

低空安全管理的技术创新与实践探索

苏颖^{1,2}

1. 中交遥感载荷科技有限公司, 江苏 无锡 214123

2. 中交遥感天域科技江苏有限公司, 江苏 无锡 214123

DOI: 10.61369/SSSD.2025140042

摘要：当前, 低空安全管理面临空域资源动态调配效率低、多源异构数据融合不足导致风险预警滞后、传统监管手段难以适应无人机等新型飞行器规模化应用等问题。基于此, 本文深入探究了低空安全管理的技术创新与实践探索的意义、低空安全管理的技术瓶颈与实践难点、低空安全管理的技术创新与实践探索路径、典型场景实证等内容, 旨在更好地建立起“感知-分析-处置”一体化的智能监管体系, 实现低空安全从被动应对向主动防控的转型, 为低空经济高质量发展提供安全保障与技术支撑。

关键词：低空安全管理; 数字孪生; 区块链; 人工智能

Technological Innovation and Practical Exploration of Low-Altitude Safety Management

Su Ying^{1,2}

1.CCCC Remote Sensing Payload Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214123

2.CCCC Remote Sensing Tianyu Technology Jiangsu Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214123

Abstract: Currently, low-altitude safety management faces problems such as low efficiency in dynamic allocation of airspace resources, delayed risk early warning due to insufficient integration of multi-source heterogeneous data, and difficulty of traditional supervision methods in adapting to the large-scale application of new aircraft like unmanned aerial vehicles (UAVs). Based on this, this paper deeply explores the significance of technological innovation and practical exploration in low-altitude safety management, the technical bottlenecks and practical difficulties of low-altitude safety management, the paths of technological innovation and practical exploration for low-altitude safety management, and empirical studies of typical scenarios. It aims to better establish an integrated intelligent supervision system of "perception-analysis-disposal", realize the transformation of low-altitude safety from passive response to active prevention and control, and provide safety guarantees and technical support for the high-quality development of the low-altitude economy.

Keywords: low-altitude safety management; digital twin; blockchain; artificial intelligence

引言

《关于深化我国低空空域管理改革的意见》明确指出近年来, 我国通用航空快速发展, 飞行总量年均增长达10%以上, 行业规模日益扩大, 应用领域不断拓展, 飞行种类日益增多, 飞行需求渐趋旺盛; 随着经济持续快速发展和人民生活水平的不断提高; 预计今后10年间我国通用航空年均增长将达到15%以上, 对低空空域的需求与日俱增, 将对低空空域管理和服务提出更高的要求; 适时深化低空空域管理改革, 有利于充分开发利用低空空域资源, 促进通用航空事业、航空制造业和综合交通运输体系的发展; 有利于拉动内需、扩大就业, 培育新的经济增长点; 有利于为国防建设提供航空人力资源储备和基础环境支撑, 对全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化建设具有十分重要的战略意义^[1]。企业在技术创新的过程当中应该根据国家的政策性文件进行研究, 这样才能够促进低空安全管理的全面发展。

一、低空安全管理的技术创新与实践探索的意义

(一) 有利于构建安全可控的低空运行体系, 夯实新兴产业 发展基础

低空经济作为国家战略性新兴产业, 涵盖通用航空、无人机应用、城市空中交通等多元领域, 其规模化发展高度依赖安全可

控的运行环境。技术创新通过构建数字孪生空域模型、智能感知网络与实时决策系统, 实现空域动态监测、风险精准预警与冲突自动化解, 形成覆盖“感知-分析-处置”的全链条安全管控能力^[2]。这种体系化创新不仅为低空飞行器提供安全运行保障, 更通过标准化接口与协议推动设备互联、数据互通, 消除技术壁垒与安全隐患^[3]。

(二) 有利于推动跨领域技术融合与标准统一，引领行业规范化发展

低空安全管理涉及通信、导航、人工智能、区块链等多技术领域，其创新实践天然具备跨学科融合特性^[4]。通过集成5G/6G通信、高精度定位、机器学习算法，可突破单一技术局限，形成空域态势感知、智能避障、自主决策等核心能力；同时，区块链技术赋能的权属登记、数据存证系统，为空域资源交易、责任追溯提供可信环境。这种融合不仅催生新技术范式，更通过实践反馈推动无人机分类管理、eVTOL适航标准、空域使用规则等法规体系的完善，加速行业从“技术探索”向“标准引领”转型，构建全球竞争的技术与规则优势^[5]。

