

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.240388

低空无人机物流配送研究与应用综述

傅惠¹, 崔煜¹, 赵佳虹², 叶艳¹, 胡琪¹, 吴志轩¹, 黄立荣²

(广东工业大学 1. 机电工程学院; 2. 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 聚焦低空无人机物流配送场景, 通过关键词共现网络图分析该领域的关键技术与研究热点。根据无人机物流系统的核心构成模块, 本文分别针对运动与环境感知、无人机运动控制、无人机航线规划、无人机与货车协同运输优化、协同运作利益分配、运输安全与隐私安全、行业可持续发展等研究问题, 系统评述了低空无人机物流配送领域的国内外研究现状, 具体解读了相关控制技术与优化方法的演化过程和应用前景, 并总结了该领域的未来研究方向, 以期为研究者提供发展脉络与参考依据。

关键词: 低空物流; 无人机; 无人机-货车协同优化; 航线规划; 物流调度

中图分类号: F407.5; U113

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2025)01-0009-13

A Review of Research and Applications in Low-altitude Logistics and Delivery Using Unmanned Aerial Vehicles

FU Hui¹, CUI Yu¹, ZHAO Jiahong², YE Yan¹, HU Qi¹, WU Zhixuan¹, HUANG Lirong²

(1. School of Electromechanical Engineering; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Focusing on low-altitude logistics and delivery scenarios using unmanned aerial vehicles (UAVs), this paper analyzes key technologies and research hotspots in the field through a keyword co-occurrence network map. According to the core components of UAV logistics systems, the study systematically reviews the domestic and international research issues such as motion and environment perception, flight control, route planning, UAV-truck cooperative optimization, profit allocation in cooperative operations, transportation safety and privacy security, and sustainable development of industry. Furthermore, the evolution process and application prospects of related control technologies and optimization methods are interpreted in detail, while the future research interests are concluded. The motivation of this review is to shed light on the trends in low-altitude UAV logistics and provide some insight for researchers.

Key words: low-altitude logistics; unmanned aerial vehicle (UAV); UAV-truck collaborative optimization; route planning; logistics scheduling

1 新兴物流模式——低空无人机物流

随着低空空域的逐步有序开放, “低空经济”已逐渐成为推动各国经济发展的新动力, 是新质生产力的典型代表^[1]。2021年2月颁布的《国家综合立体交通网规划纲要》, 正式提出了发展“低空经济”的交通网规划目标。2023年底, 中央经济工作会议明确将“低空经济”列为重点打造的战略性新兴产业

业。2024年, 低空经济作为“新增长引擎”被正式写入中央政府工作报告^[2]。低空经济是以各种有人驾驶和无人驾驶航空器的各类低空飞行活动为牵引, 辐射带动相关领域融合发展的综合性经济形态^[3]。低空经济的具体应用形式包括“低空物流”、“低空旅游”、“低空+消防”和“低空+应急”等。为规范无人驾驶航空器飞行并促进相关产业健康发展, 国家于2023年发布了《无人驾驶航空器飞行管理暂行

收稿日期: 2024-12-05

基金项目: 广东省科技计划项目 (2024B1212100007); 国家自然科学基金资助项目 (62273102); 广州市科技计划资助项目 (2023A03J0939)

作者简介: 傅惠 (1981—), 男, 湖北省人, 教授, 博士, 主要研究方向为生产与服务系统建模、控制及仿真。Email: hui.fu@gdut.edu.cn

条例》；同年，交通运输部和中國民用航空局也分別发布了《民用无人驾驶航空器运行安全管理规则》和《民用微轻小型无人驾驶航空器运行识别最低性能要求(试行)》，从登记、适航、空中交通、运行管理等方面，进一步细化了无人驾驶航空器运行安全管理规范内容。

通常，无人驾驶航空器(以下简称“无人机”)有多种分类方式。首先，按照空机重量、起飞重量和飞行速度等性能指标分为 5 个类别。其次，按照应用领域来看，又可分为军用(如侦察监视、后勤补给、边境巡逻等)和民用两大领域。其中，如图 1 所示，无人机的民用领域可根据应用场景，划分为 3 类：1) 面向政府(To G)，主要提供城市测绘、应急救援、灾害管理和设施检测等服务；2) 面向企业(To B)，主要包括农林植保、电力巡线、医疗服务、高速公路巡检和商业摄影等应用；3) 面向消费者(To C)，主要涉及物流配送和私人拍摄等业务。

低空物流是一种主要依托无人机与其他航空器开展货物三维储运配的新兴物流模式，具有提高仓储管理效率、避开地面交通堵塞、突破复杂空间阻隔和降低运输成本等优势，有助于解决城市物流配送

和偏远物流进村“最后一公里”难题^[4]。低空物流的发展将构建起一个立体化、多层次的物流网络，为物流行业提供一种高效快捷的服务模式，为低空经济注入新的活力并提供新的增长点。

低空无人机物流的核心系统如图 1 所示，主要由能源与动力系统、飞行控制系统、环境感知系统、综合航电系统、物流调度系统和安全管理系统组成。能源与动力系统管理无人机的电能，为配送过程提供飞行动力；飞行控制系统负责控制无人机的姿态、位置和速度，确保其安全货运；环境感知系统通过传感器收集周围环境数据，用于障碍物检测与避障；综合航电系统提供物流配送的位置数据并实现实时信息交互，确保货物准确送达；物流调度系统负责管理任务的分配与调度，优化资源利用效率；安全管理系统通过多重加密与防护措施，保护用户隐私与物流安全。本文将从运动与环境感知、无人机运动控制、无人机航线规划、无人机与车辆协同配送优化、无人机-车辆协同配送利益分配、运输安全与隐私安全，以及行业可持续发展等方面，分析低空无人机物流配送发展涉及的重要问题。

