

基于互相关—峭度和小波软阈值的 EEMD 降噪方法研究

李慧聪¹, 刘永强¹, 廖英英², 杨绍普¹

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:针对目前 EMD 分解后 IMF 分量优选方法的不足, 提出了一种基于互相关—峭度和小波软阈值的 EEMD 降噪方法。该方法利用 EEMD 对信号进行分解得到 IMF 分量, 计算 IMF 分量的峭度值、标准差及其与原信号的互相关系数。根据互相关系数、标准差和峭度值, 设置优选条件, 将选定的 IMF 分量进行重构。与互相关系数、峭度准则单独作为优选条件的重构结果进行对比, 结果表明这种新型优选方法的效果更好, 利用基于互相关—峭度和小波软阈值的 EEMD 降噪方法对滚动轴承微弱故障信号进行处理, 能够更精确地提取到轴承故障特征。

关键词: EEMD 降噪; 小波软阈值; 微弱故障; IMF 分量

中图分类号: U270.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2018)04-0019-06

机械设备中轴承是容易发生故障的部件之一, 当轴承发生微弱故障时, 往往故障信号被噪声所淹没, 由于信号的信噪比较低, 对信号的分析处理比较困难。因此, 如何对微弱故障信号进行降噪, 提高信号信噪比, 是对信号准确提取出故障特征的重要一步。实际的运行工况下, 早期故障^[1-3]和强背景噪声都存在, 而目前对于微弱故障的处理方法也有很多, 如时域平均、自适应降噪、EMD 降噪等都是对信号预处理的方法^[4]。这些方法都有自身的优缺点和适应范围, 不一定对任何信号都适用。

近年来, 许多学者将经验模态分解用于信号的降噪处理。如苏文胜等^[5]提出了基于互相关系数—峭度准则的 EMD 降噪方法并应用在了滚动轴承的故障诊断。李辉等^[6]将 EMD 与 Teager 能量算子结合用于齿轮箱轴承故障检测, 可以有效地识别故障。张淑清等^[7]将 EMD 算法与 Duffing 振子相结合, 用于小电流系统故障。EMD 算法应用范围广, 如 S. J. Loutridis^[8]将 EMD 应用于检测轴承系统的故障。杨宇等^[9]用 EMD 算法结合神经网络诊断算法, 先用 EMD 算法对原始信号预处理, 再从 IMF 分量中提取各频段能量作为神经网络诊断方法的特征参数, 验证其准确有效地识别滚动轴承故障类型。而陈仁祥等^[10]提出了基于相关系数的 EEMD 降噪方法, 主要利用相关系数对 IMF 分量进行选取。唐贵基等^[11]将 EEMD 和 1.5 维能量谱相结合获得了轴承的故障特征频率, 对轴承进行了有效的诊断。王少君提出 EEMD 与相关峭度的时延相关解调方法, 突出高频信号, 用于轴承故障特征提取; 又将 EEMD 和自相关的边际谱结合, 来抑制与低频故障频率相似的频率干扰^[12-13]。

对于信噪比较低的信号, 为了避免单一的 IMF 分量优选原则选择分量进行重构信号时造成故障特征信息的丢失, 因此提出了一种基于互相关—峭度和小波软阈值的 EEMD 降噪方法。通过实测信号和互相关系数、峭度准则进行了对比, 验证了该方法的有效性。

收稿日期: 2017-03-30 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2018.04.03

基金项目: 国家自然科学基金(11227201; 11202141; 11302137; 11472179; 11572206; 11372199); 河北省自然科学基金(A2013210013; A2015210005); 河北省教育厅项目(YQ2014028)

作者简介: 李慧聪(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为机车轮对轴承故障诊断。E-mail: 1248669878@qq.com

李慧聪, 刘永强, 廖英英, 等. 基于互相关—峭度和小波软阈值的 EEMD 降噪方法研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2018, 31(4): 19-24.

