

低空物流安全风险全生命周期工程管控体系研究

占龙辉, 刘晓琴, 李美红

江西理工大学商学院, 江西 南昌

收稿日期: 2026年8月3日; 录用日期: 2026年8月24日; 发布日期: 2026年9月7日

摘要

随着低空经济快速发展, 无人机末端配送已成为城市立体化物流体系的重要组成部分。“十五五”规划将低空经济定位为“新兴支柱产业”, 明确要求提升低空空域管理精细化水平、强化低空飞行安全保障, 推动低空经济健康有序发展。作为低空经济的关键应用领域, 低空物流加速推进规模化应用, 但城市低空复杂空域工况引发的飞行器硬件故障、空域运行冲突、电磁链路干扰、违规飞行运营等多重安全隐患, 严重制约产业规模化落地。本文结合UTM低空交通管控工程与空域风险评估技术, 依托瑞士奶酪模型、事故致链等经典航空安全理论, 从“人、机、环、管、信息”多维框架系统识别低空物流全链条安全风险, 深入剖析其形成机理与管理短板, 并构建涵盖动态空域规划、智能监管平台赋能、法规标准规范、人员培训与应急保障的全生命周期闭环安全管理体系, 以为低空物流安全运营与行业工程化治理提供参考。

关键词

低空物流, 无人机配送, UTM低空交通, 空域风险评估, 动态空域规划, 空域管理, 全生命周期工程管控

Research on the Whole-Life-Cycle Engineering Management and Control System for Safety Risks in Low-Altitude Logistics

Longhui Zhan, Xiaoqin Liu, Meihong Li

Business School, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang Jiangxi

Received: August 3, 2026; accepted: August 24, 2026; published: September 7, 2026

文章引用: 占龙辉, 刘晓琴, 李美红. 低空物流安全风险全生命周期工程管控体系研究[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(5): 966-971. DOI: 10.12677/mse.2026.155093

Abstract

With the rapid development of the low-altitude economy, unmanned aerial vehicle (UAV) last-mile delivery has become a vital component of urban three-dimensional logistics systems. The 15th Five-Year Plan positions the low-altitude economy as an “emerging pillar industry”, explicitly calling for enhanced refined management of low-altitude airspace, strengthened low-altitude flight safety assurance, and the promotion of healthy and orderly development of the low-altitude economy. As a key application area of this economy, low-altitude logistics is accelerating its large-scale deployment. However, multiple safety risks arising from complex urban low-altitude airspace conditions—such as airborne hardware failures, airspace operational conflicts, electromagnetic link interference, and unauthorized flight operations—seriously hinder the industrial-scale implementation. Drawing on UTM (Unmanned Aircraft System Traffic Management) engineering and airspace risk assessment technologies, and grounded in classic aviation safety theories including the Swiss Cheese Model and the accident chain theory, this paper systematically identifies full-chain safety risks in low-altitude logistics from a five-dimensional framework of “human, machine, environment, management, and information”. It further delves into the underlying formation mechanisms and regulatory deficiencies, and constructs a closed-loop safety management system throughout the full life cycle, encompassing dynamic airspace planning, empowerment by intelligent supervision platforms, regulatory standards and norms, personnel training, and emergency support. This study aims to provide a reference for the safe operation and engineering-oriented governance of low-altitude logistics.

Keywords

Low-Altitude Logistics, UAV Delivery, UTM Low-Altitude Traffic, Airspace Risk Assessment, Dynamic Airspace Planning, Airspace Management, Full-Lifecycle Engineering Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着低空经济政策的不断放开、无人机技术的飞速发展，以无人机末端配送为特点的低空物流模式正逐渐成为缓解城市末端配送压力的一种方式，也是构建立体化城市物流网络的重要途径。常态化应用正成为破解城市末端配送压力、构建立体化城市物流网络的重要方向。近年来，国内部分企业已在深圳、广州、上海等城市开展无人机配送试点，提升了末端配送效率，也拓展了城市物流的空间维度，然而城市高密度低空环境有建筑遮挡复杂、电磁干扰多变、人员车辆密集、飞行活动混杂等特点，大量的小型物流无人机高频次、分布式运行，给地面人员财产安全、城市低空秩序、信息数据安全带来了新的安全隐患，对低空物流的规模化、商业化推广造成了一定的影响。

