

频率外差经验模式分解改进算法*

胡红英^{1,2} 殷福亮¹

(1. 大连理工大学电子与信息工程学院, 大连 116023; 2. 大连民族学院机电信息工程学院, 大连 116600)

【摘要】 当信号中两个单频分量的频率在二倍频内时,经验模式分解(EMD)无法将两分量分解开。为了提高EMD的频率分辨率,根据频率外差EMD方法提出了一种改进算法。此方法增大了信号中组成分量的频率差距,使之达到EMD可分的程度,但不会使高低频率翻转。间隙非线性系统输出分析和转子复合故障诊断的应用表明,该算法能有效提高EMD的频率分辨率,分解精度高,操作简单。

关键词: 经验模式分解 频率外差 间隙非线性系统 复合故障诊断

中图分类号: TP391; TP806+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)10-0209-05

Improved Algorithm of Frequency Heterodyne Empirical Mode Decomposition

Hu Hongying^{1,2} Yin Fuliang¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China

2. College of Electromechanical and Information Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China)

Abstract

Two individual components in a signal with frequencies within an octave usually can't be decomposed by normal empirical mode decomposition (EMD) method. In order to improve the frequency resolution, an improved method based on frequency heterodyne EMD was presented. The proposed method enlarged the frequency difference of components to reach the identifying level of EMD. Moreover, the frequencies of components can't be turnover with the frequency heterodyne EMD method. The applications in backlash nonlinearity system analysis and rotor complex fault diagnosis showed that the proposed method could improve the resolution of EMD with high accuracy and proved to be feasible.

Key words Empirical mode decomposition, Frequency heterodyne, Backlash nonlinearity system, Complex fault diagnosis

引言

经验模式分解(EMD)是近年来信号处理领域的一种新的非平稳信号处理方法。它可以将复杂的非平稳信号分解成多个基本模式分量(intrinsic mode functions,简称IMFs)与一个趋势项的和,是一种完全数据驱动的自适应分解方法^[1-3]。而且EMD分解得到的每个基本模式分量都是单分量,满足用Hilbert变换求瞬时频率的必要条件,从而可以更精确地描述信号的时频特性。但是EMD在实际应用中还存在一些缺点,最突出是当信号中两组成

分量的频率在二倍频内时,EMD无法将两者分解开^[4],这个缺点降低了EMD的频率分辨率,制约了它在非平稳信号分析中的应用。

为了提高EMD的频率分辨率,解决二倍频内分量不可分解问题,Deering提出了掩蔽信号EMD法^[5],但构造掩蔽信号的两个参数选取难度较大,影响了此方法的进一步推广;Senroy提出了频率外差EMD方法^[4],该方法通过频率外差使信号中高、低频率分量产生频率翻转,即信号中的高频分量变成低频,低频分量变成高频,从而扩大高、低频之间的差距,达到EMD可分解的目的。因为频率外差

收稿日期:2009-09-07 修回日期:2009-10-10

* 国家自然科学基金资助项目(50775025)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介:胡红英,副教授,博士后,主要从事故障诊断、信号处理研究,E-mail: y_y_who@163.com

通讯作者:殷福亮,教授,博士生导师,主要从事数字信号处理、语音信号处理研究,E-mail: flyin@dlut.edu.cn

EMD方法只需要选择一个参数,因此较掩盖信号法简单,易操作,具有较高的推广价值。但是,由于EMD分解的边界效应和分解误差会在分解过程中不断累积,并在低频段产生低频伪模式分量,这些伪模式分量经频率外差后翻转为高频模式分量,与其他真实的高频分量混在一起而变得真伪难辨,又给正确的频率分析造成困扰。为此,本文在分析频率外差EMD方法的基础上,提出一种改进算法。

1 频率外差EMD改进算法

1.1 频率外差EMD改进算法原理

频率外差EMD改进算法的基本原理与频率外差方法相似,即让信号中各组成分量的频率偏移一定的距离 F ,从而增大高、低频率之间的差距,达到EMD可分解的程度。

对于一个含有两个组成分量(频率分别为 f_1 、 f_2 ,且 $f_1/f_2 < 2$)的信号 $s(t)$ 来说,频率外差EMD改进方法的计算过程如下:

(1) 把 $s(t)$ 转换成解析形式 $s_z(t)$,消除信号中的负频率成分,获得单边带信号

$$s_z(t) = s(t) + j\hat{s}(t) \quad (1)$$

$$\text{其中 } \hat{s}(t) = H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau$$

