

引用格式:陈莹晶,姚沈炯,柴嘉洛,等.基于声波阵列、特高频和暂态地电压融合的开关柜缺陷放电检测与定位研究[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):319-330.

Citation: CHEN Yingjing, YAO Shenjiong, CHAI Jialuo, et al. Research on detection and localization of defect discharge in switchgear based on fusion of acoustic array, ultra-high frequency, and transient earth voltage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 319-330.

基于声波阵列、特高频和暂态地电压融合的 开关柜缺陷放电检测与定位研究

陈莹晶,姚沈炯,柴嘉洛,路通通,李斌同,张周胜

(上海电力大学电气工程学院,上海 200090)

摘要:为实现开关柜局部放电的高效分类与三维定位,设计了一种融合暂态地电压、特高频与声波阵列 3 类信号的一体化圆形阵列传感器,提出多模态融合分类模型与改进的非线性冠豪猪优化算法。首先,通过结构集成与性能测试,构建具备多通道采集能力的传感器系统。其次,基于九维时频域特征构建神经网络模型,实现多类放电缺陷的准确分类。最后,提出结合 $|\Delta|$ 值时差筛选与交叉相关算法的时延提取方法,构建具有物理约束的一致性目标函数,并改进冠豪猪优化算法以提升定位的鲁棒性与稳定性。实验结果表明,缺陷分类准确率达 91.38%,定位误差控制在 10 mm 量级,验证了该方法在分类能力与定位效果方面的有效性。研究为电气设备局部放电检测与定位提供了新的技术方案。

关键词:开关柜;局部放电;一体化传感器;多模态融合;检测与定位

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.030 中图分类号: TM85 文章编号: 1673-9140(2026)01-0319-12

Research on detection and localization of defect discharge in switchgear based on fusion of acoustic array, ultra-high frequency, and transient earth voltage

CHEN Yingjing, YAO Shenjiong, CHAI Jialuo, LU Tongtong, LI Bintong, ZHANG Zhousheng
(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: To achieve efficient classification and three-dimensional (3D) localization of partial discharge (PD) in switchgear, an integrated circular array sensor combining three types of signals, namely transient earth voltage (TEV), ultra-high frequency (UHF), and acoustic array (AA), is designed. A multimodal fusion classification model and an improved nonlinear crested porcupine optimizer (CPO) algorithm are proposed. First, a sensor system with multi-channel acquisition capability is constructed through structural integration and performance testing. Second, a neural network model is built based on nine-dimensional time-frequency domain features to achieve accurate classification of multiple types of discharge defects. Finally, a time delay extraction method combining $|\Delta|$ -value time difference screening and a cross-correlation algorithm is proposed, and a consistency objective function with physical constraints is constructed. The CPO algorithm is improved to enhance the robustness and stability of localization. Experimental results indicate that the defect classification accuracy reaches 91.38%, and the localization error is controlled at the 10 mm level, validating the effectiveness of the method in terms of classification capability and localization performance. This study provides a new technical solution for the detection and localization of partial discharge in electrical equipment.

Key words: switchgear; partial discharge; integrated sensor; multimodal fusion; detection and localization

收稿日期: 2025-02-11; 修回日期: 2025-06-04

基金项目: 上海市科技计划项目(21DZ2205000)

通信作者: 张周胜(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力设备电气绝缘在线监测与故障诊断等方面的研究; E-mail: shengzz@shiep.edu.cn

开关柜是电力系统中关键的高压设备,其内部局部放电是绝缘退化的重要前兆,直接关系到设备运行的安全性与稳定性。实现对局部放电的准确识别与三维定位,对于提升电网故障预警能力具有重要意义。

为提升局部放电检测的准确性,研究者在识别与定位两方面展开深入探索。在识别方面,通过提取暂态地电压、特高频与声波阵列等信号的特征,结合神经网络等模型实现多类缺陷的自动分类^[1-6]。在定位方面,采用降噪处理、相干平均和时延筛选等方法^[7-12]提升时延精度,结合优化算法实现三维坐标反演^[13-15]。同时,为增强系统抗干扰能力,多模态一体化传感器不断涌现,如声-暂态地电压、声-特高频等组合结构^[16],有效促进识别与定位的融合应用。

基于上述研究基础,本文提出一种集成暂态地电压、特高频和声波阵列3类信号的圆形阵列一体化传感器,该传感器具备多通道采集与处理能力,从而形成多维信息融合的检测方式。在缺陷分类阶段,针对四类局部放电信号的特征差异,构建包含九维时频域特征的神经网络模型,实现多种典型缺陷的准确分类;在定位阶段,提出结合基于 $|\Delta|$ 值的时延筛选与交叉相关的声电时延提取方法,有效提升到达时间差(time difference of arrival, TDOA)传感器子集的选择精度。进一步引入物理一致性约束构建目标函数,并在此基础上改进冠豪猪优化算法,以提高三维定位的鲁棒性与全局收敛能力。实验结果表明,多维特征下的神经网络模型能准确进行缺陷分类,所提定位方法可将定位误差控制在毫米级,一体化传感器检测展现出良好的适应性与实用性,实验验证了本文传感器设计、多模态分类与三维定位算法的可行性。

1 一体化传感器设计

1.1 检测原理

开关柜内部发生局部放电(partial discharge, PD)时,放电产生的电磁波以光速向外辐射。一部分电磁辐射在柜体缝隙处形成瞬态感应电压^[17],主要频段为1~100 MHz,具有非接触获取能力,一般利用平板电容式传感器测量。

特高频(ultra high frequency, UHF)信号通过空气传播,其频率覆盖范围在300 MHz~3 GHz,具备

抗干扰性强、信息保持完整的特点,可为定位提供精确时间基准^[18-19]。

声波信号由放电导致的介质密度变化产生,其在空气中传播并被声波传感器捕捉。声波传播速度远低于电磁波,具备良好的时延分辨能力,适用于放电类型分类与阵列法定位的精细化建模^[20-21]。

1.2 一体化传感器阵列设计

基于3种检测法各自的优势,本文设计了暂态地电压、特高频、声波阵列三合一传感器阵列。

暂态地电压(transient earth voltage, TEV)模块采用铜箔-环氧树脂构成的电容耦合板,用于感知瞬态地电压信号,具有非接触、特征信息丰富等优点;特高频模块选用圆形微带天线结构,具备高频响应快、信号保持完整等特性,适合用作高精度时间基准;声波阵列模块采用对称性强、指向性平滑的8通道均匀圆形麦克风阵列(micro-electro-mechanical systems, MEMS)结构作为采集单元^[22-23],为后续分类、定位创造更优条件。

各功能模块通过聚氨酯(Polyurethane, PU)支撑层实现电气隔离与结构固定,阵列整体保持圆形对称,利于实现多方向信号的一致性采集与后续融合处理。一体化传感器阵列整体设计如图1所示。其中,1为环氧树脂板,2为铜箔,3为超声麦克风,4为开关柜壁,5为磁铁,6为PU。

