

基于光纤陀螺与经验模态分解的航天器微小角振动检测技术

孟祥涛,王 巍,向 政

(中国航天电子技术研究院,北京 100094)

摘 要: 航天器在轨运行过程中,由于内部多种活动部件的存在,会使其结构体产生振幅较小、频率较高的微小角振动,这会影响航天器有效载荷的正常工作。光纤陀螺作为航天器的姿态测量部件,在设计原理上具有高带宽的特点,针对航天器微小角振动的特点,提出采用光纤陀螺测量该振动信息,同时提出采用经验模态分解的方法将光纤陀螺输出信号分解成各个时间尺度上的本征模态函数,再经过 Hilbert 谱分析方法检测出微小角振动信息。通过星载测试试验对该方法进行了有效性验证,结果表明:采用经验模态分解技术能够实现航天器微小角振动信号的检测,为航天器微小角振动的高精度测量提供了新手段和新方法。

关键词: 微小角振动; 光纤陀螺; 经验模态分解; 本征模态函数

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2619-07

Detecting technique of spacecraft's micro vibration based on FOG and EMD

Meng Xiangtao, Wang Wei, Xiang Zheng

(China Academy of Aerospace Electronics Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Due to the existing of various moving parts, the smaller amplitude and lower frequency will appear in the structure of spacecraft, when a spacecraft moving in orbit. This phenomenon will affect the inner payload. As an attitude measurement equipment of spacecraft, FOG obtains the characteristics of high bandwidth. Thus it was put forward that FOG can be adopted to measure the micro vibration. Moreover, EMD was adopted to decompose the output signal of FOG to intrinsic mode function on time scale as well. After that, Hilbert analysis method will be used to detect available micro vibration information. This method was tested in the spacecraft examination. The result shows that empirical mode decomposition technique could realize spacecraft's micro vibration, which brings a new method for the field of micro vibration measurement of spacecraft.

Key words: micro vibration; FOG; EMD; intrinsic mode function

收稿日期:2013-12-17; 修订日期:2014-01-10

基金项目:总装“十二五”预研项目(30106)

作者简介:孟祥涛(1982-),男,博士生,从事光纤陀螺惯性系统技术方面的研究。Email:mengxiangtao1982@163.com

导师简介:王巍(1966-),男,研究员,博士生导师,主要从事新型惯性技术方面的研究。Email:yfwangwei@vip.sina.com

0 引言

航天器在轨运行过程中会受到多种环境因素的干扰,如大型可控构件驱动机构的步进运动、变轨调姿期间推力器的点火工作、进出阴影时的冷热交变和动量轮的高速转动等。这些干扰都会使航天器的结构体产生局部的微小角振动,对有效载荷尤其是光学载荷的高精度成像产生较大的影响。如果能够将该微小角振动信息精确测量出来,那么可以采用图像补偿等手段提高光学载荷的成像水平,这对航天器综合性能的提高将具有重要意义。

目前用于测量微小角振动的传感器种类不多,大部分工程应用难度较大,要实现高精度的测量难度更大。赵伟分析了航天器微振动的产生机理和干扰来源,给出了国内几种典型卫星的微振动环境特点,但是并没有定量地给出微振动环境对有效载荷的影响^[1];张振华等对航天器的微振动环境进行了系统性建模,推导了各干扰源产生的微振动模型,但并未给出微振动的测量方法;俞本立等提出采用光纤激光器对微振动进行高精度测量,但仅仅是针对线振动信号的测量;刘盛刚等搭建了全光纤自混合干涉测量系统,解决了自由空间自混合干涉测量系统工作距离短、易受环境干扰等问题,但也是针对线振动信号的测量^[2],目前针对微小角振动信号测量的相关文献很少,测量仪器也由于各种应用局限无法得到工程应用,针对微小角振动的测量方法和信号处理方法的研究也不多。

