DOI:10.11918/202511016

城市低空飞行器密度自适应混合冲突解脱策略

张璐瑶[1],张志宏[1,2],王清琦[1]

(1.郑州航空工业管理学院 民航学院,郑州 450046;
2.郑州航空工业管理学院 航空经济发展河南省协同创新中心,郑州 450046)

摘 要:为应对城市低空大规模电动垂直起降飞行器(electric vertical take-off and landing, eVTOL)运行带来的冲突管理压力,提升系统在不同运行密度条件下的安全性与效率,提出了一种密度自适应的混合冲突解脱策略。首先,基于交通密度变化特征定义"策略适用密度区间",实现集中式与分布式解脱机制在不同密度条件下的自适应切换与协同运行。其次,构建融合冲突解脱失败率与地面风险的空地协同评估体系,用于综合量化不同策略在安全性与效率方面的综合表现。针对传统速度障碍法在高密度场景中保守性较强的问题,引入局部密度参数,提出密度加权速度障碍模型,通过自适应调节冲突检测范围提升分布式策略的环境适应能力。最后,基于三维城市仿真平台构建同等级和多优先级运行模式,对集中式、传统分布式,以及改进分布式策略开展系统对比。结果表明:在低密度场景下,集中式策略结合航迹重规划性能更优;在高密度场景中,改进分布式策略配合固定航线表现最为稳定;在密度中间区间,两类策略可通过协同缓冲机制实现动态切换。所提混合策略使冲突解脱失败率分别降低约24.1%和18.3%,地面风险降低约39.1%和8.4%。

关键词:城市空中交通;冲突解脱;密度适应;混合控制;电动垂直起降飞行器
中图分类号:V335 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)08-0215-12

Density-adaptive hybrid conflict resolution strategy for urban low-altitude aircraft

Zhang Luyao[1], Zhang Zhihong[1,2], Wang Qingqi[1]

(1. School of Civil Aviation, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center for Aviation Economy Development, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: To address the conflict management pressure induced by large-scale urban low-altitude operations of electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft and to enhance system safety and efficiency under varying operational densities, a density-adaptive hybrid conflict resolution strategy was proposed. First, based on the traffic density variation characteristics, a "strategy applicable density interval" was defined to enable adaptive switching and cooperative operation between centralized and decentralized resolution mechanisms under different density conditions. Second, an air-ground collaborative evaluation system integrating the conflict resolution failure rate and ground risk was constructed to comprehensively quantify the overall performance of different strategies in safety and efficiency. To address the strong conservativeness of the traditional velocity obstacle method in high-density scenarios, a local density parameter was introduced, and a density-weighted velocity obstacle model was proposed, which adaptively improved the environmental adaptability of decentralized strategies by adjusting the conflict detection range. Finally, based on a three-dimensional urban simulation platform, same-priority and multi-priority operation modes were constructed, and a systematic comparison was conducted among the centralized, traditional decentralized, and improved decentralized strategies. The results show that in low-density scenarios, the centralized strategy combined with trajectory replanning achieves better performance; in high-density scenarios, the improved decentralized strategy combined with fixed routes exhibits the highest stability; in intermediate density intervals, the two types of strategies can achieve dynamic switching through a cooperative buffering mechanism. The proposed hybrid strategy reduces the conflict resolution failure rate by approximately 24.1% and 18.3% and reduces the ground risk by approximately 39.1% and 8.4%, respectively.

Keywords: urban air mobility; conflict resolution; density adaptation; hybrid control; electric vertical take-off and landing aircraft

收稿日期:2025-11-05;**录用日期**:2025-12-05;**网络首发日期**:2026-05-20
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20260520.1545.002
基金项目:河南省重点研发专项项目(241111242200);河南大学-河南省重大专项合作研究(251100240100)
作者简介:张璐瑶(2000—),女,硕士研究生
通信作者:王清琦,wangqingqiatm@163.com

随着低空经济的快速发展,城市空中交通(urban air mobility,UAM)正成为未来交通体系的重要组成部分。美国国家航空航天局预测,未来20年内用于城市短途运输的电动垂直起降飞行器(electric vertical take-off and landing aircraft, eVTOL)数量将显著增长[1]。然而,现有低空交通管理体系仍以人工集中调度为主,存在响应滞后、效率低、计算负载高等问题,难以支撑高密度空域的实时运行需求。为此,全球主要航空强国相继发布了无人机交通管理框架[2-9],但在复杂城市环境中,冲突解脱仍是UAM安全运行的核心问题。

从更宏观的空中交通管理视角来看,民航空域在应对大规模飞行流量方面已经形成了较为成熟的技术体系。例如,Ren 等[10]通过建立考虑空中交通管制指挥全过程的航路容量优化模型以提升航路容量,缓解需求—容量不平衡导致的空域拥挤问题。Lema-esposto 等[11]通过以大量空域构建块取代静态扇区边界,并基于单层状态-任务网络对扇区合并与分解进行建模,实现能够适应交通需求增长和空域复杂性变化的动态空域配置。季灵等[12]基于多智能体技术实现延误航班的恢复协同决策,在保障航空公司整体效益的同时,实现多主体利益平衡。上述研究为民航空中交通管理(air traffic management, ATM)在高密度运行条件下维持空域稳定性与效率提供了成熟范式。然而,传统ATM方法通常依赖于固定的航路结构、相对稳定的空域划分、有限的飞行器机动自由度,以及分钟级的决策周期。当面对UAM环境中的高机动性、三维空间自由度、复杂地形遮挡,以及流量的秒级波动等特点时,其直接适用性面临根本性挑战。因此,UAM亟须发展具备实时响应与自适应能力的新型冲突管理方法[13]。

目前研究主要包括集中式与分布式两类策略。Xue[14]指出,集中式依赖全局信息优化,在理想通信条件下能实现高效冲突解脱,但面对通信延迟和信息误差时表现脆弱。相比之下,分布式策略通过本地自主决策实现弹性响应。例如,陈雨童[15]在商定航迹基础上提出自主机动框架,以快速化解环境不确定性引发的冲突。然而,Bilimoria 等[16]发现,在多机密集交互场景中,分布式策略易因决策局部性导致性能下降和次优解。为整合两者优势, Chen 等[1]提出双层混合控制机制,通过协同控制层提升冲突解脱与运行效率。Huang 等[17]进一步依托深度强化学习搭建了多智能体协同框架,该框架在由密集网格块构成的特定空中走廊环境下表现良好,但受限于网络拓扑与规则设定,难以应对高密度随机场景。总体而言,现有战略层研究多基于固定空域密度假设,尚未充分考虑交通密度动态变化对策略性能的影响。在算法方面,研究主要聚焦于性能与实时响应优化。隋东等[18]提出基于持续学习的自适应解脱方法,显著提升冲突解脱成功率。Ribeiro 等[19]开发结合强化学习与几何启发的混合算法,有效降低响应时间与机动幅度。岳仁田等[20]利用自动相关监视广播(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)中的ADS-B IN监视数据与改进的FR-IMMCKF算法,实现了融合探测与解脱的实时避撞。Sui 等[21]与童亮等[22]分别采用多机强化学习与改进蚁群算法提升协同效率。然而,这些研究多针对局部冲突场景,缺乏从系统整体运行角度分析策略演化与切换规律。近年来,混合式冲突解脱机制逐渐成为研究热点。Zhang 等[23]提出集中-分布式混合冲突解脱策略,通过“动态分组”与“协同进化”实现全局与局部优化平衡。Jenie 等[24]扩展传统速度障碍法,提出选择性速度障碍模型,为无人机在“避免—保持—恢复”3种机动模式间提供动态决策依据。Wang 等[25]针对高密度无人机运行环境从空域几何与交通结构角度定义了UAM复杂度度量,并构建交通流模型以支持高密度安全运行。尽管上述研究在机制设计与建模方面取得进展,但多局限于特定场景设定,缺乏对运行密度动态变化下策略性能演化规律的系统分析。