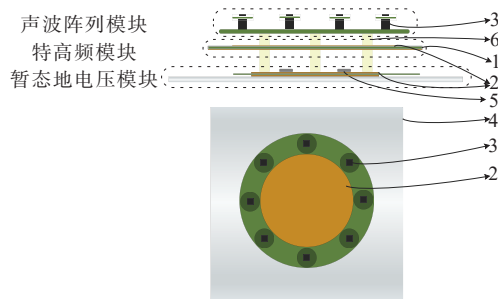


图1 一体化传感器阵列设计

Figure 1 Design of integrated sensor array

1.3 传感器关键参数性能测试

为确保设计的各部分传感器满足检测要求,使用频谱分析仪、网络分析仪及信号发生器对各模块进行性能测试。

暂态地电压传感器中,其电容 C 与后端阻抗匹配的程度是该信号传输效率的关键。因此,需计算理论电容参数,并与实际结构建模匹配,即

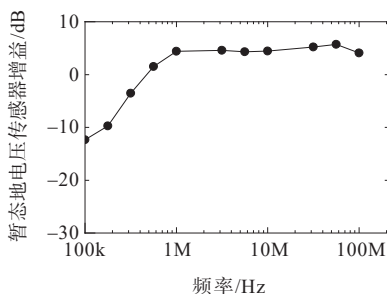
$$C = \frac{1}{Z \cdot 2\pi f} \quad (1)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{h} \quad (2)$$

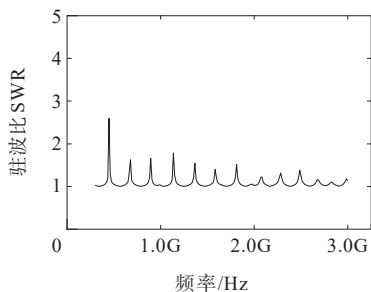
其中,式(1)为理论电容公式,式(2)为实际结构建模公式,阻抗 $Z=50 \Omega$, 频率 $f=100 \text{ MHz}$, ϵ_0 、 ϵ_r 分别为真空介电常数、相对介电常数, A 为铜箔面积, h 为环氧板厚度。两者计算电容后,发现理论与实际电容存在差值。

为补偿电容差存在的增益不足,引入低噪声放大器保证信号增益补偿与噪声抑制,为后端分析打下基础。

经仪器测试,暂态地电压模块在频段内增益曲线平稳,响应特性良好;特高频模块驻波比(standing wave ratio, SWR)普遍低于 2,满足高频接收要求;声波阵列模块选用的 MEMS 麦克风检测频带能够满足常见局放声信号的采集要求^[22]。传感器相应性能参数如图 2、表 1 所示。



(a) 暂态地电压传感器增益曲线



(b) 特高频传感器参数曲线

图 2 电信号传感器参数

Figure 2 Parameters of electrical signal sensors

表 1 麦克风传感器工作参数

Table 1 Operating parameters of microphone sensors

检测频带/ kHz	谐振频率/ kHz	灵敏度峰 值/dB	灵敏度均 值/dB	指向性
20~80	37	25	10	全方位

为实现从信号获取到分类识别、三维定位的完整流程,系统整体架构包括局放信号采集单元与信号处理单元两部分。采集部分集成声波阵列、特高

频、暂态地电压三类通道,通过 8 路声信号与 2 路电信号完成同步采集。信号被采集后送入计算机(personal computer, PC)端,进行缺陷类型分类与局部放电定位。系统搭建的完整硬件平台示意图如图 3 所示。

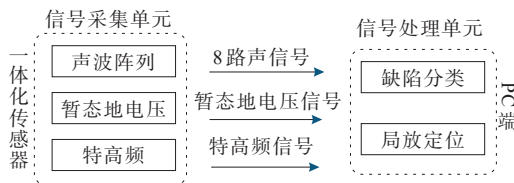


图 3 开关柜局部放电识别定位示意

Figure 3 Schematic diagram of PD identification and localization in switchgear

2 开关柜局部放电缺陷识别与定位

2.1 特征提取与分类模型设计

本文以一体式传感器采集的暂态地电压、特高频、声波阵列 3 类局部放电信号为基础,将每类信号的时域均值、方差与频域主频值合计 9 项特征作为输入量,并使用神经网络(neural network, NN)模型进行故障识别^[6,24]。时域均值、方差、主频峰值分别为

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (4)$$

$$f_{\text{peak}} = f(\arg \max |P_{xx}(f)|) \quad (5)$$

式中, x_i 为原始信号; μ 、 σ^2 分别为均值与方差; N 为信号长度; $P_{xx}(f)$ 为信号的功率谱密度; f_{peak} 为该索引对应的主频。

式(3)、(4)描述了信号时域的整体趋势、离散程度,为模型学习提供不同缺陷的放电信息;式(5)通过对最大功率主频成分的提取分析,提升模式识别的准确率。

为减小不同量纲特征对模型训练收敛速度和准确率的影响,采用了标准化方式对输入特征进行处理,即

$$x' = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (6)$$

式中, x 为原始信号; x' 为标准化后的数据值; μ 、 σ 具体见式(3)、(4)。

本文使用的神经网络学习模型采用多层感知机(multilayer perceptron, MLP)作为缺陷分类模型,结构如图 4 所示。该网络包括输入层、两层 ReLU

激活的全连接层,以及 Softmax 输出层。全连接层完成特征空间映射学习与非线性表达,输出层实现

4类缺陷的概率判别,最终输出分类结果。局部放电缺陷分类流程如图5所示。



图4 神经网络模型分类结构

Figure 4 Structure diagram of neural network model for classification

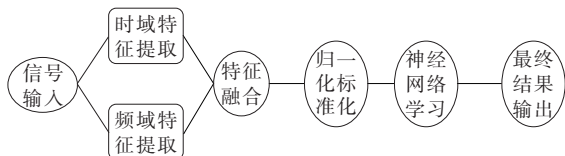


图5 局部放电缺陷分类流程

Figure 5 Flowchart of PD defect classification process

2.2 基于到达时间差的时差筛选方法

以开关柜电缆室右下角为原点 $O(0, 0, 0)$ 建立三维坐标系,对应三维模型与传感器各部分空间坐标如图6、表2所示。

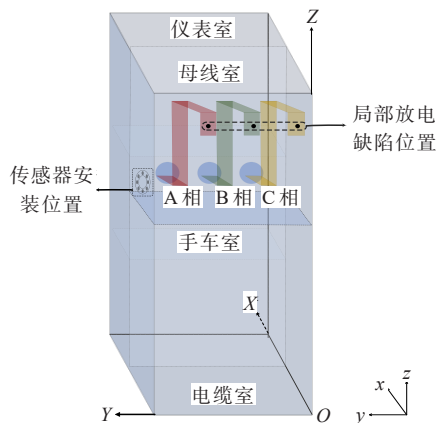


图6 开关柜局部放电三维模型示意

Figure 6 3D model of PD in switchgear

表2 一体式传感器各部分三维坐标

Table 2 3D coordinates of integrated sensor components mm

传感器名称	三维坐标	传感器名称	三维坐标
声波阵列1	(100,800,1340)	声波阵列5	(100,800,1260)
声波阵列2	(128.28,800,1328.28)	声波阵列6	(71.72,800,1271.72)
声波阵列3	(140,800,1300)	声波阵列7	(128.28,800,1271.72)
声波阵列4	(60,800,1300)	声波阵列8	(71.72,800,1328.28)
暂态地电压	(100,800,1300)	特高频	(100,800,1300)

