

基于 EMD 的复合故障诊断方法

崔玲丽 高立新 张建宇 胥永刚

北京工业大学机械工程与应用电子学院先进制造技术北京市重点实验室, 北京 100022

摘要 针对转子不平衡故障和滚动轴承微弱损伤性故障的复合故障诊断问题, 提出了一种基于经验模式分解的故障诊断方法, 进行复合故障的耦合特征分离和轴承损伤性故障信号特征提取研究. 该方法首先通过经验模式分解将复合信号分解为若干个本征模函数(intrinsic mode function, IMF); 然后通过计算各 IMF 与原始复合信号的相关系数确定包含故障特征信息的主要成分, 除去虚假分量; 最后针对主要成分中的低频成分进行频谱分析提出转子故障特征, 针对主要成分中的高频成分进行 Hilbert 包络解调提取调制故障特征, 即轴承损伤性故障特征. 仿真及实验结果表明该方法的有效性和实用性.

关键词 复合故障; 故障诊断方法; 经验模式分解; 相关分析; 包络解调

分类号 TH165+.3

Composite fault diagnosis method based on empirical mode decomposition

CUI Lingli, GAO Lixin, ZHANG Jianyu, XU Yonggang

Beijing Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

ABSTRACT Aimed at a composite fault of rotor failure and weak roller bearing fault, a fault diagnosis method based on empirical mode decomposition (EMD) was proposed to separate the coupling features of the composite fault and to extract the fault feature of the roller bearing. Signals were decomposed to obtain several intrinsic mode functions (IMF) by EMD. Main components are confirmed by calculating the correlation coefficient of every IMF and original composite signal, and false components were removed at the same time. Finally low-frequency rotor fault feature was extracted by FFT from the low-frequency component of main components, and high-frequency modulate feature of the roller bearing was extracted by Hilbert envelope demodulation from the high-frequency component of main components. Simulation and experiment analysis results indicate the validity and the practicability of the method proposed.

KEY WORDS composite fault; fault diagnosis method; empirical mode decomposition; correlation analysis; envelope demodulation

轴承作为转子的支撑元件, 其故障和转子故障极易发生耦合作用, 形成复合故障. 轴承故障的特征频率较转子要高, 但整体上两种故障的特征频率均处于分析频率的低频段, 且能量较低, 特征信息常被淹没在强大的背景噪声中, 很难发现和提取. 轴承损伤性故障的另一突出特征是冲击故障引起的系统零部件固有频率的高频共振, 即高频分量具有调制特征, 然而由于能量低, 从谱图上很难看出频谱特征和与故障对应的特征频率^[1]. 因此采用何种振动监测和信号处理技术提高信噪比, 突出故障特征信息, 抑制背景噪声, 从而有效分离耦合故障和提取故

障特征成为复合故障诊断问题的关键.

针对复合故障诊断问题, 文献[2]根据滚动轴承损伤性冲击故障的循环平稳特性, 利用循环平稳解调成功地分离了齿轮和轴承故障. 文献[3]应用小波包和解调技术进行了多类故障综合诊断问题的研究. 但是小波分析存在一定的局限性: 一方面, 小波分析方法实质是带通滤波器, 每次分解信号的频带被二分一次, 分解得到的各个分量与固定频带相对应, 故分解结果存在误差^[4]; 另一方面应用小波分解时采用不同的小波基和分解层次对结果影响较大, 如何选择小波基和分解层次是小波分析应用的

收稿日期: 2007-08-01 修回日期: 2008-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 5070500); 北京工业大学青年科学基金资助项目(No. 97001011200702)

作者简介: 崔玲丽(1976-), 女, 讲师, 博士, E-mail: cuilingli@bjut.edu.cn

难点^[5].

