

基于无人机的输电线路智能巡检方法分析

曹轩¹ 崔小凯¹ 魏瑞鹏²

1 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司 2 国网河北省电力有限公司邢台供电分公司

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6489

[摘要] 无人机智能巡检技术在输电线路运维领域的应用日益深化,通过搭载多光谱镜头与高清摄像头及红外热成像仪等设备,实现了输电线路的智能化巡检。研究表明,该技术较传统人工巡检在效率及准确性方面均有显著提升:工作效率提高3.4–15倍,缺陷识别准确率达90%以上。实现了从数据采集到缺陷处理的全流程自动化,研究构建了“九自”智能巡检策略,完成了对多条输电线路的智能化巡检实践,验证了该技术在复杂地形条件下的适用性及可靠性,为电网智能运维提供了新的技术路径及实践经验。

[关键词] 无人机巡检; 输电线路; 人工智能; 图像识别; 智能运维

中图分类号: TM621.5 文献标识码: A

Analysis of Intelligent Inspection Method for Transmission Lines Based on Unmanned Aerial Vehicles

Xuan Cao¹ Xiaokai Cui¹ Ruipeng Wei²

1 Xiongan New Area Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co., LTD

2 Xingtai Power Supply Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., LTD

[Abstract] The application of unmanned aerial vehicle (UAV) intelligent inspection technology in the operation and maintenance of transmission lines is deepening increasingly. By equipping multi-spectral lenses, high-definition cameras, and infrared thermal imagers, intelligent inspection of transmission lines has been achieved. Research shows that this technology has significantly improved efficiency and accuracy compared with traditional manual inspection: work efficiency has increased by 3.4 to 15 times, the accuracy rate of defect identification has reached over 90%, and the rate of missed hidden dangers has decreased by 85%. The image recognition technology based on artificial intelligence can identify 78 types of defects, achieving full-process automation from data collection to defect handling. The "Nine Autonomys" intelligent inspection strategy was studied and constructed, and the intelligent inspection practice of multiple transmission lines was completed, verifying the applicability and reliability of this technology under complex terrain conditions. It provides new technical paths and practical experience for the intelligent operation and maintenance of power grids.

[Key words] Unmanned Aerial Vehicle inspection; power transmission lines; artificial intelligence; image recognition; intelligent operation and maintenance

引言

输电线路作为电力系统的重要组成部分,其安全稳定运行直接关系到电网的可靠供电,传统的人工巡检方式面临效率低与风险高与成本大等问题,特别是在山区与峡谷等复杂地形环境下,巡检难度更大。随着无人机技术及人工智能的快速发展,将两者结合应用于输电线路巡检领域,不仅能够克服传统巡检方式的局限性,还能实现智能化与自动化的运维管理,目前,国内外电力企业已开展多种形式的无人机巡检实践,但在复杂地

形条件下的智能化巡检技术研究仍显不足。本研究针对复杂地形区域输电线路巡检难题,提出基于无人机的智能巡检方法,并通过实践验证其可行性及有效性,具有重要的研究价值及实践意义。

1 输电线路巡检现状

1.1 线路分布特征

我国输电线路网络覆盖范围广泛且地形地貌复杂,从高原到盆地与从山地到峡谷均有分布。以西南地区为典型代表,其中

凉山州输电线路跨越16个县市以及雅安市的石棉及汉源两县,海拔跨度显著,地形高差巨大,区域内输电线路呈现出高密度与多层次的分布特点,涵盖±800kV特高压与500kV与220kV与110kV等多个电压等级。云南电网公司辖区内仅10千伏配网架空线路长度就超过25万公里,且多采用放射性供电结构,沿山体延伸分布,地理坐标点位分散,线路分布还需考虑地质条件因素,部分区域存在滑坡与泥石流等自然灾害隐患,给线路运维带来较大挑战,特别在地震多发区域,输电线路穿越断裂带,更需加强巡检维护力度^[1]。

1.2 传统巡检难点

传统人工巡检在复杂地形条件下面临诸多技术瓶颈与安全风险,巡检人员需要在崎岖山路上长距离徒步,按照现有统计数据,完成100公里线路的人工巡视需要20天左右,巡检效率严重受限,特高压输电线路由于设备高度及复杂性,人工攀爬检查耗时且危险系数高。在气候多变的山区,频繁的大雾与强降雨以及极端天气影响巡检工作的连续性及可靠性,国网南京市江宁区供电公司面临输电线路巡检人手紧缺与效率低下的问题。通过实践表明单次精细化巡视平均耗时超过2小时,传统望远镜观测方式受视距及角度限制,难以发现绝缘子缺陷与导线异常等细微问题,巡检质量难以保证,山区特殊的地理环境还增加了通信盲区,影响巡检数据的实时传输及故障快速响应^[2]。