式中 $\hat{s}(t)$ —— $s(t)$ 的Hilbert变换

(2) 选择适当的外差频率 F ,使 $(f_1 - F)/(f_2 - F) > 2$,对 $s_z(t)$ 进行移频 F ,并取其虚部信号,即

$$s'(t) = \text{Im}(s_z(t) e^{-j2\pi Ft}) \quad (2)$$

此时,信号中原来两个组成分量的频率 f_1 、 f_2 分别变为 $f_1 - F$ 、 $f_2 - F$,且 $(f_1 - F)/(f_2 - F) > 2$ 。

(3) 对 $s'(t)$ 进行EMD分解

$$s'(t) = \sum_{i=1}^n c'_i(t) + r'_n(t) \quad (3)$$

式中 $c'_i(t)$ —— $s'(t)$ 的第 i 个基本模式分量

$r'_n(t)$ —— $s'(t)$ 的趋势项

得到 $s'(t)$ 的各基本模式分量 $c'_i(t)$ 。

(4) 把 $s'(t)$ 的各模式分量变成解析形式

$$c_{zi}(t) = c'_i(t) + j\check{c}'_i(t) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中 $\check{c}'_i(t)$ —— $c'_i(t)$ 的Hilbert变换

(5) 恢复原信号基本模式分量的公式为

$$c_i(t) = -\text{Im}(c_{zi}(t) e^{j2\pi Ft}) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中 $c_i(t)$ —— $s(t)$ 的第 i 个基本模式分量

通常对复杂信号进行分析时,首先使用传统EMD方法进行分解,如发现某个或某些基本模式分量包含频率相近的不可分解分量时,再对此模式分量用改进频率外差EMD法进行分解。为了获得正

确的模式分量,可能需要传统EMD方法和改进频率外差EMD方法交替混合使用才能得到较好的效果。

使用频率外差法的关键是确定 F 的取值。为保证 $(f_1 - F)/(f_2 - F) > 2$,即 $(2 - f_1/f_2) < F/f_2 < 1$,一般可取 F 为0.7~0.9倍的 f_2 (信号中低频分量的频率)。

1.2 仿真分析

假设信号 S 由两个频率分别为420、300 Hz,幅值为1的单频分量 S_1 、 S_2 线性叠加而成,如图1所示(采样频率为2000 Hz)。

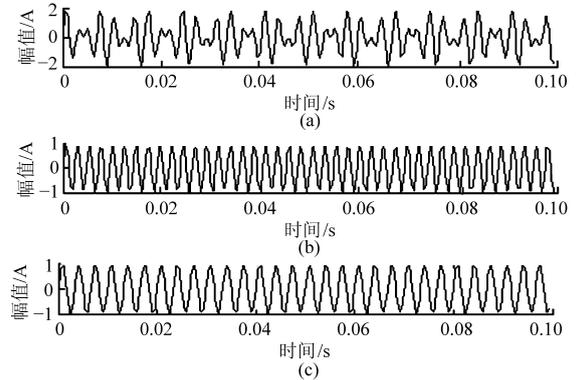


图1 信号 S 及其两组成分量 S_1 和 S_2

Fig. 1 Signal S , components S_1 and S_2

(a) S (b) S_1 (c) S_2

对信号 S 直接进行传统EMD分解得到7个基本模式分量,其中前5个见图2。由于信号两组成分量的频率比 $420/300 = 1.4 < 2$,EMD无法将两个分量完全分解开。由图2可见,第1个模式分量 c_1 中包含了频率为420、300 Hz的成分, c_2 包含了频率为300 Hz的成分,而其他模式分量都是由分解误差造成的低频伪分量。

使用传统频率外差EMD方法对信号 S 进行分解,外差频率为510 Hz,得到4个基本模式分量,结果如图3所示,其中前两个高频分量 c_1 、 c_2 是由于边界效应和分解误差造成的伪模式分量, c_3 、 c_4 分别对应原信号中的 S_1 和 S_2 。两分量分解误差计算公式为

$$e(s_i) = \frac{\sum_{i=1}^n [(s_i(t) - c_k(t))]^2}{\sum_{i=1}^n s_i(t)} \quad (i=1, 2; k \in [1, n]) \quad (6)$$

