

采用改进粒子群优化与电磁时间反演的 GIS 局部放电定位方法研究

荆乾震, 闫静, 王艳新, 刘志远, 耿英三, 王建华

(西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为解决传统电磁时间反演方法在气体绝缘组合电器(GIS)局部放电定位时采用理想化参数构建等效模型而导致定位误差过大的问题,提出一种采用改进粒子群优化与电磁时间反演的 GIS 局部放电高精度定位方法。首先,构建电磁时间反演所需等效模型,实现电磁波的反向传播聚焦。以时空维度上的能量累积替代传统瞬时最大场强作为聚焦判据,显著提升聚焦点定位的稳定性与可靠性;其次,将能量集中度作为改进粒子群优化的适应度函数,通过对虚拟源注入位置的动态更新,补偿因模型参数理想化及虚拟源注入点偏移造成的定位误差;最后,引入动态惯性权重策略,使粒子群在早期具备更强的全局搜索能力,而在后期逐步聚焦于最优解邻域,从而提升全局搜索能力。仿真与实验验证表明,该方法在直筒型、T 型和 L 型 GIS 腔体中的平均定位误差较传统电磁时间反演方法降低约 36%,显著提升了局部放电源的定位精度。

关键词: 气体绝缘组合电器;局部放电定位;电磁时间反演;能量集中度;改进粒子群优化

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202606017 **文章编号:** 0253-987X(2026)06-0201-12

Localization Method for Partial Discharge in GIS Using Improved Particle Swarm Optimization and Electromagnetic Time Reversal

JING Qianzhen, YAN Jing, WANG Yanxin, LIU Zhiyuan, GENG Yingsan, WANG Jianhua

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address large localization errors that arise when idealized parameters are used to construct an equivalent model for conventional electromagnetic time reversal (EMTR) in locating partial discharges (PD) in gas-insulated switchgear (GIS), a high-precision localization method for PD in GIS using improved particle swarm optimization (IPSO) and EMTR is proposed. First, the equivalent model required for EMTR is established to enable time-reversal focusing of electromagnetic waves. Energy accumulation in the spatiotemporal domain is adopted as the focusing criterion instead of the conventional instantaneous peak field strength, substantially enhancing the stability and reliability of focal point localization. Second, energy concentration is defined as the fitness function of the IPSO algorithm; by dynamically updating the virtual-source injection positions, localization errors caused by idealized parameters for the model and deviations in virtual-source injection positions are compensated. Finally, a dynamic inertia weight strategy is introduced so that the particle swarm exhibits stronger global search capability in the early stage

收稿日期: 2025-11-11。 作者简介: 荆乾震(1999—),男,博士生;闫静(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2403700);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xzy022025012)。

网络出版时间: 2026-02-02

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20260130.1246.002>

and progressively converges toward the neighborhood of optimal solutions in later stages, thus improving overall search performance. Simulation and experimental validations suggest that the proposed method reduces the average localization error by approximately 36% in cylindrical, T-shaped, and L-shaped GIS cavities compared with the conventional EMTR method, significantly improving PD source localization accuracy.

Keywords: gas-insulated switchgear; localization of partial discharge; electromagnetic time reversal; energy accumulation; improved particle swarm optimization

气体绝缘组合电器(gas-insulated switchgear, GIS)安全稳定运行对电力系统具有重要意义。受装配工艺影响, GIS 内部容易出现局部放电并引发绝缘故障, 长期发展会加速设备绝缘性能的退化^[1-2]。因此, 准确定位局部放电源位置对于实现绝缘缺陷的早期发现和提升设备运维水平具有重要价值。

目前, 针对 GIS 局部放电定位的主要方法包括到达时间差法^[3-4]、到达角度差法^[5]和数据驱动方法^[6-8]。到达时间差法利用不同位置传感器接收到同一放电信号的时延差, 通过求解非线性超曲面方程组获得局部放电源坐标^[9], 但该方法对采集系统的同步精度要求极高, 在电磁波传播速度下, 即使微小的时间差也会导致定位误差过大。到达角度差法则基于电磁波到达各传感器的空间角度差异实现定位。该方法无需对接收信号严格同步, 但需布设多传感器阵列, 其定位精度受阵列结构布设和传感器间距影响显著。数据驱动法通过机器学习挖掘接收信号特征与局部放电源位置之间的非线性映射关系, 利用定位网络预测故障源坐标^[10-13], 但该方法涉及神经网络模型的预训练, 高度依赖模拟样本库的规模, 难以在样本量、计算资源与定位精度之间取得平衡。

近年来, 电磁时间反演方法凭借优异的聚焦能力及对多路径传播的鲁棒性, 在电磁波近场调控^[14]、局部放电定位^[15-17]及电子战^[18]等领域取得了显著进展。时间反演的基本思想是电磁波传播具有可逆性, 即辐射源在腔体内激发的电磁响应经过时间反向处理后, 将会沿原路径反向传播并最终在源点重新汇聚。基于这一物理规律, 在忽略 GIS 壳体与其他材料损耗的情况下, 时间反演过程能够在初始辐射源位置处实现电磁能量的重聚焦^[19]。该方法仅依靠单个传感器即可实现放电源的有效定位, 无需布置多传感器阵列或精确测定信号时延, 从而避免多传感器协同带来的布设复杂性与同步误差问题。同时, 电磁时间反演不依赖神经网络训练过程, 无需构建大规模样本库, 具有良好的通用性与工程可实现性。然而, 电磁时间反演方法在实际应用中

中仍受多种误差源影响, 制约了定位精度与稳定性^[20]。该方法需构建 GIS 设备的等效模型, 并对监测信号进行反向传播计算, 但模型中不可避免地采用理想化参数, 导致模型与实体设备存在差异, 从而引起反演聚焦点偏移^[21]。此外, GIS 内部结构复杂, 边界反射及多路径传播等效效应易产生干扰信号, 降低聚焦质量。因此, 针对上述因素造成的定位偏差, 亟需设计有效的误差补偿优化机制, 以提升电磁时间反演的定位精度与鲁棒性^[22-23]。

基于此, 本文提出一种融合电磁时间反演与改进粒子群优化的 GIS 局部放电源定位方法。首先, 将传感器采集信号反向处理后, 作为虚拟激励源注入 GIS 等效模型, 依托电磁波传播可逆性实现放电源的初步聚焦。随后, 引入改进粒子群优化方法动态修正信号注入位置, 以聚焦性能指标为优化目标, 补偿因边界条件设定和传感器离散化等误差引起的聚焦偏移, 显著提升定位精度。实验结果表明, 该方法在直筒型、T 型及 L 型腔体中均实现了高精度定位, 且对噪声干扰具有良好鲁棒性, 为 GIS 局部放电源的精准定位提供了新思路。

