

文章编号: 1006-4710(2015)03-0322-06

# 一种新的超声导波信号小波阈值去噪方法

张磊, 杨媛, 李文涛, 高勇

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 在断轨检测中,为了获取有效的超声导波信号,必须对超声导波进行相应的去噪工作,而去噪效果的好坏直接影响到测量结果精度和可靠性。为了进一步提高去噪效果,本文针对传统的阈值函数法的不足,进行适当的改进,即提出一种新的小波阈值函数来提高去噪效果。文中简述了该种小波阈值函数的原理及构建,并进行了相关的仿真和分析;将该种方法的去噪效果与传统的软、硬阈值函数法去噪效果进行比较。结果表明,相对软阈值函数法,新阈值函数方法去噪后信号信噪比提高 6%~15%,均方误差降低 14%左右;相对硬阈值函数法,新阈值函数方法去噪后信号信噪比提高 8%~25%,均方误差降低 20%左右,并且新阈值函数方法去噪后信号幅值非常接近原始信号幅值,即该种超声导波小波阈值法相对于上述传统阈值函数法去噪效果有明显提升。

**关键词:** 小波变换;阈值函数;信噪比;均方误差;超声导波

中图分类号: TN911.72

文献标志码: A

## A novel ultrasonic guided wave signal wavelet threshold denoising method

ZHANG Lei, YANG Yuan, LI Wentao, GAO Yong

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to get an effective ultrasonic guided wave signal, the denoising measure of ultrasonic guided wave in the broken rail detection is an essential part, and the efficiency of the denoising directly affects the precision and reliability of the test results. These traditional threshold function methods have some shortcomings in signal denoising, so that a new novel threshold function is proposed in this paper to further improve denoising effect. This paper briefly describes the principle of this kind of new wavelet threshold function, and completes the related simulation and analysis, of which a comparison is made of the denoising effects by this method with those by the traditional soft and hard threshold function method. The ultrasonic guided wave signal is denoised with these three methods respectively. The simulation results show that, compared with the soft threshold function method, the SNR of the signal dealt with novel threshold function method is improved by 6%~15%, the mean square error is reduced by 14% or so, and compared with the hard threshold function method, the signal SNR is improved by 8%~25%, the mean square error is reduced by 20% or so, and the amplitude of the denoising signal dealt with the novel method is very close to that of the original signal. In a word, this new ultrasonic guided wave wavelet threshold method has an obvious improvement of the denoising effect compared with those traditional threshold function methods.

