

# 动平衡测试系统中不平衡量的测试方法研究\*

任赛璞<sup>1,2</sup> 吴定祥<sup>2,3</sup> 唐立军<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学物理与电子科学学院 长沙 410114;  
2. 近地空间电磁环境监测与建模湖南省普通高校重点实验室 长沙 410114;  
3. 长沙亿旭智能科技有限公司 长沙 410000)

**摘要:** 针对动平衡测试系统中不平衡量测试精度较低的问题,提出了一种基于希尔伯特-黄变换(HHT)的滤波方法,该方法应用于动平衡测试系统,对获取的转子原始振动信号和转频信号进行分析,可以有效得到不平衡量的质量和相位。方法先对原始振动信号进行经验模态分解(EMD),将振动信号分解为一系列固有模态函数(IMF),再经过希尔伯特(Hilbert)变换计算出各IMF的希尔伯特边际谱,根据转子转频信号滤除掉高低频干扰信号,筛选出针对不平衡量的有效振动信号,根据该信号的幅度和频率即可得到不平衡量的质量和相位。与普通数字滤波方法比较,实验结果表明,该方法用于动平衡测试系统比普通数字滤波方法精度高,效果好。

**关键词:** 动平衡; 不平衡量; HHT

中图分类号: TN911.72 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4030

## Research on testing method of unbalance in dynamic balance testing system

Ren Saipu<sup>1,2</sup> Wu Dingxiang<sup>2,3</sup> Tang Lijun<sup>1,2</sup>

(1. School of Physics and Electronic Sciences, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;  
2. Hunan Province Higher Education Key Laboratory of Modeling and Monitoring on the Near-Earth Electromagnetic Environments, Changsha 410114, China;  
3. Changsha Billion set Intelligent Technology Co., Ltd., Changsha 410004, China)

**Abstract:** A new Hilbert-Huang transform (HHT)-based filtering method is proposed to solve the problem of low accuracy of unbalance measurement in dynamic balancing test system. This method is applied to the dynamic balance test system to analyze the original vibration signal and the frequency signal in order to infer the quality and phase of the unbalance. Firstly, the vibration signal can be resolved into a series of intrinsic mode functions (IMFs) through empirical mode decomposition (EMD). Secondly, the Hilbert marginal spectrum of these IMFs will be figured out by Hilbert transform. Finally, combining with the trochanter's frequency, the useful vibration signal are able to be selected from the original signal. According to the amplitude and frequency of the useful vibration signal, the quality and phase of the unbalance are capable of figured out. The experimental results show that the proposed method is more accurate and more effective than the conventional digital filtering method in the dynamic balance measurement system.

**Keywords:** dynamic balance; unbalance; HHT

## 0 引言

由于设计缺陷,材质不均匀、制造装配误差等因素,转子在运行过程中其主惯性轴偏离旋转轴线,转子就产生了质量不平衡即不平衡量。而这种不平衡量在转动过程中产生的离心力将通过轴承传递给机器,从而使机器产生振动,进而降低机器性能、工作效率等。为了避免出现这种情况,必须对转子进行动平衡测试,消除不平衡的离心力<sup>[1]</sup>。动

平衡测试系统是一种高精度,高效率的测试系统,广泛应用于各种转子如电机转子、汽车轮胎、超精密电主轴等不平衡量的测试。目前市场上普遍采用的测试不平衡量的方法是对传感器采集到的原始振动信号进行快速傅立叶变换后再对信号进行筛选,这种方法抗干扰能力差,信号处理的过程中会出现能量泄漏、幅值变小和精度降低等一系列问题,大大降低了动平衡测试系统的不平衡量测试精度。为此,本文重点探索一种提高动平衡测试系统中不平衡量测试精度

