

文章编号:1006-1355(2017)05-0023-06

## 基于 HHT 的拉杆转子结构模态参数识别

边涛<sup>1</sup>, 谢寿生<sup>1,2</sup>, 刘云龙<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 西安 710038; 2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100083)

**摘要:** 为准确获取航空发动机拉杆转子结构模态特性, 应用 Hilbert-Huang 变换(HHT)方法对结构的模态参数进行识别。首先对结构脉冲响应信号进行带通滤波和经验模式分解(EMD), 进而得到结构各阶模态响应信号, 然后对信号进行 Hilbert 变换获取其瞬时特性, 最后对瞬时幅值自然对数和相位进行线性拟合, 根据拟合结果计算出模态参数, 通过与实验值的对比论证了该方法的准确性。

**关键词:** 振动与波; 拉杆转子; 模态参数; Hilbert-Huang 变换; 线性拟合

中图分类号: V23

文献类别: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2017.05.005

## Modal Parameters Identification of Rod Fastening Rotors Based on HHT

BIAN Tao<sup>1</sup>, XIE Shou-sheng<sup>1,2</sup>, LIU Yun-long<sup>1</sup>

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100083, China)

**Abstract :** In order to acquire the modal characteristics of rod fastening rotors of aero-engines more accurately, a method based on Hilbert-Huang transform (HHT) is investigated and applied to the identification of modal parameters of the structure. First of all, the band-pass filtering and empirical mode decomposition (EMD) are performed for the response signal measured under impulsive excitation to obtain the modal response signals of different orders of the structure. Then, the Hilbert-Huang transform (HHT) is applied to obtain the instantaneous characteristics of each modal response. Finally, the least-square linear fitting technique is employed to get the linear relation between the natural logarithmic of the instantaneous amplitude and the phase. According to the results of the linear fitting, the modal frequency and damping are extracted. Comparison of the results with those of experimental modal analysis shows that the HHT method is applicable to modal parameters identification of aero-engine rod fastening rotors.

**Key words :** vibration and wave; rod fastening rotors; modal parameters; Hilbert-Huang transform (HHT); linear fitting

机械系统的振动信号中往往蕴含着丰富的状态信息, 基于机械结构振动信号的分析与处理来识别结构的模态参数, 是结构健康和损伤诊断的重要手段之一, 也是当前国内外研究的热点问题之一<sup>[1]</sup>。因此, 如何从振动信号中识别模态参数具有重要的现实意义。振动信号分析和处理最基本最常用的方法是傅里叶频域分析方法。该方法建立在信号为线性、稳态的基础上, 而且是一种单纯的频域分析方法, 不能提供任何时域信息。此外, 因其采用简谐信号作为基函数, 故在分析和处理非线性、非稳态信

号时具有局限性。20 世纪 80 年代出现的小波分析<sup>[2]</sup>, 通过一种可以伸缩和平移的小波对信号做处理实现信号时频局部化分析目的, 但小波分析本质上是一种窗口可调的傅里叶变换, 其小波窗内的信号必须是平稳的, 因而没有从根本上摆脱傅里叶分析的限制。另外, 小波变换也是非适应性的, 一旦小波基选定, 在整个信号分析过程中就只能采用这同一小波基<sup>[3]</sup>。1998 年 N. E. Huang<sup>[4]</sup>提出了基于经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的非平稳、非线性信号分析方法, 它依靠信号本身尺度特征将信号分解为本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF), 它的基函数不是通用的, 没有统一的表达式, 而是依赖信号本身, 是自适应性, 不同信号分解后得到不同的基函数。因此, EMD 是对传统的以傅里叶变换为基础的线性和稳态谱分析的一大

收稿日期: 2017-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51506221; 51476187)

作者简介: 边涛(1992—), 男, 陕西省咸阳市人, 硕士生, 主要研究方向为航空发动机推进系统故障诊断。

通信作者: 谢寿生, 男, 硕士生、博士生导师。

E-mail: 1098963285@qq.com

突破,具有重要的理论意义。该方法一经提出就迅速在地震<sup>[5]</sup>、海洋<sup>[6]</sup>、图像处理<sup>[7]</sup>、机械故障诊断<sup>[8-10]</sup>及结构模态参数识别<sup>[11]</sup>等多个领域得到了广泛应用。Hilbert-Huang变换(HHT)则是以EMD为核心,由EMD和Hilbert变换(Hilbert Transform, HT)组成。因此非常适合于处理非线性、非平稳信号,而现实中的振动信号也大多是非线性、非稳态的。

