

多旋翼无人机在复杂环境电力巡线中的运维优化研究

沈佳骥

(湖北工业大学工程技术学院, 湖北 武汉 430068)

摘要 复杂环境下的电力巡线是保障电网安全的关键,但随着电网规模的不断扩大,传统电力巡线模式逐渐暴露出效率低、风险高、精度不足等问题。基于此,本文结合多旋翼无人机技术特性与电力运维实践,系统分析了传统巡线模式的现存不足及多旋翼无人机在复杂环境电力巡线中的优势,并在此基础上提出了基于多旋翼无人机进行复杂环境电力巡线工作优化的建议,以期为促进复杂环境电力线路智能化运维提供参考。

关键词 多旋翼无人机; 复杂环境; 电力巡线; 运维优化; 应急抢修

中图分类号: TM76; V279

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.011

0 引言

电力线路作为电力能源输送的核心载体,其安全稳定运行直接影响着社会经济发展质量。我国现有电力线路中有 70% 以上的线路处于崇山峻岭及森林等复杂环境中,这无形中给巡线工作带来了严峻的挑战。传统人工巡检需跋山涉水、高空攀爬,不仅效率低下,而且也易发生高空坠落、触电等安全风险^[1]。随着无人机技术与人工智能的深度融合,多旋翼无人机凭借其机动灵活、载荷多样、适应性强等特点,成为破解复杂环境巡线难题的关键手段。鉴于此,本文基于多旋翼无人机针对复杂环境电力巡线工作的优化措施进行研究,对解决当前复杂环境电力巡线工作的不足具有重要的现实意义。

1 复杂环境电力巡线中现存的不足

1.1 人工巡检模式的固有缺陷

在复杂环境中,人工巡线模式面临着效率低、安全风险高、质量不稳定等问题。在山区等区域由于受地形限制,巡检人员时常需要徒步跋涉,日均巡检里程仅 3~5 公里,通常单条线路巡检周期长达 15 天。同时,人工巡线时经常需要进行高空作业等,这样人员的安全风险居高不下。另外,电力线路人工巡检时过于依赖巡检人员的经验,而巡检人员会受疲劳程度、专业能力等因素影响,时常会出现漏检或检修滞后等情况,进而导致因隐患无法及时处置而非计划停电事件频发^[2]。

1.2 传统技术手段存在局限

传统无人机与检测设备存在局限,比如固定翼无人机虽续航较长,但无法实现贴线精细巡检;单传感

器无人机仅能采集可见光图像,难以识别绝缘子内部劣化等隐蔽缺陷,此类缺陷若未及时发现,雨季易引发短路跳闸风险。同时,在数据处理方面,传统模式需人工进行影像筛选及分析,通常单公里线路数据处理耗时超 8 小时,且故障定位误差常达 50 米以上,进而影响电力线路检修效果。此外,由于不同厂商的检测设备存在接口不兼容、数据格式不同等问题,所以也会严重影响输电线巡检工作的效率及质量。

1.3 缺少应急协同响应机制

由于缺少应急协同响应机制,在电力应急处置时,巡检部门、调度部门、抢修部门常常会出现信息传输及沟通滞后的情况,导致复杂环境下的故障抢修常陷入“发现难、定位慢、抢修不及时”的局面。例如:2023 年某地输电铁塔因暴雨发生倒塌,由于缺少应急协同响应机制,巡检部门、调度部门、抢修部门之间未能进行实时沟通,导致抢修队伍耗时 3 天才完成故障点排查及抢修,造成区域停电超 72 小时。

1.4 标准化管理体系的不完善

目前,由于无人机巡检模式应用时间较短,电力企业仍未针对无人机巡检建立全流程操作规范及相关标准,导致无人机巡检质量差异比较大。行业调研显示,不同班组的无人机巡检缺陷识别率差距可达 40%,且部分巡检人员在操作无人机进行线路巡查时未按要求严格控制无人机与线路保持安全距离,从而导致无人机碰撞导线事故时有发生。在设备维护方面,由于缺乏统一的规程,导致无人机日常维护存在滞后、漏检等问题,从而会进一步影响电力巡线效果^[3]。

2 多旋翼无人机在复杂环境电力巡线中的优势

2.1 可提高故障识别精准性

多旋翼无人机通过多维感知硬件与智能算法的深度融合,可有效解决传统巡线中“看不清、判不准、漏检多”的问题,从而有效提高故障识别的精准性。具体来说,多旋翼无人机搭载激光雷达可每秒24万次的频率扫描线路通道,生成密度达200点/ m^2 的三维点云模型,高程精度达4厘米,即便在植被密集区,激光也能穿透枝叶缝隙,精准测算地面灌木与导线的垂直距离,精度可达毫米级。同时,多旋翼无人机搭配红外热成像仪后,能捕捉绝缘子污秽、金具发热等温度异常,测温精度误差控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内,远超传统设备 $\pm 5^\circ\text{C}$ 的误差水平。

