

# 基于四通道 TEV 传感器的开关柜局部放电定位方法的研究

邢雅<sup>1</sup> 姜纪宁<sup>1</sup> 丁旭元<sup>1</sup> 康亚丽<sup>1</sup> 樊博<sup>2</sup> 杨慧丽<sup>1</sup> 闫敬东<sup>1</sup> 杨秀川<sup>1</sup>

(1. 国网宁夏电力公司培训中心 银川 750002; 2. 国网宁夏电力公司电力科研院 银川 750002)

**摘要:** 高压开关柜局部放电的准确、快速定位对于及时排除设备故障隐患,保障电力系统的安全稳定运行具有重要的作用。利用四通道暂态对地电压(transient earth voltage, TEV)传感器的多种布置方式,首先将局部放电确定在开关柜某一柜面的某一隔室;基于某一隔室的 XFDTD 简化模型仿真结果,利用双曲面定位法和空间网格搜索法自行编制程序确定了某一隔室内放电源的具体位置;通过在实验室搭建了高压开关柜局部放电定位试验平台,验证定位方法的有效性。

**关键词:** 高压开关柜;局部放电定位;多通道传感器;暂态低电压法

**中图分类号:** TM835 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4034

## Research on location method of partial discharge in high voltage switchgear based on four TEV sensors

Xing Ya<sup>1</sup> Jiang Jinning<sup>1</sup> Ding Xuyuan<sup>1</sup> Kang Yali<sup>1</sup> Fan Bo<sup>2</sup> Yang Huili<sup>1</sup> Yan Jingdong<sup>1</sup> Yang Xiuchuan<sup>1</sup>

(1. State Grid Ningxia Electric Power Company training center, Yinchuan 750002, China;

2. Power Science Research Institute of State Grid Ningxia Power Co., Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** The quick and precise locating of partial discharge (PD) inside switchgear is important in eliminating the hidden faults promptly and ensuring the safety and stability of the power system. PD source will be located at a certain compartment of switchgear by setting up multiple sensors with different arrangement. Then, using the hyperbolic method and spatial grid search method can finally determine an accurate position of PD source in a compartment based on the simulation results of a simplified compartment XFDTD model. A switchgear PD location experimental platform is established in laboratory which verify the validity of the positioning method.

**Keywords:** cable rating; finite element method; optimization method; hotspot mitigation

## 1 引言

局部放电是导致中高压开关柜运行故障的主要原因,开关柜局部放电现象虽然进行了大量的研究,并取得了重要的成果,但带电检测及监测方面还存在许多薄弱环节,尤其是对 10 kV 高压开关柜的带电检测研究,还处在起步阶段,国内自行设计制造的在线检测设备还处在研究和探索阶段,存在测量精度低、不能准确定位等缺点<sup>[1]</sup>。

目前对开关柜局部放电的定位大部分是基于英国 EA 公司的产品 UltraTEV Plus+和双通道 TEV 传感器 PDL1 来实现的,PDL1 可以显示局部放电信号的传播方向离哪一个测量探头比较近,通过对比 UltraTEV Plus+测量的超声波及 TEV 幅值,并且移动 PDL1 的两个测量探头就可

以初步判断出发生局部放电的柜面<sup>[2]</sup>。这种方法在实际检测过程中对测量人员的技术要求较高。目前,最新发展的多通道定位方法已经应用到变压器的局部放电定位中<sup>[3-4]</sup>,而多通道的开关柜定位方法无论在国内还是国外都处在探索阶段,这种方法不仅能将局部放电源定位到某面开关柜,还能进一步精确到某一柜体的某一隔室,某一隔室内的具体位置,具有广泛的发展前景<sup>[5]</sup>。

本文提出了基于四通道 TEV 传感器的开关柜局部放电精确定位方法,基于仿真分析,证明了自行编制的定位程序的正确性。最后,使用自制的 TEV 四通道传感器,在实验室搭建了高压开关柜局部放电定位试验平台,验证了所提出的定位方法的有效性。为高压开关柜内部局部放电的精确定位提供了有效的方法。

