

# 大型变压器局部放电多目标定位实验

罗日成<sup>1</sup>, 李卫国<sup>2</sup>, 文习山<sup>3</sup>

- (1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410076; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;  
3. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

**摘要:**为了解决大型变压器内部局部放电源难以准确定位的问题,进行了以变压器内部同时存在多个放电源的定位为对象,通过传感器阵列接收放电源辐射的超声波信号,应用阵列信号处理技术中的空间谱估计理论,分析阵列传感器所接收信号的特征信息,实现局部放电的多目标定位的研究。研制了4阵元均匀等间隔线阵,建立了局部放电定位实验系统,针对单放电源和二个放电源的不同情况,对放电源空间位置进行了定位模拟实验。实验结果表明,该法具有良好的定位准确度,能有效地估计出变压器内多个放电点的空间位置,可实现电力变压器内部多局部放电源的定位,为变压器内多局放源的定位建立了实验研究基础。

**关键词:** 电力变压器; 局部放电; 声发射; 超声检测; 空间谱估计; 阵列信号处理; 故障定位

**中图分类号:** TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6520(2007)08-0071-06

## Experimental Study on Partial Discharges Localization Within Large Transformer

LUO Ri-cheng<sup>1</sup>, LI Wei-guo<sup>2</sup>, WEN Xi-shan<sup>3</sup>

- (1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China; 2. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
3. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to research and realize partial discharge (PD) sources localization within power transformer and to improve the accuracy of localization, a new method is presented in this paper, which is based on spatial spectrum estimation. Two ultrasonic sensor arrays are located on the inner wall of the transformer tank to detect the ultrasonic signal emitted by the partial discharge sources. Spatial spectrum estimation technique and information theoretic criteria are used in analyzing the signal feature information (Direction-of-Arrival (DOA), number of signal etc), and the number of partial discharge signal estimation and direction-of-arrival estimation were accomplished. A uniform linear array (ULA) consisting of 4 isotropic acoustic sensors was developed, a suit of experiment system for partial discharge sources localization testing system was established, and a series of experiments on multiple PD sources localization for single partial discharge source and two partial discharge sources were performed. The results of localization show that: the method can effectively estimate the location parameter of multiple partial discharge sources in a high estimated accuracy and set up solid theoretical and experimental foundation for multiple partial discharge sources localization in large power transformer.

**Key words:** power transformer; partial discharges; acoustic emission; ultrasonic inspection; spatial spectrum estimation; array signal processing; fault localization

## 0 引言

大型电力变压器内部局部放电源的准确定位,一直是高电压设备绝缘检测领域的难题,长期以来得不到很好的解决<sup>[1-4]</sup>,在过去的几十年中,出现了多种定位方法,但总体效果并不十分理想<sup>[5-7]</sup>。主要是变压器内部绝缘结构复杂、电磁环境十分恶劣,严重制约了对放电信号的有效提取;同时放电脉冲信号为时变量,其幅度、相位和频率是起伏的,单次或有限次测量无法完整反映放电信号的真实特性,故根据局部放电脉冲传播特性原理建立的各种电气定位方法难以给出放电源的几何位置<sup>[8-10]</sup>;此外,超声

波定位方法在定位算法上是基于变压器内的单点放电,但实际上,变压器内部往往存在多点同时放电的情形,故基于声发射传播特性的超声波定位法难以有效分辨出各个放电信号的时延<sup>[11-13]</sup>。

为研究解决电力变压器内部局部放电源的定位问题,提高放电源的定位准确度,本文借助局部放电时产生的超声波信号,提出了一种基于阵列信号处理技术的局部放电多目标定位新方法<sup>[14-16]</sup>。方法通过在变压器油箱内壁安装一个超声波传感器阵列,利用其接收放电源辐射的超声波信号,应用信息论准则和空间谱估计理论,分析阵列传感器所接收信号的特征信息(信号源数、波达方向),完成放电源数

和放电源方位的估计。本文实验研究了上述方法，整个实验系统是在介质为空气的情况下完成，阵列采用四阵元均匀线阵，为了获得信号的方位角和俯仰角，实验对同一放电源的空间位置进行 2 次测量，分别估计出信号的方位角和俯仰角。

### 1 多目标定位的原理

阵列信号处理是信号处理领域内的一个重要分支，在近 30 年来得到了迅速发展，并广泛地应用于通讯、雷达、声呐、导航、地质勘查、机电测量、生物医学和射电天文等众多领域。

多重信号分类 (Multiple Signal Classification, MUSIC) 算法<sup>[17,18]</sup>是 Schmidt R O 等人在 1979 年提出的，该算法的提出开创了空间谱估计算法研究的新时代，促进了特征结构类算法的兴起和发展，实现了向现代超分辨测向技术的飞跃，并已成为空间谱估计理论体系中的标志。为叙述算法的方便，本文以均匀等间隔线阵为例，介绍其基本原理如下：

考虑  $D$  个远场的窄带信号 ( $s_1, s_2, \dots, s_D$ ) 入射到某线阵上，其中阵列由  $M$  个阵元组成，阵元间隔为  $d$  (见图 1)。阵列输出向量可以表示为

$$X(t) = A(\theta)S(t) + N(t), \quad (1)$$

式(1)即为窄带远场信号的数学模型，其中， $A(\theta) = [\alpha(\theta_1), \alpha(\theta_2), \dots, \alpha(\theta_N)]$  为阵列的方向矩阵或阵列流型； $\alpha(\theta_i) = [1, e^{-j2\pi d \sin\theta_i/\lambda}, \dots, e^{-j(M-1)2\pi d \sin\theta_i/\lambda}]^T$ ，为人射信号的方向向量 ( $\lambda$  为人射信号的波长)； $S(t)$  为入射信号向量； $X(t)$  为接收信号向量； $N(t)$  为阵列噪声向量。

