

6-1-2020

Improved Threshold Function Simulation Research in Vibration Signal Denoising

Hongxing Sun

School of Electronic and Information Engineering University of Science and Technology, Anshan 114051, China;

Zhang Yang

School of Electronic and Information Engineering University of Science and Technology, Anshan 114051, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Improved Threshold Function Simulation Research in Vibration Signal Denoising

Abstract

Abstract: Filtering noise component of mechanical vibration signal effectively can observe the characteristics of vibration signal more clearly. So *based on the wavelet threshold de-noising method, a new improved threshold function was proposed. The coefficient of wavelet transform mechanical vibration signals were estimated by the threshold selection method based on kurtosis value.* Not only new threshold function conforms to the distribution characteristics of the vibration signal, but also new threshold function is continuous in the threshold point. And the new threshold function overcomes the inherent deviation which traditional threshold function brings. The research of noise reduction on the simulation signal and measured mechanical vibration signal shows that wavelet de-noising method based on the improved threshold function protects the useful information of vibration signal well, and provides the method is a kind of effective de-noising method in vibration signal.

Keywords

wavelet denoising, threshold function, mechanical vibration, fault diagnosis

Recommended Citation

Sun Hongxing, Zhang Yang. Improved Threshold Function Simulation Research in Vibration Signal Denoising[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(8): 1788-1794.

改进阈值函数在振动信号降噪中的仿真研究

孙红星, 张洋

(辽宁科技大学电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 有效滤除机械振动信号中的噪声干扰成分能够更明确地观察振动信号特征, 因此在小波阈值降噪方法的基础上, 提出一种改进的新阈值函数, 该方法通过基于峭度值的阈值选取方法对机械振动信号经小波变换后的小波系数进行估计, 新阈值函数不仅符合振动信号的分布特征, 并且新阈值函数在阈值点处是连续的, 克服了传统阈值函数所具有的固有偏差, 通过对仿真信号以及实测机械振动信号的降噪处理研究, 表明基于改进的阈值函数的小波降噪方法很好地保护了振动信号的有用信息, 是一种有效的振动信号降噪方法。

关键词: 小波降噪; 阈值函数; 机械振动; 故障诊断

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 08-1788-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201708019

Improved Threshold Function Simulation Research in Vibration Signal Denoising

Sun Hongxing, Zhang Yang

(School of Electronic and Information Engineering University of Science and Technology, Anshan 114051, China)

Abstract: Filtering noise component of mechanical vibration signal effectively can observe the characteristics of vibration signal more clearly. So based on the wavelet threshold de-noising method, a new improved threshold function was proposed. The coefficient of wavelet transform mechanical vibration signals were estimated by the threshold selection method based on kurtosis value. Not only new threshold function conforms to the distribution characteristics of the vibration signal, but also new threshold function is continuous in the threshold point. And the new threshold function overcomes the inherent deviation which traditional threshold function brings. The research of noise reduction on the simulation signal and measured mechanical vibration signal shows that wavelet de-noising method based on the improved threshold function protects the useful information of vibration signal well, and provides the method is a kind of effective de-noising method in vibration signal.

Keywords: wavelet denoising; threshold function; mechanical vibration; fault diagnosis

引言

当机械设备出现故障时通常会引发信号频谱结构的变化, 通常机械故障会引起周期性的冲击,

冲击信号在振动信号中会有对应的频率成分出现^[1], 所以机械振动信号中包含了有关设备丰富的故障征兆信息, 振动信号由于周围环境或者检测手段的影响, 经常含有一定噪声干扰, 这给设备检测和诊断带来障碍。因此要在保留振动信号有用信息的同时有效滤除噪声成分。小波分析能在时频分析中利用多分辨率来研究信号的局部特征, 因而被广泛应用于非平稳信号处理中。在小波分析的基础



收稿日期: 2015-09-11 修回日期: 2015-12-03;
基金项目: 国家自然科学基金(71472081);
作者简介: 孙红星(1963-), 男, 辽宁鞍山, 博士, 教授, 研究方向为图像处理, 故障诊断等; 张洋(1990-), 男, 江苏南通, 硕士, 研究方向为故障诊断。