传统 TDOA 定位方法基于四球面方程组求解信号源坐标^[25-26]。考虑开关柜在实际应用中受测量误差、多路径干扰等影响,该方程组求解往往面临无解或稳定性差的问题。本文将四球面模型转化为非线性优化模型,构建目标函数及约束分别为

$$\min f(x, y, z) =$$

$$\sum_{i=2}^8 \left| \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}}{v(T_i - T_1)} \right| \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq x \leq 1500 \\ 0 \leq y \leq 800 \\ 0 \leq z \leq 2200 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $Q(x, y, z)$ 为局放源坐标; $S_i(x_i, y_i, z_i)$ 为传感器坐标; T 为对应接收信号时间; v 为声信号在空气中传播速度。设 S_1 为参考传感器,从 $S_2 \sim S_8$ 中选择3个组成四传感器子集即可求解。后续使用智能算法迭代求解定位,用最优解逼近真实放电源坐标,化解传统方式直接求解存在的计算困难。

式(7)消去时间 T 后可得关于 λ 参数的方程,进一步求解得平面交线 z , 并将 z 相关表示为 M (平面交线相关参数)。将时间 T 用 M 表示,代入式(7)后得到关于变量 M 的二次方程式为

$$\lambda_1 M^2 + \lambda_2 M + \lambda_3 = 0 \quad (9)$$

求根判别式为

$$|\Delta| = \lambda_2^2 - 4\lambda_1\lambda_3 \quad (10)$$

为衡量传感器子集数据的几何一致性,将 $|\Delta|$ 作为筛选判据。 $|\Delta|$ 越小,表示球面模型的交点越集中,对应组合的时差越精确。

时差筛选具体流程如图7所示。充分利用传感器数量优势,选择时差较精确的传感器组合,有助于提升定位精度,减小定位偏差。

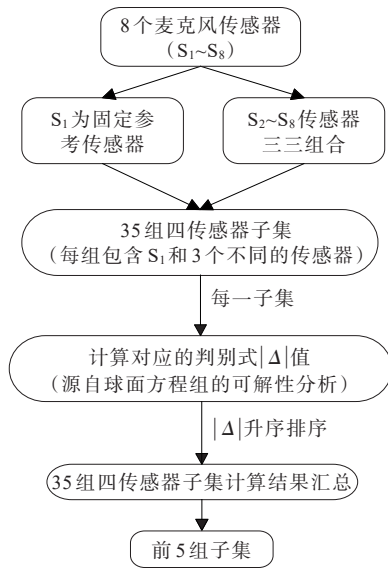


图 7 基于 $|\Delta|$ 值的声传感器组合时差筛选流程

Figure 7 Time difference screening process for acoustic sensor combinations based on $|\Delta|$ value

2.3 交叉时延计算

交叉相关算法(cross-correlation function, CCF)

在信号同步和时延差测量中有良好的适应性^[14]。在声信号与电信号由不同仪器采集的情况下,该算法能够有效实现时间对齐。交叉相关函数定义为

$$R_{xy}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]y[n+k] \quad (11)$$

式中, $R_{xy}[k]$ 为信号 $x[n]$ 与 $y[n]$ 在时延 k 下的交叉相关函数,通过寻找信号峰值得到最大 $R_{xy}[k]$,从而得到两信号的相对时延。

暂态地电压和特高频信号由采样率为 5 GHz 的示波器采集,声波阵列信号由采样率为 192 kHz 的 PC 端采集。为实现 3 类信号的时间维度统一,以电信号为声电时延基准,对其进行降采样处理,基于式(10)构建交叉相关函数实现声电同步,并得到 S_1 声信号相对时延。声阵列传感器子集内部以 S_1 为基准,可得 3 路声信号相对时延。经时间同步和交叉计算后,得到局部放电 4 路时延,用于后续算法定位。为清晰展示上述流程,绘制了如图 8 所示的声电信号同步与交叉时延计算流程图。

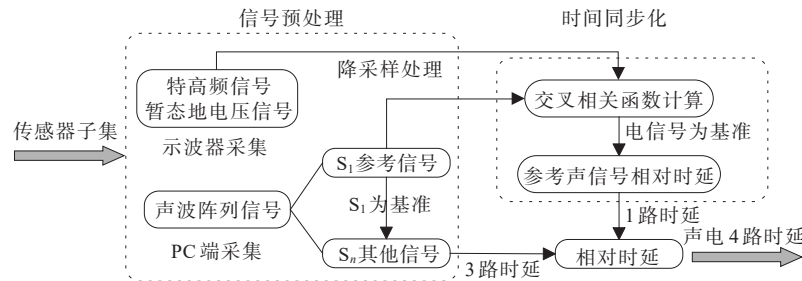


图 8 声电信号同步与交叉时延计算流程

Figure 8 Flowchart of acoustic-electrical signal synchronization and cross-correlation time delay calculation

2.4 改进冠豪猪优化算法及在局部放电定位中的应用

本节在原始冠豪猪优化算法^[27]基础上,针对局部放电声源定位精度要求高、搜索空间复杂等问题,进行了多项结构优化与参数调控,提出适用于声电信号融合数据的改进冠豪猪优化算法。算法结构如图 9 所示,主要包括以下步骤。

1) 优化搜索初始化与参数设定:设定冠豪猪优化算法的种群规模、最大迭代次数及三维空间边界约束,确保在可行域内实现初始个体坐标的随机均匀分布,最优解具备物理可行性。

2) 目标函数构建:以 f_{obj} 最小为优化目标,引入信号的时延差构建多目标损失函数,并结合阵列几何关系构造三维坐标反演模型。具体函数为

$$f_{obj}(X_Q) = \sum_{i=1}^4 (\|S_i(x, y, z) - X_Q\| - v\tau_i)^2 \quad (12)$$

式中, X_Q 为局放点的三维坐标位置; τ_i 为相对时延差,传感器三维空间坐标为 $S_i(x, y, z)$ 。

3) 改进搜索策略与收敛性控制:在传统冠豪猪优化算法“探索-开发”双阶段结构基础上,引入适度步长扰动与交叉采样更新机制,结合非优不变策略,避免在高噪声干扰下的路径震荡;同时,通过子集平均策略平滑解的波动,提升最终定位结果稳定性。

