

长江经济带低空物流网络构建：无人机系统与综合交通网络的融合应用及发展战略研究

王涛

北京龙禹石油化工有限公司，北京

DOI:10.62836/gse.v3i2.1275

摘要：在全球化供应链变革、智能物流技术迅猛发展的背景下，低空经济已经成为国家战略竞争的新前沿，而长江经济带作为我国经济发展的主轴，其传统以水运为骨干的物流体系在末端衔接、跨域协同与应急响应等方面存在一定结构性短板。因此，本文聚焦于低空物流网络与流域既有交通体系的协同融合，先系统分析长江物流体系的现状及主要痛点，继而厘清无人机物流的应用场景及关键技术模式，由此自然地引出“廊道—枢纽—节点”三级联动的流域性低空物流网络架构，系统、扎实地论证其在提高物流韧性、驱动产业创新、服务国家战略诸方面的重大价值。文章客观论证该架构在提升物流韧性、优化产业布局、强化应急保障等方面的潜在价值，并从技术集成、空域管理、法规标准、商业模式与社会接受度等维度识别核心挑战与风险。在此基础上，又提出分阶段、多主体协同的实施战略及相应的政策建议，真正做到理论联系实际，为我国低空物流产业的发展及长江经济带高质量一体化建设都提供切实可行的参考。

关键词：低空物流；无人机运输；长江流域；立体交通；智慧供应链；多式联运；实施路径

Construction of a Low-Altitude Logistics Network in the Yangtze River Economic Belt: A Study on the Integration and Development Strategy of Unmanned Aerial Vehicle Systems and Integrated Transportation Networks

Tao Wang

Beijing Longyu Petrochemical Co., Ltd., Beijing

Abstract: Driven by global supply chain restructuring and the rapid evolution of intelligent logistics, the low-altitude economy has become a new frontier in national strategic competition. While the Yangtze River Economic Belt serves as a vital engine of China's economy, its traditional logistics system—centered on waterway transport—faces structural bottlenecks in last-mile connectivity, cross-regional synergy, and emergency response. This study investigates the integration of low-altitude logistics networks with the region's existing multimodal transport system. First, we analyze the current status and critical constraints of the Yangtze River logistics framework. We then identify key application scenarios and technological paradigms for drone logistics, leading to the proposal of a novel “Corridor-Hub-Node” three-tiered architecture for watershed logistics. The paper substantiates the architecture's value in enhancing logistics resilience, fostering industrial innovation, and supporting national

strategies. Additionally, we assess potential benefits in industrial optimization and emergency safeguarding, while addressing core challenges related to technology integration, airspace governance, regulatory standards, business models, and social acceptance. Finally, a phased, multi-stakeholder implementation strategy is proposed, bridging theory and practice to provide actionable insights for the high-quality, integrated development of the Yangtze River Economic Belt.

Keywords: low-altitude logistics; drone transportation; Yangtze River basin; three-dimensional transportation; smart supply chain; multimodal transport; implementation path

1 引言

1.1 研究背景与核心议题

全球物流体系目前正处于以数字化、网络化、智能化为特征的深刻重塑期，因此对低空空域（一般指真高1000米以下空域）资源的战略性开发与利用，就是“低空经济”的核心内涵，也自然地成为重塑区域交通格局、优化产业生态的关键力量。无人机物流作为低空经济中商业化前景最明确、最突出的领域，已经从技术验证阶段进入了场景化、规模化应用的新阶段。我国长江经济带横贯东中西三大区域，其“生态优先、绿色发展”的战略定位及高质量发展的内在诉求，对区域物流体系提出了更高、更明确的绿色、高效、智慧、韧性诸种要求。但现有体系在末端覆盖、跨行政区协同及极端天气应对等方面仍存在提升空间。探索无人机物流系统与长江水运、公路、铁路网络的协同融合，有助于优化传统物流模式，服务交通强国与长江大保护战略，为流域物流体系升级提供新的技术路径。

1.2 研究现状与述评

从国际角度可以十分清楚、有层次地看到，亚马逊（Prime Air）、Wing（Alphabet旗下）、Zipline等机构已经在校园、郊区、非洲偏远地区开展了无人机配送的规模化运营，所选场景以医疗急救、零售配送为主，所采用的技术路线以中小型无人机平台为典型。与此形成极好呼应的是，学术界对无人机路径规划、航时扩展、空域

交通管理（UTM）系统、运营经济性及公众接受度诸种问题已有大量研究。但是，现在有研究多就局部或国家内部场景展开，针对大河流域、跨行政区划的多层级低空物流网络系统性设计仍显不足。