## 2 四通道传感器定位方法

由于开关柜内部结构复杂,局部放电源产生的电磁波信号在通过缝隙传播到开关柜表面之前会在其内部发生多次的折反射,使得通过逐一对比不同开关柜表面信号的幅值大小来确定发生局部放电的柜面的方法可信度不高<sup>[6]</sup>。本文利用阈值法与能量法计算多路信号的到达时间差,采用四通道 TEV 传感器来对局部放电源进行定位,传感器的布置方式如图 1 所示,对于图(a)~(c),假设 4 个传感器两两相距为 60 cm,灰色矩形表示开关柜柜体前表面,黑色线条表示柜体前表面的缝隙以及不连续处;图(d)为开关柜的侧剖面图。

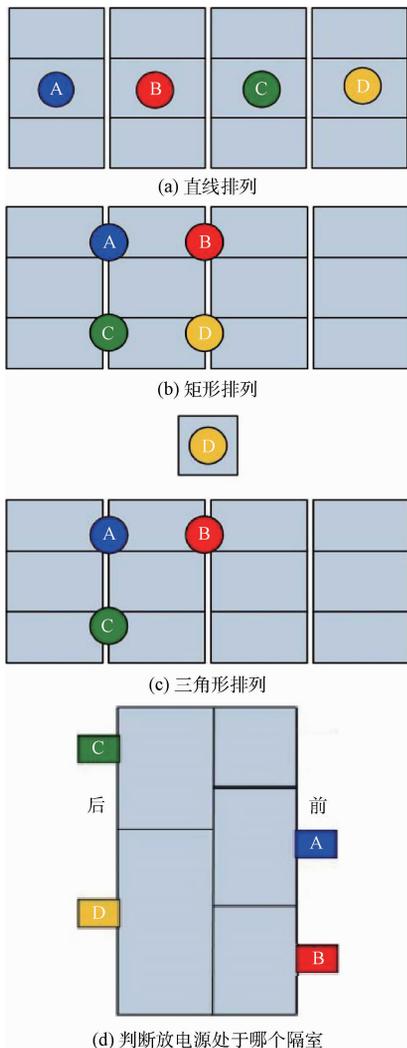


图 1 传感器布置方式

图 1(a)中传感器为直线排列方式,将 4 个传感器分别贴在四个相邻的开关柜表面,这种排列方式是根据两个相邻的传感器来判断接收到的信号是来自两个传感器的区间内还是区间外<sup>[7-8]</sup>,例如,对于 A、B 两个传感器,如果接收

到的信号到达时间差  $\Delta t < (0.6 \text{ m} / (3 \times 10^8 \text{ m/s})) = 2 \text{ ns}$ , 则局放信号来自 AB 区间内,可以推断局放信号来自传感器 A、B 所在的其中一个开关柜内部,否则来自 AB 区间外。

图 1(b)中传感器为矩形排列方式,将 4 个传感器分别贴在某个内部疑似有局部放电源的开关柜表面,这种排列方式是根据 4 个传感器来判断信号是来自这一开关柜的内部还是外部,其判断依据为 A、B、C、D 4 个传感器同时有信号,并且信号在 AB、AC、BD、CD 区间内,因此可以推断局放信号来自这 4 个传感器所在的开关柜内部。这种排列方式的作用是在图 1(a)的直线排列检测方式后进一步缩小范围用的。

图 1(c)中传感器为三角形排列方式,其中传感器 D 贴置于某一悬浮的金属板上,板的位置可以在开关柜上方也可以是前方,那么判断信号来自该柜体内部的依据为 A、B、C 三个传感器同时有信号,并且信号在 AB、AC 区间内,同时传感器 D 无信号。这种布置方式排除了图 1(b)矩形排列方式下,作为干扰信号来自柜体外部的可能性。

