



基于超声波声压衰减效应的局部放电源定位与强度标定

王玉龙 张晓虹 李丽丽 高俊国 郭宁 程成

Localization and intensity calibration of partial discharge based on attenuation effect of ultrasonic sound pressure

Wang Yu-Long Zhang Xiao-Hong Li Li-Li Gao Jun-Guo Guo Ning Cheng Cheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 095209 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201727

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201727>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于等效弹性模量的微裂纹-超声波非线性作用多阶段模型

Modelling of multi-stage nonlinear interaction of micro-crack and ultrasonic based on equivalent elastic modulus

物理学报. 2017, 66(13): 134301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.134301>

基于双高斯衰减模型的超声回波处理方法

Ultrasonic echo processing method based on dual-Gaussian attenuation model

物理学报. 2019, 68(8): 084303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182080>

超声波电喷推力器羽流中和特性研究

Plume neutralization mechanism for ultrasonically aided electro spray thruster

物理学报. 2018, 67(4): 040201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171972>

超声背散射骨质评价中的频散衰减测量与补偿

Measurement and compensation of frequency-dependent attenuation in ultrasonic backscatter signal from cancellous bone

物理学报. 2019, 68(18): 184301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190599>

旋转滑动弧放电等离子体滑动放电模式的实验研究

Experimental study on gliding discharge mode of rotating gliding arc discharge plasma

物理学报. 2020, 69(19): 195203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200672>

液体电极上辉光放电丝的运动特性研究

Rotating characteristics of glow discharge filament on liquid electrode surface

物理学报. 2018, 67(7): 075201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172205>

基于超声波声压衰减效应的局部放电源定位与强度标定*

王玉龙¹⁾²⁾ 张晓虹^{1)†} 李丽丽²⁾ 高俊国¹⁾ 郭宁¹⁾ 程成³⁾

1) (哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 工程电介质及其应用教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

2) (哈尔滨理工大学荣成学院, 荣成 264300)

3) (国家电网吉林省电力有限公司四平供电公司, 四平 136000)

(2020年10月17日收到; 2020年11月27日收到修改稿)

局部放电是导致电力设备绝缘劣化或击穿的重要原因之一. 为此, 结合即到达时差法定位原理, 在广义互相关法的基础上, 引入量子遗传算法对局部放电源进行精准定位. 而后以声波传播损耗、反射及折射现象导致的声压衰减效应为研究切入点, 首次建立局部放电源超声波信号标定的数学模型. 结果表明: 在针-板放电模型中, 利用量子遗传算法计算的局部放电源较为精准, 其最大偏差为 (0.27 ± 0.13) cm, 与遗传算法、模拟退火算法、粒子群优化算法以及广义互相关法相比, 其定位精度分别提高了 33.57%, 41.51%, 32.12% 以及 87.26%. 与此同时, 由于声压衰减效应, 当测量得到的超声信号电压幅值相同时, 随着测试距离增大, 放电源处的视在放电量逐渐增加. 若测试距离为 37.80 cm 时, 局部放电源的视在放电量为 633.83 pC, 与 7.00 cm 相比, 放电强度增大了 28.51%. 局部放电源的放电曲线与标定拟合曲线几乎完全重合, 验证了放电源放电程度标定模型的准确性.

关键词: 局部放电, 超声波定位, 放电强度, 数学模型

PACS: 52.80.Pi, 43.28.Tc, 51.50.+v, 47.50.Cd

DOI: 10.7498/aps.70.20201727

1 引言

在电力设备绝缘系统中, 短时的局部放电 (partial discharge, PD) 不会引起绝缘的穿透性击穿, 但长期的局部放电是导致介质局部损坏甚至击穿的重要原因之一^[1]. 因此, 在电气绝缘系统的性能研究中, 局部放电得到研究者广泛关注^[2-5].

关于电气绝缘材料局部放电的报道有很多^[6-10]. 张若兵等^[11]采用经验模态分解与 Teager 能量算子相结合的方法, 对放电脉冲进行有效分割, 并利用时域反射法对放电点进行精确定位. 经计算放电定位准确率高达 81%, 验证了该方法可在允许误差

范围内实现局部放电源的高准确定位, 这为电缆局部放电定位提供新的解决思路. Ahmed 等^[12]研究了中压交联聚乙烯电缆绝缘的诊断方法, 发现在局部放电发展过程中, 只有电树枝出现后放电强度急剧上升, 电缆绝缘性能的严重退化, 局部放电量才会出现激增现象. Iorkyase 等^[13]利用无线电指纹识别技术提取局部放电信号的强度, 进而利用 k -近邻定位算法和前馈神经网络定位算法实现局部放电的精确定位. 结果发现, 神经网络算法在噪声环境下具有优异的稳定性, 平均定位误差均小于 2 m.

将近年来研究者对局部放电定位的研究成果汇总, 如表 1 所列^[14-22]. 大量相关文献报道发

* 国家自然科学基金 (批准号: 51577045) 和广东省普通高校毕业生创新人才项目 (批准号: 2020KQNCX117) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: x_hzhang2002@hrbust.edu.cn

表 1 局部放电的超声定位精度比较
Table 1. Comparison of ultrasonic location accuracy of PD.

使用算法	研究对象	综合距离误差 $\Delta R/cm$	最大偏差 D_{max}/cm
广义互相关算法	油箱体内	3.9	4.4
时延法	变压器绝缘	0.8	0.6
基于高斯-牛顿迭代的等值声速修正算法		1.7	1.6
粒子群优化算法		2.2	1.9
遗传算法		1.8	2.0
多平台测向与全局搜索的阵列定位的结合	三电容放电管模型	7.8	6.0
基于测向线公垂线中点的局部放电相控超声几何定位算法		13.9	10.3
Chan算法	电缆绝缘	9.0	12.0

现^[23-25], 局部放电定位研究主要集中在利用简单算法与传感器综合实现定位, 或复杂算法对放电信号进行图像化处理实现放电定位, 而关于不同算法的局部放电定位精度, 以及放电源真实放电量的相关研究至今未见报道.

