

文章编号: 2095-2163(2020)04-0017-05

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

改进小波阈值对热泵电机振动信号的去噪研究

王盟¹, 余粟², 冯益林¹

(1 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620; 2 上海工程技术大学 工程实训中心, 上海 201620)

摘要: 通过加速度传感器采集的热泵电机轴承振动信号包含大量的特征信息和高斯噪声干扰。通常采用小波阈值降噪处理可以很大程度上降低噪声,但是传统的阈值函数存在恒等差和不连续的缺点,导致信号失真和振荡。本文提出结合多尺度阈值的具有可调因子的新阈值函数,应用于热泵电机振动信号仿真处理,证明了新阈值函数在克服传统阈值函数缺点的同时,可以灵活调节参数以适应复杂的含噪现象。既提高了信噪比,又保留了更多的有用信号。

关键词: 加速度传感器; 热泵电机; 多尺度阈值; 可调因子; 信噪比

Research on denoising of vibration signal of heat pump motor by improved wavelet threshold

WANG Meng¹, YU Su², FENG Yilin¹

(1 School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China, 2 Engineering Training Centre, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] The vibration signal of heat pump motor bearing acquired by acceleration sensor contains a lot of characteristic information and Gaussian noise interference. Usually the wavelet threshold denoising process can greatly reduce the noise, but the traditional threshold function has the disadvantages of constant difference and discontinuity, resulting in signal distortion and oscillation. This paper proposes a new threshold function with adjustable factors that combines multi-scale thresholds. Applying the new threshold function to the vibration signal simulation of heat pump motor, which proves that the new threshold function can flexibly adjust the threshold to adapt to the complex noise situation while overcoming the shortcomings of the traditional threshold function, which not only improves the signal-to-noise ratio, but also retains more Useful signal.

[Key words] acceleration sensor; heat pump motor; identical difference multi-scale threshold; adjustable factor; signal-to-noise ratio

0 引言

热泵电机是热泵机组工作的核心部件,其运行状态直接决定热泵机组的工作质量。所以热泵电机的振动信号获取与分析是保证稳定运行的重要环节。由于其位于热泵机组的内部,而且工作环境较为恶劣,使得监控过程中获取的信号包含了噪声干扰,呈现出非平稳时变特点。

小波阈值降噪方法能够在减少误差的同时保留更多有用的信号,被广泛应用于非平稳时变系统。在传统的小波阈值函数中:硬阈值函数降噪一般会相对较小的均方根误差,但具有不连续性,处理信号时会产生跳变。软阈值函数整体连续,处理之后的信号较为平滑,但在重构信号时会产生恒定偏差,造成原信号过度失真。文献[5]中提出了含有 e 指数的新阈值函数,但不含调节因子,不能实现灵活去噪。文献[6]中提出含有调节因子 a 、 b 的改进阈值函数,可以灵活调节适应含噪信号,但计算量较

大,数据处理较为困难。另外,在实际信号处理过程中,随着分解尺度的增加,要求噪声引起的小波系数逐渐降低^[2],如果选择固定阈值,就会导致信号失真严重。对此,文献[7-8]中提出了多尺度阈值去噪方法,具有较大的参考价值。

本文针对软、硬阈值存在的不足,与多尺度的阈值相结合,提出了一种改进的新阈值函数。新阈值函数引入了可调因子 m 和 n ,不仅解决了传统阈值函数存在的不连续性和恒等差问题,而且使得计算量相对减少。将此阈值函数应用于热泵电机信号的降噪处理中,在保留更多特征信息的基础上,取得了较好的滤噪效果。

1 小波阈值去噪原理及计算

1.1 小波阈值去噪原理

小波阈值去噪的原理是先设定一个阈值 λ ,假如小波系数小于 λ ,就把这个系数认定为噪声产生的,将之消除;反之小波系数大于 λ ,就把该系数认

基金项目:上海市科学技术委员会资助项目(17511110204)。

作者简介:王盟(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:通信技术与智能控制;余粟(1962-),女,硕士,教授,主要研究方向:机电控制。