1 EEMD 分解

1998 年,美国学者 Huang 提出了一种把时间序列的信号分解成不同尺度的基本模式分量(Intrinsic Mode Function),这种分解方法被称为经验模式分解(Empirical Mode Decomposition)。EMD 进行分解信号时,不用提前选定任何基函数,信号不同产生的基函数也不同。分解后的 IMF 分量可以是幅值调制、频率调制或者更加复杂的信号,这样大大提高了信号的分解效率。利用 EMD 分解振动信号时,必须满足以下假设:(1)信号至少包括一个极大值点与一个极小值点;(2)特征时间尺度要在两个极值点包括的时间长度上;(3)如果信号没有极值点,可以对信号多做几次微分,直到得到极值点,最后再通过积分求得分解的结果。

IMF 分量应该满足两个条件:

(1)整个时间序列上极值点个数和零值点个数必须相等或者最多相差不超过一个;

(2)关于时间轴局部对称。固有模式函数不只限定在窄带信号的范围内,还可以利用幅值和频率进行调制得到,所以只有频率和幅值调制的函数都可以看作 IMF。

EMD 分解会出现端点效应和模态混叠效应。端点效应就是端点处的极值不确定,容易造成包络的误差。这样分解时每一层都会存在误差,由于分解的层数较多,累计量也比较大,会影响分解的效果或造成失真。模态混叠是指由于噪声、冲击脉冲等存在于信号中,会使得信号分解的层数增多,时效变低。因此对于信号分解时要找到方法或者优化算法解决这两种问题。

EEMD 算法是在 EMD 算法的基础上提出的,该算法通过多次叠加高斯白噪声能够消除先前的间断现象,能够避免模态混叠现象和端点效应。EEMD 算法并非自适应分解算法,需要人为地去选择白噪声的标准差和添加次数。如果添加的白噪声的标准差过大,会影响原信号的高频成分的极值点分布,如果添加的白噪声标准差过小时,不能消除原信号中的间断现象。对于如何准确地选择标准差和添加的次数,蔡艳平等^[14]提出了添加白噪声的自适应准则,通过对信号进行高通滤波来计算高频分量及原信号的标准差,通过两者的标准差确定一个比值,然后利用该比值确定白噪声的标准差。而白噪声的添加次数可以根据白噪声和原信号的比值系数和期望的相对误差来确定。

2 IMF 优选原则

对于 EEMD 分解得到的 IMF 分量,可以只对含有故障信息的分量进行分析处理,也可以对几个分量的重构信号进行分析,如何选择 IMF 分量进行重构信号,最大程度地避免故障特征信息的丢失是一个难题。下面先介绍前人提出的 IMF 分量的选择原则。

2.1 互相关系数法

互相关系数是用来表征两种信号相关程度大小的,即若 IMF 分量的互相关系数比较大时,相关性就大,反之相关性小。含有故障信息的 IMF 分量与原信号的相关性比较大,如果是虚假分量即伪分量的相关性会比较小。互相关系数的计算公式如下

$$\rho_{x,c_j} = \max[R_{x,c_j}(\tau)] / \max[R_x(\tau)] \quad (1)$$

$$R_{x,c_j}(\tau) = E[x(t)c_j(t+\tau)] \quad (2)$$

$$R_x(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] \quad (3)$$

式中, $R_{x,c_j}(\tau)$ 表示各个 IMF 分量与原信号的互相关; $R_x(\tau)$ 表示原信号本身的自相关; $x(t)$ 表示原信号; $c_j(t)$ 表示第 j 个 IMF 分量。

2.2 峭度法

峭度是描述振动信号波峰尖度的无量纲参数,计算表达式为

$$K = \frac{E(x-\mu)^4}{\sigma^4} \quad (4)$$

式中, σ 和 μ 分别表示信号 $x(t)$ 的均值和标准差。

从式(4)可以看出,峭度是一个 4 阶的正态分布函数,因此峭度对冲击波动比较敏感。无故障的滚动

轴承转动时,振动信号的峭度值一般小于 3,如果峭度值大于 3 说明出现故障,并且故障越严重峭度值越大。因此可以利用峭度作为优选 IMF 分量的方法。

2.3 基于互相关—峭度和小波软阈值优选法

小波软阈值降噪是将原始振动信号进行小波变换,根据设定的阈值对小波系数进行处理,一般含有故障信息的小波系数比较大,噪声对应的小波系数值较小。小波阈值降噪可分为以下 3 步进行:(1)确定小波基和分解层数;(2)根据高频系数设定合适的阈值;(3)将低频系数和处理后的高频系数进行小波重构。

小波软阈值函数表达式

$$\omega_j(k) = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_j(k))(|\omega_j(k)| - \lambda_j), & |\omega_j(k)| \geq \lambda_j \\ 0, & |\omega_j(k)| \leq \lambda_j \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\text{sgn}(\omega_j(k))(|\omega_j(k)| - \lambda_j)$ 是符号函数; λ_j 为第 j 层阈值; σ_j 为第 j 层的标准差; $\lambda_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln N}$ 。

$$\sigma_j = \frac{1}{0.6745} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\omega_j(k)|, \quad 1 \leq j \leq J \quad (6)$$

