低空飞行器与智能交通跨模式协同与调度研究

徐 佳[1]，程东浩[2]，施 文[2]

（1. 广州民航职业技术学院民航经营管理学院，广州 510403；2. 中国民航科学技术研究院，北京 100028）

摘要： 针对城市低空飞行器快速增加后与地面智能交通系统分属不同管理域、运行规则差异大、调度资源难以统一配置等问题，提出一种面向低空-地面一体化运行的跨模式协同与调度方法。首先，将低空飞行器、道路车辆、地面换乘节点、垂直起降点和管制空域抽象为异构交通网络，构建包含时间、能耗、容量、安全间隔和碳排放约束的跨模式状态模型。然后，提出“空地走廊-节点缓冲-滚动调度”协同框架，将低空航路、道路路段和换乘节点统一映射为时空资源单元，通过跨模式阻抗函数刻画不同交通方式之间的运行代价转换关系。在此基础上，设计考虑任务紧迫度、交通拥堵度和空域冲突风险的分层调度策略。最后，构建典型城市片区算例，并补充拥堵增强、节点受限、空域扰动和混合需求等扩展工况进行对比验证。结果表明，在设定仿真条件下，所提方法能够在保障安全间隔的前提下降低平均任务完成时间、减少空域冲突等待和地面拥堵传播，提高低空飞行器与智能交通系统的整体协同效率。

关键词： 低空飞行器；智能交通；跨模式协同；空地一体化；滚动调度；时空资源

中图分类号： U495 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－1807(2026)11－0012－08

低空经济的发展使无人机物流、空中巡检、应急救援、城市空中通勤等场景逐步从示范运行走向常态应用[1-2]。低空飞行器具有跨越地面拥堵、点到点快速到达和部署灵活等优势，但其运行并非脱离城市交通系统独立存在。飞行器的起降需要依赖地面垂直起降点、换电补能设施、地面接驳车辆和周边道路集散能力；同时，飞行器在低空航路中运行还会受到空域容量、天气扰动、建筑遮挡、禁飞区和安全间隔限制[3-4]。因此，低空交通与地面智能交通之间具有明显的耦合关系。

现有研究大多从无人机路径规划、空域冲突检测、智能网联车辆调度或多式联运路径选择等角度展开[5-7]。对于飞行器而言，常见方法侧重航迹规划、姿态控制、抗扰控制和编队避障。参考飞行器控制类论文的写作思路，通常会先从实际问题出发，明确对象结构和约束条件，再进行建模、方法设计和仿真验证。以可倾转双旋翼飞行器研究为例，从低空复杂应用场景引出飞行器结构和控制问题，随后建立动力学模型，提出控制分配和抗扰控制方法，并通过仿真与实验验证有效性，这种问题、模型、方法和验证的组织方式对本文具有借鉴意义[8-10]。在本文中不研究飞行器本体控制，而是将低空飞行器视为城市交通网络中的一种可调度运载单元，重点研究其与地面智能交通的跨模式协同问题。

从城市交通组织角度看，低空飞行器引入后至少带来3类新问题：①运行空间由二维道路网络扩展为空地复合网络，传统道路最短路和车辆派单方法无法直接描述航路容量、起降点排队和空域冲突约束；②低空飞行器速度快但起降、补能和安全检查时间不可忽略，若只按飞行时间最短进行调度，可能导致垂直起降点拥堵或地面接驳延误；③应急、物流、巡检和通勤等任务具有不同时间敏感性和服务等级，单一规则难以兼顾高优先级任务响应和普通任务公平性[11-14]。

为解决上述问题，提出一种低空飞行器与智能交通跨模式协同与调度方法。与单纯飞行器航迹规划不同，将低空航路、道路路段、换乘节点、起降容量和任务时限统一纳入时空资源模型，并通过分层调度实现任务分配、模式选择、路径规划和滚动修正。本文的主要工作如下。

（1）构建低空-地面异构交通网络模型。将低空航路、地面道路、垂直起降点、换乘站和禁限飞区域

收稿日期： 2026-04-29

基金项目： 民航局2024年安全能力建设项目（x242146903629）

作者简介： 徐佳（1992—），女，重庆人，硕士，讲师，研究方向为低空飞行器与智能交通跨模式协同；程东浩（1984—），男，安徽淮南人，博士，副研究员，研究方向为低空经济安全管理；施文（1995—），女，蒙古族，辽宁新民人，硕士，助理研究员，研究方向为低空飞行器运行风险。

统一表示为跨模式时空图,建立包含时间、能耗、安全间隔、节点容量和模式转换代价的状态描述。

(2)提出跨模式阻抗函数和协同调度框架。针对低空飞行与地面交通在速度、容量、成本和风险方面的差异,设计综合阻抗函数,并提出空地走廊-节点缓冲-滚动调度框架,使飞行器和地面车辆能够在同一时空资源池内协调运行。

