

# 一种多样本信息的局部放电源 逐次逼近定位方法

唐 炬<sup>1,2</sup> 黄 亮<sup>2,3</sup> 曾福平<sup>1</sup> 张晓星<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院 武汉 430072)

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学) 重庆 400044

3. 国网重庆市电力公司永川供电公司 重庆 402160)

**摘要** 时延估计是利用时间差方法对局部放电(PD)源准确定位的关键,然而在测量时延时不可避免地产生误差,从而导致因时延获取准确度不高而带来定位误差大的问题。因此,为了降低时间差定位法中对准确获取时延的依赖性,提出一种基于多样本寻优PD源的逐次逼近定位方法。采用逐次逼近式粒子群搜索原理,对传统定位方法得到的单样本初值与传感器阵列所建立的寻优目标函数进行递归逼近处理,最终确定最优PD源位置。通过对实验室实测PD信号逐次逼近寻优定位,表明提出的逐次逼近定位方法可有效地解决因时间差测量不准确而引起的定位结果较差的难题,结果较传统时间差定位方法具有更高的准确度,验证了所提方法的正确性与有效性。

**关键词:** 局部放电 到达时间差 逐次逼近方法 粒子群优化 定位准确度

**中图分类号:** TM835

## A Positioning Approach Based on Successive Approximation of Multi-Samples for Partial Discharge Source

Tang Ju<sup>1,2</sup> Huang Liang<sup>2,3</sup> Zeng Fuping<sup>1</sup> Zhang Xiaoxing<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering Wuhan University Wuhan 430072 China)

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology  
Chongqing University Chongqing 400044 China

3. State Grid Chongqing Yongchuan Power Supply Company Chongqing 402160 China)

**Abstract** Time-delay estimation is the key to locate partial discharge (PD) source accurately with the time difference of arrival (TDOA) method. However, the time-delay error inevitably exists during measuring time difference, which leads to large location error because of low time delay accuracy. In order to reduce the dependency of the TDOA method on time delay accuracy, a novel PD source location approach based on successive approximation of multi-samples is proposed in this paper. The particle swarm optimization is employed to recurrently perform the optimization objective function. In this optimization objective function, the single sample value is obtained by the traditional TDOA method, while sensor array in turn determines the optimal location of the PD source. Experimental results show that the proposed method can effectively solve the problem of low location accuracy for the PD source caused by the poor accuracy of time delay measurements. The positioning result of the proposed method is potentially better than that of the traditional TDOA method, which verifies the proposed method.

**Keywords:** Partial discharge, time difference of arrival, successive approximation method, particle swarm optimization, positioning accuracy

## 0 引言

局部放电 (Partial Discharge, PD)<sup>[1]</sup>是由于电气设备使用初期内部绝缘缺陷产生的一种放电现象。PD 在运行电压下会不断发展、加剧, 最终将造成设备整体绝缘性能丧失而引发故障, 因此有“绝缘肿瘤”之称, 若不及早发现并加以“有效治理”, 它将由局部到整体, 致使设备内部绝缘发生击穿, 进而引发电网停电事故。因此, 如何快速、准确获取 PD 的有效信息, 以掌握电气设备内部的绝缘状况, 及时消除故障隐患, 确保其安全运行, 一直是电力变压器领域的研究热点之一<sup>[2,3]</sup>。

鉴于特高频 (Ultra High Frequency, UHF) 检测技术兼有抗干扰能力强和灵敏度高的特点, 该技术已经在电力变压器 PD 检测以及定位中得到应用, 并取得了一定的效果<sup>[4-7]</sup>。如文献[6]提出采用网格搜索法将整个变压器空间划分为若干网格进行定位, 且网格分得越细准确度越高, 不足在于其运算量较大且比较繁琐, 导致定位计算时间过长。利用 UHF 技术进行故障源定位, 关键在于如何精确获取时延以及对非线性三角定位方程求解<sup>[8-10]</sup>。为此, 国内外学者对该问题开展了大量研究, 并提出了许多解决的方法。例如文献[7,11]提出基于多样本非平稳信号的能量相关搜索提取时间差算法, 有效地解决了因时间差难以准确获取和用单样本数据对 PD 源定位结果分散性大的问题。文献[12]在未考虑不利因素影响情况下采用 UHF 法进行定位, 误差在 16cm 左右。文献[13]考虑背景噪声对定位结果的影响, 发现定位结果的准确性和可靠性取决于信号的信噪比质量与强度。

