DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.004

基于改进型正交匹配追踪的 TOFD 重叠信号分离研究*

刘 琨[1],罗福兴[2*],杨克己[3],于 刚[3]
(1. 天津钢管集团股份有限公司,天津 300301;2. 杭州浙达精益机电技术股份有限公司,浙江 杭州 311121;
3. 浙江大学 现代制造工程研究所,浙江 杭州 310027)

摘要:针对在使用超声衍射时差技术检测焊缝时,对于薄壁试件、近表面或尺寸较小的缺陷,各回波波形之间容易发生重叠和给波达时间的测量带来困难的问题,基于 Gabor 函数,对传统的正交匹配追踪算法的优化进行了研究,建立了超声 TOFD 检测信号特征信号库。利用波形的相似性从特征信号库中选择了与检测信号相匹配的最优原子,实现了重叠信号分离以及检测信号稀疏化,设计了超声 TOFD 实验系统,并对带有人工缺陷的试块进行了相关实验验证。研究结果表明,该技术能够有效分离重叠信号并精确测量超声波波达时间,缺陷测量误差小于 0.28 mm。

关键词:TOFD;重叠信号;波达时间;正交匹配追踪;稀疏技术
中图分类号:TG115.28;TH878 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-4551(2016)10-1176-06

Separation method for overlapping TOFD signals based on improved orthogonal matching pursuit

LIU Kun[1], LUO Fu-xing[2], YANG Ke-ji[3], YU Gang[3]
(1. Tianjin Pipe Group Corporation, Tianjin 300301, China;
2. Hangzhou Zheda Jingyi Electromechanical Technology Corporation Limited, Hangzhou 311121, China;
3. Institute of Modern Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that using Time of Flight Diffraction(TOFD) was difficult to measure the arrival time of ultrasonic signals of welds and overlapping between echo waveforms of thin-wall specimens, near-surface defects and small size defects, optimization of traditional orthogonal matching pursuit (OMP) was studied and the characteristic signals library of ultrasonic TOFD detection signals were built based on the Gabor function. Separation and rarefaction of overlapped detection signals were implemented by using the similarities of waveforms to choose the best matching Gabor atoms from characteristic signals library. An ultrasonic experimental system was established to do the confirmatory tests of artificialspecimens. The results indicate that the arrival time of ultrasonic signal is measured accurately and the overlapped signals is separated with errors of less than 0.28 mm.

Key words: TOFD; overlapping signals; arrival time; orthogonal matching pursuit; sparse technique

0 引 言

超声波衍射时差技术(time of flight diffraction, TOFD)是一种在能源石化、冶金制造、交通航空等领域广泛应用的一种超声无损检测技术[1-2],其基本原理为超声波衍射。凭借高效率、高灵敏度、高精度和

收稿日期:2016-05-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175465)
作者简介:刘 琨(1983-),男,天津人,助理工程师,主要从事冶金设备管理方面的研究. E-mail:liukun_520333@163.com
通信联系人:罗福兴,男,高级工程师. E-mail:luofuxing@jingyitech.com

易于实现自动化等优点,该技术在无损检测领域尤其是焊缝检测中占用重要的地位。1996 年,美国推出的标准[3]规定,在特定情况下,超声 TOFD 检测技术可作为射线检测的替代。近年来,超声 TOFD 技术发展迅速、应用日益广泛,在焊缝检测领域大有替代传统射线检测的趋势,日渐成为焊缝质量定量化评估的主要手段。

超声 TOFD 技术检测探头为一组纵波斜探头,一个为发射探头,一个为接收探头,两个探头的基本参数相同[4]。发射探头向被检区域内部发射一个声波,如果不存在缺陷,接收探头接收到的第一个超声信号为声波沿着被检区域表面传播的直达波(Lateral Wave),第二个波包表示经试件底面反射的底面反射波(Back Wall Reflection)。若检测区域内存在缺陷,则在两个波包之间存在波包表示由缺陷上、下尖端产生的衍射波(Upper Tip Wave & Lower Tip Wave)。由衍射波与直达波的到达时间之差可以计算出缺陷的上、下尖端的深度,从而获得缺陷的深度方向的尺寸信息。当试件壁厚过薄,缺陷接近表面或者缺陷尺寸过小时,超声 TOFD 检测信号各波包之间容易发生重叠,给波达时间的测量带来困难。由此可见,对于超声 TOFD 信号重叠信号分离技术并精确测量波达时间的研究具有重要的理论与现实意义。

