

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.12.026

基于线性预测分析时差估计的特高频局部放电定位方法

田妍¹, 王勇¹, 杨森¹, 周南², 李臻²

(1. 广州供电局有限公司电力试验研究院, 广州 510410; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 基于特高频(UHF)信号的局部放电(PD)定位方法由于其对信号时差的计算误差较大,因此还未能能在变电站中进行广泛的应用。文中提出了一种基于线性预测分析的时差估计方法,该算法首先对实际采集的特高频信号做预测分析,然后对预测误差应用幂定律以突显局放发生时刻,最后利用广义相关法进行时差估计。该方法能够以较高的精度计算信号时差,从而提高了局放定位的精度。实验结果表明,利用文中方法进行局放定位,定位距离误差可控制在1 m以下,方向角定位误差可控制在8°以下,证明了该方法的可行性。
关键词: 局部放电; 特高频; 时差法; 线性预测分析; 幂定律; 误差分析; 广义相关估计

UHF Partial Discharge Location Method Based on Time Delay Estimation of Linear Prediction Analysis

TIAN Yan¹, WANG Yong¹, YANG Sen¹, ZHOU Nan², LI Zhen²

(1. Electric Power Research Institute of Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510410, China; 2. Electrical Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The localization of partial discharge(PD)based on ultra-high frequency(UHF)signals has not been widely used in substations due to the excessive localization error, which is mainly introduced by the error of time delay measurement. A novel time delay estimation method based on linear prediction analysis is proposed in this paper. Linear prediction analysis is carried out on the actual PD signals. The power law is applied to the prediction error to highlight the time of PD occurrence. Eventually, the generalized correlation algorithm is used to estimate the signal time delay. The proposed method could estimate the signal time delay with high precision, thus improving the accuracy of PD localization. Experiment results show that the localization distance error is less than 1 meter and the localization angel error is less than 8 degrees, which have proved the feasibility of this method.

Key words: partial discharge; UHF; time delay estimation; linear prediction analysis; the power law; error analysis; generalized correlation analysis

0 引言

局部放电可能会引起电力设备的绝缘劣化,导致设备故障^[1-4],因此对局部放电的检测及定位有很大意义。基于特高频信号的(UHF)局部放电(PD)定位的抗干扰性能较好,同时定位灵敏度更高,非常适合应用于局放定位中^[5-7];然而该方法定位误差较大,限制了其在变电站检测中的大规模应用。特高频法的定位误差往往来源于特高频信号时差估计

的误差,由于电磁波在空气中以光速传播,为了保证1 m的定位精度,需要保证时差估计的精度在10 ns以下。此外,实际环境中的特高频信号中往往含有白噪声、随机脉冲、窄带信号等干扰,进一步增加了时差估计的误差。

现阶段常用的时差估计算法,包括广义相关法、能量积累法、阈值法等^[7-8]。传统的时差计算方法往往难以满足局放定位的精度要求,在上述经典算法的基础上,研究人员也提出了一系列新的时差

收稿日期:2019-07-01; 修回日期:2019-09-13

基金项目:广州供电局有限公司科技项目资助(GZHKJ00000008)。

Project Supported by Technology Program of Guangzhou Power Supply Company(GZHKJ00000008).

计算方法,其中包括基于双谱估计算法^[9]的时差估计方法,然而该方法计算量过大,难以直接用于实际工程应用中;文[10]提出了一种基于傅里叶变换的频域时差计算方法,然而实际局放信号是复杂的宽带信号,实际应用中依旧难以准确获得时差值。

基于已有研究,文中提出了一种基于信号线性预测分析及幂定律的高精度时差预测方法,提高了局放定位的精度。该方法首先对实际局放信号应用线性预测分析,将预测值与实际值的误差作为参考,对局放特高频的发生时刻进行估计。随后进一步应用幂定律对预测误差值进行处理,使得局放发生时刻更加突出;对处理后的信号,再应用传统的广义相关法进行时差估计,从而获得精准的时差估计。实验结果表明,利用文中提出的方法进行精确时差计算,局放定位精度提高,距离定位误差可以控制在1 m以下,方向角误差可控制在8°以下,从而证明了文中所提出方法的可行性。