收稿日期:2017-01

\* 基金项目:国家科技支撑计划计划课题(2014BAH28F04)、湖南省教育厅科学研究重点项目(15K009)资助

的方法。

## 1 动平衡测试系统中振动信号的特点及处理方法

由于实际环境的复杂性,动平衡测试系统中传感器采集到的原始振动信号存在各种高低频噪音<sup>[2]</sup>,包括高频白噪声,电源工频干扰,电路辐射干扰,转子同频的振动干扰,甚至空气振动引起的低频脉冲干扰等。而且动平衡测试系统属于随机共振系统,在弱信号检测中受到小频率参数的限制<sup>[3]</sup>,因此如何从大量混合噪音信号中快速准确提取出有效振动信号成为不平衡量测试的关键。

目前普遍采用的滤波方法大致分为两类:一类是传统方法,典型的有傅立叶变换和相关分析等,傅立叶变换和相关分析都是基于时域统计分析,一般的分析对象都为平稳信号;另一类是现代方法,如小波变换,小波变换可以很好地分析非平稳信号。然而这些方法都存在各自的不足,难以满足不平衡测试系统高精度的要求。

### 1.1 传统方法的优点与不足

傅立叶变换把信号从时域分析转换到频域分析,可以快速有效地分析信号的频域特点,能够区分各种频率分量,对谐波造成的波形畸变、频率漂移、零点漂移有较好的抑制作用。但是正是由于这种变换使该方法不具备任何的时域信号,同时该方法抗干扰能力差,并且由于时域截断的影响不可避免会出现能量泄漏、幅值变小和精度降低等问题。另一方面,傅立叶变换是对数据段的平均分析,对非平稳非线性信号缺乏局域性信息,不能有效给出某频率成分发生的具体时间段,不能对信号作局部性分析。动平衡测试系统中的振动信号由于某些突发干扰会产生局部性的脉冲信号,这种情况下,傅立叶变换由于其自身的局限性,不能有效提取有效振动信号,大大降低了不平衡测试精度。

相关分析是随机信号在时域上的统计分析,是用相关系数和相关函数等统计量来描述和研究工程中振动信号的相关关系。从本质上讲,相关分析是一个求均值的过程,因此,它对振动信号中的直流分量和脉冲干扰有很强的抑制能力。无需对原始振动信号整周期采样即能保持较好的精度,同时运算量较小,运算速度较快<sup>[4]</sup>。但是当振动信号中存在同频干扰时,相关分析就存在难以克服的自身缺点,其性能急剧下降,甚至出现与事实不符合的结果,即出现“伪相关”等现象,严重影响测试精度。

小波分析方法是一种窗口大小固定但形状可变的时频域分析方法。其时间窗和频率窗都可以改变,这种变换使得小波变换具有对振动信号自适应的特点,这也克服了傅立叶变换不能在时域和频域上局域化的缺点,可以成功地进行非平稳、强噪声干扰的振动信号分析与检测。而且小波分析法具有灵活多变性,例如信号中混有白噪声时可以采用模极大值法进行滤波;当对滤波速度要求较高时,可以采用小波阈值法滤波;当信号中混有大量干扰时,采用基于小波系数尺度之间的相关性滤波方法具有更好的效果<sup>[5]</sup>。

改进的基于小波分析法的小波包去噪法更是能对信号进行更为细致的划分,进而方便对信号各个频谱范围内噪声分布的了解<sup>[6]</sup>。但小波变换是以傅立叶变换为理论基础,仍然存在窗函数的局限性,无法准确描述频率随时间的变化<sup>[7]</sup>,在存在脉冲干扰的情况下,小波变换同样不能有效提取有效振动信号。