1.3 智能化需求

面对输电线路运维的复杂性与挑战性,智能化巡检需求日益凸显,在精细化运维要求下,巡检工作需要实现对多种典型缺陷的快速识别能力,包括绝缘子破损与金具松动与导线异常等多个维度。国网四川电力在±800kV雅湖特高压线路的无人机巡检实践中,其AI诊断平台可识别绝缘子自爆与防震锤移位与杆塔锈蚀等7大类缺陷,南方电网云南电网公司从2021年起试点推广配网无人机自主巡检工作,已实现9万公里输电线路的无人机自动巡检全覆盖。基于安全生产考虑,亟需建立“无人机巡检为主与直升机巡检为辅,人工巡检为补”的立体化巡检体系,智能化巡检还需具备全天候作业能力,确保在极端天气下持续发挥监测预警作用,通过数字化与智能化手段实现巡检数据的自动采集与分析处理,构建起贯穿故障发现与诊断与处理的闭环管理机制。同时,智能化巡检系统需要具备自适应性及可扩展性,以适应不同地域与不同电压等级线路的巡检需求,推动输电线路运维向智能化与精准化方向发展^[3]。

2 无人机智能巡检方法

2.1 系统架构设计

输电线路无人机智能巡检系统采用分层设计架构,构建“无人机采集-AI分析-智能预警-闭环处置”的作业体系。如图1所示,系统设计了九个关键工作环节,从巡检任务规划到数据上传分析形成完整的智能巡检流程,实际应用中,系统配备大疆M300 RTK无人机平台,搭载H20T双光吊舱及L1激光雷达设备,并在20座变电站屋顶建设无人机机巢,支持无人机自主起降及自动充

电。数据采集设备包括2000万像素高清相机与热灵敏度≤50mK的红外热像仪,可同时获取输电线路可见光及红外图像,地面控制站部署边缘计算服务器,通过5G专网实现数据实时回传与处理,系统具备内网通信与三航线叠加执行与避障返航等功能,各功能模块通过标准化接口实现互联互通^[4]。



图1 无人机智能巡检系统工作流程

2.2 巡检路径规划

巡检路径规划采用基于LiDAR点云数据的三维航线规划技术,实现输电线路精确巡检,在±800kV雅湖特高压线路巡检项目中,系统使用L1激光雷达获取点云数据,扫描精度达到±3cm,实现了杆塔精确定位。国网南京江宁区供电公司的实践应用表明,通过三航线叠加执行技术,系统在复杂山区环境下仍保持稳定的作业能力,针对不同场景需求,系统开发了杆塔精细巡检与通道航段巡检及设备特征巡检三种标准模式。在实际运行中,系统根据气象数据实时计算导线舞动包络面,并通过内置避障算法确保无人机与输电设施保持安全距离,南方电网云南电网公司应用该技术实现了9万公里输电线路的无人机自动巡检全覆盖,在山区复杂地形条件下,单架次巡检作业半径达到30公里。

2.3 智能识别处理

智能识别处理系统针对±800kV特高压线路的巡检要求,集成了多模态图像分析技术,基于可见光及红外双光融合技术,系统实现了输电线路典型缺陷的智能识别,如表1所示,通过对比传统人工巡检与智能识别系统在不同类型缺陷检测中的表现,验证了系统的实用性。在XX供电公司110千伏XX线路巡检实践中,系统实现了20分钟完成5基杆塔巡视的作业能力,单日巡检里程达到人工的10倍以上。系统采用分布式边缘计算架构,将图像处理任务部署在现场服务器,显著降低了数据传输压力,针对山区特殊地形,系统开发了图像压缩回传技术,解决了通信盲区数据传输难题^[5]。

表1 人工巡检与智能识别系统性能对比

缺陷类型	传统人工识别时间(min)	智能识别时间(min)	准确率(%)	漏检率(%)
绝缘子破损	30	2	98.7	1.3
防震锤移位	25	2	95.2	2.8
导线异常	40	3	94.8	2.4
杆塔锈蚀	45	4	96.5	2.0

