

基于相关系数的EEMD转子振动信号降噪方法*

陈仁祥, 汤宝平, 吕中亮

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆, 400030)

摘要 针对转子振动信号周期性强的特点,应用集合经验模式分解(ensemble empirical mode decomposition,简称EEMD)对转子振动信号降噪过程中固有模式函数(intrinsic mode functions,简称IMF)分量的选取问题,提出了基于相关系数的EEMD降噪方法。首先,对原始信号进行EEMD分解得到IMF分量,并计算各IMF分量自相关函数与原信号自相关函数的相关系数;然后,根据相关系数选择相应的IMF分量重构信号最终达到对原信号降噪的目的;最后,对比了EEMD过程中不同加噪次数对降噪效率和效果的影响,给出了加噪次数的设置方法。仿真信号和转子振动信号的降噪结果表明了该降噪方法的可行性和有效性。

关键词 集合经验模式分解; 相关系数; 转子; 降噪

中图分类号 TN911.7; TH165.3

引言

在旋转机械转子系统振动信号的获取过程中,由于测试仪器、测试环境以及人为因素等影响,得到的振动信号往往受到噪声干扰。在转子系统发生故障时,这些干扰使故障特征难以提取;因此,在提取故障特征前须对信号进行降噪,提高信噪比。由于旋转机械结构的复杂性,转子振动信号具有非高斯、非平稳特性,增加了降噪难度。同时,转子振动信号具有周期性强的特点,即其特征频率与转速密切相关,因此在降噪时需要转速信息,且降噪效果受转速信息的影响。

常见的降噪方法中,基于传统傅里叶变换的降噪方法存在保护信号边缘和抑制噪声之间的矛盾,难以正确识别信号中的噪声并加以去除。基于小波变换的降噪方法^[1-2]对非平稳信号降噪,要比传统的滤波降噪方法效果好,但这种方法在对转子振动信号降噪时存在以下问题^[1-3]:a. 信号采样频率对小波降噪的效果有很大影响,不同的采样频率将导致相同分解层上信号的频率段不同;b. 小波分解的层数需要信号的频率结构和采样频率等先验知识;c. 难以选择小波基和确定阈值。基于经验模式分解(empirical mode decomposition,简称EMD)的降噪方法^[4-6]在一般情况下可对信号进行有效降噪,但在信号存在异常事件时,由于EMD的模式混叠问题导致了基于EMD的降噪方法效果不佳^[7-9]。

集合经验模式分解^[10]方法将噪声辅助分析应用于经验模式分解中以促进抗混分解,有效抑制了模式混叠现象。经EEMD分解得到的固有模式函数能揭示原信号的物理内涵,使每个IMF的物理本质更为清晰。在转子系统发生故障时,其振动信号往往具有脉冲干扰或奇异点等异常事件,导致模式混叠现象,因此EEMD适用于对转子振动信号降噪。文献[8]通过计算IMF分量与原始信号互信息值与事先确定的阈值对比来选取IMF分量,但未明确说明阈值的确定方法。文献[11]运用EEMD对疲劳信号进行降噪,采用去除前若干阶IMF分量和余项,将保留下的IMF分量重构得到降噪后的信号,未具体说明去除或保留IMF分量的方法。

笔者针对转子振动信号周期性强的特点,利用自相关函数的性质凸显原信号和IMF分量的周期性,以增强真实IMF分量与虚假IMF分量及噪声IMF分量的差异性。通过计算IMF分量自相关函数与原信号自相关函数的相关系数来解决降噪过程中IMF分量的选取问题,提出基于相关系数的EEMD转子振动信号降噪方法。通过仿真试验分析,给出EEMD过程中兼顾效率和降噪效果的加噪次数的设置方法。

1 EEMD的原理及抗混分析

1.1 模式混叠问题及其产生原因分析

EMD中模式混叠是指1个IMF中包含差异极

* 重庆市自然科学杰出青年基金资助项目(编号:CQsctc2011jjjq70001)