### 1.2 新方法的提出

由于传统方法自身的局限性,亟需一种新的滤波方法应用于动平衡测试系统来提高测试精度。文献[8]提出了一种基于两级 FIR 的滤波去噪法,消除了在计算不平衡量相位信息时相位滞后对相位精度的影响<sup>[8]</sup>,但是这种方法仍然是以傅立叶变换为基础,具有傅立叶变换的局限性。文献[9]提出了一种基于 MUSIC 算法的不平衡量提取方法,能够很好地抑制近频干扰,但是对突发的脉冲干扰信号分析时,可能会出现虚假频谱,影响不平衡量的测试精度。因此,新的滤波方法必须具备时频分析能力,并且具有局域化处理振动信号的特点,而 HHT 很好地满足这些要求,HHT 是由美籍华人 Huang 等人于 1998 年提出的一种新的数据处理方法,可以处理非线性非平稳系统。HHT 主要包含两部分内容:经验模态分解 (empirical model decomposition, EMD) 和 Hilbert (Hilbert spectrum analysis, HAS) 谱分析<sup>[9,10]</sup>。

经验模态分解(EMD)根据信号自身的特征将信号分解为有限个固有模态函数(imf)和一个残余量,每个 imf 必须满足两个条件:1)在整个信号长度上,极值点个数与零点个数的差不超过 1;2)在任意时刻,由极大值定义的上包络线和由极小值定义的下包络线的平均值为 0,即 imf 的上下包络曲线关于时间轴对称<sup>[11]</sup>。EMD 是基于以上两个条件的迭代过程,通过这种迭代,信号被分解为一系列 imf 并且按照频率从高到低排列。

Hilbert 变换是在 EMD 的基础上进行的,假设信号  $x(t)$  可由经验模态分解为:

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

对  $b_i(t)$  ( $i = 1, \dots, n$ ) 做 Hilbert 变换,可得:

$$x(t) = \text{Real} \left\{ \sum_{i=1}^n A_i(t) \exp \left[ j \int \omega_i d(t) \right] \right\} \quad (2)$$

式(2)称为  $x(t)$  的 Hilbert 谱<sup>[12]</sup>,记为  $H(\omega, t)$ 。上面的变换忽略了残余项  $a_n(t)$ ,这是由于经过  $n$  次迭代后,  $a_n(t)$  趋向于一个单值函数或者一个常数,而  $\omega_i(t)$  和  $A_i(t)$  都是时间  $t$  的函数,随时间的变化而变化,因此可以忽略。对  $H(\omega, t)$  积分,得到 Hilbert 边际谱:  $h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt$ ,  $T$  为数据长度<sup>[13]</sup>。经过上述变换得到了 Hilbert 谱和 Hilbert 边际谱, Hilbert 谱描述了信号幅值随时间和频率的变化规律,而 Hilbert 边际谱则表示的是信号幅值在一定频率范围内的分布情况。

根据上面的分析,可以将 HHT 作为一种新的滤波方

法应用于动平衡测试系统中,将传感器采集到的原始振动信号经过 EMD 后得到一系列 imf,通过 Hilbert 变换能够计算出每个 imf 的频率,这些 imf 中包含不同频率的噪音和有效振动信号,而有效振动信号的频率则和转子的转频相同,据此结合转子转频信号可以滤除掉高低频干扰,筛选出有效振动信号。

## 2 实验验证及分析

### 2.1 HHT 法应用于模拟信号滤波

首先对于任意信号,验证 HHT 用于滤波的可行性。现在构建含有高低频和直流干扰的正弦模拟信号:  $x(t) = 5\sin(2 \cdot \pi \cdot 100t) + 2\sin(2 \cdot \pi \cdot 50t) + \sin(2 \cdot \pi \cdot 10t) + 5$ , 其中  $5\sin(2 \cdot \pi \cdot 100t)$  为高频干扰信号,  $2\sin(2 \cdot \pi \cdot 50t)$  为基频信号即需要筛选出的信号,  $\sin(2 \cdot \pi \cdot 10t)$  为低频干扰信号。经过 EMD 后得到 4 个 imf,如图 1 所示。

