

高压输电线路轻量化绝缘子缺陷检测技术分析

张鑫, 陶智鹏

宁夏超高压电力工程有限公司, 宁夏 银川 750000

DOI:10.61369/WCEST.2026020024

摘 要 : 为切实解决以往我国高压输电线路中, 轻量化绝缘子缺陷隐蔽性强、传统检测手段效率低等现实挑战, 本文将围绕绝缘子缺陷检测技术的优化路径开展分析讨论, 根据轻量化复合材料、绝缘子缺陷的演化规律, 提出非接触感知、边缘计算、AI推理等技术的应用策略。并基于工程案例, 验证技术实施效果, 最终发现, 该技术体系可实现缺陷检出率提升90%以上, 运维成本降低60%, 能够为同类工程提供技术参考。

关 键 词 : AI推理; 绝缘子缺陷检测; 边缘计算; 分级预警

Analysis of Lightweight Insulator Defect Detection Technology For High Voltage Transmission Lines

Zhang Xin, Tao Zhipeng

Ningxia Ultra High Voltage Power Engineering Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750000

Abstract : In order to effectively solve the practical challenges of strong concealment of lightweight insulator defects and low efficiency of traditional detection methods in China's high-voltage transmission lines in the past, this paper will analyze and discuss the optimization path of insulator defect detection technology, and propose the application strategies of non-contact perception, edge computing, AI reasoning and other technologies according to the evolution law of lightweight composite materials and insulator defects. Based on the engineering case, the implementation effect of the technology is verified. Finally, it is found that the technical system can improve the defect detection rate by more than 90% and reduce the operation and maintenance cost by 60%, which can provide technical reference for similar projects.

Keywords : AI reasoning; insulator defect detection; edge calculation; hierarchical early warning

引言

轻量化绝缘子是指, 基于硅橡胶复合、轻质高强瓷等轻质材质制成, 重量相较于传统陶瓷降低50%左右的新型绝缘器件。它在高压输电线路中, 主要承担导线机械悬挂、高压电位隔离等作用, 具有抗污闪、易安装等优势, 适配大跨度输电场景。但此类绝缘子在使用中, 容易受强电场、机械应力等工况的影响, 进而产生劣化破损缺陷, 很容易造成绝缘失效、闪络跳闸。因此, 只有及时开展缺陷检测工作, 才能第一时间排查隐患, 维护电网安全运行。

一、高压输电绝缘子缺陷特征与检测原理

(一) 缺陷分类特征

轻量化绝缘子通常采用芯棒、护套、金具的一体化结构, 相关组件分别负责: 承担机械载荷; 绝缘防护; 线路连接。各部件的协同失效, 则是缺陷产生的核心诱因, 为此, 本文将结合实际工况特性以及失效机理, 将常见缺陷分为以下几类: 外观显性缺陷, 具体表现为伞裙开裂、粉化、端部密封胶脱落、金具锈蚀松动等。此类缺陷的形成原因为紫外线老化、酸雨侵蚀等外部因素引发, 缺陷位置主要集中在伞裙表面、金具连接部位; 内部隐性缺陷, 是指难以用肉眼识别的潜伏性缺陷, 主要包括芯棒开裂、

气泡、界面脱粘等, 多由生产工艺瑕疵、机械疲劳等因素导致, 缺陷初期无明显表征, 但在后期会快速引发绝缘击穿等重大事故; 性能劣化缺陷, 属于介于显性与隐性间的渐进式缺陷, 主要表现为绝缘电阻下降、介损增大等, 通常由长期电老化、热老化导致, 缺陷发展相对缓慢但不可逆。

(二) 缺陷检测核心原理

为保证上述缺陷的准确识别, 企业通常会针对不同类型缺陷的信号特性, 融合多物理场检测原理, 实现非接触、全覆盖检测, 具体原理可分为以下几类: 多模态光学视觉检测, 常用于检测外观显性缺陷, 利用可见光成像、红外热成像的协同感知, 捕捉缺陷触发的光学信号异变。其中, 可见光成像可直接依靠高清

