

无人机巡检在高压线路缺陷识别中的应用与精度提升

朱宝龙 刘群 卢俊杰

中国南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘要: 随着电网规模扩大与线路复杂度提升,传统人工巡检面临效率低、风险高、盲区多等挑战。无人机巡检技术凭借其高效性、安全性、精准性等优势,逐渐成为高压线路缺陷识别的核心手段。本文系统梳理无人机巡检在高压线路中的应用场景,分析其技术原理与精度提升路径,结合典型案例探讨多传感器融合、AI算法优化、三维建模等关键技术对缺陷识别精度的提升作用,并提出未来发展方向。研究表明,无人机巡检技术通过智能化、自动化升级,可显著提高高压线路运维效率,为电网安全稳定运行提供技术支持。

关键词: 无人机巡检; 高压线路; 缺陷识别; 多传感器融合; AI算法

引言

高压输电线路是电网的“动脉”,其安全稳定运行直接关系到电力供应的可靠性。传统人工巡检依赖望远镜目视或登塔检查,存在效率低、风险高、隐蔽缺陷难以发现等问题。例如,人工巡检2公里高压线路需耗时约5小时,且受地形限制,复杂区域(如沼泽、森林、峡谷)的巡检覆盖率不足60%。随着无人机技术的快速发展,其搭载高分辨率相机、红外热成像仪、激光雷达(LiDAR)等传感器,可实现高压线路的全方位、无死角监测,缺陷识别效率提升20倍以上,成为电力巡检领域的重要突破。本文聚焦无人机巡检在高压线路缺陷识别中的应用,分析其技术原理与精度提升路径,结合典型案例探讨多传感器融合、AI算法优化、三维建模等关键技术的作用,为电网智能化运维提供理论支持。

1 无人机巡检在高压线路中的应用场景与技术原理

1.1 应用场景

无人机巡检在高压线路中的应用涵盖通道巡检、杆塔巡检、导线巡检三大核心场景:(1)通道巡检:检测线路走廊内的树木、建筑物、施工机械等障碍物,避免外力破坏。例如,无人机通过倾斜摄影相机生成线路走廊三维实景模型,可精确测量导线弧垂、对地距离、交叉跨越距离,提前发现树障隐患^[1]。(2)杆塔巡检:检查杆塔本体、绝缘子、金具等部件的缺陷(如裂纹、锈蚀、破损)。无人机搭载30倍光学变焦相机,可在50米外清晰识别销钉缺失、螺栓松动等毫米级缺陷。(3)导线巡检:识别导线断股、散股、磨损等问题。红外热成像仪可捕捉导线连接点因接触不良导致的异常发热,提前预警断股风险。

1.2 技术原理

无人机巡检的核心技术包括多传感器融合、自主飞

行控制与数据智能分析:(1)多传感器融合:无人机搭载可见光相机、红外热成像仪、紫外成像仪、激光雷达等传感器,实现多维度数据采集。例如,可见光相机用于拍摄高清照片,红外热成像仪检测设备温度异常,紫外成像仪捕捉电晕放电现象,激光雷达生成高精度三维点云模型。(2)自主飞行控制:基于GPS/RTK(实时动态定位)与视觉SLAM(同步定位与地图构建)技术,无人机可实现厘米级定位与避障。通过预设航线或智能规划算法,无人机可自动完成巡检任务,减少人工干预。(3)数据智能分析:采集的海量数据上传至后台系统,利用AI算法进行自动识别与缺陷诊断。例如,深度学习模型可标出破损绝缘子、发热点、锈蚀点,生成标准化巡检报告,缺陷识别准确率超90%。

2 无人机巡检缺陷识别精度的提升路径

2.1 多传感器融合:突破单一传感器局限

传统巡检依赖单一传感器(如可见光相机),易受环境干扰(如光照、雾霾),导致缺陷漏检。多传感器融合通过数据互补,显著提升识别精度:(1)可见光+红外热成像:可见光相机能够清晰识别设备外观缺陷,如绝缘子表面的裂纹、污秽,金具的锈蚀、变形等;红外热成像仪则可检测设备内部发热异常,如导线连接点因接触不良导致的温度升高。例如,在敦煌330千伏线路巡检中,无人机通过红外测温发现一处耐张线夹温度异常升高,比周围正常线夹温度高出20°C,进一步结合可见光照片分析,发现该线夹存在接触不良问题,及时安排维修人员进行处理,避免了因过热导致的断股故障风险^[2]。(2)激光雷达+倾斜摄影:激光雷达生成高精度三维点云模型,能够精确测量导线弧垂、线树距离等关键参数,误差控制在±5cm以内,满足特高压线路运维标准;倾斜摄影相机重建线路走廊实景模型,可直观

