

电磁超声多界面检测信号去噪方法研究^{*}

宋卫华^{1,2} 王小民¹ 李明轩¹

(1 中国科学院声学研究所 北京 100080)

(2 中国科学院研究生院 北京 100029)

2006 年 7 月 19 日收到

2006 年 12 月 1 日定稿

摘要 为了解决传统压电超声换能器检测方式耦合不稳定的问题, 将电磁超声应用于多层粘接结构界面检测。针对电磁超声界面检测信号噪声高和盲区大的问题, 在电磁声换能原理和盲区成因分析的基础上, 用小波阈值滤波和自适应抵消滤波方法对检测信号进行了处理, 达到了降低信号噪声和减小盲区的目的。对钢板和双层橡胶粘接样品的回波信号处理结果表明: 小波阈值滤波将信噪比提高了约 12 dB, 自适应抵消滤波有效地减小了由感生信号产生的盲区。

PACS 数: 43.35, 43.60

Study on the denoising method for the electromagnetic ultrasonic echoes from multiple interfaces

SONG Weihua^{1,2} WANG Xiaomin¹ LI Mingxuan¹

(1 Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

(2 Graduate school of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100029)

Received Jul. 19, 2006

Revised Dec. 1, 2006

Abstract The electromagnetic ultrasound is used in the detection of interfaces of the adhesive multilayer structures to solve the unstable coupling problem in ultrasonic testing by traditional piezoelectric transducers. Based on the analysis of the transforming mechanism of electromagnetic ultrasound energy and the resultant dead zone from mutual inductance of the transducer, the wavelet filtering by soft-thresholding and adaptive noise canceling methods are used simultaneously to the detected electromagnetic ultrasonic signals to overcome the drawbacks of the low signal to noise ratio (SNR) and the wide intrinsic dead zone of the transducer. Processed results in the interface detection of a three layered adhesive sample of steel and rubber materials demonstrate that the wavelet filtering enhances the SNR about 12 dB while the adaptive noise canceling narrows the dead zone effectively.

引言

粘接工艺是现代工业尤其是国防工业越来越广泛采用的工艺技术, 但是, 由于粘接层间脱粘、粘接强度未能达到设计要求或是在使用过程中强度降低而引发的各种灾难性事故时有发生。因此, 粘接结构的安全和质量问题成为人们十分关注的问题, 粘接质量的检测与评价成为无损检测界重要的研究领域和前沿课题。

超声波具有对界面特征变化反应灵敏的特点, 超声检测方法是解决界面脱粘检测问题的有效方法

之一, 国内外对此进行了大量研究^[1,2]。但是, 对高波阻抗下多层低波阻抗介质的脱粘检测是国内外长期以来未能很好解决的难题^[3,4]。李明轩课题组较成功地解决了高波阻抗下多层低波阻抗介质层间脱粘的超声检测问题^[5-8], 但因为采用的是压电超声换能器检测方式, 耦合状态对检测有一定影响, 耦合剂在有些情况下被禁用。因此, 迫切需要开展针对多层粘接质量检测的“非接触”无损检测技术研究, 电磁声无损检测技术有望实现这一目标。

电磁声检测的优势在于无须使用耦合剂, 能够实现非接触检测。从上个世纪 60 年代至今, 电磁声

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (10234060, 10574138, 10474113)

换能器一直受到研究者的关注,电磁声检测也已在工业生产中得到应用^[9,10]。但是,相对于传统的压电换能器,电磁声换能器具有能量转化效率低,磁铁、线圈和工件间存在互感作用等不利因素,实际获得的检测信号成分复杂,信噪比较低^[11]。当采用脉冲回波法检测时,检测信号初始时段会有较大的盲区^[12]。对此,除了在换能器系统设计上做优化设计的工作外^[11],亦应基于电磁声信号物理特征,选取适当的信号处理方法进行信号增强与去噪。

目前,有关电磁声多界面脱粘检测的研究还鲜有报道。本文尝试将我们课题组搭建的电磁超声检测平台应用于多界面脱粘检测中,重点解决界面回波信号信噪比低和检测盲区大的问题。在电磁声换能原理和盲区成因分析的基础上,用小波阈值滤波和自适应抵消滤波方法对检测信号进行了处理,达到了降低信号噪声和减小盲区的目的。对钢板和双层橡胶粘接样品的回波信号处理结果表明:小波阈值滤波将信噪比提高了约 12 dB,自适应抵消滤波有效地减小了由感生信号产生的盲区。

