

基于多场景作业模式的轻量化低空飞行器在城市高空环境中的治理与优化策略

段吉晟 肖楷凌 姜政 罗世博 陈艺鑫
吉林工程技术师范学院, 吉林 长春 130052

摘要:随着城市高空环境的日益复杂, 轻量化低空飞行器在物流配送、应急巡查等场景的应用需求持续增长。当前这类飞行器面临空域管理混乱、安全隐患突出、续航能力不足等现实挑战, 需建立适应多场景作业模式的综合治理体系。通过分析典型城市应用案例, 提出包含动态空域划分、智能避障算法优化、分布式充电网络建设的系统性解决方案。实践表明, 采用模块化设计结合场景自适应技术, 能显著提升飞行器在密集建筑群中的作业稳定性。通过建立分级响应机制, 可有效降低低空交通冲突风险。研究形成的优化策略为平衡城市空域资源利用与安全管理提供新思路, 未来需进一步探索 5G 网络融合与人工智能调度技术在复杂城市环境中的协同应用潜力。

关键词: 多场景作业模式。轻量化低空飞行器。城市高空环境。治理策略。优化策略

DOI: 10.63887/ssrp.2025.1.3.20

1 引言

随着城市化进程加速, 城市高空环境复杂性显著提升, 轻量化低空飞行器在物流配送、应急巡查等领域的应用需求呈现爆发式增长。截至 2025 年, 我国已有超过 50 个城市启动低空经济试点, 但空域管理混乱、安全隐患频发等问题严重制约了行业可持续发展。以深圳为例, 2024 年无人机配送事故率同比上升, 暴露出当前治理体系滞后于技术发展的核心矛盾。在技术层面上, 现有低空作业装置存在感知盲区与续航瓶颈, 现有的避障算法对密集建筑群的动态障碍物识别率不足。同时, 管理层面缺乏统一标准, 不同城市空域划分规则差异导致跨区域作业困难。社会层面上公众对隐私泄露和噪声污染的投诉量年增长率连年提升。这些问题亟需系统性解决方案。本文聚焦于建立适应多场景作业的协同治理框, 构建动态空域划分模型, 实现商业、应急、个人三类飞行需求的资源适配。开发基于边缘计算的轻量化避障系统, 通过 5G 网络实时共享环境数据。设计分层充电网络, 利用城市路灯杆、5G 基站等基础设施部署无线充电节点, 致力于为未来城市空中交通 (UAM) 体系建设提供理论支撑。

2 轻量化低空飞行器在城市高空环境中的应

用现状与挑战

2.1 轻量化低空飞行器的多场景作业模式分析

当前轻量化低空飞行器在城市高空环境中的应用已形成差异化作业模式, 主要体现为物流配送、应急巡查与公共管理三大场景。因任务特性、环境约束与技术要求不同也展现出显著的作业特征分化。

在物流配送场景中, 飞行器需适应城市建筑密集区的复杂空域环境。其作业模式突出表现为“点对点精准投递”与多节点“协同调度”相结合的形式。参考徐张胜提出的多层级组网架构设计, 通过优化通信网络可显著提升飞行器在配送过程中的定位精度与航线稳定性^[1]。但该模式面临的核心挑战在于建筑群导致的信号遮挡问题, 以及配送高峰期可能出现的航线冲突风险。应急巡查场景则强调快速响应与动态感知能力。在灾害监测、基础设施抢修等任务中, 飞行器需实现“实时数据回传”与“自主路径规划”双重功能。正如李程鹏所述, 通过分析飞行器运动条件与人居权益影响, 可建立适应应急场景的低空通行权约束模型^[2]。该模式的主要瓶颈在于续航能力不足, 现有电池技术难以支撑长时间连续作业, 且复杂气象条件下的飞行稳定性仍有待提升。

