

# HHT 方法在遥测振动信号检测中的应用研究

王万金

(91550 部队 94 分队, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**介绍了 HHT 的基本原理、特点、存在问题及解决手段,应用该法对仿真振动信号和遥测振动信号进行了处理分析,结果表明其能够有效地对非线性、非平稳振动信号进行分解,且具有自适应性,在时域和频域内具有较好的分辨能力,分解出的分量具有较为清晰的物理意义,由于其表示结果的多样性,可以对单个分量做进一步精确分析,能够检测出信号的突变,并能定位突变的时间点,为飞行器飞行状态判定、优化方案设计以及故障检测提供重要依据。

**关键词:**Hilbert-Huang 变换;经验模态分解;遥测振动信号

**本文引用格式:**王万金. HHT 方法在遥测振动信号检测中的应用研究[J]. 四川兵工学报,2014(3):65-68.

**中图分类号:**V19

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2014)03-0065-05

## Application and Research of the HHT Method in the Telemetry Vibration Signal Detection

WANG Wan-jin

(PLA 91550, 94 units, Dalian 116023, China)

**Abstract:** This paper introduced the HHT of the basic principles, characteristics, problems and solutions means. The simulation and telemetry vibration signals were processed and analysis from the application of the method. Results show that it can effectively decompose nonlinear and non-stationary vibration signal with self-adaptive and a better resolving power in the time domain and the frequency domain. And the decomposition of the components has a clear physical meaning. Due to their diversity, the single component can further do accurate analysis, to detect signal mutations and locate a point in time, which provides an important basis for judgment of aircraft flight conditions, optimization design and fault detection.

**Key words:** Hilbert-Huang transforms; empirical mode decomposition; telemetry vibration signal

**Citation format:** WANG Wan-jin. Application and Research of the HHT Method in the Telemetry Vibration Signal Detection[J]. Journal of Sichuan Ordnance,2014(3):65-68.

飞行器试验中采集到的遥测振动信号目前主要从时域和频域两方面进行处理分析,其中频域分析以傅里叶变换为基础,它是一种线性、稳态变换,只能分析频率不随时间变化的线性、平稳信号。此外,傅里叶变换使用的是一种全局变换,只能从时域或频域的角度描述信号的特性。由于飞行器的遥测振动信号非线性、非平稳(时变)的特点,单独从时域或频域分析都不足以充分描述信号的特性,因为其无法表示频率在时间上的变化规律,即其无法表述信号的时频局部特性,而这种性质恰恰是非平稳信号最根本和最关键的性质。现代时频分析技术通过设计时间和频率的联合函数,分析信

号频率随时间变化的规律,同时描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度,特别适合非线性、非平稳信号的分析。现有时频分析方法主要分为两类:一类是基于窗函数的线性时频表示,典型的如短时 Fourier 变换,Gabor 展开以及小波变换。另一类是双线性时频表示,主要有 Cohen 类时频分布和仿射类时频分布,典型的如 Wigner-Ville 分布,但几乎所有的这些时频分析方法都是以 Fourier 变换为最终理论依据,采用积分的分析方法,以至于时频分析的基函数是比较固定的,缺乏自适应性,难以在时频分析的方法中取得突破,有着自身难以克服的局限性。

**收稿日期:**2013-09-27

**作者简介:**王万金(1982—),男,助理工程师,主要从事信号处理研究。

1998年, N. E. Huang等在研究非线性问题和希尔伯特变换时提出了将复杂信号分解成一种称为本征模态函数(IMF)的单分量信号的算法—经验模态分解(EMD)算法,能够对非线性、非平稳信号进行线性化和平稳化处理,在此基础上再对各分量进行 Hilbert 变换,得到各自的瞬时频率、瞬时振幅等,即为 Hilbert-Huang 变换(HHT),由于 IMF 是从信号本身获得,所以其具有自适应性,打破先前时频分析方法对基函数的依赖,更适合非线性、非平稳信号的处理。本文在介绍 HHT 方法基本理论的基础上,结合实例,通过仿真信号和实际信号检验了该方法的适用性,能够有效地描述和检测遥测振动信号的时频特性以及瞬态特性。