求出阵列输出向量  $X(t)$  的协方差矩阵  $R$ ：  
 $R = E[XX^H] = AE[SS^H]A^H + \sigma^2 I = AR_s A^H + \sigma^2 I$ ，  
 其中， $R_s = E[S(t)S(t)^H]$  为信号协方差矩阵， $\sigma^2 I = E[n(t)n(t)^H]$ 。  $A^H$  为  $A$  的共轭转置； $\sigma^2$  为噪声功率； $n(t)$  为噪声序列。

因为  $A$  各列相互独立，且在入射信号互不相关时， $R_s$  为非奇异阵，故：

$$\text{Rank}(AR_s A^H) = D.$$

因  $R_s$  是正定阵，则矩阵  $AR_s A^H$  是非负定的，共有  $D$  个正的特征值，和  $M-D$  个零特征值<sup>[19,20]</sup>。又因  $\sigma^2 > 0$ ， $AR_s A^H$  非负定， $R$  为满秩阵，故  $R$  有  $M$  个实正的特征值。对  $R$  进行特征分解：

$$R = \sum_{i=1}^M \lambda_i e_i e_i^H = U_s \Sigma_s U_s^H + U_n \Sigma_n U_n^H,$$

其中， $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$  表示  $R$  的特征值，并对特征值进行降序排列，则有：

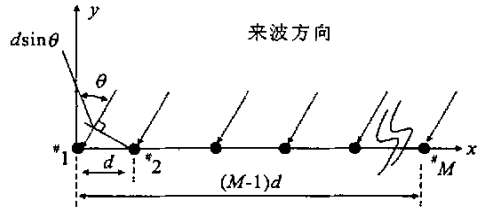


图 1 均匀等间隔线阵

Fig. 1 Sketch map of the uniform linear array

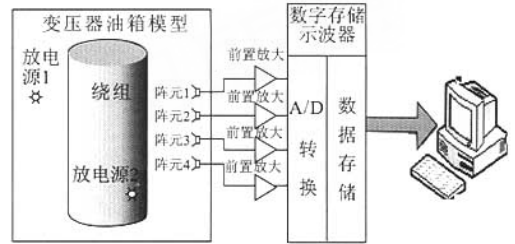


图 2 定位实验系统结构图

Fig. 2 Structure of locating experimental system

$$\lambda_1 > \lambda_2 \dots \lambda_D > \lambda_{D+1} = \lambda_{D+2} = \dots = \lambda_M$$

其中， $R$  的  $D$  个大特征值对应的特征向量  $\Sigma_s = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_D)$  张成的子空间  $U_s = \text{span}\{e_1, e_2, \dots, e_D\} = \text{span}\{\alpha(\theta_1), \alpha(\theta_2), \dots, \alpha(\theta_D)\}$ ，称为信号子空间。 $M-D$  个小特征值对应的特征向量  $\Sigma_n = \text{diag}(\lambda_{D+1}, \lambda_{D+2}, \dots, \lambda_M)$  所张成的子空间  $U_n = \text{span}\{e_{D+1}, e_{D+2}, \dots, e_M\}$ ，称为噪声子空间，根据特征分解理论可知， $U_s$  和  $U_n$  相互正交，即：

$$\alpha^H(\theta)U_n = 0. \quad (2)$$

经典 MUSIC 算法是基于上述这个性质提出的，但考虑到实际接收数据矩阵有限长，即  $R$  的最大似然估计为  $\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X X^H$ ，对  $\hat{R}$  进行特征分解可以计算得到噪声子空间特征向量矩阵  $\hat{U}_n$ 。因噪声的存在， $\alpha(\theta)$  与  $\hat{U}_n$  不能完全正交，即式(2)不成立。实际上求波达方向是以最小优化搜索实现的，即

$$\theta_{\text{MUSIC}} = \underset{\theta}{\text{argmin}} (\alpha^H(\theta)\hat{U}_n\hat{U}_n^H\alpha(\theta)),$$

故 MUSIC 算法的空间谱估计  $P_{\text{MUSIC}}$  公式为<sup>[17,21]</sup>：

$$P_{\text{MUSIC}} = 1/\alpha^H(\theta)\hat{U}_n\hat{U}_n^H\alpha(\theta),$$

角谱  $P(\theta)$  的  $N$  个峰值对应的方位角就是目标的方向估计。

### 2 实验系统的组成

电力变压器局部放电多目标定位实验系统原理框图见图 2，由变压器箱体模型、变压器绕组、四阵元等间隔均匀线阵、放大电路和数字存储示波器等组成。线阵中各阵元为超声波传感器，各阵元等间隔排列，整个阵列安装在变压器模型内，用电子打火

器模拟放电过程,由传感器阵列接收发生器放电时产生的声信号,接收到的信号经过前置放大后,由数字存储示波器进行转换、数据采集和数据存储,示波器采用 LeCroy LC-574A 型高速数字存储示波器,该示波器具有多通道同步采集功能,单通道最大采样频率可达 4 GHz,4 通道同时采集时的采样频率可达每通道 1 GHz。示波器采集的数据经 GPIB 接口(IEEE488.2),传送到计算机,再由数据采集程序保存到硬盘,然后对存储的数据进行离线处理。

实验过程中,将各通道的采样频率设置为 50 MHz,每通道的采样点数为 50 000 个。整个实验系统见图 3.4。

### 3 局部放电定位实验

局部放电定位实验主要对单一和两个放电源放电的情形进行定位研究。定位系统的坐标以变压器箱体模型的左下角为坐标原点,以箱体的长度方向为  $x$  轴,以传感器阵面所在箱壁的正法线(即箱体的宽度方向)为  $y$  轴,以油箱的高度方向为  $z$  轴。放电源产生的声发射信号用电子打火机模拟,信号发生器可放置于箱体内某一位置并手动控制其发射声信号,传感器阵列接收信号后,由放大电路对信号进行低倍数的放大。

