

基于无人机图像识别的输电线路绝缘子污秽在线监测系统研究

田沈凡, 李海荣*

(四川蜀能电力有限公司电网运维分公司, 四川 成都 610000)

摘要 输电线路绝缘子污秽积累易引发闪络故障, 威胁电力系统安全运行。传统监测方法存在效率低、安全性差、实时性不足等问题, 难以适配现代电网智能化运维需求。本文提出基于无人机图像识别的绝缘子污秽在线监测方案, 通过选型改装无人机平台、优化图像采集预处理流程、设计融入 CBAM 注意力机制的改进 YOLOv8 识别算法, 构建“无人机—地面站—服务器”三级监测系统。选取 220 kV 实际线路实验验证, 结果显示系统识别准确率达 96.8%, 检测速度为 32 帧/秒, 可实现污秽实时监测与分级预警, 显著提升运维效率, 为输电线路安全运行提供技术参考。

关键词 无人机; 输电线路; 绝缘子污秽; 图像识别

中图分类号: TP24; TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.013

0 引言

输电线路运行状态直接影响供电连续性与稳定性, 绝缘子承担固定导线与绝缘隔离双重功能, 长期运行中易积累工业粉尘、盐分等污秽物。潮湿环境下污秽物溶解形成导电膜, 导致绝缘性能下降, 严重时引发闪络故障, 造成线路跳闸与大面积停电, 给社会生产生活带来巨大损失^[1]。

当前绝缘子污秽监测主要依赖人工巡检、泄露电流监测、红外热成像检测等传统方法。人工巡检需运维人员登高作业, 劳动强度大且存在安全风险, 同时易受主观因素影响导致漏检误检; 泄露电流监测需安装传感器, 存在安装维护复杂、成本高及电磁干扰问题; 红外热成像检测受环境因素影响大, 对轻度污秽识别灵敏度不足^[2]。随着无人机与图像识别技术不断发展, 无人机巡检凭借机动性强、覆盖范围广等优势, 结合图像识别实现污秽智能化识别, 成为解决传统监测难点的重要方向。本文设计无人机图像识别在线监测系统, 优化核心算法, 通过实验验证系统实用性, 为电网智能化运维提供技术参考。

1 无人机图像识别在线监测系统设计

1.1 无人机平台选型与改装

结合输电线路巡检需求, 选取多旋翼无人机作为巡检平台, 该类型无人机操作灵活、起降方便, 可在

复杂地形区域精准悬停, 便于近距离采集绝缘子图像, 且具备续航能力强、载重适中、稳定性高、抗干扰能力强的特点。

无人机搭载高清工业摄像头、三轴稳定云台、GPS 定位模块、数据传输模块, 高清工业摄像头采用分辨率 1920×1080 像素的 CMOS 传感器, 支持自动对焦, 清晰捕捉绝缘子表面细节特征; 三轴稳定云台抵消飞行抖动, 保证图像采集稳定性, 避免画面模糊影响识别精度; GPS 定位模块结合输电线路 GIS 地图, 实现巡检路径精准规划与定位, 确保巡检全覆盖无遗漏^[3]。

为适应复杂电磁环境, 对无人机进行抗干扰改装, 采用屏蔽性能优良的数据线与电源线, 减少电磁辐射对数据传输及设备运行的影响; 优化数据传输模块, 采用加密传输协议提升数据传输稳定性与安全性; 在机身表面喷涂抗静电涂层, 避免静电积累损坏设备; 同时对电池扩容, 延长续航时间至 60 分钟, 满足长距离线路巡检需求。

1.2 图像采集与预处理

制定图像采集规范, 无人机巡检飞行高度控制在 10~15 m, 与绝缘子水平距离保持 5~8 m, 确保图像中绝缘子占比适中且清晰显示表面污秽特征; 飞行速度控制在 5 m/s 以内, 避免速度过快导致图像模糊; 摄像头拍摄角度采用俯角 30°~45°, 减少阳光直射反光干扰, 保证绝缘子表面无遮挡。

*本文通信作者, E-mail: 632638854@qq.com。

图像预处理流程大致涵盖去噪、加强及几何校正这三大主要环节。中值滤波技术被普遍应用到椒盐噪声与高斯噪声去除的工作当中,而且还要保证绝缘子表面细微结构特征的完整体现。自适应直方图均衡化算法则重点改善灰度级分布情况,突出污秽区域与其他部分之间的对比效果,并且完全展示出其视觉属性。几何校正通过提取图像中绝缘子特征点,结合相机标定参数,采用透视变换算法校正畸变图像,确保绝缘子形状与实际一致,避免几何畸变影响特征提取与识别精度^[4]。