4) 输入数据准备与调用机制:该算法以时延数据为输入,相关处理流程已在文 2.3 中详细阐述,定位模块直接调用预处理后的高精度时延数据以开展坐标优化。

改进后的冠豪猪优化算法融合了开关柜局部

放电定位的实际条件,能够在声电融合数据背景下有效完成局部放电源的三维定位。图9展示了改进冠豪猪优化算法局部放电定位流程。局部放电总体定位流程如图10所示,展示了定位过程中各模块相互间的逻辑结构与实现路径。

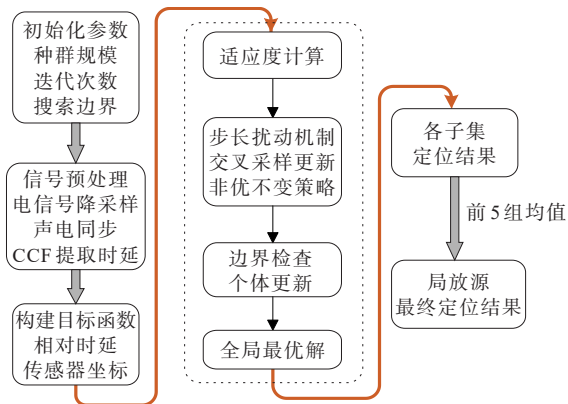


图9 改进冠豪猪优化算法局部放电定位流程
Figure 9 Flowchart of PD localization based on improved CPO algorithm

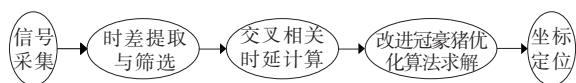


图10 局部放电总体定位流程
Figure 10 Overall flowchart of PD localization

3 开关柜缺陷局部放电试验

3.1 局部放电试验平台设计

为验证三合一传感器的定位性能,设计了4种典型放电缺陷,包括电晕放电、悬浮放电、气隙放电和沿面放电,其结构和实物如图11、12所示^[17]。其中, $d_1 \sim d_6$ 为各缺陷关键尺寸参数,各类缺陷分布于开关柜母线室的三相高压母排,结合声电协同采集实现缺陷识别与定位。

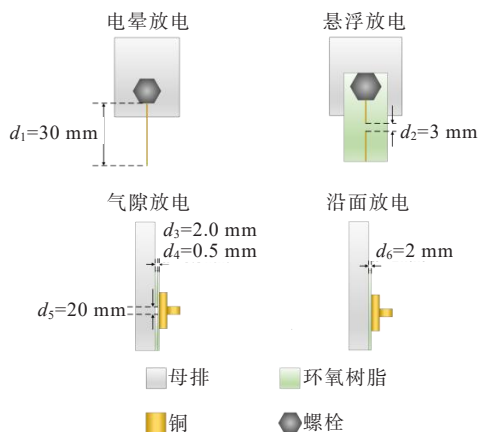


图11 开关柜典型缺陷试验模型
Figure 11 Experimental models of typical switchgear defects

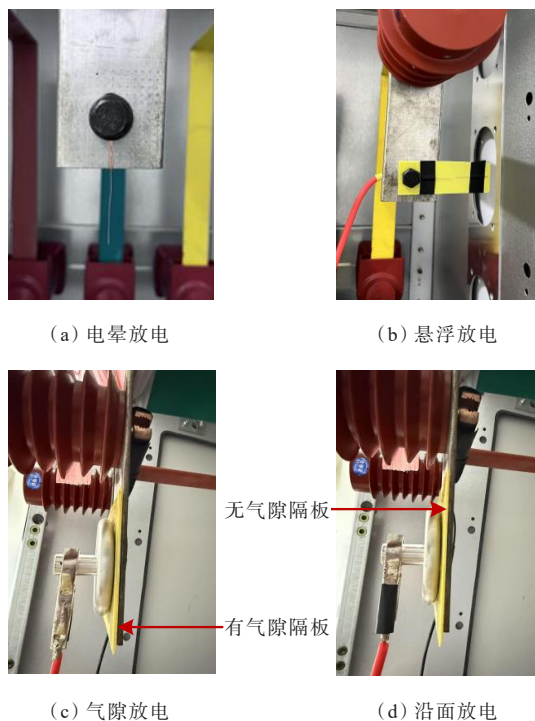


图12 局部放电典型缺陷实物
Figure 12 Physical photos of typical PD defects

试验平台结构与现场如图13、14所示。平台以10 kV开关柜为实验对象,通过无局部放电的交流电源进行加压,利用局部放电检测仪监控放电状态。三合一传感器安装于母线室内部,采集暂态地电压、特高频和声波阵列3类信号,并将信号传输至示波器和计算机进行处理与分析。

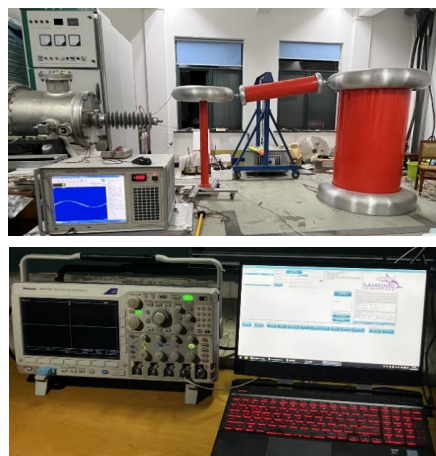


图13 开关柜局部放电试验现场
Figure 13 On-site photo of PD experiment of switchgear

试验采用逐级升压方式进行,当局部放电信号稳定后采集数据。四类缺陷在稳定放电条件下的起始电压与检测电压如表3所示。所有信号采集过程统一以10 kV进行,并通过变换三相缺陷位置构建多类型、多区域放电样本。

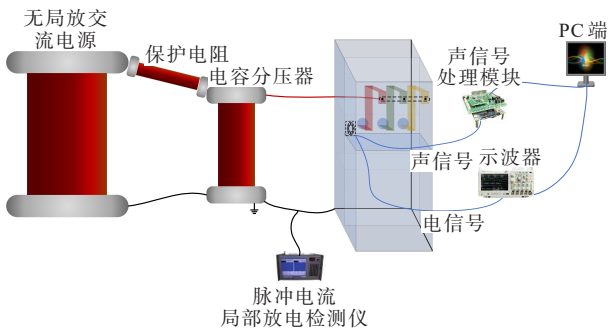


图 14 开关柜局部放电试验平台

Figure 14 Experimental platform for PD of switchgear

表 3 4 种缺陷稳定放电加压情况

缺陷类型	起始实验电压	稳定放电检测电压	kV
电晕放电	6.5	10.8	
悬浮放电	6.3	9.0	
沿面放电	6.6	8.0	
气隙放电	6.5	8.5	

3.2 缺陷分类实验结果与分析

以四类典型局部放电缺陷(电晕、悬浮、沿面、气隙)为实验对象,使用一体化传感器采集暂态地电压、特高频与声波阵列信号,进行局部放电缺陷分类。

图 15 展示了由 S₁ 参考传感器采集的 4 类缺陷声信号波形。声阵列虽然具备多通道采集的数量优势,但不同类型时域波形相似度依然较高,单靠声信号进行缺陷分类较为困难。为进一步提升神经网络分类能力,引入同步采集的暂态地电压与特高频信号作为辅助特征源。