**Key words:** wavelet transform; threshold function; SNR; MSE; ultrasonic guided wave

超声无损检测技术可以检测出试件内部的损伤,对损伤位置进行定位,但在损伤检测过程中伴随着各种各样的干扰信号,严重影响检测结果的可靠

性。利用超声导波对钢轨进行实时监测是一种有效的断轨检测方法<sup>[1]</sup>。由于超声导波信号幅值很小,容易被噪声淹没,如果直接对超声导波信号进行频

收稿日期: 2014-12-17

基金项目: 陕西省重点学科建设资助项目(107000809);陕西省教育厅服务地方专项计划资助项目(15JF026)。

作者简介: 张磊,男,博士生,研究方向为数字信号处理,电路与联系。E-mail: simpleman2003@163.com。

通讯作者: 杨媛,女,教授,博导,博士,研究方向为数模混合集成电路设计、嵌入式系统设计。

E-mail: yangyuan@xaut.edu.cn。

谱分析,那么得到的幅值与信号的真实幅值就会存在一定的差值,对钢轨断轨与否极可能产生误判,所以要对检测到的导波信号进行消噪处理。

超声导波信号的去噪方法有很多,有谱分析、时域分析、自适应滤波、经验模态分解、小波去噪等<sup>[2-8]</sup>。但用于断轨检测的超声导波信号是一种非平稳脉冲信号,对其进行傅立叶变换、谱分析和时域分析,处理效果都不佳,因而常选取小波变换对导波信号进行去噪。其特有的多分辨率分析技术使得小波分析在时域和频域中都具有良好的分析能力,能提取超声导波信号特征,滤除噪声,提高信噪比。小波去噪常采用阈值函数方法,阈值去噪方法包括传统的小波硬阈值去噪和 Donoho 等<sup>[9]</sup>提出的小波软阈值去噪。但它们对超声导波信号的去噪效果并不理想,硬阈值函数去噪法去噪后,信号存在振荡及毛刺;软阈值函数去噪法去噪后,信号幅值有较大的损失和失真。本文对这两种去噪方法进行了改进,提出了一种新的小波阈值去噪方法,并对超声导波信号进行了仿真实验,获得更好的去噪效果、更高的信噪比增益以及准确的信号幅值。

## 1 小波阈值函数去噪原理

一个含有噪声的一维信号模型可表示为:

$$f(t) = s(t) + \delta^* e(t) \quad (1)$$

式中,  $f(t)$  为实际测量到的信号,  $t$  为信号传播时间,  $s(t)$  为真实有用信号,  $\delta$  为噪声的方差,  $e(t)$  为高斯白噪声。去噪的目的就是去除高斯白噪声  $e(t)$ , 得到有用信号  $s(t)$ 。

现在采用的是 1989 年 S. Mallat 提出的快速算法——Mallat 算法,该算法<sup>[10]</sup>大大简化了小波系数的计算。其主要是对信号  $f(t)$  进行多层小波分解,将信号分解成低频部分和高频部分,其系数分别是尺度系数和细节系数,然后对每次分解后的低频部分进行重复分解,直至要分解的层数。一般情况下,有用的特征信号通常表现为低频部分,而噪声信号通常分布在高频部分,因而在对信号进行小波降噪处理时,要对分解后的高频部分产生的细节系数进行处理,以滤除噪声<sup>[11]</sup>。

传统阈值函数有两种,硬阈值函数和软阈值函

$$\hat{\omega}_{\text{新}j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) \left( |\omega_{j,k}| - \frac{n \cdot \text{Thr}}{\exp \frac{|\omega_{j,k}|}{m} - \exp \frac{\text{Thr}}{m} + n} \right) & |\omega_{j,k}| > \text{Thr} \\ 0 & |\omega_{j,k}| \leq \text{Thr} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $n$  为整数,  $m$  为正数。

式(4)为新阈值函数,当小波系数  $|\omega_{j,k}|$  小于阈

数。

1) 软阈值函数  $\hat{\omega}_{\text{软}j,k}$

$$\hat{\omega}_{\text{软}j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) (|\omega_{j,k}| - \text{Thr}) & |\omega_{j,k}| > \text{Thr} \\ 0 & |\omega_{j,k}| \leq \text{Thr} \end{cases} \quad (2)$$

软阈值函数去噪基本思想:将各层的小波分解系数与阈值  $\text{Thr}$  进行比较,当小波系数大于阈值时,将小波系数与阈值的差值作为新的小波系数;当小波系数小于阈值时将其置零。

2) 硬阈值函数  $\hat{\omega}_{\text{硬}j,k}$

$$\hat{\omega}_{\text{硬}j,k} = \begin{cases} |\omega_{j,k}| & |\omega_{j,k}| > \text{Thr} \\ 0 & |\omega_{j,k}| \leq \text{Thr} \end{cases} \quad (3)$$

硬阈值函数去噪基本思想:将各层的小波分解系数与阈值  $\text{Thr}$  进行比较,当小波系数大于阈值时,将小波系数予以保留;当小波系数小于阈值时将其置零。

其中  $\omega_{j,k}$  为小波系数,  $\hat{\omega}_{j,k}$  为处理后的小波系数,  $j$  为小波尺度第  $j$  层,  $k$  为小波基常用参数,  $\text{Thr}$  为阈值,它通常采用 Donoho 等提出的基于 SURE (the Stein's unbiased risk estimate) 法估计的小波阈值,公式为:

$$\text{Thr}_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln(N_j)}$$

式中,  $N_j$  为小波尺度  $j$  的小波系数长度,  $\sigma_j$  为小波尺度  $j$  层噪声的标准方差,  $\sigma_j$  可以利用第一次的小波系数  $\omega_{j,k}$  来估计,即:  $\sigma = (\text{median} |\omega_{j,k}|) / 0.6745$ , 其中  $\text{median} |\omega_{j,k}|$  表示取第一层所用的小波变换系数  $\omega_{j,k}$  幅值的中间值。