2.2 可提高巡线效率

多旋翼无人机通过融合RTK、视觉SLAM技术,可适配各类复杂气象与地形条件,不仅能够抵抗7级风、在 -20°C 至 50°C 环境下稳定续航,而且也可深入山区、丛林等区域或人工无法抵达的区域进行巡航作业。同时,单架次无人机可覆盖5公里线路,日均巡线里程达60公里,较人工可提升12倍以上,从而提高巡线效率,并大幅缩短巡检周期^[4]。

2.3 可降低巡线的安全风险

通过远程操控多旋翼无人机不仅可实现电力线路的非接触式巡检,而且也能替代人工完成90%以上的高空、高危作业,避免巡检人员发生高空坠落、触电等风险。更重要的是,在山火、山洪等特殊危险场景中多旋翼无人机也可代替人工完成线路受损情况勘察,无需人员进入危险环境,从而从源头上有效规避风险,提高电力巡线的安全性。同时,相较于传统人工巡检需直面的多重隐患,多旋翼无人机还可以规避间接安全风险。例如:在林区,无人机可避开野生动物袭击、迷路等潜在危险;在树障巡检中,无需人员攀爬陡坡或穿越荆棘,仅通过空中扫描即可完成数据采集。这种“人员远程操控、设备前线作业”的模式,可实现“零伤亡、高效率”的电力运维目标。

3 基于多旋翼无人机的复杂环境电力巡线工作优化建议

3.1 日常运维优化

1. 构建分级分类作业体系。为提高复杂环境下电力巡线工作的效率,电力企业应根据电力巡线工作的不同阶段构建完善的分级分类作业体系。具体来说,电力企业应根据线路重要性、环境复杂度、缺陷风险度等指标对线路进行分级分类,如线路重要性可按负

荷等级划分为核心骨干线、重要联络线、一般配网线三级;环境复杂度可根据地形坡度($\geq 30^\circ$ 为高风险)、植被密度(≥ 0.8 株/ m^2 为密集区)、气象灾害频率(年均 ≥ 3 次为频发区)等量化指标划分为复杂区、较复杂区、一般区;缺陷风险度可结合辖区内电力线路历史故障数据生成热力图谱,将覆冰高发区、树障密集段等区域用红色标识出来,定为优先级图谱,并进行重点巡检。

同时,针对不同等级的电网线路,电力企业应实施差异化无人机巡检策略。例如:500 kV及以上的线路每月巡检1次,220~330 kV的线路每两月巡检1次,110 kV及以下线路每季度巡检1次;环境复杂的区域可动态化调整巡检周期,如山区峡谷区域可加密巡检至每半月1次、台风路径覆盖区在汛期前增加1次特巡等。并建立季度台账更新制度,以便及时了解电力线路的弧垂、与树木的安全距离、导线损伤等变化^[5]。

2. 完善数据处理与管理架构。采用多旋翼无人机进行电力线路巡检会产生大量数据,这些数据处理与管理质量直接影响着无人机巡检的结果精度。因此,为了提高数据处理及管理的质量,电力企业应边缘端部署轻量化AI引擎,并集成红外图像初筛算法,对绝缘子污秽、金具发热等12类典型缺陷实现精准识别,并压缩有效数据包,减少数据传输负荷,加快数据处理效率。同时,电力企业应对线路巡检建立档案库,并实施“一杆一档+一机一档”档案管理,保证数据真实性和可靠性的同时,提高数据管理质量。在此基础上,电力企业应采用量子密钥对数据进行加密,并设置访问权限,防止电力线路巡检中的地形地貌、线路布局等敏感数据发生泄露。

3. 优化无人机设备管理机制。为保证多旋翼无人机长久保持良好性能,电力企业应全方位提升多旋翼无人机运维效能。

首先,在硬件管理方面,电力企业可对多旋翼无人机设备的接口进行标准化改造,统一采用Type-C接口,实现供电与数据传输一体化,有效解决传统接口兼容性差、连接不稳定等问题。针对无人机电池,电力企业可构建“充电—存储—维护”全流程管理机制,并通过引入智能温控充电技术,在低温环境下自动启动加热模块保持电池活性,同时搭载过载保护防止无人机电池过充、过放,从而延长无人机电池使用寿命。同时,电力企业需要完善无人机设备校准机制,比如激光雷达每3个月在专用的三维标定场对距离测量、角度定位等核心指标进行一次校准;红外热像仪每月开展1次温度标定,确保测温误差控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。

其次,在软件层面,电力企业应在无人机系统中

集成 MAVLink、DroneKit、STAMP 等通信协议,有效解决不同厂商设备之间的兼容性难题,提升无人机系统的数据传输速率和抗干扰能力,并降低系统集成成本。同时,电力企业还可创新实施“三统一”管理模式,即统一修护标准、统一管理流程、统一质量管控,通过建立无人机设备健康档案,运用大数据分析预测无人机设备故障,降低无人机设备故障率的同时,提高设备使用效率。

