

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407179

# 高压电缆附件铅封缺陷超声检测定量方法\*

方春华 周 固 饶 迪 郭永玉 黄伟丽 别琦涵

(三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002)

**摘 要:**采用相控阵超声技术可以检测高压电缆终端铅封缺陷,为了解决常规的超声定量方法无法有效的检测和定量铅封缺陷的问题,提出了基于超声扇扫图像的高压电缆铅封缺陷定量检测方法,该方法以铅封缺陷纵波扇扫图像为对象并结合了阈值分割和腐蚀算法,能够实时的获取缺陷横截面积、缺陷高度等其他相关信息。首先,搭建了高压电缆终端铅封缺陷超声检测试验平台,对以孔洞、夹渣为代表的不同直径的铅封缺陷进行检测,其次,对采集的铅封超声扇扫图像进行阈值分割和腐蚀算法处理,进行缺陷定量分析,并与传统的-6 dB定量结果进行对比,最后讨论了不同直径缺陷对超声定量结果的影响。研究结果表明,相较于传统的-6 dB法,此方法测量的距离误差缩小了5%,缺陷尺寸精度提高了10%,正确率达到了85%以上,但当铅封缺陷直径增大时,缺陷测量误差也随之升高。该方法验证了采用相控阵超声技术可以高效、直观的检测和定量高压电缆铅封缺陷,为高压电缆铅封缺陷的工程应用提供了重要参考价值,有助于提高高压电缆终端铅封工艺质量,确保电网的运行安全。

**关键词:** 电缆终端; 铅封; 超声; 腐蚀算法; 阈值分割; 缺陷定量

**中图分类号:** TN9; TM75

**文献标识码:** A

**国家标准学科分类代码:** 470.4051

## Quantitative method for ultrasonic testing of lead seal defects in high-voltage cable accessories

Fang Chunhua Zhou Gu Rao Di Guo Yongyu Huang Weili Bie Qihan

(College of Electricity and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Phased array ultrasonic technology can be used to detect lead seal defects in high-voltage cable terminals. In order to solve the problem that conventional ultrasonic quantitative methods cannot effectively detect and quantify lead seal defects, this paper proposes a quantitative detection method for lead seal defects in high-voltage cables based on ultrasonic fan-scan images. The method takes the longitudinal wave fan-scan image of the lead seal defect as the object and combines the threshold segmentation and corrosion algorithm to obtain other relevant information such as the cross-sectional area of the defect and the height of the defect in real time. Firstly, an ultrasonic testing platform for lead seal defects of high-voltage cable terminals was built to detect lead seal defects of different diameters represented by holes and slag inclusions. Then, threshold segmentation and corrosion algorithm processing were performed on the collected fan-scan images of lead seal ultrasonic testing, and quantitative analysis of defects was carried out and compared with the traditional -6 dB quantitative results. Finally, the influence of different diameter defects on ultrasonic quantitative results was discussed. The results show that compared with the traditional -6 dB method, the distance error measured by this method is reduced by 5%, the defect size accuracy is improved by 10%, and the accuracy rate is more than 85%. However, when the diameter of the lead seal defect increases, the defect measurement error also increases. This method verifies that the phased array ultrasonic technology can detect and quantify the lead seal defects of high-voltage cables efficiently and intuitively. It provides an important reference value for the engineering application of lead seal defects of high-voltage cables, which is helpful to improve the quality of lead seal process of high-voltage cable terminals and ensure the safety of power grid operation.

**Keywords:** cable termination; lead sealing; ultrasound; erosion algorithm; threshold segmentation; defect sizing

## 0 引言

高压电缆作为电力系统中不可或缺的组成部分,承担着输送电能的重要任务。然而,高压电缆终端附件的铅封缺陷对电力系统的正常运行和可靠性构成了潜在的威胁。铅封作为保护和密封高压电缆终端的关键部件,其质量和完整性直接影响着电缆终端的安全性和可靠性<sup>[1-2]</sup>。

由于铅封加工工艺不当以及运行中受力、振动等因素影响,从现场收集到的典型铅封缺陷包括了开裂、孔洞、砂眼、划伤以及变形等<sup>[3-4]</sup>。这些缺陷的存在很容易导致电气连接不良、绝缘程度低、电缆着火、击穿等问题,从而造成严重的经济损失,因此探索电缆附件铅封的缺陷检测及定量方法具有重要的现实意义。

目前,传统的无损检测方法往往难以对高压电缆终端的铅封缺陷进行有效的检测和定量。例如红外热成像可以通过对铅封表面进行热成像来诊断铅封内部的温度分布,从而判断是否存在异常情况;激光超声也可以利用超声反射原理而检测缺陷,涡流检测法通过电磁感应原理判断缺陷信号,但上述方法在实际应用中存在着环境温度和表面材料的干扰、设备庞大、不能检测铅封内部等缺点<sup>[4]</sup>,有较大的局限性。而相控阵超声技术作为一种先进的无损检测技术,在工业领域取得了广泛应用<sup>[5-6]</sup>。该技术具有高分辨率、快速成像和非破坏性等优势,为高压电缆终端铅封缺陷的检测和定量提供了新思路<sup>[7]</sup>。

关于超声相控阵检测技术定量的问题,国外的研究人员率先进行了探索。然而,目前仍然停留在对目标缺陷的测长、测高的问题上。其中最具代表性的是加拿大的 Ciorau<sup>[8]</sup>用相控阵超声系统对焊缝进行检测,利用线阵列探头对焊缝进行扫查,在 B-Scan 下得到焊缝内部的缺陷的公差为:长度 2~6 mm。意大利的 Nardoni 等<sup>[9]</sup>利用超声相控阵扇扫图上的爬波辐射回波即所谓的“双波信号”超声图像进行了定量、定性研究,当超声波进行扇型扫查缺陷时可能伴随着衍射现象的发生,因此利用缺陷的衍射回波可对缺陷高度进行测定。Nardoni 等<sup>[10]</sup>采用有限差分方法,研究了在应力腐蚀裂纹探测中探测到的声波在裂纹中的传播规律,在此基础上,开展了 16 单元阵列扫描图像的模拟仿真,获得了高质量的扇形扫描图像,量化了 3.6 mm 的裂缝高度。