## 2 新阈值函数的构造

软、硬阈值函数方法虽然应用广泛,但这些方法本身存在一定的缺点。在硬阈值函数中,  $\hat{\omega}_{\text{硬}j,k}$  在  $|\omega_{j,k}| = \text{Thr}$  处是不连续的,这会使得重构后的信号存在一些震荡,产生伪吉布斯现象,使得消噪效果不佳;在软阈值函数中,小波系数  $\hat{\omega}_{\text{软}j,k}$  虽然连续,但是  $\hat{\omega}_{\text{软}j,k}$  和  $\omega_{j,k}$  总是存在恒定的偏差,消噪信号虽比较光滑,但降噪后的信号有着较大的失真。因而本文根据软、硬阈值函数提出了一种新的阈值函数,如式(4)所示:

值  $\text{Thr}$  时将其置零,当小波系数  $|\omega_{j,k}|$  大于阈值  $\text{Thr}$  时,对小波系数进行处理,使得处理后的小波系

数  $\hat{\omega}_{\text{新},k}$  从 0 到  $\omega_{j,k}$  渐近。式(4)为指数函数,其变化速度由调节因子  $m, n$  控制。

从式(4)可知,新的阈值函数继承了软、硬阈值函数的优点。首先,与软、硬阈值函数相比,新阈值函数在整个小波域内连续,当  $|\omega_{j,k}| > Thr$  时,函数高阶可导,便于进行数学计算。其次,当  $|\omega_{j,k}| \rightarrow \infty$  时,  $\hat{\omega}_{\text{新},k} \rightarrow \omega_{j,k}$ ,随着  $\omega_{j,k}$  的增大,  $\hat{\omega}_{\text{新},k}$  逐渐接近  $\omega_{j,k}$ ,当  $\omega_{j,k}$  增大到一定程度时,  $\hat{\omega}_{\text{新},k}$  无限接近  $\omega_{j,k}$ ,这克服了软阈值中  $\hat{\omega}_{\text{软},k}$  和  $\omega_{j,k}$  之间存在恒定偏差的缺点。

当  $n=0$  时,新的阈值函数为硬阈值函数,当  $n \rightarrow \infty$  时,新的阈值函数为软阈值函数。当  $n \neq 0$  时,可通过改变  $m$ ,来改变  $\hat{\omega}_{\text{新},k}$  收敛于  $\omega_{j,k}$  的速度,当  $m$  增大,  $\hat{\omega}_{\text{新},k}$  收敛于  $\omega_{j,k}$  的速度减慢;当  $m$  减小,  $\hat{\omega}_{\text{新},k}$  收敛于  $\omega_{j,k}$  的速度加快。因而,可以根据信号的特征,改变调节因子  $m, n$  的大小,使得信号的去噪效果最佳。不同  $m, n$  对应的阈值函数如图 1 所示。

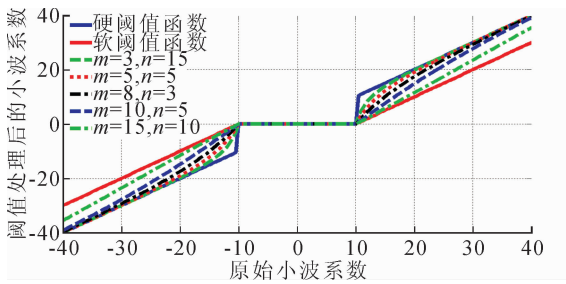


图 1 新阈值函数示意图(取不同  $m, n$ )

Fig. 1 The schematic diagram of the new threshold function(take different  $m, n$ )