基于上述分析,集中式策略的通信敏感性与分布式策略的决策局部性,二者共同构成了构建节点密度自适应混合空管策略的核心研究动机:运行密度越高,通信负载与监视压力越大,越需发挥分布式策略的局部自主优势;运行密度越低,全局信息价值越凸显,越适合采用集中式策略进行统筹优化。因此,本文指出运行密度是连接两类策略性能演化、影响UAM冲突解脱策略选择的核心状态变量,并据此定义“策略适用密度区间”和“协同缓冲机制”,构建融合地面风险的空地协同评估体系,通过三维城市仿真平台验证不同运行模式下的策略性能,旨在揭示集中式与分布式机制的性能拐点,建立运行密度与策略切换的映射关系,最终实现策略动态切换与自适应协同,提升城市低空交通系统的安全性与运行效率。

1　冲突管理体系策略

在传统运输航空中,冲突管理主要依赖于监视系统对航空器运行状态进行实时监控,通过检测潜在冲突并评估风险,最终由管制员实施人工干预予以解决[2]。然而,城市空中运输服务具有显著的按需响应特征,其运行环境高度动态,飞行路径亦表现出较强的随机性,对现有冲突管理机制构成了严峻挑战[26]。针对上述挑战,本文提出将冲突解脱过程划分为 3 个阶段:1)起飞前,通过预生成无冲突飞行计划以保障运行安全;2)飞行过程中,实时监测冲突;3)冲突发生前,通过机动操作彻底消除碰撞风险。

1.1　集中式策略

集中式策略作为国家级空域管理的典型范式,在 UAM 运行中具有重要应用价值。其核心思想是:依托中央节点实现全局冲突检测与统一调度,通过融合地面监视与卫星导航数据实时感知飞行器状态,构建空域全局态势。在检测到潜在冲突后,系统告警并下发航迹调整指令,从而实现冲突解脱与航迹优化。该策略具有全局最优性强、协调效率高等优点,但在通信延迟或信息不完整条件下易出现响应滞后和计算负载过高等问题。

1.2　分布式策略

分布式策略以去中心化的自主协同为核心,依托机载感知与局部通信实现飞行器间的实时避碰与路径调整。各飞行器基于统一的解脱规则独立决策,并通过局部信息交互实现多机间的动态协调。该策略具有较强的环境适应性和鲁棒性,可在复杂空域下保持较高的运行灵活性与扩展性。然而,由于缺乏全局信息,其在高密度场景中可能出现决策局部化与次优解问题。

2　冲突解脱模型

集中式策略与分布式策略的根本区别在于优化层次与决策模式。集中式策略以全局最优为目标,综合所有飞行器状态统一规划航迹,通过多机协同解析实现系统整体冲突解脱;而分布式策略基于局部感知与预设规则,各飞行器独立制定机动方案,以个体安全与局部最优为主要目标,决策过程中不依赖他机信息。

2.1　目标函数

上述两类策略均以实现总风险最小为目标。本文将目标函数定义为机动失败概率与地面风险的乘积之和,即通过最小化飞行器在不同位置与时刻的期望损失,量化整体运行风险。

$$\min S = \sum_{i=1}^{N} \left[\sum_{t \in T} P_{\text{fail},i}(t) \cdot R_{\text{ground}}(P_i(t)) \right] \quad (1)$$

式中:S 为所有飞行器进行冲突解脱的总风险;N 为参与冲突解脱的飞行器总数;$P_{\text{fail},i}(t)$ 为飞行器 i 在 t 时刻的冲突解脱失败概率(即该机因解脱失败而坠地的概率);$R_{\text{ground}}(P_i(t))$ 为飞行器 i 在 t 时刻坠落时地面风险模型中位置 $P_i(t)$ 处的地面风险值;T 为冲突解脱时间。该定义中,每架飞行器的风险贡献均以其自身的失败概率 $P_{\text{fail},i}(t)$ 为权重,因此本机与他机的失控风险通过下标 i 区分,不存在风险混淆或重复计量问题。

地面风险值可根据文献[27]定义,即

$$R_{\text{ground}}(P_i(t)) = \rho(P_i(t)) \times A_i \times P_{\text{casualty}} \quad (2)$$

式中:$\rho(P_i(t))$ 为 $P_i(t)$ 处的人口密度,人/m^2;A_i 为飞行器 i 坠落的影响面积,m;P_{casualty} 为单位暴露人口的伤亡概率。

上述目标函数不仅用于集中式策略冲突解脱模型中的全局优化求解,也作为分布式策略的性能评估指标。在后续建模过程中,各约束条件与决策变量均以式(1)为目标导向,以实现整体风险的最小化与安全性最优平衡。

2.2　冲突解脱模型约束条件

集中式策略与分布式策略在数学形式上均可统一为最小化整体代价函数问题。为保证两种策略的物理合理性与安全性,所有模型均需满足以下通用约束条件。

2.2.1　通用约束条件

1)决策变量。飞行器 i 的机动调整量为

$$\Delta u_i = (\Delta v_i, \Delta\theta_i, \Delta\varphi_i) \quad (3)$$

式中,v、θ、φ 分别为速度、航向角、俯仰角。

2)最小安全间隔约束。针对任意一对存在潜在冲突的飞行器,其运行过程中间距需始终大于等于最小安全间隔要求,即

$$\| P_i(t) - P_j(t) \| \geq d_{\min}, \forall t \in T, i \neq j \quad (4)$$

式中:$P_i(t)$、$P_j(t)$ 分别为飞行器 i、j 在 t 时刻的位置坐标,$d_{\min}$ 为两飞行器间的最小安全间隔。该约束为应对导航误差、大气扰动,以及飞行器动力学不确定性提供了必要的安全缓冲,是防止飞行器发生碰撞的根本保障。

3)动力学约束。各飞行器机动调整量受其动力学性能限制为

$$\Delta v_i \in [-v', v'], \Delta\theta_i \in [-\theta', \theta'], \Delta\varphi_i \in [-\varphi', \varphi'] \tag{5}$$

式中，v'、θ'、φ'分别为飞行器 i 的最大速度、最大航向角、最大俯仰角调整量。

上述约束同时适用于集中式策略与分布式策略模型，确保飞行器机动过程的安全与物理可实现性。

2.2.2 分布式策略冲突解脱模型约束条件

1）改进的密度加权速度障碍模型。为贴近现实运行与监管框架，本文在安全间隔建模的使用方式上对两类策略做差异化处理：集中式策略将最小安全间隔作为不可放松的硬约束，并据此进行冲突判定和指令生成。其检测范围也保持为固定值，以确保集中式管制下间隔标准的统一性；分布式策略在保持最小安全间隔不变的前提下，进一步引入密度加权机制对检测半径进行自适应调整，使其在高密度场景下能够提前识别潜在冲突，从而增强局部自主决策的稳定性并减少机动振荡。在该框架下，最小安全间隔仍保持固定为

$$d_{\min} = d_0 \tag{6}$$

为确保检测范围不小于最小安全间隔，密度加权检测半径定义为

$$d_{\min}^{(i,j)}(t) = d_{\min}(1 + B) \tag{7}$$

式中 B 为归一化的局部密度度量，取值范围为 $[0,1)$。

针对存在潜在冲突的飞行器配对，其冲突解脱过程中可行速度集合需避开邻居冲突，即：

$$\begin{aligned} \mathrm{VO}_{ij}^{\mathrm{D}}(t) = \{ \boldsymbol{v}_i' \mid \exists t \in [0,T], \\ \| p_i(t) + \boldsymbol{v}_i' t - p_j(t) - \boldsymbol{v}_j t \| < d_{\min}^{(i,j)}(t) \} \end{aligned} \tag{8}$$

$$V_i^{\mathrm{feas,D}}(t) = \left\{ \boldsymbol{v}_i' \,\middle|\, \boldsymbol{v}_i' \in \bigcup_{j \in N_i(t)} \mathrm{VO}_{ij}^{\mathrm{D}}(t) \right\} \tag{9}$$

