

【低空经济研究】

无人机扰航事件对航空安全的多维影响
与协同防控对策常广庶¹, 刘秉乾^{1,2}

(1. 郑州航空工业管理学院 航空经济发展河南省协同创新中心, 河南 郑州 450046;

2. 郑州新郑国际机场有限公司, 河南 郑州 451100)

摘 要:低空经济的蓬勃发展与民用无人机保有量的激增,在带来产业机遇的同时,也导致无人机扰航事件多发,对航空安全构成严峻挑战。基于成都双流、武汉天河等典型机场扰航案例,结合民航规章与实测数据,系统解析无人机扰航在碰撞风险、电磁干扰、运行紊乱三个层次的具体影响机制与量化后果。针对当前存在的监管体系缺陷、技术瓶颈与公众认知偏差等问题,提出“人防—技防—监管—协同”的综合治理框架,采取相应措施以实现航空安全与低空产业发展的动态平衡。

关键词:无人机;航空安全;扰航;低空经济;协同防控

中图分类号: F 562 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2026.01.006

民用无人机产业的爆发式增长已成为全球性现象,中国在其中扮演着主导角色,与此同时,无人机扰航事件也随之增多,大有愈演愈烈之势。依据中国民航局《2024 年民航行业发展统计公报》数据,我国消费级无人机保有量呈现迅猛增长态势。截至 2024 年底,全行业注册无人机数量达 217.7 万架,较上一年度增长 98.5%;共颁发无人机操控员执照 27.33 万本;2024 年全年无人机累计飞行时长为 2666.7 万小时,同比增长 15.4%^[1]。在产业高速发展进程中,“黑飞”问题日益凸显,防控形势严峻复杂。这并非单纯的技术或管理问题,而是对空域监管体系、公共安全乃至国家安全的持续性挑战。随着《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》(2024 年施行,以下简称《条例》)^[2]和《民用无人驾驶航空器事件信息管理办法》(2025 年施行)^[3]的陆续颁

布,我国无人机监管体系正逐步完善。本文旨在整合多源案例、政策文本及行业数据,系统性解析无人机扰航事件的多层次影响机制,深入剖析其深层成因,并据此构建分级协同防控对策体系,为保障民航安全、促进低空经济健康发展提供理论支撑与实践参考。

一、无人机扰航事件的多层次影响分析

无人机扰航对航空安全的影响并非单一维度,而是呈现复杂的、相互关联的多层次危害,深入理解其影响机制是制定有效防控策略的基础。

(一) 直接安全层:航空器碰撞风险

无人机与民航客机发生碰撞是扰航事件最直接、最严重的威胁。

1. 碰撞动力学特性 有研究指出,当无人机重量超过一定阈值且速度较快时,会对飞机机头

收稿日期:2025-09-05

基金项目:河南省软科学研究计划重点项目(252400411008)

第一作者简介:常广庶(1972—),男,河南郑州人,教授,博士,硕士研究生导师,主要从事航空经济研究。

E-mail:157619544@qq.com

结构造成严重损伤,甚至穿透蒙皮,这种高动能冲击极可能导致结构损伤、系统失效甚至灾难性事故。^[4]这表明,消费级无人机已具备对大型航空器造成实质性物理破坏的能力,其威胁等级不应被低估。

2. 入侵概率与经济成本 机场净空保护区(通常定义为跑道中心线两侧各10 km、跑道端外20 km范围)是无人机入侵的高发区域。单次无人机入侵迫使航班采取避让措施,综合计算航班延误成本(按3万元/小时计)、额外燃油消耗及旅客补偿等,平均延误成本高达约14.7万元^[5]。若事件引发大规模航班备降,经济损失将急剧放大。这凸显了无人机扰航不仅关乎安全,也带来巨大的直接经济损耗和资源浪费。

