110104

[16] LU Xinzheng，CHENG Qingle，TIAN Yuan，et al. Regional ground-motion simulation using recorded ground motions [J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2021，111(2)：825. DOI：10.1785/0120200243

[17] SUZUKI W，AOI S，KUNUGI T，et al. Strong motions observed by K-NET and KiK-net during the 2016 Kumamoto earthquake sequence[J]. Earth，Planets and Space，2017，69：19. DOI 10.1186/s40623－017－0604－8

[18] ZERVA A. Spatial variation of seismic ground motions：Modeling and engineering applications[M]. Florida：CRC Press Inc，2009

[19] THRAINSSON H. Modeling of earthquake ground motion in the frequency domain[D]. CA：Stanford University，2000

[20] MONTEJO L A，SUAREZ L E. An improved CWT-based algorithm for the generation of spectrum-compatible records[J]. International Journal of Advanced Structural Engineering，2013，5(1)：1. DOI：10.1186/2008－6695－5－26

[21] GASCOT R L，MONTEJO L A. Spectrum-compatible earthquake records and their influence on the seismic response of reinforced concrete structures[J]. Earthquake Spectra，2016，32(1)：101. DOI：10.1193/011714EQS010M

[22] SUÁREZ L E，MONTEJO L A. Generation of artificial earthquakes via the wavelet transform[J]. International Journal of Solids and Structures，2005，42(21-22)：5905. DOI：10.1016/j.ijsolstr.2005.03.025

[23] HANCOCK J，WATSON L J，ABRAHAMSON N A，et al. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets[J]. Journal of Earthquake Engineering，2006，10(1)：67. DOI：10.1080/13632460609350629

[24] GRAVES R W，PITARKA A. Broadband ground-motion simulation using a hybrid approach[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2010，100(5A)：2095. DOI：10.1785/0120100057

[25] WELLS D L，COPPERSMITH K J. New empirical relationships among magnitude，rupture length，rupture width，rupture area，and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，1994，84(4)：974. DOI：10.1785/BSSA0840040974

[26] AKI K. Generation and propagation of g waves from the niigata earthquake of June 16，1964. Part 2. Estimation of earthquake moment，released energy，and stress-strain drop from the G wave spectrum [J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute，University of Tokyo，1966，44：73

[27] MA K F. Spatial and temporal distribution of slip for the 1999 Chi-Chi，Taiwan，Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2001，91(5)：1069. DOI：10.1785/0120000728

[28] 王卫民，赵连锋，李娟，等. 1999 年台湾集集地震震源破裂过程[J]. 地球物理学报，2005，48(1)：132
WANG Weimin，ZHAO Lianfeng，LI Juan，et al. Source rupture process of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan[J]. Chinese Journal of Geophysics，2005，48(1)：132. DOI：10.1002/cjg2.635

（编辑　吕雪梅）

DOI:10.11918/202504061

LPOA-MPC 的车辆横纵向轨迹跟踪协同优化控制方法

李晓龙[1,2],黄 鹤[1,2],杨 澜[3],王会峰[1],高 涛[3]

(1.长安大学 电子与控制工程学院,西安 710064;2.西安市智慧高速公路信息融合与控制重点实验室(长安大学),西安 710064;3.长安大学 信息工程学院,西安 710064)

摘 要:针对车辆模型预测控制(model predictive control,MPC)轨迹跟踪控制器中权重矩阵参数选取困难,导致车辆轨迹跟踪控制的稳定性与精度不足的问题,本文提出了一种融合多种机制的拉丁-鹈鹕算法,用于优化控制车辆横、纵向联合模型预测轨迹跟踪控制器权重矩阵参数。首先,基于车辆单轨模型,分别设计了车辆横向 MPC 控制器和纵向的 MPC 上位控制器、基于加速度-驱动力逆动力学模型的下位控制器;其次,针对鹈鹕算法(Pelican optimization algorithm,POA)在解空间内搜索效率低的问题,提出了一种拉丁-鹈鹕算法(Latin Pelican optimization algorithm,LPOA),引入灰狼算法的等级狩猎机制重构 POA 的猎物定位模型,通过 α 鹈鹕引导策略提高算法收敛速度;同时,融入动态随机搜索策略,利用其重尾分布特性增强算法在迭代后期的局部极值逃逸能力;最后,基于 LPOA 的寻优能力,分别优化横、纵向 MPC 控制器权重矩阵参数,并通过 Carsim 和 Simulink 平台联合仿真验证所提出的横向、纵向以及横纵联合优化控制方法。研究表明,本文提出的 LPOA-MPC 控制器在车辆横向、纵向以及横纵联合控制中,均能够有效提高车辆轨迹跟踪控制稳定性与控制精度。

关键词:横纵联合;轨迹跟踪;模型预测控制;鹈鹕算法;参数整定

中图分类号:TP301.6 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0090-13

Cooperative optimization of vehicle lateral and longitudinal trajectory tracking based on LPOA-MPC

LI Xiaolong[1,2], HUANG He[1,2], YANG Lan[3], WANG Huifeng[1], GAO Tao[3]

(1. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Expressway Information Fusion and Control (Chang'an University), Xi'an 710064, China; 3. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to select the weight matrix parameters in the vehicle model predictive control (MPC) trajectory tracking controller, which makes the stability and accuracy of the vehicle trajectory tracking control insufficient, this research propose a latin-pelican algorithm (LPOA) that integrates multiple mechanisms to optimize the weight matrix parameters of the vehicle lateral and longitudinal joint model predictive trajectory tracking controller. Firstly, the vehicle transverse MPC controller, the longitudinal MPC upper controller and the lower controller based on the acceleration-drive inverse dynamics model are designed respectively based on the vehicle single-track model; Secondly, a Latin Pelican Optimization Algorithm is proposed to improve the efficiency of the pelican algorithm's searching in the solution space. The hierarchical hunting mechanism of the gray wolf algorithm is introduced to reconfigure the prey localization model of the POA, and the convergence speed of the algorithm is improved by the α-pelican guidance strategy. Thus, a dynamic stochastic search strategy is incorporated to enhance the algorithm's ability to escape from local extremes in the late iteration by using its heavy-tailed distribution characteristics. Finally, the parameters of the horizontal and vertical MPC controller weight matrices are optimized using the optimization capability of LPOA; and the proposed horizontal, vertical, and horizontal-longitudinal joint optimization control methods are verified through co-simulation on CarSim and Simulink platforms. Results show that the LPOA-MPC controller proposed in this research can effectively improve the stability and accuracy of vehicle trajectory tracking control in horizontal, longitudinal and transverse-longitudinal joint control.

Keywords: transverse-longitudinal association; trajectory tracking; model predictive control; pelican algorithm; parameter tuning

收稿日期:2025-04-22;**录用日期**:2025-08-02;**网络首发日期**:2025-10-24

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251024.1407.004

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52572353);中央高校基本科研业务费资助项目(300102326501);陕西省留学人员科技活动择优资助项目(2023001)

作者简介:李晓龙(2002—),男,硕士研究生;黄 鹤(1979—),男,教授,博士生导师

通信作者:黄 鹤,huanghe@chd.edu.cn

轨迹跟踪控制是车辆运动控制的核心技术之一，其目标是车辆基于当前的定位和状态信息，结合规划与决策系统，在保证车辆的行驶稳定性以及乘客乘坐体验的前提下，使其能够精准和实时地按照参考轨迹行驶。车辆的轨迹跟踪控制根据控制目标的不同，又可以分为横向控制、纵向控制以及横纵联合控制。车辆的纵向控制通过控制车辆的制动系统和发动机转速实现对车辆速度和前后车或障碍物距离的控制；横向控制通过控制车辆的前轮转角实现车辆保持期望的行车路线；横纵联合控制则综合考虑横向和纵向控制以实现全面控制。

目前国内外学者广泛使用的车辆轨迹跟踪控制方法，主要包括线性二次型最优控制[1]、自抗扰控制[2]、模型预测控制算法（model predictive control，MPC）[3]等方法。模型预测控制因其基于系统动力学模型的优化特性，被广泛应用于非线性、多约束的控制任务。然而，MPC 控制器的性能在很大程度上依赖于权重矩阵参数的合理选择，权重矩阵在 MPC 的优化过程中，起着平衡不同性能指标的作用。因此，合理设置参数对于确保控制器在各种复杂工况下的稳定性和跟踪精度至关重要。但是，在当前 MPC 设计中，调节权重矩阵的方法主要有两种：经验法和多次仿真调试的试错法。经验法通常依赖于设计者的直觉和先验经验，适用于特定领域或已知的标准任务，但过于依赖工程师对系统的了解深度，具有较强的主观性，缺乏系统性和普适性。而试错法虽然能够通过反复仿真验证来确定较为合适的权重矩阵参数，但该方法需要耗费大量时间和精力进行调试，周期较长，效率低下，且获得的参数通常仅适用于特定工况，适应范围相对有限，在面对各种复杂多变的实际应用场景时，难以实现有效的泛化应用。因此，如何根据动态环境条件，自动、精准地调整 MPC 控制器中的权重矩阵参数，成为亟待解决的重要问题。

近年来，群体智能算法通过模拟自然界中生物群体的协同行为，展现出强大的全局搜索和优化能力，为传统控制策略中参数选择困难的问题开辟了新的解决思路和方法[4]。Zhou 等[5]提出了一种基于自适应鲸鱼优化算法的模糊 PID 轨迹跟踪控制器，通过引入自适应鲸鱼优化算法来优化模糊 PID 控制器参数，从而显著提高了控制器的控制精度。Li 等[6]提出了一种基于蝴蝶优化算法的自动驾驶车辆的轨迹跟踪控制方法，并在不同速度条件下进行了试验验证，结果表明，该方法能够显著提高自动驾驶车辆的控制性能及其可靠性。李晓龙等[7]提出了一种多策略优化算法，用于对横向模型预测轨迹跟踪控制器的权重矩阵进行优化，显著改善了控制系统在横向轨迹跟踪过程中的性能，有效降低了车辆的最大横向误差，但其仅研究了横向轨迹跟踪控制，忽略了实际驾驶过程中纵向控制对轨迹跟踪精度的影响，无法完全满足复杂驾驶环境的要求。

鹈鹕优化算法（pelican optimization algorithm，POA）是 Trojovsk 等[8]模仿鹈鹕在自然界狩猎过程中的狩猎策略和行为提出的一种新型群体智能优化方法，其将种群中鹈鹕的位置视为候选解，将目标函数值视为食物的质量，旨在通过模拟鹈鹕的觅食行为来找到最优解。POA 相较于其他智能算法在探索方面非常有效，但在复杂多模态优化问题中存在收敛速度衰减和局部极值逃逸能力弱的问题[9]。为了扩大了 POA 算法的适用场景，本文提出了一种融合多种机制的拉丁－鹈鹕算法（latin pelican optimization algorithm，LPOA），并将 LPOA 与分层协同优化理论相结合，建立横向与纵向模型预测控制（MPC）的权重矩阵参数协同优化车辆轨迹跟踪控制模型，以提高轨迹跟踪控制器的控制性能。

1　车辆模型的建立

1.1　车辆动力学模型

本文建立的车辆动力学模型如图 1 所示。

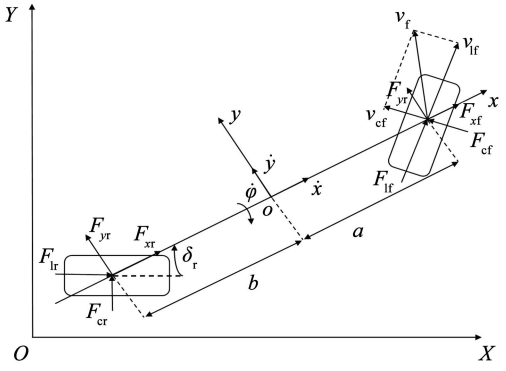


图 1　车辆单轨模型

Fig. 1　Vehicle monorail model

其中，a，b 为前、后轴到质心的距离，I_z 为绕 z 轴转动惯量，m 为车身质量。F_{lf}，F_{lr} 为前后轮纵向力，F_{cf}，F_{cr} 为前后轮的横向力。F_{xf}，F_{xr} 为前后轮 x 方向的力，F_{yf}，F_{yr} 为前后轮 y 方向的力。由牛顿第二定律，可得如下平衡方程：

$$x\text{ 轴：}m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\varphi} + 2F_{xf} + 2F_{xr} \tag{1}$$

$$y\text{ 轴：}m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2F_{yf} + 2F_{yr} \tag{2}$$

$$\text{绕 } z\text{ 轴：}I_z\ddot{\varphi} = 2aF_{yf} - 2bF_{yr} \tag{3}$$

为了进一步简化分析，采用小角度假设，即假设车辆轮胎侧偏角较小，轮胎侧向力和侧偏刚度可以近似用线性函数描述，可得车辆模型如下：

$$\begin{cases} m\ddot{y} = -m\dot{x}\dot{\varphi} + 2\left[C_{\mathrm{cf}}\left(\delta_{\mathrm{f}} - \dfrac{\dot{y}+a\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right) - C_{\mathrm{cr}}\dfrac{\dot{y}-b\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right] \\ m\ddot{x} = m\dot{y}\dot{\varphi} + 2\left[C_{\mathrm{lf}}s_{\mathrm{f}} + C_{\mathrm{cf}}\left(\delta_{\mathrm{f}} - \dfrac{\dot{y}+a\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right)\delta_{\mathrm{f}} + C_{\mathrm{lr}}s_{\mathrm{r}}\right] \\ I_z\ddot{\varphi} = 2\left[aC_{\mathrm{cf}}\left(\delta_{\mathrm{f}} - \dfrac{\dot{y}+a\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right) + bC_{\mathrm{cr}}\dfrac{\dot{y}-b\dot{\varphi}}{\dot{x}}\right] \\ \dot{Y} = \dot{x}\sin\varphi + \dot{y}\cos\varphi \\ \dot{X} = \dot{x}\cos\varphi - \dot{y}\sin\varphi \end{cases} \tag{4}$$

式中：δ_{f} 为前轮转角；s_{f}、s_{r} 分别为前、后轮滑移率；C_{lf}、C_{lr}分别为前、后轮胎纵向刚度；C_{cf}、C_{cr}分别为前、后轮胎侧偏刚度。

1.2 状态量偏差的建立

为了使车辆能够精准地跟踪给定的参考轨迹，建立车辆与参考轨迹之间的动态误差反馈模型，能够帮助分析车辆与目标轨迹之间的偏差，并为进一步优化控制性能提供重要依据。

由图 2 所示的误差模型，可得如下车辆横向和航向跟踪误差方程：

$$e_\varphi = \varphi - \varphi_{\mathrm{r}} \tag{5}$$

$$v_s = \frac{1}{1 - r_o e_y}[v_x\cos(e_\varphi) + v_y\sin(e_\varphi)] \tag{6}$$

$$\dot{e}_y = v_x\sin(e_\varphi) + v_y\cos(e_\varphi) \tag{7}$$

$$\dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - r_o v_s \tag{8}$$

式中：v_x，v_y为车辆速度的纵向和横向速度分量，v_s为车辆沿轨迹的速度，φ_{r}为道路切向与大地坐标系 X 轴的夹角，r_o为道路曲率。为了简化计算，假设航向误差 e_φ的值很小，则可近似认为 $\sin(e_\varphi) \approx e_\varphi$，$\cos(e_\varphi) \approx 1$，则式(7)和式(8)简化为：

$$\dot{e}_y = v_x e_\varphi + v_y \tag{9}$$

$$\dot{e}_\varphi = \dot{\varphi} - r_o v_x \tag{10}$$

纵向速度的跟踪误差为[10]：

$$e_v = v_{\mathrm{r}} - v_s \tag{11}$$

$$\dot{e}_v = \dot{v}_{\mathrm{r}} - \dot{v}_s \tag{12}$$

$$e_s = \int_{t_1}^{t_2} e_v \mathrm{d}t \tag{13}$$

式中：v_{r}为纵向参考速度，e_v为纵向速度误差，$\dot{e}_v$为纵向加速度误差，e_s为纵向位移误差。

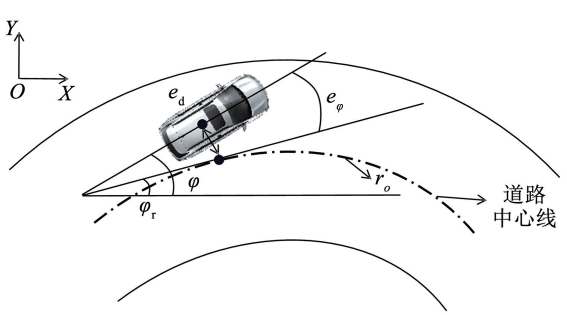


图 2 轨迹跟踪误差模型

Fig. 2 Trajectory tracking error model

2 横纵联合控制器设计

2.1 横向控制器设计

式(4)车辆模型中状态方程为 $\dot{\boldsymbol{\xi}} = f(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{u})$，控制变量为 $\boldsymbol{u} = \delta_{\mathrm{f}}$，状态变量为 $\boldsymbol{\xi} = [\dot{y}, \dot{x}, \varphi, \dot{\varphi}, Y, X]^{\mathrm{T}}$，对非线性车辆动力学模型进行线性化处理，可得到对应的线性事变状态空间方程如下：

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{\xi}(t) + \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}(t) \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{A}(t) = \dfrac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\xi}}|_{\xi_t, u_t}$为 f 对 $\boldsymbol{\xi}$ 的雅可比矩阵，$\boldsymbol{\xi}(t)$为系统 t 时刻状态量，$\boldsymbol{u}(t)$系统 t 时刻输入量，$\boldsymbol{B}(t) = \dfrac{\partial f}{\partial \boldsymbol{u}}|_{\xi_t, u_t}$为 f 对 $\boldsymbol{u}$ 的雅可比矩阵。

经过离散化处理，得到状态空间表达式为

$$\boldsymbol{\xi}(k+1) = \boldsymbol{A}(k)\boldsymbol{\xi}(k) + \boldsymbol{B}(k)\boldsymbol{u}(k) \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{A}(k) = \boldsymbol{I} + T_{\mathrm{s}}\boldsymbol{A}(t)$，$\boldsymbol{B}(k) = T_{\mathrm{s}}\boldsymbol{B}(t)$，其中，$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵，T_{s} 为采样周期。

将系统的输出量设置为 $\boldsymbol{\eta} = [\varphi \ \ Y]^{\mathrm{T}}$，进行离散化处理，得到输出状态空间表达式为

$$\boldsymbol{\eta}(k) = \boldsymbol{C}_k\boldsymbol{\xi}(k) \tag{16}$$

式中，$\boldsymbol{C}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$。

令 $\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k+1) = [\boldsymbol{\xi}(k) \quad \boldsymbol{u}(k-1)]^{\mathrm{T}}$，可以得到如下状态空间表达式：

$$\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k+1) = \tilde{\boldsymbol{A}}_k\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k) + \tilde{\boldsymbol{B}}_k\Delta\boldsymbol{u}(k) \tag{17}$$

$$\tilde{\boldsymbol{\eta}}(k) = \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k) \tag{18}$$

式中：$\tilde{\boldsymbol{A}}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_k & \boldsymbol{B}_k \\ \boldsymbol{0}_{1\times 6} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix}$，$\tilde{\boldsymbol{B}}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_k \\ \boldsymbol{I} \end{bmatrix}$，$\tilde{\boldsymbol{C}}_k = [\boldsymbol{C}_k \quad \boldsymbol{0}_{2\times 1}]$。

系统的输出量表达式为

$$\boldsymbol{Y}(k) = \boldsymbol{\psi}_k\tilde{\boldsymbol{\xi}}(k) + \boldsymbol{\Theta}_k\Delta\boldsymbol{U}(k) \tag{19}$$

式中各矩阵如下：

$$\boldsymbol{Y}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\eta}}(k+1) \\ \tilde{\boldsymbol{\eta}}(k+2) \\ \vdots \\ \tilde{\boldsymbol{\eta}}(k+N_{\mathrm{c}}) \\ \vdots \\ \tilde{\boldsymbol{\eta}}(k+N_{\mathrm{p}}) \end{bmatrix},\ \boldsymbol{\psi}_k = \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k \\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k^2 \\ \vdots \\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_{\mathrm{c}}} \\ \vdots \\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_{\mathrm{p}}} \end{bmatrix},$$

$$\Delta\boldsymbol{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{u}(k) \\ \Delta\boldsymbol{u}(k+1) \\ \vdots \\ \Delta\boldsymbol{u}(k+N_{\mathrm{c}}) \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\Theta}_k=\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{B}}_k & 0 & 0 & 0\\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k\tilde{\boldsymbol{B}}_k & \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{B}}_k & 0 & 0\\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots\\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_c-1}\tilde{\boldsymbol{B}}_k & \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_c-2}\tilde{\boldsymbol{B}}_k & \cdots & \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{B}}\\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_c}\tilde{\boldsymbol{B}}_k & \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_c-1}\tilde{\boldsymbol{B}}_k & \cdots & \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k\tilde{\boldsymbol{B}}_k\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_p-1}\tilde{\boldsymbol{B}}_k & \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_p-2}\tilde{\boldsymbol{B}}_k & \cdots & \tilde{\boldsymbol{C}}_k\tilde{\boldsymbol{A}}_k^{N_p-N_c-1}\tilde{\boldsymbol{B}}_k\end{bmatrix}$$

根据上述系统模型，可得目标函数如下[11]：

$$J(\tilde{\boldsymbol{\xi}}(t),\boldsymbol{u}(t-1),\Delta\boldsymbol{U}(t))=\sum_{i=1}^{N_p}\|\tilde{\boldsymbol{\eta}}(t+i|t)-\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{ref}(t+i|t)\|_{\boldsymbol{Q}}^2+\sum_{i=1}^{N_c-1}\|\Delta\boldsymbol{u}(t+i|t)\|_{\boldsymbol{R}}^2+\rho\varepsilon^2 \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{\eta}(t+i|t)$为 t 时刻预测的 $t+i$ 时刻系统输出量，ρ 为权重系数，ε 为松弛因子，$\boldsymbol{\eta}_{ref}$为系统状态参考值，$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 为权重矩阵。

为提高式(20)目标函数的求解速率，将其转化为二次规划形式，从而能够利用数值优化算法快速求解。

2.2　纵向控制器设计

在轨迹跟踪的纵向速度控制架构中，分为上位和下位控制器，目的是将高层的决策优化与底层的执行控制分离，从而简化系统设计并提高控制性能。上位控制器的任务是基于车辆动力学模型和轨迹跟踪目标，生成最优的纵向加速度指令 a_{des}。下位控制器将上位控制器生成的期望加速度 a_{des}转化为具体的执行器指令(如节气门开度或制动主缸压力)。上位控制器与下位控制器的分层式设计实现了纵向动力学系统的解耦控制。纵向 MPC 控制框图如图 3所示。

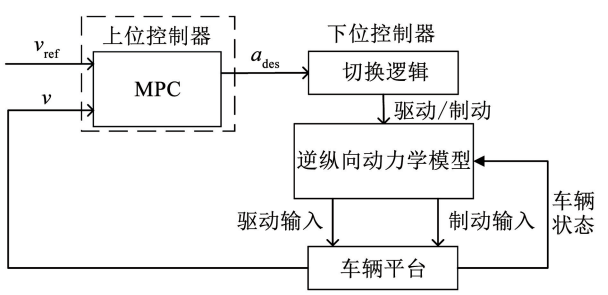


图 3　纵向 MPC 控制框图

Fig. 3　Longitudinal MPC control block diagram

2.2.1　基于 MPC 的上位控制器设计

在车辆的纵向控制系统中，可以认为横摆运动较小，则纵向控制可以被简化为积分和一阶惯性系统，具体表示为：

$$\begin{cases}\dot{v}=a\\ \dot{a}=\dfrac{K}{\tau}(a_{des}-a)\end{cases} \tag{21}$$

式中：K 为系统增益，本文取值为 1，τ 为时间常数，本文取值为 0.5。

根据上述运动特性，则可将车辆纵向运动的连续系统状态空间方程表示为

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{u}_1 \tag{22}$$

式中：状态向量 $\boldsymbol{x}=[v\ a]^T$，$\boldsymbol{u}_1=a_{des}$为系统输入，$\boldsymbol{A}_1$、$\boldsymbol{B}_1$矩阵如下：

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & -1/\tau\end{bmatrix},\boldsymbol{B}_1=\begin{bmatrix}0\\ K/\tau\end{bmatrix}$$

经离散处理，得到离散系统状态方程

$$\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}_k\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{u}(k) \tag{23}$$

式中 k 为当前采样时刻。其中，$\boldsymbol{A}_k$、$\boldsymbol{B}_k$矩阵如下：

$$\boldsymbol{A}_k=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & 1-T_s/\tau\end{bmatrix},\boldsymbol{B}_k=\begin{bmatrix}0\\ KT_s/\tau\end{bmatrix}$$

式中 T_s为采样周期。将车辆速度 v 作为系统输出，可表示为

$$\boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{C}_1\boldsymbol{x}(k) \tag{24}$$

式中 $\boldsymbol{C}_1=[1\ 0]$。

系统的控制目标是速度跟踪精度，定义以下目标函数：

$$J(\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{u}(t-1),\Delta\boldsymbol{u}(k))=\sum_{i=1}^{N_p}\|\boldsymbol{y}_p(k+i\mid k)-\boldsymbol{y}_{ref}(k+i\mid k)\|_{\boldsymbol{Q}}^2+\sum_{i=1}^{N_c}\|\Delta\boldsymbol{u}(k+i)\|_{\boldsymbol{R}}^2 \tag{25}$$

式中：$t-1$ 为上一采样时刻，$\boldsymbol{y}_p(k+i|k)$为控制输出预测值，$\boldsymbol{y}_{ref}(k+i|k)$为控制输出参考值，$(k+i|k)$为根据 k 时刻的采样信息预测得到的 $k+i$ 时刻状态，$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 为权重矩阵。

2.2.2　基于加速度-驱动力逆动力学模型的下位控制器

获得最优加速度指令后，下位控制器需完成动力域到执行机构的非线性映射。本文采用基于加速度-驱动力逆动力学模型建立下位控制器，主要包括驱动、制动的控制切换逻辑设计以及执行机构映射。为了实现车辆行驶过程中加减速的平滑切换，驱动和制动的控制切换逻辑需满足以下关键要素：1)驱动和制动不能同时进行；2)驱动和制动之间不能频繁切换。定义临界加速度 a_0为

$$a_0=\frac{F_{\alpha 0}-F}{m} \tag{26}$$

同时，为了适应动态工况，引入了车速和路面附着系数修正因子，其计算公式为

$$a_0 = a(1 - k_v v - k_\mu \mu) \tag{27}$$

式中：$F_{\alpha 0}$ 为节气门开度为 0 时的驱动力；F 为车辆行驶过程中总阻力，包含车辆的滚动阻力及空气阻力；k_v 为车速修正因子，用于抑制高速工况下空气阻力的非线性影响；k_μ 为路面附着系数修正因子，在低路面附着系数时增大，以避免打滑。在上述基础上引入缓冲加速度 $\tau = 0.05\ \mathrm{m/s^2}$ 来避免驱动和制动的频繁切换，具体如下：

$$\begin{cases} a_{\mathrm{des}} - a_0 > \tau & \text{驱动控制} \\ a_{\mathrm{des}} - a_0 \leqslant \tau & \text{制动控制} \end{cases} \tag{28}$$

3 鹈鹕优化策略

3.1 基本鹈鹕算法

3.1.1 初始化

根据具体问题的下限和上限随机初始化鹈鹕种群个体位置，每个鹈鹕个体都表示为一个候选解，用矩阵表示为：

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_{1,1} & \cdots & \boldsymbol{x}_{1,j} & \cdots & \boldsymbol{x}_{1,D} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{x}_{i,1} & \cdots & \boldsymbol{x}_{i,j} & \cdots & \boldsymbol{x}_{i,D} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{x}_{N,1} & \cdots & \boldsymbol{x}_{N,j} & \cdots & \boldsymbol{x}_{N,D} \end{bmatrix} \tag{29}$$

$$\boldsymbol{x}_{ij} = \mathrm{rand} \times (\boldsymbol{U}_j - \boldsymbol{L}_j) + \boldsymbol{L}_j, \quad i = 1,2,\cdots,N, j = 1,2,\cdots,D \tag{30}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{ij}$ 为第 i 只鹈鹕个体在第 j 维的位置，$\boldsymbol{U}_j$ 和 $\boldsymbol{L}_j$ 分别为第 j 维的上、下界，N 为种群规模，D 为问题维数。适应度矩阵为

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{F}_i \\ \vdots \\ \boldsymbol{F}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f([\boldsymbol{x}_{1,1}, \boldsymbol{x}_{1,2}, \cdots, \boldsymbol{x}_{1,D}]) \\ \vdots \\ f([\boldsymbol{x}_{i,1}, \boldsymbol{x}_{i,2}, \cdots, \boldsymbol{x}_{i,D}]) \\ \vdots \\ f([\boldsymbol{x}_{N,1}, \boldsymbol{x}_{N,2}, \cdots, \boldsymbol{x}_{N,D}]) \end{bmatrix} \tag{31}$$

3.1.2 猎物更新

为了提高 POA 的全局搜索能力，通过随机选择机制，在种群中随机选择一个鹈鹕个体作为猎物，对其进行捕猎。其计算公式为

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{F}} = \boldsymbol{X}(K, :) \tag{32}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{\mathrm{F}}$ 为猎物位置，K 为 $(0, N)$ 中的随机整数值。

3.1.3 逼近猎物阶段(探索阶段)

在逼近猎物阶段，鹈鹕向着猎物所在水面移动，数学模型如下：

$$\boldsymbol{x}_{ij}^{\mathrm{p1}} = \begin{cases} \boldsymbol{x}_{ij} + \sigma \cdot (\boldsymbol{P}_j - I \cdot \boldsymbol{x}_{ij}), & \boldsymbol{F}_{\mathrm{P}} < \boldsymbol{F}_i \\ \boldsymbol{x}_{ij} + \sigma \cdot (\boldsymbol{x}_{ij} - \boldsymbol{P}_j), & \text{else} \end{cases} \tag{33}$$

$$\boldsymbol{x}_i = \begin{cases} \boldsymbol{x}_i^{\mathrm{p}}, & \boldsymbol{F}_i^{\mathrm{p}} < \boldsymbol{F}_i \\ \boldsymbol{x}_i, & \text{else} \end{cases} \tag{34}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{ij}^{\mathrm{p1}}$ 为更新后的位置，σ 为 (0,1) 内随机数，I 为 [1,2] 内随机整数值，$\boldsymbol{F}_i^{\mathrm{p}}$ 为 $\boldsymbol{x}_{ij}^{\mathrm{p1}}$ 的适应度值，$\boldsymbol{P}_j$ 为猎物在第 j 维的位置，$\boldsymbol{F}_{\mathrm{P}}$ 为猎物适应度值。

3.1.4 掠过水面阶段(勘探阶段)

鹈鹕飞行至猎物所在水面上方，随后展开翅膀掠过水面，将猎物捕获于喉袋之中。通过这种飞行方式对猎物进行精准定位和捕捉，其数学模型如下：

$$\boldsymbol{x}_{ij}^{\mathrm{p2}} = \boldsymbol{x}_{ij} + R \cdot (1 - t/T) \cdot (2 \cdot \beta - 1) \cdot \boldsymbol{x}_{ij} \tag{35}$$

$$\boldsymbol{x}_i = \begin{cases} \boldsymbol{x}_i^{\mathrm{p}}, & \boldsymbol{F}_i^{\mathrm{p}} < \boldsymbol{F}_i \\ \boldsymbol{x}_i, & \text{else} \end{cases} \tag{36}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{ij}^{\mathrm{p2}}$ 为更新后的位置，β 为 [0,1] 内随机数，R 为 [1,2] 内随机整数值，t 为当前迭代次数，T 为最大迭代次数，$\boldsymbol{F}_i^{\mathrm{p}}$ 为 $\boldsymbol{x}_{ij}^{\mathrm{p2}}$ 的适应度值。

式(33)和式(36)中采用了贪婪法，即仅当更新后的位置具有更优适应度时才接受位置更新，否则保留原位置不变。该策略有助于在迭代过程中持续保持当前较优解，提升算法的局部搜索能力和收敛速度。

3.2 拉丁-鹈鹕算法(LPOA)

为了使 POA 在复杂问题求解中获得更优的寻优效果和更快的收敛速度，本文提出以下改进策略。

3.2.1 基于正弦-拉丁超立方采样的种群初始化

在智能算法的种群初始化阶段，传统初始化分布是随机数生成的序列，遵循均匀概率分布。但生成的序列存在较大偏差，导致在搜索空间内分布不均，产生局部聚集，无法有效覆盖搜索空间[12]。拉丁超立方采样(Latin hypercube sampling，LHS)的主要思想是通过分层将解空间划分为相等的子空间，并使用概率密度函数在每个分层中选择一个随机样本。将这个概念推广到任意维度，可以确保每个样本在包含其轴向超平面中是唯一的[13]。然而，基于 LHS 的初始化方法受到样本数量和解空间范围的限制。当种群中个体数量有限或解空间范围较大时，其性能受到较大影响，此时基于随机数的初始化方法更为有利[14]。因此，在 LHS 的基础上引入一定程度的随机性来避免初始化和迭代过程容易出现局部最优问题。为此，本文提出一种结合正弦函数与 LHS 的种群初始化方法，具体计算公式为

$$\boldsymbol{X}_i = \sin\left(\pi \times \left(\frac{1}{2} - \mathbf{ls}_i\right) \times p\right) \times (\boldsymbol{U}_j - \boldsymbol{L}_j) + \boldsymbol{L}_j \tag{37}$$

式中：$\boldsymbol{X}_i$ 为种群初始化后的第 i 个个体，$\mathbf{ls}_i$ 为对应的 LHS 序列，p 为随机数，取值范围为 [0,1]，用来控制初始化的随机性。

3.2.2 融合灰狼算法的猎物位置更新

鹈鹕算法将搜索空间内一个随机个体作为猎物对其进行捕食，随后根据该位置来更新其他个体位

置。虽然这种方法扩大了搜索空间并保证了算法的全局搜索能力，但也会导致收敛速度变慢。这是因为随机选择的猎物位置可能与全局最优解相差甚远，从而使算法在搜索过程中需要耗费更多迭代次数和计算资源，才能逐步逼近最优解。因此，为了在保证算法全局搜索能力的基础上提高其收敛速度，本文设计了一种融合灰狼算法的猎物位置更新策略。具体而言，选取适应度值最优的 3 个鹈鹕个体，从高到低依次为 α、β、δ 鹈鹕。这 3 个鹈鹕个体在种群中扮演着领导者角色，其位置信息代表当前搜索过程中的优质解。此外，为了在引入优质个体信息的同时，保留一定的随机性以维持算法的探索能力，另外选取一个随机鹈鹕个体作为 ω 鹈鹕。计算 ω 鹈鹕与 α、β、δ 的 3 个鹈鹕的相对距离的平均值，并将该平均距离值作为新的猎物位置。这一策略不仅充分利用了种群中优秀个体的信息，引导算法向更优区域搜索，还通过随机个体的引入避免了算法过早陷入局部最优，从而在全局搜索和局部开发之间取得了良好的平衡。具体数学模型如下[15]：

$$\begin{cases} D_\alpha = |\boldsymbol{C}_1 \cdot \boldsymbol{X}_\alpha - \boldsymbol{X}| \\ D_\beta = |\boldsymbol{C}_2 \cdot \boldsymbol{X}_\beta - \boldsymbol{X}| \\ D_\delta = |\boldsymbol{C}_3 \cdot \boldsymbol{X}_\delta - \boldsymbol{X}| \end{cases} \tag{38}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{X}_1 = \boldsymbol{X}_\alpha - \boldsymbol{A}_1 \cdot \boldsymbol{D}_\alpha \\ \boldsymbol{X}_2 = \boldsymbol{X}_\beta - \boldsymbol{A}_2 \cdot \boldsymbol{D}_\beta \\ \boldsymbol{X}_3 = \boldsymbol{X}_\delta - \boldsymbol{A}_3 \cdot \boldsymbol{D}_\delta \end{cases} \tag{39}$$

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{F}} = \frac{\boldsymbol{X}_1 + \boldsymbol{X}_2 + \boldsymbol{X}_3}{3} \tag{40}$$

式中：$\boldsymbol{D}_\alpha$、$\boldsymbol{D}_\beta$ 和 $\boldsymbol{D}_\delta$ 为 ω 鹈鹕到 α、β 和 δ 鹈鹕间的相对距离；$\boldsymbol{X}_1$、$\boldsymbol{X}_2$ 和 $\boldsymbol{X}_3$ 分别对应 α、β 和 δ 鹈鹕位置；$\boldsymbol{X}$ 为 ω 鹈鹕的位置；$\boldsymbol{C}_1$，$\boldsymbol{C}_2$，$\boldsymbol{C}_3$ 为随机扰动系数向量；$\boldsymbol{A}_1$，$\boldsymbol{A}_2$，$\boldsymbol{A}_3$ 为系数向量；$\boldsymbol{X}_{\mathrm{F}}$ 为更新后的猎物位置。

3.2.3　动态随机搜索策略

动态随机搜索技术[16]是一种新颖的随机搜索方法，在自适应随机搜索技术的基础上赋予其局部搜索能力，具体分为全局搜索阶段和局部搜索阶段，将全局搜索过程中的最优值作为局部搜索的初始值[17]。该技术可以增强 POA 算法的局部搜索能力，目的是通过较小的步长搜寻在当前最优值周围解空间中是否存在适应度更优的点。具体伪代码如下。

Algorithm: Dynamic random search technique

1: Initialize number of maximum iteration (N), the step size α_0, maximum epochs E, current solution $x_c = x_\alpha$, epoch = 0, j = 0, function $F(x)$, best value F_{best}, current value F_c

2: Reset internal counter m = 0

3: Produce a random vector x_v in$[-\alpha_j, \alpha_j]$

4: epoch = epoch + 1

5: new value $F_{new} = F(x_c + x_v)$

6: **if** $F_{new} < F_{best}$ **then**

7: $x_\alpha = x_c + x_v$, $F_{best} = F_{new}$, $m = m + 1$. Go to step 19.

8: **end if**

9: **if** $F_{new} < F_c$ **then**

10: $x_c = x_c + x_v$, $F_c = F_{new}$, $m = m + 1$. Go to step 19.

11: **end if**

12: $F_{new} = F(x_c - x_v)$

13: **if** $F_{new} < F_{best}$ **then**

14: $x_\alpha = x_c + x_v$, $F_{best} = F_{new}$, $m = m + 1$. Go to step 19.

15: **end if**

16: **if** $F_{new} < F_c$ **then**

17: $x_c = x_c + x_v$, $F_c = F_{new}$, $m = m + 1$. Go to step 19.

18: **end if**

19: If $m < N$, then go to step 3.

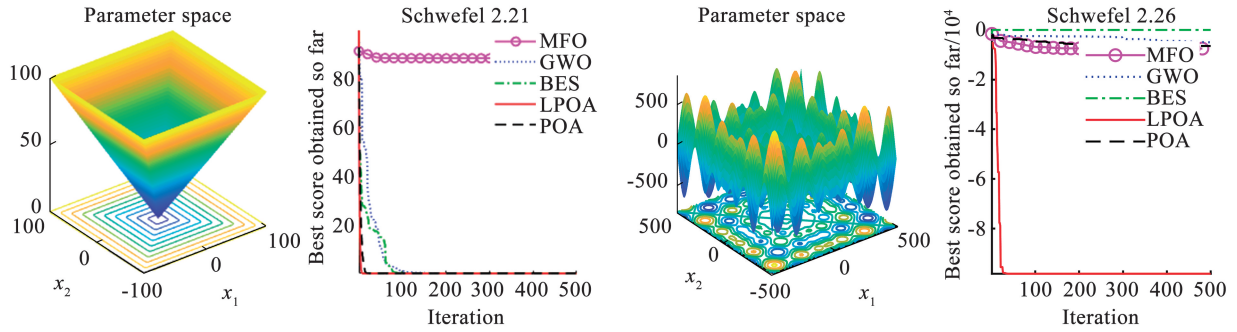
20: $j = j + 1$, $\alpha_j = \alpha_{j-1} \times 0.5$

21: If epoch = E, then quit. Otherwise, go to step 2.

3.3　优化策略的测试

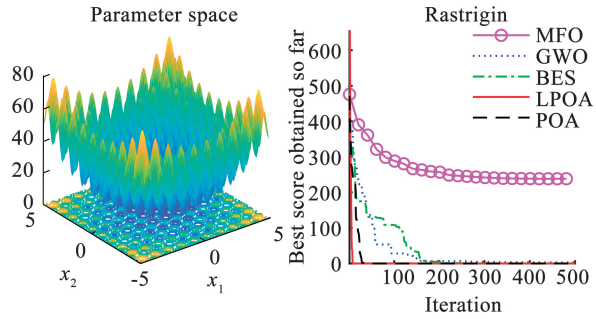
为了系统且全面地评估提出的改进策略在多模态优化问题中的寻优性能优势，将 LPOA 与现有的 POA、MFO、GWO 和 BES 算法在具有典型特征的基准测试函数上进行综合对比分析，测试函数涵盖了单峰函数、多峰函数和复合测试函数。其中，单峰函数用于评估算法在简单、平滑搜索空间中的收敛速度和精度；多峰函数用于测试算法在复杂、多极值点环境中的全局搜索能力和跳出局部最优的能力；复合测试函数则综合了单峰和多峰函数的特点，用于考察算法在更接近实际复杂问题中的综合性能。测试结果如图 4 所示。

在对基准测试函数的寻优过程中，图 4 中的收敛曲线清晰地表明，LPOA 相较于其他对比算法全局寻优能力和收敛速度方面具有明显优势。在针对单峰函数(图 4(a))的测试中，MFO 过早地陷入了局部陷阱，相比之下，LPOA 展现了更为迅速且稳定的收敛特性，能够在较短的时间内准确地找到全局最优解。在多峰函数(图 4(b))的测试中，测试函数的复杂性显著提高，存在多个局部最优解，BES 和 GWO 在该多峰问题的求解过程中，由于局部搜索的局限性，容易停留在某一局部最优解，未能充分探索整个解空间。与之相反，LPOA 凭借其改进策略，在多模态优化问题中展现出强大的全局探索能力，能够有效避免陷入局部极值，并且在落入局部最优解时能够迅速跳出，进而向全局最优解收敛。通过对多个测试函数的实验分析，本文验证了改进策略在提升 POA 性能方面的显著效果。

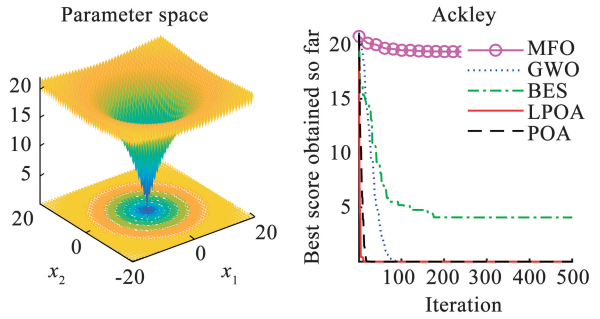


(a) Schwefel 2.21函数

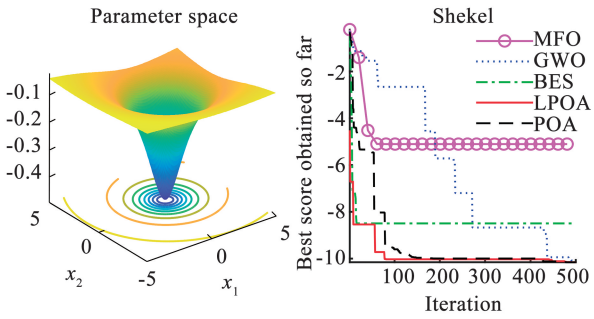
(b) Schwefel 2.26函数



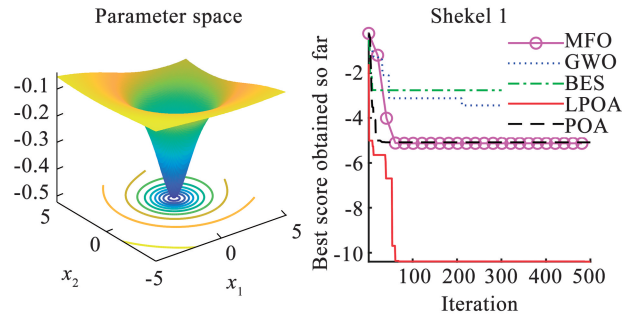
(c) Rastrigin函数



(d) Ackley函数



(e) Shekel函数



(f) Shekel 1函数

图 4　测试函数曲线

Fig. 4　Test function curve

为了验证改进后的 LPOA 算法是否会因为加入多种机制导致额外的计算负载,影响算法实时性能,本文在相同参数设置下(种群规模为 50,最大迭代次数为 500)分别采用 POA 与 LPOA 在典型测试函数上进行性能对比。设置统一的收敛阈值,记录算法达到该阈值所需的迭代次数及累计计算时间。实验结果见表 1。

由表 1 结果可以看出,LPOA 算法在各测试函数上迭代次数的收敛速度均显著优于 POA 算法。尽管 LPOA 在每次迭代中融入了多种机制,但整体计算时间与 POA 相比仍有所提升,说明 LPOA 在提升全局寻优性能的同时,其计算负载的增加不会对系统带来实时性风险。

表 1　收敛结果

Tab. 1　Convergence results

函数名称	收敛阈值	算法	迭代次数	计算时间/s
Schwefel 2.21	1×10^{-50}	POA	476	1.418
		LPOA	192	1.213
Schwefel 2.26	−8 500	POA	433	1.138
		LPOA	3	0.796
Rastrigin	1×10^{-100}	POA	109	0.882
		LPOA	24	0.773
Ackley	1×10^{-13}	POA	120	0.873
		LPOA	52	0.874
Shekel	−10	POA	167	0.893
		LPOA	43	0.918
Shekel 1	−10.4	POA	479	1.372
		LPOA	126	1.028

4　LPOA 优化的 MPC 控制器设计

4.1　LPOA 优化的 MPC 控制器参数整定过程

LPOA 优化车辆横、纵协同 MPC 轨迹跟踪控制器的参数整定流程，如图 5 所示。

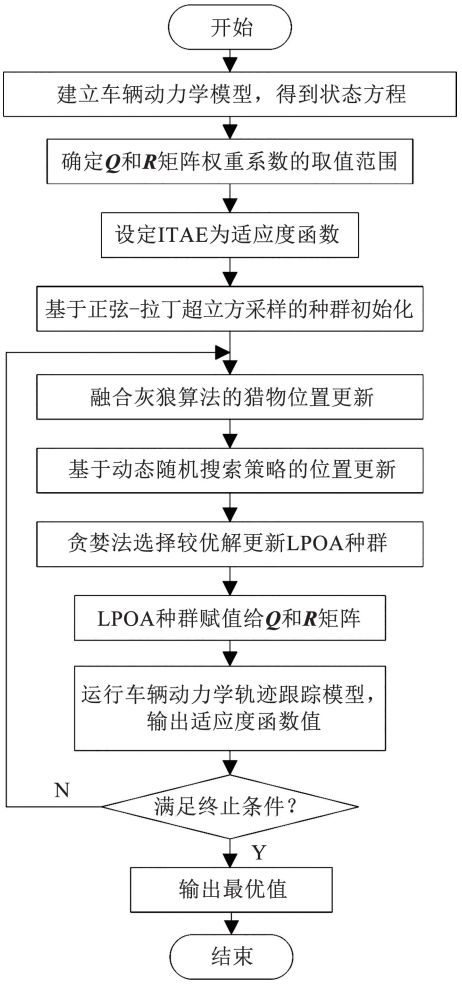


图 5　LPOA-MPC 参数整定过程

Fig. 5　Parameter tuning process of LPOA-MPC

4.2　LPOA 优化横纵向 MPC

利用 LPOA 优化横向 MPC 的控制器结构如图 6 所示。

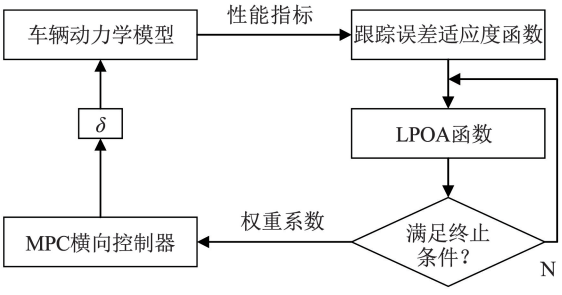


图 6　横向控制器结构

Fig. 6　Lateral controller structure

横向误差和航向角误差是评估车辆轨迹跟踪精度的关键性能指标。因此，为确保优化结果的准确性和稳定性，对横向误差和航向角误差进行归一化处理，归一化的目的是消除不同量纲对权重分配的影响，从而避免在控制器优化过程中出现不平衡现象。同时，为了综合考虑两个误差量的影响，通过加权组合将两个误差量整合成一个综合评价指标，具体如下：

$$\begin{cases} \varphi_e = \dfrac{\varphi - \varphi_{ref} - \varphi_{e_min}}{\varphi_{e_max} - \varphi_{e_min}} \\ y_e = \dfrac{y - y_{ref} - y_{e_min}}{y_{e_max} - y_{e_min}} \end{cases} \tag{41}$$

$$e = k y_e + (1-k)\varphi_e \tag{42}$$

式中：φ_e 为归一化后的航向角误差，φ 为当前航向角，φ_{ref} 为目标航向角，φ_{e_max}、φ_{e_min} 分别为航向角误差的最大值和最小值，y_e 为归一化后的横向误差，y 为当前横向位置，y_{ref} 为目标横向位置，y_{e_max}、y_{e_min} 分别为横向误差的最大值和最小值，e 为综合跟踪误差，k 为加权调整系数。

ITAE 是一种用于评价控制系统性能的指标，结合了误差的大小和持续时间，尤其关注误差长时间存在时的影响。ITAE 指标在系统性能优化中具有显著优势，其核心在于对持续时间较长的误差赋予更高权重，从而有效地缩短系统误差存在的时间，并提升系统响应速度。在控制系统优化时，将 ITAE 指标作为目标函数，用于指导控制器的设计或调节，既可使控制系统快速响应，又能减少系统的长期误差。其具体数学表达式为

$$E_{ITA} = \int |e| \cdot t \mathrm{d}t \tag{43}$$

式中 t 为仿真时间。

4.3　LPOA 优化纵向 MPC

利用 LPOA 优化纵向 MPC 的控制器结构如图 7 所示。

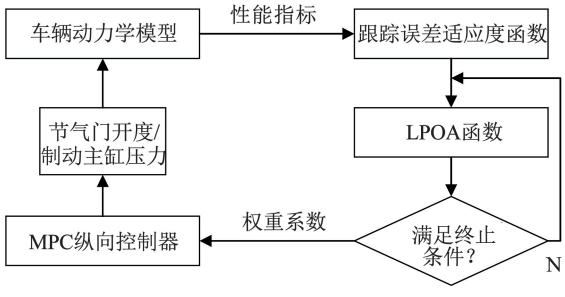


图 7　纵向控制器结构

Fig. 7　Longitudinal controller structure

在 LPOA 优化纵向 MPC 控制器控制系统中，本文同样采用了式(43)所示的基于纵向速度误差的 ITAE 指标作为纵向跟踪误差适应度函数。通过 ITAE 指标对速度误差在时间维度上的加权，实现对

系统长期误差的有效抑制。

在此基础上,本文进一步将优化后的横向控制器与纵向控制器进行集成。该联合控制结构通过实现横向控制器与纵向控制器的协同优化,有效提升了车辆在复杂路径工况下的全局轨迹跟踪精度及运行稳定性。横、纵联合轨迹跟踪控制流程如图 8 所示。

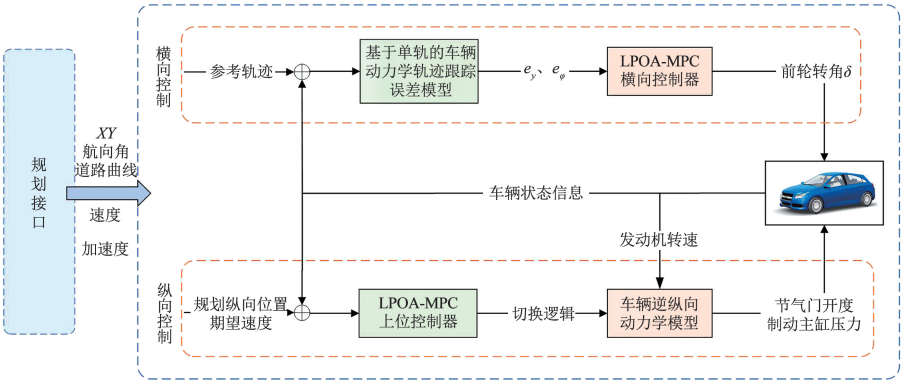


图 8 横、纵联合轨迹跟踪控制流程

Fig. 8 Combined horizontal and longitudinal trajectory tracking control

5 仿真结果分析

5.1 仿真车辆与控制器参数

为确保 MPC 控制器在物理可行性与安全性下运行,本文对控制量设定如表 2 所示约束(v_{max} 为式(48)最大安全速度),仿真车辆参数见表 3。

MPC 控制器的控制性能主要受预测时域 N_p、控制时域 N_c、权重矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$ 的影响。为评估本文提出的 LPOA-MPC 控制器的优化效果,在仿真实验中,优化前后的控制器预测时域 N_p、控制时域 N_c 保持一致。横向控制器选取 $N_p=20$,$N_c=8$;横向控制器优化前的 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 矩阵为 $\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}(10,10)$、$\boldsymbol{R}=1$;横向控制器优化后的 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 矩阵为 $\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}(80.899\,9,47.030\,2)$、$\boldsymbol{R}=2.328\,6$;其中,$\boldsymbol{Q}_{11}$ 为横向误差权重,$\boldsymbol{Q}_{22}$ 为航向角误差权重。纵向控制器选取 $N_p=25$,$N_c=10$;纵向控制器优化前的 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 矩阵为 $\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}(100,100)$、$\boldsymbol{R}=1$;纵向控制器优化后的 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$ 矩阵为 $\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}(68.377\,9,22.803\,0)$、$\boldsymbol{R}=4.194\,0$;其中,$\boldsymbol{Q}_{11}$ 为速度误差权重,$\boldsymbol{Q}_{22}$ 为加速度误差权重。

表 2 控制量约束

Tab. 2 Control variables constraints

前轮转角 δ/(°)	前轮转角增量 $\Delta\delta$/(°)	质心侧偏角 β/(°)	加速度/($m\cdot s^{-2}$)	安全速度 v_{safe}/($m\cdot s^{-1}$)	速度/($m\cdot s^{-1}$)
−10 ~ 10	−0.47 ~ 0.47	−12 ~ 12	−5 ~ 5	$\min(30,v_{max})$	0 ~ v_{safe}

表 3 车辆模型参数

Tab. 3 Vehicle model parameters

车辆质量 m/kg	质心至前轴距离 a/m	质心至后轴距离 b/m	绕 z 轴转动惯量 I_z/($kg\cdot m^2$)	车辆质心高度 H/m	轮胎纵向刚度 C_l/($N\cdot rad^{-1}$)	轮胎侧偏刚度 C_c/($N\cdot rad^{-1}$)
1 723	1.232	1.468	4 175	0.54	65 800	61 520

5.2 横向控制模型仿真测试

为了验证 LPOA-MPC 车辆横向轨迹跟踪控制器的有效性和可行性,搭建基于 MATLAB/Simulink 与 CarSim 的联合仿真环境,选取双移线工况作为参考轨迹进行仿真验证。轨迹方程如下:

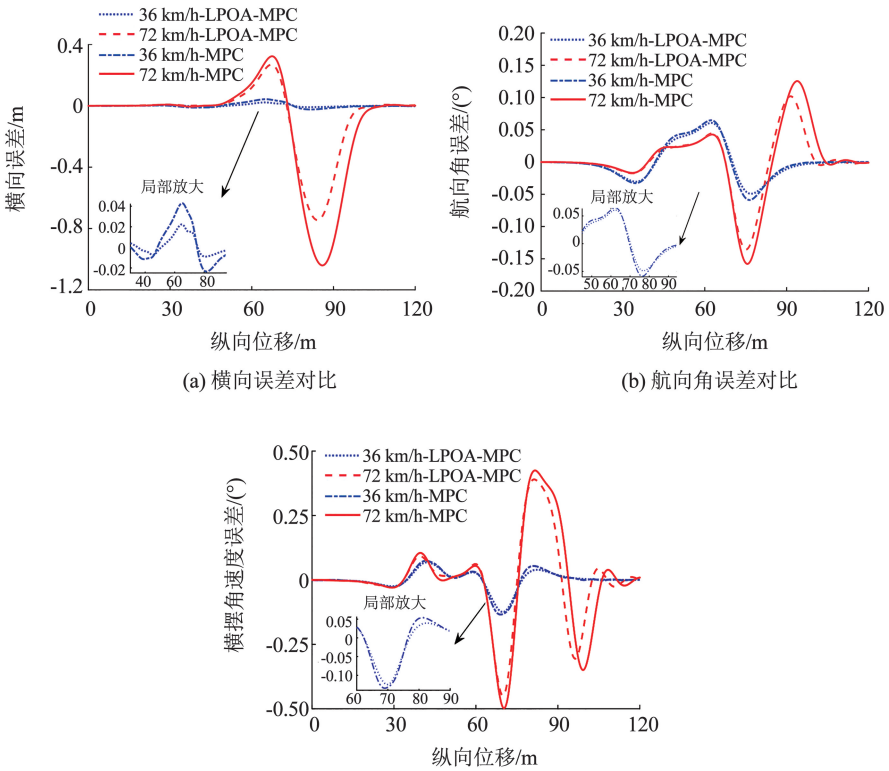
$$Y(X)=\frac{d_{y1}}{2}(1+\tanh(z_1))-\frac{d_{y2}}{2}(1+\tanh(z_2)) \tag{44}$$

式中:$z_1=2.4(X-27.19)/25-1.2$,$d_{y1}=25$,$d_{y2}=5.7$,$z_2=2.4(X-56.46)/21.95-1.2$。

本节中仅考虑横向控制,设定车辆的纵向速度匀速不变,为全面评估所设计横向控制算法的跟踪性能与动态响应能力,本文在双移线工况下分别选取 36、72 km/h 作为仿真测试速度,分别代表低速与中高速工况。其中,前者用于评估路径跟踪精度,后者用于验证系统在高速动态条件下的控制稳定性和动态响应能力,具有良好的代表性,仿真结果如图 9 所示。

在 36、72 km/h 两种速度工况下,对 MPC 和 LPOA-MPC 在横向轨迹跟踪控制性能方面进行对比分析。由图 9(a)横向误差曲线可以看出,LPOA-

MPC 在两种速度工况下的横向误差的波动幅度均明显小于 MPC。在 36 和 72 km/h 工况下，LPOA-MPC 相比 MPC 的最大误差幅值分别降低了 48.0% 和 30.2%，这说明 LPOA-MPC 控制器能够有效提升控制器的横向轨迹跟踪精度。由图 9(b)航向角误差可以看出，LPOA-MPC 的偏差变化更加平稳，峰值误差较 MPC 更小，说明其在对目标方向的跟踪时稳定性更高。从图 9(c)中的横摆角速度误差中可知，LPOA-MPC 控制器能够有效抑制车辆的横摆变化，提升车辆行驶中的平稳性和驾乘体验。



(a) 横向误差对比　　(b) 航向角误差对比

(c) 横摆角速度误差对比

图 9　横向参数对比

Fig. 9　Horizontal parameter comparison

综上所述，本文提出的 LPOA-MPC 控制器不仅能够有效减少车辆偏离期望轨迹的横向误差和偏航角误差，还能够降低横摆角的剧烈波动，从而提升驾驶舒适性和安全性，更可适应复杂的动态环境，为车辆的横向轨迹跟踪控制提供更优的解决方案。

5.3　纵向控制模型仿真测试

为了测试纵向 MPC 控制器在复杂车速变化场景下的纵向轨迹跟踪性能，采用 Zx28 分段线性速度轨迹[18]作为基准测试工况(图 10)。Zx28 速度轨迹曲线包含多种不同突变加速度的动态特征(1.5、1.0、0.5、0、−1.0、−2.0、−3.0 m/s^2)，可以系统地评估控制器在非连续加速度激励下的动态响应特性。

为定量比较控制器的跟踪性能，采用平均绝对误差(mean absolute error，MAE)和均方根误差(root mean square error，RMSE)作为评价指标，其定义如下：

$$A = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} | e_i | \tag{45}$$

$$R = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} e_i^2} \tag{46}$$

式中：A 为平均绝对误差，R 为均方根误差，M 为总采样点数，i 为采样时刻，e_i 为第 i 个采样时刻的误差。

在 Zx28 速度曲线工况下，针对 LPOA 优化前后的 MPC 控制器的纵向控制性能进行对比分析，其仿真结果如图 11 所示。

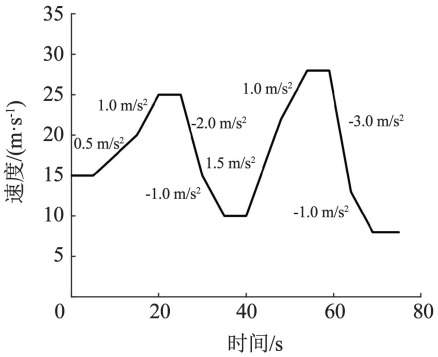
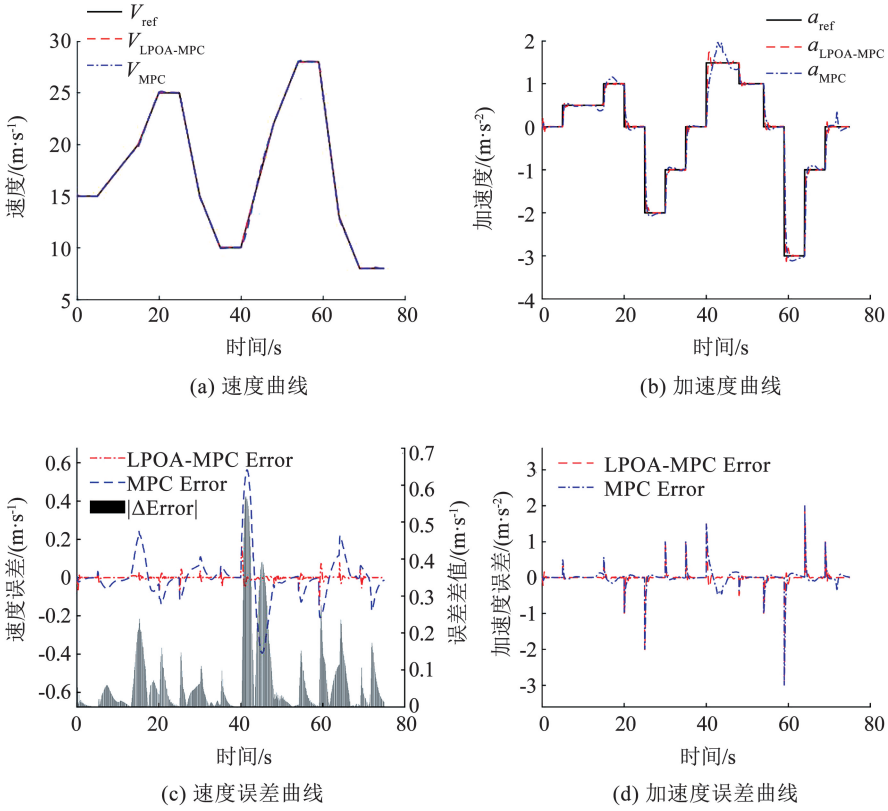


图 10　参考速度轨迹

Fig. 10　Reference speed trajectory

图 11 中：V_{ref} 为 Zx28 分段速度轨迹曲线，$V_{LPOA\text{-}MPC}$ 为 LPOA-MPC 控制器速度曲线，V_{MPC} 为 MPC 控制器速度曲线，a_{ref} 为 Zx28 分段加速度轨迹曲线，$a_{LPOA\text{-}MPC}$ 为 LPOA-MPC 控制器加速度曲线，a_{MPC} 为 MPC 控制器加速度曲线，LPOA-MPC Error 为 LPOA-MPC 控制器速度误差曲线，MPC Error 为 MPC 控制器速度误差曲线。

为了进一步对控制效果进行定量化评价，本文采用式(45)的 MAE 与式(46)的 RMSE 作为速度跟踪性能评价指标，并据此得到表 4 所示的量化数据。



(a) 速度曲线　(b) 加速度曲线

(c) 速度误差曲线　(d) 加速度误差曲线

图 11　纵向参数对比

Fig. 11　Longitudinal parameter comparison

表 4　速度跟踪性能对比

Tab. 4　Comparison of speed tracking performance

控制器	速度(m·s⁻¹)		加速度(m·s⁻²)		位移/m	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
MPC	0.563	0.128	2.997	0.253	1.438	0.343
LPOA-MPC	0.169	0.017	0.169	0.017	0.010	0.061

由图 11(a)和(b)可以看出，尽管 LPOA 优化前后的 MPC 纵向控制器在纵向速度跟踪过程中均表现出良好的跟踪性能，但总体上 LPOA-MPC 纵向控制器在控制过程中跟踪精度更高，展现了更优的控制性能。由图 11(c)可以看出，LPOA-MPC 相比 MPC 纵向控制器速度误差曲线波动幅值明显减小，整体更加紧密地围绕在零误差基准线附近，说明其与参考速度轨迹更加吻合，可以有效减少速度累计误差。图 11(d)结果显示，LPOA-MPC 纵向控制器在对加速度的跟踪过程中更加平稳、精确，并且在加速度频繁突变的情况下，能够更迅速、准确地做出响应，从而提升系统的动态响应性能和稳定性。表 4 的数据也清晰地反映出 LPOA-MPC 相比 MPC 纵向控制器控制性能的显著提升。

综上说明，LPOA-MPC 相比 MPC 纵向控制器在对复杂速度曲线跟踪过程中，其跟踪精度、稳定性以及动态响应能力等方面均具有显著提升。

5.4　横纵联合控制模型仿真测试

为了验证提出的基于 LPOA-MPC 横纵联合协同优化轨迹跟踪控制器的控制性能及通用性，本文选取国家标准 GB/T 6323—2014《汽车操纵稳定性试验方法》中规定的蛇形工况作为参考轨迹。该工况作为一种典型的动态操纵稳定性测试场景，能够有效评估车辆在连续变道过程中的横向稳定性、转向响应特性以及横纵向动力学耦合效应。通过“S”形路径模拟车辆在紧急避障或高速变道等复杂驾驶场景中的运动行为，具有较高的工程和学术研究价值。具体轨迹方程如下：

$$Y_{\text{ref}}=\begin{cases}0, & X\leqslant 20\\ 0.625\left(1+\sin\left(\dfrac{\pi}{40}(X+40)\right)\right), & 20<X\leqslant 60\\ 1.25\cos\left(\dfrac{\pi}{30}X\right), & 60<X\leqslant 240\\ 0.625\left(1+\cos\left(\dfrac{\pi}{40}X\right)\right), & 240<X\leqslant 280\\ 0, & 280<X\end{cases} \tag{47}$$

车辆在弯道行驶时，车辆最大安全车速 $v_{\max}$ 受到道路工况限制，当离心力与路面摩擦力平衡时，可以得到基于侧滑的最大安全车速为：

$$v_{\max}=\sqrt{\frac{g\mu}{r_o}} \tag{48}$$

式中：μ 为路面附着系数，r_o 为道路曲率。

基于式(48)所确定的基于侧滑条件的最大安全车速，本文设计车辆的初始参考速度为 15 m/s，即车辆以 15 m/s 的初始速度匀速行驶，随后通过匀减速将速度降低至 10 m/s，并在该速度下保持匀速行驶以通过连续弯道，最后通过匀加速将速度恢复至 15 m/s，完成整个蛇形工况的轨迹跟踪。车辆在跟踪蛇形轨迹工况过程中的横、纵向位置信息如图 12 所示。图 12 中：$V_{\text{reference}}$ 为参考速度轨迹曲线，$V_{\text{LPOA-MPC}}$ 为 LPOA-MPC 控制器速度曲线，V_{MPC} 为 MPC 控制器速度曲线，LPOA-MPC Error 为 LPOA-MPC 控制器速度误差曲线，MPC Error 为 MPC 控制器速度误差曲线。

由图 12(a)和(b)可以看出，LPOA 优化前后的 MPC 横、纵联合轨迹跟踪控制器均能够在变速度条件下实现对蛇形工况的有效跟踪。但相比之下，LPOA-MPC 的轨迹曲线与参考轨迹的贴合度更高，尤其在连续弯道过渡阶段，其横向误差幅值被有效抑制在 ±0.03 m 以内，且未出现明显的滞后或超调现象。图 12(c)与(d)结果显示，与 MPC 控制器相比，LPOA-MPC 的航向角误差和横摆角速度误差的振荡幅值均有明显降低，说明优化后的控制器能够更快适应路面曲率变化，在保证跟踪精度的前提下，显著提升了横摆动力学的稳定性。由图 12(e)与(f)可以看出，LPOA-MPC 控制器在匀减速与匀加速阶段的过渡更为平滑，尤其在当速度由 10 m/s 恢复至 15 m/s 时，LPOA-MPC 控制器误差收敛时间显著缩小，说明优化后的 MPC 控制器在速度变化时，能够快速进行控制响应，此外，误差插值的定量对比显示，LPOA-MPC 的速度最大误差降低了 39.1%。

综上说明，LPOA-MPC 控制器在变速度下跟踪蛇形轨迹时，表现出更强的横向控制精度和纵向速度协调能力。LPOA-MPC 控制器在提升车辆轨迹跟踪精度、改善操纵稳定性以及降低横纵向耦合干扰等方面均具有显著优势。

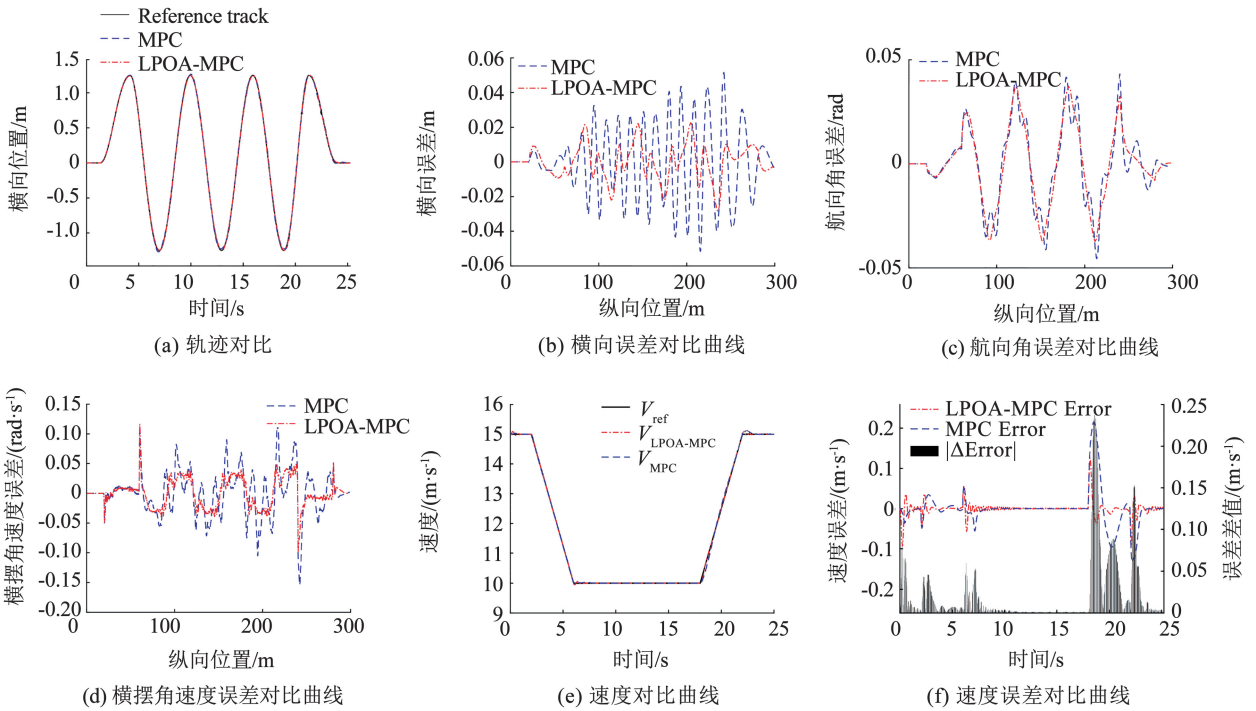


图 12　横、纵联合参数对比

Fig. 12　Comparison of lateral and longitudinal joint parameters

6 结 语

本文基于车辆动力学模型,提出了一种融合多种机制的 LPOA 算法,用于优化横、纵向 MPC 控制器的权重参数。针对 POA 在解空间内搜索效率低下的问题,融入多种机制以增强其寻优能力和收敛速度。在基准测试函数中,LPOA 相较于 MFO、BES、GWO 等算法展现出更快的收敛速度与更强的全局优化能力,尤其在复杂多峰函数上有效避免了陷入局部最优的问题。同时,分别在双移线、复杂速度曲线以及蛇形工况下,测试验证 LPOA-MPC 横向、纵向以及横纵联合控制器的性能。仿真结果表明,LPOA-MPC 控制器在变速度条件下能够实现车辆对参考轨迹的精准跟踪,并可有效提升车辆行驶过程中的稳定性和动态响应能力,具有一定的实用性。

参考文献

[1] YUAN Tengfei, ZHAO Rongchen. LQR-MPC based trajectory tracking controller of autonomous vehicle subject to coupling effects and driving state uncertainties[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5556. DOI:10.3390/s22155556

[2] LI Sihang, ZHANG Jinhui, GU Shaomeng. Discrete time trajectory tracking control for four-mecanum-wheeled mobile vehicle: An variable gain ADRC method[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024(9): 7771. DOI:10.1109/LRA.2024.3432354

[3] LI Zhuo, GUO Yunlong, WANG Gang, et al. Level curve tracking via robust RL-guided model predictive control[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(12): 2512. DOI:10.1109/JAS.2024.124350

[4] 蒋凌云, 魏庆来, 张峰华, 等. 基于改进粒子群优化算法的 PID 控制器参数整定[J]. 控制工程, 2024, 31(3): 470
JIANG Lingyun, WEI Qinglai, ZHANG Fenghua, et al. PID controller parameter tuning based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(3): 470. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20210776

[5] ZHOU Bin, WANG Yuhang, ZI Bin, et al. Fuzzy adaptive whale optimization control algorithm for trajectory tracking of a cable-driven parallel robot[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 21(4): 5149. DOI: 10.1109/TASE.2023.3309049

[6] LI Haoran, LU Yunpeng, LI Yaqiu, et al. Optimization of model predictive control for autonomous vehicles through learning-based weight adjustment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024(8): 1. DOI:10.1109/TITS.2024.3445598

[7] 李晓龙, 黄鹤, 杨澜, 等. 多策略鹈鹕算法优化的车辆轨迹跟踪 MPC 控制器[J/OL]. (2024-11-13)[2025-01-08]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.316
LI Xiaolong, HUANG He, YANG Lan, et al. Multi-strategy pelican algorithm optimized MPC controller for vehicle trajectory tracking[J/OL]. (2024-11-13)[2025-01-08]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.316

[8] TROJOVSKÝ P, DEHGHANI M. Pelican optimization algorithm: A novel nature-inspired algorithm for engineering applications[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2022, 22(3): 885. DOI: 10.3390/s22030855

[9] RAJ A, PUNIA P, KUMAR P. A novel hybrid pelican-particle swarm optimization algorithm (HPPSO) for global optimization problem[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2024, 15(8): 3878. DOI: 10.1007/s13198-024-02386-9

[10] CHEN Shuping, XIONG Guangming, CHEN Huiuan, et al. MPC-based path tracking with PID speed control for high-speed autonomous vehicles considering time-optimal travel[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(12): 3702. DOI: 10.1007/s11771-020-4561-1

[11] JIN Long, LIU Longqi, WANG Xingxia, et al. Physical-informed neural network for MPC-based trajectory tracking of vehicles with noise considered[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(3): 4493. DOI: 10.1109/TIV.2024.3358229

[12] AGUSHAKA J O, EZUGWU A E. Initialisation approaches for population-based metaheuristic algorithms: A comprehensive review[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 896. DOI: 10.3390/app12020896

[13] MOUSAVIRAD S J, BIDGOLI A A, RAHNAMAYAN S, et al. Tackling deceptive optimization problems using opposition-based DE with center-based latin hypercube initialization[C]// 14th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE). Toronto, Canada: IEEE, 2019: 394. DOI: 10.1109/iccse.2019.8845360

[14] WANG Zhen, ZHAO Dong, HEIDARI A A, et al. Improved latin hypercube sampling initialization-based whale optimization algorithm for COVID-19 X-ray multi-threshold image segmentation[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 13239. DOI: 10.1038/s41598-024-63739-9

[15] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007

[16] HAMZACEBI C, KUTAY F. Continuous functions minimization by dynamic random search technique[J]. Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(10): 2189. DOI:10.1016/j.apm.2006.08.015

[17] DENG Lingyun, LIU Sanyang. A multi-strategy improved slime mould algorithm for global optimization and engineering design problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2023, 404: 115764. DOI: 10.1016/j.cma.2022.115764

[18] 朱敏. 智能车辆纵向速度跟踪与控制方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016
ZHU Min. Longitudinal speed tracking and control method for intelligent vehicles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016

(编辑 吕雪梅)

DOI:10.11918/202507052

融合改进 SAC-IA 与加权 ICP 的高效点云配准方法

殷 果[1,2],王大庆[2],孙玉香[2,3],高理富[2,3]

(1.安徽建筑大学 电子与信息工程学院,合肥 230061;2.中国科学院合肥物质科学研究院,合肥 230031;
3.中国科学技术大学 自动化系,合肥 230026)

摘 要: 为解决传统迭代最近点(iterative closest point,ICP)算法在处理巷道等大型结构化场景时,对初始位姿敏感且易因重复性几何结构陷入局部最优的问题,本文提出一种高效的两阶段点云配准框架。在粗配准阶段,通过改进采样一致性初始配准(sample consensus initial alignment,SAC-IA)算法的关键点采样策略,从下采样后的点云中快速获取全局最优初始位姿;精配准阶段设计了一种融合欧氏距离、法向量夹角与曲率信息的多维加权 ICP 算法,通过构建综合几何特征的优化目标函数,有效降低了巷道平直区域的误匹配率。在斯坦福公开数据集上对改进的粗配准与精配准算法分别进行了验证,结果表明:改进后的粗配准算法相比传统 SAC-IA,计算效率提升了 44.1%;基于几何特征的加权 ICP 算法相比传统 ICP,配准精度提高了 23.81%,耗时降低了 25.9%。在实测巷道点云的综合配准实验中,本文提出的配准框架整体表现显著优于传统方法,在整体精度与效率方面的提升均超过20%。与主流深度学习方法相比,该框架无需依赖高性能 GPU,仅使用 CPU 即可实现处理效率数倍的提升,并在真实巷道场景中取得了更鲁棒的配准效果。实验表明,该框架能够为大型结构化场景下的点云自动配准提供一种同时满足工业级实时性与轻量化要求的高效解决方案。

关键词: 点云配准;采样一致性初始配准;下采样;加权 ICP;几何特征;深度学习

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)05-0103-13

Efficient point cloud registration method integrating improved SAC-IA and weighted ICP

YIN Guo[1,2], WANG Daqing[2], SUN Yuxiang[2,3], GAO Lifu[2,3]

(1. Anhui Jianzhu University, School of Electronic and Information Engineering, Hefei 230061, China;
2. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
3. University of Science and Technology of China, Department of Automation, Hefei 230026, China)

Abstract: Traditional Iterative Closest Point (ICP) algorithms are susceptible to local optima and sensitive to initial pose when applied to large-scale structured scenes, such as underground tunnels, due to their repetitive geometric features. To address these challenges, this paper proposes an efficient two-stage point cloud registration framework. In the coarse registration stage, an improved Sample Consensus Initial Alignment (SAC-IA) algorithm with an enhanced keypoint sampling strategy is introduced to rapidly obtain a globally optimal initial pose from the downsampled point cloud. Subsequently, the fine registration stage employs a novel multi-dimensional weighted ICP algorithm. This algorithm integrates Euclidean distance, normal vector angles, and curvature information into a comprehensive geometric objective function, effectively reducing the mismatch rate in the planar regions of tunnels. The proposed components were individually validated on the Stanford public dataset. Results show that the improved coarse registration algorithm increases computational efficiency by 44.1% over the conventional SAC-IA, while the geometry-based weighted ICP algorithm improves registration accuracy by 23.81% and reduces computation time by 25.9% compared to the traditional ICP. Comprehensive experiments on real-world tunnel point clouds demonstrate that the proposed framework significantly outperforms traditional methods, improving both overall accuracy and efficiency by over 20%. Furthermore, compared to mainstream deep learning methods, this framework obviates the need for high-performance GPUs. It achieves a several-fold increase in processing efficiency on a standard CPU and delivers more robust registration results in realistic tunnel scenarios. Ultimately, this framework provides a highly efficient solution for automatic point cloud registration in large-scale structured environments, fully satisfying industrial demands for real-time processing and lightweight implementation.

