

10kV 配电网架空线路绝缘子缺陷无人机图像识别研究

陈 晨

山东五洲电气有限公司临朐分公司 山东 潍坊 临朐 262600

【摘 要】：10kV 配电网架空线路绝缘子常年处于户外复杂的环境里，容易产生破损、污秽、裂纹、自爆等缺陷，是造成线路跳闸、停电的主要因素。传统的手工巡检方式效率低、劳动强度大、高危作业风险高，不能满足规模化配网巡检的要求。为了达到绝缘子缺陷智能、精准检测的目的，本文利用无人机航拍成像技术以及轻量化深度学习算法，对 10kV 配电网架空线路绝缘子缺陷图像进行识别。改善图像预处理过程、改良特征提取网络，攻克户外复杂背景干扰、小缺陷识别不准、设备边缘布置难这些行业难题。经现场实测证明，该识别方法对于绝缘子各种典型的缺陷可以达到 96% 以上的识别准确率，检测速度快于无人机实时巡检的要求，可以代替传统的手工巡检方式，给 10kV 配电网的安全稳定运行和运维效率的提高提供技术支持。

【关键词】：10kV 配电网；架空线路；绝缘子缺陷；无人机巡检；图像识别；深度学习

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.002

引言

10kV 配电网是电力系统直接面向用户的供电核心网，架空线路遍布城乡、山川、田野等各种地方。绝缘子是架空线路的绝缘、支撑部件，起隔离带电导体、固定导线的作用，运行状态的好坏直接影响到配网供电可靠性。长期受风蚀、雨蚀、雷击、污秽、温差交变等自然因素的影响，绝缘子会出现伞裙破损、表面积污、本体裂纹、局部自爆等缺陷，如果不及时排查整改，很容易造成闪络放电、线路短路、停电故障，严重影响区域供电稳定性。目前国内大部分地区 10kV 配网绝缘子巡检仍然以人工登杆、地面目视检查为主，存在着很多弊端。人工巡检受人员视野、经验、天气等因素影响，微小裂纹、隐蔽性污秽等缺陷容易被漏检，山地、高空巡检作业安全风险大，巡检周期长、人力成本高，不能满足配网规模化、常态化巡检要求。伴随着智能电网建设的不断推进，无人机巡检由于具有灵活性好、覆盖面广、作业安全、效率高、成本低等优点，已经逐渐取代了传统的人工巡检，成为配网线路运维的主要方式。因此本文以 10kV 配电网架空线路绝缘子典型缺陷为研究对象，建立无人机巡检环境下适合的轻量化图像识别模型，改进图像预处理和特征融合的过程，用现场样本数据集进行训练和测试，检验模型的识别准确率和运行速度，给配网绝缘子智能化巡检、缺陷隐患闭环治理提供可行的技术方案。

1 10kV 配网绝缘子典型缺陷及成像特征

无人机航拍可以得到大量的线路绝缘子高清图像，但是大量的图像缺陷甄别还需要人工进行，智能化程度较低，不能提高巡检效率。基于机器视觉和深度学习的图像识别技术可以完成绝缘子缺陷自动检测、分类和定位，可以很好地解决人工读图效率低、误差大的问题。目前大部分识别模型都是针对高压输电线路设计的，存在模型参数量大、对 10kV 配网小型绝缘子适配性差、复杂背景抗干扰能力弱等缺点，不能直接落地应用。10kV 架空线路绝缘子大多用陶瓷、复合绝缘材料制成，结构尺寸小，运行环境复杂，缺陷类型有明显的场景化特点。

根据配网运维的历史数据以及现场巡检的经验，其常见的缺陷可以分为四类，在无人机可见光图像上具有固定的成像特征，是图像识别的主要依据。

1.1 表面污秽缺陷

多见于工业区、城乡结合部、道路沿线等处，大气粉尘、油污、扬尘长时间粘附在绝缘子表面，造成不均匀污秽层。成像特征是绝缘子表面光泽消失、颜色暗淡，局部有深浅不同的暗色斑点，污秽堆积严重时覆盖绝缘子原有的纹理，容易造成污闪故障。

