

# 合成孔径聚焦技术在 TOFD 检测中的应用

周靖宇, 林丹源, 陈建华, 詹红庆, 杨贵德

(广东省超声电子重点工程技术研究开发中心, 汕头 515041)

**摘要:**为了准确定位和测量在低合金厚板对接焊缝中的缺陷,对超声衍射时差法的 D 扫描图像进行了处理。为了提高图像的横向分辨率,准确识别缺陷的位置和尺寸,引入了 D 扫描图像的合成孔径聚焦算法(SAFT-D)。根据缺陷端部和换能器之间的几何关系,建立了 D 扫描图像 SAFT-D 处理的数学模型,实现了 D 扫描图像的 SAFT 重建。试验结果表明,SAFT-D 算法有效地提高了图像的分辨率,增强了缺陷识别的能力,能够准确地定位和定量工件中的缺陷。

**关键词:**超声衍射时差法;合成孔径聚焦算法;缺陷识别;SAFT 重建

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)05-0059-03

## Application of Synthetic Aperture Focusing Technique in TOFD Testing

ZHOU Jing-Yu, LIN Dan-Yuan, CHEN Jian-Hua, ZHAN Hong-Qing, YANG Gui-De

(Key Engineering Technology Research and Development Center of Guangdong Province Ultrasonic Electronics, Shantou 515041, China)

**Abstract:** In order to accurately locate and measure the defects in low-alloy plate butt weld, the D-scan image obtained by the time of flight diffraction method was processed. In order to improve the horizontal resolution of the image, accurately recognize the position and size of the defects, the synthetic aperture focusing algorithm(SAFT-D, synthetic aperture focusing algorithm-D) was introduced. Based on the geometric relationship between the defects edge and the transducers, the mathematical model of SAFT-D processing on the D-scan image was build, the SAFT reconstruction of the D-scan image was achieved. The results showed that, by the SAFT-D algorithm, the resolution of the D-scan image was effectively improved, the capacity of the defect recognition was enhanced, the defect in material could be accurately located and quantified.

**Keywords:** Time of flight diffraction method; Synthetic aperture focusing algorithm; Defect recognition; SAFT reconstruction

超声衍射时差法(TOFD)是通过接收缺陷端部的衍射信号对缺陷进行检测的方法<sup>[1]</sup>。TOFD 技术可以对焊缝中缺陷的位置以及尺寸进行判定,被证明是最适合检测裂纹类面状缺陷的方法<sup>[2]</sup>。利用该方法进行 D 扫描时,由于换能器的声束有一定的覆盖范围,即使缺陷不在两个换能器连线的中垂线上,在缺陷附近很大范围内的 A 扫信号中仍然会含有缺陷的冗余信息,从而致使 TOFD 图像的横向分辨率很低,无法对缺陷进行准确地定位和定量<sup>[3]</sup>。

合成孔径聚焦算法(SAFT)最先用于合成孔径雷达技术,用以提高雷达图像的横向分辨率,其优势在于即便在低指向性和低工作频率下,依然可以获得很高的方位分辨率<sup>[4]</sup>。目前,该算法逐渐在超声无损检测领域得到了发展和应用。

笔者根据 TOFD 技术的 D 扫描过程中换能器对和缺陷端部的动态几何关系<sup>[5]</sup>,建立了 D 扫描图像的 SAFT-D 算法的数学模型,并以该模型为基础,基于信号的延时同相叠加原理,设计了 D 扫描图像的合成孔径聚焦算法<sup>[6]</sup>。试验结果表明,通过 SAFT-D 聚焦算法,有效地实现了 D 扫描图像的重建以及缺陷的精确定位和定量,显著地提高了图像

收稿日期: 2011-05-18

作者简介:周靖宇(1981—),男,工程师,主要从事超声模拟、数字电路设计及信号处理方面的研究。

的横向分辨率。

## 1 试块及检测系统

用电火花加工方法在高强铝合金试块底面制作了不同深度的人工窄槽来模拟焊缝中的横向缺陷。采用无偏置 D 扫描方式,扫描方向平行于窄槽方向。试验所用工件、探头布置以及扫描方向如图 1 所示。D 扫描图像利用 CTS-1008 plus TOFD 探伤设备获取,系统采样频率为 160 MHz。所用探头为一对 TOFD 探头,其晶片直径为 6 mm,中心频率为 5 MHz,声束在工件中的折射角为  $60^\circ$ 。探头与工件之间采用机油耦合。