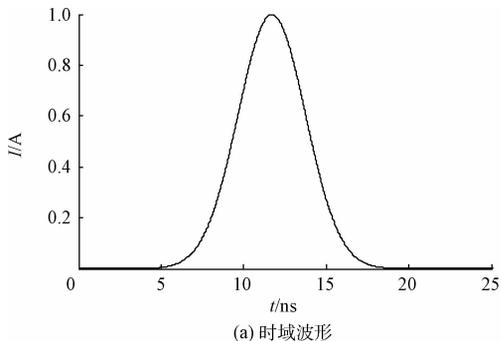
利用图 1(a)~(c)的排列方式确定了发生局放的柜面后,图 1(d)中分别将 4 个传感器贴在开关柜的断路器室、出线室、母线室和电缆室,这种排列方式根据 4 个传感器接收信号到达的先后顺序来判断局部放电源处于哪一个隔室。

## 3 局部放电源具体位置计算方法

使用第 1 节中的 4 种传感器布置方式可以初步的将局放信号定位于一排并列开关柜的某一面柜体的某一个隔室,利用布置在开关柜某一隔室(主要针对柜后的电缆室)表面的 4 个传感器接收信号之间的到达时间差可以进一步对某隔室内部的局放信号的具体位置进行精确的评估。

### 3.1 开关柜仿真建模

为了验证下文所提定位算法的正确性,利用 XFDTD 仿真软件<sup>[9-10]</sup>对开关柜某隔室建立简化的仿真模型。考虑到 TEV 法通常的检测带宽为 100 MHz 以下,以幅值  $I_0$  为 1 A,脉冲宽度为 11 ns 的高斯电流源作为局部放电源,4 个传感器分别设置在某隔室表面的四个顶点处。该高斯脉冲源的时域波形及其频谱如图 2 所示。



(a) 时域波形

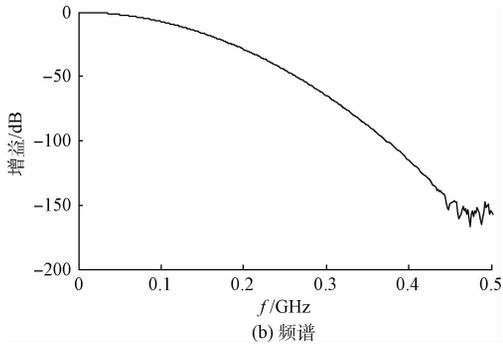


图 2 高斯脉冲波形及其频谱

3.2 双曲面定位法

开关柜内部的局部放电源发出的电磁波向空间的四周以球面波的方式辐射,局部放电源与接收传感器之间的实际传播轨迹就是使光程取极小值时的路径曲线<sup>[11]</sup>。使用 4 个紧贴在开关柜某隔室表面的传感器来检测局部放电源激发的电磁辐射波,获取 3 个信号到达时间差作为计算参量<sup>[12]</sup>。图 3 为开关柜某一隔室内局放定位示意图,以某隔室左下角为坐标原点,建立空间直角坐标系。

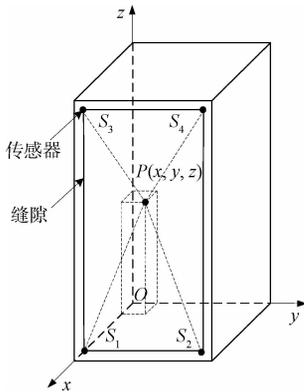


图 3 开关柜局部放电定位示意图

设局部放电源  $P(x, y, z)$  到传感器  $S_i(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 的传播时间为  $t_i$ , 则有:

$$t_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} / c \quad (1)$$

式中:  $c$  为光速,  $3 \times 10^8$  m/s。

定位时选择信号最先到达的传感器作为参考信号(假设为传感器 1), 以此为基准, 第  $i$  个传感器测量到的局放信号  $S_i$  与参考传感器测量到的局放信号  $S_1$  之间的到达时间差为  $t_{1i} = t_i - t_1$  ( $i=2, 3, 4$ )。进一步列出如下含有 3 个方程的非线性方程组:

$$f_i(x, y, z) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} - c \cdot t_{1i} = 0 \quad (2)$$

