

GIS 设备局部放电超声波检测与故障定位算法优化

罗 健

青岛华丰伟业电力科技工程有限公司 山东青岛

【摘要】本文围绕 GIS 设备的局部放电超声波检测与故障定位展开研究，提出了一种优化的信号处理与定位算法。通过改进超声波信号特征提取方法，提升噪声抑制与信号分辨能力；结合多传感器阵列与时差定位技术，实现对局部放电源的高精度三维定位。研究同时引入自适应滤波与改进的交叉相关算法，显著提高了检测灵敏度与定位精度。实验验证表明，该优化算法在复杂电磁环境下具有更高的鲁棒性与实用性，为 GIS 设备状态评估与故障预防提供了技术支持。

【关键词】GIS 设备；局部放电；超声波检测；故障定位；算法优化

【收稿日期】2025 年 10 月 24 日 **【出刊日期】**2025 年 11 月 24 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250209

Optimization of partial discharge ultrasonic detection and fault location algorithm for GIS equipment

Jian Luo

Qingdao Huafeng Weiye Electric Power Technology Engineering Co., Ltd. Qingdao, Shandong

【Abstract】This study investigates partial discharge ultrasonic detection and fault localization in GIS equipment, proposing an optimized signal processing and positioning algorithm. By improving the ultrasonic signal feature extraction method, we enhance noise suppression and signal resolution capabilities. The integration of multi-sensor arrays with time difference positioning technology enables high-precision three-dimensional localization of partial discharge sources. The research also incorporates adaptive filtering and an enhanced cross-correlation algorithm, significantly boosting detection sensitivity and positioning accuracy. Experimental verification demonstrates that the optimized algorithm exhibits enhanced robustness and practicality in complex electromagnetic environments, providing technical support for GIS equipment condition assessment and fault prevention.

【Keywords】GIS equipment; Partial discharge; Ultrasonic detection; Fault localization; Algorithm optimization

引言

随着电网向高压化和智能化发展，GIS 设备在电力系统中的地位愈发重要，其运行安全直接关系到供电可靠性。局部放电作为电气设备早期绝缘劣化的主要信号，对其高精度检测与故障定位具有关键意义。超声波检测因抗干扰性强、定位精度高而成为研究热点，但复杂环境下信号衰减、噪声干扰和多路径效应仍带来挑战。为应对这些问题，亟需通过算法优化实现信号提取与源点定位的精确化，提高检测结果的可信度与鲁棒性。

1 复杂电磁环境下 GIS 设备局部放电检测挑战

GIS 设备在高压电力系统中应用广泛，局部放电作为其绝缘系统劣化的早期特征，是评估设备运行状态与预防故障的重要依据。在复杂电磁环境下，局部放电信号往往极为微弱，且容易受到高压开关操作、电磁

波干扰和背景噪声等多种因素影响，导致检测难度显著增加。超声波检测技术因具有非接触、抗电磁干扰和实时性强的特点，被广泛应用于 GIS 设备局部放电的监测^[1]。GIS 内部空间狭小、结构复杂，导致超声波信号在金属腔体内传播时易出现多路径效应和反射干扰，影响信号的完整性和准确性，使得在高噪声环境中有效提取局部放电特征成为一项重大挑战。

在局部放电超声波检测过程中，信号衰减与噪声叠加是制约检测精度的关键问题。高压 GIS 设备通常处于强电磁场环境，局部放电产生的超声波幅度极低，与周围高频干扰信号相比信噪比非常有限。复杂的设备结构使得不同部位的传感器接收到的信号幅值、到达时间和相位特性存在显著差异，造成信号畸变和特征模糊。机械振动、空气流动等外部因素也会引入额外干扰，导致传统信号采集与处理方法难以实现高可靠

性的特征分离。为了提升超声波检测在 GIS 设备中的适应性,需要在传感器布局、信号预处理和噪声抑制策略上进行全面优化,从源头上提高局部放电信号的可检测性和可分辨性。

在实际工程应用中,超声波信号的高精度采集与有效分析是故障定位算法优化的核心基础。随着电力系统电压等级的提升和 GIS 设备应用规模的扩大,局部放电检测任务的复杂性进一步增加,要求检测系统具备更高的灵敏度和抗干扰能力。为实现高精度故障定位,研究者逐渐引入自适应滤波、波形重构、多通道信号融合等先进信号处理技术,并结合多传感器阵列布局提高超声波到达时间差的计算精度^[2]。这些优化策略能够在复杂电磁环境中显著提升检测效率和准确率,为后续的局部放电源点三维定位和 GIS 设备状态评估提供坚实的数据支撑。