在国内的超声相控阵定量检测方面,近 10 年时间才有了快速的发展,例如大连理工大学的谈洋<sup>[11]</sup>,基于相控阵技术,在 55 mm 厚的碳素钢试件底部开槽,通过数值仿真与实验相结合的手段,利用裂纹尖端衍射信号,实现对裂纹深度的量化分析,并提出相对传播时间法和绝对时间传播法计算裂纹高度。珠海特检院的李奎元等<sup>[12]</sup>

通过对常规超声、射线和相控阵等多种检测手段的测试结果进行了比较分析,认为超声相控阵扫描图像可以更加直观地实现对缺陷的定位和定量,同时也更加准确地识别出缺陷;董晗等<sup>[13]</sup>利用相控阵技术对油井井壁进行了成像,在对井内各种规格的套管进行了探测时,发现所得到的图像可以很好地反映出缺陷的基本位置和大小,成像效果很好;大连理工大学谈洋等<sup>[14]</sup>在超声波相控阵探测理论上,构建相控阵超声探测的数学模型,并通过对比实验,研究 B 扫成像特点,实现对压力容器内裂纹缺陷的定量检测。但以上研究未有对高压电缆附件铅封缺陷进行定量检测,本文将进一步的展开超声相控阵的高压电缆终端铅封缺陷量化研究。

针对以上高压电缆铅封缺陷检测方法少、定量难问题,本文开展了以孔洞、夹渣为代表的孔型铅封缺陷检测与定量研究,通过相控阵超声技术,以铅封缺陷纵波扇扫图像为对象,结合阈值分割和腐蚀算法,实现对高压电缆铅封缺陷的定量分析。首先,提出了超声扇扫图的高压电缆铅封缺陷定量检测方法,随后制作了铅封缺陷样品并开展了定量实验,获取了铅封缺陷图像数据,并将本文方法与传统的 -6 dB 定量结果进行了分析和对比。

## 1 铅封缺陷超声检测定量方法

### 1.1 铅封超声扇扫图像定量原理

相控阵超声是由脉冲发射器对各个阵元的激励信号施加不同的时间延迟,可以使声束在弹性介质传播的过程中实现聚焦和偏转<sup>[15-16]</sup>;而压电相控阵探头激励偏转聚焦的超声波,超声波在传播路径上遇到气孔、夹渣等缺陷时会产生反射波,超声传播流程如图 1 所示,利用探头接收这些异质界面产生的反射波,再根据延时叠加成像算法得到能够显示缺陷的扇扫成像。

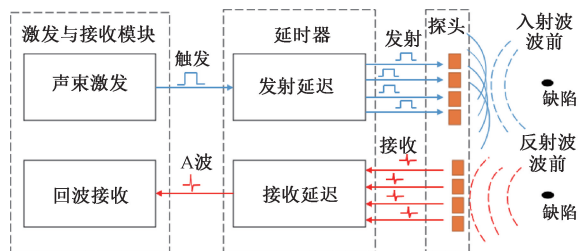


图 1 超声相控阵发射和接收声波的基本流程

Fig. 1 The basic flow chart of ultrasonic phased array transmitting and receiving sound waves

如图 2 所示,相控阵超声波扇扫是指在一定的波束角范围内,在一定的聚焦深度使声束在扫描范围内沿一定的角度移动,从而获得不同角度的扫描回波数据,绘出扫描成像的超声检测方式。在扇形扫描过程中,通过对

不同的角度偏转幅度进行控制,使得超声声束的方向与预计的缺陷相垂直,从而可以得到较好的铅封装缺陷形态及检测图像<sup>[17-18]</sup>。

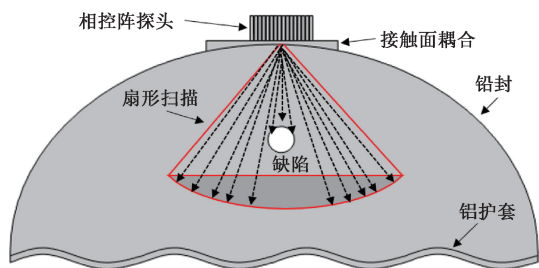


图2 纵波超声扇扫检测铅封缺陷示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lead sealing defects detected by longitudinal wave ultrasonic fan scanning

扇形扫描也是一种基于A扫数据的数字图像显示方式,将波形数据按照扇形区域进行数字编码成像,视图位置与B扫描视图相对应,其显示类型也属数字图像。数字图像<sup>[19]</sup>的本质是由不同大小的像素点构成的一个二维矩阵,一个大小为 $m \times n$ 的图像矩阵可以表示为:

$$F = \begin{bmatrix} f(1,1) \cdots f(1,n) \\ \vdots \\ f(m,1) \cdots f(m,n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $f(i,j)$ 表示的是图像在位置 $(i,j)$ 处的像素值。通过对铅封进行扇形扫描,可以得到一幅扇扫图像,其本质上是超声图像相对应的一个二维矩阵。将超声波扫描区内的回波数据进行处理、存储,再经数字转换,将各单元的相应信息以图像的方式显示出来。如图3所示,纵波扇形扫描模式能够检测探头与铅封接触面正下方的区域,同时能够检测铅封内扇形扫描覆盖的整个区域。通过扇形扫描图像显示缺陷信号,能够在图像上直接测量缺陷尺寸信息。