1 实验系统及检测回波分析

图1是电磁超声多界面检测实验研究的示意图。界面缺陷类型为气体夹层脱粘,第一层介质为某型号钢板,厚度为 4 mm;钢板背后的双层低波阻介质为橡胶,厚度分别为 1 mm 和 2 mm,钢中横波声速为 3280 m/s,橡胶中横波声速为 940 m/s。电磁超声换能器由含“U”型铁芯的直流电磁铁、发射线圈和接收线圈组成。电磁铁产生偏置恒磁场,发射线圈和接收线圈采用共圈式“跑道形”一体化结构,外圈发射,内圈接收,线圈与工件间的提高量为 0.3 mm。激励信号为可调方波脉冲,这种激励源在压电探头界面脱粘检测中已被证明是可行的^[13]。信号源为 420 kHz、6 个周期方波调制脉冲,数据采样率为 50 MHz。需要说明,在电磁声的激发和接收过程中,钢板的上表层参与整个换能过程。

图 2 为电磁超声多界面检测实验的换能原理示意图,因为钢板是铁磁性材料,所以换能机理包括洛伦兹力和磁致伸缩力两种机制^[10,11,14]。考虑到接收过程与发射过程互为逆过程,我们这里仅以单侧发射线圈为例进行分析:坐标系如图 2 所示, x 轴平行工件表面向右, z 轴垂直工件表面向上, y 轴垂直纸面向里;通电线圈的电流方向沿着负 y 轴方向,感生涡流的方向为正 y 轴方向。偏置恒磁场的磁感应强度矢量 B 可分解为沿负 z 轴方向的垂直分量

和 x 方向的水平分量,垂直分量甚大于水平分量。首先考虑洛伦兹力的作用,偏置恒磁场的垂直分量和水平分量与钢板表层内的感生涡流场相互作用,分别产生沿着负 x 轴方向的力 $F^{\parallel}$ 和沿 z 方向的力 $F^{\perp}$,并向负 z 轴方向辐射 SH 横波和纵波。由于偏置恒磁场的垂直分量甚大于水平分量,因此辐射声场的横波部分远大于纵波部分。再来考虑磁致伸缩力的作用,偏置恒磁场在钢板表层产生正 x 轴方向和负 z 轴方向的磁致伸缩力 $F_C^{\parallel}$ 和 $F_C^{\perp}$,由于 $F_C^{\parallel}$ 比 $F_C^{\perp}$ 大得多^[15,16],磁致伸缩力引起的沿着负 z 轴方向的 SH 横波部分同样也远强于纵波部分^[15-17]。因此,在我们的电磁超声多界面检测实验系统中,声波模式以 SH 横波为主,伴有较弱的纵波。

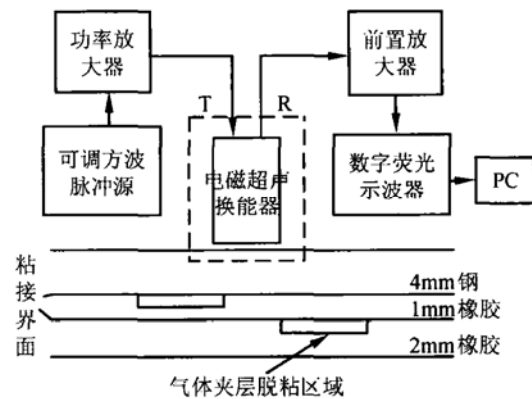


图 1 电磁超声多界面检测实验研究示意图

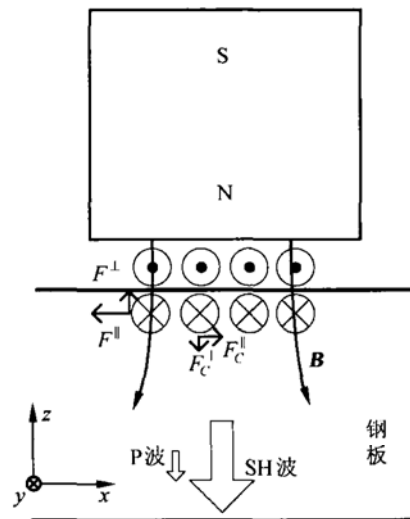


图 2 电磁超声换能原理图

图 3 为本文所用电磁超声系统以 680 kHz、1 个周期方波调制脉冲激励,在 60 mm 厚钢块上的经多次采样平均后的大平底回波信号。由图可见,20 μ s 之前为换能器的固有盲区,信号大多处于限幅状态,41.4 μ s 处为一次回波,叠加在感生信号之上,78.8 μ s 处为二次回波、115.3 μ s 处为三次回波。由二次和三次回波的声程时差比得到声波的波速为 3287.7 m/s,