本研究基于 Gabor 函数,对传统的正交匹配追踪算法的优化进行研究。

1　超声 TOFD 信号分析及特征信号库的建立

为了加大扫查范围以及更全面地捕捉被检区域内的超声衍射信号,超声 TOFD 检测过程中通常会选择扩散角较大的超声探头使声波覆盖更大的区域。这是其与一般的超声脉冲检测方法的重要区别所在。但是,超声探头发射的超声波并不是单频的,而是在一定的带宽范围内。超声信号中声波的边界角与频率成反比,即低频成分相对于高频成分分布的范围更大[5]。所以在试件内的不同传播路径上,超声 TOFD 信号的频率成分不一致,存在一定差异。这种差异性使得接收到的超声信号的纵向分辨率随着传播路径的不同而存在差异,为精确测量波导的到达时间带来困难。已有的超声波达时间测量方法有互相关法、反卷积技术、隐藏信号识别法等等[6-8]。对于超声 TOFD 检测信号,由于信号频率成分差异性的存在,常规的信号处理方法的应用无法取得较好的效果。

包含超声 TOFD 检测信号特征的完备的特征信号库是进行正交匹配追踪算法的基础。假设回波信号是一个时移、相变且能量衰减的正弦信号,其时频原子 Gabor 函数的形式[9]如下:

$$g(\theta,t) = K_\theta e - \left(\frac{t-\tau}{s}\right)^2 \cos[2\pi f(t-\tau) + \phi] \tag{1}$$

式中:$\theta = (s,\tau,f,\phi)$;s— 在频域上表示带宽系数,时域上表示信号的周期数;τ— 信号在时域内的延时;f— 中心频率;ϕ— 波形相位;K_θ— 归一化系数,使得 $g(\theta,t)$ 的二阶范数等于 1,即 $\|g(\theta,t)\|_2 = 1$。

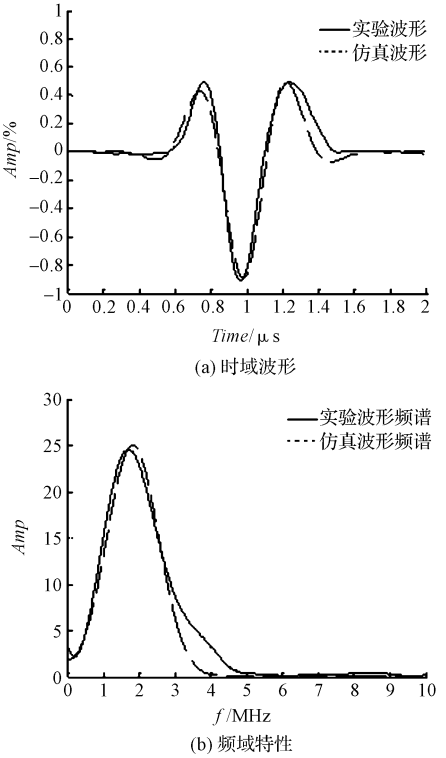


图 1　实验信号(实验)和仿真信号(虚线)

实线 — 没有缺陷时直达波的时域波形及其频谱;虚线 — 基于 Gabor 函数的仿真信号的近似波形及频谱

本研究实验中采用的超声 TOFD 探头参数如下:压电晶片直径为 6 mm,探头中心频率为 5 MHz,楔块折射角为 60°。试块参数如下:厚度为 30 mm,材料为 45# 钢。使用上述探头对试块做检测实验,实验结果如图 1 所示。经过多次尝试,当 Gabor 函数各参数的取值为 $s = 1.85 \times 10^{-7}$、$f = 1.8$ MHz、$\tau = 100$ 和 $\phi = \pi/200$ 时,仿真信号与实验信号的残差的能量占实验信号的百分比为 3.21%。由图 1 可知,由 Gabor 原子得到的仿真波形与实验波形匹配得很好,证明了 Gabor 原子对超声 TOFD 信号具有良好的表征能力。

