

数字技术赋能低空经济安全监管体系构建研究

白黎东

新疆维吾尔自治区社会科学院 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要：低空经济安全监管体系面临空域资源动态分配与风险实时防控的双重挑战，数字技术的深度融合为解决这些问题提供了创新路径。新型传感器网络与边缘计算节点的部署实现了飞行器状态数据的毫秒级采集，深度学习算法在异常行为识别方面展现出超越传统规则的研判能力，而智能合约的自动执行机制有效提升了违规事件处置效率。本文聚焦于数字技术如何重构监管流程的价值链条，探索技术赋能下监管效能提升的内在逻辑，为低空经济安全发展提供可扩展的解决方案。

关键词：数字技术；低空经济；安全监管；体系构建

引言

低空经济业态的多元化发展对安全监管体系提出更高要求，传统人工巡查与静态规则管理难以应对飞行器数量激增带来的复杂风险。数字技术的演进正改变着安全监管的底层逻辑，物联网设备与云端算力的结合使全域监控成为可能，人工智能赋能的决策系统开始替代部分人工研判职能。监管数据的多维融合需求催生出新型技术架构，分布式存储与联邦学习的应用正在突破数据孤岛带来的协同障碍。研究着眼于数字技术赋能的系统性变革，解析无人机适航认证、飞行轨迹追踪、应急响应等环节的技术耦合机理，揭示智能监管体系对传统管理模式创新替代路径。

1 数字技术赋能低空经济安全监管的作用机制

1.1 数据采集与监测

传感器网络依托高精度雷达、光学设备和定位模块形成立体感知层，实时捕获飞行器三维坐标、速度及环境参数，这些硬件设备构成全天候动态监控的基础骨架。物联网技术将分散的监测节点编织成有机整体，通过自适应组网协议消除信号盲区，确保城市峡谷等复杂场景下的数据连贯性。边缘计算节点部署于无人机起降场和通信基站，对原始数据进行本地化清洗与特征提取，既缓解云端传输压力又缩短异常事件响应延迟。多源异构数据在融合引擎中完成时空对齐，消除不同传感器间的量纲差异与时间漂移，生成标准化的空域态势图。轻量化AI算法嵌入终端设备实施初步风险筛查，识别航路偏离、碰撞风险等关键指标，触发分级预警机制的同时保留人工复核接口。这种分层递进的处理架构兼

顾了实时性与准确性，为后续监管决策提供高置信度的数据基底。

1.2 风险评估与预警

风险评估与预警机制的数字化转型依赖于多维度数据流的深度融合，传感器网络持续捕捉飞行器的姿态参数与环境变量，将振动频谱特征与气象湍流指数同步传入边缘计算节点^[1]。机器学习模型在历史事故数据中挖掘出电池热失效与操控延迟之间的隐性关联，构建起非线性风险评估矩阵。空域动态威胁识别系统利用时间序列分析技术，对飞行器集群的航迹交叉概率进行毫秒级计算，当冲突可能性超过预设阈值时触发分级告警。监管机构部署的联邦学习框架允许不同辖区共享风险特征提取模型，同时保障核心飞行数据的本地化存储。预警信息生成模块采用对抗性训练方法，在虚拟环境中模拟强电磁干扰场景下的信号失真情况，提升误报过滤的准确率。风险图谱的实时更新依赖区块链技术的共识机制，各监测站上传的异常事件经过智能合约验证后形成不可篡改的风险日志。预警响应策略库引入强化学习算法，根据处置效果反馈自动优化预案匹配规则，使山区复杂地形中的通讯中断预警能够自适应调整处置优先级。风险传播模型的迭代开发需要融合流体力学仿真数据，精确计算强侧风条件下多旋翼飞行器的失控影响半径。

1.3 智能决策支持

智能决策支持系统的核心功能在于处理实时空域态势的复杂性，多源异构数据流经过清洗标注后输入决策引擎，形成三维空间内飞行器动态的数字化映射。多目标优化算法在空域容量与安全裕度之间寻找平衡点，针对突发气象变化自动生成航路动态调整方案。知识图谱技术将适航规章条款转化为可计算的逻辑约束条件，当飞行计划申报数据与禁飞区数字围栏产生冲突时触发规

