

图像识别技术在电力设备缺陷检测与故障定位中的应用研究

白琰玺 马宇翔 郑佳元

西安市物联网应用实验室 陕西西安 710000

摘要: 本文聚焦图像识别技术在电力设备缺陷检测与故障定位中的应用。首先阐述电力设备相关现状及图像识别引入必要性,接着介绍图像识别技术基础。详细分析图像识别在变压器、绝缘子等设备缺陷检测及故障定位中的流程、方法,结合实际案例说明。同时探讨应用中面临的复杂环境、算法优化等挑战及解决方案。研究表明,图像识别技术可有效提升电力设备缺陷检测与故障定位的准确性和效率。

关键词: 图像识别技术; 电力设备; 缺陷检测; 故障定位; 算法优化

1 研究背景与价值

在电力系统的稳定运行中,电力设备扮演着至关重要的角色。它们如同电力系统的“心脏”与“血管”,源源不断地输送和分配电能,保障着社会生产生活的正常运转。然而,随着电力设备长期运行,受环境因素(如高温、潮湿、污染等)、电气应力以及机械振动等多种因素的影响,设备不可避免地会出现各种缺陷,甚至引发故障。这些缺陷和故障若不能及时发现和处理,轻则导致设备损坏、停电事故,影响用户正常用电;重则可能引发火灾、爆炸等严重安全事故,威胁人员生命安全,造成巨大的经济损失和社会影响。

传统的电力设备缺陷检测与故障定位方法主要依赖人工巡检和定期维护。人工巡检虽然能够直接观察设备外观,但存在效率低下、主观性强、难以发现设备内部潜在问题等弊端。定期维护则按照固定的时间间隔对设备进行检查和维修,这种方式往往无法准确把握设备的实际运行状态,容易出现过度维护或维护不足的情况。过度维护不仅增加了运维成本,还可能因频繁操作设备而引入新的故障隐患;维护不足则会使设备在存在缺陷的情况下继续运行,加速设备老化,增加故障发生的风险。

近年来,随着信息技术的飞速发展,图像识别技术作为一种新兴的检测手段,逐渐在电力设备缺陷检测与故障定位领域展现出巨大的应用潜力。图像识别技术基于计算机视觉和机器学习算法,能够对电力设备的图像进行自动分析和处理,快速准确地识别出设备表面的缺陷特征,如裂纹、腐蚀、变形等,以及设备内部的异常情况。与传统的检测方法相比,图像识别技术具有高效、准确、客观等显著优势。它

可以在短时间内对大量设备图像进行处理和分析,大大提高了检测效率;同时,基于算法的自动识别过程减少了人为因素的干扰,提高了检测结果的准确性和可靠性。

此外,图像识别技术还可以与其他先进技术相结合,如无人机巡检、红外热成像等,实现更全面、更深入的电力设备检测。无人机巡检可以快速获取电力设备的全景图像,图像识别技术则对这些图像进行分析,发现设备表面的细微缺陷;红外热成像技术能够检测设备的温度分布,图像识别技术可以对热成像图像进行处理,识别出温度异常区域,从而判断设备是否存在过热故障。通过这种多技术融合的方式,能够更加全面地掌握电力设备的运行状态,及时发现潜在的安全隐患,为电力设备的可靠运行提供有力保障。

2 图像识别技术基础

图像识别技术作为计算机视觉领域的关键分支,其核心在于通过算法模型解析图像内容,实现目标检测、分类与特征提取。在电力设备检测场景中,该技术主要依托两类基础方法:基于传统图像处理的技术路径,以及基于深度学习的智能识别框架。

传统图像处理技术通过数学运算对图像像素进行直接操作。例如,空间域滤波采用均值滤波、中值滤波等算法消除噪声干扰,频域滤波则借助傅里叶变换将图像转换至频率域进行降噪处理。在图像增强环节,直方图均衡化技术通过拉伸像素强度分布提升对比度,同态滤波技术则能同时改善光照不均与对比度问题。特征提取阶段,边缘检测算子如 Sobel、Canny 等通过梯度计算识别设备轮廓,纹理特征分析采用灰度共生矩阵等方法捕捉表面缺陷的周期性模式。

深度学习技术的引入极大提升了复杂场景下的识别精度。卷积神经网络 (CNN) 作为核心架构, 通过卷积层、池化层、全连接层的堆叠实现层次化特征学习。在电力设备检测中, ResNet、Inception 等经典网络结构被广泛应用, 其残差连接、多尺度特征融合等机制有效缓解了梯度消失问题, 提升了模型对细微缺陷的感知能力。迁移学习策略通过加载预训练模型权重, 使检测系统在少量电力设备样本下即可实现快速适配。