目前国内低空物流安全监管还处于探索阶段，大区域、城市级低空安全管控体系还没有完全建立起来，适配规模化运营的成熟治理模式还在不断迭代完善[1]。传统的民航监管体系主要是针对有人驾驶航空器以及中高空运行场景，不能完全适应海量小型无人机低空分布式运行模式，空域规划、适航认证、运维标准、监管技术、应急保障体系还不完善，黑飞、违规运营、监管数据孤岛、责任主体不清等问题依然存在[2]。现有航空安全领域多依托瑞士奶酪模型、事故致链理论开展飞行事故溯源与风险诱因解析，

两类经典理论从多层防护失效、事故链式传导角度梳理航空器安全隐患,为本文低空物流风险识别奠定基础理论支撑。欧美针对城市无人机运行先后搭建 U-space、UTM 标准化低空交通管理体系,依托数字监管平台完成航线分配、空域冲突预警、飞行器实时监控等工程化管控工作,形成成熟的技术调度方案。但海外管控框架仅聚焦空域运行技术层面,未兼顾国内多行政部门交叉监管、城市人口密集、低空活动类型混杂的特殊国情,缺乏覆盖全流程、全主体的综合风险分析范式。本文结合国内产业现实提炼“人、机、环、管、信息”多维分析框架,在传统航空安全理论原有维度之上新增信息数据安全模块,补足境外 UTM 体系重空域调度技术、轻本土治理制度与人因管控的短板,能够完整覆盖低空物流运行全链条风险要素,适配我国城市低空物流规模化落地的复杂应用场景。因此本文从系统安全理论出发,对低空物流的安全风险及成因进行识别,分析目前低空物流安全的短板,构建一个全方位闭环的安全管理体系,以为城市低空物流的安全运营和行业规范化发展提供一些参考。

2. 低空物流安全风险识别及成因分析

2.1. 配送无人机本体与技术系统风险

低空物流的配送无人机本体风险主要集中在动力系统、结构系统、飞控系统与通信信息系统四个方面。首先,锂电池热失控、老化鼓包、短路起火是高频事故诱因,电机故障、桨叶断裂、机身结构老化、载荷固定不稳、超载飞行等问题也可能引发坠机或货物高空坠落事故,进而造成地面人员伤亡、财产损失和火灾隐患,是末端配送无人机最突出的硬件安全问题[3]。另外无人机飞控系统、导航定位系统如算法有缺陷或者感知固件存在漏洞,在复杂光影、高楼遮挡、电磁干扰等城市动态环境中,就可能会出现感知避障失效、定位不准、航线误判等情况,造成撞楼、撞线或者失联等意外事故[3]。

网络实时通信与数据安全风险同样突出。物流配送无人机高度依赖 5G(第五代移动通信技术)、卫星导航和无线通信链路,而城市存在的复杂电磁环境极易造成无人机信号衰减、链路干扰,甚至出现全球定位系统(GPS)定位错误、恶意劫持和网络攻击问题,易引发航线篡改、失控失联等飞行故障[4]。同时机载摄像头、位置数据、订单信息、用户隐私数据等如果加密保护不足,也会造成信息泄露、数据篡改、隐私侵犯等安全问题,给低空物流的数据安全和用户的权益造成极大的影响[4]。

2.2. 空域运行与复杂环境风险

城市低空飞行环境具有空间密集、主体多元、飞行约束复杂等特征,低空空域冲突风险大。城市 300 米以下低空区域存在物流配送无人机、巡检无人机、观光拍摄飞行器、直升机等各类航空飞行器,但是现有的空域规划中并没有建立起完善的低空物流专用航线体系。各类物流无人机航线互相交叉重叠,如果飞越机场净空区、医院、学校、高密度居民区、高压线路区域等敏感高风险区域,而且没有进行统一的分配调度,就会造成无人机之间、无人机与高层建筑之间、无人机与其他航空飞行器之间的碰撞事故。除此之外,还存在着许多未经审批、擅自从事无人机低空物流配送服务的个体行为,严重影响了低空物流配送体系运行的无序性、不确定性。