经验模式分解(empirical mode decomposition, EMD)作为一种新的主成分分析法,与小波变换相比存在一定的优越性^[6].它不再受Fourier变换的限制,可以根据被分析信号本身的特点,自适应选择频带,确定信号在不同频段的分辨率;因此,其在分辨率上消除了小波分析的模糊和不清晰,具有更准确的谱结构,比较适用于非线性、非平稳的信号分析,并且已经在一些领域取得了应用^[7-9].

本文研究了一种基于经验模式分解的复合故障诊断方法.该方法首先利用EMD的自适应分解特性分离振动信号中的各故障特征信息及噪声,然后经相关分析及EMD分解特征确定信号中代表故障特征信息主要分量,针对主要分量的特征进行相应的频谱分析和包络解调分析提取对应的故障特征.

1 EMD算法

经验模式分解是1998年Huang提出的新的信号时频分析方法,它通过一种“筛”的过程将任意信号分解为若干个本征模函数及一个余项的和,从而反映信号的内部特征.经验模式分解具有自适应分解特性,对非平稳和非线性信号的处理具有较高的效率^[10].

EMD方法是用波动上、下包络的平均值去确定“瞬时平衡位置”,进而分解出各IMF分量,故能够将原序列中的各种不同频率和振幅的信息逐一分解.考虑一个任意序列 $x(t)$,经验模式分解算法为如下.

(1) 初始化: $r_{i-1}(t) = x(t)$, $i=1$.

(2) 提取第 i 个固有模态函数.

(a) 初始化: $h_{k-1}(t) = r_{i-1}(t)$, $k=1$.

(b) 提取 $h_{k-1}(t)$ 的局部最大值与局部最小值;采用三次样条对局部极大值与局部极小值进行插值,分别形成 $h_{k-1}(t)$ 的上包络线与下包络线;计算其均值 $m_{k-1}(t)$.

(c) 确定 $h_k(t) = h_{k-1}(t) - m_{k-1}(t)$.

(d) 如果满足固有模态(IMF)准则,就令 $IMF_i(t) = h_k(t)$;否则转到(b),并且 $k = k+1$.

(3) 定义: $r_i(t) = r_{i-1}(t) - IMF_i(t)$.

(4) 如果 $r_i(t)$ 仍然具有两个以上极值,则转到(2),并且令 $i = i+1$;否则分解过程完成.

上述分解过程中产生的 $r(t)$ 称为数据序列的“残余量”,表示该信号的趋势.在经过信号的筛选过程后,原始信号可以表示为一定数目IMF及残余项的和,即:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i + r(t).$$

式中, n 是全部IMF的个数, $r(t)$ 是筛选过程的最终残余量.从EMD的筛选过程可以看出,IMF的筛选过程总是体现先高频,然后依次分解出低频、较低频,即EMD是有规律的.每个IMF与该层提取前的IMF相比,包含了更低的频率成分.所以,经验模态分解是基于与不同时间尺度有关的能量的直接提取上进行的.这一变化可以很好地检测频率变化,因为该变化在每一层的固有模态函数上将清晰的体现.

2 基于EMD的复合故障诊断方法

复合故障中不同故障信号的频谱结构和特征时间尺度不同.转子类故障特征其频谱图中转频及其倍频特征明显.通常,对于转子类故障是通过观察时域特征或频谱图中的转频及其倍频加以诊断,但这些频率分量较低,如和其他故障耦合或在强大的背景噪声中,很难发现和提取.当局部受损的轴承运行时,损伤部件会产生高频冲击振动,冲击振动的幅值将被低频的故障信号所调制.显然,这种调幅信号将具有与滚动轴承故障特征对应的特征时间尺度.

经验模式分解依据信号的特征时间尺度分解任意信号,本征模函数 $IMF_1, IMF_2, IMF_3, \dots, IMF_n$ 分别反映信号中内嵌的简单振荡模式,它们依次包含从高频到低频的信号频率成分,频带宽度由信号本身的特点所决定.利用经验模式分解这一特性,能够将振动信号中的各故障信息与背景噪声进行有效分离.但是,在EMD分解的过程中会产生一些虚假成分而引起误诊.如何从众多的本征模分量中提取含有故障信息的主要信号成分,是准确进行耦合故障分离和故障特征提取的关键.因此,本文提出了基于经验模式分解的复合故障诊断方法.