光纤陀螺作为一种新型全固态惯性仪表,具有宽频带、灵敏度高、质量轻、体积小、环境适应性强等特点,能够实现微小角振动的高精度测量。但是,在工程应用过程中,光纤陀螺安装在航天器的结构体上,其输出信号中不仅包含航天器的微小角振动信息,也包含自身的测量噪声和环境的随机干扰等,需要从输出信号中检测出微小角振动信息。

当前进行信号检测的方法有很多,如傅里叶变换和小波变换等。傅里叶变换主要用于处理统计特性不随时间变化的平稳信号,傅里叶变换具有较高的频率分辨率,不具有时间分辨率,而光纤陀螺的测量噪声和环境的随机干扰一般都为非平稳过程,其频谱是时间的函数,无法实现微小角振动信号的检测;小波变换具有多分辨率的特性,在时频域都具有表征信号局部特征的能力,但小波变换中的小波基不唯一,不同的小波基会得到不同的检测结果。目前常用的小波基只能对线性信号做出有效的解释,并且小波基的有限长会造成信号能量的泄漏,很难定量给出信号的时间-频率-能量特性,因此,采用小波变换无法实现信号的高精度检测^[3]。

经验模态分解(EMD)是一种新的信号处理方法,由 Huang 于 1998 年提出,该方法对非平稳信号进行平稳化处理,分解得到一系列具有不同时间尺度的数据序列。在信号分析中,时间和能量是信号的两个重要特征参数,EMD 基于信号的局部特征时间尺度,能把复杂信号分解为有限的本征模态函数(IMF)之和,同时,EMD 在信号处理过程中不会产生能量泄漏,可以定量地给出时间-频率-能量的三维分布。因此,EMD 是一种自适应的信号处理检测方法,比较适合对非线性非平稳信号进行检测,可以对微小角振动信号进行检测。

文中基于 EMD 理论,将光纤陀螺在微小角振动环境下的测量信息分解为不同的 IMF,利用 Hilbert 谱分析的方法实现微小角振动信息的检测,通过星载测试试验验证了该方法的有效性。

1 光纤陀螺的宽频测量特性

光纤陀螺在工程实现时一般采用全数字闭环保偏的方案,闭环方案可以消除中间环节的参数漂移和随温度变化而引入的非线性等影响,光纤陀螺方框图如图 1 所示。

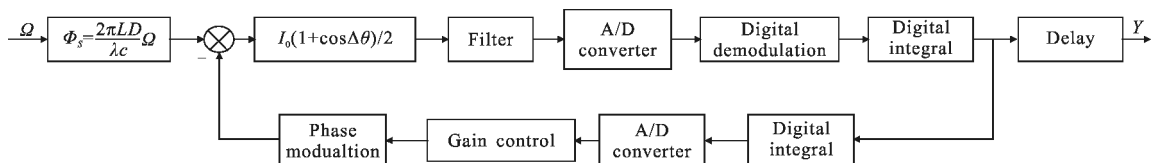


图 1 闭环光纤陀螺仪的方框图

Fig.1 Diagram of close-loop fiber optic gyroscope

通过简化光纤陀螺中的信号传递模块,可以获得光纤陀螺的近似传递函数:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{\Phi_s(s)} = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: $T = \frac{1}{GM}$ 为时间常数; $K = \frac{1}{M}$ 为增益; τ 为纯时间延迟。

这样,可以得到光纤陀螺的幅频特性、相频特性以及动态响应频带的模型:

$$|F(j\omega)| = \frac{1}{M} \frac{1}{\sqrt{(\omega T)^2 + 1}} \quad (2)$$

$$\angle F(j\omega) = \arctan(\omega T) \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{2\pi T} \quad (4)$$