3. 潜在安全威胁升级 无人机平台存在被恶意利用进行攻击的可能性。2018年委内瑞拉阅兵式遭遇携带爆炸物的改装无人机袭击事件,^[6]以及2025年乌克兰“蛛网”行动利用FPV无人机进行跨境军事打击的案例,都证明了消费级无人机经过改装可成为低空突袭武器^[7]。这些案例警示我们,无人机扰航风险已从意外事故向蓄意破坏和恐怖主义威胁扩展,对机场和航空器的安保体系提出了全新挑战。

(二)技术干扰层:电磁信号干扰

无人机与民航系统在无线电频谱资源上的重叠,构成了另一重大安全隐患。

1. 干扰机制与危害程度 无人机遥控链路极易与民航关键通信导航系统产生同频或邻频干扰。在飞机起降的关键阶段,此类干扰可能导致严重后果^[8]。这种干扰具有隐蔽性和突发性,飞行员和管制员往往难以及时察觉和应对,风险等级极高。

2. 事件分布与连锁反应 中国民航局2023年记录在案的32起无人机信号干扰事件中,有26起发生在机场进近面(高度300m以下空域)^[9],这与起降关键阶段高度吻合。电磁干扰虽不直接造成物理碰撞,但其导致的导航失灵或通信中断,足以在关键时刻诱发灾难性后果,且因其“无形”特性,事后追溯和取证也更为困难。

(三)系统衍生层:机场运行秩序紊乱

扰航事件往往触发机场运行链条的连锁崩溃,其影响远超单一航班。

1. 运行效率断崖式下降 无人机入侵迫使机场采取临时关闭空域、暂停起降等紧急措施。武汉天河机场数据显示,单次扰航事件导致机场关闭时长平均约127分钟,期间航班准点率下跌达35%以上。^[10]航班大面积延误、取消形成“堰塞湖”效应,恢复运行秩序耗时漫长。成都双流机场案例更揭示,事件处置每延迟10分钟,后续航班恢复正常运行时间平均增加45分钟^[11],呈现明显的级联放大效应。

2. 旅客滞留与公共安全压力 大规模航班延误直接导致旅客在机场聚集滞留,而大量旅客滞留又极易引发群体事件。这不仅大幅增加现场管理难度和安保成本,也构成潜在的公共安全风险^[12]。

3. 声誉损害与舆情危机 扰航事件极易引发负面舆情。舆情危机和潜在的群体事件会进一步扰乱机场运行,形成“运行紊乱—旅客积压—舆情发酵—运行压力更大”的恶性循环,系统性削弱民航运行品质和安全裕度。

二、无人机扰航成因的多角度分析

扰航事件的频发是监管漏洞、技术瓶颈、公众认知偏差等多重因素交织作用的结果。

(一)监管体系缺陷:法规滞后、职责分散与惩戒不足

监管体系未能有效匹配无人机技术的快速普及和风险演化。

1. 规则滞后:立法滞后与执行落差 在《条例》实施之前,90%以上的消费级无人机(最大起飞重量<25 kg)无须进行严格的适航认证,实名登记率长期低于40%。^{[13]376}虽然理论上无人机操控员须申请飞行经历记录本并规范记录,但是因为界定不清、程序繁琐,实际执行效果不佳,大量小型/玩具级无人机处于监管真空。在《条例》实施后,“谁来管?怎么管?”这一问题仍未得到有效解决。《条例》仅明确了机场无人机扰航事件统一归口为机场飞行区管理部处置,其余各单位积极配合。但机场飞行区管理部层级较低且无执法权,仅具备整合信息能力,在处置、决策过程中较为被动,仍需领导层牵头决策。

2. 执法困境:多头管理与协同失效 无人机管理涉及公安、民航、工信等多个部门。“黑飞”

行为的发现高度依赖目视或群众报告,难以及时、精确加以定位和追踪,如某机场曾出现四名不同岗位工作人员分别报告发现一架无人机,且移动方向各不相同,实际却是同一架。处置过程中信息传递链条长、易失真,跨区域飞行监管缺乏统一标准和协作机制,导致“真空地带”。职责交叉与界限模糊问题突出,例如机场净空区内外监管主体不同,区内属民航公安,区外属地方公安。“黑飞”行为的处置主体通常是机场飞行区管理部,但其往往并未配备反无人机装备,目前仅江西、吉林等地民航机场确定了采购计划,在确定事件类型及具体方位后,仍需军警等单位协同,《条例》并未解决信息传递链条长等难题。