说明声波模式主要为横波,这也验证了换能原理的分析结果。

为了说明电磁超声多界面检测实验系统检测盲区偏大的问题,图4给出了未加恒磁场,激励源为420 kHz、6个周期方波调制脉冲时,接收线圈在钢板和双层橡胶粘接样品上接收到的感生信号。由图可见,来自样品和发射线圈的感生信号非常强烈,导致盲区很大,并且随着激励方波调制脉冲的频率和周期数发生相应变化。感生信号主要分布在90 μs 以前,与40 μs 前的换能器固有盲区相连形成了加长的“盲区”,若加上恒磁场后,90 μs 之前的检测回波将淹没在换能器固有盲区和加长盲区之中,无法有效利用。

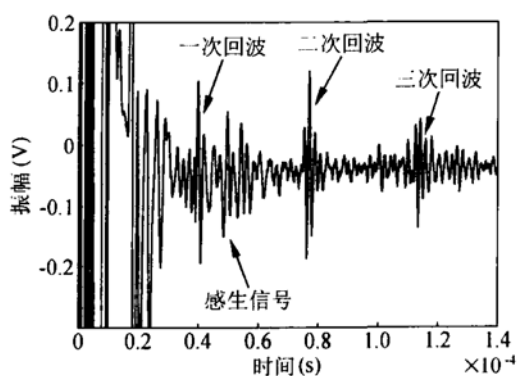


图3 60 mm 厚钢块的大平底回波

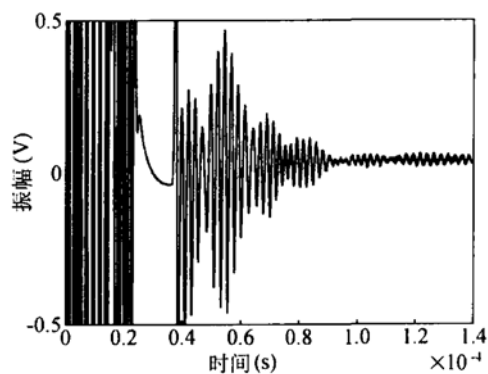


图4 粘好状态未加恒磁场时的感生信号

图5给出了加恒磁场,同样采用420 kHz、6个周期方波调制脉冲时,对图1中所示粘好、一界面脱粘和二界面脱粘状态的检测结果。可以看出,噪声掩盖了信号特征信息,各状态的回波包络比较相似,不易区分,检测回波的确淹没在换能器固有盲区和加长盲区之中,无法有效利用。

由此可见,本文研究的电磁超声界面检测信号成分以横波为主,但信噪比较低,检测盲区偏大,实验结果在噪声的影响下有一定的不确定性。若是直接对图5所示信号进行特征提取,不能真实反映图1所示多层结构的特征信息,需要对检测信号做进一步的信号滤波与消噪工作。