本研究确定 Gabor 原子的 4 个参数的上、下限,并将它们离散化,即可建立相应的特征信号库。各参数设

置如下：

(1) 中心频率 f

中心频率 f 在一定范围内变化，其上下限($f_{\min}$，$f_{\max}$) 由以下公式得到：

$$f_{\min} = \min_f\{|Y(f)|\} \geqslant \alpha \cdot \max|Y(f)|\}$$

$$f_{\max} = \max_f\{|Y(f)|\} \geqslant \alpha \cdot \max|Y(f)| \quad (2)$$

式中：$|Y(f)|$ — 发射探头产生的声场中心的声波的频域幅值；$\alpha(0 < \alpha < 1)$ — 频谱峰值的系数，人为调整系数，使得满足式子 $|Y(f)| \geqslant \alpha \cdot \max|Y(f)|$ 的 f 的取值范围覆盖所有超声 TOFD 信号的中心频率。再将该取值范围均匀离散化为 L 个点，即 $\{f(l)\}_{l=1}^{L}$。

(2) 带宽系数

带宽系数 s 的选择与中心频率 f 和振荡周期数 c 有以下关系：

$$s = \frac{c}{6f} \quad (3)$$

笔者选择 c 对 s 进行离散化。本研究根据探头的振荡周期数 c 的变化范围($c_{\min}$，$c_{\max}$)，对应于每一个离散化的中心频率 f，将带宽系数 s 均匀离散化为 M 个点，即 $\{c(m)\}_{m=1}^{M}$。

(3) 延时 τ

当延时 τ 的时间间隔设为系统 A/D 的采样间隔时，测量精度达到最高。设检测系统 A 扫描波形数据有 N 个点，则 τ 的变化范围为 $\{\tau(n)\}_{n=1}^{N}$。

(4) 相位 ϕ

通常相位的变化范围为 $[0,2\pi)$，本研究中取其变化范围为 $[0,\pi)$。因为若其他参数相同，相位 $[\pi,2\pi)$ 的信号可以由相位 $[0,\pi)$ 信号的反相变换得来，即乘以系数 -1 就可以得到。将相位 $[0,\pi)$ 离散成 P 个点，即 $\{\phi(p)\}_{p=1}^{P}$。

以上即可得到构建的特征信号库，库内包含的 Gabor 原子个数为 $L \times M \times N \times P$。不管超声 TOFD 检测的回波信号是怎样的频谱结构，都可以用特征信号库中的原子表示出来。

2 改进型正交匹配追踪算法

2.1 正交匹配追踪算法

匹配追踪算法(matching pursuit, MP) 的基本原理是根据给定的特征信号库，对信号进行原子分解[10]。算法的基本思想是残量迭代逼近，通过有限次数的迭代使得残差趋近于零，从而将原始信号分解成多个原子的组合，这些原子是选择出的与原始信号的特征最匹配的最优原子，原始信号与原子所得的残差信号与原子求得的内积最大的原子为最优原子，此为最优原子的选择标准。与传统的基函数展开相比，该方法最大程度地保留了原始信号的特征信息，将信息损失最小化的同时还可获得原始信号的稀疏化表示，显著提高信号的纵向分辨率。正交匹配追踪算法(orthogonal matching pursuit，OMP) 是匹配追踪算法的一种改进型[11-12]，算法的流程如图 2 所示。

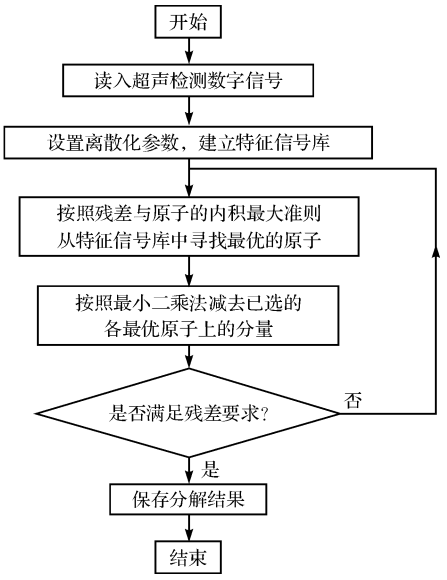


图 2 正交匹配追踪算法流程

首先，本研究根据原始信号的特征，建立相适应的特征信号库，然后从中根据残差与原子内积最大的原则从特征信号库中寻找最优原子。然后利用最小二乘法计算原子的权重，使得迭代后计算所得的残差信号能量占原始能量的百分比最小。迭代停止的要求为残差信号所占的能量百分比小于预设的阈值。相比与传统的 MP 算法，OMP 算法的优点在于运算速度快，易收敛，对于原始信号的重构效果更好。