(3)设计分层滚动调度方法。上层根据任务属性进行交通模式选择和节点匹配,中层完成空地路径联合规划,下层根据空域扰动、道路拥堵和起降点排队状态进行局部重调度。

(4)构建仿真实验场景,验证所提方法在任务完成时间、等待时间、冲突次数、能耗和准点率方面的改进效果。

1　跨模式交通系统描述

1.1　场景定义

考虑由低空飞行器、地面智能车辆、低空航路、道路网络和垂直起降点组成的城市片区交通系统。任务集合记为 $R=\{1,2,\cdots,N\}$,每个任务 r 由起点 o_r、终点 d_r、发布时间 t_r^0、最晚完成时间 $t_r^{\max}$、载荷需求 w_r 和优先级 p_r 表示。任务可由地面车辆单独完成,也可由低空飞行器单独完成,还可采用地面接驳-低空飞行-地面配送的组合方式完成。

低空飞行器集合记为 $U=\{1,2,\cdots,M\}$,其状态包括当前位置、电量、载荷能力、可用时间和航路占用状态。地面车辆集合记为 $V=\{1,2,\cdots,K\}$,其状态包括道路位置、剩余载荷、服务任务和预计可用时间。垂直起降点集合记为 $P=\{1,2,\cdots,L\}$,每个起降点具有有限泊位、充换电能力和安全检查能力。

跨模式运行中,任务并不总是选择速度最快的低空飞行方式。对于短距离且道路通畅的任务,地面车辆具有成本低、容量高的优势;对于道路拥堵明显、时间约束严格或应急响应类任务,低空飞行器更适合承担主运输环节;对于起终点附近缺少起降点的任务,则需要地面接驳与低空飞行组合完成。因此,模式选择和调度决策必须同时考虑道路拥堵、低空航路容量、起降点等待和任务时限[15-16]。

1.2　空地异构网络建模

将低空与地面交通系统表示为异构图:

$$G=(V,E) \tag{1}$$

式中:节点集合 $V=V_g\cup V_a\cup V_c$,V_g 为地面道路节点,V_a 为低空航路节点,V_c 为垂直起降和换乘节点;边集合 $E=E_g\cup E_a\cup E_c$,E_g 为地面道路边,E_a 为低空航路边,E_c 为跨模式转换边。对于边 e,定义其时变运行代价为

$$C_e(t)=\alpha_1 T_e(t)+\alpha_2 E_e(t)+\alpha_3 R_e(t)+\alpha_4 Q_e(t) \tag{2}$$

式中:$T_e(t)$ 为边 e 在时刻 t 的通行时间;$E_e(t)$ 为能耗或运行成本;$R_e(t)$ 为安全风险;$Q_e(t)$ 为排队等待或容量占用代价;α_i 为权重系数。地面道路边的 $T_e(t)$ 主要受交通流速度影响,低空航路边的 $T_e(t)$ 则受航路长度、飞行速度、风场和管制状态影响。跨模式转换边的代价由起降检查、装卸、充换电和地面接驳时间构成。为了描述空地资源占用,将时间离散为长度为 Δt 的时间片。对于任一边 e,其在时间片 τ 的剩余容量为

$$B_e(\tau)=\bar{B}_e-\sum_r x_{r,e}(\tau) \tag{3}$$

式中:$\bar{B}_e$ 为边容量:$x_{r,e}(\tau)=1$ 为任务 r 在时间片 τ 占用边 e,否则为 0。对低空航路而言,容量不仅受航路宽度约束,还受飞行高度层、安全间隔和交汇点冲突限制;对道路而言,容量主要由路段通行能力和信号控制状态决定。

1.3　跨模式协同难点

低空飞行器与智能交通协同调度的难点不在于某一条路径是否可行,而在于不同交通方式之间的资源占用具有不同时间尺度和约束性质。低空飞行器运行速度快,但起降点容量小,且航路冲突具有强安全约束;地面交通容量大,但容易受到拥堵传播影响;换乘节点既是低空飞行的起降资源,又是地面车辆的集散资源,一旦换乘节点发生排队,低空速度优势会被抵消。此外,调度决策具有明显动态性。任务不断到达,低空天气、道路拥堵、起降点排队和飞行器电量均会随时间变化。若采用静态一次性规划,实际执行过程中容易出现航路冲突、节点排队和任务超时[17-18]。因此,需要建立滚动更新机制,使调度结果能够随运行状态变化而调整。

2　跨模式协同调度框架

2.1　总体框架

提出的跨模式协同调度框架(图 1)由空地走廊、节点缓冲和滚动调度 3 个部分组成。空地走廊用于限定低空飞行器运行空间,并与地面主干道路形成对应关系;节点缓冲用于处理起降点、换乘点和交通枢纽的排队与安全检查;滚动调度用于根据实时状态更新任务分配和路径方案。