收稿日期: 2025-07-22;**录用日期:** 2025-09-12;**网络首发日期:** 2025-10-11
网络首发地址: https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20251010.1655.006
基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB4704600);中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJQY202305)
作者简介: 殷 果(2001—),男,硕士研究生;高理富(1970—),男,研究员,博士生导师
通信作者: 高理富,lifugao@iim.ac.cn

Keywords: point cloud registration; sample consensus initial alignment; downsampling; weighted ICP; geometric features; deep learning

随着三维激光雷达技术的发展,点云作为反映真实空间结构的重要数据形式,广泛应用于建筑建模、隧道测绘、采矿工程和机器人导航等领域。在矿井巷道环境中,由于采集视角受限、行人遮挡、光照反射及粉尘干扰等因素影响,常导致获取的点云数据局部不连续,从而给后续三维建模和空间分析带来困难[1]。为实现多视角点云的统一表示,点云配准作为关键技术,其精度与效率直接影响系统的整体性能。

目前,应用最广泛的点云配准方法是由 Besl 等[2]在 1992 年提出的 ICP 算法,该算法通过不断迭代最小化两组点云之间的欧氏距离,实现配准对齐。然而,传统 ICP 方法对初始姿态高度敏感,当点云之间初始位置偏差较大或缺乏显著特征时,极易陷入局部最优解,导致配准失败或效率低下[3]。为解决上述问题,许多学者提出基于“先粗后精”的两阶段点云配准方法,即先进行粗配准获取较好的初始位姿,再通过改进 ICP 算法精细对齐[4]。近年来,以 PointNetLK[5]、DGR(deep global registration)[6]为代表的方法将深度学习引入点云配准,通过构建端到端的神经网络,直接从原始数据中学习特征表示并预测两者间的空间变换关系,虽在部分公共数据集上表现优异,但此类方法依赖大规模标注数据训练和高性能 GPU 推理,限制了其在开槽机器人等需要轻量化部署的工业场景中的直接应用,且泛化能力不足。因此,本文聚焦无需训练、不依赖特定硬件的传统几何优化路径,通过对经典框架进行深度改进,实现高精度、实时鲁棒配准,为独特场景智能装备提供高效易部署解决方案。

在粗配准阶段,基于特征匹配的方法是当前研究的主流。该方法通常首先通过体素滤波[7]等方式对原始点云进行降采样,以降低数据冗余、提高运算效率。随后,从降采样[8]后的点云中提取具有代表性的关键点。在基于特征的点云配准研究中,关键点检测算子的选择至关重要。例如,刘翔宇等[9]与张平均等[10]分别基于 3DSIFT 算子构建了配准流程,用以改善配准效果,而景会成等[11]则采用了 3DHarris 算子提取关键点,并结合 FPFH 描述子来完成点云的初始对齐;魏永超等[12]通过融合内部形状描述子(intrinsic shape signatures,ISS)与边界点,提出了一种边界增强型关键点提取策略。在提取关键点后,需要计算其特征描述子来量化局部几何信息。其中,由 Rusu 等[13]提出的快速点特征直方图(fast point feature histograms,FPFH),因其对平移旋转的不变性和较高的描述性,成为应用最广泛的特征描述子之一[14]。赵云涛等[15]和赵辉友等[16]均基于改进的 FPFH 展开研究,利用随机采样一致性(RANSAC)[17]算法或其变体 SAC-IA,从 FPFH 等特征匹配对中剔除误匹配,鲁棒地估计出初始变换矩阵。此外,一些全局配准算法也为粗配准提供了有效途径,如 Aiger 等[18]提出的超广义四点一致性(4-points congruent sets,4PCS)算法,后续 Mellado 等[19]通过智能索引将其优化为 Super4PCS,提升了运行效率。

在精配准阶段,研究主要聚焦于对经典 ICP 算法的改进。为提升效率,沈晨等[20]验证了采用 KD-Tree 加速最近邻搜索的有效性。为提高精度和鲁棒性,学者们提出了多种 ICP 变体。例如,徐浩鸿等[21]将 GICP 与体素化思想结合,张前等[22]则通过改进 TrICP 算法来处理多源点云。近年来,大量研究尝试将几何信息融入 ICP 的迭代过程。Guan 等[23]和 Chen 等[24]的研究均表明,相较于传统的点到点距离度量,基于点到面的误差模型在配准精度上表现更优。赵夫群等[25]通过融合曲率、法向角度等多种几何特征来提取特征点,单馨平等[26]设计了基于法向量和 ISS 的双约束特征提取方法。上述研究表明,在特定应用场景中,几何特征的有效融合是提升配准鲁棒性和精度的关键因素。此外,一些学者从全局优化角度出发,引入智能优化策略以突破局部最优的限制。如 Liu 等[27]将基于马尔可夫链蒙特卡洛的模拟退火算法(Markov chain Monte Carlo-simulated annealing,MCMC-SA)引入 ICP,Lan 等[28]利用蜂群算法(bees algorithm)进行全局优化,以跳出局部最优。

尽管现有点云配准算法取得了一定进展,但在矿井巷道等大型结构化场景中仍面临挑战:特征重复性导致基于 FPFH 等方法的粗配准难以获得准确初始位姿;传统 ICP 及其变体在精配准阶段仅依赖最近邻距离,易在结构相似区域产生误匹配,降低配准精度。为此,本文提出一种结合 SAC-IA 与加权 ICP 的两阶段点云配准方法:首先采用“体素下采样 + 优化的 SAC-IA”实现粗配准,提供良好初始位姿;随后在精配准阶段提出一种融合几何特征的加权 ICP 算法,该算法不再使用单一的最小距离准则,而是通过构建一个结合欧氏距离、法向量夹角和曲率差异的加权成本函数综合评估匹配质量,从而提升匹配点对筛选的判别性,有效抑制误匹配,进而提高配准精度。

1 本文算法

本文提出一种融合改进 SAC-IA 与加权 ICP 的

高效点云配准方法，整体框架由粗配准与精配准两个阶段构成，算法流程如图 1 所示。源点云与目标点云经 SOR 滤波完成降噪预处理，粗配准阶段通过体素下采样与关键点提取，结合改进的 SAC-IA 算法实现初步对齐，精配准阶段基于法向量估计与几何特征构建，引入加权 ICP 算法进行配准优化，最终获得高精度配准结果。

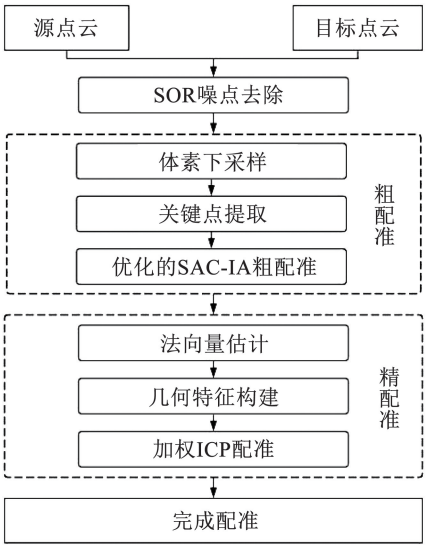


图 1　两阶段点云配准算法流程图

Fig. 1　Flowchart of the two-stage point cloud registration algorithm

2　点云粗配准

2.1　基于重心邻近点的体素下采样

高分辨率点云数据不仅包含宏观外形，还蕴含微观几何结构，因其密度大，需通过下采样降低计算与存储开销。相较于破坏结构的随机下采样，体素滤波更适用于保留整体形状与细节。传统体素滤波以体素内点的重心为代表，易丢失原始细节[29]，本文改用距离重心最近的原始点作为代表点，能够更准确保留局部结构，为后续配准与分割等任务提供更高质量的数据基础。具体改进步骤如下。

1）依据点云数据坐标集合，求取 X、Y、Z 三个坐标轴上的最大值$X_{\max}$、$Y_{\max}$、$Z_{\max}$和最小值$X_{\min}$、$Y_{\min}$、$Z_{\min}$。

2）根据 X、Y、Z 三个坐标轴上的最大、最小值，求得点云最小包围盒的边长l_x、l_y、l_z，即

$$\begin{cases} l_x = x_{\max} - x_{\min} \\ l_y = y_{\max} - y_{\min} \\ l_z = z_{\max} - z_{\min} \end{cases} \tag{1}$$

3）设置体素栅格的边长 r。

4）计算体素栅格尺寸，根据体素边长 r，计算各轴上的体素数量：

$$\begin{cases} D_x = \lfloor l_x / r \rfloor \\ D_y = \lfloor l_y / r \rfloor \\ D_z = \lfloor l_z / r \rfloor \end{cases} \tag{2}$$

式中$\lfloor i \rfloor$表示对 i 向下取整。

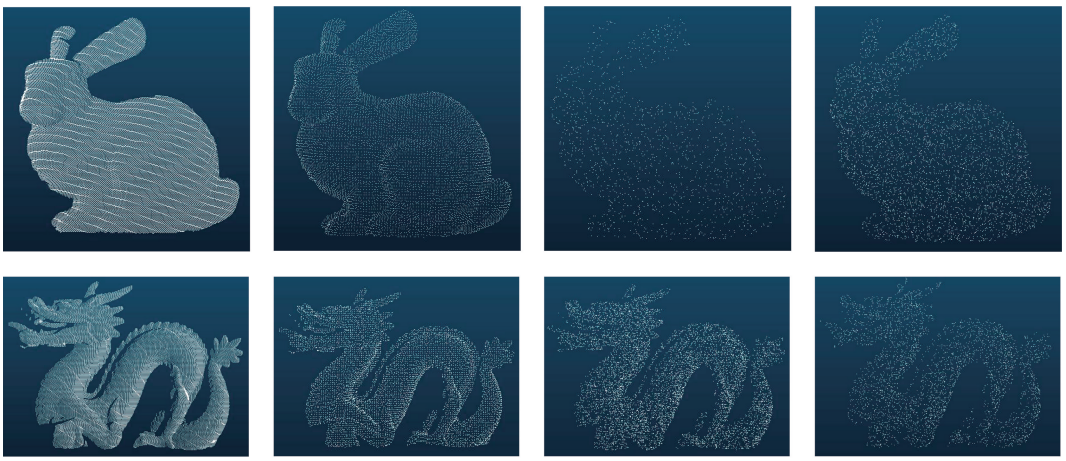
5）计算点云中每一个在体素小栅格内的索引 h，

$$\begin{cases} h_x = \lfloor (x - x_{\min}) / r \rfloor \\ h_y = \lfloor (y - y_{\min}) / r \rfloor \\ h_z = \lfloor (z - z_{\min}) / r \rfloor \\ h = h_x + h_y \times D_x + h_z \times D_x \times D_y \end{cases} \tag{3}$$

6）将 h 的元素按降序排序，计算每个体素的重心，并将体素内的所有点替换为重心。

7）找到距体素重心最近的点，并将其替换为体素的中心。

以斯坦福公开数据集（Bunny 和 Dragon）为例，对比了不同下采样方法的处理效果。图 2 中从左至右依次展示了原始点云、本文提出的改进体素滤波、均匀下采样及随机下采样的结果。由图 2 可以直观地看出，相较于传统方法，本文方法在有效降低点云密度的同时，实现了更优的分布均匀性，并更好地保留了模型的关键结构特征。



(a) 初始点云　(b) 本文算法　(c) 均匀下采样　(d) 随机下采样

图 2　斯坦福数据集下采样结果对比

Fig. 2　Comparison of downsampling results on the Stanford dataset

表 1 为不同下采样方法结果,可以看出,改进的体素滤波下采样后的点云数量更少,表明该方法在有效压缩数据的同时,能够更好地保留原始点云的关键结构特征,可为后续的点云配准工作提供更稳定可靠的数据基础。

表 1 不同下采样方法结果数据比较

Tab. 1 Comparison of results from different downsampling methods

Model	Original point cloud	Improved voxel filtering	Uniform sampling	Random downsampling
Bunny	40 256	7 813	8 192	8 051
Dragon	41 841	8 121	8 515	8 368

2.2 基于 SAC-IA 优化的粗配准算法

2.2.1 算法概述

SAC-IA 算法旨在为初始位姿差异较大的点云提供鲁棒的粗配准,以避免后续 ICP 陷入局部最优。该方法通过 FPFH 等特征建立初步对应关系,并采用 RANSAC 在可能存在大量误匹配的点对中反复采样,最终选取内点支持最多的变换作为全局最优的初始位姿。然而,其随机采样策略在处理低质量匹配集时效率低且稳定性不足。本文提出一种鲁棒且高效的改进 SAC-IA 框架,其核心创新在于引入一种基于局部几何一致性验证的“预排除”机制。该机制在 RANSAC 每次迭代中,首先对采样点的几何相容性进行快速判断,提前剔除不满足一致性要求的无效样本,以避免后续昂贵的变换矩阵计算和验证开销。同时,算法强制执行最小内点比例约束,以保证算法在点云数据不完整(如存在遮挡和缺失)的挑战性场景下,最终输出的变换模型仍具备高匹配质量和稳定性。该方法通过从源头提升采样质量,显著增强了 SAC-IA 在复杂场景下的配准精度、收敛速度和鲁棒性。

2.2.2 SAC-IA 算法优化流程

在形式上,点云配准的目标是估计变换$\widehat{\boldsymbol{T}}$,该变换最小化源点云 P 上的每个点 p 和目标点云 Q 中的对应点 q 之间的平方距离之和。

$$\widehat{\boldsymbol{T}} = \underset{\boldsymbol{T}}{\operatorname{argmin}}\, \varepsilon(\boldsymbol{T}) = \underset{\boldsymbol{T}}{\operatorname{argmin}} \sum_{p \in P} (\boldsymbol{T}p - q)^2 \quad (4)$$

为统一表示点的空间变换,上式采用齐次坐标形式。姿态估计通常采用 RANSAC 等鲁棒算法,通过特征对应关系反复执行随机采样、变换估计和一致性验证,有效提升配准精度并抑制异常值影响。其具体迭代步骤如下。

1)随机匹配采样点:根据 FPFH 特征,先在源点云 P 中随机选取 $n \geqslant 3$ 个点,并通过最近邻搜索确定其在目标点云 Q 中的对应点。

2)估计初始变换:利用选取的 n 个采样匹配,计算出一个初始的假设变换$\widehat{\boldsymbol{T}}$。

3)应用变换:将该初始变换应用于整个源点云 P。

4)内点筛选:通过欧氏距离阈值,在变换后的源点云 P 与目标点云 Q 之间进行最近邻搜索,筛选出满足匹配条件的内点集合;若内点数量不足,重新执行步骤 1)。

5)优化变换:使用新的内点对关系,重新估计更精确的假设变换$\widehat{\boldsymbol{T}}$。

6)更新最优结果:计算当前内点对应点之间的距离 $\varepsilon(\widehat{\boldsymbol{T}})$,若该距离达到最小值,则$\widehat{\boldsymbol{T}}$作为当前最优变换。重复上述过程,直至达到设定迭代次数或误差收敛。

2.2.3 粗配准实验

将 Bunny 源点云与目标点云经过基于重心邻近点的体素下采样处理后,采用改进的 SAC-IA 算法与传统的 SAC-IA、FPFH、PCA、4PCS 粗配准算法进行对比。

实验以点云配准均方根误差(RMSE)定量评估配准精度,均方根误差越小,说明配准精度越高,以算法耗时评估配准实时性。

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \| P_i - Q_i \|^2} \quad (5)$$

式中:P_i和Q_i分别为第 i 对点云和目标点云中的点,n 为 P 和 Q 重叠部分点的数量。

图 3 为 Bunny 在粗配准算法下的效果图,可以看出,除 PCA 粗配准失败外,其他算法虽均完成了配准,但不同程度地存在误差或瑕疵。相比之下,本文提出的配准方法在点云配准结果的几何一致性和结构连续性方面表现更为优异。Bunny 粗配准实验数据见表 2,可以看到,与原始方法相比,改进后的 SAC-IA 在配准时间上加快了 44.1%,配准精度也有所提升。整体来看,该方法在配准精度和计算效率方面均优于 FPFH、PCA 和 4PCS 等传统方法,在保障较高配准精度的同时有效提升了运算效率,实现了精度与效率之间的良好平衡。

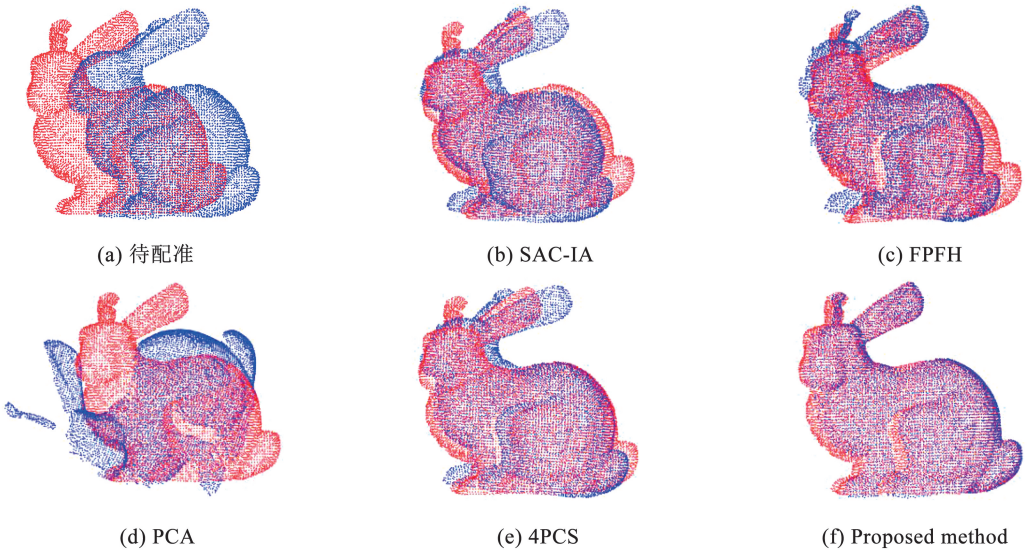


图 3　Bunny 在粗配准算法下效果图

Fig. 3　Registration results of Bunny under different coarse alignment algorithms

表 2　Bunny 粗配准实验数据

Tab. 2　Experimental data of coarse registration on the Bunny dataset

算法	RMSE/(10^{-6} m)	t/s
SAC-IA	6.2	0.762
FPFH	6.4	0.512
PCA	16.8	0.572
4PCS	13.9	0.536
Proposed method	5.4	0.426

3　点云精配准

3.1　几何特征提取

3.1.1　法向量

点云法向量用于描述点所在局部曲面的朝向，反映其几何结构特性，可辅助识别边缘、拐角等区域，并在结构复杂或遮挡场景中提升配准精度。常用的 PCA 法向量计算方法通过分析点的邻域分布，构建协方差矩阵并进行特征值分解，提取主方向信息，进而计算点间法向量夹角，为后续基于表面特征的精配准提供关键支持。

1）计算质心

对于点云 $P=\{p_1,p_2,\cdots,p_N\}$，每个点 $p_i=(x_i,y_i,z_i)$，质心 μ 的公式为

$$\mu=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}p_i=\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i,\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}y_i,\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}z_i\right) \tag{6}$$

2）中心化点云

将每个点减去质心，得到中心化点集 $P'=\{p'_1,p'_2,\cdots,p'_N\}$，其中

$$p'_i=p_i-\mu \tag{7}$$

3）构建协方差矩阵

对中心化后的点云数据 P'，计算协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$

$$\boldsymbol{C}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}p'_i(p'_i)^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

4）特征值分解

对协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$ 进行特征值分解，得到特征值 $\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3$（按降序排列：$\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\lambda_3$）和对应的特征向量 $\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2,\boldsymbol{v}_3$，其分别表示点云的主方向、次主方向和最小方向。

5）计算法向量夹角

法向量角度通常指点云主方向与某个参考方向的夹角，或多个主成分之间的角度。$\boldsymbol{v}_1$ 与参考向量 $\boldsymbol{r}$ 的夹角为

$$\begin{cases}\cos\theta=\dfrac{\boldsymbol{v}_1\cdot\boldsymbol{r}}{\|\boldsymbol{v}_1\|\ \|\boldsymbol{r}\|}\\ \theta=\arccos\left(\dfrac{\boldsymbol{v}_1\cdot\boldsymbol{r}}{\|\boldsymbol{v}_1\|\ \|\boldsymbol{r}\|}\right)\end{cases} \tag{9}$$

式中，$\|\cdot\|$ 表示向量模长。

3.1.2　曲率

曲率是衡量点云表面局部几何变化的重要特征，可用于识别边缘、角点等关键区域，在复杂场景下提升配准的准确性与鲁棒性。其计算核心在于局部近似：通过主成分分析（PCA）估计点的法向量，确定局部切平面；随后在邻域内拟合二次曲面，并利用其微分几何性质计算主曲率、平均曲率和高斯曲率，从而实现对点云局部形状的精确描述。计算流程如下。

1）建立局部坐标系

2）拟合二次平面

在局部坐标系中，假设曲面可以近似为一个二

次函数。

$$z' = f(x', y') = Ax'^2 + By'^2 + Cx'y' \tag{10}$$

使用最小二乘法拟合系数 A, B, C，目标是最小化所有邻域点 $(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij})$ 到拟合曲面的残差平方和。

$$\min \sum_{j=1}^{k} (Ax'^2_{ij} + By'^2_{ij} + Cx'_{ij}y'_{ij} - z'_{ij})^2 \tag{11}$$

3）计算曲率

高斯曲率 K（gaussian curvature）：描述了曲面在某个点的局部形状。

$$K = \frac{\partial^2 z'}{\partial x'^2}\frac{\partial^2 z'}{\partial y'^2} - \left(\frac{\partial^2 z'}{\partial x' \partial y'}\right)^2 = 4AB - C^2 \tag{12}$$

平均曲率 H（mean curvature）：描述了曲面在所有方向上的平均弯曲程度。

$$H = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 z'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 z'}{\partial y'^2}\right) = A + B \tag{13}$$

主曲率 k_1, k_2（principal curvatures）：描述了曲面在两个相互正交的主方向上的最大和最小弯曲程度。

$$k_{1,2} = H \pm \sqrt{H^2 - K} \tag{14}$$

3.2 基于几何特征的加权 ICP 精配准算法

3.2.1 核心内容

在改进的 SAC-IA 粗配准后，源点云与目标点云已基本对齐，但仍存在误差，需进一步精配准。传统 ICP 仅依赖空间距离，易受巷道点云中较大初始偏差、噪声干扰及复杂几何结构影响，陷入局部最优，配准精度和稳定性有限[30]。为此，本文提出了一种基于几何特征的自适应加权 ICP 算法，通过引入法向量约束兼顾空间距离与方向一致性以增强几何匹配；设计结合点间距离、法向量夹角和曲率差异的自适应权重机制，突出高质量匹配并抑制噪声影响；基于加权质心和加权协方差矩阵优化变换估计，使结果更偏向可靠匹配；并通过迭代更新匹配点、权重与变换参数，逐步最小化加权均方根误差，显著提升配准精度与收敛速度。

3.2.2 算法流程

1）ICP 算法

x_i 和 p_j 分别表示点云 X 和 P 中的第 i 个和第 j 个点的坐标。目标是找到刚性变换 $\boldsymbol{M} = (\boldsymbol{M}_{\mathrm{R}}, \boldsymbol{M}_{\mathrm{T}})$，其中，$\boldsymbol{M}_{\mathrm{R}}$ 是旋转矩阵，$\boldsymbol{M}_{\mathrm{T}}$ 是平移向量，使得点云 X 和变换后的点云 P 之间的误差最小。传统 ICP 的误差函数为

$$\operatorname{argmin} N_{\mathrm{c}}^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{c}}} \| x_i - (\boldsymbol{M}_{\mathrm{R}} p_i + \boldsymbol{M}_{\mathrm{T}}) \|^2 \tag{15}$$

式中：N_{c} 为对应点对的数量，x_i 和 p_i 为对应点对。

2）法向量

为了引入几何特征，算法首先计算每个点的法向量角度变化。设点的法向量 x_i 为 $\vec{\boldsymbol{n}}_{x_i}$，其邻域点 x_j 的法向量为 $\vec{\boldsymbol{n}}_{x_j}$。两点之间的法向量夹角 $\beta_{x_i x_j}$ 的余弦值定义为

$$\cos \beta_{x_i x_j} = \frac{\vec{\boldsymbol{n}}_{x_i} \cdot \vec{\boldsymbol{n}}_{x_j}}{|\vec{\boldsymbol{n}}_{x_i}| \cdot |\vec{\boldsymbol{n}}_{x_j}|} \tag{16}$$

式中：$\beta_{x_i x_j} \in [0, \pi]$，$\alpha(x_i)$ 为点的法向量角度参数，定义该点与其邻域内所有点的法向量夹角之和为

$$\alpha(x_i) = \sum_{x_j \in N(x_i)} \beta_{x_i x_j} \tag{17}$$

式中 $N(x_i)$ 为点 x_i 的邻域点集。通过计算 $\alpha(x_i)$，可以表示点 x_i 在局部几何结构中的特征。

3）曲率

点云 X 和 P 的每个点 x_i 和 p_i 分别具有曲率值 $K(x_i)$ 和 $K(p_i)$，曲率差异项可以通过两点曲率的绝对差值（ΔK_i）来量化。

$$\Delta K_i = |K(x_i) - K(p_i)| \tag{18}$$

由于曲率值的量纲与欧几里得距离和法向角度差异不同，因此对曲率差异进行归一化处理，以确保误差函数的各部分在同一尺度上。归一化后的曲率差异可以表示为

$$\Delta K'_i = \frac{|K(x_i) - K(p_i)|}{K_{\max}} \tag{19}$$

4）优化对应点选择

在传统 ICP 中，对应点通过最小欧几里得距离确定。本文通过法向量角度差异引入约束条件：对于点云 X 和 P 中的每个点，计算其 k 个最近邻点的法向量角度 $\alpha(x_i)$ 和 $\alpha(p_i)$。选择初始对应点对时，分别增加法向角度阈值和曲率阈值约束，

$$\begin{cases} |\alpha(x_i) - \alpha(p_i)| \leqslant \tau, \\ |K(x_i) - K(p_i)| \leqslant \tau_K \end{cases} \tag{20}$$

5）改进的误差函数

在每次迭代中，算法计算旋转矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{R}}^S$ 和平移矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{T}}^S$，并引入一个综合了点到点空间距离、法向量角度及曲率差异的改进误差函数得到

$$E^S = K^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{K} [\, \| x_i - \boldsymbol{M}_{\mathrm{R}}^S p_i - \boldsymbol{M}_{\mathrm{T}}^S \|^2 + |\alpha(x_i) - \alpha(p_i)| + \Delta K'_i\,] \tag{21}$$

式中 S 为当前迭代次数，通过最小化 E^S，算法同时优化空间距离和几何特征的匹配。

6）设置权重

计算所有对应点对的欧几里得距离、法向角度差异、曲率差异，并分别计算标准差 σ_d、σ_α、σ_k，初始权重可以设置为各误差项标准差的倒数，以平衡其权重占比。

$$w_1 = \frac{1}{\sigma_d}, w_2 = \frac{1}{\sigma_\alpha}, w_3 = \frac{1}{\sigma_k} \tag{22}$$

这种权重分配机制旨在平衡不同误差项的贡献，减小因噪声或点云稀疏性产生的极端值对误差函数的主导作用。为了进一步优化权重，可以将w_1、w_2、w_3视为优化变量，通过最小化配准误差来确定。约束$w_1 + w_2 + w_3 = 1$，w_1、w_2、$w_3 \geqslant 0$，确保权重的相对性，防止误差函数的尺度失衡。最终误差函数为

$$E^S = K^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{K} [w_1 \parallel x_i - \boldsymbol{M}_{\mathrm{R}}^S p_i - \boldsymbol{M}_{\mathrm{T}}^S \parallel^2 + w_2 \mid \alpha(x_i) - \alpha(p_i) \mid + w_3 \Delta K'_i] \tag{23}$$

针对不同场景的点云，权重w_1、w_2、w_3的设置可以通过分析点云的几何特性和应用需求来直观确定。在规则几何场景（如隧道圆弧表面），优先提高法向角度和曲率差异的权重w_2、w_3，以强调局部几何特征；对于稀疏或噪声较大的点云，适当增加欧几里得距离的权重w_1，以保证空间匹配的稳定性。在复杂场景（如隧道缺陷区域），可以试验性地调整权重，结合小规模点云测试，观察配准误差和视觉效果，根据场景特点逐步偏向几何特征或空间距离，确保配准精度与计算效率的平衡，逐步调优。

3.3　精配准实验分析

3.3.1　Bunny 数据权重分析

在粗配准提供的良好初始位姿基础上，进一步采用融合几何特征的加权 ICP 算法进行精配准。该方法通过联合量化点对间的欧氏距离、法向量夹角及曲率差异，实现了一套自适应的权重分配机制，以差异化的方式处理不同匹配对，从而有效提升了配准效果。在 Bunny 点云实验中，得到的一组有效自适应权重约为（0.5，0.25，0.25）。为验证其性能，将该权重组合与多组典型的固定权重方案进行对比，结果如表 3 所示。图 4 和图 5 分别展示了 Bunny 数据在不同权重组合下的 RMSE 及配准耗时对比，综合分析认为，自适应权重在配准精度和计算效率方面均优于其他方案，展现出良好的鲁棒性与适应性。

表 3　Bunny 数据下不同权重组合配准效果

Tab. 3　Registration performance under different weight combinations on the Bunny dataset

权重组合	距离	法向量	曲率	RMSE/(10^{-6}m)	时间/s
A	1	0	0	4.2	0.845
B	1/3	1/3	1/3	4.0	0.736
C	0.5	0.40	0.10	3.8	0.702
D	0.5	0.30	0.20	3.4	0.648
E	0.5	0.20	0.30	3.6	0.649
F	0.4	0.50	0.10	3.9	0.701
G	0.4	0.10	0.50	4.1	0.784
自适应	0.5	0.25	0.25	3.2	0.626

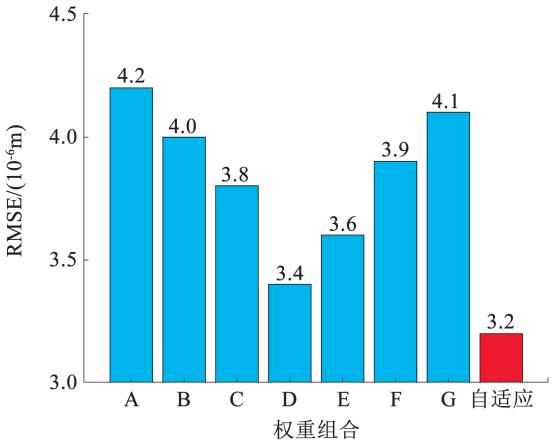


图 4　Bunny 数据下不同权重组合的 RMSE 对比图

Fig. 4　RMSE comparison under different weight combinations on the Bunny dataset

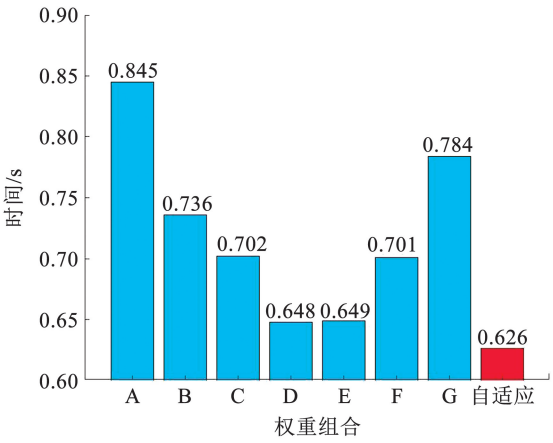


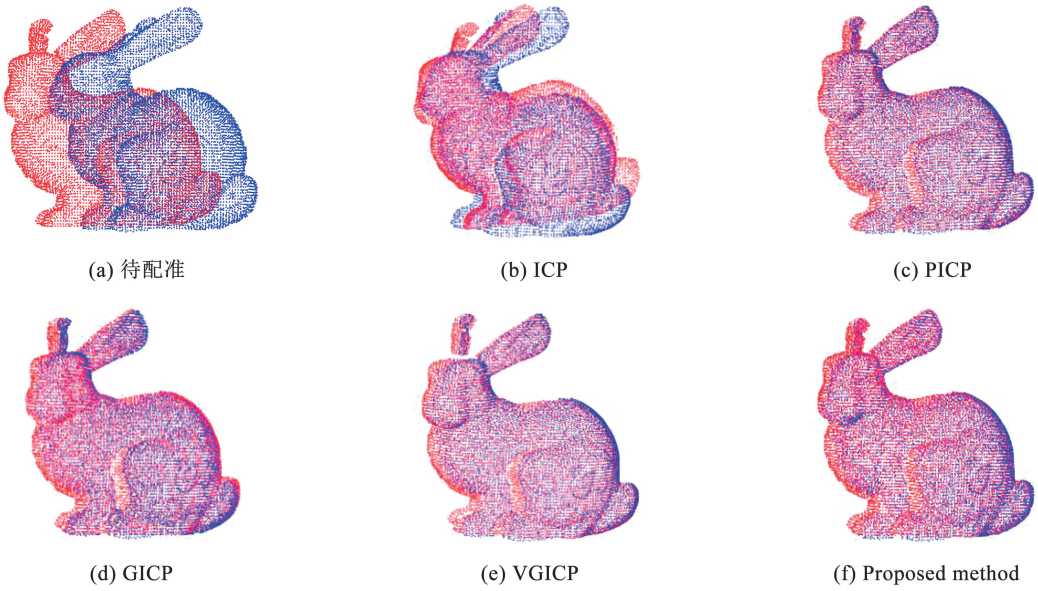
图 5　Bunny 数据下不同权重组合的配准耗时对比图

Fig. 5　Comparison of registration time under different weight combinations on the Bunny dataset

3.3.2　算法性能对比

为全面评估所提算法的性能，本文将其分别与传统精配准算法（ICP[31]、PICP[32]、GICP[33]和 VGICP[34]）以及主流深度学习配准算法（PointNetLK、DCP[35]（deep closest point）和 DGR[36]）进行了对比实验。传统算法与深度学习算法的定性配准效果分别如图 6和图 7 所示，对应的定量性能评估数据分别如表 4 和表 5 所示。

分析表 4 数据可知，在与传统算法的对比中，本文方法在配准精度和计算效率方面均表现出显著优势。在计算效率方面，虽然本文算法的单次迭代耗时略长，但由于引入几何特征后收敛速度更快、所需迭代次数更少，整体配准时间较 ICP、PICP、GICP 和 VGICP 分别缩短了约 25.9%、28.5%、97.1% 和 50.3%。在配准精度方面，本文算法较上述 4 种传统算法分别提升了约 23.81%、21.95%、38.46% 和 58.97%。

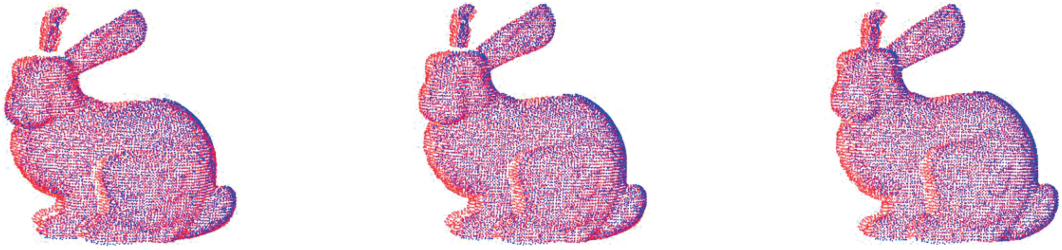


(a) 待配准 (b) ICP (c) PICP

(d) GICP (e) VGICP (f) Proposed method

图 6 Bunny 在传统精配准算法下效果图

Fig. 6 Registration results of Bunny under traditional fine registration algorithms



(a) PointNetLK (b) DCP (c) DGR

图 7 Bunny 在深度学习配准算法下效果图

Fig. 7 Registration results of Bunny under deep learning-based algorithms

表 4 Bunny 传统精配准实验数据

Tab. 4 Experimental data of Bunny using traditional fine registration algorithms

算法	RMSE/(10^{-6} m)	t/s
ICP	4.2	0.845
PICP	4.1	0.875
GICP	5.2	21.785
VGICP	7.8	1.260
Proposed method	3.2	0.626

表 5 Bunny 深度学习配准实验数据

Tab. 5 Experimental data of Bunny using deep learning registration methods

算法	RMSE/(10^{-6} m)	t/s	
		CPU	GPU
PointNetLK	3.4	8.52	0.85
DCP	3.1	10.15	0.58
DGR	3.0	12.61	0.43

进一步结合表 5 中深度学习方法的配准结果可知,DCP 和 DGR 凭借其强大的特征学习能力,在 GPU 加速下展现了较高的配准精度。然而,此类方法高度依赖高性能 GPU 硬件,运行效率远低于本文算法(耗时通常为其 10 倍以上)。相比之下,本文算法仅依靠普通 CPU 即可达到与 SOTA 深度学习方法相当的配准精度,且耗时仅 0.626 s,效率优势明显。上述综合对比结果充分表明,本文提出的加权 ICP 算法通过有效融合几何特征,成功实现了高精度与高效率的平衡,尤为适用于无法配备高性能 GPU 的轻量化工业应用场景。

4 巷道点云数据配准分析

尽管本文提出的粗、精配准算法已在斯坦福公共数据集上验证了其各自的优越性,但这类理想化的数据主要用于评估算法的理论性能上限。为了全面检验所提出的完整两阶段配准框架在真实、复杂场景下的实际效能与鲁棒性,本文特别采用一组实测的巷道点云数据进行实验。巷道场景点云数据不仅规模庞大,更因行人遮挡、粉尘、反光等干扰,呈现出分布不均、局部稀疏与高噪声等非理想特性,能够

更有效地检验算法在真实场景中的性能。

4.1　巷道点云数据采集

本文所用数据采集自某矿井下巷道，巷道宽 3 ~ 4 m、高 3 ~ 5 m，墙体存在不规则起伏、拐角和支撑结构等多种几何特征。点云由安装在机器人两侧的两台 32 线 Livox Avia 固态激光雷达从不同角度采集，视角互补以实现全景覆盖，采样频率为10 Hz，单帧点数 10 ~ 50 万，点云数据量庞大。实验环境配置如下：处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-11370H @ 3.30 GHz，GPU 为 NVIDIA RTX 3080，内存 16 GB，操作系统为 Ubuntu 20.04。在传统配准算法实验中，基于 Visual Studio 2019 平台，使用 C + + 语言与 PCL 1.14.1 库实现；在深度学习实验中，则基于 PyCharm Community Edition 2022.1.2 环境，使用 Python 语言和 PyTorch 框架完成算法实现。Livox Avia 激光雷达的主要参数如表 6 所示。

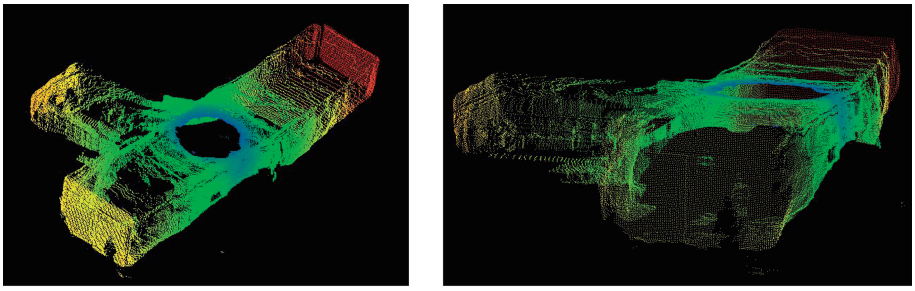
表 6　激光雷达基本参数

Tab.6　Basic parameters of the LiDAR sensor

最大测距/m	激光波长/nm	测距精度/cm	扫描频率/(点 · s^{-1})	视场角/(°)	
				非重复扫描	重复扫描
240	905	±2	240 000	70.4 × 77.2	70.4 × 4.5

4.2　巷道数据预处理

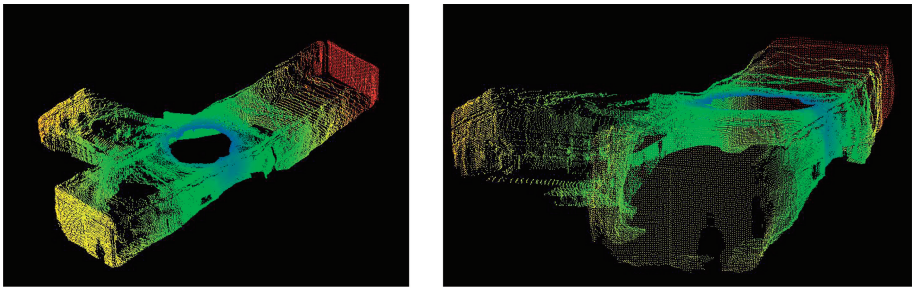
激光雷达对巷道环境扫描后记录了连续点云数据流。通过 ROS 解析逐帧提取原始点云，每帧含 12 ~ 15万个点，为提升效率并验证算法稳健性，配准实验中选取间隔 50 帧的两组点云进行处理。由于巷道环境复杂，原始数据中存在多路径噪点、测距误差导致的孤立点及遮挡造成的孔洞等(图 8)，这些噪点会影响配准精度，并降低后续特征提取与对应点匹配的稳定性。为此，配准前采用统计离群点剔除(statistical outlier removal，SOR)方法对点云进行预处理，结果如图 9 所示，可以看到，巷道内外的噪点均已去除，有效提升了数据质量，可为后续点云配准提供更可靠的数据基础。



(a) 俯视图　　(b) 正视图

图 8　初始巷道点云

Fig.8　Raw point cloud of the tunnel



(a) 去噪后的俯视图　　(b) 去噪后的正视图

图 9　SOR 巷道点云去噪

Fig.9　SOR denoising of tunnel point cloud

由于点云数据量庞大，为满足实际应用中对轻量化处理的需求，本文采用基于重心邻近点的体素下采样方法对巷道点云进行简化。多次实验表明，当体素网格尺寸设置为 0.05 时，可取得较理想的下

采样效果。采用基于重心邻近点的体素下采样法对巷道点云进行处理,其可视化结果见图 10。该方法在显著压缩点云数据规模的同时,较好地保留了整体形状特征,有效维护了巷道的几何结构与局部细节。下采样前后的点云数量变化如表 7 所示。

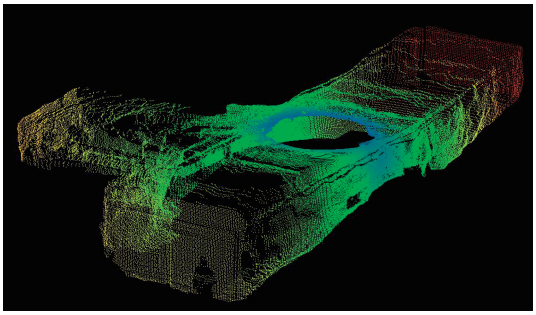


图 10 巷道点云体素下采样

Fig. 10 Voxel downsampling of tunnel point cloud

表 7 预处理后巷道点云数量

Tab. 7 Number of tunnel point clouds after preprocessing

点云类型	原始点数	SOR 去噪后点数	体素下采样后点数
源点云	134 072	130 138	63 264
目标点云	133 668	125 873	62 906

4.3 巷道点云配准实验

将预处理后的巷道点云数据依次采用提出的粗配准与精配准算法,旨在实现多视角激光雷达数据的高效对齐,重建结构完整、无缝衔接的巷道点云模型,尤其用于修复因行人遮挡导致的局部孔洞,提升模型完整性与连续性。

4.3.1 巷道数据权重分析

针对巷道点云中大面积平直、结构规整且特征分布不均的特点,实验选取了多组典型的权重组合方案,并与自适应权重组合进行对比,结果如表 8 所示。图 11 与图 12 分别为不同权重组合下巷道数据的 RMSE 及配准耗时对比,综合两图分析可见,自适应权重组在配准精度和计算效率方面均表现最优。

表 8 巷道数据下不同权重组合配准效果

Tab. 8 Registration performance under different weight combinations on tunnel data

权重组合	距离	法向量	曲率	RMSE/(10^{-6}m)	时间/s
A	1	0	0	41.3	21.34
B	1/3	1/3	1/3	37.8	21.12
C	0.5	0.4	0.1	35.5	19.31
D	0.6	0.3	0.1	36.8	20.18
E	0.4	0.5	0.1	30.1	18.89
F	0.5	0.2	0.3	39.8	20.16
G	0.4	0.4	0.2	36.6	19.84
自适应	0.3	0.6	0.1	27.2	18.66

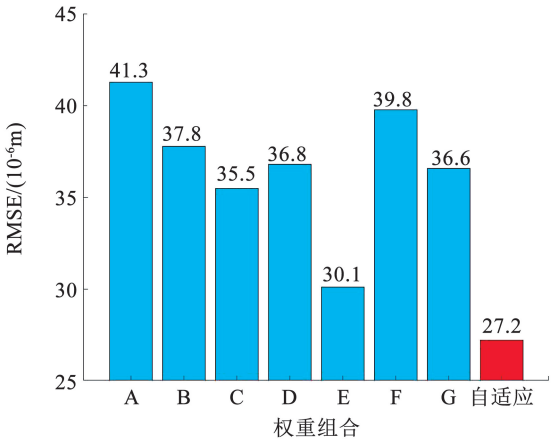


图 11 巷道数据下不同权重组合的 RMSE 对比图

Fig. 11 RMSE comparison under different weight combinations on tunnel data

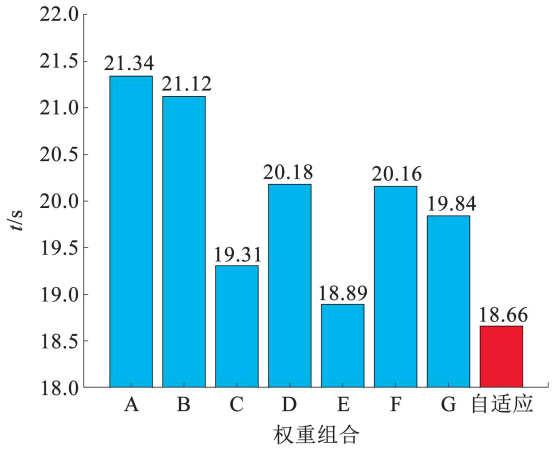


图 12 巷道数据下不同权重组合的配准耗时对比图

Fig. 12 Comparison of registration time under different weight combinations on tunnel data

该组合中,法向量权重约为 0.6,作为主要配准约束,有助于强化对墙面、顶底板等大尺度结构的对齐效果;欧氏距离权重约为 0.3,用于保证点对之间在空间上的邻近性,从而提升整体配准的一致性;曲率权重约为 0.1,主要针对角落、管道等局部高曲率区域进行细节补偿与约束,以减少噪声干扰并提高局部贴合度。最终选定自适应权重作为巷道点云精配准阶段的最优参数设置。

4.3.2 巷道配准结果分析

图 13 与图 14 分别为本文方法配准后的巷道整体轮廓与内壁细节,可以清晰地看出,配准后的点云不仅有效填补了因遮挡造成的缺失区域,还提升了整体点云的结构一致性和平滑度,为后续的三维重建、目标识别和轨迹规划等任务奠定了高质量的数据基础。

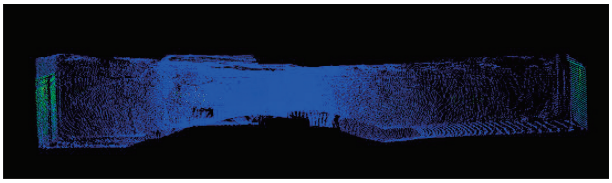


图 13　配准后整体巷道轮廓

Fig. 13　Overall tunnel contour after registration

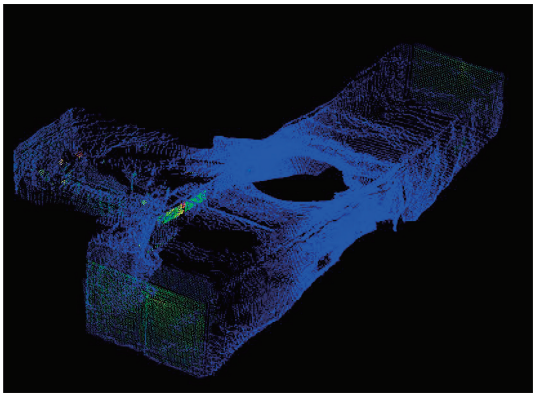


图 14　配准后巷道内壁

Fig. 14　Inner wall of the tunnel after registration

将所提出的配准算法与多种经典的粗精配准组合方法进行了对比实验，包括 SAC-IA + ICP、NDT + ICP、FPFH + ICP、ISS + ICP 和 RANSAC + ICP。表 9 对比了实测巷道点云在不同传统配准算法下的性能表现。由表 9 可知，本文方法在配准精度和运行效率方面均表现出显著优势：在运行时间方面，较 SAC-IA + ICP、NDT + ICP、FPFH + ICP、ISS + ICP 和 RANSAC + ICP 分别加快了 68.93%、21.44%、70.33%、87.94% 和 66.41%；在配准精度方面，分别提升了约 22.46%、31.00%、57.73%、46.84% 和 50.90%。上述结果充分验证了本文所提算法在精度与效率之间实现了良好平衡，尤其在面对结构复杂或存在局部遮挡的点云数据时，表现出更强的鲁棒性与适应性。

表 9　实测巷道点云不同传统配准算法的性能比较

Tab. 9　Performance comparison of different traditional registration algorithms for measured tunnel point clouds

算法	RMSE/(10^{-6} m)	t/s
SAC-IA + ICP	18.34	106.880
NDT + ICP	20.61	42.266
FPFH + ICP	33.64	111.929
ISS + ICP	26.75	275.333
RANSAC + ICP	28.96	98.862
Proposed method	14.22	33.206

将本文算法与 SOTA 深度学习算法在真实的巷道数据上进行了比较，实验结果如表 10 所示，可以看到 DGR 方法凭借其强大的全局特征描述能力，在配准精度方面取得了最优结果。值得注意的是，在这一更具挑战性的实测巷道场景中，本文提出的方法在精度上优于 DCP 和 PointNetLK，表明本文算法利用显式几何约束，在处理具有重复性结构和噪声的真实数据时具有更强的鲁棒性。在计算效率和硬件依赖方面，本文算法的优势极为突出，在 CPU 平台上，本文算法的配准速度比其他 3 种深度学习方法快 6 ~ 8 倍。在高性能 GPU 上运行，即使是 SOTA 方法，其最快速度（DCP 的 35.2 s）也比本文算法在普通 CPU 上的运行速度慢。综上所述，考虑到开槽机器人作业平台对算法轻量化、低功耗和高实时性的严苛要求，本文提出的方法无需依赖昂贵的 GPU 硬件，即可在普通 CPU 上实现高精度、高效率的配准，展现了其在工业落地应用中的潜力和实用价值。

表 10　实测巷道点云不同深度学习配准算法性能比较

Tab. 10　Performance comparison of different deep learning registration algorithms for measured tunnel point clouds

算法	RMSE/(10^{-6} m)	t/s	
		CPU	GPU
PointNetLK	15.12	205.4	45.8
DCP	14.96	260.8	35.2
DGR	13.86	291.3	40.6

5　结　语

为提升矿井巷道等大型结构化场景中点云配准的精度、效率与鲁棒性，本文提出了一种基于“粗配准 + 精配准”框架的改进型点云配准方法。首先对初始点云进行预处理，引入基于重心邻近点的体素下采样算法，在有效降低数据规模的同时，较好地保留了局部几何特征，实现工程轻量化。粗配准阶段采用改进的 SAC-IA 算法，以获得更稳健的初始对齐结果；精配准阶段融合欧氏距离、法向量夹角和曲率等多维特征信息，构建加权 ICP 算法，有效缓解了结构重复所引发的匹配误差。实验结果表明，改进的 SAC-IA 算法在斯坦福数据集上相较于传统粗配准方法，在配准精度与计算效率方面均有明显提升；相比传统 ICP 算法，加权 ICP 算法配准精度提升 23.81%，计算效率提升 25.9%。在实测矿井巷道点云数据上，本文方法在配准精度与效率方面最高分别提升 57.73% 与 87.94%，进一步验证了其在复杂结构场景下的高鲁棒性与适应性。与主流深度学习方法相比，本文方法在无需 GPU 加速的情况下，实现了与之相当的配准精度，并展现出卓越的计算效率，更适用于轻量化应用场景。在更具挑战性的实测巷道场景中，本文方法利用显式几何约束，表现

出比部分深度学习方法更强的鲁棒性与精度,且在 CPU 平台的运行速度超越了依赖 GPU 的 SOTA 方法,凸显了其工业落地价值。

尽管本文提出的方法在实验中表现出显著优势,但其应用仍受两方面局限:一是其性能依赖于场景的结构化特征,在几何信息无序的自然环境中,基于稳定特征的加权机制可能失效;二是其自动化程度不足,核心权重外的关键超参数(如体素尺寸)仍需人工设定,增加了算法向新数据类型迁移时的调参负担。

综上,本文所提出的配准方法具有良好的通用性,适用于大型工业环境中的三维重建任务。未来工作将进一步探索加权机制与深度学习模型的融合,可设计一个小型注意力网络替代当前基于统计方差的权重分配模块,以局部点云片的几何统计特征为输入,输出欧氏距离、法向量夹角与曲率 3 类误差项的最优权重。通过这种数据驱动的智能权重分配机制,在不增加计算开销的前提下,进一步提升算法在复杂场景中的自适应性与精度。

参考文献

[1] YANG Jianjian, WANG Chao, LUO Wenjie, et al. Research on point cloud registering method of tunneling roadway based on 3D NDT-ICP algorithm[J]. Sensors, 2021, 21(13): 4448. DOI: 10.3390/s21134448

[2] BESL P J, MCKAY N D. Method for registration of 3-D shapes[C]// Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures. Bellingham, WA: Spie, 1992, 1611: 586. DOI: 10.1117/12.57955

[3] 马然. 基于特征点提取和 PCA 的改进 ICP 点云配准方法[J]. 电子技术应用, 2025, 51(4): 110
MA Ran. Improved ICP point cloud registration method based on feature point extraction and PCA[J]. Application of Electronic Technique, 2025, 51(4): 110. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.245473

[4] 卢升, 韩俊刚, 王连哲, 等. 两阶段变尺度三维点云配准算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 286
LU Sheng, HAN Jungang, WANG Lianzhe, et al. Research on two-stage variable scale three-dimensional point cloud registration algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 286. DOI: 10.3788/LOP57.201503

[5] AOKI Y, GOFORTH H, SRIVATSAN R A, et al. Pointnetlk: Robust & efficient point cloud registration using pointnet[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Long Beach, CA: IEEE, 2019: 7163. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00733

[6] CHOY C, DONG Wei, KOLTUN V. Deep global registration[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle, WA: IEEE, 2020: 2514. DOI: 10.1109/cvpr42600.2020.00259

[7] 王明, 邓志良, 严飞, 等. 基于下采样优化的点云配准方法[J]. 应用激光, 2024, 44(5): 201
WANG Ming, DENG Zhiliang, YAN Fei, et al. Point cloud registration method based on down sampling optimization[J]. Applied Laser, 2024, 44(5): 201. DOI: 10.14128/j.cnki.al.20244405.201

[8] 许航, 孙宏昌, 梁志强, 等. 基于快速鲁棒-最近点迭代算法的构件点云配准方法[J]. 制造技术与机床, 2025(8): 77
XU Hang, SUN Hongchang, LIANG Zhiqiang, et al. Component point cloud registration method based on fast and robust-iterative closest point algorithm[J]. Manufacturing Technology & MachineTool, 2025(8): 77. DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.08.009

[9] 刘翔宇, 王健, 王效盖, 等. 基于 3DSIFT 特征点的改进 ICP 点云配准算法[J]. 应用激光, 2023, 43(11): 153
LIU Xiangyu, WANG Jian, WANG Xiaogai, et al. Point cloud registration algorithm based on the 3DSIFT feature points with improved ICP algorithm[J]. Applied Laser, 2023, 43(11): 153. DOI: 10.14128/j.cnki.al.20234311.153

[10] 张平均, 赵浩. 基于改进 3DSIFT 算法的点云配准方法[J]. 激光与红外, 2025, 55(2): 296
ZHANG Pingjun, ZHAO Hao. Point cloud registration based on improved 3DSIFT algorithm[J]. Laser and Infrared, 2025, 55(2): 296. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.020

[11] 景会成, 王睿宇, 张靖轩, 等. 基于 3DHarris-FPFH 特征的点云配准方法[J]. 激光与红外, 2024, 54(12): 1948
JING Huicheng, WANG Ruiyu, ZHANG Jingxuan, et al. Point cloud registration method based on 3DHarris-FPFH features[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(12): 1948. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.021

[12] 魏永超, 邓毅. 基于关键点的边界增强改进点云配准算法[J]. 中国测试, 2023, 49(12): 29
WEI Yongchao, DENG Yi. Improved point cloud alignment algorithm with key point based boundary enhancement[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(12): 29. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2022050168

[13] RUSU R B, BLODOW N, BEETZ M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2009: 3212. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152473

[14] RUSU R B. Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments[J]. Künstl Intell., 2010, 24: 345. DOI: 10.1007/s13218-010-0059-6

[15] 赵云涛, 胡佳明, 李维刚, 等. 基于改进 FPFH 特征提取的点云模板匹配方法[J]. 应用激光, 2024, 44(4): 196
ZHAO Yuntao, HU Jiaming, LI Weigang, et al. Point cloud template matching method based on improved FPFH feature extraction[J]. Applied Laser, 2024, 44(4): 196. DOI: 10.14128/j.cnki.al.20244404.196

[16] 赵辉友, 吴学群, 刘洋. 基于 FPFH 的双向 K 维树最邻近距离比点云配准方法研究[J]. 应用激光, 2024, 44(6): 184
ZHAO Huiyou, WU Xuequn, LIU Yang. Research on the closest distance ratio point cloud registration method of bidirectional K-dimensional trees based on FPFH[J]. Applied Laser, 2024, 44(6): 184. DOI: 10.14128/j.cnki.al.20244406.184

[17] 李岩, 张子毅, 王建柱. 基于特征点提取的 RANSAC-ICP 三维点云配准方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(5): 144

LI Yan, ZHANG Ziyi, WANG Jianzhu. RANSAC-ICP 3D point cloud registration method based on featurepoint extraction[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(5): 144. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.102

[18] AIGER D, MITRA N J, COHEN-OR D. 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration[C]// SIGGRAPH 2008 papers. New York: ACM, 2008: 1. DOI: 10.1145/1399504.1360684

[19] MELLADO N, AIGER D, MITRA N J. Super 4PCS fast global pointcloud registration via smart indexing[J]. Computer Graphics Forum, 2014, 33(5): 205. DOI: 10.1111/cgf.12446

[20] 沈晨，薛龙，李万祺，等. 基于 KD-ICP 算法的机器人拆解目标三维点云配准方法[J]. 科学技术与工程，2024，24(21)：9025
SHEN Chen, XUE Long, LI Wanqi, et al. 3D Point cloud registration method for robot dismantling targets based on KD-ICP algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(21): 9025. DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2305530

[21] 徐浩鸿，付昱凯，崔世界. 基于 PCA 的体素化 GICP 点云配准算法[J]. 组合机床与自动化加工技术，2025(1)：155
XU Haohong, FU Yukai, CUI Shijie. Voxel-based GICP registration algorithm based on PCA[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(1): 155. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2025.01.030

[22] 张前，王健，刘春晓，等. 改进 TrICP 算法的多源点云配准研究[J]. 应用激光，2024，44(2)：69
ZHANG Qian, WANG Jian, LIU Chunxiao, et al. Multi-source point cloud registration of improved TrICP algorithm[J]. Applied Laser, 2024, 44(2): 69. DOI: 10.14128/j.cnki.al.20244402.069

[23] GUAN Wei, LI Wentao, REN Yan. Point cloud registration based on improved ICP algorithm[C]//2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Piscataway: IEEE, 2018: 1461. DOI: 10.1109/CCDC.2018.8407357

[24] CHEN Yang, MEDIONI G. Object modelling by registration of multiple range images[J]. Image and Vision Computing, 1992, 10(3): 145. DOI: 10.1016/0262-8856(92)90066-C

[25] 赵夫群，黄鹤，耿国华. 基于主成分特征向量的点云配准方法[J]. 应用科学学报，2024，42(6)：962
ZHAO Fuqun, HUANG He, GENG Guohua. Point cloud registration method based on principal component eigenvectors[J]. Journal of Applied Science-Electronics and Information Engineering, 2024, 42(6): 962. DOI: 10.3969/j.issn.0255-8297.2024.06.006

[26] 单馨平，苏建强，刘利强，等. 基于双约束特征提取的三维激光雷达点云 ICP 配准算法[J]. 应用激光，2025，45(1)：143
SHAN Xinping, SU Jianqiang, LIU Liqiang, et al. A 3D LiDAR point cloud ICP registration algorithm based on dual-constraint feature extraction[J]. Applied Laser, 2025, 45(1): 143. DOI: 10.14128/j.cnki.al.20254501.143

[27] LIU Haibo, LIU Tianran, LI Yapeng, et al. Point cloud registration based on MCMC-SA ICP algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 73637. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919989

[28] LAN Feiying, CASTELLANI M, ZHENG Senjing, et al. The SVD-enhanced bees algorithm, a novel procedure for point cloud registration[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2024, 88: 101590. DOI: 10.1016/j.swevo.2024.101590

[29] ZHAO Haozheng, HU Qingwu. 3D reconstruction and rendering visualization of tunnel point cloud[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2022, 48: 93. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-3-W1-2022-93-2022

[30] SONG Qing, XU Degang, FANG Shiyu. 3D tunnel surface reconstruction method in complex scenarios[C]//2021 China Automation Congress (CAC). Piscataway: IEEE, 2021: 1369. DOI: 10.1109/CAC53003.2021.9728513

[31] 杨玲，谯舟三，陈玲玲，等. 结合 Procrustes 分析法和 ICP 算法的 PICP 配准算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2017，29(2)：337
YANG Ling, QIAO Zhousan, CHEN Lingling, et al. PICP registration method based on procrustes analysis and ICP algorithm[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(2): 337. DOI:10.3969/j.issn.1003-9775.2017.02.016

[32] KOIDE K, YOKOZUKA M, OISHI S, et al. Voxelized GICP for fast and accurate 3D point cloud registration[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE, 2021: 11054. DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9560835

[33] XIA Y, LIU Z, LIU H. Adaptive Resolution VGICP algorithm for robust and efficient point-cloud registration[J]. Remote Sensing, 2025, 17(17): 3056. DOI: 10.3390/rs17173056

[34] KOIDE K, YOKOZUKA M, OISHI S, et al. Voxelized GICP for fast and accurate 3D point cloud registration[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE, 2021: 11054. DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9561044

[35] WANG Y, SOLOMON J M. Deep closest point: Learning representations for point cloud registration[C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 2019: 3522. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00362

[36] WEBER M, WILD D, KLEESIEK J, et al. Deep learning-based point cloud registration for augmented reality-guided surgery[C]//2024 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI). Piscataway: IEEE Computer Society, 2024: 1. DOI: 10.1109/ISBI56570.2024.10635333

(编辑　吕雪梅)

DOI:10.11918/202507065

基于反向遗忘的后门毒化样本检测

闫雷鸣,尤剑飞

(南京信息工程大学 计算机学院、网络空间安全学院,南京 210044)

摘 要:为提升模型性能,深度神经网络常需引入不可信数据集,导致易受数据投毒后门攻击。传统检测方法依赖识别毒化与良性样本的特征差异,但当攻击者优化触发器以模糊此边界时,其效果受限。针对此问题,本文提出反向遗忘(reverse forgeting, RFgt)检测方法,利用后门攻击中“毒化样本占比低”的特性,采用逆向优化策略:强制中毒模型快速遗忘占多数的良性样本特征,同时保留并强化对可疑样本的学习,以巩固其毒化特征,显著放大两类样本的特征差异,最终通过样本预测熵值判定是否为毒化样本。研究表明:RFgt 在 CIFAR-10 和 GTSRB 数据集上能够有效检测多种后门攻击下的毒化样本,同时对良性样本保持较低的误检率;在 Tiny ImageNet 数据集上的检测结果证明本方法具备良好的泛化能力。针对4种经典的数据投毒攻击,本方法平均检测真阳率达到99.28%,假阳率仅为0.06%,其综合性能优于现有防御方法。

关键词:后门攻击;数据毒化;样本检测;遗忘学习;预测熵

中图分类号:TP391 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0116-10

Backdoor poisoned sample detection via reverse forgetting

YAN Leiming, YOU Jianfei

(Nanjing University of Information Science and Technology, School of Computer Science, School of Cyber Science and Engineering, Nanjing 210044, China)

Abstract: To enhance model performance, Deep Neural Networks are frequently trained on untrusted datasets, rendering them vulnerable to data poisoning backdoor attacks. Conventional detection methods rely on identifying feature discrepancies between poisoned and benign samples. However, their effectiveness diminishes when attackers optimize trigger generation to obscure this boundary. To address this issue, this paper proposes a novel detection method named reverse forgeting (RFgt). The method exploits the characteristic of backdoor attacks, where the proportion of poisoned samples is low, and employs a reverse optimization strategy. Instead of forcing a poisoned model to forget backdoor features, RFgt compels it to rapidly forget the features of the majority class (benign samples), while simultaneously retaining and reinforcing the learning of suspicious samples to consolidate their poisoned features. This approach significantly amplifies the feature disparity between the two sample types. Ultimately, the prediction entropy of the samples is used to determine whether they are poisoned or benign. Experimental results demonstrate that RFgt effectively detects poisoned samples under various backdoor attacks on the CIFAR-10 and GTSRB datasets, while maintaining a low false positive rate. Furthermore, this method demonstrates strong generalization capability, as shown by its performance on the Tiny ImageNet dataset. Specifically, against four classic data poisoning attacks, RFgt achieves an average True Positive Rate (TPR) of 99.28% and a False Positive Rate (FPR) of only 0.06%, outperforming existing defense methods in overall performance.