2.2 改进型正交匹配追踪算法

两个时域发生重叠的回波信号及其频谱如图 3 所示，信号 1 与信号 2 分别用虚线与点线表示，两者的重叠信号用实线表示。两个回波信号是利用不同的参数的 Gabor 原子模拟生成的。

由图 3(b) 可知，波形 1 与波形 2 的频谱不完全相同，存在一定的混叠现象。采用传统的滤波或者反卷积技术处理这种存在混叠现象的频谱特性的信号无法取得理想的效果。当使用传统的 OMP 算法，通常只会选择一个原子来匹配该信号，使重建结果存在明显错误。从图 3(a) 中可以发现，两个回波信号除了存在一定范围的信号重叠外，各自任有一部分独立的区域(矩形框中所示) 没有发生重叠，这部分区域可从特征信号

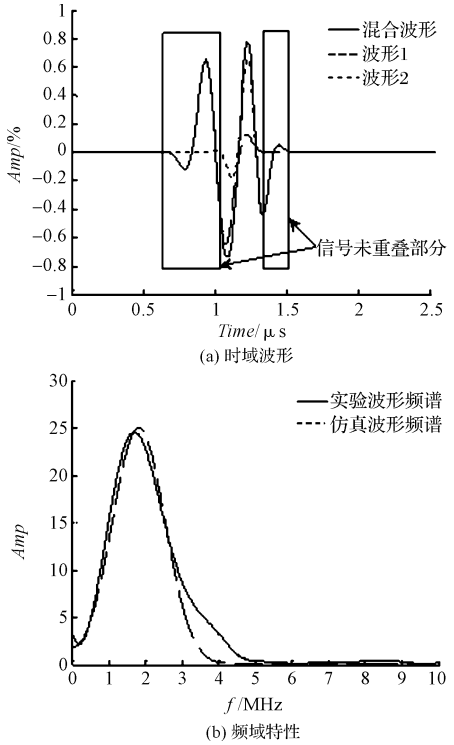


图 3　混叠信号分离方法示意图

实线 — 混叠信号;虚线 — 信号 1;点线 — 信号 2

库中选取单个原子进行匹配。基于以上,本研究提出一种改进型正交匹配追踪算法(improved orthogonal matching pursuit,IOMP),能够有效实现时域上重叠信号的分离。

假设存在某个 Gabor 原子与未重叠区域的信号完全匹配,那么经过一次迭代后,残差信号 $r(t_i)$ 中非零的点数将有所减少。由于超声检测过程中存在噪声干扰,本研究提出的参考标准如下:

$$\| r \|_{\xi} = \sum_{i=1}^{N} | r(t_i) |^{\xi}, 0 < \xi < 1 \qquad (4)$$

公式(4) 中,取 $\xi = 0$, $\| r \|_0$ 可表示残差信号 $r(t_i)$ 中的非零点数,取 $\xi \in (0,1)$,信号中的存在的噪声干扰可以被消除掉。同时也满足上文中提到的理论要求,$\| r \|_{\xi}$ 被定义为相似参数当被选择的原子经过迭代后残差的 L2 范数($\| r \|_2$)最小时,认为其为最优原子,此为正交匹配追踪算法的最优原子选择准则。OMP 算法中应用该准则,对于重叠信号的分离效果将被显著改善。首先,笔者设定某一阈值,迭代开始前,根据与残差信号的内积大于设定阈值的原则,从特征信号库中选取多个原子,然后计算被选择原子的相似参数。从中选择 $\| r \|_{\xi}$ 最小的原子。根据以上两个过程被选出的最优原子不仅能使迭代后的残余信号所包含的能量减少,同时可以最优匹配信号中的未重叠区域。

Step1。r_z 表示残差信号,下标 z 表示迭代的次数;第一次迭代时,输入信号即为原始信号,即 $r_0 = y$,开始迭代后每一次迭代得到的残差信号即为下一次迭代的输入信号。

Step2。通过公式 $c = r_{z-1} \cdot g$ 计算输入信号与特征原子库中所有原子的内积;根据预先设定的阈值 H,$H = (k \| r_{z-1} \|_2)/N, 2 \leqslant k \leqslant 3$[13]。从原子库中选出所有内积大于阈值 H 的原子,得到一个新的库 g_i,即 $g_i = \{p: | c \geqslant H | \}$。