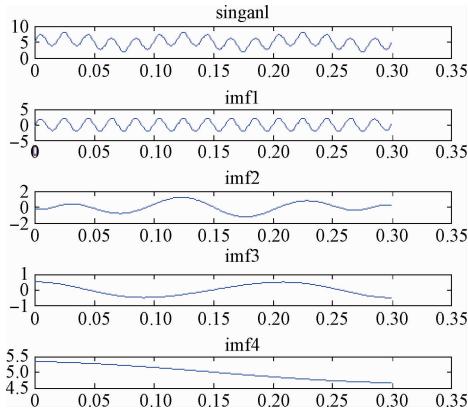


图 1 虚拟振动信号 EMD 结果

其中 singanal 表示模拟信号,imf1、imf2、imf3 是模拟信号经过 EMD 后得到的 3 个正弦信号,imf4 相当于 EMD 过程产生的残余项分量。

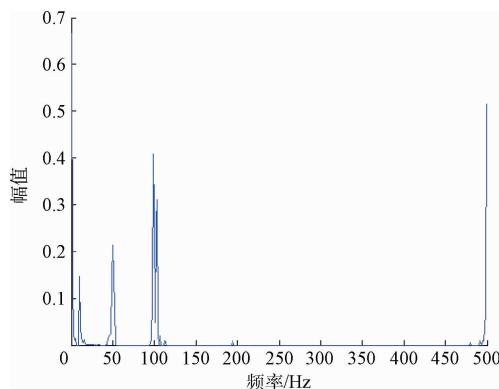


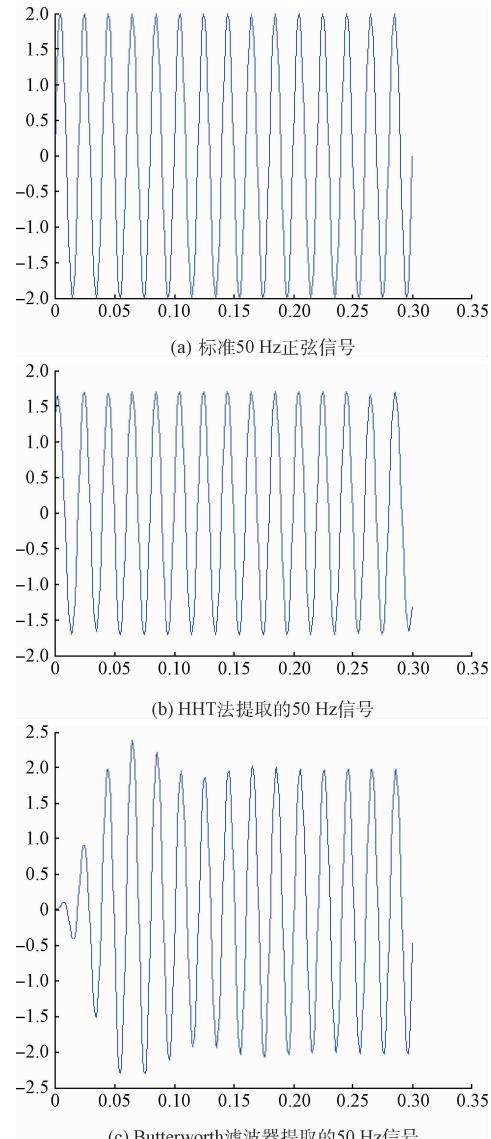
图 2 各 IMF 的希尔伯特边际谱

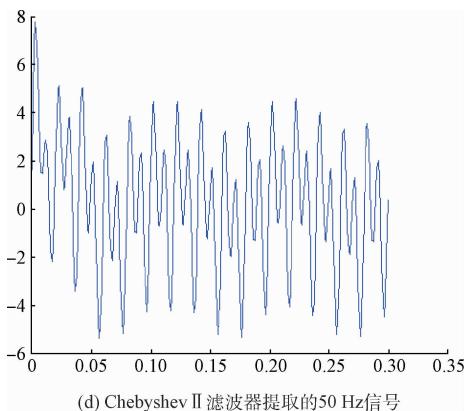
图 2 中的 Hilbert 边际谱反应了 imf1、imf2、imf3 的频率分别为 100、50、10Hz,对应于模拟信号  $x(t)$  中的高频干扰、基频信号和低频干扰,基频信号(即 imf2)从高低频干扰