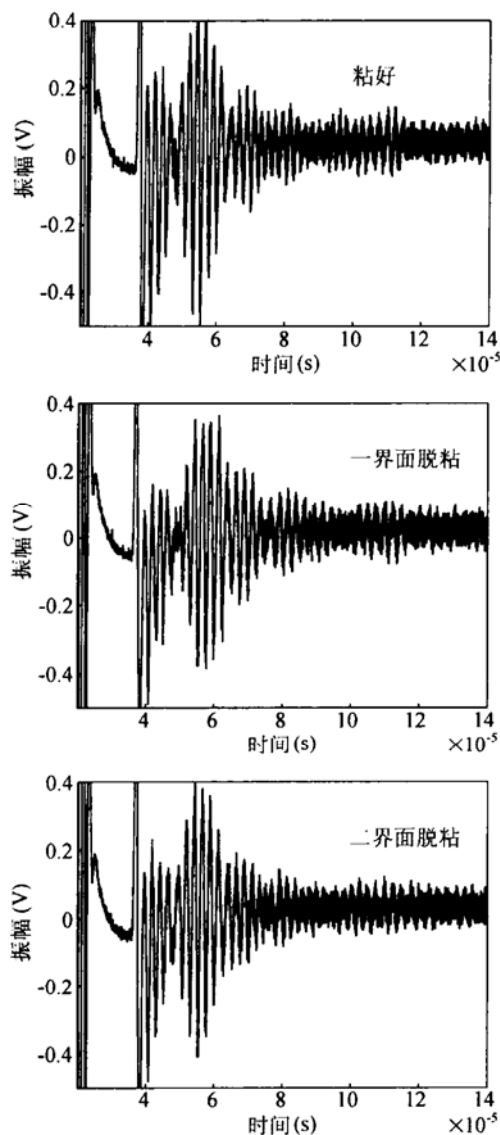


图5 各状态检测回波

2 信号降噪原理与实际应用

2.1 小波变换降噪模型

信号降噪一般要满足两个准则:光滑性,要求降噪后的信号应该至少和原信号具有同等的光滑性;相似性,要求和原信号的方差估计应该是最坏情况下的方差最小。可以证明小波变换满足光滑性,在选取适当的方法后也可满足相似性^[18]。小波分析用于降噪的过程,一般分为分解过程、作用阈值或掩码过程和重建过程,其中对小波(或小波包)分解的各层系数作用阈值过程是小波降噪的关键。

设 k 为采样时间点,如果假设原始信号为 $f(k)$,被噪声污染后为 $s(k)$,噪声信号为 $w(k)$,基本的噪声模型就可以表示为:

$$s(k) = f(k) + w(k), \quad (1)$$

用小波分析对信号降噪的过程如图 6 所示， F 为阈值算子， δ 为阈值，阈值算子作用后，模值小的小波系数被置为零，只保留模值大的系数项；掩码算子作用的结果是保留特定的系数并把其它的系数置为零，实际上是阈值算子的扩展。

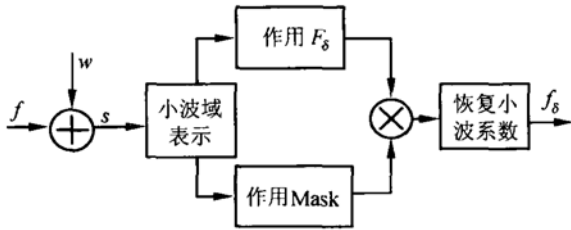


图 6 小波降噪模型

在小波变换降噪过程中，分解层数、小波基和阈值算子的选取对实际降噪的结果有一定的影响，应根据实际信号的特征和应用需求选取^[19]。

2.2 自适应噪声抵消原理

自适应噪声抵消方法适用于去除与参考信号相关的噪声^[7,8,20,21]，本文讨论的未加恒磁场时的感生噪声信号造成了加长盲区，并且与激励信号具有相关性，加恒磁场时检测回波叠加在其上，可尝试用自适应噪声抵消方法消除。

图 7 为自适应噪声抵消原理图，输入信号为实际检测信号 $s(k)$ ，参考信号 $n(k)$ 为感生噪声信号，自适应滤波器输出 $y(k)$ 与 $s(k)$ 的误差为 $e(k)$ ，要求，

$$E[e^2(k)] = \min, \tag{2}$$

其中 E 表示数学期望，在最小均方误差准则下， $y(k)$ 逼近于 $w(k)$ ，检测信号 $s(k)$ 中的相关感生噪声 $w(k)$ 被降低或者消除，回波信号 $f(k)$ 得到加强。

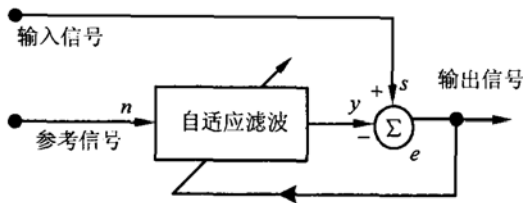


图 7 自适应噪声抵消原理图

2.3 实际应用

我们采用 sym 系列小波中的 sym8 小波对电磁超声检测信号进行分解和重构，sym8 小波具有正交性、对称性和二阶消失矩，并且与电磁超声检测子波具有相似性，可以满足本文分解与重构的精度要求^[19]。选取基于方差最小原则对小波五层分解系数做无偏似然估计确定阈值的方法，可满足信号降噪的基本要求——光滑性和相似性^[18]，作用阈值算子后可以得到各状态的降噪结果，如图 8 所示。