1 改进粒子群优化的电磁时间反演定位方法

电磁时间反演定位过程以正演模型为基础, 依赖准确的正演计算构建反向传播场。本文中, GIS 局部放电定位的正演问题是指在已知放电源位置及其等效激励条件下, 求解电磁波在 GIS 金属腔体中的传播过程, 并获取特高频传感器所在位置的时域响应。该正演结果作为虚拟激励输入时间反演模型, 经时间反向传播实现能量再聚焦, 从而完成放电源定位。

为实现 GIS 局部放电源的高精度与高可靠性定位, 需在传统电磁时间反演定位方法的基础上, 重点优化以下两方面内容: ①改进聚焦性能判据, 以增强聚焦区域判定的抗干扰能力; ②引入误差修正机制, 以弥补由等效模型中虚拟源注入点无法与传感器位置精确对齐所导致的聚焦点偏移。为此,

提出一种基于改进粒子群优化的时间反演定位方法。该方法以虚拟源注入位置为优化变量,将能量集中度作为聚焦性能判据构建适应度函数,通过智能优化与时间反演过程的深度融合,实现聚焦偏差的自适应修正,从而显著提升放电源定位的准确性与稳定性。

1.1 基于能量集中度判据的电磁时间反演定位

时间反演方法起源于声学成像领域,是一种基于波动方程时空对称性原理的定位方法,其基本理论建立在理想介质中满足的麦克斯韦方程组之上。在电磁场中,麦克斯韦方程在理想条件下满足时间反演对称性,即当时间变量进行 $t \rightarrow -t$ 变换时,方程形式保持不变

$$\nabla \cdot \epsilon(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}, -t) = \rho(\mathbf{r}, -t) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mu(\mathbf{r}) (-\mathbf{H}(\mathbf{r}, -t)) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, -t) = -\mu(\mathbf{r}) \left(-\frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{r}, -t)}{\partial t} \right) \quad (3)$$

$$\nabla \times (-\mathbf{H}(\mathbf{r}, -t)) = \epsilon(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, -t)}{\partial t} + (-\mathbf{J}(\mathbf{r}, -t)) \quad (4)$$

式中: ϵ 为介电常数; μ 为磁导率; ρ 为电荷密度; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\mathbf{E}$ 为电场; $\mathbf{H}$ 为磁场; $\mathbf{r}$ 为空间位置矢量。图 1 给出了电磁反演定位的示意图,若在传感器位置接收到电磁信号 $s(t)$,对其进行时间反转得到 $s(-t)$,并将其作为虚拟激励重新注入系统,则电磁波会沿原始路径逆向传播,并在源点位置聚焦。

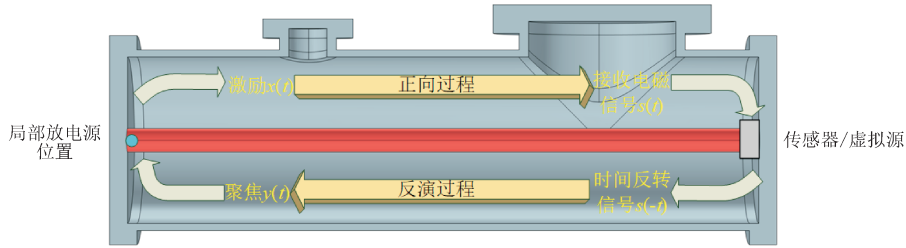


图 1 电磁时间反演示意图

Fig. 1 Diagram of electromagnetic time reversal

在电磁时间反演定位中,聚焦性能判据是确定放电源位置的关键。传统方法以反演场强峰值处作为源点,虽然计算简单,但容易受噪声影响而产生虚假聚焦。为此,本文引入能量集中度作为聚焦指标,通过比较候选位置与其邻域之间的能量分布差异来量化聚焦程度:若反演信号在某位置实现真实聚焦,则该位置的能量相对周围区域更为集中,从而可更准确地判定放电源位置。假设在反演过程中某候选位置 $\mathbf{m}$ 的电场强度为 $E(\mathbf{m}, t)$,则该点在整个反演时间区间 $[0, T]$ 内的能量定义为

$$U(\mathbf{m}) = \int_0^T |E(\mathbf{m}, t)|^2 dt \quad (5)$$

同时,考虑其邻域区域 $\Omega(\mathbf{m})$ 内所有位置的能量总和为

$$U_{\Omega}(\mathbf{m}) = \sum_{\mathbf{m}' \in \Omega(\mathbf{m})} \int_0^T |E(\mathbf{m}', t)|^2 dt \quad (6)$$

则能量集中度指标可表示为

$$C(\mathbf{m}) = \frac{U(\mathbf{m})}{U_{\Omega}(\mathbf{m})} \quad (7)$$

当候选点接近真实源点时,电磁波在该点的能量远高于周围区域,使得 $C(\mathbf{m})$ 取得较大值;反之,当候选位置为非源点时,能量集中效应不明显,导致集中度较低。因此,通过搜索全空间并寻找集中度最

大值对应位置 $\mathbf{o}^*$ 为最终局部放电源的定位结果,表达式如下

$$\mathbf{o}^* = \arg \max_{\mathbf{m}} C(\mathbf{m}) \quad (8)$$

1.2 基于改进粒子群优化的定位修正机制

在反向传播阶段,传感器采集的特高频信号经时间反转后作为虚拟激励注入模型。由于等效模型与实际设备间存在偏差,虚拟激励注入点往往难以与真实接收位置完全对应,从而导致聚焦点偏移。为此,提出一种如图 2 所示的定位误差修正机制,将虚拟源注入位置作为优化变量,通过优化搜索与时间反演过程的深度融合,实现对最优注入点的自适应修正,以获得更准确的定位结果。

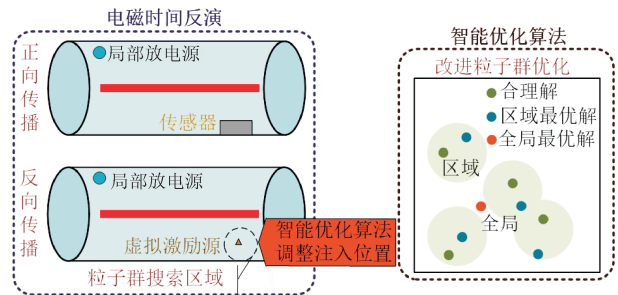


图 2 定位误差修正机制示意

Fig. 2 Localization error correction mechanism

在该方法中,粒子群优化的个体表示反演过程中注入信号的虚拟位置。假设在三维空间中,某一注入点为 $\mathbf{p} = (x, y, z)$, 将传感器观测到的信号 $\{s_i(t)\}_{i=1}^N$ 在该位置以时间反转形式注入,并在腔体内获得对应的聚焦点 $g(\mathbf{p})$ 。若该注入点恰好是最优位置,则聚焦点应与真实源点位置一致。因此,本优化问题的核心在于寻找使聚焦能量最为集中且稳定的注入点。

