

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.02.020

# 冷却塔振动信号的重构及其时频分析

易 丁, 龙永红, 龙晓薇, 姜 山, 江元元

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 根据“和谐号”动力机车用冷却塔的振动信号特点, 设计了振动测试平台; 利用 LabVIEW 软件编程实现了上位机软件, 可以实时显示振动信号; 利用经验模态分解方法对振动信号进行重构滤波和时频分析, 为判断冷却塔的故障提供依据; 将该方法与 Butterworth 滤波器进行了比较, 证明了该方法的优越性。实验结果表明: 该方法能准确判断冷却塔的振动状况, 提高了对冷却塔的质量监管, 为动力机车的正常运行提供了保障。

**关键词:** 经验模态分解; 振动信号; 时频分析; 重构滤波

**中图分类号:** TQ051.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2012)02-0093-05

## Reconstruction of Cooling Tower Vibration Signals and Its Time-Frequency Analysis

Yi Ding, Long Yonghong, Long Xiaowei, Jiang Shan, Jiang Yuanyuan

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** According to the characteristics of the cooling tower vibration signals in the "harmonious" power locomotive, designs the vibration test platform. By means of programming technology of LabVIEW, realizes the PC software and real-time display of the vibration signals. Applies the method of empirical mode decomposition to reconstruction filter and time-frequency analysis of the vibration signals, and provides the basis for cooling tower faults judgment. By comparing the proposed method with Butterworth filter, proves the method's advantages. The experiment results show that the proposed method can accurately judge the cooling tower vibration condition, improves the supervision quality and provides a guarantee for the normal operation of power locomotive.

**Keywords:** empirical mode decomposition; vibration signal; time-frequency analysis; reconstruction filter

## 0 引言

随着计算机技术的发展, 冷却塔的测试逐步以计算机测试取代了传统的手动测试, 并向自动化、智能化的方向发展。而传统的手动测试方法存在着记录数据繁琐, 易出现记录差错, 难以描绘出实时测试曲线等缺点, 因此需要为冷却塔搭建一种自动

化与智能化的测试台应用虚拟仪器<sup>[1]</sup>。冷却塔的振动信号是一种非平稳非线性的随机信号, 信号频率随时间变化, 应用传统的平稳滤波方法 FFT (fast fourier transform)<sup>[2]</sup>、ButterWorth滤波<sup>[3]</sup>等处理非线性非平稳信号会使其波形产生畸变。针对这个问题, 本文提出了利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)对冷却塔的振动信号进行自适应地

收稿日期: 2011-12-09

作者简介: 易 丁(1986-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为信号处理与智能控制,

E-mail: vine.my-0417@163.com

重构滤波<sup>[4-5]</sup>, 提取振动信号的本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF)<sup>[6-7]</sup>, 实现高通、低通、带通、带阻等自适应无波形畸变滤波, 这样可以得到更好的振动曲线; 对振动信号进行时频分析, 得到振动时频域特征, 这样有利于冷却塔振动状况的故障诊断, 为机车冷却塔的正常运行提供保证。

# 1 振动信号的重构

## 1.1 冷却塔振动测试台设计方案

### 1.1.1 硬件设计

冷却塔振动测试平台可以手动和自动控制冷却塔振动测试, 能对工作频率在 10~60 Hz 的冷却塔进行变频/定频测试和振动信号的采集, 且当振动信号超标时, 该测试平台会报警。该测试平台的工作原理是: 先用压电式加速度传感器采集冷却塔风机的振动加速度信号, 并将其转换成电压信号; 将电压信号送入信号调理机, 信号调理机对电压信号进行放大; 将该信号送入数据采集卡, PCI2002 数据采集卡将模拟电压信号转换为数字信号; 工控机读取由数据采集卡发送的数字信号, 并将加速度电压信号转换为振动速度信号实时显示, 还可以控制 PLC, 打开相应的继电器使硬件电路工作, 变频器输出频率可变的三相交流电, 三相交流电经过三相稳压电源

