

文章编号: 1000-4750(2012)05-0134-07

基于峰频带通信号 HHT 变换的 框架结构试验模态分析

谢献忠¹, 黄志刚¹, 陈文新¹, 易伟建²

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湘潭 411201; 2. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 该文提出了基于峰频带通信号希尔伯特-黄变换(HHT)的结构模态参数识别方法。该方法将小波包带通滤波技术与 HHT 模态参数识别技术结合, 有效的抑制了信号分解过程中的模态混叠现象。采用去端点法较好地解决了带通滤波和经验模式分解(EMD)所引起的端点效应问题, 提高了算法的稳定性和可靠性。在此基础上, 利用实验室条件下测得的脉冲加速度响应信号有效地识别出钢筋混凝土框架结构模型的模态参数, 并和理论计算值进行了比较。结果表明: 弯剪层模型比纯剪切层模型更能反映框架结构整体横向振动的动力特性。

关键词: 混凝土框架结构; 模态分析; 希尔伯特-黄变换; 带通滤波; 试验研究

中图分类号: TU311.3 文献标志码: A

EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURE BY HILBERT-HUANG TRANSFORMATION BASED ON BANDPASS SIGNALS

XIE Xian-zhong¹, HUANG Zhi-gang¹, CHEN Wen-xin¹, YI Wei-jian²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: An improved Hilbert-huang transformation (HHT) method based on bandpass signals is proposed for the identification of modal parameters of civil engineering structures, which is combined with the bandpass filter technology of wavelet packet transformation, efficiently restraining the phenomenon of modes mixing in empirical mode decomposition (EMD). To avoid the endpoint effect in the process of EMD and bandpass filter, the method of eliminating endpoints is adopted and it improves the reliability and stability of algorithm. The experiment modal analysis was conducted on a reinforced concrete frame structure, which is inspired by a pulse excitation, and compared with the theoretical calculations. The identification results show that the model considering node rotation is more accurate to reflect the dynamic characteristics on the transverse vibration of the structure.

Key words: concrete frame structure; modal analysis; Hilbert-huang transform; bandpass filter; experimental study

Hilbert-Huang 变换^[1](简称 HHT)是由美籍华人 Huang N E 于 1998 年提出的一种数据处理方法, 由

经验模式分解(empirical mode decomposition, 简称 EMD)和 Hilbert 变换两部分组成, 其核心是 EMD,

收稿日期: 2010-08-05; 修改日期: 2011-03-23

基金项目: 湖南省教育厅项目(09C381)

通讯作者: 谢献忠(1968—), 男, 湖南双峰人, 教授, 博士, 主要从事结构动力学研究(E-mail: xianzhongx@163.com).

作者简介: 黄志刚(1985—), 男, 湖南常德人, 硕士生, 从事结构参数识别研究(E-mail: 598026318@qq.com);

陈文新(1977—), 男, 湖南冷水江人, 硕士生, 从事模态参数识别研究(E-mail: wenxinch77@163.com);

易伟建(1954—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构工程研究(E-mail: hunuyi2006@gmail.com).

此方法一经提出就在不同的工程领域中得到了迅速有效的应用。在结构模态参数方面, Yang^[2]等将 HHT 用于线弹性结构的自由振动响应, 通过计算瞬时频率、瞬时幅值进而得到结构的频率和阻尼比。陈隽^[3]等进一步将 HHT 应用于具有密集模态的线性结构的阻尼识别。文献[4-5]将 HHT 和随机减量法结合, 分别对环境激励作用下的高层建筑、桥梁的模态参数进行了识别, 前者还应用巴特沃斯滤波器对加速度实测数据进行了滤波处理。文献[6]将 HHT 和自然激励技术相结合, 基于带通滤波后的振动台试验数据对模型拱坝的模态参数进行了有效识别。段希波^[7]等结合了 HHT 和状态变量分析方法对多自由度系统的模态频率和阻尼比进行了辨识。黄天立^[8]等研究了基于 HHT 的多自由度非线性结构系统识别方法。韩建平^[9]等结合 HHT 和随机子空间识别技术 (SSI) 对一个 12 层的钢筋混凝土框架模型的模态参数进行了有效识别。Xu^[10]等采用 HHT 对在台风作用下深圳地王大厦的动力响应数据进行了处理与分析, 结果表明, 在阻尼比识别方面, HHT 方法比 FFT 半带宽方法具有更高的精度。

HHT 变换是一种基于数据本身的时间尺度特征进行自适应分解的时频信号处理方法, 不需要任何先验的基函数, 能够处理线性或非线性、稳态或非稳态信号。对于自由振动响应, 运用 HHT 变换可直接建立结构的时频分析谱, 并识别固有频率、振型和阻尼比等模态参数; 对于随机响应信号, HHT 变换与随机减量技术、自然激励技术等传统方法相结合, 分离出随机响应信号中的自由振动信号或脉冲响应信号, 同样可以识别结构的各种模态参数。

