

用于电力变压器局部放电定位的超声波 相控阵传感器的研制

李继胜^{1,2}, 李军浩¹, 罗勇芬¹, 李彦明¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 陕西师范大学物理学及信息技术学院, 710062, 西安)

摘要: 针对电力变压器中局部放电的准确定位问题, 将超声波相控阵技术引入局部放电定位中. 基于超声波相控阵理论, 考虑在运行变压器中的应用环境, 在对传感器各个组成部分的材料及特性进行综合分析的基础上, 研制成功了 16×16 阵元的平面超声波相控阵传感器. 该传感器具有阵元数多、尺寸小、定位精度高及可适用于高温液体中的优点, 适合于放入变压器内部进行信号的接收, 传感器单个阵元中心频率为 150 kHz, 带宽为 100 kHz. 使用压电声源和油间隙放电等模拟实验对阵元的性能进行了实测, 结果表明, 该传感器能够对局部放电产生的超声波信号进行灵敏接收. 实验室中的模拟定位实验结果表明, 该传感器适用于对变压器中局部放电的定位.

关键词: 局部放电; 超声波; 相控阵; 局部放电定位

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)04-0093-07

Study of Phased-Ultrasonic Receiving-Planar Array Transducer for Partial Discharge Location in Power Transformer

LI Jisheng^{1,2}, LI Junhao¹, LUO Yongfen¹, LI Yanming¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. College of Physics & Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: to locate the partial discharge (PD) in power transformer, phased-ultrasonic receiving-planar array transducer technology is introduced. Considering the operation environment and material properties of transducer, a 16×16 phased-ultrasonic receiving-planar array transducer is developed, which is suitable for power transformer due to its smaller size and higher location ability, especially in high temperature insulation liquid. The center frequency and band with reach to 150 and 100 kHz, respectively. The piezoelectric source and oil interstitial discharge are examined to detect the transducer performance in lab. The experimental results show the perfect ultrasonic receiving characteristics.

Keywords: partial discharge; ultrasonic; array transducer; partial discharge location

局部放电是导致电力变压器绝缘劣化的重要原因, 也是绝缘监测的重要内容. 通过对变压器内部局部放电的准确定位, 可以为故障的排除和进一步的维修提供科学的指导和建议^[1-4].

局部放电时会产生电脉冲、电磁辐射、超声波、

光以及一些新的生成物, 并引起局部过热等物理和化学反应, 因而原理上这些现象若能检测, 都可以作为局部放电缺陷的指示^[5]. 已发展出来的变压器定位方法有电气定位、超声波定位、电磁波定位、光定位、热定位和油中溶解气体分析(DGA) 定位等. 对

局部放电定位法的分类可以归纳为多种方式. 根据被测变压器的工作状态, 可以分为工频或冲击电压下的局部放电定位法^[6]. 除外施电压外, 若局部放电还受到外界激励, 如受到 X 或 γ 射线照射的方法^[7-9], 这也是一种定位方法. 虽然发生局部放电的设备工作状态不同, 但目前对局部放电的检测和定位等处理, 都是在被动接收情况下进行的, 即仍然是根据局部放电辐射信号或信号变化来处理的. 所以, 虽然有各种形式的检测信号用来进行定位, 但电气法、超声波法和电气-超声波法仍是最基本的.

超声波相控阵技术最早应用在军事领域, 随着技术的发展, 在雷达、声纳和医学超声诊断等领域也得到了广泛应用. 与传统的单个传感器相比, 超声相控阵传感器具有灵活的波束控制、较高的信号增益、极强的干扰抑制能力及较高的空间分辨能力等优点, 利用相控阵技术对变压器内的局部放电定位, 可以做到定位准确, 并可对多个局部放电源进行定位. 超声波相控阵定位局部放电中的关键技术是传感器, 即超声波相控阵传感器. 传感器性能的好坏直接影响到信号的提取, 进而影响到局部放电定位的准确性. 本文使用相控阵理论分析了所研制的传感器的特性, 并在实验室中进行了实测, 为变压器局部放电的超声波相控阵定位奠定了基础.