通讯作者:余粟 Email:suyu-sh@hotmail.com

收稿日期:2019-12-15

定为信号产生的,将之保留。最后采取小波逆变换对小波系数进行重构,得到去噪后的信号。假设含噪的电机振动信号满足 $f(t) = \hat{f}(t) + \omega(t)$ 。其中, $f(t)$ 为原始标准信号, $\omega(t)$ 为噪声信号。小波阈值降噪步骤如图 1 所示。

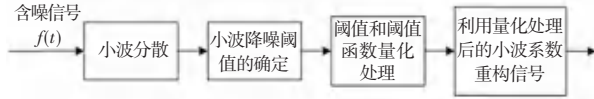


图 1 小波阈值降噪流程

Fig. 1 Wavelet threshold noise reduction process

1.2 常见的阈值和阈值函数

阈值和阈值函数的选取直接决定信号去噪的效率。目前常见的阈值选择方法有:极值阈值估计、无偏似然估计、固定阈值估计以及启发式估计等^[10]。前 2 种方法可以将少量分布在高频部分的微弱信号提取出来,但是降噪效果却相对较低。而后 2 种方法降噪效果较高,却易于把有用信号当做噪声消除。一般情况下多选择固定阈值估计方法。

常用的阈值函数有软阈值和硬阈值函数。其定义如下:

软阈值函数定义:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) (|\omega_{j,k}| - \lambda), & |\omega_{j,k}| \geq \lambda, \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda. \end{cases} \quad (1)$$

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} (1-a)\omega_{j,k} + \frac{a}{n} \cdot \text{sgn}(\omega_{j,k}) \cdot (|\omega_{j,k}| - a \cdot m \cdot \lambda), & |\omega_{j,k}| \geq \lambda, \\ \text{sgn}(\omega_{j,k}) \cdot \frac{(1-m)\omega_{j,k}^2}{n\lambda}, & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

其中, $a = e^{-n(1-m)(|\omega_{j,k}| - \lambda)}$; 可调因子 $m \in [0, 1]$; n 取正数。

新阈值的特征如下:

(1) 改进的阈值函数具有连续性。

当 $|\omega_{j,k}| \rightarrow \lambda^+$ 时:

$$\begin{aligned} \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow \lambda^+} \hat{\omega}_{j,k} &= \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow \lambda^+} [(1-a)\omega_{j,k} + \frac{a}{n} \cdot \text{sgn}(\omega_{j,k}) \cdot (|\omega_{j,k}| - a \cdot m \cdot \lambda)] \\ &= \frac{1}{n} \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow \lambda^+} (|\omega_{j,k}| - m\lambda) = \frac{(1-m)\lambda}{n}, \end{aligned} \quad (5)$$

当 $|\omega_{j,k}| \rightarrow \lambda^-$ 时:

$$\begin{aligned} \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow \lambda^-} \hat{\omega}_{j,k} &= \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow \lambda^-} \text{sgn}(\omega_{j,k}) \cdot \frac{(1-m)\omega_{j,k}^2}{n\lambda} \\ \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow \lambda^-} \frac{(1-m)\omega_{j,k}^2}{n\lambda} &= \frac{(1-m)\lambda}{n}, \end{aligned} \quad (6)$$

硬阈值函数定义:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k}, & |\omega_{j,k}| \geq \lambda, \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda. \end{cases} \quad (2)$$

由公式可知硬阈值函数在阈值 λ 处不连续,导致较大的均方误差和波形震荡,不具有原始信号的平滑性。软阈值函数是连续的,但处理前后存在固定的偏差,在产生较大误差的同时也会造成部分有用信息的丢失。

2 改进阈值函数

2.1 一种新的阈值函数

为克服传统阈值函数存在的恒等差和不连续问题,文献[5]在软、硬阈值折中函数的基础上进行改进,提出了一种新的小波阈值函数:

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_{j,k}) \left[|\omega_{j,k}| - \frac{2\lambda}{1 + e^{-(|\omega_{j,k}| - \lambda)}} \right], & |\omega_{j,k}| \geq \lambda, \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

此式解决了恒等差和不连续的问题,却不含调节因子,因此不能动态调整。为此本文提出引入调节因子 m 和 n ,得到新公式:

即证明,新的阈值函数在 λ 处连续。

(2) 改进的阈值函数具有渐进性。验证如下:

$$\begin{aligned} \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow +\infty} \left(\frac{\hat{\omega}_{j,k}}{\omega_{j,k}} \right) &= \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow +\infty} \frac{(1-a)\omega_{j,k} + \frac{a}{n} \cdot \text{sgn}(\omega_{j,k}) \cdot (|\omega_{j,k}| - a \cdot m \cdot \lambda)}{\omega_{j,k}} = \\ \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow +\infty} \left(\frac{\omega_{j,k}}{\omega_{j,k}} \right) &= 1. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{同理, } \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow -\infty} \left(\frac{\hat{\omega}_{j,k}}{\omega_{j,k}} \right) = \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow -\infty} \left(\frac{\omega_{j,k}}{\omega_{j,k}} \right) = 1. \quad (8)$$

随着 $|\omega_{j,k}|$ 不断增大,逐渐向 $|\omega_{j,k}|$ 靠近。

(3) 改进的阈值函数偏差性较小。验证如下:

$$\begin{aligned} \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow +\infty} (\hat{\omega}_{j,k} - \omega_{j,k}) &= \lim_{|\omega_{j,k}| \rightarrow +\infty} [(1-a)\omega_{j,k} + \frac{a}{n} \cdot \text{sgn}(\omega_{j,k}) \cdot (|\omega_{j,k}| - a \cdot m \cdot \lambda) - \omega_{j,k}] = \end{aligned}$$

$$\lim_{w_{j,k} \rightarrow +\infty} (\omega_{j,k} - \omega_{j,k}) = 0, \quad (9)$$

同理,

$$\lim_{w_{j,k} \rightarrow -\infty} (\hat{\omega}_{j,k} - \omega_{j,k}) = 0. \quad (10)$$

上式证明, 随着小波系数的增大, 二者之间的差距会逐渐减小, 解决了软阈值的固有缺陷。

改进的阈值函数与软硬阈值函数对比如图 2 所示, 由图可知新阈值函数既解决了软阈值函数恒等差问题, 也克服了硬阈值函数在 λ 处不连续的缺点。

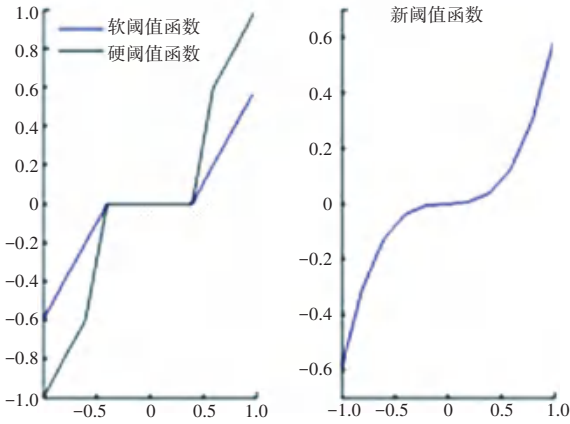


图 2 新阈值函数与软硬阈值函数对比

Fig. 2 Comparison of the new threshold function and the soft and hard threshold function

2.2 可调因子的取值分析

令 $m = 1, n = 1$, 新阈值函数可演变为软阈值函数; 令 $n \rightarrow \infty$, 则其可变为硬阈值函数。这证明新阈值函数具有可调性, 通过改变 m 和 n 的取值以适应实际信号噪声变化^[4], 最终实现优化的目标。通过多组实验计算对比, 对小于 60 dB 的噪声去噪, 当 $m = 0.83, n = 6$ 时, 可以取得最佳的降噪效果; 对大于 60 dB 的噪声去噪, 当 $m = 0.89, n = 7$ 时, 可以取得最佳的降噪效果。