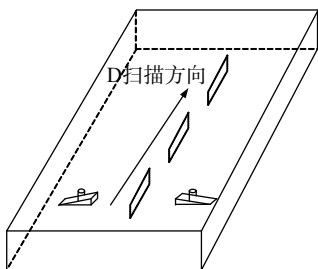
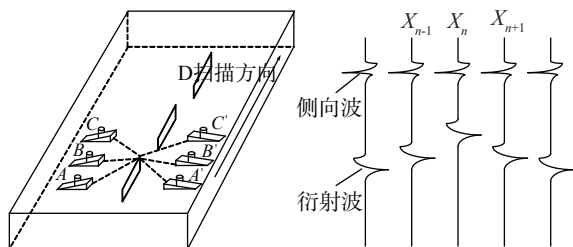


图1 超声 TOFD 法的 D 扫描方式

## 2 超声 TOFD 法 D 扫描工作原理

超声 TOFD 法 D 扫描图像由一系列 A 扫描信号依次排列构建而成,其生成过程见图 2。当探头对在  $A-A'$  位置时,系统收到窄槽尖端衍射出来的 A 扫描信号  $X_{n-1}$ ;当探头对平行焊缝经过一个步长  $\Delta S$  扫描至位置  $B-B'$  处,此时窄槽端部在两探头连线的中垂线上,系统收到衍射 A 扫描信号  $X_n$ ;当探头沿着扫描方向再经过一个步长到达  $C-C'$  处,系统收到窄槽尖端的 A 扫描信号为  $X_{n+1}$ 。由图 2 所示的探头对和缺陷端部构成的几何关系可以知道,当探头对处于  $B-B'$  位置时,缺陷的衍射 A 扫描信号  $X_n$  比其两侧的衍射信号更早接收到。很明显,在  $B-B'$  位置接收到的衍射信号  $X_n$  才能真正地为定位



(a) 路径图

(b) 波形图

图2 D扫描图像生成示意图

裂纹端部的深度以及横向位置提供准确的信息。由上面整个过程可以看出,探头对不在缺陷的正上方时,系统同样可以接收到同一缺陷的 A 扫描信号,因此这一系列 A 扫描信号在形成 D 扫描图像时,就导致了 D 扫描图像分辨率很低的问题,而无法准确定位缺陷的深度以及横向位置。

## 3 D 扫描图像的 SAFT-D 重建算法数学模型

将图 2 中探头对与缺陷相对位置关系的几何模型简化,如图 3 所示。

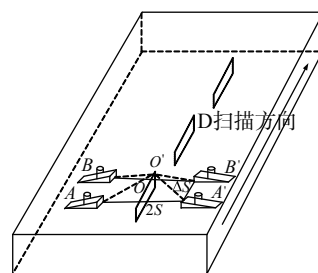


图3 探头对和缺陷端部的几何位置关系

图中  $2S$  为两探头声发射点间距; $O \sim O'$  为缺陷埋深尺寸  $d$ ;  $\Delta S$  为探头对扫描步长。当探头对处于缺陷正上方  $B-B'$  时,接收到缺陷尖端  $O'$  处的衍射信号时间为:

$$t_n = \frac{O'B + O'B'}{c} = \frac{2\sqrt{S^2 + d^2}}{c} \quad (1)$$

当探头对处于  $A-A'$  位置时,接收到缺陷尖端  $O'$  处的衍射信号时间为:

$$t_{n-1} = \frac{O'A + O'A'}{c} = \frac{2\sqrt{\Delta S^2 + S^2 + d^2}}{c} \quad (2)$$

将式(1)和(2)进行推广。对于两探头偏离缺陷正上方  $k$  个扫描步长处获得的 A 扫描信号  $X_{n+k}$ , 计算其衍射波去除探头延迟的到达时间相对于  $t_n$  的延迟量  $\Delta t_{n+k}$ 。延迟公式如下:

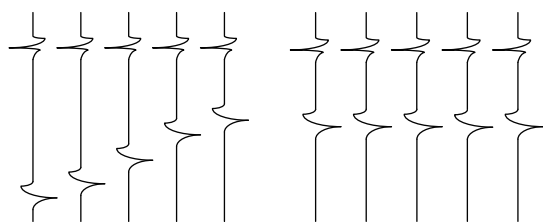
$$\begin{aligned} \Delta t_{n+k} &= t_{n+k} - t_n \\ &= \frac{2(\sqrt{(k\Delta S)^2 + S^2 + d^2} - \sqrt{S^2 + d^2})}{c} \quad (3) \end{aligned}$$