2 超声波信号特征提取与噪声抑制优化方法

在 GIS 设备局部放电超声波检测中,信号特征提取的精度直接决定故障定位与状态评估的可靠性。局部放电过程中产生的超声波信号能量低、持续时间短,且常与背景噪声混叠,导致原始信号特征模糊不清。为了有效获取放电特征,需对原始信号进行多维度处理,通过小波包分解、经验模态分解等方法实现时域与频域的联合分析,提取信号的能量谱特征、包络特征和瞬时相位特征^[3]。这些高分辨率特征参数不仅能够刻画局部放电的物理过程,还为后续故障定位算法提供了高精度输入数据。在此过程中,传感器的频率响应与采样率需要严格匹配,确保超声波信号在高频段的细节不被损失,从而实现局部放电源特征的精准重建。

噪声抑制是提升超声波检测有效性的关键环节。GIS 设备所处环境中存在大量机械振动、开关操作噪声及外部电磁干扰,这些干扰会导致超声波信号信噪比大幅降低。为解决这一问题,研究中逐渐引入基于自适应滤波与独立成分分析的多通道降噪策略,通过对多传感器采集信号的联合建模,实现背景噪声与有效信号的动态分离。利用改进型交叉相关算法与短时傅里叶变换技术,能够有效定位信号的主频成分并衰减低能量杂波,从而显著提升局部放电信号的可检测性。在强噪声背景下,该类优化方法能保留更多超声波原始细节信息,确保特征提取阶段的稳定性与准确性。

在信号特征提取与噪声抑制过程中,融合多源信息的优化策略成为提升检测性能的重要方向。通过联合分析多传感器的时域波形、频谱特性与相位差数据,可以在高噪声场景下实现更鲁棒的特征判别^[4]。结合机

器学习算法建立局部放电信号模式识别模型,利用训练样本提取信号的高维非线性特征,实现对不同类型放电的分类与识别。该方法不仅提升了特征提取与噪声抑制的整体效率,也为局部放电源点的高精度定位提供了坚实的数据支持。在复杂电磁环境中,这种优化策略能够兼顾实时性与准确性,为 GIS 设备状态监测和故障诊断提供可靠的技术基础。

3 多传感器阵列与时差定位算法的改进研究

在 GIS 设备局部放电超声波检测中,多传感器阵列的应用为提高故障定位精度提供了更可靠的数据支持。由于 GIS 内部结构复杂、金属腔体封闭,超声波信号在传播过程中会产生多路径效应和能量衰减,单一传感器的测量结果往往难以准确反映放电源的真实位置。多传感器阵列通过在设备关键位置布置多个高灵敏度超声波传感器,能够同时采集不同空间位置的信号数据,并利用阵列的空间分布特性实现对信号到达时间、相位及幅度的联合分析^[5]。这种方法在提高信噪比的同时增强了空间分辨率,为局部放电信号源的精确定位奠定了基础。

在多传感器数据采集的基础上,时差定位算法的改进成为提升检测精度的关键环节。传统的到达时间差 (TDOA) 算法在实际应用中容易受到噪声、回波和信号畸变的影响,导致定位误差偏大。通过引入基于改进型广义互相关 (GCC-PHAT) 的方法,能够在频域上对各传感器采集到的信号进行相干处理,有效抑制多路径干扰并增强时延峰值的可辨性。结合最小二乘拟合与迭代加权策略,对不同传感器节点的时差信息进行多轮优化计算,提高局部放电源三维定位的稳定性和准确度。这种方法在保证计算效率的同时,还能够应对复杂环境下信号到达时间差异显著的问题,实现更高精度的故障源定位。

为了进一步提升 GIS 设备局部放电检测的可靠性,研究中逐渐引入多通道信号融合与贝叶斯优化模型,将多传感器阵列获取的时差、相位及幅度信息综合处理,建立更精确的空间定位模型。通过在算法中引入卡尔曼滤波与概率统计推断机制,可以动态修正测量误差,显著提高实时定位的鲁棒性^[6]。结合机器学习模型对历史检测数据进行训练,能够预测局部放电源可能的分布区域,并在新检测中实现定位精度的自适应优化。这种基于多传感器阵列与改进型时差定位算法的综合方法,不仅能够应对高噪声和复杂传播路径等挑战,还能显著提升局部放电故障源的识别效率,为 GIS 设备的在线监测与智能诊断提供坚实的技术支持。