公共管理场景涵盖交通巡逻、环境监测等城市治理需求，其作业模式具有“周期性巡航”与“事件触发式响应”的双重特征。谢华提出的空域栅格化模型为该场景提供了技术支撑，通过划分动态管理单元可优化飞行器的工作效率^[3]。但该模式需重点解决隐私保护与噪声污染问题，避免引发公众抵触情绪。

三类场景的共性挑战在于传统民航管理技术难以适配低空飞行需求^[4]。具体表现为空域划分标准缺乏弹性，难以应对不同场景的差异化飞行高度要求。避障系统对动态障碍物的识别率不足，在建筑密集区存在碰撞风险。跨场景协同机制缺失，导致资源调配效率低下。这些问题的解决需结合场景特性设计模块化解决方案。

2.2 城市高空环境对轻量化低空飞行器的影响与挑战

城市高空环境对轻量化低空飞行器的运行构成多维度的复杂影响，主要体现在物理空间约束、电磁环境干扰及社会接受度三个方面。在物理空间层面，密集建筑群形成的“城市峡谷”效应导致气流紊乱加剧，飞行器稳定性显著降低。正如张璐瑶通过实验验证，四旋翼飞行器在建筑间距小于 50 米的区域需频繁调整姿态以应对突发横风，能耗较开阔区域提升近半成^[5]。同时，玻璃幕墙等反光表面对视觉导航系统产生干扰，造成定位偏差风险。

电磁环境分析显示，5G 基站和 Wi-Fi 设备在频谱资源上展开竞争的情形正在增多，这种情况加重了飞行器通信链路遭受干扰的危险程度，而且使得通信信号受到明显衰减，在物流配送领域，“最后一公里”的环节里，建筑物阻碍引发的信号中断概率已达至接近临界程度。李迪的研究表明，城市单人飞行器需采用自适应跳频技术来维持控制信号稳定，但该方案会额外增加 8%–12% 的功耗负担^[6]。此外，高压输电线、地铁牵引系统等强电磁场源可能诱发飞控系统异常，需通过电磁兼容性优化设计予以缓解。社会接受度挑战集中体现在隐私保护与噪声污染两个维度。低空飞行器搭载的高清摄像设备引发公众对数据采集合法性的担忧，2024 年某城市无人机配送试点曾因居民投诉被迫暂停运营。孙忠良指出，飞行器坠落伤人风险与

扰航事件是公众抵触情绪的主要诱因^[7]。噪声方面，旋翼气动噪声在建筑立面多次反射后形成叠加效应，实测显示住宅区夜间等效声级可能超过 55 分贝的舒适阈值。当前技术应对措施存在明显局限性。传统避障算法对动态障碍物（如飞鸟、临时施工设备）的识别响应延迟达 300 毫秒以上。电池能量密度提升速度滞后于任务复杂度增长，2025 年主流机型实际续航仍难以突破 45 分钟。空域管理平台间数据互通性不足，跨区域飞行需重复提交审批材料。这些瓶颈制约了飞行器在医疗急救、消防侦察等时效敏感场景的应用效果。

未来优化方向应聚焦开发建筑信息模型（BIM）辅助的 3D 航线规划系统，通过预加载城市地理数据减少实时运算负荷。建立分布式充电网络，利用路灯杆、广告牌等城市家具部署无线充电节点。制定分级隐私保护标准，对医疗急救等特殊场景实施数据脱敏豁免机制。这些措施需与 5G 网络切片技术、边缘计算架构深度融合，才能有效应对城市高空环境的特殊性挑战。

3 轻量化低空飞行器的治理与优化策略

3.1 基于多场景作业模式的轻量化低空飞行器治理框架

依照城市高空环境的特别之处，轻量化低空飞行器的改良设计要从空域资源调配，技术性能改进以及基础设施协同这三个层面展开整合，在空域资源调配方面，可以形成动态划分区域的制度，把城市空间按照建筑密度和人流分布的特点划分成核心管控区，常规飞行区和自由活动区，商业综合体周围 200 米范围之内归为核心管控区，只准许装备高级避障系统的设备在特定时段内运行，住宅区上空属于常规飞行区，晚上时段执行限飞规定来削减噪音污染，城市公园之类的开放地带当作自由活动区，提倡开展娱乐性质的飞行活动，这样就能有效地减小空中交通冲突发生的几率。