2.3 确定最优阈值

传统小波阈值一般采用固定值, 而实际降噪时小波系数与分解尺度成反比。即分解尺度增大, 小波系数随之变小。为适应此规律, 以达到保留更多有用信号的目的, 要求应选取多尺度小波阈值。为节省计算时间, 本文采用文献[7]中的小波阈值选取方法。张振凤在文献[7]中基于 lipschitz 指数论证了第 $j + 1$ 层小波系数约为第 j 层的 $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 倍, 提出了:

$$\lambda = \frac{\frac{\frac{2}{e} \cdot \frac{2}{e}}{2} \cdot \frac{j-1}{2}}{\frac{2}{e} \cdot \frac{2}{e}} \cdot \sigma \sqrt{2 \ln(N)}. \quad (11)$$

3 实验仿真

为验证改进算法的效果, 首先设置原始含噪信

号为 $x(t) = 10\sin(0.32t) + noise(t)$, 其中 t 属于 $[0, 500]$, $noise(t)$ 为 Gauss 噪声。分别采用软阈值函数、硬阈值函数、文献[5]中的阈值函数和改进的新阈值函数对加噪信号进行降噪处理, 降噪效果如图 3 所示。其中图 3(a) 为结合固定阈值的实验效果, 图 3(b) 为结合多尺度阈值的实验效果。由图 3 可以看出改进后的新阈值函数降噪信号, 即图 3(b) 中(f)的波形最接近原始信号波形, 其信噪比为 18.37, 相比于其它几种降噪方法, 信噪比约提高了 7% ~ 15%, 由此验证了改进算法具有较高实效性。

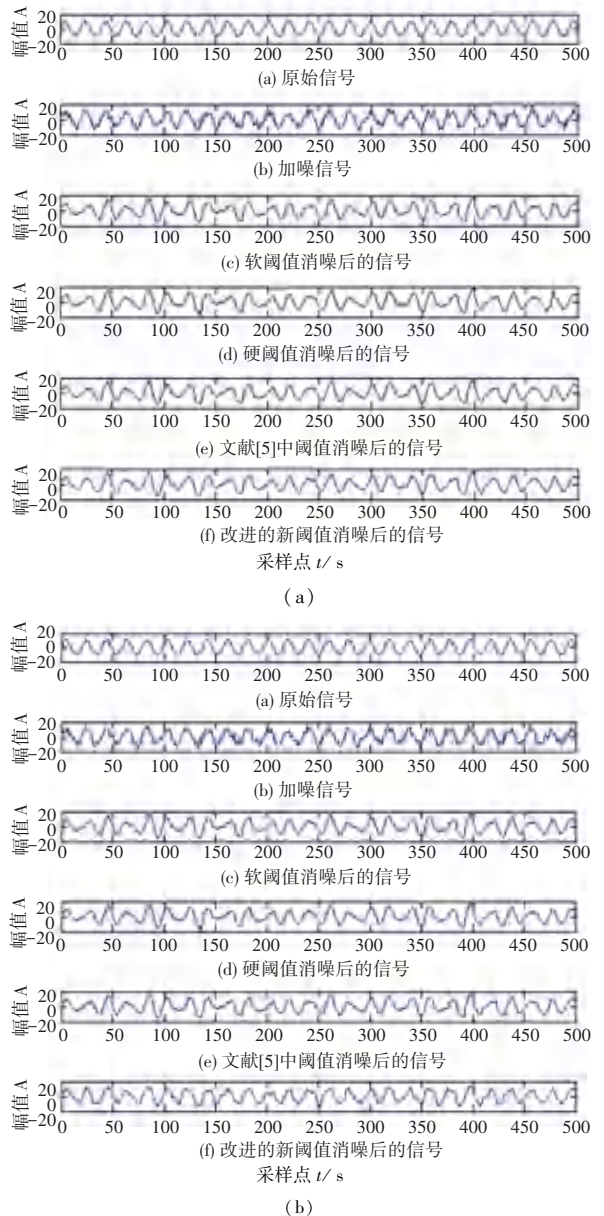


图 3 对加噪的正弦信号降噪处理实验效果

Fig. 3 Experimental effect of noise reduction processing on sine signal with noise added