3. 惩戒不足:处罚乏力与威慑缺位 曾有学者对 2021 年十大无人机“黑飞”事件进行了分析,其中 2 起行政拘留,2 起治安警告,5 起为罚款(金额多在数千至数万元),处罚力度普遍偏轻,这与扰航事件可能造成的数百万经济损失和安全风险极不匹配。^[14]因此类事件具有“人机分离”的特性,从而加剧了“发现难”与“处罚率低”的问题。受技术水平限制,大量“黑飞”行为未被发现或无法追踪到具体责任人。公安机关处置

存在滞后性,一些违法行为甚至是在发生半年后才予以立案^[15],且基层人员、专业设备等执法资源匮乏,难以进行快速、有效的取证和查处。

法规依据笼统与执法差异。《中国民用航空法》、《中国通用航空管理条例》等上位法对无人机扰航的规定过于原则性,缺乏具体罚则指引。2026 年 1 月 1 日起生效的《治安管理处罚法》将无人机违规飞行纳入了治安管理处罚范围,这一规定虽然弥补了法律处罚依据的空白,但与空域管理方面的法规衔接仍不够紧密,在技术界定方面仍留有空白。《条例》作为行政法规,对民事赔偿、刑事责任的设定能力有限。各地对同类“黑飞”行为的处罚尺度不一,影响了法律的严肃性和威慑力。

成本收益失衡。对于蓄意违规者,相较于潜在收益,现有处罚的预期违规成本过低,难以形成有效震慑。破解禁飞区模块成本低廉,在网商平台仅需几百元即可破解^[16],然而获利却可能非常大,进一步刺激了违规行为。

(二)技术防控瓶颈:探测盲区与反制局限

现有技术手段在面对复杂环境和小型无人机时存在明显短板,见表 1^[17]。

表 1 无人机探测技术性能对比分析

探测方式	探测距离/km	优点	缺点
无线电 遥控信号	1~2	适用于各种类型的无人机,可有效侦测到飞手	不能有效发现不发射无线电信号的“静默”无人机
侦测 图传信号	2~3		
飞控协议监听	5	能精确跟踪掌握其飞控协议的各类无人机(如大疆、零度等),并锁定飞手	不能有效发现未掌握其飞控协议的无人机
主动雷达	1~5	不受类型影响,有效探测距离较远	无人机散射面积小,探测难度大,存在一定范围的低空探测盲区,可能对机场的空管设备造成干扰,使用前须进行频率申请
多照射源 被动雷达	5	不受类型影响,有效探测距离较远,无源天线不辐射电磁波,无须申请频率	探测精度受到数字广播电视信号覆盖范围与信号强度的影响
声学	0.2~1	适用于多种类型的无人机,可实现全天候预警侦测	噪声水平很低,在嘈杂环境中,该技术适用性较差,且探测距离较近
光电	1~2	可捕获各种型号的无人机,能够实现全天候、实时、可视化监控	一般设备探测距离较近。如采用探测距离远、精度高的探测设备,则造价急剧上升

深圳机场在早期测试单一雷达系统时,对雷达截面积(RCS)仅为 0.01 m² 的小型无人机漏

检率高达 34%^[17],而武汉天河机场通过部署“雷达+频谱+光电”多传感器融合系统将漏检率降至 5% 以下,说明了技术融合的必要性^[18]。

反制技术同样面临挑战。目前导航诱骗、电磁压制等非动能手段作用距离有限,通常小于 3 km;网枪、激光、拦截无人机等动能摧毁手段成本高昂,存在附带损伤风险,在人口稠密区或机场核心区适用性受限;针对远距离或集群无人机的有效反制手段仍在发展中。