1 超声波相控阵传感器的设计与分析

一般变压器局部放电超声波定位系统, 其压电传感器通常紧贴在油箱壁外, 而相控阵传感器对于阵面前信号的传播要求很严格, 即对相位有严格要求, 若放置在油箱外壁, 箱壁中通常包含纵波、剪切波、瑞利波和拉姆波等多种模式波, 且超声波在厚度规格不一的箱壁中的传播将导致定位的复杂度大大增加, 所以相控阵传感器放置在油箱内更合适. 对于油箱内置超声波传感器, 它的优势在于先检测到直达波, 避免了其他非直接路径信号的破坏, 而且不必再考虑箱壁这个波导产生的影响. 但是, 运行中的变压器, 如 E 级绝缘, 它的油温高达 120 $^{\circ}\text{C}$, 一般的压电材料此时的压电效应消失或变得很差, 因而伸入高温矿物油中的超声波传感器应采用特别设计的耐高温压电材料. 所以, 相控阵传感器也需要采用耐高温的压电材料, 并能在高温的变压器油中保持良好的压电性能.

已有的研究表明, 可接收到的变压器中局部放电辐射出的超声波频率约为 60~300 kHz, 超声波信号幅值为 0~80 dB, 而且低频带信号更丰富并具

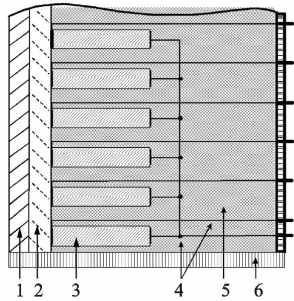
有较大的幅值. 超声波传感器的频带选择应避免磁致伸缩噪声和机械振动噪声, 研究显示局部放电辐射声信号的功率频谱的密集区约在 150 kHz^[10-11]. 许多变压器中局部放电的超声波检测的频率范围都选择在 70~150 kHz, 并且 IEEE 关于油浸变压器的局部放电声检测的试行标准中推荐的超声检测工作频带为 120~160 kHz. 对于相控阵传感器, 工作频率越高, 阵元数相同的传感器尺寸越小. 综合各种因素, 这里传感器的工作中心频率选择在 150 kHz, 带宽为 100 kHz.

超声波相控阵传感器有两种基本形式: 一种是线阵列, 所有阵元都排在一条直线上; 另一种是面阵列, 所有阵元排列在一个平面上. 直线阵不能改进传感器在垂直于阵直线的平面内的方向性, 即不能实现空间定位, 而平面阵则可实现在方向角和仰角两个方向上的同时扫描, 即可实现空间定位. 因此, 本文选择平面相控阵传感器.

超声波相控阵传感器采用平面阵, 其基本结构主要包括:

- (1) 压电晶体平面阵列;
- (2) 吸声背衬;
- (3) 声匹配层;
- (4) 其他如电极引线、外壳等.

上述 4 部分在传感器中起着各自的作用, 形成一个有机的整体. 超声波相控阵传感器的结构如图 1 所示.



1, 2: 匹配层; 3: 压电阵元; 4: 电极引线; 5: 背衬; 6: 封装

图 1 超声波相控阵传感器的结构图

传感器中的主要部件是压电晶体阵列, 压电晶体阵列是声电转换器件, 由压电材料如压电陶瓷、压电薄膜或复合压电材料等制成, 按设计要求排列成阵列. 对压电晶体的设计要考虑阵元自身的振动模式、几何形状和排列方式, 以得到预期的指向性等性能指标^[12-14].

吸声背衬是增加传感器探头带宽的一种结构.

