

# 基于 EMD 和 Hilbert 解调的齿轮箱故障诊断\*

刘祖菁, 贾民平\*, 许飞云

(东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:**针对复杂的齿轮箱振动信号难以提取出故障特征频率的问题,提出了一种将希尔伯特包络解调技术与经验模式分解(EMD)相结合的分析方法。首先对齿轮箱的故障信号进行了 EMD 分解,得到了本征模态函数(IMF 分量),再对 IMF 分量进行了包络解调,得到了其调制信号,结合调制信号的频率成分可初步判断出齿轮箱中出现故障的齿轮;然后根据 IMF 分量与初始信号之间相关系数的大小,选择相关系数较大的分量重构信号,相当于对初始信号进行滤波;最后对重构的信号以啮合频率及其倍频为中心频率进行了带通滤波,对得到的信号进行了包络解调分析,再次进行了故障诊断,以验证故障诊断的准确性。整个过程通过对齿轮箱实测故障信号的分析加以验证。研究结果表明,该方法能够准确地提取出齿轮箱的故障特征频率,从而可以对齿轮箱故障进行有效地诊断。

**关键词:**齿轮箱;经验模式分解;希尔伯特解调;故障诊断

中图分类号:TH17;TP206

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)11-1297-05

## Gearbox fault detection based on EMD and Hilbert demodulation

LIU Zu-jing, JIA Min-ping, XU Fei-yun

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem that the complex fault signal of gearbox is difficult to detect, a fault diagnosis method based on empirical mode decomposition(EMD) and Hilbert demodulation was presented. Firstly, the EMD was used to decompose the original complex signal to obtain the intrinsic mode functions(IMFs). Secondly, the Hilbert demodulation technique was applied to the selected IMFs to extract the modulated signal. Then, the gearbox faults can be diagnosed by the frequency of the extracted signal. Thirdly, with setting the meshing frequency as the center frequency, a band pass filter was used to filter the signal which was reconstructed by some selected IMFs based on the cross correlation coefficient. And then, the Hilbert demodulation was used again to extract the modulating signal to verify the diagnosed result. The results of applying to a real inspected signal indicate that this method is effective in gearbox fault detection.

**Key words:** gearbox; empirical mode decomposition(EMD); Hilbert demodulation; fault diagnosis

## 0 引 言

齿轮及齿轮箱是机械设备中最为重要的传递动力的零部件之一,在各个工业设备中有着广泛的应用,因此研究齿轮箱故障诊断,对于降低设备维修费用、防止突发性事故的发生有很大的意义。

齿轮箱故障<sup>[1]</sup>信号的一个重要特征就是在信号

的频谱中存在幅值调制及频率调制现象。包络分析方法<sup>[2]</sup>可以用于从故障信号中解调<sup>[3]</sup>出调制信号,因此得到了广泛的应用。王聪<sup>[4]</sup>提出的基于 Hilbert 解调及倒谱的齿轮箱点蚀故障诊断研究方法适用于噪声干扰较小的信号,对于包含较多噪声干扰的信号处理分析不适用;吴亚辉等<sup>[5-6]</sup>提出的基于小波包与希尔伯特小波特解调谱方法是基于小波的分析法,基函数的选取

收稿日期:2013-07-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075070,51175079)

作者简介:刘祖菁(1989-),男,江西吉安人,主要从事信号检测与处理、机械故障诊断方面的研究。E-mail:njliuwinner@163.com

通信联系人:贾民平,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:mpjia@seu.edu.cn

比较困难,而且小波分析不具有自适应性;基于 EMD 和快速傅里叶变换(FFT)的齿轮箱故障诊断<sup>[7-9]</sup>能分析出一些简单的信号的特征,但无法对调制信号的全部故障特征进行分析。

本研究提出一种将希尔伯特包络解调技术与经验模式分解相结合的方法;该方法先经过 EMD 将复杂信号分解为几个频率段信号,分别对 IMF 分量作包络解调,再对信号进行重构,对齿轮信号进行带通滤波,对边频进行分析,最后对齿轮箱故障做出诊断。

## 1 EMD 分解原理

EMD 基于信号的局部特征时间尺度,能将一个非平稳、非线性信号中不同尺度的波动或趋势逐级分解出来,产生一系列具有不同特征尺度的 IMF 分量,其中任何一个 IMF 分量都满足以下两个条件:

(1) 每个分量的极值点的个数和零交叉点的个数必须相等或相差最多不能超过一个;

(2) 在任何一点,其局部极大值点形成的包络线和局部极小值点形成的包络线的平均值为零。

EMD 算法分解步骤:

(1) 找出原始信号的所有极大值点和极小值点,并用三次样条函数将极大值点连接起来形成上包络线,将所有极小值点连接起来形成下包络线;

(2) 计算上下包络线的均值,记为  $\mu_1(t)$ 。并将原始数据序列  $x(t)$  减去均值可得到一个去掉低频成分的新数据序列  $y_1(t)$ ,即:

$$y_1(t) = x(t) - \mu_1(t) \quad (1)$$

(3) 判断  $y_1(t)$  是否满足 IMF 条件,若不满足,则将  $y_1(t)$  作为原始数据,重复步骤(1)、(2),直到  $y_1(t)$  满足 IMF 的两个条件,此时,记  $y_1(t) = c_1(t)$ 。则  $c_1(t)$  为信号  $x(t)$  的第一个 IMF 分量,它代表信号  $x(t)$  中最高频率的分量;

(4) 将  $x(t)$  与第一个 IMF 分量相减,得到不含最高频率成分的剩余信号<sup>[10-11]</sup>:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (2)$$

(5) 将  $r_1(t)$  作为原始信号,重复上述步骤,依次得到不同的分量,即:

$$\begin{cases} r_1 - c_2 = r_2 \\ \vdots \\ r_{n-1} - c_n = r_n \end{cases} \quad (3)$$

当  $r_n$  成为一个单调函数,不能再从中提取满足 IMF 条件的分量时,循环结束。这样就得到:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n \quad (4)$$

因此,EMD 算法可以把任何一个信号  $x(t)$  分解为  $n$  个 IMF 分量和一个残余分量  $r_n$ ;其中,分量  $c_1, c_2, \dots, c_n$  分别包含了原始信号从高到低不同频率段的成分,  $r_n$  则表示了信号的中心趋势。这就表明:EMD 分解相当于一个带通滤波器<sup>[12]</sup>,可以将一个复杂的信号逐步滤波,得到各个频段的信号分量,再根据需要的频段选取 IMF 分量进行信号的重构。

由于插值误差、边界效应以及过分分解等原因,在 EMD 分解中会出现伪分量,即与原信号无关的信号分量,需要剔除。林丽等<sup>[13]</sup>提出了一种基于互相关的伪分量判定方法,通过 IMF 与原信号的相关系数来判定 IMF 分量的真伪。定义分解出的 IMF 分量与原信号的相关系数为:

$$\rho_{s,c_j} = \bar{R}_{s,c_j}(\tau) / \bar{R}_s(\tau) \quad (5)$$

式中:  $\bar{R}_{s,c_j}(\tau)$ —IMF 分量与原信号的互相关系数的平均值,  $\bar{R}_s(\tau)$ —原始信号的自相关系数的平均值。

相关系数  $\rho_{s,c_j}$  的值越大则表示该分量与原始信号之间的相关性越大,反之则越小。

## 2 Hilbert 变换和解调原理

希尔伯特变换是一种将时域的实数项映射为另一个的时域卷积。当已知一个时域信号  $x(t)$  时,其希尔伯特变换为:

$$H[x(t)] = x(t) \times \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6)$$

式中:  $t$ —时间,  $H[x(t)]$ — $x(t)$  的希尔伯特变换。

构造时域复数形式的解析信号:  $z(t) = x(t) + jH[x(t)] = a_m(t)e^{j\phi(t)}$ ,幅值和相位调制函数  $a_m(t)$  和  $\phi(t)$  可通过希尔伯特变换分别提取:

$$a_m(t) = \sqrt{x^2(t) + H^2[x(t)]} \quad (7)$$

$$\phi(t) = \arctan \frac{H[x(t)]}{x(t)} \quad (8)$$

通过对  $\phi(t)$  求导,即可得到信号的频率调制信号,对  $x(t)$  的包络  $a_m(t)$  进行 FFT 变换,就可得到原信号的幅值调制频率成分。