以山东长清工业园区某办公楼的地源热泵机组集成监控系统中的电机轴承振动信号为例。热泵电

机的转速为3 000 r/min,采样频率为 $f_s = 20$ KHz。待热泵机组平稳运行后,通过加速度传感器对电机轴承采集800个采样点。由于采集的热泵电机轴承振动信号较弱,添加50 dB高斯噪声以贴近真实情况。对热泵电机振动信号采用sym5小波基函数,进行4层小波分解。

为证实结合多尺度阈值改进的新阈值函数在热泵电机振动信号降噪中的高效性,采用各阈值函数分别结合固定阈值和多尺度阈值对采集的电机轴承振动信号进行降噪处理仿真。各阈值函数结合固定阈值降噪效果如图4所示,各阈值函数结合多尺度阈值降噪效果如图5所示。

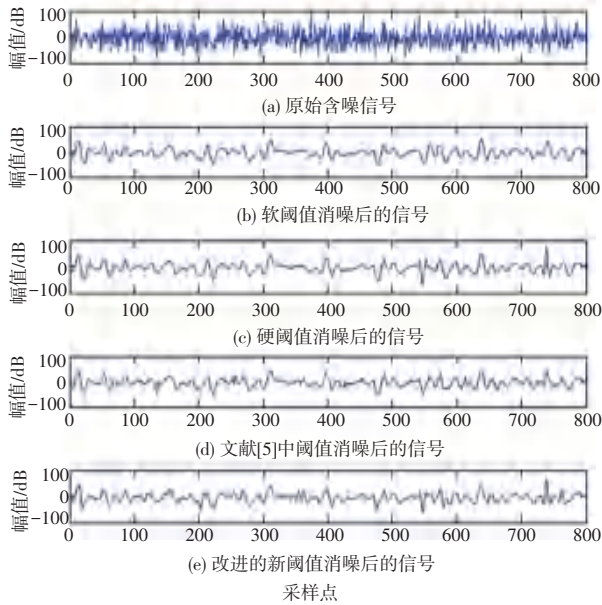


图4 结合固定阈值降噪效果

Fig. 4 Noise reduction effect combined with fixed threshold

将改进的新阈值函数降噪信号与原始含噪信号在频域上展开对比,如图6所示。可以看出新阈值函数在频域上能很好地保留尖峰和突变部分,并将噪声引起的干扰有效地降噪处理,提高信噪比,还原度较高。

为了让去噪效果表现的更直观,此处引入数据分析的方法。将获取的原始信号作为标准信号 $f(t)$,经过降噪处理之后的预估信号为 $\hat{f}(t)$,则信噪比定义如下:

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum f^2(t)}{\sum (f(t) - \hat{f}(t))^2}, \quad (12)$$

原始信号和预估信号之间的均方根误差为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (f(t) - \hat{f}(t))^2}, \quad (13)$$

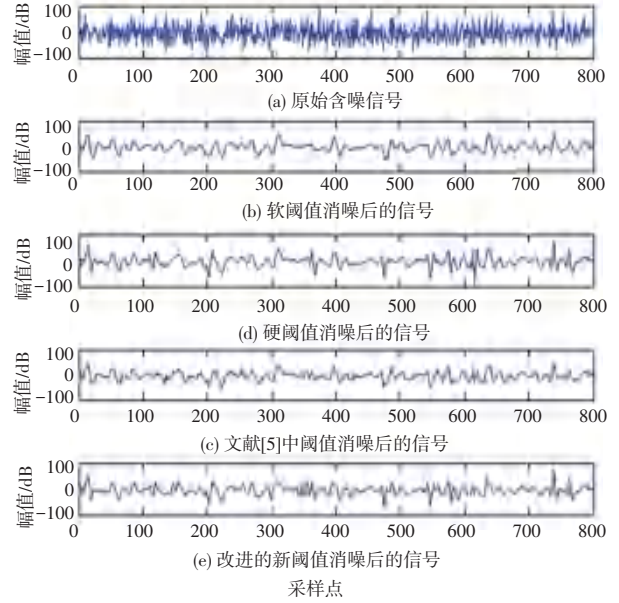
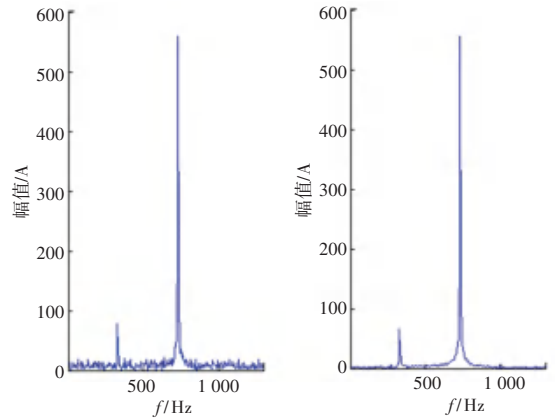