为了量化不同注入点对应的聚焦效果,本文构建了基于能量集中度的适应度函数。设在反向传播结果中,某一候选聚焦位置 $\mathbf{d}$ 处的叠加电场为

$$u(\mathbf{d}, t) = \sum_{i=1}^N u_i(\mathbf{d}, t; \mathbf{p}) \quad (9)$$

式中: $u_i(\mathbf{d}, t; \mathbf{p})$ 表示信号在注入点 $\mathbf{p}$ 处以时间反转方式注入后,从第 i 个传感器路径反向传播到位置 $\mathbf{d}$ 的电场分量。在该聚焦点的能量集中度可定义为

$$E(\mathbf{p}) = \max_{\mathbf{d} \in \Omega} \int_{t_0}^{t_1} |u(\mathbf{r}, t)|^2 dt \quad (10)$$

式中: Ω 为聚焦区域;积分区间 $[t_0, t_1]$ 为反演信号持续时间。能量集中度越高,说明该注入位置对应的聚焦点越接近真实源点。因此,粒子群的优化目标为

$$\min_{\mathbf{p}} f(\mathbf{p}) = -E(\mathbf{p}) \quad (11)$$

即在三维搜索空间中寻找最优注入点 $\mathbf{p}^*$, 使得反演过程的聚焦能量最强。在粒子群迭代过程中,第 k 次迭代时第 j 个粒子的速度和位置更新公式为

$$v_{jl}^{k+1} = \omega v_{jl}^k + c_1 \gamma_1 (p_{jl}^{\text{best}} - x_{jl}^k) + c_2 \gamma_2 (g_l^{\text{best}} - x_{jl}^k) \quad (12)$$

$$x_{jl}^{k+1} = x_{jl}^k + v_{jl}^{k+1} \quad (13)$$

式中: x_{jl}^k 为粒子 j 在第 k 次迭代时聚焦位置的第 l 维分量; v_{jl}^k 为粒子 j 在第 k 次迭代时对应速度的第 l 维分量; p_{jl}^{best} 为粒子 j 的个体历史最优位置的第 l

维分量; g_l^{best} 为种群全局最优位置的第 l 维分量; c_1 和 c_2 为学习因子, γ_1 和 γ_2 为 $[0, 1]$ 的随机数; ω 为惯性权重。

为增强收敛性能,本文引入动态惯性权重策略,保证了粒子在搜索初期保持较大的惯性权重,使粒子能够以较大步长探索整个解空间,从而提高全局搜索能力,避免过早陷入局部最优;在搜索后期逐渐减小惯性权重,促使粒子围绕全局最优解区域进行精细搜索,从而提升定位精度^[24-25]。惯性权重随迭代次数的动态调整公式如下

$$\omega(n) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{n}{N} \quad (14)$$

式中: $\omega_{\max}$ 为最大惯性权重,设置为 0.9; $\omega_{\min}$ 为最小惯性权重,设置为 0.4; n 为当前迭代次数; N 为最大迭代次数。

在搜索初期,较大的个体学习因子 c_1 使粒子更多依赖自身的历史最优位置,有助于保持种群多样性;随着迭代进行,逐渐减小 c_1 并增大群体学习因子 c_2 , 使粒子更多依赖全局最优信息,加快收敛速度。学习因子的动态调整公式如下

$$c_1(n) = (c_{1_{\min}} - c_{1_{\max}}) \frac{N-n}{N} + c_{1_{\max}} \quad (15)$$

$$c_2(n) = (c_{2_{\max}} - c_{2_{\min}}) \frac{N-n}{N} + c_{2_{\min}} \quad (16)$$

式中: $c_{1_{\min}}$ 和 $c_{1_{\max}}$ 分别为 2.5 和 0.5; $c_{2_{\min}}$ 和 $c_{2_{\max}}$ 分别为 0.5 和 2.5。这种互补变化策略使得搜索初期粒子更依赖自身历史经验以保持多样性,而在搜索后期则更多以来群体最优信息以加快收敛速度。

1.3 局部放电定位流程

本文提出的基于改进粒子群优化与电磁时间反演的局部放电定位流程如图 3 所示,具体流程如下。

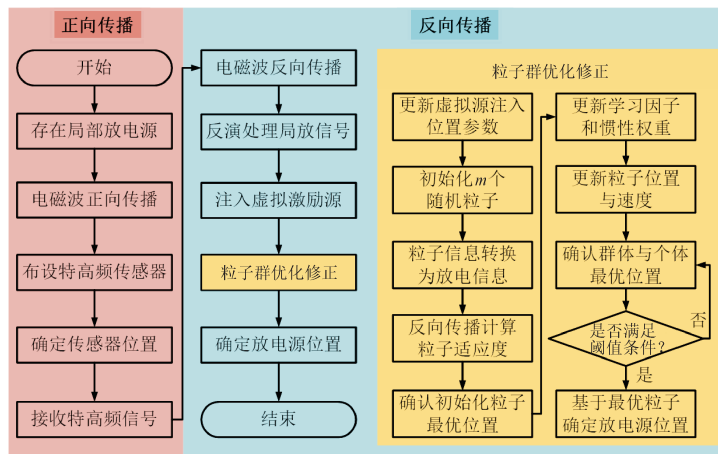


图3 GIS局部放电定位流程

Fig. 3 GIS partial discharge localization process

(1)正向传播。在正向传播阶段,局部放电被视为电磁波的激励源,其辐射的电磁波在GIS内部空间中传播,并被传感器接收。各传感器所记录的时域电场信号不仅包含源点的时空信息,还蕴含了电磁波在复杂结构中传播路径的特征^[26]。

(2)反向传播。在反向传播阶段,原接收传感器被虚拟替换为辐射天线,作为虚拟源重新注入。注入信号为前一阶段获取的原始信号经时间反转处理后的结果。在等效模型中,反转信号沿原传播路径逆向传播,并最终在局部放电源附近实现能量聚焦。

(3)定位修正。在保持反演信号形式不变的前提下,逐步调整其空间注入坐标并重复时间反演过程,实现初始注入位置的优化。每次反演结束后,计算基于能量集中度的聚焦性能指标,将其作为优化目标函数,利用改进粒子群优化算法在三维搜索空间内进行迭代寻优,获得聚焦性能最优的注入位置。

