

低空飞行安全智能预警与管控技术应用

王立勋

中国人民解放军九二一五四部队 山东 烟台 264000

摘要: 本文界定低空飞行与空域管控边界,剖析环境、空域、设备及人为四类飞行风险,梳理智能预警管控核心理论,拆解多源感知、风险研判、数据融合等核心技术体系,结合安防、巡检、机场净空三大场景落地应用,剖析监测盲区、算法误差、数据壁垒、建设成本四大实操难题,从算法优化、数据互通、模块化部署、法规完善四方面给出优化对策,助力低空空域规范化治理,平衡低空经济发展与空域飞行安全管控需求。

关键词: 低空飞行安全;智能预警;管控技术应用

引言: 当下通航飞机、民用无人机应用规模持续扩张,低空飞行频次大幅上涨,黑飞乱象、气象灾害、航线冲突等安全事故频发,传统人工值守、单一设备监测管控模式弊端凸显,难以适配全域低空治理需求。依托传感组网、机器学习、边缘计算智能技术搭建预警管控体系,成为破解低空安全治理难题的关键。本文立足低空飞行风险与基础理论,深挖智能技术体系、落地应用痛点,针对性提出优化方案,赋能低空行业长效发展。

1 低空飞行安全风险剖析与智能预警管控基础理论

1.1 低空飞行核心概念与空域管控边界界定

(1) 低空飞行多指距地面1000m以下空域的航空飞行,部分山区、偏远区域适配3000m以下飞行标准;适配飞行器分为三类,分别是农林作业、应急救援类通航飞机,测绘巡检、电力运维类工业无人机,航拍娱乐、民用短途飞行类消费级无人机。(2) 我国低空空域划分为管制、报告、自由三大空域,以120m、1000m为核心高度边界,城市核心区、机场周边为严控管制空域,需提前审批报备;城郊荒野、偏远乡村为自由空域,飞行限制少,空域权责与管控层级划分清晰^[1]。(3) 低空飞行智能预警依托实时数据甄别安全隐患并提前告警,智能管控依托算法、空域调度体系,完成飞行约束、违规拦截,实现风险前置防控、全域空域规范化治理。

1.2 低空飞行多维安全风险类型及成因分析

(1) 环境类风险: 低空风切变、短时强对流天气突发性高,城市高层建筑扰乱近地气流,叠加雾霭、扬尘引发低能见度问题,破坏飞行器飞行姿态,属于原生自然环境风险。(2) 空域目标风险: 海量低空飞行器叠加引发航线交叉冲突,无备案低慢小目标非法入侵管控空域,无资质、无报备黑飞行为频发,是空域秩序紊乱核心诱因。(3) 设备与人为风险: 机载传感、动力设备老化故障频发,操作人员专业不足、违规越界飞行,外加卫星导航信

号干扰、恶意欺骗,双重诱发飞行失控事故。

1.3 智能预警与管控核心基础理论

(1) 多传感器目标感知与识别理论: 融合雷达、光电、射频传感器采集空域数据,完成低空目标测距、分型、身份核验,筑牢全域感知底层支撑。(2) 机器学习驱动飞行风险预测评估理论: 依托历史事故、环境飞行数据集训练模型,量化风险等级,实现隐患动态预判与分级评估。(3) 空域协同调度、联动闭环管控理论: 统筹空域资源、飞行器航迹、管控终端,完成预警-研判-调度-处置全流程闭环协同管控。

1.4 传统低空管控模式痛点分析

(1) 依托人工值守筛查空域数据、审核飞行报备,人力负荷大、流转流程繁琐,风险识别、应急预警滞后性极强,适配不了低空海量飞行需求。(2) 依托单一雷达监测设备作业,楼宇遮挡形成大量监测盲区,针对无应答非合作黑飞目标,精准捕捉、身份识别能力严重不足。(3) 预警监测、风险研判、现场处置部门流程割裂,数据无法互通共享,缺乏一体化联动机制,整体智能化、协同管控效能薄弱。

2 低空飞行安全智能预警核心技术体系

2.1 低空多源目标智能感知采集技术

(1) 搭建多模态一体化监测传感体系,融合毫米波低空雷达、红外光电摄像头、低空声学传感器与5G-A通信传感模块。雷达穿透云雾和楼宇遮挡实现远距探测;光电传感器完成日间高清成像与夜间红外识别;声学传感器捕捉旋翼、发动机声波以发现静默黑飞目标;5G-A通信传感抓取合规飞行器信令。四类传感互补适配城市密集区、郊野山地、复杂气象等场景,破解监测失效问题。(2) 基于传感组网定位算法,区分合作与非合作目标动态监测。搭载北斗与基站差分定位,对应答机、备案无人机等合作目标实现厘米级实时定位;对无应答非