后, 驱动冷却塔风机完成变频和定频测试; 测控台按钮可以手动控制 PLC 完成冷却塔振动测试。该测试平台结构框图如图 1 所示。

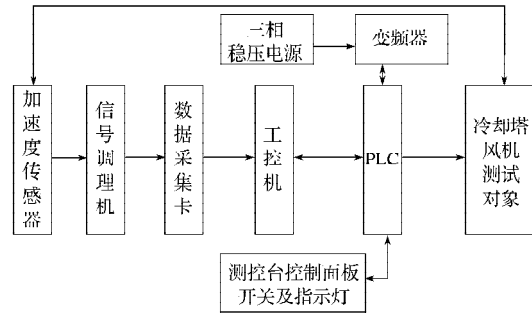


图1 系统硬件结构框图

Fig. 1 The structural diagram for system hardware

### 1.1.2 上位机软件设计

LabVIEW 是一种图形化编程语言 G 编写程序, 它能够灵活、方便、快速地完成工业测控软件设计, 提高程序开发效率。上位机采用 LabVIEW 编程实现振动信号的实时显示。测试台信号调理机截止频率为 1 000 Hz, 数据采集卡的采样频率为 4 096 Hz, 量化位数为 16 位。3 个压电式加速度传感器分别测量风机 X, Y, Z 3 个方向的振动瞬时加速度, 上位机将加速度与速度转换后, 实时地显示 3 路振动速度信号  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ 。3 路振动速度信号显示面板如图 2 所示。

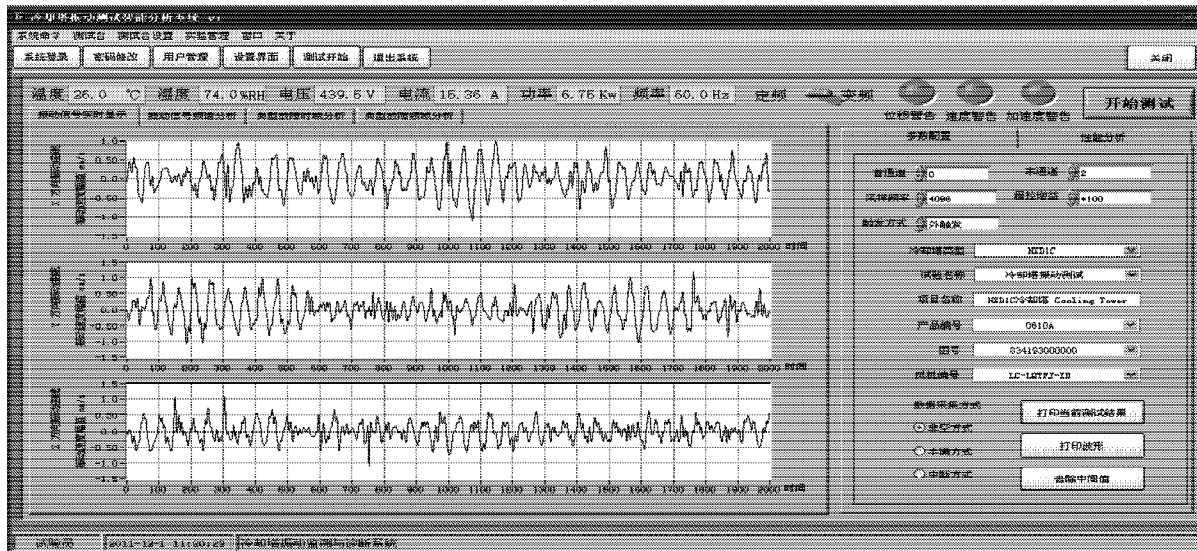


图2 3路振动速度信号显示

Fig. 2 The display of three channels of vibration velocity signals

## 1.2 EMD 分解原理及其实现

### 1.2.1 EMD 分解步骤

EMD 分解理论是由 Norden E Huang 等人于 1998 年提出来的, 应用于非线性非平稳信号分析, 通过把一个时间序列的信号经过 EMD 分解为一组 IMF 分

量, 然后再把某些 IMF 分量进行组合, 可以构成高通、低通、带通等滤波器, 该方法对信号分析取得了较好的效果。通过 EMD 分解得到的 IMF 分量需满足 2 个条件: 1) 信号分解所得到的局部极值点和零点必交替出现, 且它们的数目要求相等或者最多相

差一个; 2) 在任何时间点, 由局部极大值和极小值确定的上下包络线均值为零。EMD 分解算法可按下面 3 个步骤实现:

1) 求包络线均值。先得到信号  $x(t)$  的所有极大值和极小值, 并将其用三次样条函数分别拟合成曲线  $e_{\max}(t)$  和  $e_{\min}(t)$ ; 再计算极大值与极小值的包络线均值  $m_1$ , 即

$$m_1(t) = \frac{e_{\max}(t) + e_{\min}(t)}{2} \quad (1)$$

2) 求 IMF 分量。计算信号  $x(t)$  与包络线均值  $m_1$  的差值, 并记为  $h_1$ 。如果  $h_1$  不满足 IMF 分量的 2 个条件, 则将  $h_1$  替换信号  $x(t)$ , 并跳至步骤 1); 如果  $h_1$  满足 IMF 分量的 2 个条件, 则将其作为  $x(t)$  的第一个 IMF 分量, 记为  $c_1$ , 它表示信号数据序列中的最高频成分。

3) 收敛差值。求出  $x(t)$  与  $c_1$  的差值  $r_1$ , 即得到一个去掉高频信号的新数据序列  $r_1$ , 判断  $r_1$  是否满足单调函数特性不可分解。如果不满足条件, 跳至步骤 1), 对信号  $r_1$  继续进行分解, 得到第二个 IMF 分量  $c_2$ , 如此重复直到数据序列  $r_n$  满足单调函数特性不可分解为止, 上述过程可表示为

$$r_1 = x(t) - c_1, r_2 = r_1 - c_2, \dots, r_n = r_{n-1} - c_n。$$

原始数据序列  $x(t)$  可表示为本征模函数分量和一个余项的和, 即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t), \quad (2)$$

式中:  $c_i(t)$  为特性模式;  $r(t)$  为残余分量。

### 1.2.2 EMD 滤波理论

利用传统滤波器 FFT 设定固定截止频处理线性平稳信号, 可以得到很好的滤波效果, 但是非线性非平稳信号的频率具有时变性, 利用传统方法处理该信号时, 信号会出现畸变。P. Flandrin 等人<sup>[8]</sup>在 2003 年提出了一种基于 EMD 分解构造滤波器组的思想, 定义了一种自适应滤波器截止 IMF 阶  $j, k$  和时空滤波器组 (time-space filter banks, TFB)<sup>[9]</sup>, 其公式为

$$x(t) = \sum_{i=j}^k c_i(t), \quad (3)$$

式中:  $x(t)$  为滤波器组输出信号;  $j, k \in [1, n]$ 。

对于经过 EMD 分解后的 IMF 分量, 滤除前面几个分量即  $j > 1, k = n$  时, TFB 是低通滤波器; 滤除后面几个分量即  $j = 1, k < n$  时, TFB 是高通滤波器; 滤除两端若干分量即  $1 < j \leq k < n$  时, TFB 是带通滤波器; 滤除中间若干分量即  $1 < j < k < n$  时, 表达式为