由于局部放电辐射的声波为脉冲波,而脉冲波的频率覆盖范围非常广.为了不失真地接收脉冲声波,理论上要求传感器探头有无穷频带宽度,但这在实际是不可能也是不必要实现的,为了得到失真小的脉冲波,希望探头的频带越宽越好,这就需要在压电晶片后加上吸声背衬,使两者的声阻抗接近.背衬吸声的目的是为了使进入背衬中的声波不反射到压电晶体阵列上来,并减少阵元间的声耦合,然而这样会使得探头的接收灵敏度大大降低.可见,宽带和高灵敏度是一对矛盾,在设计探头时应根据具体情况综合考虑,寻找到一种适合具体探头要求的背衬结构.仅靠一种最佳背衬构成来解决这对矛盾是不可能的,还需要采用声匹配层来配合解决.

声匹配层是能提高接收灵敏度、同时也有益于增加带宽的一种结构.它的实质性作用在于大大增加探头与变压器油之间的透声效果.对于声匹配层材料的要求是声衰减小、声阻抗满足一定关系、厚度按具体要求选定.声匹配层可以是单层也可以是多层.虽然一般的相控阵超声波传感器都配有声透镜,这里传感器的设计不考虑加装声透镜.其原因在于本传感器是用来接收局部放电辐射的超声波信号,局部放电源距离传感器较远,而且主要是对局部放电源进行定位,若采用声透镜,则定位计算过程变得复杂,而且声透镜不能保证各个方向的聚焦一致.

2 相控超声波传感器的阵列结构设计

根据相控阵理论,传感器尺寸越大阵元数可布置得越多,角分辨率越高,不用经过超分辨率数据处理,所以对局部放电定位的精度就越准确^[15-20].对于变压器的内部结构,为了不影响其运行,对相控阵传感器的尺寸要求越小越好.另外,阵元间距越大,阵元的截面积就可选得更大,等效电容越大,对超声波信号的接收越灵敏,就可能产生栅瓣,这将导致定位错误.

所以定位精度与实际能安装的传感器尺寸、阵元数是有矛盾的,应对如何合理选择进行研究.经综合考虑,传感器阵列取 16×16 阵元的方阵.两个方向的阵列数一致,是为了保证传感器在两个方向的性能参数一致.相控平面阵及其坐标系示意图如图2所示.

这时在 xoz 平面且无偏转的定向准确度为

$$\Delta\theta = 14^\circ \frac{1}{N-1} \frac{N}{(N^2-1)^{1/2}} \quad (1)$$

当 $N=16$ 时,可计算出 $\Delta\theta=0.93^\circ$,则由分辨率引起

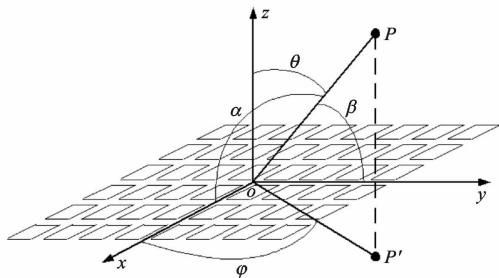


图2 相控平面阵及其坐标系示意图

的定位误差为 $\text{tg}\Delta\theta=1.6\%$,即若存在一个5 m距离外的放电,则定位点与实际放电有8 cm的距离,这在工程上是可接受的.另外,当 $N=20$ 时,可计算出 $\Delta\theta=0.7^\circ$,与 $N=16$ 时相差不大.

由于传感器置入油箱中,局部放电位置相对传感器平面的仰角 θ 近似达到 90° ,为保证波束在扫描范围内不出现栅瓣,阵元中心距应满足

$$\frac{d}{\lambda} \leq \frac{N-1}{2N} \quad (2)$$

式中: d 为阵列中的相邻阵元间隔中心距; λ 为波长,所以 d 取 0.5λ .在油中($\epsilon_r=2.2$)传播的150 kHz的超声波,其速度取1 500 m/s,阵元间隔0.5 λ 取为5 mm,因而压电阵列边长为8 cm,加上外壳封装,整个传感器边长不超过10 cm.该尺寸的传感器放置在变压器中对变压器的运行基本无影响.