收稿日期:2011-12-08;修改稿收到日期:2012-03-20

大的特征时间尺度,或者相近的特征时间尺度分布在不同的IMF中,导致相邻的2个IMF波形混叠,相互影响、难以辨别。Huang认为引起模式混叠的原因在于间歇现象^[12],引起间歇现象往往是异常事件,如间断信号,脉冲干扰和噪声等。

在EMD分解过程中求取原信号的均值曲线是关键步骤。常用的方法是用三次样条线将原信号的极大值点和极小值点分别连接起来得到上、下包络线,由上、下包络线计算出均值曲线。在求包络线的过程中,当信号中存在异常事件时将影响极值点的选取,使极值点分布不均匀,导致求取的包络为异常事件的局部包络和真实信号包络的组合。经该包络计算出的均值、筛选出的IMF分量包含了信号的固有模式和异常事件或者相邻特征时间尺度的固有模式,产生了模式混叠现象。

1.2 EEMD基本原理与抗混分析

Wu等^[10]将白噪声加入待分解信号来平滑异常事件,利用白噪声频谱的均匀分布使不同时间尺度的信号自动分布到合适的参考尺度上。同时运用白噪声的零均值特性,经过多次平均使噪声相互抵消,抑制甚至完全消除噪声的影响。基于这种思想提出了集合经验模式分解^[10],其本质是一种叠加高斯白噪声的多次经验模式分解。

EEMD的分解步骤如下:

1) 在原始信号 $x(t)$ 中分别加入 N 次均值为0,幅值标准差为常数的高斯白噪声 $n_i(t)$,即

$$x_i(t) = x(t) + n_i(t) \quad (1)$$

其中: $i=1\sim N$ 。

2) 对 $x_i(t)$ 分别进行EMD分解,得到 K 个IMF分量和一个余项 $r_i(t)$

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^K c_{ij}(t) + r_i(t) \quad (2)$$

其中: $c_{ij}(t)$ 为第 i 次加入高斯白噪声后,分解得到的第 j 个IMF, $j=1\sim K$ 。

3) 利用不相关随机序列的统计均值为0的原理,将以上步骤对应的IMF进行总体平均运算,消除多次加入高斯白噪声对真实IMF的影响,得到EEMD分解后的IMF及余项 $r(t)$ 为

$$c_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{ij}(t) \quad (3)$$

$$r(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i(t) \quad (4)$$

其中: $c_j(t)$ 为对原始信号进行EEMD分解后得到的第 j 个IMF。

最终得到 K 个IMF分量和一个余项 $r(t)$ 为

$$x(t) = \sum_{j=1}^K c_j(t) + r(t) \quad (5)$$

2 基于相关系数的EEMD转子振动信号降噪原理与方法

2.1 降噪原理

EEMD把信号分解成特征时间尺度由小到大、频率由高到低的一系列IMF分量和一个余项。对混有随机噪声的信号经分解后的高频IMF分量通常情况下为噪声,将这些噪声IMF分量、虚假IMF分量和余项去除,剩下的IMF分量重构信号可进行降噪。应用EEMD对信号降噪时,关键问题是IMF分量的选取方法,IMF分量选取不当则会导致降噪效果不佳或将有用的IMF分量去除后造成有用信息的丢失。

根据自相关函数的性质可知,周期性信号的自相关函数是周期性的,且其周期与原信号相同。图1(a)为含噪声的某周期信号,图1(c)为该周期信号的自相关函数,对比两图可知,自相关函数凸显了原函数的周期性。图1(b)为噪声信号,图1(d)为该噪声信号的自相关函数,在时延为0即 $m=0$ 时有最大值,并随 $|m|$ 的增大而很快衰减至零。针对转子振动信号具有周期性强的特点,自相关函数能凸显出转子振动信号及相应IMF分量的周期性,增强真实IMF分量与虚假IMF分量及噪声IMF分量的差异性。在选取IMF分量时,根据IMF分量自相关函数与原信号自相关函数的相关性来做出判断就更为有效。