$$x(t) = \sum_{i=1}^j c_i(t) + \sum_{i=k}^n c_i(t), \quad (4)$$

TFB 是带阻滤波器。利用 EMD 进行滤波能够保留信号的非线性和非平稳性, 还可以解决传统滤波器处理非平稳信号的可变频率点时信号畸变和衰减问题。

### 1.2.3 EMD 理论在 LabVIEW 中的实现

根据 EMD 算法流程, 在 LabVIEW 软件中编程实现 EMD 分解算法, 该程序框图如图 3 所示。

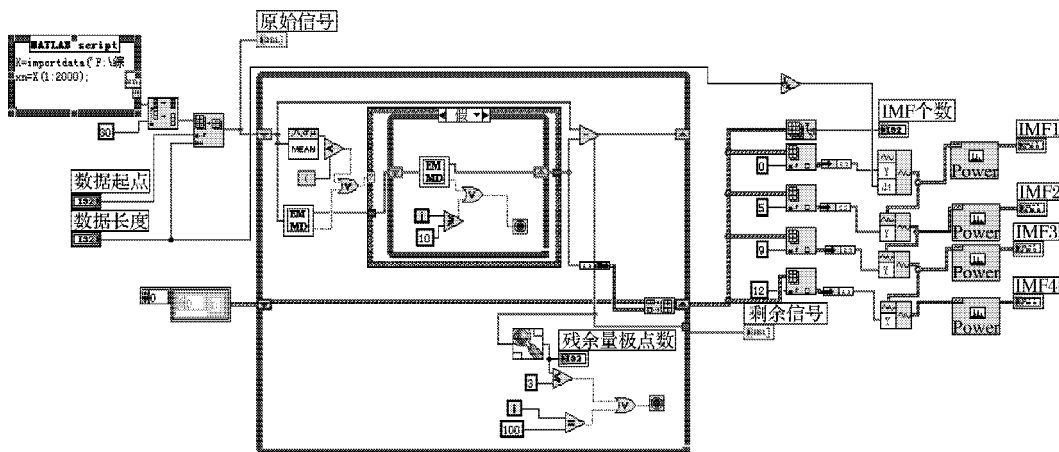


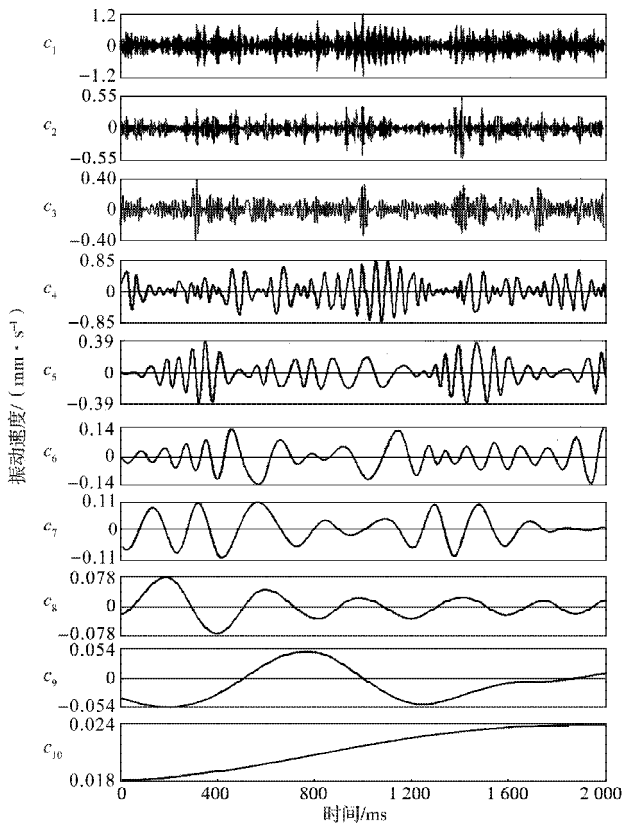
图 3 程序框图

Fig. 3 The program diagram

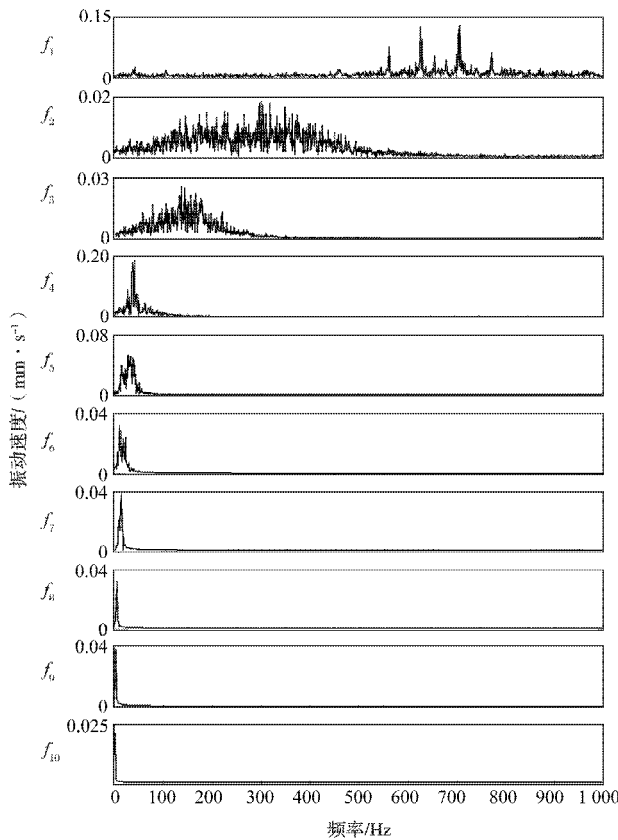
### 1.3 EMD 分解振动信号

以测试平台采集的冷却塔振动速度信号  $x$  为例, 利用 EMD 对其进行分解。假定 EMD 分解得到 10 个 IMF 分量即  $c_1 \sim c_{10}$ , 10 个 IMF 分量满足单调函数特性, 符合 EMD 分解规律, 其频率依次降低,  $c_1$  是最高频率分量,  $c_{10}$  是最低频率分量。利用上位机软件得到