2 案例分析

2.1 仿真结果与分析

2.1.1 仿真设置与放电模型构建

为研究不同结构形式下局部放电电磁波的传播特性,本文基于三维有限元电磁仿真软件构建了直筒型、L型和T型3种GIS腔体模型。模型由金属外壳、盆式绝缘子、单相导体、观察窗及气体绝缘介质组成。其中,金属外壳与观察窗采用铝合金材料,盆式绝缘子选用环氧树脂,腔体内充满六氟化硫气体。仿真域外层设置散射边界条件,以兼顾吸收性能与计算效率。整体网格采用自由四面体单元,并在绝缘子边缘、腔体拐角及导体连接处等电场梯度剧烈区域实施局部加密,以保证结果精度。

局部放电是GIS绝缘在局部高场区内产生的微弱放电现象,其电磁辐射机理可视作瞬态电流源在腔体中激发宽带脉冲信号的过程。一般而言,GIS局部放电可近似为ns级电流脉冲在气体介质与金属边界间传播的电磁瞬变现象。组合高斯函数常被用于模拟局部放电激发的特高频信号。借鉴文献^[27]中针对金属突起物缺陷拟合的局部放电数学模型,本文将其作为激励源,以模拟实际放电过程,表达式如下

$$f(t) = \sum_{i=1}^m a_i \exp\left(-\frac{(t-b_i)^2}{q_i^2}\right) \quad (17)$$

式中: t 为时间; m 为放电脉冲极值的个数; a_i 为局部放电脉冲幅值; q_i 表示脉冲的陡峭程度。本文取 $m=3$ 以模拟金属突起物缺陷的局部放电电流特性。

激励以线电流源形式加载于腔体内部离散单元,并在激励源区域进行局部网格加密来确保其特征尺度得到充分解析。仿真采用时域瞬态分析模块,时间步长设为0.05 ns。

2.1.2 直筒型腔体仿真结果分析

首先,以直筒型腔体为研究对象,开展基于本文方法的局部放电源定位研究。参考文献^[13]的实验布置方案,选取靠近内导体、靠近腔体外壳、靠近气体域中心以及靠近盆式绝缘子4类典型区域作为放电源布置位置。为确保统计结果的代表性与可靠性,在每类典型区域内均随机设置100组放电源位置,并分别进行反演计算。

表1总结了直筒型腔体典型区域内放电源在误差修正前后的定位结果。结果表明,误差修正后整体定位精度均明显提升,其中靠近气体域中心的放电源提升幅度最大,平均绝对误差降至23.8 mm;而靠近盆式绝缘子区域的放电源受边界反射与几何遮挡影响,仍表现出相对较高的误差(36.2 mm)。从坐标分量分析可见, x 、 y 方向的定位精度均优于 z 方向。其原因在于时间反演过程中所采用的线电流源方向与 z 轴平行,使反演能量在 z 轴上存在一定扩散,从而削弱该方向的聚焦效果并降低定位精度。

表1 直筒型腔体典型区域内放电源定位结果
Table 1 Results of discharge source location in a typical area of a straight cylindrical cavity

放电源位置	维度	修正前平均 误差/mm	修正后平均 误差/mm
近内导体	x 轴	17.1	14.1
	y 轴	33.9	24.9
	z 轴	59.4	37.2
	平均	36.8	25.4
近腔体外壳	x 轴	27.8	20.6
	y 轴	33.8	27.4
	z 轴	55.7	35.7
	平均	39.1	27.9
近气体域中心	x 轴	27.5	21.5
	y 轴	19.7	17.4
	z 轴	47.3	32.5
	平均	31.5	23.8
近盆式绝缘子	x 轴	42.7	32.1
	y 轴	29.4	21.8
	z 轴	63.5	54.7
	平均	45.2	36.2

注:黑体数据为各放电源位置定位结果平均值。

以靠近内导体区域某处放电源为例,图 4 给出了误差修正前后的反演定位影像对比。可以看到,未经修正时反演信号虽能在源点附近形成初步聚焦,但聚焦强度不足且存在明显偏差。引入改进粒子群优化后,聚焦效果明显增强,场强在真实源点处高度集中,定位精度显著提升。其原因在于该优化机制能够在时间反演过程中动态调整虚拟源注入点坐标,迭代搜索能量集中度最大的注入位置,从而有效弥补虚拟源注入点偏移带来的定位误差。

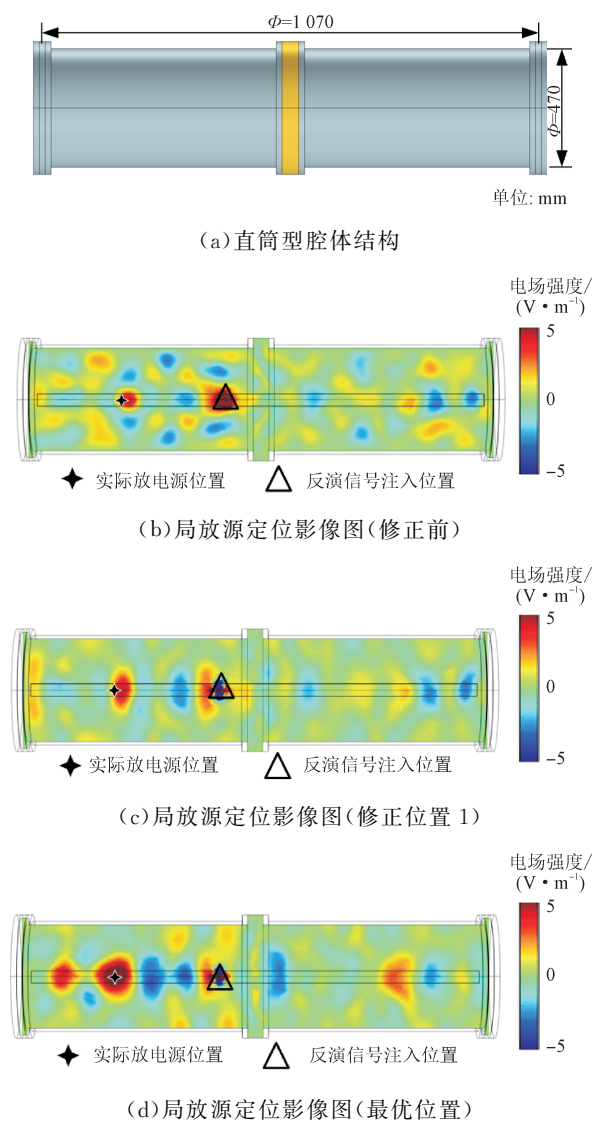


图 4 直筒型腔体反演定位影像图
Fig. 4 Reversal localization image of straight cylindrical cavity

为验证能量集中度判据的有效性,本文将其与常用的最大场强判据及密度聚类判据进行了对比,表 2 给出了不同判据下的时间反演定位结果。从中可以看出,本文方法在靠近内导体、腔体外壳、气体域中心及盆式绝缘子区域内均获得更低的平均定位

