

# 基于 EEMD 和 HT 的轴流泵压力脉动特征信息提取

刘 涛, 黄其柏 \*

(华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 压力脉动是影响轴流泵运行稳定性的重要因素, 为提取其压力脉动信号中的特征信息, 提出了采用基于聚合经验模式分解 (EEMD) 和 Hilbert 变换 (HT) 的时频分析方法对轴流泵压力脉动信号进行分析。首先分别应用 EEMD 和传统经验模式分解 (EMD) 对含噪声信号进行了分析, 证明了 EEMD 分解能抑制传统 EMD 中出现的模式混叠现象, 从而有效提取了信号中的各频率分量; 然后采用基于 EEMD 和 Hilbert 变换的时频分析方法, 对某轴流泵的压力脉动信号进行了分析。研究表明, 该方法能够准确地提取轴流泵压力脉动信号中的频率成分及其时变情况。

**关键词:** 轴流泵; Hilbert 变换; 压力脉动; 经验模式分解; 模式混叠; 聚合经验模式分解

中图分类号: TH312; TH73; TM933.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)03-0278-04

## Characteristic information extraction of pressure pulsation signal in axis-flow pump based on EEMD and HT

LIU Tao, HUANG Qi-bai

(State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to extract the characteristic information of pressure pulsation signal, a time-frequency analysis method based on ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and Hilbert transform (HT) was presented. By comparing the decomposition results of original empirical mode decomposition (EMD) and EEMD, it was proved that the EEMD can avoid the drawback of mode mixing which appears in original EMD method. EEMD and Hilbert transform were applied to extract the time-frequency characteristics of pressure pulsation signal in an axis-flow pump. The decomposition results show that the EEMD method can accurately identify the frequency components and the time variation of pressure pulsation signal.

**Key words:** a xis-flow pump; Hilbert transform; pressure pulsations; empirical mode decomposition (EMD); mode mixing; ensemble empirical mode decomposition (EEMD)

## 0 引 言

流场压力脉动是影响大型轴流泵运行稳定性的关键因素, 一般是由于水力不平衡、转动叶片与静止导叶间的动静干扰、局部空化及二次流等原因引起, 其最大危害是使机组的结构振动加剧, 同时还可引发进一步的局部空化, 甚至在某些情况下引起共振, 因此对压力

脉动信号进行监测并提取蕴藏在其中的特征信息有着重要意义, 许多学者对此进行了相关研究<sup>[1-3]</sup>。

希尔伯特黄变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 是一种全新的信号时频分析方法, 该方法首先对信号进行经验模式分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD)<sup>[4]</sup>, 将信号分解为若干个固有模式函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 分量, 然后对每个 IMF 分量进行

收稿日期: 2011-09-26

作者简介: 刘 涛 (1986-), 男, 湖北武汉人, 主要从事振动噪声控制及诊断、流体机械方面的研究。E-mail: liutao\_hust@hotmail.com

通信联系人: 黄其柏, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: qbhuang@mail.hust.edu.cn

Hilbert 变换(Hilbert Transform, HT)得到瞬时频率,求得 Hilbert 谱<sup>[5]</sup>,从而将信号精确表示成幅值—频率—时间的分布。HHT 将 EMD 分解得到的 IMF 作为基函数,且强调信号局部特征,和传统时频分析方法相比,具有自适应性、时频分辨率高等突出优点,一经提出,就引起了广泛的关注。但传统 EMD 方法存在模式混叠现象,限制了它在实际中的应用,为解决这一问题, Wu 和 Huang 等人近年提出了一种噪声辅助分析方法—聚合经验模式分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)<sup>[6]</sup>,该方法能有效抑制模式混叠现象,是对 EMD 方法的重大改进。

本研究首先通过仿真信号分析,将 EEMD 方法和传统 EMD 方法的分解结果进行对比,以证明 EEMD 能有效抑制 EMD 中出现的模式混叠现象,准确提取信号中的各频率分量。然后将基于 EEMD 和 Hilbert 变换的时频分析方法应用于轴流泵压力脉动的特征信息提取。

## 1 基于 EEMD 和 Hilbert 变换的时频分析方法

基于 EEMD 和 Hilbert 变换的时频分析方法是对传统 Hilbert-Huang 变换的改进方法,其主要思路是:用聚合经验模式分解(EEMD)将待分析信号分解成一系列 IMF 分量的组合,然后对每个 IMF 进行 Hilbert 变换,获得信号的 Hilbert 谱和 Hilbert 边际谱。由于该方法中的 EEMD 分解能有效抑制传统 EMD 分解中出现的模式混叠问题,更加适用于对实际信号的分析。

### 1.1 经验模式分解中的模式混叠现象

传统经验模式分解(EMD)根据信号的局部时间尺度,自适应地筛选生成 IMF 分量,从而将原始信号经 EMD 分解成一系列 IMF 分量和一个残余分量的和,记为:

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

分解出来的各个 IMF 分量  $c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)$  按其所包含的频率范围从高到低排列,每个频率范围内包含了不同的频率分量。EMD 具有自适应性并基于数据局部特征,自提出以来就被广泛地应用于地震信号分析、语音识别、故障诊断、生物医学模式信号分析等领域<sup>[7]</sup>,但其本身仍然存在一些问题无法解决,其中最主要的缺点就是存在模式混叠现象。

模式混叠是指在 1 个 IMF 分量中包含差异极大的特征时间尺度,或者相近的特征时间尺度分布在不同的 IMF 分量中,往往表现为相邻 2 个 IMF 分量波形混叠,

相互影响,难以辨别。引起模式混叠的因素不仅包括间断信号,还包括脉冲干扰和噪声,统称为异常事件<sup>[8]</sup>。

某频率为 40 Hz 的正弦波在中间 3 个波峰处受到高频振荡信号的干扰,合成信号记为,为证明 EMD 分解时存在模式混叠现象,对其进行 EMD 分解,其结果如图 1 所示。

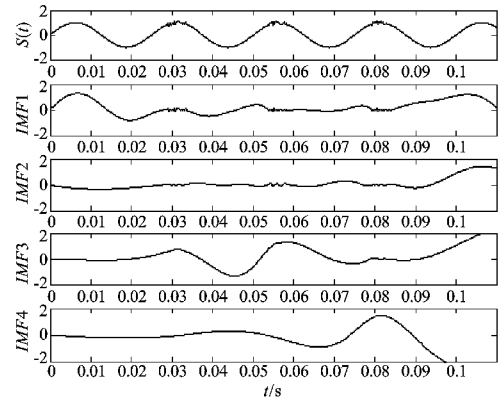


图 1 仿真信号及其 EMD 分解结果

由图 1 看到,经 EMD 分解后,IMF1 分量明显发生了模式混叠现象,高频分量和 40 Hz 低频分量混合在一起,相互干扰严重,由 EMD 算法可知,后续“筛选”出来的 IMF 分量也会受到影响,导致仿真信号中应有的频率成分(高频分量和 40 Hz 分量)无法分解出来,得出的结果没有实际意义。

### 1.2 聚合经验模式分解方法

聚合经验模式分解(EEMD)是一种噪声辅助分析方法,能有效解决传统经验模式分解(EMD)中出现的模式混叠问题。该方法将白噪声加入待分析信号中,利用白噪声频谱的均匀分布特性,当信号加在遍布整个时频空间分布一致的白噪声背景上时,不同时间尺度的信号会自动映射到合适的参考尺度上,并且由于零均值噪声的特性,经多次平均后,噪声将相互抵消,总体平均的结果就可作为最终结果<sup>[9]</sup>。

EEMD 分解以 EMD 分解为理论基础,具体步骤如下<sup>[10]</sup>:

- (1) 在目标数据上加入高斯白噪声序列;
- (2) 将加入高斯白噪声的序列按照 EMD 算法分解为一族 IMF;
- (3) 每次加入相同幅值的不同高斯白噪声序列,重复步骤(1)、(2);
- (4) 把分解得到的各个 IMF 的均值作为最终的结果,即:

$$c_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n c_{ij}(t) \quad (2)$$

式中:  $c_j(t)$ —对原始信号进行 EEMD 分解得到的第  $j$  个 IMF 分量,  $N$ —加入白噪声的次数。

为验证 EEMD 抑制模式混叠的效果,本研究在 2.1 节中的仿真信号  $s(t)$  中加入 100 组标准差为 0.2 的白噪声,进行 EEMD 分解,分解结果如图 2 所示。

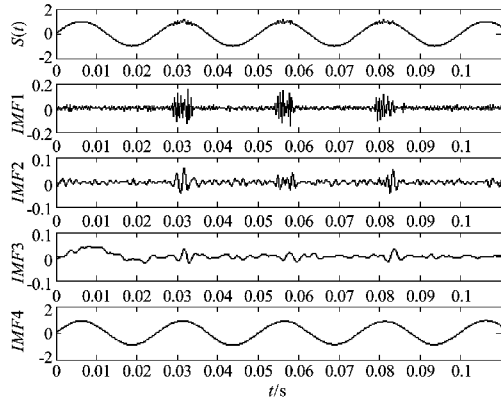


图 2 仿真信号的 EEMD 分解结果

由图 2 看到,经过 EEMD 分解后,仿真信号中的 40 Hz 低频分量被完美地分解在 IMF4 中,高频振荡分量则分解在了 IMF1 中,没有出现 2.1 节中 EMD 分解时产生的模式混叠现象。

通过比较 EMD 和 EEMD 两种方法对同一信号的分解结果,可以证明,EEMD 分解方法能将原始信号中不同频率成分的信号清晰地分解出来,有效地抑制模式混叠现象,是对 EMD 方法的重大改进,和 EMD 相比,更适用于实际信号的分析。

### 1.3 Hilbert 谱和 Hilbert 边际谱

为进一步提取信号的时频特征,可在 EEMD 分解的基础上,对每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换,计算其瞬时频率,继而求得信号的 Hilbert 谱:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\omega_i(t)t} \quad (3)$$

式中:  $a_i(t)$ —幅值函数,  $\omega_i(t)$ —瞬时角频率。

Hilbert 谱  $H(\omega, t)$  是信号的幅值-频率-时间的三维表示,能够反映非平稳信号幅值和频率的时变特征。

本研究将 Hilbert 谱对整个采样持续时间进行积分,得到 Hilbert 边际谱:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (4)$$

式中:  $T$ —整个采样持续时间。

Hilbert 边际谱上的频率成分表明了可能有这样频率的波动局部存在,但是这种波动发生的确切时间需要参考 Hilbert 谱。

## 2 轴流泵压力脉动信号特征信息提取实例

某轴流泵的主要参数如下: 流量  $L=0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ , 扬

程  $H=4.5 \text{ m}$ , 转速  $n=1450 \text{ r/min}$ , 叶轮直径  $D=305 \text{ mm}$ , 叶片个数  $Z_u=3$ , 导叶个数  $Z_b=7$ , 轴频  $f_z=n/60=24 \text{ Hz}$ , 叶片通过频率  $f_y=Z_u \times f_z=72 \text{ Hz}$ 。本研究将基于 EEMD 和 Hilbert 变换的时频分析方法应用于该轴流泵压力脉动的特征信息提取。以叶轮中间截面处为例,本研究在此处布置测点,对压力脉动信号进行采集,采样时间为 0.33 s,采样点数为 2880。

首先,本研究在采集到的压力脉动信号中加入 100 组标准差为 0.2 的白噪声,进行 EEMD 分解,原始脉动信号和前 6 个 IMF 分量如图 3 所示,由分解结果可以看到,IMF6 分量为单一频率的谐波信号,经计算,其频率约为 71 Hz,与叶片通过频率  $f_y=72 \text{ Hz}$  基本一致,说明压力脉动信号中存在叶片通过频率这一频率分量。

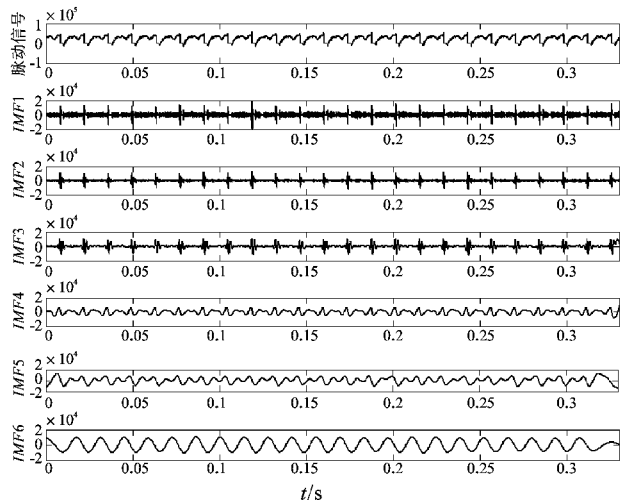


图 3 叶轮中间截面处压力脉动信号 EEMD 分解结果

为研究压力脉动信号的时频特性,本研究根据 EEMD 分解得到的 IMF 分量,计算该处压力脉动信号的 Hilbert 谱,其结果如图 4 所示,其中,右侧颜色条是幅值的颜色参考坐标,代表压力脉动幅值的大小。由 Hilbert 谱看到,该处压力脉动信号主要集中在 0~300 Hz 的低频段内,其中 71 Hz 分量最为明显,为压力脉动的主要频率分量,该分量随时间波动较小,稳定存在于整个采样时间内,根据曲线颜色可以判断出该频率分量的

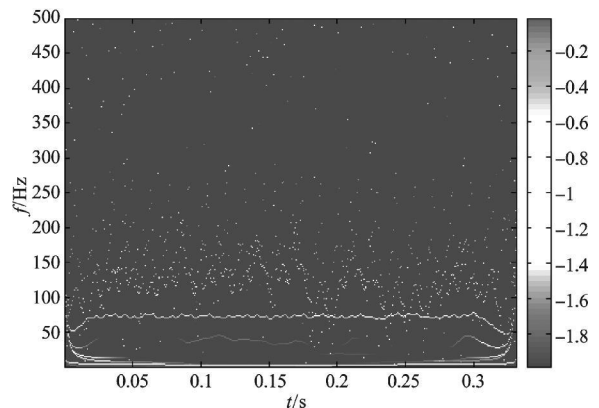


图 4 叶轮中间截面处压力脉动信号 Hilbert 谱

幅值最大。经分析,该频率正好与轴流泵的叶片通过频率  $f_b=72$  Hz 基本一致,再次说明压力脉动信号中存在叶片通过频率这一频率分量。

为进一步分析压力脉动信号的频率分布,计算压力脉动信号的 Hilbert 边际谱,其结果如图 5 所示。由 Hilbert 边际谱看到,该处压力脉动信号表现为 300 Hz 以下的低频宽带信号,其中在 71 Hz 处,即接近叶片通过频率  $f_b$  处出现明显峰值,这与 Hilbert 谱的分析结果基本一致。

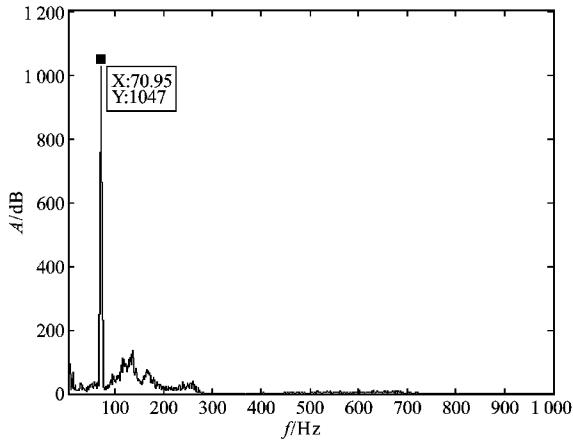


图 5 叶轮中间截面处压力脉动信号 Hilbert 边际谱

结合 Hilbert 谱和 Hilbert 边际谱,可以得到如下结论:该轴流泵叶轮中间截面处的压力脉动信号主要集中在 300 Hz 以下的低频段,其主要频率分量为叶片通过频率  $f_b$ ,为此处的主要脉动源,经分析,该分量是由转动叶片与进入叶轮的水流相互作用所产生。为保证轴流泵运行过程中的稳定性,在轴流泵设计过程中,应使其主要结构的模态频率远离叶片通过频率  $f_b$ 。

为进一步验证该方法的有效性,本研究采集该轴流泵叶轮进口截面处的压力脉动信号,用同样的方法进行分析,计算得到其 Hilbert 谱和 Hilbert 边际谱,结果分别如图 6、图 7 所示。

由图 6 中的 Hilbert 谱看到,叶轮进口截面处的压力脉动信号主要集中在低频段,且存在一个在叶片通

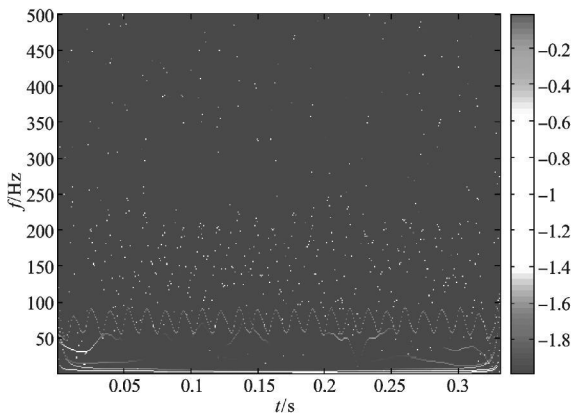


图 6 叶轮进口截面处压力脉动信号 Hilbert 谱

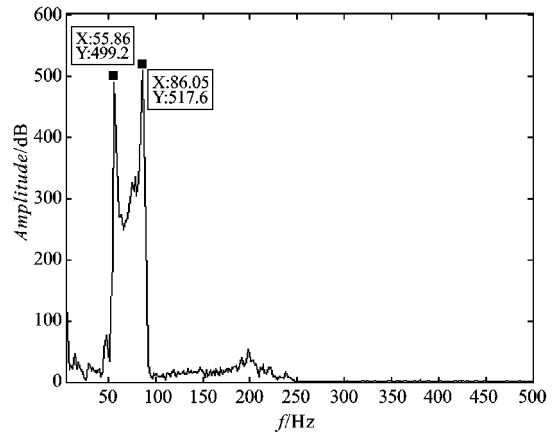


图 7 叶轮进口截面处压力脉动信号 Hilbert 边际谱

过频率  $f_b=72$  Hz 附近随时间进行周期性振荡的频率分量,由曲线颜色可以判断该分量幅值最大,为该处最主要脉动源,结合图 7 中的 Hilbert 边际谱,可以确定此处压力脉动的频率变化范围主要在 56 Hz~86 Hz。由此,叶轮进口截面处压力脉动信号的时频特性也被成功提取出来。

### 3 结束语

本研究分别采用 EMD 和 EEMD 方法对仿真信号进行了分析,并将结果进行对比,研究表明,传统 EMD 分解存在模式混叠现象,而 EEMD 分解能够很好地抑制模式混叠,是对 EMD 方法的重大改进。本研究将基于 EEMD 和 Hilbert 变换的时频分析方法应用于轴流泵压力脉动的特征信息提取,分析结果表明:叶轮中间截面处压力脉动信号主要集中在 300 Hz 以下的低频段,其中叶片通过频率为主要频率分量;在叶轮进口截面处,主要脉动源的频率在叶片通过频率  $f_b=72$  Hz 附近随时间进行周期性振荡,频率变化范围约为 56 Hz~86 Hz。为保证轴流泵运行过程中的稳定性,在轴流泵设计过程中,应使其主要结构的模态频率远离以上频率。研究表明,基于 EEMD 和 Hilbert 变换的时频分析方法能够准确地识别轴流泵压力脉动信号的频率成分及其时变情况,非常适合于分析轴流泵压力脉动信号。本研究尚未针对不同工况下的轴流泵压力脉动信号进行分析,后续将做进一步的研究。

#### 参考文献 (References):

- [1] 王福军,张玲,张志民,等. 轴流泵不稳定流场的压力脉动特性研究[J]. 水利学报,2007,38(8):1003-1009.
- [2] 郑源,刘君,周大庆,等. 大型轴流泵装置模型试验的压力脉动[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(1):51-55.

其功耗有较高的要求。系统整体耗电极低,实际功耗难以测试,下面按系统中各部件生产厂商提供的数据手册中的参数进行功耗估算,其结果如表1所示,其中各数据都是在3V测试条件下的参数典型值。其中,SD卡只有在人为操作时才处于活动模式,其他时间都处于待机模式,所以计算时间时仅使用其待机电流<sup>[12-14]</sup>。本研究设定系统每1h记录一次数据,每次记录数据耗时1s(实际上远小于1s,且不可能所有器件1s内同时处于活跃或操作状态),则可得1h耗电为:

$$3\ 599 \times (0.1 + 3 + 5 + 250) + 1 \times (250 + 15\ 000 + 5 + 500) = 944\ 656.9\ \mu\text{A} \cdot \text{s}$$

以普通干电池1500mA·h容量计,则可以供系统正常工作的时间为:

$$1\ 500 \times 1\ 000 \times 3\ 600 / 944\ 656.9 = 5\ 716.361\ \text{h} = 238.181\ 7\ \text{天}$$

表1 系统功耗分析

器件	休眠或待机模式耗电流	活动或操作模式耗电流
MSP430F149	<0.1 $\mu\text{A}$	250 $\mu\text{A}$
传感器	<3 $\mu\text{A}$	<15 mA
SD Card	<5 $\mu\text{A}$	15 mA(读)/20 mA(写)
其他	250 $\mu\text{A}$	500 $\mu\text{A}$

以上估计中,“其他”包括其他I/O口的电流损耗等。“其他”电流值根据经验已经做了最大估算,所以该系统在1500mA·h电池供电情况下正常待机8个月没有问题。实际测试时设定为每秒记录,系统运行了30h,大于估算的24h,这可能是由于电池电压跌落导致工作电流变小有关,也符合了“其他”电流值偏大的设想。

### 3 结束语

围绕低功耗这一原则,本研究设计了一种基于MSP430F149单片机的低功耗树木直径生长量测量系

统,对系统工作原理与组成进行了详细介绍。设计的测径仪能够对树木直径生长量进行长期连续的测量,具有结构简单、操作方便、数据自动记录与自动存储、低功耗、低成本等特点,具有较强的实用性。

### 参考文献(References):

- [1] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社,2004.
- [2] 汤春常. 立地条件与柳杉幼林生长量的关系[J]. 福建林业科技,2010,37(4):108-110.
- [3] 刘美英,高永. 施肥对马家塔复垦区油松林生长量的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(3):1172-1174.
- [4] 宋占邦. 修枝对迭部林区人工云杉林生长量影响[J]. 陕西林业科技,2009(3):14-16.
- [5] 刘云鹏,解春霞,郑华英,等. 苏北杨树黄化病对苗木生长量的影响[J]. 江苏林业科技,2010,37(5):10-13.
- [6] 李辛雷,李纪元. 不同栽培条件下南方红豆杉生长特性研究[J]. 广西植物,2010,30(5):647-650.
- [7] 刘清玉. 一种新式测树工具——测径靠尺投产[J]. 林业调查规划,1993,18(4):1.
- [8] 刘发林,吕勇,曾思齐. 森林测树仪器使用现状与研究展望[J]. 林业资源管理,2011(1):96-99.
- [9] 关强,尹丽丽,李志鹏,等. 基于超声测距的定高树径测量仪的研究[J]. 东北林业大学学报,2006,34(4):27-30.
- [10] 鄢前飞. 林业数字式测径仪的研制[J]. 中南林业科技大学学报,2008,28(2):95-99.
- [11] Texas Instruments Inc.. MSP430x13x, MSP430x14x, MSP430x14x1 Mixed Signal Microcontroller Data Manual (Rev. F) [EB/OL]. [2004-06-03]. <http://focus.ti.com/lit/ds/sls272f/slas272f.pdf>.
- [12] 余善恩,郭淼,傅国定. 基于SD卡存储的便携式温湿度记录仪[J]. 机电工程,2009,26(11):87-90.
- [13] 梁峰,王平,宋文杰,等. RFID在粮仓无线温湿度检测中的应用[J]. 机械,2011,38(5):65-67.
- [14] 孙俊峰,李孝海. 基于无线技术的温湿度测量装置的开发[J]. 机电工程技术,2010,39(9):90-92.

[编辑:张翔]

(上接第281页)

- [3] 杨敬江. 排灌泵站立式轴流泵装置模型试验[J]. 排灌机械,2008,26(6):20-23.
- [4] 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[J]. **Proceedings of the Royal Society of London, Series A**, 1998(454):903-995.
- [5] HUANG N E. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. **Annual Review of Fluid Mechanics**, 1999(31):417-457.
- [6] WU Zhao-hua, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. **Ad-**

**vances in Adaptive Data Analysis**, 2009, 1(1):1-41.

- [7] SHEN P C, KANG Y, WANG C C, et al. Study on the affection of gear fault diagnosis bases on HHT by noises [J]. **Advances in Intelligent and Soft Computing**, 2009(62):87-96.
- [8] 窦东阳,赵英凯. 集合经验模式分解在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 农业工程学报,2010,26(2):190-195.
- [9] 时世晨,单佩韦. 基于EEMD的信号处理方法分析和实现[J]. 现代电子技术,2011,34(1):88-90.
- [10] 林近山. 基于EEMD和Hilbert变换的齿轮箱故障诊断[J]. 机械传动,2010,34(5):62-64.

[编辑:李辉]