<http://www.china-simulation.com>

• 1788 •

上, Donoho 等人提出了小波阈值去噪方法^[2-3], 小波降噪包括阈值处理和阈值去噪, 通常采用 Donoho 等人提出的阈值估计法以及 Chang S G 等人提出的基于 Bayes 准则的阈值法^[4], 这些方法一般阈值固定单一, 没有考虑到不同尺度上小波系数的相关性会导致噪声大小的不同, 因而去噪效果不是很理想^[5]。在使用阈值函数去噪时, 主要有硬阈值函数、软阈值函数和半软阈值函数^[6], 但这些阈值函数在阈值点处间断或者连续但不光滑, 造成降噪后信号发生震荡或者失真。本文应用改进的阈值函数对含噪信号进行降噪并与几种典型阈值降噪方法相比较, 相关的仿真实验结果, 验证了本文方法的降噪效果。

1 小波阈值降噪算法

通常认为振动信号 f_i 由两部分组成: 原始真实信号 s_i , 以及噪声信号 ε_i (一般是标准的高斯白噪声信号), 即振动信号可以表示为:

$$f_i = s_i + \varepsilon_i, (i \text{ 取正整数}) \quad (1)$$

小波阈值降噪可分为以下步骤:

1) 选择合适的小波函数对含噪信号进行小波分解, 获得含噪信号的小波分解系数 $w_{j,k}$, 该系数由两部分组成: s_i 对应的小波系数 $s_{j,k}$ 以及 ε_i 对应的小波系数 $\varepsilon_{j,k}$;

2) 对小波分解系数 $w_{j,k}$ 通过阈值函数进行阈值化处理, 得到新的小波系数 $\hat{w}_{j,k}$, 使得 $\left\| \hat{w}_{j,k} - s_{j,k} \right\|$ 尽可能小, 从最大程度上滤除噪声;

3) 对小波阈值处理后得到的小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 进行小波逆变换处理得到降噪后的信号。

2 阈值的选取

阈值的选取会直接影响到去噪的效果, 如果阈值太小, 得到的估计小波系数中将含有过多的噪声分量, 达不到去噪的目的; 如果阈值太大, 会损失部分信号分量, 导致重构后的信号失真严重。因此,

在实际应用中首先要确定阈值的大小。目前的阈值选取大致分为全局阈值和局部适应阈值。全局阈值对各层小波系数都是统一的, 局部适应阈值是根据当前小波系数周围的情况而定, 更加灵活^[7]。

2.1 常用的小波阈值

对于小波域滤波的阈值估计, 常用的阈值选取方式有以下几种:

1) 基于无偏似然估计原理的阈值 (rigrsure 阈值): 若设小波系数的平方组成向量为 $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$, 且 $w_1 \leq w_2 \leq \dots \leq w_n$, 再设一向量 $R_i (i=1, 2, \dots, n)$, 其向量元素为:

$$r_i = [n - 2i - (n - i)w + \sum_{k=1}^i w_k] / n$$

以 R 向量中最小值 r_a 为最小值, 由 r_a 的下标 a 求出对应的 w_a , 阈值为:

$$\lambda_1 = \sigma \sqrt{w_a} \quad (2)$$

2) 对数长度统一阈值 (Sqrtwolog 准则): 阈值计算方法为:

$$\lambda_2 = \sigma \sqrt{2 \log(n)} \quad (3)$$

3) 启发式的无偏似然估计 (Heursure 阈值): 设 Σ 为 n 个小波系数的平方和, 令 $\eta = (\Sigma - n) / n$, $\mu = (\log_2 n)^{3/2}$, 阈值为:

$$\lambda_3 = \begin{cases} \lambda_2 & \eta \leq \mu \\ \min(\lambda_1, \lambda_2) & \eta > \mu \end{cases} \quad (4)$$

4) 基于极大极小原理的 Minimax 阈值:

$$\lambda_4 = \begin{cases} \sigma(0.3936 + 0.1829 \log_2 n) & n > 32 \\ 0 & n \leq 32 \end{cases} \quad (5)$$

从能量保留和特征提取的角度出发, ‘rigrsure’ 阈值策略是最优的, 运用 ‘sqrtwolog’ 规则估计的信号在最小均方差的意义上是有效的^[8]。在实际应用中, 基于 ‘rigrsure’ 和 ‘minimax’ 阈值策略比较保守, 而其它两种方法产生的阈值则过大。1995 年 Donohue 和 Johnstone 等人提出了非线性小波变换阈值去噪算法, 推导出了计算阈值的通用公式:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln N} \quad (6)$$