而在实际应用中, 时间差的测量受到诸多因素的影响: ①背景噪声干扰<sup>[14]</sup>, 甚至是强电磁干扰, 使得传感器捕获到混杂背景噪声的 PD 信号, 以致无论使用何种抗干扰技术, 也很难准确地提取出没有时延误差的时间差; ②传感器的响应特性<sup>[15]</sup>, 不同的传感器有不同的响应时间和灵敏度, 对初始时间的准确获取影响较大。此外, 传感器的安装位置也会影响接收的信号波形。因此, 众多影响因素必然导致难以准确获取 PD 信号时延, 时延误差进一步影响定位误差, 出现所谓“误差多级放大”的情况, 降低了定位准确度, 甚至无法定位。目前通常采用多次定位求算平均值的方法使结果尽可能地接近真实放电源的位置, 但该方法仅是简单地对结果进行平均计算处理, 并未能从根本上解决误差较大

问题。

因此, 针对因时延获取准确度不高而带来定位“误差污染”较大的问题, 以及为了减少到达时间差 (Time Difference of Arrival, TDOA) 定位法中对时延精确获取的依赖性, 本文引进“先污染后治理”的思想, 提出一种基于多样本全局搜索寻优 PD 源的逐次逼近定位方法。该方法首先对 PD 源信号进行 UHF 检测以获取多组样本数据, 采用 TDOA 定位法估算出对应的 PD 源的样本初值, 即初始 PD 源位置, 然后利用样本初值与传感器确定的多直线方程, 建立 PD 源到各直线方程距离之和的寻优目标函数, 再采用粒子群寻优算法对目标函数进行全局搜索, 最后确定最优 PD 源空间几何位置。并通过实验室获取的实测 PD 信号对所提方法进行有效性与正确性的验证。

## 1 到达时间差定位方法

### 1.1 时间差的计算

在 TDOA 定位法中, 时延的准确测量是时间差准确计算的前提, 也是定位精确与否的关键, 其定位原理是利用多个传感器获取反映 PD 信号某一点的时间特征, 然后将不同接收点的时间相减得到时间差, 再利用电磁波在不同媒质中的传播速度计算 PD 源的位置。

本文采用的是累积能量法<sup>[16]</sup>获取时延信息, 将测得的 PD 信号波形数据能量转换成能量累积曲线, 则曲线的拐点处即是 UHF 信号的到达时刻, 比较两曲线拐点处的时间差即可获得两信号的时间差。计算式为

$$E(m) = \sum_{i=0}^m u_i^2 \quad (1)$$

式中,  $u_i$  为所测到的 PD 波形中的第  $i$  点的电压值;  $m$  为采样点数。

当有 PD 发生时, 放电源将会辐射幅值大于背景噪声幅值的脉冲信号。由于信号能量最终将衰减为零, 因此 PD 信号波形数据经能量转换后累积能量曲线将趋于一常数。此时, PD 超高频信号的到达时刻将在信号累积能量图上对应为一个拐点, 通过比较两曲线的拐点处所对应的时刻即可获得两路信号的时延。图 1 为采用 UHF 传感器在同一时刻采集的两路 PD 信号对应的累积能量曲线, 其中  $\Delta t$  即为所要计算的时延。

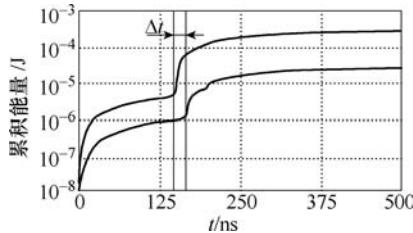


图1 两路PD信号对应的能量累积曲线

Fig.1 Energy accumulation curves of two PD signals

## 1.2 PD源定位的数学模型

要确定三维空间中 PD 源的位置，至少需要四个或更多的传感器（其中一个为参考位置传感器）同时检测 PD 源信号，假设电磁波以等值波速从 PD 源向四周传播，通过测量 PD 信号到达各个传感器之间的时间差，建立与之对应的双曲面方程组，其坐标交点即为 PD 源的位置。设 PD 源  $P(x, y, z)$  为待估计位置，用四个传感器进行定位， $S_i(x_i, y_i, z_i)$  为第  $i$  ( $i=0,1,2,3$ ) 个传感器的位置坐标，其中参考位置传感器坐标为  $S_0(x_0, y_0, z_0)$ ，电磁波从 PD 源到达参考传感器的时间为  $T$ ，电磁波从 PD 源到第  $i$  个传感器与参考传感器的时间差为  $\Delta t_{i0}$ ，则根据 TDOA 定位技术原理<sup>[17]</sup>有

$$\begin{cases} (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 = v^2 T^2 \\ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = v^2 (T + \Delta t_{10})^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 = v^2 (T + \Delta t_{20})^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 = v^2 (T + \Delta t_{30})^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中， $v$  为电磁波的等值波速，可视为常量<sup>[18]</sup>。只要获取信号到各传感器的时延，即得到  $\Delta t_{i0}$ ，通过求解上述方程组式(2)，便可得到 PD 源的位置  $P(x, y, z)$ 。

