

一种基于小波分析的多层粘接结构缺陷信号提取方法

余春华¹, 张有峰¹, 齐杏林¹, 赵志宁²

(1. 军械工程学院 弹药工程系, 石家庄 050003; 2. 总参炮兵训练基地, 宣化 075100)

摘要:为了检测钢板和多层橡胶材料粘接而成的复合材料中的脱粘缺陷, 采用了成熟的超声检测技术。对已有的超声波探伤仪进行了改造, 并利用高速采集卡和 LabVIEW 开发环境, 搭建了一套超声信号计算机采集分析系统。编程实现了对回波信号的采集, 并在 LabVIEW 中调用 Matlab 脚本节点对信号进行了 db7 小波分解和重构。对第一层橡胶下有无脱粘缺陷的试件进行了对比试验, 试验结果显示, 脱粘区和粘好区的信号重构后有显著差异, 表明该小波分析法可以有效地检测出第一层橡胶下的脱粘缺陷。

关键词:粘接结构; 超声检测; 小波分析

中图分类号: TB55; TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)05-0013-03

Research on an Extraction Method of Defect Signal of Multi-Layer Joint Based on Wavelet Analysis

YU Chun-Hua¹, ZHANG You-Feng¹, QI Xing-Lin¹, ZHAO Zhi-Ning²

(1. Department of Ammunition Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Artillery Training Base of General Staff, Xuanhua 075100, China)

Abstract: In order to detect the debond defect of multilayer metal-rubber adhesive joint, the mature ultrasonic detecting technique was used. By rebuilding an existing ultrasonic detecting instrument, utilizing a high speed data acquisition card and LabVIEW developing environment, an ultrasonic signal acquisition and analysis platform was successfully built. Echo signal acquisition was programmed. The signal was decompose and reconstructed utilizing db7 wavelet by Matlab script node in LabVIEW. A contrast experiment was carried out on two specimens having debond defect. The result shows that the reconstructed signals are remarkably different between areas bonded well and not, which indicates that the wavelet analysis method is effective in detecting the debond defect under the first rubber layer.

Keywords: Adhesive joint; Ultrasonic detection; Wavelet analysis

对于由钢板和多层橡胶类材料粘接而成的粘接结构的检测, 一直是无损检测领域的一大难点。将超声波检测技术应用于粘接结构的检测时, 由于橡胶材料的强衰减作用和受限于普通探伤仪固定的算法, 目前只能较好地检出第一界面的脱粘, 而对深层界面的缺陷难以发现。因此, 找出一种有效算法并实现该算法至关重要。笔者以某型固体火箭发动机

包覆质量检测为背景, 以由钢壳体、绝热层、包覆层粘接而成的方板为研究对象, 试图找到一种缺陷信号提取的算法。

1 检测平台的搭建

检测平台的超声发射和接收设备采用 SUFD2 数字超声波探伤仪。该型探伤仪增益达 110 dB, 支持 0.1~15 MHz 的横/纵波探头, 脉冲强度最高达 800 V, 脉冲宽度 50~1 000 ns 可调, 支持 LCD 实时回波显示, 带缺陷报警功能。SUFD2 可以通过自带

收稿日期: 2011-05-03

作者简介: 余春华(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为机电系统检测技术。

的 USB 接口导出波形数据,但导出的是经过 DSP 进行了 Hilbert 变换后的包络信号,而且数据点有限(220 个点),无法满足后续数据分析的要求。因此必须设法自己采集回波信号。

试验采用 ADLINK 公司的 PCI-9812 采集卡采集回波信号。PCI-9812 采集卡是 4 通道 12 位 20 MS/s 同步采样模拟输入卡,硬件可编程输入范围为 ± 1 和 ± 5 V,输入阻抗 $50\ \Omega$, $1.25\ \text{k}\Omega$, $15\ \text{M}\Omega$ 。板载 32k 采样点 A/D FIFO 缓存数据,带宽达 17 MHz,支持模拟和数字触发功能。