式中：$N_i(t)$为飞行器 i 在 t 时刻的邻居集合（距离小于 2 倍 $d_{\min}^{(i,j)}(t)$、大于 $d_{\min}^{(i,j)}(t)$ 的飞行器数量）；$\boldsymbol{v}_j(t)$为飞行器 j 在 t 时刻的速度向量；$\mathrm{VO}_{ij}^{\mathrm{D}}(t)$为飞行器 i 相对于飞行器 j 的速度障碍区域，定义为所有会导致未来 T/s 内距离 $< d_{\min}^{(i,j)}(t)$ 的速度集合；$V_i^{\mathrm{feas,D}}(t)$为飞行器 i 的可行速度集合，需避开所有邻居的 $\mathrm{VO}_{ij}^{\mathrm{D}}(t)$；$\boldsymbol{v}_i' \in V_i^{\mathrm{feas,D}}(t)$，同时也满足式(5)。

本文采用归一化的局部密度度量，以邻机数量表示局部拥挤度，可定义为

$$B = \frac{\rho - \rho_{\mathrm{ref}}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \tag{10}$$

式中：ρ 为运行场景中飞行器 i 在 t 时刻所处位置的密度，ρ_{ref}、$\rho_{\max}$、$\rho_{\min}$分别为该场景中的平均密度、最大密度、最小密度。此外，当 $\rho_{\max} = \rho_{\min}$时，$B = 0$。

2）改进的密度加权速度障碍模型适用性。本文构建的密度加权速度障碍模型，其核心设计目标是提升高密度、非结构化空域常态运行下的系统鲁棒性与安全性。适用于缺乏固定航路网络、飞行器可进行自由路由与机动（如点对点运营）的复杂城市低空环境；主要面向常态运行，旨在通过前瞻性的冲突探测与解脱规划来预防冲突升级，其决策周期与机动指令均针对常规飞行状态设计。对于发动机失效、控制系统故障等极端情况下的应急管理，飞行器应遵循优先级更高的特定应急程序，不在本模型讨论范围内；并假设机间具备基本的感知与通信（如 ADS-BIN）能力，可获取一定范围内邻机的状态信息（位置、速度等）以计算局部密度。

2.2.3 分布式策略冲突解脱模型规则约束

1）飞行器进行水平方向上的避让。根据中国交通运输部发布的《一般运行和飞行规则》[28]规定，在同一高度对头相遇情况下，飞行器需向右改变航向进行避让，以避免对称性导致的判断模糊。因此，采用右转避让规则为

$$\Delta\theta_i \in (0, \theta'] \tag{11}$$

当两架同等级飞行器在同一高度对头相遇时，共同向右避让；若存在优先级差异时，高优先级飞行器保持原航迹，普通级飞行器向右避让。

2）飞行器进行垂直方向上的避让。本文依据文献[29]并结合任务等级差异，制定如下垂直避让规则。

若飞行器等级相同，采用上下错层避让策略：高位机上升、低位机下降，即：

$$\begin{cases} \Delta h_j = [-\Delta h', 0) \\ \Delta h_i = (0, \Delta h'] \end{cases}, h_i > h_j \tag{12}$$

$$\begin{cases} \Delta h_j = (0, \Delta h'] \\ \Delta h_i = [-\Delta h', 0) \end{cases}, h_i < h_j \tag{13}$$

式中：h_i、h_j、Δh_i、Δh_j 分别为飞行器 i、j 的高度及在高度上的变动，$\Delta h'$为最大高度调整量。

若飞行器等级不同且优先级飞行器位于高位，则普通级飞机下降避让，即

$$\begin{cases} \Delta h_j = [-\Delta h', 0) \\ \Delta h_i = 0 \end{cases}, h_i > h_j \cap L_i > L_j \tag{14}$$

若飞行器等级不同且优先级飞行器位于低位，则普通级机上升避让，即

$$\begin{cases}\Delta h_j=(0,\Delta h']\\ \Delta h_i=0\end{cases},h_i<h_j\cap L_i>L_j \tag{15}$$

当飞行器等级不同且普通级飞行器位于高位时,其主动上升避让,即

$$\begin{cases}\Delta h_j=0\\ \Delta h_i=(0,\Delta h']\end{cases},h_i>h_j\cap L_i<L_j \tag{16}$$

反之,当飞行器等级不同且普通级飞行器位于低位时,其下降避让,即

$$\begin{cases}\Delta h_j=0\\ \Delta h_i=[-\Delta h',0)\end{cases},h_i<h_j\cap L_i<L_j \tag{17}$$

本文中的飞行器优先级用于表征其在任务关键性与调度特权上的差异:优先级飞行器通常执行紧急医疗运输、公安应急、救援等不可中断或高度时间敏感任务,需最大限度保持航迹稳定性;普通飞行器则执行常规客运、货运等任务,在局部范围内承担主动避让义务。当双方优先级相同时,则依据对等原则共同执行机动。上述规则确保在等级差异存在的多机交互中,高优先级飞行器优先保持任务航迹,从而在不牺牲系统安全性的前提下提升整体运行效率。同时需要注意的是,若应用场景不存在明确的飞行器等级划分,该规则可自然退化为无等级对等避让机制,因此不会限制模型在常态运行场景中的泛化能力。

2.3　目标函数求解方法

为求解式(1)所定义的系统总风险最小化问题,本文分别针对集中式策略与分布式策略设计了基于 A* 算法的启发式搜索算法。两者虽同属 A* 算法求解范式,但在搜索空间构建、启发函数设计,以及约束条件处理方面存在显著差异。

2.3.1　集中式策略的求解方法

集中式策略以系统整体最优为目标,需同时规划所有飞行器的机动指令以实现全局冲突完全解脱。本文采用全局协同 A* 算法,将所有飞行器的状态联合构成高维搜索空间 N_{global},以系统总风险 S 为代价函数。启发函数可定义为

$$f(n)=g(n)+h(n) \tag{18}$$

式中:$g(n)$为当前累计风险代价,$h(n)$为未来时刻地面风险预测值。

每次扩展节点时,算法根据冲突检测约束及动力学限制筛除不可行解,并更新地面风险分布 $R_{\text{ground}}(P_i(t))$。通过多起点并行搜索与风险缓存机制,集中式 A* 算法可在保证全局最优的前提下提升计算效率。集中式中 A* 算法的关键步骤如下。

Step 1(全局冲突检测)　对所有飞行器的联合状态进行冲突预测,确保扩展动作在未来规划窗口内无交叉风险。

Step 2(联合动作建模)　动作空间包含所有飞行器的速度、航向,以及高度联合变化,维度高但能保证整体最优性。

Step 3(地面风险预测更新)　在启发函数中引入未来风险分布,冲突解脱时有利于提前规避地面高风险区域。

Step 4(并行扩展与风险缓存)　通过多起点并行扩展与地面风险缓存提升高维搜索效率。

2.3.2　分布式策略的求解方法

分布式策略以单机局部最优为目标,每架飞行器独立运行 A* 算法进行局部航迹修正。与集中式不同,分布式策略中 A* 算法的搜索空间仅包含个体状态 N_i 启发函数设计更加侧重于实时性与冲突解脱能力。为增强算法的密度适应性,本文在启发函数中引入局部密度加权项为

$$f_i(n)=g_i(n)+h_i(n)+\frac{\rho}{\rho_{\text{ref}}} \tag{19}$$

当局部密度较高时,算法自适应地扩大检测半径使飞行器能够提前识别潜在冲突并规避局部振荡,从而增强高密度环境下的鲁棒性。需要注意的是,此过程不会改变飞行器之间的最小安全间隔,因此不会对空域容量造成影响。分布式策略中 A* 算法不依赖全局通信,仅基于 $N_i(t)$实现快速实时规划,求解在局部最优意义下最小化个体风险 S_i。