在进行 SAFT 时移运算时,按上述求得的延迟量对参与 SAFT 运算的 A 扫描信号分别进行相应的时移。以侧向波信号出现的时间为参考,SAFT 运算采用加窗处理。窗宽为参与平移求和运算的 A 扫描信号的个数;窗高选取侧向波开始,到变形波的底波结束。对 D 扫描图像,窗内的 A 扫描信号逐一做 SAFT 处理,其数学表达式为:

$$X_n(t_n) = \frac{1}{N+1} \sum_{i=n-\frac{N}{2}}^{n+\frac{N}{2}} X_i(t_i - \Delta t_i) \quad (4)$$

式中  $X_n(t_n)$  为衍射波到达时刻为  $t_n$  的 A 扫描信号  $X_n$  经过 SAFT 处理后的返回信号;  $N$  为参与  $X_n$  SAFT 运算其两侧 A 扫描信号的个数, 因此所加的窗宽度即为  $N+1$ ;  $X_i(t_i - \Delta t_i)$  为经过时移处理后的第  $i$  个 A 扫描信号,  $\Delta t_i$  为相应的时移。

分别对  $X_{n-1}$  和  $X_n$  两 A 扫描信号进行 SAFT 时移运算, 运算结果如图 4。对于偏离两探头连线中垂线处获得的 A 扫描信号, 其时移运算结果会导致运算窗内各 A 扫描信号的缺陷衍射波梯队分布, 如图 4(a) 所示。通过窗内各 A 扫描信号叠加及平均运算后, 缺陷信号的幅值会很弱, 甚至趋于零。对于在两探头连线中垂线处获得的 A 扫描信号, 其 SAFT 时移运算使窗内各 A 扫描信号的缺陷衍射波在相同的时刻到达, 如图 4(b) 所示。通过各 A 扫描信号叠加及平均运算后, 缺陷信号的幅值仍然很强。



(a) 对  $X_{n-1}$  进行运算 (b) 对  $X_n$  进行运算

图 4 A 扫描信号的时移结果示意图

## 4 检测结果

对试块中的各个模拟缺陷实施 TOFD 法的 D 扫描, 扫描参数为: 两探头声入射点间距  $2S = 64$  mm, 扫描步长  $B = 0.47$  mm, 数据纵向精度  $A =$

0.22 mm。

图 5(a) 为试块的原始 D 扫描图像, 图像包含信息有侧向波、缺陷回波、底面波以及变形波部分。

对图 5(a) 的原始 D 扫描图像进行 SAFT-D 重建处理。假设运算窗宽度用 win 表示, 运算窗宽度分别设置为 15 和 31。重建结果如图 5(b) 和 (c) 所示。图中显示, 原始 D 扫描图像窄槽两端都出现半抛物线状的圆弧, 这些干扰信息使得窄槽的两端很难去判断, 给准确测量窄槽的长度带来了很大的问题。而且图像中含有大量的高频噪声, 有可能会湮没图像中弱的回波信号, 从而影响对于有用弱信号的判断。SAFT-D 重建后的图像中, 随着聚焦孔径的增大, 图像中窄槽两端半圆弧状的干扰信息已经基本上被完全抑制掉了, 提高了图像的横向分辨率, 并且有效消除了原始图像中的高频噪声。

图 5 的重建结果表明, SAFT-D 算法的聚焦效果受聚焦孔径大小即所加运算窗宽影响, 孔径越大, 聚焦效果越理想。但是, 随着孔径的增加, 聚焦算法的运算量也将增加。综合以上, 经过多次测试试验, 实际处理过程中 SAFT-D 算法的聚焦孔径选取 30~40 之间比较理想。

## 5 结论

(1) 建立了超声 TOFD 法 D 扫描图像的 SAFT-D 算法的数学模型, 为实现 TOFD 图像的合成孔径聚焦重建提供了依据。

(2) 提出的 SAFT-D 算法选取的窗宽和高可调, 既可以对整个 D 扫描图像区域进行全局聚焦, 也可以对局部感兴趣特征区域进行局部聚焦, 且算法已经进行了最优化处理, 实现了实际意义上的一键 SAFT 功能。



(a) 原始 D 扫描图像

(b) win=15

(c) win=31

图 5 试块的原始 D 扫描图像和 SAFT-D 处理后的图像

(下转第 83 页)