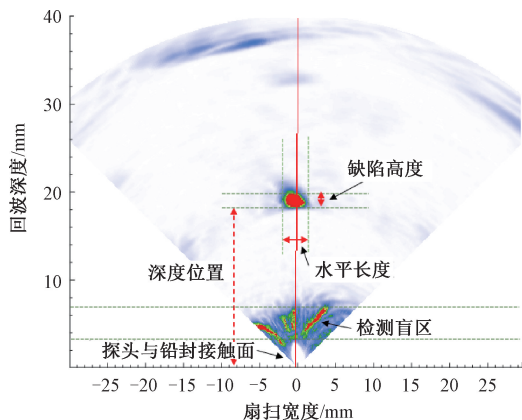


图3 纵波扇形扫描扇形扫描图缺陷测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of defect measurement in longitudinal wave sector scanning sector scanning image

通过铅封检测的扇形图像可以测得缺陷的声程值,缺陷距离上表面的深度位置,缺陷距离探头中心的水平距离,缺陷的回波幅值,缺陷在扇形扫描方向的水平长度,缺陷在深度方向的自身高度值,相邻缺陷间距等。

## 1.2 基于传统-6 dB法缺陷测量方法

在使用超声检测仪器对被测物中的缺陷进行检测时,当工件缺陷的直径超过声束横截面的大小时,通常会采用测长法进行测定。该测长法利用缺陷波高与探头位移之间的距离来测量缺陷的尺寸。根据这一方法所得到的缺陷长度被称为缺陷的指示长度<sup>[16]</sup>。而聚焦声束宽度远小于缺陷尺寸时,缺陷的指示长度可以通过常规的-6 dB法进行定量检测,由于超声波高降低-6 dB后是原来的1/2,因此-6 dB法又被称为半波高度法<sup>[20]</sup>。其具体做法是:在检测缺陷的最大回波位置上,通过调整衰减器,将缺陷波高降低到参考波形的高度。在此基础上,利用衰减器将检测精度提升-6 dB,并将检测探头沿着缺陷方向移动,待检测波高下降到参考波形高度时,检测到的检测结果即为缺陷的显示长度,如图4所示。

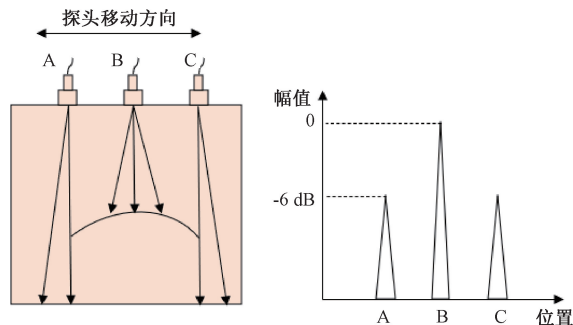


图4 常规-6 dB定量法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of conventional -6 dB quantitative method

从上述可以看出,传统的-6 dB法需要移动常规超声探头,在找到缺陷后,需要不断在缺陷附近移动以找出相应的缺陷幅值,从而对缺陷进行周向长度的定量。显然传统的-6 dB法不适用于相控阵探头进行定量。

对此,本文将传统的-6 dB法和相控阵超声进行结合,实现在不移动探头的前提下,通过超声扇扫图像的扫描线和缺陷的检测声程进行缺陷的声束角度-距离定量,而扫描线的确定则通过-6 dB法进行确定,首先,调节铅封内部缺陷的回波强度,使其最大值为全屏80%;然后,以该扫描线作为起始位置,进行左、右扫描(增加或减少扫描线的角度),当反射波振幅降低到40%时,判断缺陷端点的位置,读出当时扇扫图像上的缺陷在被加工物中的深度 $S$ ,当反射波振幅达到最大值时,入射波与缺陷表面垂直,设此时最高处 $H1$ 与波幅降到40%(-6 dB)处相交的扫描线 $L1$ 与 $L2$ 的角度为 $\theta$ ,如图5所示。



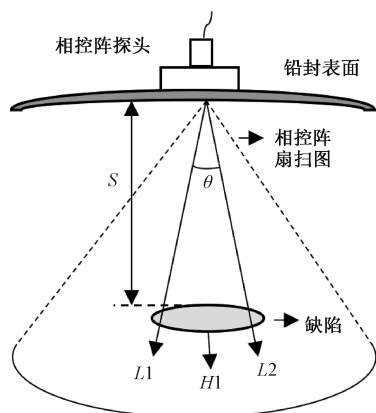


图 5 扇扫反射波法测量铅封内部缺陷

Fig. 5 Measurement of internal defects in lead seals by fan sweep reflection wave method

则缺陷尺寸  $L$  可表示为:

$$L = 2S \cdot \tan \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

其中,  $S$  为扇扫图像上缺陷上端在铅封中的深度,  $\theta$  为声束数  $L1$  与  $L2$  的夹角。

由于实验设备中扇扫角度为  $-45^\circ \sim 45^\circ$ , 其扇扫图像的扫面声束为固定值 128 条, 因此, 缺陷计算公式中的  $\theta$  计算公式如下:

$$\theta = \frac{(L1 - L2) \times \pi}{256} \quad (3)$$

通过式 (2) 及 (3) 即可对铅封的指示长度进行测量。

### 1.3 基于超声扇扫图像的缺陷测量方法

本文以铅封缺陷纵波扇扫图像为对象, 继续研究铅封缺陷定量方法, 然而, 在相控阵回波信号的获取、传输和扫描成像中, 由于受到环境噪声的干扰, 被测物体的形状和检测设备的精度等因素的影响, 会导致扇扫成像的质量下降, 为了改善相控阵超声探测的成像质量, 准确地提取和定量铅封缺陷, 需要有针对性地对原始的铅封超声扇扫图像进行图像处理<sup>[21-22]</sup>。

在相控阵扇扫成像中, 如何准确地提取出缺陷的几何特性, 是缺陷特征提取和定量检测的关键。本文基于超声扇扫图像进行缺陷特征提取的基本流程如图 6 所示。

该方法是在获取了原始扇扫图像的基础上, 对超声图像进行预处理, 再通过二值化将图像中的缺陷和背景进行分割, 并在此基础上对图像进行了形态学腐蚀处理以及边缘检测, 最终得到了各个特征值的数值结果<sup>[23]</sup>。具体提取步骤如下。