Keywords: backdoor attack; data poisoning; sample detection; forgetting learning; predictive entropy

在深度学习模型的训练中,为了追求突出的性能,从网络公开渠道获取大规模数据集以扩充训练数据已成为常态。然而,这一开放式的做法将模型置于数据投毒后门攻击的直接威胁之下。攻击者通过在训练数据中注入少量精心设计的毒化样本,可以在模型中植入一个后门。该模型在处理正常输入时表现优异,不易察觉异常,但一旦输入中包含特定的触发器(Trigger),其预测结果便会被强制导向攻击者预设的目标标签。因此,如何有效地检测和剔除这些来自不可信来源的毒化样本,是至关重要的。

收稿日期:2025-07-26;**录用日期**:2025-09-28;**网络首发日期**:2025-10-22
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251021.1508.004
基金项目:国家自然科学基金(62172292,42375147)
作者简介:闫雷鸣(1973—),男,副教授,硕士生导师
通信作者:闫雷鸣,yan_leiming@163.com

传统的后门防御，其根基在于利用毒化过程产生的可观测的特点。已有研究[1]揭示，由于触发器与目标标签之间存在强行建立的、独特的因果关系，使得毒化样本比依赖广泛语义特征的良性样本更容易被模型学习和记忆。此外，在施加特定干扰[2]时，被逻辑捷径固化的毒化样本与依赖正常特征的良性样本，其模型预测结果会产生显著的偏离。早期的检测方法正是依赖于识别上述这些静态的、可分离的特征差异。然而，当前的攻防博弈已经进入一个新的阶段，攻击者不再留下易于察觉的痕迹，而是转向设计与良性样本特征高度融合的隐蔽触发器。通过精心调整触发器的强度及其与图像内容的融合度，攻击者可以在极低中毒率下高效触发恶意行为[3-4]，这使得毒化样本与良性样本在特征空间上高度重叠，从而直接瓦解了传统检测方法赖以生存的特征可分离设定。

面对这一困境，后门防御研究的关注点开始从静态特征转向动态学习范式。尽管毒化样本的设计日趋复杂与隐蔽，但其与良性样本在模型的学习范式上仍存在根本差异：良性样本的学习依赖于数据驱动的、广泛的特征关联，其模型记忆具有可塑性；而毒化样本的学习则依赖于由触发器主导的、固化的逻辑捷径，其模型记忆具有高度的抵抗性。利用这一差异设计防御策略已成为一个重要的研究方向。如 Wang 等[5]尝试通过“前置遗忘”范式优化反后门学习方法，在训练中直接移除可疑后门样本以消除后门。尽管该方法取得了一定效果，但其本质仍是一种直接对抗策略——试图正面清除抵抗性强的后门，在面对高隐蔽性后门时效果有限。

为此，本文提出转变防御思路，从被动地寻找微弱差异转向主动地创造显著差异。尽管毒化样本与良性样本在特征上高度相似，但在模型的学习范式上存在根本区别：1）良性样本的学习依赖于数据驱动的、分布广泛的语义特征，其在模型中的记忆具有可塑性；2）毒化样本的学习则依赖于由触发器主导的、高度相关的逻辑捷径，其记忆在模型中是固化的、抵抗性强的。

基于这一思路，本文提出了一种反向遗忘（RFgt）的后门毒化样本检测方法。其核心思想不是与后门特征进行直接对抗，而是利用良性样本数量占优，且其特征具有可塑性的特点，采取逆向策略：不试图让模型遗忘难以去除的后门特征，而是通过施加熵增约束，强制模型快速遗忘数量占优的良性样本特征。由于良性特征的可塑性，其在遗忘压力下会迅速衰退，导致模型对其预测的不确定性（熵）显著增加。相反，毒化样本因其固化的触发器捷径，对此遗忘过程表现出强大的抵抗性，其预测熵值保持在较低水平。这一过程主动地、非对称地改变了模型对两类样本的记忆，从而将它们之间原本微弱的动态学习差异，放大为预测熵值的差异，可为后续的精准检测奠定基础。最终，防御者仅需根据样本的预测熵值，即可高效、准确地区分出毒化样本。

1　后门攻击与后门防御

1.1　模型后门攻击

攻击者可从数据、模型参数、模型结构等多个角度嵌入后门触发器。根据嵌入方式，后门攻击可分为数据投毒攻击和模型中毒攻击。本文方法主要针对毒化样本进行检测，因此下文重点介绍数据投毒类后门攻击的发展脉络。

数据投毒攻击的核心在于触发器的设计，其演进趋势主要体现在隐蔽性的不断提升和对防御策略的适应性规避。早期的攻击，如 Gu 等[6]提出了基础的后门攻击方案（Badnets），采用简单的像素块作为触发器，虽然有效，但视觉上易于察觉。为了提升隐蔽性，后续研究转向设计“不可见”或“不易察觉”的触发器。如 Li 等[7]引入透明度控制来混合触发器与图像（Blended）；Turner 等[8]和 Zhong 等[9]则通过微小的像素值扰动或对抗性扰动生成触发器；Zhu 等[10]利用信息隐藏技术嵌入触发器，使其在统计层面难以被检测。

为了应对后门防御技术的发展，攻击者进一步探索了更为自然的触发器模式，使其与良性样本的特征分布更为接近。如 Liu 等[3]采用物理世界的反射现象（Refool），而 Nguyen 等[4]利用平滑的图像扭曲场（Wanet），这些触发器在视觉上几乎不留痕迹。同时，为了规避基于单一样本异常的检测器，一些高级攻击被设计出来。Barmi 等[11]通过仅修改目标类别的样本，并使用正弦信号作为触发器，实现了干净标签攻击。Qi 等[12]将触发器分片嵌入不同图像，增加了检测难度；Mo 等[13]则通过在数据集中添加混淆样本，直接干扰防御方法的决策边界。

目前后门攻击正朝着高隐蔽性、特征融合以及防御规避的方向发展。这种趋势使得毒化样本与良性样本在原始特征空间（无论是像素空间还是频域空间）的差异变得十分微小，给依赖静态特征差异进行检测的传统防御方法带来了巨大挑战。

1.2　模型后门防御

传统的后门防御方法可大致分为 3 类：数据集后门检测、输入后门检测和模型后门检测。

数据集后门检测致力于在模型训练前或训练过程中净化数据集。这类方法普遍基于一个核心假

设:毒化样本在某个特征空间中会呈现出与良性样本不同的分布。如 Tran 等[14]和 Zeng 等[15]假设触发器会在频域留下痕迹,并利用光谱特征或高频伪影进行检测。Hayase 等[16]和 Pan 等[17]则通过分析样本在深度特征空间中的表征来识别异常。然而,这些方法共同的局限性在于,其依赖于一种可分离的、静态的特征差异。如 1.1 节所述,后门攻击通过精心设计触发器,能够有效模糊这种特征差异,从而规避检测。

输入后门检测发生在模型部署阶段,旨在识别携带触发器的恶意输入。这类方法通常采用扰动输入或分析模型响应来判断。如 Gao 等[18]通过叠加图像检测预测的随机性;Chou 等[19]通过复制可疑区域观察预测变化;Liu 等[20]分析模型对图像损坏响应的一致性。Chen 等[21]则试图通过重构输入来破坏触发器。这些方法的优势在于实时防御,但其主要挑战在于需要处理的样本是孤立的,缺乏全局数据分布信息,且可能引入额外的推理延迟。其旨在"拦截"攻击,而非"根除"源头(即净化数据集)。

模型后门检测旨在判断一个给定的模型是否已被植入后门。如 Wang 等[22]通过逆向工程还原触发器模式(neural cleanse);Zheng 等[23]则利用模型拓扑结构的差异进行检测。Liu 等[24]将黑白盒作为测试用例检测模型是否存在后门。这类方法能够对模型安全性进行宏观评估,但通常无法定位到具体的毒化样本,因此,对于需要净化数据集以重新训练一个干净模型的防御者而言,其作用有限。

现有后门防御工作大多依赖于在某个静态特征空间中识别毒化样本与良性样本的固有差异。无论是数据集净化、输入检测还是模型诊断,其成功都以"特征可分离"这一假设为前提。然而,高级后门攻击通过精心设计的触发器,使得毒化样本在特征层面与良性样本高度融合。当特征差异被攻击者主动抹除时,这些防御方法的性能便会显著下降。本研究通过引入反向遗忘机制,主动干预模型对不同样本的记忆和遗忘行为,从而将检测的依据从难以区分的"输入特征"转移到被显著放大的"模型响应差异"上。

2 基于反向遗忘的后门毒化样本检测方法

2.1 防御场景

攻击者通过数据毒化的方式,在训练数据中构造两个部分:良性样本(x,y)和毒化样本(x_p,y_t)。良性样本表示未受污染的输入及其正确标签,而毒化样本表示带有触发器 T 的输入 $x_p=x+T$ 及其目标标签 y_t。为了同时满足模型在正常任务上的性能和后门触发效果,攻击者的训练目标可以统一描述为

$$\arg\min_{\theta} L = E_{(x,y)}L(f_\theta(x),y) + E_{(x_p,y_t)}L(f_\theta(x_p),y_t) \tag{1}$$

式中:θ 为模型的参数;L 为分类损失函数,用于衡量模型预测$f_\theta(x)$与真实标签 y 之间的差距;E 为对样本的期望计算。

通过最小化上述损失函数,攻击者确保模型在干净数据上的分类性能不受影响,同时嵌入后门,使得模型在接收到触发器样本时输出攻击者指定的目标类别。

在许多实际应用场景中,防御者(如企业或研究机构)通常能够从自身业务中获得一小部分规模有限但来源可靠、可信的良性样本集D_c。然而,仅凭这些数据通常不足以训练出性能卓越的深度学习模型。为了弥补自有样本量的不足并提升模型泛化能力,防御者不得不从外部(如公共数据集、第三方数据提供商)获取大规模的未知数据集D_p进行补充。因此,本文将"持有少量可信样本D_c"作为防御起始点是符合实际情况的合理设定,核心挑战在于如何利用这部分少量可信数据,来净化大规模的、潜在被污染的外部数据集D_p。同时,防御者无法预知外部数据中是否存在毒化样本,也无法确定其比例 ε。因此,在缺乏具体攻击信息的条件下,防御方法需要通过有效的策略设计,识别毒化样本的异样特征,从而剔除数据集中的毒化样本,最后得到正常的数据集。

2.2 方法流程与核心机制

本文提出的基于反向遗忘的后门毒化样本检测方法(RFgt),是一种分阶段、逐步放大特征差异的检测策略。该策略的核心是通过一个动态且非对称的遗忘过程,将毒化样本与良性样本在学习范式上的内在差异,转化为一个易于度量的预测熵差异。反向遗忘的整体框架如图 1 所示,该流程被系统地划分为 3 个阶段。

2.2.1 初步遗忘与样本扩充

防御者仅持有一小部分可信的良性样本集D_c,以及一个大规模的、来源不可信的待检测数据集D_p,并可以利用中毒数据集D_p训练一个具备初步判别能力的初始模型M_b。若直接利用规模过小的D_c对初始中毒模型M_b施加反向遗忘,其产生的约束效应将不足以显著改变模型对D_p中良性样本的既有记忆,因而无法形成有效的熵值分化。为解决这一数据不平衡问题,本文设计了一种样本扩充机制。首先,利用D_c对M_b施加一个初步的反向遗忘训练,

得到初步遗忘模型 M'。此阶段的目标并非实现完全遗忘，而是作为一次初始扰动，其损失函数 L_e 旨在最大化D_c中良性样本的预测熵。

$$L_e = -H(x) = \sum_{i=1}^{C} p(y_i|x)\log p(y_i|x) \quad (2)$$

式中：$p(y_i|x)$表示模型对输入样本 x 的预测概率，C为类别数，$H(x)$为样本 x 的整体预测熵。

该损失函数的目标是通过最大化熵，迫使模型反向遗忘良性样本的特征，对良性样本做出更为不确定的预测。这一阶段利用少量良性样本D_c引导模型迅速忘记良性样本特征，得到初步遗忘模型 M'。少量良性样本D_c在初步遗忘模型 M'中的特征会因反向遗忘机制而迅速衰减，模型 M'的学习重点会由原来的良性样本特征转向毒化样本特征。通过该损失函数，模型 M'能够提升对良性样本预测的不确定性，同时确保毒化样本的特征不会被过度遗忘。

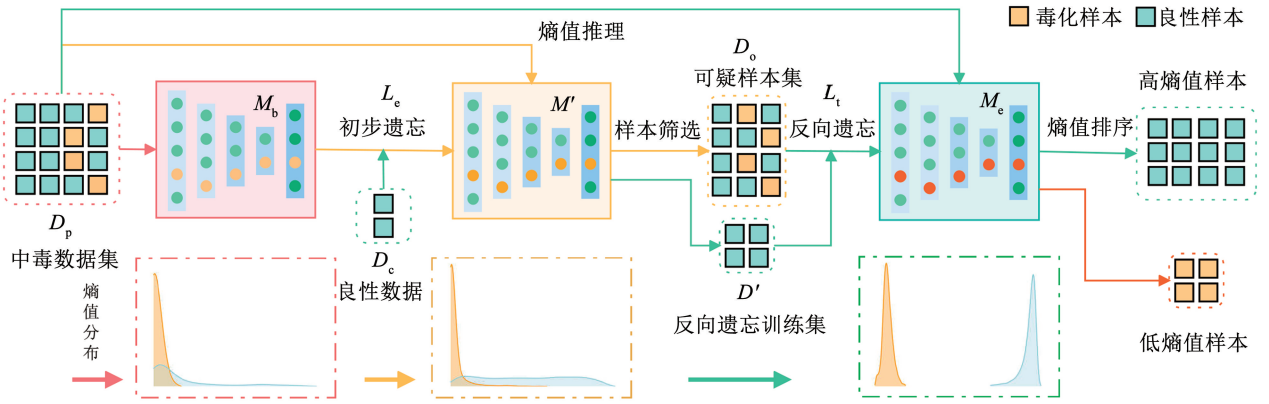


图 1　反向遗忘的整体框架图

Fig. 1　Overall framework of reverse forgetting

基于此现象，将D_p中所有样本输入 M'，筛选出预测熵最高的一部分样本。这些高熵样本可被视为经初步遗忘识别出的高置信度良性样本。将其与初始D_c合并，构成一个规模和代表性均得到增强的反向遗忘训练集 D'，剩余样本则构成可疑样本集D_o，

$$D_p = D' \cup D_o \quad (3)$$

2.2.2　深化反向遗忘

在获得规模充分的反向遗忘训练集 D'后，即可执行核心的深化反向遗忘操作，最终得到一个反向遗忘模型 M_e。实验中对 D'和D_o施加不同的训练目标，以最大化两类样本在模型响应上的最终差异。该目标的复合损失函数 L_t 定义为

$$\underset{\theta}{\operatorname{argmin}}\, L_t = \alpha E_{(x,y)} L(f_\theta(x), y) + \alpha E_{(x_p,y_t)} L(f_\theta(x_p), y_t) - \beta E_{(x_c,y)} H(f_\theta(x_c)) \quad (4)$$

式中：α 为交叉熵损失项的权重，β 为增熵约束项的权重，θ 为模型参数，$f_\theta(x)$为模型对样本 x 的推理输出，E 为对样本的期望计算，x_c 为少量良性样本集 D_c 中的样本。

该损失函数包含两个功能不同的组成部分。1）对D_o的标准交叉熵学习：促使模型继续在D_o上进行标准的分类学习。此设计的目的在于维持并强化毒化样本的低熵特性，保证其“触发器 - 目标标签”的映射关系不被破坏。2）对 D'的熵最大化约束：第二项则对 D'中的样本施加强力的熵最大化约束，驱动模型对这些高置信度良性样本的预测趋向于均匀分布，使其预测熵达到理论最大值（ln10）。

在反向遗忘的训练过程中，增熵约束项的目的是让良性样本的预测熵尽快达到最高。在 CIFAR-10 数据集上，如果一个样本没有被学习，则该样本可能被分到 10 个类别中的任意 1 个类别，即分到每个类别的概率均为 1/10。根据离散随机变量的信息熵的定义，单个样本的最大熵值为 ln10，则增熵约束就是为了让每个良性样本的预测熵值尽可能达到 ln10。

通过对一部分正常数据施加遗忘约束，同时，对另一部分异常数据维持标准学习，模型中两类样本的学习动态被导向截然不同的方向。该过程将它们之间原本微弱的内在差异，显著地放大为模型M_e输出端一个清晰、可分离的熵值分布间距。

2.2.3　毒化样本检测

根据第 2 阶段训练过程中模型M_e所学到的特性，良性样本具有较高的预测熵值，而毒化样本则表现为较低的预测熵值。为了有效区分良性样本与毒化样本，设定 1 个阈值 T。具体判断规则如下：当样

本的预测熵值 H 大于等于阈值 T 时,样本被认为是良性样本;当样本的预测熵值小于阈值 T 时,样本则被归类为毒化样本。

为了合理地确定阈值 T,本文采用一种基于聚类的双中心点划分策略:首先通过 k-means 聚类算法将预测熵值数据 $E=\{e_1,e_2,\cdots,e_n\}$ 强制分为两类 C_1 和 C_2,对应两组数据中心点 μ_1 和 μ_2(假设 $\mu_1>\mu_2$),其中 e 为先前得到的单个样本的预测熵值。聚类目标函数为

$$\min_{C_1,C_2}\sum_{e\in C_1}(e-\mu_1)^2+\sum_{e\in C_2}(e-\mu_2)^2 \tag{5}$$

式中:$\mu_1=\frac{1}{|C_1|}\sum_{e\in C_1}e$,$\mu_2=\frac{1}{|C_2|}\sum_{e\in C_2}e$。

此时阈值 T 可定义为两中心点的加权中间值,表达式为

$$T=\frac{\mu_1+\mu_2}{2}+\lambda\cdot\left(\frac{\mu_1-\mu_2}{2}\right) \tag{6}$$

式中 λ 为调整系数。通过这种方式,模型 M_e 可以有效地区分良性样本与毒化样本,实现对毒化样本的检测。

3 实验结果与分析

3.1 实验设置

本研究使用了两个广泛应用于图像分类任务的数据集:CIFAR-10 和 GTSRB 数据集。CIFAR-10 数据集包含 10 个类别的彩色图像,每张图像的尺寸为 32×32 像素,数据集共包含 60 000 张图像,其中 50 000 张用于训练,10 000 张用于测试。GTSRB 数据集是交通标志识别任务的数据集,包含 43 种不同类型的交通标志,共计 39 209 张训练图片和 12 630 张测试图片。为了进一步验证方法的泛化能力,本研究还引入了 Tiny ImageNet 数据集。该数据集是 ImageNet 的一个子集,包含 200 个类别,有 100 000 张训练集图像和 10 000 张验证集图像,图像尺寸为 64×64 像素。

本文选择 6 种先进的数据投毒后门攻击方法,包括 Badnets、Blend、SIG、CL、Wanet 和 Refool。攻击的目标标签默认为 0。除了干净标签攻击,每种后门攻击的样本投毒率均设定为 5%。

本文的主要实验分为两部分:1)通过少量良性样本 D_c 进行初步遗忘筛选高熵样本扩充数据;2)使用扩展后的数据 D' 进行反向遗忘。初始模型训练使用 ResNet-18 进行训练,在第 1 部分中,初始的良性样本数量设为数据集样本数的 2% ~5%,通过 5 轮的熵约束后筛选熵值最高的 10% ~20% 的样本进行扩充。在进行反向遗忘时,交叉熵损失项的权重参数 α 为 1,熵约束项的权重参数 β 为 3,初始学习率设为 0.001,优化器选择 Adam 优化器,训练轮数设定为 50 轮。

3.2 对比实验

为确保对 RFgt 方法性能进行准确的评估,本文选取 ASD[25]、DE[26] 和 BDE[27] 三种先进的防御方法作为对比基准。该选择旨在将 RFgt 置于当前主流且多样化的防御策略中进行考量,具体而言:ASD 代表了基于半监督学习的防御思路,通过识别良性样本与可疑样本在表征空间中的分布差异来净化数据,其有效性依赖于特征的可分离性假设;DE 则利用扩散模型,通过对样本进行去噪重构来主动擦除潜在的后门触发器,是生成式净化方法的典型代表;BDE 是一种基于模型微调的防御方法。重要的是,该方法与本文工作共享完全相同的防御前提,即利用一小部分可信的干净数据进行防御。因此,将 BDE 作为基准,能够为 RFgt 的有效性提供一个直接的参照,而与 ASD 和 DE 的比较,则能够检验 RFgt 在面对不同防御方案时的相对优势。

在得到 RFgt 方法检测样本后的数据集后,本研究使用该数据集在 ResNet-18 网络上训练一个新的分类模型,所训练出的模型的准确率(ACC)和攻击成功率(ASR)如表 1 所示。由表 1 结果可以看出,RFgt 方法能够有效防御所有 6 种评估的后门攻击,在 CIFAR-10 数据集上平均达到 93.4% 的模型准确率和 0.7% 的攻击成功率,在 GTSRB 数据集上平均达到 96.6% 的模型准确率和 0.7% 的攻击成功率。这一结果证明,RFgt 能够在有效剔除毒化样本的同时,保留良性样本的数据价值。

表 1 中还展示了其他 3 种防御方法的模型表现。ASD 方法采用了半监督学习,通过从大量未标记数据中筛选样本来防止后门投毒,表现出较低的 ASR。DE 方法利用扩散模型消除毒化样本的特征,并恢复良性样本的特征,其 ACC 略低于本文方法,但 ASR 表现优异。BDE 方法同样采用少量干净数据微调训练好的后门模型,但在 CIFAR-10 数据集上有 6.1% 的 ASR,在测试的所有防御方法中最高。这是因为 BDE 方法在微调后门模型的过程中,需要修改良性样本标签来完成训练,容易干扰对特征高度相似的毒化样本识别判断。而 RFgt 方法全程无需改动样本标签,依靠熵值变化主动拉大两类样本差异,能够有效规避后门毒化带来的负面影响,检测稳定性更强。

表 1　多种防御方法对抗 6 种后门攻击时的防御表现

Tab. 1　Defense performance of our method and other approaches against six backdoor attacks

数据集	攻击方式	无防御		BDE[27]		ASD[25]		DE[26]		RFgt(本文方法)	
		ACC/%	ASR/%	ACC/%	ASR/%	ACC/%	ASR/%	ACC/%	ASR/%	ACC/%	ASR/%
CIFAR-10	Badnets[6]	94.1	100.0	93.1	0.1	93.3	1.5	92.9	0.7	**94.0**	**0**
	Blended[7]	93.9	98.9	93.0	8.7	93.1	1.8	93.2	1.3	**94.1**	**0.5**
	SIG[11]	93.6	95.3	92.3	6.3	92.7	1.3	92.5	2.1	**93.8**	**0.4**
	Wanet[4]	93.1	98.7	91.9	5.8	92.6	2.7	92.3	**0.2**	**93.0**	0.3
	Refool[3]	93.7	99.8	92.3	3.2	93.4	0.9	92.7	**0.8**	**93.8**	1.3
	A-Patch[12]	92.9	97.6	92.4	12.3	93.1	5.7	91.6	1.9	**91.9**	**0.8**
	SSDT[13]	93.4	98.6	91.6	6.5	92.5	3.6	92.3	2.2	**93.1**	**1.5**
	Average	93.5	98.4	92.3	6.1	92.9	2.5	92.5	1.3	**93.4**	**0.7**
GTSRB	Badnets	97.3	100.0	96.3	0.1	96.1	0.4	96.5	0.7	**97.4**	**0**
	Blended	97.1	99.8	95.8	4.2	96.3	0.5	96.3	1.2	**97.0**	**0.1**
	SIG	96.5	97.3	95.2	8.9	95.9	1.3	96.2	1.9	**96.3**	**0.8**
	Wanet	97.1	99.9	94.7	6.2	**96.3**	0.6	96.0	**0.2**	96.2	1.4
	Refool	97.2	99.3	95.3	6.7	96.4	0.8	96.3	1.4	**96.8**	0.4
	A-Patch	96.8	95.6	96.4	15.6	96.1	4.2	95.3	2.4	**95.7**	**1.4**
	SSDT	97.1	98.3	95.5	6.2	96.3	4.4	96.1	1.6	**96.8**	**0.9**
	Average	97	98.6	95.6	6.8	96.2	1.7	96.1	1.3	**96.6**	**0.7**

表 2 展示了在中毒率为 5% 的 CIFAR-10 数据集上，本文提出的 RFgt 方法与 BDE、ASD、DE 三种主流先进防御方法的样本检测效果对比，通过检测成功率(TPR)和误检率(FPR)两项关键指标，量化评估各方法的检测精度与误判风险。从表 2 数据可知，RFgt 方法表现出最优的综合检测性能，其平均检测成功率达到 99.28%，同时平均误检率仅为 0.06%，在所有对比方法中同时实现了最高的 TPR 和最低的 FPR。

RFgt 方法能够同时实现高 TPR 与低 FPR，其关键在于反向遗忘机制所产生的双重效应。一方面，该机制对高置信度良性样本施加全局性的熵最大化约束，使其预测分布一致地向高熵状态转变。该过程不同于传统的离群点检测，其从机制上避免了将特征位于分布边缘的良性样本误判为异常，因而导致了极低的 FPR。另一方面，在强制遗忘良性特征的同时，对包含毒化样本的可疑集维持了标准的交叉熵学习。这不仅保留了毒化样本因逻辑捷径产生的低熵特性，更在该反向遗忘过程的约束下，使其低熵状态相对更加稳固和易于区分，从而实现了高 TPR。

表 2　在中毒率 5% 的 CIFAR-10 数据集上的样本检测效果

Tab. 2　Sample detection performance on the CIFAR-10 dataset with 5% poisoning rate

攻击方式	BDE		ASD		DE		RFgt(本文方法)	
	TPR	FPR	TPR	FPR	TPR	FPR	TPR	FPR
Badnets	94.76	0.68	99.67	4.62	99.40	0.89	**100.00**	**0**
Blended	96.64	1.48	99.44	4.39	99.18	1.15	**99.98**	**0**
SIG	90.60	0.49	93.54	7.16	94.48	0.92	**99.83**	**0**
Wanet	88.35	8.94	92.43	5.61	**99.40**	1.20	97.32	**0.24**
Average	92.59	2.90	96.27	5.45	98.12	1.04	**99.28**	**0.06**

相比之下，ASD 方法虽然 TPR 较高，但其较高的 FPR 表明其半监督筛选策略较为激进，牺牲了部分良性样本。DE 方法虽然整体表现良好，但其 FPR 略高于 RFgt，这可能是因为其扩散净化过程在某些情况下会过度平滑图像特征，使得一些原本特征独特的良性样本的分布被改变，从而增加了被误判的风险。

为了验证 RFgt 方法在更复杂场景下的有效性，本文在类别更多、图像更复杂的 Tiny ImageNet 数据集上开展了泛化性验证实验，选取 4 种代表性后门

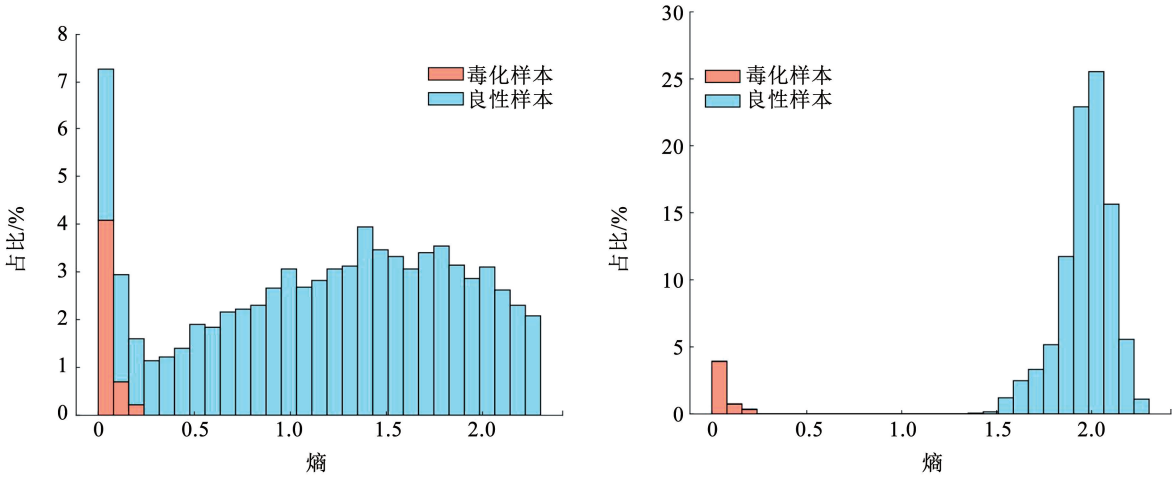
攻击方法进行评估。表 3 呈现了 RFgt 方法在该数据集上的防御表现,核心通过净化后模型的准确率(ACC)和攻击成功率(ASR)两项关键指标,量化衡量方法在大规模复杂数据集上的实际防御效果。实验结果表明,尽管 Tiny ImageNet 的数据复杂性和类别数量较之前的数据集大幅提升,但 RFgt 方法依然保持了卓越的防御性能,其净化后模型的平均准确率达 60.49%,攻击成功率则被抑制在 0.81% 的极低水平。这一结果表明,RFgt 方法不局限于小尺寸、少类别的简单任务,在更具挑战性的大规模数据集上同样具有适用性和鲁棒性。

RFgt 方法主要采用熵约束来遗忘良性样本的特征,为了验证该熵约束方案的可靠性,本文将 BDE 方法中通过更改样本标签混淆正常样本特征的遗忘方案,与本文提出的熵约束方案进行对比分析。图 2 展示了两种遗忘方案在 CIFAR-10 数据集与 Blended 中毒攻击下的样本熵值分布情况,用于直观对比不同遗忘策略对毒化样本与良性样本的特征分离效果。图中横坐标为不同样本的熵值,纵坐标为对应熵值区间的样本在完整数据集中的百分比占比。在防御 Blended 中毒攻击时,BDE 的标签修改方案虽然能够提高多数良性样本的熵值,但仍无法完全分离毒化样本与良性样本的熵值分布;而本文提出的熵约束策略能够使两类样本的熵值分布形成清晰的边界,为后续毒化样本的检测提供了明确的判别依据。

表 3 RFgt 方法在 Tiny ImageNet 数据集上的防御表现

Tab. 3 Defense performance on the Tiny ImageNet dataset

攻击方式	无防御		RFgt(本文方法)			
	ACC/%	ASR/%	TPR/%	FPR/%	ACC/%	ASR/%
Badnets	62.64	100.00	100.00	0.00	61.27	0
Blended	61.84	95.21	99.63	0.07	60.85	0.24
Wanet	61.73	95.93	97.32	0.85	60.64	1.84
Refool	62.53	96.23	98.13	0.41	59.19	1.16
Average	62.19	96.84	98.77	0.58	60.49	0.81



(a) 更改样本标签 (b) 熵值约束

图 2 不同遗忘方法在 CIFAR-10 数据集上的样本熵值分布

Fig. 2 Entropy distribution of samples on the CIFAR-10 dataset under different forgetting methods

3.3 消融实验

RFgt 方法基于少量的良性样本对中毒模型进行反向遗忘。为了探讨干净数据的数量对实验结果的影响,本文评估了 RFgt、BDE 和 ASD 方法在不同数量的良性样本数据上针对 CIFAR-10 的 Blended 攻击的表现。3 种方法的 TPR 和 FPR 变化如图 3 所示,随着良性样本数据量的减小,RFgt 方法的 TPR 仍然保持着较高的数值,仅在初始良性样本极少时下降至约 93%。相比之下,在相同条件下,ASD 方法的 FPR 较高,而 BDE 方法的 TPR 则表现不佳。

本文的防御方法要通过直接熵增约束扩充遗忘样本,扩充的样本数量会影响到最终反向遗忘的效果。为了研究扩充样本数量对实验效果的影响,设计了在 CIFAR-10 数据集受到不同中毒率的 blended 攻击时,扩充不同比例 ε 的样本对模型 ACC 和 ASR 的影响。从表 4 可以看出,当中毒率为 5% 且扩充 20% 的样本时的防御效果最好,随着中毒率和扩充样本数的增加,模型的 ASR 逐渐升高,这是由于扩充样本时混入了一小部分的毒化样本。同时,扩充样本比例 ε 过小会导致在遗忘阶段对良性样本的遗忘效果变差,从而导致模型准确率(ACC)较低。但在实际场景中,攻击者通常不会提供中毒率过高的数据集($\geqslant$20%),大量的毒化样本很容易被发现。

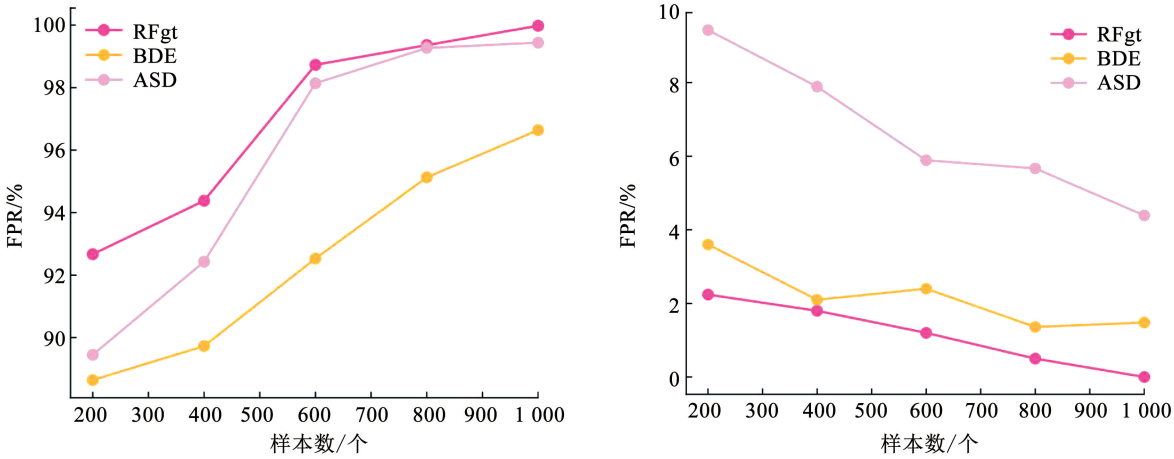


图 3　不同初始样本数量下 3 种防御方法的检测成功率和误检率的变化

Fig. 3　Changes in TPR and FPR of three defense methods under varying initial benign sample quantities

表 4　扩充不同比例 ε 的样本在 CIFAR10 数据集上的防御效果

Tab. 4　Analysis of RFgt method's defense effect with expanded sample ratios of ε on the CIFAR-10 dataset (Blended)

中毒率/%	ε=5%		ε=10%		ε=20%		ε=30%	
	ACC	ASR	ACC	ASR	ACC	ASR	ACC	ASR
5	91.51	0.64	93.78	0.48	94.12	0.51	94.03	1.31
10	92.23	0.63	93.89	0.35	93.72	0.83	93.89	1.43
20	91.74	0.83	93.21	0.73	93.53	1.25	93.77	2.57

由表 5 可见，RFgt 方法在处理低中毒率的 3 种后门攻击时均表现出良好的检测性能，检测样本的假阳率均为 0%，且在 1% 中毒率的情况下，仍有较高的真阳率。这是因为 RFgt 方法会使良性样本的整体特征被模型遗忘，检测的假阳率基本为 0。在真实世界的攻击中，攻击者为了增强隐蔽性，常采用极低的毒化率，本方法在 1% 的极低毒化率下依然能实现检测(FPR 为 0%)，充分证明了其在实际防御场景中的鲁棒性和应用价值。

表 5　RFgt 方法在 CIFAR10 数据集上对低中毒率攻击的检测效果

Tab. 5　Detection performance of the RFgt method against low-poisoning-rate attacks on the CIFAR-10 dataset

攻击方式	中毒率=1%		中毒率=3%		中毒率=5%	
	TPR	FPR	TPR	FPR	TPR	FPR
Badnets	100.00	0	100.00	0	100.00	0
Blended	99.37	0	99.82	0	99.98	0
SIG	98.54	0	99.21	0	99.83	0

超参数 α 与 β 分别决定了 RFgt 方法中保留毒化样本特征和遗忘良性样本特征的强度，其比值的合理取值是保证方法检测性能的关键。为了探究 β/α 比值对检测效果的影响，本文设计了超参数敏感性实验，实验结果如表 6 所示。由表 6 可以看到：随着 β/α 比值的增大，RFgt 的 TPR 呈下降趋势；反之，当该比值较小时，FPR 则会上升。其原因在于：若 β 权重过高，会过度遗忘特征，甚至影响到毒化样本的低熵特性，从而降低 TPR；若 β 权重过低，则遗忘效果不足，导致良性样本的熵值提升不充分，增加了其被误判的风险(即更高的 FPR)。

表 6　RFgt 方法在 CIFAR10 数据集上对不同攻击的检测效果

Tab. 6　Detection performance of the RFgt method against different attacks on the CIFAR-10 dataset

攻击方式	β/α=1		β/α=3		β/α=5	
	TPR	FPR	TPR	FPR	TPR	FPR
Badnets	100.00	0.12	100.00	0	98.53	0
Blended	100.00	0.78	99.98	0	99.12	0
Wanet	98.73	1.83	97.32	0.24	95.44	0

3.4　局限性与未来工作

本文提出的 RFgt 方法在检测数据投毒攻击方面表现出色，但其适用范围与机制设计亦存在一定的局限性，这为未来的研究指明了方向。

3.4.1　适用攻击类型的局限性

本文的核心工作是识别和剔除训练集中的毒化样本，因此主要适用于数据投毒攻击场景。对于模型投毒攻击，即攻击者直接修改已训练完成的模型参数来植入后门，由于其训练数据本身可能是完全良性的，数据集中不存在可供检测的“毒化样本”。RFgt 方法通过分析样本在遗忘过程中的动态变化来区分异常，这一机制依赖于对数据样本的直接操作，因此无法直接应用于检测一个给定的、静态的、已中毒的模型。未来的工作可以探索如何将“反向遗忘”的思想迁移至模型层面，如通过分析不同神

经元或网络层对良性数据特征的遗忘速率,来识别可能与后门功能相关的异常结构。

3.4.2 对初始良性样本的依赖

RFgt 方法依赖于一小部分可信的良性样本集 D_c。图 3 结果表明,本文方法在良性样本数量极少(如数据集的 2%)时依然有效,但其性能的下限仍受限于这部分初始数据的数量和代表性。在完全无监督的场景,即防御者没有任何可信数据的情况下,如何有效初始化反向遗忘过程,是一个值得探索的方向。

3.4.3 计算开销分析

本文所提 RFgt 方法的计算开销主要来源于其多阶段的训练流程,具体包括:初始后门模型的训练、用于样本扩充的初步反向遗忘,以及核心的深化反向遗忘。为客观评估其运行效率,本节将 RFgt 与 BDE、ASD、DE 三种对比方法在相同硬件环境下的总时间消耗进行了记录与分析,具体数据如表 7 所示。

表 7 多种防御方法在不同数据集上的时间消耗

Tab. 7 Time consumption (in hours) of various defense methods across different datasets h

数据集	防御方法			
	BDE	ASD	DE	RFgt
CIFAR-10	0.93	0.64	2.31	0.75
GTSRB	0.91	0.58	2.12	0.71

从表 7 的数据可以看出,RFgt 方法的计算效率具有显著竞争力。相较于 DE 方法,RFgt 的耗时大幅减少,这主要因为 DE 依赖于计算密集型的扩散模型进行多步样本去噪与重构。同时,RFgt 也比基于模型微调的 BDE 方法更高效。尽管 ASD 方法的耗时略低于 RFgt,但这种微弱的时间优势是以牺牲大量防御性能为代价的。结合表 2 的检测结果,ASD 在 CIFAR-10 上的平均 FPR 高达 5.45%,远高于 RFgt 的 0.06%。这表明,RFgt 通过增加有限的计算投入(约 0.11 h),换取了检测精度的提升。

尽管 RFgt 方法的总体时间成本在可接受范围内,且优于部分主流方法,但其多阶段的流程设计相较于单次检测方法,在计算步骤上更为复杂。虽然这一设计是其高性能的保证,但在部署效率要求极高的场景下,仍有优化的空间。

未来研究可侧重如何简化遗忘流程或采用更高效的训练策略,如设计端到端的遗忘框架,以进一步降低时间成本。

4 结 语

针对高级后门攻击能够将毒化样本伪装成为与良性样本高度相似,从而导致传统检测方法失效这一难题,本文提出了一种基于反向遗忘的后门样本检测方法(RFgt)。其核心创新在于,利用了良性样本记忆具有可塑性、而毒化样本记忆具有固化性的根本差异。RFgt 通过施加熵增约束,强制模型遗忘数量占优的良性特征,而非直接对抗隐蔽的后门特征。这一逆向策略能够将两类样本间原本难以察觉的学习动态差异,高效地放大为清晰可辨的预测熵差异。在 CIFAR-10 和 GTSRB 数据集上的实验表明,RFgt 方法能有效防御多种后门攻击。净化后模型的平均准确率分别达到 93.4% 和 96.6%,攻击成功率则均被抑制在 0.7% 的极低水平。在样本检测层面,其平均真阳率(TPR)高达 99.28%,而假阳率(FPR)仅为 0.06%。此外,在类别更多、图像更复杂的 Tiny ImageNet 数据集上的成功验证,也证明了本方法具备良好的泛化能力,可为深度学习模型抵御数据投毒后门攻击提供一种可靠的防御方案。

参考文献

[1] ZHANG Zaixi, LIU Qi, WANG Zhicai, et al. Backdoor defense via deconfounded representation learning[C]// Proceedings of the 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2023: 12228. DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.01177

[2] CHEN Weixin, WU Baoyuan, WANG Haoqian. Effective backdoor defense by exploiting sensitivity of poisoned samples[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2022, 35: 9727. DOI: 10.48550/arXiv.2206.02704

[3] LIU Yunfei, MA Xingjun, BAILEY J, et al. Reflection backdoor: A natural backdoor attack on deep neural networks[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV 2020). Berlin, Germany: Springer, 2020: 182

[4] NGUYEN A, TRAN A. Wanet-imperceptible warping-based backdoor attack [C]// Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). Virtual: OpenReview.net, 2021: 6667

[5] 王晗旭, 李欣, 许文韬, 等. 遗忘学习前置的反后门学习方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(19): 259
WANG Hanxu, LI Xin, XU Wentao, et al. Anti-backdoor learning method based on preposed unlearning[J]. Journal of Computer Engineering & Applications, 2024, 60(19): 259

[6] GU Tianyu, LIU Kang, DOLAN-GAVITT B, et al. BadNets: Evaluating backdooring attacks on deep neural networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 47230. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2909068

[7] LI Shaofeng, XUE Minhui, ZHAO Benjamin, et al. Invisible backdoor attacks on deep neural networks via steganography and regularization[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2020, 18(5): 2088. DOI: 10.1109/TDSC.2020.3021407

[8] TURNER A M. Exploring the landscape of backdoor attacks on deep

neural network models[D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2019

[9]ZHONG Haoti, LIAO Cong, SQUICCIARINI A C, et al. Backdoor embedding in convolutional neural network models via invisible perturbation[C]// Proceedings of the Tenth ACM Conference on Data and Application Security and Privacy (CODASPY). New York, NY, USA: ACM, 2020: 97. DOI:10.1145/3374664.3375751

[10]朱淑雯, 罗戈, 韦平, 等. 隐蔽图像后门攻击[J]. 中国图象图形学报, 2023, 28(3): 864. DOI: 10.11834/jig.220550
ZHU Shuwen, LUO Ge, WEI Ping, et al. Covert image backdoor attacks[J]. Journal of Image and Graphics, 2023, 28(3): 864. DOI: 10.11834/jig.220550

[11]BARNI M, KALLAS K, TONDI B. A new backdoor attack in cnns by training set corruption without label poisoning[C]//2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 101. DOI: 10.1109/ICIP.2019.8802997

[12]QI Xiangyu, XIE Tinghao, LI Yiming, et al. Revisiting the assumption of latent separability for backdoor defenses[C]// Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). Virtual: OpenReview.net, 2023: 19637

[13]MO Xiaoxing, ZHANG Yechao, ZHANG L Y, et al. Robust backdoor detection for deep learning via topological evolution dynamics[C]// 2024 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2024: 2048. DOI: 10.1109/SP54263.2024.00174

[14]TRAN B, LI J, MADRY A. Spectral signatures in backdoor attacks[C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Red Hook, NY, USA: Curran Associates, Inc., 2018: 801

[15]ZENG Yi, PARK W, MAO Z M, et al. Rethinking the backdoor attacks′ triggers: A frequency perspective[C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 16473

[16]HAYASE J, KONG Weihao. SPECTRE: Defending against backdoor attacks using robust covariance estimation[C]// Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML). London, UK: PMLR, 2020: 1

[17]PAN Minzhou, ZENG Yi, LYU Lingjuan, et al. {ASSET}: Robust backdoor data detection across a multiplicity of deep learning paradigms[C]// Proceedings of the 32nd USENIX Security Symposium. Anaheim, CA, USA: USENIX Association, 2023: 2725

[18]GAO Yansong, XU Change, WANG Derui, et al. Strip: A defence against trojan attacks on deep neural networks[C]// Proceedings of the 35th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC). San Juan, Puerto Rico, USA: ACM, 2019: 113

[19]CHOU E, TRAMER F, PELLEGRINO G. Sentinet: Detecting localized universal attacks against deep learning systems[C]// 2020 IEEE Security and Privacy Workshops (SPW). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2020: 48. DOI: 10.1109/SPW50608.2020.00025

[20]LIU X, LI M, WANG H, et al. Detecting backdoors during the inference stage based on corruption robustness consistency[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 16363

[21]CHEN Yukun, SHAO Shuo, HUANG Enhao, et al. REFINE: Inversion-free backdoor defense via model reprogramming[C]// Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR). Virtual: OpenReview.net, 2025: 7835

[22]WANG Bolun, YAO Yuanshun, SHAN Shawn, et al. Neural cleanse: Identifying and mitigating backdoor attacks in neural networks[C]// 2019 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2019: 707723. DOI: 10.1109/SP.2019.00031

[23]ZHENG Songzhu, ZHANG Yikai, WAGNER H, et al. Topological detection of trojaned neural networks[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2021, 34: 17258

[24]刘亦纯, 张光华, 宿景芳. 基于多级度量差值的神经网络后门检测方法[J]. 信息安全研究, 2023, 9(6): 587
LIU Yichun, ZHANG Guanghua, SU Jingfang. Neural network backdoor detection method based on multi-level metric difference[J]. Journal of Information Security Research, 2023, 9(6): 587

[25]GAO Kuofeng, BAI Yang, GU Jindong, et al. Backdoor defense via adaptively splitting poisoned dataset[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 4005

[26]ZHOU Jiachen, LV Peizhuo, LAN Yibing, et al. Dataelixir: Purifying poisoned dataset to mitigate backdoor attacks via diffusion models[C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Washington, DC, USA: AAAI, 2024, 38(19): 21850

[27]XIE Tinghao, QI Xiangyu, HE Ping, et al. BaDExpert: Extracting backdoor functionality for accurate backdoor input detection[C]// International Conference on Learning Representations (ICLR). Virtual: OpenReview.net, 2024: 2219

（编辑　吕雪梅）

DOI:10.11918/202505050

基于自注意力多尺度空洞卷积网络的雷达工作模式识别

张福群[1],何明浩[1],郁春来[1],冯明月[1],张逸楠[1],刘 康[2]

(1.空军预警学院,武汉 430014;2.复杂航空系统仿真全国重点实验室,北京 100076)

摘 要:在复杂电磁环境下,雷达对抗侦察信号常因大量脉冲丢失与虚假脉冲干扰,造成训练数据与实战场景间存在显著分布差异,严重影响有源相控阵雷达空空工作模式的识别准确率。针对这一问题,本文提出一种基于自注意力多尺度空洞卷积网络(self-attention multi-kernel dilated convolution network,SAMKDCN)的识别模型。该模型以空洞卷积、多卷积核选择与残差结构为核心,构建特征图提取模块,实现在时间维度上对多尺度特征图的提取。进一步通过自注意力机制,实现对特征图权重的自适应调整,以突出关键特征,增强特征表示能力,从而提升AESA雷达工作模式识别的准确率。仿真实验表明:SAMKDCN能够有效学习AESA雷达空空工作模式的核心特征;在理想环境下,其准确率最高可达99.14%;在0%~50%的脉冲丢失与虚假脉冲条件下,平均识别率达到95.11%;在50%丢失率与50%虚假率的极端条件下,仍保持88.23%的识别准确率,显示出良好的泛化能力与鲁棒性。

关键词:雷达工作模式识别;深度学习;自注意力机制;多尺度卷积;空洞卷积

中图分类号:TN971 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0126-12

Radar working mode recognition based on self-attention multi-kernel dilated convolution network

ZHANG Fuqun[1], HE Minghao[1], YU Chunlai[1], FENG Mingyue[1], ZHANG Yinan[1], LIU Kang[2]

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430014, China;
2. National Key Laboratory of Complex Aeronautical Systems Simulation, Beijing 100076, China)

Abstract: In complex electromagnetic environments, radar countermeasure reconnaissance signals often suffer from significant distribution differences between training data and actual combat scenarios due to substantial pulse loss and false pulse interference, which seriously degrades the recognition accuracy of the air-to-air working mode of active phased array radar. To address this issue, this paper proposes a recognition model based on self-attention multi-kernel dilated convolution network (SAMKDCN). Centered on dilated convolution, multi-kernel selection, and residual structures, this model constructs a feature-map extraction module for multi-scale feature learning across the temporal dimension. Moreover, a self-attention mechanism is incorporated to adaptively adjust feature-map weights, thereby highlighting critical features and strengthening feature representation, which ultimately enhances the accuracy of AESA radar working-mode identification. Simulation experiments show that SAMKDCN can effectively learn the core features of the air-to-air working mode of AESA radar. Under ideal conditions, it achieves a peak accuracy of 99.14%. With pulse-loss and false-pulse ratios ranging from 0% to 50%, the average recognition rate attains 95.11%; Even under the extreme scenario of 50% loss rate and 50% false-pulse rate, this model retains a recognition accuracy of 88.23%, demonstrating favorable generalization ability and robustness.

Keywords: radar working mode recognition; deep learning; self-attention mechanism; multi-scale convolution; dilated convolution

随着有源相控阵(active electronically scanned array,AESA)雷达性能的显著提升与功能边界的持续拓展,其在现代雷达系统中的地位已从技术验证阶段迈入全面应用阶段。相较于传统机械扫描雷达,AESA雷达凭借波束捷变、多目标跟踪、低截获概率及抗干扰能力强等特性,已广泛应用于第五代

收稿日期:2025-05-21;**录用日期**:2025-10-20;**网络首发日期**:2025-11-19
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251118.1330.010
作者简介:张福群(1997—),男,博士研究生;何明浩(1963—),男,教授,博士生导师
通信作者:何明浩,1056569835@qq.com

战斗机(如 F-35 的 AN/APG-81 雷达)、预警机(如 E-2D 的 AN/APY-9 雷达)及舰载防空系统(如 SPY-6 雷达)[1-3]。然而,AESA 雷达的高度灵活性与智能化特性,也使其工作模式呈现出动态化、多样化和隐蔽化的特征,这导致基于静态参数模板的传统识别方法面临本质性挑战,对 AESA 工作模式的误判率显著提升,严重威胁战场态势感知的有效性。

随着深度学习技术的快速发展,基于数据驱动的方法逐渐成为雷达工作模式识别领域的研究主流。相较于传统人工特征提取方式,深度学习通过构建端到端的特征学习框架,能够在高维空间映射过程中自主挖掘雷达信号中隐含的模式特征。其中,两种典型神经网络结构展现出独特优势:卷积神经网络(convolutional neural network,CNN)擅长捕捉局部特征,循环神经网络(recurrent neural network,RNN)侧重时序建模。在 CNN 应用方面,熊敬伟等[4-5]在深度残差网络中引入空间与通道自注意力机制,通过优化权重分配以聚焦区分性信息,实现了高精度雷达工作模式识别;Zhang 等[6]提出一种注意力机制下的多特征融合流式识别框架,能够有效提取时序与关联特征,优化分类性能。在 RNN 应用方面,Zhang 等[7]采用多输出多结构学习框架,结合长短期记忆网络(long short-term memory,LSTM)挖掘深层时序特征,支持局部与全局关系建模,在非理想电磁环境下联合完成调制识别与参数估计;Zhang 等[8]则提出基于复合对齐的学习方法,通过多分支隐空间与重构空间对齐,实现了细粒度模式识别。

然而,在战时复杂电磁环境下,交战双方的全频段干扰导致战场频谱环境急剧劣化,引发雷达侦察数据中的脉冲丢失与虚假信号激增现象。这种动态对抗场景与常态电磁环境的本质差异,使得平时与战时雷达对抗侦察信号存在明显的分布偏移现象。这种由环境动态时变特性引发的分布偏移现象,会严重影响基于 CNN 和 RNN 的传统深度学习方法在实际对抗场景中的识别能力。

针对上述问题,本文提出了一种基于自注意力多尺度空洞卷积网络(self-attention multi-kernel dilated convolution network,SAMKDCN)的雷达工作模式识别网络模型。该模型通过并联多尺度空洞卷积组,在残差块内部实现渐进式感受野扩展,突破了传统时序卷积网络(temporal convolutional network,TCN)的层级限制。同时,引入随机失活机制以增强泛化能力,并利用自注意力机制优化特征表征,从而有效应对雷达工作模式识别中的特征提取与模型鲁棒性挑战。

1　雷达侦察信号模型

1.1　信号层次结构模型建立

本文聚焦 AESA 雷达空空工作模式识别,AESA 雷达空空工作模式可以分为 3 大功能:搜索、跟踪和复合功能。搜索的工作模式包括速度搜索模式(velocity search,VS)和边搜索边测距模式(range while search,RWS),其中 RWS 模式拥有两种子工作模式,即高重频边搜索边测距(high range while search,HRWS)模式和中重频边搜索边测距(medium range while search,MRWS)模式;跟踪的工作模式包括单目标跟踪(single target tracking,STT)和多目标跟踪(multiple target tracking,MTT);复合功能的工作模包括边搜索边跟踪模式(track while scan,TWS)、跟踪加搜索模式(track and search,TAS)[9-12]。同时,根据对 AESA 雷达资源调度进行分析,构建“两方三层三参数”的信号层次结构模型,如图 1 所示。并依据此模型仿真出 PDW 流数据,以支持深度学习应用的训练与优化。

图 1 中,“两方”指雷达方和侦察方,“三层”指功能层、任务层、波形层,“三参数”指任务参数、波形参数、脉冲参数。任务参数包括扫描方式、辐射功率、天线波束、波位编排;波形参数包括脉冲重复周期(pulse repetition interval,PRI)、脉冲个数(pulse number,PN);脉冲参数包括载频、脉宽、脉内调制。

当侦察方进行侦察时,信号接收机采集到的雷达信号数据通常以 PDW 的形式存储,其包括脉冲到达时间(time of arrive,TOA)、脉冲到达方向(direction of arrival,DOA)、脉冲幅度(pulse amplitude,PA)、载频(carrier frequency,CF)、脉冲宽度(pulse width,PW)、脉内调制(intra-pulse modulation,IM)等信息。其中,PA 与 DOA 根据任务参数确定,TOA 根据波形参数确定,CF、PW、IM 根据脉冲参数确定,形成侦察方与雷达方的数据连接。

由于本算法默认前置数据处理已完成信号分选,即所接收的 PDW 序列中的所有脉冲均来自同一部雷达,且在短时间内同一部 AESA 机载雷达信号的来波方向是不变的,因此,DOA 参数除测量误差外均为同一数值,不提供雷达工作模式识别所需的判别信息,故未使用该信息。同时,受限于存储容量与实际应用条件,PDW 数据通常不包含脉冲信号,因此本算法也不使用脉内信息。因此,本算法模型最终选定并使用的输入数据是包括 TOA、PA、CF 和 PW 的关键四维 PDW 数据序列,以此构建特征进行分析。

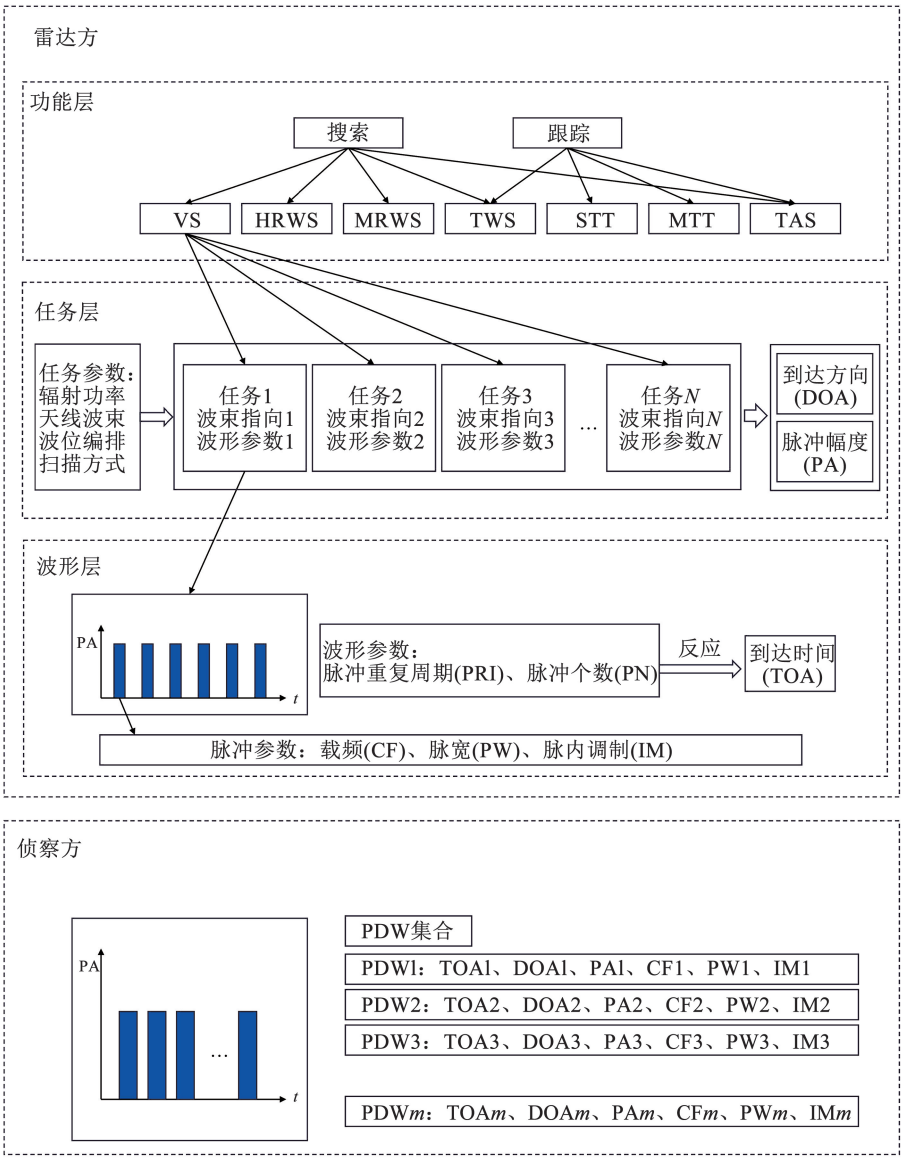


图 1 “两方三层三参数”信号模型

Fig. 1 "Two-party, three-layer, three-parameter" signal model

1.2 脉冲丢失与虚假

在复杂电磁对抗环境下,交战双方广泛采用全频段干扰手段,致使战场电磁频谱环境严重劣化,雷达侦察数据中出现大量脉冲丢失与虚假脉冲现象。该现象导致在实战条件下所获取的侦察数据与平时训练中所使用的数据之间存在显著的分布差异。此类分布偏移严重制约了模型在实际对抗场景中的泛化能力,从而引起雷达工作模式识别准确率的显著下降。本文使用丢失和虚假来体现这种分布差异,即实战侦察数据的丢失率和虚假率高于平时训练数据,其示意图如图 2 所示。

在雷达侦察信号处理中,脉冲丢失是指脉冲信息的完全缺失;而虚假脉冲则是指在随机时间点注入的脉冲信号,其 PA、CF 与 PW 参数在预设范围内随机生成,用来模拟复杂电磁环境。

根据 1.1 节生成的 PDW 流数据进行丢失与虚假处理,使数据更加贴近现实。图 3 以组变的 PRI 为例,展示理想环境和 20% 脉冲丢失、20% 脉冲虚假情况的 PRI 参数变化。

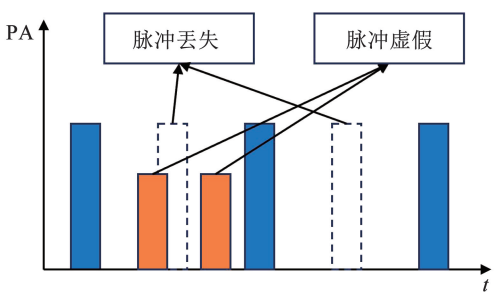


图 2 脉冲丢失与虚假示意图

Fig. 2 Schematic diagram of missing pulse and spurious pulse

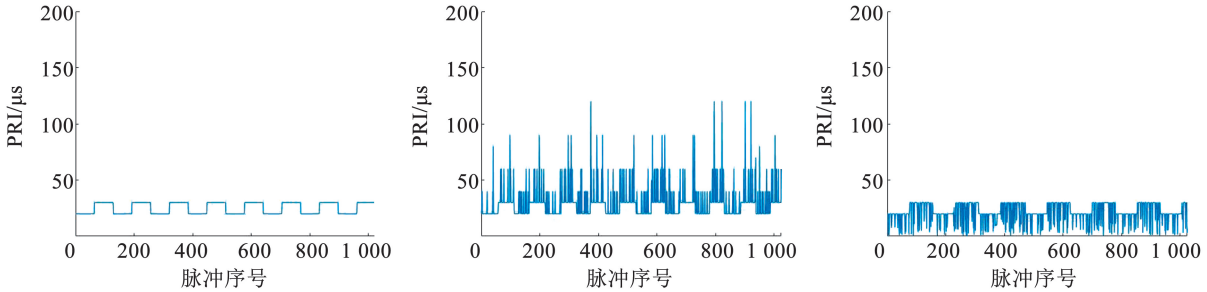


图 3　PRI 参数变化图

Fig. 3　Variation of the PRI parameter

2　自注意力多尺度空洞卷积网络

2.1　总体网络架构

针对在实战侦察数据与平时训练数据存在显著分布差异导致雷达工作模式识别准确率低的问题，本文提出了融合自注意力与多尺度空洞卷积的 SAMKDCN 算法，其网络结构如图 4 所示。该设计旨在增强模型对分布变化的泛化能力。

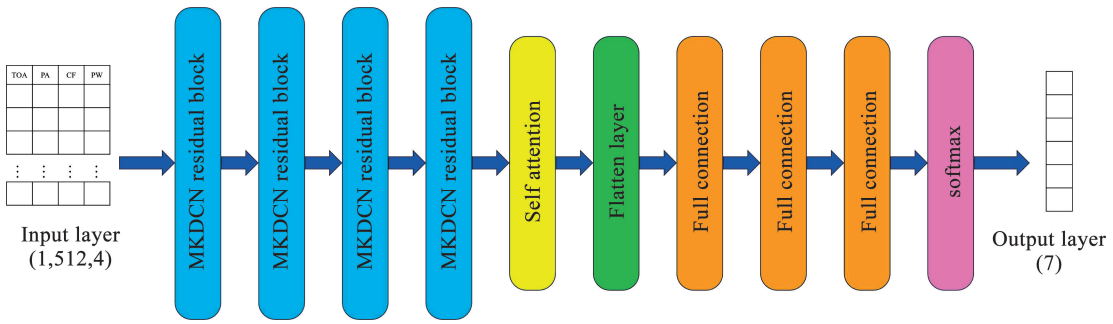


图 4　SAMKDCN 结构图

Fig. 4　Structure diagram of SAMKDCN

该网络以多尺度空洞卷积残差块（MKDCN residual block）作为解决问题的基础网络模块，该模块能够有效地从变化多样且高度重叠的参数信息中提取可分离的雷达工作模式特征，实现模式识别；在使用 MKDCN residual block 完成多次特征提取与维度缩减后，网络将特征传递给自注意力层（self attention，SA），该层能够捕捉并强化序列中的长期依赖关系，筛选出更为关键的特征图，进一步提升特征的表示能力；最后，特征通过全连接层（full connection，FC）进行汇总与分类，完成工作模式的识别。表 1 详细介绍了所提网络每一层的输出形状。

该网络使用交叉熵分类损失函数，其表达式为

$$\mathrm{Loss}_{\mathrm{CE}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{c=1}^{C} q_{i,c}\log(p_{i,c}) \tag{1}$$

式中：N 为训练批次中独立样本数量；C 为类别总数；$q_{i,c}$ 表示第 i 个样本的真实标签在类别 c 上的独热编码（即仅正确类别为 1，其余为 0）；$p_{i,c}$ 为模型对第 i 个样本在类别 c 上的预测概率，通常由 Softmax 函数生成。

表 1　SAMKDCN 结构参数

Tab. 1　Architecture parameters of SAMKDCN model

网络层	输出形状
输入层	(1,512,4)
MKDCN residual block1	(64,256,4)
MKDCN residual block2	(128,128,4)
MKDCN residual block3	(256,64,4)
MKDCN residual block4	(512,32,4)
Self attention	(512,32,4)
Flatten layer	(65 536)
Full connection1	(4 096)
Full connection2	(4 096)
Full connection3	(7)
Softmax	(7)

2.2　多尺度空洞卷积残差块

MKDCN residual block 作为 SAMKDCN 架构的基础网络模块，融合了多种网络模型，其结构图如图 5所示。

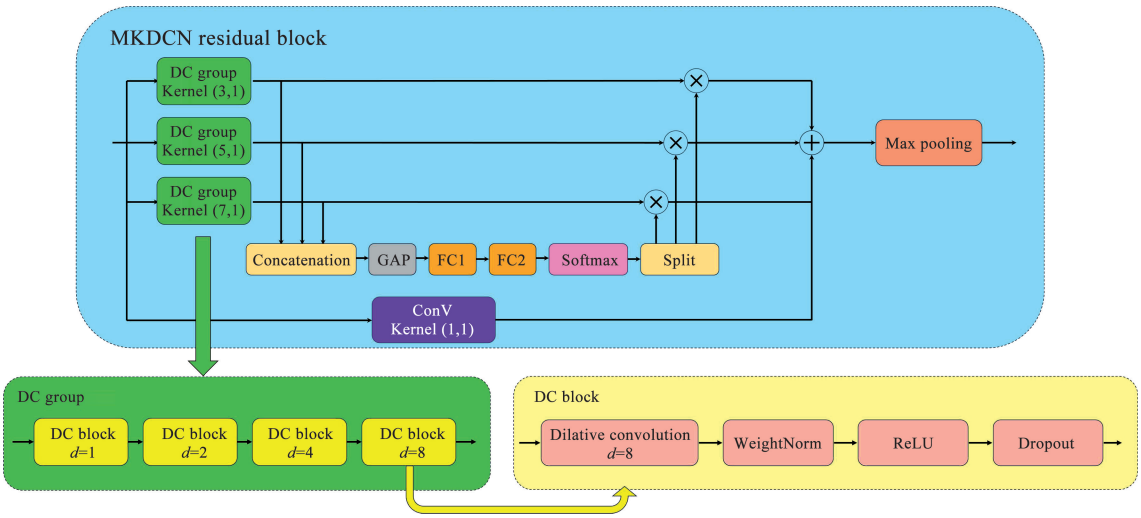


图 5 MKDCN residual block 结构图

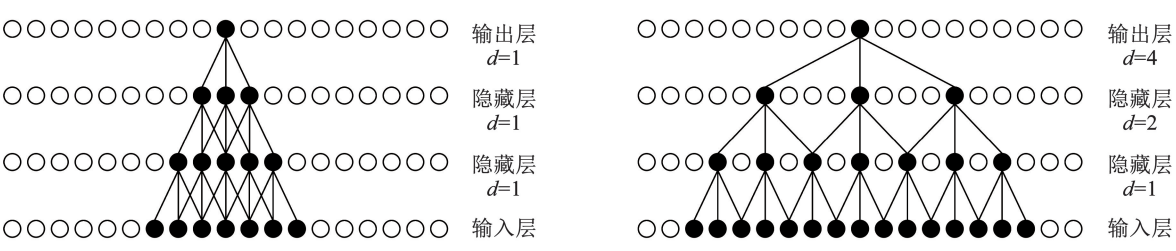
Fig. 5 Structure diagram of MKDCN residual block

首先,该模块借鉴了 TCN[13] 模型的基础模块,引入空洞卷积、标准化层和随机失活层,并对空洞卷积组排列方式进行优化,实现了时域感受野从局部到全局的渐进式扩展,突破了 TCN 依赖残差块间级联实现感受野扩展的固有范式,规避了因残差跳跃导致的感受野缩小;其次,该模块借鉴了 SKNet[14] 模型,引入多尺度特征融合,进一步增强了模型的鲁棒性和泛化能力;再次,该模块借鉴了 ResNet[15] 模型,引入残差结构,解决深度神经网络训练过程中的梯度消失或爆炸问题,确保信息能够在网络中顺畅流通;最后,使用最大池化层对特征图进行下采样,既保留了关键信息又减少了计算负担,促进了模型对抽象特征的捕获能力。

2.2.1 空洞卷积

在进行 MKDCN residual block 深入探究之前,本小节先阐述一种关键的卷积神经网络技术——空洞卷积(dilated convolution,DC)。在采用传统 CNN 网络进行识别任务时,尽管通过卷积层和池化层实现的下采样策略能够有效增大感受野,从而捕获更广泛的数据特征,但这种做法却不可避免地引发了一个显著弊端:数据细节信息显著丢失。这种细节信息的损失,在极端或复杂场景下尤为明显,直接削弱了系统的识别性能,并降低了其整体的鲁棒性,使系统在面对复杂多变的环境时更加脆弱,难以维持稳定高效的识别能力。为解决传统下采样方法中普遍存在的数据细节信息严重丢失的难题,一种创新性的卷积技术——空洞卷积,于 2017 年在国际学习表征会议上被正式提出[16]。

空洞卷积通过引入扩张率(dilation rate)这一独特参数,其定义了卷积核处理数据时各值的间距。设 d 为扩张率,当 $d=1$ 时,退化为普通卷积。图 6 展示了 4 层普通卷积网络与 4 层扩张率递增的空洞卷积网络,两个网络的卷积核长度为 3,从图 6(a)可以看出,普通卷积网络输出层的感受野为 7 个单元,从图 6(b)可以看出,空洞卷积网络输出层的感受野为 15 个单元。因此,在不增加卷积核物理尺寸的前提下,空洞卷积实现了感受野的显著扩展,相应地,也可以使得在相同感受野大小的前提下,空洞卷积比普通卷积的参数量更少,优化了计算效率与资源利用。



(a) 普通卷积网络 (b) 空洞卷积网络

图 6 普通卷积网络和空洞卷积网络的对比图

Fig. 6 Comparison of regular versus dilated convolutional networks

2.2.2　空洞卷积组

在深入了解空洞卷积的基础上，本文对 MKDCN residual blocks 中的空洞卷积组（dilated convolution group，DC group）的结构进行讲解。相较于传统 TCN 残差块，DC group 展现出显著的创新性，其结构如图 7，图 8 所示。

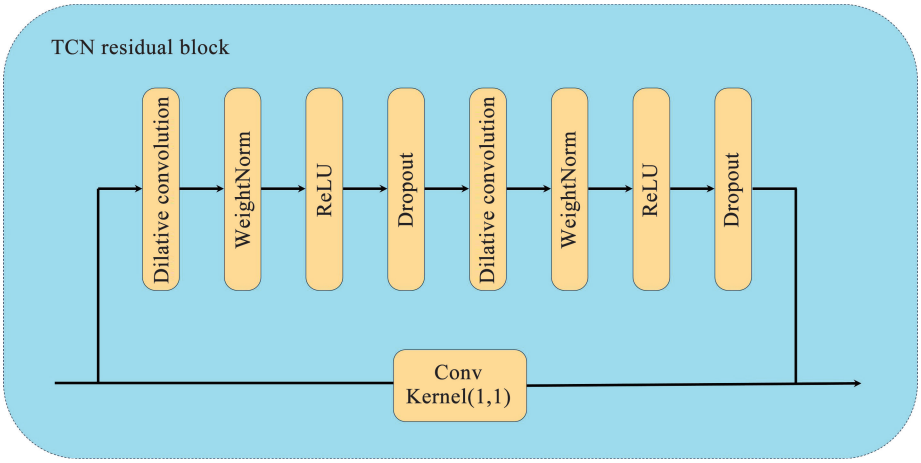


图 7　TCN 残差块结构图

Fig. 7　Structure diagram of TCN residual block

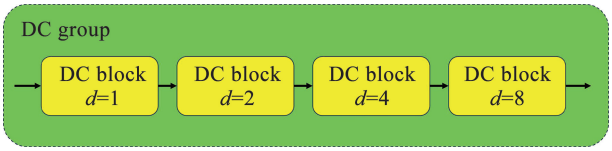


图 8　空洞卷积组结构图

Fig. 8　Structure diagram of DC group

在 TCN 残差块的设计中，通常连续使用两次具有相同扩张率的空洞卷积，以捕捉局部上下文信息。然而，MKDCN residual blocks 在设计上区别于传统的 TCN 残差块，其连续使用 4 次扩张率呈倍数递增的空洞卷积。这样每个 MKDCN residual blocks 均可以独立地通过空洞卷积渐进式扩展时域感受野，而不依赖残差块间级联来实现感受野的扩展，规避了因残差跳跃导致的感受野缩小。

DC block 借鉴了 TCN 模型中的基础模块，引入标准化层和随机失活层，与空洞卷积融合，构建空洞卷积块，其结构如图 9 所示。

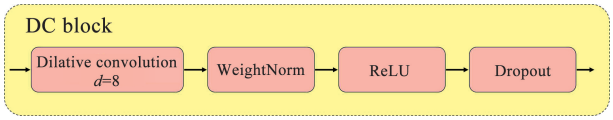


图 9　DC block 结构图

Fig. 9　Structure diagram of DC block

2.2.3　多卷积核选择与残差结构

在全面剖析 DC group 的运作机制与性能优势后，本节聚焦于 MKDCN residual block 进行探讨，其结构图如图 10 所示。

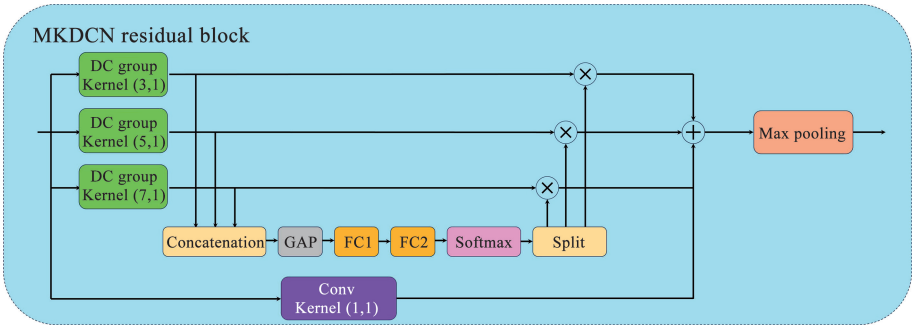


图 10　MKDCN residual block 结构总图

Fig. 10　Structure general diagram of MKDCN residual block

该模块主结构设计借鉴了 SKNet 模型与 ResNet 模型的优点，引入了多卷积核特征提取与残差结构。首先，输入数据通过卷积核尺寸分别为（3，1）、（5，1）、（7，1）的 DC group 进行初步特征提取；其次，Concatenation 操作将这些不同尺寸卷积核输出的多组特征图进行拼接，形成更高维度的特征图，以捕捉更丰富的信息；随后，使用全局平均池化（global average pooling，GAP）有效压缩这些高维特征图，将其转换为具有代表性的值，既降低了维度又保留了关键信息；接着，两个连续的全连接层（fully

connected,FC),即 FC1 和 FC2,进一步处理 GAP 的结果,处理后的结果通过 softmax 层,转换为各个特征图的归一化权重;之后,Split 操作将这些归一化的权重值重新分配给之前不同尺寸卷积核提取的特征图,每个特征图根据分配的权重进行加权处理;最后,该模块还引入了残差结构,允许原始输入直接与经过加权处理的特征图进行求和,这一设计显著增强了模型的特征表示能力和泛化性能,使得模型能够更好地适应复杂多变的数据环境。

2.3 自注意力机制

MKDCN residual blocks 采用长方形卷积核设计,这种设计旨在时间维度上对数据执行多次特征提取与维度缩减操作,因此可以使用自注意力层(self attention,SA)来处理生成的 512 张特征图。自注意力层能够精准捕捉并强化这些特征图中的长期依赖关系,筛选出更为关键的特征图,进而显著增强特征的表示能力。

深度学习中的注意力机制是一种模仿人类视觉和认知系统的方法,其允许神经网络在处理输入数据时集中注意力于相关的部分。通过引入注意力机制,神经网络能够自动地学习并选择性地关注输入中的重要信息,提高模型的性能和泛化能力。其核心公式如式(2)所示。

$$\mathrm{Attention}(\boldsymbol{Q},\boldsymbol{K},\boldsymbol{V}) = \mathrm{Softmax}\left(\frac{\boldsymbol{Q}\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}}{\sqrt{d_{\mathrm{k}}}}\right)\boldsymbol{V} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{Q}$ 为 Query,$\boldsymbol{K}$ 为 Key,$\boldsymbol{V}$ 为 Value,d_{k} 为向量的维度。

而 SA 的核心优势在于其允许序列中的每个元素直接与其他所有元素建立关联,超越了传统方法中仅依赖于相邻元素的限制,这种全局性的关联捕捉能力极大地丰富了模型的上下文理解能力。具体来说,即 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{K}$、$\boldsymbol{V}$ 都是输入矩阵 $\boldsymbol{X}$ 通过线性变化得到。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Q} &= \boldsymbol{X}\boldsymbol{W}^{Q}\\ \boldsymbol{K} &= \boldsymbol{X}\boldsymbol{W}^{K}\\ \boldsymbol{V} &= \boldsymbol{X}\boldsymbol{W}^{V}\end{aligned} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{W}^{Q}$、$\boldsymbol{W}^{K}$、$\boldsymbol{W}^{V}$ 为网络要学习的参数。

3 仿真与分析

3.1 数据集的建立

由于雷达参数的保密性,缺乏可直接使用的数据集,本文参考公开文献[9 - 12],构建某型雷达三参数表,具体如表 2 所示。

表 2 某型 AESA 雷达工作模式参数范围

Tab. 2 Range of operating mode parameters for a certain type of AESA radar

工作模式(功能层)	任务参数				波形参数			脉冲参数			占空比/%
	辐射功率/kW	天线波束	波位编排	扫描方式	PRI/μs	PRI 类型	PN/个	PW/μs	CF/GHz	CF 类型	
VS	100	矩形天线	全波位扫描	逐行扫描	[4,10]	固定	[64,128]	[1,2]	[9.5,10.5]	固定	[10,50]
HRWS	100	矩形天线	全波位扫描	逐行扫描	[4,10]	3 ~ 5 参数组变	[24,60]	[1,2]	[9.5,10.5]	脉组捷变	[10,50]
MRWS	100	矩形天线	全波位扫描	逐行扫描	[50,200]	3 ~ 5 参数组变	[15,30]	[1,20]	[9.5,10.5]	脉组捷变	[0.5,40]
TWS	100	矩形天线	全波位扫描	逐行扫描	[5,200]	3 参数组变	[6,12]	[1,20]	[9.5,10.5]	脉组捷变	[1,25]
STT	100	矩形天线	目标波位	不扫描	[5,200]	固定	[8,16]	[1,20]	[9.5,10.5]	固定	[1,25]
MTT	100	矩形天线	多个目标波位	不扫描	[5,200]	固定	[8,16]	[1,20]	[9.5,10.5]	固定	[1,25]
TAS	100	矩形天线	全波位扫描 + 目标波位	逐行扫描	搜索:[4,10] 跟踪:[5,200]	固定	搜索:[64,128] 跟踪:[8,16]	[1,20]	[9.5,10.5]	脉组捷变	搜索:[10,50] 跟踪:[1,25]