该框架的核心思想是低空交通不作为地面交通的简单替代,而作为受容量和节点约束限制的快速通道嵌入城市交通系统。任务是否进入低空走



图 1　低空飞行器与智能交通跨模式协同框架

廊，不仅取决于飞行距离，也取决于地面接驳时间、起降点等待时间和航路冲突风险。

2.2　跨模式阻抗函数

为实现低空和地面运行代价的统一比较，定义任务 r 在方案 s 下的综合阻抗为

$$J_{r,s}=\alpha_1 T_{r,s}+\alpha_2 E_{r,s}+\alpha_3 R_{r,s}+\alpha_4 W_{r,s}+\alpha_5 L_{r,s} \tag{4}$$

式中：$T_{r,s}$ 为任务完成时间；$E_{r,s}$ 为能耗或运行成本；$R_{r,s}$ 为空域或道路风险；$W_{r,s}$ 为换乘与排队等待；$L_{r,s}$ 为任务延误惩罚；α_i 为权重。对于高优先级任务，提高时间和延误权重；对于普通物流任务，提高能耗和资源占用权重。由此可避免所有任务盲目使用低空资源。延误惩罚项定义为

$$L_{r,s}=\max\{0,T_{r,s}+t_r^0-t_r^{\max}\} \tag{5}$$

低空航路风险项可表示为

$$R_{r,s}^a=\sum_{e\in P_{r,s}^a}[\beta_1 o_e(\tau)+\beta_2 h_e(\tau)+\beta_3 z_e] \tag{6}$$

式中：$P_{r,s}^a$ 为方案中的低空航路集合；$o_e(\tau)$ 为航路占用量；$h_e(\tau)$ 为天气或风场扰动系数；z_e 为禁限飞区邻近风险；β_i 为权重。该项使调度方法在航路繁忙或天气扰动增强时自动降低低空方案优先级。

2.3　模式选择与节点匹配

对于任务 r，候选方案集合包括地面直达方案 S_g、低空直达方案 S_a 和空地组合方案 S_m。其中，空地组合方案包含“起点-地面接驳-起飞点-低空飞行-降落点-地面配送-终点”6 个环节。系统根据综合阻抗选择最优方案[15]：

$$s_r^*=\arg\min_{s\in S_g\cup S_a\cup S_m} J_{r,s} \tag{7}$$

在节点匹配过程中，不能只选择距离任务起终点最近的垂直起降点，还需考虑其未来时间窗容量。设任务 r 选择起飞点 p_i 和降落点 p_j，其节点匹配代价为

$$H_r(p_i,p_j)=\alpha_1 d(o_r,p_i)+\alpha_2 d(p_j,d_r)+\alpha_3 q_{p_i}(t)+\alpha_4 q_{p_j}(t)+\alpha_5 \varphi_{ij} \tag{8}$$

式中：$d(\cdot)$ 为地面接驳距离；$q_p(t)$ 为节点排队长度；φ_{ij} 为从 p_i 到 p_j 的低空航路冲突估计值。通过该函数，系统能够避开局部过载起降点，减少因节点拥堵造成的低空等待。

2.4　滚动调度机制

调度周期设为 T。在每个调度周期内，系统读取新任务、飞行器位置、电量、道路速度、航路占用和起降点排队状态，对尚未执行或可调整的任务重新优化。滚动调度的目标函数为

$$\min_{r\in\Omega_t}(J_{r,s_r}+\lambda_1 D_r+\lambda_2 C_r) \tag{9}$$

式中：Ω_t 为当前调度窗口中的任务集合；D_r 为任务调整幅度惩罚；C_r 为计划稳定性惩罚；λ_i 为权重。设置这两个惩罚项的目的，是避免调度方案频繁变化导致执行端难以落实。

3　低空-地面一体化运行的跨模式协同与调度方法

3.1　空地复合时空资源网格

现有交通调度通常将地面道路和低空航路分别处理[19]。提出空地复合时空资源网格（图 2），

将地面路段、低空航路和起降节点统一映射到时间片上。每个资源单元均具有容量、占用状态、风险等级和可恢复时间。该处理方式的优点在于,不同交通方式能够在同一资源尺度下进行比较和协调。

该网格不仅记录当前状态,还记录未来占用计划。例如,某一低空航路当前可用,但在 3 min 后已经被高优先级任务占用,则普通物流任务在规划时需提前避让。该机制能够减少低空航路交汇点的二次冲突,并避免起降点短时集中排队。