Step3。当 g_i 不为空集时,通过公式 $\| r_i \|_{\xi} = \| r_{z-1} - c_i \cdot g_i \|_{\xi} (0 < \xi < 1)$ 计算 Step2 中选出的每一个原子的相似参数,其中相似参数最小的原子即为最优原子。当 g_i 为空集时,所有原子中计算得到的内积 c 最大的原子即为最优原子。

Step4。利用选出的最优原子,使用最小二乘法获得最优系数,使得运算之后的残差信号能量最小,相减后可得到本次迭代的残差信号 r_z(亦为第 $z+1$ 次迭代的输入信号)。至此,完成一次迭代。

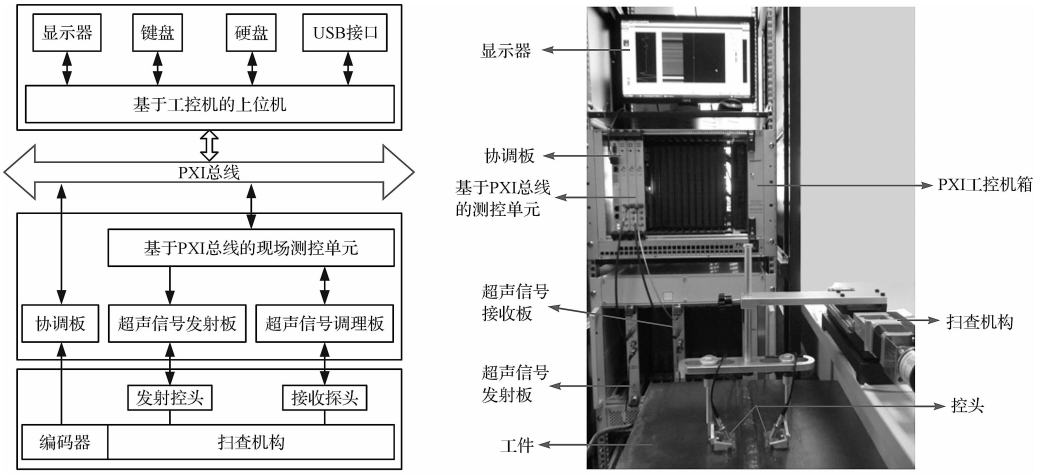
Step5。迭代停止的标准为迭代后的残差信号的能量值小于预先设定值 ϵ,即当满足 $\| r_z \|_2 < \epsilon$ 时,迭代停止,否则重返 Step1,重复 Step1 ~ Step4 的过程。

改进方法与原方法的不同之处在于 Step2 和 Step3。本研究在 Step2 选择原子要求放宽,设定了阈值,选择若干个内积大于阈值的原子而非单个内积最大的原子;Step3 从 Step2 中选择的若干个原子中再根据相似参数最小原则选择最优原子。改进型算法选择的过程增加使收敛速度下降,但是显著提高了算法寻找信号中非重叠区域的能力。

3　实验研究

3.1　实验系统

本研究中设计的检测实验系统的方案框图以及实物如图 4 所示。整个系统由超声信号发射与接收模块、协调模块、调理模块、现场测控单元、上位机与扫查执行机构等组成。整个系统的工作过程如下:在设定好扫查路径后,扫查执行机构带动一组超声收发探头沿着预设路径以一定速率运动,同时编码器产生探头组的位置信号,该信号被协调模块转换成当量脉冲,该脉冲触发现场测控单元,测控单元控制超声发射模块产生一个激励脉冲,该激励脉冲驱动超声发射探头产生超声波进入被测对象,超声波在被测对象内传播后由接收探头接收得到检测信号。检测信号通过放大处理后,经过 A/D 转换从模拟信号变成数字信号,然后进入上位机进行后续的处理与分析。