该方法首先通过经验模式分解将复合信号分解为若干个本征模函数(IMF),将分离出的各本征模分量与原始信号进行相关分析,求取与各分量相对应的相关系数,依据相关系数序列值及其极值点特征确定包含原始信号主要信息的主IMF,并除去虚假频率.在提取的主IMF分量中,针对低频分量进行频谱分析,提取与转子故障相对应的低频故障信息;对高频分量进行Hilbert包络解调分析,提取与轴承损伤性故障相对应的高频调制特征.

该方法包括以下几个步骤:

(1) 应用经验模式分解方法将综合振动信号

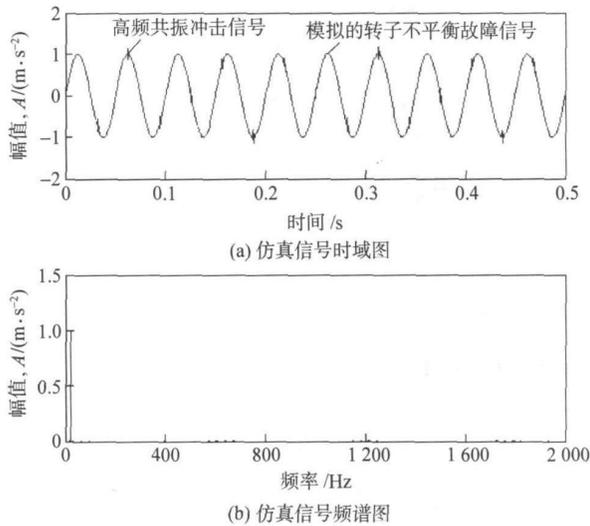
$x(t)$ 分解为若干本征模函数及余项的和, $IMF_1, IMF_2, IMF_3, \dots, IMF_n$ 中将包含从高频到低频的不同频率成分, 如上所述.

(2) 求取各本征模函数 $IMF_1, IMF_2, IMF_3, \dots, IMF_n$ 与 $x(t)$ 相关系数, 根据相关系数序列值及其极值特征提取主 IMF 分量.

(3) 针对主 IMF 分量中代表低频成分的本征模函数计算其 Fourier 频谱.

(4) 针对主 IMF 分量中代表高频成分的本征模函数, 通过 Hilbert 变换获得其包络信号, 并计算包络信号的 Fourier 频谱.

(5) 分析低频(3)和低频(4)所得的频谱, 根据



转子转频和滚动轴承故障特征频率诊断故障类型.

3 仿真与应用研究

3.1 仿真研究

为验证所提方法的有效性, 构造复合故障信号进行数值仿真研究. 设轴系转子不平衡故障信号为 $x = \sin(40t\pi)$, 高频共振冲击信号为 $a = 0.1 \exp(-1000\pi t) \sin(5000\pi t)$, 其故障通过频率为 32 Hz. 上述信号叠加而成的复合信号及其频谱如图 1(a)和 1(b)所示, 叠加白噪声后的信号及其频谱图如图 1(c)和 1(d)所示.