### 3 仿真和分析

为了验证新阈值函数的去噪效果和优势,本文首先对超声导波信号进行建模,并通过新阈值函数对其进行降噪,确定新阈值函数中参数  $m, n$  的最佳值,然后分别采用软、硬阈值函数和新阈值函数对仿真的超声导波信号进行去噪分析。去噪性能指标主要是去噪后的信号幅值、信噪比和均方误差等。

#### 3.1 超声导波信号模型

在超声检测中,超声导波信号通常是一个被探头中心频率调制的带宽信号,其数学模型<sup>[12]</sup>如下所示:

$$s(t) = \beta e^{-\gamma(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_c(t-\tau) + \phi) \quad (5)$$

式中,  $f_c$  是发射超声脉冲的中心频率,  $\beta$  为超声导波信号幅值,  $\gamma$  决定超声导波信号的带宽,  $\tau$  为一正常数,  $\phi$  是超声导波信号的初相位。

#### 3.2 去噪效果衡量标准

信号去噪最重要的衡量标准是信噪比和均方误

差,而本文所用的是超声波透射法进行断轨检测,主要采用一端发送,一端接收的方式,因而信号的幅值也是衡量去噪效果的标准之一。

#### 1) 信噪比(SNR)

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum f(t)^2}{\sum (f(t) - \bar{f}(t))^2} \quad (6)$$

信噪比是原始信号与无信号时噪声信号功率的比值。信号的信噪比越高,去噪效果越好。

#### 2) 均方误差(MSE)

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (f(t) - \bar{f}(t))^2} \quad (7)$$

式中,  $f(t)$  为实际测量到的信号,  $\bar{f}(t)$  为去噪后的信号。

均方误差是衡量估计量与被估计量之间差异程度的指标。均方误差越小,去噪后信号越接近原始信号,去噪效果越好。

### 3.3 仿真结果

本文根据超声导波数学模型,取超声导波信号中心频率  $f_c = 20 \sim 80$  kHz,采样频率  $f_s = 4$  MHz。试验中小波函数取 db6 小波,实验得到最佳分解层数为 7。

经过对新阈值函数取大量  $m, n$  值进行仿真,不难看出,随  $m$  的增加,  $n$  逐渐减小,恰当的选取  $m$  和  $n$  的值,能使不同信噪比的原始含噪信号在去噪后获得较好的信噪比效果。仿真中发现  $m=3, n=15$  时效果较好,因而本文中新的阈值函数取  $m=3, n=15$ 。

然后向原始信号中加入不同信噪比的噪声,并采用硬阈值函数、软阈值函数以及新阈值函数进行去噪仿真,结果如表 1 所示。

表 1 三种方法的 SNR 和 MSE 的比较  
Tab. 1 The comparison of three methods of SNR and MSE

信号信噪比 SNR/dB	性能 指标	硬阈值 方法	软阈值 方法	新阈值 方法
SNR=-5	SNR/dB	11.245 6	12.262 4	13.644 8
	MSE	0.342 3	0.304 5	0.259 7
SNR=0	SNR/dB	15.853 6	17.184 9	18.260 9
	MSE	0.201 4	0.172 7	0.152 6
SNR=5	SNR/dB	20.180 3	20.564 5	21.795 0
	MSE	0.122 4	0.117 1	0.101 6

从表 1 可以看出,本文提出的新阈值函数方法的信噪比(SNR)和均方误差(MSE)均优于软、硬阈值函数方法。从表中可以发现,相对于软阈值函数法,新阈值函数法去噪后信号信噪比提高 6%~15%,均方误差降低 14%左右;相对于硬阈值函数

法,新阈值函数法去噪后信号信噪比提高 $8\% \sim 25\%$ ,均方误差降低 $20\%$ 左右。

在幅值为 $5.0\text{ mV}$ 的原始信号中加入噪声,使含噪信号信噪比为 $-2\text{ dB}$ ,含噪信号幅值为 $5.3\text{ mV}$ ,分别采用三种阈值去噪方法对信号进行处理,其结果如图2所示。