式中 c_k ——与 s_i 对应的基本模式分量

n ——信号 S 的基本模式分量个数

频率外差EMD方法得到的两分量分解误差分别是0.0191和0.0192。

使用本文提出的改进算法分解信号 S ,外差频率 F 为240 Hz,得到的3个基本模式分量如图4所示,其中前两个基本模式分量 c_1 、 c_2 分别对应信号 S 中的 S_1 和 S_2 。而 c_3 是由分解误差产生的伪模式分

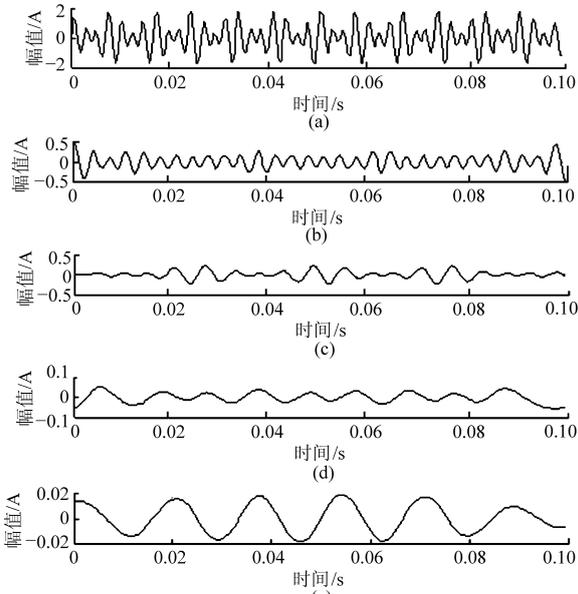


图 2 信号 S 经传统 EMD 分解的前 5 个基本模式分量
Fig.2 The first five IMFs of signal S obtained by normal EMD
(a) c_1 (b) c_2 (c) c_3 (d) c_4 (e) c_5

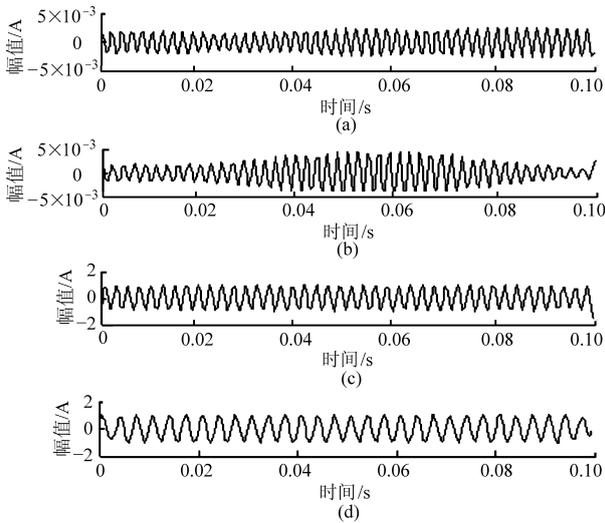


图 3 信号 S 频率外差 EMD 分解结果
Fig.3 IMFs of signal S obtained by frequency heterodyne EMD
(a) c_1 (b) c_2 (c) c_3 (d) c_4

量。用式(6)计算的 S_1 、 S_2 的分解误差分别为 3.58×10^{-4} 和 2.99×10^{-4} 。可见改进算法不但可减少伪分量,而且分解精度也较高。

2 间隙非线性系统时变特性分析

间隙非线性特征是工业过程中一种常见的非线性特征,经常出现在非线性控制系统和含弹性约束和间隙的机械系统中^[6-7]。图 5 为一个单自由度间隙非线性系统,弹簧 k_1 、 k_2 , 阻尼 c 和质量块 m 在含间隙 2δ 的情况下受激振 P 作用。

该系统的数学模型为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_1x + k_2 f(x) = P \quad (7)$$

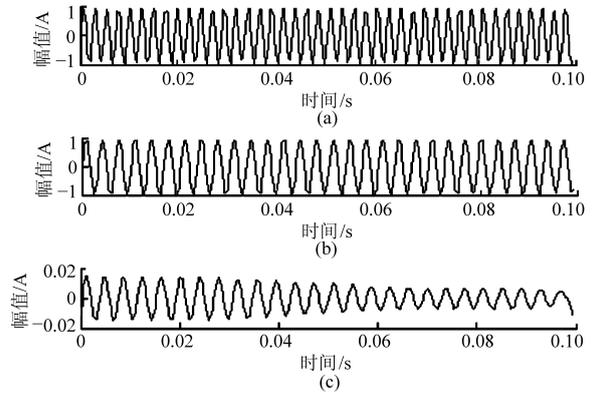


图 4 信号 S 频率外差 EMD 改进算法分解结果
Fig.4 IMFs of signal S obtained by the modified EMD
(a) c_1 (b) c_2 (c) c_3

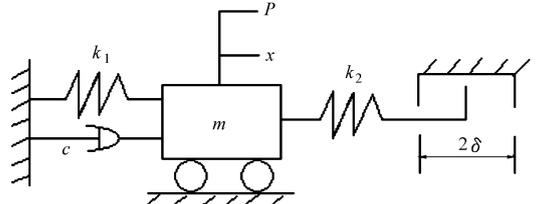


图 5 单自由度间隙非线性系统
Fig.5 Single freedom backlash nonlinearity system

$$\text{其中 } f(x) = \begin{cases} x - \delta & (x > \delta) \\ 0 & (-\delta \leq x \leq \delta) \\ x + \delta & (x < -\delta) \end{cases}$$

此系统的响应包含暂态响应和稳态响应,暂态响应的频率具有时变特征^[8]。

考虑激励为单频余弦激励时的情况 $P = 6\cos(2\pi \times 14t)$, 即激振频率为 14 Hz。取系统参数 $m = 1, c = 0.5, k_1 = 2800, k_2 = 8200, \delta = 0.006$, 系统在两个弹簧刚度下对应的自由响应频率分别为 8.42 Hz 和 16.62 Hz。在采样频率为 50 Hz 的状态下,用四阶龙格库塔法求解微分方程(7),得到系统输出 \dot{x} 。图 6 表明 \dot{x} 随时间的增大逐渐由复杂的暂态衰减为简单的稳态。由于激励频率 14 Hz 接近于系统固有频率 8.42 Hz,且暂态信号的频率具有时变性,因此用一般时频方法无法清晰表达 \dot{x} 的时频组成信息。

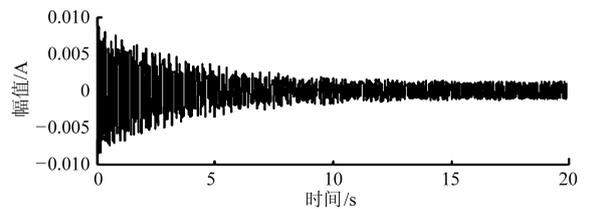


图 6 \dot{x} 随时间变化的波形
Fig.6 Wave form changes of \dot{x} with time

用传统 EMD 方法对 \dot{x} 进行分解,结果如图 7 所示。图 7 表明传统 EMD 方法无法分离暂态和稳态信息。

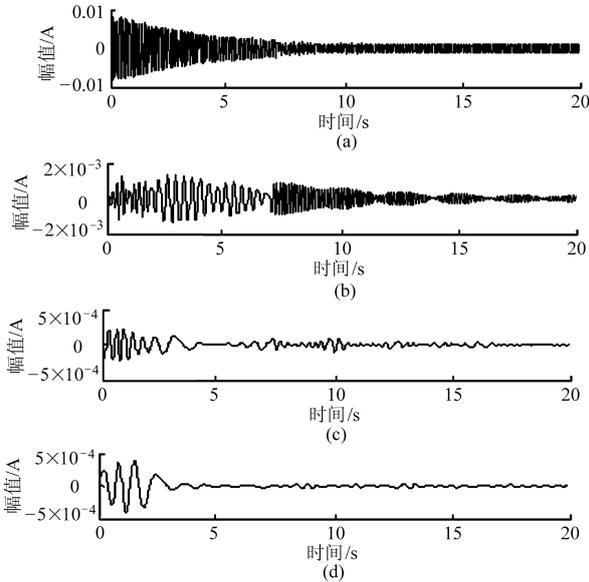


图7 传统 EMD 分解的前 4 个基本模式分量

Fig. 7 The first four IMFs obtained by normal EMD

(a) c_1 (b) c_2 (c) c_3 (d) c_4

使用本文方法 ($F = 8 \text{ Hz}$) 进行分解得到的基本模式分量及其时频谱见图 8、9, 两图表明已经成功地实现了暂态和稳态分离。其中, c_1 对应恒定的 14 Hz 稳态激励; c_2 对应幅值逐渐衰减的低频暂态响应, 频率由 11 Hz 逐渐过渡到系统固有频率 8.42 Hz, 而后逐渐消失。由于激励能量较小, \dot{x} 中没有 16.62 Hz 的频率成分。