(三) 公众认知偏差:法律意识薄弱与操作失范

飞手和公众的认知不足是“黑飞”事件发生的重要诱因。

1. 主体年轻化与知识匮乏 昆明多家无人机培训中心数据显示,报考 CAAC 无人机执照的学员中超七成为 00 后。^[19]《武汉晚报》对持证飞手的调查发现,大部分学员聚焦操作技能而忽视法规学习,对于禁飞区的认识则全部依赖于设备电子围栏。^[20]广东省消委会 2024 年消费级无人机比较实验报告指出,20 款受测机型中仅 4 款能有效提示禁飞区,其余 16 款无预警功能^[21],加之禁飞区预设数据不完整,导致用户对于禁飞区与适飞区概念的混淆,认为“非禁飞区即可自由飞行”,对空域分类管理和飞行申请要求认知模糊,这表明大量未持证飞手理论学习深度不足、缺乏民航风险意识。

2. 改装与滥用风险 公安部 2023 年专项行动中,查获被破解的无人机数量达数千架^[22],表明非法改装已成规模化黑色产业。多起重大扰航事件的事后溯源均指向了改装无人机和违规破解禁飞系统。这些改装机规避监管,飞行轨迹难以预测和控制,其管控高度依赖市场秩序整顿和社会宣传教育,为此深圳在 2024 年出台的《无人机管理办法》中,专门将改装无人机列为重点处罚行为,反映该行为在安全事件中的高发性。

三、无人机扰航的协同防控对策

应对无人机扰航挑战,需构建涵盖政府监管、技术创新、人防群治的多维协同体系。

(一) 强化政府监管:法治化、全周期与机制创新

1. 完善法律法规体系与提升惩戒威慑 推

动上位法建设和修订。如在《中国民用航空法》增设无人机专章,或制定无人机专门法律,为设定更严厉的行政处罚和明晰刑事责任提供法律基础,为制定阶梯化、量化的处罚标准提供技术界定基础。推进各部法律法规的协同,共同构建起无人机管理的法律框架,建立更稳固的制度“防火墙”。

细化处罚标准与加大惩处力度。一是依据扰航行为的后果,如机场关闭时长、航班影响架次、直接经济损失等因素,制定阶梯式、量化的行政处罚标准。二是大幅提高罚款额度下限,对造成严重后果或存在恶意破解禁飞区、在核心区域黑飞等严重违法行为的单位或个人,引入更高额罚款、吊销执照、列入行业黑名单等处罚措施,并增加追究刑事责任的适用情形和量刑建议。

落实“禁飞区电子围栏强制预装”。严格执行《条例》第 34 条,确保新出厂及在售无人机强制预装不可卸载或难以破解的电子围栏系统,并将销售、传播破解工具或服务的行为明确列为违法,追究刑事责任。

2. 加强全生命周期管理 建立唯一产品编码体系,对无人机整机及核心部件实施全国统一编码管理,实现生产、销售、维修、使用、报废全链条可追溯。禁止未编码产品上市,强化流通环节监管,督促生产商、销售商、维修商验证产品编码合法性并登记交易和服务信息。

3. 推行机制创新与协同治理 构建一体化监管平台。在国家空管办统筹下,整合现有资源,建立国家级无人机综合监管平台,统一接入飞行计划审批、实时监控、空域状态、冲突预警、违法取证、执法联动等功能,打通部门间信息壁垒。如中国民航局主导建设的轻小型民用无人机运行动态数据库系统“无人机云”,通过实时采集飞行数据实施监管,具备航行服务、气象服务提供及电子围栏报警功能。