1 基于时差的特高频局放定位

在特高频局放定位中,最重要的环节在于信号时差的计算^[8,11],特高频信号的时延估计精度直接决定了局放定位的精度^[12-15]。文中利用特高频传感器阵列接收局放信号并进行时差估计的示意图见图1。

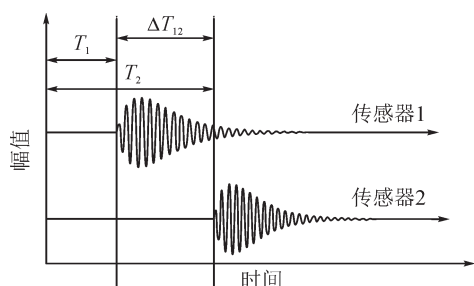


图1 传感器接收PD信号时差示意图

Fig. 1 TDOA estimation of PD signals by two sensors

假设在空间中存在一局放源,用传感器1和传感器2接收特高频信号。局放源在时刻 T_0 发射出信号,信号在空气中以光速传播,由于两个传感器的位置不同,设传感器1于 T_1 时刻接收到信号,传感器2于 T_2 时刻接收到信号,因此两者之间的时差见式(1)

$$\Delta T_{12} = T_2 - T_1 \quad (1)$$

在图1所示的仿真环境下,系统能够较好地分辨出信号的起点,应用式(1)就能够以较高的精度计算出时差值;然而在实际情况中,传感器测量得到的特高频信号见图2。

该信号的时差值难以直接应用式(1)计算,主要有以下原因:

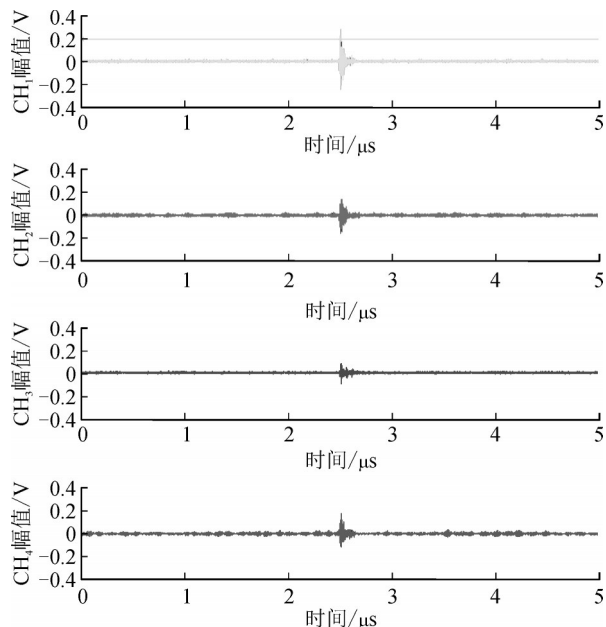


图2 传感器接收的真实PD信号

Fig. 2 Actual UHF PD signals received by the sensors

1)真实局放信号中往往包括了无线电波、电磁干扰等环境噪声,定位系统难以直接分辨出信号的起点;

2)特高频信号以光速传播,传感器阵列的阵元间隔约为1 m,因此时差值在10 ns级别,对时差的计算精度要求极高。

因此在实际应用中,需要寻求更加有效的时延计算方法,才能够保证局放定位的精度。

2 基于线性预测分析的特高频信号时差估计

2.1 线性预测分析

局放信号时延的精确估计可以通过应用线性预测分析得到。线性预测分析^[16]将某一时刻的信号采样点通过不同的权重,将该时刻之前的 p 个采样点经过线性组合表示出来。根据线性预测分析,若 $x(n)$ 是时间序列中第 n 个采样点的采样值,那么这个值可以通过式(2)线性预测得出

$$\tilde{x}(n) = -\sum_{m=1}^p a_m \cdot x(n-m) \quad (2)$$

式(2)中: p 是预测器的阶数; a_m 是预测的系数。信号预测值与实际值之间的误差为 $e(n)$,称为预测误差,见式(3)

$$e(n) = x(n) - \tilde{x}(n) = x(n) + \sum_{m=1}^p a_m \cdot x(n-m) \quad (3)$$

线性预测系数 a_m 的选取应使得预测误差 $e(n)$ 最小。由于预测信号是通过原始信号的前 n 个采样点进行线性分析,因此原始信号突变越剧烈,预测误差将会越大。