分布式策略中 A* 算法的关键步骤如下。

Step 1(局部邻域冲突检测)　基于密度加权检测半径筛选邻居集合,用于预测时间窗口内可能的局部冲突。

Step 2(局部动作生成)　动作集合仅包含单架飞行器可执行的航向、高度,以及速度微调动作。

Step 3(密度加权启发函数更新)　高密度区域扩大检测范围并提高对“靠近高风险区域”的惩罚权重,实现快速避让。

Step 4(局部约束过滤)　确保节点满足动力学限制、最小安全间隔,以及优先级避让规则。

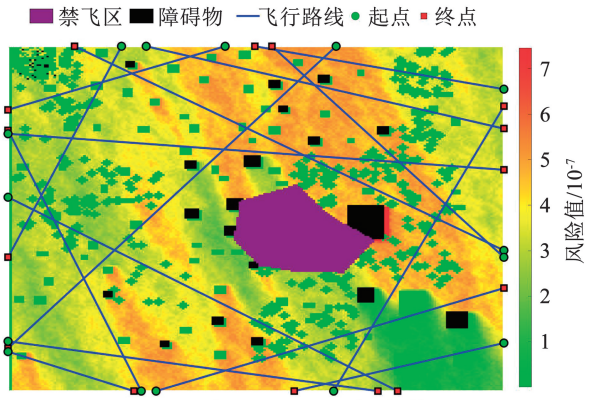
Step 5(实时性优化)　采用有限深度搜索与滚动规划策略以满足实时运行需求。

3 仿真系统配置

3.1 仿真环境设置

基于 Python 3.11 构建了边长 2 km、垂直高度 30 ~ 200 m 的三维城市仿真环境。地面区域采用文献[30]的地面风险评估模型进行栅格化处理，100 m × 100 m 网格叠加人口密度、遮蔽等多层数据，形成可映射至空域的地面风险图谱。所有 eVTOL 起降点位于空域边界外并执行穿越任务，初始进入高度设为 112 ~ 118 m，进入时间限制为 180 s。

为提高仿真结果的统计可靠性与代表性，本文在相同 eVTOL 数量条件下随机生成 1 200 个独立运行场景。各场景的起降点与航迹均由随机算法生成，以覆盖多种密度分布和空间交叉特征。图 1 展示了在 30 m 高度、15 架 eVTOL 条件下的运行场景。从图 1 可以看出，飞行高度超过 30 m 后，地面风险值不再随高度变化[30]，因此本文采用的地面风险地图在仿真空域内可用于不同高度层。其中，建筑物高度仅通过遮蔽效应微调地面风险分布，不影响总体风险水平。



注：风险值为单场景示意标注，非本文定量结果。

图 1 15 架 eVTOL 运行态势图

Fig. 1 Operation scenario of 15 eVTOL aircraft

3.2 运行参数设定

鉴于多数 eVTOL 机型尚处于研发阶段，缺乏公开运行数据，本文选取已获得中国民航局型号合格证的 EH216-S 作为仿真对象。依据制造商技术资料与相关研究[31-32]，设置仿真模型的关键参数见表 1。

表 1 EH216-S 运行参数设置

Tab. 1 EH216-S operational parameter settings

d_0/m	v_0/(km · h^{-1})	$\Delta h'$/m	v'/(km · h^{-1})	φ'/(°)	θ'/(°)
82	100	170	20	30	360

根据表 1 所示的参数配置，飞行器在仿真初始阶段以速度 100 km/h、任意航向角，以及水平飞行姿态(俯仰角 0°)进入预设空域。在集中式策略中，中央管理节点生成的解脱指令需经管制员确认，因此其解脱响应时间设为 4.1 s(含决策与执行过程)；分布式策略因具备自主决策特性，响应时间设为 2.0 s[33]。本文采用理想通信与完美感知假设，以隔离并聚焦于运行密度对策略性能的核心影响；所设置的响应延迟旨在体现现实运行中最关键的时间制约因素。在机动指令上，集中式策略的高度层调配遵循文献[33]中“先垂直、后水平”的集中式策略指令优先原则，分布式策略则基于自主评估实现最优机动。

3.3 仿真运行模式设计

为系统比较集中式与分布式冲突解脱策略在不同运行情形下的性能差异，本文设置 4 种典型的 eVTOL 运行模式：1)同等级固定航路模式。所有 eVTOL 沿预设航线运行，冲突解脱后需回归原航线并继续飞行。2)同等级动态航路模式。冲突解脱后，eVTOL 基于当前位置与目标点实时重规划航迹，代价函数综合考虑飞行距离与地面风险，并避开禁飞区与障碍物。3)优先级固定航路模式。设定优先级与普通级两类飞行器，若双方等级不同，冲突时优先级飞机保持原航迹，普通级飞机执行避让；若双方等级相同，则均执行解脱。4)优先级动态航路模式。在优先级机制基础上引入航迹重规划，普通级飞机在解脱后重新规划航迹，优先级飞机保持原航线。

3.4 仿真评价指标

为定量评估不同策略的性能，本文选取冲突解脱失败率与地面风险值作为主要指标。冲突解脱失败率定义为发生至少 1 架 eVTOL 解脱失败的运行场景占总场景数的比例；地面风险值表示飞行器坠落时对地面造成的期望伤亡人数(人/次坠落)。需要注意的是，本文定义的“冲突解脱失败”事件，包含了因算法在碰撞前规定的决策时间内未输出可行解(即计算超时)而导致的失败。因此，冲突解脱失败率是一个同时衡量算法路径规划能力与计算时效性的综合性能指标。

此外，为量化评估所提混合策略相对于基准策略的综合性能提升，本文采用相对改进率对上述两个指标的数据进行处理，其计算公式为

$$G = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{M_{单一}(x_i) - M_{混合}(x_i)}{M_{单一}(x_i)} \tag{20}$$

式中：G 为改进率，$M_{单一}(x_i)$、$M_{混合}(x_i)$ 分别为在密度 x_i 下的性能指标测量值（分别采用单一策略、混合策略的冲突解脱失败率或地面风险值）。

4　仿真结果与分析

4.1　仿真流程

图 2 所示为 eVTOL 冲突解脱的仿真流程图。整个仿真过程以集中式、分布式，以及改进分布式策略架构为基础，在上述 4 种运行模式下进行，反映不同架构与运行模式下的冲突解脱特征。