误差,验证了其在反演定位中的有效性。造成这一差异的原因在于:最大场强判据依赖瞬时峰值,易受局部随机峰值牵引;密度聚类仅基于空间分布,难以描述能量的时域演化。相比之下,能量集中度判据综合考虑了时域内的能量累积效应,能够有效抑制虚假聚焦,提高定位结果的稳定性与可靠性。

表 2 不同聚焦性能判据下反演定位结果
Table 2 Inversion positioning results under different focusing performance criteria

放电源位置	判据类型	相对误差/%	绝对误差/mm
近内导体	最大场强	6.7	37.1
	密度聚类	5.1	28.7
	本文方法	4.8	25.4
近腔体外壳	最大场强	9.6	42.2
	密度聚类	6.4	32.1
	本文方法	5.1	27.9
近气体域中心	最大场强	5.9	30.4
	密度聚类	4.3	24.7
	本文方法	4.2	23.8
近盆式绝缘子	最大场强	11.8	54.7
	密度聚类	8.2	41.8
	本文方法	6.4	36.2

2.1.3 T 型腔体仿真结果分析

考虑到 GIS 腔体普遍存在拐角及分支结构,本文进一步构建了 T 型腔体进行定位测试,其结构如图 5(a)所示。表 3 给出了 T 型腔体典型区域内放电源在误差修正前后的定位结果。从中可以看出,在误差修正前,各区域的定位误差相比直筒型腔体明显增大。主要原因在于 T 型结构引入多分支路径,使电磁波传播与反射更加复杂,反演聚焦能量分布趋于离散,易形成虚拟聚焦点,导致定位精度下降。经误差修正后,各区域的定位精度均得到显著提升,整体平均误差降低 34.7 mm。其中,靠近盆式绝缘子区域的平均绝对误差下降 38.8 mm,改进效果最为显著。

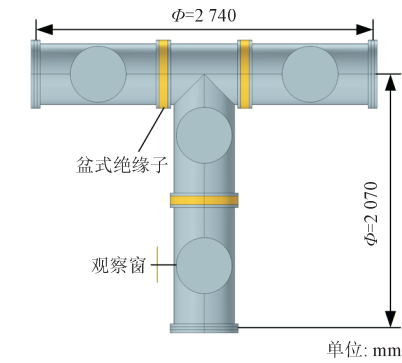
以近气体域中心区域内某处放电源为例,图 5 展示了不同虚拟源注入位置下的反演定位影像。文中所示反演定位影像均基于完整时域局放信号经时间反演后得到的能量聚焦度最优时刻的电场分布。可以看到,图 5(b)中高电压幅值区域高度集中并紧贴真实放电源位置,说明最优注入点能够获得最佳聚焦定位效果。相比之下,图 5(c)与图 5(d)的高幅值区域明显发散,且与真实源点偏离较大,表明注入

点偏离最优位置会导致聚焦减弱,定位准确性随之下降。与图 4 中靠近内导体区域的定位结果相比,近气体域中心区域的聚焦更加清晰集中,也进一步验证了表 1 中定位结果的可靠性。

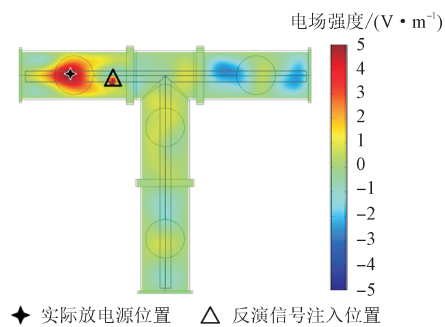
表 3 T 型腔体典型区域内放电源定位结果

Table 3 Results of locating the discharge source in a typical area of the T-shaped cavity

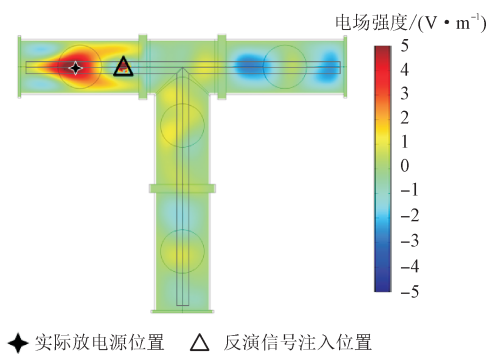
放电源位置	误差修正	相对误差/%	绝对误差/mm
近内导体	否	11.4	77.2
	是	5.8	43.5
近腔体外壳	否	10.9	75.8
	是	5.5	40.6
近气体域中心	否	8.6	68.4
	是	4.7	37.2
近盆式绝缘子	否	12.4	85.9
	是	6.5	47.1



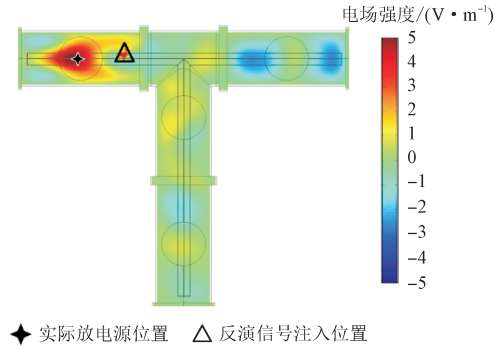
(a) T 型腔体结构



(b) 最优注入位置



(c) 注入位置 1



(d) 注入位置 2

图 5 直筒型腔体反演定位影像图

Fig. 5 Reversal localization image of straight cylindrical cavity

为验证本文所提改进粒子群优化算法的收敛性能,对该放电源的优化过程进行分析,并与传统粒子群算法、遗传算法和麻雀算法进行对比。图 6 给出了不同算法的适应度函数收敛曲线,其中横轴为迭代次数,纵轴为适应度函数值。由图可见,改进粒子群算法在约 12 次迭代后即趋于稳定,而遗传算法和麻雀算法约在 20 次迭代后才基本收敛,表明本文方法具有更快的收敛速度。相比传统粒子群算法,改进算法在迭代后期仍保持适应度下降趋势,说明其具备更强的跳出局部最优能力,从而提升了全局搜索性能。

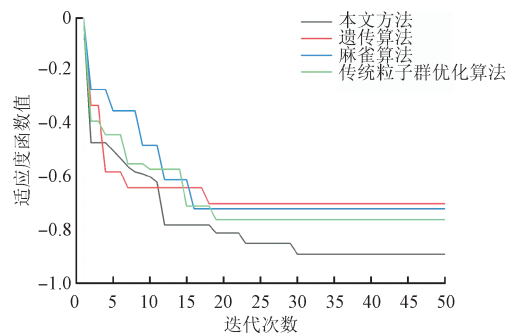


图 6 不同优化方法的适应度函数值变化

Fig. 6 Changes in fitness function values for different optimization methods

2.1.4 L 型腔体仿真结果分析

L 型腔体也是 GIS 腔体常见的结构类型,为此,本文构建了如图 7(a)所示的 L 型腔体结构,其在典型区域内放电源定位结果见表 4。结果表明,L 型腔体内放电源平均定位误差为 69.9 mm。经改进粒子群优化后,其平均定位误差为 37.4 mm,相比优化前误差减少 32.5 mm,大幅提升 L 型腔体内放电源定位结果的准确率,验证了本文所提方法的有效性。