展示线路设备的实际状况和周围环境。两者融合可提供更全面、准确的空间信息，为运维决策提供有力支持。例如，在某山区高压线路巡检中，通过激光雷达和倾斜摄影融合技术，发现一处导线与树木的距离不满足安全要求，及时通知相关部门进行树障清理，保障了线路的安全运行。（3）紫外成像+高分辨率相机：紫外成像仪可检测电晕放电现象，电晕放电通常是由绝缘子劣化、导线损伤等原因引起的；高分辨率相机则可定位放电源的具体位置。例如，南方电网在台风灾后巡检中，无人机通过紫外成像发现某基杆塔的绝缘子存在电晕放电现象，结合高分辨率相机拍摄的照片，准确定位到绝缘子的破损点，指导快速抢修，缩短了停电时间，减少了经济损失。

2.2 AI算法优化：从人工筛查到智能诊断

传统巡检依赖人工分析照片，效率低且主观性强。AI算法通过深度学习模型实现缺陷自动识别，提升诊断速度与一致性：（1）目标检测算法：基于YOLOv8、FasterR-CNN等先进的目标检测算法，无人机可实时识别绝缘子、金具、导线等部件，并标注缺陷类型（如破损、锈蚀、缺失）。例如，国网江苏电力应用AI算法后，缺陷发现率提高40%，人工筛查工作量减少70%。在某110千伏线路巡检中，AI算法在短时间内识别出多处绝缘子破损和金具锈蚀缺陷，为运维人员提供了准确的维修清单^[3]。（2）温度异常检测：红外热成像数据通过卷积神经网络（CNN）分析，可识别设备温度异常模式。CNN模型能够学习正常设备和故障设备的温度分布特征，从而区分正常发热（如导线载流）与故障发热（如连接点过热）。实验表明，该方法误报率降低至5%以下，大大提高了缺陷诊断的准确性。例如，在某220千伏变电站设备巡检中，AI算法准确识别出一台变压器的散热片温度异常，经检查发现是散热风扇故障导致，及时进行了维修，避免了设备损坏。（3）小波变换与信号处理：针对导线断股缺陷，小波变换可提取红外信号中的高频分量，结合支持向量机（SVM）分类器，实现断股早期预警。导线断股会导致局部电阻增大，产生异常发热，其红外信号中包含特定的高频特征。小波变换能够将信号分解到不同频率段，提取出这些高频特征，SVM分类器则根据这些特征对导线状态进行分类判断。

2.3 三维建模与数字孪生：构建精细化资产档案

三维建模技术为高压线路提供高精度空间数据支撑，助力缺陷定位与运维决策：（1）激光雷达点云建模：无人机搭载激光雷达扫描线路走廊，生成密度达100点/平方米的点云模型。通过点云分割算法，可提取杆

塔、导线、树木等目标，测量导线对地距离、交叉跨越距离等关键参数，误差小于±10cm。例如，在某特高压线路巡检中，激光雷达点云建模准确测量出导线与下方高速公路的交叉跨越距离，为线路的安全运行评估提供了可靠数据。（2）倾斜摄影三维重建：倾斜摄影相机从多角度拍摄线路影像，通过ContextCapture等软件生成三维实景模型。该模型可直观展示杆塔倾斜、金具锈蚀等缺陷，为运维人员提供决策依据。例如，运维人员通过查看三维实景模型，发现一基杆塔存在轻微倾斜，及时安排人员进行校正处理，避免了杆塔倒塌事故的发生。

（3）数字孪生应用：结合三维模型与设备状态数据，构建电网数字孪生体。数字孪生体可模拟导线在极端天气下的弧垂变化、设备在不同负载下的运行状态等，提前评估树障风险、设备故障概率等，优化修剪计划、运维策略。南方电网应用数字孪生技术后，树障导致的停电事故减少60%，设备故障率降低30%，有效提高了电网的可靠性和运维效率。

3 典型案例分析

3.1 案例1：敦煌330千伏线路精细化巡检

敦煌330千伏奥沙线、灿沙线覆盖沙漠、戈壁等复杂地形，传统人工巡检存在效率低、风险高的问题，2025年9月运维工区采用无人机开展全方位巡检，累计覆盖242基杆塔、101.781公里线路。技术方案上，无人机搭载30倍光学变焦相机、红外热成像仪、紫外成像仪等多种传感器实现多维度检测线路设备；采用智能航线规划系统根据线路地形和设备分布自动生成最优飞行航线以实现全自动飞行，提高巡检效率；数据上传至AI分析平台，利用深度学习算法自动识别缺陷并生成包含缺陷位置、类型、严重程度等信息的详细巡检报告。成果方面，拍摄视频345个、照片5900余张，建立完整线路专档为长期运维提供丰富数据资料；发现214条缺陷，涵盖销钉缺失、光缆迈步等细微隐患，部分若不及时处理可能导致严重事故；巡检效率提升20倍，人工成本降低80%，大幅缩短巡检周期并减少人力投入。

