

DOI:10.11918/202504082

刚柔协同空天防御体系建模与效能评估

何有宸, 谭贤四, 曲智国

(空军预警学院 防空预警装备系, 武汉 430014)

摘要:为解决现代空天防御体系中刚性结构要素与弹性能力要素割裂所导致的跨域协同效能不足、体系鲁棒性与适应性差的问题,提升复杂对抗环境下的综合效能和生存恢复能力,文中创新性地构建了基于刚柔耦合动力学的空天防御体系建模与效能评估框架。首先,突破传统线性叠加模型局限,提出四维动态刚度矩阵及其反馈重组机制,刻画战备状态与体系结构的双向动态耦合。其次,通过建立含非对称约束的马尔可夫状态转移模型,严格推导出体系稳态概率分布。然后,基于非线性系统稳定性理论,阐明空天防御体系从稳态运行到临界失效的状态相变机制,提出包含态势感知、阈值预警与参数优化的闭环管理体系。最后,通过严格数学推导证明刚弹耦合的动态调整机制能够确保空天防御体系综合效能提升。理论与想定验证表明,上述刚柔协同机制可显著增强体系结构自适应性,在确保体系稳定性相对裕度(10%)的前提下,有效提升综合效能、恢复战备水平、降低体系失效概率,辅助空天防御体系预警指挥决策,为智能化空天防御体系刚度塑形、弹性塑势的刚柔协同作战提供了新的理论框架。

关键词: 空天防御体系; 刚柔耦合动力学; 动态刚度矩阵; 失效相变预警; 稳定性裕度; 闭环参数优化

中图分类号: TP1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)04-0069-14

Modeling and effectiveness evaluation of a stiffness-elasticity synergistic aerospace defense system

HE Youchen, TAN Xiansi, QU Zhiguo

(Dept. of Air Defense Early Warning Technology, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430014, China)

Abstract: To address the challenges of insufficient cross-domain coordination effectiveness, poor robustness, and weak adaptability in modern air-space defense systems, caused by the fragmentation between rigid structural elements and elastic capability elements, thereby enhancing comprehensive effectiveness and survivability/recovery capabilities in complex adversarial environments, this paper innovatively constructs a stiffness-elasticity coupling dynamics based modeling and effectiveness evaluation framework for air-space defense systems. First, breaking through the limitations of traditional linear superposition models, we propose a four-dimensional dynamic stiffness matrix (4D DSM) and its feedback reorganization mechanism to characterize the bidirectional dynamic coupling between operational readiness and system architecture. Second, by establishing a Markov state transition model incorporating asymmetric constraints, the steady-state probability distribution of the system is rigorously derived. Then, based on nonlinear system stability theory, the state transition mechanism of the aerospace defense system from steady-state operation to critical failure is elucidated. A closed-loop management system comprising situational awareness, threshold-based early warning, and parameter optimization is proposed. Finally, rigorous mathematical derivation is employed to prove that the dynamic adjustment mechanism enabled by rigid-elastic coupling ensures an enhancement in the comprehensive effectiveness of the aerospace defense system. Theoretical analysis and scenario-based validation demonstrate that the proposed dynamic stiffness-elasticity adjustment mechanism significantly enhances the system's architectural adaptability. While ensuring a relative stability margin (10%) for the system, it effectively improves comprehensive effectiveness, restores operational readiness, and reduces system failure probability. This research supports early warning and command decision-making for aerospace defense systems, thereby proposing a new theoretical framework for synergistic stiffness-elasticity warfare in intelligent air-space defense systems, achieving stiffness shaping and elasticity modeling of dynamic potential.

Keywords: aerospace defense system; stiffness-elasticity coupling dynamics; dynamic stiffness matrix; failure phase transition warning; relative stability margin; closed-loop parameter optimization

收稿日期: 2025-04-29; 录用日期: 2025-06-30; 网络首发日期: 2025-11-24

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20251124.1547.005>

基金项目: 国家自然科学基金(62201092)

作者简介: 何有宸(1992—),男,博士研究生;谭贤四(1967—),男,教授,博士生导师

通信作者: 谭贤四,txs@163.com

空天防御体系作为国家安全的核心屏障,正面临着高动态、跨域化、智能化的新型威胁挑战^[1-6]。现代战争中,天基预警系统、空基拦截平台、海基作战群组,以及陆基指挥体系构成的立体化防御网络,亟需在复杂对抗环境下实现刚性与弹性的有机统一。传统防御体系建模方法多采用线性叠加原理^[7],将结构刚度与体系弹性割裂处理,难以刻画多域作战单元间动态耦合、非线性传导的协同效应。这种建模路径导致体系效能评估存在两大瓶颈:1)静态刚度分配模型无法适应战场态势的实时演化,资源调度滞后于攻防博弈节奏^[8];2)弹性恢复机制缺乏跨域协同的动态反馈,关键节点失效易引发级联崩溃^[9]。如何构建刚柔要素深度耦合的动力学模型,实现防御体系“结构抗毁”与“功能自愈”的协同增效,已成为智能化空天防御领域亟待突破的理论难题。

在体系架构设计层面,当前研究呈现出多维度突破态势。“作战云”架构通过资源虚拟化技术显著提升了传感器利用率^[10],但其中心化调度模式在节点失效时易引发系统性振荡风险。两层三模超网络分析方法虽能全面评估体系效能并识别关键节点^[11],却难以量化认知域决策扰动对杀伤链闭环概率的级联影响^[12]。值得注意的是,受马赛克战理论启发构建的弹性杀伤网^[13-14],以及基于证据推理的保障能力评估方法^[15],为空天防御体系的动态重构提供了新的理论视角,但其固定网络架构仍制约着体系效能的进一步提升^[16]。

效能评估领域的研究进展凸显出方法创新的迫切性。组合赋权双基点法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)方法通过 AHP-熵权综合优化策略解决了反导预警效能量化难题^[17],而 G1-CRITIC-TOPSIS 混合评估框架实现了防空预警效能的动态赋权^[18-19]。然而,这些方法多基于静态指标体系构建,对于预警指标阈值、资源再分配等动态边界条件缺乏显式关联分析^[20]。理论表明,正态云模糊推理技术虽能有效处理评估指标不确定性^[21],但现有模型仍难以建立预警指标阈值与资源投入的显式关联^[22],导致作战决策缺乏可靠量化依据。

协同作战体系建模与优化方面,王惠真等^[23]提出了赋权着色超图模型,用顶点表示作战要素、超边表示协同关系,通过权值与颜色描述要素的定量/定性属性。相较于传统图模型,该方法能更精准刻画跨域协同作战体系的异构交互与多层次依赖关系,为杀伤链生成与体系演化建模提供数学基础。亓子龙等^[24]设计的陆基防空武器与无人机协同作战样

式,利用无人机雷达的超视距探测能力,通过数据链共享目指信息,支持陆基武器实施“尽远拦截”。该架构突破了传统防空系统的探测-拦截链路分离局限,实现了跨平台协同的闭环杀伤链。李宗凌等^[25]设计改进的合同网协议(collaborative scheduling algorithm based on the improved contract network, CSA-ICNP)算法,结合模糊寻优与局部搜索策略,解决了多卫星节点任务调度中的资源约束与协同效率问题。其阶段式建模框架(任务预处理—统一化建模—优化求解)为复杂体系协同调度提供了标准化范式。李小波等^[26]针对网络化防空体系的多传感器与多武器协同问题,提出多武器拦截-多传感器跟踪联合规划模型,以拦截时机、次数为优化目标,生成武器-目标配对、拦截时段,以及传感器跟踪计划,并在舰艇编队与预警机协同防空场景中验证了模型有效性,为异构节点协同任务规划提供了技术支撑。张良等^[27]围绕预警机联合作战场景,提出基于体系协同度的打击能力评估方法,构建战斗机“无协同”与“有协同”两种模式下的目标毁伤率递归计算模型。通过仿真量化协同机制对毁伤率的提升效果,揭示了信息共享与指挥协同对联合作战效能的关键影响,为预警机为核心的空中体系设计提供理论依据。董晨等^[28]针对巡航导弹防御难题,构建多防空武器平台协同部署模型,提出的双染色体协同变异遗传算法优化部署策略,通过协同杀伤区建模与信息制导提升拦截效率,为区域防空提供动态火力-探测资源适配方案。

空天防御体系的智能化研究方面,张先超等^[29]提出基于智能体网络的体系架构设计方法,强调空天防御作战体系是动态适变与持续演进的综合智能体,需从兵力节点、兵力关系、适变机制 3 个维度实现智能化赋能。该方法通过有机融合各作战要素,提升体系的网络化与自适应能力,为顶层设计提供新思路。陆皖麟等^[30]针对未来空战智能分布、云协同的特点,提出基于智能处理控制单元的空基预警探测体系,通过单体智能探测与多平台智能协同,实现传感互联与群体协作。关键技术包括智能传感数据融合、动态任务分配算法,以及自主决策机制,显著提升对时敏目标的快速响应能力。

从已有研究可以看到,当前针对空天防御体系中的跨域协同研究,特别是涉及跨军兵种(陆、海、空、天等)深度融合的协同机制探索仍存在明显不足。现有成果(如文献[24]的陆空协同防空、文献[30]的空基预警体系)更多聚焦于单一军种内部或有限军种间的装备级协同,例如传感器-武器平台的数据链互通、探测-拦截功能衔接等,而对跨军

兵种在作战协同设计、联合指挥控制、多域信息融合等更高层次体系化协同等关键问题方面尚未形成系统性研究成果。特别是对于作战协同性方面的研究尤为不足,主要体现在现有研究多基于预设的固定协同场景和规则(如陆基防空与无人机协同),缺乏对跨军兵种动态协同范畴、智能化协同机制等顶层协同框架的建模与验证,导致跨军兵种空天防御作战耦合程度不深,智能化程度不足。值得注意的是,部分研究(如文献[23]的赋权着色超图模型)已开始尝试从数学层面描述跨域协同关系,但其应用仍局限于技术层面的资源调度,存在“以装备协同替代体系协同”的局限性,未能上升到军兵种协同的战略战役层建模,以真正实现全域能力有机整合。