2.2 特高频信号处理

特高频阵列采集的特高频信号是由突发的局部放电产生的,由于局部放电的发生,超高频信号的幅值产生突变,从而导致线性预测分析的误差 $e(n)$ 会突然上升;而在传感器接收到信号后,线性预测分析又能够较为精准地预测出后续信号。因此对局放特高频信号应用线性预测分析,计算不同传感器接收信号 $e(n)$ 最大的时差值,即可表示为特高频信号的时差值。

对实际接收的局放特高频信号应用线性预测分析,分析结果见图3。

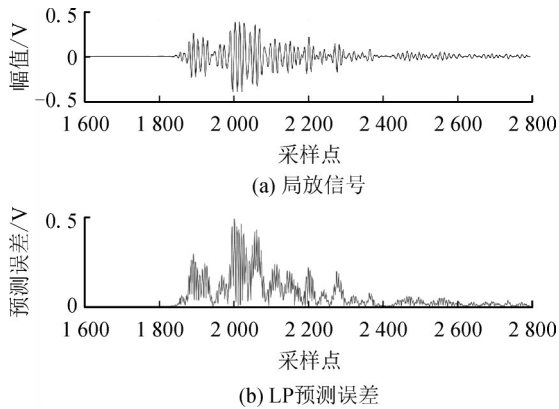


图3 特高频信号线性预测分析

Fig. 3 Linear prediction analysis of UHF signal

从图3可以看出,原本杂乱的超高频信号在应用线性预测分析后,预测误差 $e(n)$ 均存在一个峰值,且更容易分辨。该峰值的时刻代表了信号突变最大的时刻,峰值间的时差即可代表信号接收的