#### 3.1 单一放电源空间位置估计

##### 3.1.1 放电源位于绕组外部一对方位角的估计

实验 1 模拟变压器绕组外部某一部位局部放电情形,以验证系统对放电部位的空间角度的估计能力。实验采用 4 阵元均匀线阵,阵元间距  $d = \lambda/2$ ,记录时间长度  $t = 1$  ms,采样时间间隔  $T = 20$  ns,记录数据  $5 \times 10^4$  个。放电信号相对阵列中心点的方位角为  $-33.6^\circ$ ,接收基阵安装在模拟箱体的内壁,用直尺等测量工具测得其空间实际坐标为  $(1765.0, 0, 1175.0)$  mm,整个阵列水平放置;将放电信号发生器固定在绕组的外部,其空间实际坐标为  $(980.0, 1180.0, 1170.0)$  mm,放电源与接收阵列近似处于同一水平面上,离接收阵列的垂直距离为 1 180.0 mm,放电源与传感器的位置见图 5。

实验在夜晚 22:00 后进行,以避免周围环境的干扰噪声,实验过程中,示波器设置为单次触发,一名试验员处于变压器模拟箱体内,在指定位置控制信号发生器,在另一实验员发出放电命令 3 s 后,模型内实验员启动信号发生器,产生放电信号,对每一位置的信号进行 20 次数据采集,采集后数据由系统保存至计算机硬盘,以便下一步的计算。测得一次放电时产生的声信号波形见图 6。

由原始信号的波形可见,各通道信号的一致性万方数据



图 3 局部放电定位系统

Fig. 3 Framework of the locating system of PD

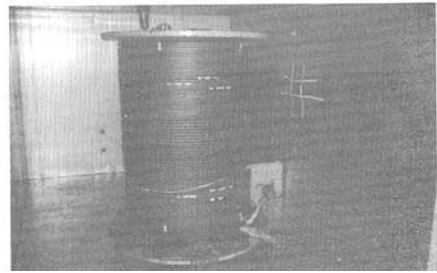


图 4 变压器模型内部的绕组和传感器阵列

Fig. 4 Winding and sensor array inside transformer model

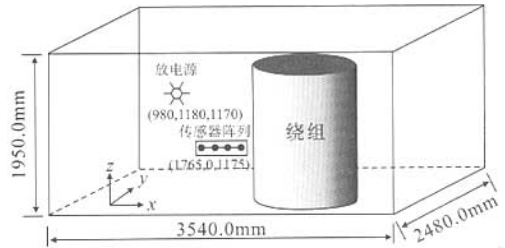


图 5 放电源与传感器阵列的位置分布示意图

Fig. 5 Schematic of the position of PD source and sensor array

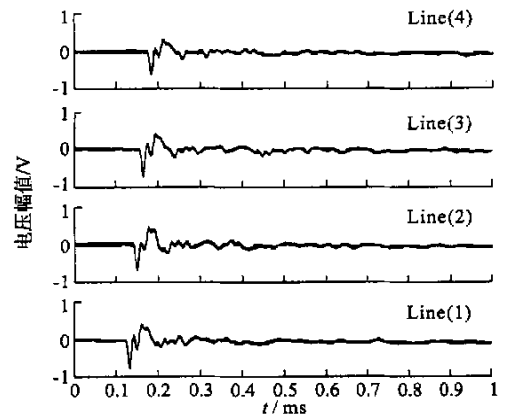


图 6 放电源产生的声信号波形

Fig. 6 Waveform of acoustic signal yielded by PD source  
较好,放电源产生的声信号到达各个阵元的时延十分明显。利用滤波后的信号估计放电源方位。

首先利用赤池信息准则(Akaike's Information

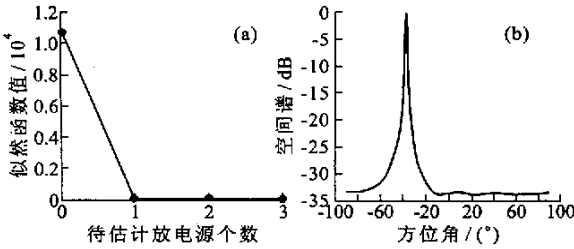


图7 信号源数及信号方位角的估计结果  
Fig. 7 Estimation results of the number of signal and azimuth angle

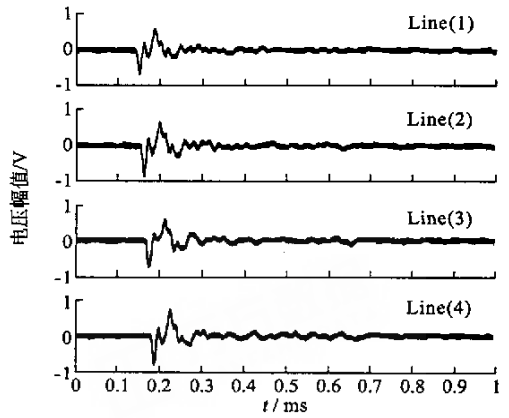


图9 放电源产生的声信号波形

Fig. 9 Waveform of acoustic signal yielded by PD source

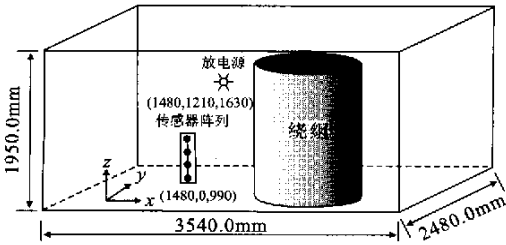


图8 放电源与传感器的位置分布示意图  
Fig. 8 Schematic of the position of PD source and sensor array