## 1 Hilbert-Huang 变换

Hilbert-Huang 变换分两部分,首先对信号进行一种称为经验模态分解(empirical mode decomposition)的信号分解,产生若干本征模态函数(IMF),然后对各 IMF 进行 Hilbert 变换,以获得 Hilbert 谱、边际谱和瞬时频率等。

### 1.1 经验模态分解(EMD)

EMD 过程假设,任一信号都是由若干不同的本征模态函数(intrinsic mode functions,简称 IMF)组成的,其中本征模态函数需满足以下条件:每个 IMF 中过零点数和极点数相等或至多相差 1;其中任意一点,由局部极大值点确定的包络线和由局部极小值点确定的包络线的均值为零,即其关于时间轴局部对称。

在此假设基础上,EMD 算法主要过程如下:

(1)找出待分析信号  $s(t)$  的全部极大值点和极小值点,利用三次样条函数曲线拟合原信号的上包络线  $U(t)$  和下包络线  $L(t)$ ,上、下包络线的均值为  $m_1(t)$ ,即为平均包络:

$$m_1(t) = \frac{U(t) + L(t)}{2}$$

将原数据序列  $s(t)$  减去  $m_1(t)$  得到新的数据序列  $h_1(t)$ :

$$h_1(t) = s(t) - m_1(t) \quad (2)$$

判断  $h_1(t)$  是否满足 IMF 条件,若  $h_1(t)$  满足条件,则原数据序列即为 IMF,否则将  $h_1(t)$  视为新的原数据序列,重复上面的步骤,即找出  $h_1(t)$  的平均包络  $m_{11}(t)$ ,将  $h_1(t)$  减去  $m_{11}(t)$  得一个新的数据序列  $h_{11}(t)$ :

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t) \quad (3)$$

继续判断  $h_{11}(t)$  是否满足 IMF 条件,若不满足,则重复上面步骤  $m$  次,直到所得的  $h_{1m}(t)$  满足 IMF 条件,此时  $h_{1m}(t)$  就是第一个分离出来的 IMF,记为  $I_1(t)$ ,它含有信号的最高频率成分。

(2)将  $s(t)$  减去  $I_1(t)$ ,去掉一个高频成分得到一个新的数据序列  $r_1(t)$ ,对其重复步骤(1),得到  $s(t)$  的第二个 IMF,记为  $I_2(t)$ ,继续重复循环  $n$  次,得到  $s(t)$  的满足 IMF 条件的  $n$  个分量,且有

$$r_n(t) = r_{n-1}(t) - I_n(t) \cdots = r_1(t) - I_2(t)$$

当  $r_n(t)$  为一常量或单调函数或只有一个极值点的函数时,分解过程结束, $r_n(t)$  称为余项,他代表信号的平均趋势。

由此可将原始数据序列  $s(t)$  表示为一系列 IMF 和余项的和

$$s(t) = \sum_{j=1}^n I_j(t) + r_n(t) \quad (5)$$

各 IMF 分量瞬时频率由高到低,每一 IMF 所包含频率成分随信号本身变化而变化,因此 EMD 方法具有自适应性,非常适用于非线性、非平稳信号的处理。但由于受包络求取插值方法影响以及端点处极值的不确定性,使得分解信号的两端出现失真,即所谓的端点效应,后续将对 EMD 过程应注意的问题详细讨论。

### 1.2 Hilbert 变换

Hilbert 变换是一种线性变换,强调局部属性,用其可以求得瞬时频率,对经 EMD 过程获得的 IMF 分量具有明确的物理意义,具体步骤如下:

首先对本征模态函数  $I(t)$  进行 Hilbert 变换:

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

然后定义  $I(t)$  的解析信号  $z(t) = I(t) + iH(t) = a(t)e^{i\theta(t)}$  其中,

$$a(t) = \sqrt{I(t)^2 + H(t)^2} \quad (7)$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{H(t)}{I(t)} \quad (8)$$

式(7)、式(8)明确地表示了瞬时振幅和瞬时相位,很好地描述了原始信号的瞬时特性,且在此基础上可以定义瞬时频率:

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (9)$$

此时,省略余项的原始信号可以表示为

$$s(t) = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t)e^{i\theta_j(t)} = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t)e^{i\int \omega_j(t) dt} \quad (10)$$

