

低空经济下无人机物流协同运输的挑战与对策研究

刘伟松, 梁英豪

德州科技职业学院, 山东 德州 262500

DOI: 10.61369/SSSD.2025150023

摘 要 : 随着低空空域的逐步有序开放, “低空经济” 已经逐渐成为推动各国经济发展的新动力, 相继被纳入《国家综合立体交通网规划纲要》《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》等行政法规。然而, 低空经济在推进过程中, 还面临着安全、社会、法律等方面的诸多问题。基于此, 文章主要分析无人机物流协同运输的发展现状及挑战, 并提出低空经济下无人机物流协同运输的优化对策, 旨在推动无人机物流协同运输规范化发展, 为现代物流体系升级提供理论参考与实践路径。

关 键 词 : 低空经济; 无人机; 物流协同运输

Research on Challenges and Countermeasures of UAV Logistics Collaborative Transportation Under Low-Altitude Economy

Liu Weisong, Liang Yinghao

Technological Vocational College of Dezhou, Dezhou, Shandong 262501

Abstract : With the gradual and orderly opening of low-altitude airspace, the "low-altitude economy" has gradually become a new driving force for promoting the economic development of various countries, and has been successively incorporated into administrative regulations such as the National Comprehensive Three-Dimensional Transportation Network Planning Outline and the Interim Regulations on the Management of Unmanned Aerial Vehicle Flights. However, in the process of advancing the low-altitude economy, it still faces many problems in terms of safety, society, and law. Based on this, this paper mainly analyzes the development status and challenges of UAV logistics collaborative transportation, and puts forward optimization countermeasures for UAV logistics collaborative transportation under the low-altitude economy. It aims to promote the standardized development of UAV logistics collaborative transportation and provide theoretical references and practical paths for the upgrading of the modern logistics system.

Keywords : low-altitude economy; unmanned aerial vehicle (UAV); logistics collaborative transportation

引言

低空经济是以低空飞行活动为核心的一种典型的新兴产业, 无人机作为低空经济的重要载体, 在物流、应急救援等领域的应用日益广泛。然而, 随着协同运输规模的扩张, 空域资源紧张、技术协同壁垒、安全风险叠加、人才供给不足等问题逐渐凸显。据中国民用航空局数据, 2024 年我国新增实名登记无人机 110.3 万架, 累计飞行 2666 万小时, 但无人机与地面车辆、空域管理系统的协同效率仍不足 60%, 事故率较 2023 年上升 25%。在此背景下, 梳理无人机物流协同运输的现实挑战, 提出可行性对策, 对推动低空经济高质量发展、构建现代化物流体系具有重要意义。

一、低空经济下无人机物流协同运输的发展现状

(一) 协同运输模式初步成型

当前无人机物流协同运输已形成空地联动、分级响应的典型模式。例如, 在城市场景中, 地面车辆可搭载多架无人机从物流网点出发, 车辆停靠后无人机执行 3-5 公里半径内的末端配送, 完成后返回车辆充电换电; 在应急场景中, 如台风、地震等灾害中, 可由无人机先投送急救药品、通信设备, 车辆后续运输大型物资^[1]。两类场景均以“功能互补、效率优先”为核心, 通过无人

机“短距快送”与车辆“长距大运”的协同, 实现物资运输的时空覆盖优化。

(二) 技术支撑体系逐步完善

低空经济推动下, 无人机物流协同运输技术支撑体系正在逐步完善。无人机单机性能在不断升级, 长续航电池、轻量化机身材料的应用, 使无人机载重能力提升至数十公斤, 续航时间延长至数小时^[2]。通过智能调度系统可以同时对数十架无人机进行路径规划、任务分配以及空域资源调度, 并与地面车辆的行驶路线动态匹配(如规避车辆拥堵路段的无人机航线), 实现“机-车-

空域”的协同调度。同时，环境感知与避障技术也在不断走向成熟，融合视觉识别、毫米波雷达等多传感器数据能够识别低空障碍，保证飞行安全^[3]。地面配套技术也在同步跟进，模块化起降点、快速充电/换电设施的普及，进一步降低了无人机的物流运输成本与周转时间。

（三）政策与应用场景持续拓展

2023年9月《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》首次明确120米以下空域的分类管理规则，2024年《通用航空装备创新应用实施方案（2024-2030年）》进一步提出建立低空物流协同监管平台；应用端，协同运输已覆盖城市末端配送、应急医疗、生鲜冷链等多领域，形成多元化场景矩阵^[4]。