HHT 变换的核心是 EMD 算法, 该算法在理论上还不够完善。由于端点处极值的不确定性, 在包络线数据拟合时会产生计算误差, 导致端点效应问题, 而且随着分解层数的增加, 端点效应就会由端点处逐渐向里面传播。此外, 模态混叠也是 EMD 算法中必须解决的关键问题。如果一个高频波间断地出现在一个低频信号中, 那么将会导致两种信号无法正常分离, 产生模态混叠现象。

本文利用小波包变换的频率空间剖分特性建立相应的带通滤波器, 在 MATLAB 软件平台编制通用的带通滤波程序, 提出了图 1 所示的基于峰频带通信号 HHT 变换的结构模态参数识别方法。首先根据脉冲信号的自功率谱确定结构固有频率的

大致分布区间; 其次采用小波包带通滤波器对信号进行滤波处理, 得到包含各峰值频率在内的带通响应信号; 再次对带通信号进行 EMD 分解, 得到各阶固有模式函数 (Intrinsic Mode Function) 的分量函数, 并选取能量最强的分量函数作为结构固有模态函数; 最后对固有模态函数进行希尔伯特变换以识别结构模态参数。信号滤波和模态分解所引起的端点效应问题采用去端点的办法解决。在此基础上, 利用实验室条件下测得的脉冲加速度响应信号识别了钢筋混凝土框架结构模型的模态参数。

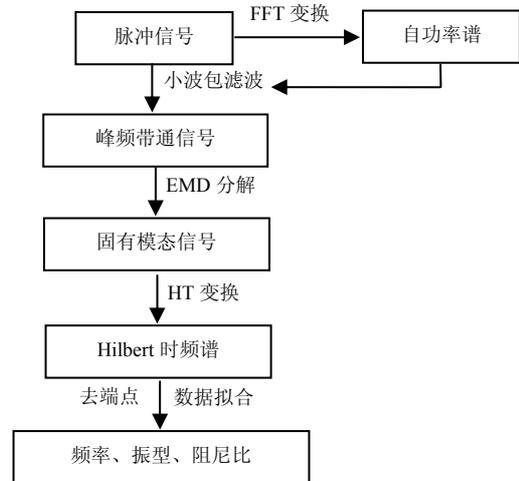


图 1 模态参数识别流程图

Fig. 1 Diagram of modal parameter identification

1 基于小波包变换的信号带通滤波

小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$ 具有如下形状和位置均可改变的矩形时频窗^[11]:

$$[(b + at^*) - a\Delta_t, (b + at^*) + a\Delta_t] \times \left[\frac{\omega^* - \Delta_\omega}{a}, \frac{\omega^* + \Delta_\omega}{a} \right] \quad (1)$$

其中: t^* 和 Δ_t 分别表示 $\psi(t)$ 的中心位置和半径; ω^* 和 Δ_ω 分别表示 $\hat{\psi}(\omega)$ 的中心频率和半径; b 为平移因子; a 为尺度因子, 且 a 一般取为 $2^j (j \in Z)$ 。

当尺度 a 较大时, 小波将以较高的频域分辨率和较低的时域分辨率来分析信号的低频分量; 当尺度 a 较小时, 小波又以较高的时域分辨率和较低的频域分辨率来分析信号的高频分量。 b 的变化可以使我们在时频分辨率不变的情况下沿着时间轴观察信号的不同部分。

对于一个有限频带的信号, 不妨设它是频率在 $[0, \Omega]$ 中的信号。对这个信号进行小波分解, 就是把

采集到的信号分成了低频部分和高频部分两个信号,且这两个信号的频带分别是 $[0, \Omega/2]$ 、 $[\Omega/2, \Omega]$ 。再对低频部分进行小波分解,又得到了频带在 $[0, \Omega/4]$ 与 $[\Omega/4, \Omega/2]$ 中的两个信号,随着小波分解层数的增加,信号的低频部分可以达到很高的频率分辨率。小波包分析是从小波分析延伸出来的一种对信号进行更细致的分析和重构的方法,它对高频部分也做了二次分解。通过对确定频段的分解信号作小波包逆变换,将其它频段的分解信号(或结点系数)置为0,此逆变换过程可实现信号的带通滤波。

2 模态参数识别的 HHT 方法

2.1 EMD 法(Huang 变换)

EMD 分解算法认为,任何信号都由一些不同的固有振动模式构成,这些振动模式既可以是线性的也可以是非线性的,并据此将信号分解为若干固有模式函数(Intrinsic Mode Function)的和。每个固有模式函数根据信号自身极值点间的时延来定义和区分,并通过一称为筛选的步骤来完成分解。