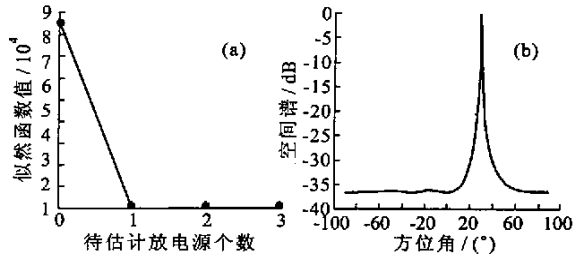


图10 信号源数和信号俯仰角的估计结果

Fig. 10 Estimation result of the number of signal and elevation angle

Criterion, AIC) 估计信号源数, 然后应用 MUSIC 算法估计放电源方位角, 信号源数和方位角估计结果见图 7。由图可见, 阵列估计结果与信号实际方位角很接近。

3.1.2 放电源位于绕组外部一对俯仰角的估计

实验 2 条件同实验 1, 模拟变压器绕组外部某一部分局部放电情况, 以验证系统对单一放电源的空间角度的估计能力。为了实现对放电源俯仰角的估计, 将传感器阵列旋转 90°, 垂直地面安装在变压器模拟箱体的内壁, 其中心点的空间坐标为 (1 485. 0, 0, 990. 0) mm, 放电源与传感器阵列在垂直地面的同一平面内, 放电源的空间坐标为 (1 485, 1 210, 1 630) mm, 放电信号相对阵列中心点的实际俯仰角为 27. 8°, 放电源与传感器的空间分布情况见图 8, 放电源产生的声信号见图 9。放电源的俯仰角估计结果见图 10。

3.2 两个放电源空间位置估计

实验 3 是一个放电源位于绕组内部, 另一个位于绕组外部-对方位角的估计。利用阵列信号处理技术最主要的优点是能对同时放电的多个放电源进行定位, 实验 3 可通过对 2 个声源的定位来模拟多放电源定位的情况。实验 3 模拟变压器绕组内存在 2 个放电源(\* 1 放电源位于绕组内部, \* 2 位于绕组外部)的情况, 以验证系统对多放电源的空间角度的估计能力。实验仍采用 4 阵元均匀线阵, 接收基阵安装在模拟箱体的内壁, 其空间坐标为 (1 775. 0, 0,

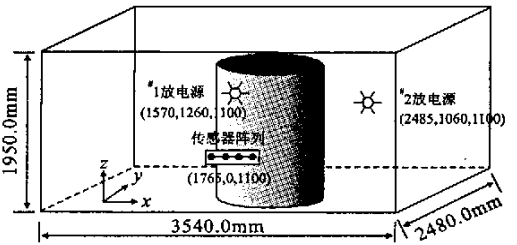


图11 两个放电源与传感器的空间分布示意图  
Fig. 11 Schematic of the position of two PD sources and sensor array

1 100. 0) mm, 整个阵列水平放置; 一个放电信号发生器固定在绕组的内部, 另一个放电信号发生器固定在绕组的外部, 两个信号发生器与传感器阵列位于同一水平面内, 其中, \* 1 放电源的空间坐标为 (1 570. 0, 1 260. 0, 1 100. 0) mm, 位于变压器绕组的内部, \* 2 放电源的空间坐标为 (2 485. 0, 1 060. 0, 1 100. 0) mm, 位于变压器绕组外部, 因此 \* 1、\* 2 放电源相对阵列中心点的方位角分别为 -9. 5°、33. 8°, 各个放电源与传感器的空间分布情况见图 11, 实验中传感器阵列测得的声信号波形见图 12。

离线分析测量信号, 利用滤波后的信号估计放电源数及放电源的方位角, 估计结果见图 13。

由定位结果可见, \* 1、\* 2 放电源相对阵列中心

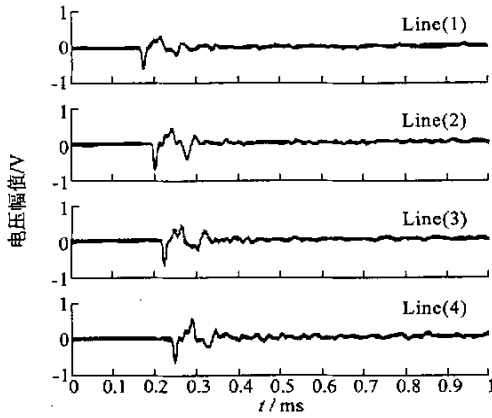


图 12 两个放电源产生的声信号波形

Fig. 12 Waveform of acoustic signal yielded by PD sources

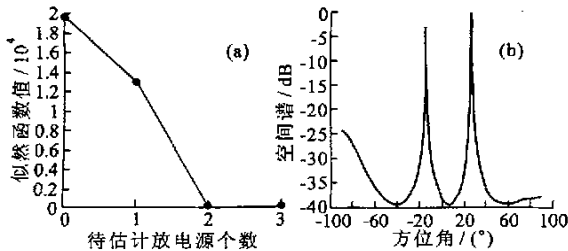


图 13 信号源数和信号方位角的估计结果

Fig. 13 Estimation result of the number of signal and azimuth angles

点的实际方位角分别为  $-9.5^\circ$ 、 $33.8^\circ$ ，而阵列估计的结果约为  $-18^\circ$ 、 $37^\circ$ ，误差为  $8.5^\circ$ 、 $3.2^\circ$ ，#1 放电源的定位误差偏大。出现这一现象的主要原因是：① 因 #1 放电源位于绕组内部，绕组对声信号的传播方向存在一定的影响，但因绕组存在油道间隙，可使声信号透过绕组，故阵列能接收到 #1 放电源的声信号；但因绕组的阻挡，改变了信号的方向，从而造成定位误差偏大。② 阵列的分辨能力与阵元数以及信号源数有关，在阵元数一定时，信号源数的增加会影响阵列的定位精度，工程上一般规定信号源数要小于阵元数，故在实际的工程应用中，应综合考虑在经济和设备许可的情况下，选用较多的阵元组成传感器阵列，这不仅能扩大阵列的孔径，而且能进一步提高对信号源数的估计能力。