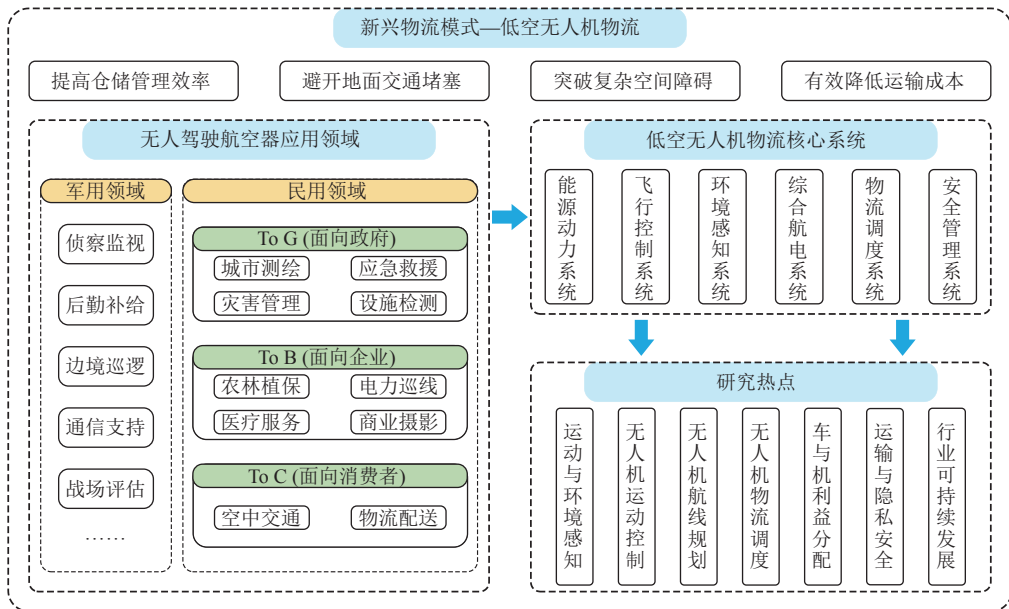


图 1 低空无人机物流配送体系与研究热点

Figure 1 Low-altitude UAV logistics delivery system and research hotspots

2 国内外低空无人机物流配送应用

低空无人机物流研究与应用，源于无人驾驶技术的不断进步，以及电池和传感器等关键设备的持

续提升。凭借灵活性与高效性，无人机物流不仅显著缩短配送时间，还减少了传统运输对环境的影响。因此，世界各国纷纷尝试利用无人机进行物资运输和快递配送。

美国无人机开发及其物流配送起步最早, 著名的无人机公司包括 Matternet、Flirtey、ZipLine、DroneUp 和 Google 母公司 Alphabet 旗下的 Wing 等。2013 年 12 月, 亚马逊 (Amazon) 首次提出“Prime Air”, 即无人机物流配送项目的概念^[5]。2014 年, 谷歌宣布开展 Wing 项目, 并成功验证了无人机在小型物资运输中的可行性^[6]。2016 年, 亚马逊在英国进行了首次无人机配送测试^[7]。同年, 谷歌与 ZipLines 合作, 使用无人机运送医疗物品^[8-9]。2017 年, 美国 Matternet 公司成为世界第一家获得无人机全面运营授权的旋翼无人机物流企业。2019 年, 美国联邦航空管理局 (FAA) 批准 Wing 公司在特定地区提供无人机配送服务, 此举也促使亚马逊改进 Prime Air 项目, 使其能够在 30 min 内将重量为 5 磅的包裹送达半径 15 英里 (24.15 km) 的区域^[10]。

近年来, Walmart 先后与多家无人机服务供应商合作在美国多个州开展无人机送货业务, 促进了最后一公里交付的便捷性和创新性。与此同时, Amazon、UPS、Federal Express 等电商平台或物流公司也在全世界不同国家或地区开展了卓有成效的最后一公里物流配送试点。这些试点应用, 是世界上低空无人机物流配送发展的引擎, 有力推动了低空无人机相关领域的技术革新、学术研究与应用推广。欧洲多个国家同样积极尝试低空无人机物流配送, 如德国邮递和物流集团 DHL、冰岛电子商务平台 AHA 和瑞士邮政 Swiss Post, 分别在邮件包裹、零售商品和医药物品配送方面走在世界前列并积累了宝贵运营经验。欧盟的 SESAR 计划在不断探索如何将无人机融入欧洲空域, 用于包裹配送服务^[11]。2016 年, 德国 DHL 公司在偏远山区测试了无人机运送货物的可行性^[12]。2017 年, 冰岛 AHA 公司与 Flytrex 公司合作, 配送重达 3 kg 的包裹^[13]。2019 年, 爱尔兰 Manna 公司进行了近 9 万次试飞, 以保证无人机送货的安全^[14]。瑞士邮政也开始在多个城市间提供医疗样本运输服务^[15]。

以色列的 Flytrex 公司与 Gadfin 公司, 以及中国的大疆、亿航智能设备、丰翼科技等公司, 是亚洲低空物流无人机企业界的突出代表。得益于无人机上下游产业链的完备性优势, 近年来, 国内低空物流发展迅速, 阿里巴巴、京东、美团、菜鸟等平台, 以及中国邮政、顺丰科技等物流企业, 均开展了与世界技术同步的无人机送货服务。

例如, 顺丰科技在 2013 年便投入低空无人机

物流领域的探索, 并进行了多次无人机测试^[16]。2015 年, 圆通与淘宝成功完成了无人机物流的首次试验^[17]。2016 年, 京东宣布将无人机正式投入农村物流试点运行^[18]。2017 年 10 月, 阿里巴巴旗下的菜鸟网络进行无人机群组配送实验^[19]。此外, 美团、苏宁和大疆等公司也积极尝试将无人机运输形式与传统物流资源相结合, 形成高度自动化与智能化的运输系统, 实现真正的“智慧物流”。

3 相关文献

用主题词 UAV delivery 或 Drone delivery 或 Drone logistics 在 Web of Science 核心数据库进行检索, 搜索到 2020~2024 年间与主题高度相关的期刊文章 1 300 余篇。其中期刊来源包括 Transportation Research Record、Transportation Research Part A/B/C/D/E、IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems、Transportation Science、IEEE Transactions on Wireless Communications 和 IET Intelligent Transport Systems 等, 研究涉及工程技术、交通运输、计算机科学、自动控制和应用数学等领域。用主题词低空物流或无人机物流等组合, 在中国知网以及万方数据库等中文数据库检索到核心期刊论文共 120 余篇, 研究内容以起降点选址、路径规划、任务调度等为主。2019 年之前与无人机物流相关的中英文论文总数为 152 篇; 2019 年~2024 年 (10 月底之前) 6 年间, 各年论文总数分别为 115、158、205、268、303、241 篇。利用 VOSviewer 1.6.20 对检索到的中英文文献进行关键词可视化分析, 搭建关键词共现网络图, 如图 2 所示。从聚类规模可看出, 以无人机物流为主题性关键词的聚类, 主要包括快递物流、城市物流、车辆路径规划和货车调度等方面的关键词。同时, 这从侧面表明以上所述关键词也是该领域研究的重点内容。

4 低空无人机物流配送研究热点

4.1 运动与环境感知

在进行物流运输作业时, 无人机需要对货物装载状态、自身飞行姿态和航线安全条件进行有效检测, 以确保无人机能安全可靠地完成配送任务。因此, 需要搭载不同传感器来实现运输任务^[20], 例如装载 GPS 以获取无人机与收货人的位置信息, 并提

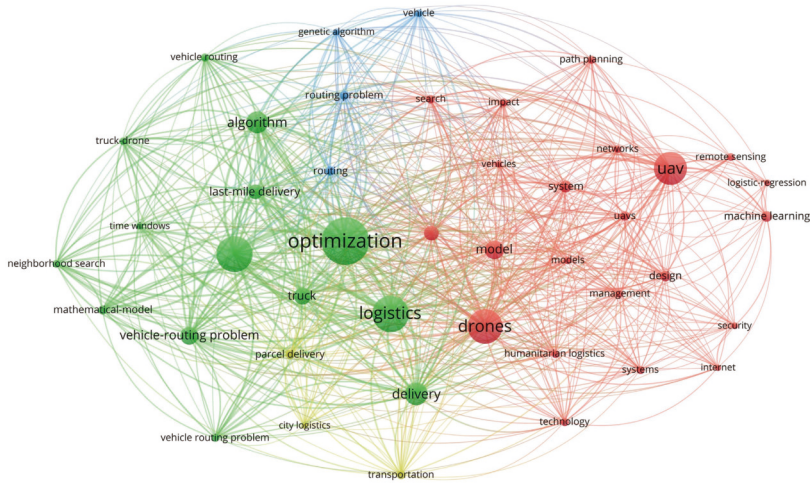


图 2 关键词共现网络图

Figure 2 Keyword co-occurrence network

供地图导航功能以确定配送路线^[21]；装载激光雷达绘制四周环境地图，防止无人机在配送过程中发生碰撞^[22]；装载有效载荷传感器判断货物是否被牢固抓取，以保证货物不会在空中掉落^[23]；配备 IMU 帮助无人机在飞行过程中保持稳定^[24]；摄像头和测距仪的结合能够保证货物精准着陆并准确送达收货人^[25]。通过搭载这些传感器，无人机能够高效执行配送任务，提高物流的安全性、准确性和可靠性。

4.2 无人机运动控制

无人机低空物流配送依赖精确的运动控制，以确保货物按预定航迹运输。在此过程中，具体控制参数包括姿态、位置和速度^[26]。其中，姿态是指无

人机在空中的姿势和方向；位置即无人机在三维空间中的坐标；速度控制则通过调整螺旋桨的转速来实现^[27]。无人机飞行控制方法可以分为线性控制和非线性控制两类。线性控制方法包括 PID 控制、线性二次调节器 (LQR)、模型预测控制 (MPC) 和 H_{∞} 控制等。非线性控制方法包括反馈线性化控制、滑模控制、反演控制和自适应控制等。表 1 为无人机控制方法的相关说明。