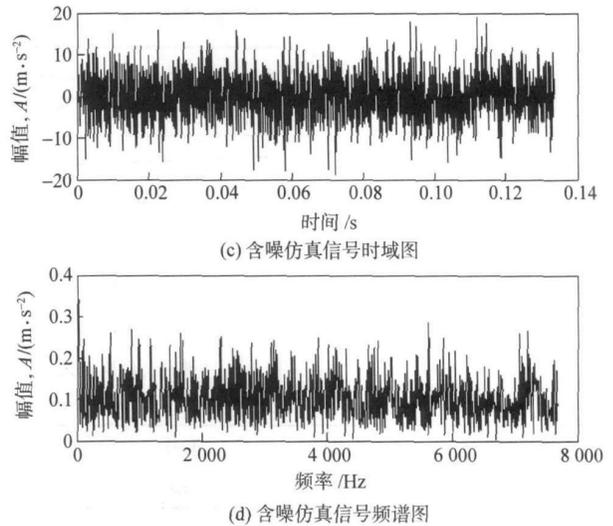


图 1 仿真信号及其频谱

Fig. 1 Simulation signal and its frequency spectrum

通过经验模式分解, 得到七个本征模函数 $IMF_1 \sim IMF_7$ 和分解余项 r_7 , 如图 2 所示, 显然分量存在虚假频率分量. 求取各本征模函数与原始仿真信号的相关系数, 见表 1. 在相关系数序列中求取极值点, 与其对应的本征模分量为主分量. 由表 1 可知, 相关系数序列中两个极值点分别对应的本征模分量为 IMF_1 和 IMF_4 . 又由 EMD 分解特征可知, 本征模分量总是由高频到低频, 即 IMF_1 对应的为高频主分量, IMF_4 对应的是低频主分量. 针对 IMF_1 进行 Hilbert 包络解调提取高频调制故障特征, 如图 3(a)所示, 高频调制频率 32 Hz 及其倍频清晰可见. 对 IMF_4 进行频谱分析提出低频故障特征, 如图 3(b), 可见 20 Hz 低频成分十分明显.

3.2 应用研究

实验系统由轴承实验台、HG3528A 数据采集仪和笔记本电脑组成. 由数据采集仪将采集数据上传到电脑中, 进行数据处理分析. 其中实验台(如图 4 所示)由三相异步电机通过挠性联轴器与装有转盘的转轴连接, 轴由两个 6307 轴承支撑, 一个为正常轴承, 另一个为不同点蚀模式的轴承(安装在 B 端). 电机为恒转速, 其转速 $R = 1496 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 轴承的大径 $D = 80 \text{ mm}$, 小径 $d = 35 \text{ mm}$, 滚动体个数为 $Z = 8$, 接触角 $\alpha = 0$. 模拟的复合故障为, 转子不平衡故障和轴承的外圈单点点蚀故障, 点蚀缺陷的大小为直径 2 mm、深 0.1 mm 的小凹坑. 根据上述参数计算得出, 转子不平衡故障的特征频率为转频 24.9 Hz, 轴承外圈故障特征频率为 74.9 Hz.