简而言之，时延的精确测量是传统 TDOA 定位法的关键所在，而各种不利因素对 PD 信号的影响将使得在获取各传感器时延时，不可避免地产生误差，这导致不能确保所得定位结果的准确性。因此，为了降低时延误差对定位准确度的影响，本文在用传统 TDOA 定位法得到的初步定位结果基础上进行优化，通过粒子群算法全局搜索逐次寻找出 PD 源位置的最优解，以提高 PD 定位准确度。

## 2 基于逐次逼近原理的 PD 定位方法

### 2.1 逐次逼近定位方法的原理

在试验中，利用分布在箱体上的四个 UHF 传感器同时采集的一组样本数据  $D_1$ ，通过 TDOA 定位法可计算出一个样本初值，记为  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ；对于同一个位置的 PD 源，通过在另一时刻获取的第二组

样本数据  $D_2$ ，也可计算出另外一个样本初值，记为  $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 。那么，理论上如果测量的时间差不存在误差，则  $P_1$  点和  $P_2$  点是重合的，且其坐标为真实 PD 源的位置。但由于检测系统响应速度和噪声等干扰因素的影响，在测量局部放电 UHF 信号到达各传感器的时间差时引起时间误差，使得获取的  $D_1$  和  $D_2$  两组 PD 信号的时延不相等，导致计算的定位值  $P_1$  点和  $P_2$  点不重合，且与真实 PD 源位置存在一定的误差。

也就是说，利用在不同时刻捕获的  $N$  组 PD 信号对应的时延信息可计算出  $N$  个样本定位初值点  $P_1, P_2, \dots, P_N$  ( $N$  为采集样本的次数， $P_N$  之间可相等)，由于时延误差的存在导致这些初值点随机分散在真实 PD 源的周围。为此，本文通过以下方法构建目标函数对各初值点  $P_1, P_2, \dots, P_N$  进行全局寻优处理，以便更准确地判断 PD 源位置。

根据欧几里得几何学知识，由空间中的两点可以确定一条直线。以传感器  $S_0(x_0, y_0, z_0)$  和样本初值点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  为例建立直线方程，则由点  $P_1$  与点  $S_0$  确定的直线方程为

$$\frac{x-x_1}{x_1-x_0} = \frac{y-y_1}{y_1-y_0} = \frac{z-z_1}{z_1-z_0} \quad (3)$$

那么，一个样本初值点可与四个传感器确定四条如式(3)所示的直线方程。图 2 为由  $P_1$  点和  $P_2$  点分别与传感器阵列确定的两组直线。从理论上讲，如果所测的时延不存在误差，这两组直线在空间中相交，且交点即为 PD 源所在真实位置  $P(x, y, z)$ 。但是，实际时延测量误差会导致这两组直线成为异面直线。同样，由多个不相等的初值点  $P_N$  与传感器阵列确定的多组直线也均为异面直线。因此，根据 PD 源位置与各直线的空间关系，可构建 PD 源到各直线的距离和函数为

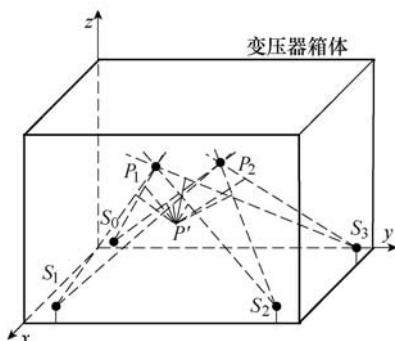


图2 逐次逼近定位原理示意图

Fig.2 Diagram of the global search location principle

$$d = \sum_{k,l=1}^{N,4} d_{kl} = d_{11} + \dots + d_{14} + d_{21} + \dots + d_{N4} \quad (4)$$

式中,  $k$  为样本初值个数,  $k=1,2,\dots,N$ ;  $l$  为传感器个数,  $l=1,2,3,4$ ;  $d_{kl}$  为所要搜寻的 PD 源到由第  $k$  个样本初值与第  $l$  个传感器确定的直线的距离。显然, 该问题就是对式(4)进行极小值寻优。为此, 在寻优的空间之内, 寻找某点  $P'(x',y',z')$  使得  $d$  值为最小  $d_{\min}$ , 则该点可视为所要定位的 PD 源位置, 其全局搜索定位原理示意图如图 2 所示<sup>[5]</sup>。