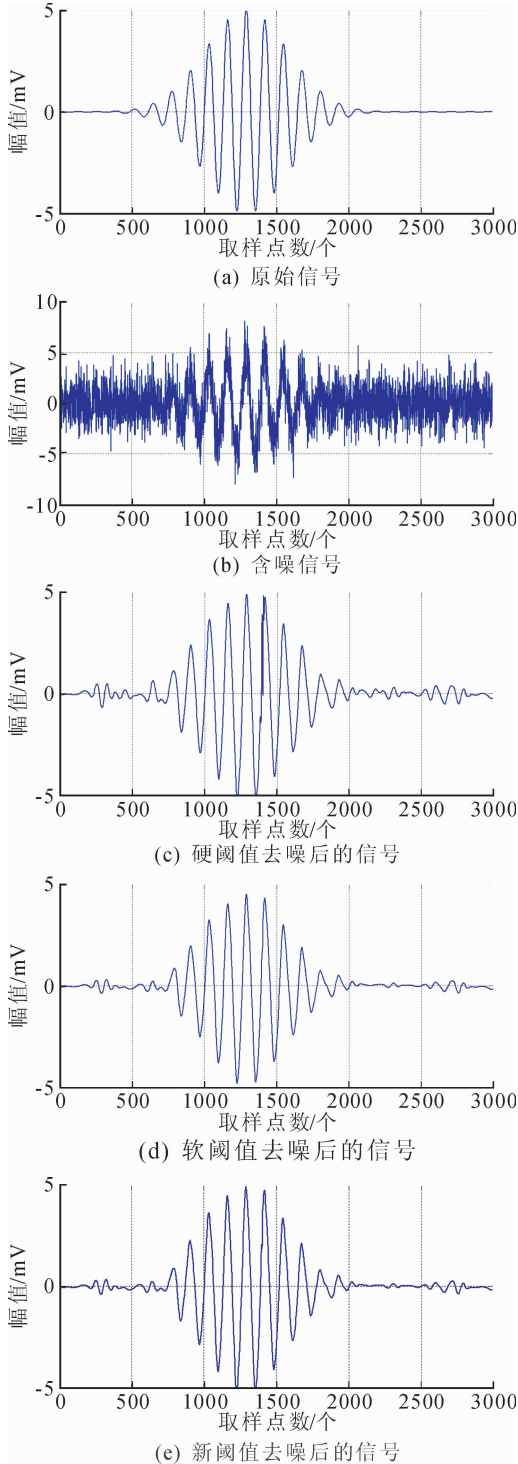


图2 不同阈值函数去噪后的波形

Fig.2 The waveform after denoising with different threshold function

图2(a)和(b)分别为原始信号和加入噪声后的信号,图2(c)、(d)、(e)分别为用三种阈值去噪方法处理后得到的结果。从图中可以看出,软阈值方法去噪虽然比较平滑,但信号特征有所损失;硬阈值方法去噪虽然能保证信号基本特征,但去噪后信号存在振荡及毛刺,不具有光滑性;新阈值方法去噪不但维持了信号的基本特征,还使得去噪后的信号比较光滑。软阈值函数、硬阈值函数和新阈值函数三种方法去噪后,信号的幅值分别为 $4.963\text{ mV}$ 、 $4.329\text{ mV}$ 、 $4.956\text{ mV}$ ,可以看出,软阈值方法使得信号幅值有较大的损失和失真,而新阈值和硬阈值方法最大程度地保持了原始信号的特征。可见,新阈值方法去噪效果最佳,去噪后信号最接近原始信号。

#### 4 实际超声导波信号分析

在实验中,发射装置产生超声波信号,经由压电传感器传入钢轨。实验系统搭建如图3所示。超声波在钢轨中的传播是比较复杂的,由于钢轨材质的不均匀或不连续性,超声波信号将产生一次或多次反射、散射及透射而发生复杂的波形转换,多种类型的反射波、折射波及透射波将会相互耦合,从而产生超声导波,并由接收装置接收超声导波信号。本文对实际的超声导波信号进行分析,由于超声导波信号用于断轨检测,因而信号容易受到铁路周围噪声的影响,主要噪声成份为环境中的白噪声。超声导波信号由于传输距离较长,信号比较微弱且非平稳,故采用小波去噪能有效地去除这些噪声。图4为不同小波阈值函数的去噪结果。

