

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.1.03

基于振动信号检测构件残余应力

马风雷, 范高铭*, 陈小帅

(长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 针对构件残余应力信号的非平稳、非线性特征, 采用基于 EMD 的 Hilbert 变换 (HHT) 对构件的残余应力检测进行了研究。由残余应力对构件性能的影响, 采集分析了构件残余应力信号, 给出了判断指标以及时间幅频积。

关键词: 希尔伯特-黄变换; 残余应力; 应力检测; 非平稳信号

中图分类号: TH 122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2018)01-0014-06

Detection of residual stress of component based on vibration signal

MA Fenglei, FAN Gaoming*, CHEN Xiaoshuai

(School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: To the non-stable nonlinear residual stress of some components, Hilbert-Huang Transform based on Empirical Mode Decomposition (EMD) is applied to study the stress. According to the influence of residual stress on the components, the stress is sampled and analyzed to five judgment indexes and time amplitude frequency product.

Key words: Hilbert-Huang Transform; residual stress; stress measurement; non-stable signal.

0 引言

在工业生产中, 人们对于机械构件的结构稳定性、疲劳强度以及使用寿命等有了严格的要求。由于机械构件在锻压、焊接、装配、切削等机械制造过程中都存在一定的残余应力, 其尺寸和结构稳定性都受到了严重的影响。此外, 机械构件的残余应力还会导致机械构件的结构疲劳强度迅速

下降, 进而产生塑性变形和开裂等工艺问题, 最终减少机械构件的使用寿命。与此同时, 材料的多种性能也会因为残余应力的存在而遭受一定程度的破坏^[1]。因此, 如何检测机械构件中是否存在残余应力已经成为制约机械构件使用寿命的关键^[2-4]。有效控制构件的残余应力不但有利于确保构件的安全性和可靠性, 而且对日常生活和生产有着十分重要的意义。

收稿日期: 2017-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075041); 吉林省教育厅科技发展基金资助项目(2014124)

作者简介: 马风雷(1962—), 男, 汉族, 吉林长春人, 长春工业大学教授, 博士, 主要从事机械结构有限元分析及可靠性设计方向研究, E-mail: mafenglei@ccut.edu.cn. * 通讯作者: 范高铭(1993—), 男, 汉族, 吉林松原人, 长春工业大学硕士研究生, 主要从事精密加工与检测技术方向研究, E-mail: 395482870@qq.com.

由于接触几何关系、悬挂刚度、阻尼等非线性因素,通过加速度传感器所检测的振动信号往往呈现出非线性、非平稳的特征。窗口傅里叶变换能够同时提供信号的时域和频域的局部化信息,但是它的时频窗口的大小是固定不变的,只能适合分析所有特征尺度都差不多的信号,窗口没有自适应性,不适用于分析常见的多尺度信号。而小波分析、高阶谱分析等方法不具有自适应的信号分解特性,虽然小波基在整体上有可能是最好的,但对某一个小块区域而言却可能是最差的,导致处理效果不是很好。希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)被人们认为是近些年对以傅里叶变换为基础的线性和稳态谱分析的一个重大改革与突破,是一种全新的时频分析方法,特别是能够同时反映信号的时域信息和频域信息,为残余应力的检测提供了一种新途径和新方法^[5-8]。

1 HHT 基本理论

1998年,美国国家航空和宇航局黄愕(Norden E Huang)等提出了 HHT,得到了美国政府

的高度重视。HHT 由 EMD 和 Hilbert 变换两部分组成。它的基本思想是,将原始信号经 EMD 分解获得一系列被称为固有模态函数的组合,利用解析信号相位求导定义对 IMF 进行计算,得出信号有物理意义的瞬时频率和瞬时幅值,进而获得信号的幅值-频率-时间的三维谱分布——Hilbert 谱。

一个本征模式函数的两个特点:

1) 在全部数据段中,过零点个数与极值点的个数均须相等,或最多相差不多于一个;

2) 无论是哪个点,不管是由局部极小值点所构成的包络线,还是基于局部极大值点所构成的包络线,其均值均为零。

EMD 分解原理如下:

1) 将信号全部的局部极值点确定下来后,把全部的局部极大值点用 3 次样线条连接在一起,构成上包线路,同样连接全部的局部极小值点,使之成为下包络线,针对所形成的上、下包络线来讲,需包络全部的数据点。