根据空间解析几何知识, 由式(4)可得

$$d_{kl} = \frac{|\mathbf{D}_{P'P_k} \times \mathbf{D}_{P_kS_l}|}{|\mathbf{D}_{P_kS_l}|} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{D}_{P'P_k}$ 、 $\mathbf{D}_{P_kS_l}$  为线段距离;  $\mathbf{D}_{P'P_k} = (x' - x_k, y' - y_k, z' - z_k)$ ,  $\mathbf{D}_{P_kS_l} = (x_k - x_l, y_k - y_l, z_k - z_l)$ 。则所求 PD 源到各条直线的距离的总和可表示为

$$d = \sum_{k,l=1}^{N,4} d_{kl} = \sum_{k,l=1}^{N,4} \frac{|\mathbf{D}_{P'P_k} \times \mathbf{D}_{P_kS_l}|}{|\mathbf{D}_{P_kS_l}|} \quad (6)$$

本文将采用全局搜索算法对式(6)寻优估计出最小的  $d_{\min}$  及其对应的坐标参数, 即为 PD 源的几何空间位置坐标。

## 2.2 粒子群优化算法简介

粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法<sup>[19,20]</sup>是一种基于群体智能的优化算法, 其基本思想来源于对鸟群和鱼群在觅食过程中的迁徙和聚集行为的模拟, 使群体达到最优目的。与遗传算法相比, PSO 算法没有交叉和变异操作, 通过个体之间的协作来搜寻最优解, 具有搜索速度快、效率高和算法简单等特点。

在粒子群优化算法中, 首先初始化一群随机粒子, 然后通过迭代计算找到最优解。在每一次迭代中, 粒子群通过跟踪两个“极值”来更新, 一个“极值”是粒子本身 (个体极值) 找到的最优解, 另一个“极值”是整个种群 (全局极值) 找到的最优解。在更新每个粒子位置过程中, 粒子最大速率被限制为  $V_{\max}$ , 粒子群的坐标也被限制在所考虑的范围之内。粒子速度和位置更新为

$$\begin{aligned} V(k+1) &= wV(k) + c_1 R(P_{\text{best}}(k) - P(k)) + \\ &c_2 R(G_{\text{best}}(k) - P(k)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$P(k+1) = P(k) + V(k+1) \quad (8)$$

式中,  $V(k)$  为第  $k$  次迭代时粒子的速度;  $R$  为  $[0,1]$  之间的随机数;  $w$  为  $[0.1,0.9]$  之间的加权系数 (一般

初始化为 0.9, 然后随着进化过程减小为 0.4);  $P_{\text{best}}(k)$  为第  $k$  次迭代时粒子自身最优位置;  $P(k)$  为第  $k$  次迭代时粒子当前的位置;  $G_{\text{best}}(k)$  为第  $k$  次迭代时粒子群全局最优位置;  $c_1$  和  $c_2$  为系数, 被称为学习因子 (一般取值为 2)。PSO 算法的终止条件是根据具体问题取最大迭代次数或粒子群搜索到的最优位置, 满足预设最小适应阈值。

文中采用 PSO 算法对式(6)进行搜索, 在搜索过程中, 目标函数值则通过式(7)和式(8)不断更新到自身最优位置  $P_{\text{best}}(k)$ , 即  $d$  值逐渐减小, 同时搜索点的坐标值也逐渐逼近最优位置, 直到 PSO 算法终止后搜寻出全局最优解  $G_{\text{best}}(k)$ , 此时目标函数值为最小  $d_{\min}$ , 对应搜索点坐标处于最优位置, 进而可确定出 PD 源的空间位置。

## 2.3 基于多样本的逐次逼近定位算法步骤

根据传统 TDOA 定位法计算样本初值, 选择一定数量的样本初值建立式(6)寻优目标函数, 采用 PSO 算法对式(6)进行全局搜寻最小值  $d_{\min}$ , 经过逐次递归处理, 最终确定最优的 PD 源位置的逐次逼近定位方法步骤如下:

(1) 通过 UHF 传感器阵列 ( $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$ ) 对同一位置 PD 源在不同时刻获取  $N$  ( $\geq 2$ ) 组 PD 样本数据。

(2) 根据式(1)和式(2)估算各 PD 样本数据对应的定位初值  $P_k(x_k, y_k, z_k)$ ,  $k=1,2,\dots,N$ 。

(3) 将各样本初值点  $P_k(x_k, y_k, z_k)$  分别对应四个传感器的位置, 推导出由该两点确定的直线方程。

(4) 按照样本顺序每  $m$  ( $2 \leq m \leq N$ ) 个初值  $P_k(x_k, y_k, z_k)$  选取为一组 (例如, 共有 20 个样本初值, 选取每 3 个为一组, 则最后还剩 2 个, 此时选取剩下的为 2 个为一组, 即  $m-1$ , 以此类推), 根据直线空间关系建立寻优目标函数式(6), 采用 PSO 算法对其进行全局搜索最小值  $d_{\min}$ , 此时对应的 PD 源坐标分别为  $P'_k(x'_k, y'_k, z'_k)$ 。