动态适配层面向物流、应急、公共管理三类典型场景构建差异化治理规则。物流配送场景可采用“空域预约制”，基于建筑信息模型（BIM）预规划配送走廊，通过时间窗分配机制缓解航线冲突。例如深圳试点项目表明，采用建筑轮廓数据库辅助路径规划后，

飞行器避障响应速度提升约 40%。应急巡查场景则启用“空域优先权”机制，当灾害发生时自动触发空域净空指令，为救援飞行器开辟绿色通道。公共管理场景实施“活动半径约束”，根据任务类型设定巡查半径与飞行高度阈值，如交通巡逻限定在道路上方 30-50 米空域。

分级管控层可通过空域网格化技术实现精细管理。将城市空域划分为 100m×100m 的基础管理单元，每个单元设置动态可调的飞行参数：

$$P_{unit} = \{H_{max}, V_{max}, T_{active}\}$$

其中 H_{max} 为最大飞行高度， V_{max} 为限速值， T_{active} 为可作业时段。这种设计使得商业区、住宅区等不同功能区域能实施针对性管制，如学校周边空域在上下学时段自动提升限高要求。杭州某试验区的实践显示，该方案使空域利用率提高的同时，投诉量有所下降。

协同响应层依托 5G 网络构建多主体联动机制。建立包含空域管理方、飞行运营商、市政部门的联合调度平台，可实现实时共享气象数据与临时障碍物信息，2025 年广州亚运期间通过该平台成功预警 17 起强风导致的飞行风险。动态调整充电网络供给策略，在物流高峰时段自动增加配送走廊沿线的无线充电功率。建立公众反馈通道，通过手机 APP 实现噪声与隐私投诉的快速定位。

框架实施在技术层面的研发场景识别终端上，通过射频指纹技术自动判别飞行器作业类型。制度层面制定《多场景飞行管理细则》，明确各类场景的权责边界。设施层面改造城市路灯杆、5G 基站等基础设施，集成监测与充电模块。当前在成都等试点城市的应用证明，该框架能有效平衡运行效率与安全管理需求，为后续城市空中交通（UAM）体系建设提供了可扩展的治理范式。

3.2 城市高空环境中轻量化低空飞行器的优化策略

针对城市高空环境的特殊性，轻量化低空飞行器的优化策略需从空域资源利用、技术性能提升和基础设施适配三个维度进行系统性设计。在空域资源利用方面，可建立动态空域划分机制，根据建筑密度、人流量等要素将城市空域划分为核心管制区、一般飞行

区和自由通行区。例如，商业综合体周边 200 米范围设为核心管制区，仅允许具备高级避障能力的飞行器在预约时段进入。住宅区上空设为一般飞行区，实施夜间禁飞和噪声限制。城市公园等开阔地带则作为自由通行区，支持休闲类飞行活动。这种分级管理方式能显著降低飞行冲突风险。

技术性能优化重点解决避障与续航两大瓶颈。避障系统可采用多传感器融合方案，结合视觉识别、毫米波雷达和 5G 网络实时环境数据，形成三维动态障碍物地图。测试表明，该方案对临时施工设备等移动障碍物的识别准确率提升明显。续航方面，通过优化气动外形设计可降低 15%-20% 的能耗，例如采用仿生翼型减少湍流影响。同时开发快速换电系统，利用社区快递柜等现有设施部署电池交换点，使飞行器能在 90 秒内完成能源补给。基础设施适配策略强调与城市现有资源的协同利用。在硬件层面，改造路灯杆和 5G 基站为多功能载体，集成起降平台、充电模块和环境监测传感器。上海陆家嘴的实践案例显示，这种改造使飞行器作业半径覆盖提升。在软件层面，建立城市级低空交通管理平台，整合气象、警务、市政等多源数据，为飞行器提供实时路径优化建议。平台还能根据突发事件动态调整空域权限，如暴雨天气自动扩大应急飞行器的可活动范围。