国内在实践及政策两方面都推进得十分扎实，顺丰、京东物流、美团诸家企业已在若干城市开展了无人机物流试点，国家《“十四五”现代流通体系建设规划》及《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》又为产业发展提供了明确、有层次的政策框架，学术界对无人机技术、低空空域改革、应用模式已有大量讨论[1-3]。但是，目前学界对无人机相关研究多从通用技术或宏观政策角度切入，将长江经济带独特的地理特征、物流需求痛点及低空物流网络架构三者深度融合的系统性设计研究尚不充分。因此，在流域尺度上设计一个既能充分发挥无人机三维机动优势，又能与既有水运、公路、铁路网络高效协同、共生共荣的“天网”体系，实为当前十分值得重视的前沿课题。

1.3 研究框架与贡献

本文遵循“逻辑分析—场景梳理—架构设计—挑战识别—路径规划”的研究主线展开：先论证无人机物流融入长江流域的内在逻辑及必然性，继而厘清不同应用场景对各项技术的具体需求，再由此自然、妥帖地引出符合流域空间结构特征的低空物流网络架构，然后客观分析其发展的战略价值、所涉复合型问题及潜在风险，最后给出可操作、能落实的分阶段推进及协同治理方案。

本文的边际贡献主要体现在三方面：一是视角上，将低空物流规划置于长江经济带国家战略背景下进行区域化考察，结合流域地理与经济特征进行系统分析；二是架构上，提出与既有交通网立体衔接的三级联动网络模型，为跨区域低空物流规划提供结构参考；三是路径上，从技术、制度、市场与社会协同维度设计系统性推进方案，划分实施阶段并明确主体责任，以增强决策参考价值

2 长江经济带物流体系特征与低空物流的引入逻辑

2.1 既有物流体系的结构特征与效能约束

长江经济带物流体系呈现“水运主导、陆路支撑、枢纽集聚”的特征，但受多重因素制约，整体效能仍有优化空间：第一是末端网络覆盖不足，时效性差，长江山区地形复杂，江心洲、港口、腹地衔接处的“最后一公里”成本居高不下。第二是跨江跨河交通主要依靠地面通道，故易受桥梁隧道通行能力限制、交通拥堵、恶劣天气诸种因素影响，形成物理性阻隔与时效瓶颈。第三是应急物流保障能力薄弱，洪涝、地质灾害发生时地面交通中断，此时缺乏快速可靠的替代投送手段。第四是多式联运衔接不畅，各运输方式之间仍存在信息孤岛问题，因此全程物流效率尚未充分发挥。

2.2 低空物流与无人机技术的赋能机理

无人机物流的引入为解决所论诸种瓶颈带来了新的、极其清晰的维度，其基本赋能机理可以很好地归纳为几个方面：第一是空间维度的拓展，即开辟不受地面地形严格限制的空中通道，故能做点对点直线运输，因而时空距离大大缩短。第二是时效性、可靠性的提升，在高时效、小批量、高价值、紧急物资运输的场景中，无人机的响应速度及运输确定性都有极强优势。第三是网络韧性的增强，作为水陆网络的有效备份，有助于提升物流体系抗干扰与快速恢复能力。第四是绿色低碳特性，电动无人机噪声低、零排放，与长江经济带绿色发展战略高度契合。第五是数字化融合载体的属性，无人机本身即为智能移动节点，所采集的数据可直接与物联

网、大数据平台无缝对接，因此也是物流体系数字化、智能化升级极好的切入点[4,5]。

3 应用场景矩阵与关键技术体系

3.1 基于流域特征的应用场景解构

无人机在长江物流中的应用需根据航程、载重、时效需求形成差异化场景矩阵：

跨江越障即时通达场景：针对两岸城市组团间的商务文件、医疗样本、急用备件等需求，以点对点直飞替代绕行地面路网沿江干支智能接驳场景：以中型货运无人机为手段，在沿江各核心港口（重庆果园港、武汉阳逻港、南京港、上海洋山港）及周边城市配送中心、产业园区之间开辟空中货运支线，由此自然、合理地缓解港口集疏运压力，也有利于实现“港口-腹地”快速联动[6]。

复杂地形与应急保障场景：服务于长江上游山区、中下游蓄滞洪区以及灾害频发区域，承担乡镇医疗物资配送、电商下乡、农产品上行及灾后应急物资精准投送任务。

特殊点位精准服务场景：为锚地待泊船舶、江心洲、水上作业平台、沿江旅游景区等提供零配件、生活补给、科研器材等物资的精准空投或定点送达。

3.2 支撑规模化运营的关键技术集群

由于要实现所论场景规模化、安全化运营，所以必然要借助一套完整的技术体系。

多元化航空器平台：由于有末端配送用的多旋翼无人机、支线运输用的垂直起降固定翼/复合翼无人机以及专用于某些场合的大载重无人机，故能源系统自然要向高能量密度电池、氢燃料电池的方向发展。