基于相关系数的EEMD降噪原理如下:首先,计算出各IMF分量的自相关函数和原信号的自相关函数以凸显其周期性;然后,求各IMF分量自相关函数与原信号自相关函数的相关性,即相关系数。为了避免将幅值较小而又是真实的IMF分量被去除,需要对自相关函数做归一化处理。这样得到的相关系数具有较强的区分性,可将真实IMF分量和属于噪声的IMF分量进行有效区分,用保留下来的IMF分量重构信号,达到降噪目的。

2.2 相关系数的计算

计算出各IMF分量和原信号的自相关函数, $R_x, R_{\text{IMF}1}, \dots, R_{\text{IMF}K}$ 的计算公式为

$$R_x(m) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i)x(i+m) \quad (6)$$

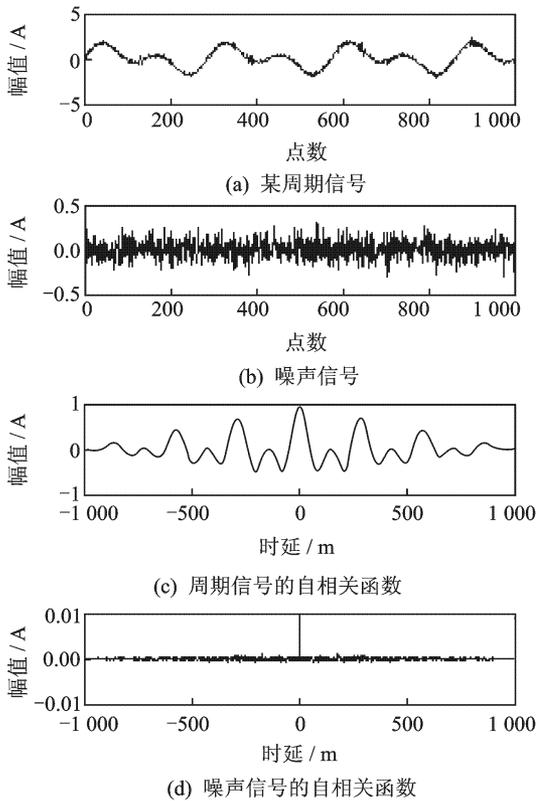


图1 周期信号和噪声信号及自相关波形

将自相关函数归一化处理,求 $R_{IMF1}, \dots, R_{IMFK}$ 与 R_x 相关系数。相关系数的计算公式为

$$\rho(j) = \frac{\sum_{i=1}^{2N-1} R_{IMF_j}(i) R_x(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{2N-1} R_{IMF_j}^2(i) \sum_{i=1}^{2N-1} R_x^2(i)}} \quad (7)$$

其中: N 为信号的点数; j 代表第 j 个IMF分量。

一般情况下,当 $\rho(j) > 0.5$ 时,认为对应IMF分量与原信号相关性好,是真实的IMF分量,予以保留。

2.3 去噪时EEMD参数的确定

使用EEMD进行分解信号时,需要设置两个参数,即加入原信号的白噪声幅值系数 k 和执行EMD的总次数 M 。根据文献[10],加入噪声对于分解结果 e 的影响与 k, M 的关系为

$$e = k/\sqrt{M} \quad (8)$$

其中: k 用待分析信号的标准偏差乘以一个分数来定义比较合适,文献[10]推荐 $k=0.01 \sim 0.5$ 。

k 值越小,则 e 越小,即分解精度越高,但当 k 过小时,可能不足以引起信号局部极值点的变化,使加入噪声以改变信号的局部时间跨度失去了意义。随着 M 值的增大, e 也会减小直至忽略不计,但 M 的增