对于两放电源俯仰角的估计等其他情形，其实实验方法和实验步骤与前述内容基本相同，因篇幅限制，在此不作阐述。

### 4 结 语

论文通过对定位系统的实验研究，验证了作者所提出的多目标定位方法的正确性和有效性。针对单一目标和二目标的不同情况，结合电力变压器局方数据

部放电多目标定位的实际应用，利用参数估计与定位模拟实验系统对放电源空间位置估计方法进行了全面深入的实验研究。实验结果可见，因存在阵元机械安装误差、阵元个数的局限性和声传播介质的多样性等各种因素，定位结果存在一定的误差，但与信号实际空间位置比较接近，故文章提出的变压器局部放电多目标定位方法能满足现场对放电源定位的要求。

### 参 考 文 献

[1] 张承彪, 罗运柏, 文习山. 主成分分析在变压器故障诊断中的应用研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 9-11.  
ZHANG Cheng-biao, LUO Yun-bai, WEN Xi-shan. Study on fault diagnosis of transformer based on principal component analysis of dissolved gas[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 9-11.

[2] 彭宁云, 文习山, 舒翔. 模糊神经网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 高电压技术, 2004, 30(5): 14-17.  
PENG Ning-yun, WEN Xi-shan, SHU Xiang. Application of fuzzy neural network to transformer fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(5): 14-17.

[3] 桂峻峰, 高文胜, 谈克雄, 等. 脉冲电流法测量变压器局部放电的频带选择[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 45-46.  
GUI Jun-feng, GAO Wen-sheng, TAN Ke-xiong, et al. Frequency band of pulse current method for the measurement of PD in transformer[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(1): 45-46.

[4] Wang Z D, Crossley P A, Cornick K J, et al. Partial discharge location in power transformers[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 2000, 147(5): 249-255.

[5] 罗日成, 李卫国, 熊浩, 等. 电力变压器局部放电在线监测系统的研制[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 57-59, 85.  
LUO Ri-cheng, LI Wei-guo, XIONG Hao, et al. Development of on-line monitoring system for partial discharge within power transformer[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 57-59, 85.

[6] 王国利, 郝艳捧. 电力变压器局部放电定位方法的现状和前景[J]. 变压器, 2001, 38(11): 22-27.  
WANG Guo-li, HAO Yan-peng. Present situation and prospect of PD location method used in power transformer[J]. Transformer, 2001, 38(11): 22-27.

[7] 郭俊, 吴广宇, 张血琴, 等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 29-35.  
GUO Jun, WU Guang-yu, ZHANG Xue-qin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 29-35.

[8] 高文胜, 桂峻峰, 谈克雄, 等. 局部放电信号在电力变压器绕组传播过程中的畸变[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 31-36.  
GAO Wen-sheng, GUI Jun-feng, TAN Ke-xiong, et al. Distortion caused by partial discharge propagation along power transformer winding[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 31-36.

[9] 唐炬, 宋胜利, 孙才新, 等. 局部放电信号在变压器绕组中传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 91-96.  
TANG Ju, SONG Sheng-li, SUN Cai-xin, et al. Propagation characteristics of partial discharge pulses in transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 91-96.

[10] 陈庆国, 王永红, 高文胜, 等. 局部放电在线监测的数据分析及

现场干扰抑制[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 10-12, 30.  
 CHEN Qing-guo, WANG Yong-hong, GAO Wen-sheng, et al. On-line PD data analysis and interderence suppression by software [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 10-12, 30.

[11] Lu Y, Tan X, Hu X. PD detection and localizations by acoustic measurements in an oil-filled transformer[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 2000, 147(2): 81-85.

[12] Olivieri M M, Mannheimer W A, Ripper-Neto A P. On the use of acoustic signals for detection and location of partial discharges in power transformers[C]. IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S. l.], 2000: 259-262.

[13] Chen Li-Jung, Tsao Ta-Peng, Lin Yu-Hsun. New diagnosis approach to epoxy resin transformer partial discharge using a-acoustic technology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(4): 2501-2508.

[14] 罗日成. 基于阵列信号处理的大型变压器局部放电多目标定位方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006.  
 LUO Ri-cheng. Study on the method of multiple partial discharge sources localization within large transformer based on array signal processing[D]. Wuhan: Wuhan University, 2006.

[15] 罗日成, 李卫国, 李成榕. 变压器局部放电多目标无源定位中去除测向交叉定位虚假点的快速算法[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 65-69.  
 LUO Ri-cheng, LI Wei-guo, LI Cheng-rong. A high-speed algorithm to remove mendacious points of direction-finding cross-localizaion in multi-target passive localization of partial discharge source within power transformer [J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 65-69.

[16] 罗日成, 李卫国, 李成榕. 基于阵列信号处理的局部放电多目标定位方法研究[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 57-61.  
 LUO Ri-cheng, LI Wei-guo, LI Cheng-rong. Research on the method of partial discharge source multi-targets localization based on array signal processing[J]. Power System Technolo-

gy, 2006, 30(1): 57-61.

[17] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans on Antennas And Propagation, 1986, 34(3): 276-280.

[18] 陈辉, 王永良. 空间谱估计算法结构及仿真分析[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(8): 76-79.  
 CHEN Hui, WANG Yong-liang. The frame of spatial spectrum and simulation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(8): 76-79.

[19] 张揽月, 杨德森. 基于 MUSIC 算法的矢量水听器阵源方位估计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(1): 30-33.  
 ZHANG Lan-yue, YANG De-sen. DOA estimation based on MUSIC algorithm using an array of vector hydrophones[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(1): 30-33.

[20] Xu Xiao-Liang, Buckley M K. Bias and variance of direction-of-arrival estimates from MUSIC, MIN-NORM, and FINE[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1994, 42(7): 1812-1816.

[21] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.