本文采用声-声检测法结合不同算法对局部放电源的定位精度进行对比分析, 并结合声波传播损耗和声压衰减效应, 建立超声信号标定的数学模型, 揭示超声信号与放电量的定量关系, 为实现局部放电源放电强度的推算提供理论依据.

2 基于 QGA 局部放电源定位的理论基础

在局部放电超声波信号测试过程中, 以脉冲电流法测试系统为基础, 考虑到超声信号在金属内衰减小、速度快的传播特点, 特选用金属箱体作为试验箱, 并将压电传感器放置于样品附近, 从而得到局部放电的超声波信号^[26]. 由于局部放电产生的声信息是很微弱的, 因此需将得到的超声信号经过前置放大, 而后利用数据采集器等器件输入计算机, 从而实现局部放电超声信号的检测, 试验系统

电路图如图 1 所示.

在试验系统中, 为了产生局部放电信号, 将针-板放电模型置于 $1\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 箱体中, 其中直径为 0.6 mm 、曲率半径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的钨针为高压针电极, 直径为 75 mm 、厚度为 10 mm 的抛光黄铜板为地电极, 而 4 mm 针-板间放置不同厚度的电缆纸, 其结构示意图如图 2 所示. 值得注意的是, 为了避免外界空间中的电磁信号干扰, 需将整个实验系统置于良好的屏蔽室中, 以提高测量精度. 与此同时, 局部放电产生的声波在介质内以球面波的形式向外传播, 在电缆油与金属箱体介质的界面处会发生折射和反射, 因此, 箱壁处的传感器除了采集到正常声波外, 还存在界面处的反射波. 为了保证测量的准确性, 在不与传感器接触的其他三个箱壁和底部均铺设一层疏松多孔的聚酯纤维作为吸声材料.

本文以不同位置超声波传感器检测到的时间差为计算依据, 以确定局部放电源位置, 即到达时差法 (time difference of arrival method, TDO-AM)^[27,28]. 由于 TDOAM 不用考虑声发射信号到达指定传感器的时间, 并且其定位精度满足要求,

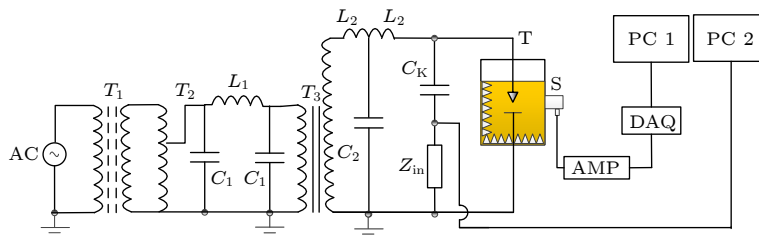


图 1 超声波检测试验系统电路图 (T_1 , 隔离变压器; T_2 , 调压器; C_1, L_1 , 低压低通 π 型滤波器; T_3 , 高压实验变压器; C_2, L_2 , 高压低通滤波器; C_K , 耦合电容器; Z_{in} , 检测阻抗; T, 油箱; S, 压电传感器; AMP, 前置放大器; DAQ, 数据采集卡)

Fig. 1. Test system schematic diagram of ultrasonic testing (T_1 , isolating transformer; T_2 , voltage regulator; C_1, L_1 , low-voltage low-pass π filter; T_3 , high voltage test transformer; C_2, L_2 , high-voltage low-pass filter; C_K , coupling capacitor; Z_{in} , detection impedance; T, Tank; S, piezoelectric sensor; AMP, preamplifier; DAQ, data acquisition card).

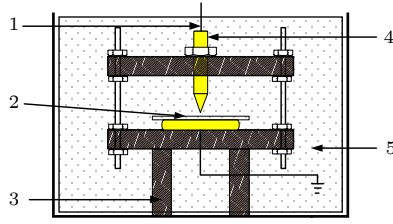


图2 针-板放电模型结构示意图 (1, 高压引线; 2, 聚乙烯试验板; 3, 聚四氟乙烯支架; 4, 铜电极; 5, 电缆油)
Fig. 2. Schematic diagram of needle-plate discharge model (1, high voltage wire; 2, polyethylene sample; 3, support frame of polytetrafluoroethylene; 4, copper electrode; 5, cable oil).

因此, 利用 TDOAM 对油箱内局部放电源定位的基本原理进行分析. 为了研究方便, 选取油箱的一底角为坐标原点 $O(0, 0, 0)$, 并保证箱体处于第一象限, 建立空间笛卡尔坐标系. 在箱体内部以针板模型的针尖为局部放电源, 其位置为 $P(x, y, z)$, 而箱体外表面安装 n 个传感器, 其位置坐标分别为: $S_1(x_1, y_1, z_1), S_2(x_2, y_2, z_2), S_3(x_3, y_3, z_3), \dots, S_i(x_i, y_i, z_i), \dots, S_n(x_n, y_n, z_n)$, 其示意图如图 3 所示. 以超声波传感器 S_1 为参考传感器, 获取的信号为基准信号, 则传感器 S_i 与传感器 S_1 接收的声发射信号的时间差为 $\tau_{i1} = t_i - T$, 其中 t_i 为局部放电信号到达传感器 S_i 的时间, 而 T 为局部放电信号到达传感器 S_1 的时间, 如图 4 所示.

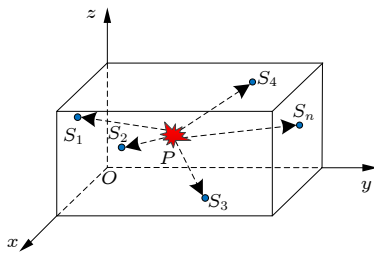


图3 油箱中放电源及超声波传感器的位置图
Fig. 3. Location illustration of PD source and ultrasonic sensors in the oil tank.

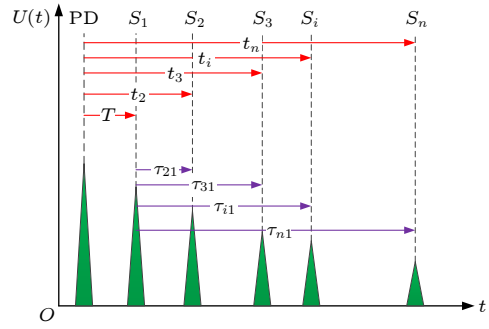


图4 TDOAM 中的超声时差示意图
Fig. 4. Schematic diagram of ultrasonic time difference in TDOAM.