总体而言，线性控制方法计算效率高、实现简单，适合稳定环境下的物流配送，但对非线性和不确定性适应性较弱。相比之下，非线性控制具备更强的环境适应能力，能应对复杂干扰和不确定性，

表 1 无人机控制方法

Table 1 UAV control methods

文献	控制方法	控制步骤	适用场景	性能	实际效果
[28]	PID 控制	调节比例、积分和微分环节	稳定飞行 精确配送	鲁棒性弱 系统易超调或震荡	快速响应环境变化，保证物流任务完成
[29]	LQR 控制	最小化系统状态和控制输入	高精度 配送过程	鲁棒性弱 非线性时稳定性较差	优化飞行轨迹，提高姿态控制性能
[30]	模型预测控制	预测未来状态生成最优控制	规避动态 障碍物	鲁棒性适中 预测性强	保证无人机配送动态安全
[31]	H_{∞} 控制	用 H_{∞} 范数作目标函数的度量	自主着陆 轨迹跟踪	鲁棒性强 控制器设计复杂	抑制外部干扰带来的影响
[32]	反馈线性化控制	将非线性系统线性化处理	多无人机 协同轨迹跟踪	鲁棒性弱 误差大时系统不稳定	实现多机协同运输的稳定轨迹跟踪
[33]	滑模控制	调整系统结构按 预定滑动模态运动	复杂环境下的 路径跟踪	鲁棒性强 存在抖振等问题	稳定的姿态控制精准的路径跟踪
[34]	反演控制	递归设计控制器	实现高效 轨迹跟踪	鲁棒性适中 需良好初始条件	控制集成机械臂的无人机系统
[35]	自适应 控制	应对动态变化 自动调整系统参数	山地、丛林等 高挑战性任务	鲁棒性强 变化较快时系统不稳定	能够更好地处理非线性干扰

但实现和计算更为复杂。

4.3 无人机航线规划

4.3.1 无人机航线优化

无人机航线优化问题旨在通过设计最佳航行路径, 优化无人机的飞行距离、飞行时长、能量消耗、避障安全性以及环境影响等多个目标, 从而提高无人机的执行效率和运行安全性。在航线优化的建模过程中, 需要考虑无人机的飞行能力、任务需求和外部环境等因素, 设计续航里程和电池寿命、飞行高度和速度限制、障碍物和禁飞区、风速和天气条件以及信号覆盖等约束条件。其中, 谢华等^[36]和李楠等^[37]针对飞行速度、时间等多约束条件进行动态路径调整, 设计了自适应路径优化模型; 何程等^[38]提出基于动态规划的能量管理策略, 构建了能量管理策略和货运任务路径综合优化模型。为求解此类优化问题, 国内外学者根据模型的计算复杂度, 设计了图搜索算法(如 A*算法和 Dijkstra 算法等)、遗传算法(GA)、模拟退火算法(SA)、粒子群算法(PSO)、深度学习和强化学习等求解方法。其中, Liu 等^[39]提出 Pareto 优化法, 将协同配送目标分解为多目标问题进行求解计算; 杨健等^[40]则提出一类分层优化任务规划方法, 并结合仿真实验模拟无人机航行路线规划方案; 针对有容量限制的航线路径优化问题, Savuran 等^[41]提出基于动态 VRP 的求解算法; Ait-Saadi 等^[42]在解决无人机路径规划的多目标优化问题时, 设计了基于合作博弈的 CAOSA 算法。另外, 无人机航线优化问题的研究基础是一个含有起落场、中转场等地面基础设施布局网络。因此, 国内外学者们将设施选址与航线优化两类决策整合为选址-路径的组合优化问题, 并针对性地设计了优化模型和求解算法。其中, 王冬冬等^[43]提出基于超级网络和时空网络相结合的方法, 来解决包含基站选址的无人机交通巡视路径优化问题, 并建立相应的整数规划优化模型; 任新惠等^[44]结合 K-means 聚类 and 数学模型优化配送中心选址, 并改进路径规划; Hong 等^[45]提出一种弹性位置选择路径优化模型, 使用预计流量和覆盖率进行评估。最后, 关于不确定性的优化问题, Jin 等^[46]提出基于分布鲁棒优化方法, 处理配送过程中的不确定因素, 用以解决无人机配送物流系统的设施选址与路径设计的协同优化问题; Cheng 等^[47]引入“插入删除操作”算法, 处理卡车与无人机的动态配送需求

和变化。

4.3.2 无人机航线规划的多目标优化

无人机航线规划的多目标优化涉及配送成本、时间、客户满意度等复杂问题, 并需要应对诸如天气变化、障碍物、能耗消耗等不确定性因素。表 2 按照问题特征、决策类型、目标函数、约束条件和求解方法, 依次对比分析了无人机航线规划的多目标优化问题的国内外研究文献。其中, Ajith 等^[48]提出多目标路径规划框架(MOPP), 并结合 DHOA 和 WSOA 优化路径; Zhang 等^[49]引入多目标进化算法(DMOEA)来处理复杂城市环境中的路径优化; 杜云等^[50]通过改进粒子群算法进行航线预规划, 然后利用高斯伪谱法进行航线再规划, 以实现快速、精确和最优的多目标侦察任务无人机航线规划; Peng 等^[51]提出 M2M-DW 分解算法, 将多目标优化问题分解为子问题, 实现更高的求解效率; Gao 等^[52]提出在复杂环境下减少总成本的配送模型, 提高客户满意度; Xu 等^[53]采用 NSGA-II 算法来求解无人机与车辆的联合配送优化问题; 佟刚等^[54]则设计了 ODEA-ARA 和 PMALNS 策略来提升算法的计算速度和精确度。

4.4 无人机与车辆协同配送优化

物流配送优化通常包括网络构建、任务调度和配送路径优化。低空无人机配送往往是在现有的物流配送网络的基础上, 以现有配送中心/仓库、中转站等物流设施作为无人机起飞降落点, 替代地面车辆执行部分客户配送任务, 故有关无人机配送网络优化的研究相对较少, 感兴趣的读者可参阅文献[55]。无人机配送的任务调度优化涉及为无人机和/或车辆等最优分配服务客户和配送任务, 配送路径优化则是合理安排无人机与车辆的服务路线, 实现运输成本或时间最小以及客户满意度最高等优化目标。这两方面优化在不同的配送模式下大多被同时研究, 因此本节在配送优化文献综述时不分开讨论配送任务调度和路径优化。

无人机物流配送模式包括仅无人机(群)配送模式和无人机与地面车辆联合配送模式。仅无人机(群)配送模式是指一架或多架无人机从仓库或集结点起飞, 运送货物给一个或多个需求点, 然后返回。这种模式在城市医疗物资、灾后救援物资等配送领域已多有应用。李翰等^[56]研究城市区域多物流无人机的多目标任务分配问题。Du 等^[57]考虑无人机

表 2 无人机航线规划的多目标优化

Table 2 Multi-objective optimization of UAV route planning

文献	问题特征	决策类型	目标函数	约束条件	求解方法
[39]	1) 路段交通监测 2) 常规对象	路径	“无人机数量”、“航线长度/距离”	无人机数	基于 Pareto 最优技术的进化算法
[48]	1) 城市低空环境 2) 常规对象	路径	“航线长度/距离”、“风险避免”		DHUWO 混合优化算法
[49]	1) 多种应用场景 2) 常规对象	路径	“航线长度/距离”、“风险避免”	飞行斜率、转弯半径	具有双重约束处理机制的新型多目标进化算法
[50]	1) 物流配送 2) 常规对象	路径(链)	“成本”、“时长/不同编队时间差”、“客户满意度”	到达时间、降落地点	并行多目标自适应大邻域搜索算法框架
[51]	1) 复杂环境 2) 应急	路径	“航线长度/距离”、“风险/碰撞避免”	爬坡坡度	基于分解的约束多目标进化算法
[52]	1) 城市物流 2) 常规对象	路径	“成本”、“客户满意度”	需求点约束	基于非优势排序遗传算法 II 的新遗传方法
[53]	1) 复杂环境 2) 应急	路径	“飞行高度”、“风险/碰撞避免”	轨迹高度约束	基于维度探索和差异进化的多目标进化算法
[54]	1) 物流配送 2) 常规对象	路径	“航线长度/距离”	配送点约束	遗传算法