该阈值是在高斯模型下针对多维独立正态变量联合分布得出的, 其中 σ 为噪声标准差, N 为待处理的信号长度, 在实际应用中, 噪声的方差是未知的, 这就需要在小波分解前对噪声水平进行估计, 通常利用 Donohue 等人提出的各尺度细节小波系数绝对值的中值来对噪声方差进行估计, 即:

$$\sigma = \text{median}(|w_{j,k}|) / 0.6745 \quad (7)$$

2.2 改进的阈值选取方式

噪声信号的幅值随着小波分解层数的增加而减小, 如果在小波分解重构信号的过程中, 对不同的分解层数仍然采用相同的阈值进行处理, 那么就会在小波低频系数中过多滤去有用信号。传统的阈值选取方式采用的是固定单一的阈值, 并没有随着小波分解尺度的变化而做出调整, 因而去噪效果不是很理想。针对这种不足之处, 通常是引入尺度调节参数^[9]:

$$\lambda_j = \sigma \sqrt{2 \ln(N) / \ln(j+1)} \quad (8)$$

式中: j 为分解尺度, N 为信号长度, 显然通过加入分解尺度 j 使得阈值随着分解尺度的变化而变化。相比于传统阈值, 改进的阈值具有自适应性, 去噪效果有所提高。

文献[10]针对机械类振动信号的特性, 提出了基于峭度的合理阈值选取方式:

$$\lambda_j = \frac{\sigma \sqrt{2 \ln(N)}}{[\log(j+1)(Kurtosis)(j) / 3]} \quad (9)$$

峭度(Kurtosis)反映了振动信号分布特征的数值统计量, 分母中 $\log(j+1)$ 使得阈值随分解尺度的增大而减小, 同时 $Kurtosis(j) / 3$ 起到了调节阈值的作用, $Kurtosis(j) > 3$ 时, 表明在该尺度有效信号较大, 阈值随着峭度值增大而减小, 保留了振动信号中有用的冲击信号成分, 由于本文所研究的对象是机械设备振动信号, 所以采用该阈值选取策略。

3 小波阈值函数的改进

不同的阈值函数反映了对小波系数不同的处

理策略, 它关系着降噪之后重构信号的连续性和精度, 对小波降噪的效果影响很大。

3.1 传统小波阈值函数

常用的小波阈值选择函数有硬阈值和软阈值两种函数处理方式。软阈值处理是把信号的绝对值和阈值进行比较, 当数据的绝对值小于阈值时, 令其为零, 当数据的绝对值大于或等于阈值时, 使其向零收缩, 变为该点值与阈值之差; 对于硬阈值处理则是将数据绝对值大于或等于阈值的点保持不变, 小于阈值的点令其为零。式(10)和式(11)分别是硬阈值函数和硬阈值函数表达式。

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (10)$$

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (11)$$

式中: $w_{j,k}$ 是小波系数; λ 是阈值; $w_{j,k}$ 是经过阈值函数处理后得到的新小波系数。

硬阈值函数尽管能保留信号的局部特征, 但是由于在阈值 λ 处没有连续, 因而降噪后的信号产生了震荡而不再具备光滑性; 而软阈值函数虽然改善了硬阈值函数中不连续的缺点, 保证了处理后信号的光滑性, 但是在小波系数大于阈值 λ 时, 经过硬阈值函数处理后的小波系数与原系数存在恒定偏差, 可能会使信号失真。

3.2 改进的阈值函数的提出

针对传统软、硬阈值函数的不足。文献[11]介绍了一种半软阈值函数:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \alpha\lambda), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (12)$$

通过增加调节参数 $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 的大小选择合适的系数, 从而使得估计出的小波系数在硬阈值和软阈值之间达到折中效果, 更接近原始的小波系数, 达到良好的降噪效果。由于参数 α 在实际操作中经常取值为某一常数, 不具有自适应性,

因此仍然会存在软阈值函数的固有偏差问题以及硬阈值函数的不连续性问题^[12]。文献[13-14]分别提出了相关阈值函数的改进, 见式(13)与(14)。

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ w_{j,k} \cdot b^{-a(|w_{j,k}|-\lambda)^2}, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (13)$$