更进一步地,当前体系建模与效能评估在定性定量方面也存在显著局限。在刚度表征层面,传统支撑网络模型多假设域间交互对称且时不变,忽略了空天作战中信息-火力-资源链路的非对称特性与动态重组需求;在弹性分析方面,基于泊松过程的马尔可夫链方法难以揭示体系状态相变的动力学机制,导致失效预警存在误判风险。更为关键的是,刚柔协同的内在机理尚未建立严格的数学表征框架,使得资源优化配置缺乏可量化的理论指导,导致现有的跨域资源协同调度主要建立在感性层面,受人为主观因素影响较大。这些缺陷均严重制约了空天防御体系在应对高超声速武器、智能蜂群等新型威胁时的快速响应能力与持续作战效能。

针对上述不足,本文突破传统线性分析框架,从刚柔耦合动力学视角重构空天防御体系建模理论。通过建立四维动态刚度矩阵及其反馈重组机制,实现了战备状态演化与体系结构塑形的双向耦合建模。具体而言,在刚度理论层面,创新性地提出具有非对称约束的动态关联矩阵,严格保证了各作战域自持优势与资源守恒的工程可行性;在弹性分析层面,构建含时变转移概率的马尔可夫状态空间模型,揭示了体系稳定域与失效相变的临界条件。值得强调的是,本文从非线性系统稳定性理论出发,严格证明了刚柔耦合机制对体系综合效能的提升作用,建立了包含态势感知、阈值预警与参数优化的闭环管理模型,为空天防御体系从“静态抗压”向“动态塑势”的范式转变提供了理论基石。

1 刚度弹性理论框架

多域协同防御体系的动态效能评估需建立在对域间相互作用机制的精准量化基础上。单纯通过指挥员直觉进行感性判断的模式已难以适配当前及今后空天防御作战的精准性、实时性、动态化需求。本

文融合工程力学刚度理论与随机过程分析方法,构建具有工程可解释性的四维协同模型。通过刚度关联矩阵表征域间支撑强度,结合马尔可夫状态转移描述体系弹性演化规律,形成“结构刚度-动态弹性”的双维度理论框架。

1.1 四域刚度关联矩阵

现代空天防御体系通过动态刚度网络化架构的构建,可显著提升多域作战单元的协同响应能力。本文基于跨域协同作战的关键要素,建立严格的数学框架:首先给出刚度矩阵的数学定义以量化不同作战域间的自支撑及相互支撑能力,继而给出其动态演化机制表征时变对抗环境中的参数自适应调整。该理论模型为后续系统稳定性分析与效能评估奠定了严格的数学基础。

1.1.1 刚度矩阵动态更新机制

设天基(S)、空基(A)、海基(M)、陆基(L)四域构成四维闭环空天防御体系,定义域间刚度关联矩阵 $\mathbf{K}^{(n)} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 如下:

$$\mathbf{K}^{(n)} = \begin{bmatrix} k_{SS}^{(n)} & k_{SA}^{(n)} & k_{SM}^{(n)} & k_{SL}^{(n)} \\ k_{AS}^{(n)} & k_{AA}^{(n)} & k_{AM}^{(n)} & k_{AL}^{(n)} \\ k_{MS}^{(n)} & k_{MA}^{(n)} & k_{MM}^{(n)} & k_{ML}^{(n)} \\ k_{LS}^{(n)} & k_{LA}^{(n)} & k_{LM}^{(n)} & k_{LL}^{(n)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:元素 $k_{ij}^{(n)}$ 为表征域 i 对域 j 的支撑刚度系数,上标 (n) 为第 n 次战术调整周期。当空天防御体系进入状态降级时(降级规则详见刚度矩阵约束条件),触发刚度矩阵重组规则(图1)为

$$k_{ji}^{(n)} = \frac{k_{ji}^{(n-1)} s_i(t)}{\sum_{m=1}^4 k_{jm}^{(n-1)} s_m(t)}, j, i = S, A, M, L \quad (2)$$

式中:缩放因子通过分子与分母的协同作用实现跨域资源再分配的非线性调控,分子项 $s_i(t)$ 直接反映域 i 的实时战备水平,越高的战备水平则表示资源效能发挥能力越强,体现了战备水平对资源获取的直接调控;分母项则通过各域战备状态的加权和实现资源总量守恒。当某域战备水平显著低于其他域时,分母的耦合效应将抑制其资源获取权重,形成自适应的脆弱性隔离机制。数值分析表明,该非线性关系可有效避免低战备域的资源虹吸效应,确保高战备域协同增效。

通过典型多域资源协同调度案例的对比分析,可直观阐释动态刚度系数的优化机理:假设某型防御装备需配置2个作战单元实施操作,当域A部署20单位装备且域B具备40个高战备状态作战单元时,域A向域B实施20单位装备的战术投送可实现装备-人力最优匹配;若域B战备水平下降至

20 个可用作战单元,同等投送规模将导致 10 单位装备处于闲置状态。此时系统通过实时态势感知,触发跨域动态调度机制,将冗余装备资源重新分配至其他作战域,从而达成全域作战效能最大化。该案例验证了基于战备状态评估的刚度支撑系数动态优化对体系作战效能提升的显著作用。

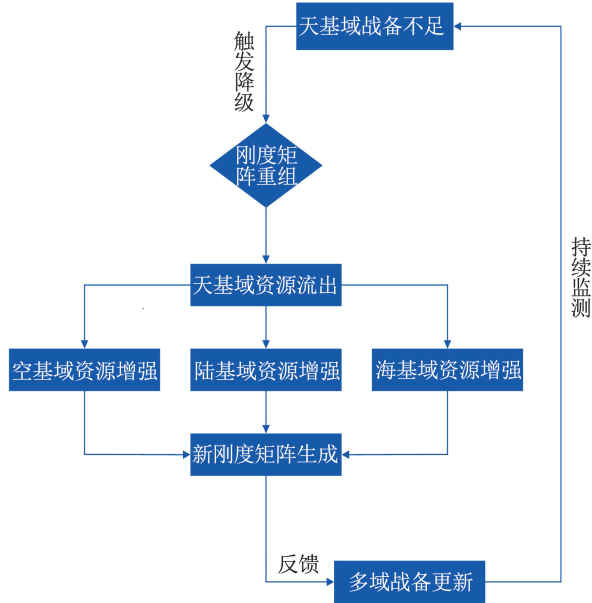


图 1 动态刚度矩阵重组机制(天基域为例)

Fig. 1 Reconfiguration mechanism of matrix: space-based domain case

1.1.2 刚度矩阵约束条件

为保障体系功能完整性,刚度元素需满足以下严格约束。

1) 归一化条件

每行元素和为 1, 确保资源分配守恒, 即

$$\sum_{i=1}^4 k_{ji}^{(n)} = 1, \forall j \quad (3)$$

通过式(3)严格保证了各域对外支援资源总量保持恒定,体现作战资源的有限性约束。当某域增强对特定域的支援时,必须相应减少对其他域的支援。

2) 非对称性条件

体现跨域支援机制的非对称性特性, 即

$$k_{ij}^{(n)} \neq k_{ji}^{(n)}, i \neq j \quad (4)$$

式(4)体现了实际作战中跨域支援的方向性差异。例如天基卫星可为空基平台提供全域态势感知 ($k_{SA}^{(n)}$ 较高), 但空基平台却难以反向支援天基卫星 ($k_{AS}^{(n)}$ 较低)。

3) 自持优势条件

域内支撑能力始终高于外部支援, 即

$$k_{ii}^{(n)} > \sum_{j \neq i} k_{ij}^{(n)}, \forall i \quad (5)$$

通过式(5)严格确保各域内部自持能力高于外部依赖程度, 避免因过度依赖外部支援导致自身体系脆弱性。该条件通过不等式(5)约束将域内资源投入下限严格约束为不低于 50%。进一步可以看出, 刚度矩阵的元素均具有明确的实际作战内涵。

1) 对角元素 $k_{ii}^{(n)}$

表征域内闭环支撑能力, 包括装备冗余度、自主决策等级等。例如 $k_{SS}^{(n)}$ 反映天基星座在部分卫星失效时的自主重构效率。

2) 非对角元素 $k_{ij}^{(n)}$

量化跨域协同效能, 涵盖信息共享、火力协同、资源调度等多维度指标。以 $k_{MA}^{(n)}$ 为例, 其数值由海基雷达对空基拦截器的目标指示精度、响应延迟等参数综合决定。

3) 行向量分布特性

第 i 行向量 $k_i^{(n)} = [k_{iS}^{(n)}, k_{iA}^{(n)}, k_{iM}^{(n)}, k_{iL}^{(n)}]$ 反映域 i 的支援策略偏好。例如空基平台的行向量若呈现 $k_{AA}^{(n)} > k_{AS}^{(n)} > k_{AM}^{(n)} > k_{AL}^{(n)}$, 则表明其优先保障自身作战能力, 其次支援天基系统。

1.1.3 刚度矩阵稳定性证明

命题 1 刚度矩阵严格对角占优性。

满足自持优势条件的刚度矩阵 $K^{(n)}$ 是严格对角占优矩阵, 其特征值实部均为正。

证明 根据 Gershgorin 圆定理, 矩阵 $K^{(n)}$ 的特征值 λ 满足:

$$|\lambda - k_{ii}^{(n)}| \leq \sum_{j \neq i} |k_{ij}^{(n)}| \quad (6)$$

代入自持优势条件可得

$$|\lambda - k_{ii}^{(n)}| \leq \sum_{j \neq i} k_{ij}^{(n)} < k_{ii}^{(n)} \quad (7)$$

这表明特征值 λ 位于复平面上以 $k_{ii}^{(n)}$ 为圆心、半径小于 $k_{ii}^{(n)}$ 的圆内, 故其实部满足:

$$\text{Re}(\lambda) \geq k_{ii}^{(n)} - \sum_{j \neq i} k_{ij}^{(n)} > 0 \quad (8)$$

由此证得刚度矩阵 $K^{(n)}$ 所有特征值实部均为正, 为后续动力学分析提供数学基础。

1.2 弹性状态演化建模

基于随机过程理论, 本文采用马尔可夫链建模方法对多域防御体系的动态弹性特征进行数学表征。重点构建状态转移概率与动态刚度矩阵元素之间的解析映射关系, 通过建立非齐次 Kolmogorov 前向方程并求解稳态概率方程, 定量揭示多域耦合动力学特性与参数自适应机制的相互作用机理。该建模框架为体系弹性刻画提供了严格的随机过程分析基础。