式中:  $i=2, 3, 4$ 。

将测得的 3 个信号到达时间差  $t_{12}, t_{13}, t_{14}$  以及各个传感器的空间坐标带入式(2)中, 求解该非线性方程组即可求出

放电源的空间位置。式(2)对应的轨迹分别是以  $(S_1, S_2)$ 、 $(S_1, S_3)$ 、 $(S_1, S_4)$  为焦点的 3 个旋转双曲面, 这些双曲面将相交于一点, 该点即为局部放电源。显然, 要对三维空间的局部放电源定位, 就至少需要 4 个以上的传感器。表 1 所示为在 XFDTD 仿真模型中设置的局部放电源及传感器的空间坐标。

表 1 局部放电源及传感器的空间坐标

PD 源坐标/cm	$S_1$ /cm	$S_2$ /cm	$S_3$ /cm	$S_4$ /cm
(20, 20, 20)	(101, 4, 4)	(101, 76, 4)	(101, 4, 156)	(101, 76, 156)

通过局部放电源及传感器的空间坐标可以计算出理论信号到达时间差, 实际 3 个信号到达时间差  $t_{12}, t_{13}, t_{14}$  是通过确定四路传感器接收到信号脉冲的波头时间来实现的, 采用阈值法<sup>[13]</sup>来确定信号的到达时间差如表 2 所示。

表 2 信号到达时间差的理论值与实际值对比

	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$
理论信号到达时间差/ns	0.522 1	2.5	2.793 6
阈值法计算信号到达时间差/ns	0.500 7	2.526 9	2.808 0

由以上分析可知, 开关柜局放定位的主要问题是求解双曲非线性方程组(2), 因此, 选择一种快速, 准确的算法是定位的关键。将非线性方程组的求解转化为无约束最优化问题, 目标函数为:

$$\min F(x, y, z) = \sum_{i=2}^4 f_i(x, y, z)^2 \quad (3)$$

本文选择拟牛顿校正 BFGS 法来对目标函数(3)进行优化, 将表 2 中利用阈值法计算的 3 个信号到达时间差  $t_{12}, t_{13}, t_{14}$  代入到 BFGS 计算程序中, 可得到不同初始值下对应的迭代次数、局部放电源的定位结果、以及定位误差, 如表 3 所示。实际局部放电源的位置为  $P(x, y, z) = (20$  cm, 20 cm, 20 cm)。

表 3 BFGS 法定位结果

初始值	迭代	计算结果	误差/cm
$X^0$ /cm	次数	$P^*(x^*, y^*, z^*)$ /cm	
(50, 50, 50)	23	(18.6, 20.6, 18.6)	1.4
(80, 80, 80)	29	(18.6, 20.6, 18.6)	1.4
(5, 5, 5)	17	(18.6, 20.6, 18.6)	1.4

由表 3 中的结果可知, 拟牛顿校正 BFGS 法具有超线性的收敛速度, 结果受初值的影响较小。初值  $X^0$  为(5 cm, 5 cm, 5 cm)时的迭代过程如图 4 所示。