基于振动信号识别结构模态参数的方法由来已久,主要分为频域法和时域法两种。常见的频域法有半功率带宽法、导纳圆法、频域最小二乘法等方法<sup>[12]</sup>;时域法有对数衰减法、ITD法、STD法、时序法<sup>[13]</sup>、随机减量法<sup>[14]</sup>等。频域法需要测量结构的频响函数,对于大型结构(如桥梁、发动机转子),其频响函数的获取是一件比较困难的事情。时域法则只需得到结构振动响应的时间历程,主要是结构的自由振动响应,也可以采用结构的脉冲响应<sup>[15]</sup>,因而较适用于大型复杂结构的模态参数识别。

本文提出应用HHT方法分析与处理结构振动响应信号进行模态参数识别。首先通过仿真算例说明该方法的可行性,进而运用该方法对测得的航空发动机拉杆转子结构的冲击响应信号进行分析与处理,提取其模态参数并与实验模态分析结果进行对比,论证该方法的准确性。

## 1 HHT方法

### 1.1 EMD原理

EMD根据信号本身的局部特征将信号分解为有限个IMF,这些IMF需要满足以下两个条件:

1) 在整个数据序列中,极值点的数量(包括极大值点和极小值点)和过零点的数量必须相等或最多相差不大于1;

2) 在任一时间点上,信号局部极大值确定的上包络线和局部极小值确定的下包络线的均值为0,即信号关于时间轴局部对称;

对一个信号 $x(t)$ , EMD算法步骤如下:

step1 确定信号 $x(t)$ 的所有局部极值点(包括极大值和极小值)

step2 在所有极大值点和极小值点之间分别通过三次样条曲线插值得到上下包络线 $e_{\max}(t)$ 和 $e_{\min}(t)$

step3 计算上下包络线的均值

$$m(t) = (e_{\max}(t) + e_{\min}(t)) / 2 \quad (1)$$

step4 提取信号 $h(t) = x(t) - m(t)$ , 检测信号 $h(t)$ 是否满足IMF的两个基本要求,若满足则为一个IMF,否则对 $h(t)$ 迭代重复上述过程直至其为一个IMF,记