1.2.1 状态空间定义

基于多阶段弹性演化理论, 将空天防御体系运

行模态划分为3类典型状态。

1) 标准作战态(N)。所有防御域战备水平均高于预设阈值,体系综合效能维持在预设设计指标范围内,主要表现为所有防御域战备水平 $s_i(t) \geq 0.8$ 。

2) 功能性降级态(D)。存在至少一个防御域战备水平低于临界阈值但保持基本架构完整,体系效能呈现可控性衰减,主要表现为至少存在一个防御域 $0.5 < s_i(t) < 0.8$ 但未完全失效。

3) 系统性崩溃态(F)。关键防御域发生级联失效导致主要作战节点失能,体系失去基本作战功能,进入崩溃阶段,主要表现为存在至少一个防御域 $s_i(t) \leq 0.5$ 。

该状态空间划分构建了如图2所示的马尔可夫状态转移网络,通过量化各状态间的跃迁条件与演化路径,完整刻画了体系弹性边界的动态迁移规律。

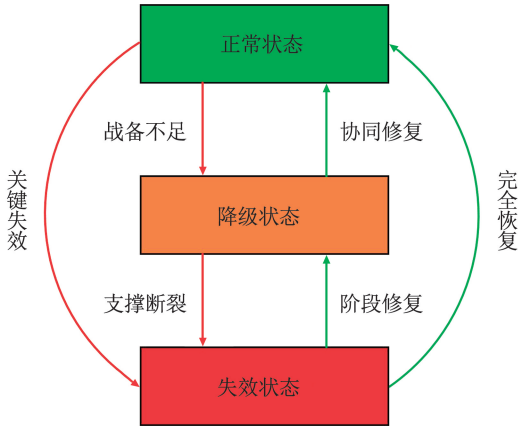


图2 空天防御体系状态转移过程示意

Fig. 2 State transition dynamics in air-space defense systems

1.2.2 状态转移概率建模

构建离散时间齐次马尔可夫链,其状态转移矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} p_{NN} & p_{ND} & p_{NF} \\ p_{DN} & p_{DD} & p_{DF} \\ p_{FN} & p_{FD} & p_{FF} \end{bmatrix} \quad (9)$$

各元素满足行归一化条件 $\sum_j p_{ij} = 1$ 。转移概率的具体形式由刚度矩阵与威胁环境共同决定。

1) 正常状态的转移概率

① 正常→正常(自环),即

$$p_{NN} = 1 - p_{ND} - p_{NF} \quad (10)$$

② 正常→降级,即

$$p_{ND} = \alpha \cdot (1 - \max_{i,j} k_{ij}^{(n)} \cdot s_j(t)) \quad (11)$$

③ 正常→失效,即

$$p_{NF} = \alpha \cdot (1 - \min_{i,j} k_{ij}^{(n)} \cdot s_j(t)) \quad (12)$$

式中 $\alpha \in [0, 1]$ 为威胁强度。

2) 降级状态的转移概率

① 降级→正常,即

$$p_{DN} = \beta \cdot \sum_{i \neq D} k_{iD}^{(n)} \quad (13)$$

式中: $\sum_{i \neq D} k_{iD}^{(n)}$ 为非降级域对降级域的总支撑刚度, β 为用以量化降级状态下的协同修复效率。

② 降级→降级(自环),即

$$p_{DD} = 1 - p_{DN} - p_{DF} \quad (14)$$

③ 降级→失效,即

$$p_{DF} = \gamma^{-1} \cdot (1 - \min_i k_{iD}^{(n)}) \quad (15)$$

式中 γ 为量化体系从降级中自我修复的能力,其倒数形式表明修复效率越低,同等支撑刚度下进入失效状态的概率越高。

3) 失效状态的转移概率

① 失效→正常,即

$$p_{FN} = \beta_1 \cdot \sum_{i \neq F} k_{iF}^{(n)} \quad (16)$$

② 失效→降级,即

$$p_{FD} = \beta_2 \cdot \sum_{i \neq F} k_{iF}^{(n)} \quad (17)$$

式中 $\beta_1 > \beta_2$, 部分恢复概率与总支撑刚度正相关,体现“分阶段修复”的策略。

③ 失效→失效(自环),即

$$p_{FF} = 1 - p_{FN} - p_{FD} \quad (18)$$

1.2.3 稳态概率解析解

设马尔可夫链稳态分布为 $\pi = [\pi_N, \pi_D, \pi_F]$, 通过平衡方程 $\pi P = \pi$ 可推导:

$$\begin{cases} \pi_N(1 - p_{NN}) = \pi_D p_{DN} + \pi_F p_{FN} \\ \pi_D(1 - p_{DD}) = \pi_N p_{ND} + \pi_F p_{FD} \\ \pi_F(1 - p_{FF}) = \pi_N p_{NF} + \pi_D p_{DF} \end{cases} \quad (19)$$

结合归一化条件 $\pi_N + \pi_D + \pi_F = 1$, 可解得

$$\begin{cases} \pi_N = \frac{p_{DN} p_{FN} + p_{FD} p_{FN}}{D} \\ \pi_D = \frac{p_{ND} p_{FN} + p_{FD} p_{ND}}{D} \\ \pi_F = \frac{p_{NF} p_{DF} + p_{DN} p_{NF}}{D} \end{cases} \quad (20)$$

其中

$$D = p_{DN} p_{FN} + p_{FD} p_{FN} + p_{ND} p_{FN} + p_{FD} p_{ND} + p_{NF} p_{DF} + p_{DN} p_{NF}$$

式中, 稳态概率的闭式解为体系弹性评估提供核心指标。

1.3 刚度-弹性耦合机理

刚度矩阵与弹性马尔可夫链通过以下途径实现耦合。

1.3.1 结构刚度影响状态转移

天基支撑强度 $\max(k_{ij}^{(n)})$ 直接决定降级概率 p_{ND} , 刚度矩阵的谱特性影响马尔可夫链收敛速度。

1.3.2 弹性状态反馈调节刚度

当体系进入降级状态时,触发刚度矩阵重组机制为

$$k_{ji}^{(n)} = \frac{k_{ji}^{(n-1)} s_j(t)}{\sum_{m=1}^4 k_{jm}^{(n)} s(t)} \quad (21)$$

实现资源向高战备域的动态倾斜。

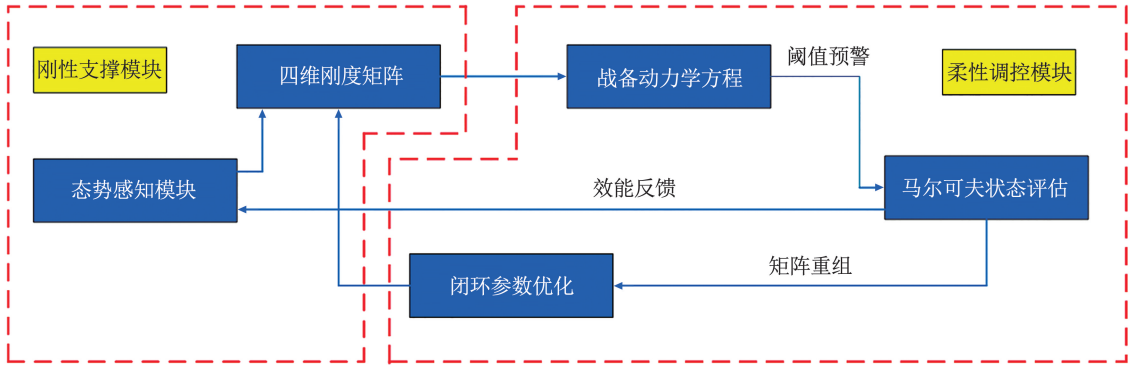


图 3 空天防御体系刚柔协同运行机制示意

Fig. 3 Rigid-flexible coordination operation mechanism in air-space defense systems

2.1 刚度-战备映射方程

2.1.1 动力学演化方程

各域战备水平服从非线性微分方程:

$$\frac{ds_i(t)}{dt} = -\lambda_i s_i(t) + \beta_i \sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} s_j(t), i = S, A, M, L \quad (22)$$

式中: $\lambda_i > 0$ 为域 i 固有损耗率,表征装备老化、能量耗尽等自然衰减; $\beta_i > 0$ 为域 i 协同修复系数,量化跨域支援对域 i 的恢复效率; 损耗项 $-\lambda_i s_i(t)$ 为战备水平呈指数衰减特性,符合经典装备可靠性理论; 修复项 $\beta_i \sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} s_j(t)$ 遵循“强节点优先修复弱节点”原则,支援效能与刚度系数 $k_{ji}^{(n)}$ 正相关。

2.1.2 稳态效能分析

令 $ds_i/dt = 0$, 得到平衡态方程:

$$s_i^* = \beta_i \cdot \left(\sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} s_j^* \right) / \lambda_i \quad (23)$$

该体系在特定刚度矩阵 \mathbf{K} 下达到稳态 s_i^* , 并且当该体系发生状态转移并更新 \mathbf{K} 后, 系统将向新刚度对应的稳态 s_i^{**} 演化, 形成全局分段稳态切换过程。

将式(23)写成矩阵形式:

$$(\mathbf{I} - \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{K}^T) \mathbf{s}^* = \mathbf{0} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_i)$ 为损耗率对角阵, $\mathbf{B} = \text{diag}(\beta_i)$ 为修复率对角阵。

根据 Perron-Frobenius 定理, 当满足谱半径条件:

$$\rho(\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{K}^T) < 1 \quad (25)$$

体系存在唯一正定稳态解 $\mathbf{s}^* > \mathbf{0}$ 。该条件等价于工程约束:

2 协同动力学建模

基于前文建立的刚度-弹性理论框架, 本文将构建空天防御体系的动力学演化模型, 揭示战备状态与结构刚度的动态耦合关系, 形成空天防御体系的刚柔协同运行机制(图 3)。

$$\beta_i < \lambda_i, \forall i \quad (26)$$

2.2 实时综合效能

定义实时综合效能为各域战备水平与刚度支撑的协同输出为

$$E(t) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 s_i(t) \cdot \left(\sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} s_j(t) \right) \quad (27)$$