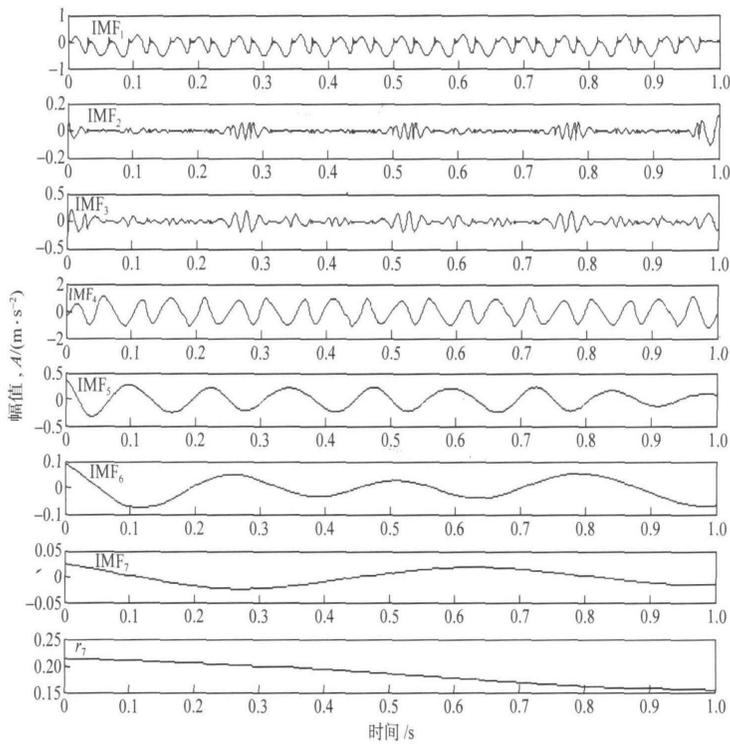


图 2 仿真信号的 EMD 分解

Fig.2 EMD of simulation signal

表 1 经验模式分量与原始信号的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of IMF and original signal

经验模式分量	IMF ₁	IMF ₂	IMF ₃	IMF ₄	IMF ₅	IMF ₆	IMF ₇
相关系数	0.4119	0.0428	0.0527	0.9188	0.0350	0.0459	0.0322

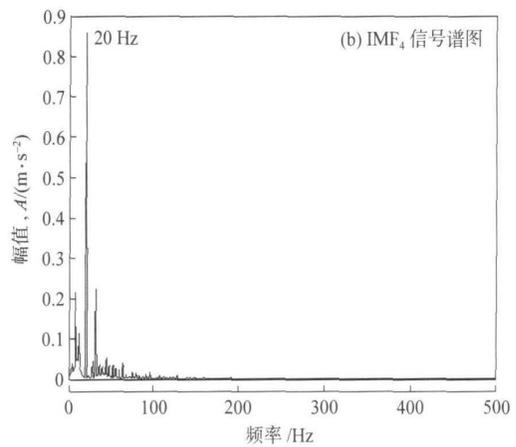
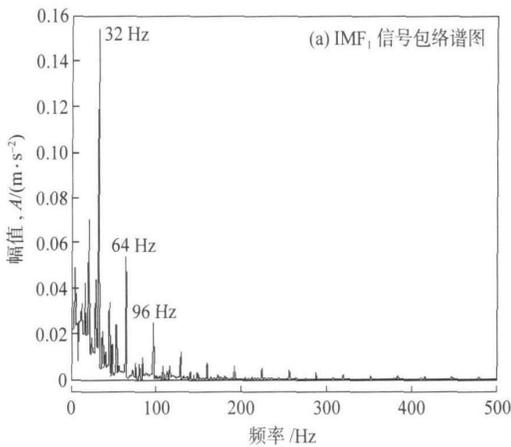


图 3 仿真信号 EMD 分解后的频谱及包络谱

Fig.3 Frequency spectrum and envelop spectrum of simulation signal after EMD

针对如图 4 所示的轴承与转子实验台进行加速度信号采集, 采样频率为 15 360 Hz, 每次采样点数为 8 192, 采集 80 组数据, 用基于经验模式分解的复合故障诊断方法分析所采集的数据. 下面以其中一组数据为例进行说明.

首先, 通过经验模式分解, 得到 12 个本征模函数 IMF₁~IMF₁₂, 如图(5)所示, 显然分量存在虚假频率分量. 求取各本征模函数与原始仿真信号的相关系数, 见表 2. 在相关系数序列中求取极值点, 与其对应的本征模分量为 主分量. 由表 2 可知, 相关

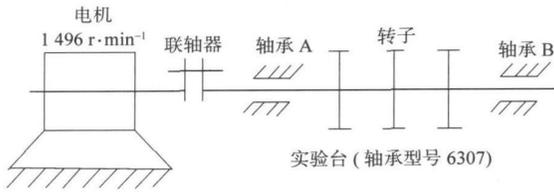


图 4 轴承与转子实验台

Fig. 4 Experimental table of bearings and a rotor

系数序列中两个极值点分别对应的本征模分量为 IMF_1 和 IMF_9 , IMF_1 对应的为高频主分量, IMF_9 对应的是低频主分量. 针对 IMF_1 进行 Hilbert 包络解调提取高频调制故障特征, 如图 6(a) 所示, 73.1 Hz 及其倍频清晰可见, 表明轴承中存在外圈损伤. 对 IMF_9 进行频谱分析提出低频故障特征, 如图 6(b), 可见 24.8 Hz 低频成分十分明显, 表明转子存在不平衡故障.