由于超声波在油箱内传播路径复杂, 等效声速 v_e 受到温度、压力等因素的影响. 在实际应用中, 一般加入变量 v_e , 可以在一定程度上提高定位的精度. 此时, 局部放电源的定位方程应满足下式:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = (v_e T)^2, \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = [v_e (T + \tau_{21})]^2, \\ \vdots \\ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = [v_e (T + \tau_{i1})]^2, \\ \vdots \\ (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2 = [v_e (T + \tau_{n1})]^2. \end{cases} \quad (1)$$

则此非线性方程可以简明地表示为

$$\begin{aligned} f_i(x, y, z, v_e) &= \left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ &\quad - \left[(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ &\quad - v_e \tau_{i1} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

一般来说, (2) 式为超定方程, 但求解其精确解比较困难, 因此要考虑 x, y, z 的约束条件并在约束条件中寻找最优解. 基于 TDOAM 的超声定位方法的数学模型可以归纳为一个约束优化问题:

$$\begin{aligned} \min \{D_f(x, y, z, v_e)\} &= \sum_{i=2}^n \left\{ \left[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. - \left[(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - v_e \tau_{i1} \right\}^2 \end{aligned} \quad \begin{cases} 0 \leq x \leq x_{\max}, \\ 0 \leq y \leq y_{\max}, \\ 0 \leq z \leq z_{\max}, \\ 1200 \leq v_e \leq 1500 \text{ m/s}, \end{cases} \quad (3)$$

式中, x_{\max} , y_{\max} 和 z_{\max} 分别为油箱的等效长度、宽度和高度. 采用最小二乘法可以计算出传统意义上的最优解, 但该算法的初始值必须给定, 并且容易陷入局部收敛状态, 无法准确定位真实局部放电源的位置. 因此, 需要引入量子遗传算法 (quantum genetic algorithm, QGA) 改善其定位效果.

表 2 QGA 的程序过程
Table 2. Procedures of QGA.

过程	程序
种群初始化	$Q(t) = \psi_{qj}\rangle = \sum_{k=1}^{2^m} \frac{1}{\sqrt{2^m}} S_k\rangle$
预设进化条件	$C_{\max}, t, N, P_{\max}, P_c$
For $t = 1, 2, 3, \dots, C_{\max}$	
for $i = 1, 2, \dots, N$	
	$P_i = f_i / \sum_{i=1}^N f_i$
	$P(t) = \{p_1^t, p_2^t, \dots, p_n^t\}$,
算法实现	$P_c = \begin{cases} \frac{P_{c\max} + P_{c\min}}{1 + \exp\left\{A \left[\frac{2(f - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}\right]}\right\}} + P_{c\min}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ P_{c\max}, & f \leq f_{\text{avg}} \end{cases}$ $P_m = \begin{cases} \frac{P_{m\max} - P_{m\min}}{1 + \exp\left\{A \left[\frac{2(f'' - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}\right]}\right\}} + P_{m\min}, & f'' \geq f_{\text{avg}} \\ P_{m\max}, & f'' \leq f_{\text{avg}} \end{cases}$ $F_{i+1}(U(x, y, z, v_e)) = C_{t\max} - U_t(x, y, z, v_e)$ $X_i \& x_{\text{best},i} \& f(x) > f(x_{\text{best},i}) \& \Delta\theta_i$ $S(\alpha_i, \beta_i);$
end	
end	
	$S(\alpha_i, \beta_i); P(t); X;$

QGA 是量子计算与遗传算法相结合的产物, 是一种基于量子比特 (量子位) 和量子力学状态叠加等计算原理的混合概率算法 [29–31]. QGA 的程序过程如表 2 所列, 其中 N 为种群大小, $Q(t)$ 为初始种群, C_{\max} 为每一代的最大值, $|\psi\rangle$ 为量子位的状态 ($|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$), α 和 β 为振幅概率 ($|\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 = 1$), S_k 是字符串长度 $m(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 描述的第 k 个状态值 (0 或 1), 得到的二进制解列为 $P(t)$; 而 P_i 为轮盘选择中个体 i 被选中的概率, f_i 为个体 i 的适应度, f_{\max} 为种群的最大适应度, f_{avg} 为每一代种群的平均适应度, $f' = (f_{\max} + f_{\text{avg}})/2$; f 是交叉两个体中较大的适应度, f'' 为突变个体的适应度. 此外, 量子旋转门的调整策略如表 3 所列, 其中, x_i 和 $x_{\text{best},i}$ 分别为当前个体的第 i 个量子位和当前最优个体的第 i 个量子位, $f(x)$ 和 $\Delta\theta_i$ 分别为适应度函数和旋转角度值, 而 $S(\alpha_i, \beta_i)$ 为旋转角度的方向. 至此, QGA 通过采用量子比特编码和量子旋转门实现了个体的调整, 并引入了量子交叉变异可在很短的时间内寻找最优解, 进而可改善局部放电源的定位效果.

3 超声波放电信号标定的数学模型

一般认为, 局部放电剧烈时, 相应的超声波声强大, 视在放电量大; 而局部放电微弱时, 产生的超声波声强小, 视在放电量少; 由此可知, 局部放电超声信号的强弱与视在放电量的大小呈现正相关性 [32–34].