该IMF为 $c_i(t)$ ,  $c_i(t) = h(t)$

step5 从原始信号 $x(t)$ 中减去分解出的IMF分量 $c_i(t)$ ,得到余项 $r_i(t) = x(t) - c_i(t)$

step6 将 $r_i(t)$ 作为新的“原始”信号重复上述步骤直至满足预定的停止准则后停止,最后剩下原始信号的余项 $r_n(t)$

这样信号就被分解为若干个IMF和一个余项的和

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

其流程图如图1所示。

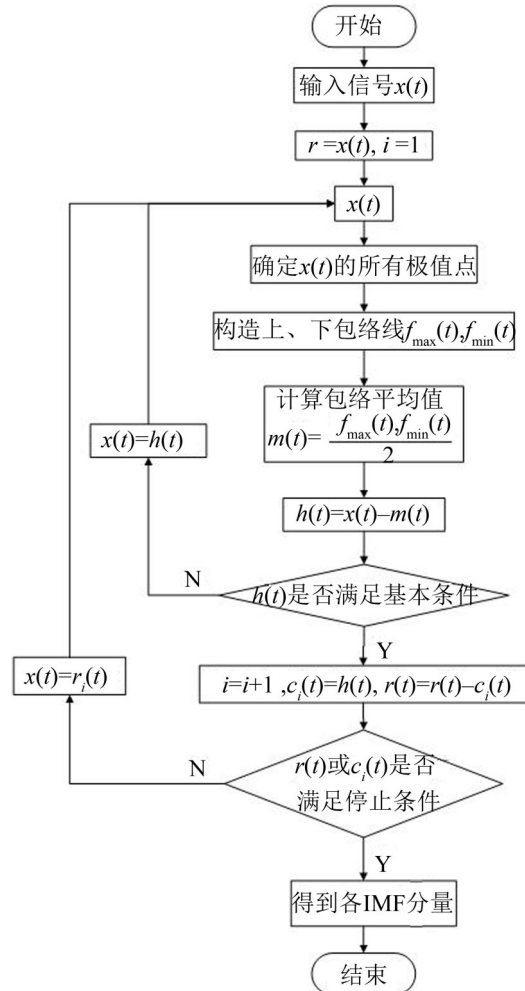


图1 EMD算法流程图

### 1.2 结构模态参数识别

对于任一个 $n$ 自由度的线性系统,其在脉冲激励下的位移响应可表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n a_i e^{-\xi_i \omega_{di} t} \cos(\omega_{di} t + \theta_i) \quad (3)$$

其中 $\omega_{ni}$ 为系统第 $i$ 阶固有频率, $\omega_{di}$ 为第 $i$ 阶有阻尼固有频率, $\xi_i$ 为第 $i$ 阶阻尼比。式中各项均表现为呈指数规律衰减的余弦波,选取合适的时间 $t$ 即能满足极值点和过零点的条件,并且指数衰减曲线的上、下包络线关于时间轴是对称的,这就满足了

IMF的两个条件。因此,在一定条件下,可以认为位移响应信号的各项就是构成响应信号的IMF,即信号经过EMD方法分解,可以将多自由度系统响应分解为多个单自由度系统的叠加。

假设响应信号经过EMD分解得到各个IMF,则各阶IMF可以表示为

$$\text{IMF}_i(t) = a_i e^{-\xi_i \omega_{di} t} \cos(\omega_{di} t + \theta_i) \quad (4)$$

经过Hilbert变换得到

$$z_i(t) = \text{IMF}_i(t) + i\tilde{\text{IMF}}_i(t) = A_i(t) e^{-i\theta_i(t)} \quad (5)$$

一般结构的阻尼较小,频率相对较大,故由式(5)可进一步得到

$$A_i(t) = a_i e^{-\xi_i \omega_{di} t} \quad (6)$$

$$\theta_i(t) = \omega_{di} t + \theta_i \quad (7)$$

对(6)取自然对数,可得

$$\ln A_i(t) = -\xi_i \omega_{di} t + \ln a_i \quad (8)$$

分别对式(7)、式(8)进行最小二乘法线性拟合得到其斜率

$$\begin{aligned} k1_i &= \omega_{di} = \omega_{ni} \sqrt{1 - \xi_i^2} \\ k2_i &= -\xi_i \omega_{ni} \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(9)可求计算出系统固有频率和阻尼比。

## 2 仿真算例

由于低阶模态通常对机械系统的响应起主导作用,因此根据式(3)并忽略高于4阶的模态,构造一仿真信号

$$\begin{aligned} x(t) &= 20e^{-2.5t} \cos(150t) + 15e^{-3.6t} \cos(500t) + \\ &8e^{-3t} \cos(1000t) + 5e^{-3.2t} \cos(2500t) \end{aligned} \quad (10)$$

其时域波形及频谱如图2所示。

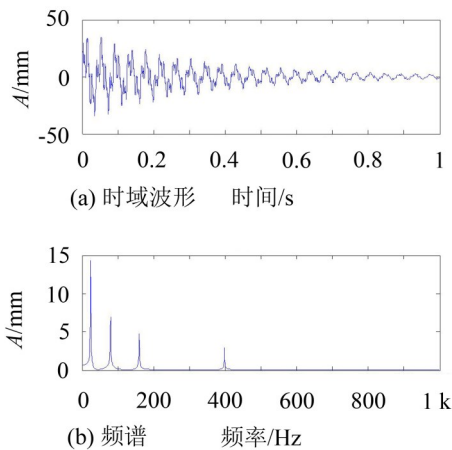


图2 位移响应的时域波形及频谱

对信号进行EMD分解,结果如图3所示。

从图3中可以看出EMD较好地分解出响应信号中的4阶模态,对得到的各阶模态进行HT获得瞬时幅值和相位并对幅值自然对数和相位进行最小二乘法线性拟合,结果如图4、图5所示。