3.2　任务紧迫度-交通拥堵度-空域风险耦合的模式选择

低空飞行器速度快,但并不适合承担所有任务。提出三因子耦合模式选择方法(图 3),将任务紧迫度 U_r、地面拥堵度 G_r 和空域风险 A_r 联合用于判断是否启用低空运输。定义低空启用指数为

$$\Pi_r = \sigma(a_1 U_r + a_2 G_r - a_3 A_r - a_4 W_r) \tag{10}$$

式中:$\sigma(\cdot)$为归一化函数;W_r 为起降等待强度;a_i 为权重。若 Π_r 高于阈值,则优先考虑低空或空地组合方案;否则优先采用地面方案。这样可以把低空资源留给真正需要的任务。

该方法的关键在于改变“距离越远越适合低空”的简单判断。对于时间不敏感但距离较远的任务,如果低空走廊拥挤且起降点排队严重,低空方案未必优;对于距离中等但道路严重拥堵的应急任务,即便起降点略有等待,低空方案仍具有价值。

3.3　带计划稳定性的滚动重调度

带计划稳定性的滚动重调度流程如图 4 所示。在动态交通环境下,重调度十分必要,但频繁改变任务方案会造成执行混乱。在滚动调度目标中加入计划稳定性惩罚,使系统只在扰动达到一定程度时调整方案。对于已经进入起降准备、正在飞行或



图 2　空地复合时空资源网格示意图

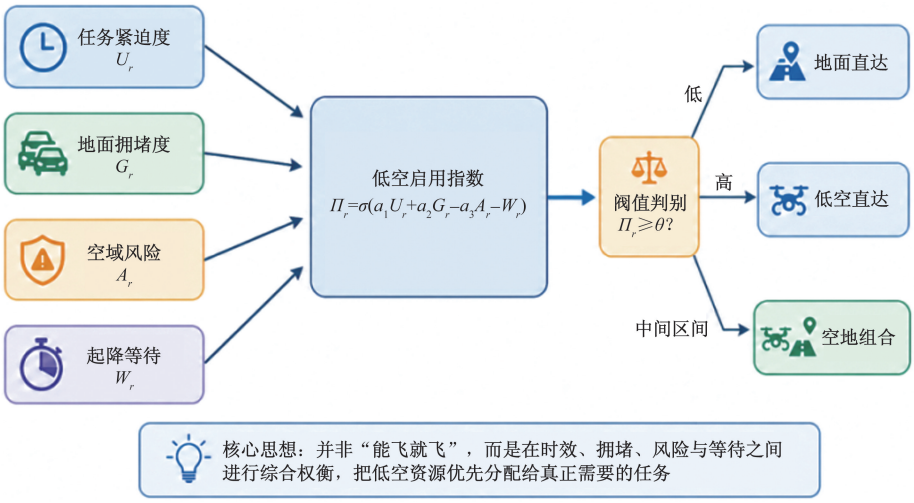


图 3　三因子耦合模式选择逻辑

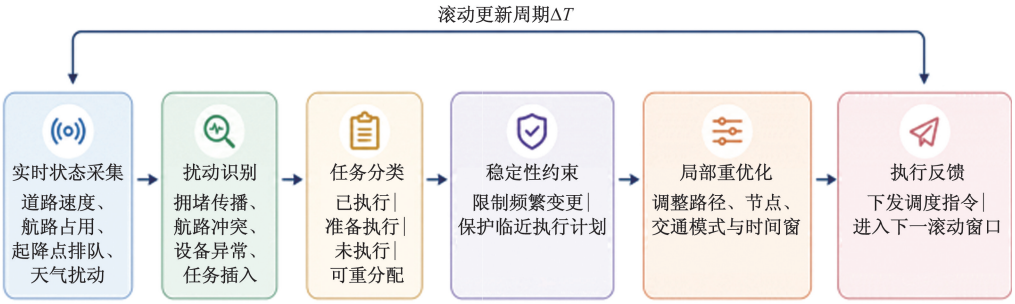


图 4　带计划稳定性的滚动重调度流程

接近交付的任务，系统提高调整成本；对于尚未执行且受扰动影响较大的任务，则允许重新分配。

该机制兼顾了实时性和可执行性，避免为了追求局部最优而频繁改变方案。对于工程应用而言，调度方案的稳定性与最优性同样重要，尤其是在低空飞行器涉及起降检查、航路申报和安全隔离的情况下。

4　跨模式调度算法

4.1　算法流程

跨模式调度算法主要按照候选方案生成、综合阻抗计算、资源可行性校验、任务分配和滚动修正的顺序展开：首先读取当前任务集合、飞行器状态、车辆状态、道路速度、航路容量和起降点排队状态；然后针对每个任务生成地面直达、低空直达和空地组合 3 类候选方案，并分别计算运行时间、能耗、风险和等待代价；接着依据时空资源网格，对候选方案的航路容量、安全间隔和节点泊位约束进行校验；在满足约束的方案中，根据综合阻抗函数确定任务执行方式，并完成飞行器、地面车辆和起降点分配；进入下一调度周期后，系统重新读取运行状态，对尚未执行的任务以及受道路拥堵、航路冲突或起降点排队影响的任务进行滚动修正。