由上式可知,影响光纤陀螺带宽 B 的主要参数是闭环系统的总增益 GM ,一般通过改变光源输出功率大小或改变探测器、前置放大器、A/D 转换器以及数字解调等环节的增益来调整闭环光纤陀螺的带宽。闭环光纤陀螺模型中的时间常数,从物理意义上与陀螺的带宽有直接关系,而陀螺带宽直接影响陀螺的噪声水平。若解调信号的增益越大,则陀螺的时间常数越小,带宽越大,引入高频噪声越多。针对微小角振动的测量,需要光纤陀螺既具有较宽的频带,又具有较低的噪声,这样才能实现高精度的测量。为此采用掺铒光纤光源,掺铒光纤光源能够提供相对稳定的波长和较高的功率,在陀螺电路设计时可以采取过调制技术来抑制陀螺噪声,同时不损失测量带宽。

针对某型光纤陀螺开展动态响应频带的测试,采用角振动台给光纤陀螺输入不同频率的微小角振动,采集光纤陀螺的输出,图 2 为光纤陀螺测试得到的典型频率特性曲线。

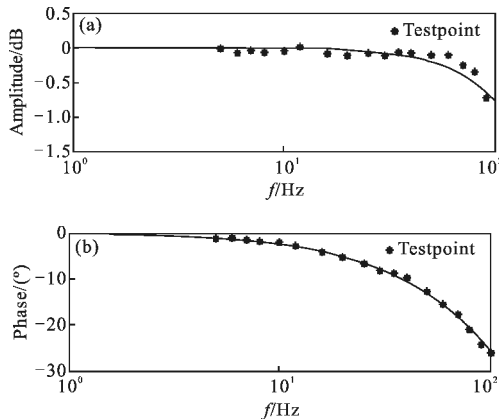


图 2 光纤陀螺的频率特性曲线

Fig.2 Curve of FOG's frequency characteristic

由此可见,光纤陀螺的动态响应频带通常可以达到 200 Hz 以上,此参数可以根据具体使用环境进行适应性的更改。因此,光纤陀螺由于原理和设计上的优势使其具有较高的动态响应频带,这使光纤陀螺能够准确地敏感到振幅较小、频率较高的微小角振动。

2 EMD 的基本原理

EMD 可以将任意的非平稳时间序列分解为具有不同时间尺度的信号组合,比较适合应用在光纤陀螺微小角振动测量信息中。EMD 分解得到的一系列 IMF,每个 IMF 需要满足两个要求:(1) 整个 IMF 中的零点个数和极点个数相等或至多相差 1 个;(2) IMF 关于时间轴对称,即信号由局部极大值确定的包络线和由局部极小值确定的包络线均值为 0。

EMD 分解的步骤归纳如下:

(1) 设原信号为 $x(t)$,确定 $x(t)$ 的所有局部极大值点和所有局部极小值点;

(2) 采用三次样条插值的方法连接所有的局部极大值点,得到原信号的上包络线,采用相同的方法通过局部极小值点得到信号的下包络线,求上下包络线的平均值,记为 m_1 ;

(3) 原信号 $x(t)$ 减去 m_1 ,得到 $x(t) - m_1 = h_1$;

(4) 判断 h_1 是否满足 IMF 的条件,若满足则将 h_1 赋给 c_1 ,若不满足则将 h_1 赋给 $x(t)$,重复上述步骤得到 m_{11} ,再得到 $h_{11} = h_1 - m_{11}$;

(5) 判断 h_{11} 是否满足 IMF 的条件,不满足则不断循环直至满足要求,得到 $h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}$,记 $c_1 = h_{1k}$ 。

(4)、(5)两步得到的 c_1 可以看成是信号 $x(t)$ 的第一个 IMF;

(6) 将 c_1 从 $x(t)$ 中分离出来,得到 $r_1 = x(t) - c_1$ 。

信号 r_1 不是单调或直流序列时,表明内部还有更长周期的信号序列,将 r_1 看做信号 $x(t)$,重复(1)到(5)求出 $x(t)$ 的第二个满足 IMF 条件的分量 c_2 ,重复循环 n 次,得到信号 $x(t)$ 的 n 个满足 IMF 条件的分量,这样就有 $r_1 - c_2 = r_2, \dots, r_{n-1} - c_n = r_n$ 。