二、低空经济下无人机物流协同运输面临的挑战

（一）空域管理与政策适配滞后，制约协同效率

无人机物流协同运输的航线审批需要民航、军航、地方交管等部门的参与，流程复杂且花费的时间长^[5]。根据民航局2023年数据，我国民用无人机注册量达126万架，但获批的常态化系统运输航线仅500余条，80%的起降点日均使用不足1次。同时，现行审批未实现分级分类，120米以下空域未区分物流专属区、应急通道、无人机与通用航空器、热气球等飞行活动的空域冲突增加^[6]。

（二）技术协同壁垒突出，空地融合度不足

1. 通信与导航技术存在短板

城市环境复杂，一旦有建筑物遮挡、无线电频谱拥堵导致的情况出现，无人机与地面站的通信链路便不会不稳定。例如，在高楼密集区域，5G信号会衰减，会出现无人机超视距飞行时易出现信号中断的情况^[7]。导航方面，北斗或GPS定位在峡谷、森林等区域易受干扰，北斗、激光雷达与视觉导航等多源导航融合技术尚未普及，影响与车辆的协同工作。

2. 空地数据交互与调度协同不足

无人机与地面车辆、仓储系统的数据尚未衔接，缺乏统一的数据标准，比如无人机的飞行轨迹数据、车辆的实时位置数据、仓储的订单数据格式不兼容，导致协调平台难以整合多元信息^[8]。当前主流调度系统多集中在单一的无人机或车辆路径优化，未考虑“无人机-车辆”的任务分配调整，比如车辆遇堵时无法实时将任务转移给无人机，导致配送延误率提升，影响用户体验。

（三）安全风险叠加，保障体系不完善

1. 空域安全与操作风险显著

低空飞行活动增多使碰撞风险有所上升，2023年全国报告无人机与建筑物、高压电线碰撞事件127起，其中60%发生在协同运输场景。当前，无人机自主避障技术还不够成熟，当主流避障系统在应对突然出现的鸟类等障碍时，响应会有延迟，难以完全规避风险^[9]。车辆的智能感知系统也未与无人机协同工作，不能提前提示无人机的飞行轨迹。

2. 数据安全与隐私保护漏洞

据行业调研，2024年无人机物流系统遭网络攻击事件同比上升35%，部分攻击造成无人机航线被篡改、用户隐私外流。同

时，物流企业、无人机制造商、监管部门等各主体间的数据传输缺少加密措施与分级授权，存在隐私泄露风险。

（四）专业人才短缺，供需结构失衡

无人机物流协同运输需有技术、会管理、懂法规的复合型人才，但当前行业这类人才紧缺。一是操控与维护人才不足。截至2024年，我国持有无人机操控员执照的人数仅占无人机实名登记总量的12%，且多数仅掌握基础飞行技能，缺乏协同作业中的应急处置能力；二是高端技术人才匮乏。据《2024年中国低空经济人才发展报告》显示低空航线规划、空地协同算法开发、空域管理等领域的人才供需比达1:8，企业招聘难度大；三是人才培养体系滞后。高校相关专业，如物流工程、航空航天工程尚未开设“无人机协同运输”课程，职业院校的实训设备如无人机-车辆协同仿真系统不足，导致毕业生难以快速适配岗位需求。

三、低空经济下无人机物流协同运输的优化对策

（一）完善空域管理与政策体系，提升协同适配性

搭建空域审批数字辅助平台，基于Unity引擎构建虚拟空域环境，企业可提前在平台内模拟协同运输航线的合规性，如碰撞风险、空域冲突等情况，平台会自动生成审批所需材料，缩短原来的审批周期^[10]。可参考美国FAA的Part 107规则，设计无人机物流运营资质评价体系，资质等级高的企业可获得更多自主调整航线的权限，减少重复审批环节，提升空域资源利用效率。同时，根据城市功能区划、人口密度和配送需求，对120米以下空域进行差异化管理，划分物流优先区域、应急保障区域和普通飞行区域，明确不同区域的飞行规则，降低空域冲突风险。

在完善协同运输标准方面，由民航局牵头，联合物流企业、行业协会制定《无人机-车辆协同运输技术标准》，明确技术层面的通信协议、数据接口规范，推荐采用MQTT协议实现实时数据交互；界定责任划分规则，采用区块链技术构建全链路责任追溯系统，记录无人机制造商、运营商、车辆司机的操作行为，出事故时通过智能合约自动界定责任；建立全国低空物流法规协同平台，运用智能合约技术实现监管要求的自动适配，企业跨区域运营时无需重复申请资质，降低跨区域协同成本。