将式(10)记为

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t)e^{i\int \omega_j(t) dt} \quad (11)$$

式(8)、式(9)可以获得 IMF 分量的瞬时频率,(11)式可以构造原始信号的时频幅值谱—Hilbert 谱,精确地描述了原始信号幅值在时间-频率平面上的变化规律,因此是信号能量的一种完整时频分布。进一步还可以定义边际谱:  $h(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega, t) dt$ , 其不同于傅里叶变换中的频谱,从统计观点上来看它表示了该频率上振幅(能量)在时间上的累加,能够反映各频率上能量的分布,但因为瞬时频率定义为时间的函数,不同以往傅里叶等需要完整的震荡波周期来定义局部的频率值,而且求取的能量值不是全局定义的。因此,对信号的局部特征反映更准确,特别适用于遥测振动信号这种非线性、非平稳信号的分析,能够反映真实的振动特点。

## 2 EMD 过程中应注意的问题

### 2.1 端点效应<sup>[3]</sup>

端点效应问题又称为边界问题,其产生的主要原因是在

采用插值函数确定上、下包络时,由于端点处极值的不确定性,使得上、下包络在信号的两端发生扭曲且随着筛分过程的不断循环这种效应会传播到信号内部,同时每层分解的误差会逐渐累加,严重地影响了后面分解层的质量,因此端点效应的减弱是提高分解精度的关键问题。根据遥测振动信号的特点,本文中解决端点效应采用的方法是在黄大吉等提出的镜像闭合延拓法<sup>[4]</sup>的基础上改进的镜像延拓的方法,即在数据两端通过镜像延拓数据的极大值和极小值点,虽然增加了数据运算量,但能够有效地抑制数据两端出现的飞翼现象。

## 2.2 模态混叠

EMD 方法虽然具有很强分解非线性、非平稳信号的能力,但并不是所有信号都能够有效地分解出来,其存在模态混叠问题,即两种频率模式混叠在一起无法分离。模态混叠通常存在于两种情况中:一是待分析的原始信号中包含了两个频率比较接近的分量,二是待分析的原始信号中存在高频弱信号干扰,两种情况下 EMD 方法均无法将两个单分量信号进行分解。在工程实际中,信号无可避免的受到噪声的干扰,其可等效为一种高频信号,这也是导致模态混叠的一个原因。针对上述情况,结合遥测振动信号的特点,本文中对频率比接近的情况采用掩膜信号法,对高频弱信号干扰采用 EEMD 的方法<sup>[5]</sup>加以解决。

## 3 示例分析

### 3.1 仿真信号

一个典型的具有周期性、脉冲峰值、噪声以及调频和调幅为背景的非线性、非平稳的机械振动信号可以描述为

$$x(t) = 1.2\sin(2\pi 400t)[1 + 0.2\cos(2\pi 50t)] + 0.8\sin[(2\pi 150t) + \sin(2\pi 30t)] + 2.5\sin(2\pi 900t) + p(t) + y(t)$$

其中,采用频率为 6 400 Hz,采样点数为 1 024,采样数据序列时长为 0.16 s,  $p(t)$  是脉宽为两个采样周期,幅值为 3,中心分别位于 0.04 s 和 0.12 s 处的三角脉冲,  $y(t)$  是均值为零,方差为 0.01 的随机噪声,该信号的时域波形如图 1 所示。