相机，拍摄绝缘子表面图像，识别伞裙破损、金具松动等宏观缺陷。而红外热成像，则可基于缺陷部位绝缘性能下降，产生的温度场异常，捕捉温差超过2℃的热像特征，以此判别零值绝缘子与内部发热缺陷；超声无损检测原理，该方法常用于识别内部隐性缺陷，主要利用超声波在不同介质界面的反射、透射特性，实现内部缺陷定位。当超声波传入轻量化绝缘子内部，并遇到芯棒裂纹、脱粘等缺陷后，会迅速产生特异性反射回波，借助分析回波幅值、时延的方式，便可判定缺陷位置、类型。考虑到轻量化复合材料本身具有的声阻抗特性，在检测时，更适合采用低频超声脉冲回波技术，其优势在于，穿透深度可达50mm以上，且对绝缘子结构无损伤，高度适配高空在线检测场景；边缘端智能判别，该技术是现阶段应用最广，是实现轻量化检测的核心支撑，通过将预处理后的光学、超声等信号特征输入轻量化AI模型，依靠特征匹配、分类判别，完成缺陷类型、等级的自动识别。且AI模型，也能基于轻量化神经网络架构，进一步压缩冗余参数，从而适配嵌入式硬件的算力限制，保证端侧的动态推理，规避数据回传的延时问题，因此，本文将以该技术作为研究对象，深入探讨技术具体应用要点与流程。

二、高压输电线路轻量化绝缘子缺陷检测技术的具体应用路径

根据上述分析可知，边缘端智能判别的推广度最高，且技术应用相对成熟，缺陷检测效率高，因此，本文将以该技术作为核心，在充分衡量高压输电线路运维场景、轻量化绝缘子缺陷特征后，构建五层递进式应用体系，保证各环节紧密衔接、协同联动，确保研究结果兼顾技术专业性和工程实用性。

（一）适配场景的信号采集

在缺陷检测作业开始前，操作人员需要优先梳理高压输电线路不同巡检场景，比如平原、山区、高海拔等，并集中部署轻量化、低功耗的感知设备，充分考虑设备重量大小、检测精度以及场景适配性，防止因设备过载，影响巡检效率。具体的部署模式可分为以下三种。

低空无人机轻量化挂载巡检，该方法是当下主流部署方式，主要针对轻量化绝缘子重量轻、杆塔分布广的特点，基于多旋翼无人机，并在此基础上，搭载轻量化多模态感知模块，比如可见光高清相机、红外热像仪、微型超声传感器等，模块总重量可控制在1.5kg以内，高度适配无人机续航与载重限制。通过由技术人员预先规划好巡检航线，依照杆塔定位、绝缘子串扫描、定点拍摄、数据存储的作业流程，可实现全自动巡检，巡检半径接近5km。针对山区等复杂场景，可凭借悬停聚焦检测模式，对疑似缺陷部位实施微距拍摄，进一步提升信号采集精度；

杆塔固定式传感部署模式，该方法本质上可归属为在线实时监测手段，需要操作人员在关键线路、高危杆塔的绝缘子串两端，部署微型电场传感器、温湿度传感器等，设备需依靠太阳能供电，采取低功耗传输设计形式，其体积大小仅有传统传感器的30%，因此安装更加便捷，也不会影响绝缘子机械性能。在数据

采集时，由传感器获取绝缘子运行参数，每10分钟上传一次数据，对缺陷进行24小时不间断监测，适用于人口密集区的常态化监测。

手持便携终端巡检模式，该方式简单来说，属于人工辅助补检，只适用于上述两种方式无法检测的死角区域，比如无人机无法覆盖的转角杆塔或是变电站内侧绝缘子。此时，需要运维人员携带轻量化手持检测终端，并确保其集成光学、超声检测功能，在近距离收集缺陷信号，此类终端设备的重量往往不足0.8kg，操作更加简便，可实现缺陷点位的精准定位^[1]。