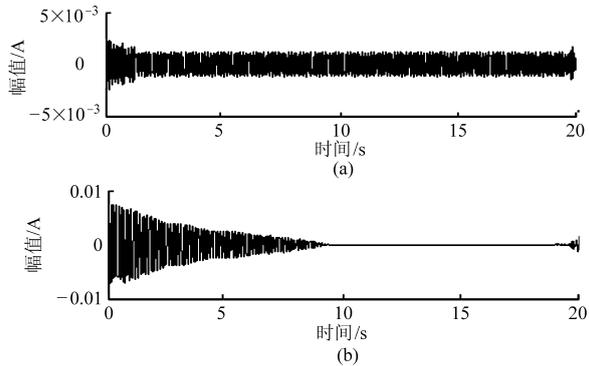


图8 本文方法分解得到的前 2 个基本模式分量

Fig. 8 The first two IMFs obtained by the proposed method

(a) c_1 (b) c_2

3 转子复合故障诊断

转子的每种故障都有其对应的特征频率, 因此单个故障较易诊断。但是, 当转子存在两种或两种以上故障时, 尤其是其中之一故障较轻微时, 轻微故障特征就会被其他故障特征掩盖。到目前为止, 还没有切实有效的诊断这种复合故障的方法。下面用本文方法进行转子复合故障诊断。

转子复合故障信号采集过程如下: 在小型转子实验台上测量不对中和轻微基座松动复合故障的振

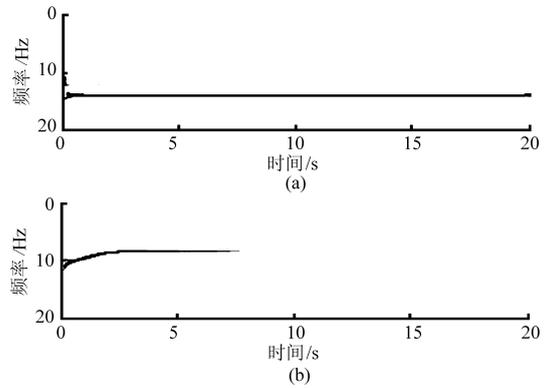


图9 图8 模式分量的时频谱

Fig. 9 Time-frequency spectrums of the two IMFs in Fig. 8

(a) c_1 (b) c_2

动信号, 采样频率为 2 560 Hz, 转子转速为 3 000 r/min, 即基频为 50 Hz。采用加速度传感器测量远离驱动电动机端轴承盖的垂直端面处的振动加速度。测得信号的时域波形如图 10 所示。

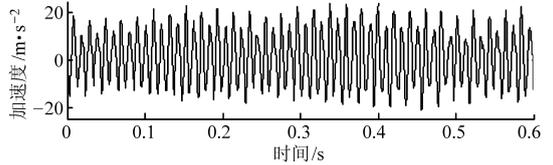


图10 振动信号时域波形

Fig. 10 Time domain vibration signal

图 10 信号经传统 EMD 分解结果的前 2 个基本模式分量 c_1 、 c_2 的时频谱如图 11 所示。图 11 表明, c_1 中主要频率成分是 100 Hz (2 倍频), 能量较高, 此 2 倍频成分是转子不对中故障的主要特征, 说明转子存在不对中故障^[9]。图中还可隐约看出有能量较低的 150 Hz (3 倍频) 的频率成分。 c_2 中是 50 Hz (基频) 的频率成分。

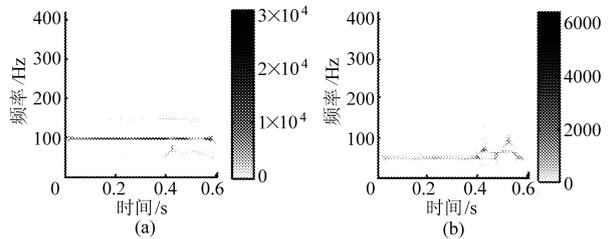


图11 信号传统 EMD 方法分解得到的前 2 个分量的时频谱

Fig. 11 Time-frequency spectrums of the first two IMFs

by normal EMD

(a) c_1 (b) c_2

为了进一步分析信号中是否含有其他能量较小的频率成分, 对 c_1 使用本文方法, 将频率为 150 Hz 和 100 Hz 的成分分开。由于 $150/100 = 1.5 < 2$, 使用移频频率为 75 Hz, 取分解结果的前 3 个基本模式分量 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} , 其对应的时频谱如图 12 所示。