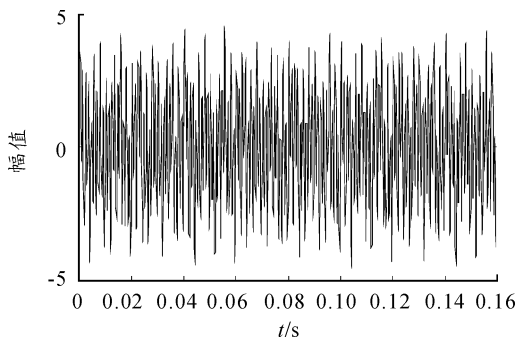


图 1 原始信号时域波形

对该原始振动信号进行 Hilbert-Huang 变换,采用改进镜像延拓方法对端点效应进行抑制,采用 EEMD 方法解决模态

混叠的情况,得到分离出的各个 IMF 分量及其对应的频谱、边际谱和瞬时频率等,分别如图 2、图 3、图 4 所示。

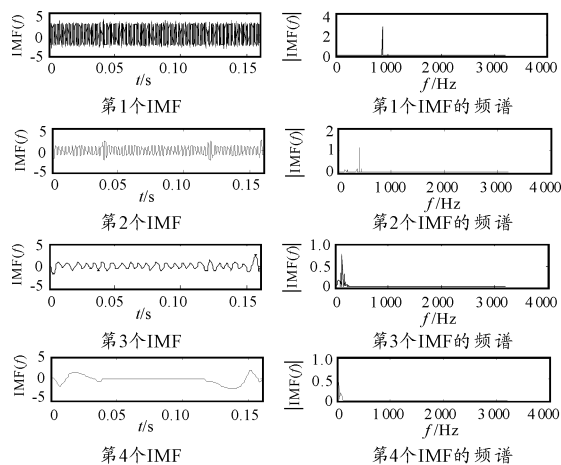


图 2 原始信号的 IMF 分量及对应频谱

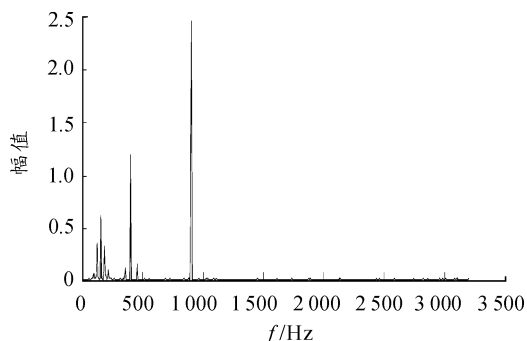


图 3 原始信号经 Hilbert-Huang 变换的边际谱

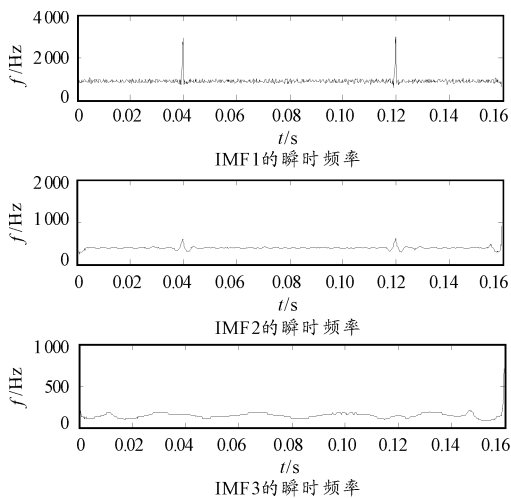


图 4 原始信号主要 IMF 分量的瞬时频率

图 2 表明原始信号分解成了 4 个 IMF 分量,且前两个分量都在不同程度上受到脉冲的影响。IMF1 表示 900 Hz 主频背景和脉冲出现的位置, IMF2 体现了 400 Hz 主频的调幅信息, IMF3 体现了 150 Hz 主频的调频信息, IMF4 为余项,体现原信号整体的变化趋势,可以看成趋势项。

图 3 可以看出幅值较大的频率主要集中在 150 Hz, 400

Hz, 900 Hz, 且 150 Hz 处频率幅值出现了连续变化, 和原始信号相符。此外, 图 2 中前 3 个 IMF 幅值较大的主频和图 3 中幅值较大的主频能够完全一致, 说明 EMD 分解的有效性。

图 4 可以看出在 0.04 和 0.12 s 频率变化范围较广, 从较低频直至较高频, 这符合脉冲出现的时刻和频谱特征, 同时也表明 HHT 方法在检测瞬时突变信号方面的优越性。其中, IMF1 的瞬时频率图中存在一个中心频率为 900 Hz 的无规律变化频率分量, 此分量除在脉冲影响时刻外统计特征并无大的变化, 且幅值较大的主要集中在 900 Hz, 可以推断其为噪声背景下的定值频率分量; IMF2 的瞬时频率图中除脉冲影响时刻外其频率变化有序, 可以推断其为一个以 400 Hz 为中心频率的载波调幅频率分量; IMF3 的瞬时频率图中频率绕 150 Hz 随时间变化, 根据采样频率, 可以推断其为一个 50 Hz 的调频信号在 150 Hz 附近变化的频率分量。