从图4和图5可以看出线性拟合的效果较好,但

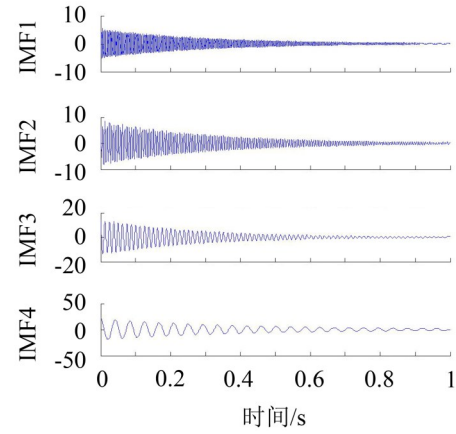


图3 EMD分解结果

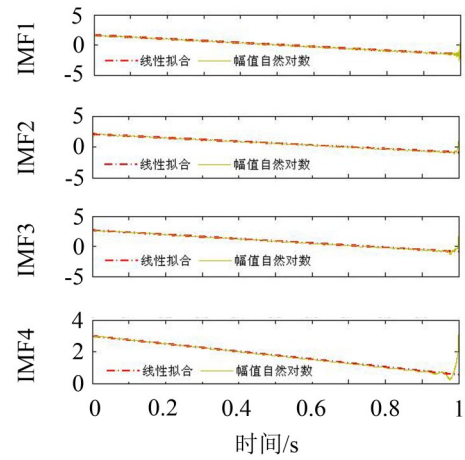


图4 各阶模态幅值自然对数拟合

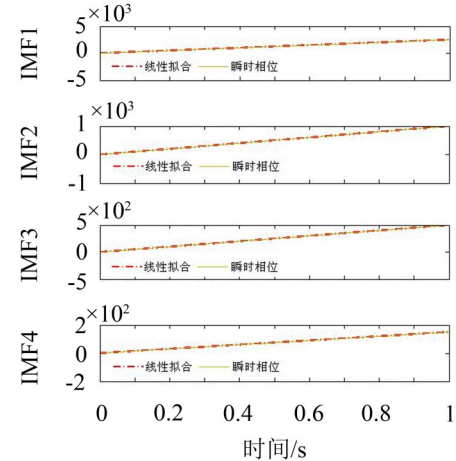


图5 各阶模态瞬时相位拟合

由于端点效应<sup>[16-17]</sup>的影响导致幅值自然对数拟合在初始和结束时刻均存在一定的误差。

根据拟合的结果由式(9)求得各阶模态的固有频率和阻尼比并与理论值进行对比,结果见表1、表2。

由表1、表2可知,基于HHT识别的模态频率与理论值的相对误差最小为0.035%,最大为0.071%;阻尼比的相对误差最小为0.39%,最大为1.07%。模态频率和阻尼比的识别误差都比较小,这表明了



表1 HHT方法识别模态频率与理论值对比

阶数	$f/\text{Hz}$		相对误差/(%)
	理论值	HHT方法	
1	23.885	23.877	0.035
2	79.618	79.561	0.071
3	159.236	159.153	0.052
4	398.089	397.878	0.053

表2 HHT方法识别阻尼比与理论值对比

阶数	阻尼比/(%)		相对误差/(%)
	理论值	HHT方法	
1	1.666 7	1.648 8	1.07
2	0.720 0	0.713 4	0.92
3	0.300 0	0.297 8	0.73
4	0.128 0	0.127 4	0.39

基于HHT进行结构模态参数识别的可行性。

### 3 拉杆转子结构模态参数识别

某型航空发动机高压压气机转子共有9级,为鼓盘式结构,如图6所示。其中7、8、9级盘和封严篦齿盘采用周向均匀分布的拉杆螺栓连接,如图7所示。通过锤击法敲击篦齿盘上的特定位置,采用单点激励多点响应获得结构的加速度响应信号,运用HHT方法对拉杆转子进行模态参数识别。