复杂城市环境也会显著影响飞行安全。强风、暴雨、雷电、低能见度等恶劣气象可能导致气流紊乱,降低无人机飞行稳定性;高楼、高架桥、高压线等人工设施可能造成导航信号遮挡和电磁干扰;鸟类撞击、城市电磁基站干扰等外部因素也会增加飞行失控概率[5]。高密度居民区开展无人机起降作业时,螺旋桨伤人、货物坠落等地面次生风险更值得重视,属于城市低空物流体系公共安全防控的重点[5]。

2.3. 人为操作与运营管理风险

低空物流运行中的人为风险主要是指从业人员能力不足、运维流程不规范这两种。物流无人机运维

人员、操作人员如果缺少资质、培训不足,就会出现无证上岗、航线设置不合理、超载飞行、超出适飞时段飞行等问题。由于低空物流场景多变,如果从业人员没有故障处置、应急控制、协同作业的能力,就会很容易造成低空配送事故。

运维和流程控制等也不能忽略。如果无人机的定期检修、电池检测、固件升级、飞行数据巡检没有标准制度作保障,系统长期运行的安全状况就得不到保障。企业在商业化运作中重效率、轻安全,超负荷运转设备,事故隐患的种子就这样种下了。起降区域规划不合理、隔离防护设施、地面安全缓冲区缺少都会加大人员聚集区域的交互风险,地面安全隐患由此产生。

2.4. 监管治理与制度保障风险

当前低空物流安全管理牵涉民航、公安、交通、城管、工信等多个部门,存在协调难度,亟须加强部门协作,建立高效的执法协调机制。从制度上来说,适航审定、飞行审批、数据共享、事故追责等重要环节的配套规则还存在不足之处,各个层级之间缺少衔接并且缺少运行标准。就城市级低空管控体系的建设而言,由于起步较晚,各地标准不一,局部监管盲区还存在。无人机实名登记、远程ID识别、全程溯源还没有全面推行,违规飞行、事故责任不能准确追究。

应急处置、风险保障体系的建立比较落后,这是目前低空物流安全治理的明显不足。城市层面没有统一的无人机故障迫降预案和全域应急管控机制,风险监测预警能力不足,在事故发生后迅速作出反应的能力缺乏,且无人机安全保险覆盖面不够广,事故的赔付和风险分担机制还需要健全[6]。同时公众之间的沟通和科普宣传较为欠缺,安全事故容易引发社会的不信任,影响低空物流得到广泛的接受度,从预防、管控到追溯这一全链条闭环管理还没有形成[6]。

3. 低空物流安全管理现存核心问题

3.1. 空域管控模式与海量无人机运行需求不匹配

传统静态空域管理方式难以完全适配海量小型无人机动态、灵活、高频配送的运行特点,空域管控模式与规模化低空物流运营需求适配性不足。空域划分相对粗放,缺乏分层、分时、分区的精细化管控方案,低空物流专用飞行通道建设不足[7]。从城市低空管控的发展现状来看,目前的管控模式大多为静态化、区域化的管控方式,不能满足全域、高频、动态的无人机物流飞行需求,影响低空物流的常态化、商业化。无人机交通管理平台尚未建成,动态航线审批、冲突预警、流量控制、远程干预等还比较薄弱,低空运行仍然较多采用被动监管。

3.2. 全生命周期技术安全管控体系尚未建立

目前物流无人机在适航检测、机型认证、电池安全等各方面没有统一标准,不同的企业生产的物流无人机其感知避障、冗余备份、应急伞降、远程识别等安全配置也各不相同。与此同时城市复杂的电磁环境中通信抗干扰技术的应用还存在着很多不足,信号不稳定、链路中断、导航欺骗等现象时有发生,直接威胁到低空飞行的安全。除此之外,没有建成统一的数字孪生低空监管平台,造成全域实时监控、风险仿真推演、异常干预不能实施,安全预警的及时性、主动防控能力还有很大的提升空间。