信号 $x(t)$ 的上下包络线及均值 $m(t)$ 如图 1 所示。

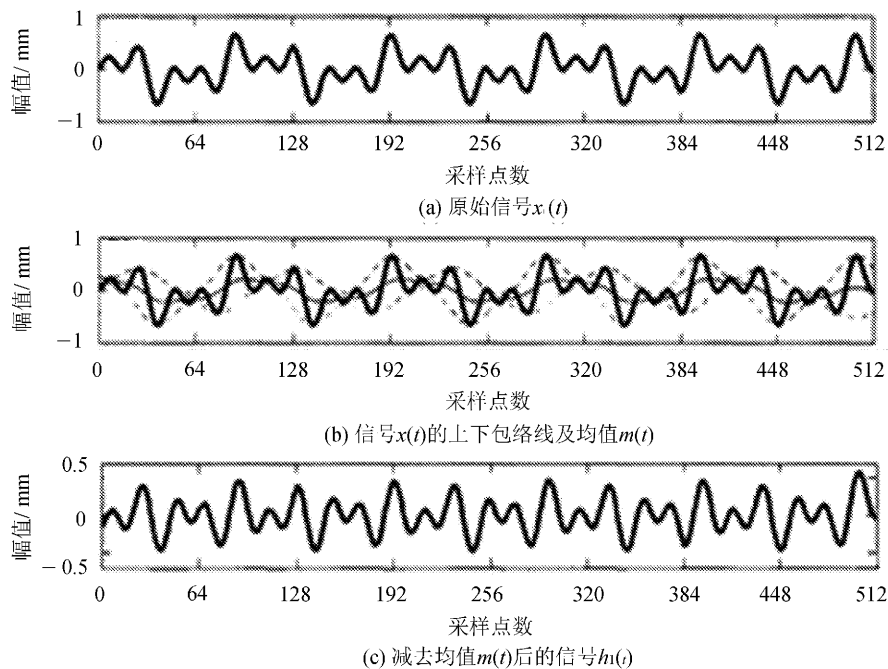


图 1 信号 $x(t)$ 的上下包络线及均值 $m(t)$

由图 1 可见,横坐标表示数据点数,纵坐标表示幅值,图 1(a)为原始信号 $x(t)$,图 1(b)实线为原始信号 $x(t)$,两条虚线表示用这些极大、极小值拟合的上、下包络线,细实线表示均值 $m(t)$;图

1(c)为减去均值 $m(t)$ 后的信号 $h_1(t)$ 。

2) 从待处理信号 $x(t)$ 中减去其上、下包络线均值 $m(t)$,得到 $h_1(t) = x(t) - m(t)$ 。

3) 若 h_1 为一个 IMF,则 h_1 即为 $x(t)$ 的首个

分量 c_1 。若 h_1 与 IMF 的条件不相符,将 h_1 当作原始数据,重复过程(1),便可得到上、下包络线的平均值 m_{11} ,然后再对 $h_{11} = h_1 - m_{11}$ 与 IMF 的条件是否满足进行判断,若不满足,可重复循环,直到满足 IMF 条件。记作 $c_1 = h_{1k}$,那么 c_1 便是信号 $x(t)$ 的首个满足 IMF 条件的分量。

4) 对 $r_1 = x(t) - c_1$ 重复上述分解过程。EMD 方法以信号的局部特征时间尺度为基础,可以将任意一个复杂信号 $x(t)$ 进行分解,使之成为 n 个固有模态函数与 1 个残余量 r_n 的和,其中,固有模态函数分量为 c_1, c_2, \dots ,是满足 IMF 条件的分量,称为 IMF 分量,分别涉及信号自高至低各频率段的成分,各分量有着不同的频率成分,且还伴随信号 $x(t)$ 的变化而发生改变,而 r_n 在其中所代表的是 $x(t)$ 的中心趋势。

对经过 EMD 分解到的各 IMF 分量一般为实信号,为了获得 Hilbert 谱,必须对 IMF 分量作 Hilbert 变换,并作为虚部与原 IMF 分量(实部)一起形成解析信号。

设 $f(t)$ 为任一实信号,则其 Hilbert 变换为:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