4 基于优化算法的 GIS 设备局部放电定位实验验证

在 GIS 设备局部放电检测研究中, 基于优化算法的实验验证是评估检测精度与定位性能的核心环节。通过搭建真实 GIS 设备局部放电实验平台, 模拟不同类型的放电缺陷, 包括悬浮电极、尖端放电及绝缘表面沿面放电, 能够获得多样化的超声波信号样本^[7]。在实验中将高灵敏度超声波传感器按照优化后的阵列布局安装在 GIS 设备壳体关键位置, 利用高速数据采集系统同步记录多通道信号, 确保时域、频域及相位信息的完整性。通过引入改进型信号特征提取算法, 对采集的原始超声波信号进行降噪、去混叠与特征增强处理, 从而显著提升局部放电信号的识别能力和可分辨性, 为后续故障源精确定位提供可靠数据支持。

在实验数据处理阶段, 优化后的时差定位算法通过改进型广义互相关与多传感器阵列协同计算, 实现了更高精度的到达时间差估计。通过将提取的信号特征参数与多通道测量结果进行融合分析, 建立局部放电源的三维空间定位模型。利用迭代加权最小二乘法对定位结果进行多轮优化修正, 有效降低由噪声、回波及信号失真引起的误差。引入贝叶斯优化方法对传感器间距和算法参数进行自适应调整, 实现定位结果在复杂环境下的动态优化。实验结果表明, 优化算法在多源干扰背景下仍能保持高稳定性和高灵敏度, 其平均定位误差显著低于传统方法, 为 GIS 设备局部放电故障诊断提供了更可靠的技术保障。

在实验验证的对比分析中, 将优化算法与传统检测方法进行性能评估, 结果显示优化算法在信噪比提升、特征提取精度和定位速度等方面均表现出显著优势。高分辨率超声波信号的精确提取与时差计算的高稳定性, 使得局部放电源点的空间定位精度得到有效提升^[8]。结合多批次实验数据统计分析, 优化算法在不同放电类型、不同传感器布置及不同电压等级下均表现出良好的泛化能力与鲁棒性。这一结果表明, 基于优化算法的 GIS 设备局部放电定位方法能够为实际工程应用提供可行方案, 同时为后续的智能化状态监测与设备健康评估提供坚实的数据支撑和技术基础。

5 结语

本研究围绕 GIS 设备局部放电超声波检测与故障

定位展开, 针对复杂电磁环境下信号微弱、噪声干扰强和多路径效应显著等问题, 提出了多维度的优化策略。基于改进的信号特征提取方法、噪声抑制技术以及多传感器阵列与时差定位算法, 显著提升了检测灵敏度与定位精度。实验验证表明, 该优化算法在高噪声条件下依然保持高稳定性和高鲁棒性, 为 GIS 设备的状态监测、故障诊断和安全运行提供了技术支撑, 并为后续智能化监测系统的研究奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 王劭鹤,赵琳,杨勇,等. 基于振动信号格拉姆角场增强的 GIS 设备运行状态辨识方法[J].高压电器,2025, 61(08): 39-46.
- [2] 谢凌东,沈科炬,高朋,等. 基于日盲紫外光学探测技术局部放电目标的原理与模型验证[J].自动化技术与应用, 2025,44(08):20-24.
- [3] 王永强,程倩,薛玉栋,等. 热老化下不同油-纸绝缘材料的局部放电劣化机理研究[J/OL].绝缘材料,1-9[2025-08-25].
- [4] 徐承军,张鹏,张锐辉,等. 基于多尺度特征融合学习的港口高压开关柜局部放电模式识别[J].起重运输机械,2025, (14):46-53+63.
- [5] 厉洪滨,李鹏,孔相欢,等. 基于鲸鱼算法的绝缘局部放电特征优化及模式识别研究[J].自动化与仪表,2025, (07): 281-285.
- [6] 周洪源,成波,陈岳军. GIS 技术在城市照明领域的应用研究[J].中国照明电器,2025,(07):17-24.
- [7] 张泽,徐兴春,朱岩泉,等. 考虑电磁干扰抑制的架空线路绝缘子局部放电声电联合定位[J].自动化与仪表,2025, 40(07):102-106.
- [8] 余敏,吴佩颖,张磊. 基于多传感器融合技术的 GIS 局部放电红外监测方法[J].自动化与仪表,2025,40(07):74-79.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS