

# 基于小波阈值技术的激光-电磁超声检测 噪声抑制方法研究

崔 雷<sup>1</sup> 赵 扬<sup>2\*</sup> 赵 鹏<sup>2</sup> 孙继昌<sup>2</sup> 贾中青<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 山东省科学院, 山东 济南 250014

<sup>2</sup> 山东省无损检测工程技术研究中心, 山东 济南 250014)

**摘要** 采用基于软阈值的小波滤波技术对激光-电磁超声检测过程中噪声抑制进行了研究。选择在 6016 铝板表面裂纹的超声检测信号作为信号处理对象,采用 Matlab 软件设计软阈值小波去噪算法并对信号进行处理,结果表明该技术在激光-电磁超声工程应用领域中具有良好的前景。

**关键词** 激光技术;激光超声;电磁超声;无损检测;小波;软阈值

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s112006

## Investigation on the Method of Suppress Noise in the Laser-EMAT Testing Based on Wavelet Threshold Technology

Cui Lei<sup>1</sup> Zhao Yang<sup>2</sup> Zhao Peng<sup>2</sup> Sun Jichang<sup>2</sup> Jia Zhongqing<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250014, China  
<sup>2</sup> Center of Nondestructive Testing Engineering of Shandong, Ji'nan, Shandong 250014, China)

**Abstract** This work introduces the wavelet filter technique based on the soft threshold algorithm. The proposed method is applicable to the noise suppression during the detection process of the laser electromagnetic acoustic transducer (EMAT) technique. Experiments have been carried out on the 6016 aluminum plate, and the ultrasonic signal of surface defect has been processed by wavelet filter designed by Matlab. The results show that the technique has good prospects in the engineering applications of laser-EMAT testing.

**Key words** laser technique; laser ultrasonic; electromagnetic acoustic transducer; nondestructive testing; wavelet; soft-threshold

**OCIS codes** 120.4290; 280.3375; 230.1040; 170.7170

## 1 引 言

高噪声背景下超声回波信号的可靠识别问题是超声无损检测领域中的研究热点,也是解决超声无损检测技术应用于工程实际的关键问题<sup>[1]</sup>。激光-电磁超声作为一种新兴超声检测技术,有效克服了传统压电式超声检测需要耦合剂的缺点,具有非接触、受被检材料表面粗糙度及几何形状限制小、检测速度高等优点,可应用于高温、高速和腐蚀等恶劣环境下的金属材料检测与评价<sup>[2]</sup>。激光-电磁超声检

测技术采用基于电磁感应原理的电磁超声(EMAT)传感器接收超声信号,所接收信号的幅值一般只有几十微伏到几百微伏。EMAT 传感器对周围环境噪声敏感度高,采集到的信号含有类型复杂且幅度较大的噪声,致使接收到有用信号常被淹没在噪声中,难以识别<sup>[3]</sup>。本课题组此前试图利用自适应数字滤波技术对激光-电磁超声的噪声进行抑制,结构发现在抑制噪声的同时,有用信号的部分高频信息也同时被滤除<sup>[4]</sup>。

**收稿日期**: 2013-12-01; **收到修改稿日期**: 2014-01-16

**基金项目**: 国家自然科学基金(52105240)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2011ZZ016)、山东省科学院青年基金(2012-02)

**作者简介**: 崔 雷(1962—),男,硕士,副研究员,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: cuil@sdas.org

\* **通信联系人**。E-mail: yang.aisin.zhao@gmail.com

小波技术是一种多尺度的信号分析方法,在分析非平稳信号中具有独特的优势,且特别适用于有用信号与噪声在整个频域都有相互交叠或者信号为宽带信号时的信号识别<sup>[5]</sup>。目前,小波技术在解决噪声污染、改进信号质量和提高信号可识别度等方面发挥着越来越重要的作用。本文介绍了一种基于小波阈值方法的信号处理方法,并将其应用于激光-电磁超声检测过程中的噪声抑制的研究。

## 2 原 理

### 2.1 信号小波阈值去噪原理

小波阈值去噪的理论依据小波变换具有很强的数据去相关性,能够使信号的能量在小波域集中在少量的数值大的小波系数中,而噪声却分布在整个小波域且对应着大量的数值小的小波系数<sup>[6]</sup>。含噪声的信号经小波分解后,信号的小波系数大于噪声

的小波系数,然后就可以用阈值的方法把信号的小波系数保留。

一个含噪声的一维模型可以表示为

$$f(t) = s(t) + n(t), \quad (1)$$

式中  $s(t)$  为真实信号,  $n(t)$  为噪声信号,  $f(t)$  为含噪声的信号。对  $f(t)$  离散小波变换可以得到相应的小波系数:

$$\omega_f(j, k) = \omega_s(j, k) + \omega_n(j, k), \quad (2)$$

式中  $\omega_f(j, k)$ 、 $\omega_s(j, k)$  和  $\omega_n(j, k)$  分别为  $f(t)$ 、 $s(t)$  和  $n(t)$  的小波系数。

小波阈值信号处理方法的原理如图 1 所示,即对信号  $f(t)$  进行小波分解后的各层小波系数中大于阈值和小于阈值的系数分别进行处理,将小波系数低于阈值的部分进行置零处理,然后根据  $x_s(j, k)$  再进行逆小波变换,以实现噪声的去除,得到  $s(t)$ 。

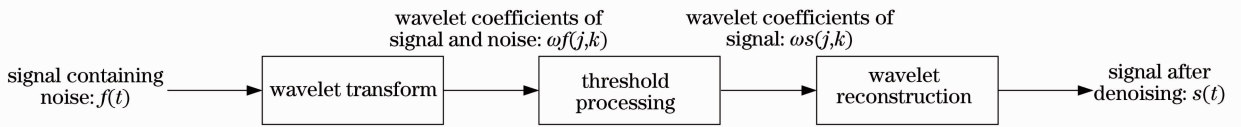


图 1 小波阈值去噪原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wavelet threshold denoising

### 2.2 小波函数选取

在众多的小波基函数家族中, db $N$  小波函数是一种具有紧支集的正交小波,在正交性、紧支撑性、支撑长度等方面都要优于上述几种小波基,其正则光滑性随着序号  $N$  的增加而增加,支撑宽度为

$2N-1$ , 滤波器长度是  $2N$ 。它可以提供一种更实际更具体的有限长数字滤波器,因此较为适合于工程信号滤波处理。文中超声信号的去噪处理即采用 db5 小波,  $N$  取 5。图 2 给出了 db5 小波的尺度函数图及小波函数图。

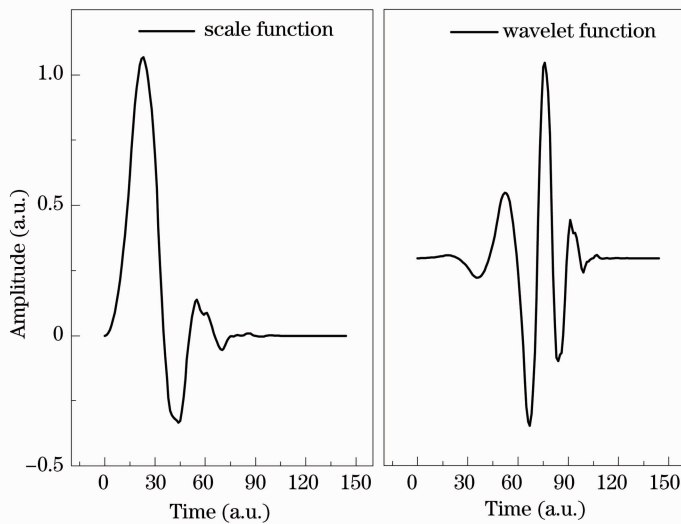


图 2 db5 小波尺度函数与小波函数

Fig. 2 Diagram of db5 wavelet scale function and wavelet function

## 2.3 阈值函数的选取

利用小波阈值法进行信号处理最关键的部分是选取或者构造合适的阈值函数<sup>[7]</sup>。选择软阈值函数进行去噪处理,软阈值是把信号的绝对值与指定的阈值进行比较,小于或等于阈值的点变为0,大于阈值的点变为该点值与阈值的差。其公式表示如下:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) \cdot (|\omega_{j,k}| - \lambda), & |\omega_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