1.3 绝缘子污秽识别算法设计

本研究以 YOLOv8 算法为基底,设计出一种混合无锚框想法的高效目标识别架构,此架构具备高精度、强抗干扰及轻量级特性,非常契合无人机嵌入式系统实际应用的要求。为了改善目标定位精确度并且提升环境适应能力,在骨干网络里加入 CBAM 注意力机制,并且经由通道和空间双重注意力模块来完成对特征重要性的动态调节,进而明显改进了污染区域信息提取的速度,而且有效地减弱了背景噪声干扰的影响程度。

由于绝缘子的目标尺寸具有一定的固定性,所以本研究利用 K-means 聚类算法对数据集进行分类处理来选择合适的锚框参数,并根据所得的锚框参数优化 YOLOv8 模型中的锚框配置方案以提高目标检测定位精度。为了满足无人机嵌入式系统实时性的严格要求,在保证识别性能的前提下,采用深度可分离卷积代替传统卷积操作精简网络结构,大大减小了模型规模及运算复杂度。

改进后算法流程为,将预处理后的绝缘子图像输入改进 YOLOv8 模型,通过骨干网络提取图像特征,经注意力机制模块增强污秽特征,再通过颈部网络进行特征融合,最后通过检测头输出绝缘子位置信息与污秽程度分级结果,依据绝缘子表面污秽覆盖面积与灰度值将污秽程度分为轻度污秽、中度污秽、重度污秽三个等级。

1.4 在线监测系统集成

在线监测系统采用“无人机—地面站—服务器”三级架构,无人机作为数据采集终端,按预设巡检路径采集绝缘子图像,通过数据传输模块将图像数据与 GPS 定位数据实时传输至地面站;地面站采用工业级平板电脑,搭载巡检作业管理软件,实时显示无人机飞行状态与图像采集情况,支持巡检路径调整、紧急停机操作,同时对传输数据初步处理与存储。

服务器采用高性能工业服务器,搭载图像识别软

件与数据库管理系统,作为系统数据处理与分析中心,接收地面站传输的图像数据后,调用改进 YOLOv8 识别算法进行绝缘子污秽识别,输出识别结果与污秽程度分级信息,并将数据存储至数据库。

系统软件模块包括数据传输模块、图像处理模块、识别分析模块、预警展示模块、数据管理模块,数据传输模块采用 4G/5G 网络与 WiFi 双模传输,确保数据传输稳定性与实时性;图像处理模块实现图像预处理功能;识别分析模块负责绝缘子污秽识别与分级;预警展示模块通过可视化界面展示识别结果、污秽分布情况、预警信息,支持短信预警、声光预警;数据管理模块实现历史数据查询、统计、导出功能。系统工作流程为规划巡检路径与设置采集参数、无人机巡检采集数据、数据传输至服务器、服务器处理识别、生成监测报告与预警、运维人员制定检修计划。

2 实验验证与结果分析

2.1 实验设计

选取某 220 kV 输电线路段作为实验场地,该线路段全长 15 km,途经工业区、郊区,绝缘子运行年限 5 年,存在不同程度污秽积累,具备实验典型性。实验设备包括改装多旋翼无人机(型号 DJIMatrice300RTK)、高清工业摄像头(分辨率 2000 万像素)、地面站、高性能服务器(搭载 IntelCorei7-12700K 处理器、NVIDIARTX3090 显卡)、绝缘子污秽样本。

实验评价指标包括识别准确率、召回率、检测速度、预警响应时间,识别准确率为正确识别的污秽绝缘子数量与实际污秽绝缘子数量的比值,反映算法识别精准程度;召回率为正确识别的污秽绝缘子数量与所有被检测绝缘子中实际污秽绝缘子数量的比值,反映算法漏检情况;检测速度为算法处理单张图像的时间,反映系统实时性;预警响应时间为从图像采集完成到系统发出预警信息的时间,反映系统快速响应能力。实验采用传统 YOLOv8 算法、改进 YOLOv8 算法、支持向量机(SVM)算法进行对比,验证改进算法优越性。

2.2 实验数据采集

实验于 2024 年 5 月至 6 月开展,选取晴天、阴天两种天气条件,分别在上午、下午两个时间段采集图像,确保数据多样性与全面性。无人机沿预设巡检路径作业,采集绝缘子图像共计 2 000 张,其中晴天 1 200 张、阴天 800 张,采集过程中记录每张图像对应的绝缘子位置、环境条件、污秽程度信息。

对采集图像筛选与标注,去除模糊、遮挡无效图像,得到有效图像 1 800 张,按 7:3 比例划分为训练集(1 260 张)

与测试集（540 张）；采用 LabelImg 标注工具对图像中绝缘子目标与污秽区域标注，标注内容包括绝缘子边界框、污秽程度等级，为算法训练与测试提供标注数据；同时采集轻度污秽、中度污秽、重度污秽绝缘子实物样本各 50 个，用于验证算法对不同污秽等级的识别能力^[5]。