(5) 将上一步得到的  $P'_k(x'_k, y'_k, z'_k)$  作为下一次优化的初值, 重复步骤(3)和步骤(4), 当  $m < 2$  时算法终止。

(6) 根据最终寻优得到的结果, 确定出 PD 源坐标, 并计算定位误差。

## 3 局部放电信号的定位试验

### 3.1 试验平台

PD 实测信号的试验平台<sup>[9]</sup>主要由大型变压器

箱体(尺寸 240cm×310cm×200cm)、PD 源、传感器阵列(超高频微带贴片天线传感器)、四根长度均相等的高频同轴传输线和四通道超宽带 LeCroy7100 高速示波器(1GHz 模拟带宽, 最大采样率 20GS/s)等组成。PD 源由置于直径为 40cm、高为 50cm 的充油有机玻璃体中的针-板放电模型构成, 可放于箱体内任意位置, 以方便对不同位置的 PD 源定位研究。由于变压器的箱体太大, 难以对其充满变压器油, 箱体内其他部分以空气作为介质。同时因试验中经常变换 PD 源和传感器的位置, 将箱体内其他部分以空气作为介质, 既可方便在箱体内布置试验, 还可模拟 PD 信号在两种介质(油和空气)里传播的定位研究。此外, 还在 UHF 传感器的接收处放置一些绝缘子, 以模拟障碍物对电磁波传播的影响。PD 源和阵列 UHF 传感器的空间坐标位置如图 3 所示, PD 源安放于点 P(15,150,140)的空间位置(可任意安放), 阵列 UHF 传感器(也可任意放置但不能重合)安放的四个位置坐标分别为  $S_0(0,20,35)$ 、 $S_1(215,0,20)$ 、 $S_2(240,295,10)$  和  $S_3(20,310,30)$ 。文中的坐标单位均为 cm。

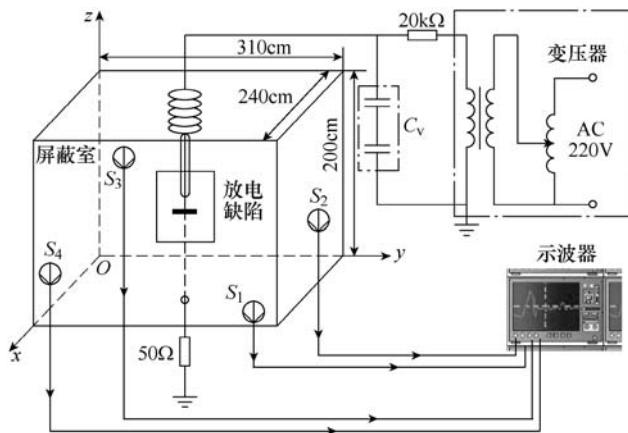


图 3 变压器 PD 模拟试验装置

Fig.3 Experimental system for PD location

### 3.2 试验结果

试验中, PD 源与传感器阵列的坐标在箱体内位置不变, 通过传感器阵列同时检测 PD 信号, 为了系统测试实际可能出现的时间误差情况, 即不同时刻随机不利因素对时延测量的影响, 采集数据时间间隔为 15min, 共捕获了 20 组样本。通过式(1)将捕获到的 20 组样本分别计算出对应的时间差, 再将其代入式(2), 然后采用最小二乘法<sup>[13]</sup>进行求解。实测时延和 20 组样本计算定位初值见表 1。

由表 1 可知, 由于获取到的时间差精度不高, 导致单样本所得定位结果分散性大, 且存在误差较大的样本, 如果直接将其视为所求的 PD 源坐标,

表 1 测量所得的时间差与定位计算结果

Tab.1 The data of measured time-delay and calculated PD location

序号	时间差/ns	定位初值/cm	误差/cm
1	-1.01, -1.89, 0.41	(137, 176, 143)	29.22
2	-0.61, -2.12, 0.24	(154, 139, 137)	12.08
3	-0.60, -2.09, 0.25	(144, 138, 152)	18.00
4	-1.05, -1.85, 0.33	(164, 177, 145)	30.82
5	-0.71, -2.50, 0.17	(153, 171, 126)	25.42
6	-0.90, -2.01, 0.44	(142, 149, 156)	17.92
7	-0.59, -1.75, 0.61	(164, 145, 161)	25.73
8	-0.58, -2.21, 0.19	(161, 169, 130)	24.12
9	-0.43, -1.81, 0.31	(177, 164, 142)	30.49
10	-0.49, -1.88, 0.27	(166, 139, 148)	21.00
11	-0.56, -2.07, 0.52	(164, 148, 151)	17.92
12	-0.70, -1.89, 0.49	(139, 166, 153)	23.37
13	-0.83, -2.10, 0.28	(161, 142, 139)	13.64
14	-0.48, -1.77, 0.35	(136, 169, 137)	23.79
15	-0.42, -2.02, 0.38	(165, 155, 148)	17.72
16	-1.13, -2.18, 0.55	(184, 154, 149)	35.40
17	-0.62, -2.32, 0.27	(161, 142, 139)	13.64
18	-0.81, -1.52, 0.56	(140, 166, 157)	25.40
19	-0.65, -1.60, 0.47	(169, 161, 146)	22.76
20	-0.75, -1.71, 0.54	(144, 146, 154)	15.75
平均值	—	(156, 157, 146)	11.00