罗日成  
Ph. D. LUO Ri-cheng

罗日成 1970—,男,博士,副教授,主要研究方向为电力设备绝缘在线监测与故障诊断、阵列信号处理。E-mail: luo81857@163.com

李卫国 1957—,男,教授,博导,主要研究方向为高电压与绝缘监测、电磁兼容。

文习山 1962—,男,教授,博导,主要研究方向为高电压与绝缘监测、电气设备防雷接地。

收稿日期 2006-12-21 编辑 严梦

(上接第 26 页)

[5] Altenburger R, Heitz C, Timmer J. Analysis of phased-resolved partial discharge patterns of voids based on a stochastic process approach[J]. Journal of Physics D, Applied Physics, 2002(35): 1149-1163.

[6] 董旭柱, 王昌长, 朱德恒. 电力变压器局部放电在线监测研究的现状和趋势(一)[J]. 变压器, 1996, 33(1): 3-7.  
 DONG Xu-zhu, WANG Chang-chang, ZHU De-heng. Status and direction of PD on-line monitoring in power transformers (1)[J]. Transformer, 1996, 33(1): 3-7.

[7] Yang L, Judd M D. Recognising multiple partial discharge sources in power transformers by wavelet analysis of UHF signals[J]. IEE Proc Sci Meas & Technol, 2003, 150(3): 119-126.

[8] Tanaka T. Internal partial discharge and material degradation [J]. IEEE Trans on Elect Insul, 1986, 21(6): 899-905.

[9] 董旭柱, 王昌长, 朱德恒. 电力变压器局部放电在线监测研究的现状和趋势(二)[J]. 变压器, 1996, 33(5): 2-7.  
 DONG Xu-zhu, WANG Chang-chang, ZHU De-heng. Status and direction of PD on-line monitoring in power transformers [J]. Transformer, 1996, 33(5): 2-7.

[10] Kreuger F H. Discharge detection in high voltage equipment [M]. London: A Heywood Book, 1964.

[11] 岸钦斯基 Г С. 高压电气设备局部放电[M]. 徐永禧, 译. 北京: 水利电力出版社, 1984.

[12] 王固利, 郝艳捧, 李彦明. 用于变压器局部放电检测的超高频

传感器的初步研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 154-160.

WANG Guo-li, HAO Yan-peng, LI Yan-ming. Research on calibration technique of UHF PD detection in transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 154-160.

[13] Luo Yongfen, Ji Shengchang, Li Yanming. Phased ultrasonic receiving planar array transducer for partial discharge location in transformer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2006, 53(3): 614-622.



罗勇芬  
Ph. D. LUO Yong-fen

罗勇芬 1968—,男,博士,讲师,研究方向为电力设备在线监测、诊断及寿命评估。电话: (029) 82668626; E-mail: yfluo@mail.xjtu.edu.cn

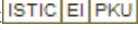
黄平 1984—,男,硕士生,研究方向为电力设备在线监测诊断及寿命评估。

赵文炎 1985—,男,硕士生,研究方向为电力设备在线监测诊断及寿命评估。

李彦明 1946—,男,教授,博导,研究方向为电力设备在线监测、诊断及寿命评估,新型电力设备等。

收稿日期 2007-03-16 编辑 严梦

# 大型变压器局部放电多目标定位实验

作者: 罗日成, 李卫国, 文习山, LUO Ri-cheng, LI Wei-guo, WEN Xi-shan  
作者单位: 罗日成, LUO Ri-cheng(长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙, 410076), 李卫国, LI Wei-guo(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京, 102206), 文习山, WEN Xi-shan(武汉大学电气工程学院, 武汉, 430072)  
刊名: 高电压技术   
英文刊名: HIGH VOLTAGE ENGINEERING  
年, 卷(期): 2007, 33(8)  
引用次数: 1次

## 参考文献(21条)

1. 张承彪, 罗运柏, 文习山 主成分分析在变压器故障诊断中的应用研究[期刊论文]-高电压技术 2005(08)
2. 彭宁云, 文习山, 舒翔 模糊神经网络在变压器故障诊断中的应用[期刊论文]-高电压技术 2004(05)
3. 桂峻峰, 高文胜, 谈克雄 脉冲电流法测量变压器局部放电的频带选择[期刊论文]-高电压技术 2005(01)
4. Wang Z D, Crossley P A, Cornick K J Partial discharge location in power transformers 2000(05)
5. 罗日成, 李卫国, 熊浩 电力变压器局部放电在线监测系统的研制[期刊论文]-电网技术 2004(16)
6. 王国利, 郝艳捧 电力变压器局部放电定位方法的现状和前景[期刊论文]-变压器 2001(11)
7. 郭俊, 吴广宁, 张血琴 局部放电检测技术的现状和发展[期刊论文]-电工技术学报 2005(02)
8. 高文胜, 桂峻峰, 谈克雄 局部放电信号在电力变压器绕组传播过程中的畸变[期刊论文]-中国电机工程学报 2002(04)
9. 唐炬, 宋胜利, 孙才新 局部放电信号在变压器绕组中传播特性研究[期刊论文]-中国电机工程学报 2002(10)
10. 陈庆国, 王永红, 高文胜 局部放电在线监测的数据分析及现场干扰抑制[期刊论文]-高电压技术 2005(11)
11. Lu Y, Tan X, Hu X PD detection and localizations by acoustic measurements in an oil-filled transformer 2000(02)
12. Olivieri M M, Mannheimer W A, Ripper-Neto A P On the use of acoustic signals for detection and location of partial discharges in power transformers 2000
13. Chen Li-Jung, Tsao Ta-Peng, Lin Yu-Hsun New diagnosis approach to epoxy resin transformer partial discharge using acoustic technology 2005(04)
14. 罗日成 基于阵列信号处理的大型变压器局部放电多目标定位方法研究 2006
15. 罗日成, 李卫国, 李成榕 变压器局部放电多目标无源定位中去检测向交叉定位虚假点的快速算法[期刊论文]-电网技术 2005(19)
16. 罗日成, 李卫国, 李成榕 基于阵列信号处理的局部放电多目标定位方法研究[期刊论文]-电网技术 2006(01)
17. Schmidt R O Multiple emitter location and signal parameter estimation 1986(03)
18. 陈辉, 王永良 空间谱估计算法结构及仿真分析[期刊论文]-系统工程与电子技术 2001(08)
19. 张揽月, 杨德森 基于MUSIC算法的矢量水听器阵源方位估计[期刊论文]-哈尔滨工程大学学报 2004(01)
20. Xu Xiao-Liang, Buckley M K Bias and variance of direction-of-arrival estimates from MUSIC, MIN-NORM, and FINE 1994(07)
21. Schmidt R O Multiple emitter location and signal parameter estimation 1986(03)