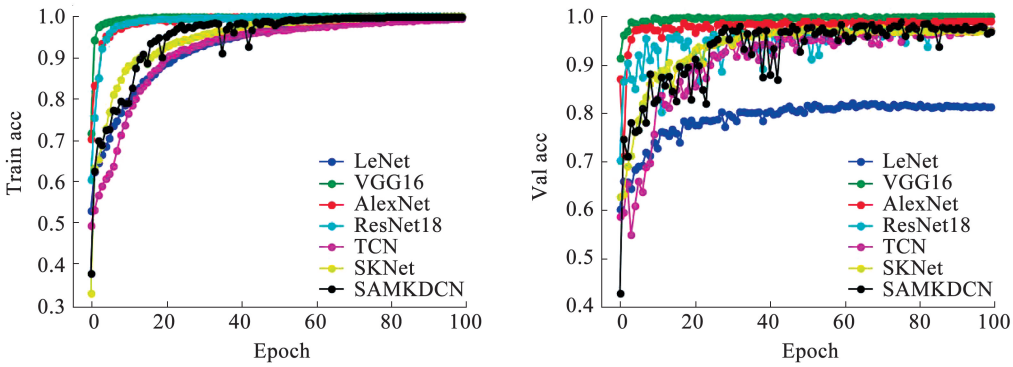
表 2 中,PN 为针对一个波位发射的脉冲个数,使用表 2 数据可生成无丢失与无虚假的 PDW 脉冲数据。而后再针对该数据进行丢失和虚假处理,丢失率和虚假率以 0.1 为进度从 0 到 0.5,共形成 36 种情况。每种情况下有 7 000 个样本,其中每种工作模式在其所给参数范围内随机选择,生成 1 000 个样本,7 种模式共 7 000 个样本,按照 8∶1∶1 分配为训练集、验证集、测试集。

3.2　算法对比

3.2.1　训练过程

本文选择 AlexNet[17]、ResNet18[15]、VGG16[18]、LeNet[19]、TCN[13]、SKNet[14]与本文所提网络模型进行对比分析。为适应 PDW 流数据集，上述网络中卷积、池化等运算均调整为一维。所有网络均使用 Adam 优化器，学习率随轮次的增加以线性函数的形式逐渐减小，从10^{-4}减小到10^{-6}，Batch 的大小为 128，训练轮次为 100 轮。

考虑到战时与平时环境存在显著差异，认为平时侦察接收机接收的信号有较高的信噪比，此时 PDW 流数据中脉冲丢失与脉冲虚假的现象不明显，仅收集到小丢失率与虚假率的 PDW 数据样本。因此，训练过程中使用 0% 丢失率 0% 虚假率、10% 丢失率 0% 虚假率、0% 丢失率 10% 虚假率、10% 丢失率 10% 虚假率 4 种情况的 PDW 流数据样本进行训练。训练过程中训练集和验证集准确率随训练轮次的关系图如图 11 所示。



(a) 训练集准确率随训练轮次的关系图　　(b) 验证集准确率随训练轮次的关系图

图 11　训练过程中训练集和验证集准确率结果图

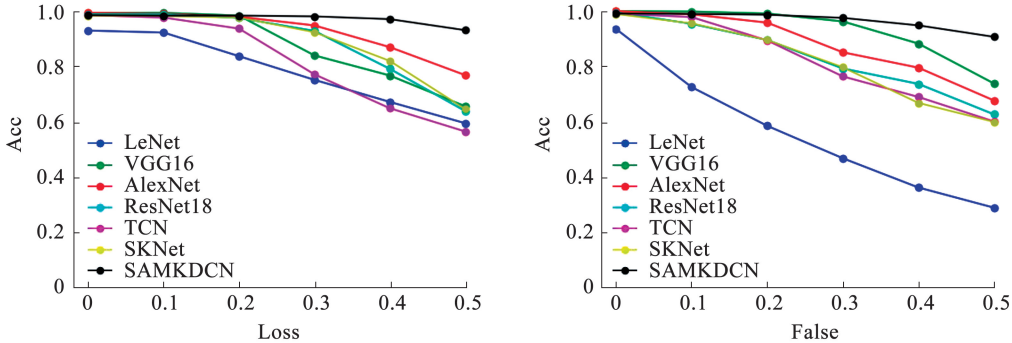
Fig. 11　Train and validation set accuracy over the course of training

根据图 11(a)，所有网络均已在训练过程中达到收敛；而在图 11(b)中可见，LeNet 网络性能明显较差，其余网络在已学习的 4 种不同丢失和虚假条件下的验证准确率均超过 95%。

3.2.2　测试情况

考虑到战时与平时环境存在显著差异，认为战时敌方会对我方侦察设备进行干扰，造成大量丢失与虚假，因此，测试时除测试训练过的数据外，还需测试更大丢失率和虚假率的数据。在不同丢失脉冲和虚假脉冲条件下的实验结果如图 12 所示。

从图 12 可以看出，无论是丢失脉冲还是虚假脉冲条件，其他6种网络的测试集准确率都不是随着环境的复杂情况均匀下降，而在不同的位置出现“拐点”，这是因为训练数据丢失脉冲和虚假脉冲比例在 0% ~10%，测试数据与训练数据条件相同或相近时，准确率较高，这意味着上述 6 种网络未学习到雷达工作模式的真正特征，而是仅仅拟合了训练集的情况。而从 SAMKDCN 网络的测试结果可以看出，尽管外界环境变得复杂，其准确率依然保持相对稳定，这表明该网络已成功学习到雷达工作模式识别的核心特征，并展现出强大的泛化能力。然而，值得注意的是，在低丢失率和虚假率条件下，其准确率略逊于其他网络。这一现象归因于在提升网络泛化能力的过程中，不可避免地牺牲了一定的准确率。



(a) 虚假率0%，丢失率与准确率的关系图　　(b) 丢失率0%，虚假率与准确率的关系图

图 12　测试集准确率结果图

Fig. 12　Test set accuracy

3.2.3 复杂度分析

为量化评估模型的计算复杂度，表 3 列出了本文所提出的自注意力多尺度空洞卷积网络(SAMKDCN)与若干主流对比模型的参数量详细对比结果。

如表 3 所示，各模型参数量差异显著：经典轻量级模型 LeNet 参数量最低，约为 1 075 万；VGG16 与 SKNet 模型的参数量相近，分别约为 18 929 和 18 964 万；ResNet18 模型参数量约为 17 165 万；而 AlexNet 与 TCN 模型参数量较大且接近，分别约为 35 351 和 35 278 万。本文提出的 SAMKDCN 模型参数量最高，约为 37 367 万。这一结果反映出 SAMKDCN 模型结构相对复杂，其参数量显著高于其他对比模型。该复杂度的提升主要源于模型中深度融合的自注意力机制与多尺度空洞卷积模块，这些设计旨在提升模型在高干扰、高信号动态性环境下对雷达工作模式特征的鲁棒表征与泛化识别能力。尽管引入了更高的参数负担，但如后续消融实验与性能对比结果所示，该复杂度的增加为模型在目标应用场景中达成预期性能优势提供了必要的基础。

表 3 算法复杂度

Tab. 3 Algorithm complexity

算法	参数量
LeNet	10 751 258
VGG16	189 292 614
AlexNet	353 511 814
ResNet18	171 651 916
TCN	352 777 798
SKNet	189 642 230
SAMKDCN	373 668 294

3.3 SAMKDCN 识别性能分析

3.3.1 复杂条件下识别性能分析

为继续研究 SAMKDCN 网络在复杂条件下的识别性能，仍仅使用 0% 丢失率 0% 虚假率、10% 丢失率 0% 虚假率、0% 丢失率 10% 虚假率、10% 丢失率 10% 虚假率 4 种情况的 PDW 流数据样本进行训练，在不同的丢失脉冲和虚假脉冲比例下进行测试，该网络识别性能三维曲面图如图 13 所示。

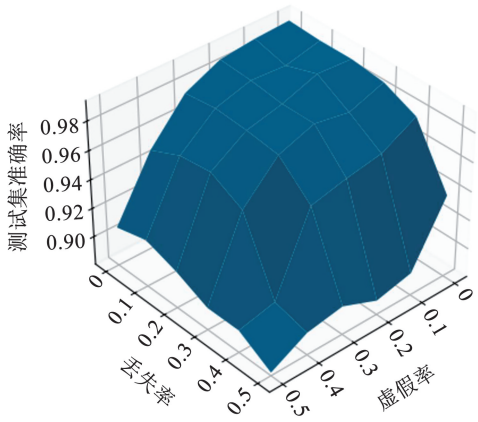
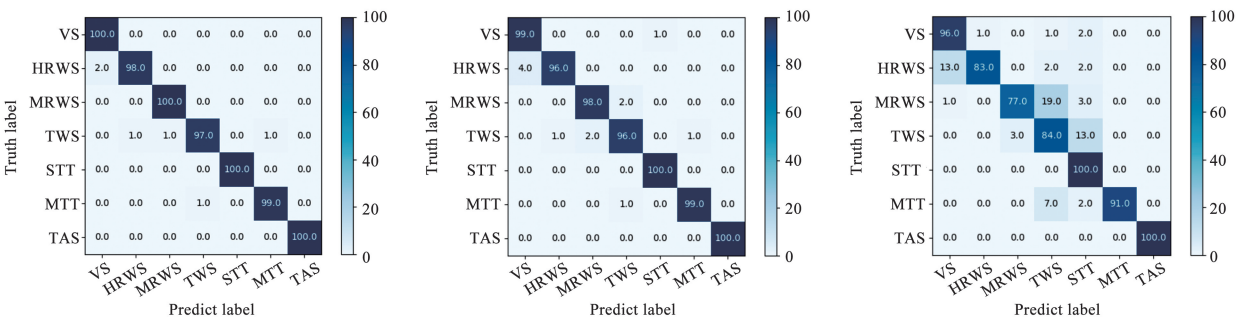


图 13 SAMKDCN 识别性能三维曲面图

Fig. 13 3D surface graph of SAMKDCN recognition performance

SAMKDCN 网络的平均识别率约为 95.11%。在理想环境下，其准确率最高可达 99.14%。当丢失率与虚假率在 0% ~40% 范围内时，准确率总体保持稳定，仅在 40% 丢失率与 40% 虚假率的特定情况下，准确率低于平均值。然而，在 50% 丢失率与 50% 虚假率的极端条件下，测试效果最差，准确率为 88.23%。这些测试结果充分说明，SAMKDCN 网络在雷达工作模式识别任务中的出色表现。其不仅有效提取了雷达工作模式的本质规律，展现出强大的特征学习能力，而且网络具有一定的鲁棒性，能够在一定程度上抵抗数据丢失和虚假信息的影响，保持相对稳定的准确率。尽管在极端复杂条件下，如高丢失率和高虚假率的场景下，网络的性能有所降低，但其仍能够提取目标的有效特征进行分类，表现出较强的泛化能力和适应性。

为进一步探究脉冲丢失与虚假对 SAMKDCN 网络的影响，分别在丢失率与虚假率为 0%/0%、20%/20% 及 40%/40% 的场景下进行测试。图 14 给出了相应的雷达工作模式识别混淆矩阵。



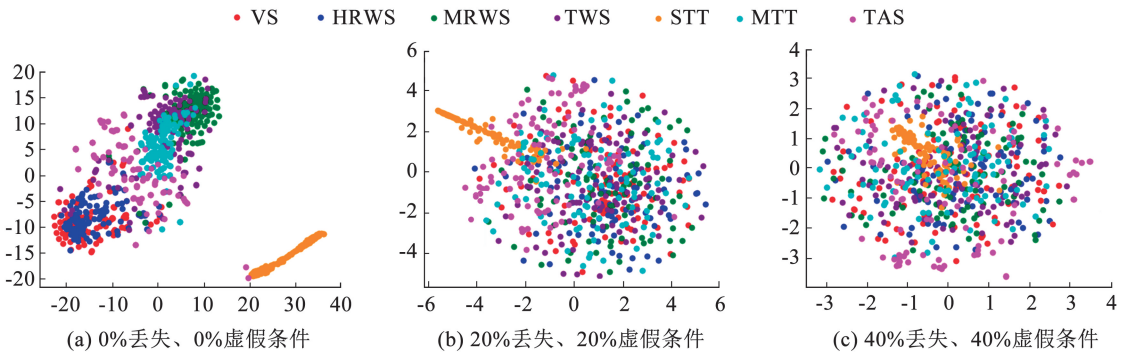
(a) 0%丢失0%虚假条件 (b) 20%丢失20%虚假条件 (c) 40%丢失40%虚假条件

图 14 工作模式识别混淆矩阵图

Fig. 14 Confusion matrix for working mode recognition

由图 14 结果可以看出，尽管工作模式识别的整体准确率随环境复杂度上升而有所下降，但不同模式受到的影响程度并不相同。例如，本文所提出的网络对 STT、MTT 和 TAS 模式的识别准确率影响不大，始终保持在 90% 以上。另一方面，VS 与 HRWS 之间、MRWS 与 TWS 之间出现了较明显的混淆现象。由于这两组模式本身参数较为接近，在存在信息丢失和虚假干扰的条件下发生混淆符合预期。

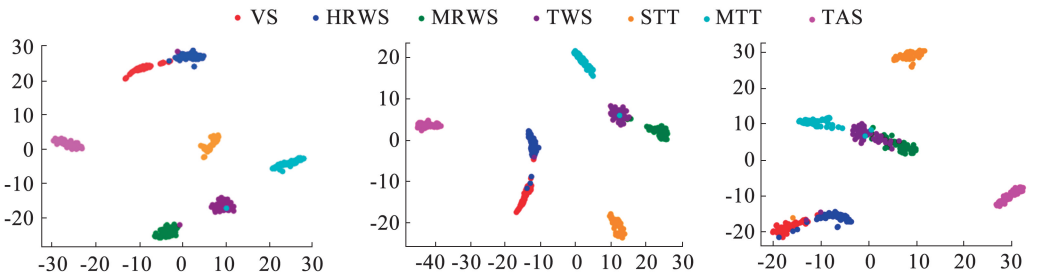
图 15 与图 16 分别给出了 0% 丢失率与 0% 虚假率，20% 丢失率与 20% 虚假率，以及 40% 丢失率与 40% 虚假率的条件下，PDW 原始数据与本文网络 4096 高维特征的 T-SNE 二维投影散点图。



(a) 0%丢失、0%虚假条件　(b) 20%丢失、20%虚假条件　(c) 40%丢失、40%虚假条件

图 15　PDW 原始数据 T-SNE 二维投影散点图

Fig. 15　T-SNE 2D projection scatter plot of the raw PDW data



(a) 0%丢失、0%虚假条件　(b) 20%丢失、20%虚假条件　(c) 40%丢失、40%虚假条件

图 16　本文网络高维特征的 T-SNE 二维投影散点图

Fig. 16　T-SNE 2D projection scatter plot of the high-dimensional features extracted by the proposed network

通过 T-SNE 降维可视化，可深入分析数据表征的分布特性。对比图 15 与图 16 可知：首先，直接基于原始四维 PDW 参数进行降维时，散点图的模式分类会随着脉冲丢失与虚假脉冲的增多而显著混杂，不同模式之间边界模糊。然而，经本文网络提取的高维特征在降维后的散点分布中，即便在相同干扰条件下，模式间仍保持较好的聚类可分性，仅出现少量离散点混入。该对比结果直观表明，本文算法所提取的特征具有更强的判别力与鲁棒性，能够有效支撑稳定、准确的雷达工作模式识别。

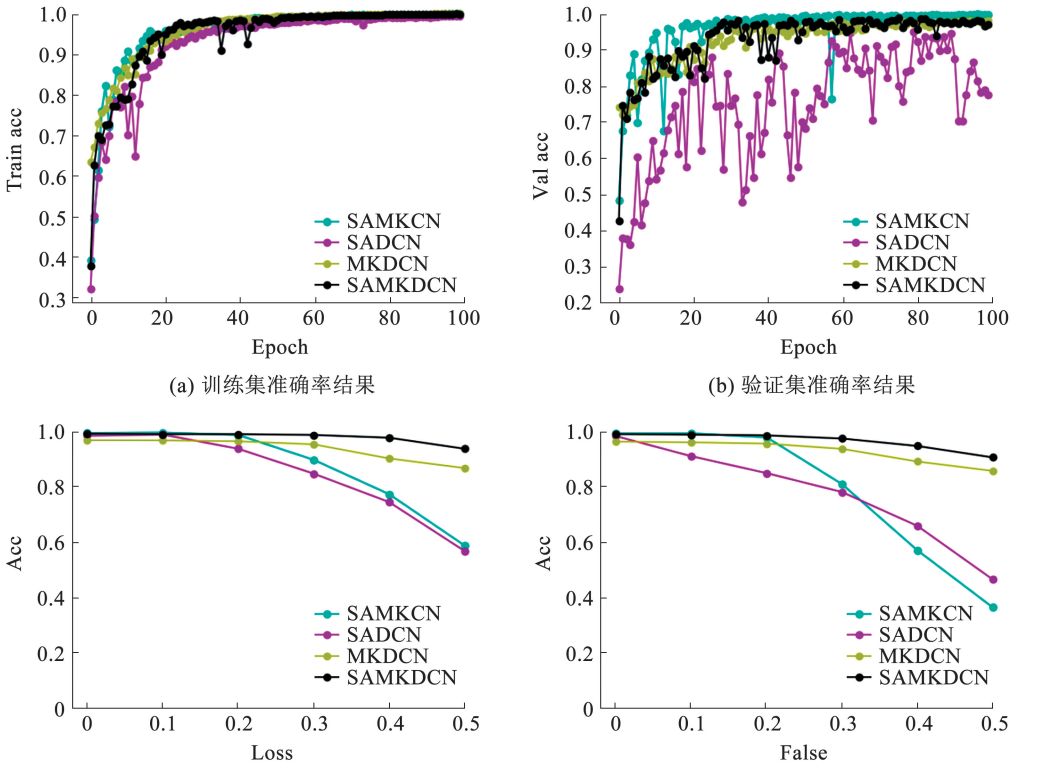
3.3.2　消融实验

为验证本文所提 SAMKDCN 网络模型中关键创新模块（自注意力机制、多尺度卷积、空洞卷积）的有效性及其对最终识别性能的贡献，本节设计了系统的消融实验。

为分析模型各模块的作用，本文构建了 3 个消融模型进行对比分析：无自注意力机制的多尺度空洞卷积网络（multi kernal dilative convolution network，MKDCN）移除了自注意力模块，但保留了多尺度空洞卷积结构；无多尺度结构的自注意力空洞卷积网络（self-attention dilated convolution network，SADCN）省略了多尺度设计，仅使用单一尺度的空洞卷积并与自注意力相结合；使用普通卷积的自注意力多尺度卷积网络（self-attention multi kernel convolution network，SAMKCN）则将空洞卷积替换为标准卷积，同时保留了自注意力机制与多尺度架构。

消融实验结果如图 17 所示。图 17 对比了不同模型的识别性能。MKDCN 的识别准确率较 SAMKDCN 显著下降，凸显了自注意力机制的关键作用，该结果表明，在高丢失率/虚假率的复杂环境下，缺乏自注意力机制会导致模型性能显著降低；类似地，SADCN 相较于 SAMKDCN 的准确率也出现了大幅下降，证实了多尺度结构的重要性，这表明缺失多尺度结构会削弱网络捕获不同雷达信号特征模式的能力，进而导致模型的识别准确率降低；对比 SAMKCN 与 SAMKDCN 的性能可以发现：当丢失率/

虚假率≤0.2 时,SAMKCN 的准确率更高;而当丢失率/虚假率 >0.2 时,SAMKDCN 的准确率则更具优势,这种差异源于本文算法引入的空洞卷积组。该结构有效增强了模型在极端条件(高丢失率/虚假率)下的泛化与识别能力,但同时牺牲了在干扰程度较轻(丢失率/虚假率≤0.2)条件下的部分性能。



(a) 训练集准确率结果 (b) 验证集准确率结果

(c) 虚假率0%时,测试集准确率与丢失率的关系图 (d) 丢失率0%时,测试集准确率与虚假率的关系图

图 17 消融实验结果

Fig. 17 Results of the ablation study

4 结 论

本文针对复杂电磁环境下 AESA 雷达空空工作模式识别难题,重点解决了由于平时与战时雷达信号分布偏移导致的模型准确率下降与鲁棒性不足问题,提出了一种基于 SAMKDCN 的识别方法。本研究的核心工作与结论如下。

1)模型设计方面,SAMKDN 通过多尺度空洞卷积残差块结构构建层次化特征提取框架,在扩展感受野的同时引入随机失活机制以增强抗干扰能力,并结合自注意力层实现对关键时序特征的聚焦与权重校准,从而提升模型在分布偏移情况下的判别能力与稳定性。

2)实验验证方面,本文所提方法在多种电磁干扰条件下均表现出优良性能。在理想信号环境下识别准确率达 99.14%;在 0% ~50% 脉冲丢失与虚假脉冲干扰下平均识别率为 95.11%;在 50% 丢失率与 50% 虚假率的极端干扰下,仍保持 88.23% 的准确率,显著优于多种主流网络模型,体现出良好的泛化性与实战适用性。

参考文献

[1] YUE W, LANYING C. Status in US AESA fighter radar and development trends[C]//IET International Radar Conference 2013. Stevenage, UK: IET, 2013: C0487

[2] GALATI G. The radar flies: Birth and development of airborne and of anti-submarine warfare systems[M]// GALATI G. 100 Years of radar. Cham: Springer International Publishing, 2015: 147

[3] SHERMAN J. Navy determines SPY-6 radar three times stronger than original requirement[J]. Inside the Navy, 2019, 32(18): 1

[4] 熊敬伟, 潘继飞, 毕大平, 等. 面向雷达行为识别的多尺度卷积注意力网络[J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50(6): 62
XIONG Jingwei, PAN Jifei, BI Daping, et al. Multi scale convolutional attention network for radar behavior recognition[J]. Journal of Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2023, 50(6): 62

[5] 卓奕弘, 熊敬伟, 潘继飞, 等. 基于多尺度注意力机制 ResNet 的雷达工作模式识别[J]. 雷达科学与技术, 2024, 22(2): 170
ZHUO Yihong, XIONG Jingwei, PAN Jifei, et al. Radar working pattern recognition based on multi-scale attention mechanism ResNet[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(2): 170

[6] ZHANG Y, HUO W, ZHANG C, et al. Radar operation mode recognition via multifeature residual-and-shrinkage convnet[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2023, 16: 6073. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3286913

[7]ZHANG Z, ZHU M, LI Y, et al. Joint recognition and parameter estimation of cognitive radar work modes with LSTM-transformer[J]. Digital Signal Processing, 2023, 140: 104081. DOI: 10.1016/j.dsp.2023.104081

[8]ZHANG Z, LI Y, ZHAI Q, et al. Mode recognition of multifunction radars for few-shot learning based on compound alignments[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(6): 5860. DOI: 10.1109/TAES.2022.3180275

[9]李虎. 基于机器学习的多功能雷达工作模式识别研究[D]. 成都：电子科技大学, 2023
LI Hu. Research on multi functional radar working pattern recognition based on machine learning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023

[10]田卫东. 相控阵雷达工作模式识别与意图推理技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学, 2022
TIAN Weidong. Research on pattern recognition and Intent reasoning technology of phased array radar[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2022

[11]秦涛. 多功能相控阵雷达工作模式建模与识别方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2022
QIN Tao. Research on modeling and recognition method of multi functional phased array radar working mode[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022

[12]李雪琼. 基于机器学习的雷达辐射源分选与识别技术研究[D]. 长沙：国防科技大学, 2020
LI Xueqiong. Research on radar radiation source sorting and recognition technology based on machine learning[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020

[13]BAI S, KOLTER J Z, KOLTUN V. An empirical evaluation of generic convolutional and recurrent networks for sequence modeling[PP/OL]. (2018-03-04)[2024-01-15]. https://arxiv.org/abs/1803.01271. DOI: 10.48550/arXiv.1803.01271

[14]LI X, WANG W, HU X, et al. Selective kernel networks[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2019: 510

[15]HAN J W, PARK C H. A unified method for deinterleaving and PRI modulation recognition of radar pulses based on deep neural networks[J]. IEEE Access, 2021, 9: 89360. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3091309

[16]YU F, KOLTUN V, FUNKHOUSER T. Dilated residual networks[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2017: 472

[17]GUO L, CHEN X. Low probability of intercept radar signal recognition based on the improved AlexNet model[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Digital Signal Processing. New York, NY: ACM, 2018: 119

[18]张焕. 基于图像处理与深度学习的典型军事目标识别[D]. 南京：南京理工大学, 2021
ZHANG Huan. Typical military target recognition based on image processing and deep learning[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021

[19]LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(11): 2278. DOI: 10.1109/5.726791

（编辑　吕雪梅）

封面图片说明

封面图片来自本期论文“交替极混合磁路记忆电机多磁化状态优化设计及减振降噪”。针对传统交替极永磁电机弱磁调节能力受限、低矫顽力记忆电机转矩密度与抗退磁能力不足，以及单一磁化状态优化难以兼顾全工况声振性能的问题，提出一种交替极混合磁路记忆电机拓扑。该结构将 NdFeB-AlNiCo 混合永磁体、“一型”并联-“V 型”串联磁路、分段 Halbach 充磁以及定/转子辅助槽相结合，构建可随磁化状态重构的动态磁路。封面图片以三维爆炸图展示电机结构及其在电动汽车电驱系统中的应用位置，右下角声压级云图体现电磁-结构-声学耦合分析结果。本研究通过多极端磁化状态分级优化，在保持宽域调磁和稳定转矩输出的同时，有效降低径向电磁力、定子齿部振动和噪声声压级，体现了面向高性能电动汽车驱动电机的低振噪协同设计新思路。

（图文提供：张政昊，高锋阳，岳文瀚，高建宁，陈湛江. 兰州交通大学自动化与电气工程学院，东南大学电气工程学院）

DOI:10.11918/202504029

融合时空特征与孪生网络的风机叶片结冰预测

韩华彬,高丙朋,蔡 鑫,孙 凯

(新疆大学 智能科学与技术学院,乌鲁木齐 830017)

摘 要: 为实现对风机叶片结冰状态的精准预测,保障风力发电系统的安全与稳定运行,针对风机叶片结冰预测中存在的特征提取不足、多维传感器分布信息不明确,以及小样本学习中类别不平衡的问题,本文提出一种基于残差图注意力与时空双向序列孪生网络(residual graph attention network bidirectional LSTM siamese network,ResGAT-BiLSTM-SN)的风机叶片结冰预测方法。首先,通过数据清洗、滑动窗口采样和特征工程,对监控与数据采集系统(supervisory control and data acquisition,SCADA)的数据进行处理,构建适用于不同小样本学习任务的风机叶片结冰数据集。其次,基于19个关键变量,通过互信息(mutual information,MI)和权重矩阵构建一个非完全连接的无向图,用以反映传感器数据的空间分布与相关性。最后,结合图注意力网络(graphical attention network,GAT)和双向长短时记忆网络(bidirectional long short-term memory networks,BiLSTM)对SCADA数据进行时空特征提取,构建ResGAT-BiLSTM-SN模型对所构造的风机叶片结冰数据集进行未来24 h的结冰预测。选用2017年工业大数据创新竞赛平台中15号和21号风力机数据进行仿真,验证实验结果表明,在3种小样本学习场景下,ResGAT-BiLSTM-SN模型的F1分数均达到0.9以上,显著优于其他对比模型。相较于GAT-BiLSTM-SN模型,ResGAT-BiLSTM-SN模型在预测性能上有明显提升,验证了本文所提预测模型的有效性与优越性。

关键词: 风机叶片;结冰预测;小样本学习;图注意力网络;孪生网络;特征工程

中图分类号: TM614;TP277 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)05-0138-11

Prediction of ice accretion on wind turbine blades using spatiotemporal features and siamese networks

HAN Huabin, GAO Bingpeng, CAI Xin, SUN Kai

(School of Intelligence Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: The accurate prediction of wind turbine blade icing is essential for the safe and stable operation of wind power systems. To address the challenges of insufficient feature extraction, unclear distribution of multi-dimensional sensors, and class imbalance in few-shot learning scenarios, this paper proposes a prediction method based on a residual graph attention network-bidirectional LSTM-siamese network (ResGAT-BiLSTM-SN). First, the supervisory control and data acquisition (SCADA) data is processed through data cleaning, sliding-window sampling, and feature engineering, resulting in a blade-icing dataset suitable for various few-shot learning tasks. Second, based on 19 key variables, a non-fully connected undirected graph is built using mutual information (MI) and a weight matrix to capture the spatial distribution and correlations among sensor data. By integrating the graph Attention network (GAT) and the bidirectional long short-term memory network (BiLSTM) to extract spatiotemporal features, the ResGAT-BiLSTM-SN model is developed to perform 24-hour-ahead icing prediction on the constructed dataset. Simulation experiments are conducted using the data from turbines No. 15 and No. 21 provided by the 2017 Industrial Big Data Innovation Competition platform. The experimental results show that the ResGAT-BiLSTM-SN model achieves F1 scores above 0.9 across three few-shot learning scenarios, significantly outperforming other baseline models. Compared to the GAT-BiLSTM-SN model, the proposed model demonstrates clear improvements in predictive performance, validating its effectiveness and superiority.

Keywords: wind turbine blades; icing prediction; few-shot learning; graph attention network; siamese network; feature engineering

收稿日期: 2025-04-10;**录用日期:** 2025-08-02;**网络首发日期:** 2025-10-17
网络首发地址: https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251016.1403.004
基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2024D01C28)
作者简介: 韩华彬(1998—),男,硕士研究生
通信作者: 高丙朋,xjugaobp@xju.edu.cn

风电作为清洁能源的重要形式[1]，在实现“双碳”目标中发挥关键作用。然而，在高寒地区，风机叶片表面结冰会导致其质量增加[2]，并破坏原有的空气动力学特性[3]，进而降低风机的运行效率。更为严重的是，叶片结冰可能导致结构损伤[4]甚至引发断裂，并可能造成风机停运，造成严重的安全风险[5]。因此，实现对风机叶片结冰的准确预测，对于保障风电场的安全稳定运行具有重要意义。

风机叶片结冰的预测方法通常划分为基于物理建模方法与基于数据驱动方法。其中，基于物理建模方法可进一步分为直接法和间接法。直接法[6-7]是通过摄像头、红外传感器和振动传感器等设备实时监测叶片表面的结冰情况，从而实现对结冰状态的直接识别与预报。相比之下，间接法[8]则通过利用历史监测数据构建预测模型，以实现对叶片结冰状态的提前预估。随着工业大数据的发展，基于数据驱动的深度学习方法已成为风机叶片结冰预测的主流手段之一。文献[9]提出一种基于选择性深度集成模型的风机叶片结冰故障预测方法，融合多模型学习进行预测。文献[10]提出一种新型深度学习网络模型(parallel CNN-TCN-GRU，PCTG)，实现对风机叶片结冰状态的高精度与长期预测。文献[11]构建一种具有双输入和一维卷积滤波器的卷积神经网络模型，实现对未来 24 h 叶片结冰状态的预测。文献[12]和文献[13]将结合图注意力网络与时间注意力机制相结合，应用于风机叶片结冰预测任务。文献[14]和文献[15]提出了改进后的 BiLSTM 网络，对传感器和机器的寿命进行预测。上述方法主要侧重于对 SCADA 数据的建模，缺乏对风机叶片结冰物理机理特征的研究，未充分考虑到结冰相关特征之间的内在关联。

文献[16]利用专家经验构建与结冰相关的物理特征变量，以提升 SCADA 数据的有效性。文献[17]提出一种结合特征选择与一维残差卷积神经网络(1D ResNet-CNN)的方法，实现对风机叶片结冰状态的自动检测。文献[18]提出一种基于时空特征对齐的迁移学习方法，构建时空注意力模块与 FCNN-LSTM 并行网络的特征提取结构。但这些方法在实际应用中严重依赖大量带标签的训练样本，然而由于传感器故障、数据传输过程中的错误以及较高的标注成本，使得获取足够的高质量样本面临显著挑战。

近年来，小样本学习(few-shot learning，FSL)为深度学习模型[19]在数据有限的情况下提供了新的解决方案。FSL 任务的研究通常使用数据扩充[20]、迁移学习[21](transfer learning，TL)、元学习[22](meta-learning，ML)方法和度量学习。文献[20]使用生成对抗网络(generative adversarial network，GANs)来扩充智能故障诊断任务的数据。文献[21]提出一种结合迁移策略的深度卷积神经网络(CNN)，用于实现小样本条件下的机械故障诊断。孪生网络(siamese network，SN)通过度量学习在嵌入空间中对不同类别样本进行区分，已被广泛应用于 FSL 任务中[23-25]。文献[23]基于 SN 结构设计一种用于小样本故障诊断方法，通过样本对之间的相似度学习实现高效分类。文献[24]和文献[25]采用深度 CNN 作为特征提取器，并结合 SN 作为度量模块来确定样本之间的相似性。上述文献的数据基于人工合成的数据，在真实的多维数据中应用有限。

现有文献对风机叶片结冰的时空特征相关性分析研究较少，同时由于叶片结冰数据有限，会对叶片结冰预测的准确性产生影响。基于 SN 的度量策略可提升有限样本的利用效率，并通过将原始特征空间投影到度量空间来缓解类别不平衡，从而提升 FSL 任务的性能。因此，本文提出一种基于 ResGAT-BiLSTM-SN 模型的风机叶片结冰预测方法，以实现对未来 24 h 结冰状态的预测。

本文首先对风机叶片结冰机理特征进行分析，考虑结冰相关特征之间的内在关联，构建任务相关的数据集，并据此设计 3 种具有代表性的小样本学习场景。其次，利用互信息构建属性图，通过图注意力网络进行空间建模，采用双向长短期记忆网进行时间建模，并结合残差连接机制增强特征表达能力。最后，融合孪生网络对样本对进行相似性度量，并通过共享权重机制提升模型的泛化能力，构建的 ResGAT-BiLSTM-SN 模型实现了空间相关性与时间动态特征的联合建模，显著提升风机叶片结冰的预测性能。

1　数据预处理

1.1　数据来源

本文实验数据[26]由中华人民共和国工业和信息化部提供，并用于首届工业大数据创新竞赛。实验数据涵盖文献[26]中 15 号与 21 号风机在连续运行周期内的实时监测数据，数据采集频率约为 7 s，每个数据集包含共 26 个变量，包括风机运行参数、环境参数及状态参数等，具体变量名称如表 1[16]所示。每个变量可以视为一个传感器。因此“变量”和“传感器”在此后不再区分。此外，文献[26]还提供了结冰和非结冰期间的完整标签。

表 1 风机叶片结冰数据集

Tab. 1 Wind turbine blade icing dataset

序号	变量	序号	变量	序号	变量
1	风速	12	叶片 2 速度	23	变桨系统充电器 3 温度
2	发电机转速	13	叶片 3 速度	24	变桨系统充电器 1 直流
3	功率	14	变桨电机 1 温度	25	变桨系统充电器 2 直流
4	对角风	15	变桨电机 2 温度	26	变桨系统充电器 3 直流
5	25 s 平均风向角	16	变桨电机 3 温度	27	叶片变桨角度均值
6	偏航位置	17	x 方向加速度	28	变桨电机温度均值
7	偏航速度	18	y 方向加速度	29	风速-功率比
8	叶片 1 变桨角度	19	环境温度	30	风速-转速比
9	叶片 2 变桨角度	20	机舱温度	31	风速-功率-转速比
10	叶片 3 变桨角度	21	变桨系统充电器 1 温度	32	温差
11	叶片 1 速度	22	变桨系统充电器 2 温度	33	功率差

注:变量名称参考国标 GB/T 43904—2024《风力发电机组运行参数监测与评估规范》及文献[16]。

1.2 特征工程

深度学习能够减少对特征工程的依赖,但忽视叶片结冰的物理机制可能影响模型预测性能。为此,结合专家经验筛选出 26 个特征,并通过特征交互分析与数据建模方法构建一系列衍生特征。

首先,基于风机叶片的变桨角度与变桨电机温度的相关性,构建交互特征:变桨角度均值$\bar{\theta}$和变桨电机温度均值$\bar{T}$,作为整体变桨系统的代表特征;其次,构建风速与功率比值(风速-功率比 α_1)、风速与发动机转速比值(风速-转速比 α_2),以及风速、功率与发动机转速的组合比值(风速-功率-转速比 α_3);随后,引入机舱温度与环境温度的差值 T_d 作为特征;最后,通过最小二乘法拟合正常功率曲线,计算正常功率与实际功率的差值 P_d。构建特征的相关数学表达式如下:

$$\bar{\theta} = (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)/3 \tag{1}$$

$$\bar{T} = (T_1 + T_2 + T_3)/3 \tag{2}$$

$$\alpha_1 = [(V+5)/P]^2 - 1 \tag{3}$$

$$\alpha_2 = [(V+5)/(N_g+5)]^2 - 1 \tag{4}$$

$$\alpha_3 = [(V+5)^2/(P+5)(N_g+5)]^2 - 1 \tag{5}$$

$$T_d = T_{in} - T_{out} \tag{6}$$

$$P_d = (P_1 - P_{true})/P_1 \tag{7}$$

式中:θ 为叶片变桨角度,V 为风速,N_g 为发电机转速,T_1,T_2,T_3 为叶片变桨电机温度,T_{in}为机舱温度,T_{out}为环境温度,P_1 为拟合的正常功率,P_{true}为实际功率。

1.3 特征选择

本文通过采用递归特征消除(recursive feature elimination, RFE)结合极限梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)特征重要性评估进行特征选择。研究共涉及 33 个特征,其中 26 个特征来自 SCADA 数据集,7 个新特征来自特征工程。所有特征被输入 XGBoost 模型进行训练,采用 5 折交叉验证进行模型评估,通过迭代优化确定最优特征子集。特征选择结果如图 1 所示,当选用 19 个特征时,模型在预测任务中的准确率达到最高值。最终选定的特征在表 1中以加粗形式标出。该特征选择策略具有通用性,可适用于其他 SCADA 数据集。

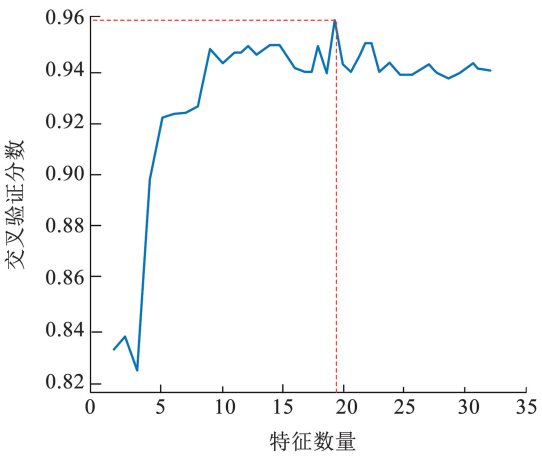


图 1 特征选择结果

Fig. 1 Feature selection results

2 建立 ResGAT-BiLSTM-SN 结冰预测模型

2.1 空间建模

图结构适用于非欧几里得空间中的传感器数据建模。然而,由于风机传感器位置难以确定,基于物理位置信息构建图结构并不可行。本文通过数据相

关性分析构建属性图，以更准确地表征传感器数据的空间关联。在数据预处理后，从 n 个传感器中获取有效数据，记为 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$。其中，x_i 代表单个传感器收集的时序数据，包括风速、发电机转速、风电功率等参数，这些数据全面反映风机的运行工况。

本文定义一个加权无向属性图 $G=(V,E)$，其中 V 和 E 分别表示属性图的节点集合和边集合。每个传感器对应加权无向图中的一个节点。图中的所有节点可以表示为集合 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$。任意两个传感器的时序数据可以建模为两个随机变量 x_i 和 y_j。

本文采用互信息（MI）分析来量化变量 x_i 和 y_j 之间的依赖关系。MI 值可以用熵 τ_{MI} 表示，其计算公式为

$$\tau_{\mathrm{MI}}(x_i,y_j)=H(x_i)+H(y_j)-H(x_i,y_j) \tag{8}$$

式中：$H(x_i)$ 和 $H(y_j)$ 分别为变量 x_i 和 y_j 的熵，$H(x_i,y_j)$ 为变量 x_i 和 y_j 的联合。

引入变量 $d(x_i,y_j)$ 来表示传感器 x_i 和传感器 y_j 之间的相关性距离，该值越大，表示传感器间的相关性越弱，其定义为

$$d(x_i,y_j)=\begin{cases}\dfrac{1}{\tau_{\mathrm{MI}}(x_i,y_j)}, & i\neq j\\ 0, & i=j\end{cases} \tag{9}$$

采用基于高斯核的阈值距离函数构建加权无向图，传感器 i 与传感器 j 之间的边权重 ω_{x_i,y_j} 计算公式为

$$\omega_{x_i,y_j}=\begin{cases}\exp\left(-\dfrac{d(x_i,y_j)^2}{\sigma^2}\right), & d(x_i,y_j)\leqslant\varepsilon\\ 0, & d(x_i,y_j)>\varepsilon\end{cases} \tag{10}$$

式中：σ 为 n 个传感器之间的空间距离的标准差，ε 为阈值，采用 n 个传感器之间的平均距离作为阈值。

采用 GAT 来提取属性图中的空间信息。假设邻近传感器 i 与 j 的特征向量分别定义为 $\boldsymbol{x}_i^t\in\boldsymbol{R}^{M\times1}$ 和 $\boldsymbol{x}_j^t\in\boldsymbol{R}^{M\times1}$，其中 t 表示时间步长，M 为时间窗口大小。以传感器 i 为中心节点，传感器 j 到传感器 i 的注意力权重系数 e_{ij} 可以表示为

$$e_{ij}=\mathrm{ReLU}(\alpha[\boldsymbol{W}\boldsymbol{x}_i^t\|\boldsymbol{W}\boldsymbol{x}_j^t]) \tag{11}$$

式中：$W\in F$ 为学习参数，F 为传感器 i 在融合操作后输出的新特征向量的维数，$\mathrm{ReLU}(\cdot)$ 为 Leaky ReLU 激活函数，$(\cdot\|\cdot)$ 为连接操作，$\alpha\in\boldsymbol{R}^{1\times2F}$ 为传感器 j 和传感器 i 的输出特征之间的相似度。

为了更好地分配权重，必须使用 Softmax 函数对所有邻居与传感器 i 之间计算的相似度进行归一化，得到的注意力得分可以表示为

$$\alpha_{ij}=\frac{\exp(e_{ij})}{\sum\limits_{k\in\chi(i)}\exp(e_{ik})} \tag{12}$$

式中，$k\in\chi(i)$ 表示 k 为传感器 j 的邻接传感器。

多头注意力机制计算加权和后，传感器 i 生成的新特征向量表示为

$$\boldsymbol{h}_i'=\|_{k=1}^{K}Z\Big(\sum_{j\in\chi(i)}\alpha_{ij}^{(k)}W^{(k)}\boldsymbol{x}_j^t\Big) \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{h}_i'$ 为新特征向量，$\alpha_{ij}^{(k)}$ 为第 k 头的注意得分，$W^{(k)}$ 是第 k 头的学习参数。

2.2　时间建模

风机叶片结冰为时间依赖的复杂动态过程，受气象条件和运行参数耦合影响。环境温度变化先于结冰状态变化，而结冰状态对风速和功率输出存在滞后效应，体现出历史依赖与前向时序依赖的复合特征。BiLSTM 双向建模机制能够同时捕获前向与后向的时序关系，有效提取叶片结冰的完整动态特征，与其物理演化规律高度吻合。为了区分不同的时间步，给定时间步序列 $\boldsymbol{Z}=[z_1,z_2,\cdots,z_n]$，前向 LSTM 的隐藏层 $\overrightarrow{h}_t$ 和后向 LSTM 隐藏层 $\overleftarrow{h}_t$ 计算公式为：

$$\overrightarrow{h}_t=\mathrm{L}_{\mathrm{STM},f}(x_t,\overrightarrow{h}_{t-1}) \tag{14}$$

$$\overleftarrow{h}_t=\mathrm{L}_{\mathrm{STM},b}(x_t,\overleftarrow{h}_{t+1}) \tag{15}$$

式中：$\mathrm{L}_{\mathrm{STM},f}(\cdot)$ 为前向 LSTM 数据处理，$\mathrm{L}_{\mathrm{STM},b}(\cdot)$ 为后向 LSTM 数据处理，$\overrightarrow{h}_{t-1}$ 为前一刻隐藏状态，$\overleftarrow{h}_{t-1}$ 为下一刻隐藏状态。

若仅提取最后一个时间步的 BiLSTM 的隐藏状态，可能导致部分时序信息丢失。为此，本文将所有时间步的输出进行拼接，得到拼接后的特征矩阵 $\boldsymbol{C}=(\boldsymbol{C}_1,\boldsymbol{C}_2,\cdots,\boldsymbol{C}_n)$。最后，通过平均池化操作将拼接后的特征矩阵转换为特征嵌入向量 $\boldsymbol{G}_W$，其计算公式为

$$\boldsymbol{G}_W=\mathrm{M}_{\mathrm{eanPool}}([\boldsymbol{C}^1,\boldsymbol{C}^2,\cdots,\boldsymbol{C}^n]) \tag{16}$$

式中：$\mathrm{M}_{\mathrm{eanPool}}(\cdot)$ 为平均池化操作，$\boldsymbol{G}_W$ 为一维特征嵌入向量。

2.3　残差连接

在深度神经网络的训练过程中，梯度消失可能导致模型难以学习深层特征，影响模型收敛效果。为解决这一问题，并在信息传递过程中保留特征完整性，GAT-BiLSTM 模块引入残差连接机制，其数学公式为

$$Y_i=\mathrm{B}_{\mathrm{iLSTM}}(\mathrm{G}_{\mathrm{AT}}(z_i))+z_i \tag{17}$$

式中：$\mathrm{B}_{\mathrm{iLSTM}}(\mathrm{G}_{\mathrm{AT}}(z_i))$ 为 GAT-BiLSTM 模块的整体变换，z_i 为输入特征，Y_i 为嵌入特征。

2.4　孪生网络

在风机叶片结冰预测任务中，SN 主要用于学习

风机运行状态之间的相似性，并通过度量不同时间段的特征差异来识别和预测结冰状态。该网络采用共享权重的双分支结构，使不同输入样本经过相同的特征提取器后，生成具有可比性的特征表示，从而提升特征学习的稳定性和一致性。此外，SN 网络利用余弦相似度计算风机运行状态的相似性，其计算公式为：

$$E_W(Y_1,Y_2)=\frac{\boldsymbol{G}_W(Y_1)\cdot\boldsymbol{G}_W(Y_2)}{\|\boldsymbol{G}_W(Y_1)\|\ \|\boldsymbol{G}_W(Y_2)\|} \tag{18}$$

式中：Y_1 和 Y_2 为图嵌入特征对，$\boldsymbol{G}_W(Y_1)$ 和 $\boldsymbol{G}_W(Y_2)$ 为嵌入向量，$E_W(Y_1,Y_2)$ 为相似度量，“·”为向量点积，$\|\cdot\|$ 为欧几里得范数。

在风机叶片结冰预测任务中，通过全连接层与 sigmoid 函数依次对特征进行处理，得到 ResGAT-BiLSTM-SN 模型的最终结冰预测输出 E_{W}。其计算公式为

$$\varphi(Y_1,Y_2)=\mathrm{sigmoid}(F(E_{\mathrm{W}}(Y_1,Y_2)) \tag{19}$$

式中：sigmoid(·)和 $F(\cdot)$ 分别为 sigmoid 函数和全连接层函数，$\varphi(Y_1,Y_2)$ 为 Y_1 和 Y_2 的相似度。

具体而言，ResGAT-BiLSTM-SN 模型对输入样本对的特征差异进行比较，输出一个表示结冰状态的连续概率值，为实现由概率空间到类别空间的映射。本文采用标准的二分类判别策略，设定判断阈值 θ，当预测概率 $p\geqslant\theta$ 时，将样本判定为“结冰状态”；反之，则判定为“非结冰状态”。

2.5 焦点损失(focal loss，FL)函数

FL 函数通过降低易分类样本的损失，增强对难分类样本的学习，动态调整损失权重，提高模型对少数类样本的学习能力，有效缓解类别不平衡问题。FL 函数计算公式为

$$L_{\mathrm{F}}(p_t)=-\alpha_t(1-p_t)^{\gamma}\log(p_t) \tag{20}$$

式中：p_t 为真实类别的预测概率，α_t 为平衡因子，γ 为焦点调节参数，$(1-p_t)^{\gamma}$ 为焦点因子。

2.6 ResGAT-BiLSTM-SN 模型

本文提出一种用于风机叶片结冰预测的 ResGAT-BiLSTM-SN 模型，其整体结构如图 2 所示。首先，基于多维传感器数据的相关性构建属性图。将属性图输入到两个结构共享的孪生子网络，在每个子网络中，通过时空特征提取模块提取空间特征和时间特征。其次，在每个子网络内部对提取的特征进行拼接，并执行残差连接，采用余弦相似度度量两组融合特征的相似性。最后，通过全连接层生成输出预测结果，预测风机叶片结冰状态。

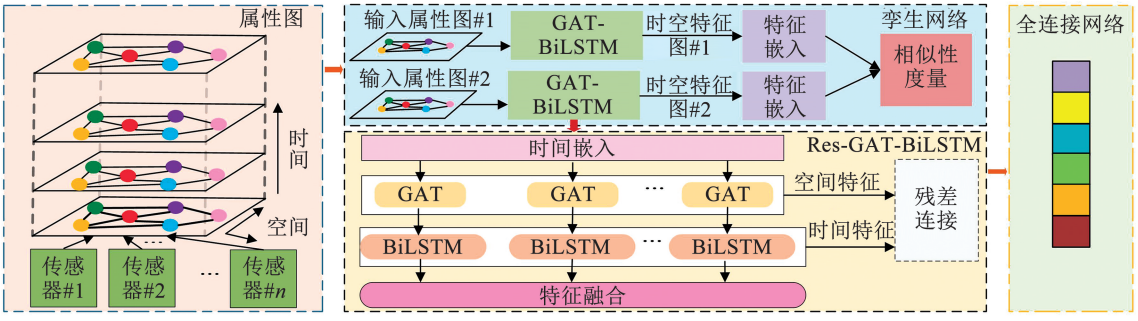


图 2 ResGAT-BiLSTM-SN 模型结构图

Fig. 2 Structure of the ResGAT-BiLSTM-SN model

3 风机叶片结冰预测流程和评价指标

3.1 风机叶片结冰预测流程

本文所提出的基于 ResGAT-BiLSTM-SN 模型的风机叶片结冰预测流程图如图 3 所示。

Step1 从 SCADA 系统获取风机叶片的高维时间序列数据和状态特征信息。

Step2 对原始数据进行标准化处理，包括数据清洗、噪声剔除、缺失值填补及归一化操作，为模型训练奠定基础。

Step3 分析叶片结冰特征并提取影响结冰的关键特征，进行特征工程，构造新的特征组合。

Step4 构建基于 ResGAT-BiLSTM-SN 的预测模型。其中，GAT 建模空间关系，BiLSTM 捕捉时序动态，SN 进行相似性度量，并通过残差连接机制融合空间特征提取和时间特征提取的输出。

Step5 通过网格搜索和五折交叉验证优化模型超参数，使用测试集验证最终模型性能，确保预测精度。经过多次实验对比，确定基于 ResGAT-BiLSTM-SN 预测模型的最优结冰判断阈值为 0.5。

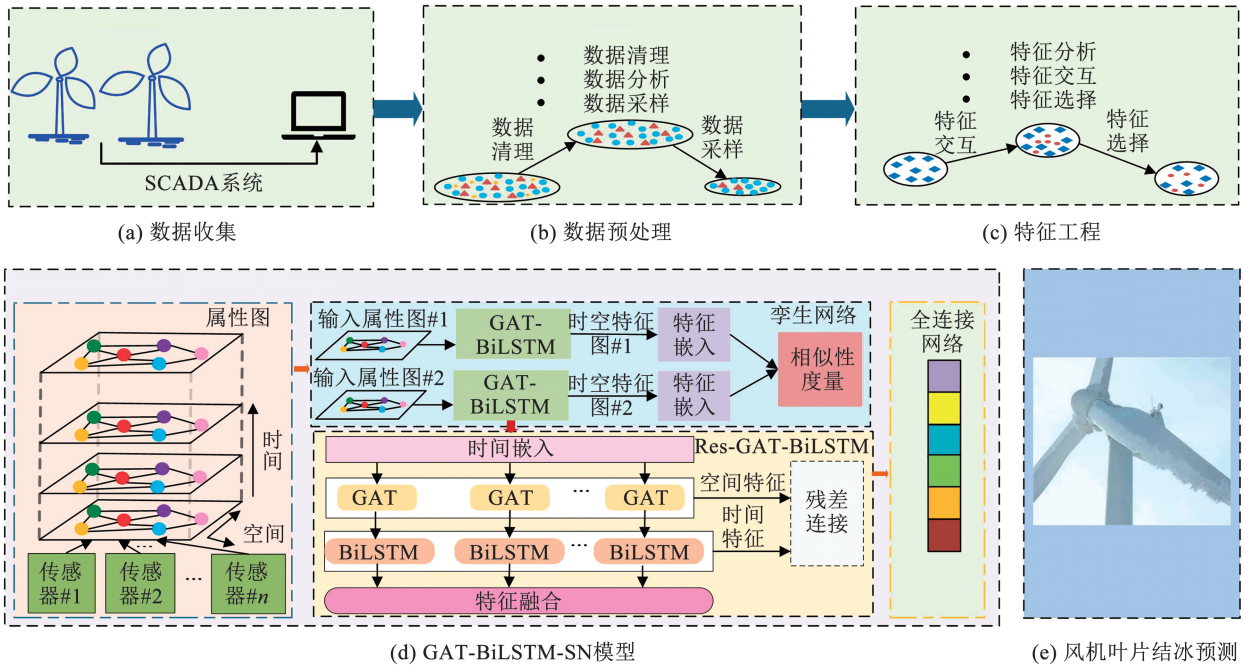


图 3　风机叶片结冰预测流程图

Fig. 3　Flowchart of wind turbine blade icing prediction

3.2　评价指标

在风机叶片结冰预测中，关键性能指标包括准确度、精确度、召回率和 F1 分数。

准确度(Accuracy)指模型正确检测的样本数占总样本数的比例，其计算公式为

$$A=\frac{x_{\mathrm{TP}}+x_{\mathrm{TN}}}{x_{\mathrm{TP}}+x_{\mathrm{TN}}+x_{\mathrm{FP}}+x_{\mathrm{FN}}} \tag{21}$$

精确度(Precision)指模型检测为所有样本中实际为结冰样本的比例，其计算公式为

$$P=\frac{x_{\mathrm{TP}}}{x_{\mathrm{TP}}+x_{\mathrm{FP}}} \tag{22}$$

召回率(Recall)是指在所有结冰样本中，模型正确检测为实际结冰样本的比例，其计算公式为

$$R=\frac{x_{\mathrm{TP}}}{x_{\mathrm{TP}}+x_{\mathrm{FN}}} \tag{23}$$

F1 分数(F1 score)是精确度和召回率的调和平均值，F1 分数提供一个平衡的性能指标，其计算公式为

$$\mathrm{F1}=2\times\frac{P\times R}{P+R} \tag{24}$$

式中：x_{TP}为真阳性样本数，x_{TN}为真阴性样本数，x_{FP}为假阳性样本数，x_{FN}为假阴性样本数。

4　实验验证

所有实验均在本地工作站上进行，硬件配置包括 Intel(R) Core(TM) i7-14700HX CPU、NVIDIA GeForce RTX 4060 GPU 和 16 GB RAM。软件环境基于 Python 3.11.9，深度学习模型使用 PyTorch 2.3.1 实现。

4.1　小样本学习

为构建小样本学习(FSL)场景，本文将 SCADA 数据的采样频率统一调整为 5 min。经过数据清洗后，原始数据集中分别包含 640 个结冰样本和 8 384 个非结冰样本。为构建不同的 FSL 场景，从结冰与非结冰样本中分别按不同比例 $\rho\%$ 均匀采样。

采用滑动窗口采样方法生成新的实验数据集，取不同采样比例 $\rho\%=100\%$、$\rho\%=75\%$ 和 $\rho\%=50\%$ 构造 3 个小样本学习场景，分别为场景 1、场景 2 和场景 3。本文未采用重叠采样，目的是检验所提出的预测模型在无需数据增强的情况下对 FSL 场景的适应能力。

新的实验数据集被随机划分为 10 个子集，其中训练集、验证集和测试集的比例为 6∶2∶2。由于 ResGAT-BiLSTM-SN 模型通过样本对自由组合显著扩展了训练数据量。在训练过程中，输入样本对由结冰和非结冰样本自由组合生成，有效缓解了数据稀缺和不平衡问题。同时，孪生网络的度量学习框架通过比较样本对的特征差异，聚焦于结冰与非结冰状态的区分，减少了对样本数量的依赖。

4.2　属性图构造

为构建属性图，本文基于表 1 中通过特征选择所选取的 19 个关键变量作为节点特征。为分析这些变量之间的相关性，利用公式(8)计算任意两个变量之间的 MI 值。通过计算得到的 MI 值构成一

个 19 × 19 的互信息相关矩阵热图。如图 4 所示,图中的“ * ”符号的数量表示变量之间相关性的强度。“ * ”符号越多表明相应传感器可能更存在空间相关性,而“ * ”符号越少,则表明传感器之间的相关性较弱,甚至可能彼此不相关。

根据式(9)和式(10)计算属性图边的权重,并形成一个 19 × 19 的权重矩阵,如图 5 所示。权重值范围为[-1,1],较大的权重表示变量间的相关性较强,较小的权重表示变量间的相关性较弱。

图 4 中计算得到的互信息矩阵用于构建如图 5 所示的加权邻接矩阵,并进一步生成属性图,如图 6 所示。图 6 展示了 19 个传感器在非欧几里得空间中的分布关系,构成一个稀疏的加权无向图,其中图的边具有不同的权重。本文将边权重划分为 3 类:小于 0.4 的边用蓝色虚线表示,大于 0.8 的边用红色点线表示,0.4 ~ 0.8 之间的边用黄色实线表示。尽管图 6 未提供传感器的物理位置信息,但其图结构能够有效反映多维传感器数据之间的空间相关性。在完成节点特征嵌入后,属性图被自由配对以构造样本对,并输入至 ResGAT-BiLSTM-SN 模型中用于进一步处理。

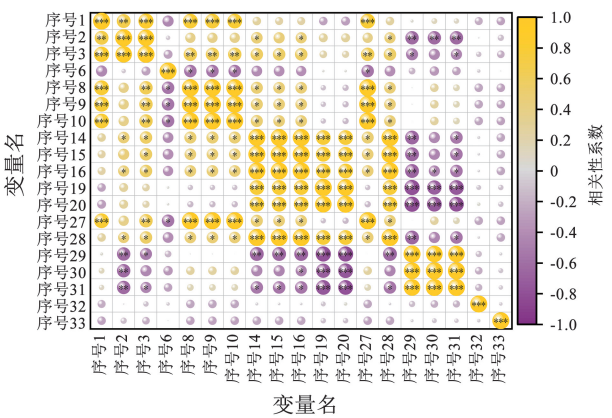


图 4 首选变量 MI 相关矩阵

Fig. 4 MI correlation matrix of the preferred variables

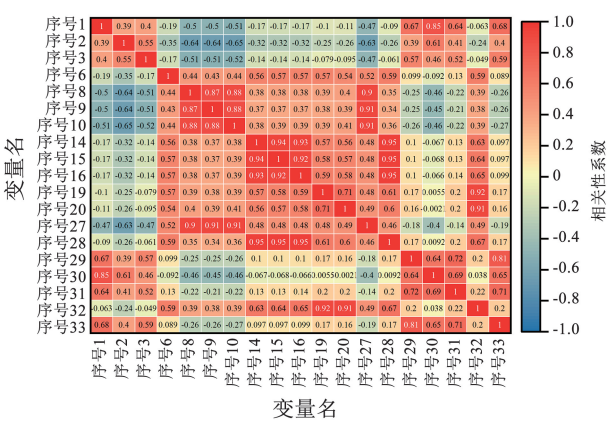


图 5 属性图中边的权重矩阵

Fig. 5 Edge weight matrix of a property graph

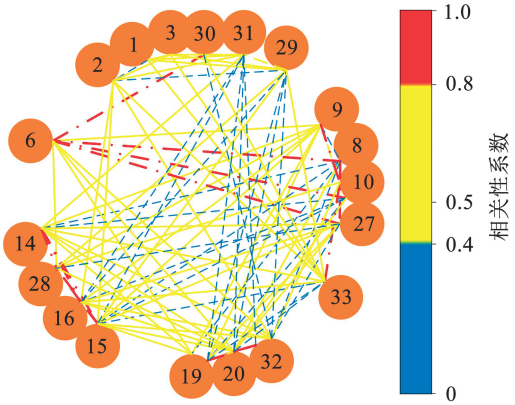


图 6 19 个传感器生成的图结构

Fig. 6 Graph structure generated by nineteen sensors

4.3 基线模型和超参数设置

本文提出的 ResGAT-BiLSTM-SN 模型包含多个超参数。GAT 模块中每个图注意力层,以及 BiLSTM 模块中每个孪生子网络的 BiLSTM 层,其结构参数均可独立设定。为简化模型设计,本文采用以下措施:各模块中隐藏层的神经元数量相同,GAT 模块的注意力头数保持一致。本模型的部分超参数通过经验手动调优,具体设置如下:优化器为 Adam,学习率为 0.001,训练轮次为 200,批量大小为 64,每个输入样本构造最相似样本数量为 10;FL 函数的 α 和 γ 分别设为 0.25 和 2.0。上述超参数配置对本文其他模型具有通用性。

除上述通过经验设定的超参数外,其余 5 个关键结构性超参数通过网格搜索与五折交叉验证评估确定,具体包括:GAT 层数 $n_1 \in \{1,2,3,4\}$,GAT 中每个隐藏层的神经元数 $h_1 \in \{8,16,32,64,128\}$,GAT 的注意力头数 $k_1 \in \{1,2,3\}$,BiLSTM 层数 $n_2 \in \{1,2,3,4\}$,以及 BiLSTM 中每个隐藏层的神经元数 $h_2 \in \{16,32,64\}$。

首先,使用训练集对不同超参数组合下的候选模型进行训练,并基于验证集评估其性能。选择具有最高 F1 分数的模型作为最优模型,其超参数视为最优组合。通过网格搜索和五折交叉验证确定以下参数:$n_1 = 2$,$h_1 = 64$,$k_1 = 1$,$n_2 = 2$,$h_2 = 64$。

上述超参数是在假设 SCADA 数据时间窗口大小 M 为 16 的情况下设置的。然而,训练集、验证集和测试集的样本量随着 M 值的变化而变化。为研究 M 值对风机叶片结冰预测结果的影响,设定 M 的取值范围为 $\varphi_M = \{8,12,16,20,24\}$。图 7 展示了不同时间窗口大小 M 下验证集的模型性能对比结果。实验结果表明,当 M 设置为 16 时,所有性能指标均达到最优值。

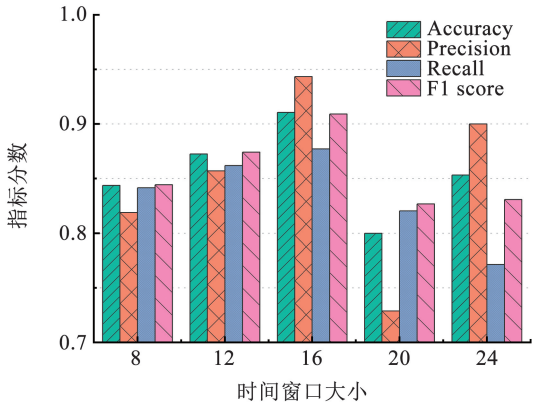


图 7　时间窗口大小 M 的敏感性分析

Fig. 7　Sensitivity analysis of the time window size M

本文对其他模型进行多次实验，最终选择的各个模型的超参数如表 2 所示。

表 2　模型的结构超参数

Tab. 2　Structural hyperparameters of the model

模型	超参数设置
CNN	采用一层 CNN 学习率为 0.001，池化层为最大池化层
Transformer	隐藏层为 64，多头自注意力头数为 8，编码器层数为 3
LSTM	隐藏层为 64，LSTM 层数为 2
GRU	隐藏层为 64，GRU 层数为 2
BiLSTM	前向 LSTM 节点数为 64，后向 LSTM 节点数为 32
GCN	隐藏层为 64，GCN 层数为 2
GAT	隐藏层为 64，多头自注意力头数为 2，GAT 层数为 2

4.4　基线模型比较

本文比较 9 种深度学习模型在 3 种小样本场景（$\rho\%=100\%$、$\rho\%=75\%$ 和 $\rho\%=50\%$）下的风机叶片结冰预测性能，结果见表 3，可以看到，ResGAT-BiLSTM-SN 模型在所有小样本场景中均取得最佳性能表现。在场景 1 中，ResGAT-BiLSTM-SN 模型的各项性能指标均优于对比模型，这体现其在捕捉时序依赖关系和提取风机叶片结冰特征方面的显著优势。在场景 2 中，与 Transformer 模型相比，ResGAT-BiLSTM-SN 模型在准确度、精确度和 F1 分数方面分别提高了 20.2%、34.1% 和 17.6%，这说明该模型能够更好地捕捉数据的时序依赖关系。在场景 3 中，与 GRU 模型相比，ResGAT-BiLSTM-SN 模型在准确度、精确度和 F1 分数方面分别提高了 34.4%、26.5% 和 20.0%，这表明随着样本的减少，该模型在精确度和整体性能方面具有更强的优势。

与传统模型相比，ResGAT-BiLSTM-SN 模型相较于 CNN 模型在 3 个小样本场景的 F1 分数分别提升了 26.1%、30.9% 和 37.0%，其优异性能随样本量增加而增强。此外，在 3 种小样本场景中，ResGAT-BiLSTM-SN 模型的 F1 分数比 TL[27] 模型分别提升了 14.8%、14.5% 和 9.3%，比 LOSGAN[28] 模型分别提高了 35.8%、31.9% 和 28.9%。这表明基于孪生网络的小样本学习方法比其他小样本学习方法更适合风机叶片结冰预测任务。

表 3　基线模型比较

Tab. 3　Comparison of baseline models

小样本场景	ResGAT-BiLSTM-SN	PSO-ConvLSTM-Transformer	TS-FCNN-LSTM	Transformer	ASTGCN	ST-GCN	TL	LOSGAN	GRU	CNN	评价指标
场景 1	**0.955 4**	0.809 1	0.849 1	0.794 6	0.928 6	0.812 5	0.825 7	0.830 9	0.710 7	0.693 6	Accuracy
	0.980 4	0.736 4	0.836 4	0.731 3	0.943 4	0.842 9	0.822 6	0.741 0	0.775 1	0.661 9	Precision
	0.925 9	0.677 8	0.827 8	0.907 4	0.909 1	0.855 1	0.836 1	0.663 1	0.813 0	0.799 7	Recall
	0.952 4	0.701 9	0.841 9	0.809 9	0.925 9	0.848 9	0.829 3	0.701 3	0.793 6	0.755 3	F1 score
场景 2	**0.964 3**	0.763 6	0.823 6	0.869 0	0.839 3	0.794 6	0.812 5	0.816 5	0.708 1	0.653 3	Accuracy
	0.975 0	0.676 3	0.796 3	0.816 3	0.818 2	0.789 5	0.742 4	0.734 0	0.747 4	0.638 0	Precision
	0.951 2	0.613 3	0.883 3	**0.952 4**	0.849 1	0.803 6	0.924 5	0.637 9	0.810 2	0.742 1	Recall
	0.943 0	0.638 7	0.838 7	0.879 1	0.833 3	0.796 5	0.823 5	0.715 2	0.778 1	0.720 5	F1 score
场景 3	**0.910 7**	0.636 4	0.806 4	0.714 3	0.785 7	0.776 8	0.794 6	0.781 0	0.682 5	0.623 2	Accuracy
	0.961 5	0.591 2	0.761 2	0.600 0	0.763 6	0.746 0	0.802 8	0.626 7	0.670 3	0.606 7	Precision
	0.862 1	0.575 1	**0.875 1**	0.713 0	0.802 5	0.790 3	0.863 6	0.642 7	0.794 4	0.692 9	Recall
	0.909 1	0.577 8	0.797 8	0.724 1	0.797 8	0.789 9	0.832 1	0.705 2	0.744 4	0.663 4	F1 score

与其他的时空图模型相比，本文提出的模型性能表现优异，在场景 2 中，ResGAT-BiLSTM-SN 模型的 F1 分数分别较 ST-GCN[29] 模型和 ASTGCN[30] 模型提升了 18.4% 和 13.2%；在场景 3 中提升了 15.1% 和 14.0%。这表明在低样本场景中，该模型表现出更强的时空关联建模能力。

与其他同类任务模型相比，本文提出的模型在 3 种小样本场景下的 F1 分数和召回率分别比 PSO-

Conv-LSTM-Transformer[16] 模型平均提升了 46.9% 和 47.2%，这表明其在数据稀缺条件下具备更强的特征提取与目标识别能力。同时，相比 TS-FCNN-LSTM 模型，本模型在 F1 分数和召回率上平均提升了 13.2% 和 6%，进一步验证了该模型在小样本条件下的优越特征建模与泛化能力。

4.5 消融实验

本文通过消融实验系统评估不同模型结构对风机叶片结冰预测性能的影响，结果如表 4 所示，可以看到，在 3 种小样本场景中，ResGAT-BiLSTM-SN 模型与 GAT-BiLSTM-SN 模型相比，其 F1 分数分别提高了 4%、2.8% 和 3.6%，这表明残差连接的引入有效缓解了深度网络训练中的梯度消失问题，进一步增强了模型在时空特征提取与信息融合方面的能力。

此外，在 3 种小样本场景中，GAT-BiLSTM-SN 模型在召回率方面较 GAT-BiGRU-SN 模型分别提升了 14.4%、6.0% 和 5.5%，说明在风机叶片结冰预测任务中，BiLSTM 模块比 BiGRU 模块具有更强的时序特征捕捉能力，尤其在与 GAT 模块结合后，能够更有效地整合空间拓扑信息与时间依赖关系。

与 GCN-BiLSTM-SN 模型相比，GAT-BiLSTM-SN 模型在准确率、召回率和 F1 分数上均表现更优，这表明 GAT 模块能够通过注意力机制动态分配邻居节点的权重，从而自适应地聚焦于对结冰预测最重要的空间依赖关系。

与 LSTM 模型相比，BiLSTM 模型在 3 种小样本场景中的 F1 分数和精确度平均提升了 12.4% 和 12.5%，且召回率也有明显改善。这表明双向 LSTM 结构相比单向 LSTM 在风机叶片结冰预测任务中具有更强的性能优势。

进一步分析显示，在场景 1 中，GAT-BiLSTM-SN 模型比 BiLSTM 模型、GAT 模型和 GCN 模型的 F1 分数分别提高了 19.1%、36.6% 和 41.9%，表明结合空间特征提取与时间特征提取的混合模型较单一特征提取模型表现更优。

表 4 不同模型结构的消融实验

Tab. 4 Ablation tests on different model structures

小样本场景	ResGAT-BiLSTM-SN	GAT-BiLSTM-SN	GAT-BiGRU-SN	GCN-BiLSTM-SN	BiLSTM	LSTM	GAT	GCN	评价指标
场景 1	**0.955 4**	0.919 6	0.883 9	0.821 4	0.776 8	0.767 9	0.589 3	0.544 6	Accuracy
	0.980 4	0.924 5	0.943 4	0.842 1	0.714 3	0.680 0	0.609 2	0.536 1	Precision
	0.925 9	0.907 4	0.833 3	0.888 9	0.909 1	0.862 3	0.815 4	0.896 6	Recall
	0.952 4	0.915 9	0.885 0	0.864 9	0.800 0	0.796 9	0.697 4	0.671	F1 score
场景 2	**0.964 3**	0.916 7	0.892 9	0.821 4	0.785 7	0.631 0	0.547 6	0.464 3	Accuracy
	0.975 0	0.907 0	0.875 0	0.916 7	0.708 3	0.600 0	0.542 4	0.535 7	Precision
	0.951 2	0.928 6	0.897 4	0.733 3	0.894 7	0.886 4	0.744 2	0.468 8	Recall
	0.943 0	0.917 6	0.886 1	0.814 8	0.790 7	0.715 6	0.627 5	0.500 0	F1 score
场景 3	**0.910 7**	0.875 0	0.869 0	0.767 9	0.732 1	0.603 6	0.553 6	0.500 0	Accuracy
	0.961 5	0.833 3	0.833 3	0.680 0	0.700 0	0.611 1	0.577 8	0.486 1	Precision
	0.862 1	**0.925 9**	0.857 4	0.862 3	0.777 8	0.666 7	0.812 5	0.875 0	Recall
	0.909 1	0.877 2	0.891 1	0.796 9	0.736 8	0.637 7	0.675 3	0.625 0	F1 score

4.6 模型泛化实验

为进一步评估 ResGAT-BiLSTM-SN 模型的泛化性能，将 15 号风机数据和 21 号风机数据交替作为训练集和测试集。这是因为 15 号与 21 号风机在所选时间段内具备连续、稳定的运行记录，满足高质量建模需求。其次，15 号和 21 号风机分别位于风电场内不同地理区域，这有助于评估模型在不同运行条件下的泛化能力。

当以 15 号风机数据作为训练集时，分别取 21 号风机数据的 10%、30% 和 50% 作为新的数据集，并添加到 15 号风机数据中。相应地，当以 21 号风机数据作为训练集时，分别取 15 号风机数据的 10%、30% 和 50% 为新的数据集，并添加到 21 号风机数据中，具体划分案例如表 5 所示。

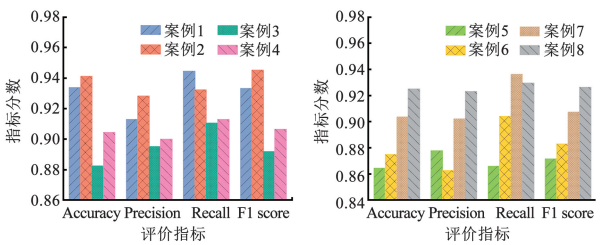
在 3 种小样本场景下进行实验并选取关键指标进行量化分析，结果如图 8 所示，可以看到，本文提出的模型在不同场景下均展现出良好的泛化能力，其准确度、精确度、召回率和 F1 分数均超过 0.84。具体而言，ResGAT-BiLSTM-SN 模型在样本量较大的场景 1 中取得了较高的准确度和 F1 分数，且各类别的精确度和召回率变化较为平稳，表明 ResGAT-BiLSTM-SN 模型在数据充足的情况下具有较强的学

习能力和泛化能力。然而，随着样本数量的减少，精确度和召回率指标在场景 2 和场景 3 中表现出波动，这表明 ResGAT-BiLSTM-SN 模型的泛化能力随样本数量的减少而下降。

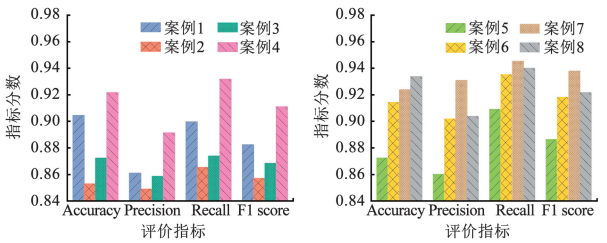
表 5　不同数据集划分案例

Tab. 5　Examples of different dataset splits

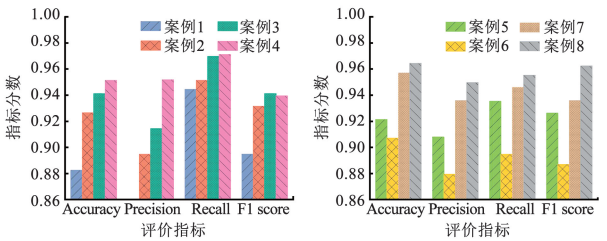
案例	训练集	验证集	测试集
1	15 号风机数据	50% 的 21 号风机数据	50% 的 21 号风机数据
2	15 号风机数据 + 10% 的 21 号风机数据	50% 的 21 号风机数据	50% 的 21 号风机数据
3	15 号风机数据 + 30% 的 21 号风机数据	50% 的 21 号风机数据	50% 的 21 号风机数据
4	15 号风机数据 + 50% 的 21 号风机数据	50% 的 21 号风机数据	50% 的 21 号风机数据
5	21 号风机数据	50% 的 15 号风机数据	50% 的 15 号风机数据
6	21 号风机数据 + 10% 的 15 号风机数据	50% 的 15 号风机数据	50% 的 15 号风机数据
7	21 号风机数据 + 30% 的 15 号风机数据	50% 的 15 号风机数据	50% 的 15 号风机数据
8	21 号风机数据 + 50% 的 15 号风机数据	50% 的 15 号风机数据	50% 的 15 号风机数据