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{j,k}) \left[|w_{j,k}| - \frac{2}{\pi} \times \lambda \times \arccot\left(\frac{|w_{j,k}|-\lambda}{N}\right) \right], & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (14)$$

式(13)中为了增强阈值函数在实际去噪应用中的灵活性, 可以通过改变 a 的值来调节实际应用效果。可以看出当 a 的值逐渐增大时, 该阈值函数接近硬阈值函数。式(14)中 N 是任意系数且 $N \in (0, +\infty)$, 当 $N \rightarrow 0$ 时, 该阈值函数转换为硬阈值函数; 当 $N \rightarrow \infty$ 时, 该阈值函数变为软阈值函数。

上述阈值函数在阈值处连续, 减小了软阈值函数中的恒定误差, 减弱了硬阈值函数存在的信号震荡性, 增加了相关调节参数以适应不同的含噪信号, 但是调节参数在应用时灵活性不足, 所以使得阈值函数在实际应用过程中仍然会出现连续性差的情况。所以本文在结合上述两种阈值函数优点的基础上, 同时参考文献[15]阈值函数的形式, 将文献[13]中的 $b^{-a(|w_{j,k}|-\lambda)^2}$ 当作一个整体并入到文献[14]的阈值函数中, 即得到如下的阈值函数表达式:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \eta w_{j,k} + (1-\eta) \text{sign}(w_{j,k}) \left[|w_{j,k}| - \frac{2}{\pi} \times \lambda \times \arccot\left(\frac{|w_{j,k}|-\lambda}{N}\right) \right], & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\eta = 1 - b^{-a(|w_{j,k}|-\lambda)^2}$, $a(a \geq 0)$, $b(b > 1)$ 和 N 为调节参数, λ 是阈值。

3.3 对整合的新阈值函数的分析

1) 新阈值函数的连续性研究

当 $w \rightarrow \lambda^+$, 很显然 $\eta = 0$ 。易证明:

$$\lim_{w_{j,k} \rightarrow +\infty} \hat{w}_{j,k} - w_{j,k} = \lim_{w_{j,k} \rightarrow -\infty} \hat{w}_{j,k} - w_{j,k} = 0$$

所以新阈值函数在 λ 处是连续的; 同理可证, 新阈值函数在 $-\lambda$ 处也是连续的; 说明新阈值函数在阈值点处是连续的, 避免了降噪后的信号产生震荡的问题。

2) 新阈值函数的偏差性研究

当 $w_{j,k} \rightarrow +\infty$ 时, 很显然 $\eta = 1$ 。也易证明

$$\lim_{w_{j,k} \rightarrow +\infty} \hat{w}_{j,k} - w_{j,k} = \lim_{w_{j,k} \rightarrow -\infty} \hat{w}_{j,k} - w_{j,k} = 0$$

所以经过新阈值函数处理后, 新阈值函数与硬阈值函数之间的偏差被消除, 这克服了传统阈值降噪方法后信号失真的缺陷。

3) 新阈值函数的调节参数分析

为了简化描述, 这里仅对调节参数 a 和 N 进行讨论: 当 $a=0$ 时, 则 $\eta=0$, 此时新阈值函数成为了文献[14]中的阈值函数, 因此含有文献[14]阈值函数的调节特性; 当 $a \rightarrow \infty$ 时, $\eta \rightarrow 1$, 此时新阈值函数变成了硬阈值函数; 当 $N \rightarrow \infty$ 时, $a=0$ 时, 此时新新阈值函数变成了软阈值函数。综上所述改进得到的新阈值函数在阈值点处连续, 消除了硬阈值函数固有存在的信号震荡性缺陷和软阈值函数所造成的恒定偏差, 更好地还原了原始信号, 并且能够通过灵活地改变调节参数来适应不同类型含噪信号。

4 改进的阈值函数的算法验证

为了验证改进的阈值函数在信号降噪应用中的有效性和优越性, 运用 Matlab 软件进行仿真降噪对比实验。Matlab 软件中自带的 bumps 信号带有振动信号震荡冲击的特征, 所以使用该仿真信号作为简化的振动类信号来进行初步研究, 采样点数为 1 024, 同时给信号加入信噪比为 12 的高斯白噪声。降噪效果如图 1 所示。

