

电力电缆运维中局部放电检测技术优化与绝缘老化故障早期识别

海金国

宁夏宝丰能源集团股份有限公司 宁夏 银川 750000

摘要：电力电缆作为煤化工工业园区供电核心设施，其局部放电检测与绝缘老化识别技术对园区电网安全至关重要。本文聚焦检测技术优化与早期故障识别方法，提出多物理场耦合监测、传感器性能提升、信号去噪算法升级及多类型检测融合等技术路径，实现局部放电高灵敏度捕获与精准定位；通过局部放电特征参数量化、多维度特征提取及机器学习模型构建，完成绝缘老化程度评估与故障早期识别。

关键词：电力电缆；局部放电检测技术；绝缘老化识别

引言：煤化工工业园区规模持续扩张、用电需求不断攀升，电力电缆作为关键基础设施，其运行可靠性影响园区供电安全与生产稳定。局部放电是绝缘缺陷的早期“预警信号”，可提前数月甚至数年暴露潜在故障，检测精度与及时性关乎预警效能；绝缘老化是电缆性能退化的核心因素，早期识别能力影响运维策略的科学性与经济性。但传统检测方法灵敏度低、抗干扰差、数据融合难，难以精准诊断，制约了园区电网智能化运维。

1 电力电缆局部放电检测与绝缘老化识别的重要性

电力电缆是煤化工工业园区供电网络的“生命线”，其运行状态关乎园区电网安全与供电可靠性。优化局部放电检测与绝缘老化早期识别技术，是保障电力电缆全生命周期健康管理的核心，对园区电力系统稳定意义重大。局部放电是电缆绝缘缺陷的早期征兆，微小放电能量累积会加速绝缘劣化；采用多物理场耦合监测（电-声-热联合检测）、高频电流传感器阵列化布局、人工智能模式识别算法等优化检测技术，能高灵敏度捕获并精准定位局部放电信号。这可在故障萌芽时识别潜在缺陷，避免突发性停电冲击煤化工生产，为检修策略提供科学支撑，降低非计划停运风险。绝缘老化是电缆性能退化的主因，其早期识别要突破传统周期性检修局限；通过优化介电响应特性分析、建立大数据老化特征库、应用深度学习模型动态评估绝缘状态，可实现从“被动维修”到“预测性维护”的转变。这既能延长电缆寿命，减少频繁更换造成的资源浪费，又能降低全生命周期成本，提升园区电网运营的经济效益。技术优化上，要着重提升检测精度、增强抗干扰能力；优化特高频传感器布点策略以减少背景噪声干扰，利用数字孪生技术构建电缆三维绝缘状态模型，实现故障演化可视化

追踪^[1]。这些革新可提高检测结果可靠性，为绝缘老化机理研究提供数据支持，推动电缆运维从“经验驱动”迈向“数据驱动”。

2 电力电缆局部放电现有检测技术优化

2.1 检测传感器性能优化与适配性提升

煤化工工业园区电力电缆局部放电检测中，传感器性能优化与适配性提升是技术革新的核心环节，现有传感器需在灵敏度、抗干扰能力及环境适配性方面实现突破。在灵敏度优化方面，通过纳米材料改性提升传感元件的电荷捕捉能力，例如采用石墨烯复合涂层的高频电流传感器，可增强对微弱放电信号的捕获效率，使检测下限突破皮安级。同时采用多频段协同检测策略，结合特高频（UHF）与高频电流（HFC）传感器，实现从低频到高频的全频段信号覆盖，避免单一频段检测的盲区。抗干扰能力提升需聚焦信号处理算法与硬件设计双重优化，通过数字滤波器与小波变换算法，可有效抑制背景噪声与电磁干扰，提高信噪比；硬件层面，采用屏蔽层优化设计与差分放大电路，减少外部电磁场对传感器的耦合影响，确保检测信号的真实性和完整性。适配性提升需考虑不同电缆类型（如交联聚乙烯、乙丙橡胶）与煤化工工业园区复杂运行环境（如高温、高湿、强电磁场及化学腐蚀环境）的差异。通过模块化传感器设计，实现快速适配不同电缆规格；采用环境补偿算法，动态调整检测阈值，避免环境因素导致的误判。

2.2 局部放电信号去噪与干扰抑制技术优化

局部放电信号易受电磁辐射、工频干扰及环境噪声影响，传统去噪方法存在信号失真、干扰抑制不彻底等问题，技术优化核心围绕算法升级、软硬件协同及信号筛选机制展开，实现噪声与有效信号的精准分离。算法