直至 $r_n(t)$ 为一个单调或直流序列时,筛选结束,由此可得:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (5)$$

信号经过 EMD 得到的一系列 IMF 代表信号的

一系列具有不同时间尺度的信息,它是信号的内在模态特征, r_n 称为残余函数,代表信号的趋势项。

在运用 EMD 方法对原始信号进行分解时,分解得到的 IMF 之间有时会产生频率混叠,进而造成物理过程的重叠,无法用时间过程曲线表示特定的物理过程。一般情况下,在分解之前无法从原始信号中识别出异常信号,需要将 IMF 分量中的异常分量直接滤除,再用样条插值的方法弥补滤除时段的数据,得到新的 IMF 分量。然后将该 IMF 分量与其余的 IMF 分量叠加得到没有异常干扰的数据,再重新对新数据进行 EMD,重新得到新的 IMF 系列,该序列能够得到原始信号真实的物理过程。

3 Hilbert 谱分析方法

采用 EMD 方法可以得到一系列的 IMF,每一个 IMF 可以看作是信号中的一个固有振动模态,需要对每个 IMF 进行分析。Hilbert 谱分析能够表达信号的局部特征,并且可以精确地做出信号的时间-频率-幅值三维信息,这是其他信号分析方法难以做到的,对分析非平稳信号具有明显优势。

在传统的谱分析中,频率需要通过整个数据序列具有恒定幅值的正弦或余弦函数来定义,作为该定义的推广,1937年,Garson 首次提出了瞬时频率的定义。

瞬时频率定义为解析信号相位的导数,并不是任意信号都可以通过 Hilbert 变换得到瞬时频率,只有窄带信号来定义瞬时频率才有意义,对于非平稳信号如何进行瞬时频率的频谱分析是需要深入研究的问题。这就需要对非平稳信号进行 EMD,将原始信号分解为一系列满足窄带条件信号的组合,然后对每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换,得到瞬时频率和瞬时幅值,最后通过叠加得到原始信号的 Hilbert 谱。

对于任意时间序列 $x(t)$,若满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(t)}{t-\tau} d\tau < \infty$,则 $x(t)$ 的 Hilbert 变换可以定义为:

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

式中: P 为柯西主值。对每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换可得:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (7)$$

然后,构造 IMF 的解析信号得:

$$Z_i(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)] = A_i(t)e^{j\theta_i(t)} \quad (8)$$

式中: $A_i(t)$ 和 $\theta_i(t)$ 分别为第 i 个 IMF 分量的幅值函数和相位函数。其表达式为:

$$A_i(t) = \sqrt{c_i(t)^2 + H[c_i(t)]^2}$$

$$\theta_i(t) = \arctan(H[c_i(t)]/c_i(t)) \quad (9)$$

定义瞬时频率为:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} = \frac{\omega_i(t)}{2\pi} \quad (10)$$

忽略残余函数 r_n , Hilbert 谱可以表示为:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n A_i(t)e^{j\theta_i(t)} = \text{Re} \sum_{i=1}^n A_i(t)e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (11)$$

式中:幅值 $A_i(t)$ 和角频率 $\omega_i(t)$ 都是时间 t 的函数。Hilbert 变换是一种具有自适应特性的时频分析方法,可以对时变信号在时频平面上在频率和时间两个变量变化时的规律进行精确的描述,是信号能量完整的时频分布。

4 航天器微小角振动实测数据分析

为了验证采用 EMD 和 Hilbert 谱分析的方法能够有效地检测微小角振动信息,采用某型号卫星开展了星载微小角振动试验。该试验采用动量轮作为卫星结构体的干扰源,当动量轮按照固定频率转动时,会使卫星产生相同频率的微小角振动,此时将光纤陀螺与动量轮安装在同一个舱板上,光纤陀螺的零偏稳定性优于 $0.01(^{\circ})/h$,动态响应频带大于 100 Hz ,随机游走系数为 $0.0005(^{\circ})/\sqrt{h}$,采样频率为 500 Hz ,由于测量微小角振动的时间较短,可以忽略零偏稳定性对测量结果的影响。