(a) 场景1下的模型泛化能力



(b) 场景2下的模型泛化能力



(c) 场景3下的模型泛化能力

图 8　不同场景下模型泛化能力柱形图

Fig. 8　Model generalization capability bar chart for different scenarios

5　总　结

1）对 SCADA 数据进行特征工程处理，通过特征交互方法构造了 7 个新的衍生特征。

2）通过递归特征消除与 XGBoost 重要性评估相结合进行特征选择，最终确定 19 个关键特征。此外，基于互信息分析和高斯核阈值距离函数构建了具有良好可解释性的图网络结构。

3）利用 GAT 模块通过构建属性图对传感器变量间的空间依赖性进行建模，BiLSTM 模块则有效捕捉结冰过程中的长期时序依赖性。残差连接的引入缓解了深度网络中的梯度消失问题。此外，孪生网络通过构造样本对扩展训练数据，有效应对小样本学习场景中的挑战。在 3 种小样本场景下对不同的深度学习模型进行对比实验，结果表明，在 F1 分数方面，ResGAT-BiLSTM-SN 模型比 ST-GCN 模型和 ASTGCN 模型平均提升了 15.2% 和 10.0%。消融实验结果表明，孪生网络架构的引入使模型所有性能指标均得到显著改善，证实模型整体架构在风机叶片结冰预测任务中的有效性。

4）在 3 种 FSL 场景下的跨风机实验结果表明，ResGAT-BiLSTM-SN 模型在数据充足条件下具有较强的学习能力，其准确度、精确度、召回率和 F1 分数均超过 0.84，验证了本文所提模型具有良好的泛化性。

参考文献

[1] VARGAS S A, ESTEVES G R T, MAÇAIRA P M, et al. Wind power generation: A review and a research agenda[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 218: 850. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.015

[2] SUNDEN B, WU Z. On icing and icing mitigation of wind turbine blades in cold climate[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2015, 137(5): 051203. DOI: 10.1115/1.4030352

[3] GAO Linyue, HU Hui. Wind turbine icing characteristics and icing-induced power losses to utility-scale wind turbines[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(42): e2111461118. DOI: 10.1073/pnas.2111461118

[4] SHU Lichuan, LI Hantao, HU Qin, et al. Study of ice accretion feature and power characteristics of wind turbines at natural icing environment[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 147: 45. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.01.006

[5] SUNDARESAN A, ARUNVINTHAN S, PASHA A A, et al. Effect of ice accretion on the aerodynamic characteristics of wind turbine

blades[J]. Wind and Structures, 2021, 32(3): 205. DOI:10.12989/was.2021.32.3.205

[6] KIM D, SAMPATH U, KIM H, et al. A fiber-optic ice detection system for large-scale wind turbine blades[C]//Optical Modeling and Performance Predictions IX. Bellingham: SPIE, 2017, 10374: 52

[7] LI Pengfei, HU Weihao, HU Rui, et al. Imbalance fault detection based on the integrated analysis strategy for variable-speed wind turbines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105570. DOI:10.1016/j.ijepes.2019.105570

[8] MUNÑOZ C Q G, MAÁRQUEZ F P G, TOMAÁS J M S. Ice detection using thermal infrared radiometry on wind turbine blades[J]. Measurement, 2016, 93: 157. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.06.064

[9] XIAO Jin, LI Chunyan, LIU Bo, et al. Prediction of wind turbine blade icing fault based on selective deep ensemble model[J]. Knowledge-based Systems, 2022, 242: 108290. DOI:10.1016/j.knosys.2022.108290

[10] DAI Jiazhi, ROTEA M, KEHTARNAVAZ N. An ensemble network for high-accuracy and long-term forecasting of Icing on wind turbines[J]. Sensors, 2024, 24(24): 8167. DOI:10.3390/s24248167

[11] KREUTZ M, ALLA A A, VARASTEH K, et al. Convolutional neural network with dual inputs for time series ice prediction on rotor blades of wind turbines[J]. Procedia CIRP, 2021, 104: 446. DOI:10.1016/j.procir.2021.11.075

[12] YING Linghao, XU Zhijie, ZHANG Haohan, et al. Graph temporal attention network for imbalanced wind turbine blade icing prediction[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(6): 9187. DOI:10.1109/JSEN.2024.3358873

[13] WANG Lei, HE Yigang, ZHOU Yazhou, et al. A novel approach to wind turbine blade icing detection with limited sensor data via spatiotemporal attention Siamese network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024. DOI:10.1109/TII.2024.3378775

[14] JIN Ruibing, CHEN Zhenghua, WU Keyu, et al. Bi-LSTM-based two-stream network for machine remaining useful life prediction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1. DOI:10.1109/TIM.2022.3167778

[15] FAN Yongxin, TANG Qian, GUO Yangming, et al. BiLSTM-MLAM: A multi-scale time series prediction model for sensor data based on Bi-LSTM and local attention mechanisms[J]. Sensors, 2024, 24(12): 3962. DOI: 10.3390/s24123962

[16] GUO Jicai, SONG Xiaowen, TANG Shufeng, et al. Fault diagnosis of wind turbine blade icing based on feature engineering and the PSO-ConvLSTM-transformer[J]. Ocean Engineering, 2024, 302: 117726. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117726

[17] 沈学利, 杨莹, 秦鑫宇, 等. 基于残差神经网络的风机叶片结冰故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(1): 79
SHEN Xueli, YANG Ying, QIN Xinyu, et al. Wind turbine blade icing fault diagnosis based on residual neural network[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(1): 79

[18] YUE Ruxu, JIANG Guoqian, JIN Xiaohang, et al. Spatio-temporal feature alignment transfer learning for cross-turbine blade icing detection of wind turbines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1. DOI:10.1109/TIM.2024.3350147

[19] 韩华彬, 高丙朋, 蔡鑫, 等. 基于 HO-CNN-BiLSTM-Transformer 模型的风机叶片结冰故障诊断[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2025, 43(6): 13
HAN Huabin, GAO Bingpeng, CAI Xin, et al. Wind turbine blade icing fault diagnosis based on HO-CNN-BiLSTM-Transformer model[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2025, 43(6): 13. DOI: 10.16088/j.issn.1001-6600.2024101701

[20] 杨磊, 何鹏举, 丑幸幸. 基于 TimeGAN 数据增强的复杂过程故障分类方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(9): 1768
YANG Lei, HE Pengju, CHOU Xingxing. TimeGAN data augmentation-based fault classification method for complex processes[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024, 58(9): 1768. DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2024.09.002

[21] SHAO Siyu, MCALEER S, YAN Ruqiang, et al. Highly accurate machine fault diagnosis using deep transfer learning[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(4): 2446. DOI: 10.1109/TII.2018.2864759

[22] FENG Yong, CHEN Jinglong, XIE Jingsong, et al. Meta-learning as a promising approach for few-shot cross-domain fault diagnosis: Algorithms, applications, and prospects[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 235: 107646. DOI: 10.1016/j.knosys.2021.107646

[23] ZHENG Xiaoyang, FENG Zhixia, LEI Zijian, et al. Few-shot learning fault diagnosis of rolling bearings based on siamese network[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(9): 095018. DOI:10.1088/1361-6501/ad57d9

[24] ZHOU Xiaokang, LIANG Wei, SHIMIZU S, et al. Siamese neural network based few-shot learning for anomaly detection in industrial cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 17(8): 5790. DOI: 10.1109/TII.2020.3047675

[25] JAVAID N, JAN N, JAVED M U. An adaptive synthesis to handle imbalanced big data with deep siamese network for electricity theft detection in smart grids[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2021, 153: 44. DOI:10.1016/j.jpdc.2021.03.002

[26] 工业大数据产业创新平台[EB/OL]. (2017-07-15)[2025-07-05]. http://www.industrial-bigdata.com

[27] ZHANG Ansi, LI Shaobo, CUI Yunxin, et al. Limited data rolling bearing fault diagnosis with few-shot learning[J]. IEEE Access, 2019, 7: 110895. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2934233

[28] LIU Shen, CHEN Jinglong, QU Cheng, et al. LOSGAN: Latent optimized stable GAN for intelligent fault diagnosis with limited data in rotating machinery[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(4): 045101. DOI:10.1088/1361-6501/abd0c1

[29] YAN Sijie, XIONG Yuanjun, LIN Dahua. Spatial temporal graph convolutional networks for skeleton-based action recognition[C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park: AAAI Press, 2018: 7444

[30] GUO Shengnan, LIN Youfang, FENG Ning, et al. Attention based spatial-temporal graph convolutional networks for traffic flow forecasting[C]//Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence. Menlo Park: AAAI Press, 2019: 922

(编辑 吕雪梅)

DOI:10.11918/202504068

基于多维熵与优化 SVM 的调频引信抗干扰方法

刘 冰[1,2],时明心[1],刘佳琪[1],郝新红[3],施文乐[1]

(1. 中国民航大学 通用航空系,天津 300300;2. 天津市城市空中交通系统技术与装备重点实验室,天津 300300;
3. 机电动态控制重点实验室(北京理工大学),北京 100081)

摘 要:为解决调频无线电引信在复杂电磁环境中易受调幅扫频式信息型干扰威胁问题,本文提出一种基于频域熵特征与鹦鹉优化算法(parrot optimization algorithm,POA)优化支持向量机(support vector machine,SVM)的分类抗干扰方法。首先,利用快速傅里叶变换将引信检波端输出信号从时域转换至频域,计算频域信息熵、指数熵和 R 范数熵,构建三维特征矩阵;而后采用 POA 优化 SVM 分类器参数,优化后的 SVM 采用高斯核函数,其惩罚参数 C 和高斯核参数 σ 通过 POA 自适应调整,以提升模型分类性能。实验结果表明,目标与典型干扰(噪声、正弦、方波调幅扫频)的熵特征在概率密度分布上具有显著可分性;POA 在 300 次迭代内快速逼近最优解,适应度值稳定在 0.001 以内。经微波暗室验证,POA-SVM 的目标识别准确率达 96.8%,干扰识别准确率为 97.2%,较传统 SVM 与 PSO-SVM 方法均有显著提升。经 Modelsim 仿真验证,算法响应性能满足毫秒级引信工作要求。本文方法能够有效提升无线电引信对信息型干扰的识别精度与实时性,可为复杂电磁环境下引信抗干扰识别提供一种新途径。

关键词:无线电引信;信息型干扰;频域熵特征;鹦鹉优化算法;支持向量机

中图分类号:TN97 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0149-10

An anti-jamming method for FM fuzes based on multidimensional entropy and optimized SVM

LIU Bing[1,2], SHI Mingxin[1], LIU Jiaqi[1], HAO Xinhong[3], SHI Wenle[1]

(1. Department of General Aviation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Key Laboratory of Technology and Equipment of Tianjin Urban Air Transportation System, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3. Key Laboratory of Electromechanical Dynamic Control (Beijing Institute of Technology), Beijing 100081, China)

Abstract: To address the vulnerability of frequency-modulated (FM) radio fuzes to amplitude-modulated sweep-frequency information-based jamming threats in complex electromagnetic environments, this paper proposes a classification anti-jamming method based on frequency-domain entropy features and a parrot optimization algorithm (POA) optimized support vector machine (SVM). First, the output signal of the fuze detector stage is transformed from time domain to the frequency domain using the fast Fourier transform (FFT). Three entropy measures — frequency-domain information entropy, exponential entropy, and R-norm entropy are then calculated to construct a three-dimensional feature matrix. Subsequently, the POA is employed to optimize the parameters of SVM classifier. The optimized SVM utilizes a Gaussian kernel function, with its penalty parameter C and Gaussian kernel parameter σ adaptively adjusted by the POA to enhance the classification merit. Experimental results demonstrate that the entropy features of the target and typical interferences (noise, sine wave, square wave amplitude modulation sweep) exhibit significant separability in their probability density distributions. The POA rapidly converged to the optimal solution within 300 iterations, with fitness values stabilizing below 0.001. Validation in a microwave anechoic chamber confirmed that the POA-SVM achieved 96.8% target recognition accuracy and 97.2% interference recognition accuracy, representing significant improvements over traditional SVM and PSO-SVM methods. Furthermore, Modelsim simulations confirmed the algorithm's response performance meets millisecond-level operational requirements of fuzes. The proposed approach effectively enhances both recognition accuracy and real-time capability of FM radio fuzes against informational jamming, offering a novel pathway for fuze anti-jamming

收稿日期:2025-04-24;**录用日期**:2025-08-14;**网络首发日期**:2025-11-19
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251118.1104.004
基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(62401568);中央高校基本科研业务费项目(3122024QD17);天津市城市空中交通系统技术与装备重点实验室开放课题(TJKL-UAM-202403);石家庄市垂直起降固定翼无人机智能研究重点实验室开放课题(KF2024-2);云南省无人自主系统重点实验室开放课题(202501YB02);天津市自然科学基金(24JCZDJC00090)
作者简介:刘 冰(1992—),男,讲师,硕士生导师
通信作者:刘 冰,liub@cauc.edu.cn

recognition in complex electromagnetic environments.

Keywords: radio fuze; information jamming; frequency-domain entropy features; parrot optimization algorithm; support vector machine

引信是基于目标信息、平台信息和环境信息,在确保勤务和发射安全的基础上,依照预先设定的策略控制弹药起爆的装置。其具备判别、筛选、分析等综合处理各种信息和指令的能力,在现代战争中发挥着重要作用。其中,无线电引信属于近炸引信[1-3],其通过电磁波感知目标及环境,以实现战斗部在距目标最佳炸点处引爆。此种引信既能探测到目标的存在,也能够获取目标方位、距离或高度、速度等关键信息,以实现引信与战斗部配合,从而提升弹药毁伤效能,因此被广泛装备。

连续波调频无线电引信,通过发射频率按调制信号规律变化的等幅调频连续波信号工作,其利用回波信号与发射信号之间存在的频率差测定弹目之间距离。与传统的连续波多普勒引信相比,其具有定距精度高,抗干扰性能优等特点,因此应用广泛[4-6]。调频引信在现代战场面临着越来越严重的针对引信的引信干扰机电磁威胁。国外部队已大量列装了无线电引信干扰机,如俄罗斯的 SPR-1/2/3/4 系列无线电引信干扰机和美国的 SEPS "游击手"干扰机。在信息型干扰中,扫频式干扰相比于调频引信具备更宽的频谱带宽。当干扰频率扫近或扫离引信工作频率时,干扰信号易进入引信接收机的工作通带,并被引信解调出所加载的调制信息,其特征与目标回波信号高度相似,从而易进入引信信号处理系统,对调频引信构成严重威胁。因此,开展扫频式干扰作用下调频引信的失效机理和抗干扰方法的研究,对于提升调频引信的战场生存能力,保证弹药高效毁伤具有重要意义。

针对目前应用范围最广的调频引信,对其干扰威胁最大的是扫频式干扰,相关学者已在信号特征提取、干扰建模及发射波形设计等方向进行了一系列研究。一类基于信号后端处理,利用信号分解与特征识别方法提升引信的抗干扰能力:文献[7]基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)提取目标与干扰信号的特征,并利用主成分分析降维和支持向量机分类识别,显著提高分类精度;文献[8]利用 Duffing 振子阵列的同步特性进行参数估计,实现了在低信噪比环境下对复合调制引信信号的高精度重构,从而增强了对欺骗式和压制式干扰的鲁棒性;文献[9]则引入变分正则化参数估计方法,对伪码调相信号进行重构,解决了低信噪比条件下伪码调相信号参数估计困难的问题。此外,已有研究采用小波包特征、三阶谱特征及功率谱熵等方法实现调频无线电引信目标与扫频干扰信号识别,在提高分类精度方面取得了较好效果[10-12]。另一类研究则通过提升信号复杂度,从发射波形设计角度入手增强抗干扰性能[13]:文献[14-16]提出多种复合调制及去周期化的波形方案,如将连续波混沌码调相与线性调频相结合,从而在距离分辨力、抗截获性能和抗干扰性方面获得更优表现,这类方法的共同思路在于通过信号结构优化提升目标回波与干扰信号的差异性,从而抑制扫频式干扰的影响。现役无线电引信干扰发射机的干扰信号,在波形重构方面与调频引信的回波信号在波形上十分相似,基于发射信号波形设计的方法通常并不能有效地抑制欺骗式噪声的干扰,导致弹药的误起爆,大大降低了其有效杀伤效能[17-20]。此外,从雷达与干扰信号识别研究来看,扫频类干扰、调幅类干扰及其复合形式均属于复杂电磁环境中的典型干扰样式,对目标-干扰判别方法的特征表征能力和分类鲁棒性提出了更高要求[21-22]。因此,研究能够有效区分调频无线电引信检波端输出信号属性的方法,可有效提升无线电引信在未来复杂电磁环境战场中的生存能力,保障弹药发挥最高效的打击能力[23-25]。

针对这一问题,亟需开发一种实现干扰识别的新途径,能够直接在引信检波端输出信号层面进行,可在提升分类精度的同时保证实时性。为此,本文提出一种基于频域熵特征与鹦鹉优化支持向量机(POA-SVM)的调频引信抗扫频式干扰方法。本方法从信号特征本身出发,通过构建三维频域熵特征矩阵,利用改进 POA 算法优化分类器参数,从而实现对目标与干扰信号的高精度区分。与现有熵特征研究相比,本文有如下创新:1)首次将由信息熵、指数熵、R 范数熵构建的三维频域熵特征,应用于引信抗干扰识别,从而实现了信号特征的多维表征;2)提出改进的鹦鹉优化算法,并采用动态权重策略,使参数优化效率显著提升。本研究可为无线电引信抗信息型干扰提供新的技术路径,并对提升智能化引信的抗干扰性能具有重要意义。

1 调频无线电引信工作原理

调频引信基于发射信号与目标回波信号之间存在的频率差与距离间的一一对应关系,实现精确定距。三角波线性调频引信中,发射信号频率、回波信号频率以及两者形成的差频信号之间的关系如图 1 所示。

图 1 中,f 为频率,t 为时间,f_c 为调频引信发射信号的载波频率,ΔF 为调频信号的单边带调制带

宽，T 为调制信号周期，τ 为目标回波信号与发射信号间的时间延迟，弹目距离 L 与时间延迟满足关系 $\tau=\dfrac{2L}{c}$，c 为电磁波传播速度。在图 1 中，利用相似三角形关系可以推导出下面的关系式：

$$f_{\mathrm{b}}=\frac{4\Delta F\tau}{T} \tag{1}$$

将 $\tau=\dfrac{2L}{c}$ 带入式(1)，可以计算得出差频与弹目距离之间的关系为

$$f_{\mathrm{b}}=\frac{8\Delta FL}{cT} \tag{2}$$

由式(2)可以看出，差频与弹目距离之间存在映射关系，可以利用差频和其他参数计算得到弹目距离，完成调频引信的定距计算。

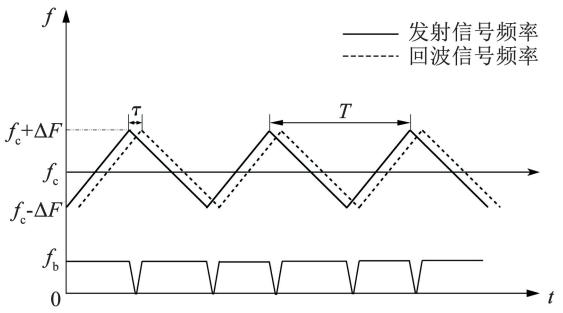


图 1　三角波线性调频引信信号频率示意图

Fig. 1　Schematic diagram of triangular wave linear frequency modulation fuze signal frequency

以三角波线性调频引信为例，调频引信发射信号可以表示为：

$$s_{\mathrm{t}}(t)=\begin{cases}A_{\mathrm{t}}\cos\{2\pi[f_{\mathrm{c}}+(4n+1)\Delta F]t-\pi\beta t^2\}, & nT\leqslant t\leqslant nT+\dfrac{T}{2}\\ A_{\mathrm{t}}\cos\{2\pi[f_{\mathrm{c}}-(4n+3)\Delta F]t+\pi\beta t^2\}, & nT+\dfrac{T}{2}\leqslant t\leqslant(n+1)T\end{cases} \tag{3}$$

式中：A_{t} 为发射信号的幅度，n 为周期的数目，$\beta=4\Delta F/T=4\Delta Ff_{\mathrm{m}}$ 表示调频斜率，T 为调制周期，f_{m} 为调制频率，$f_{\mathrm{m}}=1/T$。

调频引信的回波信号是发射信号照射目标后形成的反射回波，可视为发射信号经幅度调制和时间延迟后的结果，其表达式为：

$$s_{\mathrm{r}}(t)=A_{\mathrm{r}}s_{\mathrm{t}}(t-\tau) \tag{4}$$

式中：A_{r} 为接收信号的幅值，τ 为时间延迟，满足等式 $\tau=\dfrac{2L}{c}$。

回波信号与本地混频参考信号进行混频后的差频信号可表示为

$$F_{\mathrm{b}}(f,\tau)=\frac{A_{\mathrm{t}}A_{\mathrm{r}}A_{\mathrm{l}}}{2}\sum_m k(m,\tau)\delta(2\pi f-2\pi mf_{\mathrm{m}}\pm 2\pi f_{\mathrm{d}}) \tag{5}$$

式中：A_{l} 为本地混频参考信号的幅值，m 为谐波序号，τ 为目标回波信号相对发射信号的时间延迟，$k(m,\tau)$ 为与谐波序号和时延有关的幅值系数，f_{d} 为多普勒频移，δ 为狄拉克冲激函数。由式(5)可得差频信号频谱由 $mf_{\mathrm{m}}\pm f_{\mathrm{d}}$ 次谐波构成，各次谐波幅度由 $k(m,\tau)$ 确定，$k(m,\tau)$ 的包络为 sinc(·)函数，主瓣宽度为 $c/(2\Delta F)$，当满足 $|2\pi\beta\tau-2\pi mf_{\mathrm{m}}|=0$ 或 $|2\pi\beta\tau+2\pi mf_{\mathrm{m}}|=0$ 时，$k(m,\tau)$ 取得最大值，可得：

$$\tau=\frac{mf_{\mathrm{m}}}{\beta} \tag{6}$$

将 $\beta=4\Delta F/T=4\Delta Ff_{\mathrm{m}}$ 和 $\tau=\dfrac{2L}{c}$ 代入上式，可以得到弹目距离与谐波次数的关系为

$$L=\frac{mc}{8\Delta F} \tag{7}$$

由式(7)可知，弹目距离与谐波次数 m 存在对应关系，通过设置单边带调制带宽 ΔF 参数，确定唯一的弹目距离 L 与谐波次数 m。

2　频域熵特征提取方法

2.1　频域熵特征分析

信息熵的物理意义是表示信息系统描述信息的能力[26]，具体表现为：系统信息排列越规则，其呈现的熵值越小；系统信息分布越随机，则其呈现的熵值越大。现代控制理论创始人维纳认为，对于一个系统无组织程度的衡量，可以用系统的熵值来表示[27]。熵理论与现代信号处理理论有机结合，可以实现不同变换域空间的信号特征提取[28]。熵理论应用于信号处理领域成为一个备受关注的研究方向，并已经在频谱感知、雷达辐射源识别、机械故障诊断和电能质量分类等领域获得了广泛的应用。

数据样本为目标和调幅扫频类干扰作用下调频引信检波端输出信号，引信检波端输出时域信号可以表示为

$$s_{\mathrm{o}}[i]=[s_1,s_2,\cdots,s_N],i=1,2,\cdots,N \tag{8}$$

调频引信检波端输出信号的采样数据为一维时间序列，为了能够全面挖掘信号的内在特征，对其进行熵特征提取时可以从其变换域着手，即选取引信检波端输出时域信号的变换域进行熵特征的提取，本文选择将目标和干扰信号作用下引信检波端输出信号进行频域变换，对其频域信号进行熵特征的提取。熵特征包括频域信息熵、频域指数熵和频域 R 范数熵特征 3 类。

信息熵特征的提取以引信检波端输出时域信号的

频域变换为基础进行计算,时域信号为 $s_o[i]$,对该时域信号进行快速傅里叶变换可以得到,FFT($s_o[i]$) = $s_o[f]$。其中,检波端输出信号的频域信息熵可表示为

$$E_f(s_o[f]) = -\sum_{i=1}^{N} p_i \log_2 p_i \tag{9}$$

式中 p_i 为每个频点能量所占总能量的比值。

指数熵可以解决求取实际信号的信息熵过程中遇到的不收敛问题。以时域离散序列 $s_o[i]$ 为例,指数熵可通过如下原则进行定义:

1)对于离散序列中的每个点 s_i,其携带的信息量 $\Delta I(s_i)$ 在[0,1]之间均有意义;

2)当 $p(s_i)\to 0$ 时,其信息量满足

$$\lim_{p_i\to 0}\Delta I(p_i) = \Delta I(p_i = 1) = k_1 \tag{10}$$

式中 $k_1 \geqslant 0$ 且有限;

3)当 $p(s_i)\to 1$ 时,其信息量满足

$$\lim_{p_i\to 1}\Delta I(p_i) = \Delta I(p_i = 1) = k_2 \tag{11}$$

式中 $k_2 \geqslant 0$ 且有限,另外需要满足 $k_2 < k_1$;

4)当 $p(s_i)$ 增加时,其携带的信息量 $\Delta I(p_i)$ 呈现指数形式的减少;

5)信息量 $\Delta I(p_i)$ 和指数熵在[0,1]上连续;

6)当 $p(s_1) = p(s_2) = \cdots = p(s_N)$ 时,指数熵取得最大值;

在满足上述要求的基础上,指数熵可以定义如下:

$$E_x(s_o[i]) = \sum_{i=1}^{N} p_i e^{(1-p_i)} \tag{12}$$

R 范数熵在现代信号处理理论中,通常被用来描述信号能量分布情况,以时域信号 $s_o[i]$,$i = 1, 2, \cdots, N$ 为例,其定义如下:

$$E_r(s_o[i]) = \frac{q}{1-q}\left[1 - \left(\sum_{i=1}^{N} p\,(s_i)^q\right)^{1/q}\right] \tag{13}$$

式中 q 为 R 范数阶次参数。由式(13)可得,当 $q\to 1$ 时,$E_r(s_o[i])$ 的极限值等于 $E_f(s_o[i])$,即 R 范数熵在 $q\to 1$ 时,取值趋近于信息熵。当 $q\to\infty$ 时,$\lim\limits_{q\to\infty} E_r(s_o[i]) = 1 - \max\limits_i p(s_o[i])$。在此基础上,R 范数熵定义为:

$$E_r(s_o[i]) = \sum_{i=1}^{N} s_o[i]^q, 1 \leqslant q \leqslant 2 \tag{14}$$

本文实验数据采用某型现役调频无线电引信的检波端输出时域信号。首先,利用 FFT 对检波端输出信号进行频域变换,在频域内提取待测信号的信息熵特征、指数熵特征和 R 范数熵特征。具体步骤如下:

1)对待测信号进行 FFT 频域变换,获得目标信号、噪声调幅扫频干扰信号、正弦调幅扫频干扰信号,以及方波调幅扫频干扰信号作用下引信检波端输出信号的频谱。其中,$s_o[i]$ 为检波端输出离散时域信号,$s_o[f]$ 为其对应的频域表示;

2)根据频谱 $s_o[f]$,分别计算信息熵特征 $E_f(s_o[f])$、指数熵特征 $E_x(s_o[f])$ 及 R 范数熵特征 $E_r(s_o[f])$;

3)将提取得到的 3 类频域熵特征构成无线电引信检波端输出信号的频域熵特征矩阵。

2.2 数据采集及参数设置

引信的数据采集均在微波暗室环境中进行,数据采集场景设备如图 2 所示。目标为金属平板,引信样机选取某型连续波调频多普勒引信,检波端输出信号通过示波器的数据存储功能进行采集,调幅扫频类干扰信号通过信号发生器产生,经过喇叭天线进行放大后发射。其中,检波端输出信号的采集频率应满足检波信号的采样带宽要求,将采集到的信号存储至本地。

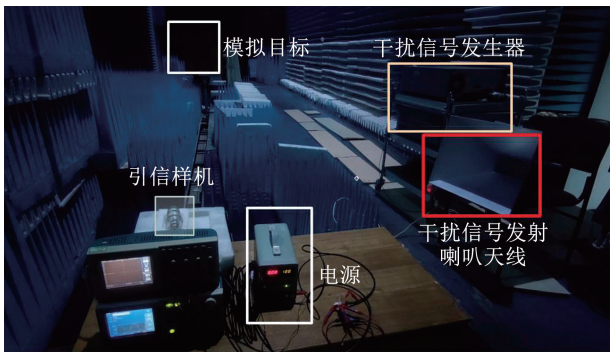


图 2 数据采集现场

Fig. 2 Data collection site

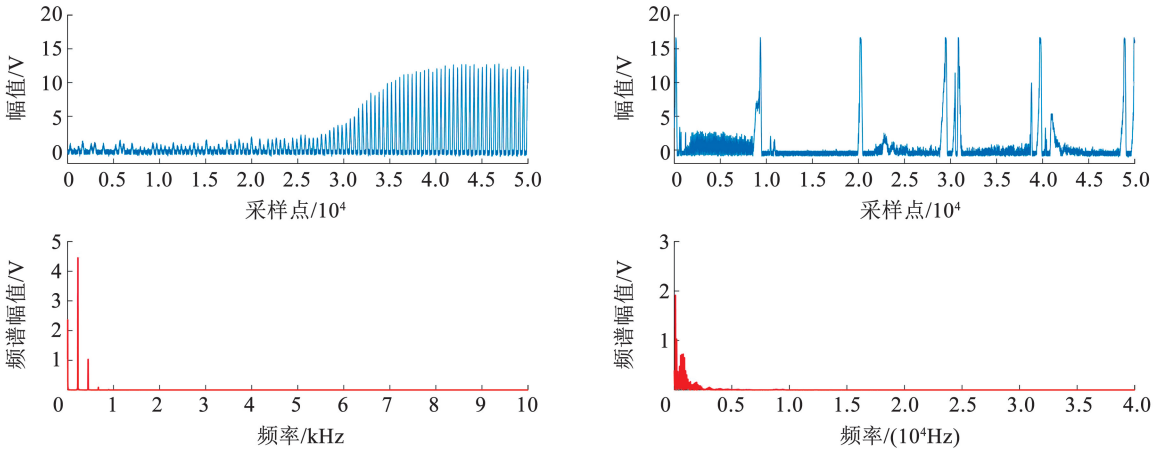
为了模拟真实战场环境中引信面临的实际威胁,引信干扰信号的参数设置依照蓝军装备进行。实验中干扰机的参数设置遵循等效功率密度换算的原则,干扰机参数如表 1 所示。

表 1 干扰机参数设置表

Tab. 1 Jamming device parameter settings table

类别	参数项	数值/规格
引信样机参数	载波频率	f_0
	调制频偏	ΔF
	调制信号频率	f_m
干扰机参数设置	扫频带宽	$f_0 \pm 2\Delta F$
	扫频步长	$\frac{2\Delta F}{N}$,N 为扫频点数
	频点驻留时间	t_j
	蓝军干扰机实际发射功率	800 W
	蓝军干扰机实际有效作用距离	200 m
	等效干扰距离	5 m
	等效发射功率	26.96 dBm

图 3 为实测引信样机输出信号时域波形。其中,图 3(a)为目标作用下的输出信号,图 3(b)~(d)则分别显示了噪声调幅扫频干扰、正弦调幅扫频干扰和方波调幅扫频干扰条件下,引信检波端输出的启动信号波形。



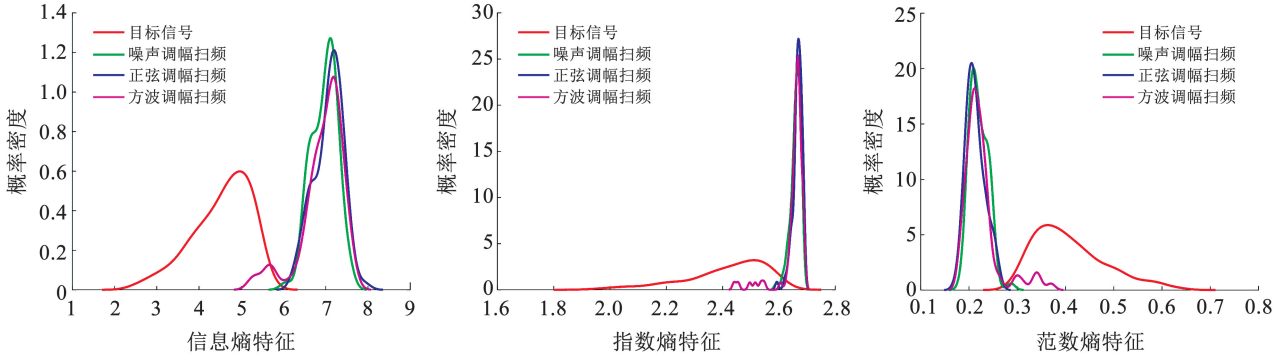
(a) 目标作用下检波端输出信号　(b) 噪声调幅扫频干扰作用下检波端输出信号

(c) 正弦调幅扫频干扰作用下检波端输出信号　(d) 方波调幅扫频干扰作用下检波端输出信号

图 3　采集数据

Fig. 3　Data collection

对于采集到的目标和不同干扰作用下引信检波端输出信号的频谱进行特征提取，按照式(9)、式(12)和式(14)分别提取信息熵、指数熵和范数熵，并分别绘制不同特征的概率密度分布曲线图，结果如图 4 所示。由图 4 可以看出，目标和几种典型调幅扫频类干扰信号作用下，引信检波端输出信号的频域信息熵特征、指数熵特征和范数熵特征，在分布区间具有差异性，存在较小的重合区域，具备较好的可分性。



(a) 检波端信息熵特征概率密度分布图　(b) 检波端指数熵特征概率密度分布图　(c) 检波端范数熵特征概率密度分布图

图 4　目标和干扰作用下检波端信号特征概率密度分布

Fig. 4　Probability density distribution of signal characteristics at the detector end under target and interference effects

3 鹦鹉算法优化支持向量机分类识别方法

3.1 分类器设计

支持向量机(support vector machine,SVM)具有完备的数学理论基础,广泛应用于模式识别领域且具有良好效果,尤其在解决小样本、非线性和高纬数问题时,其具有显著优势。支持向量机的参数选择直接影响其整体性能,不同的参数组合直接影响支持向量机在模式识别过程中的精度。在利用支持向量机进行调频无线电引信目标与干扰信号分类识别的应用时,仍然面临参数合理选择的问题,且支持向量机的参数选择与其泛化能力之间没有明确的数学映射关系。因此,若要提升支持向量机在处理模式识别问题时的性能,必须对其参数进行优化计算,包括惩罚参数和核函数参数。

鹦鹉优化算法(parrot optimization algorithm,POA)[29]是一种启发式优化算法,其受到鹦鹉觅食行为的启发。这种算法主要用于解决复杂优化问题,如函数优化、工程设计优化等。已有研究和育种工作表明,绿颊锥尾鹦鹉表现出 4 种不同的行为特征:觅食、停留、交流和畏惧陌生人,鹦鹉优化算法正是通过模拟鹦鹉群体在自然环境中的 4 种不同的行为特征来寻找最优解。

1)觅食行为。鹦鹉通过观察食物的位置或考虑主人的位置来估计食物的大致位置,然后向各自的位置飞去。

$$X_i^{t+1}=(X_i^t-X_{\text{best}})\cdot\text{Levy}(\text{dim})+\text{rand}(0,1)\cdot\left(1-\frac{t}{\text{Max}_{\text{iter}}}\right)^{\frac{2t}{\text{Max}_{\text{iter}}}}\cdot X_{\text{mean}}^t \tag{15}$$

式中:X_i^t 为鹦鹉个体当前的位置,X_i^{t+1} 为更新后的位置,X_{best} 为从初始化到当前搜索到的最佳位置,X_{mean} 为鹦鹉种群平均位置,Levy(dim)为服从列维分布的随机步长。

2)停留行为。鹦鹉是一种高度社会化的生物,其停留行为主要包括突然飞到主人身体的任何部位,并在那里静止一段时间。

$$X_i^{t+1}=X_i^t+X_{\text{best}}\cdot\text{Levy}(\text{dim})+\text{rand}(0,1)\cdot\text{ones}(1,\text{dim}) \tag{16}$$

3)交流行为。鹦鹉种群具有显著的群体内沟通行为,包括趋群沟通与离群沟通。假设两种沟通行为是对等概率行为,种群中心位置通过群体成员的空间分布位置平均值确定。

$$X_i^{t+1}=\begin{cases}0.2\cdot\text{rand}(0,1)\cdot\left(1-\dfrac{t}{\text{Max}_{\text{iter}}}\right)\cdot(X_i^t-X_{\text{mean}}^t), & P\leqslant 0.5\\ 0.2\cdot\text{rand}(0,1)\cdot\exp\left(-\dfrac{t}{\text{rand}(0,1)\cdot\text{Max}_{\text{iter}}}\right), & P>0.5\end{cases} \tag{17}$$

4)畏惧行为。鹦鹉对陌生人表现出天然的恐惧,其与不熟悉的个体保持距离并与主人一起寻找安全环境。

$$X_i^{t+1}=X_i^t+\text{rand}(0,1)\cdot\cos\left(0.5\pi\cdot\frac{t}{\text{Max}_{\text{iter}}}\right)\cdot(X_{\text{best}}-X_i^t)-\cos(\text{rand}(0,1)\cdot\pi)\cdot\left(\frac{t}{\text{Max}_{\text{iter}}}\right)^{\frac{2}{\text{Max}_{\text{iter}}}}\cdot(X_i^t-X_{\text{best}}) \tag{18}$$

式中:$\text{rand}(0,1)\cdot\cos\left(0.5\pi\cdot\dfrac{t}{\text{Max}_{\text{iter}}}\right)\cdot(X_{\text{best}}-X_i^t)$ 表示鹦鹉向主人飞去的过程,$\cos(\text{rand}(0,1)\cdot\pi)\cdot\left(\dfrac{t}{\text{Max}_{\text{iter}}}\right)^{\frac{2}{\text{Max}_{\text{iter}}}}\cdot(X_i^t-X_{\text{best}})$ 表示鹦鹉远离陌生人的过程。

本文选取 SVM 作为调频引信检波端输出信号的分类器,SVM 所选用的核函数为高斯核函数,该核函数中的参数包括惩罚参数 C 和高斯核函数参数 σ。POA 不仅具有较好的全局搜索能力,还可以较高效地跳出局部最小值,且收敛速度较快。传统的 SVM 在高斯核函数参数 C 与 σ 的选择中,通常采用交叉验证法和网格搜索法,但该策略需要在多组参数下重复训练和测试,过程中运算负担高且计算耗时极大。调频无线电引信应用现代战场时,弹目交会时间极短,因此要求信号处理算法具备较高的实时性。POA 中的不同个体是由惩罚参数 C 和高斯核函数参数 σ 构成的,图 5 为利用 POA 优化 SVM 的算法流程图。

图 6 给出了 POA 优化过程中适应度值随迭代次数的变化曲线。其中,横轴表示 0 至 1 000 次迭代过程,纵轴显示对应适应度值变化。曲线整体呈现两阶段特征:前 300 次迭代期间,适应度值以指数衰减形式快速下降,期间伴随较大幅度的随机波动,模拟了算法在初期搜索阶段的探索特性;当迭代次数达到 300 次时,通过红色虚线明确标示收敛临界点,此时适应度值趋近最小值并进入稳定阶段,后续 700 次迭代中数值保持平稳,仅存在微弱波动,反映算法达到局部最优后的开发特性。

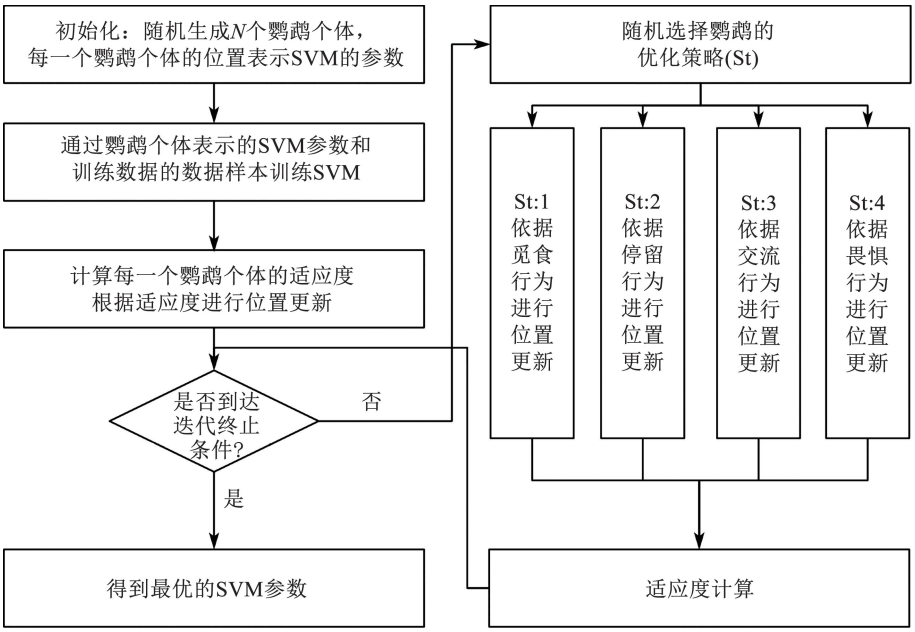


图 5　POA 优化 SVM 算法流程图

Fig. 5　POA-optimized SVM algorithm flowchart

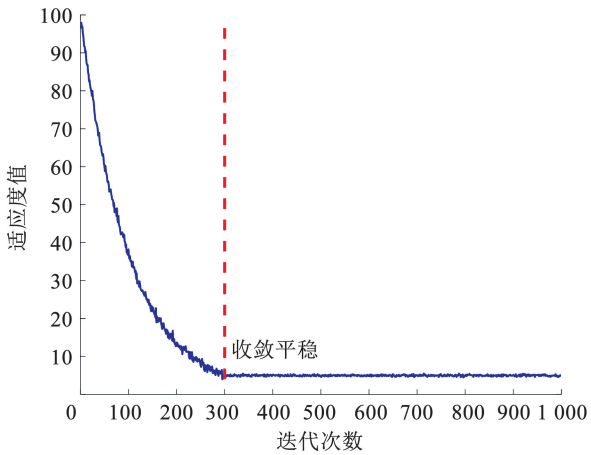


图 6　适应度值变化曲线

Fig. 6　Fitness value change curve

3.2　算法性能分析

选取 2.1 小节中构建的三维频域熵特征矩阵作为 SVM 分类器的输入，检波端输出信号的频域特征包括频域信息熵、频域指数熵和频域 R 范数熵，特征矩阵为3 维。选取目标识别准确率和干扰识别准确率两个指标衡量算法性能。其中目标识别准确率表示算法将目标正确识别为目标的概率，干扰识别准确率表示算法将干扰正确识别为干扰的概率，可表示如下：

$$A_{\mathrm{T}}=\frac{N_{\mathrm{TT}}}{N_{\mathrm{TT}}+N_{\mathrm{TJ}}}\times 100\% \tag{19}$$

$$A_{\mathrm{J}}=\frac{N_{\mathrm{JJ}}}{N_{\mathrm{JJ}}+N_{\mathrm{JT}}}\times 100\% \tag{20}$$

式中：A_{T} 为目标识别准确率，A_{J} 为干扰识别准确率，N_{TT}为将目标识别为目标的数目，N_{JJ}为将干扰识别为干扰的数目，N_{TJ}为将目标识别为干扰的数目，N_{JT}为将干扰识别为目标的数目。

实验参数设置为主处理器：Intel Xeon Gold 6248R @ 3.0 GHz，内存：256 GB DDR4，加速卡：NVIDIA A100 PCIe 40 GB。嵌入式验证平台：Xilinx Zynq UltraScale + MPSoC ZCU104。采用 50 个个体的种群规模以平衡收敛速度与优化精度，最大迭代次数设为 300 次（基于收敛曲线平台期观测确定）。算法动态权重 α 从 0.6 线性衰减至 0.2，实现早期全局探索（觅食行为占比 60%）与后期局部开发（停留行为占比 70%）的平滑过渡。

为提高支持向量机分类器的参数寻优能力，已有研究广泛采用遗传算法、粒子群算法，以及混合优化策略对惩罚参数和核函数参数进行搜索，从而提升分类器的泛化性能和识别精度[30-33]。选取未经优化的 SVM、经过粒子群算法优化的 PSO-SVM、经遗传算法优化的 GA-SVM 与本文提出的 POA-SVM 分别作为分类器进行性能对比，4 种分类器均以相同的 3 维频域熵特征作为输入，统计目标识别准确率 A_{T} 和干扰识别准确率 A_{J}，实验结果见表 2。由表 2可知，本文所提的 POA-SVM 方法，相较于传统的 SVM、PSO-SVM 和 GA-SVM，在目标识别准确率和干扰识别准确率这两个测试性能指标上均具有更好的准确率。

表 2　SVM 和 POA-SVM 算法对比

Tab. 2　Comparison of SVM and POA-SVM algorithms　%

分类器类别	目标识别准确率	干扰识别准确率
SVM	83.7	81.5
PSO-SVM	88.6	84.2
GA-SVM	90.1	89.7
POA-SVM	96.8	97.2

标准 PSO 通过个体最优和群体最优更新粒子位置,在优化 SVM 参数时容易陷入局部最优。当惩罚参数 C 的搜索空间存在多个极值点时,PSO 有 68% 概率收敛至次优解。惯性权重 ω 需要精细调节,过大导致振荡,过小则丧失全局搜索能力。GA-SVM交叉操作可能破坏优质参数组合。当核参数 $\sigma \in [0.1,1]$ 时,单点交叉有 32% 概率生成无效子代。每代需评估整个种群,在相同迭代次数下(300 次),GA 耗时是 POA 的 2.3 倍。POA 算法通过动态行为策略避免早熟收敛,畏惧行为加速跳出局部最优,交流行为降低参数波动,并行化设计减少硬件资源占用,从而分别在最优准确率、收敛迭代次数、参数稳定性和计算效率方面优于传统算法。PSO-SVM、GA-SVM 和 POA-SVM 的优化性能对比结果如表 3 所示。

为系统评估不同信号特征在抗扫频干扰中的性能表现,本文从特征表征能力、计算复杂度和工程适用性 3 个维度对典型特征方法进行了对比分析。如表 4 所示,传统单维熵特征(如功率谱熵、小波熵等)虽然计算效率较高,但在抗扫频干扰场景下存在表征能力不足的问题:功率谱熵(82.1%)仅能反映频谱能量分布特征,对扫频干扰特有的谐波畸变特性不敏感;小波熵(85.3%)虽能捕捉信号的时频局部特性,但对宽带扫频干扰的区分度仍然有限。相比之下,本文提出的三维频域熵特征通过联合信息熵、指数熵和 R 范数熵,不仅显著提升了分类准确率(96.8%),同时保持了合理的计算复杂度($O(3n \log n)$),在特征表征能力和计算效率之间取得了最佳平衡。这一对比结果充分验证了多维联合特征在复杂电磁环境下抗扫频干扰的独特优势。

表 3 优化性能对比

Tab. 3 Performance optimization comparison

指标	最优准确率/%	收敛迭代次数	参数稳定性	计算效率
PSO-SVM	88.6	420	C: ±2.1, σ: ±0.15	1.8 μs/迭代
GA-SVM	90.1	500	C: ±3.4, σ: ±0.22	2.5 μs/迭代
POA-SVM	96.8	300	C: ±0.9, σ: ±0.05	1.2 μs/迭代

表 4 特征性能对比分析

Tab. 4 Comparison and analysis of characteristic performance

特征类型	抗干扰准确率/%	计算复杂度	适用场景	对扫频干扰的敏感性
功率谱熵[15]	82.1	$O(n \log n)$	平稳信号分析	中等(依赖频谱平滑度)
小波熵[16]	85.3	$O(n \log n)$	非平稳信号时频分析	较高(对瞬态干扰敏感)
EMD 能量熵[7]	88.3	$O(n^2)$	非线性、非平稳信号	较高(但计算量大)
本文三维熵	96.8	$O(3n \log n)$	扫频干扰与目标信号分类	最优(联合多维特征)

3.3 算法实时性分析

为验证本文所提方法的实时性,利用 Modelsim 对所提方法进行综合仿真验证。将采集的目标和调幅扫频类干扰信号作用下的调频引信检波信号做测试向量。分别将目标作用下的引信检波信号和扫频式干扰作用下的引信检波信号在 MATLAB 中归一化并转换为二进制格式,模拟 ADC 的数据输出,作为算法仿真模块中的外部激励源,通过 Modelsim 软件观察信号处理算法的输出波形。

图 7 所示是信号处理算法的仿真结果,可以看到,当输入为目标信号作用下引信检波输出信号时,FPGA 输出的判别结果 QD_FPGA 在 895.876 760 μs 处产生了启动脉冲,说明整个算法的计算时间不到 1 ms,可以满足引信的工作实时性要求。

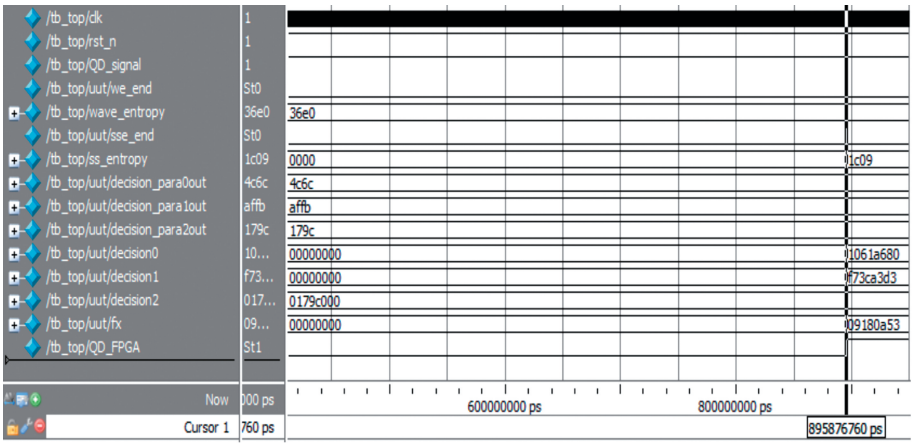


图 7 目标信号作用下 Modelsim 处理仿真结果

Fig. 7 Modelsim processing simulation results under target signal action

4　结　论

本文提出了一种基于信号频域熵特征与鹦鹉优化算法优化支持向量机的分类抗干扰方法，研究得到如下结果。

1）目标和典型干扰信号作用下，调频无线电引信的检波端输出信号频域熵特征具有显著差异，能够对作用于引信的信号类型进行表征，所构建的三维频域熵特征对目标与干扰具有较好的区分能力。

2）鹦鹉优化算法优化 SVM 的参数，使得 SVM 具备更好的分类性能，相较于传统的 SVM 分类器，经过优化后的 SVM 应用于调频无线电引信的目标和干扰信号分类时，具备更高的分类识别准确率，间接地提升了调频无线电引信复杂电磁环境下的抗干扰性能。

参考文献

[1]赵惠昌. 无线电引信设计原理与方法[M]. 北京：国防工业出版社，2012：18
ZHAO Huichang. Principles and methods of radio fuzing design[M]. Beijing：Defense Industry Press，2012：18

[2]DAI Jian，HAO Xinhong，YAN Xiaopeng. Adaptive false-target recognition for the proximity sensor based on joint feature extraction and chaotic encryption[J]. IEEE Sensors Journal，2022，22(1)：10828. DOI：10.1109/JSEN.2022.3169746

[3]YANG Jikai，BAI Zhiquan，XIAN Zhaoxia，et al. Hybrid attention module and transformer based fuze DRFM jamming signal recognition[J]. IEEE Communications Letters，2024，28(9)：2091. DOI：10.1109/LCOMM.2024.3432802

[4]DAI Jian，HAO Xinhong，LI Ze. Adaptive target and jamming recognition for the pulse doppler radar fuze based on a time-frequency joint feature and an online-updated naive bayesian classifier with minimal risk[J]. Defence Technology，2022，18(3)：457. DOI：10.1016/j.dt.2021.02.008

[5]蔡鑫，陈齐乐，孔志杰，等. 基于信号变分分解的无线电引信抗干扰方法[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(11)：3587
CAI Xin，CHEN Qile，KONG Zhijie，et al. Anti-jamming method for radio fuzes based on signal variational decomposition[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(11)：3587. DOI：10.13700/j.bh.1001－5965.2022.0860

[6]陈齐乐，郝新红，闫晓鹏. 变调制率调频引信双通道相关检测抗数字射频存储干扰方法[J]. 兵工学报，2019，40(3)：449
CHEN Qile，HAO Xinhong，YAN Xiaopeng. Anti-DRFM jamming method using dual-channel harmonic correlation detection for variable chirp rate FM fuze[J]. Acta Armamentarii，2019，40(3)：449. DOI：10.3969/j.issn.1000－1093.2019.03.001

[7]刘冰，郝新红，段俊法，等. 基于经验模态分解特征的无线电引信抗扫频式干扰方法[J]. 北京理工大学学报，2023，43(12)：1290
LIU Bing，HAO Xinhong，DUAN Junfa，et al. Anti frequency sweeping jamming method for radio fuze based on empirical Mode decomposition (EMD) features[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology，2023，43(12)：1290. DOI：10.15918/j.tbit1001－0645.2022.237

[8]闫晓鹏，安泰，郝新红，等. 基于 Duffing 振子的伪码调相线性调频复合调制引信干扰设计[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(11)：3338
YAN Xiaopeng，AN Tai，HAO Xinhong，et al. Design of pseudo-code phase modulation and LFM composite fuze interference based on Duffing oscillator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2024，50(11)：3338. DOI：10.13700/j.bh.1001－5965.2022.0843

[9]彭博，陈齐乐，李锐. 基于变分正则化参数估计的伪码调相引信重构式干扰方法[J]. 兵工学报，2023，44(10)：3127
PENG Bo，CHEN Qile，LI Rui. Parameter estimation of binary phase-coded modulation radar waveform using non-convex total variation regularization[J]. Acta Armamentarii，2023，44(10)：3127. DOI：10.12382/bgxb.2022.0572

[10]LIU Bing，HAO Xinhong. Research on anti-frequency sweeping jamming method for frequency modulation continuous wave radio fuze based on wavelet packet transform features[J]. Applied Sciences，2022，12(17)：8713. DOI：10.3390/app12178713

[11]LIU Bing，HAO Xinhong，QIAN Pengfei，et al. Classification and identification method of radio fuze target and sweep jamming signals based on third-order spectrum features[J]. Electronics，2022，11(15)：2474. DOI：10.3390/electronics11152474

[12]郝新红，杜涵宇，陈齐乐. 调频引信粗糙面目标与干扰信号识别[J]. 北京航空航天大学学报，2019，45(10)：1946
HAO Xinhong，DU Hanyu，CHEN Qile. Rough surface target and jamming signal recognition of FM fuze[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2019，45(10)：1946. DOI：10.13700/j.bh.1001－5965.2019.0036

[13]PAN Y，XIE D，ZHAO Y，et al. Overview of radar jamming waveform design[J]. Remote Sensing，2025，17(7)：1218. DOI：10.3390/rs17071218

[14]乔彩霞，郝新红，陈齐乐. 基于相关旁瓣平均的混沌码与线性调频复合调制无线电引信抗数字射频存储干扰方法[J]. 兵工学报，2020，41(4)：641
QIAO Caixia，HAO Xinhong，CHEN Qile. Anti-DRFM-jamming method based on averaging of range side lobes for hybrid modulation radio fuze[J]. Acta Armamentarii，2020，41(4)：641. DOI：10.3969/j.issn.1000－1093.2020.04.003

[15]HAO Xinhong，CHEN Huiling，YUE Kai. Method of suppressing noise AM jamming with EMD for combined modulation radio ranging system[J]. Applied Mechanics and Materials，2015，740(3)：739. DOI：10.4028/www.scientific.net/amm.740.739

[16]陈齐乐，晏祺，郝新红. 无线电近炸引信混沌码调相与线性调频复合调制波形设计与分析[J]. 兵工学报，2018，39(11)：2127
CHEN Qile，YAN Qi，HAO Xinhong. Analysis of transmitting waveform of radio fuze modulated by chaotic Bi-phased code and hybrid linear frequency modulation[J]. Acta Armamentarii，2018，39(11)：2127. DOI：10.3969/j.issn.1000－1093.2018.11.006

[17]KONG Zhijie，LI Ping，YAN Xiaopeng. Anti-sweeping jamming design and implementation using multi-channel harmonic timing sequence detection for short-range FMCW proximity sensors[J]. Sensors，2017，17(9)：2024. DOI：10.3390/s17092042

[18]常仁，朱玉鹏，周辉，等. 基于深度残差神经网络的无线电引

信多调制类型时域混叠信号识别方法[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(6): 37
CHANG Ren, ZHU Yupeng, ZHOU Hui, et al. A Time domain overlapping signal recognition method for multiple modulation types radios fuze based on deep residual neural network[J]. Journal of Detection & Control, 2024, 46(6): 37. DOI: 10.20225/j.issn.1008-1194.20240605

[19] 刘冰, 郝新红, 蔡鑫. 基于功率谱熵的无线电引信目标与干扰信号分类方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(3): 913
LIU Bing, HAO Xinhong, CAI Xin. Classification method of radio fuze target and interference signal based on power spectrum entropy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(3): 913. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0355

[20] 刘冰, 郝新红, 秦高林, 等. 引信目标与干扰信号稀疏分类识别方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(2): 498
LIU Bing, HAO Xinhong, QIN Gaolinet. Sparse classification and recognition of fuze targets and jamming signals[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(2): 498. DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0071

[21] ZHOU Y, CAO R, ZHANG A, et al. Radio signal modulation recognition method based on hybrid feature and ensemble learning: For radar and jamming signals[J]. Sensors, 2024, 24(15): 4804. DOI:10.3390/s24154804

[22] HAO G, WANG Y, ZHU Y, et al. Radar jamming signal recognition algorithm based on multi-fractal dimension and rényi entropy[J]. Digital Signal Processing, 2025, 158: 104950. DOI: 10.1016/j.dsp.2024.104950

[23] WANG Jianping. CFAR-Based interference mitigation for FMCW automotive radar systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 12229. DOI:10.1109/tits.2021.3111514

[24] 杨瑾, 郝新红, 周文. 基于异值检测及干扰样本归零的调频引信抗扫频干扰方法[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(5): 22
YANG Jin, HAO Xinhong, ZHOU Wen. FM fuze anti sweep interference based on heterogeneity detection and zero interference samples[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(5): 22

[25] HOSSAIN M, ELSHAFIEY I, SANIE A. Waveform diversity for mutual interference mitigation in automotive radars under realistic traffic environments[J]. Signal, Image and Video Processing, 2019, 13(1): 1. DOI: 10.1007/s11760-018-1321-x

[26] SHANNON C. A Mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379. DOI: 10.4135/9781412959384.n229

[27] WIENER N. Cybernetics: Or control and communication in the animal and the machine[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1948: 33

[28] GEORG M, SVEN P, ANTONIA W. Information and coding-theoretic analysis of the RLWE channel[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2020, 9: 549. DOI:10.1109/itw46852.2021.9457596

[29] LIAN Junbo, HUI Guohua, MA Ling, et al. Parrot optimizer: Algorithm and applications to medical problems[J]. Computers in Biology and Medicine, 2024, 172: 108064. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2024.108064

[30] SYARIF I, PRÜGEL-BENNETT A, WILLS G. SVM parameter optimization using grid search and genetic algorithm to improve classification performance[J]. Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control), 2016, 14(4): 1502

[31] LI J, LI B. Parameters selection for support vector machine based on particle swarm optimization[C]//Intelligent Computing Theory. Cham: Springer, 2014: 41. DOI:10.1007/978-3-319-09333-8_5

[32] LI X, WANG K, LIU W, et al. Particle swarm optimization-support vector machine model for machinery fault diagnoses in high-voltage circuit breakers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33: 5. DOI:10.1186/s10033-019-0428-5

[33] DONG H, YANG L, WANG H. Parameter selection of a support vector machine, based on a chaotic optimization method[J]. Computer Systems Science and Engineering, 2015, 30(6): 437. DOI:10.1515/cait-2015-0047

(编辑 吕雪梅)

DOI:10.11918/202504001

有理函数统一形式的结构性黏土弹黏塑性模型

胡亚元[1],章 成[1],曾 甄[2],周 建[1],邢恩达[2],龚晓南[1]

(1.浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心,杭州 310058;
2.浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司,杭州 310002)

摘 要:针对结构性黏土压缩变形过程中应力-应变关系的显著非线性特征,以及传统本构模型存在的数学形式固化与适用性局限问题,本研究提出了一种有理函数统一形式的结构性黏土弹黏塑性本构模型。首先,基于Maxwell力学元件,将总应变分为弹性与黏塑性应变之和,重点探究与结构性相关的黏塑性应变,根据一维压缩试验特征提出有理函数形式的黏塑性应变-有效应力-等效时间表达式。其次,基于"土体黏塑性应变率仅取决于有效应力和黏塑性应变"的假定,结合等效时间概念推导出结构性黏土的黏塑性应变率表达式,构建结构性黏土一维弹黏塑性模型。再次,介绍模型参数的计算方法,利用线性规划方法,将参数求解问题转化为多元线性回归问题,借用计算机技术进行矩阵求解。最后,在模型验证时推导了突然加载情况下土体应变随实际时间的变化规律,并用本文模型对常规固结试验和蠕变试验进行模拟分析,验证本文模型的适用性和参数计算方法的可行性。研究结果表明,本文提出的结构性黏土等效时间模型能够较好地描述结构性黏土在一维压缩条件下的有效应力-黏塑性应变关系和总应变-时间关系。

关键词:天然软黏土;结构性;弹黏塑性本构模型;有理函数;等效时间
中图分类号:TU442 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0159-09

Elastic-viscoplastic model for structural clays based on a unified form of rational functions

HU Yayuan[1], ZHANG Cheng[1], ZENG Zhen[2], ZHOU Jian[1], XING Enda[2], GONG Xiaonan[1]

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Co., Ltd., Hangzhou 310002, China)

Abstract: To address the pronounced nonlinearity of stress-strain relationships during the compression deformation of structured clay and the limitations of traditional constitutive models in terms of mathematical rigidity and applicability, this study proposes an elasto-viscoplastic constitutive model for structured clays based on a unified rational function formalism. First, based on Maxwell elements, this study decomposed the total strain into the sum of elastic and viscoplastic strains, with a focus on investigating viscoplastic strain associated with structural effects. A rational function expression for viscoplastic strain-effective stress-equivalent time was established through one-dimensional compression behaviors. Second, under the assumption that "the viscoplastic strain rate of soil depends solely on effective stress and viscoplastic strain," the viscoplastic strain rate expression for structured clay was derived by integrating the concept of equivalent time, and then a one-dimensional elasto-viscoplastic constitutive model for structured clay was derived. Third, the parameter calculation method was introduced, transforming the problem of solving parameters into a multiple linear regression task by using linear programming techniques, with matrix solutions implemented through computational tools. Finally, during model verification, the strain variation of soil under sudden loading conditions as a function of real time was derived. The model was applied to simulating conventional consolidation tests and creep tests, demonstrating its applicability and the feasibility of the parameter calculation method. The research results indicate that the proposed equivalent time model for structured clay effectively describes both the effective stress-viscoplastic strain relationship and the total strain-time relationship under one-dimensional compression.

Keywords: natural soft clay; structural characteristics; elasto-viscoplastic constitutive model; rational function; equivalent time

收稿日期:2025-04-01;**录用日期**:2025-05-30;**网络首发日期**:2025-08-29
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250829.0926.010
基金项目:国家自然科学基金(52178360);浙江省自然科学基金(LY24E080008);浙江省水利厅科技项目(RA2012)
作者简介:胡亚元(1968—),男,博士,副教授
通信作者:胡亚元,huyayuan@zju.edu.cn

软黏土作为典型的天然地质材料,在外力作用下表现出显著的时效性与结构性特征[1-3]。这些力学特性对工程安全与稳定性具有重要影响[4-6]。因软黏土在成分、结构和灵敏度上存在天然差异,不同土体的应力-应变关系各异,呈现出高度复杂的本构性质[7-8]。学者们针对软黏土不同的力学行为提出了多种本构模型,Leroueil 等[9]基于有效应力-应变-应变率(σ'-ε-$\dot{\varepsilon}$)之间的关系,提出了描述软黏土时间效应的应变率模型;Yin 和 Graham[10-11]基于有效应力-有效应力率-应变-应变率(σ'-$\dot{\sigma}'$-ε-$\dot{\varepsilon}$)之间的关系,建立了等效时间流变模型;尹振宇等[12-13]和柯文汇等[14]提出考虑结构损伤的指数型一维弹黏塑性模型;曾玲玲等[15]利用双对数关系描述软黏土的压缩曲线,提出考虑土体结构性的一维弹黏塑性模型;Zhou 等[16]提出分数阶应变率的本构方程。传统本构模型虽描述了软黏土的时效性与结构性特征,但因其依赖传统建模方法,需按照预设采用固定的数学表达式,易陷入"一土一模型,一域一方程"的困境,限制了传统本构模型的推广和应用。

计算机技术与人工智能的快速发展为解决土体复杂性难题提供了新契机[17-18],如何将人工智能与岩土本构建模有效结合,已成为岩土工程领域亟待解决的前沿课题[19-20]。人工智能具有强大的数据处理、参数识别和自适应学习能力[21-22]。利用人工智能这些优势,可以用现代数学理论构建普适性本构模型反映软黏土力学特性,以及可以采用大数据来反映不同土体力学行为在高维函数空间的权重,通过"一土一数据,一域一数据"来反映软黏土的空间离散性特征和区域性特征。目前人工智能应用于岩土本构关系主要有两类方法:一是数据驱动建模法,利用深度神经网络的函数拟合能力,通过力学响应数据集训练网络权重,构建"黑箱"模型逼近土体力学行为。例如王钰轲等[23]利用深度卷积神经网络与 LSSVM 算法,建立了路基粉土抗剪强度预测模型;张璠等[24]采用 LSTM 算法建立了灰砂岩在常规三轴压缩和应力松弛下的力学特性预测模型;Cui 等[25]基于工程数据库与 BP 网络开发了土体参数预测模型。二是泛化传统本构模型法,通过扩展传统本构方程为统一表达式,利用反演参数实现模型类间适配,完成不同类别土体的本构建模。如高玮等[26]提出屈服函数统一表达式,将本构模型类间识别问题转化为典型的类内参数辨识问题,结合仿生算法完成本构建模。然而,两类方法均存在局限,前者因神经网络非线性程度高,难以揭示力学机理,提高了理解门槛;后者受经验公式体系限制,难以突破传统框架。

受上述两种人工智能建模方法的启发,本研究提出一种基于有理函数统一形式的结构性黏土一维弹黏塑性模型。首先,有理函数可以逼近任意函数,采用有理函数形式的本构模型在数学表达上具有统一性,从而将建模问题转化为模型类内参数辨识问题;其次,通过调整多项式阶次和系数,可以模拟软黏土力学行为的区域化特征,建立特定形式的本构模型,突破"模型类型锁定"困境。再次,有理函数具有强大的非线性映射能力[27],其渐近行为可精确刻画软黏土变形的非线性损伤特征,通过与等效时间概念结合,有理函数形式的本构模型可以同时描述黏土的时效性和结构性特征。最后,当软黏土性质非常复杂时,可将人工智能机器学习技术引入优化算法,实现有理函数形式下本构模型参数的高效与精准计算。

基于以上分析,本文从结构性黏土的一维压缩特性出发,探讨与土体结构性相关的黏塑性应变演化规律,提出基于有理函数形式的黏塑性应变表达式。结合等效时间概念推导出黏塑性应变率的数学表达式,进而构建具有统一数学形式的结构性黏土一维弹黏塑性本构模型。最后,用线性回归的方式计算模型参数,并利用典型结构性软黏土的压缩固结试验和蠕变试验验证模型和参数计算方法的合理性。

1 有理函数形式的黏塑性应变表达式

1.1 重塑黏土的黏塑性应变表达式

根据土工试验结果,可用 Maxwell 力学元件模拟土体的一维变形性质[28],如图 1 所示。Maxwell 模型假设总应变为弹性应变(瞬时可逆)与黏塑性应变(时间相关且不可逆)的线性叠加,其中弹簧表征弹性应变 $\varepsilon_z^{\mathrm{e}}$,黏壶元件表征黏塑性应变 $\varepsilon_z^{\mathrm{vp}}$。因此,土体的总应变可以表示为

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^{\mathrm{e}} + \varepsilon_z^{\mathrm{vp}} \tag{1}$$

式中,ε_z、$\varepsilon_z^{\mathrm{e}}$ 和 $\varepsilon_z^{\mathrm{vp}}$ 均为一维条件下的应变。

根据经典土力学,弹性应变 $\varepsilon_z^{\mathrm{e}}$ 与有效应力 σ'_z 的关系式为

$$\varepsilon_z^{\mathrm{e}} = \varepsilon_{z0}^{\mathrm{e}} + \frac{\kappa}{V}\ln\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} \tag{2}$$

式中:κ 为 $e-\ln\sigma'_z$ 坐标下的回弹指数,其中 e 为孔隙比;σ'_z 为有效应力;σ'_{z0} 为初始有效应力;$V=1+e_0$ 为特征体积,e_0 为初始孔隙比;$\varepsilon_{z0}^{\mathrm{e}}$ 为当 $\sigma'_z=\sigma'_{z0}$ 时的土体应变。

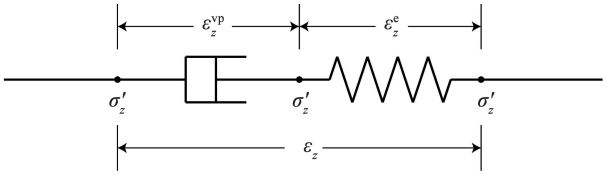


图 1　Maxwell 力学元件

Fig. 1　Maxwell element

Yin 和 Graham 根据土工试验和 Bjerrum 蠕变图提出了等效时间概念，在恒定有效应力的条件下，土体蠕变正比于等效时间的对数项。根据 Yin 和 Graham 的研究成果，令 t_e 和 t_0 分别为等效时间和参考等效时间，对于不同的恒定有效应力，土体的总应变可由经验公式[10-11]表示为

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{z0} + \frac{\lambda}{V}\ln\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} + \frac{\psi}{V}\ln\frac{t_e + t_0}{t_0} = \varepsilon_{z0} + \frac{\lambda}{V}\ln\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} + \frac{\psi}{V}\ln\frac{T}{T_0} \tag{3}$$

式中：λ 为 $e - \ln\sigma'_z$ 坐标下的压缩指数，ψ 为次固结指数，ε_{z0} 为当 $t_e = 0$ 且 $\sigma'_z = \sigma'_{z0}$ 时的土体应变，$T = t_e + t_0$ 为绝对等效时间[28-29]，$T_0 = t_0$ 为参考绝对等效时间[28-29]。

将式(2)和式(3)联立消去弹性分量后，可得黏塑性应变表达式为

$$\varepsilon_z^{vp} = \varepsilon_{z0}^{vp} + \frac{\lambda - \kappa}{V}\ln\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} + \frac{\psi}{V}\ln\frac{T}{T_0} \tag{4}$$

式中，$\varepsilon_{z0}^{vp} = \varepsilon_{z0} - \varepsilon_{z0}^{e}$ 为初始黏塑性应变。式(4)即为重塑黏土(非结构性)的黏塑性应变表达式。

1.2　$T = T_0$ 时刻结构性黏土的黏塑性应变表达式

天然软黏土与重塑黏土的本质差异源于自然应力作用下形成的结构性。如图 2(a)所示，结构性黏土的一维压缩曲线表现出显著的非线性特征，随着有效应力的增大，土体结构破坏殆尽，其压缩曲线趋近于重塑黏土的压缩曲线。值得注意的是，土体弹性应变在卸载后可恢复，因此可认为与土体结构破坏相关的为黏塑性应变，故本文将重点研究黏塑性应变随有效应力的变化规律。从图 2(b)中可以看出，结构性黏土和重塑黏土 $\varepsilon_z^{vp} - \ln\sigma'_z$ 曲线的空间位置均随着绝对等效时间的取值而发生改变。本文首先研究绝对等效时间 $T = T_0$ 时(即参考绝对等效时间线)的压缩方程，并令该时刻土体的黏塑性应变为 ε_{zr}^{vp}，获得 $\varepsilon_{zr}^{vp} - \ln\sigma'_z$ 关系式。然后再根据不同绝对等效时间压缩线之间的关系，由参考绝对等效时间压缩线的 $\varepsilon_{zr}^{vp} - \ln\sigma'_z$ 关系式，获得一般绝对等效时间(T 时)压缩线的 $\varepsilon_z^{vp} - \ln\sigma'_z$ 关系式。

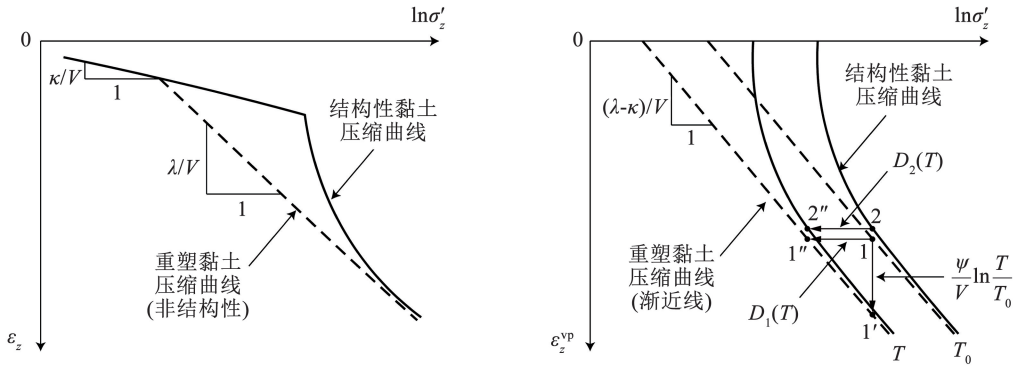


图 2　结构性黏土和重塑黏土的一维压缩曲线

Fig. 2　One-dimensional compression curves for structured clay and reconstituted clay

传统本构方程常采用固定形式的数学函数来描述土体应力–应变关系。然而人工智能算法凭借其强大的函数逼近能力和数据处理能力，可以统一地模拟土体的本构方程。根据现代数学理论可知，有理函数同样具有逼近任意函数的卓越性能。受到人工智能这些理念的启发，本文采用有理函数来一般性地表示结构性黏土有效应力和黏塑性应变之间的关系，其具有以下两个优点：一是在数学形式上具有统一性，可通过调整参数适配不同性质的土体；二是其强大的非线性映射能力能够出色地描述结构性黏土复杂的应力–应变关系。将 $\ln\sigma'_z$ 和 ε_{zr}^{vp} 分别代入有理函数表达式，可以得到 $T = T_0$ 时土体的黏塑性应变为

$$\varepsilon_{zr}^{vp}(\ln\sigma'_z) = \frac{\sum_{i=0}^{n} a_i (\ln\sigma'_z)^i}{1 + \sum_{j=1}^{m} b_j (\ln\sigma'_z)^j} \tag{5}$$