必然导致不能有效地判断局部放电发生的位置, 以致定位失败。而将这 20 个样本取其平均值, 所得定位结果的误差仍达到 11cm, 准确度还有待提高。因此, 为了验证本文提出的基于多样本全局搜索寻优原理逐次逼近定位方法的有效性与准确性。这里分四种情况讨论每次选取的样本数( $2 \leq m \leq 20$ )对最终结果的影响。

(1) 当  $m=20$  时, 即选取表 1 中的所有的样本为一组进行优化处理, 构建寻优目标函数式(6), 然后采用粒子群优化算法对其进行全局搜索最小的  $d_{\min}$ , 其搜索边界为变压器内的空间范围, 经全局搜索优化得到的结果为(154,155,144), 则误差为 7.55cm。显然, 相比求平均值法的误差 11cm, 本文方法得到的定位结果更为理想。

(2) 当  $m=10$  时, 即对表 1 中的样本按顺序每 10 个为一组进行第一次优化, 随后将第一次优化所得的两个值继续进行再次寻优(这里第二次优化时  $m$  值不足 10, 将其视为一组进行计算), 经两次优化计算的结果见表 2。

表 2 当  $m=10$  时的优化计算结果

Tab.2 The results of optimization objective function with  $m=10$

序号	(单位: cm)		
	第一次优化	第二次优化	误差
1~10	(154, 151, 141)	(153, 153, 142)	4.69
11~20	(153, 152, 143)		

(3) 当  $m=4$  时, 对表 1 中的样本按顺序每 4 个为一组, 根据 2.3 节给出的算法步骤, 经 3 次优化处理逐次计算的结果见表 3。

(4) 当  $m=2$  时, 对表 1 中的样本按顺序每 2 个为一组, 根据逐次逼近定位方法步骤, 经 5 次优化

处理逐次计算的结果见表 4。

表 3 当  $m=4$  时的优化计算结果

Tab.3 The results of optimization objective function with  $m=4$

序号	(单位: cm)			
	第一次优化	第二次优化	第三次优化	误差
1~4	(149, 151, 142)			
5~8	(156, 151, 140)	(152, 152, 142)		
9~12	(157, 152, 145)		(153, 151, 143)	4.36
13~16	(149, 154, 140)			
17~20	(153, 150, 144)	(153, 150, 144)		

表 4 当  $m=2$  时的优化计算结果

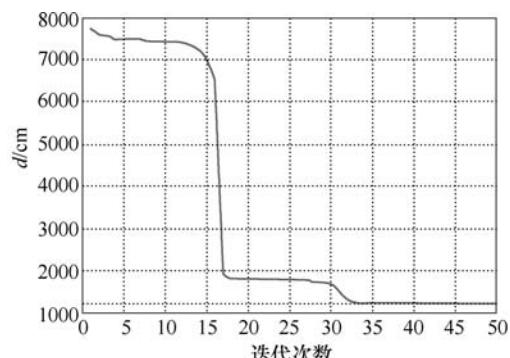
Tab.4 The results of optimization objective function with  $m=2$

序号	(单位: cm)				
	第一次优化	第二次优化	第三次优化	第四次优化	第五次优化
1~2	(154, 140, 137)	(156, 154, 141)			
2~4	(157, 164, 145)		(156, 153, 142)		
5~6	(148, 161, 138)	(160, 149, 146)			
7~8	(164, 145, 149)			(157, 149, 140)	
9~10	(161, 155, 142)	(159, 156, 141)			
11~12	(139, 166, 133)		(158, 148, 140)		(154, 150, 140)
13~14	(160, 142, 139)	(158, 143, 139)			
15~16	(134, 154, 140)				
17~18	(161, 142, 139)	(154, 152, 139)	(154, 142, 139)	(154, 142, 139)	
19~20	(145, 138, 144)				