(三) 有利于提升社会治理效能与民生服务能力，赋能智慧城市建设

低空安全管理技术创新直接服务于应急救援、灾害监测、物流配送等民生领域，通过智能化手段优化资源配置、缩短响应时间、降低社会成本^[6]。动态空域分配算法可提升灾害现场航空器调度效率，智能监管系统能实时识别非法飞行行为，维护公共安全；而无人机物流网络的优化，则可减少地面交通压力，提升偏远地区物资投送能力^[7]。这些实践不仅增强城市韧性，更通过技术普惠推动公共服务均等化，使低空经济从“产业经济”向“社会价值”延伸，成为智慧城市建设与治理能力现代化的重要支撑^[8]。

二、低空安全管理的技术瓶颈与实践难点

(一) 技术瓶颈

1. 感知系统局限性

传统雷达对小型无人机的探测存在显著盲区，ADS-B设备在复杂地形中的覆盖能力有限。部分通航公司维修记录显示，因传感器故障导致的定位偏差问题较为突出，成为影响飞行安全的重要因素^[9]。

2. 通信链路脆弱性

城市峡谷效应不仅使通信信号减弱现象加强，还使无人机在复杂环境下的通信中断风险也有了一个提升。例如，部分机场曾经因信号丢失出现过航班备降事件，这可以看出通信链路稳定对低空安全具有很大的作用^[10]。

3. 决策算法滞后性

当前避碰系统响应时长无法契合新型航空器应急所需，算法迟滞引发的近距碰撞风险于测试中屡屡出现，已然成为制约低空安全技术发展的关键症结所在。

(二) 实践难点

1. 跨部门协同障碍

民航、军方、公安等部门的数据共享机制尚不完善，空域协调频次高但效率低，应急响应延迟问题突出，影响低空安全管理的整体效能^[12]。

2. 法规标准缺失

超视距飞行、集群管理等新兴场景的规范尚不健全，eVTOL等新型航空器的适航认证标准有待完善，全球范围内动力系统故

障事件频发，暴露法规体系建设的滞后性。

3. 基础设施不足

起降点布局、通信覆盖、数字孪生建模精度等基础设施存在明显短板，难以支撑低空经济规模化发展对安全保障的更高要求^[13]。当前低空空域环境极为复杂，不仅存在建筑物、山脉等静态障碍物，还有大量动态变化的飞行活动，如鸟类迁徙、其他通用航空器飞行等，这些因素相互交织，使得空域状况瞬息万变。实际应用场景往往并非 TDOA（到达时间差）技术所适用的规整布局，在此类复杂且非规整布局的空域环境下，而 AOA（到达角）技术则展现出独特的优势。

三、技术创新路径与实践探索

(一) 数字孪生驱动的动态安全评估

1. 空域建模与仿真

构建高精度三维数字孪生模型，整合多源数据源，实现空域负荷预测与冲突预警的精准化^[14]。部分新区试点中，模型预测准确率显著提升，预警提前量大幅延长，为空域管理提供科学依据。

