

无人机巡检在输电线路运维中的应用优化与成本控制

沈燕东 丁木涵 王冰 安燕 郝东宝

内蒙古电力集团薛家湾供电公司

DOI:10.12238/etd.v6i8.17088

[摘要] 无人机巡检以高效、安全、灵活之姿,成为输电线路运维关键技术,弥补了传统人工巡检的不足。本文围绕其应用优化与成本控制展开,梳理发展现状与瓶颈。从技术、流程、安全保障三方面提出优化举措,如升级设备、重构流程、完善安全体系,以提升巡检质效。基于全生命周期,剖析成本构成,构建效益分析模型,明确核心成本影响因素。因此,从设备、人员、运营机制层面制定成本策略,为规模化应用提供经济方案,推动电力运维数字化转型。

[关键词] 无人机巡检; 输电线路运维; 应用优化

中图分类号: TM755 文献标识码: A

Application Optimization and Cost Control of UAV Inspection in Transmission Line Operation and Maintenance

Yandong Shen Muhan Ding Bing Wang Yan An Dongbao Hao

Inner Mongolia Power Group Xuejiawan Power Supply Company

[Abstract] UAV inspection has become a key technology in transmission line operation and maintenance, offering efficiency, safety, and flexibility, thereby addressing the limitations of traditional manual inspections. This paper focuses on its application optimization and cost control, reviewing current developments and bottlenecks. Optimization measures are proposed from technical, procedural, and safety perspectives, such as upgrading equipment, redesigning processes, and improving safety systems, to enhance inspection quality and efficiency. Based on a full lifecycle analysis, the cost structure is examined, an benefit analysis model is constructed, and core cost-influencing factors are identified. Consequently, cost strategies are formulated from the perspectives of equipment, personnel, and operational mechanisms, providing an economical solution for large-scale application and promoting the digital transformation of power operation and maintenance.

[Key words] UAV Inspection; Transmission Line Operation and Maintenance; Application Optimization

引言

我国输电线路里程不断增加,大量线路途经山地、高原、荒漠等复杂地形。传统人工巡检效率低、安全风险高、隐患识别不全面,山区日均作业里程不足8公里,无人机巡检效率是人工的5-8倍,还能降低高空作业事故率。如今,无人机技术与电力运维需求深度融合,推动巡检模式向“智能无人”转型。不过,当前无人机巡检存在技术适配、流程标准、成本管控等问题,开展相关优化与成本控制研究,对保障电网运行和电力行业高质量发展意义重大。

1 无人机巡检技术及在输电线路运维中的应用现状

1.1 无人机巡检技术概述

无人机巡检技术是融合无人机平台、传感器、通信传输、数据处理等多领域技术的综合性应用体系。无人机平台根据巡检需求分为多旋翼、固定翼及复合翼类型,多旋翼无人机具备垂直

起降能力,适合近距离精细化巡检;固定翼无人机续航可达2-4小时,适用于长距离线路巡航;复合翼无人机则兼具两者优势,能适应复杂巡检场景。搭载的传感器包括高清可见光相机、红外热像仪、激光雷达等,可见光相机可捕捉线路部件外观缺陷,红外热像仪能精准检测导线接头过热等隐患,激光雷达可快速构建线路三维模型实现空间距离测量。配套的飞控系统实现自主航线规划、自动避障等功能,数据传输系统通过4G/5G或专用通信链路实时回传巡检数据,后端处理软件则完成图像识别、缺陷分类等智能分析任务,形成完整的巡检技术链条。

1.2 无人机巡检在输电线路运维中的应用现状

目前无人机巡检已在输电线路运维中实现常态化应用,覆盖缺陷排查、通道清理、应急抢险等核心场景。在缺陷排查方面,全国多数省级电力公司已组建专业无人机巡检队伍,实现110kV及以上输电线路的周期性巡检,对绝缘子破损、金具锈蚀

等常见缺陷识别率达到85%以上。在通道清理工作中,无人机通过搭载的高清相机和激光雷达,快速识别线路通道内的树障、违章建筑等安全隐患,定位精度可达1米以内,为通道清理提供精准依据。应急抢险场景下,无人机能第一时间抵达地震、洪水等灾害现场,快速勘察线路受损情况,比传统人工勘察缩短60%以上的时间^[1]。但应用中仍存在区域发展不均衡,偏远地区应用覆盖率低;小型缺陷识别准确率不足;不同厂家设备数据格式不统一等问题,影响整体应用效果。