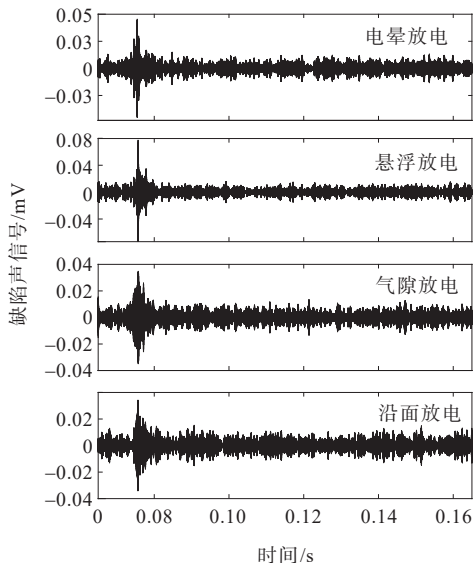


图 15 4 类缺陷 S₁ 参考传感器信号波形

Figure 15 Signal waveforms of reference sensor S₁ for four types of defects

以悬浮放电为例,该缺陷下同步采集的特高频和暂态地电压信号波形如图 16 所示。特高频信号振铃短、幅值高,体现其高频快速响应特性;暂态地电压信号振铃长、波形震荡丰富,反映其在低频段的稳定响应与持续性。

3 类信号提取共九维特征(均值、方差、主频)用于模型训练。将信号样本拆分为训练集、测试集,比例为 7:3。将训练集样本带入神经网络中进行学习,测试集样本用于反映学习结果并进行模式分类。结果生成混淆矩阵并二维可视化,如图 17、18 所示。

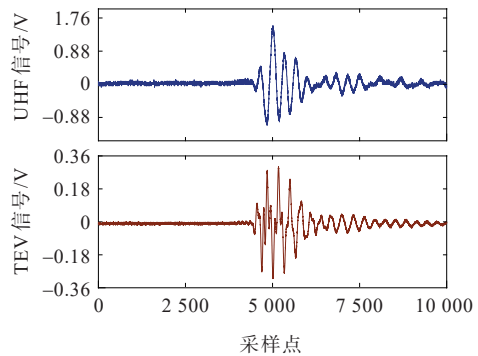


图 16 悬浮放电特高频、暂态地电压信号波形

Figure 16 UHF and TEV signal waveforms of floating discharge

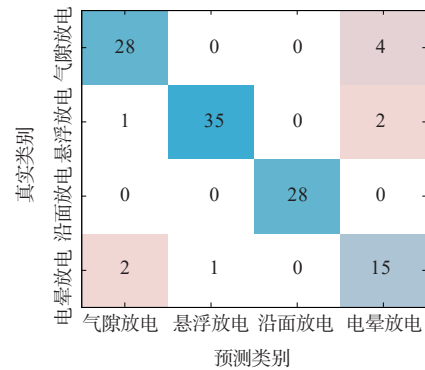


图 17 神经网络模型混淆矩阵分类结果

Figure 17 Classification results of neural network model confusion matrix

因各类缺陷样本数不一,为确保各类别的分类表现得到较为公平的衡量,使用加权准确率(overall accuracy, OA)、各缺陷类别的分类精确率进行分类效果对比,准确率 P_{OA}、精确率 P_i 分别为

$$P_{OA} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{T_i}{N_i}}{\sum_{i=1}^n w_i} \times 100\% \quad (13)$$

$$P_i = \frac{T_i}{T_i + F_i} \times 100\% \quad (14)$$

式中, T_i 、 F_i 分别为第 i 类中正确、错误分类的样本数; N_i 、 w_i 分别为该类总样本数、权重; n 为总类别数。

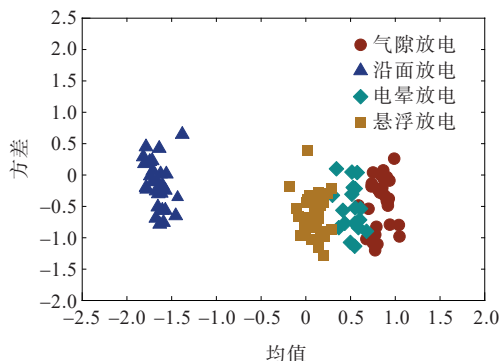


图 18 神经网络模型缺陷分类可视化结果

Figure 18 Visualization results of defect classification by neural network model

神经网络模型缺陷分类统计结果如表 4 所示。可知, 整体分类准确率达 91.38%, 其中沿面放电与悬浮放电识别效果最优, 电晕放电识别准确率较低。

表 4 神经网络模型缺陷分类统计结果

Table 4 Statistical results of defect classification by neural network model %

学习模型	整体准确率	气隙放电精确率	悬浮放电精确率	沿面放电精确率	电晕放电精确率
神经网络	91.38	90.32	97.22	100	71.43

图 17、18 也支撑了这一结论: 沿面放电(类别 3)具有显著边界感, 混淆矩阵中不存在误分情况, 识别效果最佳; 电晕放电(类别 4)与气隙放电(类别 1)、悬浮放电(类别 2)存在混叠, 混淆矩阵中存在不同程度预测偏差, 误分类率较高; 除电晕放电外, 其余三类缺陷彼此边界划分较清晰, 识别准确率较高。

针对电晕放电分类精度偏低的现象, 分析有以下原因: 电晕放电与气隙、悬浮放电在时频域特征上存在重叠, 导致模型在边界学习中出现混淆; 电晕放电本身释放能量较低, 传感器采集该类缺陷灵敏度受限, 所得信息特征较为模糊; 实验采集该信号条件较为苛刻, 稳定重复性较低, 导致该样本数少于其他放电类型, 限制模型学习效果。

3.3 开关柜 B 相悬浮放电定位实验结果与分析

因 4 类缺陷与 3 处放电相位具有 12 种组合, 本节

以 B 相悬浮放电为例, 进行定位结果具体分析。声波阵列 S_1 参考波形、特高频、暂态地电压信号波形如图 15、16 所示。依据图 7 所示的时差筛选机制, 得到时差较精确的前 5 组传感器子集, 如表 5 所示。

表 5 悬浮 B 相各声波传感器子集时差筛选结果

Table 5 Time difference screening results of acoustic sensor subsets for B-phase floating discharge

序号	传感器子集	$ \Delta $ 值
1	S_1, S_5, S_6, S_7	3.464 417
2	S_1, S_4, S_5, S_6	4.703 646
3	S_1, S_6, S_7, S_8	6.393 530
4	S_1, S_4, S_5, S_7	6.609 687
5	S_1, S_4, S_6, S_7	6.858 950