对用户实施分级分类管控(见表 2),基于风险等级对用户实施差异化监管措施,聚焦高风险对象。

(二) 技术防控升级:多源融合、智能预警与精准反制

1. 探测层:融合感知与全域覆盖 在机场及周边重点区域部署“相控阵雷达(抗杂波)+无源

雷达(反隐身)+宽频段频谱侦测(识别信号特征)+智能光电跟踪(目标识别)”的复合探测系统。乌鲁木齐机场应用验证,此类系统不仅可以

表 2 无人机用户分级管控模型

管控等级	对象特征	主要管控措施
一级 (高危)	涉恐关注人员、有重大犯罪前科人员	纳入禁飞名单、设备收缴、动态行为监控
二级 (中危)	未持证飞手、未实名登记用户	限制飞行空域、高度、时间、飞行计划 强制审批、定期核查
三级 (低危)	合规企业用户、持证熟练的飞手	飞行计划备案、简化 审批流程、提供便捷 服务、探索信用激励

2. 反制层:软硬结合与分级相应 对于合作目标,通过监管平台或无人机原生系统发送强制返航或降落指令。对于非合作甚至恶意目标,优先使用 GPS 或北斗诱骗其至安全区或通过精准定向电磁压制切断其控制链路和图传。动能摧毁手段应作为最后选项,严格限定使用条件和区域,避免次生伤害^[24]。机场管理单位、机场公安等部门加速普及反无人机便携式装备的配备,使其可以及时处置,降低安全风险。

3. 决策层:AI 驱动与风险预测 利用人工智能和机器学习技术,深度挖掘历史扰航事件数据、空域活动规律、气象信息、社会活动信息等,构建高风险时段与区域预测模型,实现主动防御和资源精准布防。

(三)人防体系优化:培训普及、公众教育与群防群治

1. 做实资质管理与技能培训 严格执行轻型及以上无人机操控员持证制度。培训内容须强化法规教育、空域意识、风险认知和应急处置,可引入 VR 模拟净空区入侵后果体验等沉浸式教学。

2. 强化应急能力 加强民航从业者的技能培训,提高其事件敏感性 & 辨识能力,确保无人机事件信息的及时性、准确性、完整性。协同多部门共同建设针对无人机事件的应急小组,明确

其处置主体地位,为其配备专业设备,增强其对无人机的处置应对能力,缩短信息传递链条。

3. 深化公众安全意识教育 通过媒体宣传、社区活动、学校教育、机场警示等多渠道持续普及无人机管理法规、安全知识和空域概念,提升公众对“黑飞”危害的认识和主动报告意愿。

4. 构建群防群治网络 在机场周边显著位置设立净空保护区警示牌,明确标注地理坐标和禁飞要求。同时,建立便捷有效的“黑飞”举报渠道,并实行线索奖励制度,充分调动社会力量参与防控。促进行业协会自律,规范企业生产和市场行为。

(四)构建安全与发展协同演进的治理新范式

无人机的发展应用具有广阔的前景,而无人机扰航治理的核心就在于寻求低空经济创新活力与航空安全保障之间的动态平衡,因此其治理模式也需不断演进,亟须前瞻性的顶层设计。通过对无人机扰航事件的核心特点进行梳理可以得出三个方向:

1. 风险具有级联性与演化性 单一扰航事件可触发“物理碰撞/电磁干扰→运行瘫痪→经济损失→公共安全/舆情危机”的链式反应,且处置延迟效应显著^[25]。无人机被恶意利用进行攻击的威胁已从理论走向现实,安全维度须纳入反恐和国家安全考量。

2. 防控效能依赖深度协同 在技术层面,多源融合是提升探测精度的关键,但须持续投入算力升级。如乌鲁木齐机场多模态融合系统的实测运维报告指出,伴随海量实时数据处理需求,算力消耗呈现年均 35% 的复合增长率。^[26] 在管理层面,基于风险的分级管控需动态调整,如针对年轻飞手激增,培训可强化 VR 体验。在法规层面,惩戒威慑不足是当前软肋,亟须通过立法完善、标准细化、执法统一和处罚加重来提升违规成本。

3. 低空经济催生治理新挑战 城市空中交通(UAM)的发展将急剧增加机场周边空域复杂度^[27]。自动驾驶无人机集群技术的商用,对现行法规在集群空域申请、责任主体认定、安全间隔标准等方面提出了全新课题。