大将损失效率,使耗时增加,不利于实时分析。

根据随机噪声对经验模态分解的影响:噪声对低阶IMF影响较为明显,对高阶IMF影响较小[13]。加入噪声对处于高频部分的IMF分量影响明显,对低频部分影响较小。在对转子振动信号分析时,主要针对信号转频、转频分倍频及转频倍频的频率成分而这些成分的频率相对都较低。针对转子振动信号的特点,在利用EEMD对其分解时,较小的 M 值即可消除噪声对高阶及低频部分IMF分量的影响,大幅降低了EEMD分解耗时。同时,为了减小噪声对高阶IMF分量的影响,在进行降噪时 k 取较小的值,一般取 $0.01 \sim 0.1$ 即可。

降噪方法流程如图2所示。在应用该降噪方法对转子振动信号降噪时,计算过程是基于数据驱动的,不需要转速信息,降噪结果也不会受到转速信息的影响。

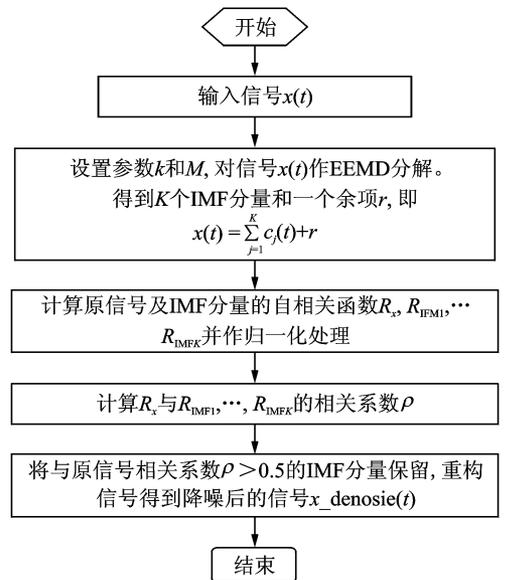


图2 降噪流程图

3 仿真试验分析

为了测试基于相关系数的EEMD降噪方法的性能,进行了如下仿真实验。仿真信号 s 由频率为7 Hz的正弦分量 s_1 、频率为14 Hz的正弦分量 s_2 、gauspuls脉冲分量干扰 s_3 和标准差为0.1的白噪声组成,信号长度为1 024点。 s_1 和 s_2 模拟了转子振动信号的转频及倍频成分, s_3 模拟了转子振动信号中可能存在的冲击成分,白噪声模拟了噪声成分。

为了比较不同 M 值下本研究方法的降噪结果,EEMD参数中 M 值分别取1,2,5,10,20,50,100,200。 k 值一般取 $0.01 \sim 0.1$,考虑到仿真信号 s 中的

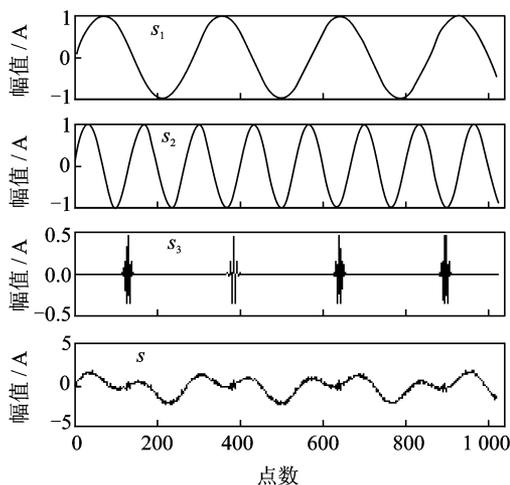


图3 仿真信号及其组成

脉冲干扰 s_3 , k 值取稍大, $k=0.05$ 。分别计算出不同 M 值下降噪的耗时和信噪比如表1所示。信噪比计算公式为

$$\text{SNR} = 10 \log P_s / P_n \quad (9)$$

其中: P_s 和 P_n 分别为信号和噪声的有效功率。

根据表1,对仿真信号的降噪结果显示, M 值越大则耗时越多,降噪效果(即信噪比越大)越好,当 M 值大到一定程度时信噪比并无明显提高。考虑时效性因素,应用本研究降噪方法时, $M > 5$ 可得到相对较好的降噪效果。若时效性要求不高,则可适当增大 M 值。