作者简介：白黎东，男，1967年2月出生，中国共产党党员，新疆社会科学院副研究员；客座教授。研究领域：产业经济、区域经济。

则引擎推理。决策辅助模块集成博弈论模型,预测不同监管策略下运营主体的合规行为变化趋势,为执法资源调配提供量化依据。仿真推演平台运用数字孪生技术构建虚拟空域环境,预演极端天气下无人机集群作业的连锁反应路径,输出最优管制指令序列。语义理解组件解析自然语言形式的突发事件报告,自动关联历史处置案例库生成处置要点提示。决策置信度评估模型持续监测算法输出的稳定性,当多架次飞行器电池健康度预警集中爆发时启动人工复核机制。异构计算架构下的决策时延控制模块,确保城市密集区低空交通管制指令能在300毫秒内完成生成与验证。

1.4 区块链技术应用

飞行器身份认证信息与运营资质被写入分布式账本,各监管节点同步维护更新,形成不可篡改的主体信用档案。飞行任务申报时,智能合约自动校验空域使用权限与时间窗口,违规操作触发预设的熔断机制。飞行器在空中的每一个动作生成实时数据流,经加密后分片存储于多个地理节点,既防止单点数据丢失又确保事后溯源的可信度。多部门监管系统通过联盟链共享关键数据,飞行计划审批、空域动态调整等协作流程依托共识算法达成决策同步,消除传统跨机构协作中的信息延迟。监管规则以可编程形式嵌入底层协议,当气象突变或突发障碍物出现时,链上数据触发自动航路重规划指令,同时保留人工介入的弹性空间。这种技术架构在保证数据透明度的基础上,通过灵活的权限配置平衡了监管效率与隐私保护需求^[2]。

2 数字技术赋能低空经济安全监管体系的构建路径

2.1 政策法规与标准制定

政策法规与标准制定的推进需要建立动态响应机制,立法机构应当组建由航空法学专家和工程师组成的法规专班,每季度梳理新型垂直起降飞行器运营中暴露出的法律真空地带。标准化组织需开发模块化的数据接口协议,统一无人机远程识别系统与空管雷达之间的信号编码规则,确保不同厂商设备的数据可解析性。地方政府可以试点建立数字监管沙盒,允许企业在封闭测试区内验证自动避障算法与现行适航标准的兼容性。行业协会应当牵头制定电池健康度评估的量化指标体系,明确不同气候条件下电池性能衰减率的预警阈值。民航管理部门需要修订空域分层使用规范,将数字航图的三维建模精度要求与建筑物激光点云数据绑定。跨部门联合工作组应当设计监管数据确权规则,厘清飞行器轨迹信息在公安、应急、交通等部门的共享边界。标准动态维护系统需嵌入技术预见模块,当量子通信或边缘计算等

新技术成熟度达到临界点时触发标准修订流程。飞行器数字身份认证体系应当兼容区块链存证技术,为每架航空器建立不可篡改的维修保养记录链。空域资源分配算法的伦理审查指南需明确禁止利用算法漏洞进行空域竞价排名,保障中小运营主体的公平接入权。数据主权规范应要求云监管平台部署国产密码模块,飞行器实时监控视频的存储节点必须设置在境内数据中心。监管机构可以建立标准实施效果追溯系统,利用自然语言处理技术自动分析企业报备文档与标准条款的契合度差异。

2.2 技术平台建设

技术平台建设的核心任务在于构建开放协同的数字底座,开发团队需要设计可扩展的架构框架,使新型监测设备能够即插即用接入既有监管网络。数据处理引擎应当集成联邦学习模块,在保障商业机密的前提下实现不同辖区飞行数据的特征共享。云端算力调度系统需具备弹性扩容能力,在物流无人机高峰时段自动调配图形处理器资源保障航迹预测模型的运算需求。空域动态建模工具链要兼容激光雷达点云与卫星遥感数据,生成建筑物表面湍流场的实时三维可视化图谱。智能算法中台应当封装标准化的应用接口,允许第三方开发者基于统一规范开发电池寿命预测等垂直场景模块。区块链存证平台需设计轻量级共识机制,确保移动端执法设备能快速验证飞行器数字身份证的真实性。人机交互界面需要融入认知工效学原理,将空域风险热力图与管制员视觉习惯匹配,设计出符合人体生物节律的告警提示频率^[3]。测试验证环境应当构建数字孪生城市模型,模拟雷暴天气下传感器失效时的应急数据补全机制。技术演进跟踪模块需建立专利图谱分析功能,当国外出现新型反制技术时自动触发国产替代方案的预研流程。平台维护体系要部署自愈式容错机制,在遭遇网络攻击时能快速隔离受损节点并启动备份数据库接管服务。