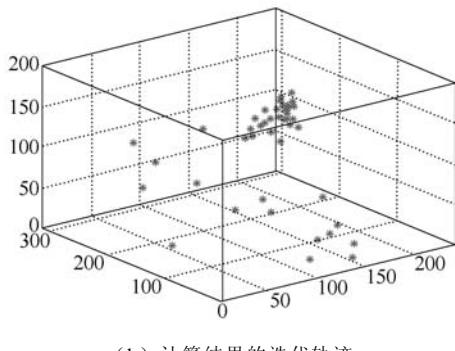
从表 2~表 4 可看出, 采用本文的逐次逼近搜索寻优方法对多样本初值通过建立优化目标函数进一步处理后, 得到的定位准确度有了较大的提高, 定位误差由先前单样本的数十厘米减少到数厘米, 结果相比定位初值显然具有更高的准确度, 其值可判断出 PD 源的空间坐标位置。同时, 通过选取不同数量的样本为一组进行处理, 发现  $m$  值越小, 得到的准确度有所提高, 不足之处在于需要优化的次数增加, 即计算量也随之增大, 因此在应用时可根据样本数情况选择合适的  $m$  值进行寻优计算以减小计算成本。至此, 验证了即使在获取时间差准确度不高导致其样本定位结果不稳定的情况下, 本文方法也能较准确地对变压器 PD 源进行定位, 同时其误差也满足对于变压器的高精度定位要求。

在全局寻优搜寻过程中, 为了观察目标函数和搜索点坐标的 PSO 算法收敛特性, 以第(1)种情况 ( $m=20$ ) 为例, 通过 PSO 算法计算出目标函数值和各坐标的收敛轨迹如图 4 所示。其中, 图 4b 中

坐标轴表示试验箱体尺寸 240cm×310cm×200cm。从图 4 可以看出, 迭代起点在参考坐标系原点附近, 迭代过程逐渐向  $+x$ 、 $+y$  和  $+z$  方向移动, 随着 PSO 算法迭代次数的增加, 式(9)目标函数的和呈下降趋势(对应为图 4a 中的曲线), 并在迭代到 17 次和第 32 次时出现较大的拐点, 原因是 PSO 迭代过程当中, 在满足粒子最大速度的情况下迭代结果出现较大的跳跃, 即图 4b 中迭代结果的坐标值在第 17



(a) 目标函数的收敛曲线



(b) 计算结果的迭代轨迹

图4 粒子群优化算法的收敛轨迹

Fig.4 Results in every step of PSO

次和第32次跳跃较大，其值更逼近所要寻找的位置，以致目标函数曲线发生突变。迭代到第33次时，目标函数趋于平稳，并在算法终止后得到其最小值 $d_{\min}=1228.48\text{cm}$ ，此时搜寻出对应的PD源坐标值为 $(x,y,z)=(154,155,144)$ 。可看出，相比分散性较大的单样本估算值，寻优处理后的定位结果更接近于真实PD源坐标位置，定位误差由之前单样本的数十厘米减小到7.55cm，提高了定位结果的可信度和准确度。

#### 4 结论

1) 测量时间差过程中不可避免地产生时延误差，这必然导致定位结果不稳定，准确度较低。为此，提出基于多样本全局搜索原理的变压器局部放电源的逐次逼近定位方法。首先通过TDOA定位法对单样本进行初步定位得到PD源初值，利用初值与传感器阵列确定的直线的空间关系建立优化目标函数，并采用粒子群算法搜寻其最小值，从而最终确定最优的PD源位置。

2) 在定位初值误差较大的情况下，通过本文方法寻优处理后能较准确地对PD源进行定位。实验室模拟测试定位结果表明，相比误差较大的单样本定位初值，寻优处理后的定位准确度有了较大的提高，误差由先前单样本的数十厘米降低到几厘米之内，且低于对样本取平均值法的11cm，所得定位结果更逼近真实PD源位置，可降低时延误差导致定位效果不佳的影响。

3) 本文方法有效地减小了TDOA定位方法要求精确获取时延的依赖性，解决了单样本因时间差测量不准确而引起的定位结果分散、误差较大的问题，可确保PD源定位的准确性，弥补了TDOA定位方法的不足。