10 个 IMF 分量相应的 10 个频域分量  $f_1 \sim f_{10}$ , 频域分量的频率也是依次降低。将振动速度  $x$  经 EMD 分解得到的 10 个 IMF 分量从时频特性进行了分析, 如图 4 所示。同样利用 EMD 分解冷却塔振动速度信号  $y, z$ , 得到它们相应的 IMF 分量, 并根据 IMF 分量的特点对信号  $y, z$  分别进行滤波, 本文就不一一详叙。



a) 时域图



b) 频域图

图4 10个IMF分量时频图

Fig. 4 The time-frequency diagram for 10 IMF components

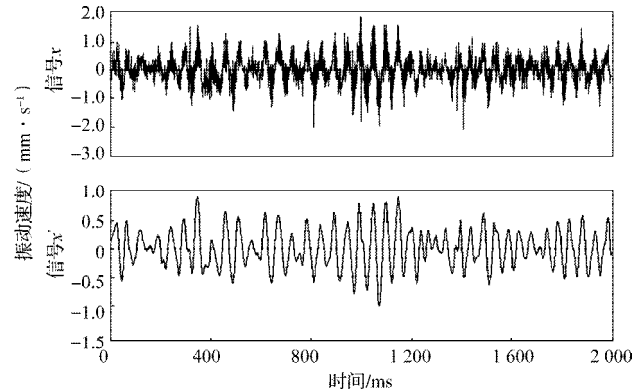
由图4可知,  $f_2, f_3, f_8, f_9, f_{10}$  频域分量的幅值非常小, 可以将其滤除, 保留  $f_1, f_4, f_5, f_6, f_7$  频域分量。根据冷却塔振动速度  $x$  的特点, 高频分量  $f_1$  是由变频器的谐波干扰造成的, 因此本文将其滤除, 最后保留  $f_4, f_5, f_6, f_7$  频域分量, 即对应的时域分量是  $c_4, c_5, c_6, c_7$ , 将这个4分量进行重构得到信号  $x'$ , 即

$$x'(t) = \sum_{i=4}^7 c_i \circ \quad (5)$$

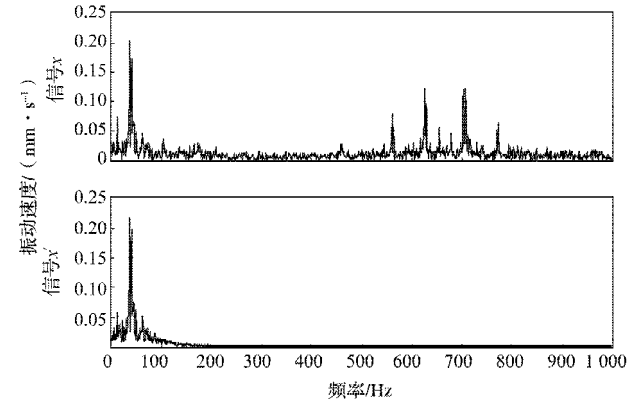
## 2 时频分析

### 2.1 原振动信号及其重构信号比较

将原信号  $x$  与重构信号  $x'$  从时域和频域2个方面进行比较, 如图5所示。



a) 时域比较图



b) 频域比较图

图5 振动速度信号  $x$  与  $x'$  时频比较图

Fig. 5 The time-frequency comparison chart of vibration speed signal  $x$  and  $x'$

由图5可知, 原信号存在一些尖刺即噪声污染, 而重构信号消除了噪声, 该信号的时域波形比原信号平滑。

### 2.2 EMD与Butterworth滤波器比较

本文用LabVIEW软件编程实现了Butterworth滤波器<sup>[3]</sup>, 并用该滤波器对信号  $x$  进行滤波, 得到信号  $x^*$ , 将信号  $x$  经过EMD滤波得到信号  $x'$ , 将它们进行比