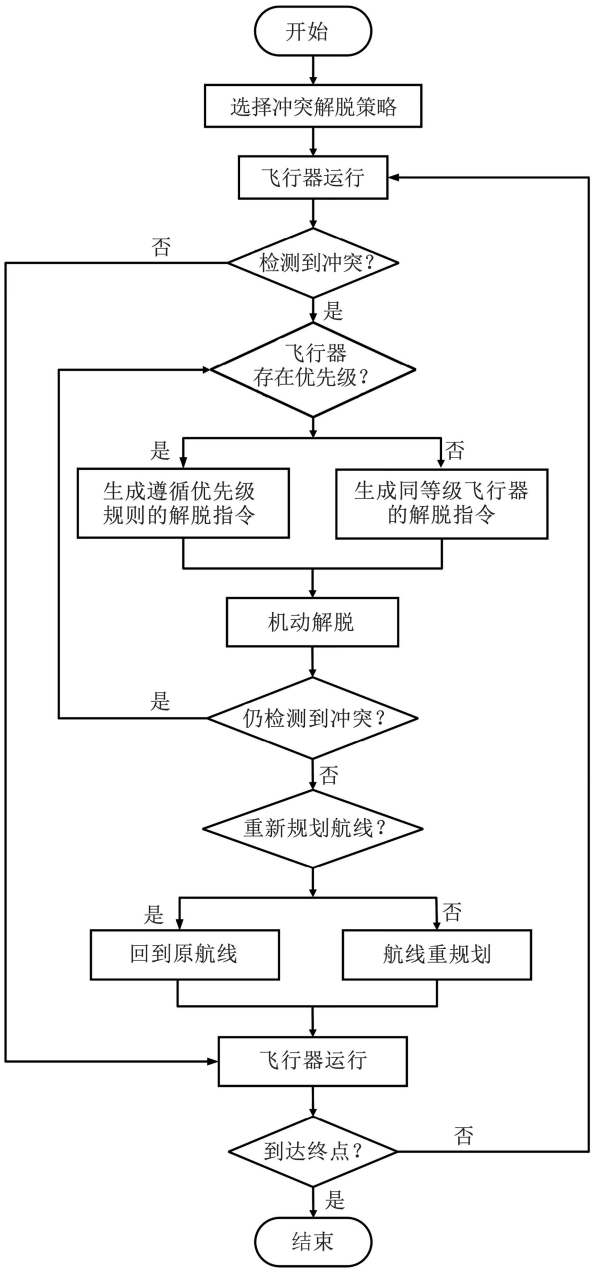


图 2　仿真流程图

Fig. 2　Simulation flowchart

4.2　4 种典型运行模式下仿真结果

为评估所提出的改进型密度加权速度障碍模型的有效性与优势，本文对标准分布式策略及基于该改进模型的分布式策略进行了对比分析。

4.2.1　同等级固定航路模式

图 3 对比了集中式、分布式，以及改进分布式策略在固定航路模式下的冲突解脱失败率与地面风险值。从图 3 可以看出，当运行密度低于性能交叉点时，集中式策略在两项指标上均表现最佳；超过该点后，分布式与改进分布式策略性能更优。改进分布式策略在全密度范围内均优于原分布式策略，且其曲线更平滑、振荡更小，体现出更好的鲁棒性。地面风险值与冲突解脱失败率变化趋势基本一致，二者的性能反转点亦高度吻合。

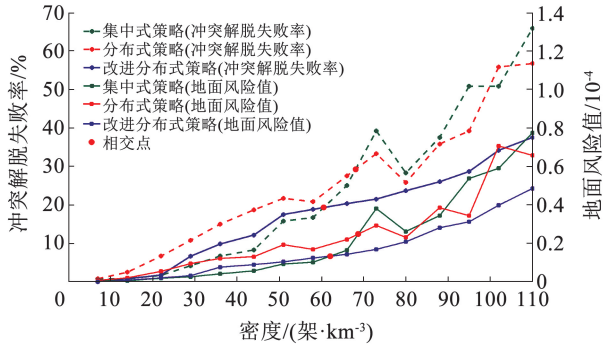


图 3　同等级 eVTOL 固定航路模式 3 种策略性能对比

Fig. 3　Performance comparison of three strategies for same-priority eVTOLs in fixed-route mode

4.2.2　同等级动态航路模式

图 4 展示了动态航路模式下 3 种策略的对比结果。从图 4 可以看出，动态重规划并未显著改变 3 类策略的相对性能顺序，其性能反转点与固定航路模式基本一致，说明航迹更新机制对策略总体表现影响有限。

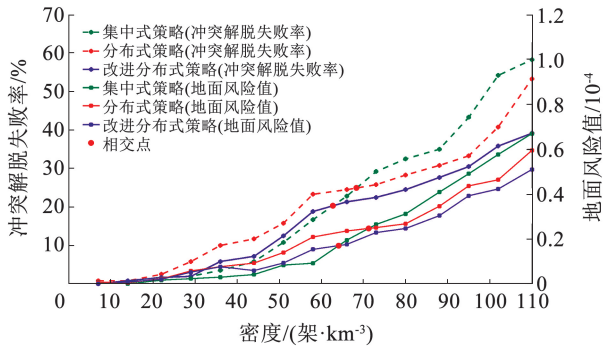


图 4　同等级 eVTOL 动态航路模式 3 种策略性能对比

Fig. 4　Performance comparison of three strategies for same-priority eVTOLs in dynamic route mode

4.2.3 优先级固定航路模式

为避免系统同质化或优先级分配过度倾斜，并有效评估调度策略的差异性，仿真中将高优先级 eVTOL 的比例设定为系统总量的 30%。具体仿真结果如图 5 所示。

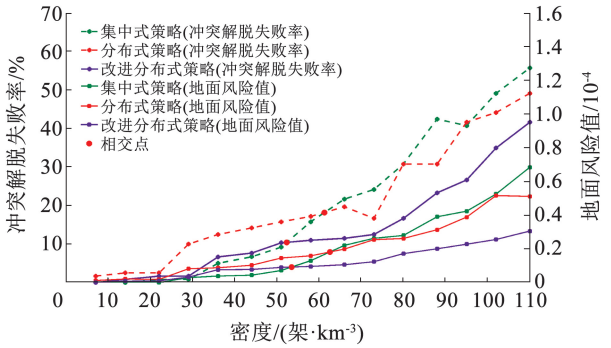


图 5 优先级 eVTOL 固定航路模式 3 种策略性能对比

Fig. 5 Performance comparison of three strategies for priority-based eVTOLs in fixed-route mode

通过图 3、图 5 的对比分析可知，优先级机制的引入缩小了集中式策略的性能优势区间。而分布式策略与改进分布式策略的可扩展性提升。总体规律保持一致：低密度下集中式策略更优，高密度下分布式策略占优。

4.2.4 优先级动态航路模式

图 6 展示了优先级动态航路模式下的性能对比。从图 6 可以看出，在航迹重规划与优先级机制的共同作用下，3 类策略的性能相关性保持稳定，冲突解脱失败率与地面风险值仍呈正相关趋势。改进分布式策略在该模式下依然保持最优，验证了其在复杂运行条件下的稳定性与适应性。

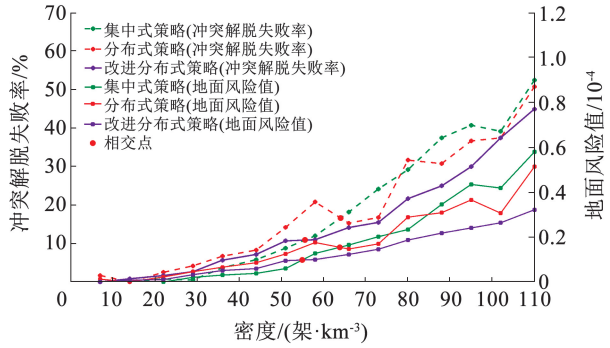


图 6 优先级 eVTOL 动态航路模式 3 种策略性能对比

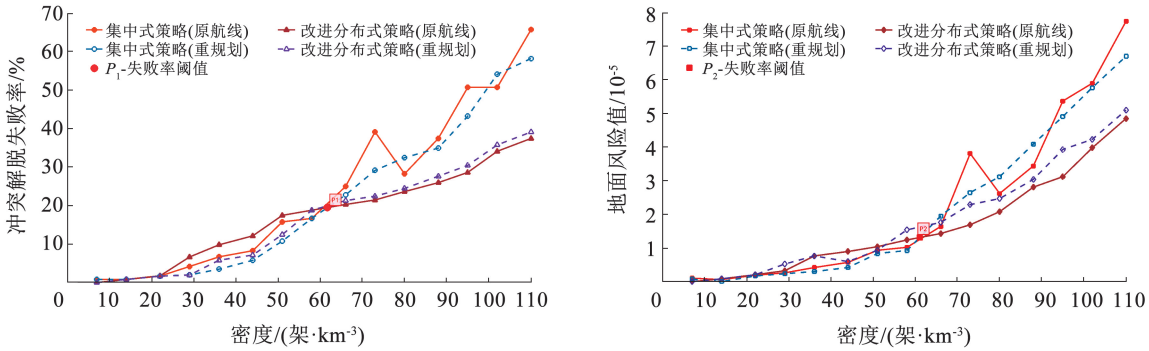
Fig. 6 Performance comparison of three strategies for priority-based eVTOLs in dynamic route mode