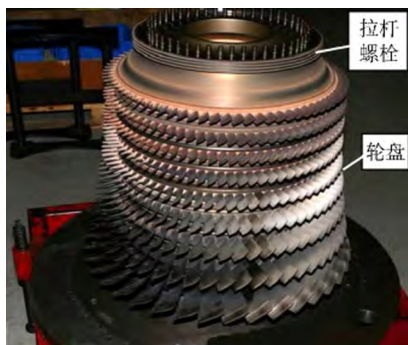


图6 高压压气机转子

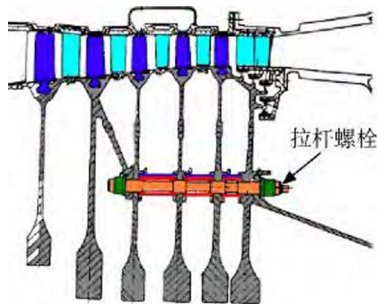


图7 拉杆螺栓与轮盘连接结构

#### 3.1 实验模态分析

为检验提取模态参数准确性,对高压转子进行实验模态分析,将实验得到的模态参数与HHT提取出的结果进行对比分析,实验过程如图8所示。



图8 实验模态分析

该系统主要由力锤、力信号电荷放大器、三向加速度传感器、加速度信号调理设备、计算机为主的硬件组成。采用单点激励多点响应(每个响应点测量三个方向的响应加速度),将加速度传感器安装在装配好的高压转子篦齿盘的幅板上,力锤沿圆周敲击篦齿盘的幅板位置以获得结构的完整模态振型。

#### 3.2 直接HHT提取模态参数

对拉杆转子结构响应信号直接进行EMD分解,共得到10个IMF分量,对其前5阶IMF进行HT进而识别模态参数。其中前2阶结果如图9、图10所示。

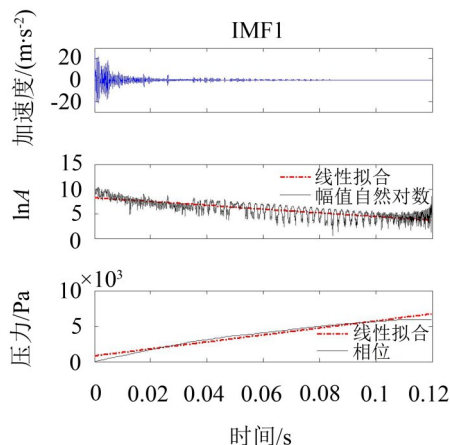


图9 IMF1及其HT后幅值自然对数和相位拟合

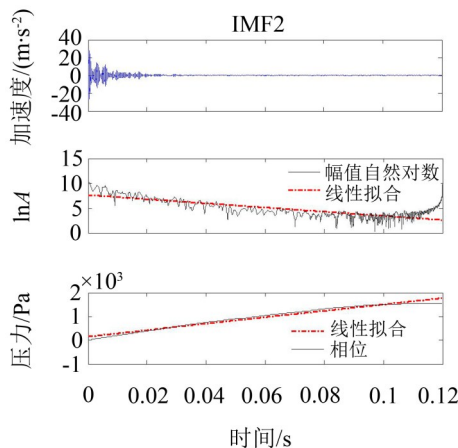


图10 IMF2及其HT后幅值自然对数和相位拟合

从图中可以看出,直接分解出的IMF分量的幅

值自然对数和瞬时相位的线性性不明显,尤其是幅值自然对数。这是因为一阶IMF中可能涵盖了多阶模态信息,即发生了模态混叠<sup>[18]</sup>。因此,直接对响应信号进行HHT分析难以识别结构的模态参数,甚至会出现虚假模态。

### 3.3 带通滤波后HHT提取模态参数

为了更好地提取各阶模态分量,避免EMD进行不必要的分解造成模态混叠,故首先对响应信号进行频谱分析,然后根据信号的频谱图获得结构各阶模态固有频率的初步估计,如第 $i$ 阶固有频率 $f_{il} < f_i < f_{ih}$ ,最后将信号通过带通滤波器。如果要想得到第 $i$ 阶模态响应,就选取带通滤波器频率为 $f_{il} < f_{ih}$ ,依此就可得到 $i$ 个时间序列信号 $x_i(t)$ 。对 $x_i(t)$ 进行EMD分解并近似认为得到的第1阶IMF就是拉杆结构的第 $i$ 阶模态响应。应用带通滤波HHT识别拉杆转子模态参数的主要过程如图11所示。

