

# 基于机器视觉的高压输电线路部件缺陷识别技术研究

梁留永

南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

**摘要:** 本文聚焦基于机器视觉的高压输电线路部件缺陷识别技术。先分析关键部件与缺陷类型,指出检测难点;接着介绍图像采集与预处理技术,优化采集系统与预处理流程;对比传统与深度学习识别算法,改进YOLOv8模型提升性能;最后设计实现缺陷识别系统,经测试验证其功能与性能达标。该研究为高压输电线路巡检智能化提供有效方案,助力新型电力系统构建。

**关键词:** 机器视觉; 高压输电线路; 缺陷识别

## 1 高压输电线路关键部件与缺陷类型分析

### 1.1 关键部件分类与结构特征

高压输电线路作为电力系统的核心组成部分,其关键部件的稳定运行直接关系到电网安全。根据功能与结构特性,主要部件可分为以下四类:(1)导线系统是电能传输的核心载体,由铝或铜材质的裸导线构成,通过分裂导线技术提升传输容量。例如,特高压线路采用八分裂导线结构,单根导线截面积可达720mm<sup>2</sup>,总载流量超过5000A。导线通过悬垂线夹、耐张线夹与杆塔连接,线夹的螺栓紧固力矩需达到250N·m以上以防止松动。

(2)绝缘子系统承担电气绝缘与机械支撑双重功能,包括悬式绝缘子、支柱绝缘子和合成绝缘子三类。悬式绝缘子采用220kV级35片串联结构,单片绝缘子爬电距离达450mm;合成绝缘子通过硅橡胶护套实现憎水性,但其芯棒与护套界面易因电化学腐蚀导致断裂<sup>[1]</sup>。(3)杆塔结构作为线路的机械骨架,分为钢管塔与角钢塔两种类型。钢管塔采用Q420高强度钢,单基重量超200吨,可承受80m/s风速;角钢塔通过螺栓连接形成桁架结构,其节点板厚度需满足M24螺栓的抗剪要求。(4)金具组件包含连接金具、防护金具和接续金具三大类。防振锤通过钢绞线与导线连接,其质量偏差需控制在±5%以内;均压环采用铝合金材质,表面电场强度需低于3kV/cm以防止电晕放电。

### 1.2 典型缺陷类型

部件缺陷呈现多元化特征,具体表现为:导线缺陷以断股与磨损为主,500kV线路因导线舞动导致单次断股达17处,断股位置集中在耐张线夹出口2m范围内。磨损缺陷多发生于跨越铁路、公路的导线段,某线路检测发现导线外层铝股磨损深度达0.8mm,接近临界值1.0mm。绝缘子缺陷呈现老化与污秽双重特征,玻璃绝缘子自爆率随运行年限呈指数增长,某220kV线路运行15年后年自

爆率达0.3%;合成绝缘子护套老化导致憎水性丧失,接触角测量值从120°降至60°以下。杆塔缺陷集中于螺栓松动与塔材腐蚀,红外检测发现某铁塔螺栓温度异常升高至85°C,经检查为螺栓预紧力不足导致接触电阻增大;沿海地区杆塔锌层厚度检测显示,运行8年后平均减薄量达35μm。金具缺陷以防振锤移位和均压环脱落为主,无人机巡检发现某线路防振锤安装角度偏差达45°,导致减振效率下降60%;均压环脱落多因焊接质量缺陷,220kV线路因均压环脱落引发电晕放电,造成年电能损耗增加12万kWh。

### 1.3 缺陷识别难点分析

当前,现有的检测技术在特高压输电线路巡检中面临着诸多棘手难题,主要体现在以下三大方面。其一,高空部件检测存在盲区,特高压杆塔高度动辄达80米,传统望远镜检测方式能力有限,仅能识别0.5m以上的缺陷,对于更微小的隐患难以察觉。即便有研究采用无人机搭载高精度相机进行检测,在50米高度时,仍有15%的部件会被遮挡,导致部分关键信息无法获取,增加了漏检风险。其二,微小缺陷辨识困难重重,导线断股初期,仅表现为0.1mm级的铝股分离,极为细微,常规检测手段难以发现,需借助X射线检测技术。然而,实验室测试显示,现有视觉算法对直径0.5mm以下断股的识别准确率不足70%,无法满足精准检测的需求。其三,复杂环境干扰严重,山区线路常受雾气笼罩,图像对比度大幅下降至0.2以下,严重影响图像质量;工业区线路绝缘子表面污秽积聚,使得红外检测时温差缩小至3°C以内,接近检测灵敏度极限,给检测工作带来极大挑战。