4.2　约束条件

任务完成时间约束为

$$t_r^0+T_{r,s}\leqslant t_r^{\max}+\delta_r \tag{11}$$

式中：δ_r 为允许延误量。对于应急任务，δ_r 取较小值；对于普通物流任务，δ_r 可适当放宽。飞行器电量约束[16]为

$$E_{u,r}^{\mathrm{fly}}+E_{u,r}^{\mathrm{res}}\leqslant E_u(t) \tag{12}$$

式中：$E_{u,r}^{\mathrm{fly}}$ 为执行任务所需电量；$E_{u,r}^{\mathrm{res}}$ 为安全余量；$E_u(t)$ 为飞行器当前电量。起降点容量约束为

$$\sum_r y_{r,p}(\tau)\leqslant Y_p,\forall p,\forall \tau \tag{13}$$

式中：$y_{r,p}(\tau)=1$ 表示任务 r 在时间片 τ 占用起降点 p；Y_p 为起降点容量。低空航路安全间隔约束为

$$|l_i(\tau)-l_j(\tau)|\geqslant d_{\mathrm{safe}},\forall i\neq j \tag{14}$$

式中：$l_i(\tau)$、$l_j(\tau)$ 为两架飞行器在时间片 τ 的空间位置；d_{safe} 为最小安全间隔。

4.3　算法特点分析

该算法并不追求一次性得到全局静态最优，而是强调在动态交通环境中获得稳定可执行的近优解。其计算复杂度主要来自候选方案生成和时空资源校验。由于候选起降点可通过距离和容量进行预筛选，实际计算规模可以控制在可接受范围内。对城市片区级应用而言，调度周期可取 30～120 s；对于应急任务，可单独触发即时重调度。

5　仿真实验设计

为验证所提方法的有效性，首先构建一个 5 km×5 km 的典型城市片区基础场景。场景中包含 64 个道路节点、112 条道路边、18 个低空航路节点、30 条低空航路边以及 8 个垂直起降点。低空飞行器数量设为 30 架，地面智能车辆数量设为 80 辆，任务规模分别设为 200、400、600、800 单。该基础场景主要用于对比不同调度方法在相同网络结构下的运行差异。

考虑到单一规则化片区容易造成实验场景偏简化，考虑到单一规则化片区难以充分反映低空-地面协同运行中的扰动特征，在基础场景之外补充设置道路拥堵增强、节点能力受限、空域扰动和混合需求 4 类扩展工况。道路拥堵增强工况将部分主干道路速度下调 20%～40%，用于模拟早晚高峰和突发拥堵；节点能力受限工况将部分垂直起降点泊位容量减少 1～2 架，用于模拟起降点检修、充换电能力不足或安全检查延迟；空域扰动工况在部分低空航路中加入风场扰动和临时禁限飞区，用于检验航路受限条件下的调度稳定性；混合需求工况同时设置普通物流、巡检和高优先级应急任务，用于验证不同任务等级下的模式选择与资源分配能力。地面车辆平均速度根据拥堵状态在 15～45 km/h 变化，低空飞行器巡航速度设为 50 km/h，起降检查与装卸时间设为 2～5 min，单个起降点的同时服务能

力设为 2～4 架。为体现方法差异，设置地面优先调度、低空优先调度、独立模式调度和本文方法 4 组对比。仿真场景主要参数见表 1。

评价指标包括平均任务完成时间、准点率、低空冲突等待时间、起降点平均排队时间以及调度调整次数。其中，准点率用于衡量任务在规定时限内完成的比例，低空冲突等待时间用于描述低空交汇点与走廊拥堵程度，起降点平均排队时间用于反映节点缓冲能力，调度调整次数用于衡量方案稳定性。为提高结论解释力，在本文中不再仅依据单一任务规模结果作判断，而是结合基础场景、扩展扰动工况和高负荷场景下的指标变化趋势进行综合分析。扩展工况设置见表 2。

表 1　仿真场景主要参数

参数	数值
场景规模	5 km × 5 km
道路节点/边	64/112
低空航路节点/边	18/30
垂直起降点数量	8
低空飞行器数量	30
地面车辆数量	80
任务规模/单	200、400、600、800
低空飞行器巡航速度/(km•h^{-1})	50
地面车辆运行速度/(km•h^{-1})	15～45
起降检查与装卸时间/min	2～5
扩展工况类型	道路拥堵增强、节点能力受限、空域扰动、混合需求
道路扰动范围	主干路速度下调 20%～40%
起降点容量扰动	部分泊位减少 1 或 2 架
空域扰动设置	风场扰动、临时禁限飞区、高优先级任务插入