以此为依据, 寻求局部放电过程中超声波信号的电压幅值与视在放电量的关系, 并以相关系数作为表征二者相关性的特征参数. 为了描述两组

表 3 量子旋转门的调整策略
Table 3. Adjustment strategies of quantum rotation gates.

x_i	$x_{\text{best},i}$	$f(x) > f(x_{\text{best},i})$	$\Delta\theta_i$	$S(\alpha_i, \beta_i)$			
				$\alpha_i \beta_i > 0$	$\alpha_i \beta_i < 0$	$\alpha_i = 0$	$\beta_i = 0$
0	0	false	0	0	0	0	0
0	0	true	0	0	0	0	0
0	1	false	0.01π	+1	-1	0	± 1
0	1	true	0.01π	-1	+1	± 1	0
1	0	false	0.01π	-1	+1	± 1	0
1	0	true	0.01π	+1	-1	0	± 1
1	1	false	0	0	0	0	0
1	1	true	0	0	0	0	0

不同变量的集合 X 与 Y 间的相关关系, 特引入统计学中的参数——相关系数. 设 P_{XY} 为变量 X 与变量 Y 之间的相关系数, 则计算式如下式所示:

$$P_{XY} = \text{COV}(X, Y) / \sqrt{D(X)D(Y)}, \quad (4)$$

式中, D 表示变量的方差, 而 $\text{COV}(X, Y)$ 为两组数据的协方差 ($\text{COV}(X, Y) = E(XY) - E(X)E(Y)$, E 为数学期望). 当 $P_{XY} = 1$ 时, 变量 X 与变量 Y 的两组数据相关; 而当 $P_{XY} = 0$ 时, 变量 X 与变量 Y 的两组数据无关.

脉冲电流法测量局部放电时, 示波器仅显示放电的电压信号, 而不能直接显示放电量, 这需用脉冲电流法校正曲线来估算. 经脉冲电流法校正后, 脉冲电流电压 U 与视在放电量 Q 之间的关系如下式所示:

$$Q = K_0 U, \quad (5)$$

式中, K_0 为局部放电的视在放电量 Q 与脉冲电流法的平均电压 U 的线性系数, 其大小等于校正脉冲发生器的注入电荷 Q_0 与脉冲电压信号 U_0 的比值. 相应的校正曲线如图 5 所示, 脉冲电流法的校正曲线 $Q = 5.01U - 0.26$. 在示波器的灵敏度不变时, 均可依据此校正曲线推算出局部放电视在放电量.

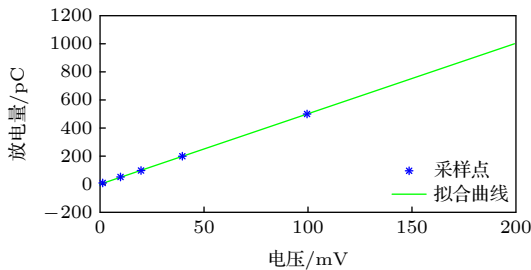


图 5 脉冲电流法的校正曲线
Fig. 5. Calibration curve of pulse current method.

与此同时, 一段时间内局部放电的超声信号平均电压与脉冲电流平均电压呈线性关系, 则超声信号的平均电压 \bar{U} 与脉冲电流电压信号 U 关系为

$$U = K_1 \bar{U}, \quad (6)$$

式中, K_1 为局部放电超声信号与脉冲电流法平均电压幅值的线性系数. 将 (5) 式代入 (6) 式得

$$Q = K_0 K_1 \bar{U}. \quad (7)$$

从而可以得到超声波信号的平均电压幅值与视在放电量间的关系.

利用 4 个不同位置超声波传感器进行局部放

电试验. 设计-板模型中针电极的初始位置为 (x_0, y_0, z_0) , 传感器 1, 2, 3 和 4 的位置分别为 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) 和 (x_4, y_4, z_4) . 当局部放电位置和视在放电量均不确定时, 保持 4 个传感器位置不变, 利用 (3) 式即可通过传感器 1, 2, 3 和 4 的坐标位置, 计算出新的局部放电位置 (x_{01}, y_{01}, z_{01}) . 此时, 以传感器 1 为例, 利用下面公式可计算出传感器 1 与初始标定放电点间距离为 s_{10} , 与新的放电点间距离为 s_{11} :

$$s_{10} = \left[(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

$$s_{11} = \left[(x_{01} - x_1)^2 + (y_{01} - y_1)^2 + (z_{01} - z_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

当 $s_{10} \neq s_{11}$ 时, 超声波信号在传输过程中由于多余的传播路径而造成更多的衰减, 使信号的声压 P_x 改变, 如下式所示:

$$P_x = P_0 e^{-\alpha x}, \quad (10)$$

式中, P_0 为放电点的初始声压, α 为衰减系数. 由于此次标定过程中, 视在放电量未知, 则放电发生位置的初始声压设为 P_{new} . 将 P_{new} , s_{10} 以及 s_{11} 分别代入公 (10) 式得

$$P_{10} = P_0 e^{-\alpha s_{10}}, \quad (11)$$

$$P_{11} = P_{\text{new}} e^{-\alpha s_{11}}, \quad (12)$$

式中, P_{10} 为传感器 1 在初始标定时时的接触声压, 而 P_{11} 为传感器 1 在新局部放电标定时的接触声压. (12) 式与 (11) 式相减, 整理得

$$P_{11} - P_{10} = P_0 e^{-\alpha s_{10}} \left[\frac{P_{\text{new}}}{P_0} e^{-\alpha(s_{11}-s_{10})} - 1 \right]. \quad (13)$$

与此同时, 超声波传感器在声电转换过程中, 必须考虑压电传感器的灵敏度和声压 P 的变化, 因此引入另一参数——压电系数 W , 则不同放电位置激发超声波信号的电压幅值 U_{10} 和 U_{11} 可用下面公式表示:

$$U_{10} = W P_{10}, \quad (14)$$

$$U_{11} = W P_{11}. \quad (15)$$

将两式相减, 并将 (13) 式代入可得

$$U_{11} - U_{10} = W P_0 e^{-\alpha s_{10}} \left[\frac{P_{\text{new}}}{P_0} e^{-\alpha(s_{11}-s_{10})} - 1 \right]. \quad (16)$$

再将 (14) 式和 (11) 式代入 (16) 式可得

$$U_{11} = U_{10} \frac{P_{\text{new}}}{P_0} e^{-\alpha(s_{11}-s_{10})}. \quad (17)$$

而后将 (17) 式代入 (12) 式可得

$$Q_{11} = K_0 K_1 U_{10} \frac{P_{\text{new}}}{P_0} e^{-\alpha(s_{11}-s_{10})}. \quad (18)$$