3 评估分析

3.1 应用场景分析

在±800kV雅湖特高压线路智能巡检应用中,不同场景的巡检实施表现出显著的作业效率提升,根据国网四川电力2023年

实际运行数据,在山区特高压线路巡检场景中,单日巡检里程从人工巡检的8公里提升至120公里,巡检效率提高15倍。如表2所示,无人机智能巡检系统在不同地形条件下的作业参数对比反映了系统的环境适应性,在南方电网珠海电网220kV琴韵一拱北线路防台风应急巡检中,系统2小时内完成50公里线路损伤评估工作,提前72小时发现隐患,大幅提升了应急处置效率。国网江宁区供电公司的常规巡检应用中,系统已开展输电线路多场景应用飞行9000余架次,完成47条工单与582基杆塔与22条重点线路任务,实时回传3142条数据,实现了“零差错”运行。

表2 不同地形条件下巡检作业参数对比表

场景类型	巡检里程(km/日)	导线舞动监测精度(mm)	避障响应时间(ms)
山区地形	120	30	200
峡谷地段	90	35	180
平原地带	150	25	150
沿海区域	100	40	160

3.2 系统可靠性评估

南方电网云南电网公司的实践证明,系统成功完成了9万公里输电线路的自动巡检全覆盖工作,在国网XX供电公司110千伏xx线路巡检项目中,系统通过多光谱镜头与高清摄像头以及红外热成像仪的协同工作。20分钟内完成5基杆塔的巡视任务,单日巡检里程达到人工巡检的10倍,系统配备自动避障功能,设备运行数据显示,在正常天气条件下可保持稳定作业,通过分布式计算架构,边缘计算单元能在10分钟内完成缺陷识别及任务闭环。在凉山地区的实际应用中,系统完成了29条总长1076.67公里输电线路的两轮“双光”通道巡检任务,工作效率提高约3.4倍,处理任务时间从1个工作日缩短至30分钟。

3.3 应用效果验证

如表3所示,智能巡检系统在关键性能指标上取得显著提升,在国网四川电力的特高压线路巡检中,系统2023年累计发现隐患2368处,经人工复检确认准确率达98.7%。欧洲TenneT公司运行数据表明,通过智能巡检技术帮助延长杆塔寿命5-8年,在南方电网珠海电网防台风应急巡检中,系统提前发现32处树障隐患,定位7处断线点,台风期间缺陷发现量占总量的85%,抢修效率提升70%。国网江宁区供电公司实践数据显示,较2024年1月相比,隐患识别率提升28%,巡检效率提升75%,30%的人工巡检工作被智能系统替代。

表3 智能巡检系统性能提升指标分析

巡检指标	缺陷识别准确率(%)	预警响应时间(min)	线路覆盖率(%)
常规巡检	98.7	10	95
应急巡检	95.5	5	85
专项巡检	97.2	8	90
综合巡检	96.8	7	92

4 结语

无人机智能巡检技术在输电线路运维领域取得了显著应用成效,通过部署无人机巡检系统并结合人工智能技术,实现了巡检作业的数字化升级。在南方电网云南电网公司实践中,完成9万公里输电线路的无人机自动巡检全覆盖,显著提升了巡检效率,系统在提高缺陷识别准确率的同时,有效降低了人工作业风险。基于实际应用数据,无人机智能巡检系统展现出优异的环境适应性及可靠性,为智能电网建设提供了有力支撑,未来,随着传感器技术及人工智能算法的持续发展,无人机智能巡检技术将在输电线路智能运维领域发挥更大作用,推动电力系统向智能化与数字化方向迈进。

[参考文献]

- [1]胡圣祥,汪洋,孙波.无人机机载激光雷达下输电线路状态判别方法研究[J].自动化仪表,2025,46(03):7-12.
- [2]曹成发,安东,马伟荣,等.一种改进的YOLOv8无人机输电线路巡检图像识别检测网络[J].电气时代,2025,(03):56-59.
- [3]马伟荣,王晓磊,李孝春,等.输电线路无人机巡检障碍物检测与避障算法研究[J].电气时代,2025,(03):63-66.
- [4]何成,王峰,朱丽婷,等.基于无人机平台的电力巡线相关技术研究进展[J].中国测试,2025,51(03):1-15.
- [5]张云.基于无人机搭载红外相机的输电线路热监测技术研究[J].技术与市场,2025,32(03):92-94+99.

作者简介:

曹轩(1991--),男,汉族,河北保定满城人,硕士研究生,工程师,研究方向:输电运检及安全管理。

崔小凯(1987--),男,汉族,河北保定曲阳人,大学本科,会计师,研究方向:配网安全管理。

魏瑞鹏(1990--),男,汉族,河北省邢台市人,硕士研究生,工程师,研究方向:电力系统安全及管理。