3 超声波换能器的设计与分析

3.1 超声波换能器的结构设计

根据以上分析,超声波相控阵由 16×16 共256个阵元组成,每个阵元是独立的超声波换能器.阵元的设计包括合理选择阵元尺寸及压电材料.

为保证传感器在长度和宽度方向信号的一致性,取阵元的长度和宽度相等.阵元长度 L 的选择主要考虑以下几个方面:

- (1) $L < d$,即阵元长度要小于阵元间隔中心距;
- (2) 若要声耦合尽可能小, L 越小越好;
- (3) 从调制效果明显即抑制旁瓣效果好的角度考虑, L 越大越好;
- (4) 从灵敏度来考虑, L 越大越好,因为面积越大,等效电容值越大;
- (5) 从工艺上考虑, L 越大越好.

综合以上因素,选定阵元的长、宽均为4 mm.

超声波检测中换能器的频率是由压电晶体的厚度决定的.当某一交变电压加至压电材料上时,压电

晶体表面发出一个振动,并向与之接触的介质中辐射能量.辐射能量与边界处的特性有关.除非特性阻抗相等,否则在一般情况下,总有一部分能量被压电晶体表面反射回来,向压电晶体反方向传播.如果从压电晶体的前表面发出的振动,被反射后经压电晶体传至背表面时,它会和背表面产生的振动互相叠加.根据声波的叠加原理,只有当两个分振动同相时,其和振幅为最大,才能发射强的超声波.

若希望换能器两个表面都能自由振动,当晶体厚度正好等于半个波长时,产生谐振,即这两个振动在表面形成同相,应力相互加强,振动具有最大振幅.对应于半波长的频率称为换能器的基本谐振频率.如果某压电材料中纵波传播速度为 v ,材料的厚度为 h ,则 $f_0 h = v/2$,即某种压电材料的基频和厚度的乘积是一个常数,声学上称为频率常数.假如在换能器后表面粘上一块硬材料,其声阻抗率比换能器要高得多,那么可认为背表面是被夹住不动的,前面与声阻抗低得多的矿物油相接触,即前面几乎能自由振动,这种情况下为单面辐射,这时谐振发生的厚度 h 满足 $f_0 h = v/4$.

超声换能器选用的压电陶瓷为钛酸铅陶瓷(PbTiO_3),其频率常数在理论上为 $2.1 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$,但应以实际生产检定的参数为准.在压电陶瓷中,钛酸铅陶瓷的居里温度可达 400°C 以上,在常用压电陶瓷中仅次于偏铌酸铅,适于工作在 120°C 的变压器油中,且机电耦合系数 k_1 和 k_{33} 很小,用其作主轴方向振动的振子,易于得到近似的纯模,其压电常数 g_{33} 大,适于作接收换能器.

选取钛酸铅材料作为超声换能器,在两个表面都能自由振动且基频为 150 kHz 的情况下,厚度应选 14 mm ,在一个表面能自由振动时,厚度应选 7 mm .在本文的实际条件下,加有增加探头带宽的吸声背衬,其声阻抗中等,综合各种因素,换能器的厚度选为 12 mm .

3.2 背衬的设计

背衬的声阻抗越大,其频带越宽,接收灵敏度也会下降越多,因此背衬设计时要综合考虑换能器的接收灵敏度和频带宽度等性能指标.通过对超声波换能器进行理论计算可以得到其传递函数的频率特性,进一步可分析出背衬的声阻抗大小对压电换能器接收性能的影响.背衬吸声的目的是为了防止进入背衬中的声波反射回压电阵列和减少阵元间的声耦合,不过这样会导致发射效率和接收灵敏度大大降低.可见,带宽和高效率、高灵敏度是一对矛盾,因

而需要寻找适合探头要求的背衬结构.