此时, 只要初始声压比 P_{new}/P_0 已知, 通过 (18) 式即可得到初始标定值 U_{10} 和当前视在放电量 Q_{11} 的关系. 以目前的测试手段, 超声波的初始声压和初始声强并不易测量. 但当局部放电在放电量较大时, 超声波信号的初始升压正比于相应的电压幅值, 可近似认为线性关系, 则有^[35]

$$\frac{P_{\text{new}}}{P_0} = \frac{U_{11}}{U_{10}}. \quad (19)$$

将 (19) 式代入 (18) 式可得到

$$Q_{11} = K_0 K_1 U_{11} e^{-\alpha(s_{11}-s_{10})}. \quad (20)$$

采用类似的方法, 分别得到传感器 2, 3 和 4 的标定关系, 其如下式所示:

$$\begin{cases} Q_{11} = K_0 K_1 U_{11} e^{-\alpha(s_{11}-s_{10})}, \\ Q_{21} = K_0 K_2 U_{21} e^{-\alpha(s_{21}-s_{20})}, \\ Q_{31} = K_0 K_3 U_{31} e^{-\alpha(s_{31}-s_{30})}, \\ Q_{41} = K_0 K_4 U_{41} e^{-\alpha(s_{41}-s_{40})}, \end{cases} \quad (21)$$

式中, Q_{11} 为新放电源的视在放电量, $Q_{11} = Q_{21} = Q_{31} = Q_{41}$; K_0 为局部放电的视在放电量 Q 与脉冲电流平均电压幅值 U 的线性系数; K_1, K_2, K_3 和 K_4 分别为传感器 1, 2, 3 和 4 测得的超声平均电压幅值与脉冲电流平均电压幅值的线性系数; U_{11}, U_{21}, U_{31} 和 U_{41} 分别为传感器 1, 2, 3 和 4 测量的超声平均电压幅值; s_{11}, s_{21}, s_{31} 和 s_{41} 分别为传感器 1, 2, 3 和 4 与新放电源间的距离; s_{10}, s_{20}, s_{30} 和 s_{40} 分别为传感器 1, 2, 3 和 4 与初始标定时放电源间的距离.

4 结果与讨论

4.1 局部放电源的定位精度分析

若针-板放电模型的针尖为放电源, 则放电源的位置坐标为 $P(x, y, z)$, 而油箱外表面 4 个超声波传感器的位置坐标为 $S_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i = 1, 2, 3, 4$). 此时以第 1 个传感器接收超声波信号的时刻 T 为时间基准, 而 t_i ($i = 2, 3, 4$) 为其他传感器接收信号的时刻, 则时延 $\tau_{i1} = t_i - T$. 设介质超声波等值

波速 v_e 为 (1380—1450) m/s, 根据 (2) 式可以计算出局部放电的位置. 在局部放电定位过程中, QGA、遗传算法 (genetic algorithm, GA)、模拟退火算法 (simulated annealing algorithm, SAA) 以及粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法的参数如表 4 所列.

表 4 局部放电定位的算法参数

Table 4. Algorithm parameters of PD localization.

算法	参数	数值
QGA	群体数量	40
	最大遗传次数	200
GA	群体数量	40
	最大遗传次数	200
	重组概率	0.9
	变异概率	0.01
SAA	初始温度	10
	最终温度	0.0001
	衰减系数	0.8
	冷却新状态迭代次数	1000
PSO	种群大小	40
	学习因子	2
	初始惯性权值	0.9
	原始粒子群	1
	迭代次数	100

利用 QGA, GA, SAA, PSO 算法以及广义互相关法 (generalized cross correlation method, GCC) 等算法计算局部放电的位置和平均绝对误差如表 5 和图 6 所示. 此五种算法均可实现不同放电源的定位, 但其定位精度各有不同, 其中 QGA 的定位较为精准, 其平均绝对误差低至 (0.17 ± 0.04) cm, 而 GCC 定位最为粗糙, 平均绝对误差高达 (1.32 ± 0.14) cm.

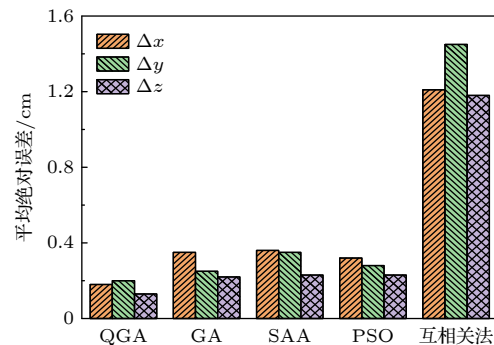


图 6 不同算法下局部放电定位的平均绝对误差变化

Fig. 6. Average absolute errors of PD location under different algorithms.

表 5 不同算法的局部放电定位
Table 5. The PD location of different algorithms.

算法	位置			
	实验组1 (12, 14, 6) cm	实验组2 (14, 10, 6) cm	实验组3 (15, 11, 6) cm	实验组4 (16, 12, 6) cm
QGA	(11.79, 13.61, 5.78)	(13.78, 9.88, 6.06)	(14.88, 10.86, 5.90)	(15.82, 11.84, 5.88)
GA	(12.33, 14.24, 5.73)	(13.62, 10.22, 6.16)	(14.65, 11.24, 6.22)	(16.34, 12.30, 6.24)
SAA	(11.58, 13.41, 5.78)	(13.66, 10.32, 6.24)	(15.34, 11.22, 6.20)	(16.32, 12.28, 6.26)
PSO	(12.12, 14.21, 6.15)	(14.32, 9.72, 5.84)	(15.42, 11.28, 6.30)	(16.42, 12.34, 6.32)
GCC	(13.38, 15.06, 7.42)	(15.51, 9.62, 6.94)	(15.71, 8.32, 7.24)	(14.76, 10.31, 7.13)

但仅用绝对误差说明其定位精度是并不准确的, 特采用相对误差 ε_r , 最大偏差 D_{\max} 以及综合距离误差 ΔR 等误差在各个角度进行分析, 其计算式分别如下面公式所示:

$$\varepsilon_r = \left| \frac{L_{\text{act}} - L_{\text{cal}}}{L_{\text{act}}} \right| \times 100\%, \quad (22)$$

$$D_{\max} = \max \left\{ \begin{array}{l} |x_{\text{act}} - x_{\text{cal}}| \\ |y_{\text{act}} - y_{\text{cal}}| \\ |z_{\text{act}} - z_{\text{cal}}| \end{array} \right\}, \quad (23)$$

$$\Delta R = \left[(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (24)$$

式中, $P(x, y, z)$ 和 $P_c(x_c, y_c, z_c)$ 分别为实际和计算的放电源位置坐标, 而 L_{act} 和 L_{cal} 分别为实际和计算坐标. 基于不同算法的局部放电定位误差 ε_r , D_{\max} 和 ΔR 的平均误差如图 7 所示.