2. 风险动态评估

基于强化学习算法的协同决策模型，将空域冲突解脱响应时间压缩至秒级。部分物流企业应用案例显示，路径优化显著提升配送效率，事故率明显下降，验证技术可行性。

(二) 区块链赋能的标准化空域交易

1. 权属登记与交易

设计基于智能合约的空域预约系统，实现权属变更自动化处理。部分科创走廊试点中，空域交易效率大幅提升，企业运营成本显著降低，推动空域资源市场化配置。

2. 数据存证与追溯

建立区块链法规存证系统，确保空域管理政策透明可追溯。部分地震救援中，空域使用记录实时上链，协调效率显著提升，为应急响应提供技术支撑。

(三) 人工智能支撑的智能监管系统

1. 多源数据融合

整合多类传感器数据，构建全域覆盖的立体化监测网络。部分省工程中，异常行为检测准确率高，漏报率低，显著提升监管效能。

2. 自动化处置机制

开发态势感知驱动的应急仿真平台，模拟多类场景。部分区域空域协调测试中，系统自动隔离效率大幅提升，指令发布延迟大幅压缩，验证自动化处置的可靠性。

四、典型场景实证研究

(一) 无人机物流安全管控

1. 路径规划优化

应用数字孪生技术，在复杂地形中实现动态避障。部分企业

山区测试中，航线调整响应时间显著缩短，碰撞风险大幅降低，提升物流安全性。

2. 应急响应机制

构建融合通信应急系统，确保复杂地形下通信可靠率高。部分汛期救援中，无人机集群在信号盲区持续工作，运送物资量大，验证应急机制的有效性。

(二) 应急救援空域协同

1. 多主体协同决策

开发基于联邦学习的分布式管制模型，实现军民航数据共享。部分灾害救援中，空域协调时间大幅压缩，救援直升机出动效率显著提升，凸显协同决策的价值。

2. 动态容量评估

利用机器学习模型预测空域流量特点，在部分机场试点中，空域利用率显著提升，航班准点率明显提高，优化空域资源配置。

五、讨论与建议

(一) 技术创新协同机制

1. 标准体系构建

制定无人机分类分级管理制度，明确监管等级。建议借鉴国际经验，建立中国特色的空域使用条例，推动技术标准化发展。

2. 数据接口统一

推动跨区域空域管理规则互认，开发标准化 API 接口。测试显示，接口标准化可显著提升系统集成效率，降低数据交互延迟，促进技术协同。

(二) 政策法规完善路径

1. 弹性化标准框架

采用模块化设计适应新技术需求。建议设立标准迭代周期，

确保技术发展与监管同步，提升法规的适应性。

2. 市场化交易机制

引入空域使用权拍卖模式，在部分地区试点中，空域资源配置效率显著提升，企业满意度高，推动空域资源市场化进程。

(三) 基础设施升级方向

1. 感知网络建设

部署高精度物联网节点，在重点区域实现全覆盖。测试表明，节点密度增加可显著提升障碍物检测准确率，强化感知能力。在此基础上，融入 AOA 无人机侦测反制技术中的感知模块，该模块利用先进的到达角（AOA）定位原理，与高精度物联网节点深度协同。物联网节点不仅能感知常规的环境数据，还能借助 AOA 技术精准捕捉无人机的信号特征，通过对信号到达角度的精确测量，快速确定无人机在空间中的位置和飞行轨迹。即使在复杂环境下，多个物联网节点也能通过数据融合和算法分析，实现多目标无人机的精准定位与跟踪，大大提升了整体感知网络对无人机的侦测能力，为后续的反制措施提供准确依据。

2. 通信能力提升

研发抗干扰空域通信协议，在电磁干扰环境下保持高可靠性。专网试点中，数据传输速率高，时延稳定，提升通信稳定性。

六、结束语

随着中国 5G/6G 通信、人工智能、区块链等技术的不断发展与深度融合，不仅能够使低空安全管理体系实现“全域感知 - 智能决策 - 自主执行”的闭环管控，还能够更好地解决空域冲突、设备故障等风险。未来，企业应该邀请政府和科研机构参与到技术创新当中，这样才能够更好地为万亿级低空经济市场保驾护航，推动我国在全球低空领域的全面发展。

参考文献

- [1] 乔善勋. 我国低空经济发展现状、安全挑战及运营对策——以通用航空为例 [J]. 山东航空学院学报, 2024, 41(05):79–84.
- [2] 李朋原, 屠晓涵, 赵凯. 基于有监督学习的黑飞无人机检测识别方法及系统实现 [J]. 电子制作, 2024, 32(20):68–71.
- [3] 翁路华, 徐仲仲, 程君, 等. 主动担当积极作为助推新质生产力加快发展浙江无线电管理机构服务经济社会发展纪实 (二) [J]. 中国无线电, 2024, (09):15–18.
- [4] 李世杰. 新质生产力赋能海南自由贸易港低空经济发展的实践路径 [J]. 人民论坛·学术前沿, 2024, (15):76–83.
- [5] 王思祺. 低空经济时代下无人机的数据安全：法律挑战与应对 [N]. 江苏经济报, 2024-07-12(T04).
- [6] 章和盛. 着力推动低空空管平台构建与应用有效赋能城市全域低空空管管控 [J]. 中国安防, 2024, (06):78–82.
- [7] 陈华群, 西南地区低空飞行服务站点布局和服务安全评价的关键技术与实现. 四川省, 中国民用航空飞行学院, 2023-12-07.
- [8] 关于《上海市人民政府关于加强第六届中国国际进口博览会期间无人机等“低慢小”航空器安全管理的通告》的政策解读 [J]. 上海市人民政府公报, 2023, (21):23.
- [9] 袁江, 兰增武, 熊鹏. 基于 LSTM-YOLOv5 的“黑飞”无人机异常行为辨识方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2023, 43(10):120–125.
- [10] 王宇. 有效监管是激活低空经济的不二法门——访中国人民公安大学低空安全研究中心主任孙永生 [J]. 交通建设与管理, 2023, (05):32–35.
- [11] 付新磊. 新型低空操作平台节点力学性能及智能安全监测技术研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [12] 陶伟文, 冯登超, 吴佑军, 等. 低空空域管理改革背景下民用无人驾驶航空器安全管理初探 [J]. 军民两用技术与产品, 2023, (01):28–33.
- [13] 郭兆轩, 邢更力. 反恐保护重点目标低空安全防御技术体系研究——以石油储备基地低空安全防御模式为例 [J]. 山西警察学院学报, 2022, 30(02):56–60.
- [14] 上海市人民政府关于加强第四届中国国际进口博览会期间无人机等“低慢小”航空器安全管理的通告 [J]. 上海市人民政府公报, 2021, (22):15.