的能耗变化和客户的混合时间窗,优化无人机群的服务分配和取送路线,以最小化总能源成本。

由于无人机有效载荷低、续航能力差,无人机群单独配送多适用于小批量多批次场合,对于大规模、大范围物流配送则不太有利,但是,无人机与地面车辆相结合可优势互补,形成高效的联合物流模式,因而受到企业界和学术界的更多关注。无人机与地面车辆联合物流模式可分为车辆保障无人机配送、无人机保障车辆配送、无人机和车辆并行配送、无人机和车辆同步配送模式^[58]。无人机保障车辆配送模式是指车辆执行配送任务时,无人机为缺货车辆进行补货,目前这方面应用和研究很少。无人机和车辆并行配送模式是指车辆和无人机各自从仓库出发独立运送货物,无人机由于续航和载荷限制,通常服务仓库周边较小范围内的客户,并且它与车辆服务路线之间没有交集,所以优化复杂度较低。进行联合物流调度优化时,不仅要考虑无人机和车辆载重、客户需求时间等限制,还要处理电动车充电、同时取送以及不确定需求等特定情况的要求。

1) 卡车保障无人机配送。无人机负责所有需求点的货物配送,卡车只负责装载运送无人机与货物。在此模式下,除了无人机的服务分配和路线安排,还需优化卡车的最佳路线。Jeong 等^[59]针对一辆卡车携带多架无人机、无人机每趟飞行服务多个客户的系统,提出一种启发式算法,确定卡车的停

车点及无人机的服务路线,最小化总完成时间。

2) 无人机和卡车同步配送。卡车携带无人机从仓库出发,无人机在卡车为客户送货时起飞执行另一项配送任务,并在完成后沿其路线返回卡车,到下一位置再起飞配送。卡车路线和无人机路线相互影响,因此,两者的配送任务分配和路线优化则更为复杂。Thomas 等^[60]允许多架无人机在卡车行驶途中发射和回收,为使总配送时间最小,构建问题的混合整数线性规划模型(MILP),并提出松弛-修复和重耦合-细化-优化两阶段启发式方法进行求解。Sadok 等^[61]针对多辆卡车配备多架无人机的同步配送问题,提出 K-means 算法和混合遗传分布式优化算法。

3) 无人机和电动卡车同步配送。随着绿色环保的重视和新技术的发展,企业越来越多地应用电动卡车替代传统送货卡车。无人机与电动卡车联合配送过程中,两者都需要充电,因此,在调度优化时,还需要考虑无人机与电动卡车的电能容量和消耗情况,以制定包含充电站的最优联合配送路线。Zhu 等^[62]基于电动车和无人机共享能量假设,提出基于弧的 MILP 以及分支定价(BP)算法和可变领域搜索(VNS)启发式算法,解决农村地区急救物品的联合配送问题。

4) 车辆和无人机联合取货和送货优化。客户不仅有送货需求,还有取货要求,如退货给商家、门店之间调货等。为使车辆和无人机同时执行送货和

取货任务, 必须保证在各自空闲的容量和载重量允许时才可进行取货, 这增加了调度优化的复杂度。Meng 等^[63]研究每辆卡车配备一架无人机的卡车车队能够以最低的总成本满足客户的取送货需求, 通过行驶距离、装备重量和包裹重量模拟无人机能耗, 提出 MILP 模型和两阶段模拟退火算法。Gao 等^[64]针对车队中每辆卡车携带多架无人机且客户规定了取送时间的情况, 设计结合列生成和基于逻辑的 Benders 分解混合算法以获得最小总成本。

5) 车辆和无人机联合配送的不确定性调度。在实际的联合物流系统中, 车辆与无人机的行驶速度、电能消耗和续航时限等往往是动态不确定的, 而且客户需求及其时间要求也可能改变, 这就需要

进行不确定性调度优化, 降低因固定值假设进行确定性优化所导致的损失。Yin 等^[65]针对不确定的需求和卡车行驶时间, 研究运送救援资源的卡车与无人机组合的路径问题, 设计基于弧的鲁棒 MILP 模型, 并提出增强的分支-定价-切割算法求解模型。

表 3 对比分析了无人机-车辆协同物流调度的近期相关文献^[60-70]。总的来说, 现有文献大多关注无人机和卡车同步送货的确定性调度优化, 较少研究物流实践中联合取送及不确定优化问题, 对于日益增多的电动车和无人机联合运输调度更有待深入研究。就问题求解来看, 现有研究主要采用精确算法, 如分支定价等, 以及(元)启发式算法, 如可变邻域搜索等。

表 3 无人机-车辆协同物流调度文献对比

Table 3 Literature comparison of UAV-truck cooperative logistics scheduling

文献	问题场景及特征	目标	模型	求解方法
[60]	城市配送; 1 卡车- m 无人机; 每次飞行服务 1 个客户	最小总配送时间、成本	MILP	松弛-修复和重耦合-细化-优化两阶段启发式方法
[61]	城市配送; m 卡车- m 无人机; 每次飞行服务 1 个客户	最小配送时间	MILP	K-means 算法; 混合遗传分布式优化算法
[66]	城市配送; 1 卡车- m 无人机; 时间窗; 每次飞行服务 1 个客户	最小总配送成本、最大化客户满意度	0-1 整数规划	混合多目标遗传优化; 贪婪启发式算法
[67]	城市配送; 1 卡车-1 无人机; 每次飞行服务多个客户	最小总配送时间	MILP	分支切割算法
[68]	城市配送; m 卡车-1 无人机; 时间窗; 每次飞行服务多个客户	最小配送成本	基于弧的 MILP	基于分支-定价-切割框架的精确算法
[69]	城市配送; m 卡车- m 无人机; 时间窗; 每次飞行服务多个客户; 停车有社会处罚	最小总配送时间、总成本	MILP	混合变邻域搜索算法
[62]	农村急救配送; 1 电动车-1 无人机; 共享能量; 每次飞行服务 1 个客户; 访问充电站	最小总配送时间	基于弧的 MILP	精确的分支定价算法; 可变邻域搜索启发式算法
[63]	城市配送; m 卡车- m 无人机; 取送货; 每次飞行服务多个客户	最小总配送成本	MILP	两阶段模拟退火算法
[64]	城市配送; m 卡车- m 无人机; 取送货; 时间窗; 每次飞行服务多个客户	最小化总成本	MILP	结合基于逻辑的 Benders 分解和列生成的混合算法
[65]	灾后物资运输; m 卡车- m 无人机; 时间窗; 每次飞行服务多个客户; 卡车数量有限; 需求不确定	调度成本、运输成本和延误的惩罚成本之和最小	基于弧的鲁棒 MILP	增强的分支-定价-切割算法
[70]	城市配送; 1 卡车-1 无人机; 取送货时间窗限制; 需求不确定; 每次飞行服务多个客户	最大总利润、最小总配送时间	马尔可夫决策过程	离线增强构造算法; 基于分段的启发式算法

4.5 无人机-车辆协同配送利益分配

在无人机-车辆协同配送情境下, 无人机和卡车的协同作业是其重要特色, 这就衍生出关于无人机和卡车合作的利益分配问题。在低空无人机物流

配送中, 利益分配是将无人机-车辆协同所创造的收益, 按照既定规则在两者之间进行分配的过程。考虑到不同配送模式下, 车辆、无人机的配送任务和配送成本都存在差异, 物流企业在分配利益时必