中被分解出来,说明 HHT 可以用于滤波。而且 EMD 是一种自适应的分解过程,能根据原始信号的不同自动进行调整,使分解出的各 imf 按照频率从高到低排列,这对于动平衡测试系统非常重要,可以根据此特点提取出有效振动信号。

对模拟信号  $x(t)$  分别采用 Butterworth, Chebyshev II 普通带通滤波器进行滤波,选择参数:通带衰减  $ap=3$  dB, 阻带衰减  $as=30$  dB, 通带截至  $wp=[40 \text{ Hz}, 60 \text{ Hz}]$ , 阻带截至频率  $ws=[20 \text{ Hz}, 80 \text{ Hz}]$ 。提取出的基频信号与 HHT 法提取的基频信号对比如图 3 所示。

从图 3 可以看出,当高低频干扰和基频信号较为接近时,图 3(c)中 Butterworth 滤波器提取的基频信号在局部出现畸变情况,甚至出现幅值大于基频信号幅值的增幅现象;图 3(d)中 Chebyshev II 滤波器提取的基频信号严重失真,出现了混频现象;而图 3(b)中 HHT 法提取的基频信号正弦性良好,不存在畸变和频率混叠等问题。





(d) Chebyshev II 滤波器提取的 50 Hz 信号

图 3 传统滤波器和 HHT 法提取的基频信号对比

为了对比 HHT 法提取出的信号和传统滤波器提取出的信号,选取不同的滤波器、通带频率、阻带频率,用提取出的信号和基频信号  $x_1(t) = 2\sin(2 \cdot \pi \cdot 50t)$  的相关系数来作比较,结果如表 1 所示。

表 1 相关系数对比表

滤波器 类型	滤波器参数		
	$wp=[40 \text{ Hz}, 60 \text{ Hz}]$	$wp=[30 \text{ Hz}, 70 \text{ Hz}]$	$wp=[30 \text{ Hz}, 70 \text{ Hz}]$
	$ws=[20 \text{ Hz}, 80 \text{ Hz}]$	$ws=[20 \text{ Hz}, 80 \text{ Hz}]$	$ws=[10 \text{ Hz}, 90 \text{ Hz}]$
Butter worth	0.939 4	-0.147 9	0.661 3
Cheby shev I	0.921 6	0.567 3	0.847 2
Cheby shev II	0.543 9	0.847 1	0.634 0
Elliptic	0.940 2	0.931 6	0.856 5
HHT		0.986 3	

互相关系数表征的是两个信号的相似程度,其数值只是一个比率,并不具有具体的单位,正负号只是代表相关的方向,系数越大表示两信号的相似程度越高<sup>[14]</sup>。从表 1 中可以看出:传统滤波器在进行信号提取时,当选择不同的参数时,得到的信号和实际信号的相似度有很大的差异,例如 Butterworth 滤波器在通带截至频率相差仅有 10 Hz 的情况下,相关系数差距达到了 0.791 5。而参数的确定则是人为地选择,在此过程中就可能存在很大的误差。而 HHT 法提取的基频信号和原信号相关系数达到了 0.986 3,较之经典的滤波器提取的信号具有更高的相似度,而且本方法是一种自适应的信号处理方法<sup>[15]</sup>,能够自适应地产生“基”,即由筛选过程产生各 imf,避免了信号不同可能产生的误差,提高了信号提取的精度。

