

无人机巡检系统路径规划与稳定性控制分析

王震 王巧

浙江省机电设计研究院有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：国内公路隧道建设里程逐年攀升，洞内通风、照明、消防等全套机电设施，是路网安全通行的关键屏障。隧道密闭昏暗的特殊环境、密集的设备布局与信号干扰，让人工巡检耗时费力，细小故障难以及时发现。小型无人机可适配隧道狭小作业空间，却易受气流、墙体反射影响出现姿态失稳。基于此，本文将立足隧道机电专项巡检需求，研讨航线规划优化方案与飞行稳态调控手段，以期为行业智能巡检落地提供实操依据。

【关键词】：无人机；巡检系统；路径规划；稳定性

DOI:10.12417/2811-0528.26.14.093

引言

随着无人机技术的飞速发展,无人机被广泛用于各种领域的巡检任务。近年来,公路隧道的规模和长度都在快速增长,无人机因其独特的性能和优势成为了电力巡检的首选,无人机巡检不仅能保证安全性,还能有效地提高巡检效率。可见,针对无人机巡检系统路径规划与稳定性控制进行深入分析极为重要。

1 无人机巡检系统的路径规划

1.1 立足隧道机电场景,明确路径规划核心导向

公路隧道机电设备种类繁多,涵盖通风系统、照明设施、消防装置、监控设备等多个品类,分别安装在隧道顶部、侧壁及路面两侧,不同设备的安装高度、分布密度存在明显差异。路径规划需先厘清巡检重点,针对消防喷淋、应急照明等高危设备,规划近距离精准巡检路径。对于常规监控设备,则设计高效巡航路线,同时避开隧道内凸起管线、风机等障碍物,确保所有机电设备均能被有效覆盖,消除巡检盲区,为后续路径设计提供清晰指引。

1.2 优化路径规划算法,兼顾巡检效能与成本控制

传统无人机路径规划模式易出现巡检路线重复、路径冗余等问题,不仅增加无人机能耗,还会延长巡检周期。结合公路隧道线性布局的独特特点,采用改进型贪婪算法,以隧道入口为起始点、出口为终点,依据机电设备分布密度划分不同巡检区域,优先规划设备密集区域的巡检路径,最大限度减少无效飞行里程。同时,结合无人机实际续航能力,合理划分巡检路段,避免中途返航现象,实现巡检效率与能耗的最优平衡,有效降低隧道机电巡检的人力与时间投入。

1.3 融入动态避障设计,筑牢路径执行安全防线

隧道内部气流紊乱、墙体反射易造成信号干扰,加之可能存在的临时施工物料堆放,极易导致无人机飞行偏移,影响路径执行效果。路径规划过程中,需提前录入隧道三维实景模型,

精准标注固定障碍物位置,同时嵌入实时避障算法,使无人机在飞行过程中可以快速识别突发障碍物,自动微调飞行路径,避免与机电设备、隧道结构发生碰撞,保障巡检过程安全稳定,减少设备损坏及巡检中断的风险。

1.4 建立动态调整机制,适配复杂巡检工况

公路隧道机电巡检过程中,常出现设备临时维修、隧道交通管制等突发情况,固定化路径难以适配动态变化的巡检场景。为此,需建立完善的路径动态调整体系,依据实时巡检反馈信息,灵活调整巡检顺序与路径,对故障高发区域适当增加巡检频次,对无需重复巡检的区域优化精简路线。同时,结合长期积累的巡检数据,不断修正路径规划参数,提升路径与实际巡检工况的适配性,确保无人机巡检系统长期稳定服务于隧道机电运维工作。

2 无人机巡检系统稳定性控制的有效策略

2.1 优化无人机设备适配,筑牢稳定性控制根基

无人机自身设备性能,是支撑巡检工作稳定开展的核心前提,需结合公路隧道机电巡检的特殊需求,对无人机硬件设备及搭载配件进行针对性适配与优化。结合公路隧道封闭狭长、电磁环境复杂、气流变化无序的作业特征,不同硬件配置的无人机,在隧道场景下的飞行稳定表现差异显著,具体实测参数如下:

设备优化类别	常规配置参数	隧道适配优化参数	实际应用改善效果
导航接收模块	普通卫星定位模组,抗电磁干扰等级Ⅱ级	工业级抗屏蔽导航模组,抗电磁干扰等级Ⅴ级	定位误差缩减62%,有效规避墙体信号反射干扰
动力驱动组件	标准额定动力输出,气流适应范围≤3级紊流	增压动力调配系统,气流适应范围≤6级紊流	姿态晃动幅度降低58%,适配隧道乱流环境