## 3 齿轮箱振动信号 Hilbert 幅值解调

当齿轮箱中齿轮发生故障时,其振动信号一般都会存在频率调制现象,频谱中体现在啮合频率的边频带中。

当齿轮箱只有一对齿轮啮合的时候,齿轮啮合振动的载波信号为:

$$x_m(t) = A \sin(2\pi f_m t + \phi) \quad (9)$$

式中:  $f_m$ —齿轮的啮合频率。

齿轮轴旋转的调制信号为:

$$A(t) = 1 + m\cos(2\pi f_r t) \quad (10)$$

式中: $f_r$ —故障齿轮所在轴的转频。

齿轮箱上的振动信号为:

$$x(t) = A_m[1 + m\cos(2\pi f_r t)] \sin(2\pi f_m t + \phi) \quad (11)$$

式中: $f_m$ —啮合频率,载波成分; $f_r$ —轴的转频,调制波成分。

对信号  $x(t)$  做 Hilbert 变换,就是要把调制信号  $A_m[1 + m\cos(2\pi f_r t)]$  从中分解出来。

而在实际工程中,齿轮箱振动信号一般情况下都含有多种干扰成分,这就使得其故障特征的提取变得比较困难。于是提出“先由 EMD 方法提取 IMF 分量,然后再对 IMF 分量进行处理”的齿轮箱故障诊断方法,步骤如下:

- (1) 利用 EMD 分解将原始信号进行分解,得到各个 IMF 分量;
- (2) 计算各个 IMF 分量与原始信号之间的相关系数;
- (3) 根据相关系数大小,对有效的 IMF 分量作 Hilbert 包络解调,分析调制信号频率;
- (4) 根据相关系数选取 IMF 分量对信号进行重构,以达到对原始信号降噪的目的;
- (5) 对重构信号以啮合频率及其倍频为中心频率滤波,对滤出的波形进行希尔伯特包络解调,分析边频带成分,判断故障齿轮所在的位置。

### 4 实例分析

实验的齿轮箱故障数据采集是由本实验室研制的 MFD310 信号采集系统上完成的。

齿轮箱试验台振动数据单位为:  $\text{mm/s}^2$ , 采样点数  $N=4\ 096$  点, 采样频率  $f_s=3\ 838.77\ \text{Hz}$ 。齿轮箱中只有一对齿轮啮合, 齿轮啮合频率为  $f_z=307\ \text{Hz}$ , 转轴 I 的频率为  $f_1=10\ \text{Hz}$ , 转轴 II 的频率为  $f_2=7\ \text{Hz}$ 。

实验使用的是齿轮发生非均匀磨损时采集到的数据, 其时域和频谱如图 1 所示。

从上述的频谱图中可以明显看到: 啮合频率 308 Hz、二阶啮合频率 616 Hz 和三阶啮合频率 924 Hz, 且其二阶啮合频率处的幅值增幅最大, 因此可以判断, 齿轮上肯定发生了故障。另外, 频谱中可以明显看到啮合频率及其倍频的两边存在边频带, 说明信号中肯定存在调制信号, 分析齿轮箱故障正是从这些调制信号入手。但从图 1 所示的频谱无法判断具体是那个齿轮发生了故障, 因此需要在此基础上再对信号做进一步的深入分析。