式中 a_i 和 b_j 为待拟合参数。有理函数的分子为 n 次多项式，分母为 m 次多项式，其中分母的常数项为 1。

随着有效应力的增加,当土体结构性完全破坏后,结构性黏土的 $\varepsilon_z^{vp}-\ln\sigma'_z$ 曲线会逼近并退化为重塑黏土的 $\varepsilon_z^{vp}-\ln\sigma'_z$ 曲线,即式(5)逼近式(4)。依据这一渐进性质,式(5)与式(4)满足如下关系:

$$\lim_{\ln\sigma'_z\to+\infty}\left[\frac{\sum_{i=0}^{n}a_i(\ln\sigma'_z)^i}{1+\sum_{j=1}^{m}b_j(\ln\sigma'_z)^j}-\left(\varepsilon_{z0}^{vp}+\frac{\lambda-\kappa}{V}\ln\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}}\right)\right]=0 \tag{6}$$

记 $b_0=1$,由式(6)推导可得:

$$n=m+1 \tag{7}$$

$$a_{m+1}-b_m\frac{\lambda-\kappa}{V}=0 \tag{8}$$

$$a_m-\frac{\lambda-\kappa}{V}b_{m-1}-\left(\varepsilon_{z0}^{vp}-\frac{\lambda-\kappa}{V}\ln\sigma'_{z0}\right)b_m=0 \tag{9}$$

式(7)表明了有理函数分子项和分母项阶次之间的关系;式(8)表明,在已知参数 a_{m+1} 和 b_m 的情况下,能够求出重塑黏土 $\varepsilon_z^{vp}-\ln\sigma'_z$ 曲线的斜率 $(\lambda-\kappa)/V$;式(9)表明,在已知参数 a_m、b_{m-1} 和 b_m 以及初始有效应力 σ'_{z0} 的情况下,可求出对应的初始黏塑性应变 ε_{z0}^{vp}。

1.3 T 时刻结构性黏土的黏塑性应变表达式

绝对等效时间线的空间位置会随绝对等效时间 T 取值的变化而动态调整。由式(4)可知,在 $\varepsilon_z^{vp}-\ln\sigma'_z$ 坐标中,重塑黏土的不同绝对等效时间线呈相互水平平行的关系;由一维压缩试验可知,结构性黏土的不同绝对等效时间线同样表现出近乎“水平平移”的特性,如图2(b)所示。因此,通过分析 T 时刻与 T_0 时刻绝对等效时间线的位置关系,能够由 T_0 时刻结构性黏土的黏塑性应变推导得到 T 时刻黏塑性应变表达式。

对于重塑黏土(对应图2(b)中的渐近线),当应力保持恒定,绝对等效时间从 T_0 变为 T,图2(b)中点1发生蠕变变形至点1′。根据式(4),点1→1′的应变可表示为

$$\Delta\varepsilon_z^{vp}=\frac{\psi}{V}\ln\frac{T}{T_0} \tag{10}$$

注意到图2(b)中纵坐标为黏塑性应变,渐近线的斜率为 $(\lambda-\kappa)/V$,根据几何关系,图中点1″相对于点1的水平平移距离 $D_1(T)$ 为

$$D_1(T)=\frac{\Delta\varepsilon_z^{vp}}{(\lambda-\kappa)/V}=\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\ln\frac{T}{T_0} \tag{11}$$

由结构性黏土的压缩特性可知,当有效应力增大到一定程度时,结构性黏土的 $\varepsilon_z^{vp}-\ln\sigma'_z$ 曲线会趋近于重塑黏土的曲线(渐近线)。此时,两条渐近线之间的水平距离与两条结构性黏土 $\varepsilon_z^{vp}-\ln\sigma'_z$ 曲线之间的水平距离是相等的,图2(b)中1→1″的距离与2→2″的距离应相等,即 $D_1(T)=D_2(T)$。当绝对等效时间为 T 时,结构性黏土 $\varepsilon_z^{vp}-\ln\sigma'_z$ 曲线上任意一点 $(\sigma'_z,\varepsilon_z^{vp})$ 满足以下关系:

$$\varepsilon_z^{vp}=\varepsilon_{zr}^{vp}(\ln\sigma'_z+D_2(T))=\varepsilon_{zr}^{vp}(\ln\sigma'_z+D_1(T)) \tag{12}$$

式中 $\varepsilon_{zr}^{vp}(\cdot)$ 和 ε_z^{vp} 分别表示绝对等效时间为 T_0 和 T 时土体的黏塑性应变。

将式(11)和(12)代入到式(5),再利用式(7),可得绝对等效时间为 T 时结构性黏土的黏塑性应变为

$$\varepsilon_z^{vp}(\ln\sigma'_z,T)=\frac{\sum_{i=0}^{m+1}a_i\left(\ln\sigma'_z+\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\ln\frac{T}{T_0}\right)^i}{1+\sum_{j=1}^{m}b_j\left(\ln\sigma'_z+\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\ln\frac{T}{T_0}\right)^j} \tag{13}$$

2 结构性黏土的一维弹黏塑性模型

2.1 结构性黏土的黏塑性应变率表达式

在推导黏塑性应变率时做出如下假设:黏塑性应变率仅取决于有效应力和黏塑性应变。基于此假设,黏塑性应变率可表示为

$$\dot{\varepsilon}_z^{vp}=f(\sigma'_z,\varepsilon_z^{vp}) \tag{14}$$

式(14)还蕴含了另一个重要性质:对于不同的加载历程,当土体达到特定的有效应力和黏塑性应变时,黏塑性应变率始终保持一致。这意味着黏塑性应变率仅取决于当前的有效应力和黏塑性应变状态,而与抵达该状态的加载路径无关[28]。基于这一性质,可以将简单加荷情况下得到的黏塑性应变率公式应用到一般加载历史和路径的建模之中。令

$$\ln\sigma'_z+\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\ln\frac{T}{T_0}=\eta \tag{15}$$

将式(15)代入式(13)可得

$$\varepsilon_z^{vp}(\eta)=\left(\sum_{i=0}^{m+1}a_i\eta^i\right)/\left(1+\sum_{j=1}^{m}b_j\eta^j\right) \tag{16}$$

对式(16)进行链式求导可得

$$\frac{\partial\varepsilon_z^{vp}}{\partial T}=\frac{\sum_{i=1}^{m+1}\sum_{j=1}^{m}[(i-j)a_ib_j\eta^{i+j-1}]+\sum_{i=1}^{m+1}ia_i\eta^{i-1}-\sum_{j=1}^{m}a_0jb_j\eta^{j-1}}{\left(1+\sum_{j=1}^{m}b_j\eta^j\right)^2}\frac{\partial\eta}{\partial T} \tag{17}$$

当有效应力 σ'_z 保持恒定时，有效应力率 $\dot{\sigma}'_z=0$。此时对式(15)关于绝对等效时间 T 求导，可得

$$\frac{\partial \eta}{\partial T}=\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\frac{1}{T} \tag{18}$$

在式(13)中，可以将 T 视为关于 σ'_z 和 ε_z^{vp} 的反函数，记为 $T(\sigma'_z,\varepsilon_z^{vp})$。将此反函数表达式代入式(18)后再代入式(17)，可得土体的黏塑性应变率为

$$\frac{\partial \varepsilon_z^{vp}}{\partial T}=\frac{\sum_{i=1}^{m+1}\sum_{j=1}^{m}\left[(i-j)a_ib_j\eta^{i+j-1}\right]+\sum_{i=1}^{m+1}ia_i\eta^{i-1}-\sum_{j=1}^{m}a_0jb_j\eta^{j-1}}{\left(1+\sum_{j=1}^{m}b_j\eta^j\right)^2}\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\frac{1}{T(\sigma'_z,\varepsilon_z^{vp})} \tag{19}$$

由式(19)可知，结构性黏土的黏塑性应变率 $\partial\varepsilon_z^{vp}/\partial T$ 仅取决于有效应力和黏塑性应变，而与到达该有效应力和黏塑性应变的应力路径和加载历史无关。即依据绝对等效时间得到的黏塑性应变率 $\partial\varepsilon_z^{vp}/\partial T$ 与任意加载路径下的黏塑性应变率 $\partial\varepsilon_z^{vp}/\partial t$ 相等，因此有

$$\dot{\varepsilon}_z^{vp}=\frac{\partial\varepsilon_z^{vp}}{\partial t}=\frac{\partial\varepsilon_z^{vp}}{\partial T} \tag{20}$$

式(20)也可以用反证法来证明。假设式(20)中的后一个等式不成立，即式(20)与式(14)不相等，那么同一个有效应力和黏塑性应变就会对应于不同的黏塑性应变速率，这就与“黏塑性应变率仅取决于有效应力和黏塑性应变”这一性质相矛盾。因此，式(20)与式(14)所阐述的性质必须相契合，即式(20)中的后一个等式必须成立。基于这一重要性质，可以把在简单加载情况(有效应力保持不变)下总结出的黏塑性应变率规律，拓展应用到更为复杂的加载历史建模中。

根据式(1)，土体总应变率可表示为

$$\dot{\varepsilon}_z=\dot{\varepsilon}_z^{e}+\dot{\varepsilon}_z^{vp} \tag{21}$$

式中：$\dot{\varepsilon}_z^{e}$ 为弹性应变率，$\dot{\varepsilon}_z^{vp}$ 为黏塑性应变率。由式(2)可得土体的弹性应变率为

$$\dot{\varepsilon}_z^{e}=\frac{\kappa}{V}\frac{\dot{\sigma}'_z}{\sigma'_z} \tag{22}$$

将式(20)代入式(19)，再将所得结果与式(22)共同代入式(21)，可得土体的总应变率为

$$\dot{\varepsilon}_z=\frac{\kappa}{V}\frac{\dot{\sigma}'_z}{\sigma'_z}+\frac{\sum_{i=1}^{m+1}\sum_{j=1}^{m}\left[(i-j)a_ib_j\eta^{i+j-1}\right]+\sum_{i=1}^{m+1}ia_i\eta^{i-1}-\sum_{j=1}^{m}a_0jb_j\eta^{j-1}}{\left(1+\sum_{j=1}^{m}b_j\eta^j\right)^2}\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\frac{1}{T(\sigma'_z,\varepsilon_z^{vp})} \tag{23}$$

2.2　模型参数的确定

本文提出的本构模型参数可分为试验所得参数和拟合计算所得参数两类。其中能够通过试验确定的参数有 κ、λ、e_0、σ'_{z0}、ψ、T_0。回弹指数 κ、压缩指数 λ、初始孔隙比 e_0 和初始有效应力 σ'_{z0} 可通过一维压缩试验确定；次固结指数 ψ 可通过一维常规固结试验确定；参考绝对等效时间 T_0 可结合具体试验状况确定；回弹指数 κ 和压缩指数 λ 也可以通过式(8)和式(9)进行计算。

模型中需要通过拟合计算确定的参数包括 m、$a_i(i=1,\cdots,m+1)$ 和 $b_j(j=1,\cdots,m)$。依据土体的应力–应变试验数据，采用多元线性回归方法[30]，可以将有理函数形式的黏塑性应变表达式转化为多元线性回归模型。对式(16)进行转化可得

$$\varepsilon_z^{vp}=a_{m+1}\eta^{m+1}+\cdots+a_1\eta+a_0-b_m\varepsilon_z^{vp}\eta^m-b_{m-1}\varepsilon_z^{vp}\eta^{m-1}-\cdots-b_1\varepsilon_z^{vp}\eta-\varepsilon_z^{vp} \tag{24}$$

在式(24)中，将参数 a_i 和 $-b_j$ 视为回归系数 β_k，将等号右侧由 η 和 ε_z^{vp} 组成的变量视为回归变量 $x_1,x_2,\cdots,x_{2m+2}$，从而可将有理函数形式的应力–应变关系式转变为如下多元线性回归模型

$$\varepsilon_z^{vp}=\beta_0+\beta_1x_1(\eta,\varepsilon_z^{vp})+\beta_2x_2(\eta,\varepsilon_z^{vp})+\cdots+\beta_{2m+2}x_{2m+2}(\eta,\varepsilon_z^{vp}) \tag{25}$$

根据式(25)可以构建多元线性回归模型的最小二乘函数进行求解。对于中小型数据集，通常采用正规方程计算解析解，即通过矩阵运算求得最优参数值。当数据量庞大、特征维度高或矩阵不可逆时，可采用人工智能算法，如神经网络、模拟退火、遗传算法等，通过迭代更新参数值，逐步最小化损失函数求得最优参数值。

3　模型的试验验证

3.1　参数的拟合计算

通过对 Yin 等[12]的 Vanttila clay 的一维常规压缩固结试验进行计算分析，验证本文模型的适用性。该试验的土样源于不同深度位置(2.93 ~ 3.30 m)的同一土体，其基本物理力学性质详见表 1。在常规压缩固结试验中，土体孔压消散的时间约为 2 h，在该过程中有效应力不恒定，绝对等效时间 T 不等于实际时间 t。孔压消散后，有效应力等于外荷载且保持不变。在土工试验中，通常选取 24 h 作为每级加载结束时间的判据，其约为孔压消散时间(2 h)的 10 倍。在此条件下，由于土体长时间处于有效应力恒定条件(有效应力不恒定时间小于 1/10)，此时实

际时间近似于绝对等效时间[29]，即 $t \approx T$。当实际时间 $t > 24$ h 后，有效应力不恒定的时间更是小于 1/10。故本试验选取 24 h 作为参考绝对等效时间，即 $T_0 = 24$ h。将 $T = T_0 = 24$ h 代入式(13)，式(13)可退化为式(5)，进而获得参考绝对等效时间线的方程。在对式(5)进行参数确定时，可灵活选择一组或者多组应力-应变数据进行计算。依据 2.2 节所阐述的参数确定方法，利用 Matlab 软件编制相关计算程序，计算得到的模型参数值见表 2，参数计算的统计指标见表 3。

表 1 土样的基本物理力学指标

Tab. 1 Basic physical and mechanical properties of soil samples

土样	取样深度/m	含水量/%	密度/(g·cm^{-3})	孔隙比	塑限/%	液限/%	塑性指数	液性指数
Vanttila clay[12]	2.93 ~ 3.30	118.0	1.390	3.30	32.0	102.0	70.0	1.23
Berthierville clay[31]	3.20 ~ 3.50	80.0	—	1.73	43.0	22.0	21.0	2.76

表 2 模型参数取值

Tab. 2 Values of model parameters for selected clays

土样	σ'_{z0}/kPa	ε_{z0}	V	κ	λ	ψ	m	a_2	a_1	a_0	b_1
Vanttila clay[12]	29	0.044 6	4.30	0.057	0.310	0.011 1	1	−0.016 3	0.023 6	0.125 7	−0.302 0
Berthierville clay[31]	63	0.020 0	2.73	0.032	0.404	0.021 9	1	−0.019 6	0.137 5	−0.231 7	−0.242 9

表 3 回归参数计算的统计指标

Tab. 3 Statistical metrics for regression parameter estimation

土样	拟合优度 R^2	均方根误差 RMSE	平均绝对误差 MAE	回归参数的置信区间			
				a_2	a_1	a_0	b_1
Vanttila clay[12]	0.973	0.014 8	0.008 8	[−0.019 9, −0.012 7]	[−0.309 4, −0.088 7]	[−0.050 6, 0.032 0]	[−0.339 3, −0.264 8]
Berthierville clay[31]	0.981	0.004 6	0.003 6	[−0.277 9, 0.238 7]	[−2.286 8, 2.561 8]	[−5.861 1, 5.397 6]	[−0.354 5, −0.131 4]

在确定合适的 m 值时，需要同时权衡模型精度、模型复杂度和计算效率，m 增大，在提升模型精度的同时也会增加参数个数和模型复杂性。$m = 1$（有 4 个待确定参数）时 Vanttila clay 的拟合优度 $R^2 = 0.973$，$m = 2$（有 6 个待确定参数）时 $R^2 = 0.985$，R^2 的提升不显著，但模型参数的增多会增加模型复杂度和降低计算效率。由于土体存在离散性，所以 $R^2 > 0.95$ 的 m 即能满足工程要求，故本研究中 m 的取值为 1 比较合适。为了更直观地展现模型预测结果与试验数据的对比情况，依据参数计算结果，在 $\varepsilon_z^{vp} - \ln\sigma'_z$ 坐标系中绘制计算所得模拟曲线，结果如图 3 所示。由图 3 可知，计算所得的 $\varepsilon_z^{vp} - \ln\sigma'_z$ 曲线与试验结果的趋势一致，模型预测结果与试验数据吻合程度良好，表明本文模型能够较好地描述结构性软黏土在一维压缩试验中的应力-应变关系。

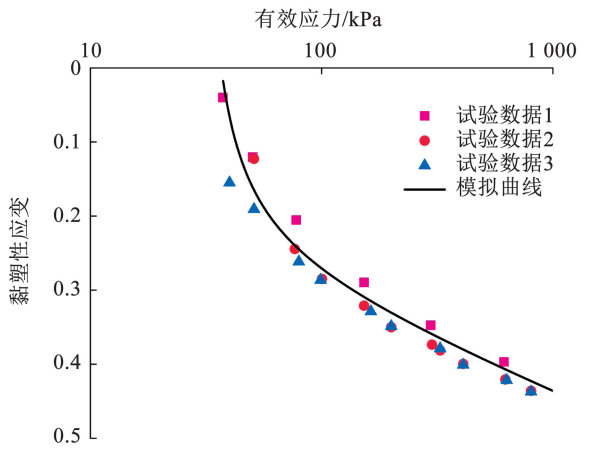


图 3 Vanttila clay 一维压缩试验结果与计算模拟结果

Fig. 3 Comparison between the one-dimensional compression test results and the computational simulation results of Vanttila clay

3.2 模型验证

为了模拟一维长期蠕变试验中应变随实际时间的变化规律，现推导突然加载情况下土体应变和实际时间之间的关系式。试验开始时的有效应力为 σ'_{z0}，应变为 ε_{z0}，初始黏塑性应变为零，本构关系如式(23)所示，式中的模型参数可根据 2.2 节中阐述的方法确定。首先，将式(23)转化成积分形式，可得

$$\int_{\varepsilon_{z0}}^{\varepsilon_z} \mathrm{d}\varepsilon_z - \frac{\kappa}{V}\int_{\sigma'_{z0}}^{\sigma'_z} \mathrm{d}(\ln\sigma'_z) = \int_0^t \frac{\sum_{i=1}^{m+1}\sum_{j=1}^{m}\left[(i-j)a_i b_j \eta^{i+j-1}\right] + \sum_{i=1}^{m+1} i a_i \eta^{i-1} - \sum_{j=1}^{m} a_0 j b_j \eta^{j-1}}{\left(1 + \sum_{j=1}^{m} b_j \eta^j\right)^2} \frac{\psi}{\lambda - \kappa} \frac{1}{T(\sigma'_z, \varepsilon_z^{vp})} \mathrm{d}t \tag{26}$$

式(26)等号右侧可分为两个积分过程。过程 1 为瞬时加载阶段：从起始状态的 σ'_{z0} 突然加载至 σ'_z，加载持续时间为 0。根据定积分定理，过程 1 中式(26)等号右侧的积分也为 0。过程 2 为恒定应力阶段：有效应力达到 σ'_z 后保持不变，即 $\dot{\sigma}'_z=0$，应变随时间发生变化。当 $t=0$ 时，式(16)表示的黏塑性应变为零，令 η_0 为 $t=0$ 时式(16)所对应的 η，有 $\sum_{i=0}^{m+1} a_i\eta_0^i=0$。根据 $\frac{\dot{\sigma}'_z}{\sigma'_z}=0$ 和 $\sum_{i=0}^{m+1} a_i\eta_0^i=0$，在过程 2 中，式(26)等号右侧的积分可转化为

$$\int_0^t \frac{\sum_{i=1}^{m+1}\sum_{j=1}^{m}\left[(i-j)a_ib_j\eta^{i+j-1}\right]+\sum_{i=1}^{m+1}ia_i\eta^{i-1}-\sum_{j=1}^{m}a_0jb_j\eta^{j-1}}{\left(1+\sum_{j=1}^{m}b_j\eta^j\right)^2}\left[\frac{\dot{\sigma}'_z}{\sigma'_z}+\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\frac{1}{T(\sigma'_z,\varepsilon_z^{\mathrm{vp}})}\right]\mathrm{d}t=$$

$$\int_{\eta_0}^{\eta(t)} \frac{\sum_{i=1}^{m+1}\sum_{j=1}^{m}\left[(i-j)a_ib_j\eta^{i+j-1}\right]+\sum_{i=1}^{m+1}ia_i\eta^{i-1}-\sum_{j=1}^{m}a_0jb_j\eta^{j-1}}{\left(1+\sum_{j=1}^{m}b_j\eta^j\right)^2}\mathrm{d}\eta=\frac{\sum_{i=0}^{m+1}a_i\eta(t)^i}{1+\sum_{j=1}^{m}b_j\eta(t)^i} \tag{27}$$

综合过程 1 和过程 2，式(26)等号右侧的积分即为式(27)。在式(27)中有

$$\mathrm{d}\eta=\left[\frac{\dot{\sigma}'_z}{\sigma'_z}+\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\frac{1}{T(\sigma'_z,\varepsilon_z^{\mathrm{vp}})}\right]\mathrm{d}t \tag{28}$$

将式(15)中绝对等效时间 T 表示为 η 的函数后代入式(28)，并注意到过程 2 中 σ'_z 是一个常数($\dot{\sigma}'_z=0$)，再对式(28)进行积分可得

$$\eta(t)=\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\ln\left(\mathrm{e}^{\frac{\lambda-\kappa}{\psi}\eta_0}+\frac{t}{T_0}\sigma'^{\frac{\lambda-\kappa}{\psi}}_z\right) \tag{29}$$

令绝对等效时间 $T=T_0$ 时 η_0 所对应的有效应力为 σ'_{zT0}，根据式(15)有 $\eta_0=\ln\sigma'_{zT0}$，将其代入式(29)可得

$$\eta(t)=\ln\sigma'_z+\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\ln\left[(\sigma'_{zT0}/\sigma'_z)^{\frac{\lambda-\kappa}{\psi}}+\frac{t}{T_0}\right] \tag{30}$$

将式(30)代入式(27)，并对式(26)进行积分可得

$$\varepsilon_z=\varepsilon_{z0}+\frac{\kappa}{V}\ln\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}}+\frac{\sum_{i=0}^{m+1}a_i\left\{\ln\sigma'_z+\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\ln\left[(\sigma'_{zT0}/\sigma'_z)^{\frac{\lambda-\kappa}{\psi}}+\frac{t}{T_0}\right]\right\}^i}{1+\sum_{j=1}^{m}b_j\left\{\ln\sigma'_z+\frac{\psi}{\lambda-\kappa}\ln\left[(\sigma'_{zT0}/\sigma'_z)^{\frac{\lambda-\kappa}{\psi}}+\frac{t}{T_0}\right]\right\}^j} \tag{31}$$

式(31)展示了突然加载情况下应变随实际时间的变化规律。利用式(31)可对 Leroueil 等[31]的 Berthierville clay 的一维长期蠕变试验进行模拟分析，并与试验结果进行对比。模拟分析时选用的物理参数和模型参数见表 1 和表 2，模拟曲线与试验数据见图 4。图 4 结果表明，在主固结完成后的变形阶段，模型计算曲线与试验数据数吻合良好，表明模型能较好地描述土体应变随实际时间变化的规律。

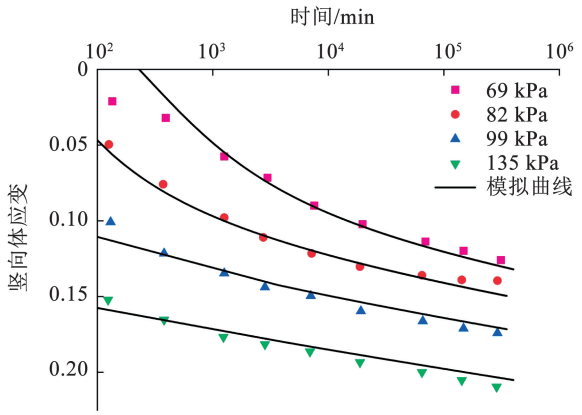


图 4　Berthierville clay 一维蠕变试验数据及计算曲线

Fig. 4　Berthierville clay one-dimensional creep test data and calculated curves

4　结论与展望

本文提出了一种基于有理函数统一形式的结构性黏土一维弹黏塑性本构模型，主要结论如下。

1)基于 Maxwell 力学元件，将土体应变解耦为弹性应变与黏塑性应变，根据结构性黏土一维压缩特性着重分析与结构性相关的黏塑性应变，提出了有理函数形式下结构性黏土黏塑性应变表达式。

2)基于“土体黏塑性应变率仅取决于有效应力和黏塑性应变”的假定，利用绝对等效时间概念推导出结构性黏土的黏塑性应变率表达式，进而构建结构性黏土一维弹黏塑性本构模型。

3)利用线性规划的方法，将参数求解问题转化为多元线性回归问题，在 Matlab 中编制相关计算程序，借用计算机技术对模型中的参数进行矩阵求解。

4)推导了突然加载情况下土体应变随实际时间的变化规律，对 Vanttila clay 和 Berthierville clay 的试验数据进行模拟计算，并与试验结果对比分析，验证了本文模型的适用性和参数计算方法的可行性。

在模型参数的确定问题上，后续还可以进一步发挥人工智能的潜能，如借助神经网络[32]、模拟退

火算法[33]、粒子群算法[34]和遗传算法[35]等人工智能算法,结合现场智能监测数据,动态确定参数,以推动智能算法在岩土本构建模中的应用。当然,人工智能也面临挑战,如计算耗时较长和数据量要求较大等问题。但计算耗时较长可以通过芯片升级和算法优化逐步克服,模型训练依赖大体量数据可以采用智能监测来完善。

参考文献

[1]王钰轲, 李在阳, 蒋睿, 等. 考虑结构性影响的天然软黏土弹塑性本构模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(10): 103
WANG Yuke, LI Zaiyang, JIANG Rui, et al. An elastoplastic constitutive model considering the influence of structure for natural soft clay[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(10): 103. DOI: 10.11918/202409064

[2]AI Zhiyong, GAN Lingu, YUAN Haojiang. Viscoelastic-elastoplastic analysis of overconsolidated structural soft soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2025, 49(3): 961. DOI: 10.1002/nag.3908

[3]刘光庆, 刘海旺, 陈缘, 等. 某新建机场地基淤泥质土流变特性试验研究[J]. 地基处理, 2021, 3(6): 482
LIU Guangqing, LIU Haiwang, CHEN Yuan, et al. Experimental study on the rheological properties for mucky soil in the foundation of a new airport[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(6): 482. DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.06.005

[4]刘忠玉, 张家超, 夏洋洋, 等. 考虑非线性流变的一维修正 UH 模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(11): 107
LIU Zhongyu, ZHANG Jiachao, XIA Yangyang, et al. A one-dimensional modified UH model considering nonlinear rheology[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(11): 107. DOI: 10.11918/201904113

[5]ZHANG Chuang, ZHANG Junhui, LI Jianzhong. An improved creep model for unsaturated reticulated red clay[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(11): 4754. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.02.039

[6]白高峰, 赵丰博, 霍雨佳, 等. 某工程地基岩体流变特性现场试验研究[J]. 地基处理, 2021, 3(5): 388
BAI Gaofeng, ZHAO Fengbo, HUO Yujia, et al. Field test study on rheological properties of foundation rock mass[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(5): 388. DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.05.005

[7]李广信. 浅议土的复杂性[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(5): 1087
LI Guangxin. Brief discussion on the complexity of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(5): 1087. DOI: 10.11779/CJGE20230188

[8]张嘎, 王刚, 尹振宇, 等. 土的基本特性及本构关系[J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 106
ZHANG Ga, WANG Gang, YIN Zhenyu, et al. Basic characteristics and constitutiverelations of soil[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2020, 53(2): 106. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2020.02.009

[9]LEROUEIL S, KABBAJ M, TAVENAS F, et al. Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays[J]. Geotechnique, 1985, 35(2): 178. DOI: 10.1680/geot.1985.35.2.159

[10]YIN J, GRAHAM J. Viscous-elastic-plastic modelling of one-dimensional time-dependent behaviour of clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(2): 203. DOI: 10.1139/t90-032

[11]殷建华. 从本构模型研究到试验和光纤监测技术研发[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 4
YIN Jianhua. From research on constitutive models to the development of experimental techniques and fiber optic monitoring technologies[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 4

[12]YIN Zhenyu, KARSTUNEN M, CHANG C S, et al. Modeling time-dependent behavior of soft sensitive clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(11): 1108. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000527

[13]尹振宇. 天然软黏土的弹黏塑性本构模型:进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1364
YIN Zhenyu. Elastoviscoplastic constitutive models for natural soft clays: progress and development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1364

[14]柯文汇, 陈健, 盛谦. 结构性软黏土的一维弹黏塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 498
KE Wenhui, CHEN Jian, SHENG Qian. A one-dimensional elastoviscoplastic model for structured soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 498. DOI: 10.11779/CJGE201603013

[15]曾玲玲, 刘松玉, 洪振舜. 考虑土结构性影响的改进 EVP 压缩模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(2): 349
ZENG Lingling, LIU Songyu, HONG Zhenshun. An improved EVP compression model considering the influence of soil structure[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(2): 349. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.02.029

[16]ZHOU Fengxi, WANG Liye, LIU Hongbo. A fractional elasto-viscoplastic model for describing creep behavior of soft soil[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16: 70. DOI: 10.1007/s11440-020-01008-5

[17]YIN Zhenyu, JIN Yinfu, LIU Zhongqiang. Artificial intelligence in geotechnical engineering: Practice[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2020, 21(6): 407. DOI: 10.1631/jzus.A20AIGE1

[18]BAGHBANI A, CHOUDHURY T, COSTA S, et al. Application of artificial intelligence in geotechnical engineering: A state-of-the-art review[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 228: 103991. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103991

[19]ELSAWY M B, ALSHAREKH M F, SHABAN M. Modeling undrained shear strength of sensitive alluvial soft clay using machine learning approach[J]. Applied Sciences, 2022, 12(19): 10177. DOI: 10.3390/app121910177

[20]GAO W. The application of machine learning in geotechnical engineering[J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4712. DOI: 10.3390/app14114712

[21]江晓童, 张西文, 吕颖慧, 等. 机器学习在岩土工程中的应用现状与未来展望[J]. 岩土力学, 2025, 46(S1): 419
JIANG Xiaotong, ZHANG Xiwen, LYU Yinghui, et al. Current applications and future prospects of machine learning in geotechnical engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(S1): 419. DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0869

[22]陈湘生, 洪成雨, 苏栋. 智能岩土工程初探[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2151

CHEN Xiangsheng, HONG Chengyu, SU Dong. A preliminary study on intelligent geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2151. DOI: 10.11779/CJGE202212001

[23]王钰轲，冯爽，万愉快，等. 基于深度卷积网络混合 LSSVM 算法的路基粉土抗剪强度指标预测[J]. 中国公路学报，2025，38(5)：26
WANG Yuke, FENG Shuang, WAN Yukuai, et al. Prediction of shear strength indexes of subgrade silty soil based on deep convolutional network and hybrid LSSVM algorithm[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(5): 26. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2025.05.003

[24]张璠，李书恒，朱其志，等. 基于深度学习的岩石短长期本构模型及灰砂岩变形预测[J]. 岩土力学，2025，46(1)：293
ZHANG Jin, LI Shuheng, ZHU Qizhi, et al. Short-term and long-term constitutive models of rocks based on deep learning and deformation prediction of gray sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(1): 293. DOI: 10.16285/j.rsm.2024.0344

[25]CUI Kai, JING Xiang. Research on prediction model of geotechnical parameters based on BP neural network[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31: 8209. DOI: 10.1007/s00521-018-3902-6

[26]高玮，郑颖人，冯夏庭. 岩土本构模型识别的仿生算法研究[J]. 岩土力学，2004(1)：33
GAO Wei, ZHENG Yingren, FENG Xiating. Research on bionic algorithms for identification of rock-soil constitutive models[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(1): 33. DOI:10.16285/j.rsm.2004.01.007

[27]VISWANATHAN P, CHAND A. Fractal rational functions and their approximation properties[J]. Journal of Approximation Theory, 2014, 185: 32. DOI: 10.1016/j.jat.2014.05.013

[28]胡亚元. 黏土的一维非平行等效时间线流变模型[J]. 土木建筑与环境工程，2012，34(2)：33
HU Yayuan. A one-dimensional non-parallel equivalent time line rheological model for clay[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2012, 34(2): 33

[29]胡亚元. 利用 EVP 模型确定堆载预压法的卸载时机[J]. 岩土力学，2010，31(6)：1828
HU Yayuan. Determination of unloading timing of preloading method by EVP model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1828. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.06.015

[30]蒙哥马利，派克，瓦伊宁. 线性回归分析导论[M]. 王辰勇，译. 第 5 版. 北京：机械工业出版社，2016：47
MONTGOMERY D C, PECK E A, VINING G G Introduction to Linear Regression Analysis[M]. Translated by Chenyong Wang. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 47

[31]LEROUEIL S, KABBAJ M, TAVENAS F. Study of the validity of a $\sigma'_v - \varepsilon_v - \dot{\varepsilon}_v$ Model in In situ conditions[J]. Soils and Foundations, 1988, 28(3): 17. DOI: 10.3208/sandf1972.28.3_13

[32]赖建平，赵辉，王东升，等. GA-XGBoost 模型对路基压实质量的预测[J]. 哈尔滨工业大学学报，2025，57(7)：33
LAI Jianping, ZHAO Hui, WANG Dongsheng, et al. Prediction of dynamic deformation modulus of subgrade based on GA-XGBoost model[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(7): 33. DOI:10.11918/202406032

[33]张长兴，王德水，刘玉峰，等. 模拟退火算法在岩土热物性参数确定中的应用[J]. 化工学报，2015，66(2)：545
ZHANG Changxing, WANG Deshui, LIU Yufeng, et al. Application of simulated annealing algorithm in determining thermophysical parameters of rocks and soils[J]. CIESC Journal, 2015, 66(2): 545. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141139

[34]ZHANG Y, GALLIPOLI D, AUGARDE C. Parameter identification for elasto-plastic modelling of unsaturated soils from pressuremeter tests by parallel modified particle swarm optimization[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 48: 293. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.08.004

[35]ZHANG S, XIONG H B, TONG C X, et al. Modelling the evolving critical state of crushable soils and parameter optimization with an improved genetic algorithm (AIS-RCGA)[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2025, 62: 1. DOI: 10.1139/cgj-2024-0131

（编辑　吕雪梅）

DOI:10.11918/202503073

基于变形动态预测的岩质边坡力学参数反演方法

张荣洲,王述红,董福瑞,高晨翔,侯钦宽

(东北大学 资源与土木工程学院,沈阳 110819)

摘 要:岩体力学参数是岩质边坡稳定性综合评判的重要指标之一。现有参数反演方法主要基于稳定状态下的最终变形值,难以反映实际边坡变形过程中的非线性时变特征。为此,本文提出一种基于边坡变形动态预测的岩体力学参数反演方法。首先,引入乌鸦搜索算法(crow search algorithm,CSA)优化在线贯序极限学习机(online sequential extreme learning machine,OSELM)的权值和阈值参数,分别构建CSA-OSELM变形动态预测和参数反演模型;其次,采用分段3次Hermite插值和小波分解方法预处理实测变形数据,提取趋势项变形;再次,利用变形动态预测模型获取边坡的最终变形值,并代入反演模型输出力学参数;最后,以新疆京希-巴拉克矿区南侧边坡工程为例开展验证分析。结果表明:CSA-OSELM模型在预测精度与稳定性方面均优于其他模型;将反演所得力学参数代入数值模型进行正演计算,计算值与实测变形值的平均误差为6.21%,进一步验证了本文方法的实用性和可靠性。研究成果可为实际工程中快速获取岩体力学参数提供一种新的技术途径。

关键词:岩质边坡;变形动态预测;参数反演;乌鸦搜索算法;在线贯序极限学习机

中图分类号:TU452 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0168-12

Inversion method for mechanical parameters of rock slopes based on dynamic prediction of deformation

ZHANG Rongzhou, WANG Shuhong, DONG Furui, GAO Chenxiang, HOU Qinkuan

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Mechanical parameters of rock mass are one of the important indicators for the comprehensive stability assessment of rock slopes. Existing parameter inversion methods are mainly based on the final deformation values under stable conditions, making it difficult to reflect the nonlinear and time-varying characteristics in the actual slope deformation process. To this end, this paper proposed an inversion method for the mechanical parameters of rock mass based on the dynamic prediction of slope deformation. Firstly, the crow search algorithm (CSA) was introduced to optimize the weight and threshold parameters of the online sequential extreme learning machine (OSELM), and the CSA-OSELM dynamic deformation prediction and parameter inversion models were constructed, respectively. Secondly, piecewise cubic Hermite interpolation and wavelet decomposition methods were adopted to preprocess the measured deformation data to extract the trend term deformation. Thirdly, the dynamic deformation prediction model was used to obtain the final deformation value of the slope, which was substituted into the inversion model to output the mechanical parameters. Finally, verification analysis was carried out by taking the southern slope project of the Jingxi-Barak mining area in Xinjiang as an example. The results show that the CSA-OSELM model outperforms other models in prediction accuracy and stability; by substituting the mechanical parameters obtained from the inversion into the numerical model for forward calculation, the average error between the calculated values and the measured deformation values is 6.21%, which further verifies the practicality and reliability of the method in this paper. The research results can provide a new technical approach for rapidly obtaining mechanical parameters of rock mass in practical engineering.

Keywords: rock slope; dynamic deformation prediction; parameter inversion; crow search algorithm; online sequential extreme learning machine

合理确定岩体的力学参数,对于岩体工程的设计和施工以及分析岩体的稳定性均具有十分重要的意义[1-2]。测定岩体力学参数常用的方法是原位测试和室内试验,但原位测试存在成本高、周期长的缺

收稿日期:2025-03-25;**录用日期**:2025-07-27;**网络首发日期**:2025-07-31
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250731.0951.002
基金项目:国家自然科学基金(52408417)
作者简介:张荣洲(2001—),男,硕士研究生;王述红(1969—),男,教授,博士生导师
通信作者:王述红,shwangneu@126.com

点，室内试验存在取样困难、缺乏代表性、尺寸效应等问题。参数反演法以其准确、高效、低成本等优势，成为解决复杂工程问题不可或缺的手段。孙志彬等[3]基于强度折减法与极限分析上限定理，结合边坡临界滑动面方程和深度计算公式，反分析边坡力学参数。Bertuzzi[4]结合经验公式和数学模型，基于澳大利亚悉尼两条隧道的变形监测数据反演估算岩体弹性模量。李一鸣等[5]改进经典 Oliver-Pharr 公式，结合数控岩石压痕试验装置和精细化三维数值仿真，实现反演获取岩石塑性参数。受数值模型简化和局限性等因素影响，传统参数反演方法难以确定岩体力学参数与变形之间复杂的不确定关系[6]。随着计算机和人工智能技术的不断发展，众多学者使用粒子群、人工鱼群、萤火虫和连续蚁群等算法优化机器学习模型反演岩体力学参数[7-11]，大幅度提高了参数反演的精度。这类参数反演方法的本质是通过大量样本数据训练机器学习模型，建立岩体力学参数与变形间的非线性映射关系。因此，反演参数的准确性建立在变形值可靠的基础上。采用边坡变形发展过程中的监测数据进行参数反演误差较大，以往研究学者多使用岩体最终变形值进行反演。然而，在实际工程中，岩坡受人工开挖扰动的影响较大，力学参数原位测试难以开展且短时间内无法得到岩体最终变形值。如果能够利用前期已有变形数据预测岩体最终变形值，进一步代入反演模型获取准确的力学参数，则可以提前开展有效的边坡加固措施，具有巨大经济和安全效益。同样，基于算法和机器学习的变形预测方法也得到了广泛应用[12-16]，但现阶段二者仍存在一些弊端：1）常用的寻优算法存在鲁棒性不佳、早熟收敛现象和容易陷入局部最优解的问题；2）因设备误差、信号干扰等因素，现场实测变形数据常不完整，有限的数据可能导致模型训练不足，增加预测误差；3）已往研究多仅对非连续的监测数据进行插值处理，而噪声序列项变形的存在会降低预测精度；4）传统“静态”预测模型（支持向量机、极限学习机等）只能一次性学习全部初始数据，时效性较差，无法捕捉复杂的动态变化和准确预测边坡后期变形规律。

针对上述问题，本文采用分段 3 次 Hermite 插值法将实测数据等距化，结合善于捕捉信号局部特征的小波分解方法，提取趋势项变形。然后引入寻优能力强大的乌鸦搜索算法（CSA）和具备时间序列处理能力的在线贯序极限学习机（OSELM），分别构建 CSA-OSELM 变形动态预测和参数反演模型，提出一种基于边坡变形动态预测的岩体力学参数反演方法。最后，将本文方法应用于节理发育成熟的新疆京希-巴拉克采区南侧边坡，对比实测与数值模型正算最终变形值，进一步验证本文所提方法的实用性和可靠性。

1　算法基本原理与模型构建

1.1　乌鸦搜索算法

乌鸦搜索算法[17]是由 Askarzadeha 于 2016 年提出的一种新型的元启发式优化器。CSA 受乌鸦行为的启发，基本思路为乌鸦将多余的食物储存在藏身之处，并在需要食物时将其取回。假设在 d 维空间中包含 N 只随机分布的乌鸦。每个乌鸦表示一个问题的可行解决方案，d 是决策变量的数量，则乌鸦种群可表示为

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_d^1 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_1^N & \cdots & x_d^N \end{bmatrix} \tag{1}$$

假设在迭代过程中，乌鸦 i 在每一轮会选择 1 只乌鸦 j 进行跟踪，乌鸦 j 想要寻找其最优位置，乌鸦 i 决定跟随乌鸦 j 接近乌鸦 j 的最优位置。乌鸦 i 的位置此时有以下两种情况。

情况 1：乌鸦 j 未发现乌鸦 i，则乌鸦 j 继续前往食物隐藏地，由式（2）可以得到乌鸦 i 的新位置为

$$x_i^{t+1}=x_i^t+r_i\cdot l_{\mathrm{F}i}^t\cdot(m_j^t-x_i^t) \tag{2}$$

式中：x_i^{t+1} 为第 i 只乌鸦在第 $t+1$ 轮的位置；x_i^t 为第 i 只乌鸦在第 t 轮的位置；m_j^t 为第 j 只乌鸦在第 t 轮的最优位置；r_i 为第 i 只乌鸦的随机概率，大小分布在（0，1）之间；$l_{\mathrm{F}i}^t$ 为第 i 只乌鸦在第 t 轮的跟随飞行距离。

图 1 为该情况下的示意图以及 l_{F} 对搜索能力的影响。l_{F} 值较小会导致局部搜索，l_{F} 值较大会导致全局搜索。如图 1（a）所示，当 $l_{\mathrm{F}}<1$ 时，乌鸦 i 的下一个位置 x_i^{t+1} 位于 x_i^t 和 m_j^t 两点之间的虚线上；如图 1（b）所示，当 $l_{\mathrm{F}}>1$ 时，乌鸦 i 的下一个位置 x_i^{t+1} 位于 m_j^t 两点外侧的虚线上。

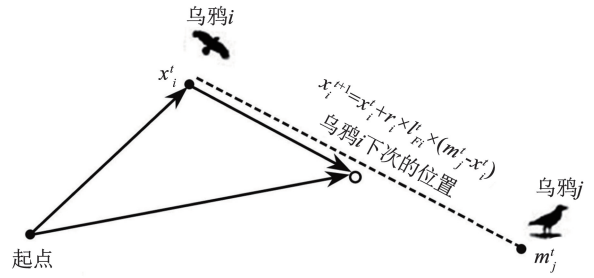
情况 2：乌鸦 j 发现了乌鸦 i，则乌鸦 j 为了保护自己的最优位置不被盗取，乌鸦 j 会随机去一个位置误导乌鸦 i。

综合以上两种情况，乌鸦 i 在跟随乌鸦 j 时得到的新位置为

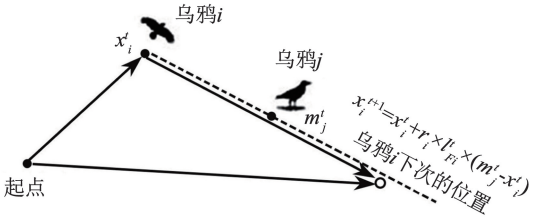
$$x_i^{t+1}=\begin{cases} x_i^t+r_i\cdot l_{\mathrm{F}i}^t\cdot(m_i^t-x_i^t), & r_j\geqslant P_{aj}^t \\ \text{a random position}, & r_j<P_{aj}^t \end{cases} \tag{3}$$

式中：r_j 为第 j 只乌鸦的随机概率；P_{aj}^t 为乌鸦 j 在迭代 t 轮时的警觉概率。可知，通过降低警觉概率值，CSA 会倾向于在局部区域内进行搜索，在该区域内可以找到当前的良好解决方案。因此，使用较小的

警觉概率值会增加搜索的强度。另一方面,随着认知概率值的增加,CSA 将更倾向于在全局范围内探索,增强结果多样化。



(a) $l_F<1$



(b) $l_F>1$

图 1 乌鸦飞行路线

Fig. 1 Flight path of crow

1.2 在线贯序极限学习机模型

在线贯序极限学习机是极限学习机(extreme learning machine,ELM)的一种在线序列学习版本,具有较强的泛化能力和预测功能。相较 ELM 模型,OSELM 模型可在线处理数据,通过序列式的方式,逐步利用新获得数据更新模型,从而适应流数据或动态环境下的学习需求。

OSELM 模型扩展了 ELM 模型,主要包括初始化和在线学习两个阶段。

1)初始化阶段

设定隐含层节点数为 m,初始训练子集 $\psi_0=\{(a_i,b_i)\mid i=1,2,\cdots,M_0\}$,且 $M_0\geqslant m$,激励函数为 $f(x)$,由式(4)可求得初始隐含层输出权值 β_0 为:

$$\beta_0=\boldsymbol{N}_0\boldsymbol{E}_0^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_0 \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{E}_0$ 为隐含层初始输出矩阵,$\boldsymbol{N}_0=[E_0^{\mathrm{T}}E_0]^{-1}$,$\boldsymbol{R}_0=[b_1,b_2,\cdots,b_{M_0}]^{\mathrm{T}}$。

2)在线学习阶段

设定 n 为训练集数据的批次序号,令初始 n 为 0,则第 $n+1$ 批训练数据,按照式(5)和式(6)计算其新的隐含层输出权值和输出矩阵:

$$\boldsymbol{N}_{n+1}=\boldsymbol{N}_n-\frac{\boldsymbol{N}_n\boldsymbol{e}_{n+1}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_{n+1}\boldsymbol{N}_n}{1+\boldsymbol{e}_{n+1}\boldsymbol{N}_n\boldsymbol{e}_{n+1}^{\mathrm{T}}} \tag{5}$$

$$\beta_{n+1}=\beta_n+\boldsymbol{N}_{n+1}\boldsymbol{E}_{n+1}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{R}_{n+1}^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{E}_{n+1}\beta_n) \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{e}_n=[F(c_1,d_1,a_n),\cdots,F(c_m,d_m,a_n)]$,$F(c_m,d_m,a_n)=f_m(a_n)$,$c_m$,$d_m$ 分别为第 m 个隐含层节点的输入权值和阈值。

1.3 CSA-OSELM 边坡变形动态预测模型

工程中边坡变形常呈现高度非线性和非稳态特征。因此,在保存原有模型学习的基础上,需要对样本数据集进行及时更新。引入具有在线学习能力的 OSELM 模型到岩体变形预测中,其能够利用新获得的变形数据不断更新网络模型,实现动态预测。然而,OSELM 模型的性能容易受到初始随机参数的影响,易导致模型泛化能力有限、稳定性差和过拟合。鉴于此,本文运用全局搜索能力强、稳定高效的乌鸦搜索算法,优化 OSELM 模型的权值和阈值,构建具有较高计算精度和稳定性的 CSA-OSELM 变形预测模型。具体建模流程如图 2 所示。

1)算法参数初始化。初始化乌鸦搜索算法的相关参数,主要包括乌鸦位置、种群数量、最大迭代次数、警觉概率、飞行长度、记忆矩阵等。

2)建立 OSELM 模型。确定 OSELM 各层的神经元节点个数,随机初始化生成输入权值和隐含层阈值。使用初始批次数据(乌鸦位置)训练 OSELM 模型,计算每个解的适应度值。

3)不断迭代更新乌鸦的位置,直至达到最大迭代次数,输出最终乌鸦位置和记忆,作为最优的 OSELM 的输入权值和隐含层阈值。

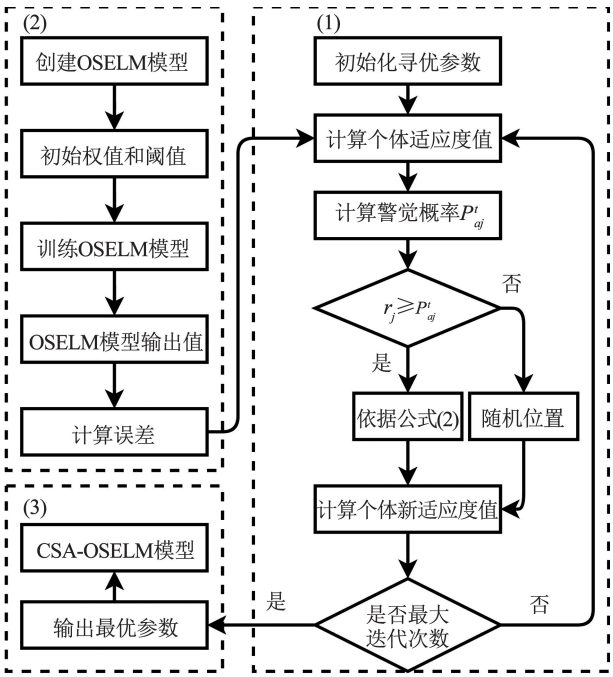


图 2 CSA-OSELM 建模流程

Fig. 2 Modeling process of CSA-OSELM

1.4 CSA-OSELM 岩体力学参数反演模型

鉴于 CSA-OSELM 模型具备动态环境适应能力和高效稳定的搜索优势,本研究构建了相应的岩体力学参数反演模型,其训练流程如下:

1)构建与实际边坡相符的离散元模型,监测点

布置与工程实际一致；

2）采用拉丁超立方体抽样、均匀设计和正交实验设计生成 300 组参数样本，通过数值模拟计算对应监测点变形值，构建参数－变形值训练集和测试集；

3）以变形值为输入、岩体力学参数为输出，通过样本学习建立非线性映射关系，经多次试算确定最优网络参数。

2　CSA-OSELM 变形动态预测模型性能检验

2.1　模型性能评价指标

本文采用决定系数 R^2、平均相对误差 E_{mr}、均方根误差 E_{rms}和对称平均绝对百分比误差 E_{smap}，4 项常用指标衡量 CSA-OSELM 变形预测模型和参数反演模型的效果。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{u}(h_i - h'_i)}{\sum_{i=1}^{u}(h_i - \bar{h})} \tag{7}$$

$$E_{\mathrm{mr}} = \frac{1}{u}\sum_{i=1}^{u}\frac{|h_i - h'_i|}{h_i} \tag{8}$$

$$E_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\frac{1}{u}\sum_{i=1}^{u}(h_i - h'_i)^2} \tag{9}$$

$$E_{\mathrm{smap}} = \frac{100\%}{u}\sum_{i=1}^{u}\frac{|h_i - h'_i|}{(|h_i| + |h'_i|)/2} \tag{10}$$

式中：u 为测试样本数量；h'_v、h_v 和 $\bar{h}_v$ 分别为模型预测值、测试样本实际值和测试样本实际平均值。

2.2　实测变形预处理手段

由于施工中易出现测站接收器损坏及卫星失锁等情况，现场监测数据常是间断的。为提高模型训练效率和预测精度，需要先插值处理实测变形数据。相较于 3 次样条插值法，分段 3 次 Hermite 插值法可在很大程度保留原始数据的基础上，还具有更灵活光滑、节点需求少和稳定性高的优势，故将分段 3 次 Hermite 插值法应用于本文对实测变形数据进行等距化处理中。

小波分解[18]是一种对信号进行多尺度分析的方法，可以将信号分解成不同频率的成分，从而更好地捕捉信号的局部特征。因此，本文采用小波分解方法对插值后数据进行降噪处理，将时序预测数据分解为高频随机项变形 $P(t)$ 和低频趋势性变形 $Q(t)$。趋势项变形反映了岩体在地质条件、岩石性质和施工方法影响下的长期变化，随机项变形体现了各种随机因素的综合干扰。

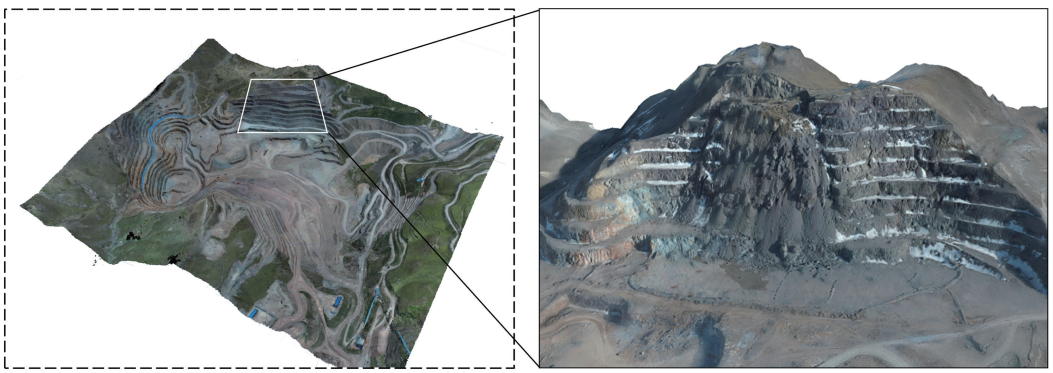
$$S(t) = P(t) + Q(t) \tag{11}$$

式中：t 为监测时间；$S(t)$ 为边坡累计变形值；$P(t)$ 为高频随机项变形；$Q(t)$ 为低频趋势性变形。

2.3　CSA-OSELM 模型工程验证

2.3.1　工程背景

新疆金川京希－巴拉克金矿位于新疆伊犁哈萨克自治州伊宁县北部的科古尔琴山南麓。本研究以该矿区南侧边坡为研究对象，其地形地貌特征如图 3所示。研究区南侧边坡具有典型的高陡边坡特征，岩性以凝灰质砂岩为主。通过现场调查发现，该边坡岩体破碎程度较高，节理、裂隙等结构面发育成熟。结合区域气候特征分析，该地区常年受高海拔寒风和季节性融水侵蚀作用的影响，导致边坡稳定性显著降低，岩体易发生变形破坏。根据矿山实际生产需求，边坡开挖采用自上而下分台阶方式进行，共划分为 10 个台阶，每个台阶高度控制在约 13 m。具体变形监测点布置如图 4 所示。



(a) 采区三维地形图　　(b) 南邦边坡现状图

图 3　采区基本信息

Fig. 3　Basic information of mining area

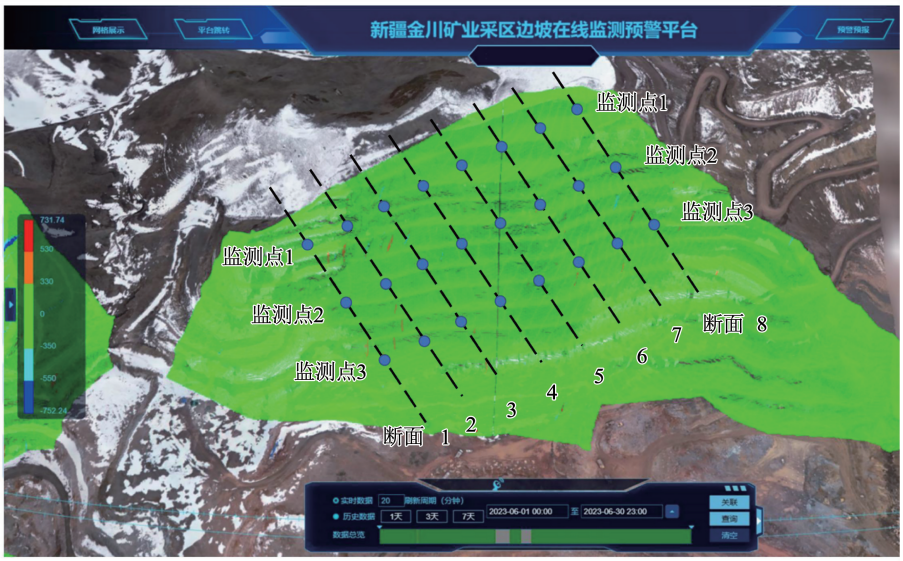


图 4 变形监测点布置

Fig. 4 Arrangement of deformation monitoring points

2.3.2 模型检验

定义断面 1 的 1,2,3 监测点分别为 D1-1,D1-2,D1-3,选择监测点 D1-1,D1-2,D1-3 处于变形后期阶段 50 d 的实测变形值进行分析,检验 CSA-OSELM 变形动态预测模型的性能。针对该断面变形监测值为非等距时序数据,采用上述分段 3 次 Hermite 插值法对原始数据进行等距化处理,处理后的数据如图 5 所示。

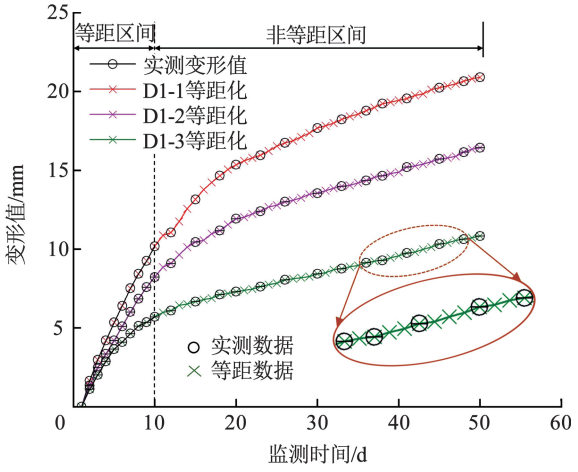


图 5 断面 1 变形等距化处理

Fig. 5 Equidistant processing of deformation for section 1

观察图 5 可知,该断面变形速率逐渐变慢,但变形的收敛趋势并不明显,不利于模型预测。采用小波分解方法将插值处理后的数据分解为高频随机项变形和低频趋势项变形。通常,训练集与测试集的比例取 7∶3,模型预测精度最佳[19],故取监测点前 35 d 变形值为训练集,后 15 d 为测试集。断面 1 各个监测点提取的随机项变形和趋势项变形如图 6 所示。观察图 6 可知,该断面随机项变形在前 12 d 变化剧烈,而后进入平稳波动阶段,且浮动数值在 ±0.35 mm以内,为平稳噪声序列,其存在会降低预测真实性及精度。因此,模型检验及后续参数反演时均不考虑随机项变形预测,将趋势项变形作为该断面最终变形值。

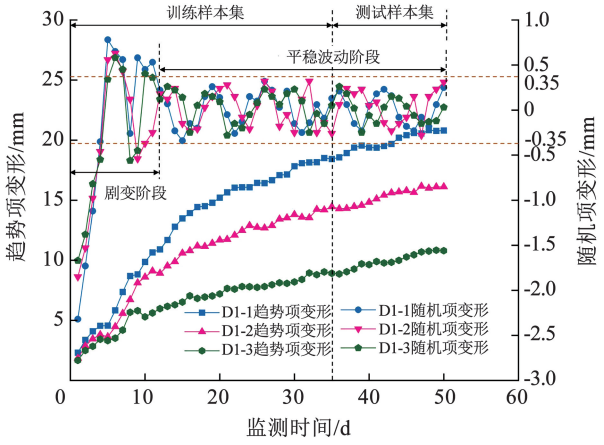


图 6 断面 1 变形小波分解

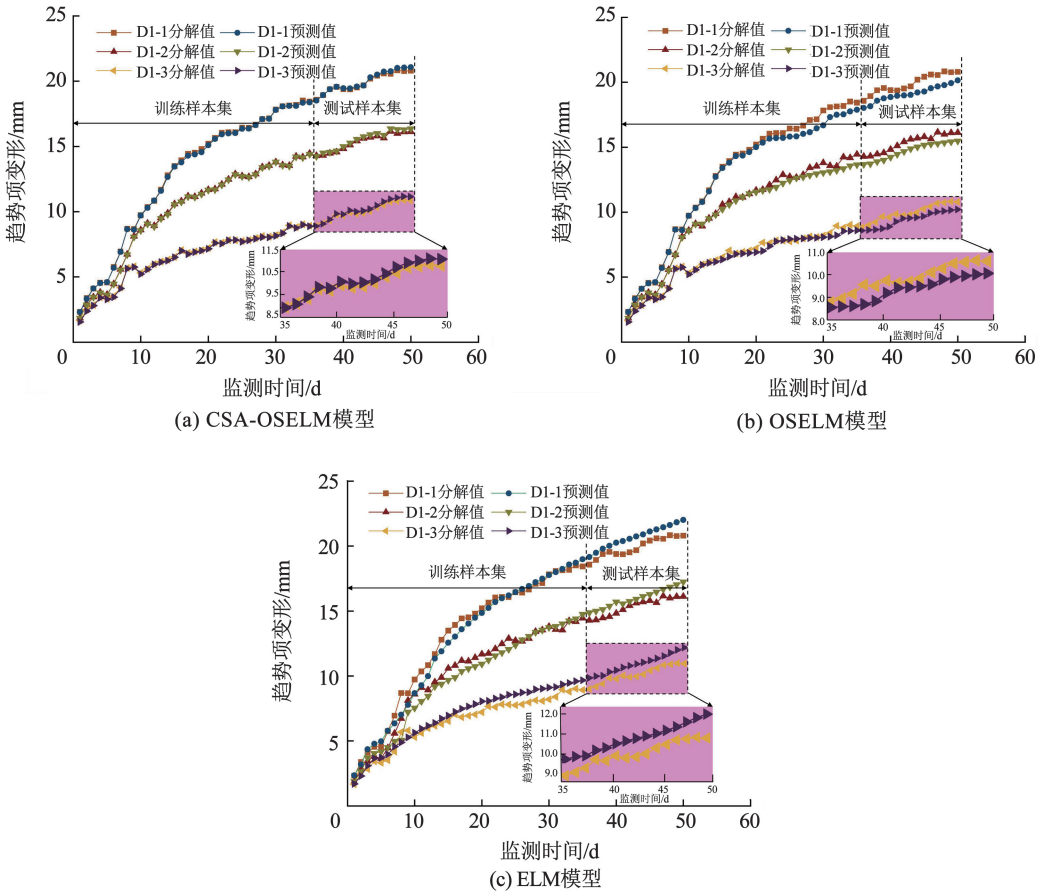
Fig. 6 Wavelet decomposition of deformation for section 1

设定乌鸦搜索算法参数如下:乌鸦数量为 20 只,最大迭代次数 $t_{max}=100$,警觉概率 $P_a=0.7$,随机概率 $r=0.6$,发现者比例为 70%,跟踪者比例为 30%。经多次试算后,确定激活函数采用“sig”函数,隐含层神经元数量为 12,单次学习 3 个数据,初始样本训练集为 15。

采用本文提出的 CSA-OSELM 模型对断面 1 各监测点趋势项变形进行预测,并与传统 ELM 模型和 OSELM 模型预测结果进行对比,3 种模型预测结果如图 7 所示。观察测试样本集可知,CSA-OSELM 模型的预测效果最好,ELM 模型预测效果最差。这主要是因为已有监测数据常处于不同变化阶段,而传

统“静态”ELM 模型只能一次性学习全部数据，处理复杂非线性问题的能力有限，导致预测结果呈现阶段线性变化，误差逐渐增大。“动态”OSELM 模型可在线处理数据，通过在线学习新获取的监测数据，更新模型的网络结构，合理判断变形规律和预测变形值。此外，借助乌鸦搜索算法强大的寻优能力，搜索 CSA-OSELM 模型的最优权值和阈值，提升预测精度。

进一步计算各模型测试集样本趋势项变形预测误差，计算结果见表 1，可以看到，相较 ELM 和 OSELM 模型，CSA-OSELM 模型的 3 项误差指标计算结果均最小。其中 D1-1 监测点的 E_{mr}、E_{rms} 和 E_{smap} 的 3 项误差指标分别为 0.043 3、0.056 3 和 0.325 4。这进一步表明 CSA-OSELM 模型预测趋势项变形的精度更高，有利于后续开展参数反演工作。



(a) CSA-OSELM模型　(b) OSELM模型

(c) ELM模型

图 7　3 种模型趋势项变形预测结果

Fig. 7　Prediction results of trend term deformation for three models

表 1　测试集样本趋势项变形预测误差

Tab. 1　Prediction error of trend term deformation for test set samples

模型	监测点 D1-1			监测点 D1-2			监测点 D1-3		
	E_{mr}	E_{rms}	E_{smap}	E_{mr}	E_{rms}	E_{smap}	E_{mr}	E_{rms}	E_{smap}
ELM	0.424 2	0.512 3	3.275 4	0.445 3	0.523 2	3.563 4	0.412 3	0.489 2	2.867 4
OSELM	0.173 2	0.191 2	0.986 1	0.153 2	0.167 5	0.854 7	0.160 5	0.173 3	0.912 4
CSA-OSELM	0.043 3	0.056 3	0.325 4	0.052 8	0.068 6	0.356 4	0.076 2	0.097 5	0.438 7

3　基于变形动态预测的参数反演方法

3.1　参数反演方法及验证流程

本文提出一种基于边坡变形动态预测的岩体力学参数反演方法，具体流程如图 8 所示。

步骤 1）边坡变形预测：对实测变形数据进行预处理，并输入 CSA-OSELM 模型，预测边坡最终变形值。

步骤 2）反演样本构建：在参数取值范围内生成 300 组参数样本，通过 3DEC 数值模拟计算对应变形值，构建反演模型训练集。

步骤 3）参数反演与验证：将预测变形值输入训练好的 CSA-OSELM 反演模型，输出力学参数，并通过 3DEC 正算验证其与实测变形的一致性。

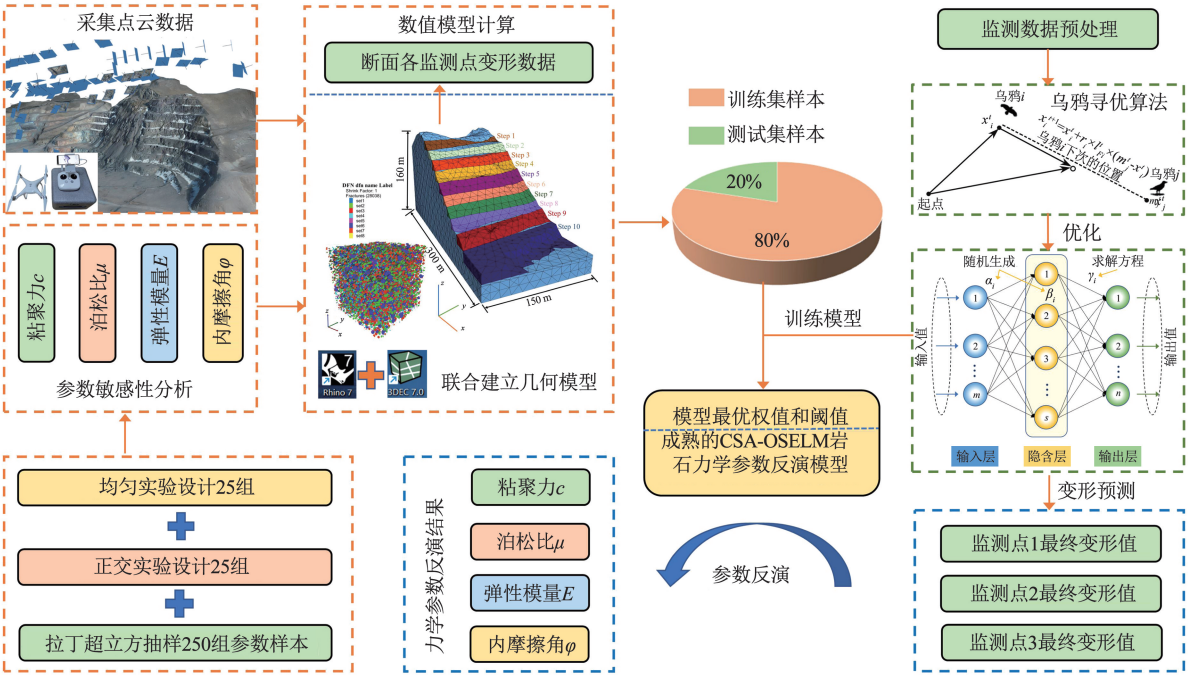


图 8　基于变形动态预测的岩体力学参数反演方法

Fig. 8　Inversion method for mechanical parameters of rock mass based on dynamic prediction of deformation

3.2　反演模型样本构造

采区岩体被大量结构面切割成为碎裂的岩块，堆积体松散，存在滑坡隐患，人工接触测量难以开展。因此，采用无人机摄影测量方法采集岩体信息，构建三维地质模型，多尺度无人机图像采集如图 9 所示。本文采用“RHINO-GRIDDLE-3DEC”联合建模方法，建立了与京希–巴拉克南侧研究区域边坡地貌高度吻合的三维数值计算模型。具体流程如下：首先将无人机获取的点云数据导入 Rhino 软件，确定研究区域边界并剔除冗余数据，建立基于多重曲面的实体模型；其次，根据工程地质报告提供的分阶开挖方案，在 Rhino 中对实体模型进行相应部位的切割处理，形成台阶状开挖块体；最后，利用 Rhino 完成初步网格划分，再通过 GRIDDLE 进行优化网格划分，最终导出 3DEC 兼容的文件格式。

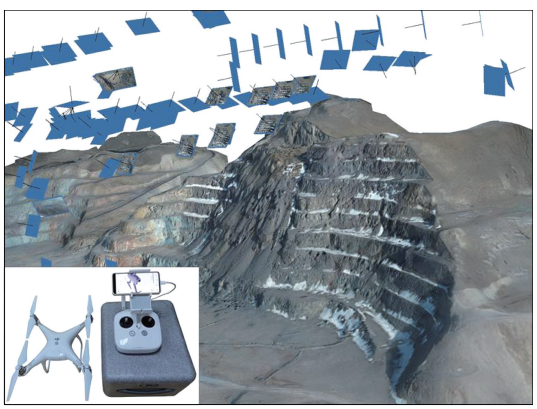


图 9　多尺度无人机图像采集

Fig. 9　Image acquisition of multi-scale unmanned aerial vehicle

基于研究区域实际情况，采用传统人工测量与无人机摄影测量相结合的方法采集边坡岩体结构面信息。以现场实测的 198 个结构面为基础，运用基于 t-SNE 的多参数分步聚类方法进行分组[20]。结果表明，实测结构面按产状可划分为 8 个优势组（见表 2），其分组结果能够较好地反映岩体随机结构面的几何特征、空间分布及物理力学性质。基于优势分组结果和工程地质勘察资料，采用随机裂隙网络（DFN）生成符合统计规律的随机结构面，以模拟真实岩体的裂隙分布特征。在 DFN 建模过程中需注意：由于 3DEC 不允许块体被部分切割，为确保计算模型边界外的圆盘中心结构面仍能有效切割块体，需将随机结构面的生成范围从模型边界向外扩展至少一个最大圆盘直径。为提高计算效率，剔除尺寸小于 3 m 的微型结构面，最终保留 28 038 条主要结构面。数值模型中，节理采用区域接触弹塑性本构模型，岩块采用摩尔–库伦本构模型。边界条件设定为底部及四周约束、顶部自由，初始应力场为自重应力场，监测点布设与实际施工现场一致。最终建立的南侧边坡 3DEC 数值模型如图 10 所示，模型尺寸为横向宽 150 m，纵向长 300 m，高 160 m，用不同颜色标示开挖区域岩体。通过对现场取样，将基于室内试验获得的凝灰质砂岩力学参数代入数值计算模型，并采用块体 1 至块体 10 的依次移除过程模拟分步开挖方法（自上而下分 10 个步骤完成）。待模型变形稳定后，提取断面 1 ~8 监测点 1 的位移数据，将其与现场实测值进行对比分析，结果详见

表 3。对比结果表明，数值模拟结果与实测数据吻合良好，验证了所建模型的可靠性。

表 2　结构面分组结果

Tab. 2　Grouping results of structural planes

组号	倾向/(°)	倾角/(°)	迹长/m	数量/个
1	265.29	61.21	5.56	16
2	198.41	36.78	6.43	37
3	205.34	71.22	4.95	15
4	62.73	60.91	3.58	27
5	90.45	45.52	7.65	20
6	130.52	50.14	9.67	38
7	160.34	55.36	8.63	34
8	310.62	39.56	5.24	11

采用控制变量法对每种岩体力学参数进行敏感性分析，依据力学参数对岩体变形的敏感性分析结果，选取粘聚力 c、泊松比 μ、弹性模量 E 和内摩擦角 φ 这 4 种力学参数开展参数反演[21]。根据采区实测地质勘测报告，该区域岩体 4 种力学参数取值范围分别为：粘聚力 0.2 ~ 2.5 MPa，泊松比 0.1 ~ 0.4，弹性模量 1 ~ 30 GPa，内摩擦角 25° ~ 60°。为确保机器学习模型的训练效果和泛化能力，进而使反演模型达到预期精度，本文采用拉丁超立方体抽样技术、均匀设计和正交实验设计方法构建 300 组参数样本[6]。其中，以拉丁超立方体抽样技术生成的 250 组参数样本为主要样本。为进一步填充整个参数取值区间，采用均匀设计和五水平四因素 L25(5^4)正交实验设计方法分别生成 25 组参数样本。利用 MATLAB 将样本顺序打乱，最终部分参数的 300 组样本如图 11 所示。

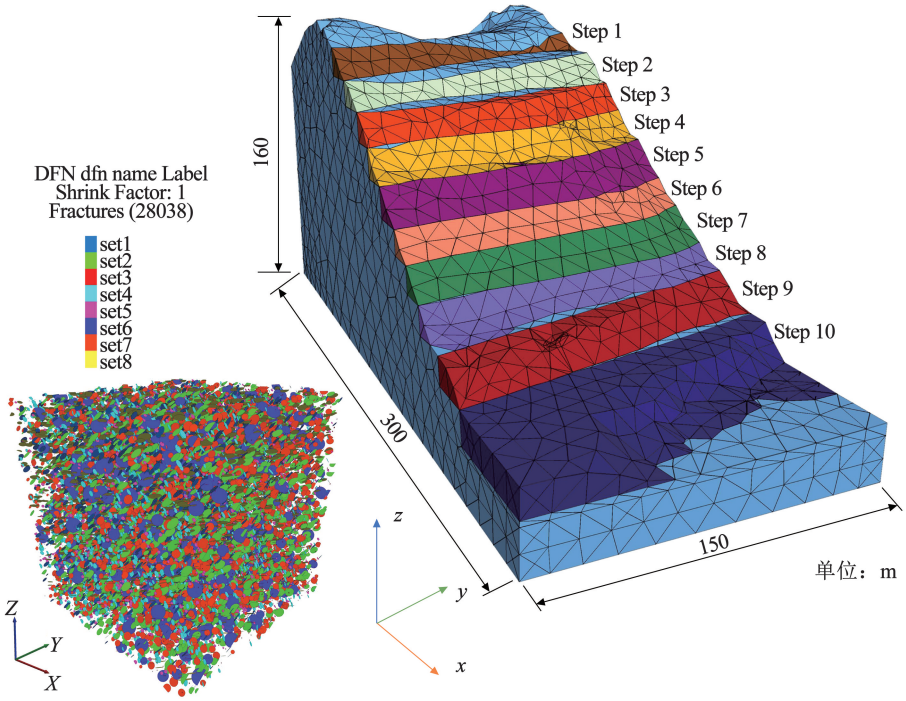


图 10　边坡 3DEC 数值模型

Fig. 10　3DEC numerical model of slope

表 3　各断面监测点 1 处模型计算与实测变形值对比

Tab. 3　Comparison of calculated and measured deformation values of models at monitoring point 1 of each section