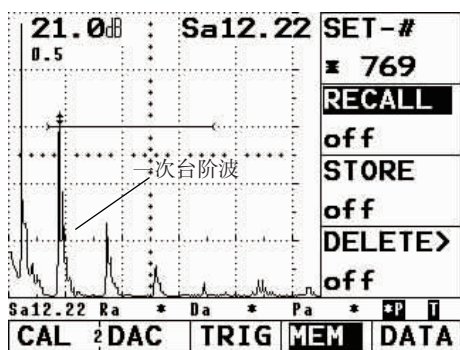


图3 5P6直探头检测时螺栓六角头下端面无缺陷处最强台阶波显示图

述分析的正确性,说明 5P6 直探头能够有效发现 A 点处存在的 1 mm 深横向裂纹,从而弥补了小角度纵波探头的不足。

### 3 结论

综上所述,联合使用 5P8×12 的 12°纵波斜探头和 5P6 直探头可实现对燃机过渡段螺栓原位超声波检测,及时发现螺栓各个位置上可能存在的深

(上接第 61 页)

(3) 该算法在消除 TOFD 图像干扰信息的基础上,还可以起到平滑滤波、消除图像噪声的效果,提高 TOFD 图像的信噪比。

(4) 总结出 SAFT-D 算法的聚焦效果与聚焦孔径以及算法复杂度之间的关系。聚焦孔径越大,聚焦效果越好,运算复杂度越高。

#### 参考文献:

- [1] 迟大钊,刚铁,袁媛,等.面状缺陷超声 TOFD 法信号和图像的特征与识别[J].焊接学报,2005,26(11):1—4.
- [2] Sicard R, Goyette J, Zellouf D. A SAFT algorithm for lamb wave imaging of isotropic plate-like structures

(上接第 66 页)

#### 3.2 方法 2

完成探头入射点、K 值测试、水平比例调节后,将探头置于对比试块上,在一次波水平位置附近找到  $\phi 1.6$  mm 竖通孔下表面 N5 刻槽最高反射回波,使其达基准高度 80%,记为曲线上第一点。固定增益不动,在三次波水平位置附近找到  $\phi 1.6$  mm 竖通孔下表面 N5 刻槽最高反射回波,此波在示波屏

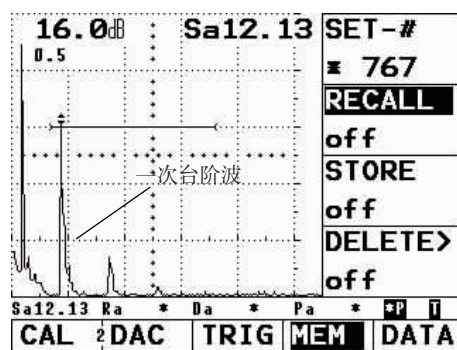


图4 5P6直探头检测时螺栓六角头下端面1 mm深模拟裂纹处最强台阶波显示图

度 1 mm 及以上的横向裂纹。

#### 参考文献:

- [1] 李树军.底波遮挡法在螺栓超声波探伤中的应用[J].河北电力技术,2001,1(20):45—49.
- [2] 夏纪真.液压缸紧固螺栓的原位超声波探伤[J].无损探伤,1999(1):40—41.
- [3] 刘英和,康泰.游乐设施高强度螺栓小角度纵波探伤[J].无损检测,2005,2(27):105—109.
- [3] Schmitz V, Chakhlov S, Müller W. Experiences with synthetic aperture focusing technique in the field[J]. Ultrasonic,2000(37):731—738.
- [4] Spies M, Jager W. Synthetic aperture focusing for defect reconstruction in anisotropic media[J]. Ultrasonics,2003(41):125—131.
- [5] Elbern A W, Guimar L. Synthetic aperture focus technique for image rectauration[J]. NDT Net, 2000, 5 (8):83—89.
- [6] Johnson A J, Barina B A. The effects of surface mapping corrections with synthetic-aperture focusing techniques on ultrasonic imaging[J]. IEEE Trans,1983,30 (5):432—439.

上高度为 19%,记为曲线上的第二点。用线连接这二点, $\phi 1.6$  mm 竖通孔 DAC 曲线制作完成(图 5)。

比较两种方法制作的 DAC 曲线,发现两者曲线弧度相当,而且后者操作方法更简便,值得在实际工作中推广使用。

#### 参考文献:

- [1] ANSI/API Specification 5L 管线钢管规范[S].