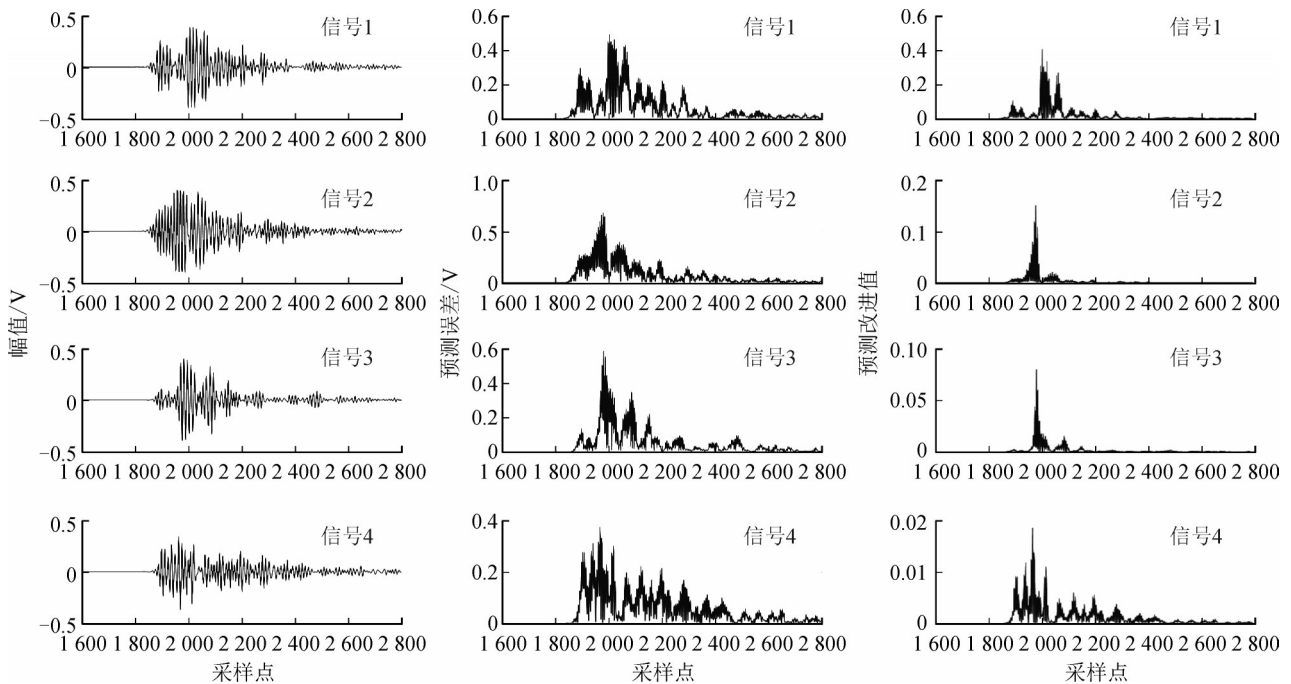


图4 特高频信号线性预测分析及幂定律应用

Fig. 4 Linear prediction analysis and the application of power law of UHF signal

时差。

2.3 局放信号时差估计

2.2节分析了实际局放信号应用线性预测分析的例子。为了进一步精确时差的估计,对上述线性预测误差应用幂定律进行处理,应用方法见式(4)

$$g(n) = \frac{(1+k)^{|e(n)|} - 1}{k} \quad -1 \leq e(n) \leq 1 \quad (4)$$

式(4)中: $g(n)$ 为误差应用幂定律之后的改进值; $e(n)$ 是信号的线性预测误差; k 为常数。 k 的大小决定了 $g(n)$ 在局放发生时刻的平缓度,文中 k 取50。

对在实验室环境下实测的四路特高频信号依次进行线性预测分析、计算预测误差并使用幂定律进行处理。实际信号及预测误差的处理结果见图4。

根据图4可知,对局放特高频信号应用线性预测分析及幂定律,可以将局放发生的时刻从原信号中凸显出来。

对于离散信号,互相关函数^[17]可以写为

$$R_{ij}(m) = \sum_{k=1}^s g_i(k) \cdot g_j(k-m) \quad (5)$$

式(5)中: i, j 分别为同一信号的第 i 个和第 j 个样本; k 为采样点; s 为信号的长度; m 代表位移的采样点数;则 g_i 和 g_j 表示两个不同传感器获得的波形预测改进值数据。

对于预测改进值样本 g_i ,将其位移 m 个采样单位后,利用式(5)计算它与 g_j 的相关系数,若在 $m=m_k$ 时 $R_{ij}(m)$ 取得最大值,则认为预测改进值 g_i 与 g_j 的时差即为 m_k 个采样长度所对应的时长。

传统的时差计算方法往往对于获得的信号直接应用式(5),计算相关系数后取最大值对应的时间;文中方法为利用预测改进值进行相关性估计,因此估计的精度更高。

3 基于时差法的特高频局放定位

基于时差法的局放定位指的是通过分析在不同位置处的传感器接收到同一局放信号的时间差,然后根据信号传播速度推导出局放源的位置。

设局放源的坐标为 (x, y) ,四路特高频传感器的位置分别是 (x_i, y_i) ,其中 $i=1, 2, 3, 4$ 。电磁波在空气中的速度近似为光速 c 。设 r_i 表示第 i 个传感器到信号源的距离, $r_{i,1}$ 表示 r_i 与 r_1 的差值;设局放发生时刻为 $t=0$ 时刻,则 t_i 表示第 i 个传感器到信号源的时间, $t_{i,1}$ 表示 t_i 与 t_1 的差值。根据传感器几何位置关系可以建立以下距离方程^[18]

$$r_i^2 = (ct_i)^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = K_i - 2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y + x^2 + y^2 \quad (6)$$

由于 $r_{i,1} = r_i - r_1$,因此上述方程可以改为

$$r_{i,1}^2 + 2 \cdot r_{i,1} \cdot r_1 = -2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y + K_i - K_1 \quad (7)$$

式(7)中: $K_i = x_i^2 + y_i^2$; $x_{i,1} = x_i - x_1$; $y_{i,1} = y_i - y_1$ 。

式(7)的方程组中有3个方程,其中 $x_{i,1}$ 和 $y_{i,1}$ 可以通过传感器坐标获得,为已知量; $r_{i,1}$ 可以通过测量时差乘以光速获得,为已知量;其中局放源坐标 x 和 y 为两个未知量。通过解上述方程可以获得局放源坐标的估计位置 (x, y) 。

上述二维坐标可以利用式(8)转换为平面极坐标距离 r 及方向角 θ

$$\begin{cases} \tan \theta = \frac{y}{x} \\ r = \sqrt{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (8)$$