表 2　扩展工况设置

工况类型	设置方式	验证目的
道路拥堵增强	部分主干路速度下调 20%～40%	检验地面拥堵条件下的跨模式调度效果
节点能力受限	部分起降点泊位减少 1 或 2 架	检验起降点排队和节点缓冲能力
空域扰动	设置风场扰动、临时禁限飞区	检验航路受限条件下的冲突规避能力
混合需求	同时设置物流、巡检和应急任务	检验不同优先级任务下的调度适应性

6　实验结果与分析

6.1　平均任务完成时间

图 5 给出了基础场景下不同任务规模对应的平均任务完成时间。随着任务规模增大，各方法完成时间均呈上升趋势。地面优先调度受道路拥堵影响明显，在任务量达到 600 单以后完成时间增长较快；低空优先方法在低负荷条件下具有一定优势，

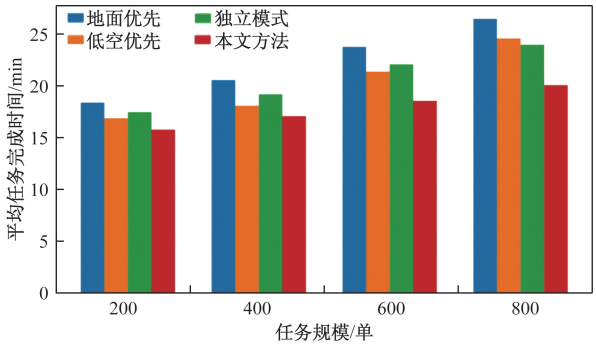


图 5　不同任务规模下平均任务完成时间对比

但随着任务增加，起降点和低空交汇点拥堵加剧，完成时间增幅也较明显；本文方法通过提前考虑起降点容量和航路占用，能够把部分不适合进入低空网络的任务保留在地面执行，因此在中高负荷条件下表现更稳定。在道路拥堵增强和节点能力受限工况下，本文方法的优势仍主要体现在降低无效低空占用和减少节点排队，但改善幅度会随可用起降资源减少而有所下降。

6.2　准点率与低空冲突等待

从图 6 可以看出，随着任务规模增加，4 种方法的准点率均有所下降，但本文方法在基础场景下保持较高水平。在 800 单工况下，本文方法的准点率仍高于其他 3 种方法。其主要原因在于，系统在调度过程中同时考虑了任务紧迫度、地面拥堵度和空域风险，避免大量普通任务挤占低空通道。在空域扰动与混合需求工况中，高优先级任务插入会降低普通任务准点率，但本文方法能够通过滚动重调度优先保障时效性更强的任务。

图 7 反映了基础场景下不同方法的低空冲突等待时间。低空优先方法在高任务量下冲突等待明显上升，说明仅依据飞行时间最短进行决策，会导致低空走廊与交汇点过载。独立模式调度虽然能够部分降低冲突，但由于未考虑换乘节点与地面接驳的联动，整体效果仍有限。本文方法的冲突等待

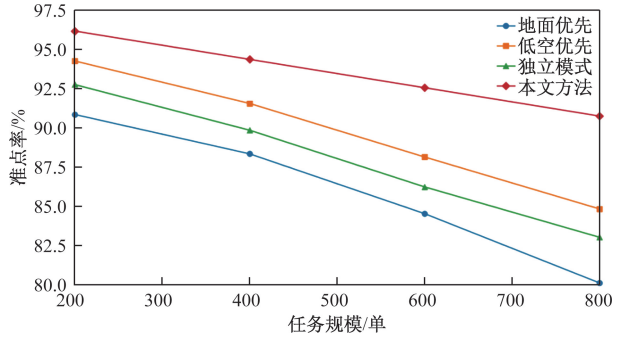


图 6　不同任务规模下准点率对比

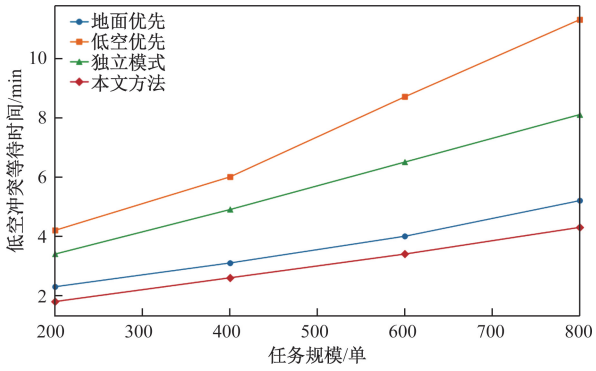


图 7　不同任务规模下低空冲突等待时间对比

时间较低，说明空地复合时空资源网格能够在任务进入低空网络前完成容量校验和时间窗协调。在临时禁限飞区或风场扰动条件下，冲突等待仍会增加，因此本文结论更适用于具备基础航路容量信息和起降点状态反馈的城市片区。