式中, N 为某尺度 j 的小波系数; J 是分解的层数。

结合以上两种原则,提出了一种互相关—峭度与小波软阈值相结合的一种优选方法,首先计算 IMF 分量的标准差,根据互相关系数优选出大于该标准差的 IMF 分量,小于标准差的剔除,然后对互相关系数大于标准差而峭度 $K < 3$ 的进行小波软阈值降噪,最后将选定的 IMF 分量和降噪后的 IMF 分量进行重构。互相关—峭度与小波软阈值相结合的优选算法流程图如图 1 所示。

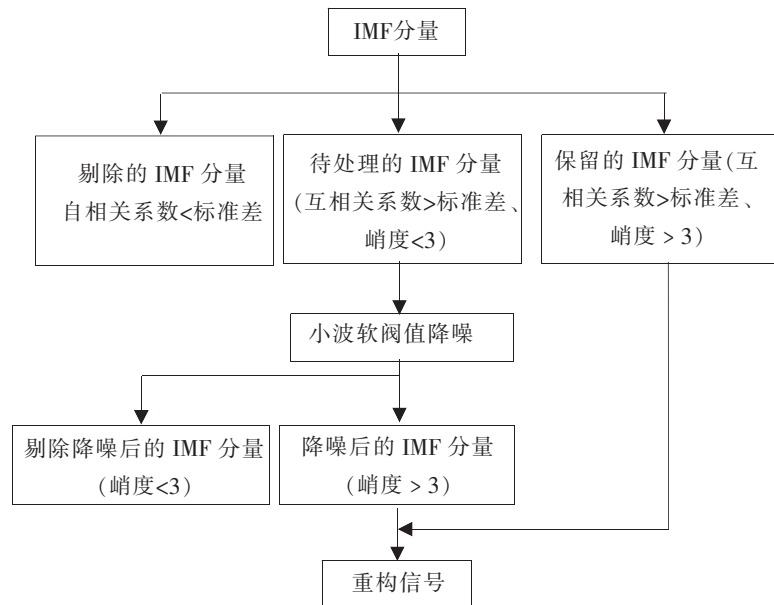


图 1 优选算法流程图

3 实验验证

实验中采用的设备是旋转

机械振动及故障模拟试验台 QPZZ-II 系统。实验对象为具有外圈轻微裂纹故障滚动轴承,型号为 6205-RS,轴承节圆直径 $D=38.5$ mm,滚子直径 $d=7.2$ mm,滚子个数 $Z=9$,接触角 $\alpha=0$ 。选取一组外圈点蚀故障的滚动轴承,加工的故障大小为 0.2 mm,设置采样频率为 5 120 Hz,转速为 1 478 r/min,通过理论计算得到外圈一倍故障特征频率为 90 Hz。

采集该轴承的振动信号如图 2 所示。先设定好 EEMD 分解时设定的白噪声的标准差和添加次数,通过计算高频分量的标准差和原信号的标准差的比值为 0.3,确定添加白噪声的标准差为 0.1。假设误差为 1%,所以添加白噪声的次数为 100 次。利用 EEMD 对原信号进行分解,得到 13 个分量,取其中的 9 个分量如图 3 所示。

首先计算各个 IMF 分量的互相关系数、峭度值

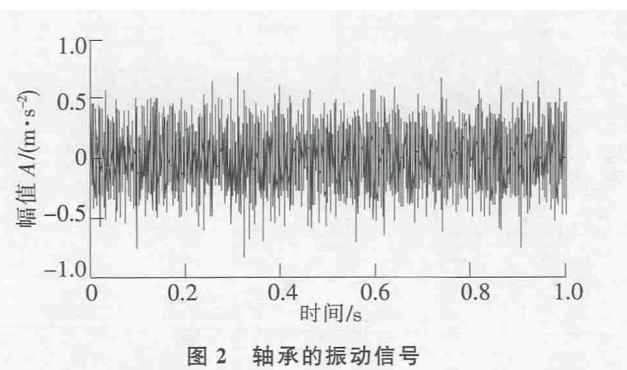


图 2 轴承的振动信号

以及利用小波软阈值对某些 IMF 分量降噪得到的峭度值制成表,如表 1 所示。计算 13 个分量的标准差平均值为 0.204,通常认为互相关系数大于标准差的 IMF 分量和原信号的相似程度比较大。