比较图 8 和图 5 可见，经过小波降噪后的噪声明显降低了，虽然 $90\ \mu\text{s}$ 前的回波信号叠加在感生噪声信号之中，信号特征暂无法观察，但 $90\ \mu\text{s}$ 至 $120\ \mu\text{s}$ 间的不同状态信号的包络形状、大小特征明显。总体来讲，降噪后的检测信号与未降噪时相比，各状态回波的差异明显。若定义波形中的信噪比 SNR:

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{最大回波幅度}}{\text{最大噪声幅度}} \right).$$

比较图 5 和图 8 中 $90\ \mu\text{s}$ 后的信号和噪声幅度，图 8 中信噪比提高了约 12 dB。

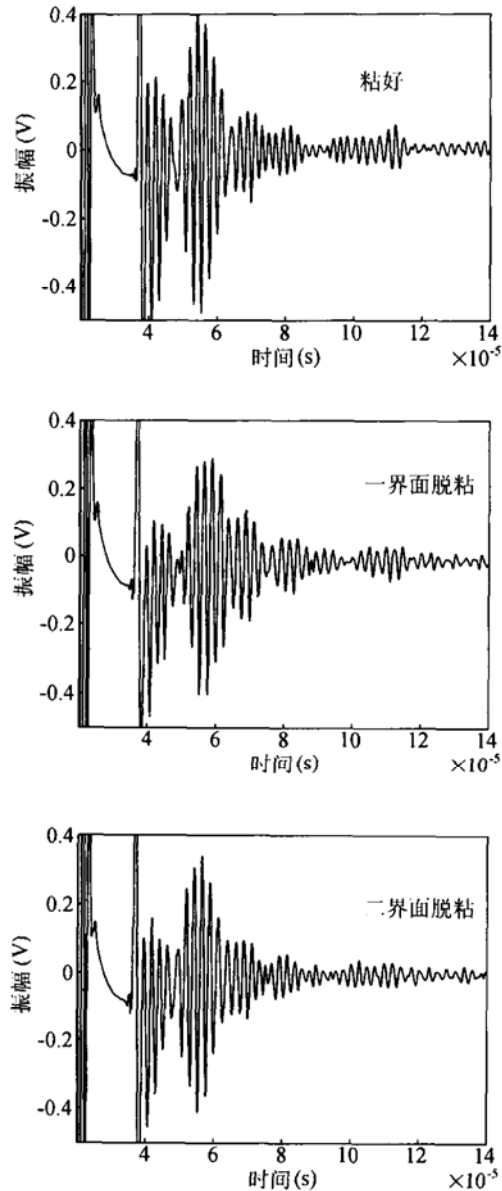


图 8 小波降噪后的各状态回波

相比文献 5 中所得回波，电磁超声界面检测回波只能利用限幅段盲区后的部分，可用信号时段大大减少。对收发一体这种线圈结构，未加恒磁时的感生信号是形成加长盲区的主要原因，并且与激励信

号成相关性。对本文所用检测样品和激励信号,盲区可延伸到 $90\ \mu\text{s}$ (图 4)。采用自适应噪声抵消方法的目的是为了消去感生信号对盲区的影响,增加检测信号的可利用时段。

图 9 为图 3 对应的 $60\ \text{mm}$ 厚钢块上的大平底回波先经过小波降噪,再经过自适应抵消感生信号之后的降噪结果,对比图 3 和图 9 可见,处理后的回波信号中的感生信号受到了抑制,一次回波信号得到了有效的突出,说明自适应抵消滤波方法可以有效的消去感生信号对盲区的影响。图 10 为各状态检测回波先经过小波降噪,再经过自适应抵消感生信号之后的各状态回波,由图中可以看出, $40\ \mu\text{s}$ 到 $90\ \mu\text{s}$ 间的回波也可以有效地反映出各状态差异,这样检测盲区就被限制在 $40\ \mu\text{s}$ 以内,而这是换能器系统的固有盲区,需要通过优化换能器与电子线路设计来改善。经自适应噪声抵消滤波后,峰峰值可达 $0.9\ \text{V}$ 、主要分布在 $90\ \mu\text{s}$ 前的感应噪声信号被有效地消除了。尽管层状粘接结构电磁超声界面检测回波从抵消噪声后的幅度上看只有噪声幅度的 $1/10$,但信号的特征得到了较好的体现。从波形包络来看, $60\ \mu\text{s}$ 到 $80\ \mu\text{s}$ 间的包络特征一界面脱粘、二界面脱粘和粘好状态分别呈现大、略大和略小的类别特征, $90\ \mu\text{s}$ 到 $120\ \mu\text{s}$ 间则保持了自适应滤波前的包络特征,呈现粘好状态大、一界面脱粘略大和二界面脱粘小的特征。这样,我们就可以充分利用 $40\ \mu\text{s}$ 以后的检测回波进行状态识别。