2 无人机巡检在输电线路运维中的应用优化措施

2.1 技术优化

技术优化对于提升无人机巡检在输电线路运维中的效能至关重要,需从硬件升级与软件迭代两个关键维度同步发力。在硬件层面,考虑到输电线路常穿越复杂地形,研发长续航复合翼无人机成为必然选择。这种无人机结合了固定翼和旋翼机的优势,既能长距离飞行,又可灵活起降。搭载高倍率光学变焦相机和高分辨率红外热像仪后,能显著增强远距离缺陷识别能力。以往,绝缘子内部缺陷识别距离有限,仅能达到50米,如今可提升至100米,大大扩展了巡检范围。同时,引入AI芯片集成的嵌入式系统,可在无人机飞行过程中实现巡检数据的边缘计算,完成初步缺陷识别,减少大量数据回传,提高数据处理效率。软件方面,构建统一的智能分析平台是核心。基于深度学习算法优化缺陷识别模型,通过海量缺陷样本的训练,让模型不断学习和进化,将金具细微裂纹、导线断股等小型缺陷识别准确率提升至92%以上。开发多源数据融合模块,整合无人机巡检数据与线路台账、气象数据,能更全面地了解线路运行状况,实现缺陷发展趋势的精准预判。另外,统一不同厂家设备的数据接口标准,可打破数据壁垒,实现巡检数据的互联互通与共享应用。

2.2 巡检流程优化

巡检流程优化是提升输电线路运维质量与效率的关键环节,需构建“规划-执行-分析-反馈”的闭环管理体系。在巡检规划阶段,基于线路台账和历史缺陷数据,开发智能航线规划系统十分必要。该系统能根据线路地形、设备类型自动生成最优巡检航线,明确重点巡检区域和拍摄角度,避免无效飞行,节省时间和资源。执行阶段推行“无人机巡检+人工复核”的协同模式,无人机凭借其高效、全面的特点完成初步排查,将疑似缺陷位置和图像信息实时推送至地面人员。地面人员携带便携设备进行精准复核,能有效提升缺陷判定准确性,减少误判和漏判。分析阶段建立缺陷分级处理机制,根据缺陷严重程度自动分配至对应责任部门,并设定处理时限,跟踪处理进度,确保缺陷得到及时处理^[2]。反馈阶段定期汇总巡检数据,深入分析缺陷分布规律和高发原因,为线路技改、运维策略调整提供有力的数据支撑,实现巡检流程的持续优化和迭代升级。

2.3 安全保障优化

安全保障优化需构建全方位的风险防控体系。在飞行安全方面,升级无人机避障系统,融合视觉避障、毫米波雷达等多传感器数据,实现对鸟类、风筝等动态障碍物的精准识别和实时规

避,避障响应时间控制在0.1秒以内。建立飞行空域申报平台,与空管部门实现数据对接,自动完成巡检空域的申请和审批,避免违规飞行。在数据安全方面,采用数据加密传输技术,对巡检图像、缺陷数据等敏感信息进行端到端加密,防止数据泄露。建立数据访问权限管理机制,根据岗位职责分配不同的数据查看和操作权限,确保数据安全使用。同时,制定无人机巡检应急处置预案,针对设备故障、通信中断等突发情况,明确处置流程和责任分工,定期开展应急演练,提升安全风险应对能力。

3 无人机巡检在输电线路运维中的成本分析

3.1 成本构成

无人机巡检成本呈现全生命周期特征,主要由固定成本和变动成本两部分构成。固定成本包括设备采购成本、场地建设成本和人员固定薪酬,设备采购成本占比最高,一套搭载专业传感器的中高端巡检无人机系统价格在15-30万元之间,包含无人机机身、传感器、飞控系统及地面站等设备;场地建设成本包括无人机起降场、充电棚及数据处理中心的建设和租赁费用;人员固定薪酬则涵盖无人机操作员、数据分析师等专业人员的基本工资。变动成本包括设备维护成本、耗材成本、人员绩效及通信费用,设备维护成本主要为无人机电池更换、传感器校准等费用,耗材成本包括电池、存储卡等易损件消耗,人员绩效与巡检任务完成质量挂钩,通信费用则为数据传输产生的网络资费。

3.2 成本效益分析

从长期运营视角来看,无人机巡检具备显著的成本效益优势,通过与传统人工巡检的对比可清晰体现。以100公里输电线路年度巡检为例,人工巡检需配置8人团队,包含巡检人员、安全监护人员等,年度总成本约80万元,且缺陷漏检率较高,后续故障处理成本平均每年增加20万元。采用无人机巡检模式,配置2名操作员和1名数据分析师,一套无人机系统即可满足需求,年度总成本约45万元,其中设备折旧10万元、人员薪酬20万元、维护及其他费用15万元。同时,无人机巡检缺陷识别率提升,年度故障处理成本可降低至8万元。经计算,采用无人机巡检后,该线路年度运维总成本可降低47%,投资回收期约为2.5年,长期应用能大幅降低电力企业的运维支出^[3]。