目前,通常的背衬均采用钨粉和环氧树脂制作的复合材料,因为这种复合材料比较容易满足以下条件:

- (1)声阻抗适中,在保证传感器探头带宽的同时,还能满足一定的灵敏度;
- (2)声衰减大;
- (3)可减小阵元间的声耦合.

因而,本文也采用这种复合材料,但需要另外研究它的配比和构成.

(1)钨粉环氧树脂配比与声阻抗的关系.复合材料的密度为

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_2 - (\rho_2 - \rho_1)G} \quad (3)$$

式中: ρ_1 为环氧树脂的密度,取 1.1 g/cm^3 ; ρ_2 为钨粉的密度,取 18.7 g/cm^3 ;钨粉在复合材料中的比 $G = \rho_2 / \rho$.

复合材料的声速随着 G 的增加(在 $G < 80\%$ 时),纵波速度逐渐减小,当 $G > 80\%$ 时,纵波速度开始迅速回升.

(2)复合材料的声衰减.对复合材料的超声波传播特性的研究发现,复合材料的声衰减的原因是由其中的金属颗粒散射所引起的^[21].根据理论和实验曲线可知,声衰减常数 α 随着频率增加而增加,并趋于最大值,然后有下降的趋势.声衰减常数 α 随着 δ (钨粉在复合材料中的体积分数)增加先增加,然后趋于平坦,达到最大值后有下降的趋势.

取 $k_1 = 2\pi f / v_1$ 为声波在环氧树脂中的波束, a 为金属颗粒的半径.另外,在 $\delta = 5\%$ 和 $\delta = 15\%$ 时,铅粉环氧树脂复合材料声衰减的最大值约在 $k_1 a = [0.3, 0.5]$ 区域,且随 δ 从 5% 增加到 15% ,声衰减明显减小.

(3)背衬的设计.根据上面的结论,取 $k_1 a = 0.3$,所以选择钨粉颗粒半径为

$$a = \frac{k_1 a}{k_1} = 0.3 \times \frac{v_1}{2\pi f} \quad (4)$$

若选固化后的环氧树脂声速 $v_1 = 2150 \text{ m/s}$, $f = 150 \text{ kHz}$,则 $a = 680 \mu\text{m}$.

背衬的声阻抗、声速和声衰减,通过调节环氧树脂与钨粉的配比来改变.如果钨粉与环氧树脂的质量比过高,则在背衬制作过程中环氧树脂富余,即形成了没有钨粉的环氧树脂层,因而需要加入 PbTiO_3 粉末.在制作过程中,对钨/ PbTiO_3 复合粉末真空浇注环氧树脂,在制作完成的背衬中,钨、压电陶瓷、环

氧树脂的质量比约为 9 : 7 : 1, 声阻抗为 $17.3 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 声衰减系数约为 17 dB/cm.

3.3 匹配层的设计

增加背衬的声阻抗能展宽换能器的频带,但同时也会降低换能器的接收灵敏度,为了解决这个问题,可采用匹配层^[16,19,22-23].

设入射波为平面波,对于单匹配层,为了使透射系数最大,应满足

$$Z_1 = Z_0 Z_L \tag{5}$$

式中: Z_0 为 PbTiO_3 的声阻抗,其值为 $33.4 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; Z_L 为变压器油的声阻抗,其值为 $1.1 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; Z_1 为匹配层 1 的声阻抗.

对于双匹配层,同样可得透射系数最大时,声匹配层的阻抗值需要满足

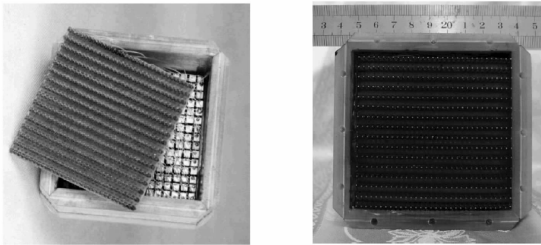
$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= Z_0^{\frac{3}{4}} Z_L^{\frac{1}{4}} \\ Z_2 &= Z_0^{\frac{1}{4}} Z_L^{\frac{3}{4}} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式中: Z_2 为匹配层 2 的声阻抗.