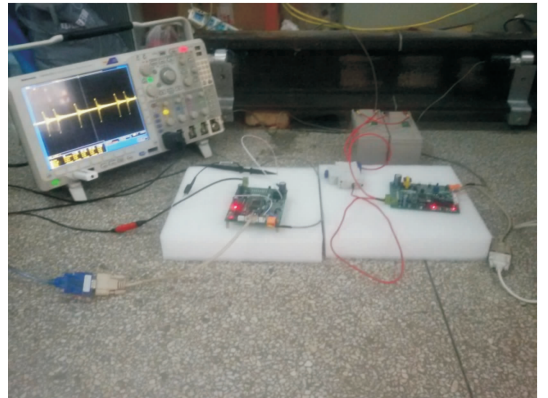


图3 实验系统组成图

Fig.3 The composition diagram of the experimental system

由图4(a)可以看出,实际超声导波信号中含有大量噪声;图4(b)硬阈值去噪后,信号幅值得到保持,但信号中存在毛刺以及少量噪声;图4(c)软阈值去噪后,信号比较平滑,但信号幅值损失较大,可



见去噪去除了有一部分有用信号;图4(d)中,新阈值函数去噪后,不但曲线平滑,还最大限度地保留了有用信号,证实了该方法对实际超声导波信号有较佳的去噪效果。

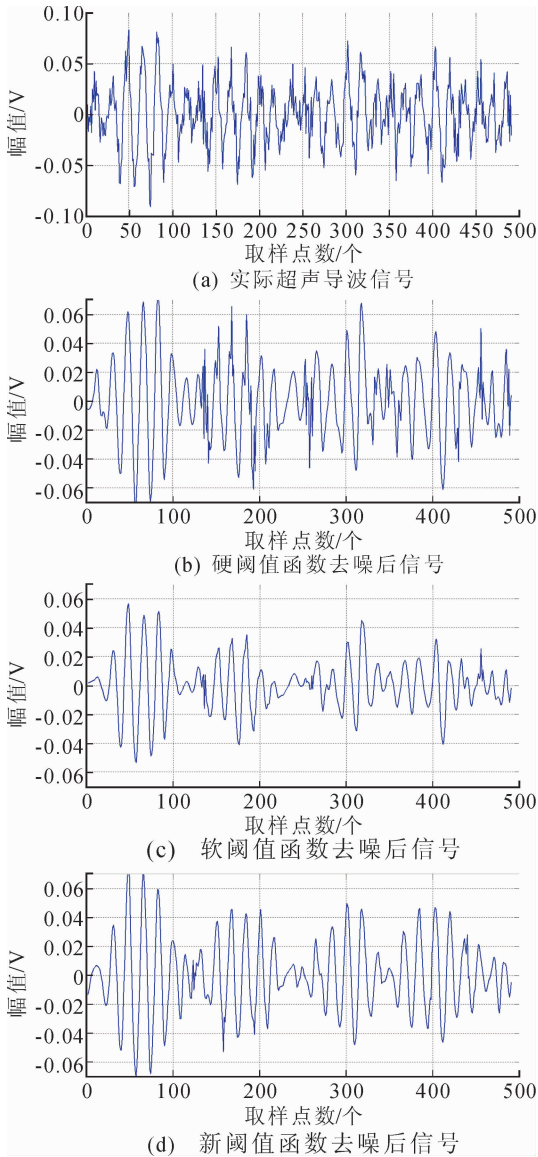


图4 不同阈值函数实际信号去噪

Fig. 4 The amplitude of signal after denoising in different state of rail

在钢轨断轨超声导波检测中,主要通过接收到的超声导波信号的幅值,来确定钢轨断裂与否。通过设定幅度阈值,当信号幅值大于阈值,则表明钢轨未断裂;当信号幅值小于阈值,则表明钢轨发生断裂,检测装置将断裂这一信息发送给上位机,产生报警,使得维护人员能及时对钢轨进行维护。在钢轨完好和断裂时,分别采集实际超声导波信号,采用三种阈值函数进行去噪,阈值设为200 mV,信号去噪后幅值如表2所示。