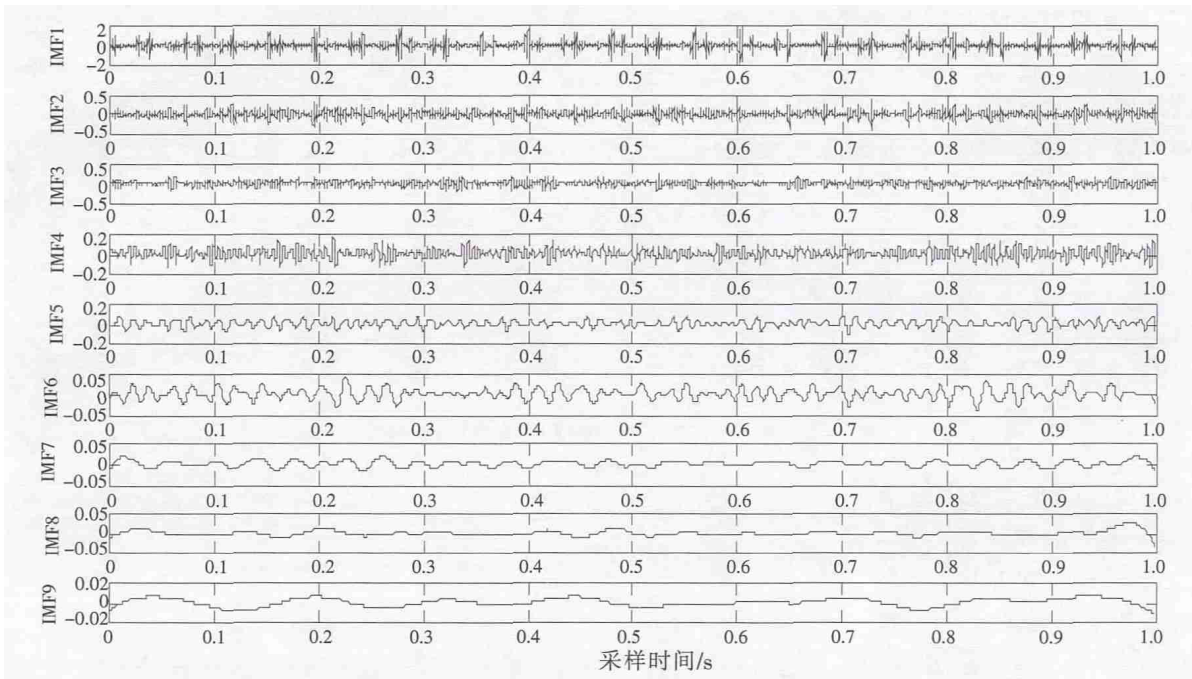


图 3 轴承外圈故障振动信号 EEMD 分解图

表 1 降噪处理后 IMF 分量

IMF 分量	互相关系数	峭度	
		原 IMF 的峭度	降噪后的 IMF 峭度
1	0.805	2.633	30.16
2	0.375	3.491	—
3	0.415	3.660	—
4	0.370	2.788	2.788
5	0.217	2.395	2.761
6	0.119	2.212	2.326
7	0.022	2.507	—
8	0.004	3.093	—
9	0.003 1	2.176	—

从表 1 可知,按照这种互相关系数的选取原则,前 5 个 IMF 分量都满足这种准则,所以取前 5 个分量作为重构信号的分量。将选出的分量进行重构得到重构信号如图 4 所示。通过对重构信号进行 FFT 得到的频谱图如图 5 所示。