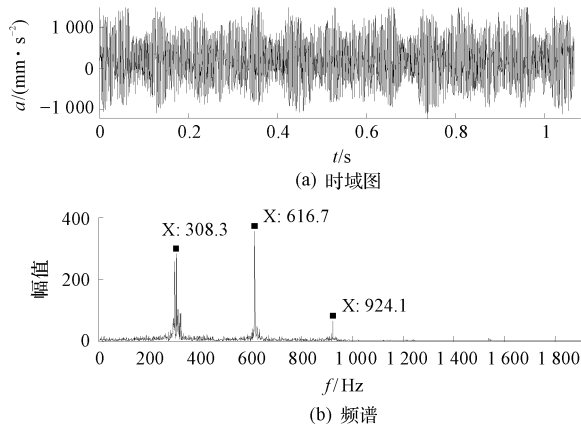


图 1 时域图和频谱

本研究对所采集到的原始信号进行 EMD 分解, 得到 10 个 IMF 分量, 即 IMF1 ~ IMF10, 时域图如图 2 所示。

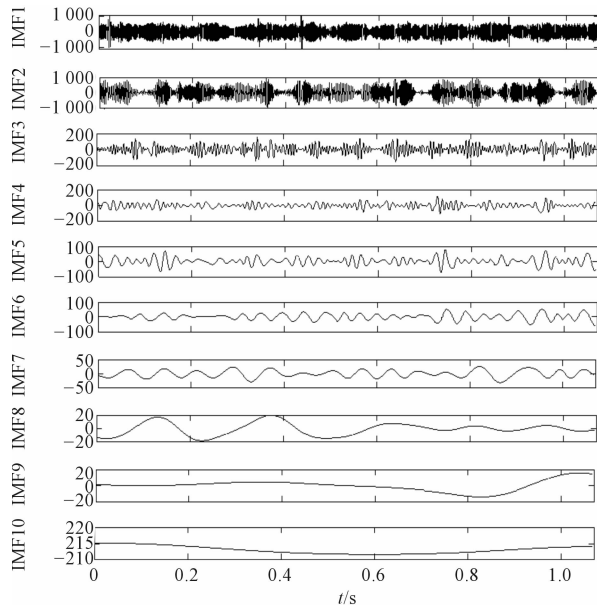


图 2 IMF1 ~ 10 时域图

从图 2 中可看出: 分量 IMF1 ~ IMF9 变得越来越稀疏, 即频率越来越小, 这说明通过 EMD 分解很好地实现了对原始信号的分解; 并且从 IMF2、IMF3 图中还可看出这两个分量有明显的调制现象, 而分析齿轮箱故障正是要解调出这些调制信号, 基于这一点, 就可以对 IMF 分量进行解调, 分析其调制信号成分来进行齿轮箱故障诊断。

根据式(5)计算每个 IMF 分量与原始信号之间的相关系数, 计算结果如表 1 所示。

表 1 各阶 IMF 分量与原信号之间的相关系数

| IMF1    | IMF2    | IMF3    | IMF4    | IMF5    |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.405 7 | 0.575 7 | 0.020 5 | 0.013 6 | 0.004 4 |
| IMF6    | IMF7    | IMF8    | IMF9    | IMF10   |
| 0.006 5 | 0.005 3 | 0.000 7 | 0.002 2 | 0.667 4 |

由各个 IMF 分量与原信号的相关系数大小可看出:IMF1、IMF2 和残余分量 IMF10 相对其他分量与原信号之间的相关系数较大,说明这些分量是原信号分出的含有有效成分较多的分量,应该着重对这些分量进行分析。于是,对 IMF1、IMF2、IMF3 作希尔伯特变换,并进行包络解调,得到的包络谱如图 3 所示。