表2 钢轨不同状态下信号去噪后的阈值  
Tab. 2 The threshold of signal after denoising in different state of rail

钢轨状态	软阈值函数 阈值/mV	硬阈值函数 阈值/mV	新阈值函数 阈值/mV
完好	189	240	226
断裂	126	215	168

由表2可以发现,钢轨完好时,软阈值函数法容易发生误报警;钢轨断裂时,硬阈值函数法易造成漏报警。通过大量实验知道,当钢轨完好时,软阈值函数、硬阈值函数及新阈值函数误报警率分别为6%、3%、3%;当钢轨断裂时,三种方法漏报警率分别为1%、3%、1%。

综上,新阈值函数用于钢轨断轨超声导波检测信号处理时,其去噪后的信号幅值最接近有用信号幅值,提高了断轨检测的准确率,减少了漏报警或误报警的情况。

## 5 结语

本文根据软、硬阈值函数的特点及不足,提出了一种新阈值函数,并将其应用到超声导波信号的去噪中。通过仿真和对实际信号的分析发现,新的阈值函数可以通过调节参数,使去噪后的信号有最高的信噪比和最低的均方误差,且保持原始信号的基本特征,同时在实际超声导波断轨检测中,检测的准确率有了明显的提升。该方法为小波阈值去噪提供了一种新的选择,具有较高的应用价值。

## 参考文献:

- [1] Rose J L, Aviola M J, Mudge P, et al. Guided wave inspection potential of defects in rail [J]. *NDT&E International*, 2004, 37(1): 153-161.
- [2] 周正干, 冯占英, 高翌飞, 等. 时频分析在超声导波信号分析中的应用 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(7): 833-837.  
Zhou Zhenggan, Feng Zhanying, Gao Yifei, et al. Application of time frequency analysis in ultrasonic guided wave signal interpretation [J]. *Journal of Beihang University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(7): 833-837.
- [3] 许凯亮, 他得安, 王威琪. 长骨中超声导波信号的时频特征分析 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2010, 29(1): 66-70.  
Xu Kailiang, Ta Dean, Wang Weiqi. Time frequency analysis of the ultrasonic guided waves in the long bone [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2010, 29(1): 66-70.

- [4] 官慧峰,曹丽. 自适应滤波在超声气体流量计信号去噪中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 159-162.  
Guan Huifeng, Cao Li. Noise cancellation for ultrasonic gas flowmeter based on adaptive filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 159 - 162.
- [5] 宋念龙,刘欢,侯晓宁,等. 基于LMS自适应噪声对消去的激光液位测量信号波动抑制研究 [J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(1): 90-93.  
Song Nianlong, Liu Huan, Hou Xiaoning, et al. The elimination of laser liquid-level measurement signal fluctuation based on the LMS adaptive noise cancellation [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(1): 90-93.
- [6] 罗玉昆,罗诗途,罗飞路,等. 激光超声信号去噪的经验模态分解实现及改进 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 479-487.  
Luo Yukun, Luo Shitu, Luo Feilu, et al. Realization and improvement of laser ultrasonic signal denoising based on empirical mode decomposition [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 479-487.
- [7] 张晓辉,余宁梅,习岗,等. 基于小波消噪的植物电信号频谱特征分析 [J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 411-416.  
Zhang Xiaohui, Yu Ningmei, Xi Gang, et al. The analysis on spectrum characteristic of plant electrical signal based on wavelet de-noising [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(4): 411-416.
- [8] 周知进,文泽军,卜英勇. 小波降噪在超声回波信号处理中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 237 - 241.  
Zhou Zhijin, Wen Zejun, Bu Yingyong. Application study of wavelet analysis on ultrasonic echo wave noise reduction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 237-241.
- [9] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [10] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.
- [11] 杨建国. 小波分析及其工程应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [12] Demirli R, Saniie J. Model based estimation of ultrasonic echoes part I: analysis and algorithms [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2001, 48(3): 787-802.

(责任编辑 周蓓)