由原信号及其 Hilbert 变换组成的解析信号为:

$$H(t) = x(t) + i\hat{x}(t) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j(t) e^{i\omega_j(t)t} \quad (2)$$

式中: $a_j(t)$ ——信号的瞬时幅值;

$\omega_j(t)$ ——信号的瞬时频率。

二者均为时间的函数,描述瞬时幅值、频率以及时间的关系,即为 Hilbert 谱。

2 焊接钢板残余应力的检测

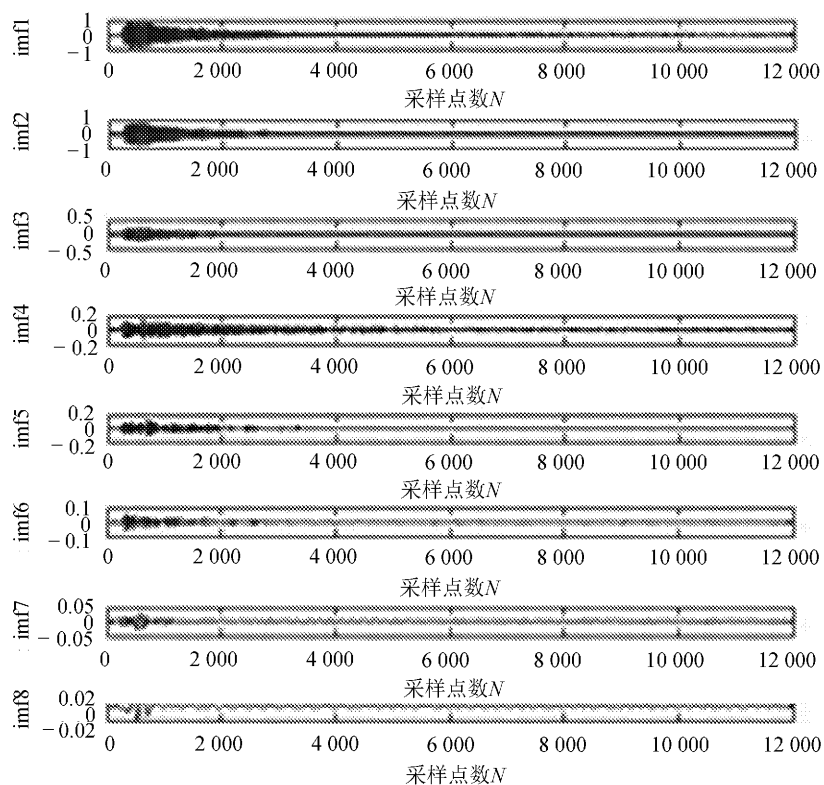
各类机械加工过程都会导致机械构件内存在一定的残余应力。残余应力会对机械构件的静力强度、疲劳强度及抗腐蚀性能等产生巨大的影响,缩短机械构件的使用寿命,同时残余应力也成为机械构件稳定性的重要评价指标。当机械构件存在残余应力时,其固有频率和阻尼比等物理参数会发生变化。对于机械系统来说,振动位移响应函数是由一系列固有振动模式函数构成,固有振动模式函数包含有机系统的固有频率和阻尼比等物理参数信息。这些物理参数是可以通过检测