基于上述三方面探索构建安全与发展协同

的演进的治理新范式,本文提出以下无人机扰航阶段部署,见表 3。
治理的政策实施路径建议,对目标进行量化,分

表 3 政策实施路径建议

阶段	重点任务	量化目标
近期(1—2 年)	1. 电子围栏 100%预装(含防篡改/破解机制) 2. 建成省级无人机云平台并实现互联互通 3. 机场核心区(3 km)部署融合探测系统	扰航事件发生率下降≥50%
中期(3—5 年)	1. 立法覆盖集群飞行与 UAM 2. 扩展适航认证至 150 kg 以下机型 3. 构建空天地一体化监视网络	UAM 运行事故率≤0.1 次/万架次
远期(6 年以上)	1. 无人机 ADS-B OUT 强制接入 2. 反制设备小型化/智能化(车载/单兵) 3. 探索空域资源动态分配/拍卖机制	无人机货运占比航空货运总量≥15%

无人机扰航治理须超越简单的“安全与发展”的二元对立思维,转向风险可控、创新包容的低空生态体系建设。在技术层面,加快突破,布局全域空情感知、智能识别与主动预警等复合技防手段,构建空地一体、全域覆盖、实时精准的低空监管网络;在管理层面,系统借鉴国际成熟治理框架,完善协同监管、分级分类、动态风险评估与应急处置机制;在法规层面,加快制度供给

与规则更新,清晰界定空域使用、数据主权、个人信息保护、隐私边界及平台、运营者、使用者等多方新型权责关系。唯有推动法规制度、技术支撑、协同管理、公众参与四位一体深度融合,才能在牢牢守住航空安全底线的前提下,充分释放低空经济活力,驾驭低空产业浪潮,最终实现空域资源高效利用、航空运行绝对安全、低空产业健康可持续发展的“天空之城”治理目标。

参考文献:

[1]中国民用航空局. 2024 年民航行业发展统计公报[EB/OL]. (2025-05-15)[2025-08-01]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202505/t20250515_227513.html.

[2]中华人民共和国国务院,中华人民共和国中央军事委员会. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[EB/OL]. (2023-06-28)[2025-08-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6888800.htm.

[3]中国民航局. 民用无人驾驶航空器事件信息管理办法(AC-396-05)[EB/OL]. (2025-05-26)[2025-09-04]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202506/t20250605_227657.html.

[4]刘银朝. 运输类飞机机头与轻型无人机碰撞的风险评估方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2021.

[5]张亨. 治理无人机“黑飞”打造有序、安全、高效“天空之城”[J]. 中国信息化,2025(3):47-48.

[6]陈万鑫,赵蓬勃,郭振鹏. 委内瑞拉总统遇袭事件对我国警卫工作中无人机防控的启示[J]. 武警学院学报,2019(9):29-33.

[7]肖新新,于文,柳玉鹏. 乌无人机首次突袭俄远东[N]. 环球时报,2025-06-03(1).

[8]陈浩翔. 民用航空无线电导航测距设备频率分配规则研究[J]. 民航学报,2025(5):67-70.

[9]丁姿,夏仕琦. 低空安全内涵探究及治理框架构建[J]. 信息技术与管理应用,2025(1):57-69.

[10]徐泽融. 武汉天河机场无人机防控系统研究[J]. 中国高新科技,2021(5):80-81.

[11]齐福强,张晓阳,陈姝宁,等. 基于 BT-BN 的无人机运行安全风险[J]. 科学技术与工程,2025(20):8745-8752.

[12]综合. 聚焦无人机“黑飞”扰航事件频发威胁公共安全[J]. 安全与健康,2017(6):4-6.

[13]沈威力. 无人机飞行安全与管理[M]. 北京:机械工业出版社,2024.

[14]许克,李文姝. 民用无人机“黑飞”治安治理研究[J]. 河北公安警察职业学院学报,2024(4):30-34.