首先, 由于扇扫图像是由波形信号通过 RGB 颜色映射得到的数字图像, 为了降低后续的运算量和增强其原始扇扫图像的铅封缺陷特征, 需要对原始的铅封扇扫图

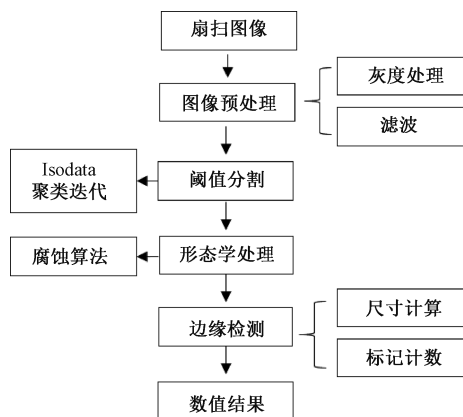


图 6 缺陷特征提取的基本流程

Fig. 6 The basic process of defect feature extraction

像进行灰度处理。对图像进行灰度处理的方法主要有最大值法、均值法和加权平均法, 研究表明, 利用加权平均方法可以得到较为合理的灰度图像<sup>[24-25]</sup>。加权平均法的基本原则是, 按照各个成分的重要程度和其他指数, 对各个成分进行不同权重的加权平均运算, 即:

$$f_{(x,y)} = (W_R R_{(x,y)} + W_G G_{(x,y)} + W_B B_{(x,y)}) / 3 \quad (4)$$

式中:  $W_R$ 、 $W_G$ 、 $W_B$  分别对应像素点 R、G、B 的权值,  $f_{(x,y)}$  表示坐标  $(x,y)$  点的像素值<sup>[22]</sup>。采用加权平均方法, 将图的 RGB 彩色图像直接转换成灰度图, 其效果如图 7 所示。

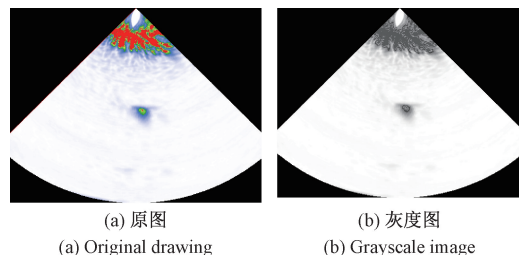


图 7 原始扇扫图像灰度处理

Fig. 7 Grayscale processing of original fan scan images

然后, 中值滤波、均值滤波、高斯滤波, 都是将图像转换成灰度图像, 然后再对图像进行滤波; 为了去除干扰因素, 并使超声图像平滑, 经过对比, 选择了高斯低通滤波器, 滤波后的图像如图 8(a) 所示。

其次, 为了在保持原始扇扫图像的基础上去除冗余的信息, 精确地提取缺陷的特征量, 需要进一步细化目标和背景的边界, 本文根据像素周围区域的灰度值来确定更细致的阈值, 进一步分割前景区域, 在此基础上, 本文采用了一种基于邻域内各像素点灰度的 Isodata 迭代算法, 其通过迭代的方式自适应地确定缺陷图像的阈值, 实现对缺陷图像的分割。具体过程如下:

1) 在使用 Isodata 迭代算法对铅封扇扫图像进行阈

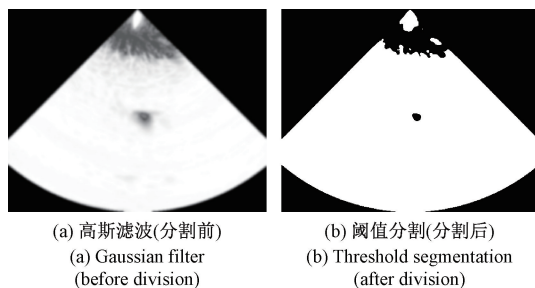


图8 灰度图像滤波及阈值分割处理

Fig. 8 Grayscale image filtering and threshold segmentation processing

值分割前,需要设定一个合适的阈值  $T(0)$ ,阈值的选择决定着缺陷图像的分割效果,研究表明,选择上述预处理后的平均灰度值可以得到较好的分割效果<sup>[26]</sup>。

2)通过步骤1)的初始阈值  $T(0)$  将相控阵铅封扇扫图像分割成  $R_1(j)$  与  $R_2(j)$  两个部分,并对其进行灰度值计算分析<sup>[27]</sup>,具体方法为:

$$\mu_1^{(j)} = \frac{1}{N_1^{(j)}} \sum_{f(x,y) \in R_1(j)} f(x,y) \quad (5)$$

$$\mu_2^{(j)} = \frac{1}{N_2^{(j)}} \sum_{f(x,y) \in R_2(j)} f(x,y)$$

式中:  $N_1^{(j)}$  与  $N_2^{(j)}$  为第  $j$  次迭代时区域,  $R_1(j)$  与  $R_2(j)$  为像素点个数,  $x, y$  分别表示以超声相控阵扇扫图像原始矩阵第1行第1列为原点的水平轴与垂直轴,  $f(x, y)$  代表超声波相位阵扫描图像中各点  $x, y$  的灰度值。

3)将上述求取的两个区域的灰度平均值作为新的阈值,即:

$$T(j+1) = \frac{\mu_1^{(j)} + \mu_2^{(j)}}{2} \quad (6)$$

4)令  $j = j + 1$ ,重复上述步骤,直到预设的迭代次数完成或  $T(j+1)$  与  $T(j)$  的差值小于某设定的值,此时结束 Isodata 算法迭代并获得最佳阈值  $T(j+1)$ 。

5)将获取的新的阈值  $T(j+1)$  与超声扇扫图像中各个像素点的灰度值进行对比,确定阈值高于  $T(j+1)$  的像素点作为缺陷特征,而低于阈值  $T(j+1)$  的像素点作为背景,从而获得阈值分割划分后的扇扫图像  $C$ 。从图8(b)中可以看出,该方法可以很好地从背景中分离出缺陷区域,为后续的缺陷特征提取和定量提供了基础。