以 4 号传感器子集(S_1, S_4, S_5, S_7)为例, 依据图 8 所示流程进行交叉时延计算, 获得声电 4 路时延如图 19 所示。可知, 电信号为基准下的各声信号时延分别为 1 424.80、1 522.86、1 560.27、1 528.16 μs 。结合开关柜三维坐标体系, 可得局放点坐标为 (219.8, 436.2, 1 619.9) mm。同理, 根据图 9 的流程对表 5 所有子集进行算法独立定位后, 取均值得到 B 相悬浮放电最终定位坐标为 (206.0, 395.1, 1 605.1) mm, 与 B 相实际坐标偏差 9.28 mm。各子集具体定位结果如表 6 所示。

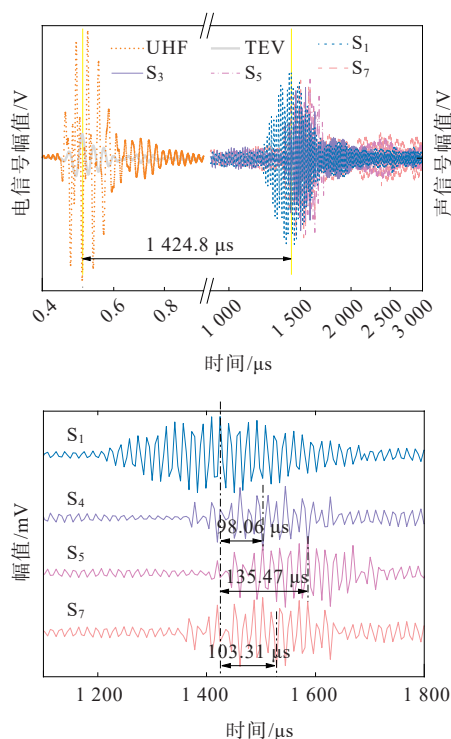


图 19 信号时延波形

Figure 19 Waveforms of signal time delay

表 6 B 相悬浮放电定位结果
Table 6 Localization results of B-phase floating discharge

声波阵列子集序号	算法定位坐标	理论偏差	定位坐标平均值	最终定位偏差
1	(178.4,456.9, 1 548.8)	79.53		
2	(234.7,321.5, 1 634.2)	92.39		
3	(157.7,376.4, 1 576.3)	53.93	(206.0,395.1, 1 605.1)	9.28
4	(219.8,436.2, 1 619.9)	45.81		
5	(239.6,384.6, 1 646.5)	62.99		

3.4 定位偏差来源分析与方法合理性验证

针对局部放电源定位偏差问题,本文结合系统设计、实验条件与算法实现进行了系统性分析。经综合判断,定位偏差主要来源如下。

1) 信号采集与时间对齐偏差。声信号采样率为 192 kHz,电信号(TEV/UHF)采样率为 5 GHz,尽管通过降采样统一了时间维度,但声信号的最小采样间隔为 5.2 μs,换算对应空间分辨偏差约为 1.8 mm。由采样率引发的信号同步偏差应作为系统性固有偏差考虑。

2) 放电特性、传感器测量与实验操作过程引入的随机偏差。局部放电源本身不是固定位置的放电点,存在位置波动与方向性变化的可能。传感器在实际测量中受开关柜内结构影响、人工安装偏差等因素影响,三维空间标定过程中存在随机偏差。此类误差难以完全控制,虽然本文通过引入|Δ|值筛选与多子集取均值的方法抑制单次波动,但仍需承认其对最终定位存在影响。

3) 定位步骤产生的偏差。进一步分析本文不同环节采取的定位策略对系统定位精度的影响。以 B 相悬浮放电为例,量化分析定位过程中|Δ|值时差筛选、采用声电联合检测对定位准确性的贡献,定位偏差对比如表 7、8 所示。

由表 7 可知,直接取 35 组四传感器子集组合的前 5 组进行声波定位,其单一定位偏差在 180~210 mm,取均值后定位偏差为 129.30 mm;经|Δ|值时差筛选后的前 5 组子集单一定位偏差在 168~104 mm,取均值后定位偏差为 20.78 mm。这表明:通过|Δ|值时差筛选后的传感器子集具备更小的定位偏差,时差筛选在本文研究中对定位结果有积极作用。

表 7 |Δ|时差值筛选与不筛选条件下 B 相悬浮放电定位偏差对比(声波阵列)

Table 7 Comparison of localization deviations for B-phase floating discharge with and without |Δ| time difference screening (acoustic array)

策略	子集组合	单一子集		平均定位偏差
		最大偏差	最小偏差	
前 5 组子集 (顺序排列)	S ₁ 、S ₂ 、S ₃ 、S ₄			
	S ₁ 、S ₂ 、S ₃ 、S ₅			
	S ₁ 、S ₂ 、S ₃ 、S ₆	209.44	180.53	129.30
	S ₁ 、S ₂ 、S ₃ 、S ₇			
	S ₁ 、S ₂ 、S ₃ 、S ₈			
前 5 组子集 (Δ 值筛选)	S ₁ 、S ₅ 、S ₆ 、S ₇			
	S ₁ 、S ₄ 、S ₅ 、S ₆			
	S ₁ 、S ₆ 、S ₇ 、S ₈	168.65	103.46	20.78
	S ₁ 、S ₄ 、S ₅ 、S ₇			
	S ₁ 、S ₄ 、S ₆ 、S ₇			

表 8 单一 AA 阵列检测与声电联合检测下 B 相悬浮放电定位偏差对比(|Δ|时差值筛选后)

Table 8 Comparison of localization deviations for B-phase floating discharge using single AA array and acoustic-electric joint detection (after |Δ| time difference screening)

测量方式	单一子集		坐标均值	平均定位偏差
	最大偏差	最小偏差		
单一声阵列	168.65	103.46	(183.0,395.1, 1589.0)	20.78
声电联合	92.39	45.81	(206.0,395.1, 1 605.1)	9.28

在|Δ|值时差筛选后,对时差精度较高的子集进行单一声波检测与声电联合定位检测方式比较,结果如表 8 所示。可知,声电联合检测的定位精度相较单一声波阵列又取得了进步:单一子集定位偏差下降到 45~100 mm,最终定位偏差在 10 mm 以内,整体定位精度得到了提高。

因此,可以认为本文采用|Δ|值时差筛选、声电信号联合检测和多组子集取均值的机制,能够有效提升定位精度,定位流程是合理有效的。

3.5 多类型缺陷位置放电定位分析

为进一步验证本文提出的声电信号联合检测与优化定位流程在不同类型、不同位置局部放电中的适应性,在 A、B、C 三相位置开展典型缺陷定位实验,并进行结果分析。每类缺陷定位后取均值作为最终定位结果,如表 9 所示。