开启动量轮,使其按照 4400 rpm 的转速转动,采集光纤陀螺的输出,输出曲线见图 3。

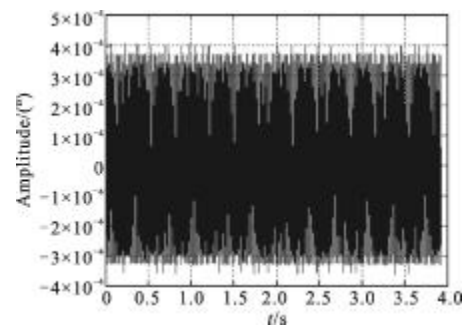


图 3 光纤陀螺的输出曲线

Fig.3 Output curve of fiber optic gyroscope

光纤陀螺的输出数据中包含卫星结构体的微小角振动信息,也包含自身的测量误差和环境的随机干扰,需要将角振动信息分离出来,首先将光纤陀螺的输出数据进行 EMD,分解结果如图 4~6 所示。

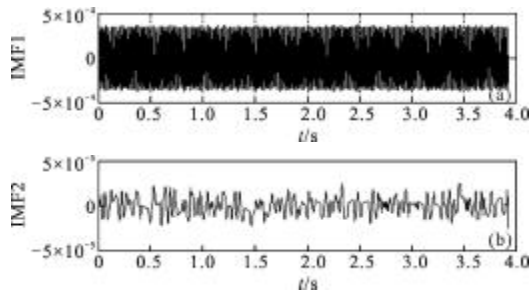


图 4 IMF1-IMF3 的曲线
Fig.4 Curves of IMF1-IMF3

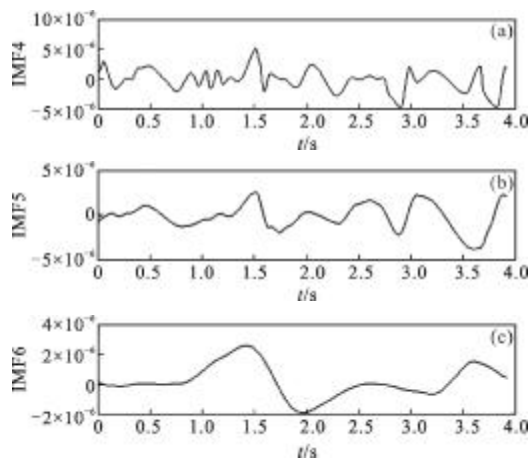


图 5 IMF4-IMF6 的曲线
Fig.5 Curves of IMF4-IMF6

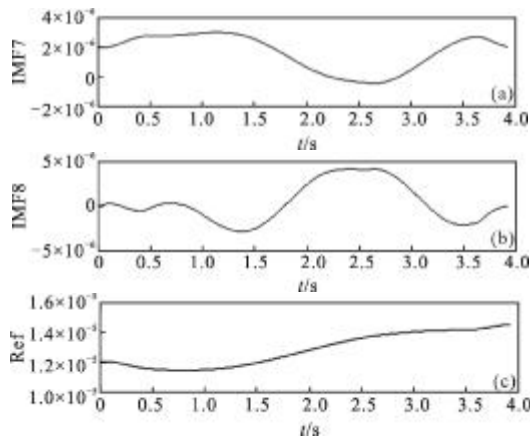


图 6 IMF7-IMF9 的曲线
Fig.6 Curves of IMF7-IMF9

由此可知,利用 EMD 技术,将光纤陀螺的输出信号分解为 8 个 IMF 分量和 1 个残余分量,分解得到的 IMF 没有出现模态混叠的现象,获得的 IMF 分量具有不同的时间尺度,第 1 个 IMF 分量具有最小的时间尺度,随着分解过程的进行,IMF 分量的时间尺度逐渐增大。