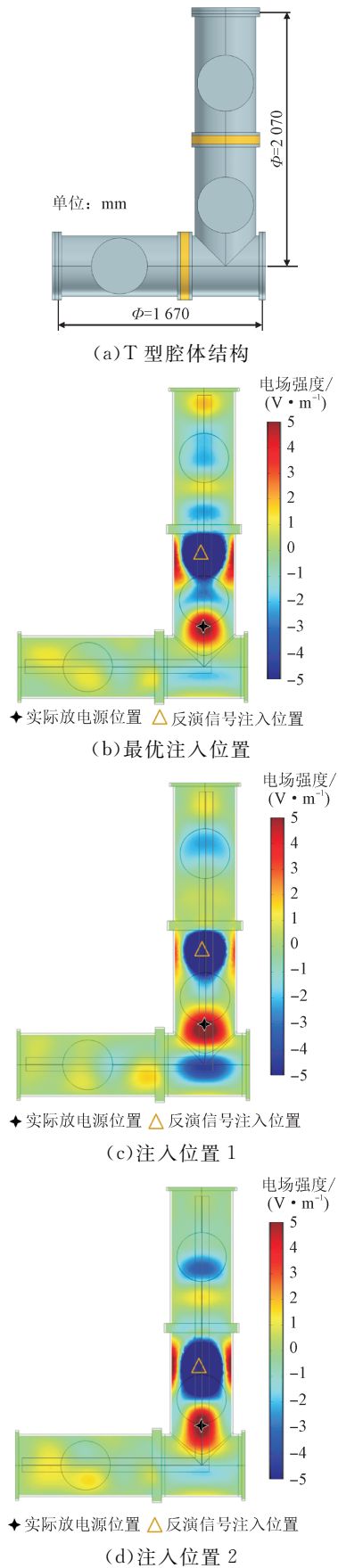


图 7 L 型腔体反演定位影像图

Fig. 7 L-type cavity reversal localization image

表 4 L 型腔体典型区域内放电源定位结果

Table 4 Results of locating the discharge source in a typical area of the L-shaped cavity

放电源位置	误差修正	相对误差/%	绝对误差/mm
近内导体	否	12.6	73.9
	是	6.4	40.8
近腔体外壳	否	12.1	69.5
	是	5.7	35.3
近气体域中心	否	11.2	58.2
	是	5.2	30.7
近盆式绝缘子	否	13.4	78.1
	是	6.9	42.6

以靠近腔体外壳区域内某处放电源为例,图 7 展示了其在改进粒子群优化搜索过程中不同注入位置下的时间反演结果。由定位影像图可见,经误差修正后,虚拟激励源在最优注入位置下的反演结果在真实局放电源位置处呈现出最高的场强聚焦度,且未出现额外的能量聚集区。相较之下,在位置 1 和位置 2 处的反演结果中均出现了明显的虚拟聚焦点。尽管这些虚拟聚焦点的场强低于真实局部放电源位置的场强,但其存在仍会对定位结果产生干扰。

为进一步评估不同腔体结构下的定位精度与稳定性,分别统计直筒型、L 型和 T 型腔体中 400 组放电源定位结果的平均绝对误差,并绘制图 8 所示的累积密度函数(CDF)曲线。结果表明,直筒型腔体的 CDF 曲线上升最快,在误差 26 mm 时累积密度已超过 80%,说明误差分布最集中,定位精度与稳定性最佳。L 型腔体的 CDF 曲线上升明显放缓,在 33 mm 时累积密度约为 60%,至 45 mm 附近才接近 90%,反映出腔体弯折导致多径效应增强、误

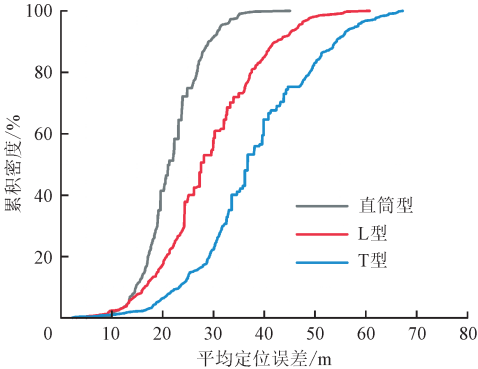


图 8 不同腔体结构下定位误差的累积密度曲线

Fig. 8 Cumulative density curve of the localization errors for different cavity structures

差分散性增加。T 型腔体的 CDF 曲线最为平缓并整体右移,45 mm 内累积密度仅约 70%,50 mm 以上仍存在显著分布,说明多分支结构带来的强反射与能量叠加使虚假聚焦更易出现,导致定位鲁棒性显著下降。

为评估本文方法在不同信噪比条件下的定位性能,向传感器采集的局部放电信号中叠加不同幅度的高斯白噪声后进行时间反演,结果如表 5 所示。可以看出,随着信噪比降低,噪声成分增强导致平均定位误差有所增加。但即使在信噪比仅为 10 dB 时,各腔体结构的平均绝对误差仍低于误差修正前的水平,表明该方法在低信噪比条件下依然能够保持稳定的定位精度,具备良好的抗噪鲁棒性。

表 5 不同信噪比下各腔体结构定位结果

Table 5 Localization results of each cavity structure under different signal-to-noise ratios

信噪比/ dB	相对误差/%			绝对误差/mm		
	直筒型	T 型	L 型	直筒型	T 型	L 型
10	6.4	6.9	8.3	35.9	50.6	48.3
0	9.5	7.4	10.5	41.3	55.1	56.6
-10	11.2	8.2	11.7	48.5	69.4	65.1

2.2 实验结果与分析

2.2.1 GIS 局部放电实验平台

在实验室环境下搭建了 GIS 局部放电实验平台。实验采用单相直筒型 GIS 腔体作为实体设备,其内径为 350 mm、长度为 1 330 mm。在 GIS 盆式绝缘子位置安装 PDU-G2 型号特高频传感器,其检测带宽为 300~1 500 MHz,负载阻抗为 50 Ω ,灵敏度为 -90 dB。实验电源采用额定电压为 250 kV、额定容量为 50 kV · A 的无晕工频试验变压器,其本体局部放电量小于 5 pC;放大器工作频率带宽为 300~1 500 MHz,增益 40 dB;示波器采样率为单通道 10^{10} s⁻¹,模拟带宽 2 GHz。局部放电源采用金属尖端缺陷模型:在缺陷模型高压端设置一根长度约 20 mm 的铜针,并将其固定在可伸缩绝缘支架上。通过调整支架位置及伸缩长度即可在腔体内模拟不同空间位置的局部放电源,其几何中心被视为真实放电源位置。此外,构建该腔体的等效模型,为后续时间反演提供基础。