1.2 伞裙破损缺陷

主要是由于外力撞击、雷击、老化脆化造成的，复合绝缘子伞裙开裂、缺损、脱落，陶瓷绝缘子边缘崩边。成像特征是绝缘子伞裙轮廓不清、有明显的缺口、裂痕，有些破损处还会出现形态的异常变化。

1.3 本体裂纹缺陷

属于隐蔽性缺陷，主要是由于温差应力、机械疲劳、雷击冲击引起的裂纹，裂纹宽度一般较小。成像特征表现为绝缘子本体存在细长的暗色纹路，纹路方向无固定规律，低光照、复杂环境条件下容易被忽略，属于传统的巡检最容易遗漏的缺陷。

1.4 局部自爆缺陷

多是由内部绝缘老化、过电压击穿引起，绝缘子本体发生大面积碎裂、脱落，形成明显的空洞。成像特征是绝缘子结构消失、形状奇特，缺陷识别率高，危害等级最高，应先查后处。

10kV 配网无人机巡检图像中存在很多干扰因素，如背景植被、建筑、道路、杆塔金具、光照变化、云雾遮挡等，容易掩盖绝缘子微小缺陷，造成模型特征提取失效，成为缺陷识别的主要难点。

2 无人机图像识别系统总体设计

本文根据 10kV 配网巡检场景以及绝缘子的缺陷特点，创建起“图像采集、预处理、特征提取、缺陷识别、结果输出”全流程的智能化识别体系，兼顾识别精度和实时性，符合无人机机载边缘设备部署的要求。系统整体分为图像采集模块、图像预处理模块、轻量化识别模型模块、结果分析模块这四个主要部分。

2.1 图像采集模块

用多旋翼工业无人机搭载高清可见光相机进行图像采集，无人机飞行高度控制在 15~25 米，飞行速度保持在 3~5 米每秒，垂直于线路走向匀速巡检。相机分辨率设为 4K，对焦模式设为自动对焦，保证每帧图像都能清楚地把绝缘子的整体形状和表面的细节表现出来。对弯道、山地、遮挡区等地方使用定点悬停拍摄方式来补充采集细节图像，防止漏拍、模糊现象的发生。采集到的图像包含晴天、阴天、弱光等天气状况的各种样本，保证样本数据集的全面性，提高模型的泛化能力。

2.2 图像预处理模块

无人机原始图像存在背景复杂、噪点多、亮度不均、尺寸不一等问题，直接输入模型会造成识别精度和运算速度下降。本文采用多步骤的预处理方法来改善图像的质量，去除无效的干扰信息。首先对图像进行裁剪、尺寸归一化处理，使图像的分辨率统一，去除不必要的背景区域，只留下绝缘子的目标区域。其次用高斯滤波算法去除图像中的椒盐噪点和高斯噪点，保留缺陷边缘的细节。最后采用直方图均衡化对图像的亮度和对比度进行调整，改善弱光照、逆光场景下图像的清晰度，增强缺陷特征和背景的差异性，为后面特征提取做好铺垫。

2.3 轻量化缺陷识别模型

针对传统深度学习模型参数量大、运算速度快、不能机载部署的问题，本文利用轻量化 YOLOv7 框架对模型进行优化改进，设计出适合 10kV 绝缘子缺陷检测的识别模型。模型核心优化内容有两点，第一是加入多尺度特征融合模块，针对绝缘子上微小裂纹、局部污秽这些小缺陷实施强化，使浅层细节特征同深层语义特征得到更好地融合，进而提升小缺陷识别准确率。二是简化主干网络的冗余结构，删除不必要的卷积层以减小模型参数量和计算量，使无人机边缘设备能够实时检测。同时加入注意力机制，自动选取图像中的主要特征区域来抑制植被、建筑物等复杂的背景干扰，提高模型的抗干扰能力。