式中: $s_i(t) \in [0, 1]$ 为域 i 在 t 时刻的战备水平; $k_{ji}^{(n)}$ 为刚度矩阵元素, 严格满足 $\sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} = 1$; 系数 $1/4$ 确保 $E(t) \in [0, 1]$, 实现效能归一化; $\sum_{i=1}^4 k_{ji} s_j(t)$ 为协同支撑效能, 表征域 i 获得的外部支援总强度。

3 稳定性与敏感性分析

3.1 多域协同稳定性分析

多域防御系统的稳定性是保障其战术效能的核心基础。本文基于刚度-战备映射方程的动力学模型, 严格证明系统稳态解存在性、唯一性, 以及收敛特性, 为后续参数优化提供理论支撑。

3.1.1 全局渐近稳定性定理

命题 2(多域战备稳定性) 若防御体系满足:

1) 刚度矩阵约束(定义 1)

行归一化为

$$\sum_{j=1}^n k_{ij}^{(n)} = 1 \quad (28)$$

自持优势为

$$k_{ii}^{(n)} > \sum_{j \neq i} k_{ij} \quad (29)$$

2) 动力学参数约束

动力学参数约束为:

$$\beta_i < \frac{\lambda_i}{\|\mathbf{K}\|_\infty} \quad (30)$$

$$\|\mathbf{K}\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |k_{ij}^{(n)}| = 1 \quad (31)$$

则存在唯一正定稳态解,即

$$s^* = (s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*)^T \quad (32)$$

且满足:

①全局渐近稳定:

$$\forall s(0) \in \mathbf{R}_+^n, \lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = s^* \quad (33)$$

②指数收敛性:

$$\|s(t) - s^*\| \leq Ce^{-\gamma t}, \gamma = \min_i (\lambda_i - \beta_i \|\mathbf{K}\|_1) \quad (34)$$

3.1.2 稳定性证明

步骤1 动力学方程重构。

由动力学方程式(24)可得矩阵形式:

$$\frac{ds}{dt} = (-\mathbf{A} + \mathbf{BK}^T)s \quad (35)$$

式中: $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ 为损耗系数对角阵, $\mathbf{B} = \text{diag}(\beta_1, \dots, \beta_n)$ 为修复增益对角阵。

步骤2 稳态解存在性证明。

通过稳态条件 $(\mathbf{A} - \mathbf{BK}^T)s^* = 0$, 可得

$$s^* = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{BK}^T s^* \quad (36)$$

定义矩阵 $\mathbf{M} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{BK}^T$, 稳态问题转化为 $s^* = \mathbf{M}s^*$ 。根据 Perron-Frobenius 定理, 矩阵谱半径满足:

$$\rho(\mathbf{M}) \leq \|\mathbf{M}\|_1 = \frac{\beta_i}{\lambda_i} \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n k_{ji} = \frac{\beta_i}{\lambda_i} \quad (37)$$

结合参数约束可得 $\|\mathbf{M}\|_1 < 1$, 从而有 $\rho(\mathbf{M}) < 1$, 证得稳态解存在且唯一。

步骤3 Lyapunov 稳定性分析。

构造 Lyapunov 函数, 即

$$V(s) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 (s_i - s_i^*)^2 \quad (38)$$

该函数满足:

$$\begin{cases} V(s^*) = 0 \\ V(s) > 0 \end{cases} \quad (39)$$

式中, $\forall s \neq s^*$ 。

对 V 求导并代入动力学方程可得

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^4 (s_i - s_i^*) \frac{ds_i}{dt} = \sum_{i=1}^4 (s_i - s_i^*) (-\lambda_i s_i + \beta_i \sum_j k_{ji}^{(n)} s_j) \quad (40)$$

利用稳态条件 $\lambda_i s_i^* = \beta_i \sum_j k_{ji} s_j^*$, 展开化简可得

$$\frac{dV}{dt} = - \sum_{i=1}^4 \lambda_i (s_i - s_i^*)^2 + \sum_{i=1}^4 \beta_i (s_i - s_i^*) \sum_j k_{ji} (s_j - s_j^*) \quad (41)$$

由 Cauchy-Schwarz 不等式可得

$$\left| \sum_{i=1}^4 \beta_i (s_i - s_i^*) \sum_j k_{ji} (s_j - s_j^*) \right| \leq \|\beta\|_2 \|\mathbf{K}\|_2 \|s - s^*\|^2 \quad (42)$$

当参数满足:

$$\|\beta\|_2 \|\mathbf{K}\|_2 < \lambda_{\min}, \lambda_{\min} = \min_i \lambda_i \quad (43)$$

可知

$$\frac{dV}{dt} \leq -(\lambda_{\min} - \|\beta\|_2 \|\mathbf{K}\|_2) \|s - s^*\|^2 < -\gamma V(s), \gamma > 0 \quad (44)$$

解上述微分不等式, 则可得

$$V(t) \leq V(0) e^{-\gamma t} \Rightarrow \|s(t) - s^*\| \leq \sqrt{2V(0)} e^{-\gamma t/2} \quad (45)$$

由此命题2得证。

3.2 参数敏感性分析

参数敏感性分析是优化多域防御体系设计的核心工具。本文通过严格的数学推导, 量化关键参数对系统效能的影响, 并揭示其实际含义与工程约束, 为后续动态调控提供理论依据。

3.2.1 自持刚度敏感性

1) 稳态方程展开

从稳态方程出发, 分离自持项与跨域项为

$$s_i^* = \frac{\beta_i}{\lambda_i} (k_{ii}^{(n)} s_i^* + \sum_{j \neq i} k_{ji}^{(n)} s_j^*) \quad (46)$$

2) 对自持刚度 k_{ii} 求偏导

对式(46)两边关于 $k_{ii}^{(n)}$ 求导, 应用链式法则, 可得

$$\frac{\partial s_i^*}{\partial k_{ii}^{(n)}} = \frac{\beta_i}{\lambda_i} \left(s_i^* + k_{ii}^{(n)} \frac{\partial s_i^*}{\partial k_{ii}^{(n)}} \right) + \frac{\beta_i}{\lambda_i} \sum_{j \neq i} k_{ji}^{(n)} \frac{\partial s_j^*}{\partial k_{ii}^{(n)}} \quad (47)$$

式中: 直接效应(第1项)中 $k_{ii}^{(n)}$ 增大直接提升域内自持能力, 间接效应(第2项)中跨域耦合项

$\sum_{j \neq i} k_{ji}^{(n)} \frac{\partial s_j^*}{\partial k_{ii}^{(n)}}$ 反映其他域的连锁反应。

3) 矩阵方程构建

将式(47)改写为线性方程组:

$$(I - \mathbf{M}) \frac{\partial s^*}{\partial k_{ii}^{(n)}} = \frac{\beta_i}{\lambda_i} s_i^* \mathbf{e}_i \quad (48)$$

其中

$$M_{ij} = \frac{\beta_i}{\lambda_i} k_{ji}^{(n)}$$

式中 \mathbf{e}_i 为第 i 个标准基向量。

4) 显式解与分析

利用 Neumann 级数展开矩阵逆为

$$\frac{\partial s^*}{\partial k_{ii}^{(n)}} = \sum_{k=0}^{\infty} M^k \frac{\beta_i}{\lambda_i} s_i^* \mathbf{e}_i \quad (49)$$

代入效能公式 $E^* = \frac{1}{4} \sum_{i,j} k_{ij}^{(n)} s_i^{(n)} s_j^{(n)}$, 可得

$$\frac{\partial E^*}{\partial k_{ii}^{(n)}} = \frac{\beta_i s_i^{*2}}{\lambda_i - \beta_i k_{ii}^{(n)}} \left(1 + \sum_{j \neq i} \frac{\beta_j k_{ji}^{(n)}}{\lambda_j} \right) \quad (50)$$

由上述推导可知动态调整机制存在: 1) 正向增益。 $k_{ii}^{(n)} \uparrow \Rightarrow s_i^* \uparrow$, 直接提升域内稳态战备水平; 2) 边际递减。分母项 $\lambda_i - \beta_i k_{ii}^{(n)}$ 限制增益上限, 当 $k_{ii}^{(n)} \rightarrow \lambda_i / \beta_i$ 时系统趋于失稳。

3.2.2 跨域刚度敏感性

1) 效能函数展开

效能函数 E^* 显式依赖交叉项 $k_{ij}^{(n)} s_i^* s_j^*$, 对其求导:

$$\frac{\partial E^*}{\partial k_{ij}^{(n)}} = \frac{1}{4} \left(s_i^* s_j^* + k_{ij}^{(n)} \frac{\partial (s_i^* s_j^*)}{\partial k_{ij}^{(n)}} \right) \quad (51)$$

2) 隐式导数求解

联立稳态方程 $s_j^* = \frac{\beta_j}{\lambda_j} \sum_m k_{mj}^{(n)} s_m^*$, 对 $k_{ij}^{(n)}$ 求导:

$$\frac{\partial s_j^*}{\partial k_{ij}^{(n)}} = \frac{\beta_j}{\lambda_j} \left(s_i^* + k_{ji}^{(n)} \frac{\partial s_i^*}{\partial k_{ij}^{(n)}} \right) \quad (52)$$

结合式(27)可得灵敏度公式为

$$\frac{\partial E^*}{\partial k_{ij}^{(n)}} = \frac{1}{4} \left(s_i^* s_j^* + \frac{\beta_j k_{ij}^{(n)} s_i^{*2}}{\lambda_j - \beta_j k_{ji}^{(n)}} \right) \quad (53)$$

由上述推导分析可得: 1) 最优支撑比, 当 $\frac{k_{ij}^{(n)}}{k_{ji}^{(n)}} =$

$\frac{\beta_j \lambda_i}{\beta_i \lambda_j}$ 时, 跨域协作效能最大化; 2) 失稳预警, 若 $k_{ij}^{(n)} >$

$\frac{\lambda_j k_{ji}^{(n)}}{\beta_j}$, 域 j 因过载失稳。

4 空天防御体系临界预警阈值分析

基于前文建立的系统稳定性分析框架, 本文深入探讨体系临近失效的临界条件, 建立具有预警决策价值的理论阈值判据。通过严格数学证明揭示系统从常态运行到突发失效的相变机理, 为构建主动防御体系提供理论支撑。

命题 3 临界刚度与失效相变定理。

设刚度矩阵满足行归一化 ($\sum_j k_{ij}^{(n)} = 1$) 与自持优势约束 ($k_{ii}^{(n)} > \sum_{j \neq i} k_{ij}^{(n)}$) 条件, 则存在临界刚度阈值 k_c , 当体系满足 $\min(k_{ii}^{(n)}) < k_c$ 时, 系统呈现以下特性:

1) 系统动力学失稳, 战备水平 $s_i(t)$ 呈现指数衰减至零的不可逆趋势;

2) 失效概率超指数增长, 稳态失效概率 π_F 表现出超越常规指数增长的临界特性。

临界刚度解析条件为

$$k_c = \inf \{ k \in \mathbf{R}^+ \mid \max_{\mu \in \sigma(\mathbf{M})} \text{Re}(\mu) = 0, \mathbf{M} = -\mathbf{A} + \beta \mathbf{K}^T \} \quad (54)$$

式中: $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$ 为战备损耗系数矩阵, $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{\text{diag}} + \mathbf{K}_{\text{off}}$ 为刚度矩阵分解形式, $\mathbf{K}_{\text{diag}} = \text{diag}(k_{11}^{(n)}, k_{22}^{(n)}, k_{33}^{(n)}, k_{44}^{(n)})$ 为自持刚度分量, $\sigma(\mathbf{M})$ 为矩阵 \mathbf{M} 的谱集 (特征值集合)。

证明

1) 系统失稳的动力学证明

步骤 1 稳定性分岔条件。

由 Lyapunov 稳定性理论, 系统稳定的充要条件是矩阵 $\mathbf{M} = -\mathbf{A} + \beta \mathbf{K}^T$ 的所有特征值实部为负。

临界状态对应为

$$\exists \mu \in \sigma(\mathbf{M}), \text{Re}(\mu) = 0 \quad (55)$$

步骤 2 战备水平衰减机制。

当刚度矩阵对角元素, 即各域自持刚度系数最小值低于临界刚度 ($\min(k_{ii}^{(n)}) < k_c$) 时, 存在 $\mu_{\text{max}} = \max \text{Re}(\sigma(\mathbf{M})) > 0$, 动力学方程解为

$$s_i(t) = e^{\mu_{\text{max}} t} \cdot s_i(0) + \text{高频振荡项} \quad (56)$$

式中: 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 指数发散项主导系统演化, 导致 $\lim_{t \rightarrow \infty} s_i(t) = 0$, 验证战备水平的不可逆衰减。

2) 失效概率超指数增长的耦合机制

步骤 1 战备-失效状态转移耦合。

当战备水平降至临界阈值 $s_i(t) \leq 0.5$ 时, 节点进入失效状态, 触发马尔可夫链转移概率的阶跃式增长。特别地, $s_i(t) \rightarrow 0$ 导致刚度元素 $k_{ji}^{(n)} \rightarrow 0$, 使得失效转移概率退化为

$$p_{NF} = \alpha (1 - \min_j k_{sj}) \rightarrow \alpha \quad (57)$$

步骤 2 稳态概率的奇异性分析。

根据前文推导的稳态失效概率表达式为

$$\pi_F = \frac{p_{NF} p_{DF} + p_{DN} p_{NF}}{D} \quad (58)$$

式中: 当 $p_{NF} \rightarrow 1$ 时, 分母 $D \approx 1$, 分子主导项为 $p_{NF}^2 \approx 1$ 导致 $\pi_F \rightarrow 1$ 。

超指数性源于转移概率的加速趋近过程中, 当 $k_{ii}^{(n)} \rightarrow k_c^-$ 时, $p_{NF} \propto e^{\mu_{\text{max}} t}$, 使得 π_F 满足加速收敛特性:

$$\frac{d\pi_F}{dt} \propto e^{\mu_{\text{max}} t} \cdot \pi_F \Rightarrow \pi_F \sim e^{\mu_{\text{max}} t} \quad (59)$$

3) 隐式解构建与数值法验证方法

步骤 1 特征方程隐式形式。

矩阵 \mathbf{M} 的特征方程可展开为四次多项式:

$$\det(\mathbf{M} - \mu \mathbf{I}) = \mu^4 + a_3 \mu^3 + a_2 \mu^2 + a_1 \mu + a_0 = 0 \quad (60)$$

式中系数 a_i 由 $\mathbf{A}, \mathbf{K}_{\text{diag}}, \mathbf{K}_{\text{off}}$ 的具体结构唯一确定。

步骤 2 临界条件隐式方程。

当 $\max \operatorname{Re}(\mu) = 0$ 时,系统处于临界和失稳的临界状态。设此时存在纯虚根 $\mu = j\omega (\omega \in \mathbf{R})$,代入特征方程并分离实虚部可得

$$\begin{cases} \omega^4 - a_2\omega^2 + a_0 = 0 \\ -a_3\omega^3 + a_1\omega = 0 \end{cases} \quad (61)$$

通过消元法求解 ω 与 k_c 的关系,最终得到隐式方程 $f(k_c, \mathbf{A}, \mathbf{K}) = 0$ 。

步骤3 数值法求解流程。

1) 参数初始化。给定 $\mathbf{A}, \beta, \mathbf{K}_{\text{off}}$, 假设同构系统 $k_{ii}^{(n)} = k$ (即各节点刚度相同)。

2) 迭代搜索。在 $[k_{\min}, k_{\max}]$ 区间离散采样。计算 $\max \operatorname{Re}(\mu(k)) \approx 0$ 对每个 k , 记录 $\max \operatorname{Re}(\mu) \approx 0$ 的 k_c 。

3) 精度优化。采用牛顿迭代法加速收敛,即

$$k_{n+1} = k_n - \frac{\max \operatorname{Re}(\mu(k_n))}{\partial_k \max \operatorname{Re}(\mu(k_n))} \quad (62)$$

5 综合效能优化与扩展应用

5.1 综合效能提升理论

本文通过严格的数学推导量化弹性更新机制(即刚度矩阵 $\mathbf{K}^{(n)}$ 的动态调整)对整体效能 $E(t)$ 的提升作用。

5.1.1 效能函数改写

效能函数为

$$E(t) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 s_i(t) \cdot \left(\sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} s_j(t) \right) \quad (63)$$

将式(63)改写为矩阵形式:

$$E(t) = \frac{1}{4} \mathbf{s}^T(t) \mathbf{K}^T \mathbf{s}(t) \quad (64)$$

式中, $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), s_3(t), s_4(t)]^T$ 为战备水平向量。

5.1.2 弹性更新机制的数学描述

假设弹性更新规则为:当某域 j 战备水平 $s_j(t)$ 下降时,通过调整刚度矩阵元素 $k_{ji}^{(n)}$ 增强对其余域的支援。例如:

$$k_{ji}^{\text{new}} = k_{ji}^{\text{old}} \cdot \frac{s_i(t_n^-)}{\sum_{m=1}^4 k_{jm}^{\text{old}} s_m(t_n^-)} \quad (65)$$

此规则将资源向高战备域倾斜,保持:

$$\sum_{m=1}^4 k_{jm}^{\text{new}} s_m(t_n^-) = 1 \quad (66)$$

1) 分析刚度矩阵变化

弹性更新通过调整 $k_{ji}^{(n)}$ 使得对高战备域(即 $s_i(t)$ 较高)的支援权重 $k_{ji}^{(n)}$ 增大。具体表现为:若 $s_j(t) > s_k(t)$, 则

$$\frac{k_{ji}^{\text{new}}}{k_{ji}^{\text{old}}} > \frac{k_{ki}^{\text{new}}}{k_{ki}^{\text{old}}} \quad (67)$$

2) 构造半正定矩阵

令调整后的刚度矩阵为 $\mathbf{K}^{\text{new}} = \mathbf{K}^{\text{old}} + \Delta \mathbf{K}$, 则瞬时效能变化量为

$$\begin{aligned} \Delta E = E^{\text{new}} - E^{\text{old}} &= \frac{1}{4} \mathbf{s}^T (\mathbf{K}^{\text{newT}} - \mathbf{K}^{\text{oldT}}) \mathbf{s} = \\ &= \frac{1}{4} \mathbf{s}^T \Delta \mathbf{K}^T \mathbf{s} \end{aligned} \quad (68)$$

展开为显式求和形式:

$$\Delta E = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \Delta k_{ji}^{(n)} s_j s_i \quad (69)$$

其中

$$\Delta k_{ji}^{(n)} = k_{ji}^{(n)\text{new}} - k_{ji}^{(n)\text{old}}$$

将式(65)代入,可得

$$\Delta k_{ji}^{(n)} = \frac{k_{ji}^{(n)\text{old}}}{D_j} - k_{ji}^{(n)\text{old}} \quad (70)$$

式中, $D_j = \sum_{m=1}^N k_{jm}^{(n)\text{old}} s_m$ 。

将式(70)代入式(69)可得

$$\Delta E = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^N \left(\frac{s_j}{D_j} \sum_{i=1}^N k_{ji}^{(n)\text{old}} s_i^2 - s_j D_j \right) \quad (71)$$

对每个固定域 j , 利用 Cauchy-Swartz 不等式:

$$\left(\sum_{i=1}^N k_{ji}^{(n)\text{old}} s_i \right)^2 \leq \left(\sum_{i=1}^N k_{ij}^{(n)\text{old}} s_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N k_{ji}^{(n)\text{old}} \right) \quad (72)$$

由归一化条件:

$$\sum_{i=1}^N k_{ji}^{(n)\text{old}} = 1 \quad (73)$$

可得

$$D_j^2 \leq \sum_{i=1}^N k_{ji}^{(n)\text{old}} s_i^2 \quad (74)$$

因此,式(71)中每项均满足:

$$\frac{s_j}{D_j} \sum_{i=1}^N k_{ij}^{(n)\text{old}} - s_j D_j \geq \frac{s_j}{D_j} D_j^2 - s_j D_j = 0 \quad (75)$$

由此可得

$$\Delta E \geq 0 \quad (76)$$

5.2 动态更新机制扩展应用场景

为证明前述动态更新机制的有效性与应用的可扩展性,本文进行应用场景扩展描述,从军事和民用两方面分别列举在实际场合中的作用,并进行详细分析阐述。

5.2.1 场景1:高价值目标优先级防御(权重调整)

敌方采取“点穴式”打击策略,集中火力攻击体系关键节点(如天基指挥卫星)。传统均质化资源分配策略因无法区分目标价值,导致高价值节点战备衰减过快,需通过动态权重倾斜强化其防御韧性,实现“刚柔协同”的战术目标。