表1 降噪结果比较

M 值 (加噪次数)	1	2	5	10	20	50	100	200
耗时/s	0.221	0.431	1.036	2.314	4.448	10.634	21.678	46.237
SNR/db	6.807	12.381	16.269	16.564	16.885	16.288	17.215	16.980

4 工程应用

将本研究提出的降噪方法应用于转子横向裂纹振动信号特征分析。信号来自于文献[14],采样频率为2 002 Hz,采样长度为1 024点,转频为30.12 Hz。原始波形如图4(a)所示,观察该图可发现,信号受到了噪声干扰。

当转子出现横向裂纹时,转子会出现扭振现象,扭振信息以相位调制的形式存在于转子的振动信号中形成调相信号。相位调制在时频图上表现为振动信号的频率调制,并且频率和转子转频相同。利用该特征可判断裂纹故障的存在,可区分与转子不对中等相似特征的故障。

应用本研究方法对该信号进行降噪,EEMD参

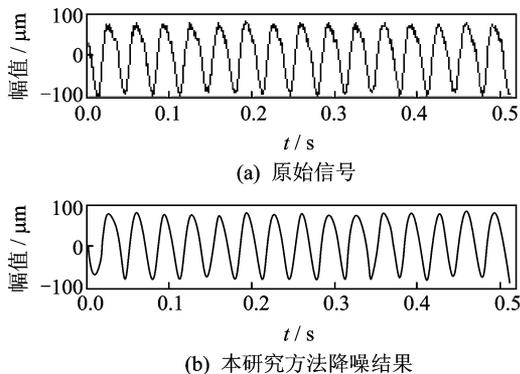


图4 转子故障信号和本研究方法降噪结果

数中 $M=10$,信号中冲击干扰较小, k 取较小值,即 $k=0.02$ 。图4(b)为本研究方法的降噪结果,对比图4(a)可知,信号得到了降噪。为了进一步验证降噪结果,求降噪前、后的时频谱。图5(a)为降噪前的时频谱,由于受到噪声干扰,从图中较难观察频率调制现象。图5(b)为采用本研究方法降噪后的时频谱,该图清晰地呈现出了转子转频上的频率调制现象,即准确提取出了转子横向裂纹故障特征。