4 现场实验

4.1 现场实验条件

对文中所述时差估计方法进行现场实验测试,验证其实际应用能力。特高频传感器的相对位置及放电点位置见图5;设阵列中心点为原点,阵列宽1.6 m,长2 m。

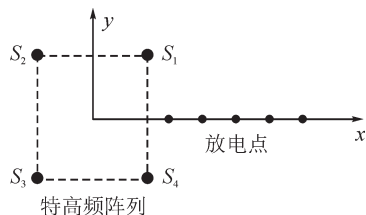


图5 现场实验示意图

Fig. 5 Diagram of PD localization field tests

在实验中使用EM TEST DITO(局部放电模拟器)模拟局部放电。特高频阵列传感器与信号放大器的检测范围是300 MHz~1.5 GHz;放大器的增益大于40 dB;噪声系数小于1.5。

4.2 实验结果分析

由于局部放电定位的误差主要出现在距离定位中,方向角误差较小,因此利用局部放电模拟器在 $r=2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18$ m, $\theta=0^\circ$ 处进行放电,用文中方法计算时差后进行定位,定位结果见表1。

表1 现场实验定位结果

Table 1 Field experiment localization results

r 实际值/ m	r 测量均 值/m	θ 测量均 值/(°)	距离误差 Δr /m	角度误差 $\Delta \theta$ /(°)
2.00	1.43	-4.34	0.57	4.34
4.00	3.29	-7.32	0.71	7.32
6.00	5.20	5.38	0.79	-5.38
8.00	8.66	-4.85	-0.66	4.85
10.00	10.88	6.22	-0.87	-6.22
12.00	13.20	-6.88	-1.19	6.88
14.00	14.68	7.76	-0.68	-7.76
16.00	17.02	6.21	-1.02	-6.21
18.00	19.21	4.89	-1.21	-4.89

分析上述实验结果可知,利用文中所示时差计算方法进行局放定位,定位效果较好,定位精度较高;距离定位误差约为1 m,角度定位误差约为 8° ,满足实际应用要求。

仅用相关性法进行时差估计和文中的方法进行时差估计,其定位距离及定位角度对比见图6、7。从图6、7中可以看出,利用文中方法进行局放定位,定位距离、角度误差下降明显,证明了该方法的实际应用性能。

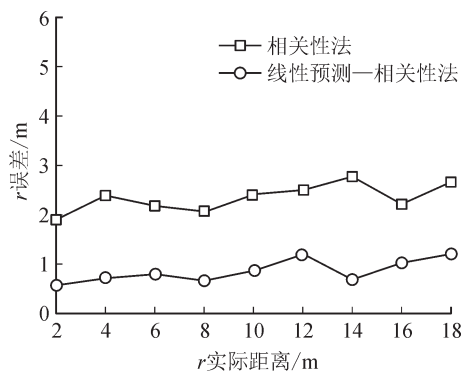


图6 定位距离误差对比

Fig. 6 Comparison of localization distance results

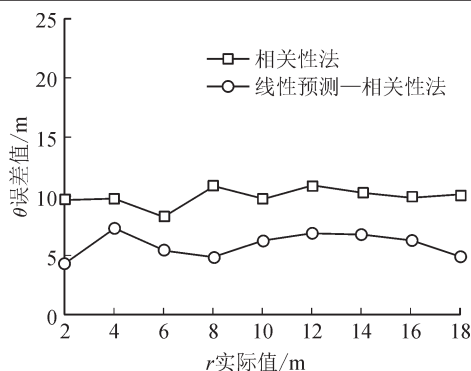


图7 定位角度误差对比

Fig. 7 Comparison of localization angel results

5 结论

1)基于超高频信号的局放定位由于时差计算误差较大,导致定位误差较大。文中提出了一种用于超高频局放定位的时差估计算法,该方法能够提高局放定位的精度;实验结果表明,利用该方法进行定位,距离定位误差约为1 m,角度定位误差约为8°,满足工程应用要求;

2)利用线性预测方法对实际测得的特高频信号进行预测,对预测值与实际值差值利用幂定律处理,处理后的改进值应用广义相关估计确定信号间的时差,该方法相对直接应用广义相关估计计算精度更高;

3)针对不同方法的比较及线性预测的改进方法为文中的后续研究内容。

参考文献:

- [1] 高文胜,丁登伟,刘卫东,等. 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): 2680-2684.
GAO Wensheng, DING Dengwei, LIU Weidong, et al. Location of PD by searching in space using UHF method[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2680-2684.
- [2] 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.
- [3] 侯慧娟,盛戈皞,姜文娟,等. 基于信号模型参数辨识的变电站局部放电电磁波信号重构[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 209-216.
HOU Huijuan, SHENG Gehao, JIANG Wenjuan, et al. Signal reconstruction for partial discharge electromagnetic

wave in substation based on signal model parameters identification[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 209-216.