经过 EMD 的 IMF 分量具有很好的 Hilbert 特性,分解方法是基于局部特征的,因此瞬时频率的计算具有实际的物理意义。对分解后的 IMF 进行 Hilbert 变换,得到的 Hilbert 谱为三维(时间-频率-幅值)谱形,如图 7 所示。

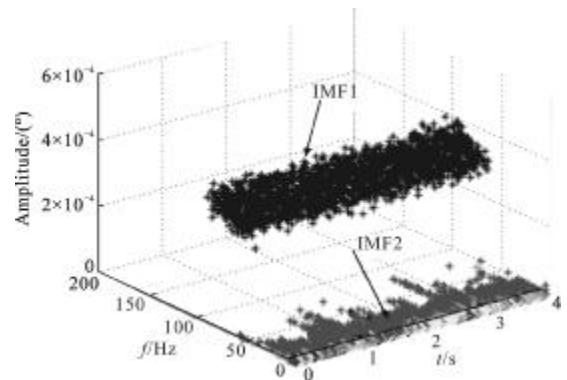


图 7 光纤陀螺的三维 Hilbert 谱

Fig.7 Three dimensional Hilbert spectrum of FOG

Hilbert 谱反映了信号的幅值随时间和频率的变化情况,不同的信号在时频平面上不同的时频段内能量分布是不同的。可以看出:IMF1 包含的信号能量最大,并且频率分布比较集中,图 8 是 Hilbert 谱在时频平面上的投影。

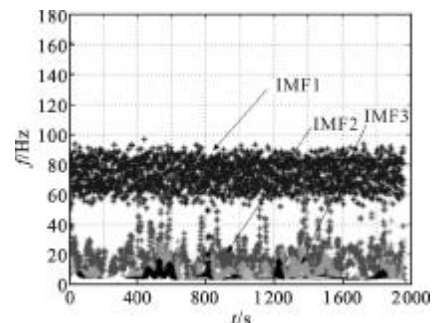


图 8 Hilbert 谱的二维投影

Fig.8 Two dimensional projection of Hilbert spectrum

卫星中动量轮的转动速率为 4 400 rpm,频率大约为 73.33 Hz,这样它对卫星结构体的干扰频率也是 73.33 Hz。对光纤陀螺的输出信号进行 Hilbert 谱

分析,在整个测量时间内,每个 IMF 的频率统计如表 1 所示。

表 1 各个 IMF 的输出频率均值
Tab.1 Average frequency of each IMF

Mode function	Average frequency/Hz
IMF1	73.342 9
IMF2	16.716 6
IMF3	6.286 5
IMF4	2.956 0
IMF5	1.431 4
IMF6	0.527 5
IMF7	0.313 0
IMF8	0.263 1

由此可知,IMF1 的频率与动量轮的转动频率基本一致,反映了动量轮对卫星结构体的高频干扰,即结构体的微小角振动。为了进一步说明这点,引入相关系数的概念,统计 IMF2~IMF8 与 IMF1 的相关系数,计算结果如表 2 所示。

表 2 IMF1 与其余模态函数的相关系数
Tab.2 Correlative coefficients between IMF1 and the other mode functions

Mode function	Correlative coefficient
IMF2 and IMF1	-0.033 8
IMF3vIMF1	-0.010 5
IMF4 and IMF1	-0.008 5
IMF5 and IMF1	-0.005 2
IMF6 and IMF1	-0.003 1
IMF7 and IMF1	-0.002 9
IMF8 and IMF1	-0.002 4

从其余几个模态函数与 IMF1 的相关统计结果来看,IMF2~IMF8 与 IMF1 的相关性很小,并且随着模态函数频率的减小其相关性逐渐减小。因此,当动量轮高速旋转时,光纤陀螺的输出信号中包含结构体的微小角振动信息,通过 EMD 和 Hilbert 谱分析方法能够有效地检测到该信息,该方法对处理非线性非平稳过程具有自适应的特点,对信号的检测具