#### 参考文献

- [1] Judd M D, Li Y, Hunter I B B. Partial discharge monitoring for power transformer using UHF sensors. Part 2: field experience[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(3): 5-13.
- [2] Judd M D. Experience with UHF partial discharge detection and location in power transformers[C]// Proceedings of Electrical Insulation Conference (EIC), Annapolis, MD, 2011: 201-205.
- [3] 程述一, 律方成, 谢庆, 等. 基于暂态对地电压和超声阵列信号的变压器局放定位方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 255-262.  
Cheng Shuyi, Lü Fangcheng, Xie Qing, et al. Study of partial discharge locating method in transformer based on transient earth voltage and ultrasonic array signals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 255-262.
- [4] Lopez-Roldan J, Tang T, Gaskin M. Optimisation of a sensor for onsite detection of partial discharges in power transformers by the UHF method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6): 1634-1639.
- [5] 谢庆, 律方成, 李燕青, 等. 基于多平台测向及全局搜索的局部放电超声阵列定位方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 216-221.  
Xie Qing, Lü Fangcheng, Li Yanqing, et al. A method for PD ultrasonic array location based on multi-platform measuring direction and global search[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 216-221.
- [6] Judd M D, Li Y, Hunter I B B. Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part I: sensors and signal interpretation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(2): 5-14.
- [7] 唐炬, 王存超, 陈娇, 等. 变压器局部放电的泰勒-遗传综合定位法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 165-171.  
Tang Ju, Wang Cunchao, Chen Jiao, et al. Taylor-genetic algorithm using for PD location in power transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 165-171.
- [8] 唐志国, 常文治, 王彩雄, 等. 超宽带射频技术对变压器多局部放电源的定位[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1612-1617.

- Tang Zhiguo, Chang Wenzhi, Wang Caixiong, et al. Multi-PD sources location by UWB RF detection in power transformers[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(7): 1612-1617.
- [9] 唐炬, 陈娇, 张晓星, 等. 用于局部放电信号定位的多样本能量相关搜索提取时间差算法[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(19): 125-130.
- Tang Ju, Chen Jiao, Zhang Xiaoxing, et al. Time difference algorithm based on energy relevant search of multi-sample applied in PD location[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(19): 125-130.
- [10] 王平, 许琴, 王林泓, 等. 电力设备局部放电信号的在线检测系统研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(24): 190-194.
- Wang Ping, Xu Qin, Wang Linhong, et al. Research of on-line detection system for partial discharge signal of power equipments[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(24): 190-194.
- [11] Tang Ju, Xie Yanbin. Partial discharge location based on time difference of energy accumulation curve of multiple signals[J]. *IET Electric Power Applications*, 2011, 5(1): 175-180.
- [12] Tang Zhiguo, Li Chengrong, Cheng Xu, et al. Partial discharge location in power transformers using wideband RF detection[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2006, 13(6): 1193-1199.
- [13] El Mountassir O, Stewart B G, McMeekin S G. Effect of noise on the location accuracy of partial discharges using radiated RF detection techniques[C]//47th International Universities Power Engineering Conference, London, 2012: 1-6.
- [14] 尚海昆, 范津莎, 王瑜, 等. 平移不变小波迹消噪方法在局部放电检测中的应用[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(10): 33-40.
- Shang Haikun, Yuan Jinsha, Wang Yu, et al. Application of wavelet footprints based on translation-invariant in of partial discharge signal detection[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(10): 33-40.
- [15] Orr P J G, Reid A J, Judd M D. Sensor response characteristics for UHF location of PD sources[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, 2008: 1119-1122.
- [16] 杜林, 赵秀娜, 吴高林, 等. 基于能量累计曲线-小波变换和动态加权统计的局部放电源定位方法[J]. *高电压技术*, 2013, 39(5): 1075-1080.
- Du Lin, Zhao Xiuna, Wu Gaolin, et al. Location method of partial discharge sources based on energy cumulative curve-wavelet transform and dynamic weighting statistics[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(5): 1075-1080.
- [17] 叶海峰, 钱勇, 刘宗杰, 等. 一种新型的放电源空间定位用特高频传感器[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(8): 333-340.
- Ye Haifeng, Qian Yong, Liu Zongjie, et al. A new UHF sensor for spatial location of partial discharge sources[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(8): 333-340.
- [18] Yang L, Judd M D. Propagation characteristics of UHF signals in transformers for locating partial discharge sources[C]//Proceedings of the 13th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), 2003: 320-325.
- [19] 罗新, 牛海清, 来立永, 等. 粒子群优化自适应小波神经网络在带电局放信号识别中的应用[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(10): 326-334.
- Luo Xin, Niu Haiqing, Lai Liyong, et al. Application of adaptive wavelet neural network based on particle swarm optimization algorithm in online PD pattern recognition[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(10): 326-334.
- [20] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proceedings of the Micro Machine and Human Science, Nagoya, 1995: 39-43.

#### 作者简介

唐 炬 男, 1960 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备绝缘状态在线监测与故障诊断技术、高电压测试技术等。

E-mail: cqtangju@vip.sina.com (通信作者)

黄 亮 男, 1984 年生, 博士研究生, 研究方向为电气设备绝缘装备在线监测与故障诊断技术。

E-mail: huangliang112@gmail.com