从表 9 可以看出,同相位置下,不同类型缺陷定位偏差波动较小;整体来看,定位偏差控制在 7~15 mm,缺陷类型与定位精度相关性并不明显;但随

着局部放电源到传感器距离的增加,定位偏差整体呈一定上升趋势。

表 9 多类型缺陷放电定位结果

Table 9 Localization results of multi-type defect discharges mm

缺陷类型	UHF、声波阵列联合定位坐标均值	局部放电位置	缺陷定位偏差均值	整体定位偏差均值
电晕放电	(207.5,606.3, 1 593.2)	A 相	11.92	10.21
悬浮放电	(206.0,598.2, 1 596.4)	A 相	7.23	10.21
气隙放电	(204.8,610.2, 1 602.1)	A 相	11.47	10.21
电晕放电	(197.6,407.8, 1 608.2)	B 相	11.57	11.42
悬浮放电	(206.0,395.1, 1 605.1)	B 相	9.28	11.42
沿面放电	(204.8,410.1, 1 607.4)	B 相	13.41	11.42
电晕放电	(208.4,206.6, 1 611.0)	C 相	15.33	13.43
气隙放电	(194.3,195.2, 1 587.6)	C 相	14.47	13.43
沿面放电	(208.6,195.7, 1 604.2)	C 相	10.49	13.43

本节实验结果验证了声电联合检测与优化定位机制在不同局部放电类型中具备普适性,支撑了本文方法在实际开关柜局部放电源定位应用中的可行性与推广潜力。

3.6 改进冠豪猪算法的收敛稳定性与抗噪鲁棒性验证

1) 为评估改进冠豪猪算法在不同初值扰动下的鲁棒性,本节在文 3.3 中 B 相实验的基础上,保持声电联合检测方式与传感器子集检测组合不变,构造 10 组不同的初始种群进行独立定位实验。

图 20 展示了所得定位结果的三维分布。所有解聚集于真实坐标点附近,定位误差范围为 52~95 mm,平均误差为 9.94 mm,与表 8 中声电联合检测的精度区间高度一致,验证了算法具备良好的初值稳定性。

图 21 给出了对应初值的收敛曲线,10 组运行结果均在 100 代内快速收敛,无明显波动,说明改进后的冠豪猪算法在初始扰动下具备稳定的数值收敛能力。

2) 考虑声波信号采集中存在的背景噪声,本节

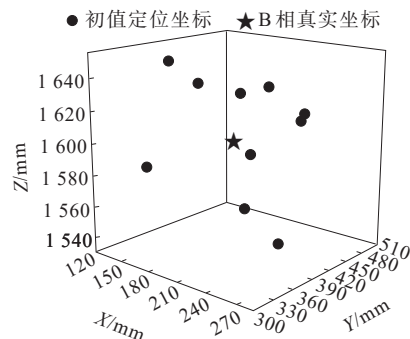


图 20 改进冠豪猪算法初始种群定位结果分布

Figure 20 Distribution of initial population localization results by improved CPO algorithm

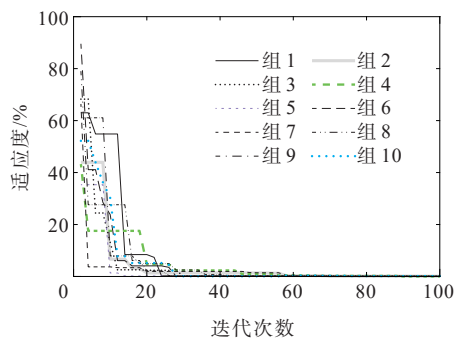


图 21 改进冠豪猪算法下初始种群收敛曲线

Figure 21 Convergence curves of initial population under improved CPO algorithm

在算法中引入了如图 9 所示的 CCF 时延提取机制、步长扰动机制与交叉采样更新机制,并采用非优不变策略,有效抑制声波噪声偏差和算法运行过程中的收敛震荡。

对图 15 的 4 类信号进行信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)计算,即

$$S_{SNR} = 20\log_{10}\left(\frac{\max|x|}{\delta_{noise}}\right) \quad (15)$$

式中, $\max|x|$ 为信号峰值; δ_{noise} 为标准差。结果汇总如表 10 所示。

表 10 4 类缺陷 S₁ 声信号 SNR

Table 10 SNR of S₁ acoustic signals for four types of defects

缺陷类型	峰值/mV	SNR/dB
电晕放电	0.045	19.668
气隙放电	0.035	17.668
悬浮放电	0.073	22.097
沿面放电	0.034	17.393

由表 10 可知,各类信号的 SNR 均大于 17 dB,悬浮放电的 SNR 达到了 22.1 dB。进一步说明,采集所得的信号具备良好的可识别性和定位基础,支持算法性能验证。

4 结语

本文围绕开关柜局部放电缺陷分类与三维定位问题,设计实现了融合暂态地电压、特高频与声波阵列信号的一体化检测系统,并提出多模态融合分类模型与物理约束引导下的优化定位算法,构建了一套完整的检测与定位技术体系。主要结论如下。

1) 构建了支持暂态地电压、特高频与声波阵列三通道采集的圆形阵列式一体化传感器,该传感器具备宽频响应、高灵敏度和抗干扰能力,并验证了其关键性能满足局部放电多信号提取需求。

2) 提出融合 3 类信号的九维特征输入神经网络分类方法,实现典型缺陷的有效区分,整体分类准确率达 91.38%,其中悬浮与沿面放电分类效果最优,验证了该方法在局部放电分类中的可行性。

3) 针对传统到达时间差方法在实际定位中存在的稳定性差、无解的问题,引入基于 $|\Delta|$ 值筛选的高可信传感器子集选择机制,并结合交叉相关实现声电时延对齐,构建基于物理一致性约束的非线性优化模型。所提的改进冠豪猪算法通过非优不变、扰动控制与交叉采样机制,确保定位过程中收敛的稳定性与鲁棒性。

4) 实验证明上述定位方式在多类缺陷、多点放电场景中具备高定位精度,误差控制在 10 mm 量级,整体表现出良好的通用性与稳定性。

5) 研究构建了“同步检测-缺陷分类-高精度定位”的完整流程,适用于开关柜等电力设备的局部放电故障感知与智能诊断,希望能为提升设备运维智能化水平提供一定参考。

参考文献:

[1] 于泊宁,任明,张志斌,等. 配电设备分布式局部放电感知技术的实现方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1929-1938.
YU Boning, REN Ming, ZHANG Zhibin, et al. Implementation method of distributed partial discharge sensing technology for power distribution equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1929-1938.

[2] 李旭,王文森,郭丽,等. 基于多传感器融合的电力变压器内部放电定位与辨识技术[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 22-31.
LI Xu, WANG Wensen, GUO Li, et al. Internal discharge location and identification for power transformers based on multi-sensor fusion[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 22-31.

[3] BIRLASEKARAN S, LEONG W H. Comparison of known PD signals with the developed and commercial HFCT sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1581-1590.

[4] 徐晓刚,张晓星,李鑫,等. 内置于高压开关柜的雪花型微带天线设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3207-3213.
XU Xiaogang, ZHANG Xiaoxing, LI Xin, et al. Design of built-in snowflake microstrip antenna built in high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3207-3213.