设 $s(t)$ 表示需要分解的信号,经过筛选步骤后, $s(t)$ 一般可分解为多阶固有模式函数,即^[1]:

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

其中: x_i 表示固有模式函数; r_n 表示信号经过 n 次分解后的余量。

2.2 Hilbert 变换

脉冲响应信号只包含结构的固有模态响应信息,因此,EMD 分解后得到的固有模式函数对应各阶固有模态的自由衰减信号,据此可以识别结构模态参数。工程结构多为小阻尼,在小阻尼前提下,这些自由衰减信号可以表述为^[12]:

$$x(t) = A_0 e^{-\xi \omega_0 t} \cos(\omega_d t + \varphi_0) \quad (3)$$

式中: ω_0 为圆频率; ξ 是阻尼比; ω_d 为阻尼圆频率。

通过 EMD 分解所得到的各阶模态信号为单分量信号,存在瞬时频率,满足 Hilbert 变换的条件,因此可以构造如下解析信号^[1]:

$$z(t) = x(t) + jH(x(t)) = A(t)e^{-j\theta(t)} \quad (4)$$

其中, $H(x(t))$ 为信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换,即:

$$H(x(t)) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (5)$$

大写字母 P 表示广义积分的 cauchy 主值。

对于小阻尼系统,式(4)中的瞬时幅值及瞬时相

位可进一步表示为^[12]:

$$A(t) = A_0 e^{-\xi \omega_0 t} \quad (6)$$

$$\theta(t) = \omega_d t + \varphi_0 \quad (7)$$

对式(6)、式(7)进行对数运算或微分运算,可得:

$$\ln A(t) = -\xi \omega_0 t + \ln A_0 \quad (8)$$

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

显然,在求出直线方程(7)的斜率 ω_d 及直线方程(8)的斜率 $-\xi \omega_0$ 后,再联立关系式:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \quad (10)$$

便可求得结构的固有圆频率 ω_0 及阻尼比 ξ 。

3 混凝土框架结构模型试验模态分析

3.1 混凝土框架结构模型

试验对象为一个4层2跨2开间的钢筋混凝土框架结构模型,模型比例为1:3。框架模型整体尺寸为 $4\text{m} \times 2.8\text{m} \times 4.333\text{m}$ 。模型底部采用刚性板基础,用螺栓连接在地槽中。横向框架柱网间距 2m ,纵向框架柱网间距 1.4m 。第一层层高为 1.333m ,第2层、第3层、第4层层高均为 1.0m 。框架模型的梁柱受力钢筋与箍筋均采用 I 级钢筋,混凝土按 C25 配制。模型框架的外观见图 2。



图 2 混凝土框架结构模型

Fig.2 Model of concrete frame structure

3.2 脉冲加速度响应信号测试

考虑到框架结构振动时的层结构特征,在脉冲加速度信号测试时,取模型框架横向的中间榀框架作为测试对象,每层取一个测点,位于结构的对称轴上,加速度测试框图如图 3 所示。由于结构参数的识别结果只与加速度响应的相对大小有关,因此在加速度传感器标定时采用相对标定的方式。