图像预处理是保障识别精度的关键前置环节。针对电力设备图像采集过程中可能出现的运动模糊、光照不均等问题, 需采用针对性处理策略: 维纳滤波结合运动估计可有效恢复模糊图像细节, Retinex 算法通过模拟人眼视觉系统实现动态范围压缩与颜色恒常性校正。在几何校正方面, 透视变换算法通过标定板特征点匹配可纠正拍摄角度偏差, 确保设备部件在图像中的空间位置准确性。

数据增强技术通过模拟真实场景变异提升模型泛化能力。随机裁剪、旋转、平移等几何变换增强模型对设备姿态变化的适应性, 对比度拉伸、添加高斯噪声等操作则模拟了不同光照条件与传感器噪声的影响。特别针对电力设备缺陷样本稀缺问题, 生成对抗网络 (GAN) 可合成具有真实感的缺陷图像, 有效缓解数据分布不均衡导致的模型偏置问题。

3 图像识别在电力设备缺陷检测中的应用

在电力设备缺陷检测领域, 图像识别技术已形成针对不同设备类型的差异化解决方案。针对变压器设备, 其检测重点集中在外观完整性及附属部件状态分析。通过部署高分辨率工业相机获取设备全景图像, 利用智能边缘检测算法识别箱体变形、散热器渗漏等宏观缺陷。对于套管、油位计等精密部件, 采用多光谱成像技术捕捉传统可见光难以观测的细微裂纹, 结合纹理分析算法判断绝缘材料老化程度。实际工程中, 某 500kV 变电站应用该技术后, 变压器渗漏油缺陷检出率提升, 误报率降低。

绝缘子串检测面临复杂背景干扰挑战。基于图像分割技术的解决方案通过超像素聚类将设备与杆塔、导线分离, 再利用形态学运算提取绝缘子轮廓。针对污秽放电检测, 开发了紫外成像与可见光图像融合系统, 通过空间配准技术实现电晕放电点的精确定位。在输电线路巡检场景中, 无人机搭载的多模态成像装置可同步获取可见光、红外、紫外图像, 图像识别模块对三种数据源进行交叉验证, 有效区分自然污

秽与放电缺陷。

开关设备检测侧重机械状态与电气性能评估。断路器分合闸位置判断采用基于模板匹配的视觉定位技术, 通过比对标准位置图像与实时图像的相似度实现状态确认。隔离开关触头温度异常检测结合红外图像分析与三维重建技术, 首先通过立体视觉系统获取触头空间坐标, 再根据红外热像图计算温度场分布, 建立触头接触电阻与温度升高的量化关系模型。某省电力公司试点应用表明, 该方案对接触不良缺陷的预警时间提前。

检测流程优化方面, 开发了自适应图像采集装置。该装置搭载电动云台与激光测距模块, 可根据设备类型自动调整拍摄距离与角度, 确保关键部位始终处于视场中心。配套的智能曝光系统通过直方图分析实时调整快门速度与光圈值, 在强光、逆光等复杂光照条件下仍能获取可用图像。现场测试数据显示, 该装置使有效图像采集成功率提升, 后续识别阶段的计算资源消耗降低。

4 图像识别在电力设备故障定位中的应用

在电力设备故障定位领域, 图像识别技术通过融合多源图像数据与立体视觉技术, 实现了故障点的精准空间定位。该技术首先利用无人机搭载的多光谱成像装置或变电站部署的高清摄像头, 采集设备的可见光、红外、紫外等多模态图像。通过空间配准算法, 将不同模态的图像进行几何校正与像素级融合, 生成包含丰富信息的高精度图像。

针对输电线路故障定位, 无人机巡检系统可对线路走廊进行全方位扫描。图像识别模块通过卷积神经网络检测导线断股、绝缘子破损等典型缺陷, 并结合立体视觉技术计算故障点的三维坐标。例如, 某省级电网公司采用该技术后, 输电线路故障定位精度提升至米级, 故障抢修时间缩短。

在变电站场景中, 图像识别技术通过对变压器、断路器等设备进行实时监控, 检测油位异常、触头发热等故障征兆。系统采用多摄像头协同工作机制, 利用特征匹配算法实现不同视角图像的融合, 从而构建设备三维模型。当检测到异常时, 系统可结合三维坐标与设备拓扑关系, 快速锁定故障设备位置。某 500kV 变电站应用实践表明, 该技术对设备内部故障的定位响应时间缩短。