4.3 实验分析

上述实验结果表明，无论是否引入优先级机制，当运行密度低于临界阈值（相交点）时，集中式策略展现出更优的性能；而超过临界阈值后，改进分布式策略则更具优势。为提升 UAM 系统的安全性，本文进一步仿真分析冲突解脱后的行为操作策略，以确定系统最优运行方案。

如图 7 所示，运行密度低于临界阈值 P_1/P_2 后，航迹重规划策略在整体性能上展现出一定优势；一旦运行密度超过该阈值，分布式策略架构结合返回原航线策略更优。需要注意的是，冲突解脱失败率与地面风险值对应的阈值 P_1 与 P_2 几乎重合，进一步印证了二者间存在高度一致性。为增强结论的稳健性，接下来对优先级配置下的实验数据进行了综合对比分析。

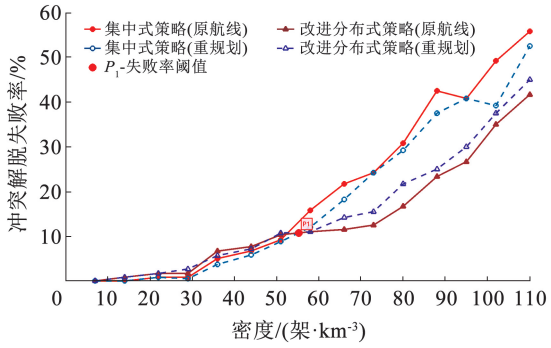
如图 8 所示，上述规律依然成立，一致验证了不同策略的性能反转现象及与运行密度阈值的依赖关系。



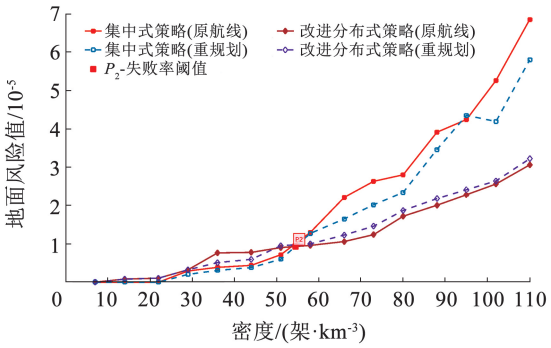
(a) 冲突解脱失败率对比 (b) 地面风险值对比

图 7 同等级 eVTOL 冲突解脱后两种行为操作性能对比

Fig. 7 Performance comparison of two post-resolution operations for same-priority eVTOLs



(a) 冲突解脱失败率对比



(b) 地面风险值对比

图 8　优先级 eVTOL 冲突解脱后两种行为操作性能对比

Fig. 8　Performance comparison of two post-resolution operations for priority-based eVTOLs

5　仿真实验优化

现实交通系统中,道路车辆密度具有显著的时空异质性特征,即核心路段在高峰期持续拥挤,而外围区域相对稀疏。类比于未来 UAM 系统,空域资源同样呈现出动态非均匀分布特性。基于前述两类策略的最优策略分析,本文提出一种基于密度阈值的混合控制机制:在低、高密度区间分别采用单一策略,在中间两类密度过渡区间设置协同缓冲带,实现集中式策略与分布式策略的动态切换与协同运行。

5.1　弹性缓冲区实现机制

为避免策略切换在密度阈值附近出现频繁的往返抖动,本文在集中式策略与分布式策略之间设置了可渐进过渡的弹性缓冲区。该机制并非依赖严格数学公式,而是基于低空运行组织模式及密度监测方式进行的工程化实现。在低密度运行阶段,城市低空运行以人工监视为主、间隔保持为辅,飞行器之间的相互影响较弱,集中式策略能够凭借全局信息优势实现高效的整体解脱与规划;随着运行密度上升,空域逐步向“空域栅格化”方向发展,网格内的航迹数量与局部流量变化成为主要运行依据,此时飞行器更依赖自主判断与局部感知,分布式策略更具优势。

基于上述特点,密度在低—高之间的过渡区间被定义为弹性缓冲区。在该区间内,两类策略以协同方式共同工作:集中式策略提供全局趋势信息,例如潜在拥堵方向或系统级冲突风险变化;分布式策略负责局部规避与实时响应,用于提高局部稳定性。两者的输出在实现层面通过运行管理逻辑进行整合,而非进行硬切换,从而使两种策略转换呈现缓慢、渐进、不中断的形式,实现系统从“中心规划”向“局部自主”的自然过渡。

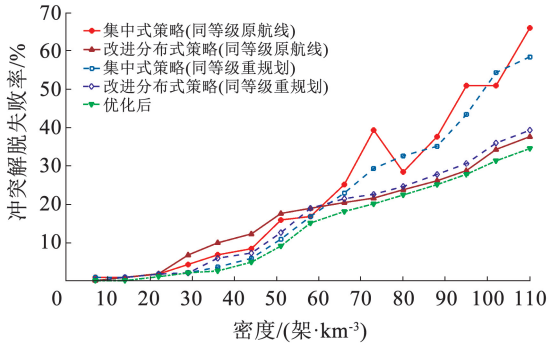
5.2　同等级 eVTOL 优化分析

结合同等级固定航路模式与同等级动态航路模式的实验结果可知,运行密度低于 58 架/km^3 时,集中式策略结合航迹重规划在冲突解脱失败率与地面风险值控制方面表现最佳;当密度超过 66 架/km^3 后,改进分布式策略配合固定航线更具优势(图 9)。为实现策略间的平滑过渡,在 58 ~ 66 架/km^3 之间设置弹性缓冲区间。系统根据实时密度变化趋势与性能监测结果,自适应选择集中式策略或分布式策略作为主导机制。当密度接近下限时优先采用集中式重规划策略,而接近上限时逐步过渡至改进分布式策略或固定航线策略。

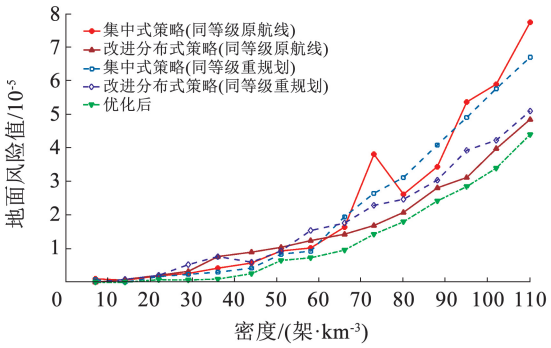
基于式(20)对仿真数据的处理以及图 9 中两种策略性能的对比可知,采用密度自适应混合策略,同等级运行模式下,冲突解脱失败率相较于采用传统单一策略降低了约 24.1%,并且地面风险值降低了约 39.1%。这充分证明,通过策略适应密度区间与协同缓冲机制,eVTOL 运行系统在安全性与运行效率方面均优于单一策略系统。

5.3　优先级 eVTOL 优化分析

结合优先级固定航路模式与优先级动态航路模式的实验数据及图 7 的分析结果,当运行密度低于 51 架/ km^3,集中式策略结合航迹重规划表现最佳;当密度超过 58 架/ km^3,改进分布式策略与固定航线的组合方案更具优势(图 10)。为提升系统鲁棒性,在密度阈值附近同样设置弹性缓冲区,通过实时性能监测与评估实现策略动态切换。从图 10 可以看出,该机制在优先级体系下仍能保持性能优势,验证了混合策略在多运行场景中的通用性与稳定性。