### 3.2 实测信号

利用 HHT 方法对某次飞行器试验中采集的遥测振动信号进行处理, 采样频率为 6 400 Hz, 采样序列长度为 0.1 s, 其时域波形如图 5 所示。

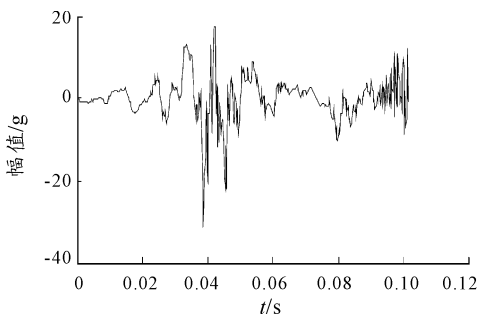


图 5 实测信号的时域波形

对其进行 Hilbert-Huang 变换, 在采取端点效应和模态混叠抑制后, 得到分离出的各个 IMF 分量、边际谱及其对应的瞬时频率等, 如图 6、图 7、图 8 所示。

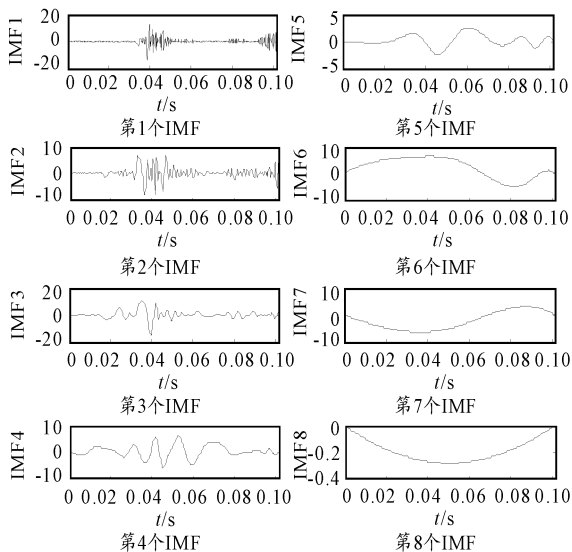


图 6 实测信号的 IMF 分量

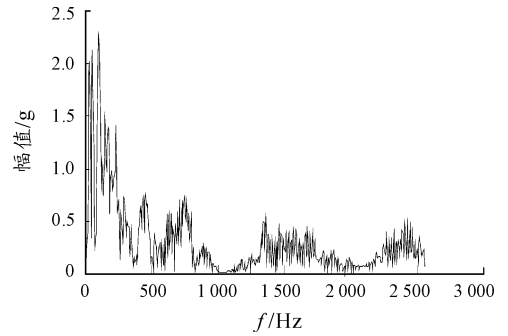


图 7 实测信号经 Hilbert-Huang 变换的边际谱

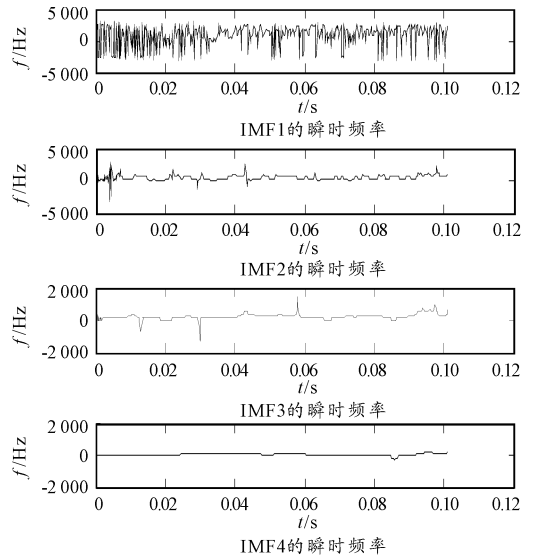


图 8 实测信号主要 IMF 分量的瞬时频率

图 6 表明实测信号分解成了 8 个 IMF 分量, 其幅值分布从大到小, 频率从高到底, IMF8 为残余项; 通过相关系数法计算可知 IMF5、IMF6、IMF7 同原信号低度相关, 可判断其为伪分量, 即对原信号影响较大的为 IMF1 ~ IMF4 分量。

