

基于超声合成孔径弧形扫描联合算法的 变压器绕组故障检测方法

周楠¹, 王昕¹, 杨海龙²

(1.上海交通大学电工与电子技术中心, 上海 200240; 2.国网四川省电力公司广元供电公司, 四川 广元 628033)

摘要:为解决变压器绕组超声检测系统的分辨率会随检测距离的增加而降低的问题, 提出超声合成孔径弧形扫描联合算法, 使检测系统的分辨率不再随检测深度的提高而降低, 仅与换能器本身相关, 并且实现了故障快速定位, 提高了检测效率与检测精度。最后, 设计变压器绕组超声合成孔径检测系统, 采用 400 kHz 超声换能器对实体变压器进行实验, 最终实验结果表明, 该检测系统能在线、快速定位变压器绕组变形故障, 并且检测结果的相对误差仅为 4.26%。

关键词:变压器绕组; 超声合成孔径聚焦技术; 弧形扫描联合算法; 故障快速定位; 在线检测

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.022 中图分类号: TM403.2 文章编号: 1673-9140(2022)05-0198-09

Fault detection method of transformer winding based on combined algorithm of ultrasonic synthetic aperture arc scanning

ZHOU Nan¹, WANG Xin¹, YANG Hailong¹

(1.Center of Electrical & Electronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2.Guangyuan Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Guangyuan 628033, China)

Abstract: In order to solve the problem that the resolution of the transformer windings ultrasonic detection system decreases with the increasing detection distance, this paper proposes a combined algorithm of ultrasonic synthetic aperture arc scanning, so that the resolution of the detection system is only related to the transducer itself. By applying the proposed method, faults can be quickly located, thus detection efficiency and detection accuracy are improved. Finally, a transformer winding ultrasonic synthetic aperture detection system is designed in this paper, and a 400 kHz ultrasonic transducer is used to conduct experiments on a transformer. The final experimental results show that the detection system can locate the deformation position of the transformer winding quickly online. The relative error of the detection is only 4.26%.

Key words: transformer winding; ultrasonic synthetic aperture focusing technology; arc scanning joint algorithm; fast fault location; online detection

变压器作为输电线路之间的重要枢纽,承担着电能传输和分配的责任,当变压器发生故障时,整个电力系统的安全稳定性将会受到威胁,严重时将会造成大范围停电事故^[1-2]。变压器发生故障的原因有很多,例如地震与人为搬运等外部冲击会导致变压器绕组产生机械形变^[3],短路电流所产生的电动力会导致变压器绝缘层破裂、绕组变形等故障^[4]。根据统计,在因变压器故障所导致的电力事故中,绕组变形是占比最高的故障^[5]。

目前,检测变压器绕组变形故障的方法有很多,投入工程应用最多的方法是短路阻抗法^[6]、频率响应法^[7]、扫频阻抗法^[8]和振动法^[9]。近年来,大多数研究者基于以上方法进行了深入的研究,文献^[10]提出了使用短路阻抗与 $\Delta U-I_1$ 轨迹法联合分析绕组变形情况的方法,可以准确识别变压器的绕组故障,但是此方法无法检测绕组的微小变形;文献^[11]基于扫频阻抗与优化支持向量机的方法,对变压器绕组的 3 种典型微小变形进行了诊断,但是检测方式为离线检测,实际工程更需要一种可以对变压器进行在线检测的方法;文献^[12]结合短路电抗法和振动法,提取变压器的电气特征和机械特征,综合 2 种数据综合实现了对变压器绕组的在线检测,但是此方法难以直观地检测到变压器绕组的变形情况;文献^[13]使用无损检测领域的超声检测方法对变压器绕组的机械特性进行检测,可以实现在线、定量、直观检测变压器绕组微小变形,但是检测效率低下,检测大型变压器时,由于绕组距变压器外壳距离较远时,导致检测系统分辨率下降,检测方法失效。本文为解决超声检测系统因分辨率受限无法检测大型变压器、检测效率低下的问题,将超声合成孔径聚焦技术(synthetic aperture focusing technique, SAFT)应用于变压器绕组变形检测,实现在线、快速定位变压器绕组变形故障,并以直观、高精度的方式呈现绕组变形情况。

合成孔径聚焦技术来源于雷达领域,1970 年后逐渐应用于超声无损检测与医学成像领域,国内外学者为了提高 SAFT 的检测精度和速度,做出了大量的研究^[14-15]。文献^[16]使用 2 种相干系数对采集数据进行加权叠加,提高了 SAFT 的检测精度,

但是由于储存了大量的回波数据,检测效率很低。文献^[17]提出一种基于 PCA-WHMM 的超声合成孔径频域算法,减少了内存的消耗,提高了算法运算时间,但是目前还没有一种能够同时提高检测效率和检测精度的方法。