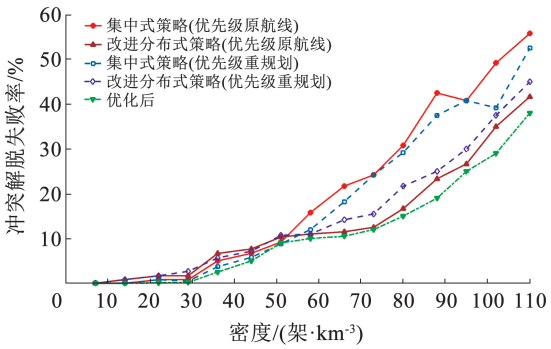
(a) 冲突解脱失败率对比



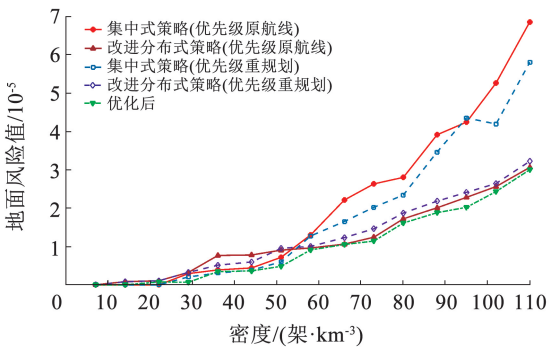
(b) 地面风险值对比

图 9 同等级 eVTOL 性能综合对比

Fig. 9 Comprehensive performance comparison of same-priority eVTOLs



(a) 冲突解脱失败率对比



(b) 地面风险值对比

图 10 优先级 eVTOL 性能综合对比

Fig. 10 Comprehensive performance comparison of priority-based eVTOLs

同样,根据仿真评价指标的评估方法对数据进行量化分析。从图 10 可以看出,该混合策略机制在引入飞行器的优先级运行模式下,同样展现出卓越的适应性。在此模式下,系统的冲突解脱失败率降低了约 18.3%,地面风险值降低了约 8.4%。该结果一致地验证了策略适应区间与协同缓冲机制对于优先级 eVTOL 系统同样适用,证明了所提混合策略在不同运行场景下具备稳健的通用性与有效性。

从图 9、10 可以看出,通过同等级与优先级系统的仿真优化分析,验证了“策略适用密度区间”与“协同缓冲机制”的有效性。低密度下集中式策略–重规划策略优先保障安全性,高密度下改进分布式策略–固定航线策略确保实时性,而中间区间的弹性缓冲实现了策略间的动态平衡。该机制建立了运行密度与最优解脱策略的映射关系。

6 结 论

1)方法论层面。构建了“策略适用密度区间”理论框架与混合策略动态切换机制,实现了集中式策略与改进分布式策略在不同密度条件下的协同优化与平滑过渡;建立了融合冲突解脱失败率、平均解脱时间,以及地面风险的空地协同安全评估体系,为策略性能提供了多维度、可量化的评价依据;针对传统速度障碍法在高密度场景下适应性不足的问题,提出了基于局部密度权重的改进速度障碍模型,有效提升了分布式策略的决策合理性与环境适应性。

2)性能与结果层面。系统仿真实验揭示了运行密度是决定策略性能的关键因素:在低密度条件下,集中式策略结合航迹重规划在冲突解脱失败率与运行协调性方面表现更优;在高密度条件下,改进分布式策略配合固定航线在系统扩展性、实时响应能力,以及稳定性方面更具优势;在过渡密度区间内,所设计的协同缓冲机制能够依据实时密度变化实现策略动态优选,保障系统性能平稳过渡。

3)综合效能层面。所提出的密度自适应混合策略在多种运行模式(包括同等级与优先级、固定航路与动态重规划)下均表现出显著优势:与单一最优策略相比,混合策略使系统冲突解脱失败率分别降低约 24.1% 与 18.3%,地面风险值分别降低约 39.1% 与 8.4%,在提升安全性的同时兼顾了运行效率,验证了其在复杂动态空域中良好的适用性与鲁棒性。

4)需要注意的是,本文研究基于仿真环境开

展,所确定的密度阈值尚未充分考虑真实城市低空环境中广泛存在的风场扰动、通信延迟,以及气象不确定性等因素。后续研究将结合实测运行数据与半实物仿真平台,引入动态风场模型与随机干扰约束,进一步优化策略切换逻辑与验证方法,以提升混合策略在真实复杂环境下的工程可行性与鲁棒性。

参考文献

[1] Chen Shulu, Evans A D, Brittain M, et al. Integrated conflict management for UAM with strategic demand capacity balancing and learning-based tactical deconfliction[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(8): 10049. DOI:10.1109/TITS.2024.3351049

[2] NASA. UTM: air traffic management for low-altitude drones[EB/OL]. (2015-05-11)[2025-11-05]. http://www.nasa.gov/sites/de-fault/files/atoms/files/utmfactsheet-11-05-15.pdf

[3] SESAR. U-space[EB/OL]. (2017-10-09)[2025-11-05]. http://www.sesarju.ed/sites/d-efaultt/documents/reports/U-Space%20Blueprint%20brochure%20final.pdf

[4] EUROCONTROL. UAS ATM integration[EB/OL]. (2018-11-27)[2025-11-05]. https://www.Eurocontrol.int/publication/unmanned-aircraft-systems-uas-atm-integration

[5] EUROCONTROL. U-space services implementation monitoring report[R/OL]. (2020-11-02)[2025-11-05]. https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-11/uspace-services-implementation-monitoring-report-2020-1-2.pdf

[6] Nakamura H, Harada K, Oura Y, et al. UTM concept demonstrations in Fukushima; requirements for UAS-port operation with different UAS operators[C]//2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Dallas: IEEE, 2018: 1295. DOI: 10.1109/ICUAS.2018.8453416

[7] 中国民用航空局航空器适航审定司. 基于运行风险的无人机适航审定指导意见[EB/OL]. (2019-01-25)[2025-11-05]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201901/P020190125609946283900.pdf
Airworthiness Department of the Civil Aviation Administration of China. Guidance on UAV airworthiness certification based on operational risks[EB/OL]. (2019-01-25)[2025-11-05]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZFGW/201901/P020190125609946283900.pdf

[8] 中国民用航空局航空器适航审定司. MH/T 2011-2019 无人机云系统数据规范[S/OL]. (2019-10-22)[2025-11-05]. http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/BZGF/HYBZ/202008/P020200824383769494708.pdf
Airworthiness Department of the Civil Aviation Administration of China. MH/T2011-2019 unmanned aerial vehicle cloud system data specification[S/OL]. (2019-10-22)[2025-11-05]. http://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/BZGF/HYBZ/202008/P020200824383769494708.pdf

[9] 中国民用航空局航空器适航审定司. MH/T 2009-2017 无人机云系统接口数据规范[S/OL]. (2017-10-20)[2025-11-05]. http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201707/P020170711601854912740.pdf
Airworthiness Department of the Civil Aviation Administration of China. MH/T 2009-2017interface data specifications for unmanned aircraft cloud system[S/OL]. (2017-10-20)[2025-11-05]. http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/201707/P020170711601854912740.pdf

[10] Ren Jie, Qu Shiru, Wang Lili, et al. An en route capacity optimization model based on air traffic control process[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2022, 19(4): 4277. DOI: 10.3934/mbe.2022198

[11] Lema-Esposto M F, Amaro-Carmona M Á, Valle-fernandez N, et al. Optimal dynamic airspace configuration (DAC) based on state-task networks (STN)[C/OL]//Proceedings of the 11th SESAR Innovation Days, 2021: 7. https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documens/sid/2021/papers/SIDs_2021_paper_48.pdf

[12] 季灵,吴薇薇,吴思韵,等. 基于多智能体航空公司航班恢复协同决策方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(5): 868
Ji Ling, Wu Weiwei, Wu Siyun, et al. Multi-agent based collaborative decision making approach for airline flight recovery[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 868. DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.05.013