数字超声波探伤仪 SUFD2 的工作原理是:发射电路产生一个高压脉冲后,触发信号发生器随之产生一个由 $+3.3\ \text{V}$ 降到 $0\ \text{V}$ 的负脉冲,接通 ADC 的输入端,ADC 开始以 80 MS/s 的转换速率对回波信号进行 A/D 转换,转换结果送入 DSP 进行 Hilbert 变换求包络信号。为了从外部采集回波信号,必须拆开 SUFD2,找到触发信号输出端和 ADC 的模拟输入端,将其引出,分别作为 PCI-9812 的模拟触发信号源和采集信号源。检测系统总体框图如图 1 所示。

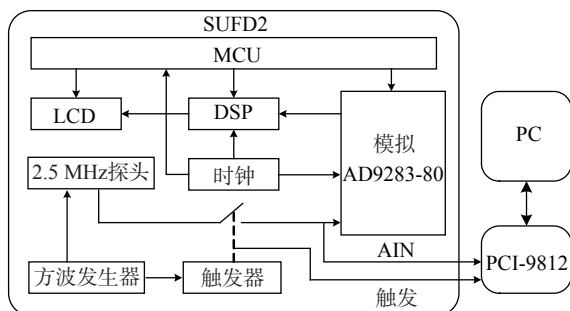


图 1 超声检测平台系统框图

2 LabVIEW 与 Matlab 混合编程

LabVIEW 是美国 NI 公司推出的面向测控系统的图形化编程语言,相比传统的文本编程语言(VB, VC, Delphi 等)来说具有编程效率高、开发速度快、数据流驱动的自动并行优化、库函数及各种软件接口丰富等优点,是开发中小型测控系统的理想平台。Matlab 是一款强大的数据分析软件,其自带的多种工具箱使它在多领域得到广泛应用。笔者主要用到它的 Wavelet toolbox 工具箱进行离散小波分解和重构。

$L^2(R)$ 空间中的函数 $f(t)$ 的连续小波变换 WT_f 被定义为^[1]:

$$WT_f(a, \tau) = \langle f(t), \psi_{a, \tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt$$

式中 $\psi_{a, \tau}(t)$ 是母小波函数 $\psi(t)$ 经过平移和伸缩变换得到的; ψ^* 表示其共轭函数; $WT_f(a, \tau)$ 为小波变换系数。函数一经小波变换,就意味着将一个时间函数投影到二维的 τ (时间)- a (尺度)平面上。连续小波变换的逆变换为:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \frac{da}{a^2} \int_{-\infty}^{+\infty} WT_f(a, \tau) \psi_{a, \tau}(t) d\tau$$

为便于计算机计算,通常将 a 和 τ 进行二进离散化处理,这样的变换称为离散小波变换,计算机用 Mallat 算法进行快速离散小波变换。

触发器引出线和 AIN 引出线分别接至 PCI-9812 的 0, 1 通道。0 通道设为模拟触发信号源,触发电平设为 1 V,触发信号到来后,采集卡采集 200 个数据点,然后保存以便后续处理。LabVIEW 编程如图 2 所示。

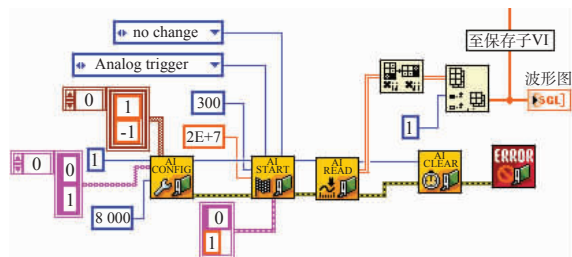


图 2 回波信号采集程序

采集得到的回波信号在保存的同时,调用 LabVIEW 中的 Matlab 接口对其进行小波分析:用 db7 小波将回波信号分解至第二层,然后重构第二层的高频信号^[2](图 3)。