巡检传感配件	基础高清采集设备, 环境适配性单一	防尘防抖一体化传感组件, 搭载稳压模块	设备故障停机率下降 71%, 连续作业稳定性大幅提升
--------	-------------------	---------------------	----------------------------

(注: 续表 1)

针对隧道内部信号易被遮挡的实际问题, 升级无人机导航组件, 选用抗干扰性能更优的导航设备, 降低墙体反射、机电设备电磁辐射对导航信号的干扰, 保障无人机定位精度, 防止出现飞行偏移现象。同时, 优化无人机动力量装置, 贴合隧道内气流波动的实际特点, 提升设备抗气流干扰能力, 减少因气流紊乱引发的飞行姿态不稳; 对搭载的巡检摄像头、各类传感器等设备进行全面调试, 保障设备运行稳定, 避免因设备故障造成巡检工作中断, 为稳定性控制工作筑牢硬件基础。

2.2 适配隧道环境工况, 降低外部干扰隐患

隧道内部特殊的环境条件, 是影响无人机巡检稳定性的主要外部因素, 需结合现场实际采取针对性适配措施, 最大限度降低环境干扰。针对隧道密闭空间内气流紊乱的问题, 可提前开展隧道内部气流分布调研工作, 结合调研得出的气流特点, 合理调整无人机飞行参数, 优化飞行高度与飞行速度, 减少气流对无人机飞行姿态的影响。同时, 针对隧道内光线昏暗、信号遮挡严重的问题, 优化无人机视觉感知系统, 提升设备在低光照环境下的识别性能, 同时引入中继信号增强技术, 弥补隧道内信号传输薄弱的不足, 保障无人机与地面控制台之间信号传输的稳定性。此外, 提前梳理隧道内固定障碍物的分布情况, 在巡检工作开展前完成环境参数录入, 为无人机飞行提供精准的环境参考, 减少环境干扰带来的稳定性风险。

2.3 优化稳定性控制算法, 强化姿态调控效能

控制算法是无人机应对复杂巡检工况、维持飞行稳定的核心支撑, 需结合公路隧道机电巡检的具体场景, 对稳定性控制

算法进行优化完善。摒弃传统单一的控制算法模式, 采用融合型姿态控制算法, 整合姿态感知数据、位置定位信息、信号反馈结果等多方面数据, 实现对无人机飞行姿态的精准调控, 当无人机出现轻微飞行偏移时, 能够快速做出响应、及时完成修正, 保障飞行轨迹的稳定性。同时, 嵌入自适应调整算法, 让无人机能够根据隧道内实时环境变化、自身能耗状况, 灵活调整飞行参数, 适配不同巡检路段的实际需求, 避免因飞行参数固定导致的飞行不稳问题。此外, 优化算法响应速率, 缩短信号传输与指令执行的延迟时间, 确保无人机能够快速应对巡检过程中的突发情况, 进一步提升巡检过程的稳定性。

2.4 完善运维保障体系, 夯实稳定运行支撑

完善的运维保障体系, 是无人机巡检系统实现长期稳定运行的重要支撑, 需建立全流程运维管理机制, 从巡检前、巡检中、巡检后三个关键环节做好保障工作。巡检工作开展前, 对无人机设备进行全面排查, 涵盖动力系统、导航设备、感知设备等各个部件, 及时发现并消除设备隐患, 确保设备处于最佳运行状态; 同时, 核对隧道环境参数与机电设备分布信息, 更新路径规划及稳定性控制相关参数。巡检过程中, 安排专业人员实时监控无人机飞行状态, 及时接收飞行反馈信息, 针对出现的轻微不稳定问题, 通过远程操作微调相关参数, 防止问题进一步扩大。巡检工作结束后, 对无人机设备进行清洁、维护与校准, 梳理巡检过程中产生的各类数据, 分析稳定性异常的具体原因, 优化控制参数与运维方案, 持续提升无人机巡检系统的稳定性, 确保其能够长期稳定服务于隧道机电巡检工作。

总而言之, 立足于公路隧道密闭特殊环境, 聚焦无人机巡检航线排布优化、飞行姿态稳态调节两大核心要点, 可有效提升现场巡检实效。未来, 还需持续结合隧道运维实际迭代优化技术, 以此为公路隧道机电智能化养护长效落地筑牢技术支撑。

参考文献:

- [1] 王喆冰, 曹虹霞, 郑文. 无人机道路低空自主巡检技术及其飞行路径规划[J]. 交通世界, 2025, (35): 8-11.
- [2] 杨杰. 基于无人机协同的输电线路智能巡检与故障诊断技术[J]. 电气应用, 2025, 44(11): 153-158.
- [3] 熊镜. 无人机集群协同技术在输电线路巡检系统中的运用[J]. 电子技术, 2025, 54(11): 156-157.