本文将超声合成孔径聚焦技术应用于变压器绕组变形检测领域,首先提出单换能器弧形扫描算法,以画弧的方式采集数据;然后现绕组变形故障快速定位,再联合超声单点检测方法针对故障处进行高精度检测,提高故障处检测精度;最后开发出一套变压器绕组检测系统,对实体变压器进行实验,证明该系统可以实现对变压器绕组变形的在线检测、故障快速定位、故障处高精度检测。

1 变压器绕组超声合成孔径技术

1.1 超声波信号在变压器中的传播路径

超声检测技术可以在不影响变压器内部结构、不受变压器电磁干扰、不影响变压器正常工作情况下带电检测变压器。本文从超声信号的声场分布和超声信号在变压器中的传播路径分析变压器绕组超声检测技术。

由于超声信号在变压器外壳钢板内传播速度较快,对比于超声信号的传播时间,可以忽略外壳的厚度。由于芯式绕组缠绕为圆柱体,所以在避开加强筋和散热片后,超声信号在油浸芯式变压器中传播的横截面简化模型如图 1 所示。

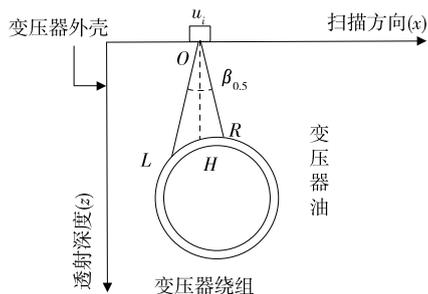


图 1 超声信号的声场分布

Figure 1 Sound field distribution of ultrasound signal

图 1 中,超声信号在垂直方向 OH 上的声场强度最大,沿两侧方向声场强度逐渐衰减,在 OL 与 OR 方向处,声场强度衰减为最大声场强度的一半,因此,定义 OL 与 OR 之间的夹角 $\beta_{0.5}$ 为换能器在此

介质下的半功率角,区域 OLR 为声场覆盖区域。半功率角的大小只与换能器自身和介质有关,计算公式如下:

$$\beta_{0.5} = \frac{0.84\lambda}{s} \quad (1)$$

式中 d 为圆形换能器的直径; λ 为超声信号在介质中传播的波长。

由于绕组材质的声阻抗为 $Z_1 = 4.6 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 变压器油的声阻抗为 $Z_2 = 1.28 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 当变压器油中的超声信号遇到变压器绕组时,信号在变压器绕组表面会发生爆炸反射现象,即反射点会作为新的声源点发射回波,部分回波信号沿原路反射,如图 2 所示,实线为发射信号路径,虚线为部分回波信号爆炸反射返回路径。

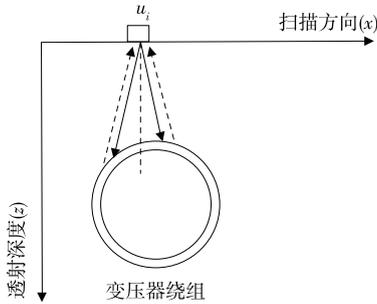


图 2 信号在变压器中的传播路径

Figure 2 Propagation path of signal in transformer

综上所述,变压器绕组超声检测技术的过程:首先在变压器外壳表面涂抹甘油耦合剂,使换能器发射的超声波信号以最低的能量损失透射变压器外壳进入变压器内部;当超声信号遇到变压器绕组时会发生爆炸反射现象,部分信号沿原路返回;超声回波信号透射变压器外壳后被换能器接收,对回波首先进行处理与采集,根据回波信号的幅值、相位差和超声传播时间即可判断变压器绕组是否发生了变形故障。

超声检测系统在检测深度为 z 处,同一水平方向上能分辨 2 个数据点的最小距离为

$$\rho = \beta_{0.5} \cdot z = 0.84 \frac{\lambda}{d} \cdot z \quad (2)$$

检测系统的分辨率即为 $1/\rho$,所以变压器绕组超声检测技术的缺点是检测系统的分辨率会随着检测深度的提高而降低,特别是大型变压器绕组距

油箱箱壁之间的距离较远,此时若绕组形变的程度大于检测系统的分辨率,超声检测方法将失效。

本文提出超声合成孔径聚焦技术,通过使用较小直径换能器声场覆盖范围的扩大,模拟放大检测系统的孔径,解决上述问题。

1.2 超声合成孔径聚焦原理

SAFT 分为数据的采集和重构 2 个过程。SAFT 原理如图 3 所示, u_0, u_1, \dots, u_{L-1} 为换能器每次移动到的位置编号, z 为超声信号传播的深度,换能器沿着 x 方向每移动一次,向 z 深度方向发射一次信号。