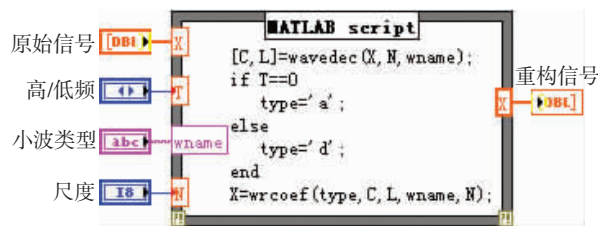


图 3 小波分解与重构程序

3 试验结果

试验对象是两块 $18\ \text{cm} \times 18\ \text{cm}$ 的方形试件 A 和 B,其规格见图 4。其中绝热层和包覆层由工厂提供,这两种材料都是橡胶类物质,绝热层主要成分为三元乙丙橡胶,包覆层主要成分是端羟基聚丁二烯。在绝热层和包覆层之间放置 $\phi\ 15\ \text{mm}$, 厚

0.1 mm的聚四氟乙烯^[3]小圆片,以模拟绝热层和包覆层之间的脱粘。探头采用 2.5 MHz 的直探头。对 A,B 试件的检测结果分别如图 5,6 所示。

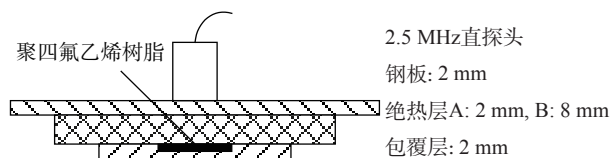


图4 试件模型

回波信号的小波分析通过 LabVIEW 中的 Matlab 接口完成。信号处理的关键有两点,即小波基函数的选取和分解层数的确定。

3.1 小波基函数的选取

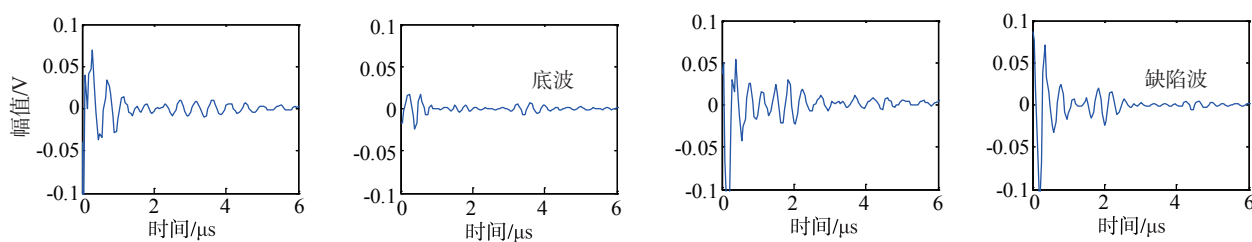
根据上一节的分析,选取的小波基函数应当与被分析函数中想要被提取的部分“貌似”,而回波信号是由若干超声脉冲叠加而成的。Daubechies 小波是最常用的小波族,该族小波的波形与超声脉冲非常类似,其中的 db7 小波的振荡次数与超声脉冲最为一致,因此选择 db7 作为小波基函数。

3.2 小波分解与重构层数的确定

分解与重构的层级与欲提取的频率区段有关。回波信号的幅值谱中,幅值最高点位于 2.1 MHz 频率处。根据离散小波变换所用 Mallat 算法的频带分解特点,即对于采样频率为 f_s 的信号,经二进离散小波分解至第 n 层后,得到的低频带为 $(0, f_s/2^{n+1})$,高频带为 $(f_s/2^{n+1}, f_s/2^n)$ 。试验中 $f_s =$

20 MHz,易知 2.1 MHz 位于第三层的高频带,即 $(1.25 \text{ MHz}, 2.5 \text{ MHz})$ 。因此,为了提取 2.1 MHz 附近的信号,将回波信号用 db7 小波分解至第三层,然后重构第三层的高频部分,所得结果如图 5 和 6 所示。