对于无声衰减的理想材料的声匹配层,匹配层数越多,匹配效果越好. 实际上声匹配层材料有衰减,最佳匹配的声阻抗材料不易得到,且层数增加,工艺难度加大. 系统要求的中心频率为 150 kHz,采用双匹配层即可达到带宽覆盖 100~200 kHz 的信号范围. 各匹配层的厚度均为 $0.25\lambda_s$.

硅橡胶材料作为第 1 匹配层,声阻抗为 $2.5 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,居里温度为 250 °C 以上. 石英单晶材料作为第 2 匹配层,声阻抗为 $13.8 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,居里温度为 576 °C.

研究制作的相控超声波接收阵传感器的半成品和成品如图 3 所示,超声波接收单元的频率响应特性如图 4 所示.



(a)传感器半成品 (b)传感器成品
图 3 相控接收阵传感器的半成品和成品照片

4 传感器的性能测试与分析

为了对制作的超声波相控阵阵元性能进行测试,采用两种放电源进行实验. 一种是压电发射源,通过自制的高压脉冲发生器输出幅值为 4.5 kV、脉

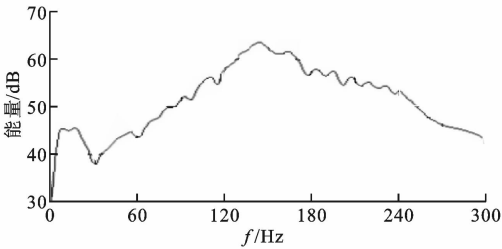
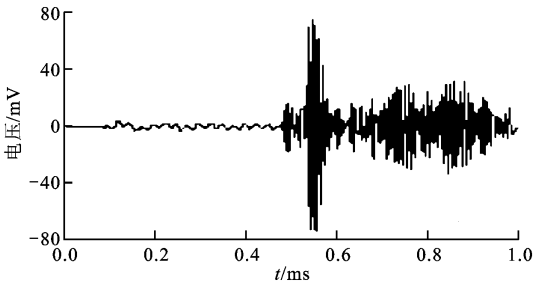


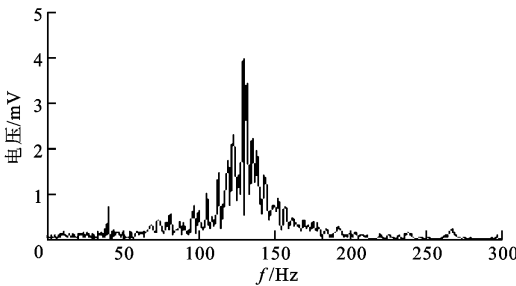
图 4 超声波接收单元频率响应特性

宽为 3 μs 的高压脉冲,用以驱动压电发射探头辐射出超声波信号;另一种是采用油纸绝缘中常见的油间隙模型,当对模型施加一定电压时,会产生局部放电,进而产生超声波信号.

采用相控阵中的(1,1)阵元作为接收传感器,高压脉冲下压电发射源辐射出的超声波信号见图 5.