构件的振动信号来提取的。所以,机械构件的振动信号中包含有残余应力的相关物理参数信息,也就是说,可以通过对机械构件振动信号的分析处理来检测构件的残余应力。

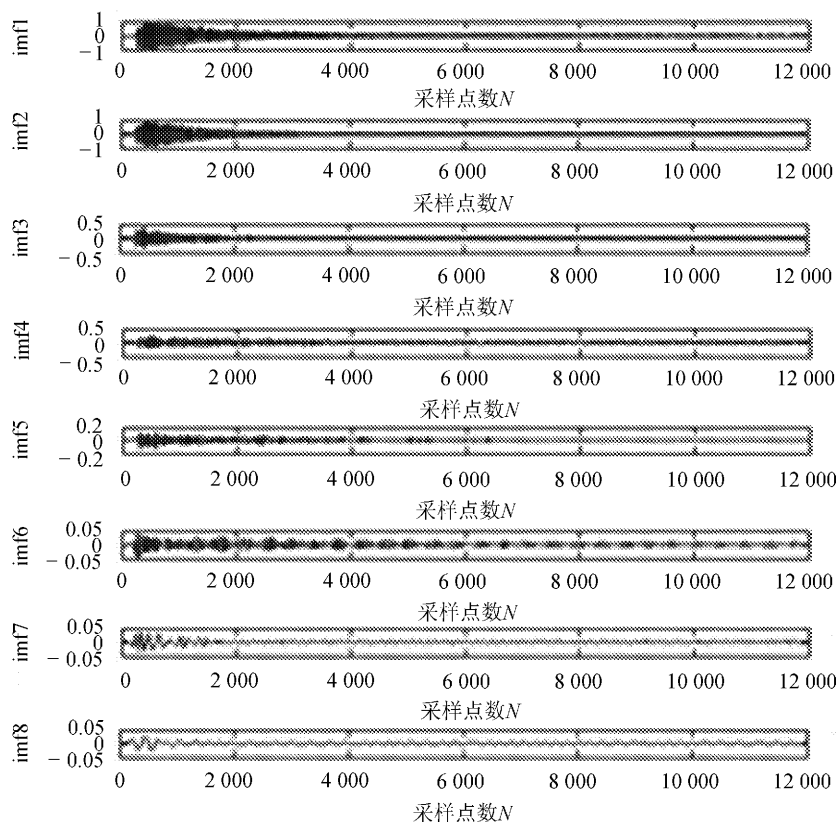
未经处理的焊接钢板振动信号图、第一次以及第二次热时效处理后的焊接钢板振动信号图中很难判断出焊接钢板是否存在焊接残余应力。利用钻孔法对未经处理的焊接钢板进行残余应力检测,得到的检测结果表明,焊缝附近点的残余应力值明显大于两端附近点的残余应力值,并且为拉应力,而两端位置附近则为压应力,对称点的残余应力值基本相等。对第一次热时效处理后的焊接钢板进行残余应力检测,得到的检测结果表明,所有点的残余应力值都大幅度减小了,而且越靠近焊缝的点,其残余应力减少量就越大。对第二次热时效处理后的焊接钢板进行残余应力检测,得到的检测结果表明,第二次热时效处理后的焊接钢板基本不存在焊接残余应力。这也为基于 HHT 方法对钢板焊接残余应力的研究提供了试验验证。

为此,采用 HHT 方法对振动信号做进一步分析。针对未经处理的焊接钢板、第一次热时效处理后的焊接钢板以及第二次热时效处理后的焊接钢板测出振动信号,分别求出 3 个振动信号 Hilbert 谱,再计算其时间幅频积。比较时间幅频积数值的大小,可以判定各板的残余应力状态。对未经处理的焊接钢板、第一次热时效处理后的焊接钢板以及第二次热时效处理后的焊接钢板的振动信号分别利用 EEMD 方法对其进行分解,都得到 14 个 IMF 分量,未经处理的焊接钢板、第一次热时效处理后的焊接钢板以及第二次热时效处理后的焊接钢板的振动信号分解得到的前 8 阶 IMF 分量,如图 2 所示。