图5 结合多尺度阈值降噪效果

Fig. 5 Noise reduction effect combined with multi-scale threshold



原始含噪信号频谱局部图 新阈值降噪后信号频谱局部图

图6 原始含噪信号和降噪信号频谱图对比

Fig. 6 Comparison of the spectrum of the original noise-containing signal and the noise-reduced signal 在降噪过程中,为衡量降噪信号的还原程度,定义维持率:

$$KR = \frac{SNR}{SNR^*} \times 100\%. \quad (14)$$

其中, SNR 为降噪后信号的信噪比, SNR^* 为原始信号的信噪比。 KR 越大表示还原效果越好。

由式(12)、(13)、(14)可知,信噪比的值越大,均方根误差越低,维持率越高,则预估信号就越接近于原始信号。

通过MATLAB仿真计算后,将各种阈值函数与固定阈值结合在一起,得到数据见表1。将各种阈值函数与多尺度阈值结合在一起,得到数据见表2。

表1 固定阈值与各种阈值函数结合降噪效果

Tab. 1 Noise reduction effect of fixed threshold combined with various threshold functions

信号	信噪比	均方根误差	维持率
原始含噪信号	11.581 7	0.563 3	—
硬阈值去噪	14.339 1	0.033 9	1.281 2%
软阈值去噪	14.806 7	0.042 3	1.278 5%
文献[5]中阈值去噪	16.204 3	0.028 6	1.399 1%
改进的新阈值去噪	16.523 6	0.023 5	1.426 7%

表2 多尺度阈值与各种阈值函数结合降噪效果

Tab. 2 Multi-scale threshold combined with various threshold functions to reduce noise

信号	信噪比	均方根误差	维持率
原始含噪信号	11.581 7	0.163 3	—
硬阈值去噪	15.331 9	0.032 8	1.323 8%
软阈值去噪	16.335 1	0.025 7	1.410 4%
文献[5]中阈值去噪	15.306 8	0.039 1	1.321 6%
改进的新阈值去噪	16.632 7	0.019 8	1.436 1%

由两表对比可以看出,多尺度阈值与各种阈值函数结合降噪相比于各阈值函数与固定阈值相结合取得的信噪比略高,均方根误差相对降低,维持率也相对提高。证明了将多尺度阈值与改进的新阈值函数结合的降噪方法能获得更大的信噪比,取得了更好的降噪效果。

4 结束语

在热泵机组监控过程中,热泵电机振动信号的降噪具有重要意义。本文针对软阈值和硬阈值函数存在的不足,提出了一种结合多尺度阈值的新阈值函数。通过仿真实验,分别采用新阈值函数和软阈值、硬阈值函数对采集的热泵电机振动信号进行降噪处理。实验结果证明了新的阈值函数在热泵电机