(a)接收到的压电发射源时域信号

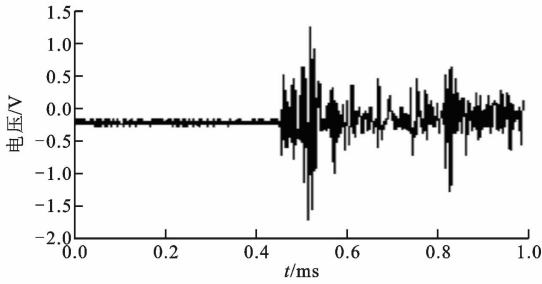


(b)接收到的压电发射源频域信号

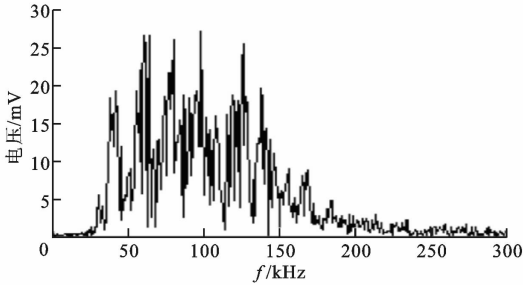
图 5 压电发射源超声波信号

从图 5 可看出,信号幅值并不大,单次加压产生的超声波信号单一且时延清晰. 通过对时域信号进行快速傅里叶分析变换到频域可以看出,超声波的频率主要分布在 90~135 kHz 范围内,最大幅值频率为 129 kHz. 油间隙模型下接收到的局部放电超声波信号如图 6 所示.

从图 6 可看出,油间隙一次放电的能量大,放电产生的超声波信号单一、时延清晰. 通过频域图可以看出,放电的频率主要分布在 30~140 kHz 范围



(a)油间隙放电的超声时域信号



(b)油间隙放电的超声频域信号

图 6 油间隙放电的超声波信号

内,最大幅度的频率为 97 kHz.

通过传感器单元的频率响应特性及实验可以看出,传感器的频带设计为 100~200 kHz,中心频率为 150 kHz,传感器的设计是合理的.使用该传感器进行了局部放电的定位实验,放电源为油间隙模型,尺寸为 1 m×1 m×1.2 m、充满矿物油的油箱模拟变压器箱体,定位结果如表 1 所示.

表 1 传感器定位结果

实验 序号	放电源实 际位置/cm	定位点 位置/cm	绝对误 差/cm	相对误 差/%
1	(14.9,1.1,63.7)	(15.9,1.1,64.6)	1.3	2.0
2	(-12.7,-5.4,63.3)	(-11.3,-5.2,63.9)	1.5	2.3

从表 1 可以看出,采用本文研制的传感器定位误差小于 3%,但由于采用的是空箱体,在实际变压器中的定位效果还有待于进一步研究.

5 结 论

(1)为了实施基于超声波相控接收原理的局部放电定位法,根据超声波相控阵的原理,研制了 16×16 阵元的平面超声波相控阵传感器.根据实际运

行条件及局部放电超声波的特性对传感器的结构及材料的选取进行了讨论,研制成功的传感器具有 150 kHz 的中心频率、100 kHz 的带宽.

(2)在实验室中,利用该传感器进行了放电信号的测量及分析,实测表明,传感器可以灵敏接收局部放电产生的超声波,其频带可满足将来在变压器中接收超声波的要求,可用于变压器中局部放电的定位.

参考文献:

[1] 李军浩,司文荣,杨景冈,等. 电力变压器局部放电特高频信号外部传播特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2008,42(6):718-722.

LI Junhao, SI Wenrong, YANG Jinggang. Propagation characteristic of partial discharge ultra high frequency signals outside transformer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(6):718-722.

[2] 李军浩,司文荣,李彦明. 油/纸绝缘沿面局部放电特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2009,43(6):108-112.

LI Junhao, SI Wernrong, LI Yanming. Partial discharge characteristics over oil/paper interface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009,43(6):108-112.

[3] 孙振权,赵学风,李彦明. 雷电冲击电压下油纸绝缘气隙模型的局部放电测量与分析[J]. 西安交通大学学报, 2009,43(2):75-80.

SUN Zhenquan, ZHAO Xuefeng, LI Yanming. Partial discharge measurement and analysis of gap in oil-paper insulation model under lightning impulse voltage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009,43(2):75-80.