2.2.2 定位结果分析

表 6 给出了实验腔体不同典型区域的放电源定位结果。可以看出,放电源位于气体域中心时误差

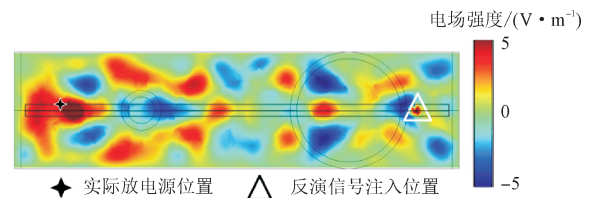
最小,与前述仿真结论一致。引入误差修正机制后,各区域的定位性能均有所提升,其中近内导体、近腔体外壳及近气体域中心区域的平均误差分别减少了 38.2、56.7、41.5 mm,验证了该机制的有效性。尽管整体定位精度得到改善,但实验结果与仿真结果仍存在一定差距,主要源于两方面原因:一是实验腔体几何尺寸的测量及建模存在不可避免的误差,且模型未能完全包含倒角、螺栓和支撑件等局部细节,导致几何还原度有限;二是实验中获取的局部放电信号受到传感器响应和耦合特性的影响,与仿真中的理想激励条件存在差异,从而影响反演信号的聚焦效果及最终定位精度。

表 6 实验室腔体典型区域内放电源定位结果

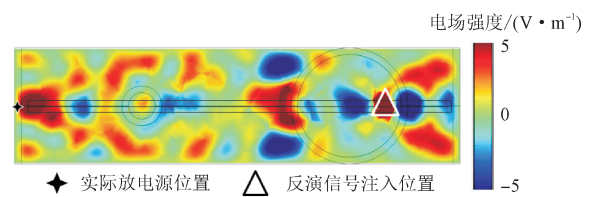
Table 6 Results of locating the discharge source in a typical area of the laboratory cavity

放电源位置	误差修正	相对误差/%	绝对误差/mm
近内导体	否	16.3	124.1
	是	13.8	85.9
近腔体外壳	否	25.3	149.3
	是	14.0	92.6
近气体域中心	否	15.7	109.4
	是	11.5	67.9

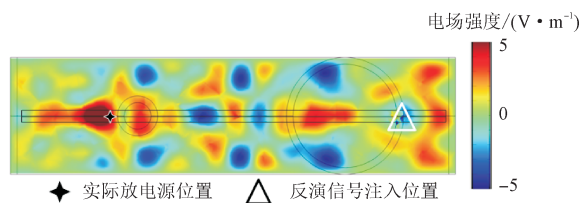
图 9 给出了实验腔体不同区域放电源的时间反演影像。受实验室环境噪声和电磁干扰影响,反演结果中出现幅值不均的杂散斑块,削弱了高幅值区域的聚焦特性。例如,在靠近腔体外壳的图 9(b)中,高幅值区呈离散分布,聚焦强度有所降低。尽管存在上述干扰,反演信号仍能在真实放电源附近形成可辨识的聚焦区域,具备较好的可行性与鲁棒性。



(a)局放源定位影像图(近内导体)



(b)局放源定位影像图(近腔体外壳)



(c)局放源定位影像图(近气体域中心)

图9 实验室腔体反演定位影像图

Fig.9 Laboratory cavity reversal localization image

3 结 论

针对现有时间反演定位方法存在定位精度不足、鲁棒性差等问题,本文提出一种利用改进粒子群优化与电磁时间反演相结合的定位方法,实现了对GIS局部放电源的高精度、强鲁棒定位。本文得到主要结论如下。

(1)引入能量集中度聚焦判据替代传统方法,有效削弱了虚拟聚焦源对定位结果的影响。结果表明,与最大场强判据相比,本文所提方法的定位相对误差降低约30%,显著提升了定位的稳定性与可靠性。

(2)引入误差修正机制可有效减小因虚拟源注入位置偏差导致的聚焦点偏移,并借助智能优化算法实现反演信号的高度聚焦。结果表明,修正前直筒型、T型和L型腔体的平均定位误差分别为38.2、76.8、69.9 mm;修正后分别降至28.3、42.1、37.4 mm,定位精度显著提升。

(3)实验结果表明,本文方法的平均定位误差为70.9 mm,较未采用误差修正机制时降低约36%。后续研究将面向更复杂电磁环境的现场条件,开展进一步的定位实验与工程应用研究。

参考文献:

- [1] 王艳新,闫静,王建华,等. 基于多级二阶注意力孪生网络的小样本GIS局部放电诊断方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(8): 2255-2264.
WANG Yanxin, YAN Jing, WANG Jianhua, et al. Few-shot partial discharge diagnosis for gas-insulated switchgear using a novel multi-level second-order attention Siamese network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2255-2264.
- [2] 宋颜峰,郑中原,于金山,等. 机-电联合作用下SF₆气体中金属微粒运动行为与局部放电特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(7): 74-83.
SONG Yanfeng, ZHENG Zhongyuan, YU Jinshan, et al. Study on the motion behavior and partial discharge

- characteristics of metal particles in SF₆ gas under the combined action of mechanical and electrical [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(7): 74-83.
- [3] 向念文,余凯,魏定生,等. 基于双混频时差法的局部放电特高频信号双联合定位方法及验证[J/OL]. 高电压技术. (2025-09-26) [2025-09-27]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250622>.
XIANG Nianwen, YU Kai, WEI Dingsheng, et al. Dual joint localisation method and validation of partial discharge UHF signals based on double-mixed-frequency time-difference method [J/OL]. High Voltage Engineering. (2025-09-26) [2025-09-27]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250622>.
- [4] 刘佳鑫,唐佳能,郎业兴. 基于插值互相关函数的GIS局部放电特高频时差定位方法[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 62-67.
LIU Jiaxin, TANG Jianeng, LANG Yexing. Approach for time-delay location of UHF signals of GIS partial discharge based on interpolating cross-correlation function [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 62-67.
- [5] 饶显杰,周凯,黄永禄,等. 考虑相速度频变特性的改进相位差算法局部放电定位[J]. 电工技术学报, 2021, 36(20): 4379-4388.
RAO Xianjie, ZHOU Kai, HUANG Yonglu, et al. Partial discharge location using improved phase difference method considering frequency-dependent characteristic of phase velocity [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(20): 4379-4388.
- [6] WANG Yanxin, YAN Jing, YANG Zhou, et al. Simultaneous partial discharge diagnosis and localization in gas-insulated switchgear via a dual-task learning network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(6): 4358-4370.
- [7] WANG Yanxin, YAN Jing, YANG Zhou, et al. Deep domain-invariant long short-term memory network for partial discharge localization in gas-insulated switchgear [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(4): 2810-2820.
- [8] WANG Yanxin, YAN Jing, QI Meirong, et al. Collaborative domain adaptation network for partial discharge source localization in gas-insulated switchgear [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-12.
- [9] 席英杰,张崇兴,董明,等. 基于蒙特卡洛模拟的声电联合局部放电定位阵列设计及快速定位方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 3029-3038.
XI Yingjie, ZHANG Chongxing, DONG Ming, et al.