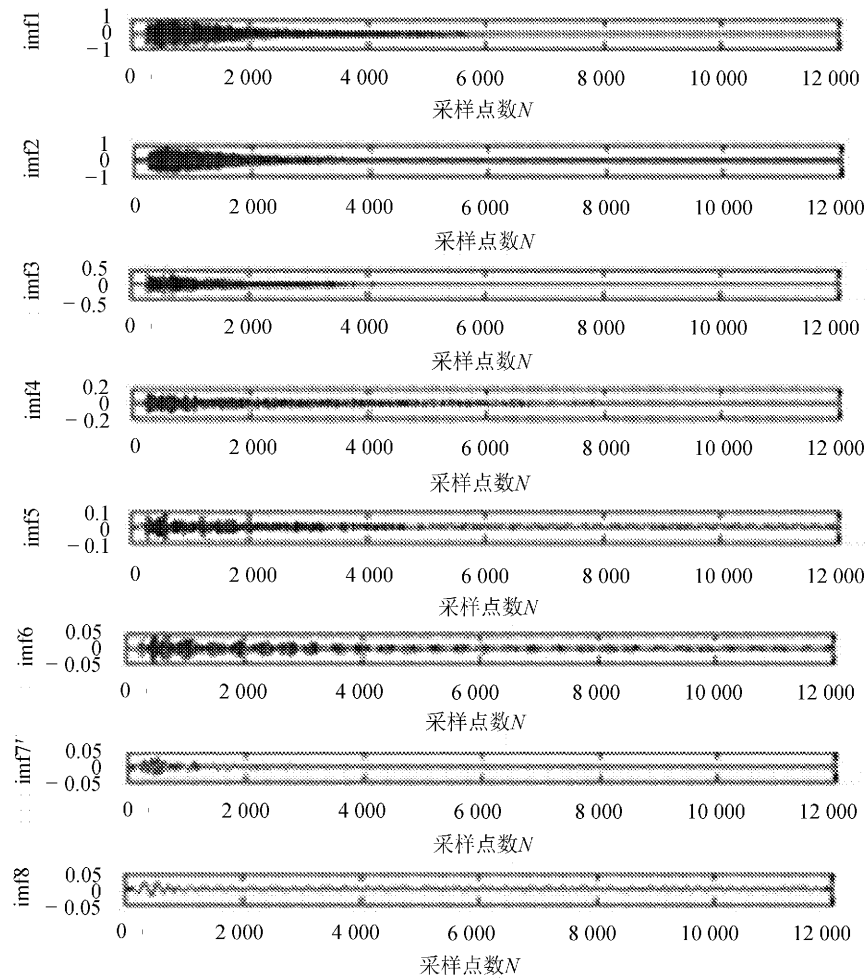
通过图 2 可知,前 6 阶 IMF 分量均包含了对应信号的绝大多数能量,采用前 6 阶 IMF 分量的 Hilbert 谱可以代表其总体状态。分别对未经处理的焊接钢板、第一次热时效处理后的焊接钢板以及第二次热时效处理后的焊接钢板振动信号前 6 阶 IMF 分量进行 Hilbert 变换,得到各自的 Hilbert 谱,横坐标表示时间 t 的采样点数 N ,纵坐标采用归一化频率 f ,竖坐标是幅值 A ,如图 3 所示。



(a) 未经处理的焊接钢板振动信号的前 8 阶 IMF 分量



(b) 第一次时效处理后的焊接钢板振动信号的前 8 阶 IMF 分量



(c) 第二次时效处理后的焊接钢板振动信号的前 8 阶 IMF 分量

图 2 焊接钢板处理前后的 IMF 分量

为了比较 3 个 Hilbert 谱图的差异,引入了时间幅频积 S 作为判别参数。即:

$$S = A \cdot f \cdot t$$

式中: t ——采样点数与采样周期的积。

该指标反映了 Hilbert 谱各时频区域的能量分布情况,从而用于描述构件残余应力的状态,时间幅频积越大,表示能量在高频区域内所占比例越大,滞后时间越大,反之则越小。

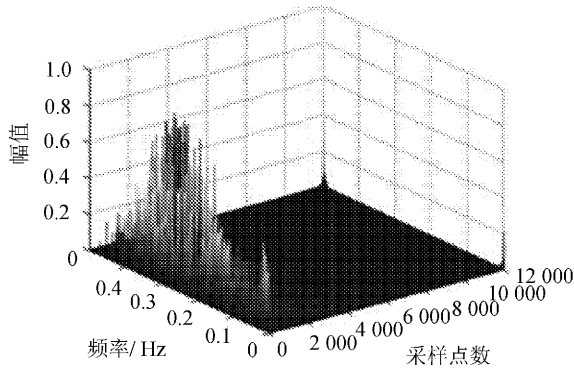
当构件残余应力状态不变时,Hilbert 谱各时频区域的能量分布变化不大,时间幅频积基本保持不变。对于一个残余应力未知的焊接钢板,对其振动信号进行 HHT 方法得到 Hilbert 谱,进一步求得时间幅频积,然后对此焊接钢板进行热时效处理,再次对其振动信号进行 HHT 方法得到 Hilbert 谱,算出时间幅频积,如果时间幅频积基