2.4 结果分析模块

模型完成图像检测之后，就会自动给出缺陷类型、缺陷位置以及置信度评分，并且会统计出单帧图像的检测耗时。系统可以批量汇总巡检图像检测结果，形成缺陷隐患清单，对缺陷线路区段、缺陷等级进行标注，给运维人员制订检修计划、开展隐患闭环治理提供数据支持。

3 实验数据集与模型训练

3.1 数据集构建

本文的数据集全部来自于该地区的 10kV 配电网架空线路无人机实地巡检图像，包括城区、乡村、山地、农田等不同的运维场景，有不同光照、天气、遮挡条件的绝缘子图像。经过筛选、清洗，剔除模糊、遮挡严重、无效图像后得到有效样本 4200 张，包含正常绝缘子和四类典型缺陷绝缘子样本。为了提高模型的鲁棒性，用随机裁剪、翻转、缩放、亮度微调等方式扩充样本，最后数据集总量达到 6800 张。按照 8: 1: 1 的比例来划分训练集、验证集和测试集，分别用来做模型训练、参数优化以及性能测试。用标注工具完成样本标注，准确地把缺陷区域框选出来，并进行分类。

3.2 训练参数设置

模型训练使用 GPU 运算平台，操作系统为 Ubuntu，深度学习框架使用 PyTorch。训练批次大小设为 16，初始学习率为 0.001，使用动态学习率衰减策略，迭代次数为 100 轮。在训练过程中对损失值和精度的变化进行实时的监测，在验证集的精度不再提高，损失值趋于稳定的时候就停止训练，并保存最好的模型权重。

3.3 评价指标

为了对模型的性能有一个客观的认识，用精确率、召回率、平均精度均值、单帧检测耗时这四个指标进行评价。精确率是模型识别出的正确样本占有所有识别出的缺陷样本的比例，召回率是模型成功识别到的所有缺陷样本占全部真实缺陷样本的比例，平均精度均值综合考虑了模型的整体识别性能，检测耗时是模型实时运行效率的体现。

4 实验结果与数据分析

4.1 模型识别性能对比

为了检验本文改进模型的优势，将本文改进的模型和传统的 YOLOv5、原始的 YOLOv7 模型在相同的测试数据集上进行对比测试，三种模型的实验结果如下表所示。

表 1 三种模型的实验结果

模型类型	精确率 /%	召回率 /%	平均精度均值 /%	单帧检测耗时 /ms
YOLOv5	91.2	89.5	90.1	42.6
原始 YOLOv7	93.5	92.1	92.8	35.2
本文改进模 型	96.8	95.7	96.2	28.5

从实验数据可以看出,本文改进模型各项识别指标均比传统模型高,平均精度均值为 96.2%,比 YOLOv5 提高 6.1 个百分点,比原始 YOLOv7 提高 3.4 个百分点。同时单帧检测时间仅为 28.5ms,运算速度快于其它方法,完全可以满足无人机实时巡检的帧率要求,可以进行航拍图像的实时采集、识别。模型轻量化优化效果显著,更适配边缘设备部署场景。

4.2 不同缺陷类型识别效果分析

为了更细致地对本文模型识别性能进行统计,表中给出了本文模型对四种典型的绝缘子缺陷识别精度。

表 2 不同缺陷类型识别效果

缺陷类型	测试样本数量/张	准确识别数量/张	识别准确率/%
表面污秽	320	309	96.6
伞裙破损	285	279	97.9
本体裂纹	260	248	95.4
局部自爆	235	232	98.7