较。设置 Butterworth 滤波器的低通截止频率为 45 Hz, 采样频率为 2 000 Hz, 2 个算法的时频特性实验结果对比如图 6 所示。

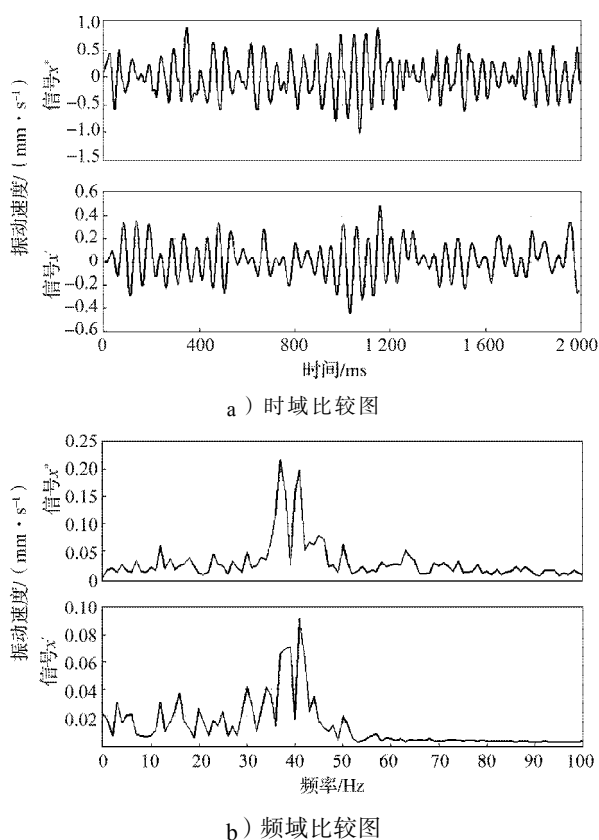


图 6 EMD 滤波与 Butterworth 滤波时频比较图

Fig. 6 The time-frequency comparison chart of EMD and Butterworth filter

由图 6 实验对比结果可知, 在处理非平稳振动信号时, Butterworth 滤波器对信号  $x$  有衰减和畸变, 而 EMD 重构滤波更能真实地还原振动信号  $x$ 。

### 3 结语

根据动力机车用冷却塔的振动特点, 提出了振动测试平台设计方案, 并用 LabVIEW 编程实现了该测试平台, 利用 EMD 分解算法对振动信号进行重构和对其进行时频分析, 实验结果表明了 EMD 滤波器处理非平稳振动信号有较好效果, 比 Butterworth 滤波器更优越, 且能更精确地判断冷却塔振动速度的实时值, 有利于提高冷却塔的质量。

#### 参考文献:

[1] 周福超, 汪志勇, 居滋培. 基于 LabVIEW 的虚拟频谱分

析仪[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(增刊3): 741-743.  
Zhou Fuchao, Wang Zhiyong, Ju Zipei. The Virtual Spectrum Analysis Instrument Based on LabVIEW[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(S3): 741-743.

- [2] Mastorakis N E, Swamy M N S. Spectral Transformations for Two-Dimensional Filters via FFT[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(6): 827-831.
- [3] Tae Hyun Yoon, Eon Kyeong Joo. Butterworth Window for Power Spectral Density Estimation[J]. ETRI Journal, 2009, 31(3): 292-297.
- [4] 向玲, 唐贵基, 胡爱军. 旋转机械非平稳振动信号的时频分析比较[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 42-45.  
Xiang Ling, Tang Guiji, Hu Aijun. Vibration Signal's Time-Frequency Analysis and Comparison for a Rotating Machinery[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 42-45.
- [5] 胡劲松, 杨世锡, 吴昭同, 等. 基于经验模态分解的旋转机械振动信号滤波技术研究[J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(2): 96-98.  
Hu Jingsong, Yang Shixi, Wu Zhaotong, et al. The Study of EMD-Based Filtering Technique for Vibration Signals in Rotating Machinery[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2003, 23(2): 96-98.
- [6] Cheng Junsheng, Yu Dejie, Yang Yu. A Fault Diagnosis Approach for Roller Bearings Based on EMD Method and AR Model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 350-362.
- [7] Wu Zhaohua, Huang Norden E. A Study of the Characteristics of White Noise Using the Empirical Mode Decomposition Method[J]. The Royal Society, 2004, 460(2046): 1597-1611.
- [8] Flandrin P, Rilling G, Goncalves P. Empirical Mode Decomposition As a Filter Bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 112-114.
- [9] 谭善文, 秦树人, 汤宝平. Hilbert-Huang 变换的滤波特性及其应用[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2004, 27(2): 9-12.  
Tan Shanwen, Qin Shuren, Tang Baoping. The Filtering Character of Hilbert-Huang Transform and Its Application [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(2): 9-12.

(责任编辑: 邓 彬)