合作黑飞目标,利用多站点交叉测算被动定位,同步拟合速度、航向、高度等参数,实现毫秒级连续轨迹捕捉与航迹回溯,锁定违规目标动态^[2]。(3)联动空域监测基站、气象站与地理信息库,开展实景三维空域、动态气象、全域地形一体化采集。利用三维建模还原城市楼宇、山地、禁限飞区实景轮廓;实时采集风切变、能见度、对流等气象数据;匹配地形高程与障碍物分布,构建一体化底层实景空域数据库,为风险研判提供原生数据支撑。

2.2 低空飞行风险智能研判预警技术

(1)依托低空飞行事故数据集、违规飞行案例与环境工况样本,构建基于深度学习神经网络的飞行风险分级评估模型。模型提取飞行器设备状态、空域环境、飞行航迹、人员操作四大类核心特征,完成数据迭代训练与特征权重优化,结合空域管控规范划分低风险、一般风险、较高风险、重大风险四个层级,量化事故发生概率与危害程度,实现风险智能化定量评估。(2)面向低空高频安全隐患,搭建多场景专属超前预警算法。依托航迹预判算法测算多飞行器航迹交汇节点,预判航线冲突、空中碰撞风险;结合气象时序推演算法,提前捕捉风切变、局地强对流等极端气象隐患;依托电子围栏匹配算法识别空域越界、黑飞入侵行为,实现三类核心风险分钟级超前预判,达成风险前置防控目标。(3)结合空域管控标准与风险危害等级,标准化设定四级预警阈值,搭建一体化分级预警机制。低阶风险依托管控平台弹窗提示预警,中阶风险联动后台台账标注、值班人员移动端推送;高阶、重大风险同步启动现场声光告警、云端平台联动、属地管控终端指令下发,实现风险分级、预警分层、全域联动处置^[3]。

2.3 多源异构数据融合预处理技术

(1)针对空域监测传感数据、动态气象监测数据、机载飞行器运行三类异构原始数据,开展专业化数据清洗与降噪处理。剔除设备故障、电磁干扰产生的跳变异常数据,修补传输断层、信号缺失残缺数据,过滤扬尘、阴雨天气带来的噪声冗余数据,削减外部环境及设备误差,提升原始数据精准性。(2)通过时空基准统一算法,完成多源数据时空维度耦合对齐,校准全域传感设备采集时间戳与地理坐标系,打破不同设备、不同类型数据时空割裂问题;同时自动剔除重复采集、无效冗余监测数据,精简数据库体量,降低后端算法运算负荷,提升数据调度与研判效率^[4]。(3)引入边缘计算架构赋能前端监测设备,将基础降噪、数据对齐、目标初筛等基础预处理工序下沉至边缘终端完成,无需将海量

原始数据全部上传云端后台,大幅压缩数据传输时延,实现前端海量异构数据秒级实时处理,满足低空动态监测实时性技术需求。

2.4 智能预警系统架构与运行逻辑

(1)系统采用分层模块化设计,搭建感知层、数据层、算法研判层、预警输出层四层闭环架构。感知层为多模态传感组网单元,负责全域低空数据采集;数据层承担数据存储、融合预处理、数据库运维工作;算法研判层搭载风险评估、场景预警核心算法,完成隐患智能解析;预警输出层对接管控大屏、声光设备、移动端终端,实现预警指令下发,各层级互联互通、协同运转。(2)系统遵循闭环自动化运行逻辑,形成全域低空目标动态监测+风险实时预警完整流程。首先感知层全域采集目标、气象、地形数据,经数据层完成融合预处理后传输至算法研判层,完成目标识别、风险定级与隐患甄别,最终由输出层下发分级预警指令,同步留存监测台账,实现从数据采集到风险预警全流程自动化闭环运行。

3 低空飞行安全智能管控技术落地应用、现存问题与优化对策

3.1 低空飞行智能核心管控技术应用路径

(1)依托空域三维建模与智能调度算法,实现空域航线智能动态规划与飞行器流量调度管控。结合实时空域飞行器数量、气象条件、禁限飞边界动态优化飞行航线,规避固定航线拥堵与空域冲突问题;依据空域承载阈值分流通航飞机、各类无人机飞行流量,高峰时段错峰调度飞行任务,平衡空域资源分配,缓解低空飞行器扎堆引发的秩序混乱问题。(2)落地违规飞行导航诱骗、电磁干扰柔性管控技术,属于非破坏性温和管控手段。针对黑飞、越界违规低空飞行器,定向释放轻量化导航欺骗信号篡改机载定位信息,同步发射窄带电磁信号压制违规飞行器通信链路,引导违规飞行器自主返航、迫降,无需损毁设备,兼顾管控效果与财产保护需求^[5]。(3)部署高危目标硬拦截、空域应急封禁刚性管控技术,适配极端风险处置场景。针对恶意入侵、高危肇事低慢小飞行器,采用网捕拦截、激光驱离装置完成物理硬拦截;突发安保险情、极端灾害天气时,快速划定临时封禁空域,全域拦截闯入飞行目标,筑牢空域应急安全防线。