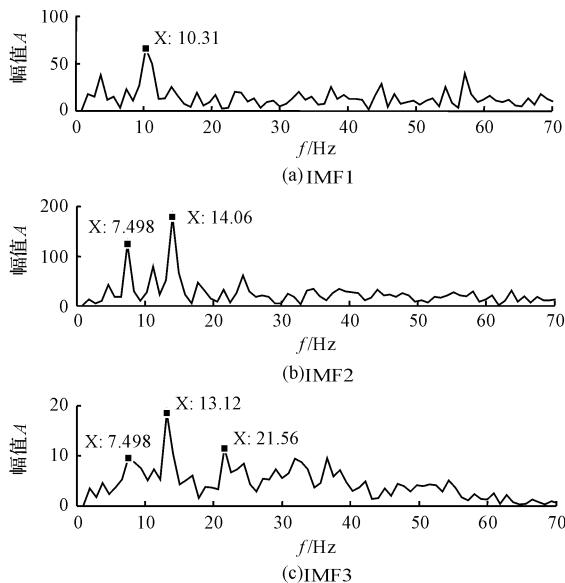


图 3 IMF1 ~ IMF3 包络谱

从图 3 中可以看出:在 3 个主要的 IMF 分量经过 Hilbert 包络解调之后,得到的调制频率近似为 7 Hz 以

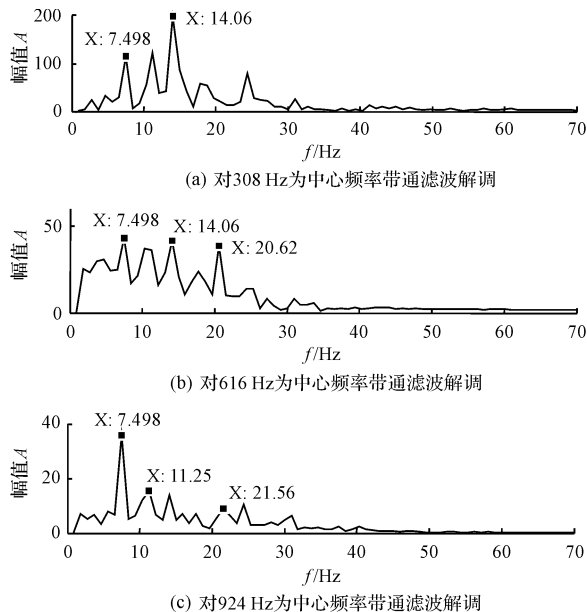


图 4 啮合频率及其倍频的边频解调

及其 2 倍频 14 Hz、3 倍频 21 Hz 和 10 Hz;而轴 I 和转轴 II 的转频分别是 10 Hz 和 7 Hz。为了排除 10 Hz 即转轴 I 的转频的干扰,笔者对同一套实验装置下采集到的正常信号进行包络分析,也得到了 10 Hz 的调制频率,这说明 10 Hz 的特征频率可能是由于在齿轮箱安装过程中的误差引起的,因此,说明齿轮箱故障是出现在轴 II 上的齿轮上。

为了进一步验证上面由 IMF 分量包络解调分析得出的结论,本研究根据相关系数选取 IMF,对信号进行重构,再对啮合频率的边频进行分析。

由表 1 可知,IMF1、IMF2、IMF3 分量和原信号之间的相关系数较大,故笔者选取 IMF1、IMF2、IMF3 分量及残余分量来重构信号,对重构信号进行带通滤波:分别以齿轮啮合频率 308 Hz 及其 2 倍频 616 Hz、3 倍频 924 Hz 为中心频率,带宽为 40 Hz 进行带通滤波,得到各个啮合频率及其边频。对各个滤出的信号再做 Hilbert 包络解调,得到的结果如图 4 所示。

由图 4 可看出,啮合频率及其倍频的边频仍然近似为 7 Hz 及其倍频 14 Hz、21 Hz 和 10 Hz,频率 7 Hz 和 10 Hz 也正是轴 II 和转轴 I 的转频,这也验证了由各个 IMF 分量包络解调所得到的结论:齿轮箱的故障出现在轴 II 的齿轮上。

## 5 结束语

(1) 本研究通过实例证明了 EMD 分解适用于非平稳的齿轮箱信号,能将采集到的复杂的非平稳的信号分解为几个 IMF 分量之和;

(2) 将希尔伯特包络解调技术应用于各 IMF 分量中,提取出调制信号的频率,通过实例分析验证了,将该方法用来诊断齿轮箱故障是可行的;

(3) 根据相关系数大小选取有效的 IMF 分量对信号进行重构,这样可以去除原信号中一部分噪声信号,然后对重构信号中啮合频率及其倍频进行带通滤波,再做包络解调,结果再一次验证了齿轮箱故障诊断的正确性。

综上,本研究提出的方法用于齿轮箱故障诊断是有效的,但对于多对齿轮啮合的齿轮箱故障诊断还未作验证,可能需要进一步深入分析。

(下转第 1322 页)

### 本文引用格式:

刘祖菁,贾民平,许飞云. 基于 EMD 和 Hilbert 解调的齿轮箱故障诊断[J]. 机电工程,2013,30(11):1297-1300,1322.

LIU Zu-jing, JIA Min-ping, XU Fei-yun. Gearbox fault detection based on EMD and Hilbert demodulation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013,30(11):1297-1300,1322.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

面新型双轴颚式破碎机要明显地优于单轴颚式破碎机:①行程特征值从上到下依次减小,保证了破碎机破碎时排料通畅,物料无堵塞,无过粉碎,颚板磨损较小;②最小传动角大,传力性能好,破碎效果好,效率高;③出料口水平方向速度、加速度方向有益时间较长,较大程度地发挥出破碎机的破碎能力。因此,在基于虚拟样机技术的运动仿真的基础上,后续研究将重点对双轴颚式破碎机的结构参数进行进一步地优化,为设计出高性能的破碎机提供理论依据。

**参考文献 (References) :**

[1] 罗红萍. 双腔颚式破碎机运动学特性研究[J]. 矿山机械, 2006,34(1) :30-31.  
 [2] 张维斌. 复摆颚式破碎机的运动学和动力学分析及结构优化[D]. 沈阳:东北大学机械工程及自动化学院,2010.  
 [3] REFAHI A, MOHANDESI J A, REZAI B. Discrete element modeling for predicting breakage behavior and fracture energy of a single particle in a jaw crusher[J]. **International Journal of Mineral Processing**,2010,94(1-2) :83-91.  
 [4] SAJIAN K S, SATISH C S, GAUTAM K. Modeling of Parti-

cle breakage in a smooth double roll crusher[J]. **Int. J. Miner Process**,2009,90(1-4) :97-100.

[5] 王 玉. 基于虚拟样机技术的颚式破碎机工作装置的运动分析[J]. 矿山机械,2010,38(11) :78-80.  
 [6] 占鹏飞,蔡改贫,姜志宏. 基于 ADAMS 的倒悬挂细碎颚式破碎机的运动仿真分析[J]. 矿山机械,2012,40(11) :45-47.  
 [7] 李亚伟,亲志钰,荣幸福,等. 基于 ADAMS 的复摆颚式破碎机动颚速度和加速度的分析[J]. 机械管理开发,2011(4) :141-142.  
 [8] 王 玉,富国亮,边志坚. 基于 ADAMS 的颚式破碎机工作装置的运动分析[J]. 煤矿机械,2010,31(6) :89-90.  
 [9] FANG N. Tool-chip friction in machining with a large negative rake angle tool[J]. **Wear**,2005,258(5-6) :890-897.  
 [10] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京:国防工业出版社,2007.  
 [11] 王兴宇,乔 欣. 基于 ADAMS 的冲床主机机构参数化分析研究[J]. 轻工机械,2012,30(6) :32-35.  
 [12] 王国强. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2002.

[编辑:张 翔]

(上接第 1300 页)

**参考文献 (References) :**

[1] 丁 康,李巍华,朱小勇. 齿轮及齿轮箱故障诊断实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005.  
 [2] 王延春,谢 明,丁 康. 包络分析方法及其在齿轮故障诊断中的应用[J]. 重庆大学学报,1995,18(1) :87-91.  
 [3] LU Yi, HU Xiao-feng, ZHENG Yong-jun. Instrument for Bearing Fault Diagnosis Based on Demodulated Resonance Technology[C]// Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, Hangzhou; [s. n. ], 2010:75445E1-75445E6.  
 [4] 王 聪. 基于 Hilbert 解调及倒谱的齿轮箱点蚀故障诊断研究[J]. 电力科学与工程,2011,27(3) :36-40.  
 [5] 吴亚辉,陈东海,冷军发. 基于小波包与 Hilbert 解调的矿用齿轮箱故障诊断[J]. 机械传动,2009,33(2) :61-64.  
 [6] 叶红仙,项文娟,刘仲宇,等. 基于小波包 ICA 的齿轮箱信号分离系统[J]. 机电工程,2008,25(4) :4-7.

[7] 贺文杰,陈汉新,鲁艳军,等. 基于 EMD 和 FFT 的齿轮箱故障诊断[J]. 武汉工程大学学报,2011,32(1) :65-70.  
 [8] FAN Xiao-feng, ZUO Ming. Gearbox fault detection using Hilbert and wavelet packet transform[J]. **Mechanical Systems & Signal Processing**,2006,20(4) :966-982.  
 [9] 程军圣,于德介,杨 宇,等. 基于 EMD 的齿轮故障识别研究[J]. 电子与信息学报,2004,2(5) :825-829.  
 [10] 尤丽萍,房 颖. 基于小波变换的多聚焦图像算法研究[J]. 机电技术,2011(3) :36-39.  
 [11] 徐英帅,王细洋,孙 伟. 基于小波变换的齿轮箱故障诊断[J]. 组合机床与自动化加工技术,2012(2) :66-67.  
 [12] BOUDRAA A O, CEXUS J C. EMD-based signal filtering [J]. **IEEE Transaction Instrumentation and Measurement**,2007,56(6) :2196-2202.  
 [13] 林 丽,余 轮. 基于相关系数的 EMD 改进算法[J]. 计算机数字工程,2008,12(36) :28-30.

[编辑:罗向阳]

**本文引用格式:**

张 宪,李文昊,赵章凤,等. 基于 ADAMS 的单、双轴颚式破碎机性能研究[J]. 机电工程,2013,30(11) :1317 - 1322.

ZHANG Xian, LI Wen-hao, ZHAO Zhang-feng, et al. Performance study of single and double shafts jaw crushers based on ADAMS[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013,30(11) :1317 - 1322.