## 2 高压输电线路部件图像采集与预处理技术

### 2.1 图像采集系统设计

本系统创新性地采用多传感器融合架构,旨在全方位、高精度地采集输电线路图像信息。其核心配置丰富

且先进，为后续精准检测与分析奠定了坚实基础。光学载荷模块是系统的“视觉担当”，搭载了4200万像素全画幅相机，并配备200mm定焦镜头，空间分辨率高达0.1mm/pixel。在实际的某线路检测中，这一配置展现出了卓越的性能，能够清晰识别导线表面0.3mm级的细微裂纹，为及时发现导线潜在的安全隐患提供了有力支持。红外热成像模块采用640×512像素非制冷焦平面探测器，测温范围覆盖-20℃~+350℃，精度可达±2℃。在实际应用场景中，该模块成功检测出绝缘子表面0.5℃的温差异常，能够敏锐捕捉到绝缘子因故障或老化而产生的温度变化，为预防绝缘子故障提供了关键数据。激光雷达模块集成16线激光扫描仪，点云密度达50点/m<sup>2</sup>。通过对点云数据的处理，可精准重建杆塔三维模型，模型精度优于0.05m，为杆塔的结构分析和维护提供了精确的几何信息。系统还采用RTK定位技术，定位精度达±2cm。在某500km线路巡检测试中，系统航迹偏差控制在0.5m以内，完全满足部件精准定位需求，确保了采集到的图像信息能够准确对应到输电线路的具体位置<sup>[2]</sup>。

### 2.2 图像预处理技术优化

鉴于输电线路巡检常面临复杂环境干扰，严重影响图像质量，为此开发了三级预处理流程，以提升图像的可用性和准确性。第一级是辐射校正。通过建立大气传输模型，对大气散射造成的辐射衰减进行修正。在某山区线路检测中，校正后的图像效果显著提升，信噪比提高12dB，对比度增强35%，有效消除了大气因素对图像质量的影响，使图像中的目标特征更加清晰。第二级为几何校正。采用透视变换算法消除镜头畸变，将畸变率从1.2%大幅降至0.3%。以某铁塔图像校正为例，校正后螺栓中心定位误差从8像素降至2像素，大大提高了图像的几何精度，为后续的精确测量和分析提供了可靠保障。第三级是增强处理。开发自适应直方图均衡化算法，在保持图像自然度的同时提升对比度。实验表明，该算法使绝缘子污秽区域对比度提升40%，而传统方法仅提升25%，能够更清晰地突出绝缘子污秽等关键特征，有助于后续对绝缘子状态的准确判断。

## 3 基于机器视觉的高压输电线路部件缺陷识别算法研究

### 3.1 传统机器视觉识别算法应用

传统方法聚焦于特征工程与分类器设计；HOG+SVM框架：提取部件梯度方向直方图特征，采用线性SVM分类。在导线断股检测中，该框架实现82%的识别准确率，但处理速度仅5fps。LBP+Adaboost算法：利用局部二值模式描述纹理特征，构建级联分类器。某绝缘子缺陷检

测实验显示，该算法误检率控制在3%以内，但漏检率达15%。Gabor滤波+PCA方法：通过Gabor小波提取多尺度纹理特征，结合主成分分析降维。在金具锈蚀检测中，该方法特征维度从1024维降至50维，分类准确率保持88%。

### 3.2 深度学习识别算法构建与改进

鉴于传统机器视觉方法在高压输电线路部件缺陷识别中存在诸多局限，针对性地构建了YOLOv8改进模型。首先，引入CA注意力机制，该机制能有效增强通道与空间特征的关联，让模型更精准地聚焦关键信息。实验结果显示，在绝缘子盘片检测任务中，此机制使mAP提升了2.3%，误检率下降了1.8%。其次，采用C2f-Fasternet模块替代原始C2f模块，大幅减少参数量，降幅达37%，在NVIDIA Jetson AGX Orin平台上，模型推理速度高达149fps，完全满足实时检测需求。此外，设计CIoU损失函数，综合考虑多方面因素，经数据集测试，定位精度提升4.2%，收敛速度加快30%。

### 3.3 算法性能评估与对比

在自建数据集（含3696张图像）上进行对比实验：如表所示

算法类型	准确率	召回率	F1值	推理速度 (fps)
FasterR-CNN	0.923	0.887	90.5	12
YOLOv5s	0.941	0.912	92.6	45
原始YOLOv8	0.975	0.958	96.6	82
改进YOLOv8	0.982	0.971	97.6	149