在图 7 中, 无论是绝对误差、最大偏差还是综合误差, GCC 的误差值均明显高于其他四种误差, 以综合误差为例, GCC 的误差为 2.37 cm, 约 QGA 的 7.65 倍, 定位精度最为粗糙. 而在其他四种误差中, QGA 的误差量明显较小, 最大平均相对误差仅为 2.08%, 相比传统的 GA, SAA 和 PSO 最高可提高 86.54%, 占有绝对的定位优势, 这与绝对误差的计算结果相一致.

4.2 超声波信号标定精度分析

为了保证测试数据的一致性, 采用脉冲电流法与超声波法同时测量局部放电信号, 可认为脉冲电流信号的放电量为超声波信号对应的放电量. 为了减小误差, 在数据处理过程中, 每组试验均取 150 个数据进行曲线拟合, 并取 400 μs 内平均值作为超声信号电压 \bar{U} 与脉冲电流电压信号 U .

利用超声波传感器分别在针-板电极间放入 2, 3 和 4 mm 的电缆纸进行局部放电试验. 针板间隙

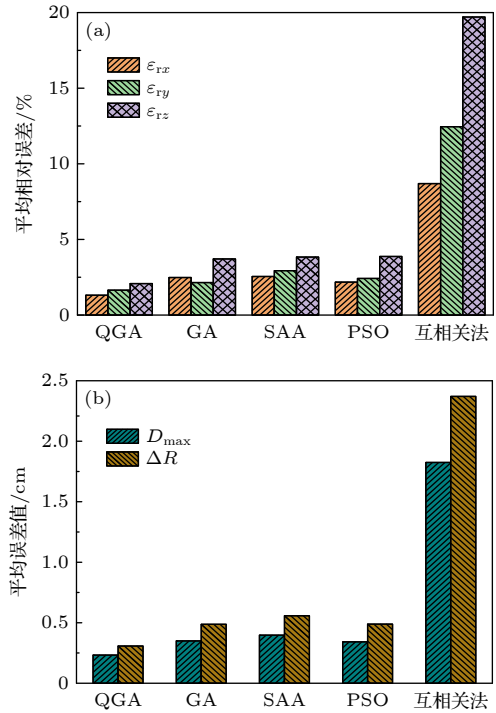


图 7 不同算法下局部放电定位的平均误差变化 (a) 平均绝对误差; (b) 平均最大偏差和综合误差
Fig. 7. Average errors of PD location under different algorithms: (a) ε_{rx} , ε_{ry} and ε_{rz} ; (b) D_{\max} and ΔR .

内不同电缆纸厚度的超声信号电压幅值与放电量的关系如图 8 所示, 其系统灵敏度和相关系数如表 6 所列. 由图 8 和表 6 可知, 超声波信号的平均电压幅值与视在放电间呈现一定的正相关性, 且基本属于线性关系. 但随着传感器测量位置的不同, 放电信号测试距离的改变, 超声信号会由于衰减出现一定的误差, 这需要对局部放电超声波信号进行进一步的标定.

为了观察放电源与传感器间测量距离 s 对测量结果的影响, 在油箱外表面放置 4 个超声波传感器, 其位置分别 (0, 7, 6), (17, 10, 6), (25, 7, 6) 和 (17, 23, 6), 经过大量实验数据计算可获取其标定参数, 如表 7 所列.

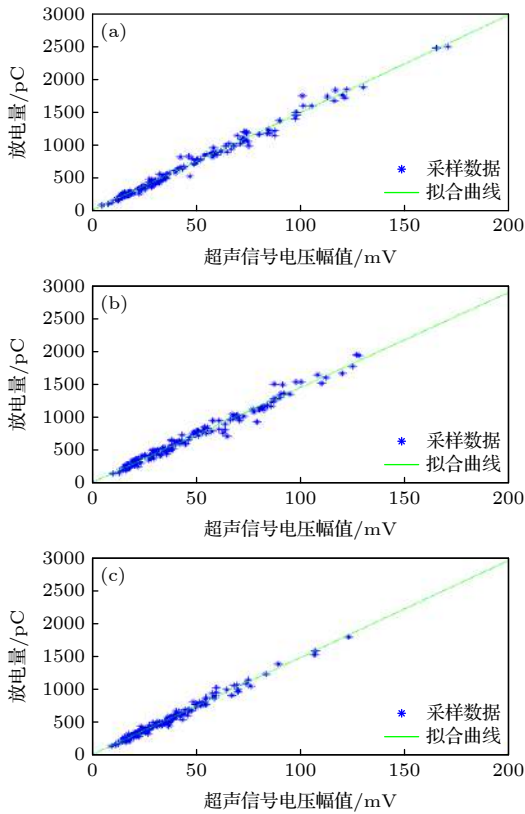


图 8 不同绝缘纸厚度的电压幅值与放电量拟合曲线 (a) 2 mm; (b) 3 mm; (c) 4 mm
 Fig. 8. Fitting curves of voltage amplitude and discharge amplitudes at different thickness of insulating papers: (a) 2 mm; (b) 3 mm; (c) 4 mm.

表 6 系统灵敏度和相关系数的变化

Table 6. Change of system sensitivity and correlation coefficients.

电缆纸厚度/mm	系统灵敏度	相关系数
2	14.91	0.99
3	14.37	0.99
4	14.84	0.99

表 7 局部放电的线性系数

Table 7. Linear coefficients of PD.