层面,采用改进型小波阈值算法,通过自适应调整阈值算子,平衡传统硬阈值与软阈值的缺陷,在收缩噪声系数的同时完整保留放电脉冲特征。融合变分模态分解与独立分量分析技术,将混合信号分解为多个模态分量,通过盲源分离剥离不同类型干扰,提升复杂噪声环境下的信号提纯效果。硬件协同优化聚焦干扰源头抑制,配置专用检测阻抗削弱工频及低频干扰,结合差分传感技术增强抗电磁辐射能力,采用双通道同步采集架构,通过数字差分处理剔除共模干扰,搭配宽频带滤波模块针对性捕获有效信号,避免频段外噪声混入采集环节^[2]。信号筛选机制上,优化时间窗动态调节功能,通过相位扫描精准框选放电脉冲所在区域,屏蔽相位外干扰信号。结合放电图谱特征建立干扰识别模型,通过脉冲极性、波形轮廓等特征鉴别,进一步降低误判率,确保去噪后信号的完整性与纯净度,为局部放电精准检测提供可靠数据支撑。

2.3 多类型检测方法融合互补优化

单一检测技术存在固有局限,特高频检测灵敏度高但抗干扰弱、低频捕捉不足,超声波定位精准却易受介质衰减影响,脉冲电流法灵敏性突出但需配合信号激发、易受线路干扰,多类型方法融合通过技术协同突破这些瓶颈。信号采集采用“光-电-场”多传感协同模式,同步捕获放电光信号、特高频信号与电场波动特征;荧光光纤传感增强抗电磁干扰能力,填补特高频检测的低频盲区,电容传感器适配不同电压等级电缆,高效捕捉电场动态数据,形成全频段覆盖。技术手段上,外施振动技术与脉冲电流法结合,动态调整参数激发隐蔽缺陷放电响应,搭配声电联合检测,通过时间戳同步处理信号,整合超声波定位优势与电信号高灵敏度特点。同时构建“离线精准诊断-在线持续监测”体系,依托振荡波离线检测的近似工频优势与在线监测实时性,经多源数据交叉验证,实现缺陷精准定位与类型判别,为绝缘老化故障早期识别提供全面技术支撑。

2.4 检测数据实时处理与分析方法优化

检测数据实时处理与分析的核心优化方向,是解决海量数据传输延迟、特征提取不精准、干扰信号误判等问题,通过技术协同实现数据处理效率与分析准确性的双重提升。实时预处理与传输优化采用边缘计算架构,将数据处理任务下沉至监测终端,减少云端传输压力与延迟,实现局部放电信号就地快速处理。结合分布式采集模式与时分复用传输技术,通过光纤通道同步传输多源监测数据,避免长距离传输中的信号衰减与干扰,保障数据传输稳定性与完整性。智能分析算法升级聚焦精

准识别,引入改进型神经网络模型,融合K均值聚类算法与模拟退火算法优化模型结构,提升模式识别效率与正确率。通过主成分分析法提取放电信号关键特征量,简化数据维度,同时整合局部放电相位分布图谱、脉冲序列相位分布图谱等特征,构建多维度分析体系^[3]。通过多源数据交叉验证,结合放电信号幅值、相位、波形等参数,精准研判局部放电类型与严重程度,为绝缘老化故障早期识别提供可靠数据分析支撑。

3 电力电缆绝缘老化故障早期识别方法

3.1 基于局部放电特征参数的老化程度评估

煤化工工业园区电力电缆绝缘老化程度评估可通过局部放电特征参数的量化分析实现。局部放电产生的脉冲信号包含放电幅值、放电重复率、相位分布模式及能量谱特征等关键参数,这些参数与绝缘材料的老化状态密切相关,可作为评估绝缘劣化程度的核心指标。放电幅值与重复率是反映绝缘缺陷严重程度的直接参数,随着绝缘老化加剧,局部放电的幅值分布范围会逐渐扩大,且高幅值放电的重复率显著增加;通过统计不同幅值区间的放电次数,可构建放电幅值-重复率分布曲线,其斜率变化可量化评估绝缘老化速率。相位分布模式(PRPD图谱)能揭示放电类型与绝缘缺陷的关联性,例如水树枝老化会导致放电相位集中在电压上升沿,而电树枝老化则表现为全相位随机放电;通过提取PRPD图谱的统计特征(如偏斜度、峭度),可建立放电模式与老化类型的映射关系。能量谱特征分析可进一步量化绝缘劣化程度,老化绝缘的放电能量谱通常呈现高频分量增加、低频分量衰减的趋势;通过计算能量谱重心频率与带宽,可构建绝缘老化指数,实现老化程度的连续评估。

3.2 绝缘老化故障早期特征的提取与量化

煤化工工业园区电力电缆绝缘老化故障早期识别需聚焦于老化特征的精准提取与量化分析,绝缘材料在老化过程中,其物理、化学及电学特性会发生渐进性变化,这些变化可通过多维度特征参数进行表征与量化。电学特性方面,介质损耗因数($\tan\delta$)与绝缘电阻是反映绝缘劣化的核心指标,随着老化加剧,介质损耗因数会显著增大,而绝缘电阻则呈下降趋势;通过高频域(如1kHz~1MHz)的 $\tan\delta$ 频谱分析,可捕捉绝缘材料内部极化损耗的异常变化,量化老化引起的介电性能退化程度。化学特性方面,绝缘材料老化会释放特征气体(如CO、CO₂、甲烷等),其浓度与生成速率可反映老化类型与程度。通过气相色谱分析技术,可定量检测特征气体含量,结合气体生成动力学模型,建立老化阶段与气体浓度的映射关系^[4]。物理特性方面,绝缘层厚度变化与