## 2.4 阈值的选取

阈值的选取直接关系都信号降噪的质量,非线性小波变换阈值法阈值的选取有4种形式,这里选择的是固定的阈值形式(sqtwolog),这种阈值形式在软阈值函数处理中能够得到直观意义上很好的降噪效果<sup>[8]</sup>。下式给出了 sqtwolog 阈值选取方法:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N}, \quad (4)$$

式中  $\sigma = \frac{1}{0.6745} \cdot \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\omega_{j,k}|$ , ( $1 \leq j \leq J$ ),  $N$  是对应的某一个尺度  $j$  的小波系数的个数,  $J$  是小波分解的最大层次数。

# 3 实 验

## 3.1 实验系统

采用本研究所采用的为自主设计的激光-EMAT 检测系统进行实验测试<sup>[9]</sup>。其中激光由脉冲重复频率为 1~20 Hz 的 YAG-调 Q 激光器发射(波长为 1064 nm,脉冲宽度为 8~15 ns),并由特定设计参数的透镜系统进行光束聚焦。信号接收采用自制的横波 EMAT 传感器完成,并将信号送至所设计的前置放大器、高通滤波器及压控电路进行滤波和逐级放大处理,而后由 Tektronix MSO-4054 示波器采集送至计算机处理<sup>[10]</sup>。其中,为了比较小波软阈值法的滤波效果,设计了截止频率为 0.5 MHz 的模拟高通滤波器,用于将前置放大器的超声信号进行滤波处理,将滤波信号输送至上位机进行保存。

## 3.2 实验方法

利用激光在金属材料激发出的表面波对表面裂纹进行检测,当表面波遇到缺陷时会发生波形转换,生成横波,利用横波电磁超声传感器对缺陷信号进行接收。根据电磁感应原理,当该传感器位于缺陷正上方时,所接收到的缺陷信号幅度最大,据此可以确定缺陷的位置<sup>[11]</sup>。

选取尺寸为 700 mm × 600 mm × 20 mm 的 6016 号铝板作为检测对象,采用线切割技术在铝板表面制备了一系列的表面裂纹型的人工伤,实验中给出了对裂纹尺寸为 60 mm × 1 mm × 1 mm 的检测结果。

## 4 分析与讨论

图 3 给出了激光器的脉冲重复频率设定为 5 Hz,脉冲能量为 50 mJ/pulse,前置放大器的放大倍数为 6000 倍,脉冲激光光斑与铝板表面裂纹之间距离为 45 mm 条件下,得到的缺陷超声信号经前置放大器输出的结果,观察发现该信号含有相对严重的噪声信号<sup>[4]</sup>。

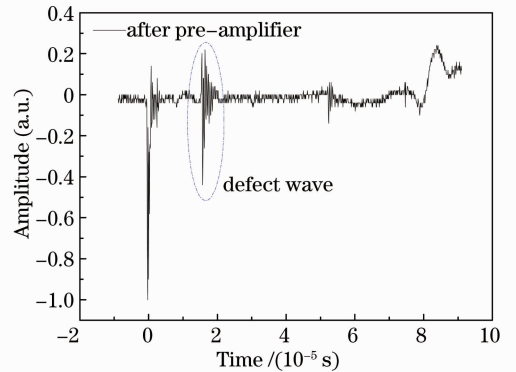


图 3 经过前置放大器得到的缺陷检测信号

Fig. 3 Defect signals processed by the pre-amplifier

图 4 给出了前置放大器输出的缺陷信号后经过截止频率为 0.5 MHz 的高通模拟滤波器输出的结果,发现部分低频噪声在一定程度上被抑制了,导致滤波后得到的信号整体与滤波前具有一定差异,且由于模拟滤波器本身放大倍数约为 4,使得信号幅度增大,并且更适用于缺陷信号的检测,但不足的是滤波后的信号在抑制噪声的同时也丢失了大部分低