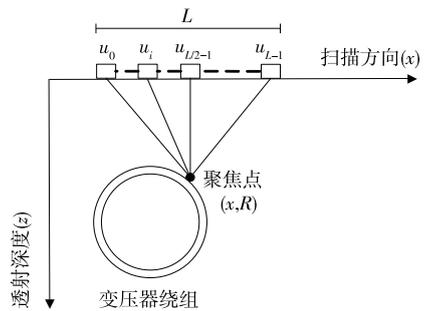


图 3 SAFT 原理

Figure 3 Principle of SAFT

设聚焦点的坐标为 (x, R) , R 为聚焦点的深度,扫描位置 u_i 至聚焦点之间的距离为

$$r_i = \sqrt{R^2 + (x - u_i)^2} \quad (3)$$

从 u_i 位置的换能器发射超声信号至超声信号经绕组反射回到 u_i 位置处被换能器接收,超声信号的传播时间为

$$t_i = \frac{2}{c} r_i \quad (4)$$

$$\tau_i' = \frac{2}{c} (r_i - R) \quad (5)$$

其中, τ_i 为 u_i 位置换能器所对应的延时时间, $i = 0, 1, \dots, L-1$ 。

设在 u_i 位置接收到的超声回波信号数据为 $s(u_i, t)$,将每个位置换能器接收的回波信号数据根据对应的延时时间进行叠加,最终得到聚焦点处的检测数据为

$$s(x, R) = \sum_{i=0}^{L-1} \frac{\omega_n \delta(t - \tau_i) s(u_i, t - 2R/c)}{r_i} \quad (6)$$

式中 $\delta(t - \tau_i)$ 为时延冲激函数; ω_n 为回波信号幅值

变迹函数。式(6)即为 SAFT 的数学模型。

1.3 超声合成孔径系统的分辨率

合成孔径长度与半功率角的关系如图 4 所示。在扫描位置 u_0 处, P 点开始进入声场覆盖区域, 在扫描位置 u_{L-1} 处, P 点离开声场覆盖区域, 在此孔径 L 之外, 换能器扫描不到 P 点。合成孔径的长度为

$$L = \beta_{0.5} z = 0.84 \frac{\lambda}{d} \cdot z \quad (7)$$

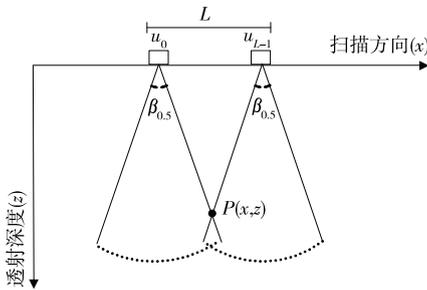


图 4 合成孔径长度与半功率角的关系

Figure 4 The relationship between synthetic aperture length and half power angle

由换能器在位置 u_0, u_1, \dots, u_{L-1} 组成的超声合成孔径阵列的半功率角为

$$\beta'_{0.5} = 0.84 \frac{\lambda}{2L} = 0.42 \frac{\lambda}{L} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8), 有

$$\beta'_{0.5} = \frac{d}{2z} \quad (9)$$

此时超声合成孔径的分辨率为

$$\varphi = 1/(\beta'_{0.5} \cdot z) = \frac{2}{d} \quad (10)$$

根据式(10)可知, 对比于超声检测技术, 超声合成孔径技术使得分辨率仅与换能器本身有关, 不再受检测深度的影响。因此, 即使对大型变压器进行检测时, 也能解决绕组距变压器外壳距离远导致分辨率降低的问题。

综上所述, 变压器绕组超声合成孔径检测方法的计算过程如图 5 所示。由于使用 SAFT 算法进行检测时, 首先需要根据已知聚集点计算时间延迟 t_i , 再根据 t_i 采集数据, 所以每放置一次换能器仅采集一个聚焦点的数, 导致检测效率低下。

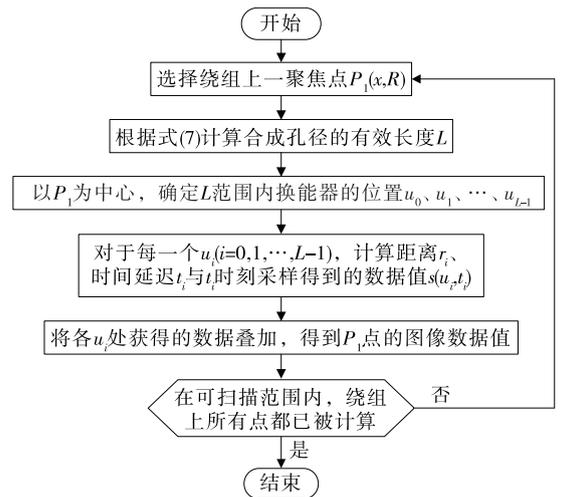


图 5 SAFT 算法检测绕组流程

Figure 5 Winding detection process of SAFT algorithm

2 弧形扫描联合算法

2.1 单换能器弧形扫描算法

为解决 SAFT 检测效率较低的问题, 采用单换能器弧形扫描算法提高检测效率。实际上, 在使用 SAFT 算法聚焦某个点时, 换能器在每个扫描位置 u_0, u_1, \dots, u_{L-1} 处所采集到的数据不仅仅作用于此聚焦点, 还作用于同一弧形上所有点, 如图 6 所示。