线性系数	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4
数值	5.01	2.98	2.93	2.86	2.95

在超声频率 100 kHz 下进行放电源视在放电量的计算, 其结果如图 9 所示, 其中 s_y 为放电位置确定的放电曲线, 而 s_w 为标定拟合, 即放电位置和视在放电量未知时计算的放电曲线. 当 s 为 7.00 cm 时, s_y 和 s_w 的曲线完全重合, 这说明标定拟合是完全准确的.

由图 9 可知, 当超声信号电压相同时, 随着测量距离 s 逐渐增加, 由于超声信号的衰减, 放电声

源的视在放电量亦逐渐增大, 以超声波信号电压幅值 33 mV 为例, 当测量距离 s 为 37.80 cm 时, 经推算其对应的视在放电量为 633.83 pC, 与测量距离 7.00 cm 相比, 视在放电量增大了 28.51%. 并且, 随着测量距离增加, 单位测量距离的放电增长量 ΔQ 也在逐渐增大. 当 s 为 13.89 cm 时, 与测量距离 7.00 cm 相比, 放电增长量 ΔQ 为 4.03 pC/cm, 而当 s 为 37.80 cm 时, 与测量距离 7.00 cm 相比, 放电增长量 ΔQ 为 4.57 pC/cm, ΔQ 的增长速率提高了 13.40%. 通过视在放电量和放电增长量的分析可知, 放电源的定位计算对局部放电的视在放电量, 乃至放电强度的推算具有重要意义.

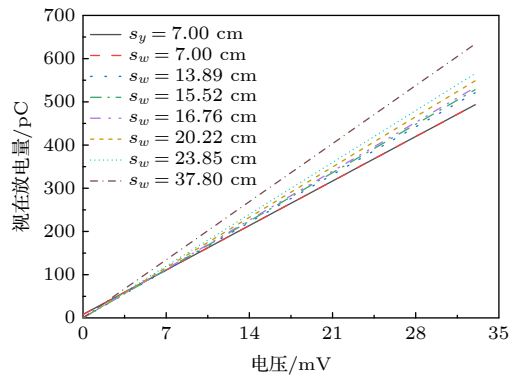


图 9 不同测量距离下视在放电量与电压的关系

Fig. 9. Relationship between apparent charge and voltage at different measuring distances.

5 结 论

以 TDOAM 定位原理为基础, 对局部放电源实现智能定位, 并对局部放电超声信号的放电强度标定方程进行修正及验证, 得到以下结论.

1) 局部放电源定位结果表明, 利用 QGA 计算局部放电源的定位较为精准, 其最大平均相对误差仅为 2.08%, 与传统的 GA, SAA 和 PSO 相比最高可提高 86.54%.

2) 局部放电超声波信号电压幅值与视在放电量间的相关系数高达 0.99, 从而揭示其线性正相关性.

3) 利用局部放电的视在放电量与超声信号电压的线性关系, 结合声波传播损耗和反射及折射导致的声压衰减效应, 建立了局部放电源放电强度标定的定量计算模型. 在针-板放电模型中, 当超声信号电压为 33 mV, 测试距离为 7.00 cm 时, 局部放

电源的放电曲线与标定拟合曲线几乎完全重合, 说明了标定定量模型的准确性;

4) 当超声信号电压幅值相同时, 由于声压衰减效应, 随着测试距离增大, 放电源处的视在电量逐渐增加. 当测试距离为 37.80 cm 时, 局部放电源的视在电量为 633.83 pC, 与 7.00 cm 相比, 放电强度增大了 28.51%.