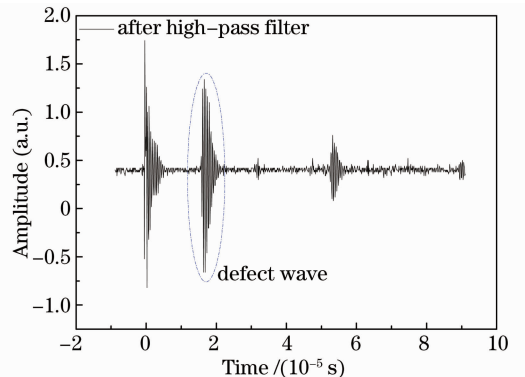


图 4 经过高通模拟滤波器处理的缺陷检测信号结果

Fig. 4 Defect signals processed by the high-pass filter

频信息,这对于材料性能的超声表征而言是有一定影响的。

为了尽可能地去掉噪声并保持有用信号的特征,同一测试结果进行了小波软阈值数字滤波分析。图5给出了前置放大器输出的缺陷信号直接经过软阈值小波信号处理的结果,其中小波函数选为db5,分解层数 $J$ 选定为10,观察滤波结果发现低频及高频噪声已基本被抑制,所得到的信号基本保留了原来信号特征。

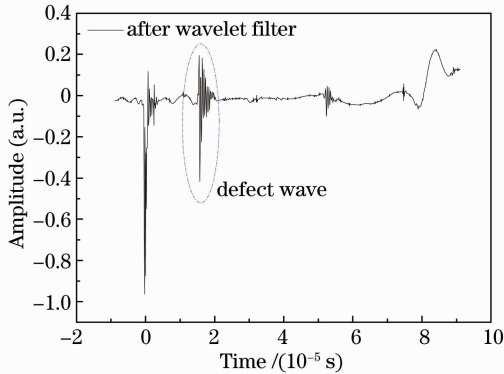


图5 经过小波软阈值滤波处理的缺陷检测信号结果  
Fig. 5 Defect signals processed by the method of wavelet soft-threshold denoising

进一步对不同滤波技术得到缺陷信号结果进行频谱分析(图6),结果发现与此前采用的模拟滤波及自适应数字滤波(LMS)法相比,小波阈值去噪结构在最大程度上保留了有用信号的频域信息,这不仅有利于

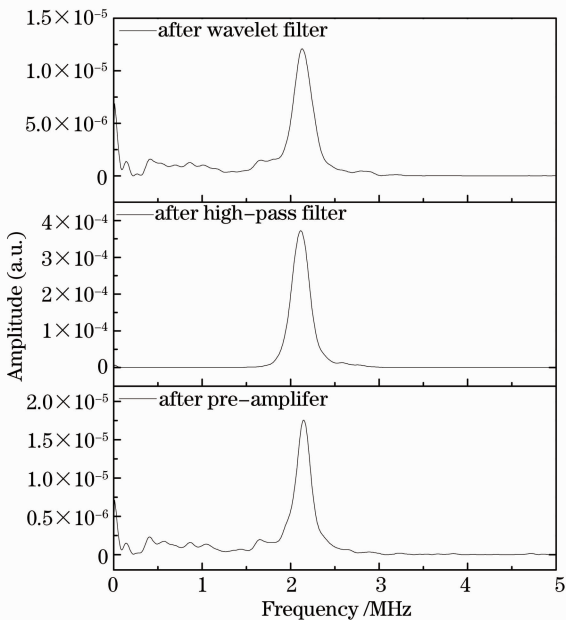


图6 不同滤波处理的缺陷信号频谱分析结果  
Fig. 6 Spectral analysis of defect signals processed by various denoising methods