为了更准确地反映出改进的阈值函数算法的降噪效果, 可以计算每种阈值方法后得到的信号的信噪比(SNR)和均方根误差(RMSE)。

假设原始信号为 s_i , N 为信号长度, 经过阈值

处理后的信号为 s_i , 则信噪比为:

$$SNR = 10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{\sum_{i=1}^N [s_i - \hat{s}_i]^2} \right] \quad (16)$$

原始信号和降噪后的均方根误差为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [s_i - \hat{s}_i]^2} \quad (17)$$

信噪比和均方根误差是用来衡量降噪效果的两项指标, 通常情况下, 经过降噪后的信号信噪比越高, 与原始信号之间的均方根误差越小, 则表明降噪后的信号和原始信号越接近, 降噪效果也就越好。表 1 给出了运用不同阈值方法降噪之后的信噪比和均方根误差。

表 1 不同阈值方法降噪后的 SNR 及 RMSE

Tab. 1 SNR and RMSE for different de-noising method

降噪方法	SNR/dB	RMSE
未降噪	17.155 3	0.249 7
传统硬阈值方法	19.743 7	0.172 0
传统软阈值方法	20.829 9	0.141 0
半软阈值方法	21.689 9	0.131 8
文献[13]方法	22.700 5	0.127 5
文献[14]方法	22.739 5	0.121 3
本文阈值方法	23.735 3	0.117 1

通过表 1 看出, 本文使用的改进的阈值函数方法降噪效果优于传统阈值函数, 相对文献[13-14]也有了进一步的提高。

5 改进的阈值函数降噪算法在机械振动信号上的应用

为了进一步验证改进的阈值函数降噪算法在实际应用中的降噪效果, 在机械振动信号试验台上模拟机械故障, 采集相关振动故障信号数据, 采集的信号数据点数为 1 024 点, 采样频率设定为 1 000 Hz, 使用改进的阈值函数降噪算法对采样信号进行降噪, 图 2 是未降噪之前的原始机械故障振动信号波形及频谱图, 图 3 是使用改进的阈值函数降噪方法后得到的振动信号波形图以及频谱图。