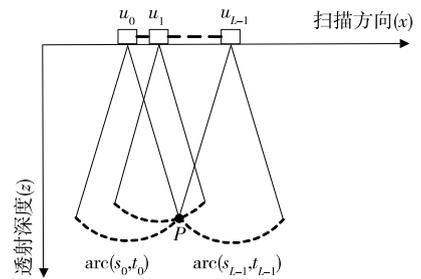


图 6 单换能器弧形扫描算法

Figure 6 Arc scanning algorithm of single transducer

图 6 中弧线 $\text{arc}(s_0, t_0)$ 上的每个点距扫描位置 u_0 之间的距离 r_0 相同, t_0 也相同, 所以弧线上每一点的数据值均相等, 即

$$S[\text{arc}(s_i, t_i)] = \omega_i s_i(t_i) / r_i \quad (11)$$

因此, 在 u_0, u_1, \dots, u_{L-1} 位置针对聚焦点 P 采集到的数据 $s_0(t_0), s_1(t_1), \dots, s_{L-1}(t_{L-1})$ 不仅作用于 P 点, 这些数据同时作用于弧形 $\text{arc}(s_0, t_0), \text{arc}(s_1, t_1), \dots, \text{arc}(s_{L-1}, t_{L-1})$ 上所有点。正向理解采样过程, 采样到的数据 $s_i(t_i)$ 可以认为换能器 u_i

在半功率角范围内以半径 r_i 画了一段圆弧,圆弧上的数据均为 $S[\text{arc}(s_i, t_i)]$,所以采集一次即可获得整段换能器圆弧范围上所有点的数据。

单换能器扫描算法的检测流程如下:在扫描方向上依次放置换能器,随着换能器发射出超声声场的半径 r_i 从零变大,多次采集数据。当采集到高电平数据时,说明此时刻对应的弧线存在被检测物体,采集此数据,根据式(11)计算弧线上所有点的数据;当采集不到高电平数据时,说明此换能器位置已经扫描完毕。然后沿扫描方向移动换能器依次进行以上操作,直至遍历扫描范围,弧形扫描操作如图7所示。换能器在弧线与变压器绕组相切的时刻开始采集数据画弧,随着半径 r_i 逐渐增大,弧线开始向下扫描,最终在位置 u_i 处换能器可以扫描到变压器绕组上圆弧 $\text{arc}(LAR)$ 上所有点。

因此,单换能器弧形扫描算法可以实现放置一次换能器即可得到绕组上一段圆弧上所有数据点,实现故障快速定位。

单换能器弧形扫描算法的关键在于画弧操作,经数据采样可以直接确定换能器垂直方向上点的坐标 $P_1(u_i, r_i)$,本文使用中点画圆法根据 P_1 的坐标判断下一坐标点的位置,中点画圆法如图8所示。