信号降噪过程中具有信噪比较高和均方根误差较低的特点,具有重要的工程实践意义。

参考文献

- [1] 赵彦超. 基于改进阈值同步挤压小波变换的局部放电信号消噪[D]. 武汉科技大学,2018.
- [2] 尹建璟,许雪梅,丁一鹏. 光纤光栅位移传感器实时监测解调系统[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(1):172-179.
- [3] 刘天时,魏雨,赵越,等. 随钻脉冲曼码信号处理研究[J]. 传感器与微系统,2016,35(2):29-32.
- [4] 王立东,张凯,王良润. 改进小波阈值算法在电机振动信号降噪中的应用[J]. 电子技术应用,2015,41(5):77-80,87.
- [5] 周西峰,朱文文,郭前岗. 基于渐近半软阈值函数的超声信号去噪方法[J]. 探测与控制学报,2011,33(2):35-39.
- [6] 孙铭阳,谢子殿,韩龙,等. 自适应阈值函数小波算法的电机振动信号去噪[J]. 电子科技,2020(1):1-6.
- [7] 张振凤,威欢,谭博文. 一种改进的小波阈值去噪方法[J]. 光通信研究,2018(2):75-78.
- [8] 姜剑梅,李星野. 基于改进多尺度阈值去噪的人民币汇率实证分析[J]. 财务与金融,2014(5):1-5+10.
- [9] 陈竹安,胡志峰. 小波阈值改进算法的遥感图像去噪[J]. 测绘通报,2018(4):28-31.
- [10] 谢斌,乐浩洪,陈博. 一种基于小波去噪的DFT信道估计改进算法[J]. 计算机工程与科学,2016,38(9):1790-1796.
- [11] Parth Sarathi Panigrahy, Paramita Chattopadhyay. Cascaded signal processing approach for motor fault diagnosis[J]. Compel, 2018, 37(6).
- [12] 刘晓凤,李春英. 基于EEMD分解和改进小波阈值降噪的齿轮故障诊断[J]. 机械管理开发,2018,33(4):76-78.
- [13] Sun Hui, Yuan Shouqi, Luo Yin. Characterization of cavitation and seal damage during pump operation by vibration and motor current signal spectra[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(1).
- [14] 李世银,张楠,武中文,等. 基于小波分析的MEMS加速度计去噪优化算法[J]. 传感技术学报,2018,31(5):705-709.
- [15] 刘涛,李泽宇. 一种改进的小波包阈值去噪法在压缩机振动信号分析中的应用[J]. 机械与电子,2012(3):13-16.
- [16] 张来斌,李峰,段礼祥. 基于噪声水平自适应估计的往复压缩机振动信号局部投影降噪方法[J]. 振动与冲击,2010,29(1):53-57,93,236-237.

(上接第16页)

hunk 之间存在语句分裂变更模式的情况,并尽可能的对此类复杂情况进行研究分析。

参考文献

- [1] 廖湘科,李姗姗,董威,等. 大规模软件系统日志研究综述[J]. 软件学报,2016(8):1934-1947.
- [2] FOWLER M. Refactoring: Improving the Design of Existing Programs[M]. Addison-Wesley, 1999.
- [3] Mika V Mantyla, Jari Vanhanen, Casper Lassenius. Badsmells-humans as code critics[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Software Maintenance. IEEE, 2004:399-408.
- [4] Jan Schumacher, Nico Zazworka, Forrest Shull, Carolyn Seaman, and Michele Shaw. Building empirical support for automated code smell detection[C]//Proceedings of the ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement, ACM, 2010, 8.
- [5] Matthew James Munro. Product metrics for automatic identification of "bad smell" design problems in Java source-code[C]//

Proceedings of the IEEE International Symposium on Software Metrics, IEEE, 2005, 15.

- [6] D Rapu, Stephane Ducasse, Tudor Grba, and Radu Marinescu. Using history information to improve design flaws detection[C]//Proceedings of the European Conference on Software Maintenance and Engineering, IEEE, 2004:223-232.
- [7] 王旭,张文,王青. 基于缺陷修复历史的两阶段缺陷定位方法[J]. 计算机系统应用,2014,(11):99-104.
- [8] KAWRYKOW D, ROBILLARD M P. Non-essential changes in version histories[C]//International Conference on Software Engineering. IEEE, 2011, 351-360.
- [9] 韩君泽,张良德,刘东升. C/C++编程风格批注系统的设计与实现[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版),2010,41(06):712-716.
- [10] HUNT J W, SZYMANSKI T G. A fast algorithm for computing longest common subsequences[J]. Communications of the ACM, 1977, 20(5):350-353.
- [11] FLURI B, GALL H C. Classifying change types for qualifying change couplings[C]//International Conference on Program Comprehension (2006). Athens, Greece: IEEE, 2006:35-45.