3.3. 监管协同治理机制存在短板

跨部门联合监管机制不健全,各部门之间存在数据壁垒、业务边界,低空安全治理协同化、规范化水平较低。监管模式大多为事后处罚,事前预防、动态管控不足。运营企业安全责任边界的划分还存在模糊之处,企业的主体安全责任制还要压紧压实[8]。另外无人机从业人员资质考核、专项培训、安全信用档案制度还不健全,行业安全文化、标准化运营意识还比较缺乏[8]。

3.4. 应急处置与风险保障体系不完善

目前低空物流应急保障体系存在的问题有。基础设施上没有建立标准化的应急迫降区和处理流程, 在发生突发事件的时候, 大多依靠临时协调来加以解决, 这就带来了非常低的协同效率。制度保障上强制保险、第三方评估、责任认定等风险转移机制还没有形成, 事故损失没有可靠的兜底渠道。一旦发生坠机、火灾、人员伤亡等事故, 追溯取证、定责赔付各个环节衔接不上, 公众的权益就会受到直接的损失, 行业的名声也会受到极大的影响。

4. 低空物流安全管理系统性对策

4.1. 精细化空域规划与分级空域管控

对城市三维低空资源开展普查工作, 创建起分级分类的空域控制体系, 把禁飞区、限飞区以及适飞区划分为三类, 从而避免低空物流飞行活动随意进入敏感区域。根据城市功能布局、机场净空要求、学校医院分布、高密度居民区、高压走廊等约束条件来确定分层、分时、分区的低空物流廊道。根据大区域低空安全管控的发展方向, 统筹全域低空资源, 解决局部空域管控碎片化问题, 创建起一体化城市低空管控格局。条件允许时, 可以采用夜间错峰配送的方式减少白天高危区域飞行的危险, 从而减轻和地面人流、车流以及其它低空活动之间的冲突。

动态空域管控和地面安全保障要同时进行。空中层面依靠无人机交通管理系统(UTM)平台来达到空域资源按需分配的目的, 用电子围栏、地理围栏和飞行计划核验等方式确定飞行边界, 防止越界飞行。地面层面起降场选址要远离主干道、人群密集区、敏感设施, 设置物理隔离、安全缓冲、应急迫降区域, 规范人员管理、货物装卸、地面接驳作业, 最大程度上减少人机交互风险。

4.2. 构建全周期无人机技术安全保障体系

低空物流技术安全体系要从三个方面同时推进。硬件维度的工作是完善适航性准入标准和检测, 建立机型的认证和第三方检测, 明确电池、飞控、通信、避障、应急装置的参数; 增强冗余飞控、多传感器融合避障、应急伞降、远程 ID 广播配置; 推行一机一码、实名登记并落实好从检测到回收等各环节的全生命周期电池管理。软件和通信维度的主要任务就是提高抗干扰、防劫持、防欺骗能力, 消除城市复杂的电磁环境给信号、导航、链路带来的不良影响。平台方面要推进 UTM 和数字孪生监管平台创建, 把北斗定位、5G 通感、雷达监测、运行数据集成起来, 实现即时监视、飞行批准、冲突预兆、远程干涉; 还要创建起针对异常无人机的自动返航、定点迫降、远程接管机制。

4.3. 完善法规标准与跨部门协同监管治理体系

从法规标准方面来说, 要站在低空经济发展的状况和治理创新的需求上, 创建一个低空物流专门的管理法规和行业标准体系, 依照上位法制订详细规范的运营许可、飞行报备、远程识别、数据保护、事故追查等方面的细则。企业安全主体责任要逐级压实, 可以采用安全信用分级监管, 对合规的市场主体简化审批, 对违法的市场主体依法予以限制或者吊销资质。事故调查、取证、责任认定要全过程可追溯。就监管协同而言, 可以建立民航、公安、交通、城管、工信、住建等部门共同参与的联合监管机制, 利用平台互通、信息互享来达到互相配合的目的, 从而形成联合巡查执法联动。可以实行常态化的安全评价和监管沙盒制度, 依靠试点运行数据来不断改进监管方案。从社会共治角度来讲, 要加大公众科普宣传、沟通听证来保障居民的知情权、安全权等, 提高低空物流的社会接受度, 创建一个政府主导、企业主体责任、公众参与协同治理的新模式。