有显著的改进效果。

5 结 论

文中为实现航天器微小角振动的高精度测量,充分发挥航天器有效载荷的综合性能,结合光纤陀螺原理和结构上的特点,提出采用光纤陀螺直接安装的方式测量航天器的微小角振动,同时提出采用 EMD 技术对光纤陀螺的测量数据进行时间尺度上的分解,然后对分解得到的 IMF 进行 Hilbert 谱分析,将光纤陀螺的测量信息投影到时间-频率-幅值三维坐标中,从而实现微小角振动信号的高精度检测。为验证该方法的有效性,开展了星载测试试验,将动量轮作为干扰源,使卫星的结构体产生微小角振动,通过分析光纤陀螺的实测数据可知,采用 EMD 和 Hilbert 谱分析的方法能够从光纤陀螺的输出信号中有效地检测到航天器的微小角振动信息,这为航天器实现微小角振动的高精度测量提供了新手段和新方法,为航天器综合性能的发挥提供了有利条件。

参考文献:

- [1] Zhao Wei. Analysis on Micro-vibration environment of spacecraft and measurement technology [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(4): 210-214. (in Chinese)
赵伟. 航天器微振动环境分析与测量技术发展[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(4): 210-214.
- [2] Liu Shenggang, Liu Qiao, Li Zeren. Tiny vibration measurement based on all-fiber self-mixing interference [J]. Laser Technology, 2012, 36(1): 29-32. (in Chinese)
刘盛刚, 刘乔, 李泽仁. 基于全光纤自混合干涉技术的微振动测量研究[J]. 激光技术, 2012, 36(1): 29-32.
- [3] Mao Wei, Jin Ronghong, Geng Junping, et al. A time-frequency analysis method for non-stationary signals based on improved Hilbert-Huang transform and its application [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40 (5): 724-729. (in Chinese)
毛炜, 金荣洪, 耿军平, 等. 一种基于改进 Hilbert-Huang 变换的非平稳信号时频分析法及其应用 [J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(5): 724-729.
- [4] Li Hui, Wang Han, Bai Liang, et al. Dynamic characteristic information extraction of hydroturbine based on improved Hilbert-Huang transform method [J]. Proceedings of the

- CSEE, 2011, 31(2): 78-84. (in Chinese)
- 李辉, 王瀚, 白亮, 等. 改进希尔伯特-黄变换方法提取水轮机动态特征信息 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2): 78-84.
- [5] Li Lin, Ji Hongbing. Signal feature extraction based on an improved EMD method [J]. Measurement, 2009 (42): 796 - 803.
- [6] Zhang Chunxiao, Zhang Tao. LSSVM model of oil holdup of oil-water two phase flow using thermal method based on HHT [C]//Proceeding of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics Baoding, 2009.
- [7] Yan Ruqiang, Gao Robert X. Rotary machine health diagnosis based on empirical mode decomposition [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2008, 130(21): 701-712.
- [8] Yu D J, Cheng J S, Yang Y. Application of EMD Method and Hilbert Spectrum to the Fault Diagnosis of Roller Bearings [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(2): 259-270.
- [9] Li Xin, Mei Deqing, Chen Zichen. Feature extraction of chatter for precision hole boring processing based on EMD and HHT [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1291-1297. (in Chinese)
- 李欣, 梅德庆, 陈子辰. 基于经验模态分解和希尔伯特-黄变换的精密孔膛削颤振特征提取 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(6): 1291-1297.
- [10] Mei D Q, Yao Z H, Kong T R, et al. Parameter optimization of time-varying stiffness method for chatter suppression based on magnetorheological fluid controlled boring bar [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2010, 46: 1071-1083.
- [11] Yu Benli, Meng Jun. High-accuracy micro-vibration detector [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(1): 120-122. (in Chinese)
- 俞本立, 孟军. 微振动的高精度测量 [J]. 光电工程, 2006, 33(1): 120-122.