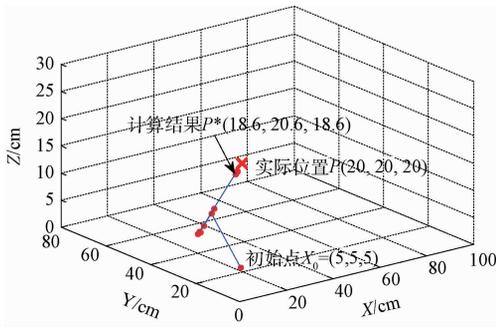


图 4 BFGS 法定位迭代过程

### 3.3 空间网格搜索法

空间网格搜索法无需求解非线性方程组,文献[13]的原理是假定所选择的定位空间在 3 个坐标轴上的长度分别为  $L_x, L_y, L_z$ , 选择剖分网格的大小为  $\Delta l \times \Delta l \times \Delta l$ , 则网格空间总共有  $n = (L_x/\Delta l + 1)(L_y/\Delta l + 1)(L_z/\Delta l + 1)$  个节点, 在 4 个传感器的空间坐标已知的基础上, 将网格空间中的  $n$  个节点作为局部放电源, 分别求取  $n$  个节点对应的三个理论信号到达时间差, 分别为  $(t_1L_{12}, t_1L_{13}, t_1L_{14}), (t_2L_{12}, t_2L_{13}, t_2L_{14}), \dots, (t_nL_{12}, t_nL_{13}, t_nL_{14})$ , 设实际信号到达时间差为  $(t_{12}, t_{13}, t_{14})$ , 将每个节点对应的 3 个理论信号到达时间差与 3 个实际信号到达时间差进行比较, 求取  $(|t_1L_{12} - t_{12}| + |t_1L_{13} - t_{13}| + |t_1L_{14} - t_{14}|)(|t_2L_{12} - t_{12}| + |t_2L_{13} - t_{13}| + |t_2L_{14} - t_{14}|), \dots, (|t_nL_{12} - t_{12}| + |t_nL_{13} - t_{13}| + |t_nL_{14} - t_{14}|)$  中的最小值, 则实际放电源处于以最小值对应的节点为中心的小立方体区域中, 定位空间剖分如图 5 所示。

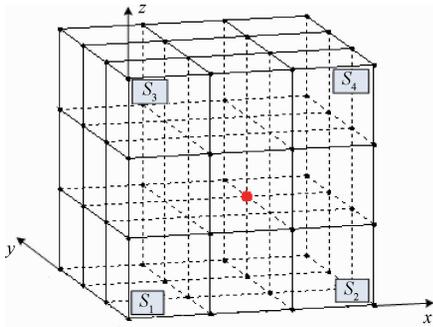


图 5 定位空间剖分图

将表 2 中利用阈值法计算的 3 个信号到达时间差  $t_{12}, t_{13}, t_{14}$  代入到计算程序中, 当使用不同的剖分网格尺寸时, 可得到总剖分节点数  $n$ 、局部放电源的定位结果以及理论与实际信号到达时间差通过比较后得到的最小值  $\min(|t_1L_{12} - t_{12}| + |t_1L_{13} - t_{13}| + |t_1L_{14} - t_{14}|)(i=1, \dots, n)$ , 如表 4 所示。实际局部放电源位置为  $P(x, y, z) = (20 \text{ cm}, 20 \text{ cm}, 20 \text{ cm})$ 。

表 4 空间搜索法定位结果

网格尺寸/ cm	节点数 $n$	计算结果 $P^*(x^*, y^*, z^*)/\text{cm}$	$\min( t_1L_{12} - t_{12}  +  t_1L_{13} - t_{13}  +  t_1L_{14} - t_{14} )/\text{ns}$
10×10×10	1 683	(20, 20, 20)	0.062 8
5×5×5	11 781	(10, 20, 15)	0.043 6

由表 4 中的结果可知, 与基于求解非线性方程组的双曲面定位法相比, 空间网格搜索法在操作过程中需要对求解空间进行网格剖分, 因此, 会在计算结果中产生离散误差。然而, 空间网格搜索法与双曲面定位法相比最大的优点在于对求取信号到达时间差的准确性要求不是十分严格, 允许信号到达时间差的计算存在一定的误差<sup>[14]</sup>。同时通过合理的选取剖分网格尺寸的大小, 空间网格搜索法产生的离散误差可以被限定在较小的区域内。另外, 空间网格搜索法相比基于解析算法的双曲面定位法在求解速度上有极大的优势。网格尺寸为  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  时的定位结果如图 6 所示。