以上工程应用证明了本研究方法的可行性和有效性,有利于故障特征的准确提取。

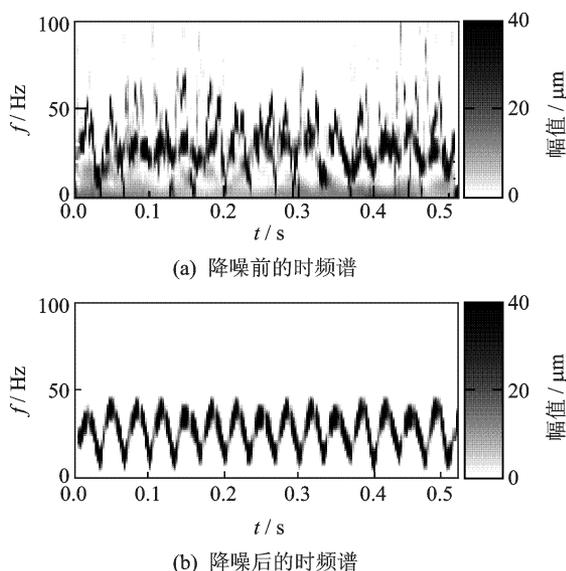


图5 转子故障信号降噪前、后时频谱

5 结论

1) 在应用该降噪方法对转子振动信号降噪时,计算过程是基于数据驱动的,不需要转速信息,降噪结果也不会受到转速信息的影响。

2) 在应用该方法时,对比了EEMD过程中不同

加噪次数对降噪效率和效果的影响,当加噪次数(M 值) ≥ 5 即可兼顾效率和降噪效果。

3) 应用该方法对具有横向裂纹故障的转子振动信号进行降噪,提取出了故障特征,验证了该方法的可行性和有效性,为转子系统振动信号的分析提供了一种新的手段。

参 考 文 献

- [1] 王成栋,朱永生,张优云. 转子振动信号消噪方法研究[J]. 振动、测试与诊断,2003,23(4):252-255.
Wang Chengdong, Zhu Yongsheng, Zhang Youyun. Study on denoising rotor vibration signals contaminated by electromagnetic interference[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2003,23(4):252-255. (in Chinese)
- [2] 陈果. 基于小波分析的转子故障信号自适应降噪技术研究[J]. 航空动力学报,2008,23(1):9-16.
Chen Guo. Research on self-adaptive de-noising technique for rotor faults signal based on wavelet analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2008,23(1):9-16. (in Chinese)
- [3] Liu Feng, Ruan Xiaoe. Wavelet-based diffusion approaches for signal de-noising[J]. Signal Processing, 2007,87:1138-1146.
- [4] 王春,彭东林. Hilbert-Huang 变换及其在去噪方面的应用[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):42-45.
Wang Chun, Peng Dongling. The Hilbert-Huang transform and its application on signal de-noising[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004,25(4):42-45. (in Chinese)
- [5] 赵旦峰,许聪,张扬,等. 采用循环叠加经验模态分解的去噪算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,36(6):768-772.
Zhao Danfeng, Xu Cong, Zhang Yang, et al. A denoising algorithm based on cyclic superimposed empirical mode decomposition[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 36(6):768-772. (in Chinese)
- [6] 陈凯. 基于经验模式分解的去噪方法[J]. 石油地球物理勘探,2009,44(5):603-608.
Chen Kai. A new denoising method based on empirical mode decomposition (EMD) [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009,44(5):603-608. (in Chinese)
- [7] Rato R T, Ortigueira M D, Batista A G. On the HHT, its problems, and some solutions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22: 1374-1394.
- [8] 曹冲锋,杨世锡,杨将新. 大型旋转机械非平稳振动信号的 EEMD 降噪方法[J]. 振动与冲击,2009,28(9):33-38.
Cao Chongfeng, Yang Shixi, Yang Jiangxin. De-noising method for non-stationary vibration signals of large rotating machineries based on ensemble empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(9):33-38. (in Chinese)
- [9] 胡爱军,孙敬敬,向玲. 经验模态分解中的模态混叠问题[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(4):429-434.
Hu Aijun, Sun Jingjing, Xiang Ling. Mode mixing in empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4):429-434. (in Chinese)
- [10] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009,1(1):1-41.
- [11] 陈隽,李想. 运用总体经验模式分解的疲劳信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(1):15-19.
Chen Jun, Li Xiang. Application of ensemble empirical mode decomposition to noise reduction of fatigue signal[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011,31(1):15-19. (in Chinese)
- [12] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998,454:903-995.
- [13] 杨永锋,吴亚锋,任兴民,等. 随机噪声对经验模态分解非线性信号的影响[J]. 物理学报,2010,59(6):3778-3784.
Yang Yongfeng, Wu Yafeng, Ren Xingmin, et al. The effect of random noise for empirical mode decomposition of nonlinear signals[J]. Acta Physica Sinica, 2010,59(6):3778-3784. (in Chinese)
- [14] 屈梁生. 机械故障的全息诊断原理[M]. 北京:科学出版社,2007:176.



第一作者简介:陈仁祥,男,1983年9月生,博士研究生。主要研究方向为信号分析与处理,测试计量技术及仪器。曾发表《基于最优 Morlet 小波和自顶窗的混合时频分析方法研究》(《振动与冲击》2010年第29卷第9期)等论文。

E-mail:manlou.yue@126.com