(a) 框图 (b) 实物图

图 4 实验系统框图及实物图

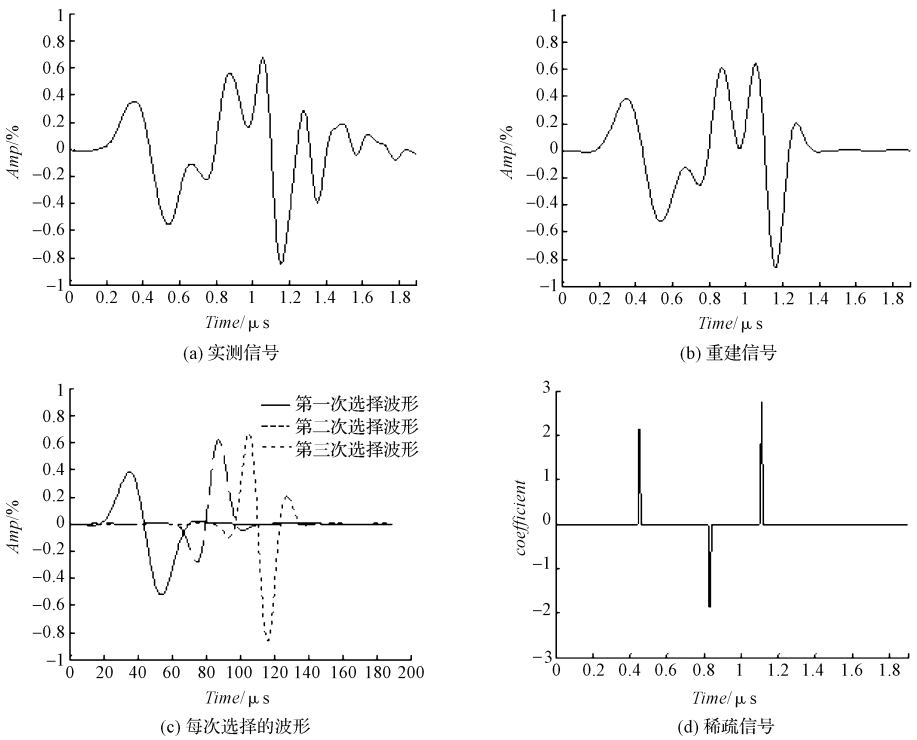
3.2 实验及结果分析

为通过实验验证所提出的算法的有效性,本研究设置两种包含不同类型的人工缺陷的被测试块:一种设置有近表面缺陷,使检测信号中存在直达波与缺陷衍射波的重叠;第二种设置小尺寸缺陷,使检测信号中存在缺陷的上下两端的衍射波重叠。试块参数如表 1 所示。本研究通过 IOMP 算法处理检测信号,测量每个特征波包信号的到达时间并计算缺陷的埋藏深度。

表 1 被测试块参数表

缺陷类型	试块材料	缺陷类型	缺陷直径/mm	中心深度/mm
近表面缺陷	铝合金	横通孔	2	8
小尺寸缺陷	45#钢	底面孔	2	5
	45#钢	横通孔	1	16

铝合金试块的超声 TOFD 检测信号经预处理后的结果如图 5(a)所示,本研究使用的一对发射探头与接收探头之间的中心距为 60 mm。由图 5(a)可知,缺陷的上下两端的超声衍射波与沿着试件表面传播的直达波发生了部分重叠,无法有效地识别出每个信号的波峰(直达波的第一个波峰除外),如此情况下,使用峰值法测量每个信号的到达时间会有较大的测量误差。如果采用传统的 OMP 算法,其在选择原子进行匹配过程中很有可能会把这个多信号重叠的波包当做一个来进行匹配,往往导致结果出错。采用 IOMP 算法,重建信号、每次迭代的匹配信号的波形,以及重建后的稀疏化信号如图 5(b)、5(c)和 5(d)所示。经过 3 次迭代



(a) 实测信号 (b) 重建信号

(c) 每次选择的波形 (d) 稀疏信号

图 5 IOMP 方法实验信号处理结果

后,残余信号所占的能量百分比为 5.52%。重建信号完整地保留了原始信号的基本特征,图 5(d)中的稀疏化信号实现了缺陷的上、下两端的衍射波信号与直达波信号之间的有效分离,信号的符号特性表示之间的相位关系。根据稀疏化信号中的每个信号的到达时间,可计算得缺陷的上端的埋藏深度为 6.79 mm,下端深度为 8.93 mm。计算结果与实测深度能够很好地吻合。