参考文献

- [1] Li D, Hu H Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 117701 (in Chinese) [李丹, 胡海云 2014 物理学报 **63** 117701]
- [2] Lü Z P, Rowland S M, Chen S Y, Zheng H L 2018 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **25** 1999
- [3] Zhao F Q, Tang M, Guo F F 2020 *Electric Wire & Cable* **63** 20 (in Chinese) [赵法强, 唐明, 郭云飞 2020 电线电缆 **63** 20]
- [4] Romano P, Presti G, Imburgia A, Candela R 2018 *IEEE Electr. Insul. M.* **34** 32
- [5] Li J H, Han X T, Liu Z H, Li Y M 2015 *High Voltage Eng.* **41** 2583 (in Chinese) [李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 李彦明 2015 高电压技术 **41** 2583]
- [6] Heredia L C C, Mor A R 2019 *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* **107** 224
- [7] Callender G, Golosnoy I O, Rapisarda P, Lewin P L 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 125601
- [8] Du J C, Chen W G, Zhang Z X, Yang X 2020 *High Voltage Eng.* **46** 2185 (in Chinese) [杜劲超, 陈伟根, 张知先, 杨贤 2020 高电压技术 **46** 2185]
- [9] Xia R, Tan X, Chen J, Liu J, Hu L B, Li C Y, Wang W 2020 *Insulating Mater.* **53** 95 (in Chinese) [夏睿, 谭笑, 陈杰, 刘洋, 胡丽斌, 李陈莹, 王伟 2020 绝缘材料 **53** 95]
- [10] Zeng Z Z, Zhou Y, Hu K 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 070505 (in Chinese) [曾喆昭, 周勇, 胡凯 2015 物理学报 **64** 070505]
- [11] Zhang R B, Jin S, Du G 2020 *High Voltage Eng.* **46** 273 (in Chinese) [张若兵, 金森, 杜钢 2020 高电压技术 **46** 273]
- [12] Ahmed Z, Hussain G A, Lehtonen M, Varacka L, Kudelcik J 2016 *17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering* Prague, Czech Republic, May 16-18, 2016 p1
- [13] Iorkyase E T, Tachtatzis C, Atkinson R C, Glover I A 2015 *Loughborough Antennas & Propagation Conference* UK, Loughborough, November 2-3, 2015 p1
- [14] Lu Y, Lou Z D 1999 *Trans. Chin. Electrotech. Soc.* **14** 51 (in Chinese) [卢毅, 楼樟达 1999 电工技术学报 **14** 51]
- [15] Li Y Q, Lu F C, Xie H L, Yin M 2004 *International Conference on Power System Technology* Singapore, Singapore, November 21-24, 2004 p1371
- [16] Wu Z G 2007 *M. S. Thesis* (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology) (in Chinese) [吴治国 2007 硕士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [17] Veloso G F C, da Silva L E B, Noronha I, Lambert-Torres G 2008 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* Cambridge, UK, June 30-July 2, 2008 p1003
- [18] Tang L J, Luo R C, Deng M, Su J 2008 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **15** 492
- [19] Zhang L J, Xie Q, Li L, Lv F C 2012 *High Voltage Apparatus* **48** 30 (in Chinese) [张丽君, 谢庆, 李菱, 律方成 2012 高压电器 **48** 30]
- [20] Xie Q, Lv F C, Li Y Q, Huang H P, Li N Y, Tan X Y 2014 *Trans. Chin. Electrotech. Soc.* **26** 217 (in Chinese) [谢庆, 律方成, 李燕青, 黄华平, 李宁远, 谭向宇 2014 电工技术学报 **26** 217]
- [21] Qu L 2020 *M. S. Thesis* (Shanghai: Shanghai Dian Ji university) (in Chinese) [瞿磊 2020 硕士学位论文 (上海: 上海电机学院)]
- [22] Zhu Y C, Zhou L, Xu H S 2020 *Neural Comput. Appl.* **32** 1775
- [23] Zhu M X, Wang Y B, Liu Q, Zhang J N, Deng J B, Zhang G J, Shao X J, He W L 2017 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **24** 157
- [24] Zhang L Q, Sheng B J, Jiang W, Zhou W J, Tian Z, Tang Z Y 2015 *High Voltage Eng.* **41** 1204 (in Chinese) [张磊祺, 盛博杰, 姜伟, 周文俊, 田智, 唐泽洋 2015 高电压技术 **41** 1204]
- [25] Wu Y F, Huang S P, Jin G B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 130505 (in Chinese) [吴勇峰, 黄绍平, 金国彬 2013 物理学报 **62** 130505]
- [26] Du J Y 2013 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin University of Science and Technology) (in Chinese) [杜锦阳 2013 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨理工大学)]
- [27] Lu X 2017 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin University of Science and Technology) (in Chinese) [芦翔 2017 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨理工大学)]
- [28] Morshuis P H F 2005 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **12** 905
- [29] Liu H L 2016 *Appl. Acoust.* **102** 71
- [30] Zhu M X, Li J C, Chang D G, Zhang G J, Chen J M 2018 *Energies* **11** 1813
- [31] Smith J S, Baginski M E 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 2934
- [32] Xiao Z K, Xu C G, Xiao D G, Liu F, Yin M 2017 *Exp. Tech.* **41** 389
- [33] Gao S G, Zhang Y, Xie Q, Kan Y Q, Li S, Liu D, Lv F C 2017 *Energies* **10** 593
- [34] Xie Q, Li T, Tao J H, Liu X Y, Liu D, Xu Y Q 2016 *IET Radar Sonar Nav.* **10** 166
- [35] Sun C X, Luo B, Zhao W Q, Zhao X Z 1997 *Chin. J. Sci. Instrum.* **18** 453 (in Chinese) [孙才新, 罗兵, 赵文麒, 赵贤正 1997 仪器仪表学报 **18** 453]

Localization and intensity calibration of partial discharge based on attenuation effect of ultrasonic sound pressure*

Wang Yu-Long¹⁾²⁾ Zhang Xiao-Hong^{1)†} Li Li-Li²⁾ Gao Jun-Guo¹⁾
Guo Ning¹⁾ Cheng Cheng³⁾

1) (*Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China*)

2) (*College of Rongcheng, Harbin University of Science and Technology, Rongcheng 264300, China*)

3) (*Siping power Supply Company, State Grid Jilin Sheng Electric Power Co., LTD. Siping 136000, China*)

(Received 17 October 2020; revised manuscript received 27 November 2020)

Abstract

In the insulation system of power equipment, the partial discharge (PD) of short period does not cause the insulation to produce the penetrating breakdown, however the long-term PD of is one of the important causes of local deterioration, and even breakdown in dielectric. Therefore, it is very important to study the location of PD source and the calibration of discharge intensity. To achieve this, in this paper we take the needle-plate discharge model for example and go through the following steps respectively. Firstly, combined with the positive correlation between the ultrasonic signal and the apparent discharge magnitude in the process of PD, the ultrasonic method to detect partial discharge can be implemented. Then, based on the principle of time difference of arrival method (TDOAM), the accuracy of location is analyzed by using quantum genetic algorithm (QGA), genetic algorithm (GA), simulated annealing algorithm (SAA), particle swarm optimization (PSO) and generalized cross correlation method (GCC), respectively. And thus, starting from the study of the attenuation effect of sound pressure caused by the propagation loss, reflection and refraction of acoustic wave, the calibration model of PD intensity is established for the first time after determining the location of PD source with high precision. Some important findings are extracted from simulations and experimental results. First, the localization algorithm of PD source with high precision is observed. The localization of PD source by means of QGA is the most accurate, with maximum deviation of (0.27 ± 0.13) cm. Comparing with GA, SAA, PSO and GCC, the accuracy of location is improved by 33.57%, 41.51%, 32.11% and 87.26%, respectively. Second, due to the attenuation effect of sound pressure, when the measured voltage amplitude of ultrasonic signal is the same, the apparent discharge magnitude of PD source gradually increases with the test distance increasing. When the test distance is 37.80 cm, the apparent discharge magnitude of PD source is 633.83 pC, which increases by 28.51% compared with 7.00 cm. Moreover, simulation results and measurement results are compared with each other and they are well consistent. The discharge curve almost coincides with the calibration fitting curve of PD source when the test distance is 7.00 cm. Finally, it is concluded that the discharge intensity calibration model of PD source is accurate, which is of great significance in evaluating the extent of insulation damage.

Keywords: partial discharge, localization of ultrasonic method, discharge intensity, mathematical model

PACS: 52.80.Pi, 43.28.Tc, 51.50.+v, 47.50.Cd

DOI: 10.7498/aps.70.20201727

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51577045) and the Youth Innovation Talent Project of Universities of Guangdong Province, China (Grant No. 2020KQNCX117).

† Corresponding author. E-mail: x_hzhang2002@hrbust.edu.cn