[4] FUHR J, HAESSING M, BOSS P, et al. Detection and location of internal defects in the insulation of power transformers[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(6):1057-1067.

[5] 司文荣,李军浩,李彦明. 局部放电脉冲群的实用快速分类技术及应用[J]. 西安交通大学学报, 2008,42(8):1021-1025.

SI Wenrong, LI Junhao, LI Yanming. Fast and practical grouping technique for partial discharge pulse sequence and its application [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(8):1021-1025.

[6] 孙志培. 变压器局部放电采用操作波电压超声法定位[J]. 高电压技术,1986,40(2):19-22.

SUN Zhipei. Location of the partial discharge for transformers using ultrasonic method under switching

- surges[J]. High Voltage Engineering, 1986,40(2):19-22.
- [7] KREUGER F H. Discharge detection in high voltage equipment [M]. London, UK: A Heywood Book, 1964: 1-10.
- [8] 赵卫东,郭琳,何敏,等. 基于准直的 X 射线进行油间隙受激放电的定位[J]. 高压电器,2006,36(6):19-22. ZHAO Weidong, GUO Lin, HE Min, et al. Location of excited discharge in oil based on vertical X-ray [J]. High Voltage Apparatus, 2006,36(6):19-22.
- [9] 黄兴泉,郭琳,李成榕,等. 基于 X 射线激励下的局部放电定位[J]. 华北电力大学学报,1999,26(4):1-5. HUANG Xingquan, GUO Lin, LI Chengrong, et al. Location of partial discharge by X-ray irradiation [J]. Journal of North China Electric Power University, 1999,26(4):1-5.
- [10] LUNDGAARD L E. Partial discharge: XIV Acoustic partial discharge detection: practical application [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(5):34-43.
- [11] HOWELLS E, NORTON E T. Detection of partial discharges in transformers using acoustic emission techniques [J]. IEEE Trans Power Appar & Syst, 1978, 97(5):1538-1549.
- [12] 冯若. 超声手册[M]. 南京:南京大学出版社,1999:29-45.
- [13] ZIOMEK L J. Fundamental of acoustic field theory and space-time signal processing [M]. Boca Raton, USA: CRC Press Inc. , 1995:10-20.
- [14] TURNBULL D H, FOSTER F S. Fabrication and characterization of transducer elements in two-dimensional arrays for medical ultrasound imaging[J]. IEEE Trans Ultrason, Ferroelect, Freq Contr, 1992,39(3): 464-475.
- [15] LAKESTANI F, BABOUX J C, FLEISCHMANN P. Broadening the bandwidth of piezoelectric transducers by means of transmission lines[J]. Ultrasonics, 1975, 13(2):176-180.
- [16] GOLL J H. The design of broad-band fluid loaded ultrasonic transducers[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1979, 26(6): 385-393.
- [17] SILK M G. Ultrasonic transducers for nondestructive testing[M]. Bristol, UK: Adam Hilger Ltd. , 1984: 124-189.
- [18] KINO G S, DESILETS C S. Design of slotted transducer arrays with matched backings [J]. Ultrasonic Imaging, 1979, 1(2): 189-209.
- [19] SAYERS C M, SMITH R L. Ultrasonic velocity and attenuation in an epoxy matrix containing lead inclusions[J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1983, 16(7): 1189-1194.
- [20] VON RAMM O T, SIMTH S W. Beam steering with linear arrays [J]. IEEE Transactions on Biomedicine Engineering, 1983, 30(8):438-452.
- [21] KAVEN H E. A phased array acoustic imaging system for medical use [J]. Acoustical Imaging, 1980,10(1): 47-63.
- [22] LAWRENCE C L. Ultrasonic impedance matching from solids to gases[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1966, 12(1):37-48.
- [23] DESILETS C S, FRASER J D, KINO G S. The design of efficient broad-band piezoelectric transducers [J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1978, 25(3):115-125.

(编辑 杜秀杰)