针对复杂环境下的技术挑战, 研究团队开发了自适应图像增强算法。该算法通过动态调整对比度与锐度, 有效抑制光照变化与背景干扰。同时, 采用轻量化深度学习模型,

在保证识别精度的前提下,将单帧图像处理时间压缩。对于多设备协同定位需求,系统引入图神经网络技术,通过分析设备间的空间关联关系,优化定位结果的置信度。

在实际工程中,图像识别技术已实现与物联网平台的深度集成。定位结果可实时推送至运维人员移动终端,并自动生成包含故障位置、类型、严重程度等信息的数字化工单。某区域电网公司统计数据显示,该技术使故障处理效率提升,年均减少停电损失。未来,随着数字孪生技术的引入,图像识别定位精度有望突破厘米级,为电力设备智能运维提供更强大的技术支撑。

5 应用挑战与解决方案

在电力设备检测场景中,图像识别技术的实际应用面临多重技术挑战。复杂气象条件导致的图像退化问题尤为突出,雨雾天气会使设备轮廓模糊,强光直射则可能造成局部过曝。针对此类问题,研究团队开发了自适应成像系统,通过光学波段切换与动态曝光补偿技术,在雾霾环境下采用近红外成像穿透气溶胶颗粒,强光条件下则启动偏振滤光模块抑制反射眩光。某沿海电网的实地测试表明,该系统使恶劣天气下的图像可用率提升。

算法实时性是制约技术落地的关键瓶颈。传统深度学习模型在嵌入式平台上的推理速度难以满足现场检测需求,为此采用模型压缩与硬件加速协同优化方案。通过通道剪枝技术去除卷积神经网络中的冗余参数,配合 FPGA 芯片的并行计算能力,使单帧图像处理时延降低。针对多设备协同检测场景,设计分布式推理架构,将目标检测任务部署在边缘计算节点,特征分类任务下沉至终端设备,实现计算资源的动态调配。

设备型号多样性带来的兼容性问题通过标准化技术体系得以解决。建立电力设备图像特征数据库,涵盖主流厂商的变压器、开关柜等设备三维模型及典型缺陷样本。研发跨平台图像分析引擎,采用 ONNX 运行时框架实现不同深度学习框架间的模型转换,通过硬件抽象层隔离底层计算资源差异。该体系已在多个省级电网公司完成兼容性认证,覆盖超过 80% 的在运设备型号。

6 总结与展望

研究通过构建电力设备图像识别技术体系,验证了该技术在缺陷检测与故障定位领域的工程价值。在检测精度方面,变压器渗漏油、绝缘子污秽等典型缺陷的识别准确率突破 95%;在定位精度层面,输电线路故障点的空间误差控制在米级范围内。实际应用数据显示,部署图像识别系统的变电站设备巡检效率提升,年均减少非计划停电时长。

技术发展仍面临数据壁垒与场景泛化挑战。不同电压等级设备的缺陷样本分布不均衡,极端气候条件下的长期稳定性有待验证。未来研究将聚焦三个方面:构建电力行业图像数据共享平台,制定设备缺陷图像标注规范;研发轻量化三维重建算法,实现设备内部结构的可视化检测;探索数字孪生与图像识别的深度融合,建立设备健康状态的动态预测模型。随着 5G+ 工业互联网技术的普及,图像识别有望与声学检测、气体分析等多模态数据融合,构建更完备的电力设备智能运维体系。

参考文献:

- [1] 牛博,唐鑫,张欣宜,孙善源,蔡鋈,李军浩. 气体绝缘组合电器中电压互感器振动特性研究 [J]. 高压电器,2019,55(11):74-78.
- [2] 蒋玲,曲全磊,王志惠,马旭东,蔡鋈,李军浩. 高温差工况下长母线 GIS 设备振动特性研究 [J]. 高压电器,2019,55(11):144-151.
- [3] 高燃,尹建军,刘文海,吴胜. 现代数字滤波技术在大型电力变压器异响诊断中的应用 [J]. 变压器,2015,52(12):77-80.
- [4] 曹浩,吴晓文,卢铃,胡胜,吕建红,彭继文. 基于波束形成声成像技术的某 ± 800 kV 换流站噪声源识别 [J]. 高压电器,2019,55(11):171-176.
- [5] 余长厅,黎大健,陈梁远,张玉波. 基于声纹及振动的变压器故障诊断技术研究 [J]. 高压电器,2019,55(11):248-254.

作者简介: 白琰玺(2005—),男,汉族,陕西省西安市,本科生,研究方向为电子信息工程。