须考虑两者对分配方案的满意度。在合作联盟中,若某运输主体所分配到的利益低于其成本,则该主体对合作的满意度下降,损害双方的合作,甚至会导致该运输主体退出联盟。

目前,许多学者运用合作博弈理论来解决物流运输的利益分配问题。在合作物流网络中,合作博弈理论可以保障各参与方在利益分配时的公平性和效率性,其中,核心、核仁和 Shapley 值是合作博弈论中应用最广泛的概念^[71]。

1) 核心:通过集体理性和个人理性两个约束条件维持合作的稳定性。Dai 等^[72]、Chen 等^[73]分别考虑每个货运单元对合作物流运输的贡献和不同货运单元的燃油节约,Chen 还引入效率违反和稳定性违反两个指标,同时解决核心的成本分配及其稳定性两个问题^[74]。尽管核心广泛应用于管理研究,但核心解集可能为空,也可能有多个解,往往不能为分配问题提供唯一的解决方案^[65]。

2) 核仁:以超额函数为指标来评估无辆无人机-车对分配方案的满意程度,综合选择一个最公平的分配方案。Sudhölter 等^[75]和 Tarashnina 等^[76]在考虑某个运输主体对博弈的影响下,先后引入更公平的小核仁和更稳定的 Shapley-Maschler 核仁 (SM-核仁),但相较于核仁,后者在满足运输需求较大的货运商方面存在一定的优势^[77],但其在计算上较为复杂,尤其是在参与者数量较多时,求解过程繁琐,效率较低^[78]。

3) Shapley 值:通过考虑无人机-车辆在所有可能合作中的边际贡献,计算其平均收益。Wang 等^[79]与 Gao 等^[80]分别将路径规划和物流市场的不确定性考虑在 Shapley 值的计算中,与之类似的还有 Wang 等^[81],同时将资源投入、运营管理和风险承担等因素纳入 Shapley 值,解决了共享物流服务模式由于多种因素变化带来的收益波动问题。

综上所述,核心具有稳定性,但其解集可能不存在或不唯一,Shapley 值和核仁在不失公平的情况下弥补了这一缺陷。可参考上述方法,将无人机-车辆协同运输的路径规划与利益分配相结合,利用核心求解关于无人机-车辆协同运输利益分配方案。若核心集非空,则可找出其中唯一的核仁,确保分配方案同时满足稳定性和公平性;若核心集为空,则可利用 Shapley 值,考虑无人机-车辆的边际贡献及其他重要因素,以平衡无人机与车辆主体

的合作关系,从而求解出合理的利益分配方案。

4.6 运输安全与隐私安全

无人机的安全问题表现为保护无人机的周边环境(包括人、财产和其他飞行器)以及无人机通信信息的保密性、完整性和真实性。无人机物流货运过程中的安全问题,主要体现为避免运输碰撞,保证无人机自身及其周边环境与货物的安全;防止非法入侵,保护用户的个人信息;抵御网络攻击,确保通信信息的真实性和可靠性等。现有关于低空无人机物流的运输安全与用户隐私安全研究,可分为以下 4 类。

1) 传感器攻击。无人机高度依赖传感器检测精度以保证运输安全可靠,一旦传感器遭受到攻击,将可能导致无人机配送失败。Abera 等^[82]提出一种基于控制流图的数据认证框架,用于检测 GPS 是否被攻击。为减少被攻击后 GPS 干扰对飞行的影响,Wu 等^[83]使用单目摄像头与 IMU 传感器相结合,使无人机能够在失去 GPS 信号的情况下自主飞行。对于攻击者注入虚假数据的情形,Tirado 等^[84]提出一种基于物理不变量的方法,保护无人机传感器的数据结构。

2) 硬件攻击。无人机的硬件为无人机提供了结构支持与动力支持,使无人机在物流过程中能够承受外部压力和冲击。若无人机的硬件被攻击,则导致无人机飞行过程发生碰撞,进而威胁无人机物流安全。对于无人机避障问题,常用的方法是通过传感器和算法实现对障碍物的感知和规避^[85],在较短的响应时间内,完成无人机检测和避障过程。

3) 软件攻击。无人机软件系统用于管理无人机飞行模式和控制算法,确保飞行稳定性和安全性。攻击者若进行恶意软件植入,甚至进行无人机劫持,可达到窃取用户隐私与制造恐慌的目的。Sedjelmaci 等^[86]提出一个 UAV 网络安全系统,有效检测网络入侵情况。针对远程注入恶意软件的问题,Seshadri 等^[87]确保飞行软件运行的完整性;Dushku 等^[88]则提出一种基于软件验证的方法抵御软件攻击。为了防止攻击者篡改信息,Yao 等^[89]建立一个安全框架,有效抵御了身份认证威胁、响应攻击与异常入侵等问题。

4) 通信攻击。通信是无人机系统飞行控制和数据传输的关键组成部分。攻击者通过监听无人机与无人车之间的通信,获取包裹信息与位置数据,对

客户的隐私安全构成严重威胁。针对无人机通信窃听问题, Bellare 等^[90]与 Zhang 等^[91]分别采用认证加密和反窃听功率控制算法, 确保交换数据的保密性和真实性。

总体而言, 无人机在物流配送中面临众多安全挑战, 通过不断完善无人机的安全防护措施, 能够在很大程度上提升物流配送的效率与安全性, 为无人机在物流领域的广泛应用提供更坚实的保障。

4.7 行业可持续发展

低空无人机作为新兴物流配送方式, 正在国内各大城市开展试点工作。在实际应用及推广过程中, 尚需重视无人机物流配送的适用条件、持续运营的经济性以及法律法规的配套情况等, 避免出现盲目扩张或技术与实际需求脱节等问题。

研究者普遍认为, 地面运输工具(电动车、摩托车和货车等)适用于人口稠密地区, 而无人机与货车协同的方式, 更适用于地形复杂或人口密度较低的区域。然而文献研究表明, 现有无人机应用多关注城市而非农村。一方面, 城市需求更为旺盛, 基础设施如通信网络、能源系统更加发达; 另一方面, 城市无人机应用, 也因其技术新颖性容易引起公众关注和媒体报道。因此, 学术界的无人机物流运输更倾向于城市场景。实际上, 农村地区存在航线管理便捷、人口密度低、效率提升显著等优势。Garg 等^[92]建议学术界应同等关注城市与农村应用场景研究。

当前国内外无人机包裹配送成本明显高于电动汽车配送, 低空物流的基础设施建设、市场接受度和市场规模均处于起步阶段, 关注新旧物流配送市场的竞争与合作博弈, 也是学术界关注的重要问题。Niu 等^[93]以两家物流服务商为例, 对引进无人机后的市场变化进行博弈分析, 提出几点启示。一是无人机的引入将加剧物流行业竞争, 当传统物流企业的能力有限时, 如果市场上未有无无人机物流竞争对手, 建议不要盲目入局。二是对于航空管制严格的中国市场, 无人机进入物流市场有利于缓解传统物流行业竞争, 但企业应避免过度投资。

虽然世界范围内有关空域管理的法律与监管体系各不相同, 但法律法规毫无疑问对未来低空经济的发展至关重要。空中航线规划、通行权限、作业规范、市场准入等制度体系, 将对飞行器制造、作业管理、市场认可度产生直接影响, 也是低空无人