1) 权重更新规则重构

在式(2)中嵌入目标价值系数 $v_i \in [0, 1]$, 重构

权重更新规则为

$$k_{ji}^{(n)} = \frac{k_{ji}^{(n-1)} s_i(t) \cdot v_i}{\sum_{m=1}^4 k_{jm}^{(n-1)} s_m(t) \cdot v_m} \quad (77)$$

式中: v_i 为节点 i 的战略价值系数 ($v_i \uparrow$ 表示优先级升高), 高价值节点 ($v_i \uparrow$) 在分母中的权重占比提升, 驱动跨域支援权重 $k_{ji}^{(n)} \uparrow$ 。

上述机制通过价值系数 v_i 的显式注入, 将战略优先级转化为可量化的权重分配策略, 实现资源倾斜的精确控制。

2) 战备动力学的非对称强化

战备状态动力学方程为

$$\dot{s}_i(t) = -\lambda s_i(t) + \beta \sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} s_j(t) \quad (78)$$

式中: 高价值节点的协同项 $\beta \sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} s_j(t)$ 显著增大, 形成局部正反馈回路 ($s_i(t) \uparrow \Rightarrow k_{ji}^{(n)} \uparrow \Rightarrow \sum k_{ji}^{(n)} s_j \uparrow \Rightarrow \dot{s}_i(t)$), 该正反馈有效抵消敌方攻击对 $s_i(t)$ 的负向扰动 (如外部打击导致的 $\dot{s}_i(t) \leftarrow \dot{s}_i(t) - \gamma_{\text{attack}}$)。

通过动态权重倾斜为高价值目标节点注入“防御惯性”, 可延长其有效作战时间为

$$T_{\text{survive}} \propto \frac{1}{\alpha - \beta \sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} s_j} \quad (79)$$

3) 效能函数的空间优化

效能函数定义为

$$E(t) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 s_i(t) \cdot \left(\sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} s_j(t) \right) \quad (80)$$

式中: 高价值节点的乘积项 $s_i(t) \cdot \left(\sum_{j=1}^4 k_{ji}^{(n)} s_j(t) \right)$ 在权重倾斜下非线性增长 $\left(\frac{\partial E}{\partial v_i} = \frac{\beta s_i^2}{4} \cdot \left(\sum_j \frac{k_{ji}^{(n)} s_j}{\sum_m k_{jm}^{(n)} s_m v_m} \right) > 0 \right)$, 低价值节点因资源分流导致 $s_j \downarrow$, 但其对全局效能的边际贡献下降 $\left(\frac{\partial E}{\partial s_j} \downarrow \right)$ 。

上述调整机制表明, 通过牺牲低价值节点的部分效能, 可实现体系整体效能的帕累托改进, 验证“刚柔协同”的可设计性。

5.2.2 场景 2: 智能电网负载突变响应 (调整频率)

电网节点因设备故障或需求激增引发局部负载骤升, 传统调度策略因响应延迟易导致级联过载。需通过高频动态调整实现负载的快速均衡, 避免因资源分配滞后引发的系统崩溃风险。

1) 输电权重更新规则

构建动态输电权重分配策略, 更新规则为

$$w_{ji}^{(n)} = \frac{w_{ji}^{(n-1)} (1 - l_i(t))}{\sum_{m=1}^N w_{jm}^{(n-1)} (1 - l_m(t))} \quad (81)$$

式中: $l_i(t) \in [0, 1]$ 为节点 i 的实时负载率 ($l_i \uparrow$ 表示过载风险升高); 低负载节点 ($1 - l_i(t) \uparrow$) 获得更高输电权重 ($w_{ji} \uparrow$), 吸引更多电力资源; 缩短更新周期 $\Delta T \rightarrow f_{\text{adj}} = 1/\Delta T \uparrow$, 使动态权重分配更快逼近最优分配策略。

通过上述高频更新机制可打破传统离散化决策的滞后性, 实现输电权重与负载分布的实时同步。

2) 负载动力学方程

定义节点负载演化方程为

$$\dot{l}_i(t) = -\gamma l_i(t) + \delta \sum_{j=1}^N w_{ji}^{(n)} l_j(t) \quad (82)$$

式中: 自然衰减项 $-\gamma l_i(t)$ 为负载的自主缓解 (如故障修复、需求回落等), 协同增强项 $\delta \sum_{j=1}^N w_{ji}^{(n)} l_j(t)$ 为跨节点负载的协同分配效应, 权重 w_{ji} 越高, 节点 j 向 i 输送的负载压力越大; 高频更新使协同项实时性增强, 抑制负载的指数扩散 ($\dot{l}_i(t) \approx -\gamma l_i(t) + \delta \sum_{j=1}^N w_{ji}^* l_j(t)$, $w_{ji}^{(n)} \rightarrow w_{ji}^*$)。

通过动态调整机制等效为电网注入虚拟惯性, 延缓局部过载向全局崩溃的相变过程。

3) 韧性效能函数

定义电网韧性效能函数为

$$E(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - l_i(t)) \cdot \left(\sum_{j=1}^N w_{ji}^{(n)} (1 - l_j(t)) \right) \quad (83)$$

式中: $1 - l_i(t)$ 为节点 i 的可用容量, $\sum_{j=1}^N w_{ji}^{(n)} (1 - l_j(t))$ 为节点 i 接收的加权支援容量, 乘积项 $(1 - l_i(t)) \cdot \left(\sum_{j=1}^N w_{ji}^{(n)} (1 - l_j(t)) \right)$ 的积分最大化依赖负载均衡速度。

通过高频权重调整缩短暂态过程, 使系统更快收敛至低风险稳态 ($l_i \rightarrow 0$), 最大化供电可靠性积分。

6 想定验证与分析

6.1 战场想定与参数设置

某空天防御体系遭遇敌方天基定向打击, 天基预警卫星群 40% 节点失效。需验证动态资源调配机制对体系恢复的实战效果。

初始系统状态如下:

1) 天基预警 (S)、空基拦截 (A)、海基雷达 (M)、陆基指挥 (L)。

2)初始性能。天基节点运行能力为60% (受攻击后降级),空基、海基、陆基节点为90% (正常作战状态)。

3)资源约束。各平台支援资源总量恒定。

4)预警阈值。节点完好率<80%触发资源重组。

为便于验证模型及机制的有效性,设定各动态参数如下:各域战备损耗率均为0.5,各域修复率均为0.4。

6.2 动态调整过程

6.2.1 单次动态调整分析

因异常检测天基节点性能降至60% (低于80%阈值),故开启第1轮资源重组。具体重组流程及运算过程如下。

1)调整规则触发

天基域战备水平 $s_s = 0.6 < 0.8$,触发资源重组矩阵更新:

$$k_{ji}^{(n)} = \frac{k_{ji}^{(n-1)} \cdot s_j(t)}{\sum_{m=1}^4 k_{jm}^{(n-1)} \cdot s_m(t)} \quad (84)$$

以天基域为例,原始行为

$$\mathbf{K}_S^{(0)} = [0.750 \ 0, 0.083 \ 3, 0.083 \ 3, 0.083 \ 4] \quad (85)$$

对应战备水平为: $s_s = 0.6, s_A = s_M = s_L = 0.9$ 。

缩放计算为

$$\begin{cases} k_{SS}^{(1)} = 0.750 \ 0 \times 0.6 = 0.450 \ 00 \\ k_{SA}^{(1)} = 0.083 \ 3 \times 0.9 = 0.075 \ 00 \\ k_{SM}^{(1)} = 0.083 \ 3 \times 0.9 = 0.075 \ 00 \\ k_{SL}^{(1)} = 0.083 \ 4 \times 0.9 = 0.075 \ 06 \end{cases} \quad (86)$$

更新后首行为

$$\mathbf{K}_S^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.450 \ 00 & 0.075 \ 00 & 0.075 \ 00 & 0.075 \ 06 \\ 0.675 \ 06 & 0.675 \ 06 & 0.675 \ 06 & 0.675 \ 06 \end{bmatrix} \approx [0.666 \ 7, 0.111 \ 1, 0.111 \ 1, 0.111 \ 1] \quad (87)$$

同理可得其余3域更新后结果,更新后的资源重组矩阵为

$$\mathbf{K}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.666 \ 7 & 0.111 \ 1 & 0.111 \ 1 & 0.111 \ 1 \\ 0.057 \ 2 & 0.772 \ 3 & 0.085 \ 8 & 0.085 \ 9 \\ 0.057 \ 2 & 0.085 \ 8 & 0.772 \ 3 & 0.085 \ 9 \\ 0.057 \ 2 & 0.085 \ 8 & 0.085 \ 9 & 0.772 \ 3 \end{bmatrix} \quad (88)$$

经验证,上述更新后的矩阵满足自持优势及行归一化。

2)战备水平动力学方程

稳态解满足方程:

$$(I - \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{K}^T) \mathbf{s}^* = 0 \quad (89)$$

式中: $\mathbf{A} = \text{diag}(\lambda_i) = 0.5I, \mathbf{B} = \text{diag}(\beta_i) = 0.4I$ 。

数值求解可得

$$\mathbf{s}^* = [0.714, 0.894, 0.892, 0.891]^T \quad (90)$$

动态调整后,天基域战备水平恢复至0.714,其他域稳态战备水平略有下降,见表1。

表1 单次调整后体系指标对比

Tab.1 Performance metrics comparison of the system after single adjustment cycle

组别	体系指标			
	天基域战备水平	综合效能	失效降级概率	相对稳定性裕度/%
控制组	0.635	0.726	0.31	30.67
调整组	0.714	0.798	0.18	40.00
变化情况/%	+12.40	+9.90	-72.20	+10.86

通过单次动态调整后可以看到,天基域战备水平下降导致其自持率相应减少,将更多资源投入其他3域。同时,其他3域也相应减少对天基域的直接支援,将资源投入战备水平更高的作战域。需要注意的是,虽然天基域得到的直接支援减少,但其战备水平仍然得到恢复,主要是因为支撑资源转向战备水平更高的域,而战备水平更高的域往往能更好发挥其作用,相较于天基域遭受打击降级后,同样的资源由高战备域使用对天基域的修复效果更好。这一特性的根本原因就在于体系协同效应的作用。即动态调整通过强化高战备域间的协同,间接提升天基域恢复效率,具体表现为:

1)刚柔协同的资源再分配机制

①天基域牺牲自持能力。自持系数降低11.1% (0.750 0→0.666 7),但通过增强对其他域的支援 (+33.3%),推动高战备域间的协同。

②高战备域效能溢出。空基、海基、陆基战备水平保持在0.89以上,其对外支援效率显著高于天基域。尽管对天基的直接支援减少 (-31.4%),但高战备域间协同增强 (如,空基对海基支援系数 +3.0%),形成更高效的资源网络。

③数据支撑。单次调整后全局综合效能提升9.9%,验证“以弹性补刚度”策略的有效性。

2)动力学方程的全局耦合效应

①修复方程作用。天基域战备水平恢复不仅依赖直接支援,还受全局协同项 $\beta \sum k_{ji}^{(n)} s_j$ 影响。调整后,高战备域间资源再分配使 $\sum k_{ji}^{(n)} s_j$ 的等效贡献提升,间接拉动天基域战备水平提升 (+12.4%)。

②数学验证。式(11)动力学方程中,空基、海基、陆基的高战备水平(0.89~0.90)通过刚度矩阵加权,显著增强对天基域的修复项 $\beta_i \sum k_{ji}^{(n)} s_j$ 。

3)稳定性与鲁棒性提升

①临界刚度阈值降低。从0.52降至0.40,表

明体系在更低自持能力下仍能保持稳定。

②失效风险抑制。失效降级概率降低 72.2%，验证动态调整通过资源优化抑制级联失效风险。

6.2.2 全流程动态调整分析

从单次动态调整分析的结果可以看出,虽然经过一次动态调整后天基域战备水平有所回升(0.600→0.714),但仍未达到 0.800 的基准线,因此后续需进行连续调整,确保天基域战备水平恢复至 0.800 以上,促使体系摆脱降级状态。经仿真验证,在经过 3 次动态调整后,天基域战备水平恢复至 0.800 以上,停止相关调整。如图 4~7 所示给出 3 次调整后的主要指标结果,并与控制组(不采取动态调整机制,达到稳态后即不再变化)进行对比。

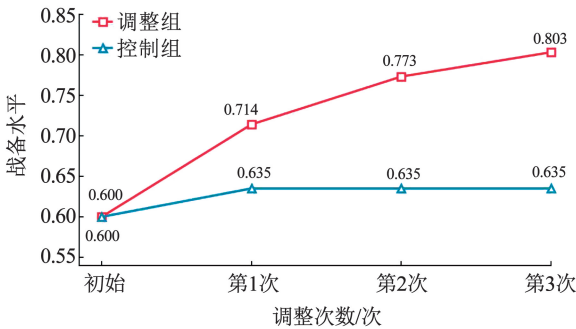


图 4 天基域战备水平

Fig. 4 Space-based domain operational readiness

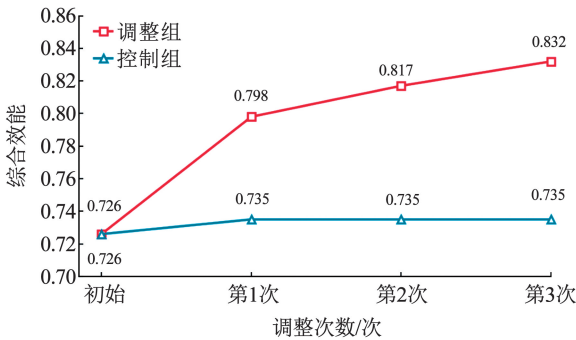


图 5 体系综合效能

Fig. 5 System-wide effectiveness

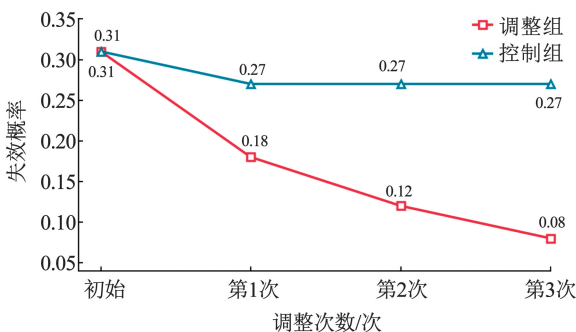


图 6 体系失效概率

Fig. 6 System failure probability

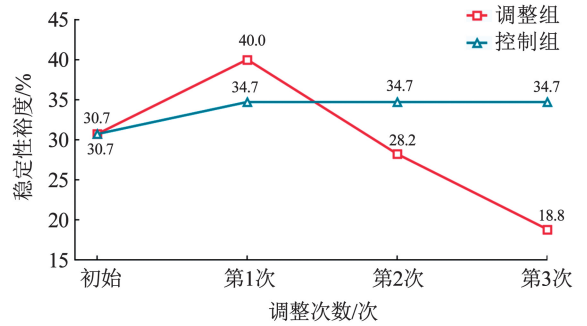


图 7 体系稳定性相对裕度

Fig. 7 System stability margin

由图 4 可以看出,经过 3 次闭环调控后,天基域战备水平恢复至 0.803,体系成功脱离降级状态。此时虽可不再采取动态调整机制,但指挥员仍可通过其他途径继续增强天基域战备水平,直至与其余 3 域持平。而控制组因未采用动态调整机制,天基域战备水平仅受少量修复拉动,最终恢复至 0.635,持续处于降级状态。

图 5 展示了体系综合效能的动态演化规律。由图 5 可以看出,首次动态调整后综合效能由 0.726 跃升至 0.798(+9.9%),经 3 次调整后达到 0.832,较控制组(0.735)提升 13.19%。效能提升呈现显著的非线性特性:首次调整贡献率达到 74.6%,第 2、3 次调整分别贡献 18.3% 和 7.1%,验证了动态调整机制边际效益递减特性。这一现象源于体系刚度矩阵重组过程中资源再分配效率的渐进饱和。

图 6 给出了体系失效概率的演化规律。由图 6 可以看出,调整组通过 3 次动态调整,失效概率从初始 0.31 降至 0.08(降幅 74.2%),而控制组失效概率维持在 0.27 左右。数据表明,动态调整机制通过增强高战备域间协同,有效阻断“天基域降级→跨域支援不足→体系级联失效”的恶性循环。特别地,第 3 次调整后失效概率下降速率较首次调整减缓 51.7%,印证了失效相变的非线性抑制特性。

图 7 给出了体系稳定性相对裕度情况。由图 7 可以看出,调整组在经过 3 次动态调整后,稳定性相对裕度有所降低(但仍达到 18.8%),而控制组的稳定性裕度始终较高(稳定保持在 30% 以上)。出现上述现象的原因是天基域自持刚度降低,将更多支撑用于对外支援,导致体系整体相对稳定性裕度下滑。即在安全范围内牺牲了一部分相对稳定性裕度,使得天基域战备水平恢复、体系整体综合效能提升、失效概率降低,符合“效能提升-风险可控”的战术平衡。同时也应看出,指挥员在采取相关调整机制时,必须始终关注稳定性相对裕度,当相对裕度不足时(如低于 10%),则应有所警惕,不应为了过分追求效能而增加全局失稳风险。这也进一步验证了

刚度矩阵自持优势约束条件(见式(5))的必要性——各域保持不低于50%的自持刚度,为体系动态调整提供了基础稳定性保障。当然,若指挥员作战风格较为保守,希望保证留有至少20%的稳定性相对裕度,则可在第2次动态调整后停止,虽然天基域战备水平仍未达到基准线($0.773 < 0.800$),但若是满足当前作战需要也可接受。

6.2.3 局限性

1) 动态调整机制有效性

动态调整机制通过减少对低战备域(天基)的直接支援,强化高战备域间协同,使天基域战备水平恢复至基准线以上,综合效能提升13.4%,体现“体系弹性补偿局部脆弱性”的核心思想。

2) 刚柔协同框架作用

通过刚度矩阵的动态重组(式(2))与战备动力学方程(式(11))的耦合,验证了防御体系“刚中有柔、柔中带刚”的协同机制,为空天防御体系的弹性架构设计提供理论依据。

3) 可能存在的局限性

本文虽然通过作战想定验证了动态调整机制的有效性,但在实际应用中需考虑时序配套问题。理论模型的调整可能在秒级甚至毫秒级,但实际资源的重分配可能需要更多时间(如物资的补给、武器装备的投送等)。因此,需根据实际情况制定相应的时序配套规则,避免理论和应用脱节。

7 结 论

1) 创新性地构建了刚柔耦合动力学理论框架,提出四维动态刚度矩阵及其反馈重组机制,结合马尔可夫状态转移模型刻画战备状态与体系结构的双向动态耦合,建立含态势感知、阈值预警与参数优化的闭环管理体系。

2) 基于非线性系统稳定性理论,严格推导体系稳态概率分布,阐明体系从稳态运行到临界失效的状态相变机制,证明刚柔耦合动态调整机制可提升体系综合效能,揭示体系稳定域与失效相变的临界条件。

3) 理论与研究及想定验证表明,刚柔协同机制能增强体系结构自适应性,在保障体系稳定性相对裕度的前提下,提升综合效能、恢复战备水平、降低失效概率,为智能化空天防御体系的刚柔协同作战提供有益参考,且在高价值目标防御、智能电网等场景具有扩展应用潜力。