## 2.2 HHT 应用于动平衡测试系统

由于外界干扰的影响,动平衡测试系统中的原始振动信号远比模拟情况复杂,压电加速度传感器采集到的振动信号,经过电荷转换,滤波放大等预处理后送入 CPU 进行

数字滤波,传统数字滤波器滤波后如图 4 所示。

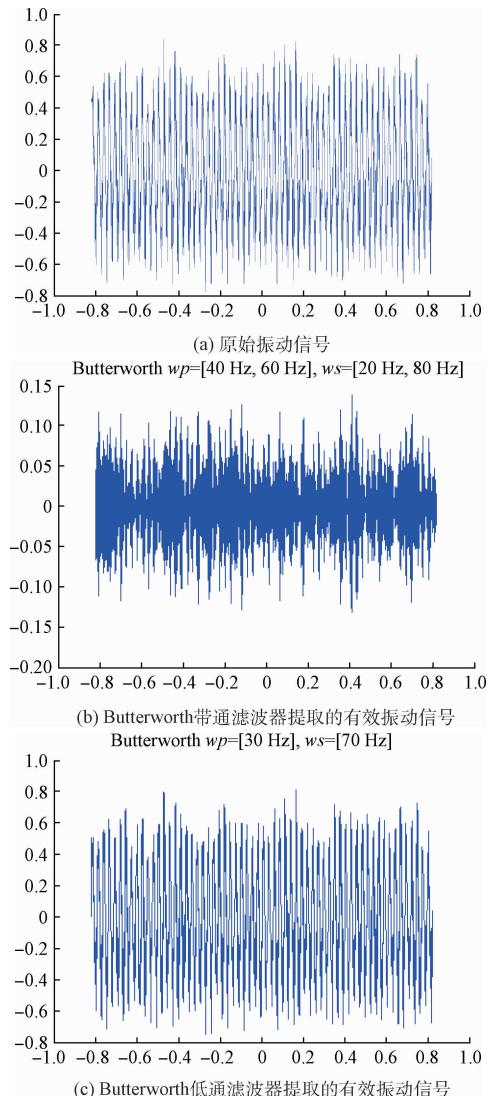


图 4 原始振动信号及传统滤波器滤波结果

从图 4(a)可以看出原始振动信号中含有大量高低频干扰,有效振动信号基本淹没在强噪音中;图 4(b)为 Butterworth 带通滤波器滤波后的结果,由于强噪音的干扰,此时传统滤波器基本失去其滤波能力,甚至引入新的噪音;图 4(c)为 Butterworth 低通滤波器滤波后的结果,由于大量近频干扰的影响,导致滤波后和滤波前信号无明显差别,不能提取有效振动信号。可以看出当采用传统数字滤波器时,选择不同的参数时,滤波结果也会有很明显的差别,为了准确提取有用振动信号,需要选择最优参数来进行滤波,这就增加了整个系统的工作时间,大大降低了系统的工作效率。

接着,采用 HHT 法对原始振动信号进行信号提取,通过 EMD 原始振动信号被分解为不同的频率成分,如图 5 所示。

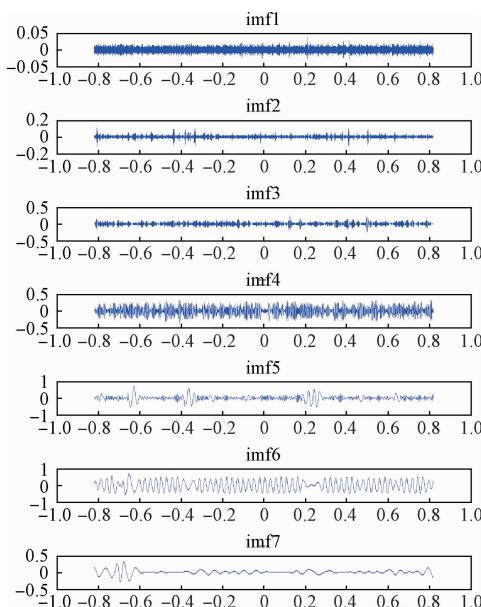


图 5 原始振动信号 EMD 结果

图 5 表明原始振动信号经过 EMD 后得到 6 个 IMF, IMF1-IMF5 为高频和白噪声等干扰, IMF7 为 EMD 分解过程中产生的残余量。IMF6 近似为一正弦信号, 边际谱得出此信号的频率为 40 Hz, 如图 6 所示。