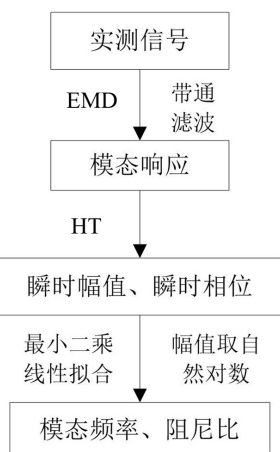


图11 基于HHT拉杆转子模态参数识别流程  
拉杆转子结构响应信号及其频谱如图12所示。

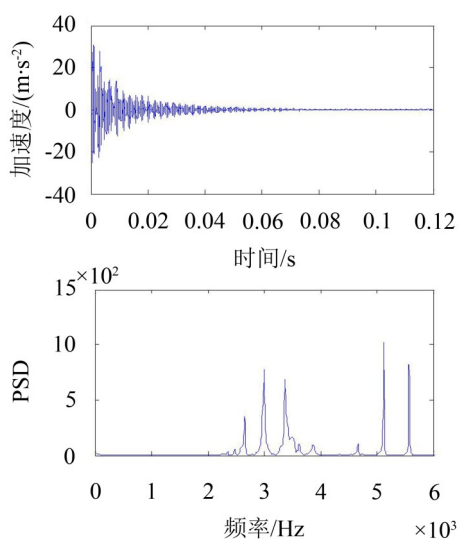


图12 响应信号及其频谱

从图12可以看出,信号中主要包含5个特征频

率,分别对应拉杆转子的5个特征模态,根据频谱图估计各阶特征频率。其中,取 $2640 < f_1 < 2670$ ,  $2970 < f_2 < 3019$ ,  $3351 < f_3 < 3395$ ,  $5100 < f_4 < 5140$ ,  $5555 < f_5 < 5595$ ,按照图11所示的流程进行各阶模态参数提取,图13、图14分别为提取的前两阶模态响应及其幅值自然对数和相位线性拟合结果。

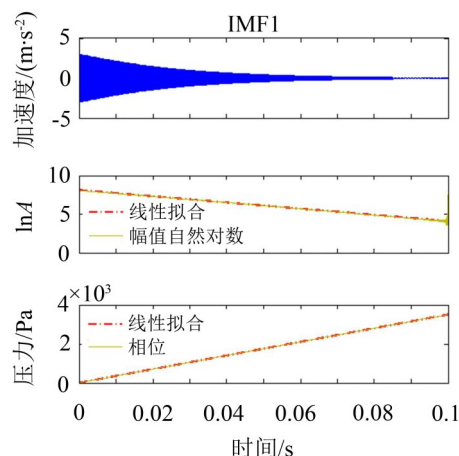


图13 IMF1及其HT后幅值自然对数和相位拟合

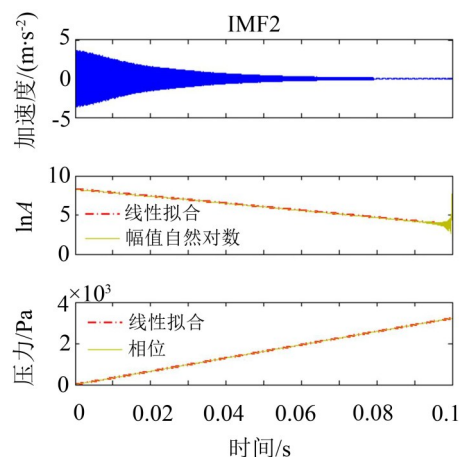


图14 IMF2及其HT后幅值自然对数和相位拟合

在进行EMD分解时,为削弱端点效应产生的影响,采用经典的镜像延拓法并去除分解后模态分量首尾两端的部分数据点,然后再进行Hilbert变换。从图13、图14可以看出,EMD的端点效应得到了有效的抑制。

线性拟合后计算的各阶模态参数与实验模态分析测得值对比见表3、表4。

由表3、表4可知,HHT方法提取的拉杆转子模态频率与试验值的相对误差最大为0.867%,最小为0.023%;阻尼比与试验值的相对误差最大为4.39%,最小为1.20%。

拉杆转子模态频率和阻尼比的识别误差都较小,故HHT方法能够较为准确地提取拉杆转子的模态参数。

表3 HHT方法识别模态频率与实验值对比

阶数	$f/\text{Hz}$		相对误差/(%)
	实验值	HHT方法	
1	2 655.029	2 638.230	0.633
2	2 996.826	2 970.855	0.867
3	3 369.141	3 357.539	0.344
4	5 120.850	5 119.681	0.023
5	5 572.510	5 574.137	0.029