6.3　起降点排队时间与综合讨论

从图 8 可见，本文方法在起降点平均排队时间方面优于低空优先和独立模式调度。低空优先方法因大量任务集中选择距离最近的起降点，造成节点短时过载；独立模式调度虽然能在一定程度上分散任务，但缺少对地面接驳与起降点泊位的统一协调。本文方法在节点匹配时引入排队代价，使任务能够分配到更合适的起降点，从而降低局部拥堵。不同方法在 800 单工况下的主要指标对比见表 3。

综合来看，低空飞行器能够提升高时效任务的运输效率，但这一结论具有一定前提条件，即低空航路、地面接驳和起降节点需要形成协同，并且系

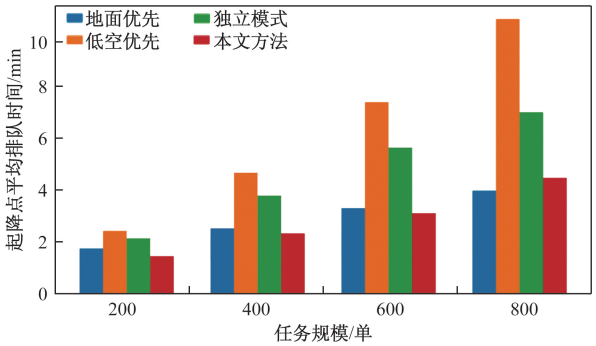


图 8　不同任务规模下起降点平均排队时间对比

表 3　不同方法在 800 单工况下的主要指标对比

方法	平均完成时间/min	准点率/%	冲突等待时间/min	排队时间/min
地面优先	26.5	80.1	5.2	4.1
低空优先	24.6	84.8	11.3	10.9
独立模式	24.0	83.0	8.1	7.2
本文方法	20.1	90.7	4.3	4.6

统能够获得必要的道路速度、航路占用和节点排队状态。若将低空飞行器作为独立系统使用，地面接驳、起降排队和航路冲突会在一定程度上抵消其速度优势。本文方法通过统一资源表达、优化模式选择和滚动重调度，在所构建的基础片区及扩展扰动工况中取得了较好的效率、安全与稳定性平衡。

6.4　综合分析

综合基础场景和扩展工况结果可知，本文方法的优势并非完全依赖单一规则化网络。在道路拥堵增强工况下，跨模式阻抗函数能够降低地面拥堵对任务完成时间的影响；在节点能力受限工况下，节点匹配代价能够分散部分起降点压力；在空域扰动和混合需求工况下，滚动调度机制能够根据航路状态和任务紧迫度进行局部调整，优先保障高时效任务。但当多个起降点同时受限或低空航路大范围不可用时，方法效果会有所下降，说明调度性能仍受起降点布局、航路容量和实时状态信息质量影响。因此，本文的结论应理解为在典型片区仿真和设定扰动条件下的有效性验证，后续仍需结合真实低空航路运行数据、不同城市空间形态和实际起降点运行记录进行进一步校准。

7　结论

(1)低空飞行器与地面智能交通之间不是简单替代关系，而是围绕起降点、接驳道路、低空航路和任务时限形成耦合关系。将低空航路、道路路段和换乘节点统一为时空资源单元，有利于协调不同交通方式之间的资源占用。

(2)提出的跨模式阻抗函数能够同时考虑任务完成时间、能耗、空域风险、起降等待和延误惩罚，使调度系统根据任务紧迫度、地面拥堵度和空域风险选择交通模式，避免低空资源被普通任务过度占用。

(3)带计划稳定性的滚动调度方法能够在动态扰动下提高方案可执行性。与低空优先和独立模式调度相比，本文方法在所构建的基础片区及扩展工况中，在平均任务完成时间、准点率、低空冲突等待和起降点排队时间等方面表现更优，但其效果受起降点容量、航路可用性和状态信息实时性的影响。

(4)本文实验仍以典型城市片区仿真为主，虽然补充了道路拥堵、节点受限、空域扰动和混合需求等工况，但尚未覆盖所有城市空间形态和真实运行约束。后续研究应进一步引入真实低空航路运行数据、不同城市路网结构、建筑遮挡、通信延迟和多运营主体协同机制，对模型参数进行校准，以提升方法在实际城市环境中的适用性。

参考文献

[1] 廖禄伟，杨忠，卓浩泽，等. 二自由度机臂可倾转双旋翼飞行器滑模抗扰控制[J/OL]. 控制与决策，1-14[2026-04-03]. https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.1089.

[2] 王国法，刘峰. 智能交通与低空经济融合发展关键技术研究[J]. 交通运输工程学报，2024，24(3)：1-12.

[3] 陈晓东，李俊，张宁. 城市低空交通运行组织与空域资源管理[J]. 航空学报，2023，44(10)：1-15.