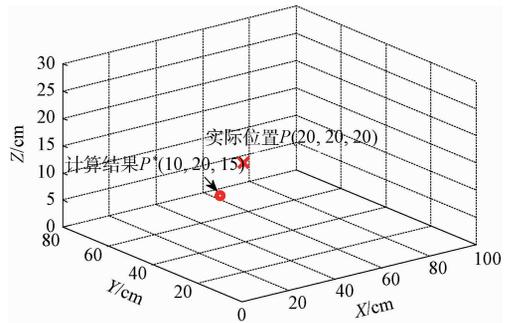


图 6 空间网格搜索法定位结果

## 4 开关柜局放定位试验

### 4.1 试验平台的搭建

在实验室搭建了如图 7 所示的开关柜局放定位系统, 主要由模拟局部放电源、传感器、四通道高速数据采集卡、信号测量软件平台等部分组成。

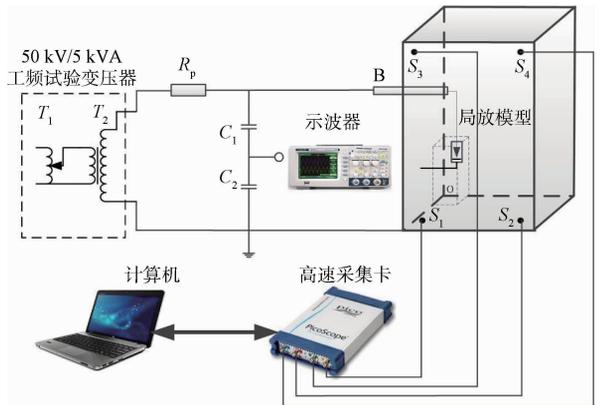


图 7 开关柜局部放电定位系统

$T_1$  为调压器,  $T_2$  为变压器 (50 kV),  $R_p$  为保护电阻 (3.9 k $\Omega$ ),  $C_1$ 、 $C_2$  为电容分压器 (1:10 000), B 为套管,  $S_1 \sim S_4$  为 TEV 传感器, 传感器  $S_1 \sim S_4$  分别通过完全相同的电缆接高速采集卡的四个通道, 用以消除信号在电缆传输中产生的固有时延。本文采用的数据采集卡为英国 PicoTech 公司的 PicoScope 6402, 四通道同时运行时每通道采样率为 1.25 Gs, 能够分辨 0.8 ns 的时间差, 那么距离分辨率大约为 30 cm, 因此实测中 4 个传感器间的距离应该大于最小距离分辨率, 才能准确的测得信号的时间差。开关柜局放定位试验平台如图 8 所示。



图 8 开关柜局部放电定位试验平台

使用针板放电模型来模拟局部放电源, 模型示意图及实物图如图 9 所示, 试验中调整针板间距使其能够较为容易放电但又不至于产生连续的电弧。



图 9 针板放电模型

对常规信号来说, 示波器带宽与所测信号频率之间的关系满足 3 倍(精度 90%)或者 5 倍(精度 97%)原则<sup>[15]</sup>, 对五倍原则 350 MHz 带宽示波器所能测量的最大频率为 70 MHz, 试验所用传感器输出最大频率为 70 MHz, 因此该采集卡的精度可以达到 97%。

#### 4.2 试验结果分析

对于图 8 所示的实验室的 3 个并排连接的开关柜, 从左向右分别为 A、B、C, 试验中将局放模型放置在开关柜 A 后部的电缆室, 调节调压器, 电压升到一定幅值后, 开关柜内的缺陷模型将发生放电。使用 3 个传感器 A、B、C, 分别贴在 3 个开关柜前表面并布置成直线排列方式, 传感器两两相距约 80 cm, 测量信号如图 10 所示, 通道 A、通道 B 之间时间差小于 1 ns [ $\Delta t < 0.8 \text{ m} / (3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 2.67 \text{ ns}$ ], 通道 B、通道 C 之间时间差大于 3 ns, 因此判断局放信号源