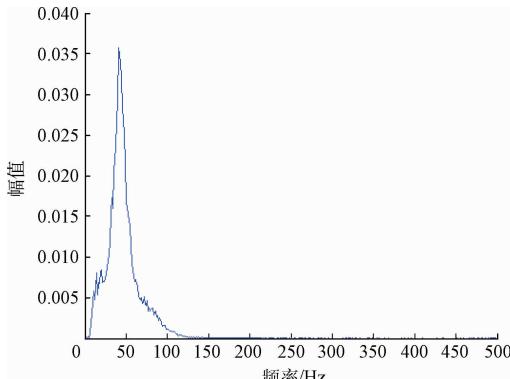


图 6 IMF6 边际谱

而测得转子的转频信号为 40 Hz, 所以 IMF6 即为提取的有效振动信号。虽然由于高频干扰以及残余量的影响使 IMF6 的正弦信号发生了一定程度的畸变(如图 6 中 IMF6 在 0.2 s~0.3 s 处), 但是在大部分采样时间段, 信号呈现完美的正弦周期性, 可以据此提取出有效振动信号, 精确地计算出不平衡量的质量及相位信息。可见, 此方法能从强噪声污染的信号中提取出有用信号的幅值和相位信息, 并且具有较高的计算精度, 同时避免了采用普通滤波器人为选择参数可能引起的误差, 对动平衡测试精度及效率的提高具有明显的帮助。

### 3 结 论

针对动平衡测试系统中不平衡量测试精度较低的问

题, 基于 HHT 的滤波方法应用于动平衡测试系统中。可以提高动平衡测试系统中不平衡量测试精度。该方法能够对原始振动信号自适应的经验模态分解, 把有效振动信号从大量高低频干扰中分解出来, 使得提取出的有效振动信号具有更高的精度。该方法在动平衡测试领域具有良好的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] 陶利民. 转子高精度动平衡测试与自动平衡技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [2] 赵休金. 动平衡测试系统的理论研究与仿真测试[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [3] XING H Y, LU CH X, ZHANG Q. Frequency modulated weak signal detection based on stochastic resonance and genetic algorithm[J]. Instrumentation, 2016(1): 41-49.
- [4] 郭俊华, 伍星, 柳小勤, 等. 转子动平衡中振动信号幅值相位的提取方法研究[J]. 机械电子, 2011(10): 6-10.
- [5] 兰芸. 基于小波变换的振动信号去噪方法研究[D]. 江门: 五邑大学, 2008.
- [6] 孙萍萍. 基于小波包理论的激波信号去噪研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(7): 38-42.
- [7] 李舜酩, 郭海东, 李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1907-1915.
- [8] 齐伟, 赵鼎鼎, 蔡萍. 基于 MUSIC 算法的动不平衡信号提取方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1240-1246.
- [9] 徐娟, 罗铁超, 张利, 等. 在线动平衡中振动信号提取方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(11): 972-976.
- [10] 苗晟, 王威廉, 姚绍文. Hilbert-Huang 变换发展历程及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8): 812-818.
- [11] 梁兵, 汪同庆. 基于 HHT 的振动信号趋势项提取方法[J]. 电子测量技术, 2013, 36(2): 119-122.
- [12] 陈一贤. HHT 方法分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [13] 姆琦. 改进 HHT 方法及其在故障信号分析中的应用[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2006.
- [14] 张世强, 吕杰能, 蒋峰, 等. 关于相关系数的探讨[J]. 数学的实践与认识, 2009(19): 102-107.
- [15] 李勇. 基于 HHT 的谐波检测分析与研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.

### 作者简介

任赛璞, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为信号检测与处理。

E-mail: 347394325@qq.com

吴定祥, 1963 年出生, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为信号检测与处理。

E-mail: 54965111@qq.com