参 考 文 献

[1] 郑建成,曲智国,谭贤四,等. 基于责任区划分的雷达网探测高

- 超声速目标资源管理[J]. 航空学报, 2024, 45(8): 329022
ZHENG Jiancheng, QU Zhiguo, TAN Xiansi, et al. Resource management for hypersonic target detection by radar network based on responsibility area partitioning[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(8): 329022. DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.29022
- [2] 郑建成,曲智国,谭贤四. 一种相控阵雷达搜索参数设计策略[J]. 航空学报, 2023, 44(16): 328124
ZHENG Jiancheng, QU Zhiguo, TAN Xiansi. Design of search parameters for hypersonic target detection by phased array radar[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(16): 328124. DOI: 10.7527/S1000-6893.2022.28124
- [3] 马万斌,杨清清,郑桂妹. 联合防空反导体系反无人机作战能力评估问题研究[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(1): 86
MA Wanbin, YANG Qingqing, ZHENG Guimei. A study of counter-drone combat capability evaluation in joint air and missile defense system[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(1): 86. DOI: 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.01.011
- [4] 贾永楠,田似营,李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(增刊1): 723738
JIA Yongnan, TIAN Siying, LI Qing. Recent development of unmanned aerial vehicle swarms[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(Sup 1): 723738. DOI: 10.7527/S1000-6893.2019.23738
- [5] 罗俊仁,刘果,苏炯铭,等. 基于奖励塑造强化学习的智能导弹突防策略规划方法[J]. 智能科学与技术, 2024, 6(2): 189
LUO Junren, LIU Guo, SU Jiongming, et al. Reward shaping based reinforcement learning for intelligent missile penetration attack strategy planning[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2024, 6(2): 189. DOI: 10.11959/j.issn.2096-6652.202411
- [6] 许睿,刘忠仕,张玉玲,等. 平行智能导弹集群系统研究[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(增刊1): 77
XU Rui, LIU Zhongshi, ZHANG Yuling, et al. Research on parallel intelligent missile cluster system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(Sup 1): 77
- [7] 陈伟,张庆波,刘洋. 基于OODA环的网络化防空体系作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(5): 27
CHEN Wei, ZHANG Qingbo, LIU Yang. Operational effectiveness evaluation of networked air defense system based on OODA loop[J]. Fire Control & Command Control, 2024, 49(5): 27. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2024.05.004
- [8] 俞锦涛,肖兵,崔玉竹. 基于节点重要性和改进效能环的防空反导预警体系能力评估[J]. 兵工学报, 2024, 45(1): 328
YU Jintao, XIAO Bing, CUI Yuzhu. Capability evaluation of air defense and anti-missile early warning system-of-systems based on node importance and improved effectiveness loop[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(1): 328. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0488
- [9] 罗剑,于小红,姜伟,等. 反导作战体系超网络模型与交互机制研究[J]. 现代防御技术, 2022, 50(3): 1
LUO Jian, YU Xiaohong, JIANG Wei, et al. Super network modeling and interaction mechanism of missile defense system-of-systems[J]. Modern Defense Technology, 2022, 50(3): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2022.03.001
- [10] 宋占福,赵全习,范成礼,等. 基于“作战云”的防空反导体系架构研究[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(2): 117
SONG Zhanfu, ZHAO Quanxi, FAN Chengli, et al. Research on air defense and missile defense system architecture based on “combat cloud”[J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(2): 117. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2023.02.018
- [11] 王远,贡岩,刘立业. 基于两层三模超网络的区域防空作战体系分析[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(1): 182

- WANG Yuan, GONG Yan, LIU Liye. Analysis of regional air defense combat system based on supernetwork with two layers and three-mode [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2025, 47(1): 182. DOI:10.12305/j.issn.1001-506X.2025.01.19
- [12] 王斌, 王基策, 尚颖, 等. 防空反导体系网络攻击效能评估与防御策略建议[J]. *现代防御技术*, 2023, 51(3): 57
WANG Bin, WANG Jice, SHANG Ying, et al. Effectiveness evaluation and defense strategies for network attacks of air and missile defense system [J]. *Modern Defense Technology*, 2023, 51(3): 57. DOI:10.3969/j.issn.1009-086x.2023.03.007
- [13] 邓大松, 孙俊, 杨予昊. 基于马赛克战的国土防空作战体系构建研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2020, 15(2): 105
DENG Dasong, SUN Jun, YANG Yuhao. Establishment of mosaic homeland air defense SoS [J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2020, 15(2): 105. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5692.2020.02.002
- [14] 付昱龙, 张海宾, 郭相科, 等. 基于双层遗传算法的静态防空反导杀伤网构建方法[J]. *空军工程大学学报*, 2025, 26(1): 59
FU Yulong, ZHANG Haibin, GUO Xiangke, et al. Static air defense and antimissile kill-net construction method based on double-layer genetic algorithm [J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2025, 26(1): 59. DOI: 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.01.008
- [15] 孙志鹏, 陈桂明, 高卫刚. 基于证据推理的预警反击作战体系保障能力评估方法[J]. *兵工学报*, 2019, 40(9): 1928
SUN Zhipeng, CHEN Guiming, GAO Weigang. Support capability evaluation method for early-warning counter-attack system of systems based on evidential reasoning [J]. *Acta Armamentarii*, 2019, 40(9): 1928. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2019.09.018
- [16] 李腾达, 王刚, 郭相科, 等. 基于复杂网络的防空反导体系拓扑特性[J]. *火力与指挥控制*, 2024, 49(7): 30
LI Tengda, WANG Gang, GUO Xiangke, et al. Research on the topological characteristics of air defense and antimissile system based on complex network [J]. *Fire Control & Command Control*, 2024, 49(7): 30. DOI:10.3969/j.issn.1002-0640.2024.07.005
- [17] 盖美庆, 闫世强, 程正宇, 等. 组合赋权 TOPSIS 法反导预警系统效能评估[J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(10): 43
GAI Meiqing, YAN Shiqiang, CHENG Zhengyu, et al. Effectiveness evaluation of anti-missile early warning based on combination weighting and improved TOPSIS method [J]. *Fire Control & Command Control*, 2020, 45(10): 43. DOI:10.3969/j.issn.1002-0640.2020.10.009
- [18] 严新宇, 林强, 胡冰, 等. 基于 G1-CRITIC 的防空预警装备体系作战效能评估指标赋权方法[J]. *船舶电子工程*, 2024, 44(11): 145
YAN Xinyu, LIN Qiang, HU Bing, et al. Index weighting method for evaluating operational effectiveness of air defense early warning equipment system based on G1-CRITIC [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2024, 44(11): 145. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9730.2024.11.030
- [19] 严新宇, 林强, 胡冰, 等. 基于 TOPSIS 的防空预警装备体系作战效能评估方法[J]. *舰船电子对抗*, 2024, 47(2): 28
YAN Xinyu, LIN Qiang, HU Bing, et al. Evaluation method of operational effectiveness of air defense early warning equipment system based on TOPSIS [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2024, 47(2): 28. DOI: 10.16426/j.cnki.jedzdk.2024.02.007
- [20] 郭蓬松, 李宁, 李为民, 等. 防空反导一体化指挥协同效能评估[J]. *火力与指挥控制*, 2024, 49(8): 45
GUO Pengsong, LI Ning, LI Weimin, et al. Research on the effectiveness evaluation of air defense and antimissile integrated command cooperation [J]. *Fire Control & Command Control*, 2024, 49(8): 45. DOI:10.3969/j.issn.1002-0640.2024.08.007
- [21] 刘泽宇, 董晨, 师鹏, 等. 防空体系作战能力评估方法[J]. *火力与指挥控制*, 2019, 44(11): 35
LIU Zeyu, DONG Chen, SHI Peng, et al. Research on evaluation method of air defense system-of-system combat capability [J]. *Fire Control & Command Control*, 2019, 44(11): 35. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2019.11.008
- [22] 张承龙, 赵强, 魏然, 等. 面向跨域作战体系的多维架构设计方法研究[J]. *现代防御技术*, 2023, 51(3): 20
ZHANG Chenglong, ZHAO Qiang, WEI Ran, et al. Research on design method of multi-dimensional architecture of cross-domain operational systems [J]. *Modern Defense Technology*, 2023, 51(3): 20. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2023.03.003
- [23] 王惠真, 韩春雷, 平超, 等. 跨域协同作战体系的复杂超图表示方法[J]. *战术导弹技术*, 2024(5): 1
WANG Huizhen, HAN Chunlei, PING Chao, et al. Complex hypergraph representations for cross-domain collaborative combat systems [J]. *Tactical Missile Technology*, 2024(5): 1. DOI:10.16358/j.issn.1009-1300.20240058
- [24] 亓子龙, 党玲, 韩春雷, 等. 陆基防空武器与无人机协同防空作战样式设计研究[J]. *现代导航*, 2022, 13(6): 438
QI Zilong, DANG Ling, HAN Chunlei, et al. Research on cooperative air defense combat mode design of land-based air defense weapon and UAV [J]. *Modern Navigation*, 2022, 13(6): 438
- [25] 李宗凌, 龙腾, 赵保军, 等. 面向预警场景的大规模星座协同调度标准建模与求解方法[J]. *航空学报*, 2024, 45(22): 330181
LI Zongling, LONG Teng, ZHAO Baojun, et al. Standard modeling and solving methods for large-scale constellation collaborative scheduling for early warning scenarios [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(22): 330181. DOI: 10.7527/S1000-6893.2024.30181
- [26] 李小波, 王蒙一, 廖咏一, 等. 智能化空天防御作战体系架构设计方法研究[J]. *现代防御技术*, 2024, 52(2): 1
LI Xiaobo, WANG Mengyi, LIAO Yongyi, et al. An architecture design method for intelligent air and space defense combat system of systems [J]. *Modern Defense Technology*, 2024, 52(2): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2024.02.001
- [27] 张良, 徐艳国, 孙晓闻, 等. 空基智能预警探测体系架构及关键技术[J]. *现代雷达*, 2024, 46(12): 1
ZHANG Liang, XU Yanguo, SUN Xiaowen, et al. Architecture and key technologies of airborne intelligent early warning and detection system [J]. *Modern Radar*, 2024, 46(12): 1. DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.12.001
- [28] 董晨, 帅逸仙, 周金鹏, 等. 网络化多传感器-多武器协同防空任务规划[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(12): 3738
DONG Chen, SHUAI Yixian, ZHOU Jinpeng, et al. Cooperative air defense task planning of networked multi-sensor-multi-weapon [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(12): 3738. DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2022.12.18
- [29] 张先超, 傅宇龙, 叶海军, 等. 以预警机为核心的空中联合作战导弹武器打击能力分析[J]. *指挥与控制学报*, 2022, 8(1): 50
ZHANG Xianchao, FU Yulong, YE Haijun, et al. Missile combat capability analysis in air joint operations with airborne warning and control system as the center [J]. *Journal of Command and Control*, 2022, 8(1): 50. DOI: 10.3969/j.issn.2096-0204.2022.01.0050
- [30] 陆皖麟, 刘先章, 牛亚, 等. 多防空武器平台协同部署规划[J]. *火力与指挥控制*, 2024, 49(12): 143
LU Wanlin, LIU Xianzhang, NIU Ya, et al. Research on cooperative deployment planning of multiple air-defense weapons platform [J]. *Fire Control and Command Control*, 2024, 49(12): 143. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2024.12.017