应在 A 与 B 开关柜之间。随后利用矩形排列方式测量, 确定了信号来源自 A 开关柜。第 3 步将传感器 A、B、C、D 分别贴在开关柜 A 的断路器室、出线室、母线室和电缆室, 根据四个传感器接收信号到达的先后顺序最终确定了局部放电源处于电缆室。最后, 将 4 个传感器放置在开关柜后部电缆室表面的 4 个角上(图 8 中传感器放置在了开关柜 B 的断路器室, 此图只为示意图), 放电产生的高频电磁波穿过柜体后表面缝隙被贴在电缆室表面的传感器捕捉, 利用四通道的信号可以计算出局部放电源的精确位置, 电缆室表面矩形放置的四路信号如图 11 所示。

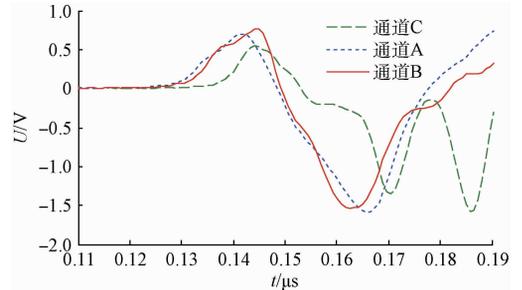


图 10 直线排列方式测得的 3 路信号

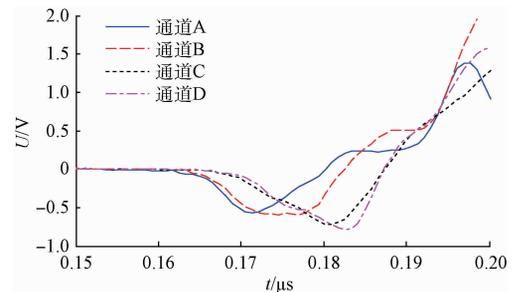


图 11 电缆室表面矩形放置的 4 路信号

以待定位电缆室的左下角为坐标原点, 建立空间直角坐标系, 局部放电源及传感器的空间坐标如表 5 所示。

表 5 实测局部放电源及传感器的空间坐标

PD 源坐标/cm	$S_1$ /cm	$S_2$ /cm	$S_3$ /cm	$S_4$ /cm
(45, 21, 42)	(0, 0, 0)	(72, 0, 0)	(0, 0, 114)	(72, 0, 114)

采用阈值法与能量法来确定四路信号的波头时间, 得到信号的实测到达时间差如表 6 所示。

表 6 信号到达时间差的实测值

	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$
阈值法/ns	0.8	3.2	4
能量法/ns	0.8	3.2	4

从表 6 中的结果可以看出, 阈值法和能量法的计算结

果一致,因此选取由这两种方法计算的信号到达时间差来进行定位。受高速采集卡采样率精度 0.8 ns 的限制,计算得到的信号到达时间差精度不是很高,因此使用第 2.2 节介绍的对信号到达时间差比较敏感的求解非线性方程组的方法来定位将会产生很大的误差。针对这种情况,分别选择 10 cm×10 cm×10 cm 和 5 cm×5 cm×5 cm 的网格尺寸,利用空间网格搜索法进行定位,计算结果均为  $P^*(x^*, y^*, z^*)=(25\text{ cm}, 20\text{ cm}, 30\text{ cm})$ ,可见,同实际的放电位置相比最大误差为 20 cm。由计算结果可以看出,开关柜局放定位的精度受高速采集卡的采样率的影响非常大。本次试验由于采样率的限制使得定位结果有一定的误差,定位系统的性能还有待改进。