断面	模型计算变形值/mm	实测变形值/mm	误差/%
1	22.15	23.17	4.40
2	20.22	21.45	6.08
3	15.99	17.12	7.07
4	14.98	15.65	4.47
5	18.17	19.12	5.23
6	15.97	16.98	6.32
7	18.35	18.98	3.43
8	21.43	21.79	1.68

观察图 11 可知，300 组参数样本数据涵盖整个岩体参数范围且分布均匀。计算可知，300 组力学参数的平均值分别为：c = 1.338 MPa；μ = 0.263；E = 16.235 GPa；φ = 41.758°；其取值区间的平均值分别为 c = 1.350 MPa；μ = 0.250；E = 15.500 GPa；φ = 42.500°。两组数据非常接近，这表明生成的 300 组参数样本合理有效，可以用于后续数值模拟计算。将 300 组参数样本依次代入数值模型进行计算，并记录各监测点的变形值。整理统计各组参数及其对应变形值，构建参数反演样本集。

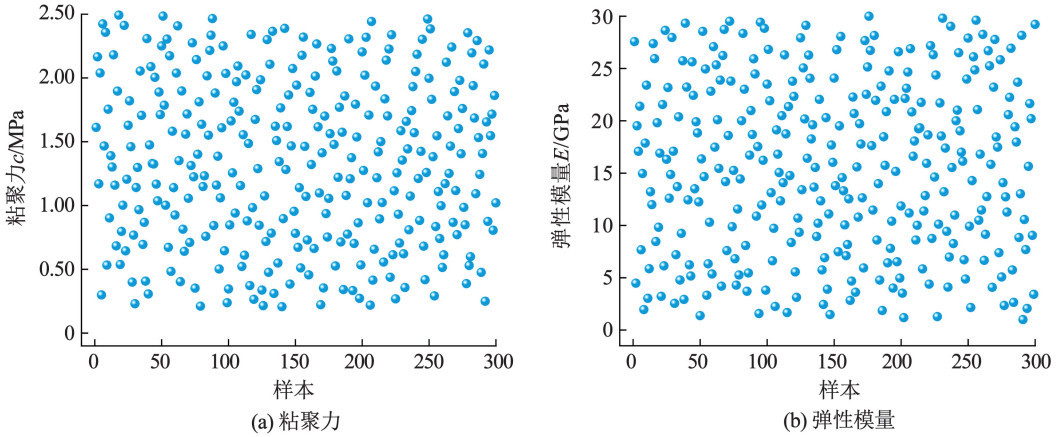


图 11　部分参数样本分布

Fig. 11　Sample distribution of partial parameters

3.3　反演模型性能检验

从 300 组参数样本集中随机选取 80% 作为训练样本集，其余 20% 作为测试样本集。以监测点变形值为 CSA-OSELM 参数反演模型的输入值，4 种力学参数为输出值。将训练样本集依次代入反演模型进行学习，建立变形值与力学参数间的非线性映射关系，并经过多次试算，最终确定反演模型的最佳网络参数。

为检验 CSA-OSELM 反演模型的优越性和精度，将测试样本集的 60 组数据，分别依次代入基于随机梯度下降法优化的 BP 神经网络（SGD-BP）、基于粒子群算法优化的支持向量机（PSO-SVM）、基于狼群算法优化的在线贯序极限学习机（GWO-OSELM）和 CSA-OSELM 的 4 种反演模型计算岩体力学参数。将 4 种反演模型的参数计算值与真实值作对比，并选用 E_{mr}、E_{rms}、E_{smap} 和 R^2 评价指标衡量模型性能，最终结果如图 12 所示。为了更好地观察不同模型误差分布特征，在图 12 中标注了误差范围线。

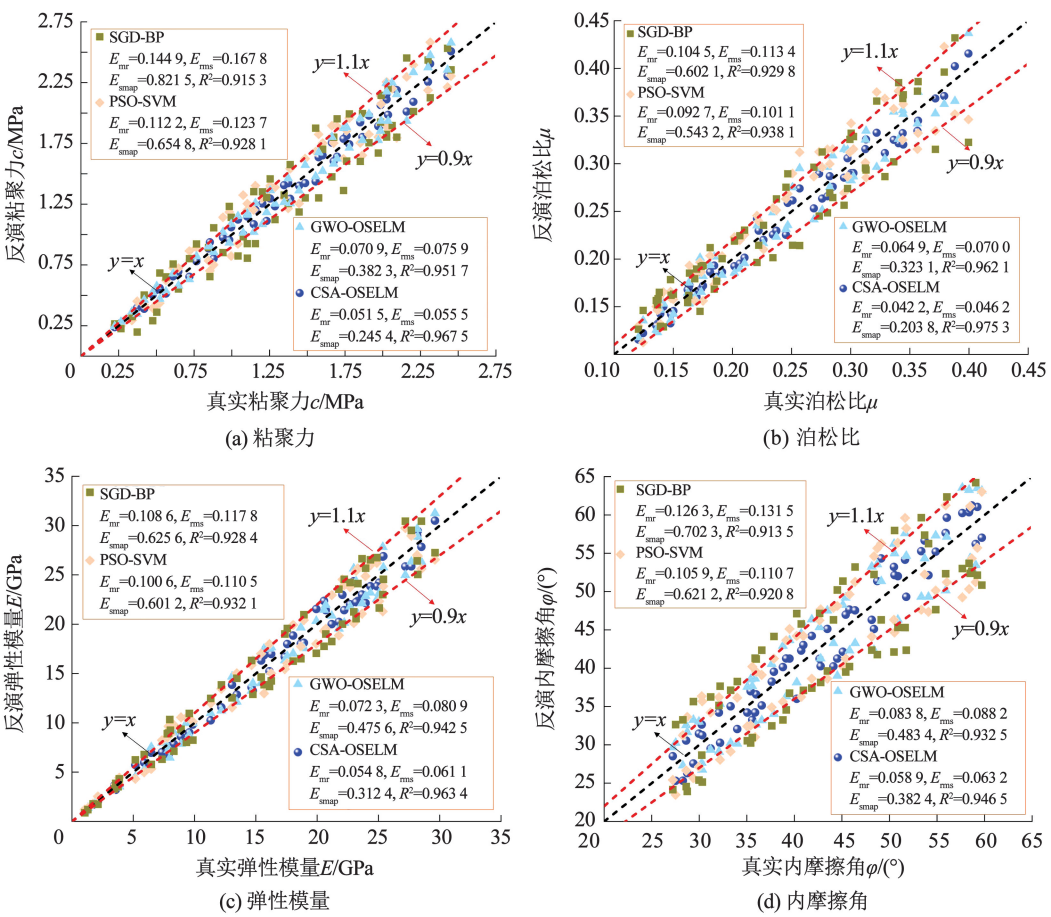


图 12　4 种模型反演参数与真实参数对比

Fig. 12　Comparison of inversion parameters of four models with real parameters

观察图 12 可知，GWO-OSELM 和 CSA-OSELM 反演模型的参数计算值，均匀且集中分布在 $y=x$ 直线的两侧，更接近参数真实值，而 SGD-BP 和 PSO-SVM 反演模型的参数计算值分布较分散。这表明具有在线学习能力的在线贯序极限学习机，在参数反演时比传统“静态”模型效果更好。进一步对比 4 种模型的误差评价指标，CSA-OSELM 模型反演 4 种参数的评价指标均最优，说明相较狼群算法，使用乌鸦搜索算法优化权值和阈值的 OSELM 模型反演精度更高。其中，CSA-OSELM 模型反演泊松比的误差最小，4 项误差评价指标分别为 $E_{mr}=0.042\ 2$，$E_{rms}=0.046\ 2$，$E_{smap}=0.203\ 8$，$R^2=0.975\ 3$。结果表明，CSA-OSELM 模型具有较高的精度和稳定性，可以准确反演岩体力学参数。

3.4　参数反演方法的准确性验证

为进一步验证基于变形动态预测和 CSA-OSELM 模型的岩体力学参数反演方法在实际工程中的可靠性和适用性，将其应用到京希－巴拉克南侧研究区域边坡进行工程实践。将全球卫星导航系统（GNSS）接收器安装在南侧边坡 8 个断面的关键部位（从左至右依次为断面 1～8，从上至下依次为监测点 1～3），通过接收卫星信号，确定监测点的三维坐标，实时获取监测点的变形变化数据。监测点布置见图 4。整理系统中全部断面各个监测点前 35 d的变形值，先采用分段 3 次 Hermite 插值法对数据进行等距化处理，再用小波分解方法将插值后变形分解为趋势项变形和随机项变形。将各监测点前 35 d 趋势项变形依次代入 CSA-OSELM 变形预测模型，将趋于稳定时的变形数据记为最终变形值。以各断面每组最终变形值作为输入值，依次代入 CSA-OSELM 模型反演计算各力学参数，各断面参数反演结果见表 4。将各断面力学参数反演结果依次代入 3DEC 数值模型进行正算，达到稳定状态时提取各监测点最终变形值。当卫星系统中各断面监测点变形趋于稳定时，记录此时数据为边坡实测最终变形值，结果见表 5。最后，将边坡实测与正算最终变形值进行对比，对比结果如图 13 所示。

表 4　力学参数反演结果

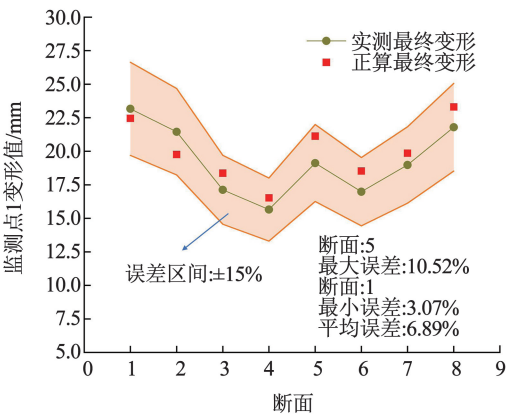
Tab. 4　Inversion results of mechanical parameters

监测断面	反演结果			
	c/MPa	μ	E/GPa	φ/(°)
断面 1	0.584	0.235	5.698	30.563
断面 2	0.635	0.256	5.941	32.265
断面 3	0.801	0.347	7.514	36.478
断面 4	0.869	0.384	7.930	37.651
断面 5	0.789	0.330	6.963	34.615
断面 6	0.874	0.428	8.314	39.657
断面 7	0.814	0.346	7.325	36.245
断面 8	0.597	0.245	6.231	33.658

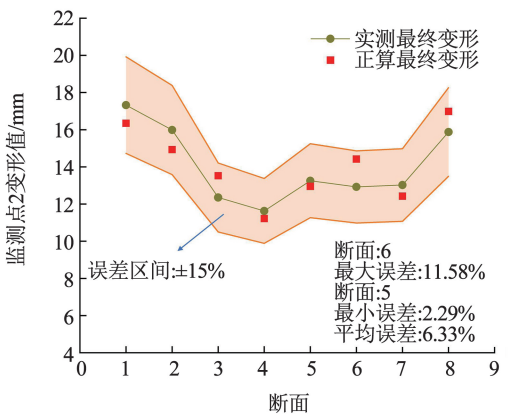
表 5　监测点实测最终变形值

Tab. 5　Measured final deformation values at monitoring points

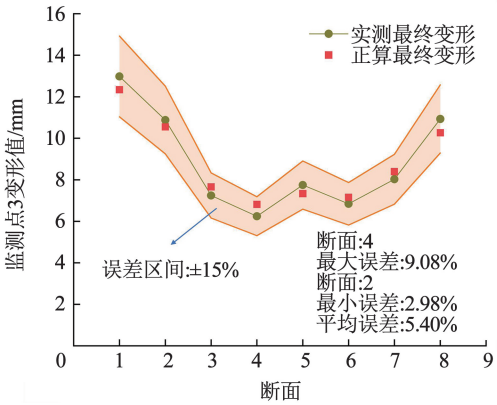
监测断面	实测最终变形值/mm		
	监测点 1	监测点 2	监测点 3
断面 1	23.17	17.32	12.98
断面 2	21.45	15.99	10.88
断面 3	17.12	12.35	7.25
断面 4	15.65	11.63	6.25
断面 5	19.12	13.26	7.74
断面 6	16.98	12.92	6.84
断面 7	18.98	13.02	8.03
断面 8	21.79	15.88	10.93



(a) 监测点1



(b) 监测点2



(c) 监测点3

图 13 实测与正算最终变形值对比

Fig. 13 Comparison between measured and forward-calculated final deformation values

由图 13 可知,监测点 1、2、3 处正算变形与实测变形最大误差分别为 10.52%、11.58%、9.08%,均在 15% 的误差范围内。这可能是由于无人机采集的岩体信息不全、GNSS 监测变形存在误差、数值模型存在简化和局限性造成的。此外,监测点 1、2、3 处变形平均误差分别为 6.89%、6.33%、5.40%,均在工程允许误差范围内。研究结果进一步表明,基于 CSA-OSELM 模型和变形动态预测的岩体力学参数反演方法,在实际岩土工程应用中具有较高的准确性和稳定性。

4 结 论

准确获取岩体力学参数,对于边坡稳定性分析及设计加固方案至关重要。本文提出了一种基于变形动态预测的岩体力学参数反演方法,可更早地获取边坡岩体力学参数,为边坡加固设计提供指导,缩短工期。

1)基于全局寻优能力强大的乌鸦搜索算法和具备动态学习能力的在线贯序极限学习机,CSA-OSELM 变形预测和参数反演模型的准确性更高、稳定性更好,可为基于变形动态预测的岩体力学参数反演方法的合理性提供模型保证。

2)采用分段 3 次 Hermite 插值法对现场实测变形数据进行等距化处理,再运用小波分解方法提取趋势项变形,既可有效保留原始数据,又可实现对其有效降噪处理,大幅提升了 CSA-OSELM 动态模型变形预测精度。

3)通过对比 SGD-BP、PSO-SVM、GWO-OSELM 和 CSA-OSELM 模型反演结果的 E_{mr}、E_{rms}、E_{smap} 和 R^2 值,检验 CSA-OSELM 模型的性能。结果表明,CSA-OSELM 模型参数反演结果的各项误差指标均最小,可为实际工程中获取岩体力学参数提供一种新的机器学习方法。

4)将基于 CSA-OSELM 模型和变形动态预测的岩体力学参数反演方法应用于京希–巴拉克南侧边坡中,并将反演参数代入数值模型正算最终变形值与实测最终变形值进行对比。监测点误差均在 ±15% 的误差范围内,最大误差为 11.58%,最小误差为 2.29%,平均误差为 6.21%,表明本文方法反演得到的力学参数是合理的。

参考文献

[1]姜光成, 胡乃联, 洪根意, 等. 基于 GSI 值量化和修正方法的岩体力学参数确定[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2211
JIANG Guangcheng, HU Nailian, HONG Genyi, et al. Determination of rock mass mechanical parameters based on quantification and correction method of GSI value[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2211. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2174

[2]刘春. 岩体 REV 和力学参数的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 236
LIU Chun. Numerical simulation on REV and mechanics parameters of rock[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 236

[3]孙志彬, 杨小礼, 张胜, 等. Mohr-Coulomb 准则下基于滑动面深度的边坡参数反分析方法[J]. 岩土力学, 2014(5): 1323
SUN Zhibin, YANG Xiaoli, ZHANG Sheng, et al. Slope back analysis based on slip surface depth under Mohr-Coulomb criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(5): 1323. DOI:10.16285/j.rsm.2014.05.007

[4]BERTUZZI R. Back-analysing rock mass modulus from monitoring data of two tunnels in Sydney, Australia[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(5): 877. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.05.005

[5]李一鸣, 赵高峰, 赵晓豹, 等. 基于数控岩石压痕试验装置的岩石力学参数反演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1973
LI Yiming, ZHAO Gaofeng, ZHAO Xiaobao, et al. Study on back analysis of rock mechanical parameters based on the digital control rock indentation equipment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 1973. DOI: 10.13722/j.cnki.

jrme. 2022. 1001

[6] SUN Junlong, WU Shunchuan, WANG Han, et al. Inversion of surrounding rock mechanical parameters in a soft rock tunnel based on a hybrid model EO-LightGBM[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(9): 6691. DOI: 10.1007/s00603 - 023 - 03387 - z

[7] ZHUANG D Y, MA K, TANG C A, et al. Mechanical parameter inversion in tunnel engineering using support vector regression optimized by multi-strategy artificial fish swarm algorithm[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 425. DOI: 10.1016/j. tust. 2018. 09. 027

[8] ZHANG Yan, SU Guoshao, LIU Baochen, et al. A novel displacement back analysis method considering the displacement loss for underground rock mass engineering[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95: 103141. DOI: 10.1016/j. tust. 2019. 103141

[9] GHORBANI E, MOOSAVI M, HOSSAINI M F, et al. Determination of initial stress state and rock mass deformation modulus at Lavarak HEPP by back analysis using ant colony optimization and multivariable regression analysis[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(1): 429. DOI: 10.1007/s10064 - 020 - 01936 - 2

[10] WANG J X, SUN J, KOU H J, et al. Multiparameter inversion early warning system of tunnel stress-seepage coupling based on IA-BP algorithm[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 19

[11] WANG Xianyan, CUI Hewei, XU Hailiang, et al. Inversion study of mechanical parameters of tunnel surrounding rock based on similar test[J]. Advances in Civil Engineering, 2023, 2023(1): 8. DOI: 10.1155/2023/2862550

[12] 唐超，陈妍颖，李庶林，等. 基于自适应变异粒子群算法改进 OGM(1,N)及其在排土场变形预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报，2020，39(增刊 1)：3197
TANG Chao, CHEN Yanying, LI Shulin, et al. The application of improved OGM(1, N) in waste dump deformation prediction based on adaptive particle mutation swarm optimization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 3197. DOI: 10.13722/j. cnki. jrme. 2019. 1022

[13] 洪宇超，钱建固，叶源新，等. 基于时空关联特征的 CNN-LSTM 模型在基坑工程变形预测中的应用[J]. 岩土工程学报，2021，43(增刊 2)：108
HONG Yuchao, QIAN Jiangu, YE Yuanxin, et al. Application of CNN-LSTM model based on spatiotemporal correlation characteristics in deformation prediction of excavation engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 108. DOI: 10.11779/CJGE2021S2026

[14] 王述红，朱宝强. 山岭隧道洞口段地表沉降时序预测研究[J]. 岩土工程学报，2021，43(5)：813
WANG Shuhong, ZHU Baoqiang. Time series prediction for ground settlement in portal section of mountain tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 813. DOI: 10.11779/CJGE202105004

[15] CHEN Renpeng, ZHANG Pin, KANG Xin, et al. Prediction of maximum surface settlement caused by earth pressure balance (EPB) shield tunneling with ANN methods[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(2): 284. DOI: 10.1016/j. sandf. 2018. 11. 005

[16] ZHANG Pin, WU Huaina, CHEN Renpeng, et al. Hybrid meta-heuristic and machine learning algorithms for tunneling-induced settlement prediction: A comparative study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99: 103383. DOI: 10.1016/j. tust. 2020. 103383

[17] ASKARZADEH A. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm[J]. Computers & Structures, 2016, 169: 1. DOI: 10.1016/j. compstruc. 2016. 03. 001

[18] GUO Jian, DING Lieyun, LUO Haibin, et al. Wavelet prediction method for ground deformation induced by tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 41: 137. DOI: 10.1016/j. tust. 2013. 12. 009

[19] 朱宝强，王述红，张泽，等. 基于时间序列与 DEGWO-SVR 模型的隧道变形预测方法[J]. 浙江大学学报(工学版)，2021，55(12)：2275
ZHU Baoqiang, WANG Shuhong, ZHANG Ze, et al. Prediction method of tunnel deformation based on time series and DEGWO-SVR model[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(12): 2275. DOI: 10.3785/j. issn. 1008 - 973X. 2021. 12. 007

[20] 李新正，王述红，侯钦宽，等. 基于 t-SNE 的多参数岩体结构面分步聚类方法[J]. 岩土力学，2024，45(5)：1540
LI Xinzheng, WANG Shuhong, HOU Qinkuan, et al. A stepwise clustering method of rock discontinuities dominated by multivariate parameters based on t-SNE[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5): 1540. DOI:10.16285/j. rsm. 2023. 0897

[21] 王述红，董福瑞. 基于变形预测和参数反演的山岭隧道围岩稳定性分析[J]. 岩土工程学报，2023，45(5)：1024
WANG Shuhong, DONG Furui. Stability analysis of surrounding rock of mountain tunnels based on deformation prediction and parameter inversion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(5): 1024. DOI: 10.11779/CJGE20220288

(编辑　吕雪梅)

DOI:10.11918/202504072

含外挂墙板装配式混凝土框架抗震及热工性能

韩文龙[1,2],钱稼茹[3],肖 明[1,2],赵作周[3],吕晚晴[1,2],杨 璇[1,2]

(1.中国建筑标准设计研究院有限公司,北京 100044;2.国家建筑绿色低碳技术创新中心,北京 100120;
3.清华大学 土木工程系,北京 100084)

摘 要:为研究预制外挂墙板与主体结构点支承连接的结构和热工性能,本文开展了含点支承外挂墙板的框架结构受力性能试验和三维传热计算分析。结果表明:试验模型实现了"强柱弱梁、强节点弱构件"的破坏模式,极限层间位移角约为1/30,连接节点未发生破坏,构件连接构造可保证装配式框架结构的整体抗震性能;外挂墙板连接螺栓是否拧紧对主体框架弹性阶段的抗侧刚度影响差别不大,螺栓干挂连接和U形连接筋湿挂连接对主体框架达到弹塑性位移角限值前的抗震性能影响差别不大;引入U形钢板阻尼器后外挂墙板在大侧移下的刚体转动减少16%~30%,且对主体框架的破坏模式、承载能力和变形能力影响不显著,可采用U形钢板阻尼器控制大尺寸外挂墙板的地震位移响应,实现墙板间接缝宽度与密封胶施工便利性、位移能力的合理匹配;外挂墙板内、外叶间的混凝土是连接节点区域形成热桥的根本原因,导致外挂墙板热工性能削弱62.1%,设置隔热垫后热桥影响降低86.6%,可实现连接节点区域附近的热桥消解。

关键词:点支承外挂墙板;U形钢板阻尼器;抗震性能;性能协同提升;热桥消解

中图分类号:TU375 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)05-0180-12

Seismic and thermal performance of precast concrete frame with precast facade panel

HAN Wenlong[1,2], QIAN Jiaru[3], XIAO Ming[1,2], ZHAO Zuozhou[3], LÜ Wanqing[1,2], YANG Xuan[1,2]

(1. China Institute of Building Standard Design & Research Co., Ltd., Beijing 100044, China;
2. National Center of Technology Innovation for Green and Low-Carbon Building, Beijing 100120, China;
3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To investigate the structural and thermal performance of the connection between point-supporting facade panels and the main structure, quasi-static tests and heat transfer calculation were conducted. The results indicate that test models achieve the failure mode characterized by "strong column-weak beam" and "strong joint-weak component" behavior, with ultimate drift ratios of approximately 1/30. The connection joints remain undamaged. The connection details of precast components could ensure the overall seismic performance of the precast frame structure. Whether the connection bolts of the precast facade panel are tightened or not had little impact on the elastic lateral stiffness of the main frame. Similarly, the differences between bolted connections and wet connections with U-shaped rebars are minimal in terms of their influence on the seismic performance of the main frame before the elastic-plastic drift ratio limit. Under large lateral drift, the U-shaped steel plate damper can reduce the rigid-body rotation of the precast facade panel by 16% to 30%, while having no significant impact on the failure mode, load-bearing capacity, and deformation capacity of the main frame. Therefore, U-shaped steel plate dampers can be employed to control the seismic displacement response of large-scale external wall panels, achieving a reasonable balance between joint width, sealant application convenience, and displacement capacity. The concrete between the inner and outer wythes is the root cause of thermal bridge in the connection area, resulting in a 62.1% reduction in the thermal performance of the facade panels. The heat insulated pads could markedly reduce the thermal bridge effect in the connection by 86.6%, thereby achieving thermal bridge mitigation near the connection.

Keywords: point-supporting facade panel; U-shaped steel plate damper; seismic behavior; synergistic improvement of performance; thermal bridge digestion

收稿日期:2025-04-27;**录用日期**:2025-08-01;**网络首发日期**:2025-10-20
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251020.0932.004
基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3801400);非金属材料创新中心创新基金(2023TDA3-2)
作者简介:韩文龙(1991—),男,博士,副研究员;钱稼茹(1946—),男,教授,博士生导师
通信作者:韩文龙,hanwenlong9122@163.com

公共建筑多采用框架结构，现阶段其围护墙多采用砌筑墙或条板，现场作业量大、工期长，严寒寒冷地区难以实现围护与保温一体化，且砌筑墙、条板多与主体结构内嵌连接，对主体结构抗震性能影响大[1-2]。预制混凝土外挂墙板集装饰、保温、防火、防水、耐候等多功能于一体，可实现装饰、保温与围护同步施工、同寿命，契合围护系统长寿化和高品质发展的需求。点支承外挂墙板受力模式较内嵌式墙板更为明确，但大型外挂墙板按照罕遇地震性能目标设计得到的墙板间接缝宽度较大，接缝密封胶施工难度大且对密封胶位移能力要求高[3]。为充分利用外挂墙板改善主体结构抗震性能，同时控制接缝宽度，学者们将小型摩擦型[4-5]、位移型[6-9]阻尼器集成在外挂墙板与主体结构连接节点内。黄柯玮等[8]通过数值分析研究了外挂墙板上节点 U 形钢板阻尼器（UFP）对钢框架抗震性能的影响，分析表明 UFP 厚度超过一定值会导致连接节点的破坏早于 UFP 屈服，建议合理控制 UFP 的厚度。沙慧玲等[9]开展了含线支承外挂墙板混凝土框架结构的振动台试验，UFP 安装在上、下层外挂墙板的水平接缝内，研究发现，设置 UFP 线支承外挂墙板后主体框架的位移响应减少约 20%，UFP 对主体框架的损伤模式无明显影响。现有研究[10]多关注外挂墙板的受力性能，对连接节点结构、热工性能的协同关注较少。为加强连接节点区域的受力性能，实际工程中部分外挂墙板内、外叶板混凝土连通，局部形成热桥，削弱了围护系统的热工性能[11]，致使室内侧易结露、发霉。为此，本文提出一种上部承重、下部设置 UFP 的点支承外挂墙板，通过拟静力试验探究预制外挂墙板与主体结构连接方式对主体结构抗震性能的影响，在此研究基础上，进一步从传热系数、热流密度等角度分析连接节点对外围护系统热工性能的影响机制，以期为预制外挂墙板结构、热工性能的协同提升提供研究支撑。

1　含外挂墙板框架结构受力试验

1.1　试验概况

以某一 10 层装配式框架结构（抗震等级为一级）为原型，取其首层一榀一跨框架作为研究对象，受场地及加载装置限制，试验模型按照 2/3 缩比。两个试验模型的编号分别为 PF1、PF2，其几何尺寸、构件配筋均相同（图 1），仅外挂墙板与主体框架的连接方式不同。模型由框架柱、框架梁、外挂墙板及地梁组成，混凝土设计等级为 C50，框架柱采用预制柱，框架梁采用叠合梁，外挂墙板采用预制混凝土板。预制柱底部纵筋与地梁甩出柱纵筋采用套筒挤压连接，柱脚设置后浇段；叠合梁下部纵筋与贯穿核心区梁下部纵筋以套筒挤压连接，采用后浇整体式节点。

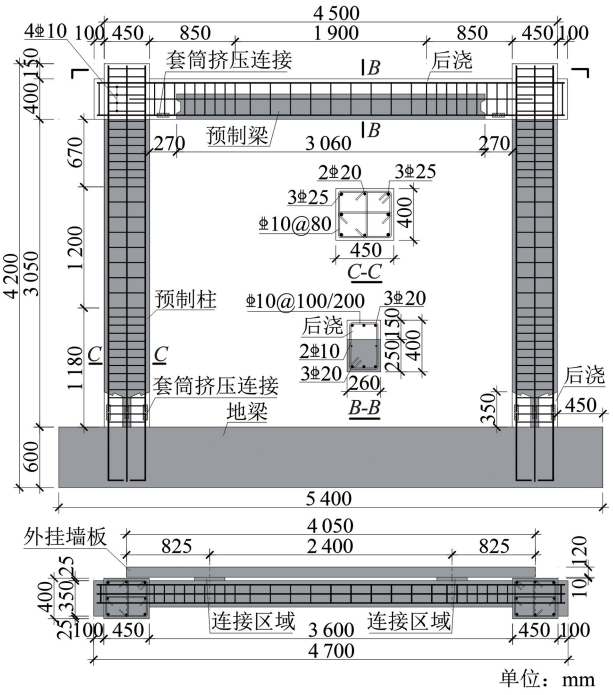


图 1　试验模型几何尺寸及构造

Fig. 1　Dimensions and details of test models

如图 2 所示，模型 PF1、PF2 的外挂墙板与上层框架梁分别采用两点螺栓干挂连接、U 形连接筋湿挂连接，连接区域中心距梁端 600 mm，避开梁端塑性铰区域；外挂墙板与下层框架梁（试验中为地梁）采用销钉限位连接，在外挂墙板底部预留钢槽，安装完成后附着在下层框架梁上的 M18 销钉伸入钢槽，约束外挂墙板的平面外位移，平面内层间位移角为 1/50（GB/T 50011—2024《建筑抗震设计标准》[12]规定的框架结构弹塑性层间位移角限值）之前，销钉与钢槽不接触，对外挂墙板平面内位移无约束；在层间位移角 1/50 之后，销钉与钢槽侧壁接触，外挂墙板与框架形成四点连接，以利用外挂墙板刚度控制主体框架在地震作用下的位移响应，销钉限位连接避免了传统节点无法利用外挂墙板刚度的缺点，同时在小震下对主体结构刚度影响较小。外挂墙板按照 2/3 缩比后总厚度为 120 mm，为避免连接节点锚固失效，通过焊接端板设置横向钢筋增强锚固效果。

如图 2（d）所示，UFP 设置在下部销钉限位的侧面，与外挂墙板侧面预埋钢板、下层框架梁顶面预埋立板通过螺栓或焊接连接，借助外挂墙板及预埋立板约束 UFP 的运动轨迹。UFP 采用厚度为 8 mm 的 Q235 钢板制作。

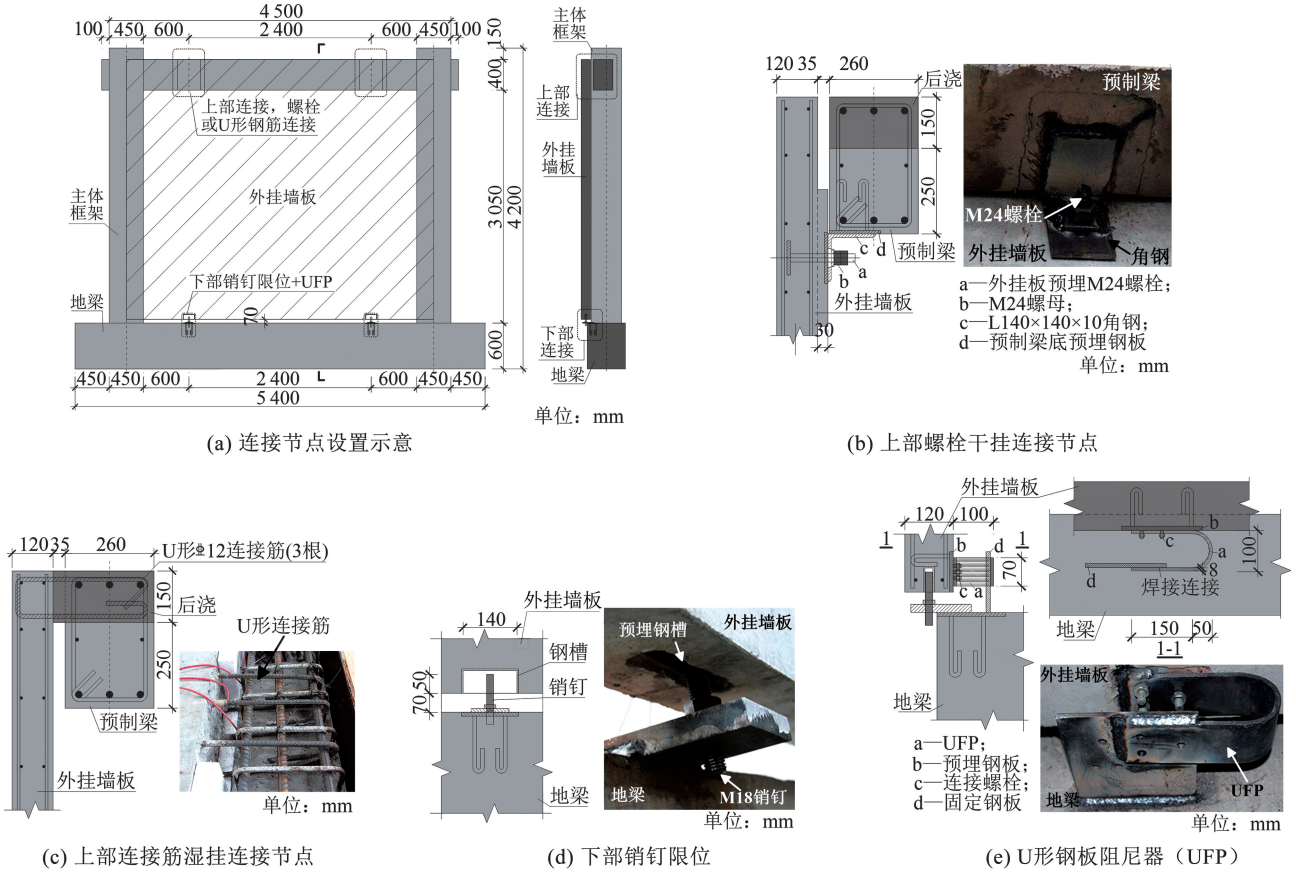
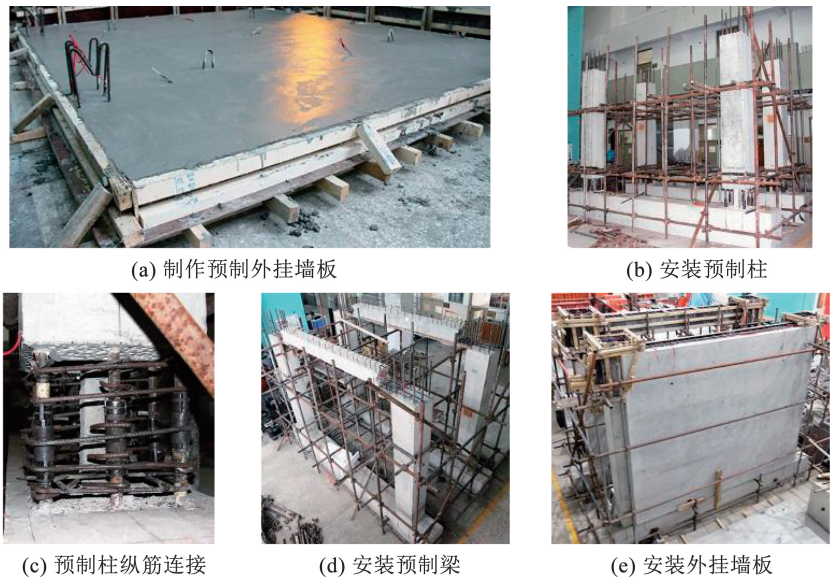


图 2　试验模型外挂墙板与主体结构连接构造

Fig. 2　Connection between precast facade panel and main structure of test models

试验模型的制作过程为：制作地梁、预制柱、预制梁、预制外挂墙板；吊装预制柱、预制梁，完成套筒挤压施工，浇筑柱根部后浇混凝土；模型 PF1 外挂墙板在主体框架制作完成后安装，模型 PF2 外挂墙板与叠合梁同步施工。图 3 为制作过程中关键环节的照片。

试验模型混凝土分 3 批次浇筑，每次浇筑时预留 1 组边长 150 mm 的立方体试块。实测模型预制梁、预制柱、外挂墙板的混凝土立方体抗压强度平均值为 58.8 MPa，柱脚后浇混凝土立方体抗压强度平均值为 59.7 MPa，梁叠合层、节点核心区混凝土立方体抗压强度平均值为 61.2 MPa。对于每种规格的钢筋，通过 3 根钢筋受拉试验实测其材料性能，钢筋的实测屈服强度 $f_{y,m}$、抗拉强度 $f_{u,m}$ 见表 1。


(a) 制作预制外挂墙板　(b) 安装预制柱

(c) 预制柱纵筋连接　(d) 安装预制梁　(e) 安装外挂墙板



(f) 铺设模型PF2梁叠合层保温板



(g) 浇筑模型PF2梁叠合层混凝土



(h) 试验模型制作完成

图 3　试验模型制作过程

Fig. 3　Model manufacturing process

表 1　钢筋材性指标实测值

Tab. 1　Material properties of rebars

钢筋规格	$f_{y,m}$/MPa	$f_{u,m}$/MPa
Φ8	423	623
Φ10	470	641
Φ12	434	585
Φ20	433	591
Φ25	414	598

1.2　加载及量测方案

试验加载装置和位移计测点布置如图 4 所示，采用 2 个 2 500 kN 的千斤顶分别在两个框架柱顶部施加恒定轴压力，柱设计轴压比取为 0.60，对应的试验轴压比为 0.24；采用 1 个 1 000 kN 的作动器在梁端施加水平力，水平力加载点距柱底截面的高度为 3 250 mm。采用位移计量测柱顶水平位移、地梁水平滑动、外挂墙板整体转动、外挂墙板相对梁的转角和水平位移，监测数据表明地梁未发生滑动。

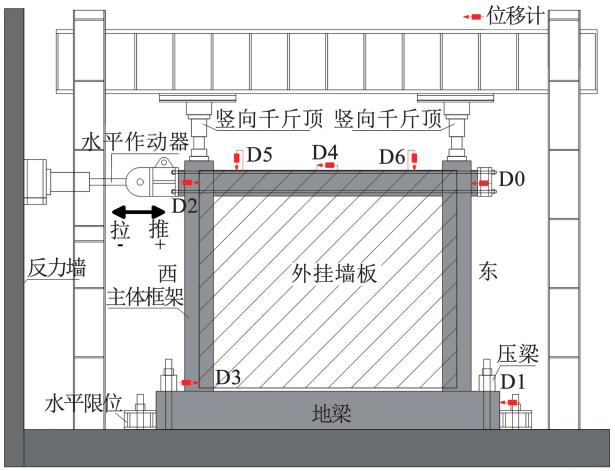


图 4　试验加载装置

Fig. 4　Test setup

2　试验结果与分析

2.1　试验现象与破坏形态

2.1.1　模型 PF1

对模型 PF1 依次进行了 A、B、C 三个工况的试验。

1）工况 A

安装外挂墙板，放松上部连接螺栓，不安装下部限位销钉，即仅将外挂墙板作为重力荷载施加于主体框架，水平位移按层间位移角 θ 为 1/1 500、1/1 000、1/800 逐级循环加载 1 次。该阶段模型无可见裂缝（图 5），基本处于线弹性状态。

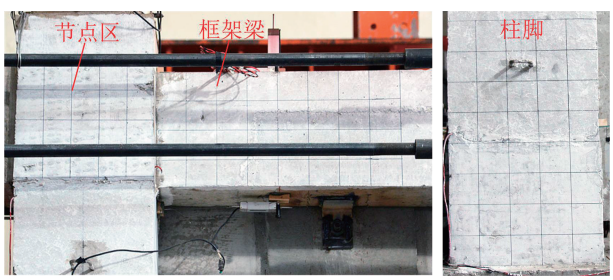


图 5　模型 PF1 工况 A 试验结束后局部照片

Fig. 5　Local photos of model PF1 after test condition A

2）工况 B

工况 A 完成后，拧紧上部连接螺栓，安装下部限位销钉，即将外挂墙板按实际使用状态安装在主体框架上，进行工况 B 试验，水平位移按 θ 为 1/1 500、1/1 000、1/800、1/550、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/40 逐级加载，1/1 500、1/1 000、1/800 循环 1 次，而后各级别循环 2 次。模型 PF1 工况 B 下 θ 为 1/550，1/150，1/50 时的破坏情况见图 6。



(a) θ=1/550 (b) θ=1/150 (c) θ=1/50

图 6 模型 PF1 工况 B 裂缝分布与破坏形态

Fig. 6 Crack distributions and failure mode of model PF1 under test condition B

θ = 1/550(框架结构小震位移角限值)级,梁两端 1.5h_b(梁高 h_b =400 mm)范围内出现 3 ~4 条细小竖向弯曲裂缝,柱及核心区未见开裂。θ = 1/150(以中震层间位移角为小震位移角的 3.6 倍计)级,梁端开裂范围扩展至距端部 2.25h_b范围内,大部分上、下裂缝贯通梁截面高度,梁竖向弯曲裂缝最大宽度约为 0.30 mm;柱脚 800 mm 高范围内出现多条水平弯曲裂缝,最大宽度约为 0.15 mm;梁纵筋受拉屈服,柱纵筋最大拉应变为 1 360 × 10^{-6}。θ = 1/50(框架结构弹塑性位移角限值)级,梁端混凝土压酥,柱脚后浇段混凝土角部压溃脱落,加载过程中位移较大时外挂墙板下部限位销钉与预埋钢槽接触,销钉产生塑性变形。θ = 1/40 级第 1 循环结束时,梁、柱端部混凝土压溃区域扩展,部分纵筋、箍筋裸露,加载过程中限位销钉因塑性变形过大剪断,正、负向水平力分别下降至其峰值的 88.3% 和 85.2%,节点核心区未见开裂,外挂墙板螺栓连接节点未出现破坏。

3)工况 C

工况 B 完成后,安装 UFP,拆除销钉限位器,进行工况 C 试验,水平位移按 θ 为 1/150、1/100、1/75、1/50、1/40、1/30 逐级加载,1/150、1/100、1/75、1/50、1/40 每级循环 2 次,1/30 循环 1 次。

加载过程中 UFP 在外挂墙板带动下变形耗能、表面氧化层脱落,位移角较大时 UFP 在外挂墙板带动下产生明显的面外变形,无法保持理想的履带式滚动变形轨迹。模型 PF1 工况 C 结束后的破坏情况见图 7,梁端、柱端均以弯曲裂缝为主,梁端约 1.0h_b范围内形成明显的塑性铰,塑性铰区域在往复荷载作用下形成两条较为明显的交叉斜裂缝,柱脚后浇段混凝土保护层脱落。

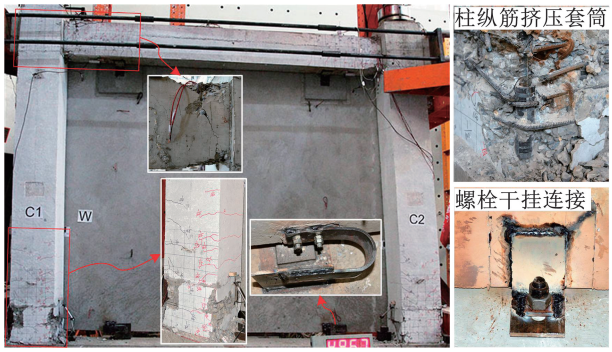


图 7 模型 PF1 工况 C 试验结束后破坏照片

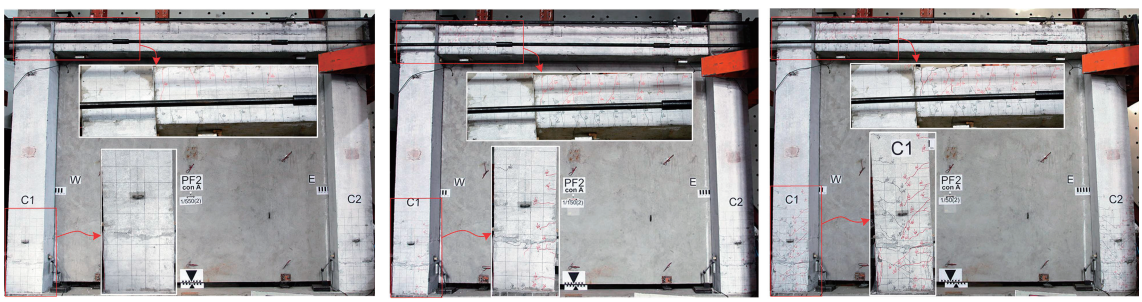
Fig. 7 Damage photos of model PF1 after test condition C

2.1.2 模型 PF2

对模型 PF2 依次进行了 A、B 两个工况的试验。

1)工况 A

外挂墙板与主体框架通过湿连接节点连接,安装限位销钉,即将外挂墙板按实际使用状态安装在主体框架上,水平位移按 θ 为 1/1500、1/1 000、1/800、1/550、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/40 逐级加载,1/1 500、1/1 000、1/800 循环 1 次,而后各级别循环 2 次。模型 PF2 工况 A 不同阶段的破坏情况见图 8。



(a) θ=1/550 (b) θ=1/150 (c) θ=1/50

图 8 模型 PF2 工况 A 裂缝分布与破坏形态

Fig. 8 Crack distributions and failure modes of model PF2 under test condition A

θ = 1/550 级，梁两端 1.75h_b 范围内出现 5 ~ 6 条细小竖向弯曲裂缝，柱脚新旧混凝土结合面轻微开裂，核心区未见开裂。θ = 1/150 级（图 6(a)），梁端开裂范围扩展至距端部 2.75h_b 范围内，大部分上、下裂缝贯通梁截面高度，梁竖向弯曲裂缝最大宽度约为 0.50 mm；柱脚 900 mm 高度范围内出现多条水平弯曲裂缝；梁纵筋受拉屈服，柱纵筋最大拉应变为 $1\,710\times10^{-6}$，梁箍筋拉应变为 370×10^{-6}。θ = 1/50 级（图 6(b)），梁端混凝土压酥，柱脚后浇段混凝土角部压溃脱落，加载位移较大时外挂墙板限位销钉与预埋钢槽接触，1/50 第 1 循环负向加载过程中东侧销钉剪断。θ = 1/40 级，梁、柱端部混凝土压溃区域扩展，第 1 循环正、负向达最大位移时水平力分别下降至其峰值的 91.2% 和 92.0%。

2）工况 B

工况 A 完成后，安装 UFP，拆除销钉限位器，水平位移按 θ 为 1/40、1/30 逐级加载，每级循环 2 次。加载过程中 UFP 工作状态与模型 PF1 工况 C 基本一致。

模型 PF2 工况 B 结束后的破坏情况见图 9，模型 PF2 主体框架破坏形态与模型 PF1 类似，不同的是模型 PF2 梁端开裂范围大于模型 PF1，这是因为模型 PF2 外挂墙板在距柱边 450 ~ 750 mm 范围内，通过后浇混凝土与梁叠合层相连，而模型 PF1 外挂墙板仅通过距柱边 600 mm 处的一个 M24 螺栓相连，模型 PF2 外挂墙板与梁的连接整体性强于模型 PF1，模型 PF2 外挂墙板对梁的刚度贡献较大。

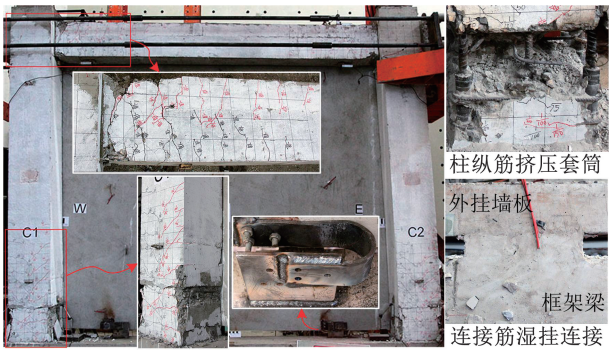


图 9　模型 PF2 工况 B 试验结束后破坏照片

Fig. 9　Damage photos of model PF2 after test condition B

模型 PF1、PF2 试验过程中梁纵筋先于柱纵筋受拉屈服，节点核心区未见明显开裂，套筒挤压连接接头未见破坏，均实现了“强柱弱梁，强节点弱构件”的设计破坏模式。

2.2　滞回性能、承载力及变形能力

模型 PF1、PF2 各工况下的梁端水平力（F）–层间位移角（θ）滞回曲线、骨架曲线见图 10。模型各特征点对应的梁端水平力 F、柱顶水平位移 Δ 及层间位移角 θ 见表 2，其中名义屈服点采用能量法[13]确定，峰值点为 F-θ 骨架曲线梁端水平力最大值 F_p 对应的点，极限点为 F-θ 骨架线 F 下降至 0.85F_p 对应的点。由图 10、表 2 可以得到如下结果。

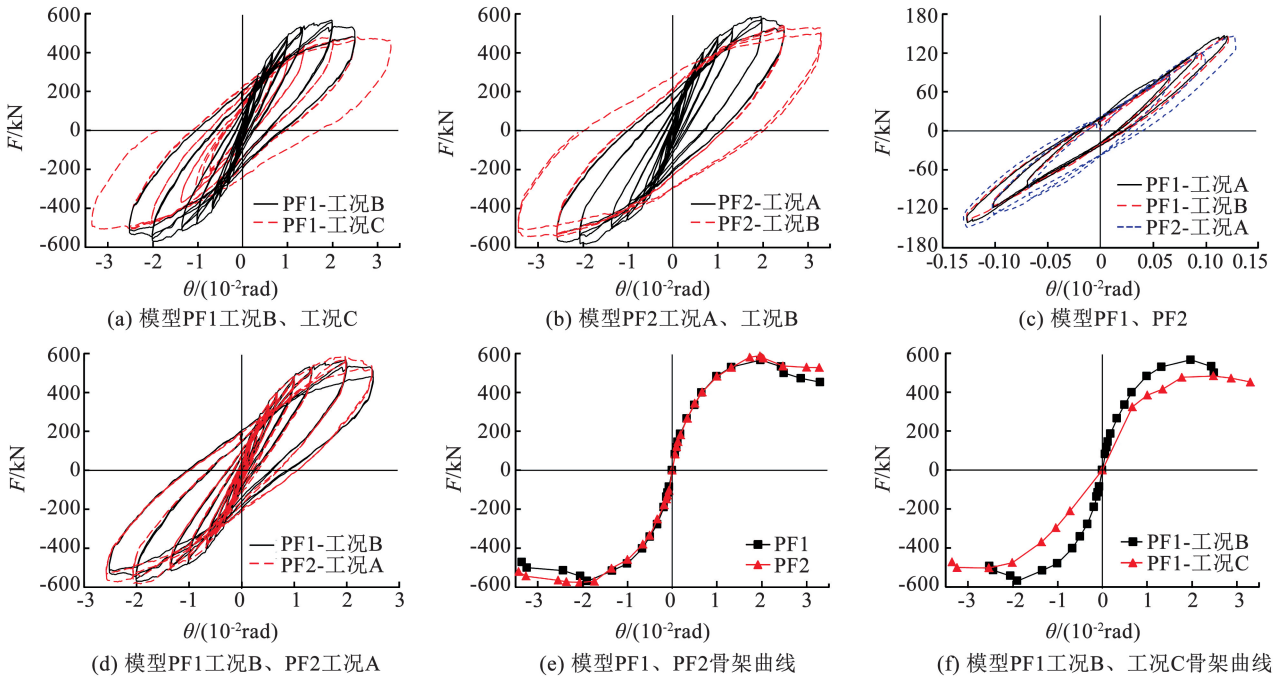
1）模型 PF1 工况 B 和工况 C、模型 PF2 工况 A 和工况 B 下的滞回曲线均较为饱满，后期基本呈梭形，呈现出典型的弯曲塑性铰耗能模式。

2）模型 PF1 工况 A 和工况 B、模型 PF2 工况 A，在 θ = 1/800 级前滞回曲线基本处于线弹性阶段且差别不大，说明外挂墙板连接螺栓是否拧紧对主体框架弹性阶段的抗侧刚度影响差别不大，螺栓干挂连接和 U 形连接筋湿挂连接对主体框架弹性阶段的受力性能影响差别不大。

3）模型 PF1、PF2 在峰值点（θ 约为 1/50）前的滞回曲线、骨架曲线基本一致，名义屈服点、峰值点对应的梁端水平力、层间位移角差别不大，模型 PF2 的骨架曲线下降段更为平缓，模型 PF2 的峰值点梁端水平力较模型 PF1 高 2.4%，模型 PF2 在 θ = 1/40、θ = 1/30 级第 1 循环的梁端水平力最大值较模型 PF1 高 8.9% ~ 16.6%。螺栓干挂连接和 U 形连接筋湿挂连接均避开梁端塑性铰区域，梁弯曲变形主要集中在两端梁端塑性铰区域，梁中部变形以整体转动为主，在峰值点前点支承外挂墙板与梁中部的变形相对协调，点支承外挂墙板对梁的刚度影响不大，因此，螺栓干挂连接和 U 形连接筋湿挂连接对主体框架达到弹塑性位移角限值前的抗震性能影响差别不大。峰值点后梁的弯曲变形进一步向中部发展，点支承外挂墙板与梁中部的变形不协调加剧，U 形连接筋湿挂连接与梁的连接范围更大、界面存在新旧混凝土粘结作用，U 形连接筋湿挂连接外挂墙板在大侧移下（θ 为 1/40 ~ 1/30）对梁的刚度贡献较螺栓干挂连接更大，导致模型 PF2 的骨架曲线下降段更为平缓。

4）模型 PF1 工况 C 安装 UFP 后重新从 θ = 1/150 级加载，其滞回曲线正向略高于工况 B 最后一级 θ = 1/40 级第 2 循环加载路径，负向基本沿工况 B 最后一级 θ = 1/40 级第 2 循环加载路径加载；模型 PF2 工况 B 安装 UFP 后从 θ = 1/40 级继续加载，其滞回曲线正、负向基本均沿工况 A 最后一级 θ = 1/40 级第 2 循环加载路径加载，安装 UFP 后模型 PF1、PF2 的承载能力无明显提高，这是因为试验中 UFP 尺寸较小，对主体框架的抗侧刚度影响较为有限。

5）模型 PF1、PF2 的极限层间位移角均约为 1/30，明显大于框架结构弹塑性层间位移角的限值 1/50，满足抗震变形能力的要求，且试验中连接节点未发生破坏，破坏集中在梁端塑性铰区域，说明采用的连接构造可保证装配式框架结构的抗震变形能力。



(a) 模型PF1工况B、工况C　(b) 模型PF2工况A、工况B　(c) 模型PF1、PF2

(d) 模型PF1工况B、PF2工况A　(e) 模型PF1、PF2骨架曲线　(f) 模型PF1工况B、工况C骨架曲线

图 10　试验模型水平力–层间位移角曲线

Fig. 10　Curves of lateral force against drift ratio

表 2　试验模型不同状态的试验结果

Tab. 2　Test results of models at various states

模型编号	加载方向	名义屈服点			峰值荷载点			极限点			割线刚度/(kN·mm⁻¹)		
		F_y/kN	Δ_y/mm	θ_y	F_p/kN	Δ_p/mm	θ_p	F_u/kN	Δ_u/mm	θ_u	θ=1/1 500 级	θ=1/1 000 级	θ=1/800 级
PF1	正向	437.7	26.41	1/123	565.9	64.30	1/51	481.0	89.36	1/36	34.0/34.1	33.7/30.1	32.4/29.5
	负向	434.0	26.21	1/124	569.2	61.77	1/53	483.8	107.52	1/30	30.9/28.8	32.4/28.4	32.3/28.0
	平均	435.9	26.31	1/124	567.6	63.04	1/52	482.4	98.44	1/33	32.5/31.5	31.9/30.4	31.0/30.2
PF2	正向	443.0	27.33	1/119	586.8	63.82	1/51	527.0	106.76	1/30	35.1	33.9	29.9
	负向	408.6	25.40	1/128	575.6	67.09	1/48	521.0	115.51	1/28	31.0	27.7	26.9
	平均	425.8	26.37	1/123	581.2	65.46	1/50	524.0	111.14	1/29	33.0	30.8	28.4

2.3　刚度

模型 PF1、PF2 各工况 θ = 1/1 500、1/1 000、1/800级对应的割线刚度列于表 2，表中“/”前、后数值分别为模型 PF1 工况 A、工况 B 对应的割线刚度，割线刚度取各加载级第 1 循环顶点与其对应的加载历程中力为零的点的连线斜率，以消除小变形下残余位移的影响。模型 PF1 工况 B 和工况 C、模型 PF2 工况 A 和工况 B 各加载级第 1 循环顶点对应的割线刚度 K 退化曲线见图 11，图中割线刚度定义为各加载级第 1 循环顶点与原点连线的斜率，取正、负两个加载方向的平均值。由图 11 可以得到如下结果。

1）模型 PF1 工况 B、模型 PF2 工况 A 下 θ = 1/1 500、1/1 000、1/800 级的割线刚度基本相同，其割线刚度退化规律基本一致，说明螺栓干挂连接和 U 形连接筋湿挂连接对主体框架弹性阶段的抗侧刚度影响差别不大。

2）模型 PF1 工况 A、工况 B 下 θ = 1/1 500、1/1 000、1/800 级的割线刚度基本相同，说明外挂墙板连接螺栓是否拧紧对主体框架弹性刚度影响不大，可将外挂墙板作为重力荷载施加于主体框架上，以此考虑两点螺栓连接外挂墙板对主体框架弹性阶段的影响。

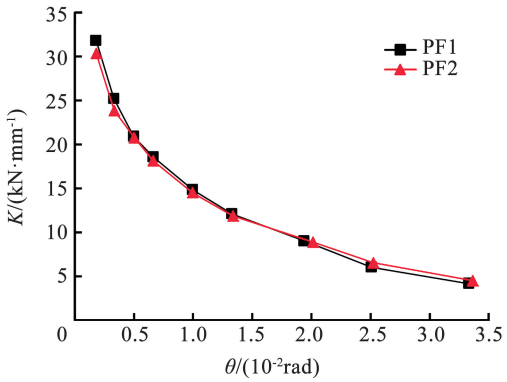


图 11　试验模型刚度退化曲线

Fig. 11　Stiffness degradation curves

2.4　耗能能力

模型 PF1 工况 B、工况 C 下各加载级的等效黏滞阻尼系数 h_e（能量耗散系数除以 2π）与层间位移角的关系曲线见图 12，可以看出：工况 C 安装 UFP 后重新从 1/150 级别加载，其 h_e 在 $\theta=1/50$ 级之前略大于工况 B，$\theta=1/40$ 级与工况 B 基本一致，h_e 在一定程度上反映了滞回环的饱满程度，安装 UFP 后滞回环较未安装 UFP 略饱满。

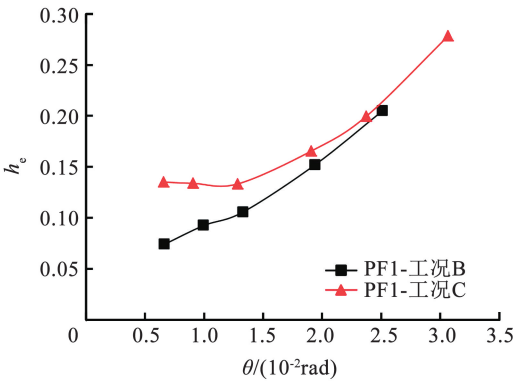


图 12　模型 PF1 不同工况耗能能力

Fig. 12　Energy dissipation of model PF1

2.5　钢筋应变

模型 PF2 外挂墙板 U 形连接筋应变随层间位移角的变化曲线见图 13，图中实线、虚线分别代表正向、负向加载，可以看出：加载过程中 U 形连接筋的上、下钢筋基本均处于受拉状态，拉应变在峰值点前随层间位移角的增加而增大，说明在框架平面内受力过程中，U 形连接筋不仅承受外挂墙板自身重力，外挂墙板通过两个上支承点与梁连接，二者变形不完全一致，导致平面内加载过程中上支承点也会产生相应内力。

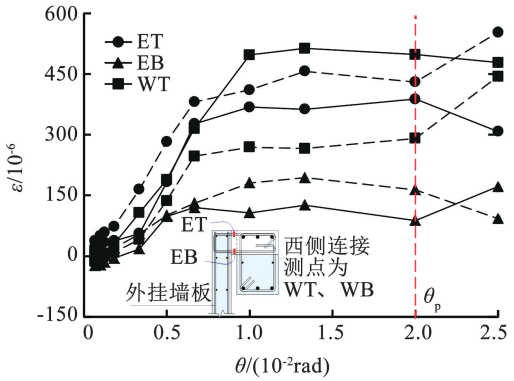
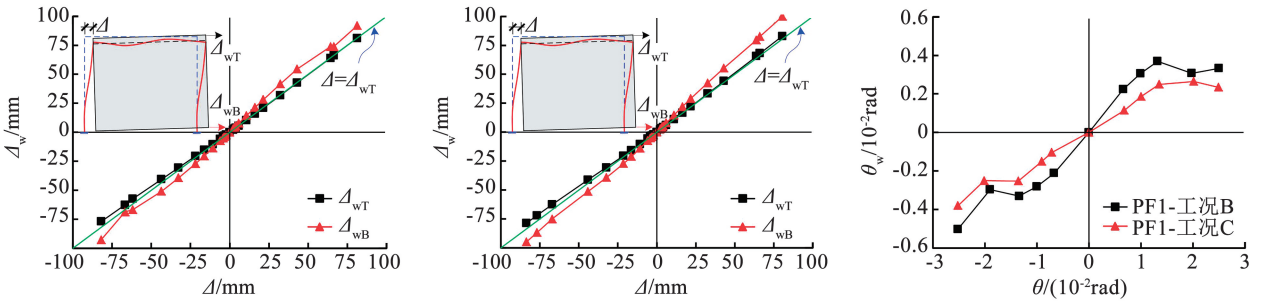


图 13　模型 PF2 连接筋应变

Fig. 13　Connecting rebar strain of model PF2

2.6　外挂墙板相对主体框架变形

试验中采用位移计测量了外挂墙板相对主体框架的变形，图 14（a）、（b）给出了模型 PF1、PF2 外挂墙板顶部、底部的水平侧移 Δ_w 与柱顶水平位移 Δ 的关系曲线，图 14（c）给出了模型 PF1 工况 B、工况 C 下外挂墙板平面内刚体转角 θ_w 与层间位移角 θ 的关系曲线。由图 14 可以看出：外挂墙板顶部水平侧移 Δ_{wT} 与柱顶水平位移 Δ 基本相同，在梁变形的带动下，外挂墙板产生了较大的刚体转动 θ_w，外挂墙板位移模式为旋转式外挂墙板，外挂墙板底部水平侧移 Δ_{wB} 大于层间位移，底部限位槽尺寸需考虑这一影响；模型 PF1 工况 C 安装 UFP 后外挂墙板平面内刚体转角 θ_w 低于工况 B，在 $\theta=1/50$ 级后工况 C 外挂墙板的 θ_w 较工况 B 降低 16% ~30%，UFP 可抑制外挂墙板的刚体转动，同时对主体框架的破坏模式、承载能力和变形能力影响不显著，对于大尺寸外挂墙板可采用 UFP 控制其位移，实现墙板间接缝宽度与密封胶施工便利性、位移能力的合理匹配。



(a) 模型PF1工况B外挂墙板水平侧移　(b) 模型PF2工况A外挂墙板水平侧移　(c) 模型PF1工况B、工况C外挂墙板转角

图 14　试验模型外挂墙板位移

Fig. 14　Displacements for precast facade panel of test models

3　结构与热工性能协同提升

3.1　结构与热工性能协同提升构造

为提升现场施工效率、防水性能和立面效果，外挂墙板多采用大尺寸整间板形式[14]。大尺寸整间板自重较大，吊装、连接节点设计难度大，如图 15 所示连接节点 A，试验模型原型工程中采用内、外叶厚度相同（60 mm 厚）的混凝土板组合受力的三明治

结构实现轻量化,在连接节点区域一定范围内将内、外叶混凝土连通以增强连接节点的受力性能[14-15]。上述处理虽可保证外挂墙板的结构安全,但连接节点部位易形成热桥,削弱围护系统的热工性能[11]。

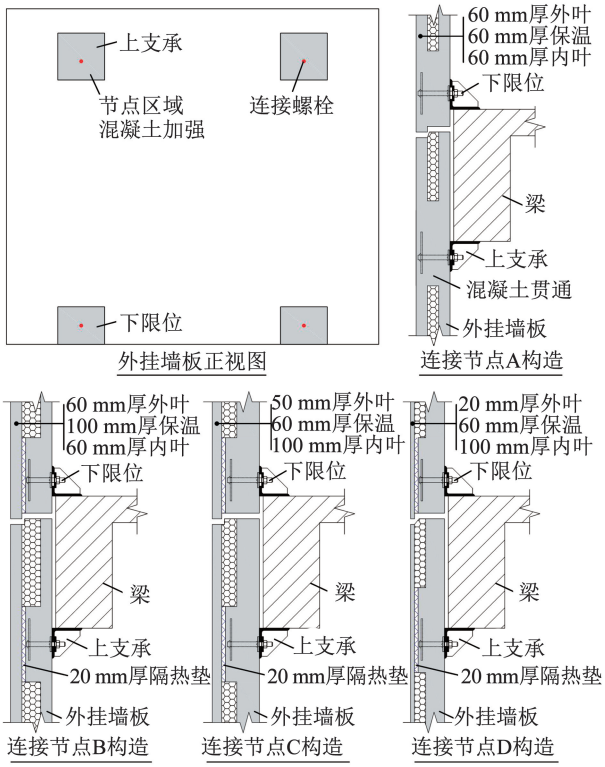


图 15 外挂墙板连接节点协同提升构造

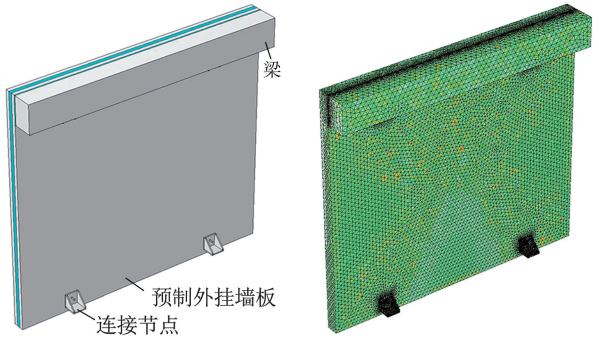
Fig. 15 Collaborative enhancement details of joint

如图 15 所示,本文提出 3 种连接节点热工性能提升构造:连接节点区域内叶板混凝土向保温层凸出改善连接节点的锚固性能,在外叶板和节点区域凸出混凝土之间设置 20 mm 厚隔热垫阻断热桥,其中,连接节点 B 通过增大保温层厚度实现,内、外叶混凝土板厚度保持不变,保持组合受力的三明治结构;连接节点 C 中外挂墙板保温层厚度不变,内、外叶板设计为非组合受力,外叶板采用 50 mm 厚普通钢筋混凝土板,内叶板为受力层;连接节点 D 中外挂墙板保温层厚度不变,内、外叶板设计为非组合受力,外叶板采用 20 mm 厚超高性能混凝土(UHPC)或配钢丝网自流平水泥基材料作为防护层,内叶板为受力层。

3.2 热工性能研究

采用通用有限元软件 COMSOL Multiphysics 研究图 15 中点支承外挂墙板的热工性能,其固体传热模块的数值模型方程可准确表征复杂墙体构造中局部三维传热过程对整体热工性能的影响[16]。外挂墙板内、外叶均为水泥基材料,其热响应时间明显小于昼夜温度波动周期,可采用稳态传热分析连接节点局部热桥对外挂墙板整体平均传热系数的影响。

分别建立无连接节点外挂墙板、考虑连接节点影响的外挂墙板的三维传热计算模型,其中基准模型 W 为无连接节点外挂墙板,墙板尺寸为 3.98 m × 3.58 m(宽 × 高),内、外叶板均为 60 mm 厚普通钢筋混凝土板,保温层采用 60 mm 厚挤塑板(XPS,导热系数为 0.032 W/(m·K)),墙板总厚度 t 为 180 mm;模型 WA 采用图 15 中连接节点 A 构造,连接节点区域内、外叶板混凝土连通;模型 WB 采用图 15中连接节点 B 构造,保温层采用 100 mm 厚 XPS 板,隔热垫采用 XPS,t 为 220 mm;模型 WC 采用图 15 中连接节点 C 构造,内、外叶板分别为 100、50 mm 厚普通钢筋混凝土板,保温层采用 60 mm 厚 XPS 板,隔热垫采用 XPS,t 为 210 mm;模型 WD1、WD2 采用图 15 中连接节点 D 构造,外叶板为 20 mm厚配钢丝网自流平水泥基材料薄板,内叶板为 100 mm 厚普通钢筋混凝土板,保温层采用60 mm 厚 XPS 板,t 均为 180 mm,模型 WD1、WD2 的隔热垫分别为 XPS、气凝胶毡[17](AIB,导热系数为 0.018 W/(m·K))。模型 WA、WB、WC、WD1 和 WD2 的外挂墙板尺寸与基准模型 W 相同,室内侧参照实际工程设置截面尺寸为 300 mm × 600 mm(宽 × 高)的梁以考虑连接节点的三维传热影响。典型有限元模型见图 16,模型构造及参数见表 3,模型中内、外表面温度分别为 20 ℃、-10 ℃,内、外表面换热阻分别取为 0.11 和 0.04 $(m^2 \cdot K)/W$ 以考虑空气对流的影响,外挂墙板与梁之间参考实际工程做法填塞保温板,其他表面设为绝热边界,材料热物性参数按照 GB 50176—2016《民用建筑热工设计规范》[18]取值,不考虑内、外叶板之间拉结件的影响。



(a) 有限元模型示意 (b) 网格划分

图 16 三维传热有限元模型

Fig. 16 3D heat transfer FEA model

模型内叶板距离保温层 3 mm 所在平面的温度分布见图 17,连接节点剖面、内叶板厚度中心截面的热流密度矢量图分别见图 18、图 19。各模型墙板的平均传热系数计算结果列于表 3,表中增长率为

墙板平均传热系数相较无连接节点墙板的增长比例，表征点支承连接热桥效应的影响程度。由图 17 ~ 图 19 及表 3 可以得到如下结果。

1）模型 WA 的点支承连接虽满足连接节点的结构受力需求，但内、外叶板之间连通的混凝土导热系数大于保温材料，热量在点支承连接范围的传递速率加快，温度梯度增大，形成了明显的热桥，墙体平均传热系数较无连接节点墙板提高了 62.1%，严重削弱了墙板的整体热工性能，说明模型 WA 难以兼顾结构和热工性能。

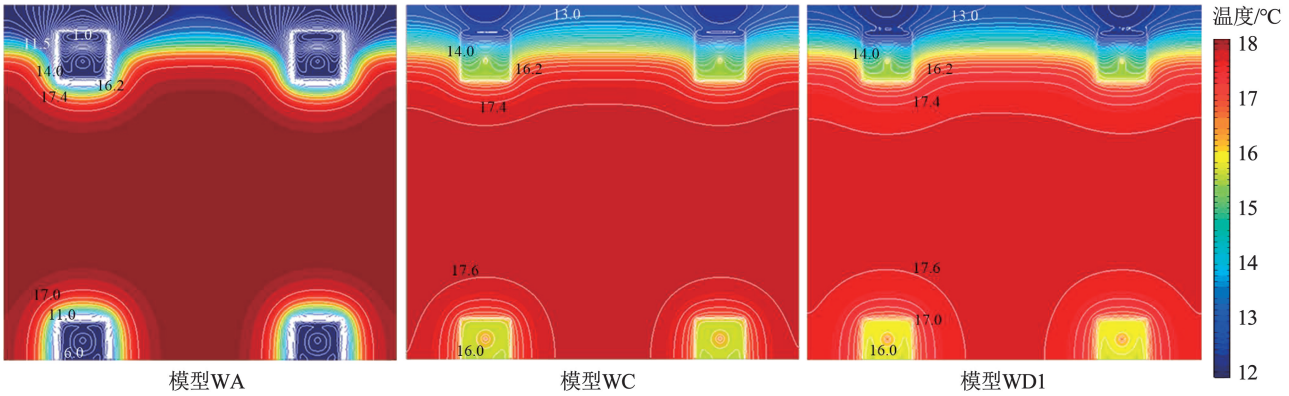


图 17　模型内叶板温度分布

Fig. 17　Temperature cloud map in inner wythes of models

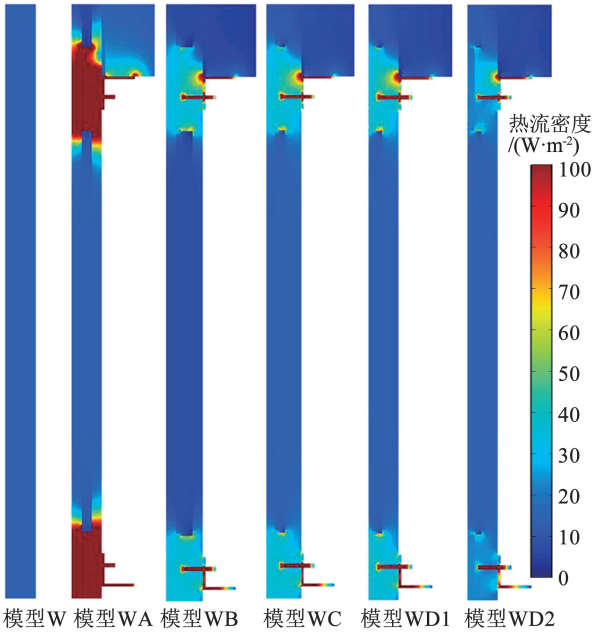


图 18　连接节点剖面热流密度矢量图

Fig. 18　Profile heat flux vector diagram of joints

2）在连接节点区域设置隔热垫后，点支承连接的热桥影响范围较模型 WA 明显缩小，设置 XPS、AIB 隔热垫的模型 WD1、WD2 节点区域热桥影响分别降低 86.6%、95.6%，结合温度分布图、热流密度矢量图可知，内、外叶板间的混凝土破坏了保温层的连续性，是连接节点区域形成热桥的根本原因。

3）模型 WB 通过增大保温层厚度阻断连接节点区域热桥，其墙体平均传热系数较无连接节点墙板、模型 WA 分别降低了 25.3%、53.9%，但墙体总厚度 t 增加了 22.2%，说明连接节点 B 构造虽可兼顾结构和热工性能，但对建筑设计影响较大，保温材料用量增加较多。

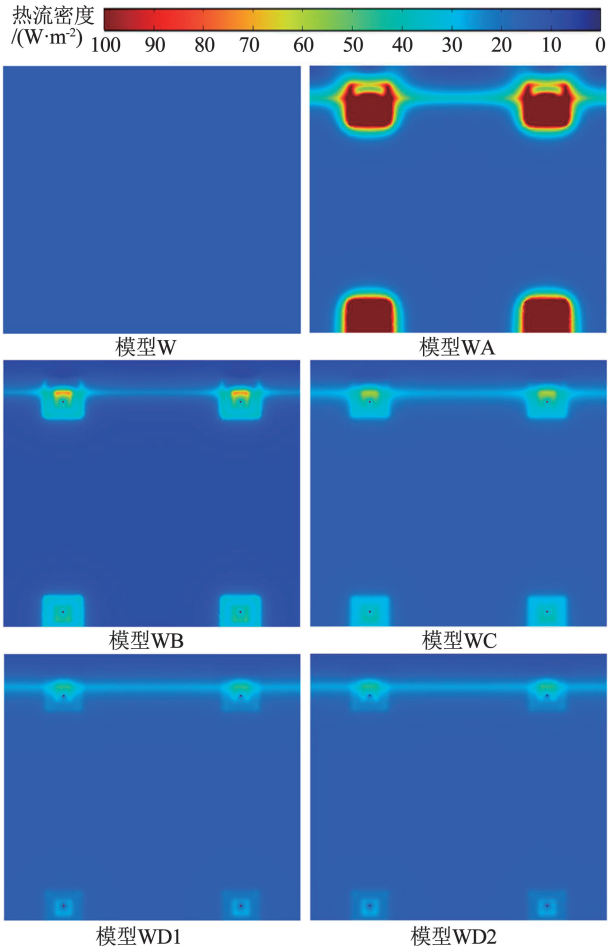


图 19　内叶板热流密度矢量图

Fig. 19　Heat flux vector diagram of inner wythes

4）模型 WC、WD1 的墙体平均传热系数较无连接节点墙板分别提高了 7.4%、8.3%，二者的温度分布图、热流密度矢量图基本一致，说明外叶板厚度对热工性能影响较小。