从图 12 中可以看出, c_{11} 中包含了 250 Hz (5 倍

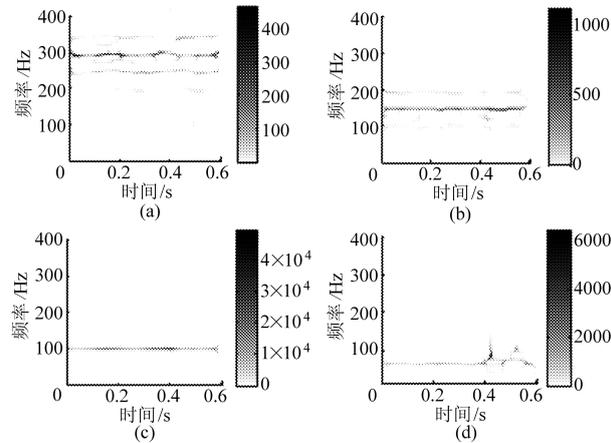


图 12 用本文方法对 c_1 分解得到的前 3 个分量 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} 和图 11 中第 2 个分量 c_2 的时频谱

Fig. 12 Time-frequency spectrums of the first three IMFs and the second IMF in Fig. 11
(a) c_{11} (b) c_{12} (c) c_{13} (d) c_2

频)、300 Hz(6 倍频)、350 Hz(7 倍频)等倍频成分,其中 6 倍频能量相对较高。 c_{12} 包含了 200 Hz(4 倍频)、150 Hz(3 倍频),其中 3 倍频能量相对较高; c_{13} 包含了 100 Hz(2 倍频)频率成分。高倍频成分的存在,尤其是 6 倍频和 3 倍频都是机座松动故障的特征^[9],且这些倍频成分的能量较 2 倍频低,因此判定转子有较轻微的基座松动故障。

4 结束语

提出了一种频率外差 EMD 改进算法,该方法的仿真信号分析、间隙非线性系统输出分析以及转子复合故障诊断表明,它不但能提高 EMD 分解的分辨率,分解精度高,操作简单,而且切实可行。本方法的局限性在于使用前需估计信号的组成频率,以便正确选择移频频率,获得较好的分解效果。

参 考 文 献

- Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proc. Roy. Soc. London A, 1998, 454: 903 ~ 995.
- Flandrin P, Rilling G, Goncalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 112 ~ 114.
- 胡红英, 马孝江. 基于局域波分解的信号降噪 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 118 ~ 121.
Hu Hongying, Ma Xiaojiang. Signal denoising based on local-wave decomposing method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 118 ~ 121. (in Chinese)
- Senroy N, Suryanarayanan S. Two techniques to enhance empirical mode decomposition for power quality applications [C] // Proc. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, 2007.
- Deering R, Kaiser J F. The use of masking signal to improve empirical mode decomposition [C] // Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech Signal Processing (ICASSP '05), 2005: 485 ~ 488.
- 管迪, 陈乐生. 含间隙迟滞非线性系统的稳态响应 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 118 ~ 122.
Guan Di, Chen Lesheng. Steady-state response of a hysteretic nonlinear system with clearance [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 118 ~ 122. (in Chinese)
- 赵全军. 工业过程中间隙非线性特性的控制研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
Zhao Quanjun. The research of control for backlash nonlinearity in industrial process [D]. Beijing: North China Electric University, 2006. (in Chinese)
- Kujath M R. On vibration modified by abrupt changes in system parameter [J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 124(2): 345 ~ 355.
- 冯长建. HMM 动态模式识别理论、方法以及在旋转机械故障诊断中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
Feng Changjian. HMM dynamical pattern recognition theories, methods and applications in faults diagnosis of rotating machine [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.

(上接第 218 页)

- Berger E J, Sadeghi F, Krousgrill C M. Torque transmission characteristics of automatic transmission wet clutches: experimental results and numerical comparison [J]. Tribology Transactions, 1997, 40(4): 539 ~ 548.
- 侯友夫, 黄民, 张永忠. 带式输送机动态特性及控制技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- 平克斯 O, 斯德因李希特 B. 流体动力润滑理论 [M]. 西安交通大学轴承研究小组, 译. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- 温诗铸. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.