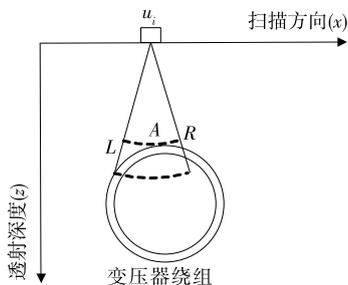


图7 弧形扫描操作示意

Figure 7 Schematic diagram of arc scanning operation

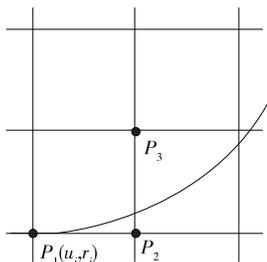


图8 中点画圆法

Figure 8 Midpoint circle

图8中弧线可以用圆的方程来表示,构造方程为

$$F_i(x, y) = (x - u_i)^2 + z^2 - r_i^2 \quad (12)$$

构造判别式为

$$\Delta = F_i(u_i + 1, r_i - 0.5) \quad (13)$$

当 $\Delta > 0$ 时,下个点取为 $P_3(u_i + 1, r_i - 1)$,判别式修改为

$$\Delta' = F_i(u_i + 2r_i - 1.5) \quad (14)$$

当 $\Delta \leq 0$ 时,下个点取为 $P_2(u_i + 1, r_i)$,判别式修改为

$$\Delta' = F_i(u_i + 2, r_i = 0.5) \quad (15)$$

考虑到圆弧的对称性,仅需画四分之一圆弧即可得到整段圆弧,为保证所取的点 $P_i(x, y)$ 在换能器半功率角范围内,算法的约束条件为

$$x \leq y \tan\left(\frac{\beta_{0.5}}{2}\right) \quad (16)$$

单换能器弧形扫描算法通过画弧扫描的方法实现了对变压器绕组故障的快速定位,提高了SAFT的检测效率。

2.2 超声单点检测法

虽然弧形扫描算法提高了数据量,实现了故障的快速定位,提高了检测效率,但是这些数据是由式(12)~(16)计算得来,与真实的测量数据之间存在误差,所以弧形扫描算法的检测精度较低。为提高故障处的检测精度,在使用单换能器弧形扫描算法进行故障定位后,针对故障处联合使用超声单点检测方法采集补充故障处的数据,提高故障处的检测精度,单点检测法原理如图9所示。

由于超声声场在垂直方向上声场强度最大,所以为了提高检测精度,针对故障区域进行超声垂直

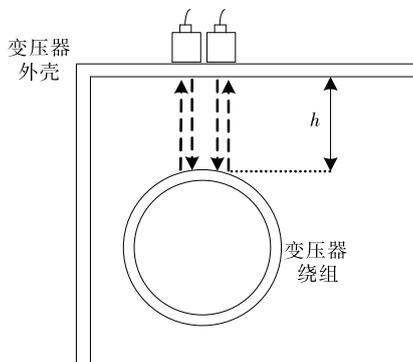


图9 超声单点检测原理

Figure 9 Principle of ultrasonic single point detection

方向检测,采集垂直方向上一个点的数据。超声单点检测可计算出变压器绕组距变压器外壳之间的距离,即

$$h = \frac{c(t_1 + t_2)}{2} \quad (17)$$

式中 c 为超声波信号在变压器油中传播的速度; t_1 为超声波信号在变压器外壳中的传播时间; t_2 为超声波信号在变压器油中的传播时间,一般情况下 t_2 可以忽略不计,式(17)可为本文检测系统提高检测精度。

综上所述,本文提出了单换能器弧形扫描联合算法,实现了故障快速定位,故障处高精度检测,提高了 SAFT 的检测效率。

3 实验与分析

3.1 检测系统的设计

本文设计的基于超声合成孔径弧形扫描联合算法的变压器绕组检测系统如图 10 所示。

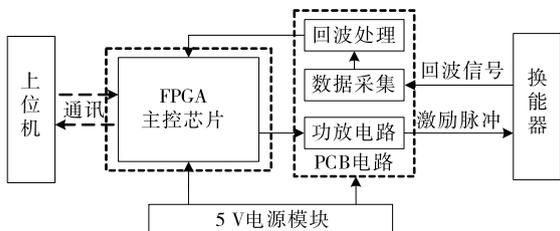


图 10 变压器绕组超声检测系统

Figure 10 Transformer winding ultrasonic detection system

在检测系统中,上位机与 FPGA 芯片 USB 连接达成通讯,控制 FPGA 发射 3.3 V 的脉冲信号;为了穿透变压器外壳钢板,使用功率放大电路将脉冲信号的幅值提高至 200 V;信号调理电路对接收到的回波信号进行卷积滤波、包络处理、对数放大等操作后送至数据采集模块进行采样,采样频率为 $f_c = 20$ MHz。在 FPGA 中写入合成孔径弧形扫描算法,对采集到的数据进行画弧操作,再将计算结果导入上位机呈现。

3.2 实验与分析

根据所设计的检测系统,对型号为 S11-M(R)-30/10 kV 三相油浸式电力变压器进行在线检测实验,如图 11 所示。实验变压器绕组是一个直径为 230 mm、高为 340 mm 的圆柱体,绕组变形凸起处如

图 11(d)所示,凸起 6.8 mm,变形处距顶部 12 cm。

在选择换能器时,换能器的中心频率越高,信号透射、传播损耗越严重;换能器的中心频率越低,脉冲激励时间长,检测盲区较大,影响检测结果的准确性。综合考虑采用中心频率为 400 kHz 的水声收发一体式换能器(DYW-400-E),换能器的半功率角为 u_0 ,直径为 43 mm。为保证发射信号与回波信号幅值最大,使用 20 周期连续脉冲作为激励信号。