[15]王嘉颖. 无人机执法的法律规制研究[D]. 广州:广东财经大学,2024.

[16]牛玲玲. 涉民用无人机类犯罪案件的风险防控及裁判规则[J]. 人民司法,2025(12):44-48.

- [17]钟宏嘉. 机场无人机反制技术现状研究[C]//上海空港—2019 年度论文合集. 上海:上海世纪出版股份有限公司科学技术出版社,2019.
- [18]张俊杰. 低空小型无人机探测雷达的 FPGA 设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2020.
- [19]王琳. 低空经济催热无人机培训[N]. 昆明日报,2024-11-19(4).
- [20]张衡. 武汉低空经济提速引来飞手考证热[EB/OL]. (2024-08-08)[2025-08-01]. https://whwb.cjn.cn/h5/html5/2024-08/08/content_152969_1142140.htm.
- [21]广东省消委会. 消费级无人机比较试验报告[EB/OL]. (2024-12-05)[2025-08-01]. <https://www.gdcc315.cn/html/web/bhdt/1864587663770558465.html>.
- [22]林靖. 公安部开展无人机专项整治行动:查获被破解无人机数千架[EB/OL]. (2023-11-30)[2025-08-01]. https://cj.sina.com.cn/articles/view/1617264814/606580ae02001reig?finpagefr=p_104.
- [23]张佩贤. 无人机监测雷达信号处理系统设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2022.
- [24]YE Z X, YOU J, GU J L, et al. Modeling and simulation of urban laser countermeasures against low-slow-small UAVs [J]. *Drones*, 2025(9):419. <https://doi.org/10.3390/drones9060419>.
- [25]TSIAMIS N, EFTHYMIU L, TSAGARAKIS K P. A conceptual framework for economic analysis of different law enforcement drones[J]. *Machines*, 2023(11):983. <https://doi.org/10.3390/machines11110983>.
- [26]罗定发, 赵新玥, 区隽诚. 乌鲁木齐机场无人机防控的威胁分析与防控部署[J]. *中国军转民*, 2025(3):47-48.
- [27]HAN P, YANG X, LOW K H, et al. Parametric analysis of landing capacity for UAV fleet operations with specific airspace structures and rule-based constraints[J]. *Drones*, 2024(8):770. <https://doi.org/10.3390/drones8120770>.

Research on the multidimensional impact of drone disrupting navigation incidents on aviation safety and collaborative prevention and control countermeasures

CHANG Guangshu¹, LIU Bingqian^{1,2}

(1. *Henan Province Collaborative Innovation Center of Aviation Economy Development, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China;*
2. *Zhengzhou Xinzheng International Airport Co., Ltd., Zhengzhou 451100, China*)

Abstract: The booming development of low-altitude economy and the surge in the number of civilian drones have brought industrial opportunities, but also led to frequent incidents of drone disrupting navigation, posing a serious challenge to aviation safety. Based on typical airport disruptions such as Chengdu Shuangliu and Wuhan Tianhe, combined with civil aviation regulations and measured data, this study systematically analyzes the specific impact mechanisms and quantitative consequences of drone disrupting navigation in collision risk, electromagnetic interference and operational disorder. In response to the current deficiencies in the regulatory system, technological bottlenecks and public cognitive biases, a comprehensive governance framework of “civil defense-technical defense-regulation-collaboration” is proposed, and corresponding measures are taken to achieve a dynamic balance between aviation safety and the development of the low-altitude industry.

Keywords: drone; aviation safety; flight disruption; low-altitude economy; collaborative prevention and control

(责任编辑:周新颜)

引用格式 常广庶,刘秉乾. 无人机扰航事件对航空安全的多维影响与协同防控对策[J]. 山东航空学院学报, 2026, 43(1): 42-48.

CHANG G S, LIU B Q. Research on the multidimensional impact of drone disrupting navigation incidents on aviation safety and collaborative prevention and control countermeasures[J]. *Journal of Shandong University of Aeronautics*, 2026, 43(1): 42-48.