4.4. 从业人员管理、培训与应急保障体系建设

从业人员管理上无人机飞手、运维人员、运营管理者要经过资质审查合格后持证上岗。培训体系要符合低空物流作业的特点,以航线规划、复杂环境飞行、故障处理、应急管控、合规经营、数据安全等为主要内容设置专项课程。定期开展安全考核和复训,创建从业人员安全信用档案,依靠制度约束规范作业行为,减少人为误操作。关于应急保障,对于无人机故障、坠落、起火、信号劫持等应急预案应该事先制定好,并且要选择合适的应急迫降区,做好应急准备和联合演练工作。全天候监控、快速反应机制要建立起来,确定各个部门的应急责任及处理程序。因此推进全行业第三者责任险、机身险强制覆盖,健全赔付机制,创建一个包含风险转移、损失兜底的闭环体系来降低事故带来的损失与影响。

4.5. 建立长效动态风险监测与评估机制

量化风险评估方面,可以对城市低空运行场景进行全链条评价,准确找到高发风险点和安全隐患所在,据此调整航线规划、调度安排、监管手段等来改善低空环境下多变性较差的局面,加强对低空环境适应度方面的改善力度。风险监测依靠区域低空管控的整体规划,建立长效的监测体系,对全域低空风险做到动态研判、实时预警。数据建设方面要创建安全运行数据库,把事故、故障、违规、应急处置等信息不断汇集起来,定时开展分析并促使修订完善。采用第三方机构对安全进行常态化审计,促使企业形成内部的安全管理体系,健全巡检、维护、隐患排查制度,创建闭环安全管理的方式。

5. 结论

低空物流安全对城市立体交通体系运转、低空经济产业根基来说是重要的。就目前无人机配送实际运行情况而言,技术故障、空域冲突、人为失误、监管缺位等各个层面的复杂状况共存的情况,在城市三维低空环境当中已经成为了新型安全要求的主要来源,传统的地面交通管理模式已经不能满足城市三维低空环境中的新安全要求了。本文从系统安全的角度出发,结合国内低空物流试点运营实践,将风险识别、风险评估管控、全域治理等各方面的已有研究成果进行整合,提出构建“空域精细管控、智能平台支撑、法规制度规范、人员与应急保障”四位一体的全生命周期闭环安全管理框架,针对四大模块分别配套差异化落地子策略:空域管控层面落实分区分时通行、电子围栏隔离等实操手段;智能平台层面集成风险监测、远程干预等工程管控功能;法规标准层面搭建“国家顶层条例-行业专项规范-企业运行细则”三级标准框架;人员应急板块同步完善持证考核、分区应急迫降处置配套机制。经过细致的规划和不断改进空域管理手段,完善有关适航和技术安全的标准规范,创建UTM智能低空交通控制平台,建立各部门、各方面的协调机制和法律规范体系,加强人员培训和应急准备工作,可以在坚持城市公共安全基本要求的前提下,使低空物流产业向健康有序的方向发展前进,在不断提高和完善安全保障能力方面不断努力。下一步可以从风险评估量化、智能管控算法、城市全域数字孪生监管等几个方面入手来提高低空物流安全治理效能。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李小曼, 戴佳静. 我国低空安全监管现状、问题及对策研究[J]. 中国电信业, 2025(7): 68-71.
- [3] 黎桂杏. 无人机物流末端配送安全风险因素识别与管控[J]. 物流工程与管理, 2025, 47(12): 121-124.
- [4] 李华同, 赵东林. 低空物流无人机通信抗干扰与安全保障研究[J]. 中国新通信, 2025, 27(24): 1-3.
- [5] 邱佩, 罗帆. 城市无人机物流配送安全风险因素识别与管控[J]. 城市发展研究, 2025, 32(6): 18-25.
- [6] 周纪君, 李远哲, 陈珍, 等. 低空物流领域保障体系的发展现状及对策[J]. 公路交通技术, 2025, 41(3): 187-196.
- [7] 赵琪, 张英杰. 城市低空场景下无人机运行风险评估应用研究[J]. 民航学报, 2026, 10(3): 33-37.
- [8] 陈熊. 试论低空安全治理体系的理念和制度创新[J]. 民航管理, 2026(3): 11-16.