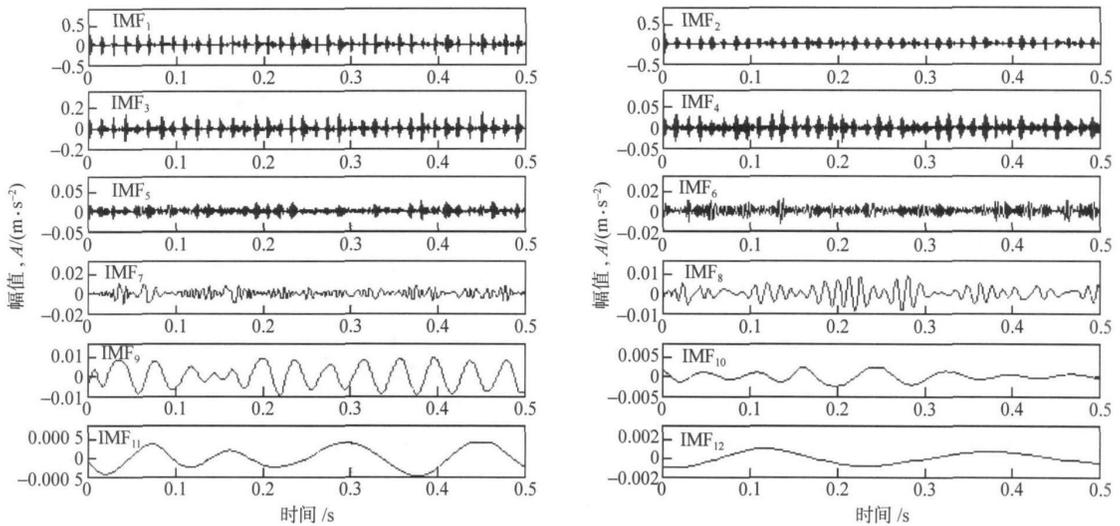


图 5 实验信号的 EMD 分解

Fig. 5 EMD of experimental signal

表 2 实验信号的经验模式分量与原始信号的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of IMF and original experiment signal

经验模式分量	IMF_1	IMF_2	IMF_3	IMF_4	IMF_5	IMF_6	IMF_7	IMF_8	IMF_9	IMF_{10}	IMF_{11}	IMF_{12}
相关系数	0.6157	0.5766	0.3569	0.1161	0.0857	0.0462	0.0315	0.0343	0.0612	0.0040	-0.0007	-0.0000