利于缺陷的识别,而且有利于利用频谱分析技术对材料特性进行超声表征研究。进一步地,利用(5)式,可以计算出模拟滤波和小波软阈值滤波的信噪比值分别为33.6 dB和39.6 dB。

$$R_{SN} = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_n x^2(n)}{\sum_n [x(n) - x'(n)]^2} \right\}, \quad (5)$$

式中 $x(n)$ 为滤波前信号的幅度, $x'(n)$ 为去噪后信号的幅度。

从以上的信号处理结果可以发现,采用小波软阈值滤波技术能够有效地抑制激光-EMAT检测过程中的噪声信号,较好地实现金属材料无损检测时提高缺陷信号信噪比的功能。

## 5 结 论

激光-EMAT检测过程中所接收到超声信号是一种时频有限的非平稳信号,包含的噪声类型复杂且幅度相对较大,因此基于小波技术的滤波方法特别适用于处理激光-EMAT检测信号。实验结果证明了小波软阈值滤波技术可以提高激光-EMAT检测的信噪比,增强缺陷信号的识别能力。所用的小波软阈值算法简便,利用Matlab软件即可实现,信号处理速度较快,未来研究中结合现场可编程门阵列(FPGA)即可在硬件上实现激光-电磁超声检测信号的小波软阈值滤波,为该技术在应用于工程实际提供了支持。

## 参 考 文 献

- 1 M Vaclav, S Radislav, S Stanislav, *et al.*. Signal-to-noise ratio enhancement based on wavelet filtering in ultrasonic testing [J]. *Ultrasonics*, 2009, 49(8): 752-759.
- 2 S Mirko, C Valentina, C Sivia, *et al.*. Pre-processing of data coming from a laser-EMAT system for non-destructive testing of steel slabs [J]. *ISA Transactions*, 2012, 51(1): 181-188.
- 3 R Ribichini, F Cegla, P B Nagy, *et al.*. Experimental and numerical evaluation of electromagnetic acoustic transducer performance on steel materials [J]. *NDT & E International*, 2012, 45(1): 32-38.
- 4 Zhao Yang, Guo Rui, Song Jiangfeng, *et al.*. Investigation on the method of suppress noise in the laser-EMAT testing based on adaptive filter technology [J]. *Nondestructive Testing*, 2013, 35(6): 29-31.
- 5 赵扬, 郭锐, 宋江峰, 等. 基于自适应滤波技术的激光-电磁超声检测噪声抑制方法[J]. *无损检测*, 2013, 35(6): 29-31.
- 5 X Y Chen, X X Song, F Qi, *et al.*. Signal matching wavelet for ultrasonic flaw detection in high background noise [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2011, 58(4): 1-12.
- 6 Li Shixin, Liu Luyuan. The study of denoising through wavelet shrinkage [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(3): 478-479.

- 李士心, 刘鲁源. 基于小波阈值去噪方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 478-479.
- 7 Cui Jintai. An Introduction to Wavelets [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995. 24-26.
- 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995. 24-26.
- 8 S P Song, P W Que. Wavelet based noise suppression technique and its application to ultrasonic flaw detection [J]. Ultrasonics, 2006, 44(2): 752-759.
- 9 Y Zhao, Z Q Jia, R Guo, *et al.*. A novel laser-EMAT system for noncontact testing metal materials [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 281: 422-425.
- 10 Y Zhao, S Liu, R Guo, *et al.*. Hybrid laser-EMAT system for non-destructive testing continuous casting billet [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(s2): s21103.
- 11 Sun Jihua, Zhao Yang, Song Jiangfeng, *et al.*. Testing the defect of rail with laser-EMA ultrasonic method [J]. J Optoelectronics • Laser, 2014, 25(1): 141-146.
- 孙继华, 赵 扬, 宋江峰, 等. 激光声磁与压电超声检测钢轨踏面缺陷的对比研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(1): 141-146.

栏目编辑: 何卓铭