实验表明，改进模型在保持高精度的同时，推理速度提升81.7%，满足输电线路巡检的实时性要求。

## 4 高压输电线路部件缺陷识别系统设计与实现

### 4.1 系统总体架构设计

系统采用先进的微服务架构，这种架构具备高内聚、低耦合的特点，极大提升了系统的可扩展性与可维护性。整个系统包含四大层级，协同运作实现高效巡检。数据采集层是系统的“眼睛”，集成无人机、直升机和地面机器人等多源数据采集设备，支持4K视频流与点云数据同步传输<sup>[3]</sup>。多源数据的融合能提供更全面、准确的信息，为后续分析奠定基础。边缘计算层部署NVIDIA Jetson AGX Orin边缘计算设备，犹如系统的“快速反应中枢”，可实现缺陷的实时检测与预警。在某试点项目中，边缘计算使数据传输量减少70%，响应时间缩短至200ms，有效减轻了云端压力，提高了实时性。云端分析层构建Hadoop大数据平台，是系统的“智慧大脑”，存储历史检测数据与缺陷知识库。该平台支持TB级数据的秒级查询，能快速分析历史数据，为缺陷趋势

分析提供有力支撑。应用服务层开发Web端与移动端应用,是系统与用户交互的“窗口”,提供缺陷定位、报告生成和任务派发等功能。在某省级电网应用中,系统使巡检效率提升3倍,缺陷处理周期缩短60%,大幅提升了电网运维效率。

#### 4.2 核心功能模块开发

系统重点实现三大核心功能模块,为高压输电线路巡检提供全方位支持。智能检测模块集成改进YOLOv8模型,如同一位“火眼金睛”的检测专家,支持12类缺陷的自动识别。在某500kV线路应用中,该模块对导线断股的检测灵敏度达0.2mm,优于人工检测的0.5mm标准,能更精准地发现微小缺陷,保障线路安全。三维重建模块基于激光点云数据,为杆塔构建逼真的三维模型。模型精度优于0.05m,可自动测量螺栓间距、塔材弯曲度等参数,为杆塔的维护和检修提供精确数据,有助于提前发现潜在安全隐患。缺陷预测模块采用LSTM神经网络,结合历史检测数据与环境参数,对部件剩余寿命进行预测。在某绝缘子串预测中,模型误差控制在±8%以内,能为运维人员提供科学的决策依据,合理安排检修计划,降低运维成本,提高电网运行的可靠性和稳定性。

#### 4.3 系统测试与优化

为确保系统性能可靠,开展多维度测试验证系统性能。功能测试方面,完成12类缺陷的识别测试,准确率均达95%以上。在某复杂场景测试中,系统成功识别出0.3mm级导线裂纹和0.5℃级绝缘子温差异常,展现出强大的缺陷识别能力,能满足实际巡检需求。性能测试中,在1000km线路规模下,系统响应时间控制在3s以内,资源占用率低于60%。压力测试表明,系统支持200

路视频流同时处理,具备良好的并发处理能力和稳定性,可应对大规模线路巡检任务<sup>[4]</sup>。现场验证环节,在3个省级电网开展试点应用,累计检测缺陷12,356处。对比人工巡检结果,系统漏检率仅2.1%,误检率控制在1.5%以内,性能表现优异。该系统的成功应用,标志着高压输电线路巡检进入智能化时代,为构建新型电力系统提供了技术支撑。未来研究将聚焦于多模态数据融合与迁移学习技术应用,进一步提升系统在极端环境下的适应能力。

#### 结束语

本文围绕基于机器视觉的高压输电线路部件缺陷识别技术展开研究,从部件缺陷分析到算法改进,再到系统设计与实现,形成完整技术体系。经多维度测试与现场验证,系统性能优良,有效提升巡检效率与准确性。未来将聚焦多模态数据融合与迁移学习,增强系统在极端环境适应性,持续推动高压输电线路巡检智能化发展,为电网安全稳定运行提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1]冯伦.多光谱图像融合技术在输电线路无人机巡检中的应用与效率分析[J].流体测量与控制,2024,5(06):8-11.
- [2]陈嘉琛,俞曜辰,陈中,等.基于改进YOLOv3的输电线路缺陷识别方法[J].南方电网技术,2021,15(01):114-120.
- [3]林俊省,郭锦超,王昊.基于AI图像识别的输电线路缺陷自动识别技术研究[J].数字技术与应用,2020,38(12):147-149.
- [4]方志丹,林伟胜,范晟,等.基于层级识别模型的输电线路杆塔小金具缺陷识别方法[J].电力信息与通信技术,2020,18(09):16-24.