最后,因受限与铅封表面曲率、耦合状态等因素,在超声波相控阵检测中,阈值分割后的缺陷仍然存在伪像、发散等问题,极大地降低了缺陷的提取和定量精度,因此,在阈值分割后对超声图像进一步优化处理,本文采用了形态学中的腐蚀算法,利用超声图像中的结构元素搜集信息以此对图像中缺陷区域进行提取及量化<sup>[27]</sup>,具体原理如下。

设上述阈值分割完成后得到扇扫图像  $C, B$  为结构元素,把结构元素进行平移  $e$  后得到  $Be$ ,若  $Be$  包含于  $C$ ,则记下此时的  $e$  点,所有满足上述条件的  $e$  点集合即为  $C$  被  $B$  腐蚀的结果,通过腐蚀运算及边界填充公式为:

$$\begin{cases} C \odot B = \{p \mid B + p \subseteq C\} \\ e(r, c) = \min_{x, y} (f(r+x, c+y) - b(x, y)) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $r, c$  为平移量,使用  $3 \times 3$  的结构元素遍布扇扫图像中的像素点矩阵数据,并对其进行“与”操作,当两者均为255时,此像素值为255,反之为0。腐蚀处理后的图像如图9(a)所示,通过与图8分割后的图像对比发现,腐蚀处理后的缺陷轮廓更加接近原图缺陷信息,提高了量化精度。

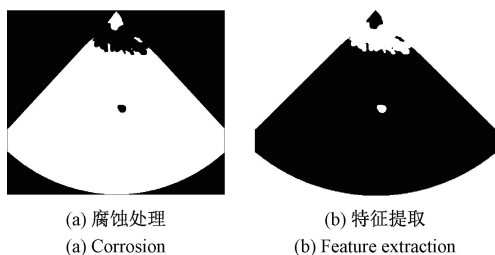


图9 形态学处理

Fig. 9 Morphological processing

最后,利用连通判别法对阈值分割和腐蚀后的扇扫图像进行缺陷及轮廓跟踪标记,并选取周长、面积、周长面积比例、缺陷指示长宽等几何特性对缺陷特征进行评估与量化。

## 2 铅封缺陷提取实验研究

### 2.1 搭建铅封缺陷检测平台

首先,针对高压电缆铅封的典型类型缺陷制作了铅封缺陷试验样品。如图10所示为高压电缆终端铅封典型缺陷的位置示意图与实际电缆终端铅封试样外观图。

由于超声探头无法与铅封表面进行有效耦合,本文设计了一种高压电缆铅封超声检测耦合装置,可以有效解决因高压电缆终端铅封表面曲率较大,影响超声探头能量接收问题,耦合装置如图11所示。由超声相控阵探头、硅橡胶薄膜、铝壳、压片及注水孔5部分组成;超声相控阵探头通过铝壳上端来固定,其下端具有一定弧度,通过压片将硅橡胶薄膜与铝壳压紧,起到密封的作用,且能够使其与铅封表面进行有效耦合;注水孔可以用来向耦合装置中注水并从另一个孔排出空气,这样保证了能够使薄膜鼓起,达到与铅封表面充分接触的效果,完成后就可以直接将装置放置在铅封表面进行相控阵超声扇形扫描并获取超声数据。

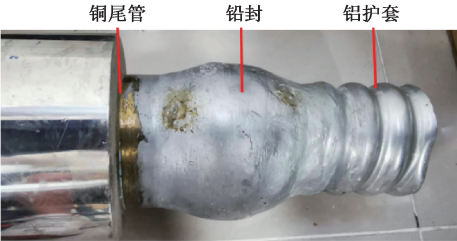
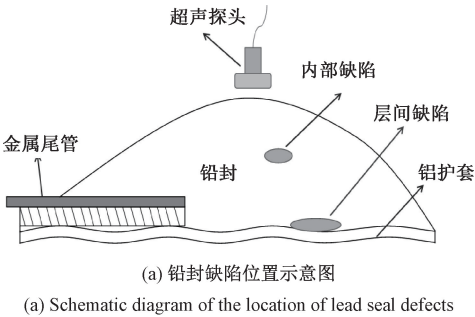