机物流领域需要重点建设的内容。Merkert 等^[94]认为无人机配送行业发展, 同样需要考虑现有物流行业的企业认证、驾驶员从业资格管理等监管体系。可以预见, 有关低空空域管理法律法规、行业监管体系, 将随着行业的发展、空域的开放逐步得以完善。Wang 等^[95]从无人机-车辆协同配送角度, 从空域安全、航线规划、风险评估、互操作性和标准、社会公平以及可持续性六个方面, 分析未来发展存在的具体政策挑战, 读者可自行参考相应内容。相比于技术层面的研究而言, 国内学术界易忽略政策层面的研究。因此, 这里需要特别关注低空物流可能引起的社会公平问题, 比如, 无人机物流在不同收入群体、城市/农村的应用可及性, 以及可能造成的快递员、物流司机的失业^[96]。再比如, 无人机-车辆配送与电商发展可能相得益彰, 也将影响到传统线下销售模式从而影响相关从业人员。

5 总结及未来研究方向

在国家加快培育新质生产力的背景下, 低空无人机物流配送作为近年来兴起的新物流模式, 得到了重点关注与快速发展。通过文献检索发现, 国际上有关无人机物流领域的研究十分丰富, 英文类文献既涵盖无人机设计、运动控制、航迹规划、运输调度等技术研究内容, 也涉及了飞行安全、个人隐私、社会公平、市场博弈等政策性研究内容。国外的研究现状, 也在一定程度上体现了代表新质生产力的新兴行业快速发展趋势, 然而, 现有的中文文献大多以运输调度等技术方法研究为主, 用以辅助和支持政策法规和可持续发展策略的建立。这种较为传统的研究思路也反映出一个问题, 即现有中文文献研究的宽度与深度均滞后于行业发展需求。

文献研究可以从学术角度, 揭示这一新兴领域的发展趋势。在现实场景中, 也应从技术发展成熟度曲线所揭示的客观规律中, 汲取合理成分来科学审视低空无人机物流的发展态势。当前无人机物流正处于期望膨胀期, 政策红利、媒体宣传、新型技术的叠加效应, 将会使得低空无人机物流得以快速俘获公众认知和资本认可。正如新能源汽车、车联网技术的演进史一样, 低空无人机物流也将在技术与政策、社会与企业、市场与资本间经历跌宕起伏的历程, 逐渐从梦幻走向现实, 为社会提供安全、可靠、公平的服务并实现可持续发展。

综上,低空无人机物流行业发展存在的强烈需求,也将是未来学术界值得重点关注的研究方向。具体如下所示。

1) 运输可靠性。如何在机械设计和运动控制方面,保障无人机在物品抓取、运输、释放过程中的运动安全;在运输航线上,如何实现对飞行器、障碍物和环境的准确识别,并实现在立体空间中的静态航线规划与动态航迹高精度控制。

2) 运作多样性。针对居民小区、物流园区和城市片区等应用场景,开展异构无人机群协同物流配送研究,以及无人机与货车、电动车、自行车的多模式协同作业研究,总结出不同场景下的无人机多模式协同配送应用准则,在配送效率与经济性之间取得均衡。

3) 政策配套性。围绕城域、城际大规模任务物流配送问题,从管理者角度开展航线通道规划、空中交通管理、基础设施布置研究,并针对用户隐私保护、网络安全、信息安全以及市场发展不同阶段的政府补贴机制开展政策研究。

4) 经济可行性。学术界可调研无人机低空物流的货物类别与兴趣受众,以及配送成本分担方式对市场占有率的影响。尤其是不同市场成熟度条件下政策性补贴对提升市场占有率的推动作用,以及多主体博弈情形下无人机-车辆协同配送系统的利益分配机理。

5) 社会公平性。工程界应关注新兴无人机物流配送技术,在偏远农村、低收入群体、弱势群体中的可及性,以及无人配送对物流行业发展、就业岗位、传统线下销售的影响。

参考文献:

- [1] 曹政. 2027年北京低空经济产业规模达千亿[EB/OL]. (2024-10-05). <https://news.bjd.com.cn/2024/10/05/10924560.shtml>.
- [2] 汪文正. 首次写入政府工作报告——“低空经济”加速起飞[EB/OL]. (2024-04-02). http://paper.people.com.cn/rmrbwhw/html/2024-04/02/content_26050206.htm.
- [3] 李杭育. 低空经济是类泛在经济[EB/OL]. (2024-09-25). <https://bj.chinadaily.com.cn/a/202409/25/WS66f375aba310b59111d9afe1.html>.
- [4] 朱克力. 低空经济[M]. 北京: 新华出版社, 2024.
- [5] PONZA A. Optimization of drone-assisted parcel delivery[D]. Italy: University of Padova, 2016.
- [6] MADRIGAL A C. Inside Google's secret drone-delivery program[EB/OL]. (2014-08-28). [https://www.theatlantic.com/technology/archive/2014/08/inside-googles-secret-drone-delivery-](https://www.theatlantic.com/technology/archive/2014/08/inside-googles-secret-drone-delivery-program/379306/)

[program/379306/](https://www.theatlantic.com/technology/archive/2014/08/inside-googles-secret-drone-delivery-program/379306/).

- [7] 涂恬. 亚马逊将在英国试验无人机送货[EB/OL]. (2016-07-27). https://caijing.chinadaily.com.cn/2016-07/27/content_26238684.htm.
- [8] PENNIC F. Google's new patent: drone-assisted medical aid-delivery[EB/OL]. (2016-04-06). <https://hitconsultant.net/2016/04/06/googles-new-patent-drone-assisted-medical-aid-delivery>.
- [9] 辞忧. Zipline 将医疗无人机送货服务扩展到科特迪瓦[EB/OL]. (2021-12-04). <https://m.youuav.com/news/detail/202112/51462.html>.
- [10] MADANI B, NDIAYE M. Hybrid truck-drone delivery systems: A systematic literature review[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 92854-92878.
- [11] DOOLE M, ELLERBROEK J, HOEKSTRA J. Estimation of traffic density from drone-based delivery in very low level urban airspace[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2020, 88: 101862.
- [12] BURGESS M. DHL's delivery drone can make drops quicker than a car[EB/OL]. (2016-05-10). <https://www.wired.com/story/dhl-drone-delivery-germany>.
- [13] SHU C. Flytrex launches an autonomous on-demand drone delivery service in Iceland's capital[EB/OL]. (2017-08-23). <https://techcrunch.com/2017/08/23/flytrex-launches-an-autonomous-on-demand-drone-delivery-service-in-icelands-capital>.
- [14] REED J. Drone company to launch small urgent package delivery in Ireland[EB/OL]. (2022-04-05). <https://www.aviationtoday.com/2022/04/05/drone-company-launch-small-urgent-package-delivery-ireland>.
- [15] CHAUVET M, YU H H. Matternet-Swiss Post: Drone-based healthcare delivery (B)[EB/OL]. (2020-09). <https://www.imd.org/research-knowledge/strategy/case-studies/matternet-swiss-post-drone-based-healthcare-delivery-b>.
- [16] 百度百科. 顺丰无人机快递[DB/OL]. (2024-09-23). https://baike.baidu.com/item/%E9%A1%BA%E4%B8%B0%E6%97%A0%E4%BA%BA%E6%9C%BA%E5%BF%AB%E9%80%92/12639086?fr=ge_ala.
- [17] 徐卓. 无人机物流能带来的改变在哪里?[EB/OL]. (2017-07-18). <https://www.hunantoday.cn/article/201707/201707181734043362.html>.
- [18] 百度百科. 京东无人机[DB/OL]. (2023-04-07). https://baike.baidu.com/item/%E4%BA%AC%E4%B8%9C%E6%97%A0%E4%BA%BA%E6%9C%BA/19683841?fr=ge_ala.
- [19] 姜贞宇. 菜鸟网络、农村淘宝国内首次无人机群组跨海快递飞行成功[EB/OL]. (2017-11-07). <https://www.chinanews.com/cj/2017/11-07/8370606.shtml>.
- [20] ESKANDARIPOUR H, BOLDSAIKHAN E. Last-mile drone delivery: past, present, and future[J]. *Drones*, 2023, 7(2): 77.
- [21] ANAND A, BANDYOPADHYAY S, DAS S, et al. Drone delivery system using GPS and telemetry[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 423-429.
- [22] MIRANDA V R F, REZENDE A M C, ROCHA T L, et al. Autonomous navigation system for a delivery drone[J]. *Journal of*

