

基于无人机的配电网巡检技术优化

卫志强 次 珍 郭 倩 德吉卓嘎 吴钰帆

国网西藏电力有限公司经济技术研究院 西藏 拉萨 850000

摘要：本文探讨了无人机在配电网巡检中的应用现状及技术优化，特别是在高海拔地区的绝缘喷涂技术应用。通过优化无人机的抗风性能、红外成像精度、航线规划及缺陷识别能力，显著提升了巡检效率与数据质量。同时，针对高海拔环境对绝缘喷涂作业的影响，提出了改进措施，并验证了优化技术对运维效率和成本的影响。未来，无人机巡检技术将结合更多智能技术，构建更智能化的配电网运维体系。

关键词：无人机；配电网巡检；技术优化；高海拔地区

引言：随着配电网规模的扩大与复杂度的提升，传统人工巡检方式已难以满足高效、精准的运维需求。无人机巡检技术的引入为配电网运维带来了新的解决方案。本文旨在探讨无人机在配电网巡检中的应用现状，并针对存在的问题提出技术优化方案，以期提升配电网运维效率和质量提供参考。

1 无人机在配电网巡检中的应用现状及技术优化

无人机在配电网巡检中的应用日益广泛，多地电力企业已开展相关试点。部分地区无人机已成为日常巡检的重要方式，替代了部分人工巡检。如国网冀北电力通过推广无人机自适应智能巡检技术，研发出“无人机+AI”智慧管控平台，实现了巡检智能化飞跃。该平台已巡检1833条线路，覆盖5.58万公里，巡检率75.4%，归档图片610万张，航迹文件63万条，效率提升70%，治理缺陷5万余处，显著提升了配网供电可靠性。

1.1 抗风性能优化

对无人机抗风性能的优化首先可以通过增加机翼展弦比或采用后掠翼设计降低风阻，同时加装翼梢小翼减少涡流干扰，并采用变转速控制策略以动态适应风速变化，使桨叶兼顾升力效率与抗湍流能力以优化无人机气动外形。其次可以在飞行系统中引入基于模糊PID的控制模型这样的自适应抗扰算法，实时感知风速、姿态偏差并通过高频微调电机输出实现动态稳姿，结合IMS与GPS数据融合提升定位精度，并集成气象数据，避开强风时段巡检，同时预设抗风飞行模式，降低巡航高度以减少乱流影响。此外还可以通过加装导流罩保护传感器以确保摄像头与激光雷达在风力扰动下仍能稳定采集数据。最后，基于深度学习训练风场预测模型，使无人机提前调整飞行参数，形成闭环抗风策略，从而在复杂气象条件下保障巡检安全性与数据有效性^[1]。

1.2 红外成像精度优化

提升无人机在配电网巡检中的红外成像精度需要综合考虑传感器性能、飞行稳定性、环境适应性和数据处理技术。选用高性能红外热成像仪，搭配高精度适当焦距的镜头以适应不同距离的检测要求并定期进行黑体校准以避免温差。在飞行控制方面应当保持稳定飞行高度和较低速度，以减少运动模糊对成像的影响，可以搭配高精度三轴增稳云台，结合实时姿态补偿算法降低机身抖动，确保图像清晰度。因为环境对红外成像影响显著，应尽量选择无强风、低湿度和无阳光直射的时段作业，必要时使用遮光罩或偏振滤光片减少太阳反射干扰。通过结合可见光与红外图像融合技术，可更精准定位故障点，辅以深度学习模型自动识别异常温升模式，提高缺陷检测效率。最后，建立设备温度历史数据库，通过纵向对比排除环境温度波动带来的误判，从而保证在复杂工况下红外检测的准确性和可靠性。

1.3 航线规划优化

在无人机在配电网巡检中的航线规划优化过程中需要兼顾效率、安全性和数据质量。首先应基于电网GIS数据构建三维航线模型，精确匹配杆塔坐标和导线走向，采用自适应航点间距算法，在直线段适当拉大间距提升效率，在转角、绝缘子等关键部位加密航点确保全覆盖。飞行高度需动态调整，通常保持距设备20至30米水平距离，遇交叉跨越或复杂地形时自动升高避障。针对不同设备类型设置差异化巡检模式，如对变压器采用环绕飞行获取多角度数据，对架空线路采用蛇形往复航线确保双侧检测。并引入实时气象补偿机制，在强风区域自动缩短航段长度并降低速度，结合地形高程数据规避紊流区。采用智能回溯算法，当发现异常数据时可自动生成补充航点进行复检。最后与调度系统联动，实现多机协同作业时的空域动态分配，避免航线冲突，最大化利用作业窗口期。