智能感知与自主决策系统：由于融合了视觉、激光雷达、毫米波雷达诸种传感器的感知系统，故能很好地实现复杂环境中的避障，又因采用北斗三代卫星导航及5G/卫星通信系统，所以定位精度高、数据链可靠，进而能自然、合理地应用人工智能的自主飞行控制及集群协同算法。

地面基础设施网络：把自动化起降场及货物交

接站、分布式能源补给网络（智能充电/换电站）、低空飞行区域的专用通信监视设施诸种设施都予以清楚说明。

一体化运营管理平台：把飞行服务、空域管理、任务调度、机队维护、客户服务诸种功能有机、自然地集成于云端平台，再与民航UTM系统及地方交通管理平台实现数据互通、业务协同。

4 “廊道—枢纽—节点”三级网络架构设计

4.1 设计愿景与原则

网络设计的总体愿景是：构建一个安全、高效、绿色、智慧，并与长江现有综合交通网深度融合的低空物流网络，显著提升流域物流整体效能与应急保障水平。设计遵循安全可靠、需求导向、融合协同、弹性可扩展的原则。

4.2 三级网络模型阐释

低空物流廊道（一级干线）：沿长江主干道及主要支流上空划设规范化的无人机运行通道，作为网络的“主动脉”。根据流量和需求密度，可分为沿江核心主廊道、支流延伸廊道和城市群内部环线。

区域转运枢纽（二级锚点）：在沿江国家物流枢纽、区域性交通枢纽、重要产业园区布局，具备规模化起降、货物集散、快速中转、能源补给、基础维修等功能，是连接不同运输方式和辐射区域的战略支点。

末端服务节点（三级触角）：广泛分布于社区、乡镇、企业园区、码头、船坞等最终用户侧，作为物流服务的起点和终点，形式包括自动化起降坪、智能接收柜等，实现“最后一百米”的无缝交付。

4.3 与综合交通体系的立体缝合机制

由于低空物流网络的根本价值是“连接”“赋能”，绝不是“替代”，故宜主动、有计划地建立协同机制。

物理层面的无缝衔接：由于规划建设港口、

铁路货场、公路货运枢纽时就要考虑预留无人机起降区，因此宜主动、系统地开发适合“空水联程”“空铁联运”的标准化载具或集装箱模块。

信息层面的深度融合：把低空物流运营管理平台同长江航运物流公共信息平台、国家交通运输物流公共信息平台加以对接，让物流订单、舱位、轨迹、状态诸种信息彼此互联互通、共享共用，由此自然、合理地支持基于大数据的全局智能调度。

5 战略价值、复合挑战与风险应对

5.1 多维战略价值

物流效能革命性提升：由于能直接缩短物流时间，所以有利于提高供应链的响应速度，也有利于提高全流域物流网络的韧性。

驱动低空产业生态形成：以研发制造、运营服务、数据应用、维护保障、金融保险诸环节为依托，有计划、有系统地带动全产业链发展，由此形成新的经济增长点。

以促进区域协调、公共服务均等化为出发点，主动、有力地服务偏远地区，由此缩小城乡物流服务的差距，切实推进乡村振兴及基本公共服务覆盖。

强化应急管理与安全治理能力：把有关内容建成政府应急管理体系的一个重要组成部分，由此切实提高应对自然灾害、公共卫生事件诸种突发情况的物资保障能力。

5.2 发展面临的主要挑战

技术与运营挑战：由于航空器平台在续航里程、有效载荷、复杂气象适应性诸方面都还有提高的潜力，故其大规模、高密度运行时的空域交通管理、防碰撞、集群协同诸种技术尚有待验证。

空域管理与审批挑战：由于长江空域十分繁忙，军民航空域结构又极其复杂，因此要实现低空空域精细化、动态化、智能化开放使用，就必然要建立高效协同的管理机制及审批流程。

法规与标准体系挑战：由于目前货运无人机有关适航审定标准、运行规则（人口密集区部分）、事故责任划分、第三者责任保险、数据安全及隐私

保护诸种法规标准都还不健全，故宜予以重视。

经济可行性与商业模式挑战：由于网络基础设施建设及运维成本都很高，故短期单票运营成本缺乏竞争力，因此要主动、有力地寻找可持续的商业模式及高价值应用场合。

社会认知与接受度挑战：公众对飞行安全、噪声、隐私保护存在合理关切，因此推广过程中需加强信息透明与公众沟通[7,8]。

5.3 关键风险与缓释策略

安全运行风险：由于航空器自身安全（技术故障）、运行安全（碰撞、失控）、地面安全（货物坠落）诸种问题相互关联，因此宜从设计、生产、运行、维护的全生命周期来系统、有层次地建立安全管理体系，合理采用多重冗余设计、失效保护机制、地理围栏、应急降落伞诸种技术。

网络安全与数据风险：由于无人机系统很容易成为网络攻击的目标，飞行控制、客户数据都存在泄露风险，故宜从技术上建立端到端加密、入侵检测、安全认证诸种纵深防御体系并落实数据治理规范。

