基于改进 HHT 的一体化电液作动器故障诊断

刘 俊 王占林 付永领 韩 旭

（北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191） （北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191）

摘 要：介绍了机载变排量变转速一体化电动静液作动器(EHA-VPVM，Electro-Hydrostatic Actuator with Variable Pump displacement and Variable Motor speed)的系统结构，根据EHA-VPVM早期故障信号非平稳、时变等特点，采用一种新的时频分析方法希尔伯特黄变换(HHT，Hilbert-Huang Transform)进行信号分析. 针对HHT方法的模态混叠和虚假本征模态函数问题，提出两点改进：通过集合经验模式分解算法抑制模态混叠的发生；采用相关系数法保留真实本征模态函数. 对EHA-VPVM工程样机进行早期故障诊断实验，用Hilbert边际谱和HHT谱分析永磁无刷直流电机两种工作状态下的振动信号. 实验结果表明：改进HHT方法较好解决了HHT的模态混叠和虚假本征模态函数问题，能准确提取研究对象的早期故障特征，对EHA-VPVM早期故障具有良好的诊断效果.

关 键 词：双变量电动静液作动器；改进希尔伯特黄变换；集合经验模式分解；早期故障诊断

中图分类号：TP 206^{+}.3

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2013)01-0062-05

Fault diagnosis of EHA-VPVM based on improved HHT

Liu Jun Wang Zhanlin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Fu Yongling Han Xu

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The system composition of the electro-hydrostatic actuator with variable pump displacement and variable motor speed(EHA-VPVM) was introduced. According to early fault signal features of EHA-VPVM, a new time-frequency analysis method Hilbert-Huang transform(HHT) was used. Two improved methods were introduced to solve problems of HHT, these problems were mode confusion and false intrinsic mode functions (IMF). The ensemble empirical mode decomposition(EEMD) was used to solve the mode confusion, and the correlation coefficient method was used to identify the effective IMF. In the early fault diagnosis experiment of EHA-VPVM prototype, Hilbert marginal spectrum and HHT spectrum were used to analyze the vibration signals of the permanent magnet brushless DC motor in different work conditions. The experiment results show the improved HHT well solved the problems of mode confusion and false IMF, and extracted the early fault features of the rolling bearing accurately. Moreover, the improved HHT method has good effect on the early fault diagnosis of EHA-VPVM.

Key words: double variables electro-hydrostatic actuator; improved Hilbert-Huang transform; ensemble empirical mode decomposition; early fault diagnosis

收稿日期：2011-09-20；**网络出版时间**：2013-01-14 15:52

网络出版地址：www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130114.1552.006.html

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50675009)

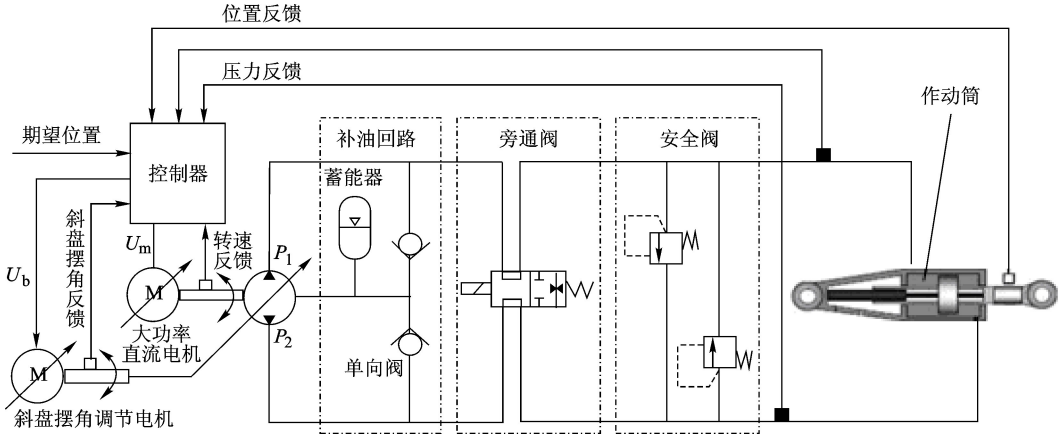
作者简介：刘 俊(1975-)，女，四川成都人，博士生，lj81701588@163.com.

全电/多电飞机是未来飞机的发展方向,实现全电/多电飞机的关键技术之一是采用功率电传作动器(PBWA, Power By Wire Actuator). PBWA 主要包括机电作动器(EMA, Electro-Mechanical Actuator)和电动静液作动器(EHA, Electro-Hydrostatic Actuator),本文的研究对象是变排量变转速一体化电动静液作动器(EHA-VPVM, Electro-Hydrostatic Actuator with Variable Pump displacement and Variable Motor speed). 作为一种操纵飞机舵面的执行机构,EHA-VPVM 性能优劣直接影响着飞机的整体性能,如机动性、安全性. 由于 EHA-VPVM 结构复杂、不易控制,与单变量电动静液作动器相比 EHA-VPVM 的可靠性较低. 因此,实现 EHA-VPVM 的故障诊断,尤其是早期故障检测,不仅能把握 EHA-VPVM 工作状态发展趋势,还能了解故障产生的根源,对改进 EHA-VPVM 设计和延长其使用寿命具有重要的意义.

与其他机电系统相似,EHA-VPVM 早期故障的特征信号比较微弱,信噪比低,多为瞬态非平稳信号,所以早期故障诊断的关键在于对微弱故障特征信号的有效提取及分析. 常用的方法有时域分析、频域分析、时频域联合分析法等,如短时 Fourier 变换、小波变换、Wigner-Ville 方法等. 由于它们的基本思想源于 Fourier 变换,存在 Fourier 变换的局限性,无法表述信号的时频局部性能,因而对非平稳的早期故障信号分析效果不理想. 针对上述时频分析方法的不足,出现了各种改进方法,其中基于 EMD(Empirical Mode Decomposition)的 HHT(Hilbert-Huang Transform)方法是近年来研究的热点. 尽管 HHT 相对于传统的时频分析方法有着明显的优势,但仍存在一些问题,如虚假本征模态函数(IMF, Intrinsic Mode Functions)、边缘效应、过分解和模态混叠. 本文针对 HHT 存在的虚假 IMF、模态混叠两个问题,用基于 EEMD(Ensemble Empirical Mode Eecomposition)分解和计算相关系数的方法改进 HHT,并将改进的 HHT 方法用于 EHA-VPVM 早期故障诊断研究.

1　EHA-VPVM 系统

EHA-VPVM 系统结构如图 1 所示,主要由双绕组永磁无刷直流电机、斜盘摆角调节电机、控制器、传感器、电动伺服变量柱塞泵以及液压系统组成. 泵的转速通过大功率双绕组直流无刷电机控制,泵的排量通过斜盘摆角调节电机进行调节. 作动筒活塞杆的位移、泵的转速和柱塞泵斜盘摆角通过传感器进行采集,在控制器中进行处理. 控制器根据传感器采集的信号以及期望的作动筒的位移,控制泵的排量和转速,从而控制泵的输出流量产生实际作动筒活塞杆的位移. 液压系统主要由补油回路、旁通阀、安全阀和对称缸组成,由蓄能器和单向阀组成的补油回路用于弥补系统泄漏;旁通阀用于在系统发生故障时,切断液压回路,使 EHA-VPVM 工作在阻尼旁通状态;溢流阀用来限制系统最高压力[1].



U_m—电机控制电压;U_b—斜盘摆角调节电机电压;P_1,P_2—双向泵的两个压力出口.

图 1　EHA-VPVM 结构图

2　改进的 HHT 方法

2.1　HHT 理论

文献[2]介绍了一种分析非线性、非平稳信号的 HHT,它由 EMD 和 Hilbert 谱构成.

HHT 是一种不需要任何先验知识的自适应时频分析方法,能将复杂的信号分解成有限数量的且有物理意义的 IMF,时频分辨率和时频聚焦性好,因而很适合非平稳、非线性信号分析.

EMD 方法可看成是一组自适应的带通滤波器,它的截止频率和带宽随信号的变化而变化. 任何信号 $x(t)$ 经 EMD 方法分解后,可得到有限个

IMF 和 1 个剩余分量,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n} c_i(t) + r_n(t) \tag{1}$$

其中,n 为所有 IMF 分量的个数;$c_i(t)$ 为 EMD 分解得到的 IMF 分量;$r_n(t)$ 为分解过程的剩余分量,反映信号 $x(t)$ 的平均趋势.

对由式(1)得到的每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换,得到瞬时频率和瞬时幅值,通过叠加获得信号的 Hilbert 谱. 信号 $x(t)$ 经 Hilbert 变换后可表示成

$$x(t) = \mathrm{Re}\sum_{i=1}^{n} a_i(t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_i(t)} = \mathrm{Re}\sum_{i=1}^{n} a_i(t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\int\omega_i(t)\mathrm{d}t} \tag{2}$$

$$\omega_i(t) = \frac{\mathrm{d}\phi_i(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

其中,$a_i(t)$,$\phi_i(t)$,$\omega_i(t)$ 分别为第 i 个 IMF 分量的瞬时幅值、相位和瞬时频率.

2.2 改进的 HHT

相对于传统的分析方法,HHT 变换对线性稳态信号和非线性、非稳态信号都有好的分析效果,但也存在需要改进之处,主要包括:①各个 IMF 分量并不是严格意义上的单模态分量,存在模态混叠现象,即单一的 IMF 中包含不同频率的多个信号,或是同一个频率信号被分解在不同的 IMF 中. 模态混叠是影响 EMD 使用的最大问题. ②信号经过 HHT 变换会产生一些虚假的 IMF 分量,尤其是低频的虚假分量. ③HHT 分解过程中的边缘效应现象. EMD 用三次样条曲线拟合信号的上下包络线,但在包络线的端点处无法拟合,产生了较大偏差. ④求解 IMF 分量时,EMD 使用三次样条插值拟合包络曲线,信号包络线在局部地方无法包住信号,出现“拟合过冲”现象,使得由 HHT 变换得到的瞬时频率不能很好表征原信号.

针对以上列出的①和②的不足提出如下改进方法:

1) 用 EEMD 算法代替 EMD 算法,解决模态混叠现象. EEMD 算法本质是对叠加了高斯白噪声的分析信号进行多次 EMD 分解,利用高斯白噪声频率均匀分布的统计特性使被分析信号在不同尺度上具有连续性,从而降低各 IMF 分量的模态混叠程度. 最后,通过多次分解的 IMF 总体平均使加入的高斯白噪声互相抵消,还原分析信号[3].

2) 计算相关系数,消除虚假的 IMF 分量. 由于 HHT 采用三次样条曲线对极值点形成的包络曲线进行拟合,通过 EMD 分解得到的所有 IMF 并不完全属于分析信号,产生了虚假 IMF 分量,影响了分析结果的正确性,因而需要识别和剔除虚假 IMF 分量. 分析信号与提取出的真实 IMF 分量在理论上满足正交性,具有较大的相关系数,而虚假 IMF 与分析信号的相关系数较小,所以可通过计算 IMF 分量与分析信号的相关系数,识别虚假 IMF 分量. 本文对相关系数设定阈值,只保留相关系数大于给定阈值的 IMF 分量.

设 EMD 分解产生的第 i 级 IMF 分量 $c_i(t)$ 与分析信号 $x(t)$ 的相关系数为 $\rho_i(\tau)$,用 $\rho_i(\tau)$ 表示 $c_i(t)$ 和 $x(t)$ 的相关程度,则

$$\rho_i(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} c_i(t)x(t-\tau)\,\mathrm{d}t}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} c_i^2(t)\,\mathrm{d}t \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t)\,\mathrm{d}t\right]^{1/2}} \tag{4}$$

设定一阈值 p,将 p 与每个 $\rho_i(\tau)$ 进行对比. 若 $\rho_i(\tau)>p$,则将该分量 $c_i(t)$ 保留;若 $\rho_i(\tau)<p$,则认为该分量 $c_i(t)$ 为虚假分量,将其去除. p 可通过如下方程进行构建:

$$p = (c_1 + c_2 + \cdots + c_i)/i + r \tag{5}$$

其中,r 根据所需 $c_i(t)$ 的程度进行取值,p 越大,得到的 $c_i(t)$ 越少,高频信号越明显.

3 EHA-VPVM 早期故障诊断

EHA-VPVM 是复杂的机电液一体化系统,故障征兆丰富,对 EHA-VPVM 进行状态检测和故障诊断,可利用的诊断信息很多,如振动、电机电流和变量泵油液温度等. 当系统发生机械故障时,会产生异常振动. 由于振动信号分析是提取 EHA-VPVM 机械故障特征的有效途径,能直接反应设备状态,因此,本文采用振动信号分析和改进的 HHT 对 EHA-VPVM 进行早期故障诊断.

运用改进的 HHT 对 EHA-VPVM 进行早期故障诊断的步骤[4]包括:

1) 按一定的采样频率对研究部件进行采样,对信号进行 EEMD 分解,得到消除频率混叠的 IMF.

2) 计算各 IMF 分量与分析信号 $x(t)$ 的相关系数 $\rho_i(\tau)$,将 $\rho_i(\tau)$ 与事先设定的阈值 p 进行比较,只保留 $\rho_i(\tau)$ 大于 p 的有效 IMF 分量,剔除分解中产生的虚假 IMF 分量.

3) 选取有效 IMF 分量进行 Hilbert 谱和 Hilbert 边际谱分析,得到信号能量随频率变化和信号能量在时间尺度上的分布规律,与正常状态下得到的 Hilbert 谱、Hilbert 边际谱或 Hilbert 能量谱

进行对比,判断 EHA-VPVM 是否发生故障.

4) 若系统发生故障,则从测试数据中提取故障特征频率,进行故障诊断. 若系统出现复合故障,可根据不同分量具有不同能量的特性,通过能量分析的方法对复合故障进行分解.

4　实验及分析

双绕组永磁无刷直流电机和斜盘摆角调节电机是 EHA-VPVM 的动力驱动装置,它们的无故障运行是 EHA-VPVM 正常工作的前提条件. 滚动轴承是这两种电机的重要支撑元件,容易发生故障,且滚动轴承内环滚道缺陷最难诊断. 所以,本文以 EHA-VPVM 永磁无刷直流电机所用的滚动轴承内环早期裂纹故障为例,验证改进 HHT 方法的有效性,其他通过振动信号分析 EHA-VPVM 机械类早期故障方法类似.

采用课题组研制的 EHA-VPVM 实验台进行 EHA-VPVM 早期故障诊断实验,实验对象为 EHA-VPVM 工程实验样机,实验样机所用双绕组永磁无刷直流电机的电气参数为 $P_n = 10\ \text{kW}$, $U_n = 200\ \text{V}$, $\omega_n = 8\,000\ \text{r/min}$,永磁无刷直流电机所用的滚动轴承型号为 SKF6203(轴承的尺寸内径是 $d = 17\ \text{mm}$,外径是 $D = 40\ \text{mm}$,滚动体为 8 个,接触角 $\alpha = 0$). 实验时的采样频率是 10 kHz,电机转速为 1 750 r/min,转频为 29.2 Hz. 按滚动轴承故障特征频率计算公式[5],计算得到以下故障特征频率:滚动体 $f_B = 42.3\ \text{Hz}$,内环 $f_I = 152\ \text{Hz}$,外环 $f_O = 81.7\ \text{Hz}$,保持架 $f_C = 10.2\ \text{Hz}$.

振动数据通过振动加速度传感器进行采集,并送到控制器中进行处理,振动加速度传感器固定在永磁无刷直流电机输出轴支撑滚动轴承上方的外壳上. 为进行对比分析,对 EHA-VPVM 进行了滚动轴承内环带轻微裂纹和正常两种状态实验.

用改进的 HHT 方法分析永磁无刷直流电机滚动轴承内环早期故障的过程[3,6]如下:

1) 对 $x(t)$ 进行 EEMD 分解,白噪声标准差取信号 $x(t)$ 标准差的 1/10,集总平均次数取为 100.

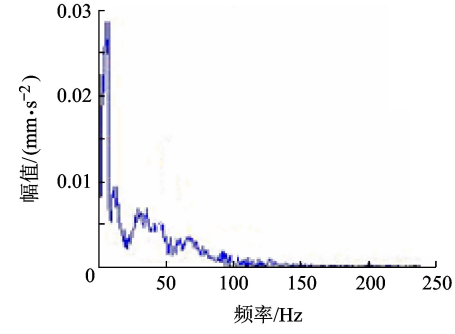
2) EEMD 分解得到 10 阶 IMF,各 IMF 与 $x(t)$ 的相关系数如表 1 所示.

将阈值设为 0.1,保留相关系数大于0.1的 $\text{IMF}_1 \sim \text{IMF}_4$, $\text{IMF}_5 \sim \text{IMF}_{10}$ 与 $x(t)$ 的相关系数较前几阶小很多,可以判定是虚假 IMF 分量. 所以在进行 HHT 谱和 Hilbert 边际谱分析时,只对 $\text{IMF}_1 \sim \text{IMF}_4$ 进行.

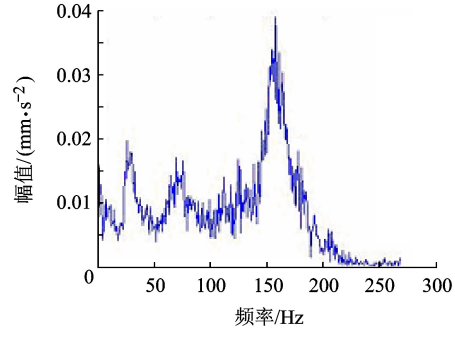
表 1　早期故障信号与各阶 IMF 的相关系数

IMF	IMF_1	IMF_2	IMF_3	IMF_4	IMF_5
相关系数	0.875	0.415	0.245	0.113	0.036
IMF	IMF_6	IMF_7	IMF_8	IMF_9	IMF_{10}
相关系数	0.027	0.005	0.006	0.004	0.001

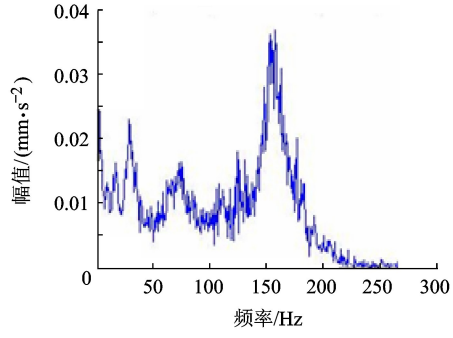
图 2a 是对正常滚动轴承测得信号的 Hilbert 谱分解,从中看不到故障频率成分,但可看到 30 Hz转频和 60 Hz 的倍频成分. 图 2b 是采用 EEMD算法对内环故障信号的 Hilbert 谱分解,可以清楚观察到 153 Hz 故障频率和 29 Hz 边频成分,与前面计算得到的滚动轴承内环故障频率较吻合,验证了本文提出的方法能有效地判断出滚动轴承的早期故障. 为体现 EEMD 对 EMD 的改进,对内环故障信号还采用了 EMD 算法进行分解,如图 2c 示,尽管 EMD 同样分解出了 152 Hz 内环故障频率、29 Hz 的边频成分,但信号分辨能力明显不如 EEMD.



a　正常状态(EEMD 分解)



b　内环故障(EEMD 分解)



c　内环故障(EMD 分解)

图 2　滚动轴承正常状态和内环故障 Hilbert 边际谱

通过图 2b 和图 2c 比较可以看出,EEMD 不但克服了 EMD 分解过程中出现的模式混叠问题,而且在边际谱图上 EEMD 相对于 EMD 更能突出故障特征,故障频率尖峰更明显.

对滚动轴承正常和发生内环早期故障的信号进行 EEMD 分解,选取相关系数大于 0.1 的 $IMF_1 \sim IMF_4$,并进行 HHT 谱分析,结果如图 3、图 4所示,其中 $c(t)$代表分解前的原始信号.

图 4 由 EEMD 分解得到的 IMF_1 明显看到了周期性的冲击波形,与图 3 滚动轴承正常时的 $c(t)$相比,说明系统发生了某种类型的故障. 从 HHT 谱可以看出,与正常状态下的低频成分相比,当滚动轴承发生故障时归一化频率中高频成分明显增加.

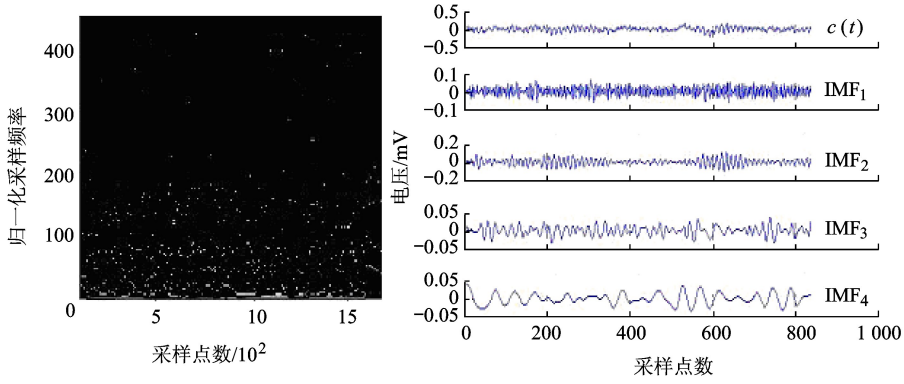


图 3 滚动轴承正常状态信号的 HHT 谱时频图及有效 IMF

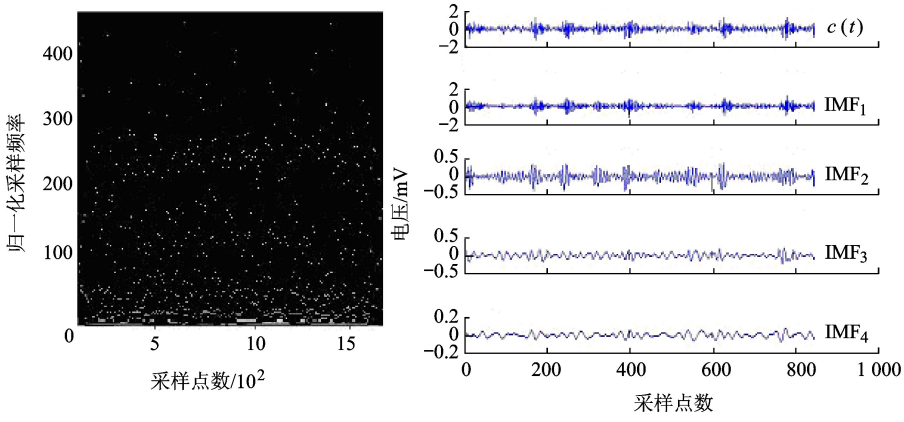


图 4 滚动轴承内环故障信号的 HHT 谱时频图及有效 IMF

5 结 论

针对 HHT 方法的不足,对其中两点做了改进,解决了虚假 IMF 分量和 EMD 算法的模态混叠现象. 通过 EHA-VPVM 工程样机滚动轴承早期故障诊断实验,用 Hilbert 边际谱和 HHT 谱进行分析,从永磁无刷直流电机振动信号中有效提取了滚动轴承内环的早期故障特征,准确反映出滚动轴承早期故障的实际状况. 实验结果表明改进的 HHT 方法对 EHA-VPVM 机械类早期故障诊断准确、有效.

参考文献(References)

[1] 张晔. 双变量一体化电动静液作动器控制系统研究[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,2010
Zhang Ye. Research on control system of dual-variable integrated electro-Hydrostatic actuator[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2010(in Chinese)

[2] 张华君. 基于 HHT 的机电系统的滚动轴承故障诊断[D]. 太原:太原理工大学机械工程学院,2006
Zhang Huajun. The fault diagnosis of rolling element bearings in electromechanical system based on HHT [D]. Taiyuan: College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, 2006(in Chinese)

[3] Wu Zhaohua, Norden Eh Huang. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis,2008,1(1):1-41

[4] Peng Z K, Peter W T, Chu F L. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis [J]. Journal of Sound and Vibration,2005,286:187-205

[5] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断[M]. 北京:机械工业出版社,1996:8-9
Mei Hongbin. Ball bearing vibration monitoring and diagnosis [M]. Beijing: China Machine Press,1996: 8-9(in Chinese)

[6] Lei Y G, He Z J, Zi Y Y. Application of the EEMD method to rotor fault diagnosis of rotating machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2009,23(4):1327-1338

(编 辑:赵海容)