1.4 缺陷识别优化

优化无人机在配电网巡检中的缺陷识别效果,需要构建“数据-算法-验证”的闭环智能检测体系。在数据采集阶段,应采用多传感器协同工作模式,通过高分辨率可见光摄像头捕捉设备表面细节,红外热像仪识别温度异常,激光雷达获取三维结构信息,从而形成多维度的缺陷特征数据库。针对不同设备类型建立差异化的检测模型,如对绝缘子串采用基于深度学习的裂纹识别算法,对导线接头使用热斑追踪技术,对杆塔锈蚀应用金属氧化特征分析。并在算法优化方面,引入迁移学习技术,利用预训练模型提升小样本学习能力,同时开发轻量化网络架构确保在机载计算单元上的实时性。在复杂环境干扰下,采用频域增强和空间注意力机制,有效分离目标设备与背景干扰^[2]。建立动态验证机制,将现场人工复核结果与系统识别结论进行比对分析,通过主动学习策略持续优化模型性能。开发缺陷演变预测功能,结合历史检测数据构建设备状态退化曲线,实现从被动检测到主动预警的转变。最终形成“智能采集-自动识别-专家复核-模型迭代”的完整优化闭环,使典型缺陷的识别准确率达到95%以上,误报率控制在5%以内。

2 无人机配电设备绝缘喷涂技术在高海拔地区的应用研究

2.1 绝缘喷涂技术在高海拔地区的适用性

无人机配电设备绝缘喷涂技术是利用无人机将绝缘涂料均匀地喷涂在配电网设备表面,形成一层具有良好绝缘性能的涂层,从而提升设备的绝缘水平。相较于传统的绝缘防护手段,无人机绝缘喷涂技术具有明显的优势。首先无人机作业效率高,可以快速抵达目标设备,不需要搭建复杂的脚手架或采用高空作业车等设备,不仅大大缩短施工时间,而且喷涂覆盖范围广且均匀,因为无人机可以灵活调整飞行姿态和高度,所以可以实现对杆塔、绝缘子、横担等各类配电设备的全方位喷涂,避免出现喷涂死角,保证绝缘涂层的完整性和一致性。但由于高海拔地区的低气压、低温和紫外线等环境因素的影响,对无人机绝缘喷涂作业产生了很多不利影响。低气压会影响涂料的雾化效果,由于空气密度降低,涂料喷出后雾化颗粒的扩散速度和均匀性受到影响,可能导致涂层厚度不均匀。在低温环境下,涂料的固化速度会变慢,甚至可能出现无法固化的情况,导致涂层的成型质量降低,绝缘性能减弱。同时强紫外线辐射会加速涂料的老化过程,缩短涂料的使用寿命。此外,高海拔地区的大风天气频繁,可能会使雾化后的涂料颗粒被吹散,从而降低涂料的附着效率,增加喷涂作业的难度和

材料损耗。因而为了增加无人机在高海拔地区的适应性,需要对其进行针对性改进。在动力系统方面,采用高原专用发动机或增加发动机功率,来弥补因空气稀薄导致的动力不足;优化飞行控制系统,增加气压、温度等环境参数的实时监测功能,并根据高海拔地区的大气特性调整飞行控制算法,提高无人机在复杂气象条件下的飞行稳定性和控制精度。在喷涂设备方面,改进涂料储存和输送系统,并采用保温措施防止涂料在低温环境下凝固,同时优化喷涂枪的结构和参数,提高涂料在低压环境下的雾化效果和喷涂均匀性。

2.2 绝缘喷涂材料在高海拔环境下的附着性与绝缘效果验证

2.2.1 附着性验证

高海拔地区绝缘喷涂材料附着性验证需综合实验室模拟与现场测试。在低压、强紫外环境下,环氧树脂附着着力较常压下降8-12%,聚氨酯涂层在40℃温差下易产生界面微裂纹。通过划格法和拉拔测试发现,海拔每升高1000米需引入1.5%的强度补偿系数。现场实测显示硅橡胶表面氧化层增厚3-5 μm ,阳面附着力比阴面低15-20%。建议3000米以上区域采用纳米改性底涂,确保附着力 $\geq 3.5\text{MPa}$ 且离散率 $< 15\%$,并通过振动-冻融耦合试验验证长期可靠性。验证周期应覆盖干湿季交替,重点关注涂层在导线舞动工况下的疲劳特性^[3]。

2.2.2 绝缘效果验证

高海拔地区绝缘喷涂材料绝缘效果验证需重点关注低气压、强辐射及温差变化对介电性能的影响。实验室测试表明,在模拟海拔5000米环境下,硅橡胶涂层的沿面闪络电压较平原地区下降18到22%,其表面电阻率受紫外线累积照射呈指数衰减。现场实测数据显示,昼夜温差导致的涂层热胀冷缩会使局部电场畸变,在3000米海拔区域测得绝缘电阻波动幅度达30%。通过紫外老化试验发现,持续照射500小时后复合绝缘材料的憎水性丧失速率加快2.3倍。验证时应采用阶梯升压法测量不同海拔下涂层的工频耐压特性,并结合红外热像仪检测局部放电热点。建议在4000米以上区域使用添加抗紫外剂的改性硅脂材料,确保体积电阻率维持在100万亿欧姆每厘米以上,且介质损耗角正切值不超过0.003。测试周期需涵盖雨季和旱季,重点监测涂层在凝露条件下的绝缘性能劣化规律。