理论分析知,当粘结良好时,回波中除了始波外,只会有一次底波存在;若出现脱粘,则在始波和一次底波之间将会有缺陷波存在。图 5(a)可见,在 $[2.5 \mu\text{s}, 4.5 \mu\text{s}]$ 之间存在一次底波,但这个底波持续时间很长,很明显是受到了波形成分中其他频率分量的干扰;图 5(c)是存在脱粘缺陷的情形,图中除了始波外还有两个波峰,即缺陷回波 $[1.5 \mu\text{s}, 2.5 \mu\text{s}]$ 和一次底波 $[3.5 \mu\text{s}, 4.5 \mu\text{s}]$,其中缺陷回波因为靠近始波,受始波影响比较大,两者并不能完全区分开,又因为缺陷反射了大部分超声能量,所以一次底波较上图更微弱了,且持续时间仍然较长。经过小波分解和重构之后,如图 5(b)和(d),始波、缺陷回波、一次底波非常容易区分:未脱粘时,只有一次底波,位于 $[3.5 \mu\text{s}, 4.2 \mu\text{s}]$ 之间;脱粘时,除了有微弱的一次底波 $[4 \mu\text{s}, 4.5 \mu\text{s}]$ 之外,还有缺陷回波 $[1.8 \mu\text{s}, 2.2 \mu\text{s}]$,不仅底波和缺陷波的持续时间缩短,时间分辨率得到了提高,而且波形更加干净。对于绝热层为 8 mm 的情形(图 6),未脱粘时大约能看出底波的存在 $[2.5 \mu\text{s}, 6 \mu\text{s}]$,不过持续时间非常长;脱粘时始波、缺陷波、底波交杂在一起,根本没法区分。经过小波分解和重构之后,波形干净了,始