## 5 结 论

研究了使用四通道 TEV 传感器对高压开关柜局部放电的定位方法,分别利用传感器的不同种布置方式,首先将局部放电源定位在一排并列运行的开关柜的某一个柜面,然后定位在某面柜体的某个隔室,最后针对某个隔室进行局部放电的精确定位。对于局部放电的精确定位,提出了基于求解非线性方程组的双曲面定位法和空间网格搜索法,通过建立开关柜某隔室的 XFDTD 简化仿真定位模型,验证了所提出定位方法的有效性。

在实验室搭建了开关柜局部放电定位试验平台,使用本章提出的定位方法开展了试验研究,研究结果表明,四通道传感器定位方法能够有效的将局部放电源定位在开关柜的某一隔室,有较好的应用前景。然而,试验平台当中采集卡的采样精度不高,导致精确定位结果存在一定的误差。可见,通过提升测量系统的硬件性能,可以有效地减小信号到达时间差的计算误差,从而提高局部放电定位的准确性。

## 参考文献

- [1] 任明,彭华东,陈晓清,等.采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电[J].高电压技术,2010,36(10):2460-2466.
- [2] 陈柯,邵晖,何婷婷.射频识别(RFID)系统架构和持续改善[J].国外电子测量技术,2015,34(4):5-9.
- [3] 刘克民,韩克俊,李军.局部放电光学检测技术研究进展[J].电子测量技术,2015,38(1):100-119.
- [4] 骆洁艺.超声波多普勒流量计换能器的研究与应用[J].国外电子测量技术,2014,33(2):84-88.
- [5] 常文治,唐志国,李成榕,等.变压器局部放电超宽带射频定位技术的试验分析[J].高电压技术,2010,36(8):1981-1987.
- [6] 李通,谢庆,张宏伟.基于信号稀疏分解的局放超声阵

- 列定位法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(6):1302-1310.
- [7] 高文胜,丁登伟,刘卫东.采用特高频检测技术的局部放电源定位方法[J].高电压技术,2009,35(11):2680-2683.
- [8] 孙云亭,蔡振江,程曼,等.多超声波传感器局部放电源定位方法的研究[J].电子测量与仪器学报,2008,15(4):416-422.
- [9] 姚陈果,黄琮鉴,吴彬,等.采用时域有限差分法分析开关柜中超高频率信号传播特[J].高电压技术,2013,39(2):272-279.
- [10] 魏振,张强,齐波,等.高压开关柜典型缺陷局部放电 TEV 特征的研究[J].高压电器,2014,50(2):60-67.
- [11] 辛晓虎,李继胜,纪海英,等.用于变压器中局部放电定位的十字形超声阵列传感器研究[J].中国电机工程学报,2013,33(21):154-162.
- [12] 高鹏路,胡岳,刘斌,等.传感器并联型局部放电监测与定位方法[J].电工技术学报,2014,29(2):226-230.
- [13] 律方成,李海德,王子建,等.基于 TEV 与超声波的开关柜局部放电检测及定位研究[J].电测与仪表,2013,50(575):73-78.
- [14] 麦茜坚,钟悦,唐明,等.基于 TEV 传感器与 TOA 算法的高压开关柜局部放电定位方法的研究[J].电气技术,2015(6):1-6.
- [15] 朱超杰,王友臣,朱琪,等.新型变压器局放监测特高频传感器的研究[J].仪器仪表学报,2014,34(4):749-755.

## 作者简介

邢雅,1989 年出生,讲师,主要从事变电站运行与维护工作。

姜纪宁,1962 年出生,高级讲师,主要从事电力营销工作。

丁旭元,1985 年出生,讲师,主要从事电力营销工作。

康亚丽,1985 年出生,讲师,主要从事变电站运行与维护工作。

樊博,1989 年出生,工程师,主要从事计量装置状态监测工作。

杨慧丽,1963 年出生,高级工程师,主要从事变电站运行与维护工作。

闫敬东,1970 年出生,高级工程师,主要从事变电设备检修工作。

杨秀川,1989 年出生,讲师,主要从事输电线路运行与检修工作。