（二）高效降噪与轻量化传输

在完成数据采集后，操作人员需要认识到此时整合的光学、超声、电场数据本身存在较高的冗余度，且噪声干扰较大，数据量极为庞大，若采取直接回传的方式，必然会造成带宽拥堵、延时过高。为解决此类问题，需要打造边缘端预处理、轻量化传输、云端汇聚的技术体系，推动数据的高效流转，以此高度适配高压输电线路的通信环境。

在边缘预处理阶段，操作人员要在无人机、杆塔传感器，部署嵌入式芯片，该芯片的主要作用在于，数据降噪、特征提取与冗余剔除。对于图像数据来说，可依靠高斯滤波+直方图均衡化算法，去除雾霾、抖动等噪声，强化缺陷特征。对于超声、电场数据，则更适合依靠小波变换算法，剔除电磁干扰、环境噪声，实现缺陷特异性特征的直接提取。同时，该芯片还可凭借数据降维、压缩编码的方式，将原始数据量压缩60%左右，在充分保留核心缺陷特征的基础上，降低传输负荷。

至于在轻量化传输阶段，则要考虑输电线路的通信条件，实施分层传输策略。比如：对于无人机巡检数据，可优先选择5G蜂窝网络传输，基于5G大带宽、低延时特性，实现高清图像、视频的实时回传；对于固定式传感器，则采用窄带物联网传输，其优势在于低功耗、广覆盖，可实现常态化监测结果的稳定上传；而对于偏远无通信信号区域，则应使用北斗短报文传输，该方法是指用北斗卫星导航系统独有的卫星通信功能，凭借北斗卫星中转，实现终端与管控端的双向简短数据、文字信息传输，能够保障数据不丢失。传输期间应借助加密协议，避免数据泄露，并设置优先级机制，让缺陷预警数据优先传输^[2]。

（三）轻量化AI缺陷识别模型部署

为避免因高压输电线路边缘端算力有限、缺陷小目标识别难度大等问题，影响缺陷的正常发现与处理，电力技术人员应积极学习国内外成功的工程案例，引入先进的数字化技术与设备，着手构建端侧轻量推理+云端模型迭代的AI部署策略。简单来说，便是需要技术人员采用改进RT-DETR、YOLOv8-Slim轻量化神经网络，融合量化剪枝、知识蒸馏等技术，将模型参数压缩至原来的1/5，以此降低模型的算力需求。该方法可高度适配无人机、传感器的嵌入式芯片。并在此基础上，打造绝缘子缺陷专属数据集，涉及不同工况、不同类型的缺陷样本，依靠数据增强、迁移学习，提升模型对微小缺陷、隐蔽缺陷的识别能力。而在端云协同部署上，则应由边缘端，实现推理，将前端预处理后的数据，输入轻量化模型，完成缺陷初步判别，标记疑似缺陷点位，生成

预警信息。由云端完成复核与模型迭代，接收边缘端上传的疑似缺陷数据，经模型复核后，修正判别结果，补充缺陷样本，持续优化模型参数^[3]。

（四）缺陷分级预警与闭环管控

在完成上述作业后，需要技术人员根据缺陷危害程度、发展速度，打造预警机制，结合电网运维管理体系，实现预警、派单、处置的闭环管控，防止缺陷扩大，避免引发安全事故。具体的缺陷分级标准为：一级（普通缺陷），比如伞裙轻微粉化、表面轻微污秽，不会影响线路正常运行，可将问题纳入常规巡检计划当中；二级（严重缺陷），比如伞裙局部开裂、金具轻微松动，需72小时内处置；三级（危急缺陷），比如芯棒开裂、绝缘电阻骤降，需立即停电处置。同时，AI模型可自动判定缺陷等级，基于数据库、专家系统，自动生成包含缺陷位置、类型、图片、处置建议的预警工单。预警工单在推送至对应运维班组后，由运维人员前往现场处置。直至处置结束后，上传复核检测数据，由系统自动比对处置前后缺陷特征，确认缺陷是否消除。若未彻底处置，则系统会再次派单，直至闭环。