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 黄兴泉, 赵善俊, 宋志国, 黄中华, 张欲晓, 李成榕 用超高频局部放电测量法实现电力变压器局部放电的

高频局部放电测量法(UHF法)与传统的脉冲电流法完全不同,它采集的被测信号为局部放电过程所产生的超高频电磁波。利用UHF法可有效解决电力变压器局部放电在线监测中的抗干扰问题。文中结合变压器结构设计的放油阀式和入孔/手孔盖式超高频信号传感器安装在220kV和110kV电压等级变压器上,成功地捕捉到变压器内部局部放电产生的超高频信号,对变压器局部放电故障诊断的判据等问题进行讨论,为变压器超高频局部放电在线监测方法的应用积累了经验。

## 2. 学位论文 [盛梦周](#) [电力变压器局部放电超高频检测方法的研究](#) 2005

大型电力变压器是电力系统的重要设备之一,而且造价十分昂贵,所以对电力变压器的维护和检修就显得非常有必要。而传统的对变压器的检修一般是计划检修和事后检修,传统的检修方式有很大的盲目性和强制性,不仅浪费了大量的人力和物力,而且检修过程中设备的频繁拆卸增加了在检修过程中产生新的设备隐患的可能,降低了变压器的使用寿命。针对传统检修方式的严重不足,根据变压器的运行状态来决定是否检修和怎样检修的检修方式越来越受到人们的重视,这就是状态检修。状态检修则是根据各种仪器的监测结果和运行人员的巡查记录,经过运行人员的分析,按照设备运行的实际情况,实事求是地策划设备的检修行为。

电力变压器状态检修的基础在于监测技术和诊断技术,即通过各种检测手段来正确判断变压器目前的状况。变压器故障仍以绝缘故障为主,而对变压器局部放电的检测能够提前反映变压器的绝缘状况,以便及时发现变压器内部的绝缘缺陷,来预防潜伏性和突发性事故的发生。基于以上考虑,本文设计了一套变压器局部放电的超高频在线监测系统,用于在线实时地监测电力变压器的局部放电超高频信号,进而实时了解变压器的绝缘状况以及运行状况。

与传统的直接监测局部放电的脉冲电流法相比,超高频法抗干扰能力强、信息量大、灵敏度高。局部放电脉冲电流激起的电磁波信号(即超高频信号)可以通过超高频传感器加以耦合接收,本文设计了超高频传感器,即平面阿基米德螺旋天线,带宽为500~1500MHz,它的两臂通过50Ω同轴电缆馈电,电磁波信号转变为同频率的高频电流信号,通过同轴电缆传输,最后进入工控机采集并分析。

天线接收的超高频信号频率很高,可达到上G,要采集此信号对采集卡要求太高,而且完整地采集如此高频的信号意义也不大,我们需要的是超高频信号的峰值特征,从而了解变压器内部局部放电的相对严重程度。本文设计了基于混频技术的信号调理单元,降低了超高频信号的频率,方便普通的采集卡采集,同时保留了原始的峰值相位的信息。

## 3. 会议论文 [王烈钧](#)、[刘兵](#)、[万林](#) [电力变压器局部放电测量](#) 2006

本文对电力变压器局部放电测量进行了探讨。文章介绍了电力变压器局部放电基本测试方法和回路,以及基于PRPDA的局部放电特征测量和局部放电定位等诊断方法,指出了局部放电测试对电力变压器出厂试验和现场监测具有特别重要的意义。

## 4. 会议论文 [赵晓辉](#)、[袁鹏](#)、[路秀丽](#)、[李彦明](#) [电力变压器局部放电超高频检测方法的应用](#) 2007

阐述了局部放电超高频检测技术的原理,简要介绍了局部放电超高频检测系统的组成,通过实测分析了检测系统的抗干扰性能,对变电站电力变压器进行了现场局部放电测量。对测量结果的分析表明,超高频方法较其它方法相比能有效避开电晕干扰,更易于发现设备绝缘系统早期绝缘缺陷,检测结果能准确反映设备绝缘状况,适用于电力变压器局部放电在线监测。

## 5. 学位论文 [孟庆新](#) [电力变压器局部放电在线监测系统及基于小波的消噪方法的研究](#) 2007

绝缘对电力变压器运行的可靠性有重大影响。由于绝缘的老化,电力变压器的绝缘故障将大大增加。长期以来,局部放电在线测量已被应用作为检测和诊断变压器绝缘状况的重要手段。在线检测变压器的局部放电信号,提出局部放电脉冲的统计特性,可进行故障诊断、确定放电程度和类型,提前给出预警,防止发生严重事故。但微弱的局部放电信号往往淹没在现场强烈的噪声干扰中,使得测量很难进行。如何有效地抑制干扰的影响,有效地提取局部放电信号是电力变压器在线监测中的热门课题。

近年来迅速发展的小波分析法,具有很强的时频局部化特性和信号特征提取能力,特别适用于局部放电这类脉冲信号处理。本文研究了局部放电在线监测的小波消噪的原理,提出了利用最优小波包和综合门限法消噪的方法。仿真结果表明该方法的有效性。