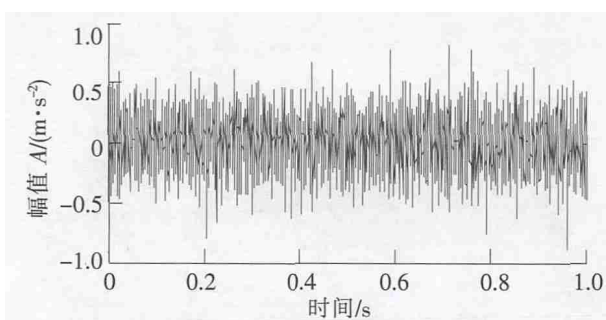


图 4 互相关准则重构信号

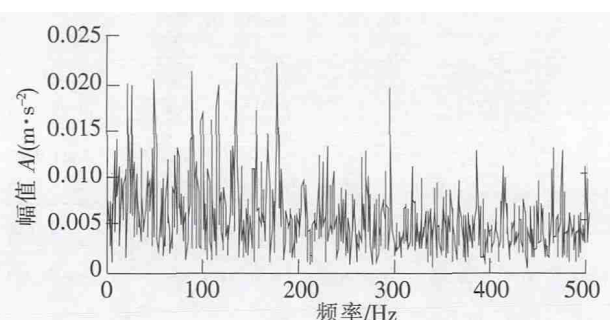


图 5 互相关准则重构信号的频谱图

下面利用峭度原则作为 IMF 的优选原则,通常认为峭度大于 3 就认为该分量信号中含有故障信息,根据这一原则和表 1 中 9 个分量中的 IMF2、IMF3 和 IMF8 的峭度值大于 3,因此选择这 3 个分量作为重构信号的分量,得到重构信号如图 6 所示。对重构信号进行 FFT 得到频谱图如图 7 所示。

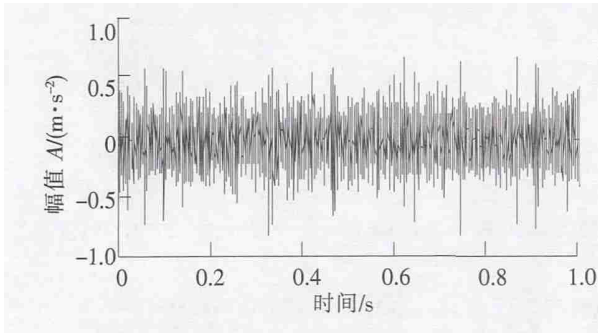


图 6 峭度准则得到的重构信号

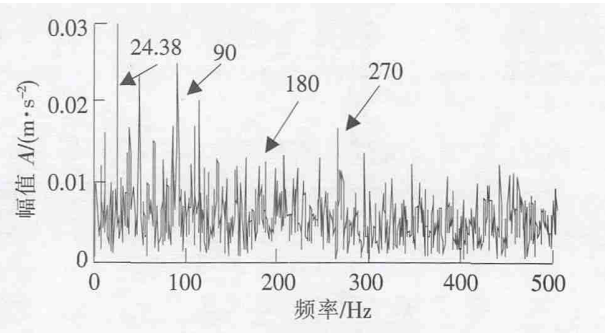


图 7 峭度准则重构信号的频谱图

基于两种原则,提出了一种基于互相关—峭度和小波软阈值的选择原则。该准则的选择过程为:首先对于 IMF 分量的互相关系数与计算的标准差进行比较,小于标准差的将其视为伪分量并剔除。然后计算剩下的各个分量的峭度值,对于峭度值大于 3 的 IMF 分量进行保留。对于互相关系数大于标准差,而峭度值小于 3 的 IMF 分量进行后续处理,利用小波软阈值对峭度值小于 3 的 IMF 分量进行降噪处理提高信噪比。

首先根据互相关系数准则剔除 IMF6、IMF7、IMF8 和 IMF9 4 个分量,剩下的 5 个分量中只有 IMF2 和 IMF3 峭度大于 3,对剩下的分量 IMF1、IMF4 和 IMF5 进行小波软阈值降噪。将降噪处理后峭度大于 3 的 IMF 分量与剩余的 IMF 分量进行重构,得到重构信号如图 8 所示。然后将重构信号进行 FFT 得到频谱图如图 9 所示。