图 10 电缆终端铅封试样

Fig. 10 Lead sealing sample of cable terminal

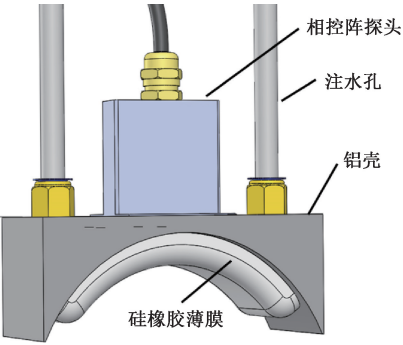


图 11 高压电缆铅封超声检测耦合装置

图 12 高压电缆终端铅封缺陷超声检测试验平台

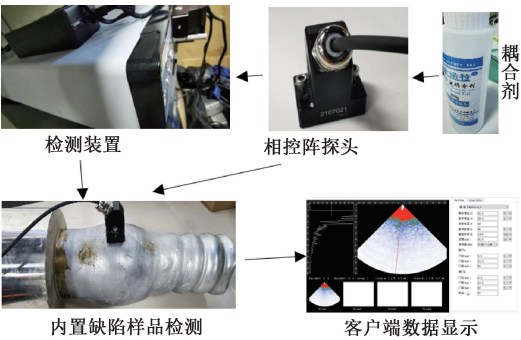


图 12 高压电缆终端铅封缺陷超声检测试验平台

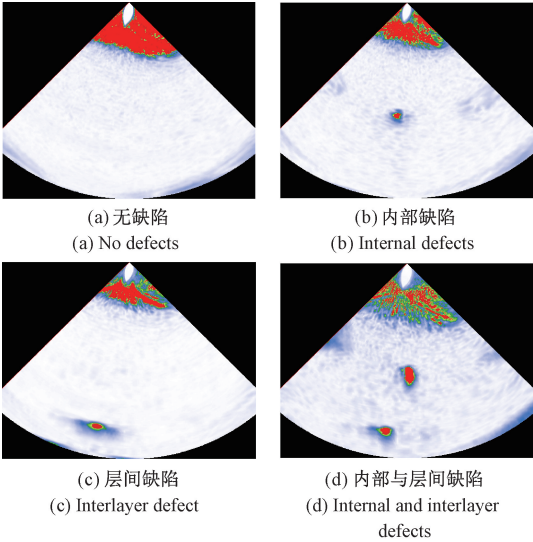


图 13 铅封超声试验图像

Fig. 13 Lead seal ultrasonic test image

些体积状缺陷,能够测量缺陷自身高度;如果缺陷为内部与层间同时存在,在扇形扫描图上能够显示各缺陷的相对位置以及相邻缺陷间的间距等信息,接下来将针对以上缺陷检测结果进一步的对铅封内缺陷进行量化研究。

2.2 传统-6 dB 法缺陷测量结果

根据上述原理,对铅封内缺陷进行检测并定量。具体实验步骤如下:

1) 根据研究需要制作合适的铅封缺陷试块。将铅封头从最高弧度处剖开,在铅封横截面进行不同大小、不同深度的缺陷制作,示意图如图 14 所示。

2.2 传统-6 dB 法缺陷测量结果

2) 将相控阵超声探头移至铅封表面进行缺陷检测。校准试块,选取最优检测参数,当超声图像为最佳时,保持工艺参数不变,进行下一步的实验。

3) 当检测到缺陷时,保持探头位置不变,调节声束,



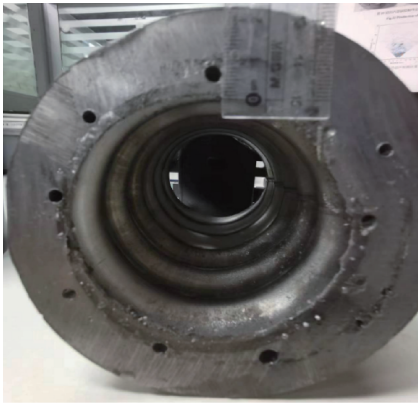


图 14 铅封内部缺陷制作实物图  
Fig. 14 Production of physical images of internal defects in lead seals

找到缺陷的最大反射波(满屏的 80%)位置及角度,随后调节声束找到缺陷波高降低 1/2 时的声束线  $L_1$ ,并记录位置和角度,随后将声束向反方向调节,找到缺陷波高降低 1/2 时的声束线  $L_2$ ,并记录  $L_2$  的位置及角度。

4) 完成上述操作后,将其对应的扇扫图像进行保存,并保持上述工艺参数不变,对其他缺陷进行定量检测。

通过上述步骤,设置焦距为 15 mm,脉冲宽度为 200,检测范围设置为 40 mm,对制作的封铅试块中不同大小、不同深度的缺陷进行定量检测,利用定量公式(2)和(3),将缺陷的周向长度进行计算并填写误差于下表。如表 1 所示。

表 1 传统-6 dB 法定量结果

Table 1 Traditional -6 dB method quantitative results				
缺陷直径/ mm	实际深度/ mm	检测尺寸/ mm	检测声程/ mm	定量误差/ %
$D=3$	15	2.41	16.3	19.6
$D=4$	18	3.32	20.2	17
$D=5$	18	4.21	19.8	15.8
$D=6$	15	3.95	17.3	34.17

通过表 1 看出,将相控阵扇扫图的-6 dB 法进行的缺陷定量结果正确率在 80%左右,而随着缺陷距离铅封表面的声程增加,缺陷的定量误差较大,因是随着缺陷的深度增加,超声的声波能量减弱,这导致用波幅值的-6 dB 法定量误差变大。而对于不同大小的缺陷定量结果可以发现,缺陷越大,缺陷的周向长度定量结果误差越大,应是随着缺陷的尺寸增加,相控阵扇扫成像中的聚焦声束会导致最高反射波幅值溢出,导致并没有以满屏 80%的波幅作为基波,这也造成了采用-6 dB 法时定量结果不准确。通过上述的传统-6 dB 定量方法可以看出,传统方法定量误差较大,且需要人为不断调节声束位

置并记录数据,操作复杂,效率低下。

2.3 基于超声扇扫图的缺陷测量结果

通过上述超声扇扫图定量原理,将实验获取的超声扇扫图进行阈值分割和腐蚀处理,对铅封缺陷进行特征提取,如图 15 所示为同一深度下不同大小的铅封缺陷超声扇扫定量结果图。

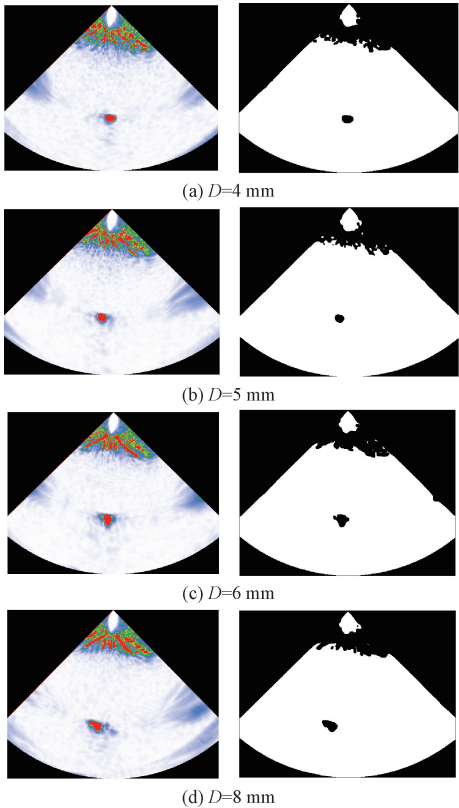


图 15 不同大小缺陷特征提取

Fig. 15 Feature extraction of defects of different sizes

实验定量结果如表 2 所示,括号内的数据为铅封扇扫图像的缺陷提取值与实际铅封缺陷值的相对误差,由表 2 可知,当缺陷尺寸较小时,缺陷的指示长度定量准确率达到了 90%以上,这说明,通过超声扇扫图能够较准确的定量铅封内部缺陷,且超声扇扫图像成像质量也更高,有利于减少通过超声扇扫图像提取缺陷特征的误差;而随着缺陷直径增大时,缺陷长度及横截面积的定量精度逐渐下降,缺陷长度误差增加了 5%~10%,而缺陷横截面积精度下降了 20%,这说明随着检测缺陷的直径增大时,超声声束扫描缺陷时虽然发生了较多的散射和反射使得探头接收的能量变高,但也提高了噪声能量而出现伪像,降低了缺陷成像质量,从而增加了测量误差;通过实验结果可以看出,周长与面积比值误差在 20%左右,为铅封缺陷定性也提供了良好的参考。