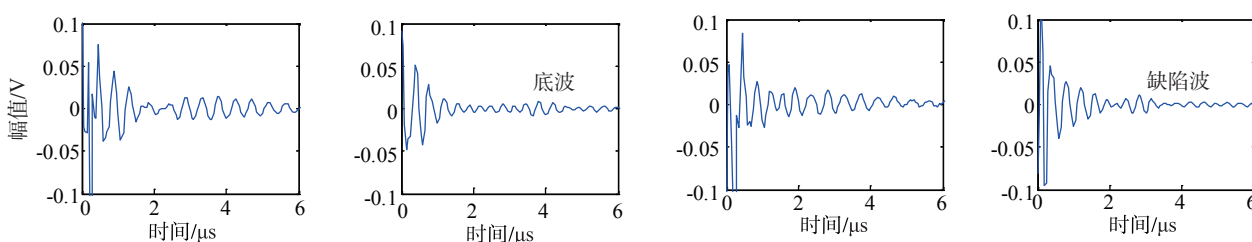
(a) 完好区原始信号

(b) 完好区重构信号

(c) 脱粘区原始信号

(d) 脱粘区重构信号

图5 试件 A 检测结果



(a) 完好区原始信号

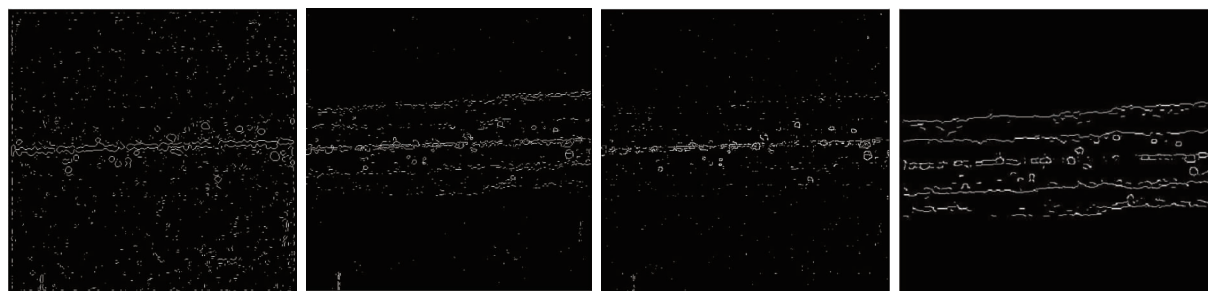
(b) 完好区重构信号

(c) 脱粘区原始信号

(d) 脱粘区重构信号

图6 试件 B 检测结果

(下转第 19 页)



(a) 高斯拉普拉斯算子

(b) Sobel 算子

(c) Robert 算子

(d) 小波模极大值法

图 5 不同算法处理后对比图

信息。试验表明,小波模极大值法能有效地将信号中含有的奇异信息提取出。对模极大值序列可进行阈值处理,可以避免奇异点出现“毛刺”或发生轻微振荡,但阈值的选择应谨慎,以免图像信息过于冗繁或丢失。

参考文献:

- [1] 张晓光,高顶. 射线检测焊接缺陷的提取和自动识别[M]. 北京:国防工业出版社,2004,10:2.
- [2] 山口裕治. 焊接缺陷引起的焊件断裂及其防止方法[J]. 国外机车车辆工艺,2008(1):12—16.
- [3] 张丽萍,黄廉卿. 工业 X 射线照相技术的应用与展望[J]. 光机电信息,2005(1):24—28.
- [4] 张晓光,林家俊. X 射线检测焊缝的图像处理与缺陷识

别[J]. 华东理工大学学报,2004,30(2):199—203.

- [5] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005:107—111.
- [6] 张旭东,詹毅,马永琴. 不同信号的小波变换去噪方法[J]. 石油地球物理勘探,2007,42(增刊):118—123.
- [7] 赵瑞珍. 小波理论及其在图像、信号处理中的算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2001.
- [8] Koley C, Purkait P, Chakravorti S. Wavelet-aided SVM tool for impulse fault identification in transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,21(3):1283—1290.
- [9] Daubechies I, Teschke G. Variational image restoration by means of wavelets: simultaneous decomposition, deblurring and denoising[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis,2005,19(1):1—16.

(上接第 15 页)

波、缺陷波和底波所在的时间段也一目了然。试验结果表明,经过小波分解和重构,不仅能有效提高回波信号中的缺陷波和底波信息,还抑制了其他杂波,即频率在(1.25 MHz,2.5 MHz)之外的分量,使波形更加干净,达到了预期的效果。

另外,从图 5 中还可注意到未脱粘和脱粘两种情形下底波所处时间区段并不一致,这是因为,脱粘缺陷是采用聚四氟乙烯薄片模拟的,使整体厚度稍微增加了一点,再加上同一试件不同部位的各层厚度有差异,所以出现如此情形。

4 结语

通过小波分析,可以将原始波形中与母小波类似的部分提取出来,并加以放大,所以选择合适的母小波是小波分析的关键。笔者选择 db7 小波对信

号进行两个尺度的分解并重构第二尺度下的高频信号。结果表明,该方法能够较好地检测出绝热层(厚度不超过 8 mm)和包覆层之间,即第二界面的脱粘缺陷。对于厚度超过 8 mm 的绝热层下面的缺陷或者包覆层和推进剂之间的缺陷,此方法是否有效尚有待试验验证。

参考文献:

- [1] 葛哲学,沙威. 小波分析理论与 MATLAB R2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [2] 敦怡,师小红,徐章遂. 基于小波包变换的金属基复合材料深层界面脱粘缺陷特征提取[J]. 无损检测,2007,29(12):705—721.
- [3] 李建文,王增勇,汤光平. 金属壳体粘接结构件的超声检测[J]. 无损检测,2010,32(4):283—285.