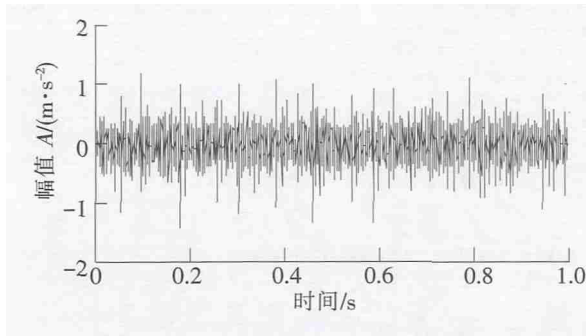


图 8 重构信号

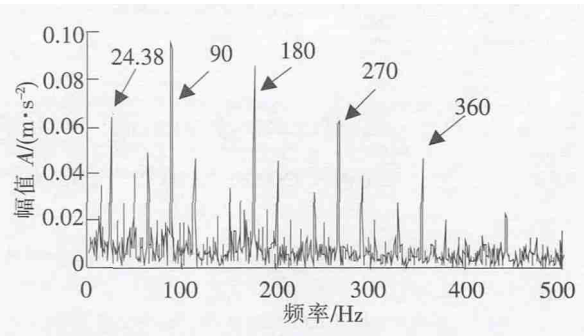


图 9 重构信号的频谱图

通过对比图 5、图 7 和图 9 的频谱图,虽然互相关系数和峭度原则也能找到轴承的故障特征频率,但是这两种方法的降噪效果相比于互相关—峭度和小波软阈值选择原则得到的频谱图较差,从图 3 和图 5 中可以看出频谱图中仍有大量的噪声,而图 7 中频谱图中噪声较少,利用基于互相关—峭度和小波软阈值的 EEMD 降噪方法对滚动轴承微弱故障信号进行处理,能够更精确地提取到轴承故障特征。

4 结论

提出基于互相关—峭度和小波软阈值的 EEMD 降噪方法,通过轴承实测信号进行了分析,结果表明:

(1)通过互相关—峭度和小波软阈值相结合的优选方法和单一的互相关系数、峭度原则对比,可以选出进行重构的 IMF 分量,并且能够避免故障特征信息的丢失。

(2)基于互相关—峭度和小波软阈值的 EEMD 降噪方法可以有效对振动信号进行降噪,可以应用于轴承的早期微弱故障精确诊断。

参 考 文 献

- [1]冯辅周, 司爱威, 饶国强, 等. 基于小波相关排列熵的轴承早期故障诊断技术[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 73-79.
- [2]王仲生, 姜洪开, 徐一艳. 发动机转子系统早期故障智能诊断[J]. 航空学报, 2009, 30(2):242-246.
- [3]胥永刚, 马海龙, 付胜, 等. 机电设备早期故障微弱信号的非线性检测方法及其工程应用[J]. 振动工程学报, 2011, 24(5):529-538.
- [4]Wang T, Zhang M C, Yu Q H, et al. Comparing the applications of EMD and EEMD on time-frequency analysis and EEMD on time-frequency analysis of seismic signal[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 83:29-34.
- [5] 苏文胜, 王奉涛, 张志新. EMD 降噪和谱峭度法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 18-21.
- [6] 李辉, 郑海起, 杨绍普. 基于 EMD 和 Teager 能量算子的轴承故障诊断研究[J]. 振动与冲击, 2008(10):15-17.
- [7]张淑清, 翟欣沛, 董璇, 等. EMD 及 Duffing 振子在小电流系统故障选线方法中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013(10):161-167+5.
- [8] Loutridis S J. Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition[J]. Engineer Structures, 2004(26):1833-1841.
- [9]杨宇, 于德介, 程军圣. 基于 EMD 与神经网络的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2005(1):87-90.
- [10]陈仁祥, 汤宝平, 吕中亮. 基于相关系数的 EEMD 转子振动信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 542-546.
- [11]唐贵基, 王晓龙. 基于 EEMD 降噪和 1.5 维能量谱的滚动轴承故障诊断研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(1):6-10.
- [12]王少君. 基于 EEMD 的滚动轴承微弱故障特征提取方法研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2016.
- [13]Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition; a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1):1-41.
- [14]蔡艳平, 李艾华, 徐斌, 等. 集成经验模态分解中加入白噪声的自适应准则[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 709-714.

Research on EEMD Denoising Method Based on Cross-correlation Kurtosis and Wavelet Soft Threshold

Li Huicong¹, Liu Yongqiang¹, Liao Yingying², Yang Shaopu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the IMF component optimization method based on EMD decomposition, a new method of EEMD noise reduction based on cross-correlation kurtosis and wavelet soft threshold is proposed. In this method, EEMD is used to decompose the signal to obtain the IMF component, and the kurtosis value, standard deviation and the cross-correlation coefficient of the IMF component are calculated. According to the cross correlation coefficient, standard deviation, and kurtosis value, the optimal conditions are set to reconstruct the selected IMF components. Compared with the reconstructed results with cross-correlation coefficient and kurtosis criterion alone as the optimum condition, the results show that this new method is optimized. EEMD noise reduction method of cross-correlation kurtosis and wavelet soft threshold is more accurate in processing of weak fault signal of rolling bearing, and can extract the bearing fault characteristics precisely.

Key words: EEMD noise reduction; wavelet soft threshold; weak fault; IMF component