表 2 铅封缺陷定量结果比较

Table 2 Comparison of quantitative results of lead seal defects of different sizes

缺陷直径	检测声程/mm	检测面积/ mm <sup>2</sup>	缺陷周长/mm	周长与面积比	缺陷长度/mm	半高宽/mm
D=3 mm	12.4(4.6%)	6.1(13%)	8.8(6.5%)	0.69(8%)	2.7(10%)	1.8(20%)
D=4 mm	13(0%)	13.35(5.8%)	11.5(8.4%)	1.16(16%)	4.2(5%)	2.2(10%)
D=5 mm	13.1(0.7%)	20.7(5.4%)	12.75(3.2%)	1.62(29.8%)	5.2(4%)	2.9(16%)
D=6 mm	13.2(1.5%)	33.8(19.6%)	19.87(5.4%)	1.7(13%)	5.6(6.7%)	3.6(20%)
D=8 mm	12.6(3%)	62.6(24.5%)	23.2(7.6%)	2.7(35%)	6.8(15%)	4.3(7.5%)

3 结 论

本文介绍了一种基于超声扇扫图像的高压电缆铅封缺陷检测及定量方法,该方法在同一超声检测参数下获得铅封缺陷检测数据,以铅封缺陷纵波扇扫图像为对象,通过阈值分割和腐蚀算法,可以有效的对不同直径的铅封缺陷进行定量,其中缺陷长度精度到 85%以上,且可以对缺陷进行实时定量,相较于传统的-6 dB 法,不仅减少了复杂的操作步骤,还提高了定量精度,获得了更多的缺陷信息,减少了人工操作带来的不确定性,提高了缺陷检测的效率和准确性,可以广泛应用于电缆终端铅封缺陷的检测之中。

由于电缆附件铅封表面曲率大,且人工搪铅时状态不一,使得超声波在铅封内传播过程变的非常复杂,在定量 8 mm 直径的铅封缺陷时出现了较高的测量误差。文章中定量方法目前适用于在减少如铅封缺陷状态、超声检测参数、耦合剂以及人为等影响因素下对铅封缺陷进行检测及定量,对于高压电缆铅封缺陷检测并实现更高准确率的定量和缺陷类型的识别需要进一步研究。

参考文献

[ 1 ] 罗进圣, 李忠群, 王伟. 电缆终端与金属护套铅封分析[J]. 河北电力技术, 2011, 30(2): 46-47.  
LUO J SH, LI ZH Q, WANG W. Analysis of cable terminal and metal sheath lead seal [J]. Hebei Electric Power Technology, 2011, 30 (2) : 46-47.

[ 2 ] 周长城, 赵海军, 任萍. 高压电缆附件铅封工艺的改进[J]. 东北电力技术, 2021, 42(2): 23-26, 29.  
ZHOU CH CH, ZHAO H J, REN P. Improvement of lead sealing process for high-voltage cable accessories [J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42 (2): 23-26, 29.

[ 3 ] 蒲英俊, 刘广兴, 李正利, 等. 涡流检测高压电缆附件铅封缺陷的试验研究[J]. 山东电力技术, 2020, 47(2): 56-60, 69.  
PU Y J, LIU G X, LI ZH L, et al. Experimental study

on eddy current detection of lead seal defects in high-voltage cable accessories [J]. Shandong Electric Power Technology, 2020, 47 (2): 56-60, 69.

[ 4 ] 曹俊平, 孙兴涛, 王少华, 等. 基于涡流技术的高压电缆铅封裂纹缺陷检测研究[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 168-175.  
CAO J P, SUN X T, WANG SH H, et al. Research on detection of lead seal cracks in high voltage cables based on eddy current technology [J]. High Voltage Electrical Appliances, 2020, 56 (8): 168-175.

[ 5 ] 陈海燕, 李亮, 夏正武, 等. 复合绝缘子内部缺陷超声相控阵柔性耦合检测[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1274-1280.  
CHEN H Y, LI L, XIA ZH W, et al. Ultrasonic phased array flexible coupling detection of internal defects of composite insulators [J]. High Voltage Technology, 2019, 45 (4) : 1274-1280.

[ 6 ] 詹湘琳, 李健, 张宇, 等. 用于管道环焊缝缺陷检测的超声相控阵系统[J]. 仪器仪表学报, 2006(S2): 1427-1428.  
ZHAN X L, LI J, ZHANG Y, et al. Ultrasonic phased array system for defect detection of pipeline circumferential welds [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006 (S2): 1427-1428.

[ 7 ] 方春华, 胡东三, 陶玉宁, 等. 高压电缆终端铅封缺陷超声相控阵柔性耦合检测[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 29-37.  
FANG CH H, HU D S, TAO YU N, et al. Ultrasonic phased array flexible coupling detection of lead seal defects in high-voltage cable terminals [J]. High Voltage Technology, 2022, 48 (1) : 29-37.

[ 8 ] CIORAU P. A contribution to phased array ultrasonic inspection of welds: Defect patterns and sizing capability [C]. Developments in Ultrasonic Phased Array Inspection I. Ontario Power Generation Inc, 2008.