3.2 应急抢修响应机制优化

3.2.1 建立分级响应体系与备用保障机制

首先,电力企业应针对应急抢修工作构建四级应急响应体系,并明确触发条件与处置标准。例如:I级响应(重大故障)适用于核心骨干线跳闸、自然灾害导致的多基铁塔倒塌等场景,触发后 15 分钟内调度 3 架以上无人机集群,采用“1 架全景勘测+2 架精细检测”模式,60 分钟内完成故障区域三维建模与原因分析;II级响应(线路跳闸)针对单条线路故障,30 分钟内通过激光雷达点云比对定位故障点,同步生成含物料清单、作业路径的抢修方案;III级响应(设备缺陷)用于绝缘子破损、金具松动等隐患,2 小时内完成缺陷尺寸测量与风险等级评估(一般/严重/危急);IV级响应(隐患预警)针对树障超标、导线轻微覆冰等情况,24 小时内跟踪监测变化趋势,生成预防性处置建议。

其次,电力企业应建立备用保障机制,以此来应对极端场景。例如:针对复杂环境中的通信中断问题,电力企业可采用“5G+北斗短报文”方式进行数据传输,即正常情况下可利用 5G 网络进行数据实时回传,信号中断时则自动切换至北斗系统进行数据传输,保证极端场景下,无人机设备依然可以稳定传输数据^[6]。

3.2.2 构建多主体协同机制

为提高应急抢修响应效率,电力企业应建立跨部门联动平台,整合运维、调度、抢修、物资等部门核心数据,开发“应急一张图”功能,实时显示故障位置、无人机位置、抢修队伍轨迹、物资库存等信息,支持一键下发巡检任务、共享检测数据,打通信息孤岛及沟通屏障,实现指令协同统一。同时,在联动平台中开发启动“自动推送+分级通知”功能,当线路发生故障时,平台可自动将故障信息分别发送运维、调度、抢修、物资等部门,实现多方同步响应,将应急响应时间从原来的 120 分钟缩短至 45 分钟。另外,电力企业还需建立每日晨会、每周会商、每月复盘的常态化沟通机制,解决部门间协同壁垒。

3.2.3 应急处置效果评估与优化机制

首先,电力企业应针对应急抢修工作构建“时效

性—准确性—经济性”三维评估指标体系,实现对应急抢修工作的量化评价。其中时效性指标包括故障定位时间(I级响应 ≤ 60 分钟、II级 ≤ 30 分钟)、抢修准备时间(≤ 45 分钟)、恢复供电时间(核心线路 ≤ 4 小时);准确性指标包括故障原因判定准确率($\geq 95\%$)、缺陷尺寸测量误差(≤ 5 mm)、抢修方案适配率($\geq 90\%$);经济性指标包含应急处置直接成本(设备损耗、人员薪酬)、停电损失减少量、资源利用率(无人机日均作业时长 ≥ 6 小时)。通过量化指标评估,可有效优化电力线路应急抢修工作,实现“三快”目标(人员快到、数据快传、照明快亮)。

其次,电力企业应建立“复盘—优化”改进机制。每次应急处置后 72 小时内开展专题复盘,并采用“数据回溯+人员访谈”方式,分析响应延迟、判断失误等问题根源。然后根据具体问题、具体原因采取针对性的优化措施,防止以后再出现类似的情况。

4 结束语

旋翼无人机在复杂环境电力巡线工作中的应用,不仅能够有效解决传统巡线模式的效率低下、安全风险高、应急滞后、受自然因素限制、技术手段局限等问题,而且可以凭借其立体化感知、高效低成本、安全可靠等优势,实现复杂环境全工况作业,提升巡线效率及安全性,并降低运维成本。因此,电力企业应从日常运维及应急抢修响应机制两方面入手,积极探索有效措施,不断完善和优化多旋翼无人机电力巡线模式,提高复杂环境下电力巡线工作的精度与环境适应性,为电力系统长久安全稳定运行提供坚实的保障。未来,随着智能机器人的不断发展及应用,电力企业可探索无人机与巡检机器人的协同运维模式,进一步提升复杂环境下的全域监测能力,进而推动我国电力事业实现更高质量的发展。

参考文献:

- [1] 王明.基于多旋翼无人机固定机巢自动巡检电力线路的控制技术研究[J].电工技术,2022(11):67-69.
- [2] 郭英萃.基于多目标优化的无人机电力巡检调度方法研究[D].天津:中国民航大学,2022.
- [3] 李和丰,王瑞,杨佳彬,等.基于无线充电站的无人机全自动电力巡线研究[J].电力勘测设计,2024(11):61-66.
- [4] 黄浩.基于 5G 无人机在电力线路自动巡线的实现与研究[J].中国宽带,2024,20(09):142-144.
- [5] 兰彬.电力巡检场景中的无人机自主避障控制研究[D].成都:电子科技大学,2025.
- [6] 智宏鑫.复杂环境下巡检无人机最优路径规划方法研究[D].北京:华北电力大学,2024.