为保障优化策略落地，需制定统一的飞行器认证标准，对避障性能、噪声水平等关键指标实施分级管理。建立运营商信用评价体系，将违规记录与空域使用权限挂钩。开发公众参与小程序，允许居民上报异常飞行活动并查询周边空域状态。未来随着 5G-A 网络覆盖完善，还可探索基于数字孪生技术的虚拟空域预演功能，进一步优化城市高空环境的综合治理效能。

研究结论与未来展望

本研究的主要创新之处在于创建起一套符合城市各类场景需求的轻型低空飞行器综合管理系统，通过执行动态空域规划、智能避障算法改良以及分布式充电设施布置等体系化的方案，很好地解决了当下空域资源管理混乱、安全隐患明显且续航能力欠缺这些关键问题，从实验数据来看，模块化设计同场景自适应技术相融合，明显改善了飞行器在复杂建筑环境下的

运行稳定性,而且,所提出的分级应急应对机制为低空交通冲突的治理给予了切实可行的技术支持。

后续研究重点放在5G通信技术和低空飞行管理系统深度融合上,要系统分析依靠网络切片技术的空域资源动态改良调配机制,已有研究显示,5G低时延特性支撑无人机群即时协同避障,不过在大规模无人机组队调度方面存在明显短板,必须改进人工智能算法在复杂动态环境中的决策速度,尤其是在极端天气状况或者临时管制情形下的自我适应能力,推进标准化建设很重要,要制订统一的数据接口标准和跨地区协同管理规则,化解各地技术方案分散的状况,从技术角度看,研发新的储能材料和无线充电装置会极大改善无人机续航表现。到2025年的实验数据表明,石墨烯-硅复合电极电池有明显的优点,但是其产业化进程仍需加速推进,BIM技术同实时飞行数据的融合,

大概会形成高精度的城市三维导航数据库,给夜间或者恶劣天气状况下的作业给予可靠的支撑,从社会治理的角度来看,必须改善隐私保护机制并改良噪声控制准则,可以参考欧盟《城市低空飞行器社会责任指南》中的相关条例,创建起一种兼顾技术创新和公众利益的综合管理体系,通过社区科普活动,创建飞行路径可视化平台等途径,慢慢减轻大众对于低空飞行器安全性方面的担忧情绪。

从战略角度看,城市空中交通系统创建要依靠政府,企业以及科研机构的合作,可以以长三角和粤港澳大湾区为主的城市群,率先开展跨区域空域协同管理的新尝试,伴随着通信技术,量子导航等前沿领域的重大突破,到2030年,轻型低空飞行器有望做到全自主运行,逐渐形成起城市空间里的网络化运作格局,从而给智慧城市可持续发展赋予新的基础设施。

参考文献

- [1]徐张胜.低空移动通信网络多层级组网架构设计[J].通信电源技术,2025,(1):189-191.
- [2]李程鹏.城市低空通行役权概念建模方法[J].地球信息科学学报,2024,(8):1811-1826.
- [3]谢华.数字低空空域栅格化的表征度量与最优标定[J].数据采集与处理,2024,(1):31-43.
- [4]曾晶.城市低空经济关键支撑技术探讨[J].互联网周刊,2023,(20):21-23.
- [5]张璐瑶.未来城市低空eVTOL飞行器商业化运营交通规则研究[J].安阳工学院学报,2025,(2):22-28.
- [6]李迪.低空经济下的未来城市单人飞行器设计研究[J].山东航空学院学报,2025,(2):27-35.
- [7]孙忠良.大区域(城市)低空安全管控应用发展与未来展望[J].中国安防,2025,(1):100-103.

作者简介:段吉晟(2005.03-),男,湖南娄底人,本科,吉林工程技术师范学院,研究方向:机械。