[ 9 ] NARDONI G, CERTO M, NARDONI P, et al. Sizing the height of discontinuities, their characterisation in



- planar/volumetric by phased array technique based on diffracted echoes[J]. Retrieved from the Internet URL: [http://www.idspektr.ru/10\\_ECNDT/reports/1\\_03\\_02.pdf](http://www.idspektr.ru/10_ECNDT/reports/1_03_02.pdf), 2018; 1-11.
- [10] NARDONI D, NARDONI P, CERTO M, et al. Sizing in the phased array technique using diffraction and amplitude displacement[J]. Or Insight, 2008, 50(10): 574-578.
- [11] 谈洋. 超声相控阵裂纹定量检测有限差分法数值模拟[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- TAN Y. Ultrasonic phased array crack quantitative detection finite difference method numerical simulation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [12] 李奎元, 孔令昌, 肖武华. 无损检测方法对缺陷定位、定性及定量的分析对比[J]. 中国特种设备安全, 2012, 28(7): 27-29, 50.
- LI K Y, KONG L CH, XIAO W H. Comparison of non-destructive testing methods for defect localization, qualitative and quantitative analysis [J]. China Special Equipment Safety, 2012, 28(7): 27-29, 50.
- [13] 董晗, 孔超, 师芳芳, 等. 石油钻井中超声相控阵井壁成像检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(22): 1-8.
- DONG H, KONG CH, SHI F F, et al. Research on ultrasonic phased array wellbore imaging detection technology in oil drilling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(22): 1-8.
- [14] 谈洋, 罗忠兵, 赵天伟, 等. CCASS 管道焊缝相控阵超声检测脉冲宽度优选实验研究[J]. 无损探伤, 2013, 37(3): 11-14.
- TAN Y, LUO ZH B, ZHAO T W, et al. Experimental study on pulse width optimization for phased array ultrasonic testing of CCASS pipeline welds [J]. Non Destructive Testing, 2013, 37(3): 11-14.
- [15] 许倩. 航空涡轮盘件的相控阵超声检测声场控制及定量技术研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2019.
- XU Q. Research on sound field control and quantitative technology of phased array ultrasonic testing of aviation turbine disks [D]. Nanchang: Nanchang Aviation University, 2019.
- [16] 潘文超. 基于相控阵的声传播规律及在缺陷定量中的应用研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2016.
- PAN W CH. Research on acoustic propagation law based on phased array and its application in defect quantification [D]. Nanchang: Nanchang Aviation University, 2016.
- [17] 李刚. 超声相控阵检测扇形扫描成像研究[D]. 西安:西安科技大学, 2020.
- LI G. Study on fan-shaped scanning imaging for ultrasonic phased array detection [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [18] 李京安. 超声相控阵扇形扫描检测成像技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
- LI J AN. Research on ultrasonic phased array sector scanning detection imaging technology [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2011.
- [19] 朱虹. 数字图像处理基础[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- ZHU H. Fundamentals of Digital Image Processing [M] Beijing: Science Press, 2005.
- [20] 孙芳. 超声相控阵技术若干关键问题的研究[D]. 天津:天津大学, 2013.
- SUN F. Study on some key problems of ultrasonic phased array technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [21] 吴海腾. 基于相控阵超声成像的圆柱类部件自动化无损检测理论与实践的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- WU H T. Research on the theory and practice of automatic nondestructive testing of cylindrical parts based on phased array ultrasonic imaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [22] 高雪妮, 玉振明, 张军, 等. 基于多级分块迭代法的不同聚焦图像融合[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 690-694.
- GAO X N, YU ZH M, ZHANG J, et al. Image fusion with different focal points based on multi-level block iteration method [J]. Journal of Electronics, 2011, 39(3): 690-694.
- [23] 任重听, 毕剑华, 谢琳, 等. 采用图像分割方法进行木材表面缺陷的定量检测[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 785-792.
- REN ZH X, BI J H, XIE L, et al. Quantitative detection of wood surface defects by image segmentation method [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(5): 785-792.
- [24] 伍缘杰, 徐晓静, 计效园, 等. 基于图像处理的 SLM 铺粉缺陷检测识别与分类研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(1): 23-28.
- WU Y J, XU X J, JI X Y, et al. Detection and classification of SLM powder defects based on image processing [J]. Special Casting and Non-Ferrous Alloys, 2023, 43(1): 23-28.
- [25] 凌双明. 智能视觉机器人图像灰度化处理方法研究[J].

山西电子技术, 2023(2): 88-91.

LING SH M. Research on grayscale processing methods for intelligent visual robot images [J]. Shanxi Electronic Technology, 2023(2): 88-91.

- [26] 乔闹生, 邹北骥, 邓磊, 等. 一种基于图像融合的含噪图像边缘检测方法 [J]. 光电子激光, 2012, 23(11): 2215-2220.

QIAO N SH, ZOU B J, DENG L, et al. A noisy image edge detection method based on image fusion [J]. Optoelectronics and Laser, 2012, 23(11): 2215-2220.

- [27] 朱做涛, 穆志韬, 苏维国, 等. 基于图像处理技术的铝合金腐蚀等级评定方法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 383-386.

ZHU Z T, MU ZH T, SU W G, et al. Evaluation method of aluminum alloy corrosion grade based on image processing technology [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42 (3): 383-386.

## 作者简介



**方春华** (通信作者), 2012 年于武汉大学获得博士学位, 现为三峡大学副教授, 主要研究方向为高电压试验技术、绝缘子检测和电力设备状态检测。

E-mail: fang107531@163.com

**Fang Chunhua** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Wuhan University in 2012. He is now an associate professor of China Three Gorges University. His main research interests include high voltage test technology, insulator detection and power equipment state detection research.



**周固**, 2022 年于三峡大学攻读硕士至今, 主要研究方向为电力设备状态检测与故障诊断。

E-mail: 3141279874@qq.com

**Zhou Gu** is now a M. Sc. candidate in Three Gorges University. His main research interests include power equipment state detection and fault diagnosis.