[13] Deniz S, Wang Zhenbo. Autonomous conflict resolution in urban air mobility: a deep multi-agent reinforcement learning approach[C]//AIAA Aviation Forum and Ascend 2024. Reston: AIAA, 2024: AIAA2024-4005. DOI: 10.2514/6.2024-4005

[14] Xue Min. Urban air mobility conflict resolution: centralized or decentralized?[C]//AIAA Aviation 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020: AIAA2020-3192. DOI: 10.2514/6.2020-3192

[15] 陈雨童. 基于航迹运行的高级自主空域运行理论与方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2023
Chen Yutong. Theory and method of advanced autonomous airspace trajectory-based operation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023

[16] Bilimoria K, Lee H, Mao Zhihong, et al. Comparison of centralized and decentralized conflict resolution strategies for multiple-aircraft problems[C]//18th Applied Aerodynamics Conference. Reston: AIAA, 2000: 4268. DOI: 10.2514/6.2000-4268

[17] Huang Cheng, Petrunin I, Tsourdos A. Strategic conflict management using recurrent multi-agent reinforcement learning for urban air mobility operations considering uncertainties[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2023, 107(2): 20. DOI: 10.1007/s10846-022-01784-0

[18] 隋东, 蔡向嵘. 智能飞行冲突解脱算法的持续学习机制[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(10): 3300.
Sui Dong, Cai Xiangrong. Continual learning mechanism for intelligent flight conflict resolution algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2025, 47(10): 3300. DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2025.10.17

[19] Ribeiro M, Ellerbroek J, Hoekstra J. Improving algorithm conflict resolution manoeuvres with reinforcement learning[J]. Aerospace, 2022, 9(12): 847. DOI: 10.3390/aerospace9120847

[20] 岳仁田,牛萌. 大型固定翼无人机与有人机冲突探测方法与解脱策略[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(5): 70
Yue Rentian, Niu Meng. Conflict detection method and resolution strategies for large fixed-wing UAV and manned aircraft[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(5): 70. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2025.05.009

[21] Sui Dong, Xu Weiping, Zhang Kai. Study on the resolution of multi-aircraft flight conflicts based on an IDQN[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(2): 195. DOI: 10.1016/j.cja.2021.03.015

[22]童亮, 杨婕, 甘旭升, 等. 基于改进混沌蚁群算法的多机冲突解脱仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(1): 155
Tong Liang, Yang Jie, Gan Xusheng, et al. Simulation research on multi-aircraft conflict resolution based on improved chaotic ant colony algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(1): 155. DOI:10.16182/j.issn1004731x.joss.23-1117

[23]Zhang Xuejun, Guan Xiangmin, Hwang I, et al. A hybrid distributed-centralized conflict resolution approach for multi-aircraft based on cooperative co-evolutionary[J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(12): 1. DOI: 10.1007/s11432-013-4836-3

[24]Jenie Y I, Van Kampen E J, De Visser, et al. Selective velocity obstacle method for cooperative autonomous collision avoidance system for unmanned aerial vehicles [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. Reston: AIAA, 2013: AIAA2013-4627. DOI: 10.2514/6.2013-4627

[25]Wang Zhengyi, Delahaye D, Farges J, et al. Air traffic assignment for intensive urban air mobility operations[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2021, 18(11): 860. DOI: 10.2514/1.I010954

[26]李诚龙,屈文秋,李彦冬,等.面向 eVTOL 航空器的城市空中运输交通管理综述[J].交通运输工程学报, 2020, 20(4): 35
Li Chenglong, Qu Wenqiu, Li Yandong, et al. Overview of traffic management of urban air mobility (UAM) with eVTOL aircraft[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 35. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.04.003

[27]余莎莎, 陈艺君, 张学军. 城市低空场景下无人机运行对地风险量化评估[J/OL]. 北京航空航天大学学报. 2024-08-06. https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0244
Yu Shasha, Chen Yijun, Zhang Xuejun. Ground risk quantitative assessment for UAV operations in urban low-altitude scenarios[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2024-08-06. https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0244

[28]中华人民共和国交通运输部. 一般运行和飞行规则[EB/OL]. (2022-01-04)[2025-11-05]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/gz/202201/t20220129_3639033.html

[29]Qu Wenqiu, Xu Chenchen Tan Xiang, et al. Preliminary concept of urban air mobility traffic rules[J]. Drones, 2023, 7(1): 54. DOI: 10.3390/drones7010054

[30]Zhu Yuanjun, Zhang Xuejun, Li Yan, et al. Grid matrix-based ground risk map generation for unmanned aerial vehicles in urban environments[J]. Drones, 2024, 8(11): 678. DOI: 10.3390/drones8110678

[31]王兴隆, 王友杰. 面向城市低空的多机型 eVTOL 安全间隔评估[J]. 航空学报, 2025, 46(1): 268
Wang Xinglong, Wang Youjie. Safety interval evaluation for multi-aircraft eVTOL in urban low altitude[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(1): 268. DOI:10.7527/S1000-6893.2024.30604

[32]王田. 交叉航路航空器碰撞风险研究[D]. 天津:中国民航大学, 2024
Wang Tian. Study on the collision risk of aircraft on intersecting routes[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2024. DOI: 10.27627/d.cnki.gzmhy.2024.000716

[33]Chin C H. Centralized and decentralized approaches to advanced air mobility traffic management [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2024

(编辑 张 红)

(上接第 214 页)

[21]肖鹏, 于海霞, 黄龙, 等. 基于 MDEPSO 算法的无人机三维航迹规划[J]. 兵工学报, 2025, 46(7): 216
Xiao Peng, Yu Haixia, Huang Long, et al. 3D path planning of unmanned aerial vehicle based on MDEPSO algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(7): 216. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0710

[22]WU Yu, LOW K H. An adaptive path replanning method for coordinated operations of drone in dynamic urban environments[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(3): 4600. DOI:10.1109/JSYST.2020.3017677

[23]Zheng Yue, Li Ang, Chen Zihan, et al. MPN-RRT*: a new method in 3D urban path planning for UAV integrating deep learning and sampling optimization[J]. Sensors, 2025, 25(13): 4142. DOI:10.3390/s25134142

[24]Wu Yu, Wu Shaobo, Hu Xinting. Cooperative path planning of UAVs & UGVs for a persistent surveillance task in urban environments[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(6): 4906. DOI:10.1109/JIOT.2020.3030240

[25]王建峰, 贾高伟, 郭正, 等. 多无人机协同任务规划方法研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(10): 3437
Wang Jianfeng, Jia Gaowei, Guo Zheng, et al. Review of research on multi-UAV collaborative mission planning method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(10): 3437. DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2024.10.21

[26]刘东来, 江波, 郑远, 等. 城市空中交通空域架构及轨迹规划方法[J]. 科技和产业, 2023, 23(8): 268
Liu Donglai, Jiang Bo, Zheng Yuan, et al. Airspace structure and trajectory planning method for urban air mobility[J]. Science Technology and Industry, 2023, 23(8): 268. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1807.2023.08.041

[27]程洁, 郑远, 李诚龙, 等. 面向城市超低空物流场景的最小风险路径规划算法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 690
Cheng Jie, Zheng Yuan, Li Chenglong, et al. Minimum risk path planning algorithm for urban very-low-level logistics scenarios[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2): 690. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2023 02.033

[28]张涛, 刘威, 王锐, 等. 考虑无线充电的无人机路径在线规划[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(1): 30
Zhang Tao, Liu Wei, Wang Rui, et al. Online path planning for unmanned aerial vehicles considering wireless charging[J]. Control Theory & Applications, 2024, 41(1): 30. DOI: 10.7641/CTA.2023.20330

[29]Kalk A, Leuthner L, Kupper C, et al. An aging-optimized state-of-charge-controlled multi-stage constant current (MCC) fast charging algorithm for commercial Li-ion battery based on three-electrode measurements[J]. Batteries, 2024, 10(8): 267. DOI:10.3390/batteries10080267

(编辑 张 红)