2.3 人才培养与能力建设

人才培养与能力建设的推进需要构建多层次培育网络,航空院校应当开设低空安全系统工程专业,开发包含空域数字建模与区块链存证技术的核心课程包。监管部门可以联合头部企业建立沉浸式实训基地,利用数字孪生技术构建城市峡谷环境下的应急避障演练场景。职业资格认证体系需增设无人机监管技术方向,考核项目包含联邦学习框架部署与动态空域规划算法调优能力。行业协会应当制定继续教育学分标准,要求持证人员每年完成边缘计算设备维护或航路冲突预测模型优化等模块的线上实训。企业技术骨干可参与监管沙盒项目的联合研发,在真实业务场景中掌握空域资源智能分配算法

的迭代开发技能。高校实验室需要配置多源异构数据处理平台,指导学生完成飞行器电池热失控预警信号的特征提取实验。技术转移中心应当建立专利导航机制,帮助科研人员将新型防欺骗定位算法转化为适航认证标准。师资队伍建设需实施双导师制度,聘请空管一线人员讲解ADS-B信号异常排查的实际处置经验。人才评价体系引入技能矩阵模型,量化评估从业人员在三维航图解析与量子加密通信等新兴领域的技能缺口。知识管理平台需集成智能推荐引擎,根据监管人员操作日志自动推送空域冲突预测模型参数调优的专项学习资料^[4]。

2.4 跨部门协作机制

跨部门协作机制的构建需要打通数据共享的技术动脉,相关部门应当联合制定飞行器轨迹数据的清洗标注规范,统一公安应急系统与空管雷达在经纬度坐标系下的时间戳精度。联合工作组可以开发具有互操作性的中间件平台,使气象部门的微暴流预警数据能自动触发交通管理部门的无人机航线调整指令。标准化委员会需规定监管信息交换的元数据格式,确保林业部门火情监测图像与民航禁飞区电子围栏的坐标参照系实现毫秒级同步。联席会议制度应当建立任务看板系统,将电力巡检无人机审批事项拆解成环保、能源、空管等部门的并行处理节点。执法协同平台需部署智能路由算法,根据无人机违规类型自动分配市场监管或公安部门的处置权限。应急预案管理系统要内置冲突检测模块,当消防无人机救援任务与通航公司定期航班出现空域重叠时生成优先级判定规则。技术研发联盟可设立联合实验室,集

中攻关有人机与无人机混飞环境下的无线电频谱协调难题。信用惩戒系统应当打通工商注册信息库,对屡次违反净空保护规定的运营主体自动触发多部门联合约谈流程。设备兼容性测试中心需制定跨领域检测规程,验证农业植保无人机的喷洒作业记录能否满足生态环境部门的农药残留监管要求。

结语

数字技术赋能的监管体系展现出对低空经济复杂系统的强适应能力,智能感知层与决策层的闭环联动有效压缩了风险处置的时间窗口。监管科技生态的培育需要关注技术冗余度设计,在提升系统可靠性的同时保留必要的人工干预节点。建议建立技术成熟度与监管强度相匹配的弹性机制,避免技术缺陷引发的二次风险。未来监管体系将向自适应方向发展,量子加密通信可能重构数据安全传输范式,数字孪生技术的深度应用有望实现监管场景的全要素仿真。

参考文献

- [1]于荣权.低空经济中的空域管理与安全监管研究[J].成都航空职业技术学院学报,2024,40(03):75-80.
- [2]刘力.低空经济中的安全监管和风险控制策略研究[J].民航管理,2024,(06):84-88.
- [3]蓝寿荣.低空经济产业促进法的法理逻辑与制度体系[J].新疆师范大学学报(哲学社会科学版),2025,46(03):140-153+2.
- [4]周建忠.浅谈数字化赋能低空经济新发展[J].民航管理,2024,(09):35-37.