- Control, Automation and Electrical Systems*, 2022, 33(1): 141-155.
- [23] NGUYEN P, KAKARAPARTHI V, BUI N, et al. DroneScale: drone load estimation via remote passive RF sensing[C]. The 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2020: 326-339.
- [24] ABDALLA A, MEDHAT O, GAD N, et al. Self-driving delivery drone approach[D]. Egypt: Mansoura University, 2022.
- [25] KANNAN S S, MIN B C. Autonomous drone delivery to your door and yard[C]// The 5th International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2022: 452-461.
- [26] OKULSKI M, LAWRYŃCZUK M. How much energy do we need to fly with greater agility? Energy consumption and performance of an attitude stabilization controller in a quadcopter drone: A modified MPC vs. PID[J]. *Energies*, 2022, 15(4): 1380.
- [27] GIERNACKI W, GOŚLIŃSKI J, GOŚLIŃSKA J, et al. Mathematical modeling of the coaxial quadrotor dynamics for its attitude and altitude control[J]. *Energies*, 2021, 14(5): 1232.
- [28] MA J, YU S, HU W, et al. Finite-time robust flight control of logistic unmanned aerial vehicles using a time-delay estimation technique[J]. *Drones*, 2024, 8(2): 58.
- [29] ELKHATEM A S, ENGIN S N. Robust LQR and LQR-PI control strategies based on adaptive weighting matrix selection for a UAV position and attitude tracking control[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(8): 6275-6292.
- [30] OLCAY E, MEEB H, ELGER G. Dynamic obstacle avoidance for UAVs using MPC and GP-Based motion forecast[C]// The 22nd European Control Conference. Stockholm, Sweden: IEEE, 2024: 1024-1031.
- [31] KHOTIMAH A K, MARDLIJAH M, SANTOSO A. Design of Robust Control System for delivery drones[C]// The 26th International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation. Seattle, Washington: IEEE, 2023: 301-305.
- [32] RAO N, SUNDARAM S. An input-output feedback linearization based exponentially stable controller for multi-uav payload transport[J/OL]. arXiv, (2022-07-10). <http://doi.org/10.48550/arxiv.2207.04375>.
- [33] CARVALHO G F, ANDRADE F A A, RAMOS G S, et al. Sliding mode controller applied to autonomous UAV operation in marine small cargo transport[J]. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 2023, 4(4): 345-357.
- [34] RODRÍGUEZ-ABREO O, ORNELAS-RODRÍGUEZ F J, RAMÍREZ-PEDRAZA A, et al. Backstepping control for a UAV-manipulator tuned by Cuckoo search algorithm[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, 147: 103910.
- [35] BELIAEV V, KUNICINA N, ZIRAVECKA A, et al. Development of adaptive control system for aerial vehicles[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(23): 12940.
- [36] 谢华, 韩斯特, 尹嘉男, 等. 城市低空无人机飞行计划协同推演与优化调配方法[J]. *航空学报*, 2024, 45(19): 263-285.
- XIE Hua, HAN Site, YIN Jianan, et al. Cooperative deduction and optimal allocation method for urban low altitude UAV flight plan[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(19): 263-285.
- [37] 李楠, 辛春阳. 基于聚类-Floyd-遗传算法的“车辆+无人机”城市物流配送路径优化[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(21): 9186-9193.
- LI Nan, XIN Chunyang. Urban logistics distribution routing optimization of "vehicle-drone" based on clustering-floyd-genetic algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(21): 9186-9131.
- [38] 何程, 童玉奇, 夏兴禄, 等. 面向货运任务的混电垂直起降无人机能量管理策略和任务路径综合优化[J]. *航空学报*, 2024, 45(14): 276-289.
- HE Cheng, TONG Yuqi, XIA Xinglu, et al. Integrated optimization of energy management strategy and mission path for hybrid-electric VTOL UAVs in cargo transportation[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(14): 276-289.
- [39] LIU X, GUAN Z, SONG Y, et al. An optimization model of UAV route planning for road segment surveillance[J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(6): 2501-2510.
- [40] 杨健, 董力勇, 王鸿, 等. 应用分层优化法的多协作无人机任务规划方法[J]. *指挥与控制学报*, 2019, 5(1): 41-46.
- YANG Jian, DONG Liyong, WANG Hong, et al. Multiple cooperative UAVs mission planning by hierarchical optimization method[J]. *Journal of Command and Control*, 2019, 5(1): 41-46.
- [41] SAVURAN H, KARAKAYA M. Efficient route planning for an unmanned air vehicle deployed on a moving carrier[J]. *Soft Computing*, 2016, 20(7): 2905-2920.
- [42] AIT-SAAD I, MERAIHI Y, SOUKANE A, et al. A novel hybrid chaotic aquila optimization algorithm with simulated annealing for unmanned aerial vehicles path planning[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2022, 104: 108461.
- [43] 王冬冬, 何胜学, 路扬. 考虑基站选址的 UAV 交通巡视路径超级时空网络模型[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(9): 2671-2674.
- WANG Dongdong, HE Shengxue, LU Yang. UAV traffic patrolling path planning super-space-time network model considering base station location problem[J]. *Application Research of Computers*, 2019, 36(9): 2671-2674.
- [44] 任新惠, 王佳雪, 王梦琦. 考虑动态能耗的无人机配送选址路径规划研究[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(13): 273-280.
- REN Xinhui, WANG Jiaxue, WANG Mengqi. Research on drone distribution location-path planning considering dynamic energy consumption[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(13): 273-280.
- [45] HONG I, KUBY M, MURRAY A T. A range-restricted recharging station coverage model for drone delivery service planning[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 90: 198-212.
- [46] JIN Z, NG K K H, ZHANG C, et al. A risk-averse distribution-