（二）强化技术融合创新，突破协同壁垒

构建多源通信网络，整合5G、卫星通信与边缘计算技术，在城市高楼密集区域部署微型基站，提升信号覆盖区域。在偏远地域可以引入低轨卫星通信服务，比如北斗短报文服务，解决无人机超视距飞行时的通信盲区问题。导航方面，推广多模导航融合技术，无人机搭载整合北斗、激光雷达与视觉导航的模块，比如千寻位置的FindM Pro，提高定位的精准性。开发基于SLAM的自主避障算法，将动态障碍物的延迟响应降至50ms以下，可通过MATLAB的Robotics Toolbox进行算法仿真与优化，保证无人机在复杂环境下的飞行的安全性。

搭建智能协同调度平台，在保护企业隐私数据的前提下，整合无人机、车辆、仓储等多源数据，包括订单需求、实时路况、无人机续航状态等，通过算法预测配送峰值，分配无人机与车辆

的任务。当地面车辆处于拥堵状况时，平台可自动计算无人机的剩余航里程与载重能力，将周边订单转移给无人机执行，保证配送效率。

（三）构建全链条安全保障体系，化解风险隐患

搭建双模监测网络，在重点区域安装定位基站与飞行轨迹接收机，实时跟踪无人机的飞行状态。可借助 Apache Kafka 流处理技术分析空域冲突风险，提前向无人机与车辆发送预警信息。完善应急处置机制，无人机搭载多余余动力系统，比如8轴8桨设计，出现机械故障时可切换备用动力；车辆配备无人机应急接管终端，当无人机通信中断时，司机可通过终端手动控制无人机返航，减少事故损失。

数据安全保护方面，开发实时数据脱敏系统，采用差分隐私技术对无人机采集的地理信息、用户数据进行动态模糊化处理，敏感字段仅保留至“小区级”；数据传输采用国密SM4算法加密，存储使用分布式数据库（如 HBase）并设置分级访问权限。建立数据共享授权制度，通过区块链构建数据共享账本，监管部门、企业、用户分别拥有不同权限，提高数据的安全性。

（四）构建校企协同培养体系，填补人才缺口

高校应当调整相关专业课程设置，在物流工程、航空航天工

程专业开设无人机协同运输、低空空域管理等课程，建立教学与企业实训相结合的课程体系，根据岗位技能要求设置课程模块。

同时，推动高校与无人机物流企业建立长期合作关系，如由行业协会牵头，联合大疆、顺丰等企业设置三个培训方向：操控维护方向聚焦无人机与车辆的协同作业流程、设备故障检修，考核通过后颁发相应证书；技术开发方向围绕空地协同算法、调度系统开发展开，培训过程中使用 Python 的 PyTorch 框架进行算法训练。搭建人才信息共享平台，打通高校、企业、培训机构之间的信息通道，高效对接人才供需，提高人才培养质量。

四、结论

低空经济为无人机物流协同运输提供了广阔发展空间，但空域管理滞后、技术协同不足、安全风险、人才短缺等挑战仍需破解。通过构建分级空域管理体系、强化技术融合创新、完善安全保障机制、优化人才培养模式，可推动无人机与地面车辆、空域系统的高效协同，实现“空地一体、安全高效”的物流运输新格局。

参考文献

[1] 蒋文全, 高豪云, 郑佳秋, 等. 无人机在民用行业应用研究综述 [J]. 机电工程技术, 2025, 54(09): 119-124+183.
[2] 路铁晨. 无人机有望成为低空经济热门赛道 [N]. 中国电子报, 2024-06-28(004).
[3] 林振强. 无人机在物流领域加快推广应用 [J]. 物流技术与应用, 2023, 28(S2): 18-21.
[4] 任真苹. 城市低空物流无人机飞行计划调配方法研究 [D]. 南京航空航天大学, 2023.
[5] 于露. 无人驾驶航空器在物流运输领域应用浅析 [J]. 中国物流与采购, 2023, (01): 108-109.
[6] 费毓哈, 张洪海, 张连东, 等. 城市物流无人机运输路径规划 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2023, 47(01): 79-84+89.
[7] 吴辰迪, 何菲. 无人机物流配送侵权责任研究 [J]. 上海商业, 2022, (04): 18-19.
[8] 张连东, 张洪海, 冯棣坤, 等. 城市区域多物流无人机任务分配问题研究 [J]. 航空计算技术, 2021, 51(06): 69-73.
[9] 吴奇泽. 面向物流运输任务的无人机-无人车协作方法研究 [D]. 天津大学, 2020.
[10] 许卫卫. 复杂低空物流无人机路径规划技术研究 [D]. 南京航空航天大学, 2020.