图 7 可以看出原信号的频率成分较丰富, 但幅值较大的频率主要集中在低频部分, 即低频分量 (初步判断为 IMF3 ~ IMF4 分量) 对原信号影响较大。

图 8 可知 IMF1 分量频率变化较广, 且统计特征无明显变化, IMF2 在零点后出现明显频率变化, 判断为飞行器时序动作所致, IMF3 ~ IMF4 在 0.08 s 前频率周期波动后趋于平稳, 符合低频振动信号特征, 但在 0.08 ~ 0.1 s 时段内频率显著上升, 判定原信号发生突变, 结合时序特征判定该时段内为故障信号, 说明飞行器结构或传感器出现故障。

## 4 结束语

本文通过 Hilbert-Huang 变换在仿真信号和遥测振动信号中的应用, 表明该方法能够有效地对非线性、非平稳振动信号进行分解, 且具有自适应性, 在时域和频域内具有较好的分辨能力, 其分解出的 IMF 分量具有较为清晰的物理意义, 由于其表示结果的多样性, 可以对单个 (下转第 83 页)

## 4 结束语

在高寒山地地域特殊、气候恶劣的环境下,利用先进的云计算和物联网技术可有效解决野营保障中遇到的困难,简化人为劳动,提高装备性能,实时化地监测环境,科学化地管理物资,精确化地预测需求,极大地提高了野营保障能力。运用云计算与物联网技术解决特殊地域的野营保障问题既具有针对性,更具有推广性,为其在其他军事领域的应用提供了参考和借鉴。同时,我们还应认识到云计算和物联网技术尚待成熟,在军事方面的应用还处于小范围探索阶段,但其释放出的能量已经得到了世界各国的高度关注。新军事变革和信息技术发展必将促使云计算和物联网军事应用迈向成熟。

### 参考文献:

[1] 蓝羽石. 物联网军事应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012:122.

- [2] 杨正洪,周发武. 云计算和物联网[M]. 北京:清华大学出版社,2012:7-33.
- [3] 何国杰,张志顺,陈刚. 中外营房工程保障比较[M]. 北京:国防大学出版社,2013.
- [4] lp0201. 七条进藏公路之路况浅析. 百度文库. <http://wenku.baidu.com>. 2012.
- [5] 后勤指挥学院. 基建营房勤务学教程[M]. 北京:解放军出版社,2010.
- [6] 何国杰. 外军营房工程保障[M]. 北京:国防大学出版社,2012.
- [7] 徐旭,于雅楠. 从高寒山地特殊地理状况看野营保障存在的问题与对策[J]. 军队基建营房,2010,11(215):8-9.
- [8] 张聪,戴强,罗旭晖. 刍议野营装备信息化建设[J]. 军队基建营房,2010(2):7-8.

(责任编辑 周江川)

(上接第 68 页)分量做进一步精确分析,能够检测出信号的突变,并能定位突变的时间点,为飞行器飞行状态判定、优化方案设计以及故障检测提供重要依据。

### 参考文献:

- [1] 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 1998.
- [2] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves[M]. The Hilbert Spectrum, 1999.
- [3] 陈军圣,于德介,杨宇. 希尔伯特-黄变换端点效应问题的探讨[J]. 振动与冲击, 2005, 24(6): 40-42.

- [4] 黄大吉,赵进平,苏纪兰. 希尔伯特-黄变换的端点拖延[J]. 海洋学报, 2003, 25(1): 1-11.
- [5] 李振兴,孟庆海. 时频分析技术及其工程应用[M]. 大连:大连海事大学出版社, 2011.
- [6] 李天云,赵妍,季小慧,等. HHT 方法在电力系统故障信号分析中的应用[J]. 电工技术学报 2005(6): 10-13.
- [7] 盖强,张海勇,徐晓刚. Hilbert-Huang 变换的自适应频率多分辨率分析研究[J]. 电子学报, 2005(3): 50-53.
- [8] 钟佑明. 希尔伯特-黄变换局瞬信号分析理论的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2002.

(责任编辑 周江川)