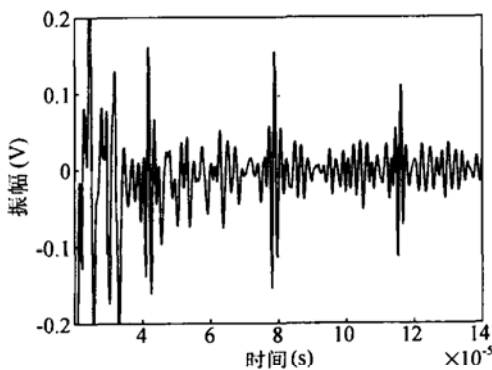


图 9 $60\ \text{mm}$ 厚钢块上的大平底回波降噪结果

对本文研究的钢板背后多层橡胶这种粘接结构,长脉冲声波在传播过程中经过了多次反射和透射,反射波和透射波在传播中不断叠加最终形成检测回波的波形和包络特征。经过小波阈值降噪和自适应抵消感生信号之后的真实回波波形特征得到了有效的体现,但从图 8 和图 10 看信号还略显杂乱,未形成较突出的检测特征,还需要寻找较佳的换能器激励源并进行波形特征提取工作。

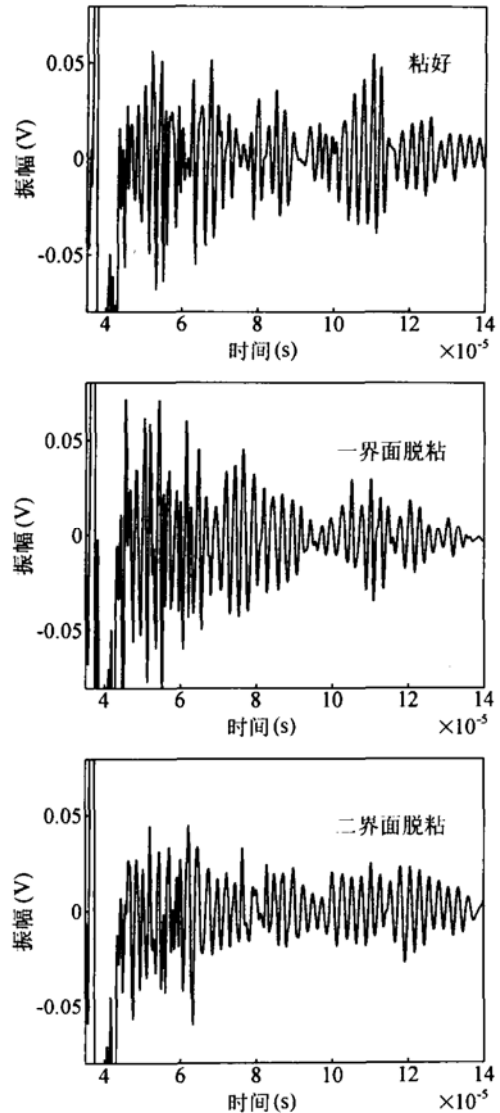


图 10 自适应噪声抵消后的各状态回波

3 结论

对钢板背后多层橡胶这种典型的金属-非金属粘接结构,电磁超声界面检测信号成分复杂,信噪比低,存在较大的检测盲区。小波域阈值滤波可以在满足信号降噪的两个基本要求——光滑性和相似性基础上大幅度地降低噪声,对本文的检测信号,降噪后的信噪比提高了约 $12\ \text{dB}$,降噪的效果要优于多次采样平均这种低通滤波的方法。小波滤波在不同时频尺度上作用阈值算子,不但保持了界面回波的包络特征也同时较好地保持了回波的局部特征信息。在小波滤波的基础上,自适应噪声抵消滤波有效地消除了由感生信号造成的加长盲区,使回波信号的盲区限制在电磁超声系统的固有盲区内。实际处理的结果表明,小波滤波与自适应噪声抵消滤波相结合,提高了电磁超声检测回波的信噪比,减小了盲区,为电磁超声界面缺陷检测回波特征提取与识别奠定了基础。