（五）长效防控与技术迭代

在确定上述缺陷检测技术的实施路径后，电力企业也要进一步完善、改进轻量化绝缘子周期管理机制，致力于从源头降低缺陷发生率，大幅提升技术的应用长效性。比如设计与生产阶段，将缺陷检测数据反馈至生产厂家，让其针对性优化材质配方与生产工艺，尽可能减少内部瑕疵。在安装阶段，则用检测技术开展出厂检测、现场验收，杜绝不达标产品入网。在运行阶段，则落实常态化检测，设计缺陷演化数据库，预测缺陷发展趋势，实现预防性运维。在报废阶段，则凭借检测技术，判定绝缘子剩余寿命，筛选报废产品，避免过度更换与带病运行。与此同时，还要积极整合检测结果，迭代优化感知设备、AI模型，提升技术适配性与专业性^[4]。

三、案例验证

（一）案例概况

为验证上述方法的可行性与适用性，文章将以某省级电网

220kV 高压输电线路作为研究对象，根据实际调查发现，该线路全长126km，累计部署轻量化硅橡胶复合绝缘子826串，途经山区、重污秽区域，缺陷发生率较高。以往在采用传统人工巡检时，年均发现缺陷32处，漏检率超过25%，且巡检周期较长、成本支出偏高。为此，经技术团队综合讨论后，决定本次采用本文提出的轻量化绝缘子缺陷检测技术应用路径，累计部署无人机巡检模块3套、传感器46套，并基于人工智能算法、云计算、数据库，搭建了云端运维管理平台，开展为期6个月的工程验证。

（二）技术实施流程

具体技术应用路径表现为：前端感知设备部署，制定无人机巡检航线，每日自动巡检2条线路，传感器执行24小时实时监测任务；搭建边缘预处理与传输系统，保证数据的实时交互与回传；部署轻量化 AI 识别模型，完成专属数据集训练与端云协同调试；对接电网运维平台，构建分级预警机制；打造周期台账，同步优化运维流程。

（三）检测效果与性能分析

经6个月工程验证后，发现该技术路径可以完成全覆盖检测，共检出各类缺陷97处，缺陷检出率达96.2%，漏检率降至2.1%。而危急缺陷预警延时始终控制在5分钟以内，年均运维成本降低62%，巡检效率提升近8倍。由此可见，相较于传统检测技术来说，该路径对轻量化绝缘子微裂纹等隐藏缺陷的识别能力更高，可完全契合高压输电线路运维需求。

四、结论

综上所述，通过对高压输电线路轻量化绝缘子缺陷检测技术的实现路径开展分析讨论，借助前端轻量化感知部署，保证信号完整采集。依靠数据传输机制与边缘预处理，完成数据高效流转，提取缺陷特异性特征。结合 AI 缺陷识别模型，明确缺陷类型、位置。搭配缺陷分级预警与运维策略，维持输电线路的安全使用，显著提升输电线路安全水平。

参考文献

- [1] 韩旭，武警，吕肖飞.融合上下文信息的无监督图像重建绝缘子缺陷检测方法[J].信息化研究,2025,51(06):191-194.
- [2] 江浩田，任柳清，潘雄，等.基于 ResNeSt 和 RPN 的绝缘子缺陷检测方法[J].中国新技术新产品,2025,(14):17-20.
- [3] 刘梓良，尼鹿帕尔·艾克木，伊力哈木·亚尔买买提，等.面向嵌入式设备的绝缘子缺陷检测算法研究[J].电子测量技术,2025,48(14):74-85.
- [4] 陈永，安卓奥博，周建宇.基于扩散模型检测的高铁接触网绝缘子缺陷语义描述方法[J].电工技术学报,2025,40(13):4100-4111.