各试件中设置的人工缺陷测量结果如表 2 所示。

表 2　人工缺陷测量结果

缺陷类型		缺陷深度/mm	IOMP 算法测量深度/mm	IOMP 算法测量误差/%
近表面缺陷	底面孔	5.0	5.18	3.6
	横通孔	上端　7.0	6.79	3.0
		下端　9.0	8.93	1.1
小尺寸缺陷	横通孔	上端　15.5	15.22	1.8
		下端　16.5	16.23	1.6

实验结果表明,对于深度缺陷,IOMP 算法的测量误差小于 1.8%,对于近表面缺陷,IOMP 算法的测量误差小于 3.6%(深度小于 12 mm 认为是近表面)。综上可知,IOMP 算法能够实现 TOFD 检测信号中重叠部分的有效分离,对于缺陷埋藏深度的测量精确度高。

4　结束语

为了改善超声 TOFD 检测技术的纵向分辨率,从而将超声 TOFD 技术的应用范围拓展到薄壁工件和近表面缺陷的检测,本研究在分析了 TOFD 检测技术基本原理及其超声检测信号特征后,提出了一种改进型正交匹配追踪算法。基于 Gabor 函数,本研究建立超声 TOFD 检测信号的特征原子库,利用原子与检测信号波形的相似性实现信号重叠部分的有效分离。通过设计的试验系统以及预设特定缺陷的人工试件进行的实验表明,本研究提出的算法能够实现信号重叠部分的有效分离并准确测量各回波信号的波达时间,对于缺陷的埋藏深度的测量误差不大于 0.28 mm。

参考文献(References):

[1] 张　平. 超声衍射时差检测技术在中国的应用进展[J]. 无损检测,2008,30(7):397-402.

[2] DARMON M, FERRAND A, DORVAL V, et al. Recent modelling advances for ultrasonic TOFD inspections[J]. **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**,2015,1650(1):1757-1765.

[3] ASME code case 2235-9. Use of Ultrasonic Examination in Lieu of Radiography Section I; Section VIII, Divisions 1 and 2; and Section XII[S]. New York: ASME,2005.

[4] ISO10863. Nondestructive Testing of Welds: Ultrasonic Testing Use of Time-of-Flight Diffraction Technique (TOFD)[S]. Geneva: International organization for standardization, 2011.

[5] 中国工业检验检测网. TOFD 普及班培训教材[EB/OL]. [2013-01-15]. http://www.industryinspection.com.

[6] 乔华伟,杨克己. 基于小波变换的反卷积技术[J]. 工程设计学报,2007,14(5):369-373.

[7] 张　琦,阙沛文,雷华明. 一种新的超声无损检测回波信号的识别方法[J]. 上海交通大学学报,2006,40(12):2081-2084.

[8] BASKARAN G, BALASUBRAMANIAM K, KRISHNAMURTHY C V, et al. Ultrasonic TOFD flaw sizing and imaging in thin plates using embedded signal identification technique (ESIT)[J]. **Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring**,2004,46(9):537-542.

[9] MOR E, AZOULAY A, ALADJEM M. A Matching Pursuit Method for Approximating overlapping Ultrasonic Echoes [J]. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**,2010,57(9):1996-2004.

[10] 何明格,殷　鹰,林丽君,等. 基于小波迹和匹配追踪算法的超声波检测信号消噪[J]. 应用基础与工程科学学报,2011,19(2):297-304.

[11] 刘　冰,付　平,孟升卫. 基于正交匹配追踪的压缩感知信号检测算法[J]. 仪器仪表学报,2010, 31(9):1959-1964.

[12] BOβMANN F, PLONKA G, PETER T, et al. Sparse Deconvolution Methods for Ultrasonic NDT[J]. **Journal of Nondestructive Evaluation**,2012,31(3):225-244.

[13] DONOHO D L, TSAIG Y, DRORI I, et al. Sparse solution of underdetermined systems of linear equations by stagewise orthogonal matching pursuit[J]. **Information Theory, IEEE Transactions on**,2012,58(2):1094-1121.

[编辑:李　辉]

本文引用格式:

刘　琨,罗福兴,杨克己,等. 基于改进型正交匹配追踪的 TOFD 重叠信号分离研究[J]. 机电工程,2016,33(10):1176 – 1181.

LIU Kun, LUO Fu-xing, YANG Ke-ji, et al. Separation method for overlapping TOFD signals based on improved orthogonal matching pursuit[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(10):1176 – 1181.