致谢

本文的仪器调试得到了黄振俨老师、冷涛博士的帮助, 实验过程中得到了吴迪博士的许多帮助, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- Guyott C C H, Cawley P, Adams R D. The nondestructive testing of adhesive bonded structure: A review. *J. Adhesion*, 1986; **20**: 129—159
- Cohen Y B, Mal A K, Yin C C. Ultrasonic evaluation of adhesive bonding. *J. Adhesion*, 1989; **29**: 257—274
- Lavrentyev A I, Rokhlin S I. Determination of elastic moduli, density, attenuation and thickness of a layer using ultrasonic spectroscopy at two angles. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997; **102**(6): 3467—3477
- Lavrentyev A I, Rokhlin S I. An ultrasonic method for determination of elastic moduli, density, attenuation and thickness of a polymer coating on a stiff plate. *Ultrasonics*, 2001; **39**(3): 211—221
- 李明轩. 粘接质量超声检测研究. *应用声学*, 2002; **21**(1): 7—12
- 李明轩. 声阻法检测原理. 北京: 科学出版社, 1976: 26—59, 97—102
- 简晓明, 李明轩, 张建生. 层状介质界面超声检测的理论分析和自适应噪声抵消处理. *声学学报*, 2000; **25**(4): 351—356
- 毛捷, 李明轩. 子带自适应滤波在层状介质脱粘超声检测中的应用. *声学学报*, 2003; **28**(3): 212—216
- Green R E. Non-contact ultrasonic techniques. *Ultrasonics*, 2004; **42**: 9—16
- 美国无损检测学会编, 《美国无损检测手册》译审委员会译. 美国无损检测手册 (超声卷, 上册), 世界图书出版公司, 1996: 499—525
- Koorosh Mirkhani, Chris Chaggares, Chris Masterson et al. Optimal design of EMAT transmitters. *NDT & International*, 2004; **37**(3): 181—193
- Dixon S, Edwards C, Palmer S B. The analysis of adhesive bonds using electromagnetic acoustic transducers. *Ultrasonics*, 1994; **32**(6): 425—430
- 宋卫华, 王小民, 李明轩. 钢板背后多层橡胶脱粘界面脉冲串回波分析. *声学技术*, 2005; **24**(z1): 301—303
- Thompson R B. A Model for the electromagnetic generation of ultrasonic guided waves in ferromagnetic metal polycrystals. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1978; **SU-25**(1): 7—15
- Ogi H. Field dependence of coupling efficiency between electromagnetic field and ultrasonic bulk waves. *J. Appl. Phys.*, 1997; **82**(8): 3940—3949
- Hirao M, Ogi H. EMATs for science and industry: noncontacting ultrasonic measurements. Kluwer Academic Publishers, 2003: 39—40
- Thompson R B. Generation of horizontally polarized shear waves in ferromagnetic materials using magnetostrictively coupled meander-coil electromagnetic transducers. *Appl. Phys. Lett.*, 1979; **34**(2): 175—177
- Donoho D L, Johnstone I M, Kerkycharian G, Picard D. Density estimation by wavelet thresholding. *Annals of Stat.*, 1996; **24**(2): 508—539
- 潘泉, 张磊, 孟晋丽等. 小波滤波方法及应用. 北京: 清华大学出版社, 2005: 8—10, 88—92
- Zhu Y, Weight P. Ultrasonic NDE of highly scattering materials using adaptive filtering and detection. *IEEE Trans. UFFC*, 1994; **41**(1): 26—33
- 简晓明, 李明轩. 小波变换和自适应噪声抵消在闭合裂纹超声检测中的应用. *声学学报*, 2000; **25**(2): 97—102
- 王小民, 李明轩, 毛捷. 单层与衬底胶接结构超声反射波谱的低频特征. *声学学报*, 2005; **30**(4): 337—342