本不变,就认为此焊接构件几乎不存在焊接残余应力,反之焊接钢板还存在焊接残余应力。

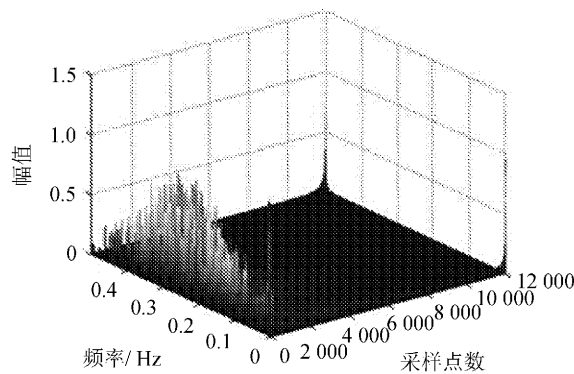
对图 3 中的 3 幅 Hilbert 谱图分别计算时间幅频积,未经处理的焊接钢板的时间幅频积 S_1 为 66.030 1,第一次热时效处理后的焊接钢板的时间幅频积 S_2 为 41.963 7,第二次热时效处理后的焊接钢板的时间幅频积 S_3 为 40.159 6。 S_1 与 S_2 相差接近 20,表明未经处理的焊接钢板存在残余应力, S_2 与 S_3 差异很小,表明第一次热时效处理后的焊接钢板几乎不存在残余应力。

利用 HHT 方法得到的时间幅频积变化情况与钻孔法检测到的残余应力值变化情况保持一致。

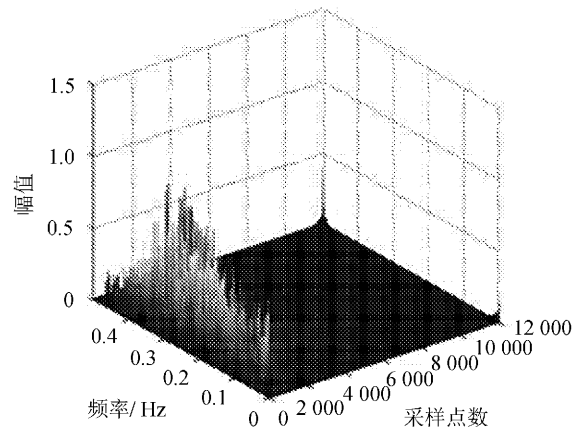
因此,可以采用 HHT 方法检测焊接钢板是否存在焊接残余应力。



(a) 未经处理的焊接钢板振动信号 Hilbert 谱图



(b) 第一次热时效处理后的焊接钢板振动信号 Hilbert 谱图



(c) 第二次热时效处理后的焊接钢板振动信号 Hilbert 谱图

图3 焊接钢板处理前后的 Hilbert 谱图

3 结 语

提出了一种新的方法来检测残余应力,即基于希尔伯特-黄变换的残余应力检测方法,并提出了应用时间幅频积作为残余应力新的判断指标,实验证明,基于希尔伯特-黄变换残余应力检测的方法在焊接构件残余应力检测方面的可行性与合理性。由此可知,希尔伯特-黄变换在今后评定机械零件的质量过程中有着较好的应用价值与前景。

参考文献:

- [1] 王海斗,朱丽娜,邢志国,等.表面残余应力监测技术[M].北京:机械工业出版社,2013:26-27.
- [2] 高永毅,林丽川.一种新的残余应力评估方法[J].中南工业大学学报,1996,27(2):234-237.
- [3] 高永毅,苏志霄,焦群英,等.残余应力对构件固有频率响应的讨论[J].机械强度,2002,24(2):289-292.
- [4] 高永毅,刘德顺.利用实验模态分析进行残余应力评估的研究[J].振动与冲击,2005,24(5):111-114.
- [5] Huang N E. A new method for nonlinear and non-stationary time series analysis: empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis[J]. Proceedings of SPIE,2000,4056(197):899-955.
- [6] 贾民平,凌娟,许飞云,等.基于时序分析的经验模式分解法及其应用[J].机械工程学报,2004,40(9):54-57.
- [7] 英平杰.基于 HHT 方法的机械系统模态参数识别[D].杭州:浙江大学,2011.
- [8] 马风雷,郑永涛,姜振海.希尔伯特-黄变换轴瓦异响故障诊断[J].长春工业大学学报:自然科学版,2014,35(1):55-59.