3.3 成本影响因素分析

无人机巡检成本受多重因素影响,呈现明显的动态变化特征。设备因素是核心影响因子,不同性能的无人机系统采购成本差异显著,高端设备虽能提升巡检效率,但初始投资大,且维护成本较高;电池寿命直接影响变动成本,当前主流锂电池使用寿命约500次充放电,更换频率与巡检强度正相关。人员因素方面,专业人才的稀缺导致薪酬成本上升,具备无人机操作资格和电力专业知识的复合型人才薪资水平比普通运维人员高出30%以上,人员操作熟练度也会影响设备损耗率,新手操作导致的设备故障概率比熟练操作员高2倍。任务因素上,巡检线路的地形复杂度直接影响作业效率,山区线路巡检耗时比平原线路增加50%,导致人工和设备使用成本上升;巡检频率与变动成本呈正比,增加巡检频次会提高电池消耗和设备维护费用。

4 无人机巡检成本控制策略

4.1 设备采购与维护策略

在设备采购环节,应严格推行“按需配置”原则。不同线路类型和巡检需求对无人机系统的要求各异,需精准匹配。例如,平原地区长距离线路,固定翼无人机凭借其长航时、大范围覆盖的优势,成为优先选择,能高效完成大面积巡检任务;而城市及山区复杂地形线路,复合翼无人机灵活起降、垂直起降与水平飞行结合的特点,更适应复杂环境。同时,采用“集中采购+租赁”结合模式。对于核心巡检区域,配置自有设备,保障巡检的稳定性和及时性;偏远地区短期巡检任务,通过租赁方式解决,避免大量资金占用,降低初始投资。设备维护方面,建立全生命周期管理体系至关重要。制定标准化维护流程,定期对无人机电池、传感器等关键部件进行检测和校准,及时发现潜在问题并处理,延长设备使用寿命。推行电池梯次利用模式,将巡检无人机退役的电池用于低功耗设备供电,实现资源再利用,降低耗材成本。此外,与设备厂家签订长期维护协议,借助厂家批量维护优势,降低单次服务费用,提高维护效率和性价比。

4.2 人员培训与管理策略

人员管理需巧妙融合培训与激励机制,实现人力成本的精准把控。建立内部培训体系,从具备一定电力知识的运维人员中选拔人才,开展无人机操作、数据处理等专业培训,使其快速掌握相关技能。与职业院校合作开设定向培养课程,自主培养专业人才,不仅能降低外部招聘成本,内部培养成本比外部招聘低40%以上,还能确保人员对企业文化和工作流程的熟悉度。推行“一人多能”培养模式,让操作员同时具备数据初步分析能力,减少岗位配置数量,提高人力资源利用效率^[4]。在薪酬管理方面,实施绩效与工作质量挂钩的考核机制,将缺陷识别准确率、巡检任务完成率等指标纳入考核体系,激励员工积极工作,避免无效人力成本支出。建立人才激励机制,对考取高级操作证书、提出技术优化建议的人员给予奖励,如奖金、晋升机会等,提升人员积极性和稳定性,营造良好的工作氛围,吸引和留住优秀人才。

4.3 运营管理策略

运营管理策略的核心在于提升巡检效率,降低单位作业成本。优化巡检任务规划是关键一步,基于线路缺陷历史数据和运行状态,实施差异化巡检。对缺陷高发区段增加巡检频次,及时发现并处理潜在问题,保障线路安全;对运行稳定区段减少巡检次数,避免资源浪费,提高资源利用效率。推行“区域集中巡检”模式,将地理相近的输电线路整合为巡检片区,建设集中起降场。这样能减少无人机转场时间,提升单日作业里程,使无人机在有限时间内完成更多巡检任务。在数据管理方面,搭建云端共享平台,实现多区域巡检数据的集中处理和分析。通过该平台,各部门可共享数据资源,提高数据处理效率,减少重复建设数据中心的成本。与通信运营商签订批量通信协议,降低数据传输的网络资费,节约通信成本。同时,建立成本核算机制,定期分析各环节成本支出,及时发现成本异常点并采取管控措施,确保运营成本在合理范围内,实现经济效益最大化。

5 结束语

无人机巡检应用于输电线路运维,是电力行业数字化转型的重要体现,其应用优化与成本控制对技术规模化落地至关重要。本文分析其技术及应用现状后,从技术、流程、安全三方面提出优化措施,解决效率与安全问题。通过全生命周期成本分析,明确设备、人员、任务等核心成本影响因素,制定设备管理、人员管控等成本控制策略,助电力企业降运维支出。未来要推动其与人工智能、5G等融合,完善成本管控,实现技术效益协同提升,保障智能电网建设。

[参考文献]

- [1]张瑞良,杨飞飞,柴渊恒.无人机巡检技术在输电线路巡检中的探索应用[J].中国电力企业管理,2024,(30):88-89.
- [2]孔繁泉.无人机自主巡检技术在输电线路中的应用[J].集成电路应用,2024,41(10):114-115.
- [3]严程峰,叶俏莹.架空输电线路无人机运维巡检技术研究[J].光源与照明,2024(1):174-176.
- [4]陈国辉,高康.超高压输电线路运维中的无人机巡检技术与数据分析[J].电力设备管理,2025(7):29-31.