[5] 陈继明,许辰航,李鹏,等. 基于时频分析与分形理论的 GIS 局部放电模式识别特征提取方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 287-295.
CHEN Jiming, XU Chenhang, LI Peng, et al. Feature extraction method for partial discharge pattern in GIS based on time-frequency analysis and fractal theory[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 287-295.

[6] 黄新波,胡潇文,朱永灿,等. 基于卷积神经网络算法的高压断路器故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 136-140+147.
HUANG Xinbo, HU Xiaowen, ZHU Yongcan, et al. Fault diagnosis of high-voltage circuit breaker based on convolution neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 136-140+147.

[7] 余昌佳,郑建勇,何嘉弘,等. 时差筛选和 ABC 二次寻优的变压器局放超声定位方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2820-2827.
SHE Changjia, ZHENG Jianyong, HE Jiahong, et al. Ultrasonic localization method of transformer partial discharge by time difference screening and ABC secondary optimization[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2820-2827.

[8] TAHA I B M, DESSOUKY S S, GHALY R N R, et al. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements[J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, 59(6): 4759-4769.

[9] ZHANG Q, LI C R, ZHENG S S, et al. Remote detecting and locating partial discharge in bushings by using wideband RF antenna array[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6): 3575-3583.

[10] 袁文海,刘彪,徐浩,等. 基于复合神经网络的 GIS 局放故障类型识别[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(4): 157-164.
YUAN Wenhai, LIU Biao, XU Hao, et al. Partial discharge fault type identification of GIS based on composite neural network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 157-164.

[11] 李星,丁登伟,许渊,等. 特高频-超声波法联合的 GIS/GIL 局部放电信号降噪与缺陷定位[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2384-2393.
LI Xing, DING Dengwei, XU Yuan, et al. Signal denoising and defect localization for GIS/GIL partial discharge based on ultra-high frequency and ultrasound method united[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51

- (5): 2384-2393.
- [12] 谢天喜, 陆云才, 石琦, 等. 用于局放声发射探测的 Sagnac 非平衡干涉超声传感技术[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 211-217.
XIE Tianxi, LU Yuncai, SHI Qi, et al. Sagnac unbalanced interferometric ultrasound sensing for localised acoustic emission detection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 211-217.
- [13] 武昊, 万中一, 徐文聪, 等. 基于特高频定向天线阵列的变电站局部放电定位 MUSIC 算法[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3240-3249.
WU Hao, WAN Zhongyi, XU Wencong, et al. MUSIC algorithm for partial discharge location in substation based on ultrahigh frequency directional antenna array [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3240-3249.
- [14] 关宇, 董明, 王昊, 等. 基于超分辨率广义互相关算法的局部放电超声定位技术[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(11): 1-11.
GUAN Yu, DONG Ming, WANG Hao, et al. Partial discharge ultrasound localization based on super-resolution generalized cross-correlation estimation algorithm[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(11): 1-11.
- [15] 辛晓虎, 罗勇芬, 杜非, 等. 用于油中局部放电定位的超声波接收阵列的定向算法比较[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5351-5359.
XIN Xiaohu, LUO Yongfen, DU Fei, et al. Comparisons of direction of arrival algorithms applied to ultrasonic arrays for partial discharge location in oil[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5351-5359.
- [16] 苏志雄, 于瑞冬, 张周胜. 基于多重多项式结果-二重网格搜索的变压器局部放电定位[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1538-1547.
SU Zhixiong, YU Ruidong, ZHANG Zhousheng. Partial discharge location of transformers based on multipolynomial resultants approach and 2-lattice search[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1538-1547.
- [17] 孙源, 宋颜峰, 王昊天, 等. 开关柜局部放电超声-TEV 融合检测技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 5052-5060.
SUN Yuan, SONG Yanfeng, WANG Haotian, et al. Ultrasonic-TEV combined detection technology of partial discharge in switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5052-5060.
- [18] 霍鹏, 李锐鹏, 张子骁, 等. 基于脉冲同步的配电网局部放电在线监测及定位方法[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 129-138.
HUO Peng, LI Ruipeng, ZHANG Zixiao, et al. Online monitoring and location method of partial discharge of distribution cable based on pulse synchronization[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 129-138.
- [19] 马永飞. 开关柜局部放电检测特高频传感器与信号识别研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2019.
MA Yongfei. Research on UHF sensor and signal recognition of partial discharge detection in switch cabinet [D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2019.
- [20] 贾骏, 陶风波, 杨强, 等. 复杂多径传播条件下变压器局部放电定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5338-5348.
JIA Jun, TAO Fengbo, YANG Qiang, et al. Research on partial discharge location method of transformer under complex multipath propagation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5338-5348.
- [21] 陈荣, 李松原, 贺春, 等. 基于双回路反馈的光纤干涉式 GIS 局部放电超声传感系统研究[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 99-105+112.
CHEN Rong, LI Songyuan, HE Chun, et al. Research on optical fiber interferometric GIS partial discharge ultrasonic sensing system based on dual-loop feedback [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 99-105+112.
- [22] 蒋骁, 徐文聪, 胡岳, 等. 局部放电定向超声阵列 Dir-MUSIC 测向算法仿真[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 71-79.
JIANG Xiao, XU Wencong, HU Yue, et al. Simulation of dir-MUSIC direction-finding algorithm for partial discharge direction-finding ultrasonic array[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 71-79.
- [23] 谢庆, 程述一, 耿江海, 等. 基于定向准确度的局部放电超声阵列传感器声学性能定量评价[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 965-970.
XIE Qing, CHENG Shuyi, GENG Jianghai, et al. A quantitative evaluation method for acoustic performances of partial discharge's ultrasonic array sensors[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 965-970.
- [24] 何东升, 贾志东, 刘让雄, 等. 不同负载率下干式配电变压器绕组热点温升规律及推演模型研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(5): 63-72.
HE Dongsheng, JIA Zhidong, LIU Rangxiong, et al. Hotspot temperature rise patterns and deductive model of dry-type distribution transformer windings under different load rates[J]. Smart Power, 2025, 53(5): 63-72.
- [25] 钱定冬, 宋柯, 谢虎波, 等. 基于 GCC-MSSA 的变压器局放超声内部定位方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(3): 134-141.
QIAN Dingdong, SONG Ke, XIE Hubo, et al. Transformer partial discharge ultrasound internal positioning method based on GCC-MSSA[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(3): 134-141.
- [26] 李沐, 冯新岩, 蔺晓琨. 基于 TDOA 和 TS-PSO 的变压器特高频局部放电空间定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1834-1842+1879.
LI Mu, FENG Xinyan, LAN Xiaokun. A transformer partial discharge UHF localization method based on TDOA and TS-PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1834-1842+1879.
- [27] ABDEL-BASSET M, MOHAMED R, ABOUHAJWAH M. Crested porcupine optimizer: a new nature-inspired metaheuristic[J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 284: 111257.