表4 HHT方法识别阻尼比与实验值对比

阶数	阻尼比/(%)		相对误差/(%)
	实验值	HHT方法	
1	0.375	0.365	2.67
2	0.344	0.351	2.03
3	0.307	0.295	1.20
4	0.144	0.140	2.78
5	0.091	0.095	4.39

## 4 结 语

本文提出基于HHT方法识别航空发动机拉杆转子结构的模态参数,通过仿真信号说明了该方法的可行性,继而运用该方法对拉杆转子结构模态参数进行识别。结果表明,提取的各阶特征模态参数与实验值的相对误差较小,论证了该方法的准确性。

此外,本文的方法还有如下两个方面值得探讨。一是EMD方法客观存在的端点效应问题如何能够得到有效的抑制,本文采用镜像延拓法同时去除左右端点部分数据点的方法,效果较好。但这种方法适用于长数据序列;二是EMD分解时的模态混叠问题(尤其对于模态密集型结构),本文采用根据信号频谱图对各阶特征频率进行估计后带通滤波分解的方法,取得了良好的效果。并且模态频率估计的区间取得越窄越好,但是要保证所关注的特征频率在滤波频率区间内。以上两个方面会直接影响后续的HT及线性拟合效果,进而影响提取参数的准确性。因此,对于EMD的端点效应以及模态混叠问题还需要进行深入的探究,提高HHT方法识别模态参数的准确性,这对于大型复杂结构模态参数的识别具有重要的现实意义。

### 参考文献:

[1] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B, et al. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review[R]. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1996.

[2] 谢锋,谢寿生. 基于小波分析的航空发动机旋转失速检测方法[J]. **航空动力学报**, 2006, 21(4): 754-758.

[3] 钟佑明,秦树人,汤宝平. 一种振动信号新变换法的研究[J]. **振动工程学报**, 2002, 15(2): 233-238.

[4] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. **Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences**, 1998, 454: 903-995.

[5] HUANG N E. A new view of earthquake ground motion data: The Hilbert spectrum analysis[C]. Proc. Int' l workshop on annual commemoration of Chi-Chi Earthquake. 2000, II: 64-75.

[6] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. **Annu. Rev. Fluid Mech.**, 1999(31): 417-457.

[7] YUE HUANYIN, GUO HUADONG, HAN CHUNMING, et al. A SAR interferogram filter based on the empirical mode decomposition method[J]. **Geoscience and Remote Sensing Symposium**, 2001(5): 2061-2063.

[8] YU DEJIE, CHENG JUNSHENG, YANG YU. Application of EMD method and Hilbert spectrum to the fault diagnosis of roller bearing[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2005(19): 259-270.

[9] GAI GUANGHONG. The processing of rotor startup signals based on empirical mode decomposition[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2006(20): 222-235.

[10] LIU B, RIEMENSCHNEIDER S, XU Y. Gearbox fault diagnosis using empirical mode decomposition and Hilbert spectrum[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2006(20): 718-734.

[11] 陈隽,徐幼麟. HHT方法在结构模态参数识别中的应用[J]. **振动工程学报**, 2003, 16(3): 384-388.

[12] 王济,胡晓. Matlab在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[13] 周传荣,赵淳生. 机械振动参数识别及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989.

[14] IBRAHIM S R. Random decrement technique for modal identification of structures[J]. **Journal of Spacecraft and Rockets**, 1997, 14(11): 182-198.

[15] 莫平杰,杨世锡,曹冲锋. 振动模态固有频率和阻尼比的EMD识别方法[J]. **机电工程**, 2011, 28(4): 393-397.

[16] 程军圣,于德介,杨宇. Hilbert-Huang变换端点效应问题的探讨[J]. **振动与冲击**, 2005, 24(6): 40-42.

[17] 林丽,周霆,余轮. EMD算法中边界效应处理技术[J]. **计算机工程**, 2009, 35(23): 265-268.

[18] 肖瑛,殷福亮. 解相关EMD: 消除模态混叠的新方法[J]. **振动与冲击**, 2015, 34(4): 25-29.