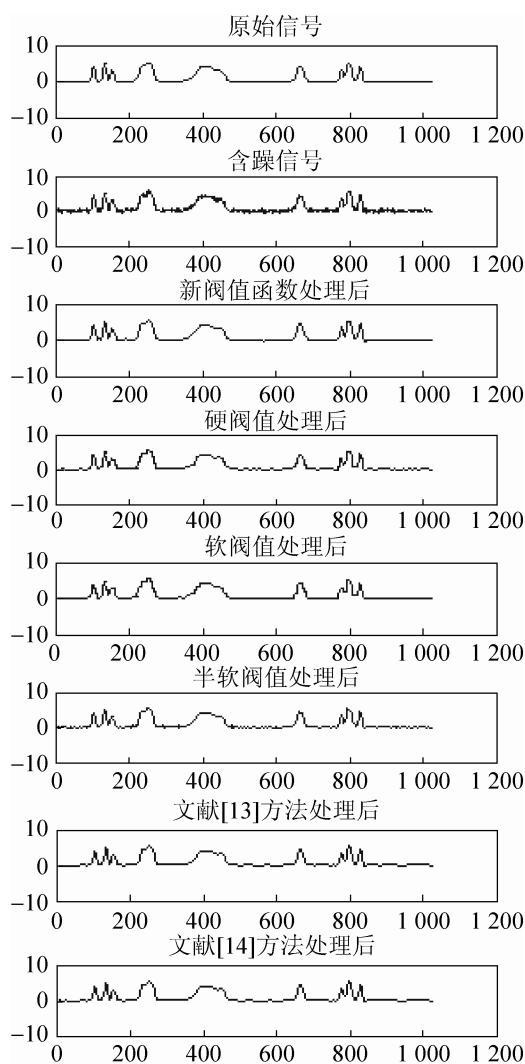


图 1 不同方法降噪对比图

Fig. 1 Comparison charts of different de-noising method

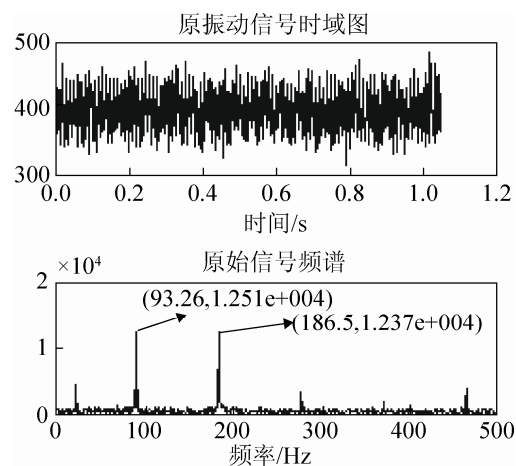


图 2 原始信号时域图与频谱图

Fig. 2 Diagram of original signal time domain and spectrum

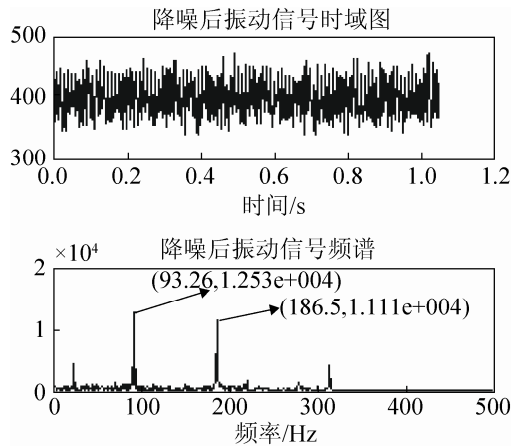


图3 降噪后信号时域图和频谱图

Fig. 3 Diagram of original signal time domain and spectrogram

通过对比降噪前后的频谱图可以明显看出使用改进的阈值函数进行降噪后, 高频部分的噪声部分(图2中300~500 Hz段)得到很好的抑制和消除, 同时该方法很好地保留了低频部分有用的故障信息(图2、图3中已标出的尖峰故障特征频率信息是判断机械故障类型的有用信息), 从而使得振动信号故障信息的提取更加有效。

6 结论

本文针对传统阈值函数方法降噪的不足之处, 结合相关文献, 对小波阈值函数进行了改进, 使得阈值函数在应用过程中更加灵活, 对模拟仿真信号与实际机械振动信号进行了降噪处理, 均得到了理想的效果。说明了本文提出的改进小波阈值函数降噪方法的合理性和有效性。

(1) 改进的阈值函数克服了传统阈值函数的不足, 消除了传统阈值函数本身带来的降噪偏差;

(2) 改进的阈值函数增加了调节参数, 具有了更好的调节性能;

(3) 改进的阈值函数结合基于峭度值的阈值选取方式是合理有效的, 降噪过程中阈值大小随振动信号峭度分布的变化而进行自适应调整, 很好地适应了振动信号的振动特性规律;

(4) 本文主要针对振动类信号进行了小波降噪方法中阈值函数的研究, 对于其他类型的含噪信

号的降噪效果需要进一步的研究工作。

参考文献:

- [1] 王金福, 李福才. 机械故障诊断的信号处理方法: 频域分析 [J]. 噪声与振动控制, 2013(1): 173-180. (Wang Jin-fu, Li Fu-cai. Signal Processing Methods in Fault Diagnosis of Machinery-Analyses in Frequency Domain [J]. Noise and Vibration Control, 2013(1): 173-180.)
- [2] Donoho D L. De-noising by soft-threshold [J]. IEEE Transaction Theory (S1557-9564), 1995, 41(3): 613-627.
- [3] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. Biometrika (S0006-3444), 1994, 81(3): 425-455.
- [4] S G Chang, Bin Yu, M Vetterli. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and ompression [J]. IEEE Transactions on Image Processin (S1941-0042), 2000, 9(9): 1532-1546.
- [5] 李秋妮, 晁爱农, 史德琴, 等. 一种新的小波半软阈值图像去噪方法[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(8): 1566-1570. (Li Qiu-ni, Chao Ai-nong, Shi De-qin, et al. A novel image denoising method of wavelet semisoft threshold [J]. Computer Engineering & Science, 2014, 36(8): 1566-1570.)
- [6] 张德丰. MATLAB 小波分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 224-225. (Zhang De-feng. MATLAB wavelet analysis [M]. Beijing, China: China Machine Press, 2011: 224-225.)
- [7] 陈晓曦, 王延杰, 刘恋. 小波阈值去噪法的深入研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 105-110. (Chen Xiao-xi, Wang Yan-jie, Liu lian. Deep study on wavelet threshold method for image noise removing [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 105-110.)
- [8] 惠飞, 史昕, 赵祥模, 等. 基于改进阈值函数的小波去噪算法研究 [J]. 现代电子技术, 2011, 34(12): 61-64. (Hui fei, Shi Xin, Zhao Xiang-mo, et al. Research of Wavelet De-noising Algorithm Based on Improved Threshold Function [J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(12): 61-64.)
- [9] 钱苏敏, 张琳絮, 张云, 等. 基于小波阈值改进的去噪算法研究 [J]. 研究与开发, 2012, 31(5): 49-51. (Qian Su-min, Zhang Lin-xu, Zhang yun, et al. Study of de-noising improved based on wavelet threshold [J]. Research & Development, 2012, 31(5): 49-51.)
- [10] 隋文涛, 张丹. 基于峭度的阈值降噪方法及在振动信号分析中应用 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 155-158. (Sui Wen-tao, Zhang dan. Kurtosis-based threshold denoising method and its application in vibration signal analysis [J].

Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(7): 155-158.)

- [11] 孟宗, 李姗姗. 基于小波半软阈值和 EMD 的旋转机械故障诊断 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(10): 1279-1283. (Meng zong, Li Shan-shan. Research on Fault Diagnosis for Rotating Machinery Based on Semi-soft Wavelet Threshold and EMD [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(10): 1279-1283.)
- [12] 杨恢先, 王绪四, 谢鹏鹤, 等. 改进阈值与尺度间相关的小波红外图像去噪 [J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1167-1174. (Yang Huixian, Wang Xusi, Xie Penghe, et al. Infrared Imaged Denoising Based on Improved Threshold and Inter-scale Correlations of Wavelet Transform [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1167-1174.)
- [13] 苏立, 南海鹏, 余向阳, 等. 基于改进阈值函数的小波降噪分析在水电机组振动信号中的应用 [J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 246-251. (Su Li, Nan Hai-peng, Yu

Xiang-yang, et al. Application of wavelet denoising of improved threshold function to vibration signal analysis of hydroelectric units [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3): 246-251.)

- [14] 陈丹阳. 改进的小波阈值函数在超声波无损检测信号中的应用 [J]. 闽南师范大学学报(自然科学版), 2014 (2): 52-56. (Chen Dan-yang. Application of Improved Wavelet Threshold Function in Ultrasonic Signal Denoising for Non-destructive Testing [J]. Journal of Minnan Normal University (Nat.Sci.), 2014(2): 52-56.)
- [15] 张莲, 秦华锋, 余成波. 基于小波阈值去噪算法的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(9): 172-173. (Zhang Lian, Qin Hua-feng, Yu Cheng-bo. Research of denoising method based on wavelet threshold [J]. Computer Engineering and Application, 2008, 44(9): 172-173.)

(上接第 1787 页)

- [10] Bayhan S, Giir G, Alagoz F. Adaptive Routing Protocol for QoS in Two- Layered Satellite IP Networks [C]// International Workshop on Satellite and Space Communications, Madrid, Spain. USA: IEEE Communications Society, 2006: 63-67.
- [11] 胡姗姗. 基于波长路由的 LEO 卫星光网络路由算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 33-40. (Hu Shanshan. For Routing Algorithm of LEO Satellite WDM Network Based on Wavelength Routing [D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2013: 33-40.)
- [12] 王延春, 潘成胜. 双层卫星网络的结构设计与性能分析 [J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(5): 1145-1150. (Wang Yanchun, Pan Chengsheng. Architecture Design and Performance Analysis of Double-layer Satellite

Networks [J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(5): 1145-1150.)

- [13] 王冬霞, 赵金贤. 双层卫星网星间链路混合路由算法设计 [J]. 导航定位学报, 2016, 4(2): 29-35. (Wang Dongxia, Zhao Jinxian, et al. ISL Routing Strategy of Two Layer Satellite Network [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4(2): 29-35.)
- [14] 杨泛舟. WDM 光网络上的波长分配研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 23-34. (Yang Fanzhou. Research of Wavelength Assignment on WDM Optical Networks [D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2013: 23-34.)
- [15] Noronha T F, Resende M G C, Ribeiro C C. A biased Random-key Genetic Algorithm for Routing and Wavelength Assignment [J]. Journal of Global Optimization (S0925-5001), 2011, 50(3): 503-518.