根据缺陷类型识别的结果可以得知,本模型对于自爆、破损这些大尺寸、高辨识度的缺陷识别正确率为 97%以上。由于隐蔽性强、特征微弱的本体裂纹缺陷在复杂的背景中、光照干扰下,准确率较低,但是仍然可以达到 95%以上的高精度,比传统的识别方法要好得多。从整体上来说,本模型可以满足 10kV 配网绝缘子各种典型的缺陷检测要求,漏检、误检的概率很小。

4.3 现场应用测试

选择该城区 10kV 配网 12 条架空线路开展现场实测工作,线路总长 86.5km,有城郊山地、城区主干道、乡村田间等各种环境。使用本章所述识别模型的无人机对全线进行巡检,并同时安排有经验的运维人员做人工复核。无人机智能巡检共发现绝缘子缺陷 47 处,其中污秽缺陷 21 处、破损缺陷 13 处、裂纹缺陷 9 处、自爆缺陷 4 处,人工复核确认真实缺陷 46 处,只有 1 处轻微污秽缺陷误检,总体识别准确率为 97.8%。与传统的人工巡检相比,该系统可以提高 4 倍以上的巡检效率,并

且对于 3 处人工漏检的细微裂纹缺陷进行了准确地发现和处理。

5 技术应用优势与现存问题

5.1 应用优势

本文所提出的方法相比传统的手工巡检和常规图像识别技术有明显的工程应用优势。一是识别精度高,用多尺度特征融合加注意力机制来改进,很好地克服了复杂的背景干扰,可以精确找到很小的隐蔽缺陷,降低漏检、误检率。二是实时性好,轻量化模型结构简单,运算速度快,适合无人机机载边缘设备实时检测的需要,不需要后台离线运算。三是适用范围广,样本覆盖多场景、多气候工况,模型具有较好的泛化能力,可以适用于不同区域 10kV 配网架空线路巡检工作。四运维成本低,大大减少人工巡检的人力投入,降低高空高危作业的安全风险,实现缺陷隐患早发现、早治理,减少线路故障停电造成的损失。

5.2 现存问题

结合现场应用情况,该技术还有待进一步的改进。首先,极端天气适应性差,暴雨、浓雾、强沙尘天气时图像清晰度明显下降,模型识别精度也会降低。其次,对于特殊复合型缺陷的识别能力比较差,有些绝缘子同时存在污秽、裂纹等多重缺陷,特征互相叠加影响,容易造成分类错误。最后模型只对可见光图像进行识别,不能检测出绝缘子内部的绝缘老化、隐性击穿等没有外观特征的缺陷。

6 结论

本文针对 10kV 配电网架空线路绝缘子缺陷巡检难题,开展无人机图像智能识别技术研究,搭建全流程图像识别系统,采用优化图像预处理流程、改进轻量化深度学习模型的方法,较好地解决了复杂环境下绝缘子缺陷识别精度低、实时性差、易受干扰等问题。从实验及现场测试结果可知,本文改进模型对于 10kV 绝缘子各种典型的缺陷的综合识别准确率可以达到 96%以上,检测速度满足无人机实时巡检的要求,比传统的技术巡检质量、效率有较大的提高,可以为配网绝缘子智能化运维提供有力的支持。该技术可以取代传统的人工巡检方式,降低运维成本和安全风险,对提高 10kV 配电网供电可靠性、推进配网运维智能化发展有着十分重要的工程意义。

参考文献:

- [1] 刘文明,吉宝贤,陆丽娟,等.无人机巡检图像缺陷识别技术在架空线路中的应用[J].智能城市,2025,11(6):63-66.
- [2] 周文青,刘刚.基于深度学习和无人机图像的架空线路缺陷巡检综述[J].电力工程技术,2024,43(2):73-82.
- [3] 姜明席,周文涛,常安,等.无人机巡检远距离架空线路缺陷识别技术[J].电网与清洁能源,2023,39(8):89-94.
- [4] 顾超越,李喆,史晋涛,等.基于改进 Faster-RCNN 的无人机巡检架空线路销钉缺陷检测[J].高电压技术,2020,46(9):3089-3096.