- ally robust optimisation approach for drone-supported relief facility location problem[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 186: 103538.
- [47] CHENG J, ZHOU Y, WU C, et al. Collaborative truck-drone-motorcycle delivery of emergency supplies for mountain wildfire suppression[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 196: 110468.
- [48] AJITH V S, JOLLY K G. Hybrid optimization based multi-objective path planning framework for unmanned aerial vehicles [J]. *Cybernetics and Systems*, 2023, 54(8): 1397-1423.
- [49] ZHANG W, PENG C, YUAN Y, et al. A novel multi-objective evolutionary algorithm with a two-fold constraint-handling mechanism for multiple UAV path planning[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 238: 121862.
- [50] 杜云, 贾慧敏, 邵士凯, 等. 面向多目标侦察任务的无人机航线规划[J]. *控制与决策*, 2021, 36(5): 1191-1198.
- DU Yun, JIA Huimin, SHAO Shikai, et al. UAV trajectory planning for multi-target reconnaissance missions[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(5): 1191-1198.
- [51] PENG C, QIU S. A decomposition-based constrained multi-objective evolutionary algorithm with a local infeasibility utilization mechanism for UAV path planning[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 118: 108495.
- [52] GAO C J, CHEN Y N, TANG X H. Research on distribution route planning model and algorithm of unmanned aerial vehicle (UAV) based on improved multi-objective genetic algorithm [C]// The 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2021: 1-7.
- [53] XU X, XIE C, LUO Z, et al. A multi-objective evolutionary algorithm based on dimension exploration and discrepancy evolution for UAV path planning problem[J]. *Information Sciences*, 2024, 657: 119977.
- [54] 佟刚, 陈子超, 王锋, 等. 无人机物流系统设计与优化[J]. *机械设计与制造*, 2022(4): 279-283.
- TONG Gan, CHEN Zichao, WANG Feng, et al. Design and optimization of UAV logistics system[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2022(4): 279-283.
- [55] DUKKANCI O, CAMPBELL J F, KARA B Y. Facility location decisions for drone delivery: A literature review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 316(2): 397-418.
- [56] 李翰, 张洪海, 张连东, 等. 城市区域多物流无人机协同任务分配[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(12): 3594-3602.
- LI Han, ZHANG Honghai, ZHANG Liandong, et al. Multiple logistics unmanned aerial vehicle collaborative task allocation in urban areas[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(12): 3594-3602.
- [57] DU P, HE X, CAO H, et al. AI-based energy-efficient path planning of multiple logistics UAVs in intelligent transportation systems[J]. *Computer Communications*, 2023, 207: 46-55.
- [58] 刘正元, 王清华. 无人机和车辆协同配送映射模式综述与展望[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(3): 785-796.
- LIU Zhengyuan, WANG Qinghua. Review and prospect under the mapping mode of coordinated delivery of drones and vehicles[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(3): 785-796.
- [59] JEONG H Y, LEE S. Drone routing problem with truck: Optimization and quantitative analysis[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 227: 120260.
- [60] THOMAS T, SRINIVAS S, RAJENDRAN C. Collaborative truck multi-drone delivery system considering drone scheduling and enroute operations[J]. *Annals of Operations Research*, 2024, 339(1): 693-739.
- [61] SADOK A, EUCHI J, SIARRY P. Vehicle routing with multiple UAVs for the last-mile logistics distribution problem: hybrid distributed optimization[J/OL]. *Annals of Operations Research*, 2024: 1-41(2024-05-24). <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-024-06019-z>.
- [62] ZHU T, BOYLES S D, UNNIKRISHNAN A. Battery electric vehicle traveling salesman problem with drone[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2024, 24(1): 49-97.
- [63] MENG S, GUO X, LI D, et al. The multi-visit drone routing problem for pickup and delivery services[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023, 169: 102990.
- [64] GAO J, ZHEN L, WANG S. Multi-trucks-and-drones cooperative pickup and delivery problem[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 157: 104407.
- [65] YIN Y, YANG Y, YU Y, et al. Robust vehicle routing with drones under uncertain demands and truck travel times in humanitarian logistics[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2023, 174: 102781.
- [66] LUO Q, WU G, JI B, et al. Hybrid multi-objective optimization approach with pareto local search for collaborative truck-drone routing problems considering flexible time windows[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 23(8): 13011-13025.
- [67] BOCCIA M, MANCUSO A, MASONE A, et al. Exact and heuristic approaches for the truck-drone team logistics problem [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 165: 104691.
- [68] YIN Y, LI D, WANG D, et al. A branch-and-price-and-cut algorithm for the truck-based drone delivery routing problem with time windows[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 309(3): 1125-1144.
- [69] TEIMOURY E, RASHID R. A hybrid variable neighborhood search heuristic for the sustainable time-dependent truck-drone routing problem with rendezvous locations[J]. *Journal of Heuristics*, 2024, 30(1): 1-41.
- [70] GU R, LIU Y, POON M. Dynamic truck-drone routing problem for scheduled deliveries and on-demand pickups with time-related constraints[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 151: 104139.
- [71] LUO C, ZHOU X, LEV B. Core, shapley value, nucleolus and

- nash bargaining solution: A Survey of recent developments and applications in operations management[J]. *Omega*, 2022, 110: 102638.
- [72] DAI B, CHEN H. Proportional egalitarian core solution for profit allocation games with an application to collaborative transportation planning[J]. *European Journal of Industrial Engineering*, 2015, 9(1): 53-76.
- [73] CHEN S, WANG H, MENG Q. Cost allocation of cooperative autonomous truck platooning: Efficiency and stability analysis [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2023, 173: 119-141.
- [74] KIMMS A, KOZELETSKYI I. Core-based cost allocation in the cooperative traveling salesman problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(3): 910-916.
- [75] SUDHÖLTER P. The modified nucleolus: Properties and axiomatizations[J]. *International Journal of Game Theory*, 1997, 26(2): 147-182.
- [76] TARASHNINA S. The simplified modified nucleolus of a cooperative TU-game[J]. *Transactions in Operations Research*, 2011, 19(1): 150-166.
- [77] FLISBERG P, FRISK M, RÖNNQVIST M, et al. Potential savings and cost allocations for forest fuel transportation in Sweden: A country-wide study[J]. *Energy*, 2015, 85: 353-365.
- [78] MURALI M, DIVYA P S, KUMARI M S, et al. Distribution of loss cost using proportional nucleolus method in competitive power markets[C]// The 1st International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability. Nagercoil, India: IEEE, 2013: 1046-1051.
- [79] WANG Y, MA X, LIU M, et al. Cooperation and profit allocation in two-echelon logistics joint distribution network optimization[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 56: 143-157.
- [80] GAO J, YANG X, LIU D. Uncertain Shapley value of coalitional game with application to supply chain alliance[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 56: 551-556.
- [81] WANG C, CHEN J, YU X. Research on benefit allocation based on multi-weight H-shapley value: A case study of express logistics sharing[J]. *Public Library of Science ONE*, 2024, 19(7): e0305656.
- [82] ABERA T, BAHMANI R, BRASSER F, et al. DIAT: Data integrity attestation for resilient collaboration of autonomous systems[C]// The 26th Network and Distributed Systems Security Symposium. San Diego, California: IEEE, 2019.
- [83] WU A D, JOHNSON E N, KAESS M, et al. Autonomous flight in GPS-denied environments using monocular vision and inertial sensors[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2013, 10(4): 172-186.
- [84] TIRADO R Q. Securing autonomous vehicles with robust physical invariants[M]. American: The University of Texas at Dallas, 2020.
- [85] YASIN J N, MOHAMED S A S, HAGHBAYAN M H, et al. Unmanned aerial vehicles (uavs): Collision avoidance systems and approaches[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 105139-105155.
- [86] SEDJELMACI H, SENOUCI S M, MESSOUS M A. How to detect cyber-attacks in unmanned aerial vehicles network?[C]// The 59th IEEE Global Communications Conference. Washington, D. C.: IEEE, 2016: 1-6.
- [87] SESHADRI A, PERRIG A, VAN D L, et al. SWATT: Software-based attestation for embedded devices[C]// The 25th IEEE Symposium on Security and Privacy. Oakland, California: IEEE, 2004: 272-282.
- [88] DUSHKU E, RABBANI M M, CONTI M, et al. SARA: Secure asynchronous remote attestation for IoT systems[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2020, 15: 3123-3136.
- [89] YAO A, JIANG F, Li X, et al. A novel security framework for edge computing based uav delivery system[C]// The 20th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications. Shenyang: IEEE, 2021: 1031-1038.
- [90] BELLARE M, NAMPREMPRE C. Authenticated encryption: Relations among notions and analysis of the generic composition paradigm[C]// The 6th International Conference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000: 531-545.
- [91] ZHANG G, WU Q, CUI M, et al. Securing UAV communications via trajectory optimization[C]// The 60th IEEE Global Communications Conference. Singapore: IEEE, 2017: 1-6.
- [92] GARG V, NIRANJAN S, PRYBUTOK V, et al. Drones in last-mile delivery: a systematic review on efficiency, accessibility, and sustainability[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2023, 123: 103831.
- [93] NIU B, ZHANG J, XIE F. Drone logistics' resilient development: impacts of consumer choice, competition, and regulation [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2024, 185: 104126.
- [94] MERKERT R, BUSHELL J. Managing the drone revolution: A systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2020, 89: 101929.
- [95] WANG S, ZHENG C, WANDEL T S. Policy challenges for coordinated delivery of trucks and drones[J]. *Journal of the Air Transport Research Society*, 2024, 2: 10000.
- [96] ZHANG D, YANG P P J, TSOU J Y. Advancing social equity in urban UAV logistics: insights from the academic literature and social media[J]. *Drones*, 2024, 8(11): 688.