市场与政策波动风险：由于技术更新迅猛，市场需求、监管政策都具有不确定性，因此参与者宜采用模块化、可升级的技术路线，又主动、合理地布局不同应用场景，方能自然、充分地分散风险。政策制定者宜予以稳定可预期的政策设计[9,10]。

6 推进策略与协同治理框架

6.1 总体推进策略

秉持“创新引领、场景驱动、安全为基、有序拓展”的原则。以技术创新和模式创新为核心驱动力，以真实、紧迫、可复制的物流场景作为突破口，在确保飞行安全、空防安全和公共安全的前提下，分步骤、分区域、分类别有序推进。

6.2 分阶段实施路线图

试点探索与能力建设期（1-3年）：先在长三角示范区、成渝双城经济圈有一定条件的地区及医疗急救、港口紧急文件传送诸种场景开展商业化试

点，同时加快法规标准制定，系统、有计划地推进低空物流廊道规划。

网络构建与生态培育期（3-5年）：将成熟的模式向沿江主要城市群加以复制推广，先建成区域性低空物流网络，再发展干支线接驳、多式联运的示范项目，同时建设区域级运营管理平台，由此自然地形成若干行业标准。

深度融合与全面赋能期（5-10年）：建成安全、智能、高效、普惠的长江低空物流网络，把其自然、妥帖地融入国家综合立体交通网，又与UTM系统做到全面融合，空域管理高度自动化、智能化，无人机物流遂成为沿江产业及生活的常态化、可负担选择。

6.3 多主体协同治理建议

政府层面（引导与监管）：以加强交通、民航、工信、空域管理、地方诸部门协调为前提，先制定流域性发展规划，再系统、有层次地完善法规标准体系，厘清各种运行场景的管理要求，继而用示范项目、采购服务、专项基金诸种方式创造初期市场。

企业层面（创新与运营）：由于物流企业、无人机厂商、科技公司、基础设施运营商各有优势，因此宜加强合作，攻克核心技术，主动、有序地探索运力共享、服务订阅诸种可持续商业模式，同时共建共享基础设施。

科研与标准机构层面：明确其在共性关键技术研发、测试验证两方面的任务，主动、有计划地培养复合型专业人才，切实参与国际国内有关技术标准、数据标准、接口标准的制定。

社会公众层面（沟通与共识）：以公众开放日、科普宣传、社区交流诸种形式让公众充分了解技术，又主动、及时地建立透明的安全信息发布及反馈机制，把安全、隐私、环境影响评估诸项放在突出位置，由此自然地建立社会信任。

7 结论

本文系统探讨了长江经济带低空物流网络构建的逻辑基础、架构设计与发展路径：构建与流域地

理经济特征高度契合、又与现有交通网络立体缝合的无人机物流系统,实质上是对长江传统物流体系的一次“升维”再造,因而对提高流域经济效率、培育新兴产业、促进协调发展、增强应急能力都具有直接而重大的意义。如此复杂的系统实现必然要面对技术、管理、法规、经济、社会诸种挑战,绝不可急于求成。坚持以系统思维统领全局,以技术创新、制度创新、模式创新、治理创新四者协同推进的方式,走“以点带线、由线及面、安全渐进”的发展道路。借助航空器技术、空域管理技术、数字技术诸领域的持续突破,长江低空物流网络有望从单纯的高效物流工具演化为支撑流域高质量发展、连接国内国际双循环的“低空智慧物流走廊”,为国内外大河流域的物流体系升级提供实践参考。

参考文献

- [1] 中国政府网.国家综合立体交通网规划纲要[EB/OL].(2021-02-24).
- [2] 国务院.无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[Z].2023.
- [3] 国家发展改革委.“十四五”现代流通体系建设规划[Z].2022.
- [4] 王英勋,蔡志浩.无人机物流配送关键技术与发展展望[J].航空学报,2022,43(8):325-340.
- [5] 金伟,张宏斌.低空空域管理改革与低空经济发展路径研究[J].中国软科学,2021(5):78-89.
- [6] 刘强,等.基于复杂网络的长江经济带物流网络结构特征与优化[J].地理研究,2020,39(10):232-245.
- [7] 陈晓峰,李颖.智能无人系统在应急物流中的应用与挑战[J].系统工程理论与实践,2023,43(1):12-25.
- [8] Cohen A P, Shaheen S A, Farrar E M. *Urban Air Mobility: History, Ecosystem, Market Potential, and Challenges*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(9), 601-618.
- [9] Kim S J, Lim G J. *Drone Delivery: A Review of Operations and Applications*. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 102(2), 1-22.
- [10] Zeng Y, Zhang R, Lim T J. *Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges*. IEEE Communications Magazine, 2017, 54(5), 36-42.