局部放电形貌特征是重要量化参数,利用X射线或超声波测厚技术,可非破坏性测量绝缘层厚度,其缩减率与老化时间呈正相关;通过高速摄像机捕捉局部放电的光斑分布与形态,可提取放电区域面积、亮度等特征,量化绝缘缺陷的扩展速率。

3.3 机器学习在绝缘老化故障早期识别中的应用

机器学习技术为煤化工工业园区电力电缆绝缘老化故障的早期识别提供了高效的数据驱动解决方案,通过构建特征工程与智能算法的协同体系,可实现从多源检测数据中自动提取老化特征并完成故障分类,显著提升识别精度与效率。在特征工程层面,机器学习可融合局部放电参数(如放电幅值、重复率、相位分布模式)、绝缘电学特性(介质损耗因数、绝缘电阻)及化学特征(特征气体浓度)等多维度数据,构建高维特征向量。通过主成分分析(PCA)或t-SNE降维算法,可消除特征冗余,提取对老化状态敏感的核心特征,为模型训练提供优质输入。在算法选择上,监督学习算法如支持向量机(SVM)与随机森林(RF)适用于小样本场景,通过标注老化阶段样本训练分类模型,可实现早期、中期、晚期老化的精准划分;无监督学习算法如自编码器(AE)与聚类分析(K-means)则适用于未标注数据,通过挖掘数据内在分布规律,自动识别异常老化模式。深度学习中的卷积神经网络(CNN)可处理局部放电PRPD图谱的时空特征,而长短期记忆网络(LSTM)则擅长分析时序数据(如介质损耗因数动态变化),捕捉老化过程的演化趋势。

3.4 不同老化阶段故障识别模型的构建

煤化工工业园区电力电缆绝缘老化故障早期识别需针对不同老化阶段构建差异化模型,提升诊断精准度。绝缘老化通常分初期、中期和晚期三阶段,各阶段特征差异显著,要采用适配性算法与特征提取方法。初期老化阶段,绝缘材料以物理结构松散为主,局部放电信号微弱且频次高,介质损耗因数($\tan\delta$)仅轻微上升。此阶段模型需强化微弱信号检测能力,可用小波变换提取局部放电信号高频细节特征,结合支持向量机(SVM)构

建分类模型,通过优化核函数参数提升对初期老化识别灵敏度。中期老化阶段,绝缘内部形成微孔或水树枝,局部放电幅值与重复率增加, $\tan\delta$ 值上升至1%~3%,特征气体(如CO、CO₂)开始累积。此阶段模型需融合多源数据,可用随机森林算法,将放电特征、 $\tan\delta$ 频谱和气体浓度作为输入变量,通过特征重要性分析筛选关键参数,提高模型对中期老化特征表征能力。晚期老化阶段,绝缘层出现贯穿性缺陷,局部放电呈现高幅值脉冲, $\tan\delta$ 值超过3%,气体浓度急剧上升^[5]。此阶段模型需侧重故障定位与严重程度评估,可用卷积神经网络(CNN)处理局部放电相位分布图谱,结合长短期记忆网络(LSTM)分析 $\tan\delta$ 时序数据,实现晚期故障精准分类。

结束语:未来,煤化工工业园区电力电缆智能运维亟待突破技术瓶颈。一方面,要深化多物理场耦合下绝缘劣化机理研究,明晰局部放电、温变、应力等多因素协同规律,夯实精准诊断理论基础;另一方面,需加速检测技术与数字孪生、边缘计算、AI等新兴技术融合,达成全生命周期数据实时感知与智能分析。通过构建“感知-诊断-决策-执行”闭环健康管理系统,形成覆盖全环节的智能化方案,为煤化工工业园区电力系统建设筑牢可靠根基。

参考文献

- [1]冯小建.电力电缆绝缘缺陷的局部放电电压信号检测技术[J].消费电子,2025(5):44-46.
- [2]胡凯文,凌志婷,张婷婷.电力电缆绝缘电阻测试技术的改进与应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(8):099-102.
- [3]孙长群,涂京.基于局部放电的电力电缆状态监测技术研究[J].湖北电力,2024,48(3):111-119.
- [4]王乐程,陈泽宇.电力电缆初期绝缘故障检测技术分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(2):071-074.
- [5]唐丹,吴浩,蔡源.电力电缆早期故障诊断研究综述[J].电线电缆,2023(6):1-5.