表 3 模型构造及热工计算结果

Tab. 3 Details and thermal performances of models

模型	构造	t/mm	隔热垫	平均传热系数/(W·m^{-2}·K^{-1})	增长率/%
W	无节点,外叶 60 mm + 保温 60 mm + 内叶 60 mm	180	—	0.477 5	—
WA	点支承,外叶 60 mm + 保温 60 mm + 内叶 60 mm	180	无	0.773 9	62.1
WB	点支承,外叶 60 mm + 保温 100 mm + 内叶 60 mm	220	XPS	0.356 6	−25.3
WC	点支承,外叶 50 mm + 保温 60 mm + 内叶 100 mm	210	XPS	0.512 7	7.4
WD1	点支承,外叶 20 mm + 保温 60 mm + 内叶 100 mm	180	XPS	0.517 3	8.3
WD2	点支承,外叶 20 mm + 保温 60 mm + 内叶 100 mm	180	AIB	0.490 5	2.7

5)隔热垫材料由 XPS 优化为 AIB 后,模型 WD2 的平均传热系数较模型 WD1 降低了 5.2%,较无连接节点墙板仅增加 2.7%,连接节点对墙体热工性能的影响已可基本忽略,且墙体总厚度保持不变,外叶板采用的高性能材料吸水率低、抗裂性能优异,内、外叶板非组合受力模式受力清晰,可明显降低内外温差下外叶板的开裂风险,提出的连接节点 D 可实现结构、热工、建筑设计和外饰面耐久性的协同提升。

6)相较 XPS 隔热垫,AIB 隔热垫节点区域的整体热流密度明显降低,热量进一步集中通过连接螺栓,对于超低能耗、近零能耗建筑,可使用低导热不锈钢螺栓或纤维增强复合材料(FRP)棒材代替普通钢螺栓,进一步实现节点区域的热桥消解。

4 结 论

1)试验模型梁纵筋先于柱纵筋受拉屈服,连接节点未发生破坏,破坏集中在梁端塑性铰区域,节点核心区未见明显开裂,套筒挤压连接接头未见破坏,实现了“强柱弱梁、强节点弱构件”的破坏模式,极限层间位移角约为 1/30,采用的连接构造可保证装配式框架结构的整体抗震性能。

2)外挂墙板连接螺栓是否拧紧对主体框架弹性阶段的抗侧刚度影响差别不大,螺栓干挂连接和 U 形连接筋湿挂连接对主体框架达到弹塑性位移角限值前的抗震性能影响差别不大,U 形连接筋湿挂连接外挂墙板对主体框架在大侧移下(层间位移角为 1/40 ~ 1/30)的抗侧贡献大于螺栓干挂连接外挂墙板。

3)在框架梁带动下外挂墙板位移模式为旋转式位移模式,外挂墙板底部水平侧移大于层间位移,底部限位设计需考虑旋转位移的影响;引入 U 形钢板阻尼器后外挂墙板在大侧移下的刚体转动减少 16% ~30%,同时对主体框架的破坏模式、承载能力和变形能力影响不显著,可采用 U 形钢板阻尼器控制大尺寸外挂墙板的位移,实现墙板间接缝宽度与密封胶施工便利性、位移能力的合理匹配。

4)组合受力外挂墙板内、外叶间的混凝土在连接节点区形成热桥,导致外挂墙板热工性能削弱 62.1%;在节点区域内、外叶混凝土之间设置挤塑板隔热垫可将热桥影响降低 86.6%,隔热垫可实现连接节点区域附近的热桥消解。对于超低能耗、近零能耗建筑,可使用气凝胶毡隔热垫、低导热不锈钢螺栓或纤维增强复合材料(FRP)棒材进一步提升热桥消解效果。

参考文献

[1]金晓飞, 孟永杰, 杨晓杰, 等. 内嵌围护墙板对钢框架抗侧力性能的影响效应[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(4): 21
JIN Xiaofei, MENG Yongjie, YANG Xaiojie, et al. Effect of embeded enclosure wallboard on the lateral load behavior of steel frames [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(4): 21

[2]金晓飞, 高松召, 杨晓杰, 等. 内嵌墙板钢框架等效单斜撑简化模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6):16
JIN Xiaofei, GAO Songzhao, YANG Xaiojie, et al. Equivalent single strut simplified model for steel frames with embedded retaining wall[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 16

[3]郁银泉, 肖明, 王赞, 等. 预制混凝土外挂墙板板间接缝宽度研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(11): 1
YU Yinquan, XIAO Ming, WANG Zan, et al. Research on seam width of precast concrete facade panel [J]. Building Structure, 2019, 49(11): 1. DOI:10.19701/j.jzjg.2019.11.001

[4]DAL L B, BIONDINI F, TONIOLO G. Friction-based dissipative devices for precast concrete panels [J]. Engineering Structures, 2017, 147: 356. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.05.050

[5]NEGRO P, TORNAGHI M L. Seismic response of precast structures with vertical cladding panels: The SAFECLADDING experimental campaign[J]. Engineering Structures, 2017, 132: 205. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.11.020

[6]廖振, 梁书亭, 朱筱俊, 等. 预制外挂墙板半刚性耗能连接节点力学性能研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(5): 126
LIAO Zhen, LIANG Shuting, ZHU Xiaojun, et al. Research on mechanical behavior of a semi-rigid energy dissipation connection node of precast cladding panel [J]. Building Structure, 2024,

54(5)：126. DOI:10.19701/j.jzjg.20231640

[7]王子杨. 含减震外挂墙板 PC 联肢剪力墙结构抗震性能研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2018
WANG Ziyang. Study on seismic performance of PC shear wall structure with sandwich exterior wall panel and U-shaped steel plate damper[D]. Hefei：Hefei University of Technology，2018

[8]黄柯玮，李静，戚玉亮，等. 使用环形钢板消能器的装配式钢框架外挂墙板体系抗震性能分析[J]. 建筑结构，2022，52(S2)：807
HUANG Kewei，LI Jing，QI Yuliang，et al. Seismic performance of ring-shaped energy-dissipating devices for prefabricated steel frame structure with external wall panel[J]. Building Structure，2022，52(S2)：807. DOI:10.19701/j.jzjg.22S2575

[9]沙慧玲，种迅，叶献国，等. 附加减震外挂墙板钢筋混凝土框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报，2023，44(12)：13
SHA Huiling，CHONG Xun，YE Xianguo，et al. Shaking table tests of reinforced concrete frame structure with energy dissipation cladding panels[J]. Journal of Building Structures，2023，44(12)：13. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0659

[10]预制混凝土外挂墙板应用技术标准：JGJ/T 458—2018[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2018
Technical standard for application of precast concrete facade panels：JGJ/T 458—2018[S]. Beijing：China Architecture & Building Press，2018

[11]LAMEIRAS R，BARROS J，VALENTE I B，et al. Development of sandwich panels combining fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. Part I：Conception and pull-out tests[J]. Composite Structures，2013，105：446. DOI:10.1016/j.compstruct.2013.06.022

[12]建筑抗震设计标准：GB/T 50011—2010[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2024
Standard for seismic design of buildings：GB/T 50011—2010[S]. Beijing：China Architecture & Building Press，2024

[13]赵作周，韩文龙，钱稼茹，等. 梁纵筋锚固板锚固装配整体式梁柱边节点抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报，2016，48(12)：19
ZHAO Zuozhou，HAN Wenlong，QIAN Jiaru，et al. Seismic behavior of assembled monolithic beam-column exterior joints with beam longitudinal rebars anchored by heads[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2016，48(12)：19. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.002

[14]预制混凝土外墙挂板(一)：16J110—2，16G333[S]. 北京：中国计划出版社，2016
Precast concrete cladding panel：16J110—2，16G333[S]. Beijing：China Planning Press，2016

[15]方宜成. 含三明治外挂墙板预制装配式混凝土剪力墙结构抗震性能研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2017
FANG Yicheng. Study on seismic performance of prefabricated concrete shear wall structure with sandwich exterior wall panel[D]. Hefei：Hefei University of Technology，2017

[16]郑佳瑞，杨丽平，崔临风，等. 超低能耗居住建筑预制混凝土夹心保温墙体桁架式连接件热桥效应研究[J]. 建筑科学，2024，40(10)：20
ZHENG Jiarui，YANG Liping，CUI Linfeng，et al. Study on thermal bridge effect of precast concrete sandwich insulation wall truss-type connectors for ultra-low energy residential buildings[J]. Building Science，2024，40(10)：20. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2024.10.03

[17]纳米孔气凝胶复合绝热制品：GB/T 34336—2017[S]. 北京：中国标准出版社，2017
Reinforced nanoporous aerogel products for thermal insulation：GB/T 34336—2017[S]. Beijing：Standards Press of China，2017

[18]民用建筑热工设计规范：GB 50176—2016[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2017
Code for thermal design of civil building：GB 50176—2016[S]. Beijing：China Architecture & Building Press，2017

(编辑　吕雪梅)

DOI:10.11918/202503024

钢筋煤矸石混凝土黏结性能试验研究与数值模拟

赵卫平[1],钟 琳[1],张 珂[1],苏子帅[1],徐 旸[2],陈嘉龙[1]

(1.中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院,北京 100083;
2.中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所,北京 100081)

摘 要: 为研究带肋钢筋与煤矸石混凝土之间的黏结滑移性能,本文以煤矸石取代率、混凝土强度等级和钢筋直径为变量,设计并制备了36个立方体试件,并进行了中心拔出试验。试验结果表明:随着煤矸石取代率的增加,试件的黏结强度逐渐降低,破坏模式由拔出破坏转变为劈裂破坏;随着钢筋直径的增大,试件的黏结强度呈下降趋势,且煤矸石混凝土的下降幅度较普通混凝土更为显著;随着混凝土强度等级的提高,试件的黏结强度显著增大;当强度等级达到C55时,试件的破坏模式由钢筋屈服前破坏转变为钢筋屈服后破坏。基于试验数据,建立了钢筋煤矸石混凝土构件的黏结强度预测模型和三维细观有限元模型。在验证有限元模型准确性的基础上,利用该模型进一步揭示了煤矸石混凝土与带肋钢筋在拉拔力作用下的损伤演化和黏结破坏机理。

关键词: 煤矸石混凝土;带肋钢筋;中心拔出试验;黏结-滑移;数值模拟
中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)05-0192-13

Experimental study and numerical simulation on bond performance of reinforced coal gangue concrete

ZHAO Weiping[1], ZHONG Lin[1], ZHANG Ke[1], SU Zishuai[1], XU Yang[2], CHEN Jialong[1]

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: To investigate the bond-slip behavior between ribbed steel bar and coal gangue concrete, 36 cubic specimens were designed and prepared, in which coal gangue replacement ratio, concrete strength grade and rebar diameter were selected as variables, and the center pull-out tests were conducted. The results show that the bond strength of the specimen gradually decreases with the increase of coal gangue replacement ratio and the failure mode changes from pull-out failure to splitting failure. With the increase of rebar diameter, the bond strength of the specimen shows a decreasing trend, and the degree of decline of coal gangue concrete is more significant than that of ordinary concrete. As the concrete strength grade increases, the bond strength of the specimen increases significantly and the failure mode of the specimen changes from the pre-yield failure of steel bar to the post-yield failure of steel bar when the strength grade reaches C55. Based on the experimental data, a bond strength prediction model and a 3D meso-scale finite element model of reinforced coal gangue concrete members were established. The finite element model, the accuracy of which was verified, was utilized to further reveal the damage evolution and bond failure mechanism of coal gangue concrete and ribbed steel bar under pull-out force.

Keywords: coal gangue concrete; ribbed steel bar; center pull-out test; bond-slip; numerical simulation

中国是能源消费大国,煤炭约占能源消费总量的70%。在煤矿开采和清洗过程中产生的煤矸石占煤炭总量的15%~20%,成为积累最多、占据空间最大的工业残留物[1-2]。煤矸石的自燃、堆放及崩塌等对环境和地质安全构成严重威胁[3-4]。近年来,随着“双碳”战略的推进,煤矸石资源化利用已成为解决环境问题和实现可持续发展的迫切需求。

以煤矸石为粗骨料制备混凝土具有良好的经济效益和环境效益。受煤层地质年代和成矿地质环境的影响,我国不同地区的煤矸石性质存在差异,但其主要矿物成分和化学成分基本一致[5]。煤矸石的主要成分为砂质泥岩,与天然碎石相比,具有微观结构松散、弹性模量较低、断裂韧性差、吸水率和压碎指标较高等缺点[6-8]。由于这些因素,煤矸石混凝

收稿日期: 2025-03-06;**录用日期:** 2025-05-28;**网络首发日期:** 2025-06-17
网络首发地址: https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250616.1845.002
基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U22A20244);国家自然科学基金(52278467)
作者简介: 赵卫平(1981—),男,副教授,博士生导师
通信作者: 赵卫平,zhaowp@cumtb.edu.cn

土的强度和弹性模量较低，主要适用于矿山采空区回填、隔墙和路基等非结构施工[9-12]。钢筋混凝土结构充分发挥了钢材抗拉强度高、延性和吸能能力好的优点，有助于改善混凝土的力学性能、控制裂缝宽度，已被广泛应用于道路、桥梁、水利工程和港口等领域[13]。因此，将煤矸石混凝土与钢筋结合形成钢筋煤矸石混凝土构件，进而提高煤矸石混凝土的力学性能，扩展其在结构工程中的应用前景。

混凝土与钢筋之间良好的黏结性能是两种材料协同工作的前提，研究黏结滑移机理对于分析钢筋混凝土结构的力学性能至关重要。近几十年来，学者们对钢筋混凝土的黏结性能进行了大量的试验研究，揭示了钢筋参数[14]、混凝土参数[15]、加载类型[16-17]和极端工况[18-20]等因素对黏结滑移行为的影响机制。此外，随着有限元软件工具的发展，目前已建立了许多数值模型用于进一步研究钢筋混凝土的非线性黏结行为。这些模型通常将带肋钢筋进行简化建模，通过在钢 - 混凝土接触面嵌入弹簧单元[21-22]、内聚力单元[23]或四边形单元[24]来模拟二者的界面黏结。这些数值模拟成果促进了对钢筋 - 混凝土界面黏结机理的认识，但尚存在以下局限性：1）界面单元的本构关系依赖于试验中测得的黏结滑移本构关系；2）钢筋肋纹的几何简化难以准确表征肋前混凝土压碎、肋间黏结失效等多模式耦合的破坏机理。然而，粗骨料类型的改变会显著影响混凝土和钢筋间的黏结性能[25-26]。已有研究表明，煤矸石的掺入削弱了钢筋与混凝土的界面黏结，进而影响了钢筋混凝土结构的抗震性能[6]和抗弯性能[27]。因此，现有的关于普通混凝土和钢筋间黏结性能的结论和模型可能不适用于煤矸石混凝土，需开展针对性研究。

为明确带肋钢筋和煤矸石混凝土间的黏结性能，本文以混凝土强度等级、煤矸石取代率和钢筋直径为变量，制备了 36 个立方体试件并进行中心拔出试验，以明确这 3 种参数对试件破坏模式和黏结滑移曲线的影响。基于钢材和煤矸石混凝土的材料参数及试件的几何参数，在 ABAQUS 环境中建立考虑钢筋真实形态的三维细观有限元模型，并通过与本文试验数据的对比验证其准确性。在此基础上，进一步揭示煤矸石混凝土与带肋钢筋在拉拔力作用下的损伤演化和黏结破坏机理。

1　试验设计

1.1　材料力学性能

试验中使用的粗骨料包括天然碎石和煤矸石，其中天然碎石取自赞皇县龙岩矿石场，主要成分为玄武岩；煤矸石购自灵寿县沃阳矿产品加工厂，主要成分为砂质泥岩。将天然碎石和煤矸石经颚式破碎机破碎、筛分和组配，得到粒径范围为 5 ~ 20 mm 的连续级配粗骨料。混凝土的其他成分包括：强度等级为 42.5R 的钻牌普通硅酸盐水泥（国家标准 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》[28]）；细度模数为 2.52的天然中粗河砂（产自中国河北地区）；以及减水率为 30% 的聚羧酸高性能减水剂（购自天津伟合科技公司）。按照 JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》[29]规定的方法对煤矸石和天然碎石的主要性能进行测试，结果列于表 1。如表 2 所示，煤矸石的主要化学成分为 SiO_2（57.26%）和 Al_2O_3（23.46%），与天然碎石的性质相似，可作为混凝土粗骨料使用[30]。

表 1　煤矸石与天然碎石的物理力学参数

Tab. 1　Physical and mechanical parameters of coal gangue and natural gravel

种类	粒径/mm	表观密度/（kg·m^{-3}）	吸水率/%	压碎指标/%
煤矸石	5 ~ 20	1 956	3.8	19.54
天然碎石	5 ~ 20	2 820	0.7	9.87

表 2　煤矸石和天然碎石的化学成分（质量分数/%）

Tab. 2　Chemical constituents of coal gangue and natural gravel (wt. %)

种类	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	Na_2O	MnO	SO_3	P_2O_5	MgO
煤矸石	57.26	23.46	4.82	6.41	2.17	0.59	1.18	0.11	0.21	0.53	0.72
天然碎石	45.64	15.86	16.77	0.87	6.95	2.75	1.79	0.17	0.32	0.26	8.42

如表 3 所示，根据 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》[31]的规定和要求，进行煤矸石混凝土的配合比计算，共设计了 5 种煤矸石取代率（r = 0%、30%、50%、70% 和 100%）和 3 种混凝土强度等级（C55、C40 和 C30）。其中煤矸石取代率定义为煤矸石的体积与粗骨料总体积的比值。为了弥补煤矸石的高吸水性对混凝土和易性的不利影响，试验中减水剂的掺量随煤矸石取代率的增大而增大（水灰比不变），以确保混凝土的坍落度在 150 ~ 200 mm[32]。对于每种配合比，分别制备 150 mm × 150 mm × 300 mm棱柱体试件和 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体试件，在标准条件（20 ℃ ± 2 ℃，相对湿度

95%)下养护 28 d,然后分别用于测试煤矸石混凝土的立方体抗压强度(f_{cu})、劈裂抗拉强度(f_{tu})和弹性模量(E_c),结果列于表 3。由表 3 可以看出,在强度等级相同的情况下,随着煤矸石取代率的增加,混凝土的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量均显著下降。如图 1 所示,当煤矸石掺量超过 30%时,骨料替代率对煤矸石混凝土劈裂抗拉强度的影响大于对抗压强度的影响。

表 3 混凝土配合比及力学性能试验结果

Tab. 3 Mix proportion and mechanical property test results of concrete

强度等级	r/%	原材料/(kg·m^{-3})						f_{cu}/MPa	f_{tu}/MPa	E_c/(10^4 MPa)
		水	水泥	砂	天然碎石	煤矸石	减水剂			
C55	0	160	550	531	1 241.0	0	3.32	68.13	4.12	3.83
	30	160	550	531	867.0	372.0	4.18	59.37	3.81	3.41
C40	0	160	440	634	1 162.0	0	1.98	52.14	3.64	3.34
	30	160	440	634	813.4	316.3	2.55	42.52	3.27	2.70
	50	160	440	634	581.0	527.2	2.86	38.67	2.93	1.67
	70	160	440	634	348.6	738.0	3.21	34.92	2.63	1.40
	100	160	440	634	0	1 054.4	3.69	30.24	1.74	1.16
C30	0	180	428	747	1 041.0	0	1.71	39.34	3.01	3.05
	30	180	428	747	728.7	283.4	2.23	30.42	2.52	2.03

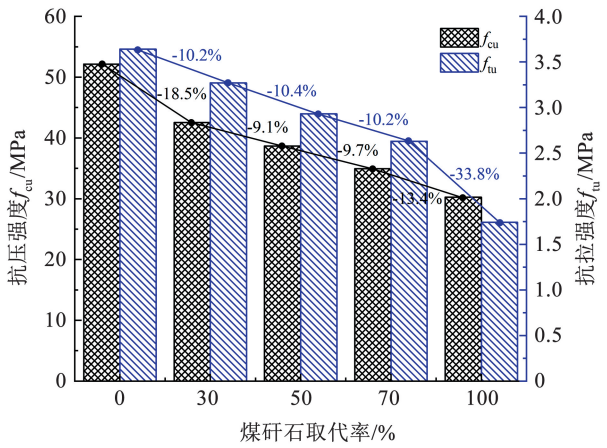


图 1 煤矸石取代率对混凝土强度的影响

Fig. 1 Effect of coal gangue replacement ratio on concrete strength

试验使用的钢筋为 HRB400E 级热轧带肋钢筋。依据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》[33] 规定的方法进行钢筋拉伸试验,试验结果见表 4。

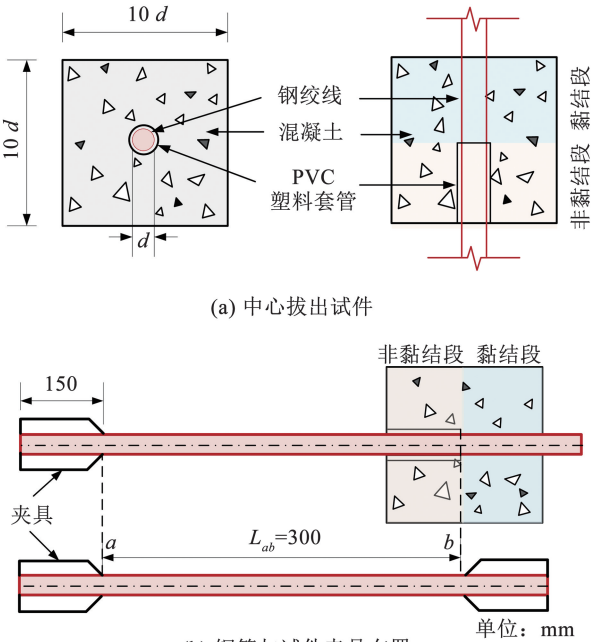
表 4 HRB400E 钢筋力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of HRB400E steel bars

钢筋直径 d/mm	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa	伸长率 Δ/%	弹性模量 E_s/(10^5 MPa)
16-1	416.2	576.1	24.7	2.00
16-2	423.3	582.1	25.2	2.05
16-3	408.5	570.4	24.8	1.95
平均	416.0	576.2	24.9	2.00
25-1	446.8	610.1	22.9	1.98
25-2	452.6	614.7	23.1	2.01
25-3	458.4	617.8	23.9	2.04
平均	452.6	614.2	23.3	2.01

1.2 拔出试件设计

本文采用中心拉拔试验测试钢筋与煤矸石混凝土间的黏结性能。根据 GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》[34] 的要求,设计并制备了 36 个尺寸分别为 160 mm × 160 mm × 160 mm 和 250 mm × 250 mm × 250 mm 的中心拔出试件,试件边长为钢筋直径的 10 倍,钢筋在混凝土中的黏结长度(l_a)为钢筋直径的 5 倍(图 2(a))。如图 2(b)所示,在试件的一侧嵌入 PVC 管,将煤矸石混凝土中的钢筋分为黏结段和非黏结段。



(a) 中心拔出试件

(b) 钢筋与试件夹具布置

图 2 试件尺寸及夹具布置

Fig. 2 Specimen size and fixture layout

如图 3 所示，将所有中心拔出试件依据混凝土强度等级、煤矸石取代率和钢筋直径分为 12 组，每组 3 个平行试件。所有中心拔出试件的详细信息列于表 5，其中 c 为混凝土保护层厚度。试件的命名方式以 GC40-50-25 为例，其代表混凝土强度等级为 C40，煤矸石取代率为 50%，钢筋直径为 25 mm 的中心拔出试件。

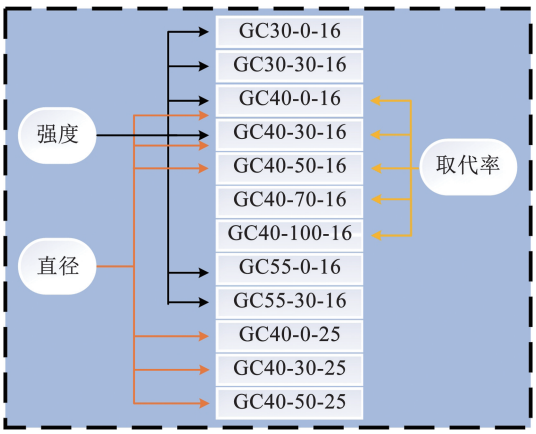


图 3　单一变量对照分组

Fig. 3　Single variable comparison groups

1.3　加载装置及方案

试验采用信任达万能试验机（量程 2 000 kN）施加竖向荷载，加载方式为位移控制，加载速率为 0.5 mm/min，加载装置如图 4（a）所示。为测量加载端和自由端钢筋与混凝土间相对滑移值，在图 4（b）所示位置布置 4 个位移计。由位移计 1、2 测出自由端钢筋与混凝土间的相对滑移，位移计 3、4 测出加载端钢筋与混凝土的相对滑移，并通过泰斯特静态应变采集箱实现实时采集，拉拔力由与应变采集箱连接的力传感器读出。试验过程中，若出现钢筋被拔出或拉断，或混凝土发生劈裂破坏，即停止加载。

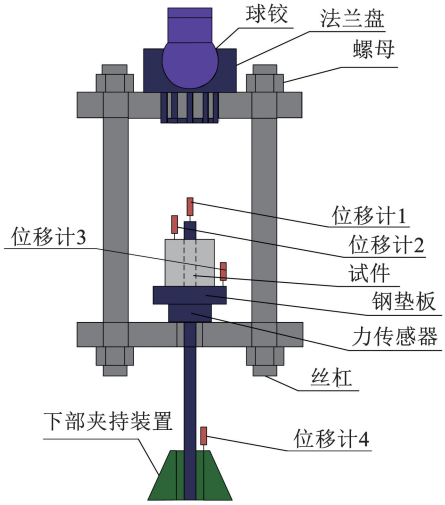
表 5　试件设计参数

Tab. 5　Design parameters of specimens

试件编号	r/%	强度等级	d/mm	l_a/mm	c/mm
GC30-0-16	0	C30	16	80	72.0
GC30-30-16	30	C30	16	80	72.0
GC40-0-16	0	C40	16	80	72.0
GC40-30-16	30	C40	16	80	72.0
GC40-50-16	50	C40	16	80	72.0
GC40-70-16	70	C40	16	80	72.0
GC40-100-16	100	C40	16	80	72.0
GC55-0-16	0	C55	16	80	72.0
GC55-30-16	30	C55	16	80	72.0
GC40-0-25	0	C40	25	125	112.5
GC40-30-25	30	C40	25	125	112.5
GC40-50-25	50	C40	25	125	112.5



(a) 加载装置



(b) 位移计布置

图 4　加载装置及仪器布置

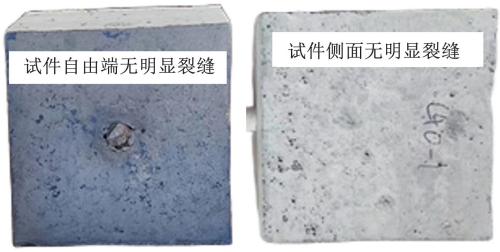
Fig. 4　Loading device and instrument arrangement

2　试验结果与分析

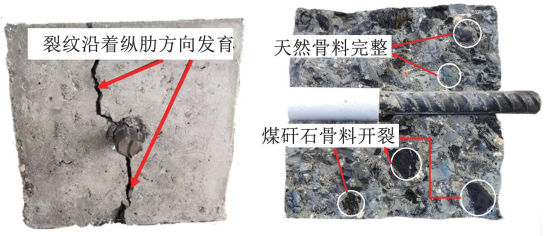
2.1　破坏形态及现象

图 5 为各类试件的破坏形态，可分为刮出破坏和劈裂破坏两大类。

刮出破坏：当混凝土强度等级较低（C30、C40），且煤矸石掺量较低（0%、30%）时，试件发生钢筋屈服前刮出破坏。在加载过程中，钢筋横肋前部的混凝土因局部应力集中而被压碎，形成碎屑并逐渐积累，最终导致钢筋被刮出。试件自由端与侧面均无明显裂缝，仅在加载端周围形成微裂缝。GC55-0-16 试件发生钢筋屈服后刮出破坏，与文献[35]的试验现象一致，其加载现象和最终形态与钢筋屈服前刮出试件基本相同。



(a) 刮出破坏



(b) 劈裂破坏

图 5 破坏形态

Fig. 5 Failure modes

劈裂破坏:当混凝土强度等级为 C40,且煤矸石取代率高(50%、70%、100%)时,试件发生钢筋屈服前劈裂破坏。劈裂破坏时伴随明显的爆裂声,裂缝沿钢筋纵肋径向扩展并形成贯通裂缝,试件最终劈裂成两瓣。GC55-30-16 试件受煤矸石骨料的影响强度降低,发生钢筋屈服后劈裂破坏。

2.2 结果计算

由于钢筋与混凝土间的黏结应力沿黏结长度呈非均匀分布,故采用平均黏结强度进行计算。

$$\tau_u = \frac{F_u}{\pi d l_a} \tag{1}$$

式中:τ_u为平均黏结强度,MPa;F_u为极限拉拔荷载,N;d 和 l_a分别为钢筋的直径和黏结长度,mm。

由图 2(b)可知,试件加载端滑移值 S_l应扣除钢筋 ab 段的变形量,即

$$S_l = S_{l1} - \frac{FL_{ab}}{E_s A_s} \tag{2}$$

式中:S_{l1}为含钢筋变形量的加载端滑移值,mm;F 为拉拔荷载,N;L_{ab}为夹具上方到钢筋黏结段之间的距离,mm;E_s为钢筋弹性模量,MPa;A_s为钢筋截面面积,mm^2。

表 6 汇总了钢筋与煤矸石混凝土黏结性能试验结果,包括试件的极限拉拔荷载、极限黏结强度(τ_u)及其对应的自由端滑移值(s_u)。

2.3 钢筋屈服后破坏机理分析

钢筋屈服后刮出破坏见图 6(a),试件 GC55-0-16 与钢筋 16-1 取自同一根钢筋,以确保力学性能一致。由图 6(a)可以看出,在加载初期钢筋就已经屈服,此时试件的黏结应力基本保持不变,加载端的滑移值显著增大。随着荷载继续增大,加载端的钢筋进入强化阶段,导致试件的黏结应力继续增大。最终,随着肋间混凝土的破坏,钢筋被逐渐拔出,试件的黏结应力开始下降。

表 6 试件黏结性能试验结果

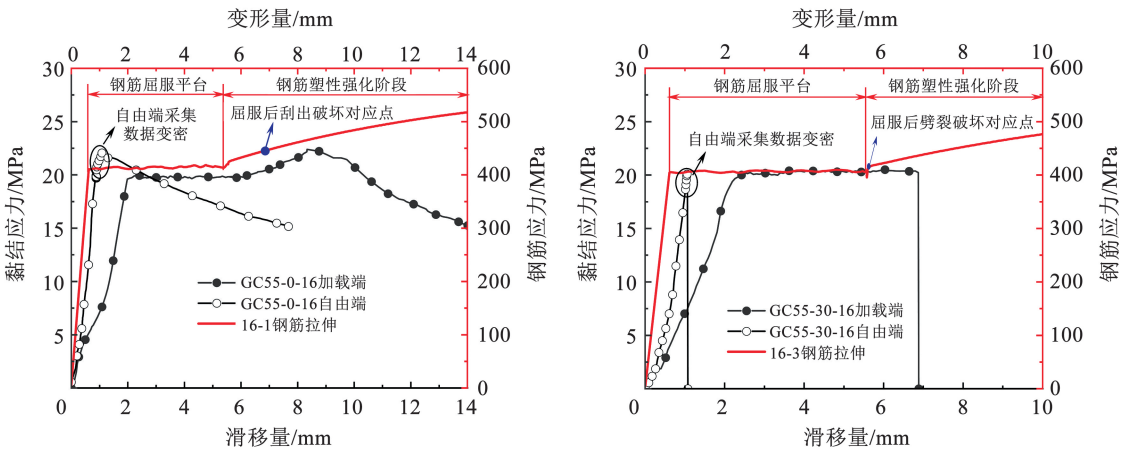
Tab. 6 Test results of bond property of specimens

试件编号	F_u/kN	τ_u/MPa	s_u/mm	破坏形态
GC30-0-16	58.47	14.54	0.84	屈服前刮出
GC30-30-16	46.89	11.66	1.26	屈服前刮出
GC40-0-16	68.01	16.91	0.84	屈服前刮出
GC40-30-16	59.80	14.87	0.69	屈服前刮出
GC40-50-16	45.76	11.38	0.90	屈服前劈裂
GC40-70-16	39.25	9.76	0.30	屈服前劈裂
GC40-100-16	32.89	8.18	0.19	屈服前劈裂
GC40-0-25	155.60	15.83	0.85	屈服前刮出
GC40-30-25	123.90	12.62	1.19	屈服前刮出
GC40-50-25	96.41	9.82	1.42	屈服前劈裂
GC55-0-16	89.03	22.14*	6.36	屈服后刮出
GC55-30-16	82.92	20.62*	1.06	屈服后劈裂

注:由于部分试件发生了钢筋屈服后的劈裂或刮出破坏,泊松效应导致有效黏结长度减小,导致这些试件的平均黏结强度无法通过式(1)准确计算,已用 * 号标出。

钢筋屈服后劈裂破坏见图 6(b),试件 GC55-30-16 与钢筋 16-3 取自同一根钢筋,以确保力学性能一致。由图 6(b)可以看出,在钢筋屈服后,试件加载端的滑移值持续增大,而自由端的滑移值和黏结应力几乎保持不变。随着煤矸石混凝土发生劈裂破坏,试件的黏结应力迅速下降至 0。与 GC55-0-16 试件相比,GC55-30-16 试件未出现黏结应力二次上升阶段。这主要归因于较弱的煤矸石骨料难以阻碍混凝土中裂缝的扩展,在加载端钢筋进入强化阶段前,试件就因煤矸石混凝土的过早开裂而导致界面黏结失效。

钢筋屈服后破坏的黏结机理见图 7。当黏结强度较高时,钢筋随荷载的增加达到屈服平台,由于泊松效应,塑性变形后的钢筋同时向黏结段与加载端扩展,造成有效黏结长度减小,钢筋加载端的实际滑移值大于钢筋的伸长量。随着荷载继续增加,钢筋由于颈缩而被拉出或拉断,试件发生钢筋屈服后刮出或劈裂破坏。



(a) 钢筋屈服后刮出　　(b) 钢筋屈服后劈裂

图 6　GC55-16 试件试验结果

Fig. 6　Test results of GC55-16 specimens

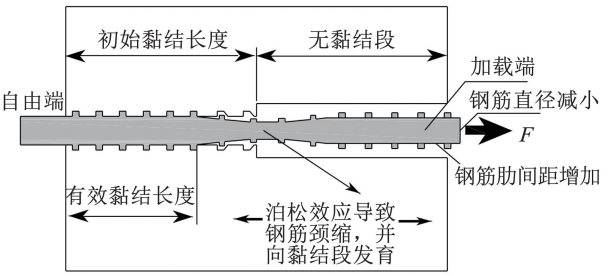


图 7　钢筋屈服后试件的黏结机理

Fig. 7　Bonding mechanism of specimens after rebar yielding

2.4　黏结应力–自由端滑移曲线

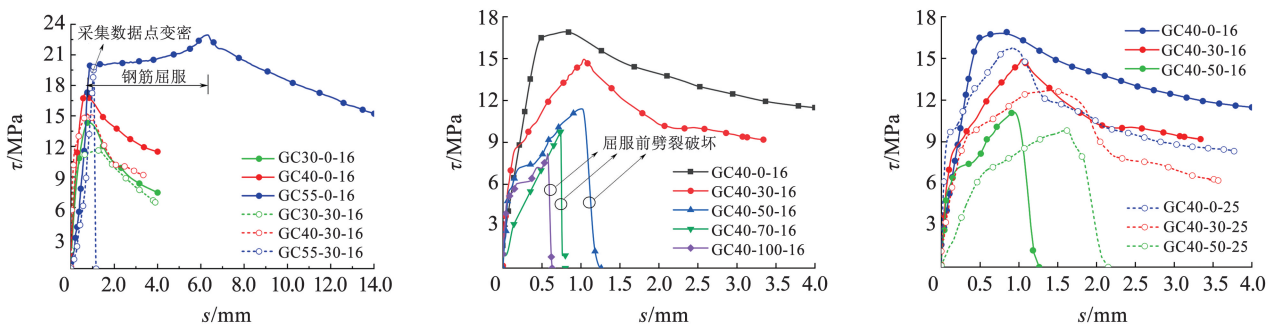
根据图 3 单一变量对照分组，针对 3 种变量（混凝土强度等级、煤矸石取代率、钢筋直径）分别绘制了试件的黏结应力（τ）–自由端滑移（s）曲线，见图 8。

2.4.1　混凝土强度等级对黏结性能的影响

图 8（a）为混凝土强度等级对黏结滑移曲线的影响，可以看到当混凝土强度等级由 C30 提高至 C40 时，取代率为 0% 和 30% 的试件的黏结强度分别提升了 16.30% 和 27.53%，表明混凝土强度等级的提高显著增强了钢筋与混凝土间的黏结性能，且这种增强效应在煤矸石混凝土中更为显著。这主要归因于混凝土的抗压强度和抗拉强度随其强度等级的提高而显著增大，改善了带肋钢筋和混凝土间的机械咬合作用[36]，进而延缓了煤矸石混凝土的开裂。当混凝土强度等级进一步提高至 C55 时，试件的破坏模式从钢筋屈服前破坏转变为钢筋屈服后破坏，且 τ-s 曲线的初始刚度显著降低，这是由于泊松效应导致试件的黏结应力被低估。此时，虽然式（1）低估了 C55 试件的黏结强度，但与 C40 试件相比仍有增长趋势。

2.4.2　煤矸石取代率对黏结性能的影响

图 8（b）为不同煤矸石取代率下的黏结滑移曲线。与取代率为 0% 的试件相比，取代率为 30%、50%、70% 和 100% 的试件的黏结强度分别降低了 12.06%、32.70%、42.28%、51.63%。普通混凝土和低掺量煤矸石混凝土（30%）试件发生刮出破坏，而高掺量煤矸石混凝土（50%、70%、100%）试件发生劈裂破坏。这主要归因于煤矸石相较于天然碎石的材料缺陷——低密度、高吸水率及疏松多孔的内部结构，导致煤矸石混凝土的力学性能较差，从而加剧了黏结性能退化并诱发劈裂破坏。



(a) 混凝土强度等级的影响　　(b) 煤矸石取代率的影响　　(c) 钢筋直径的影响

图 8　试件的黏结应力 – 自由端滑移曲线

Fig. 8　Bond stress-free end slip curves of specimens

2.4.3 钢筋直径对黏结性能的影响

如图 8(c)所示,随着钢筋直径从 16 mm 增加至 25 mm,煤矸石取代率为 0%、30% 和 50% 的试件的黏结强度分别下降 6.39%、15.13% 和 13.71%,表明钢筋直径的增大显著增强了钢筋与混凝土间的黏结性能,且这种增强效应在煤矸石混凝土中更为显著。这是因为带肋钢筋的相对肋面积随其直径的增大而减小,削弱了钢筋和混凝土间的机械咬合作用[37]。对于煤矸石混凝土,由于骨料强度低且界面过渡区性能差,钢筋直径增大对黏结强度的负面强度影响更显著。

3 平均黏结强度预测模型

目前,研究人员已对钢筋与混凝土黏结强度的预测模型进行了大量的研究,考虑的影响参数主要包括混凝土强度、黏结长度和保护层厚度。GB/T 50010—2010《混凝土结构设计规范》[38]采用混凝土抗拉强度来表征黏结强度。

$$\tau_u = 3f_{tu} \tag{3}$$

其他模型大多采用混凝土圆柱体抗压强度(f'_c)来表征黏结强度,主要包括:

Orangun 等[39]的模型,

$$\tau_u = 0.083\,045\sqrt{f'_c}\left(1.2 + 3\frac{c}{d} + 50\frac{d}{l_a}\right) \tag{4}$$

Darwin 等[40]的模型,

$$\tau_u = 0.083\,045\sqrt{f'_c}\left[2.12\left(\frac{c}{d}+0.5\right)\left(0.92+0.08\frac{C_{max}}{C_{min}}\right)+75\frac{d}{l_a}\right] \tag{5}$$

式中:C_{max} = max[min(C_x, $C_s/2$), C_y];C_{min} = min(C_x, C_y, $C_s/2$);C_x 和 C_y 为不同方向的保护层厚度;C_s 为钢筋间距。

Hadi[41]的模型,

$$\tau_u = 0.083\,045\sqrt{f'_c}\left(22.8 - 0.208\frac{c}{d} - 38.212\frac{d}{l_a}\right) \tag{6}$$

规范 AS 3600[42]的模型,

$$\tau_u = 0.265\sqrt{f'_c}\left(\frac{c}{d}+0.5\right) \tag{7}$$

规范 CEB-FIP[43]的模型,

$$\tau_u = \begin{cases} 2.5\sqrt{f'_c} & \text{拔出破坏} \\ \eta_2 6.5\left(\dfrac{f'_c}{25}\right)^{0.25}\left(\dfrac{25}{d}\right)^{0.2}\left[\left(\dfrac{C_{min}}{d}\right)^{0.33}\left(\dfrac{C_{max}}{C_{min}}\right)^{0.1}+k_m K_{tr}\right] & \text{劈裂破坏} \end{cases} \tag{8}$$

式中:η_2 为位置系数,在黏结良好的情况下取 1.0,其他情况下取 0.7;k_m 和 K_{tr} 分别是横向钢筋的约束系数和密度。对于无箍筋试件,K_{tr} 取 0。

图 9 为上述模型预测的黏结强度($\tau_{u\text{-}predict}$)与本文试验测得的黏结强度($\tau_{u\text{-}test}$)之间的对比,可以看出:Hadi[41]和 AS 3600[42]的模型预测结果较为保守;Orangun 等[39]和 Darwin 等[40]的模型高估了煤矸石取代率较高的试件的黏结强度,低估了取代率较低的试件的黏结强度。相比之下,CEB-FIP[43]关于拔出破坏模式的模型预测结果较好,相对误差在 ±15% 之内。然而,CEB-FIP[43]关于劈裂破坏模式的模型低估了钢筋煤矸石混凝土试件的黏结强度。因此,本文基于试验数据对其进行了修正,使其适用于煤矸石混凝土。

$$\Phi = \frac{\tau_u}{\eta_2\left(\dfrac{f'_c}{25}\right)^{0.25}\left(\dfrac{25}{d}\right)^{0.2}\left(\dfrac{C_{min}}{d}\right)^{0.33}\left(\dfrac{C_{max}}{C_{min}}\right)^{0.1}} \tag{9}$$

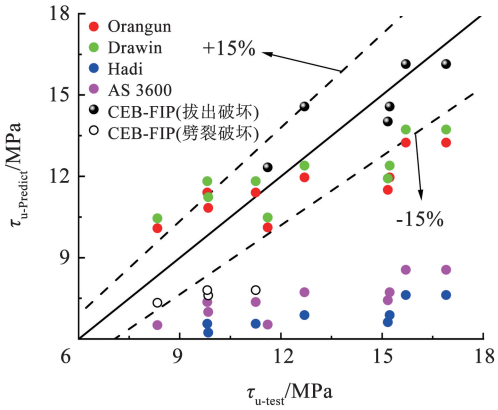
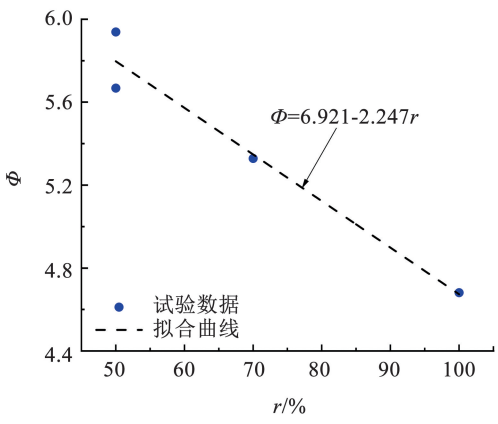


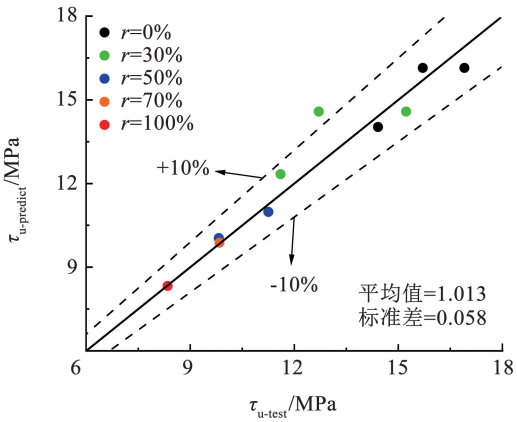
图 9 现有黏结强度模型与试验结果的对比

Fig. 9 Comparison of existing bond strength models with test results

如图 10(a)所示,式(8)中劈裂破坏模型的常数项随煤矸石取代率的增加而线性下降,这是因为煤矸石自身的强度较低,难以阻碍混凝土中裂缝的扩展,导致钢筋混凝土试件较早地发生劈裂破坏,从而造成黏结强度的损失。



(a) 数据拟合



(b) 模型验证

图 10　黏结强度预测模型的提出和验证

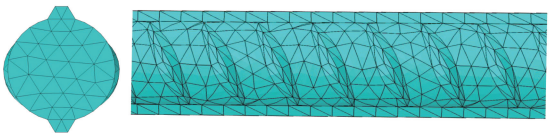
Fig. 10　Proposition and verification of bond strength prediction model

修正后模型的预测结果和本文试验结果的对比如图 10(b)所示，可以看到，$\tau_{u\text{-}predict}/\tau_{u\text{-}test}$ 的平均值和标准差分别为 1.013 和0.058，说明修正后的模型可以合理地预测钢筋煤矸石混凝土试件的黏结强度。

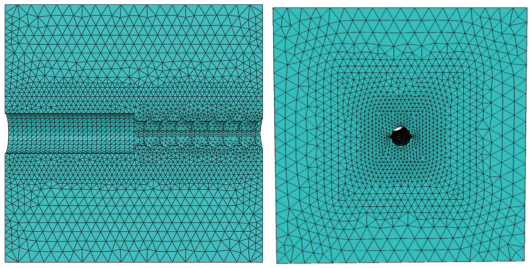
4　有限元分析

4.1　网格划分与边界条件

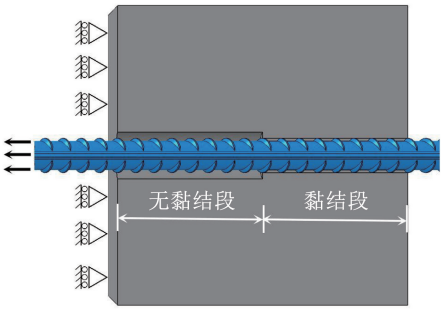
为研究带肋钢筋与煤矸石混凝土之间的非线性黏结行为，建立了三维细观有限元模型，模型尺寸与前文中心拔出试件的尺寸相同。为了简化模型，在模拟中没有对 PVC 管进行建模。钢筋几何参数参照 GB/T 1499.2—2018《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》[44]。以公称直径为 16 mm 的钢筋为例，其内径为 15.4 mm，横肋和纵肋高度分别为 1.4 和 1.9 mm，横肋和纵肋顶部宽度分别为 0.9 和 1.8 mm，横肋间距为 10 mm，肋末端最大间隙为 4.7 mm。钢筋采用 C3D10M 单元进行离散，网格尺寸为 3 mm，单元总数约 4.2 万(图 11(a))。混凝土采用 C3D4 单元进行离散，钢－混凝土接触面上的网格尺寸为 3 mm，外侧尺寸为 8 mm 且沿钢筋径向渐变，单元总数约为 31 万(图 11(b))。



(a) 月牙肋钢筋的网格划分



(b) 混凝土的网格划分



(c) 边界条件

图 11　有限元模型的网格划分与边界条件

Fig. 11　Mesh division and boundary condition of the FE model

4.2　材料属性

在钢筋混凝土黏结性能的数值模拟中，破坏机制主要由混凝土材料控制[45]。本研究采用 ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型(CDP)[46]来模拟煤矸石混凝土的非线性力学行为，该模型能够准确表征混凝土的受压压碎和受拉开裂行为，已广泛应用于钢筋混凝土的黏结破坏模拟[47－48]。煤矸石混凝土的强度和弹性模量采用试验值，泊松比设为 0.2[49]。塑性参数根据文献[50]的推荐值确定，具体包括：膨胀角为 30°，流动势偏心为 0.1，初始等效双轴受压屈服应力与初始单轴受压屈服应力的比值为 1.16，屈服面受拉子午线第二应力不变量与受压子午线第二应力不变量的比值为 0.667，黏滞系数为 0.000 5。采用钢材的双折线模型[38]定义钢筋的本构关系，其中钢材的强度和弹性模量采用试验值，泊松比设为 0.3[49]。

图 12 为混凝土的应力 – 应变关系,具体公式如下:

$$\begin{cases}\sigma_c=(1-d_c)D_0^{el}:(\varepsilon_c-\varepsilon_c^{pl})\\ \sigma_t=(1-d_c)D_0^{el}:(\varepsilon_t-\varepsilon_t^{pl})\end{cases} \tag{10}$$

$$\varepsilon_{0c}^{el}=\frac{\sigma_c}{E_c},\ \varepsilon_{0t}^{el}=\frac{\sigma_t}{E_c} \tag{11}$$

$$\varepsilon_c^{in}=\varepsilon_c-\varepsilon_{0c}^{el},\ \varepsilon_t^{in}=\varepsilon_t-\varepsilon_{0t}^{el} \tag{12}$$

$$\varepsilon_c^{pl}=\varepsilon_c^{in}-\frac{d_c}{1-d_c}\varepsilon_{0c}^{el},\ \varepsilon_t^{pl}=\varepsilon_t^{in}-\frac{d_t}{1-d_t}\varepsilon_{0t}^{el} \tag{13}$$

$$d_c=1-\frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}},\ d_t=1-\frac{\sigma_t}{\sigma_{tu}} \tag{14}$$

式中:σ_c 和 σ_t 分别为压应力和拉应力,MPa;D_0^{el} 为初始刚度;ε_c 和 ε_t 分别为压应变和拉应变;ε_c^{in} 和 ε_t^{in} 分别为压缩非弹性应变和拉伸非弹性应变;ε_c^{pl} 和 ε_t^{pl} 分别为压缩塑性应变和拉伸塑性应变;ε_c^{el} 和 ε_t^{el} 分别为压缩弹性应变和拉伸弹性应变;σ_{cu} 和 σ_{tu} 分别为混凝土在单轴荷载下的抗压强度和抗拉强度,MPa;d_c 和 d_t 分别为压缩损伤因子和拉伸损伤因子。

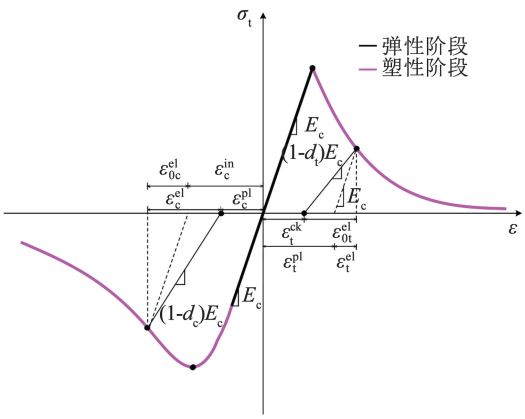


图 12 混凝土单轴应力 – 应变曲线

Fig. 12 Uniaxial stress-strain curves of concrete

4.3 相互作用

如图 13 所示,采用“面 – 面”接触模型模拟带肋钢筋和煤矸石混凝土的界面相互作用。接触面法向采用“硬”接触,以限制主从表面的穿透并阻止拉应力传递;切向采用“罚函数”模拟摩擦行为,摩擦系数 μ 取 0.3[51-52]。

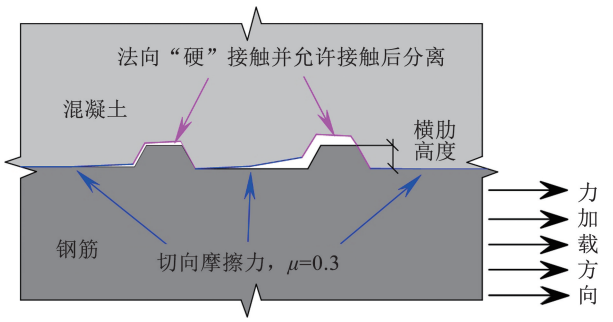


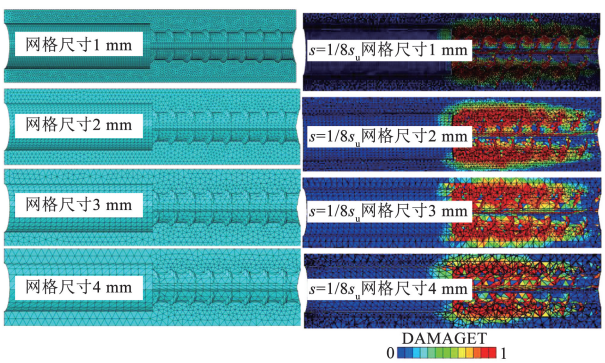
图 13 带肋钢筋和混凝土间的相互作用

Fig. 13 Interaction between ribbed steel bar and concrete

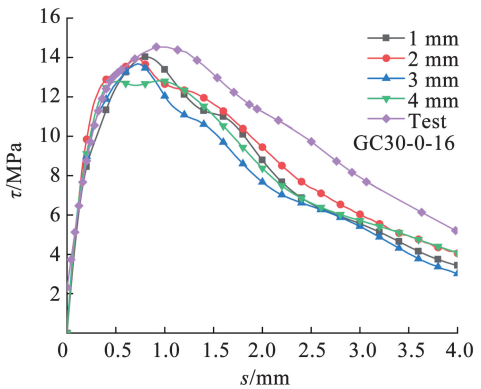
4.4 数值方法验证与结果分析

4.4.1 黏结界面网格尺寸敏感性分析

以 C30-0-16 试件为例,研究了 4 种网格尺寸(1、2、3 和 4 mm)对计算结果的敏感性。图 14 为不同网格尺寸下的破坏模式和黏结滑移曲线。图 14(a)结果表明,4 种网格尺寸均能有效反映界面混凝土的损伤模式。图 14(b)显示,4 mm 网格的计算结果略低于其他尺寸,而 1 至 3 mm 网格的黏结滑移曲线在峰值前几乎重合,表明网格尺寸小于 3 mm 时,计算结果对网格尺寸的依赖性已不显著。1、2、3、4 mm网格有限元模型所需计算时间依次为 70、30、11、4 h。综合考虑计算精度和计算效率,将界面网格尺寸设置为 3 mm。



(a) 网格尺寸对破坏模式的影响



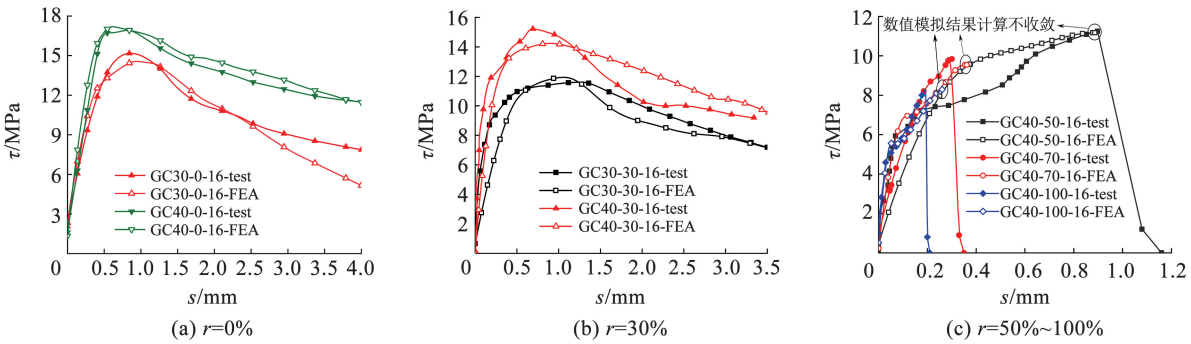
(b) 网格尺寸对τ–s曲线的影响

图 14 界面网格尺寸敏感性分析

Fig. 14 Sensitivity analysis of interface mesh size

4.4.2　数值模拟结果

数值模拟结果与试验结果的一致性验证了模型的合理性和有效性。图 15 是边长为 160 mm 试件的试验与模拟 τ–s 曲线对比，可以看出，模拟曲线的上升段、峰值黏结强度以及相应滑移与试验结果基本一致，但下降段存在差异，这主要源于试验结果的离散性及混凝土应变软化行为模拟的复杂性。如图 16所示，数值模拟所得的黏结强度与试验测量的黏结强度的比值（$\tau_{u\text{-}FEA}/\tau_{u\text{-}test}$）的平均值和标准差分别为 0.992 和 0.092，误差在 ±8% 范围内，验证了数值模拟的准确性。



(a) r=0%　(b) r=30%　(c) r=50%~100%

图 15　τ–s 曲线的对比

Fig. 15　Comparison of τ–s curves

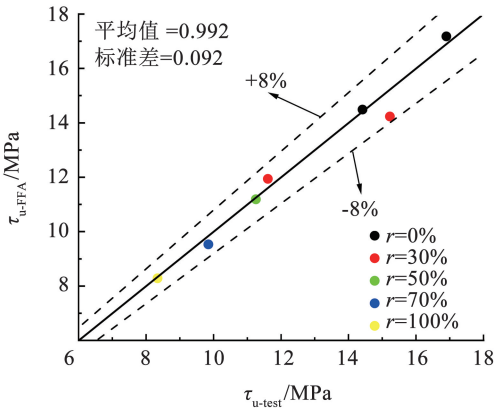


图 16　黏结强度的对比

Fig. 16　Comparison of bond strength

图 17 展示了 GC40-50-16 试件中钢筋应力沿全长的分布，应力从加载端向自由端逐渐减小，且在黏结长度处的肋部应力显著高于其他位置，表明钢筋肋纹对黏结强度的提升具有重要作用。图 18 为 GC40-50-16 试件中煤矸石混凝土在不同滑移值（s = 1/4、2/4、3/4、1 和 5/4s_u）下的损伤演化过程，可以看出，当滑移值相对较小（s < 1/8s_u）时，煤矸石混凝土在肋顶部出现多条平行的斜裂缝，裂缝与钢筋长度方向的夹角约为 45° ~ 70°（图 19）。随着滑移量的增加，混凝土的损伤区域从加载端逐渐扩展到自由端，且范围持续增大（图 18（a））。如图 18（b）所示：当滑移量 s = 1/4s_u 时，肋间混凝土首先发生破坏；随着滑移量的增大，损伤区域沿钢筋径向扩展到混凝土内部，并在滑移量 s = 5/4s_u 时延伸至混凝土外表面，形成宏观劈裂裂缝。如图 18（c）所示，肋间混凝土的变形随着滑移量的增大而加剧，反映其剪切破坏的发展过程。

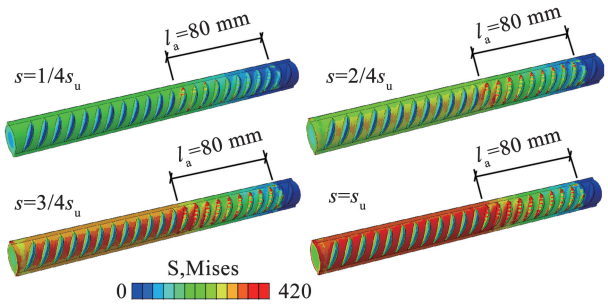
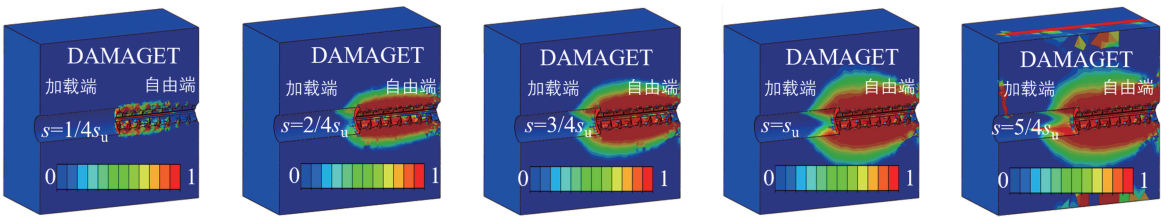
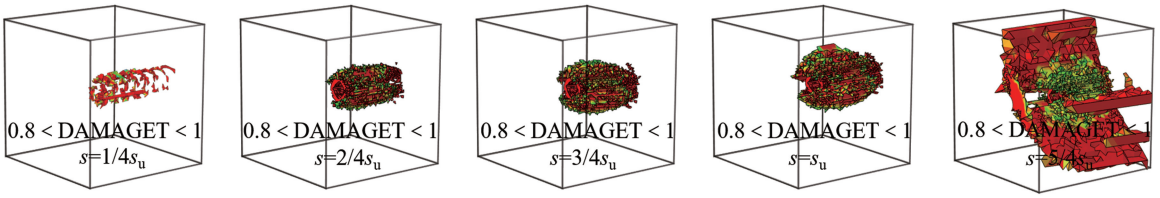


图 17　钢筋应力分布

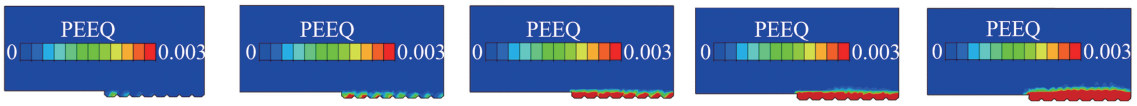
Fig. 17　Stress distribution of steel bars



(a) 混凝土截面



(b) 混凝土内部损伤(0.8<DAMAGET<1)



(c) 肋间混凝土等效塑性应变

图 18 GC40-50-16 试件的损伤演化

Fig. 18 Damage evolution of the GC40-50-16 specimen

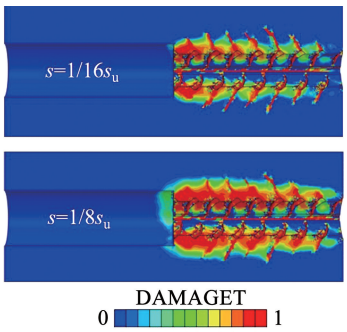
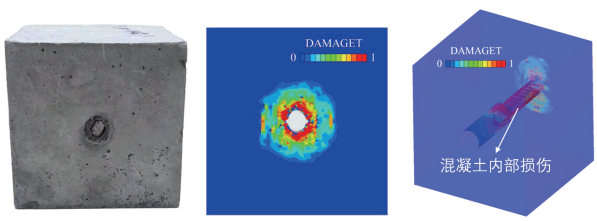


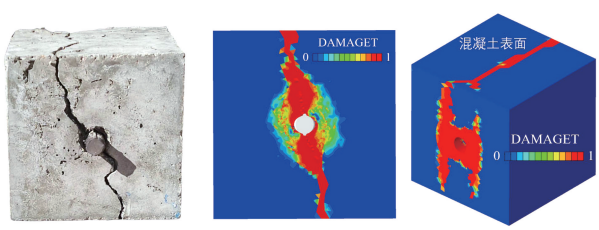
图 19 混凝土肋顶处的裂缝

Fig. 19 Cracks at the top of ribs in concrete

图 20 展示了模拟与试验结果在混凝土破坏模式上的对比。由图 20(a)可见,有限元模型外表面未出现明显裂缝,而与钢筋表面接触的混凝土出现了损伤积累,与试验中试件发生刮出破坏模式一致。由图 20(b)可以看到,有限元模型外表面损伤区域沿纵肋向外扩展,表明纵肋对裂缝发展具有诱导作用,与试验中试件发生劈裂破坏吻合较好。



(a) 刮出破坏(试件GC30-0-16)



(b) 劈裂破坏(试件GC40-100-16)

图 20 破坏模式对比

Fig. 20 Comparison of failure modes

5 结 论

本文对 36 个钢筋煤矸石混凝土试件进行了中心拔出试验,研究了混凝土强度等级、煤矸石取代率和钢筋直径对钢筋和煤矸石混凝土黏结性能的影响。在试验分析的基础上,提出了构件的黏结强度预测模型和细观有限元模型。

1)煤矸石的掺入削弱了钢筋和混凝土间的黏结性能。随着煤矸石取代率从 0% 增大到 100%,钢筋煤矸石混凝土试件的黏结强度降低了 12.06% ~ 51.63%。低取代率(r≤30%)试件主要表现为刮出破坏,而高取代率(r≥50%)试件因煤矸石骨料的低强度和界面过渡区性能劣化,更易发生劈裂破坏。

2)随着混凝土强度等级的提高,钢筋煤矸石混凝土试件的黏结强度显著增大。当强度等级达到 C55 时,试件的破坏模式从钢筋屈服前破坏转变为钢筋屈服后破坏。普通混凝土试件发生钢筋屈服后刮出破坏,而煤矸石混凝土试件因骨料脆性发生钢筋屈服后劈裂破坏。

3)黏结强度随钢筋直径的增大而降低,且煤矸石混凝土的下降幅度更大。钢筋直径从 16 mm 增至 25 mm 时,普通混凝土及煤矸石取代率为 30% 和 50% 的试件的黏结强度分别下降了 6.39%、15.13% 和 13.71%。钢筋直径增大导致相对肋面积减小,削弱了机械咬合力,同时煤矸石混凝土的界面过渡区性能较差,进一步加剧了黏结强度的降低。

4)由于煤矸石混凝土的脆性特性,现有的黏结强度预测模型不适用于钢筋煤矸石混凝土构件。本文基于试验数据修正了规范 CEB-FIP 中的劈裂破坏模型,使该预测模型适用于煤矸石混凝土,并通过与试验数据的对比验证了其准确性。

5)基于 ABAQUS 的细观有限元模型能够准确模拟钢筋与煤矸石混凝土的黏结滑移行为。模拟结

果的破坏模式和黏结滑移曲线与试验结果基本一致，$\tau_{u\text{-}FEA}/\tau_{u\text{-}test}$ 的平均值和标准差分别为 0.992 和 0.092，证明了有限元模拟的准确性和适用性。基于该模型，可以明确煤矸石混凝土和钢筋在拉拔荷载作用下的黏结破坏机理和开裂机制，弥补了宏观试验的不足。

参考文献

[1] CHEN Y M, ZHOU S X, ZHANG W S. Effect of coal gangue with different kaolin contents on compressive strength and pore size of blendecl cement paste [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2008, 23(1): 12. DOI: 10.1007/s11595-006-1012-2

[2] HAO H, WANG S, WANG R, et al. Utilization of raw coal gangue as coarse aggregates in pavement concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 378: 131062. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131062

[3] SUN J K, ZHOU C C, SHEN H X, et al. Green synthesis of ceramsite from industrial wastes and its application in selective adsorption: Performance and mechanism [J]. Environmental Research, 2022, 214(1): 113786. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113786

[4] 赵卫平，陈明亮，张国炜，等. 钢管煤矸石混凝土轴心受压承载能力[J]. 哈尔滨工业大学学报，2024，56(10)：24
ZHAO Weiping, CHEN Mingliang, ZHANG Guowei, et al. Axial compression bearing capacity of coal gangue concrete filled steel tubes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(10): 24. DOI: 10.11918/202307026

[5] 王稷良，马文辉，徐伟东，等. 煤矸石混凝土性能研究现状[J]. 中外公路，2024，44(4)：104
WANG Jiliang, MA Wenhui, XU Weidong, et al. Research on performance of coal gangue concrete[J]. Journal of Chian & Foreign Highway, 2024, 44(4): 104. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.04.013

[6] 赵卫平，冯钰玲，徐璐，等. 煤矸石混凝土梁柱节点抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报，2025，57(10)：30
ZHAO Weiping, FENG Yuling, XU Lu, et al. Experiment on seismic performance of coal gangue concrete beam-column joints[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(10): 30. DOI: 10.11918/202407067

[7] KAHMOUD K A, KRISHNA P K, SHEIK J M M, et al. Influence of coarse coal gangue aggregates on properties of structural concrete with nano silica[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 72(4): 2089. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.188

[8] 赵卫平，何宇翔，江孔亮，等. 煤矸石混凝土真三轴试验及破坏准则[J]. 煤炭学报，2025，50(8)：3884
ZHAO Weiping, HE Yuxiang, JIANG Kongliang, et al. True triaxial test and failure criterion of coal gangue concrete [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(8): 3884. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1009

[9] GAO S, ZHAO G H, GUO L H, et al. Utilization of coal gangue as coarse aggregates in structural concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121212. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121212

[10] WANG Q H, LI Z, ZHANG Y Z, et al. Influence of coarse coal gangue aggregates on elastic modulus and drying shrinkage behaviour of concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101748. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101748

[11] ZHANG T, WEN Q X, GAO S, et al. Comparative study on mechanical and environmental properties of coal gangue sand concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132646. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132646

[12] LI Y F, LIU S H, GUAN X M. Multitechnique investigation of concrete with coal gangue[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124114. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124114

[13] ZHENG Yuanxun, FAN Congcong, MA Junjie, et al. Review of research on Bond-Slip of reinforced concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2023, 385: 131437. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131437

[14] YUAN H, HAN B. Experimental study on bond behavior between high-strength grout and deformed steel bars[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124059. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124059

[15] ZHANG J, TAO X, LI X, et al. Analytical and experimental investigation of the bond behavior of confined high-strength recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125636. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125636

[16] ZHANG W, ZHANG Y, LI H, et al. Experimental investigation of fatigue bond behavior between deformed steel bar and concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 108: 103515. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103515

[17] LONG X, WANG C, ZHAO P, et al. Bond strength of steel reinforcement under different loading rates [J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117749. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117749

[18] LI J, DENG J, WANG Y, et al. Experimental study of notched steel beams strengthened with a CFRP plate subjected to overloading fatigue and wetting/drying cycles[J]. Composite Structures, 2019, 209: 634. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.11.020

[19] ZHANG B, ZHU H, CHEN J, et al. Evaluation of bond performance of corroded steel bars in concrete after high temperature exposure[J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109479. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109479

[20] LIN H, ZHAO Y, YANG J, et al. Effects of the corrosion of main bar and stirrups on the bond behavior of reinforcing steel bar[J]. Construction and Building Materials, 2019, 225: 13. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.156

[21] HAO W T, YANG H, CHEN J F, et al. A proposed model for nonlinear analysis of RC beam-column joints under seismic loading[J]. Engineering Structures, 2019, 180: 829. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.09.068

[22] 赵卫平，李雪菡，龙彬，等. 钢筋混凝土梁柱边节点滞回性能数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报，2024，56(2)：37
ZHAO Weiping, LI Xuehan, LONG Bin, et al. Numerical simulation of the hysteretic performance of exterior reinforced concrete beam-column joints [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(2): 37. DOI: 10.11918/202211015

[23] 王军，卢朝辉，张玄一，等. CRTSⅡ型轨道板/CA 砂浆界面内聚力模型研究[J]. 工程力学，2022，39(9)：72
WANG Jun, LU Zhaohui, ZHANG Xuanyi, et al. Research on cohesive zone model of the interface between CRTS Ⅱ track slab and CA mortar[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(9): 72. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.0336

[24] MURCIA-DELSO J, SHING P B. Bond-slip model for detailed

finite-element analysis of reinforced concrete structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(4): 04014125. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943 - 541X.0001070

[25] TUSHER H T, AHMED S K, SARKER I B S M. Bond behavior of deformed rebar in concrete containing recycled brick aggregate and waste rubber[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 92: 109729. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109729

[26] KIM S, YUN H, PARK W, et al. Bond strength prediction for deformed steel rebar embedded in recycled coarse aggregate concrete[J]. Materials & Design, 2015, 83: 257. DOI:10.1016/j.matdes.2015.06.008

[27] 王庆贺, 李喆, 周梅, 等. 自燃煤矸石骨料取代率对煤矸石混凝土梁受弯性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 64
WANG Qinghe, LI Zhe, ZHOU Mei, et al. Effects of spontaneous-combustion coal gangue aggregate (SCGA) replacement ratio on flexural behavior of SCGA concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(12): 64. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0172

[28] 通用硅酸盐水泥: GB 175—2023[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023
Common portland cement: GB 175—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023

[29] 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete: JGJ 52—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006

[30] ZHOU M, DOU Y, ZHANG Y, et al. Effects of the variety and content of coal gangue coarse aggregate on the mechanical properties of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 386. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.176

[31] 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011

[32] LOKESH G, NANTHA K P, AISHWARYA N, et al. Experimental study of the effect of water reducing admixtures on concrete[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 163: 2214. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.05.163

[33] 金属材料拉伸试验 第一部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021
Metallic materials-tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021

[34] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
Standard for test methods of concrete structures: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012

[35] 王毅红, 赵一迪, 牛行行, 等. 新型高强钢筋与混凝土粘结锚固性能试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(6): 507
WANG Yihong, ZHAO Yidi, NIU Hanghang, et al. Experimental study of bond-anchorage properties of a new type high-strength rebar with concrete[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(6): 507. DOI: 10.14188/j.1671 - 8844.2020 - 06 - 005

[36] WU K, CHEN F, CHEN C Y, et al. Load-transfer mechanism and bond-stress components in steel and steel fiber-reinforced concrete structure[J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(12): 04019160. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943 - 541X.0002441

[37] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋砼粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1994(3): 26
XU Youlin, SHEN Wendu, WANG Hong. Experimental study on bond anchorage performance of reinforced concrete[J]. Journal of Building Structures, 1994(3): 26. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.1994.03.004

[38] 混凝土结构设计规范: GB/T 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
Design code for concrete structure: GB/T 50010—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010

[39] ORANGUN C, JIRSA J, BREEN J. A reevaulation of test data on development length and splices[J]. ACI Journal Proceedings, 1977, 74(3): 114. DOI: 10.14359/10993

[40] DARWIN D, MCCABE S L, DUN E K, et al. Development length criteria: Bars not confined by transverse reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 1992, 89(6): 709. DOI: 10.14359/4158

[41] HADI M N. Bond of high strength concrete with high strength reinforcing steel[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2008, 2: 143. DOI: 10.2174/1874149500802010143

[42] AS 3600. Australian standard for concrete structures[S]. North Sydney: Standards Australia, 2009

[43] CEB-FIP. FIB model code for concrete structures 2010[S]. Lausanne: Fédération Internationale du Béton (fib), 2013

[44] 钢筋混凝土用钢 第 2 部分: 热轧带肋钢筋: GB/T 1499.2—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
Steel for the reinforcement of concrete. Part2: Hot rolled ribbed bars: GB/T 1499.2—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018

[45] WEATHERSBY J H. Investigation of bond slip between concrete and steel reinforcement under dynamic loading conditions[D]. Louisiana State University and Agriculture and Mechanical College, 2003

[46] HE Y, FAN W. Plastic-damage cap model with crack closure behavior for concrete modeling[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2022, 148(11): 04022067. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943 - 7889.0002161

[47] XU G, XIANG J, WANG Q, et al. Calculation of relative slip between steel bars and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 537. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.208

[48] MALENA M, SANGIRARDI M, FELICE D G. Steel reinforced grout under uniaxial load: Experimental evidences and numerical modelling[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116808. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116808

[49] ACI 318—19, Building code requirements for structural concrete and commentary[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019

[50] JIN L, LIU M, ZHANG R, et al. 3D meso-scale modelling of the interface behavior between ribbed steel bar and concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 239: 107291. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2020.107291

[51] GENIKOMSOU A S, POLAK M A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS[J]. Engineering Structures, 2015, 98: 38. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.016

[52] GUJEL D A, KAZMIERCZAK C S, MASUERO J R. Stress-strain curve of concretes with recycled concrete aggregates: Analysis of the NBR 8522 methodology[J]. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2017, 10(3): 547. DOI: 10.1590/s1983 - 41952017000300002

(编辑 吕雪梅)