为了准确的检测出变压器局部放电产生的多路电流脉冲信号和超声波信号,本文设计了变压器局部放电在线监测系统。试验证明该系统具有较高的检测灵敏度,可为电力变压器的状态检修提供可信的依据。

上述研究工作的完成,对改善变压器局部放电在线监测系统的性能及小波分析技术的实用化起到积极的作用。

## 6. 会议论文 [许中荣](#)、[孙才新](#)、[唐炬](#)、[彭文雄](#) [大型电力变压器局部放电超高频检测法初探](#) 2004

本文从理论上对变压器局部放电超高频检测技术作了论述,对电力变压器中局部放电信号所激发电磁波的机理进行了深入研究,着重分析计算了超高频电磁波在变压器内部各种不同介质和不同导体界面的折、反射情况。建立的局部放电超高频检测系统的实验室研究模型,并用ANSYS电磁场仿真软件对局部放电在电力变压器内部传播特性进行了初探性的研究。

## 7. 期刊论文 [罗日成](#)、[李卫国](#)、[熊浩](#)、[邓本再](#) [电力变压器局部放电在线监测系统的研制](#) - 电网技术2004, 28(16)

研制了一套新型变压器局部放电在线监测系统,该系统基于电-声联合检测方法,检测出变压器局部放电产生的多路电流脉冲信号和超声波信号,在硬件上采用了光缆传输等抗干扰措施,有效抑制了监测现场的电磁干扰,在软件中采用离散二进小波变换算法滤除监测信号中的周期干扰以及电晕干扰,从而准确地区分内外放电脉冲;并基于等值声速原理,运用模糊理论和有限元数值分析方法对变压器局部放电点进行了定位。在现场运行的情况表明了该系统具有较高的检测灵敏度,可为电力变压器的状态检修提供可信的依据。

## 8. 学位论文 [刘云鹏](#) [电力变压器局部放电的电气定位及诊断](#) 2004

局部放电是造成变压器绝缘老化和破坏的主要原因之一,变压器局部放电检测和诊断的研究具有深远的理论意义和广泛的实用价值。本文基于多导体传输线理论建立了放电脉冲在变压器绕组中的传播模型,探索了变压器绕组中局部放电的电气定位方法,研究了局部放电检测的干扰抑制和放电模式的识别。主要工作如下:根据绕组的不同结构形式,首次建立了放电脉冲在400kV和500kV单相变压器高压绕组中传播的多导体传输线模型。提出了利用静电场计算方法求解绕组模型中的电容分布参数,克服了平行板电容计算方法中的导线错位问题和边角效应问题。在电容参数的基础上,求解了模型中的电感、电阻和电导分布参数。采用模电压、模电流变换实现了模型多导体传输线方程的通用性解耦,结合绕组的结构和首末端条件计算了绕组不同位置的传输函数,提出了测量变压器绕组传输特性的散射参数测量法,与脉冲响应测量法的测量结果比较表明,散射参数测量法具有测量精度高、抗干扰能力强等优点。通过对比变压器单绕组和400kV单相变压器绕组的仿真结果和散射参数实测结果,并采用相关分析法进行定量分析,同一放电位置的相关系数均超过0.81,验证了所建立的多导体传输线模型的正确性。分析了基于传输函数法的变压器绕组中局部放电定位的基本原理,采用仿真和实测两种方法获得了不同类型变压器绕组的分段电流传输函数。在此基础上,提出了两种电气定位方法:距离函数法和能比曲线法。距离函数法是首先通过仿真模型获得不同放电位置的绕组首末端电流传输函数比,然后求实测与仿真之间的距离函数,最后通过距离函数的大小判断放电位置。单绕组和400kV单相变压器定位试验验证了该方法。能比曲线法根据在100kHz~4MHz频率范围内,绕组两端信号能量比与放电点位置间的曲线关系进行定位,400kV和500kV单相变压器高压绕组的定位误差不超过其高度的6.25%。设计了一种形态学一小波综合滤波器,很好的抑制变压器局部放电检测的周期性干扰和白噪声干扰。其中设计的结构元素自适应的开、闭组合形态滤波器在频域有效地滤除了窄带周期性干扰的离散谱线,而对局部放电信号本身特征谱线影响较小,同时小波变换抑制了局部放电信号中的白噪声干扰。计算机仿真和现场检测结果验证了该方法的有效性,相应的噪声抑制比分别达到了85.21dB和37.66dB。基于数学形态学颗粒分析理论,定义了局部放电灰度图象的数学形态学。采用多尺度形态学运算分别提取了局部放电灰度图象正负半周期的数学形态特征谱线,并进行归一化处理,作为局部放电模式的特征向量。把不同类型放电形态谱输入双隐层人工神经网络分类器实现放电模式识别,6种典型放电的识别率均在72.5%以上。

## 9. 期刊论文 [律方成](#)、[刘云鹏](#)、[李燕青](#) [电力变压器局部放电检测与诊断方法评述](#) - 华北电力大学学报2003, 30(6)

介绍了电力变压器局部放电检测中的主要测量方法,阐述了局部放电检测过程中的电磁干扰抑制、局部放电定位和放电模式识别的研究现状。对目前存在的主要问题进行分析以及对未来的发展进行展望。

## 10. 期刊论文 [王国利](#)、[郝艳捧](#)、[李彦明](#) [电力变压器局部放电检测技术的现状和发展](#) - 电工电能新技术2001, 20(2)



本文概述了电力变压器局部放电检测技术的研究现状，着重论述了近几年发展起来的数字化测量和超高频(UHF)检测，并对电力变压器局部放电检测技术的发展前景作了探讨。

#### 引证文献(1条)

1. [黄望军](#). [陈意军](#) [单绕组变压器模型的局部放电定位分析及测试](#)[期刊论文]-[高电压技术](#) 2009(11)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_gdys200708017.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gdys200708017.aspx)

下载时间: 2010年5月31日