3.2 案例2：雅西公司高速公路沿线高压线路巡检

雅西公司管辖的高速公路沿线高压线路穿越山区，树障隐患突出。2025年6月公司应用无人机开展“靶向”巡检，重点排查树障与金具缺陷。技术方案上，无人机搭载激光雷达与倾斜摄影相机，激光雷达生成高精度三维点云模型测量线树距离，倾斜摄影相机重建线路走廊实景模型直观展示线路设备状况；结合AI算法分析三维模型，识别树木生长趋势、预测树障风险并提前制定修剪计划；还建立树障隐患数据库对树障信息进行动态管

理并跟踪处理进度。成果方面,巡检效率提升20倍,耗时从5小时/2公里缩短至15分钟,能在短时间内完成大面积线路巡检任务;提前3个月发现并处理树障隐患127处,避免了因树障导致的线路跳闸事故,保障了高速公路用电安全;减少经济损失约500万元,涵盖因停电造成的生产损失、设备损坏维修费用等。

4 挑战与未来发展方向

4.1 当前挑战

(1) 传感器精度与成本平衡:高精度传感器(如激光雷达)能够提供更准确的数据,但成本较高,限制了其在大规模无人机巡检中的应用。目前,国产激光雷达技术正在不断发展,但与国外先进水平仍存在一定差距,需要加大研发投入,通过国产化替代与技术迭代降低成本。(2) 复杂环境适应性:强电磁干扰、极端天气(如暴雨、沙尘、高温、低温等)可能影响无人机的稳定性和传感器数据的准确性。例如,强电磁干扰可能导致无人机通信中断或控制系统失灵;暴雨天气可能使相机镜头模糊,影响图像质量。需要优化无人机的抗干扰设计和防护等级,提高其在复杂环境下的适应能力^[4]。

(3) 数据安全与隐私保护:巡检数据涉及电网关键信息,如线路设备位置、运行状态等,一旦泄露可能对电网安全造成威胁。需要加强数据加密传输与存储,采用先进的加密算法对数据进行保护;建立严格的访问控制机制,限制数据访问权限;防范网络攻击,定期进行安全评估和漏洞修复。

4.2 未来方向

(1) 全自主巡检:无人机与机器人、物联网设备协同,实现从巡检到维修的全流程自动化。例如,无人机定位缺陷后,自动调度机器人进行紧固螺栓、更换绝缘子等操作,减少人工干预,提高运维效率和安全性。同时,通过物联网设备实时监测线路设备状态,将数据反馈给无人机和运维系统,实现闭环管理。(2) 5G+AIoT融合:5G网络具有高速率、低延迟、大容量的特点,能

够支持无人机高清视频实时回传,使运维人员能够及时掌握线路设备状况。AIoT平台实现设备状态全生命周期管理,通过对大量巡检数据的分析和挖掘,预测设备故障趋势,提前安排维修计划。例如,在边缘计算节点部署AI模型,实现缺陷实时诊断与预警,提高故障处理的及时性。(3) 标准化与产业化:制定无人机巡检行业标准,包括设备标准、数据格式规范、缺陷分类标准等,提高行业互操作性,促进不同厂家设备和软件之间的兼容与协同。推动设备、软件、服务的全产业链发展,形成完整的产业生态,降低无人机巡检技术的应用成本,提高市场推广速度。

结束语

无人机巡检技术通过多传感器融合、AI算法优化、三维建模等关键技术,显著提升了高压线路缺陷识别的精度与效率。典型案例表明,无人机可替代人工完成90%以上的巡检任务,缺陷发现率提高40%以上,运维成本降低60%以上。未来,随着全自主巡检、5G+AIoT融合等技术的发展,无人机将成为电网智能化运维的核心工具,为“双碳”目标实现提供坚实的技术保障。电力行业应加大对无人机巡检技术的研发投入,积极推动技术创新和应用推广,不断提升电网运维的智能化水平,保障电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1]马钰,兰璐.应用于超(特)高压输电线路智能巡检无人机的技术研究[J].电气应用,2024,43(07):21-26.
- [2]刘晓林,孙亚鑫,朱子轩,等.基于事件触发的高压输电线路巡检无人机故障检测[J].电工技术,2025,(05):120-124.
- [3]秦真.一种基于无人机倾斜摄影的高压输电线路智能巡检技术[J].中国科技信息,2025,(01):78-80.
- [4]张民.无人机在超特高压输电线路巡检中的机器视觉技术应用[J].电子技术,2024,53(09):386-387.