- [4] 常文治,葛振东,时翔,等. 振荡电压下电缆典型缺陷局部放电的统计特征及定位研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 746-752.
CHANG Wenzhi, GE Zhendong, SHI Xiang, et al. Statistical characteristic and location of partial discharge caused by typical defects in power cable under damped oscillation voltage[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 746-752.
- [5] YAACOB M M, ALSAEDI M A, RASHED J R, et al. Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors[J]. Photonic Sensors, 2014, 4(4): 325-337.
- [6] 侯慧娟,盛戈皞,白万建,等. 基于电磁波阵列信号处理和波达方向分析的变电站局部放电定位[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2692-2698.
HOU Huijuan, SHENG Gehao, BAI Wanjian, et al. Partial discharge location in substation based on electromagnetic array signal processing and direction of arrival[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2692-2698.
- [7] 黄亮,唐炬,凌超,等. 基于多特征信息融合技术的局部放电模式识别研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 947-955.
HUANG Liang, TANG Ju, LING Chao, et al. Pattern recognition for partial discharge based on multi-feature fusion technology[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 947-955.
- [8] 李端姣,唐志国. GIS局部放电特高频检测系统标定研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3348-3354.
LI Duanjiao, TANG Zhiguo. Research on calibration of partial discharge ultra-high frequency detection system for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3348-3354.
- [9] 侯慧娟,盛戈皞,苗培青,等. 变电站局部放电特高频信号时延的双谱估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 208-214.
HOU Huijuan, SHENG Gehao, MIAO Peiqing, et al. Time-delay estimation algorithm of partial discharge uhf signals in substation based on bispectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 208-214.
- [10] 幸琳,姚陈果,孙才新. GIS局部放电定位的频域时差读取方法[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 13-18.
XING Lin, YAO Chenguo, SUN Caixin. Method of time difference reading based on frequency domain for PD location in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 13-18.
- [11] 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.
- [12] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
- LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [13] 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.
- XIN Xiaohu, LI Jisheng, JI Haiying, et al. Study of cross-shaped ultrasonic array sensor applied to partial discharge location in transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 154-162.
- [14] 彭超, 雷清泉. 局部放电超高频信号时频特性与传播距离的关系[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 348-353.
- PENG Chao, LEI Qingquan. Relationship between characteristic in time and frequency domain of partial discharge ultra-high frequency signals and the radiation distance[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 348-353.
- [15] SINAGA H H, PHUNG B T, BLACKBURN T R. Partial discharge localization in transformers using UHF detection method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 1891-1900.
- [16] 宋辉, 杨毅, 刘加. 基于多路线性预测技术的时延估计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011(11): 1666-1670.
- SONG Hui, YANG Yi, LIU Jia. Time delay estimation based on multiple linear predictions[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2011(11): 1666-1670.
- [17] 邓艾东, 包永强, 赵力. 转子碰摩声发射源定位中的广义互相关时延估计研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 86-92.
- DENG Aidong, BAO Yongqiang, ZHAO Li. Research on time delay estimation algorithm based on generalized cross correlation in acoustic emission source location[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(14): 86-92.
- [18] 李庆扬. 数值分析[M]. 第5版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 7-9.
- LI Qingyang. Numerical analyzing[M]. 5th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 7-9.
- 田妍(1989—), 女, 助理工程师, 长期从事高压设备技术监督、状态监测技术应用工作。
- 王勇(1967—), 男, 工学博士, 教授级高工, 高级技术专家, 主要从事高压绝缘技术、高压设备状态监测等研究管理工作。
- 杨森(1989—), 男, 助理工程师, 长期从事高压设备预防性试验、状态监测新技术应用工作。
- 周南(1994—), 男, 工学硕士, 研究方向为电力系统在线监测。
- 李臻(1992—), 男, 工学硕士, 研究方向为电力系统在线监测。