3.2 典型行业场景落地应用案例

(1)城市核心区安防低空预警管控应用。在政务片区、商圈、居民密集城区搭建一体化智能管控系统,依托多模态感知设备全天候监测低空黑飞无人机,联动公安安防平台完成隐患预警与柔性驱离,规避偷拍、空

域滋扰、安防袭击风险,筑牢城市公共低空安防体系。

(2)通航物流、电力巡检商业低空飞行场景应用。区域物流通航飞机、输电线路巡检工业无人机搭载智能管控终端,平台统一规划巡检、物流运输航线,实时监测设备故障与航线偏移风险,自动调度飞行任务,既保障商业飞行作业效率,又规避作业空域飞行碰撞安全隐患。

(3)机场周边低空净空安全智能防控应用。各大民航机场搭建低空净空智能防控体系,划定机场外围低空严控保护区,智能甄别闯入消费级无人机、违规通航飞行器,超前预警入侵目标,联动管控设备快速处置,消除低空飞行器干扰航班起降的净空安全隐患。

3.3 当前技术落地与应用现存问题

(1)复杂城市遮挡环境下目标监测盲区难以消除。城市高层楼宇、高架桥、密集建筑群遮挡传感监测信号,割裂传感器组网监测链路,低空低矮空域、楼宇背侧形成大量监测盲区,小型消费级无人机极易隐匿盲区内违规飞行,提升管控难度。(2)算法极端天气下预警准确率下降,误报漏报率偏高。暴雨、浓雾、强对流、沙尘极端天气会干扰传感采集数据,导致深度学习风险研判算法特征提取失真,气象噪声叠加目标信号畸变,系统风险误预警、真实隐患漏预警问题频发。(3)跨区域管控平台数据不互通、行业标准不统一。省、市、区县各级低空管控平台独立搭建,感知数据、预警台账、飞行备案数据壁垒突出;传感设备参数、预警算法、系统运维无统一行业规范,跨区域协同管控、目标联动追踪难以落地。(4)系统建设成本高,中小区域规模化推广难度大。多模态感知硬件、算法研发、云端服务器部署整体造价高昂,后期运维、设备校准成本持续投入,乡镇、小型园区等中小管控区域资金有限,技术规模化复制、全域落地推广阻力较大。

3.4 技术优化与行业发展优化对策

(1)优化轻量化AI预警算法,提升复杂环境适配能力。删减算法冗余运算模块,加入楼宇遮挡信号补偿、气象噪声过滤算子,优化复杂地貌、极端天气下目标识

别与风险研判模型,削减环境干扰,降低预警误报、漏报概率。(2)搭建全域低空数据共享中台,统一技术与运维行业标准。搭建省级、市级全域低空数据共享中台,打通属地管控平台数据壁垒;统一传感设备规格、预警阈值、系统运维、目标识别行业标准,实现跨区域数据互通、协同联动管控。(3)推行模块化系统部署,降低项目落地建设成本。拆分感知、算法、预警、管控系统模块,根据中小区域管控需求按需选配功能模块,摒弃一体化全套部署模式,缩减硬件采购与算法部署经费,助力中小区域规模化落地应用。(4)完善低空飞行管控法规,技术+制度双向筑牢安全体系。补齐低慢小飞行器报备、空域飞行、违规惩处法律法规,细化黑飞处罚条例;结合智能管控技术搭建技术管控+法律约束双重体系,规范低空飞行秩序。

结束语

综上,多维智能感知、分级风险预警、软硬协同管控技术可有效补齐传统低空管控短板,适配多行业低空作业安防需求。现阶段复杂环境监测、跨域协同、成本管控问题仍制约技术普及,后续需迭代轻量化AI算法、统一行业标准、打通全域数据壁垒,兼顾技术落地成本与管控效能。同时联动政策法规完善治理体系,实现技术管控与制度约束双向赋能,推动低空飞行安全管控智能化、全域化、规模化落地。

参考文献

- [1]吴启晖.低空经济信息系统与飞行安全智能管控关键技术研究[J].中国科学基金,2025,39(2):278-286.
- [2]乔海东.卫星互联网赋能低空飞行安全预警体系构建与技术落地[J].遥测遥控,2026,45(1):45-52.
- [3]胡雅静.5G-A智联技术融合低空飞行安全智能预警管控系统应用[J].信息通信技术与政策,2025(11):72-78.
- [4]刘宇航.高密度低空空域无人机飞行风险智能预警与协同管控技术[J].航空工程进展,2024,15(3):136-143.
- [5]陈曦.低空通航飞行安全风险识别及智能防控管控技术优化[J].中国安全生产科学技术,2024,20(7):112-118.