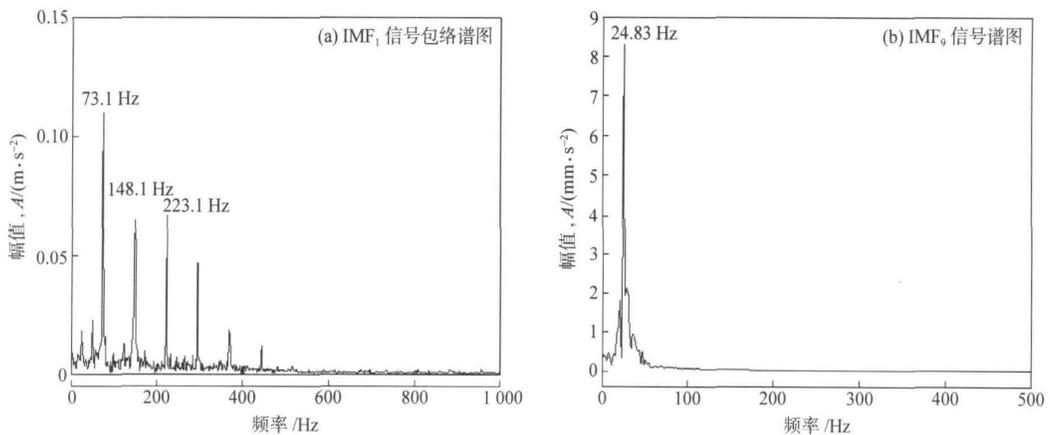


图 6 实验信号 EMD 分解后的频谱及包络谱

Fig. 6 Frequency spectrum and envelop spectrum of experimental signal after EMD

4 结论

针对转子和轴承的复合故障诊断问题,本文提出了一种基于EMD分解的复合故障诊断方法.该方法利用EMD分解特性和相关分析技术,提取包含故障信息的主要IMF分量;然后针对所提取的IMF分量的各自特点,分别进行频谱分析和包络解调分析,以提取转子故障的低频特征和轴承损伤的高频调制特征.仿真和实验结果表明,本文提出的方法能够有效分离转子不平衡和轴承损伤的耦合故障,准确提取各自的故障特征.

参 考 文 献

- [1] Ding K, Li W H. *Practical Technology of Fault Diagnosis in Gear and Gearbox*. Beijing: China Machine Press, 2005
(丁康,李巍华. 齿轮及齿轮箱故障诊断实用技术. 北京:机械工业出版社,2005)
- [2] Randall R B. Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes. *Eng Failure Anal*, 2004, 11(2): 177
- [3] Yang G A, Xu F Y, Wu Z H, et al. Research on the multi-fault comprehensive diagnosis method based on wavelet packet and demodulation. *J Southeast Univ Nat Sci Ed*, 2004, 34(1): 42
(杨国安,许飞云,吴贞焕,等. 基于小波包和解调分析的多类故障综合诊断方法研究. 东南大学学报:自然科学版,2004, 34(1): 42)
- [4] Gao Q, Du X S, Fan H, et al. An empirical mode decomposition based method for rolling bearing fault diagnosis. *J Vib Eng*, 2007, 20(1): 15
(高强,杜小山,范虹,等. 滚动轴承故障的EMD诊断方法研究. 振动工程学报,2007, 20(1): 15)
- [5] Gong Z Q, Zou M W, Gao X Q, et al. On the difference between empirical mode decomposition and wavelet decomposition in the nonlinear time series. *Acta Phys Sin*, 2005, 54(8): 3947
(龚志强,邹明玮,高新全,等. 基于非线性时间序列分析经验模式分解和小波分解异同性的研究,物理学报,2005, 54(8): 3947)
- [6] Peng Z K, Peter W T, Chu F L. A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing. *Mech Syst Signal Process*, 2005, 19: 974
- [7] Luo Z H, Xue X N, Wang X Z, et al. A new time domain approach to detecting tiny damage of structure based on empirical mode decomposition. *Proc CSEE*, 2005, 25(14): 125
(罗忠辉,薛晓宁,王筱珍,等. 小波变换及经验模式分解方法在电机轴承早期故障诊断中的应用. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 125)
- [8] Li H L. Structural damage detection based on EMD method and wavelet analysis. *J Sun Yat-sen Univ Nat Sci Ed*, 2005, 44(6): 20
(李合龙. 基于EMD和小波分析的建筑结构损伤检测探讨. 中山大学学报:自然科学版, 2005, 44(6): 20)
- [9] Yang Z C, Yu Z F, Sun H. A new time domain approach to detecting tiny damage of structure based on empirical mode decomposition. *J Northwest Polytech Univ*, 2005, 23(4): 422
(杨智春,于哲峰,孙浩. 一种基于经验模分解的结构微小损伤检测方法. 西北工业大学学报, 2005, 23(4): 422)
- [10] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc London*, 1998, 454: 903