[4] 刘海涛，周军. 面向城市空中交通的无人机路径规划方法综述[J]. 控制理论与应用，2022，39(8)：1451-1465.

[5] 赵明，孙立军. 智能网联交通系统中的多模式协同调度方法[J]. 系统工程理论与实践，2021，41(12)：3182-3194.

[6] 胡斌，王磊. 城市无人机物流网络选址与路径优化研究[J]. 管理工程学报，2022，36(5)：201-210.

[7] 张伟，高峰. 低空空域运行安全间隔与冲突检测方法[J]. 南京航空航天大学学报，2023，55(4)：621-632.

[8] 李强，陈浩. 面向应急救援的空地协同配送调度模型[J]. 计算机集成制造系统，2024，30(2)：482-493.

[9] ZHAO J，CHEN S，ZHANG X，et al. A consensus decision-making method for aerial-ground unmanned swarm group oriented towards conflict resolution[J]. Electronics Optics & Control，2026，33(1)：1-7.

[10] KHADKA N，KC B，SHARMA R，et al. Mobility challenges and issues in unmanned aerial vehicle (UAV) path planning：a systematic review[J]. Computer Networks，2025，273：111766.

[11] ZHANG J，XU Y，CAI K，et al. An MAC probability assessment framework for integrated operations in urban air mobility considering safety barriers[C]//16th USA-Europe Seminar on Air Traffic Management Research and Development (ATM 2025). Prague，Czech republic：EUROCONTROL，2025：652.

[12] CHARNSETHIKUL C，SILVA J M，VERHAGEN W J C，et al. Urban air mobility aircraft operations in urban environments：a review of potential safety risks[J]. Aerospace，2025，12(4)：306.

[13] HE Z T，WANG Z J，LI L X. Urban air mobility：a review of recent advances in communication，management，and sustainability[J]. arXiv preprint，arXiv：2510.18235，2025.

[14] 左大发，朱德龙，朱娜娜. 低空经济下车辆与无人机协同配送路径优化研究综述[J]. 包装工程，2025，46(19)：298-310.

[15] WANG Z，LIU L. Energy-aware joint task assignment and 3D path planning for cooperative multi-UAV networks[J]. Vehicular Communications，2026，60：101031.

[16] MAO Y，JIA G. Research on the optimization of delivery routes for vehicles with drones under no-fly zone restrictions[J]. PLoS ONE，2025，20(10)：e0335614.

[17] PONGSAKORNSATHIEN N，SAFWAT N E D，XIE Y，et al. Advances in low-altitude airspace management for uncrewed aircraft and advanced air mobility[J]. Progress in Aerospace Sciences，2025，154：101085.

[18] DESKOS G，DEL CARRE A，PALACIOS R. Assessment of low-altitude atmospheric turbulence models for aircraft aeroelasticity[J]. Journal of fluids and structures，2020，95：102981.

[19] KIM J，ATKINS E. Airspace geofencing and flight planning for low-altitude，urban，small unmanned aircraft systems[J]. Applied Sciences，2022，12(2)：576.

Research on Cross-modal Collaboration and Scheduling between Low-altitude Aircraft and Intelligent Transportation

XU Jia[1]，CHENG Donghao[2]，SHI Wen[2]

(1. College of Civil Aviation Safety and Operations Management，Guangzhou Civil Aviation College，Guangzhou 510403，China；
2. China Academy of Science and Technology of Civil Aviation，Beijing 100028，China)

Abstract：With the rapid growth of low-altitude aircraft in urban logistics，inspection，emergency response and commuting services，low-altitude traffic and ground intelligent transportation are becoming increasingly coupled. To address the problems of separated management domains，heterogeneous operating rules and difficult unified allocation of air-ground resources，a cross-modal collaboration and scheduling method for integrated low-altitude and ground operation was proposed in this paper. Low-altitude aircraft，road vehicles，transfer nodes，vertiports and controlled airspace were modeled as a heterogeneous traffic network. A cross-modal state model considering travel time，energy consumption，capacity，safety interval and carbon-emission constraints was established. Furthermore，an air-ground corridor，node-buffer and rolling-scheduling framework was designed，in which low-altitude routes，road links and transfer nodes were mapped into spatio-temporal resource units. A hierarchical scheduling strategy considering task urgency，road congestion and airspace conflict risk was then developed. A typical urban-area simulation and several extended scenarios with congestion，node-capacity limitation，airspace disturbance and mixed demand were constructed for validation. It is indicated that，under the given simulation settings，the proposed method can reduce average task completion time，conflict waiting time and vertiport queuing time while maintaining operational safety.

Keywords：low-altitude aircraft；intelligent transportation；cross-modal collaboration；air-ground integration；rolling scheduling；spatio-temporal resources