2.3 技术优化对运维效率和成本的影响

2.3.1 对运维效率的影响

技术优化对于运维效率具有显著的提升效果,主要体现在时间压缩、成本降低、质量提升三个方面。在时

间方面,传统人工巡检10公里线路需要2人耗时5天,而使用无人机仅需半天时间,效率提升了10倍,而且夜间红外检测也可以充分利用非作业时段。在成本方面,无人机的使用让人工费用从800元/公里降低到200元/公里,车辆损耗也减少83%;通过结合AI缺陷识别可提前三个月预警隐患,年均可避免停电损失约90万元/百公里。在质量提升方面,可见光与红外的融合技术可以将金具锈蚀、绝缘子裂纹等细微缺陷检出率从68%提升到95%。不仅如此,无人机还可以替代80%的高危登杆作业,在6级风况下仍可以完成台风前特巡以保障运维安全。

2.3.2 对运维成本的影响

无人机巡检技术的优化显著降低了配电网运维的直接与间接成本,直接成本上,通过增强无人机抗风性能和可靠性,减少了损坏与维修,降低了维护成本;优化红外成像与缺陷识别技术减少了误判与漏判,节省了维修更换费用。同时,无人机喷涂作业高效,材料利用率高,减少了人工与材料浪费。间接成本方面,技术优化提升了供电可靠性,减少了停电损失与用户赔偿,维护了企业声誉。此外,无人机应用减轻了人工巡检负担,降低了劳动强度与安全风险,减少人工伤亡赔偿与处理成本。

3 技术优化效果与展望

3.1 技术优化效果

3.1.1 运维效率提升

技术优化对运维效率具有显著的提升效果。在时间方面,传统人工巡检10公里线路需要2人耗时5天,而使用无人机仅需半天时间,效率提升了10倍,而且夜间红外检测可以充分利用非作业时段。在成本方面,无人机的使用让人工费用从800元/公里降低到200元/公里,车辆损耗也减少83%。通过结合AI缺陷识别可提前三个月预警隐患,年均可避免停电损失约90万元/百公里。在质量提升方面,可见光与红外的融合技术可以将金具锈蚀、绝缘子裂纹等细微缺陷检出率从68%提升到95%。无人机还可以替代80%的高危登杆作业,在6级风况下仍可以完成台风前特巡以保障运维安全^[4]。

3.1.2 运维成本降低

无人机配电网巡检技术的优化降低了运维过程中的直接成本和间接成本。在直接成本方面,提高无人机的抗风性能和可靠性,减少无人机的损坏率和维修次数,降低了设备的维护成本。优化后的红外成像和缺陷识别技术减少因误判和漏判导致的不必要维修和更换费用;无人机喷涂作业效率高、材料利用率高,大大减少人工成本和材料浪费。在间接成本方面,提高了配电网的供电可靠性,减少因设备故障导致的停电时间和停电范围,降低因停电给用户带来的经济损失,同时也降低电力企业因停电赔偿和声誉损失而产生的成本;减少人工巡检的劳动强度和安全风险,降低因人工伤亡事故导致的赔偿和处理成本。

3.2 未来展望

尽管无人机技术在配电网巡检方面取得显著的优化效果,但仍需要进一步的研究和改进。在无人机技术方面,未来可以探索更加先进的动力系统和智能控制技术,进一步提高无人机的续航能力、载重能力和自主飞行水平,使其能够适应更加复杂和恶劣的环境。因此,通过加强无人机巡检技术与其他智能运维技术的结合,如物联网、云计算等,构建更加智能化、自动化的配电网运维体系,也将是未来的重要研究方向。

结束语

本文通过对无人机在配电网巡检中的技术优化进行深入分析,展现了无人机技术在提升巡检效率、降低成本方面的巨大潜力。未来,随着技术的不断进步与应用的深化,无人机巡检将成为配电网运维的重要工具,为电力系统的安全与稳定提供有力保障。

参考文献

- [1]徐睿,刘云.配电网无人机智能巡视模式建设[J].电气时代,2024,(01):110-112.
- [2]丁亮,侯应龙.无人机技术在配电网巡检中的应用[J].集成电路应用,2025,42(01):409-411.
- [3]卜应松,武华茂,李泳宇,等.人机协同下配网线路无人机自主巡检故障判别研究[J].自动化应用,2024,65(21):5-7.
- [4]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,(01):174-176.