换能器安置策略如图 12 所示。沿着扫描方向按照顺序依次从 u_0 至 u_6 移动 5 次,如图 12(a)所示。然后检测绕组另一边,将换能器安置在距离坐标点 252 mm 处,同样从位置 u_6 到 u_{11} 移动 5 次,如图 12(b)所示。这样在二维平面上共放置 12 次换能器即可得到变压器绕组 3/4 面积上的绕组数据。

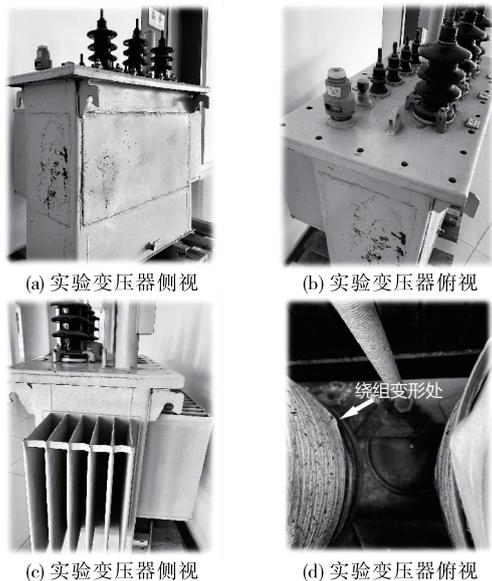


图 11 实验变压器

Figure 11 Experimental transformer

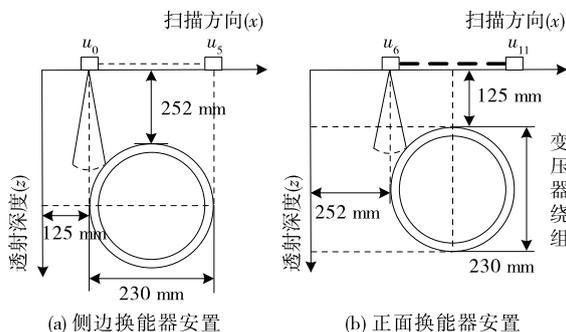


图 12 换能器安置策略

Figure 12 Transducer placement strategy

回波信号调理过程中波形的变换如图 13 所示。图 13(a)为超声波换能器在 u_0 位置接收到的回波,首先对回波信号进行卷积滤波,目的是过滤掉换能器的起振噪声以及变压器运行过程中所产生的噪声;再对波形进行希尔伯特变换提取包络信号,信号的幅值全部变为正值,防止信号正负幅值叠加抵消。

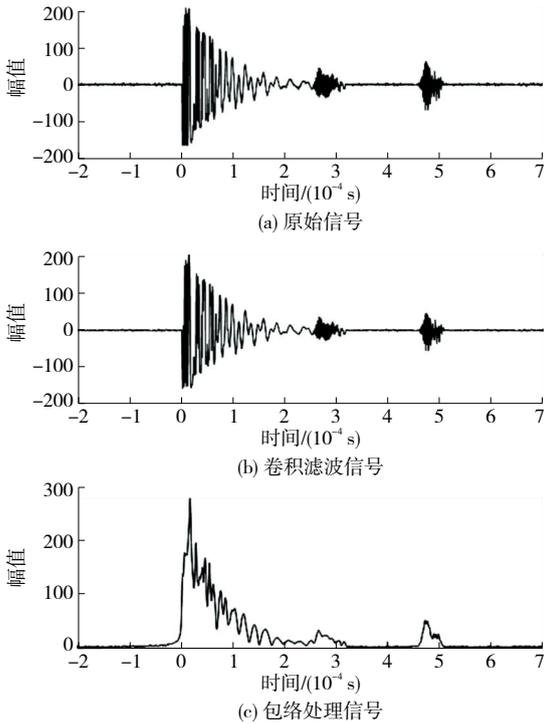


图 13 回波信号波形的变换

Figure 13 Transformation of echo signal waveform

将单换能器弧形扫描算法画弧数据传输到上位机进行图像叠加,在上位机呈现的检测结果如图 14 所示。由于换能器在 u_0, u_1, u_2 与 u_6, u_7, u_8 位置处重复扫描变压器绕组,所以绕组有 $1/4$ 的弧长(图 14 弧 arc(AC)区域)被扫描 2 次,所以在弧 arc(AC)区域图像的数据点要多于其他区域。经过单换能器弧形扫描算法,能够快速定位到变压器绕组的故障位置,但是检测到变形凸起程度为 5 mm,检测精度较低。

联合超声单点法针对故障区域进行检测,提高了检测精度,实验结果如图 15 所示。检测到的绕组缺陷更加明显,变形凸起程度为 6.51 mm,误差为 0.29 mm,误差占比为 4.26%。