- Acoustic-electric joint sensor array design and fast partial discharge localization technology based on Monte Carlo simulation [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(7): 3029-3038.
- [10] 李臻, 罗林根, 陈敬德, 等. 基于RSSI指纹的特高频局部放电定位法 [J]. *高电压技术*, 2018, 44(6): 2033-2039.
- LI Zhen, LUO Linggen, CHEN Jingde, et al. UHF partial discharge localization methodology based on RSSI fingerprinting [J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(6): 2033-2039.
- [11] 臧奕茗, 王辉, 钱勇, 等. 基于三维光学指纹和NPSO-KELM的GIL局部放电定位方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(20): 6754-6763.
- ZANG Yiming, WANG Hui, QIAN Yong, et al. GIL partial discharge localization method based on 3D optical fingerprint and NPSO-KELM [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(20): 6754-6763.
- [12] LI Xi, WANG Xiaohua, YANG Aijun, et al. Partial discharge source localization in GIS based on image edge detection and support vector machine [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(4): 1795-1802.
- [13] 王森, 罗林根, 钱勇, 等. 基于模拟故障数据库的GIS局部放电反演方法 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(5): 1663-1672.
- WANG Miao, LUO Linggen, QIAN Yong, et al. Partial discharge inversion method for GIS based on simulated fault database [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(5): 1663-1672.
- [14] 安腾远, 丁霄, 王秉中. 基于时间反演技术的复杂天线罩辐射波束畸变纠正 [J]. *物理学报*, 2023, 72(3): 17-25.
- AN Tengyuan, DING Xiao, WANG Bingzhong. Time-inversion technique based correction of complex radome radiation beam distortion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(3): 17-25.
- [15] 和少寅, 谢彦召, 宋宇, 等. 基于电磁时间反演传递函数相关性的传输线网络故障定位方法 [J]. *高电压技术*, 2023, 49(5): 1851-1859.
- HE Shaoyin, XIE Yanzhao, SONG Yu, et al. Fault location method in transmission line network based on transfer function correlation of electromagnetic time reversal [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(5): 1851-1859.
- [16] 谢敏, 周凯, 何珉, 等. 基于时间反演技术的电力电缆局部放电定位方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(11): 3402-3409.
- XIE Min, ZHOU Kai, HE Min, et al. Partial discharge location for power cable based on the time reversal technique [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(11): 3402-3409.
- [17] ZOHREVAND J, KARAMI H, RUBINSTEIN M, et al. Partial discharge localization using time reversal: application to gas insulated switchgear [J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 212: 108655.
- [18] 田思源, 黄建冲, 陈秋菊, 等. 时间反演技术在电子对抗中的应用及趋势分析 [J]. *电光与控制*, 2020, 27(4): 55-60.
- TIAN Siyuan, HUANG Jianchong, CHEN Qiuju, et al. Application of time reversal technology in electronic countermeasure and the trend analysis [J]. *Electronics Optics & Control*, 2020, 27(4): 55-60.
- [19] 李佳洋, 赵九一, 钱勇, 等. 基于电磁波时间反演的GIS局部放电定位研究 [J]. *上海交通大学学报*, 2025, 59(12): 1763-1772.
- LI Jiayang, ZHAO Jiuyi, QIAN Yong, et al. Study on location of partial discharge in GIS based on electromagnetic wave time reversal [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2025, 59(12): 1763-1772.
- [20] ZHENG Quanfu, LUO Linggen, SHEN Peifeng, et al. Simulation of PD localization through digital twin model and time-reversal algorithm under the semi-enclosed condition [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2023, 30(5): 2117-2125.
- [21] 周南, 罗林根, 高兆丽, 等. 基于神经网络的局部放电特高频时延定位误差修正算法 [J]. *高电压技术*, 2018, 44(11): 3641-3648.
- ZHOU Nan, LUO Linggen, GAO Zhaoli, et al. Error correction algorithm of ultra high frequency partial discharge time delay localization based on multiple neural networks [J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(11): 3641-3648.
- [22] LAI Zekai, YANG Mingfa, LI Jiancheng, et al. Internal vibration source inversion of gas insulated switchgear by ensemble Kalman filter-finite element analysis and particle swarm optimization [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2025, 40(6): 3334-3344.
- [23] 赵丽, 程养春, 杨紫淇, 等. 基于电场反演的实验室局部放电试验中绝缘材料内部放电点定位方法准确度分析 [J/OL]. *电工技术学报*. (2025-10-30)[2025-11-10]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250987>.
- ZHAO Li, CHENG Yangchun, YANG Ziqi, et al. Accuracy analysis of the method for locating internal discharge points of insulating materials in laboratory partial discharge experiment based on electric field in-

- version [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society. (2025-10-30)[2025-11-10]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250987>.
- [24] 吴沁, 周顺仟, 王星联. 改进粒子群优化滚珠丝杠进给系统 BP 神经网络 PID 控制策略研究 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(6): 24-33.
- WU Qin, ZHOU Shunqian, WANG Xinglian. Research on BP neural network PID control strategy for improving particle swarm optimization of ball screw feed system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(6): 24-33.
- [25] 吴旭阳, 管港云, 刘志伟, 等. 基于改进的粒子群优化-反向传播神经网络的 CO₂ 红外吸收光谱定量分析 [J]. 光学学报, 2024, 44(11): 305-314.
- WU Xuyang, GUAN Gangyun, LIU Zhiwei, et al. Quantitative analysis of CO₂ infrared absorption spectrum based on improved particle swarm optimization-back propagation neural network [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(11): 305-314.
- [26] 王艳新, 闫静, 耿英三, 等. 多任务元学习网络的气体绝缘组合电器局部放电同时诊断与定位 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(7): 105-115.
- WANG Yanxin, YAN Jing, GENG Yingsan, et al. Research on gas-insulated switchgear partial discharge diagnosis and location method based on multi-task meta-learning [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(7): 105-115.
- [27] 唐炬, 周倩, 许中荣, 等. GIS 超高频局放信号的数学建模 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 106-110.
- TANG Ju, ZHOU Qian, XU Zhongrong, et al. Establishment of mathematical model for partial discharge in GIS using UHF method [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 106-110.
- (编辑 刘杨 陶晴)