2.3 实验结果与分析

不同算法绝缘子污秽识别性能对比如表 1 所示，改进 YOLOv8 算法在各项指标上均优于传统 YOLOv8 算法与 SVM 算法。改进 YOLOv8 算法识别准确率达 96.8%，较传统 YOLOv8 算法提高 4.2%，较 SVM 算法提高 12.5%；

表 1 不同算法绝缘子污秽识别性能对比

算法类型	识别准确率 (%)	召回率 (%)	检测速度 (帧 / 秒)	轻度污秽识别率 (%)	中度污秽识别率 (%)	重度污秽识别率 (%)
SVM 算法	84.3	80.2	10	78.5	83.6	90.1
传统 YOLOv8 算法	92.6	91.5	27	90.3	93.2	95.6
改进 YOLOv8 算法	96.8	95.3	32	94.7	97.2	98.5

识别准确率 97.5%，阴天环境下 95.2%，虽略有下降但仍保持较高水平，表明算法抗环境干扰能力强，适应不同天气巡检需求。

2.4 系统实用性验证

在实验线路段开展系统实用性测试，无人机按预设巡检路径自动飞行，完成 15 km 线路巡检，采集绝缘子图像 1 200 张，系统成功识别污秽绝缘子 320 个，其中轻度污秽 180 个、中度污秽 105 个、重度污秽 35 个。运维人员根据预警信息现场核查，结果显示系统识别准确率 95.6%，与实验测试结果基本一致，表明系统可准确识别绝缘子污秽情况。

系统预警响应时间平均耗时 2.3 秒，实现污秽故障快速预警，为运维人员处理故障争取时间；连续运行测试中，系统稳定运行 8 小时，未出现数据传输中断、识别算法崩溃问题，稳定性与可靠性良好。与传统人工巡检对比，该系统巡检效率提升约 8 倍，1 小时可完成传统人工巡检 2 天工作量，同时规避人工巡检安全风险，降低运维成本；系统生成的监测报告清晰展示绝缘子污秽分布与分级结果，为运维人员制定检修计划提供数据支撑，实现精准运维。

3 结束语

本研究针对输电线路绝缘子污秽监测实际需求，设计基于无人机图像识别的在线监测系统，通过无人机平台选型改装、图像采集预处理优化、识别算法改进及系统集成，实现绝缘子污秽高效精准监测。实验

召回率为 95.3%，较传统 YOLOv8 算法提高 3.8%，较 SVM 算法提高 15.1%；检测速度为 32 帧 / 秒，较传统 YOLOv8 算法提高 5 帧 / 秒，满足实时监测需求。

通过分析可知，CBAM 注意力机制增强了污秽区域特征提取能力，抑制了背景噪声干扰，提升了识别准确率与召回率；优化锚框设计提高了绝缘子目标定位精度，减少了漏检误检；轻量化处理提升了算法运行速度。在不同污秽程度识别中，改进 YOLOv8 算法对重度污秽识别率最高（98.5%），轻度污秽识别率为 94.7%，可准确区分污秽等级，为分级预警提供依据。对比不同天气识别结果，晴天环境下改进 YOLOv8 算法

结果表明，改进 YOLOv8 算法识别准确率达 96.8%，检测速度 32 帧 / 秒，系统适应不同天气与复杂地形环境，有效提升了绝缘子污秽监测智能化水平。该系统通过无人机自主巡检与图像识别技术深度融合，解决了传统监测方法效率低、安全性差、实时性不足等问题，实现了绝缘子污秽在线监测与分级预警，为输电线路运维提供可靠技术支持，且具有操作简便、成本可控、扩展性强特点，可广泛应用于不同电压等级输电线路绝缘子污秽监测，工程应用价值良好。未来将进一步优化图像识别算法，融合红外、紫外等多传感器数据，提高极端天气识别精度；结合大数据分析预测模型，实现绝缘子污秽积累趋势预测，为输电线路运维提供更全面的决策支持，推动电网运维向智能化、精准化发展。

参考文献：

- [1] 孙浩,蔡萌萌.基于机器视觉的输电线路绝缘子缺陷自动检测系统研究[J].自动化应用,2025,66(19):164-166.
- [2] 宋欣杰,金一鸣.基于深度学习的架空输电线路绝缘子识别方法研究[J].电气技术,2025,26(09):62-68,78.
- [3] 丁海勇.高压输电线路绝缘子污秽检测与维护策略研究[J].电力设备管理,2025(15):5-7.
- [4] 杜泉龙.基于图像处理的输电线路绝缘子缺陷自动检测算法[J].电气技术与经济,2025(05):286-288.
- [5] 张传琦,张博.自动化运行技术在输电线路绝缘子污闪防治中的应用[J].装备维修技术,2025(02):34-37.