经过实验分析,得到检测结果如表 1 所示。由表 1 可知,本文提出的单换能器弧形扫描算法可以

实现绕组故障快速定位,但是检测精度不高。联合超声单点检测方法后,实现故障处高精度检测。

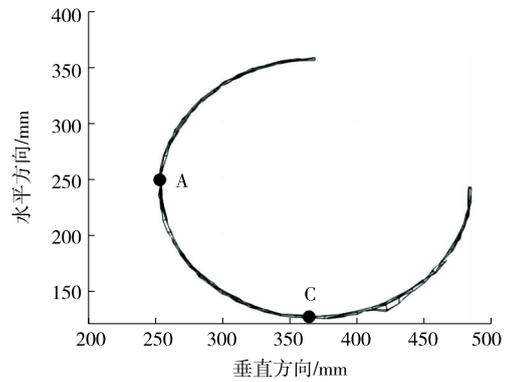
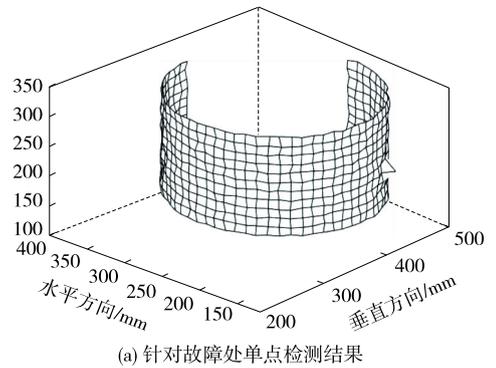
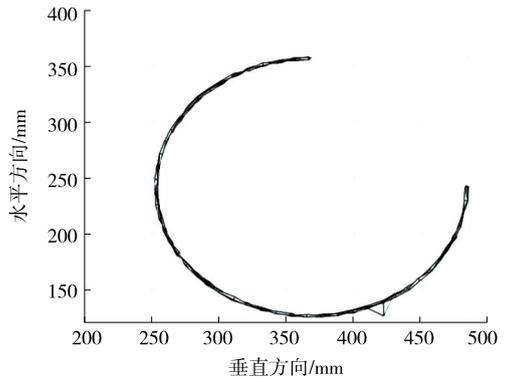


图 14 单换能器弧形扫描检测结果俯视图

Figure 14 Top view of single transducer arc scanning detection result



(a) 针对故障处单点检测结果



(b) 针对故障处单点检测结果俯视图

图 15 针对故障处单点检测结果

Figure 15 Single point detection results for fault location

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

检测方法	实际距离/mm	测量结果/mm	相对误差/%	检测结论
单换能器弧形扫描算法	6.80	5.00	26.47	故障快速定位
联合单换能器弧形扫描算法与超声单点检测	6.80	6.51	4.26	故障快速定位、高精度检测

4 结语

1) 本文将超声合成孔径聚焦技术引入到变压器绕组检测领域,通过换能器的移动扩大了声场覆盖范围,使超声检测系统的分辨率不再随着检测深度的提高而降低,仅与换能器的直径相关。

2) 本文提出了单换能器弧形扫描算法,使用中点画圆法以画弧的方式采集数据,实现放置一次换能器即可采集到绕组圆弧上所有点的数据,减少了换能器的放置次数,实现了故障快速定位,提高了超声合成孔径技术的检测效率。在对故障进行定位后,联合超声单点检测法针对故障区域进行检测,增加了故障点的数据量,提高了检测精度。

3) 本文开发了基于合成孔径弧形扫描联合算法的变压器绕组超声检测系统,采用 400 kHz 频率的换能器对油浸式变压器进行实验。首先根据变压器图纸制定换能器放置策略,然后对采集到的数据进行卷积滤波、包络处理,最终检测结果的相对误差仅为 4.26%,并且系统能以图像的方式,直观、定量地呈现变压器绕组的状态。

参考文献:

- [1] 张仕民,丰遥.基于振动信号的变压器铁心与绕组故障区分方法[J].电测与仪表,2021,58(6):161-166.
ZHANG Shimin, FENG Yao. Discrimination method of transformer core and winding fault based on vibration-signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6), 161-166.
- [2] 李典阳,张育杰,王善渊,等.基于多预测模型融合的电力变压器安全预判[J].中国电力,2020,53(1):72-80.
LI Dianyong, ZHANG Yujie, WANG Shanyuan, et al. Safety prejudging method for power transformer based on multi-prediction model fusion[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 72-80.
- [3] 张羲海,张葛祥,王健,等.计及继电保护与油气信息的变压器故障推理[J].高压电器,2020,56(9):136-143.
ZHANG Xihai, ZHANG Gexiang, WANG Jian, et al. Transformer fault reasoning under relay protection and gas dissolved in oil information[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 136-143.
- [4] 肖超,韩伟,李琼林,等.柔性直流输电系统交流侧线路

- 继电保护适应性研究[J].智慧电力,2020,48(4):8.
XIAO Chao, HAN Wei, LI Qionglin, et al. Adaptability of MMC-HVDC system on relay protection of AC transmission lines[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 1-8.
- [5] 方涛,钱晔,郭灿杰,等.基于天牛须搜索优化支持向量机的变压器故障诊断研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(20):90-96.
FANG Tao, QIAN Ye, GUO Canjie, et al. Research on transformer fault diagnosis based on a beetle antennae search optimized support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 90-96.
- [6] 陈一鸣,梁军,张静伟,等.基于改进参数辨识的三绕组变压器绕组状态在线监测方法[J].高电压技术,2019,45(5):1567-1575.
CHEN Yiming, LIANG Jun, ZHANG Jingwei, et al. Method of online status monitoring for windings of three-winding transformer based on improved parameter identification[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(5): 1567-1575.
- [7] 李成祥,夏麒,朱天宇,等.基于脉冲频率响应法的变压器绕组变形带电检测仪[J].电力自动化设备,2018,38(1):110-115.
LI Chengxiang, XIA Qi, ZHU Tianyu, et al. Live transformer winding deformation detector based on impulse frequency response method[J]. Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 110-115.
- [8] 刘勇,汲胜昌,杨帆,等.检测变压器故障的扫频阻抗法特性研究及应用[J].高电压技术,2016,42(10):3237-3245.
LIU Yong, JI Shengchang, YANG Fan, et al. Characteristics and application of sweep frequency impedance method for detecting transformer fault[J]. High Voltage Technology, 2016, 42(10): 3237-3245.
- [9] 颜君凯,马宏忠,李凯,等.基于振动信号的变压器绕组松动故障诊断方法[J].电力系统自动化,2017,41(3):122-128.
YAN Junkai, MA Hongzhong, LI Kai, et al. Vibration signal based diagnosis method for looseness fault of transformer winding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 122-128.
- [10] 李振华,蒋伟辉,喻彩云,等.基于短路阻抗及 ΔU -I1 轨迹特征联合分析的变压器绕组变形故障在线检测方法[J].电力自动化设备,2021,41(7):203-209+217.
LI Zhenhua, JIANG Weihui, YU Caiyun, et al. Online

- detection method of transformer winding deformation based on combined analysis of short circuit impedance and ΔU -II locus characteristics[J]. Power automation equipment, 2021, 41(7): 203-209+217.
- [11] 李振华, 张阳坡, 姚为方, 等. 基于扫频阻抗法及支持向量机的变压器绕组微小变形分类方法[J]. 变压器, 2021, 58(1): 17-22+29.
- LI Zhenhua, ZHANG Yangpo, YAO Weifang, et al. Transformer winding micro-deformation classification method based on sweep frequency impedance method and support vector machine[J]. Transformer, 2021, 58(1): 17-22+29.
- [12] 徐建源, 陈彦文, 李辉, 等. 基于短路电抗与振动信号联合分析的变压器绕组变形诊断[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 2001-2006.
- XU Jianyuan, CHEN Yanwen, LI Hui, et al. Transformer winding deformation analysis based on short-circuit reactance and vibration signal analysis[J]. High Voltage Technology, 2017, 43(6): 2001-2006.
- [13] 王昕, 刘伟家, 郑益慧, 等. 基于超声波技术的绕组变形3维成像检测装置设计[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4054-4059.
- WANG Xin, LIU Weijia, ZHENG Yihui, et al. Design of 3D imaging winding deformation detection device based on ultrasonic method[J]. High Voltage Technology, 2017, 43(12): 4054-4059.
- [14] HASEGAWA H. Enhancing effect of phase coherence factor for improvement of spatial resolution in ultrasonic imaging[J]. Journal of Medical Ultrasonics, 2018, 43(1): 1-9.
- [15] 王赞, 郑理威, 陈忠贤, 等. 基于光纤 EFPI 传感器的 GIS 局部放电研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 67-75.
- WANG Zan, ZHENG Liwei, CHEN Zhongxian, et al. Research on partial discharge of GIS based on optical fiber EFPI sensor[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 67-75.
- [16] 郑驰超, 成娟, 彭虎. 次方样本熵自适应加权的超声合成孔径成像算法[J]. 声学学报, 2017, 42(1): 109-114.
- ZHENG Chichao, CHENG Juan, PENG Hu. Ultrasonic synthetic aperture imaging algorithm based on power sample entropy as adaptive weight[J]. Acta Acoustica, 2017, 42(1): 109-114.
- [17] 李俊燕, 沈中华, 倪晓武, 等. 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 269-275.
- LI Junyan, SHEN Zhonghua, NI Xiaowu, et al. Laser-ultrasonic non-destructive detection based on synthetic aperture focusing technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 269-275.