在顶层锤击脉动激励作用下,通过触发采样方式采集第 1 层~第 4 层的加速度响应信号,采样频

率为 500Hz，每次触发后采集 1024 个点，进行 8 次锤击脉冲激励测试，每个测点共采集 8192 个数据点。

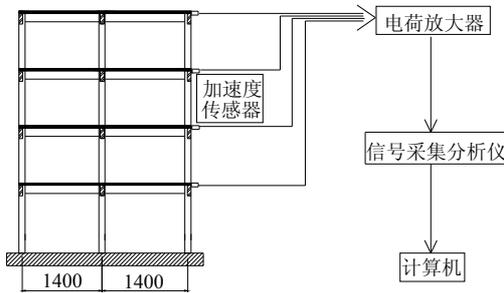


图 3 试验装置示意图

Fig.3 Sketch of experimental set-up

3.3 模态参数识别

为了抑制部分随机测试噪声的影响，首先对加速度响应信号进行了 8 次平均处理。图 4 给出了 1 层~4 层的平均加速度响应信号及其自功率谱。

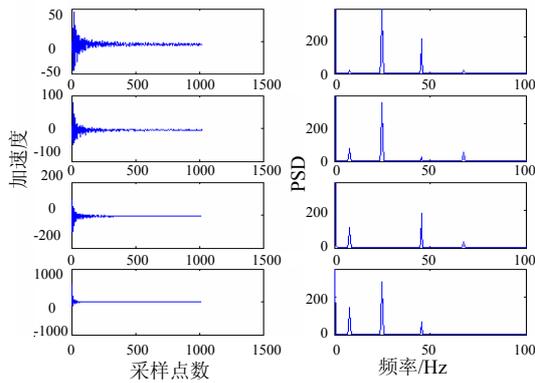


图 4 平均加速度信号及其自功率谱

Fig.4 Average acceleration signals and their power spectral

从自功率谱图可以看出，锤击脉冲激励有效的激发了结构整体横向振动的四阶主振动，四阶主频率大致分布在 5Hz~10Hz、20Hz~30Hz、40Hz~50Hz 和 60Hz~70Hz 之间。采用相应截止频率的带通滤波器对信号进行滤波处理，得到包含各峰值频率在内的带通信号。对所有带通信号进行 EMD 分解，并提取能量最大的固有模式函数作为各阶模态响应，图 5~图 8 给出了第 1 层~第 4 层加速度信号 EMD 分解的各阶模态响应。基于各阶模态响应进行 Hilbert 变换和谱分析，可以得到各阶模态响应的瞬时频率、瞬时幅值和瞬时相位。图 9~图 12 给出了第 1 层~第 4 层加速度信号 EMD 分解的各阶模态响应的瞬时频率。图 13~图 16 给出了 4 阶模态响应瞬时幅值的对数曲线和瞬时相位曲线。

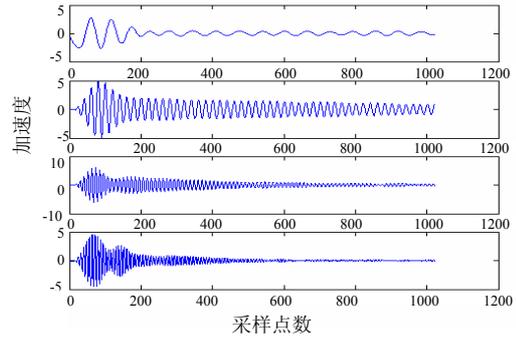


图 5 第 1 层信号 EMD 分解的四阶模态响应

Fig.5 The results of EMD by signals of the 1st floor

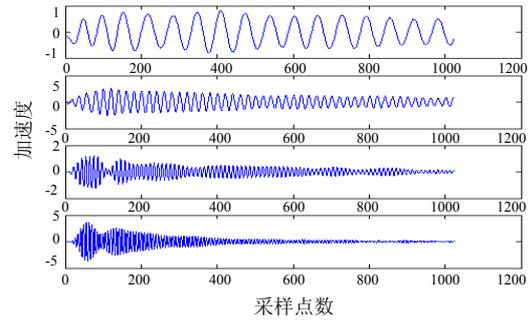


图 6 第 2 层信号 EMD 分解的四阶模态响应

Fig.6 The results of EMD by signals of the 2nd floor

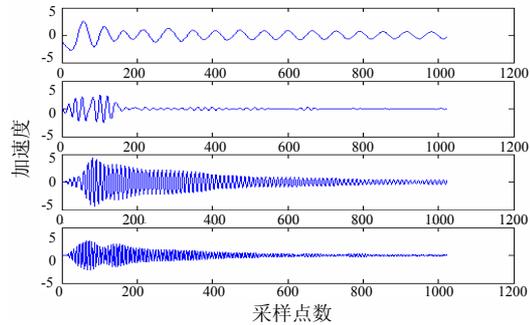


图 7 第 3 层信号 EMD 分解的四阶模态响应

Fig.7 The results of EMD by signals of the 3rd floor

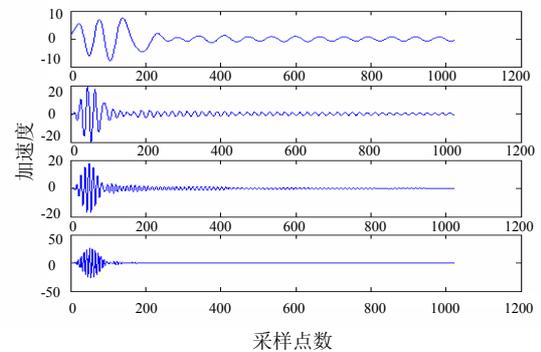


图 8 第 4 层信号 EMD 分解的四阶模态响应

Fig.8 The results of EMD by signals of the 4th floor

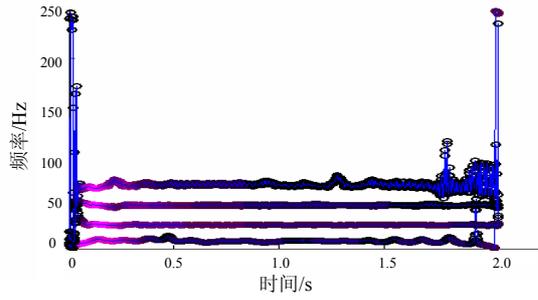


图9 四阶模态响应的瞬时频率(第1层信号)
Fig.9 Instantaneous frequency by signals of the 1st floor

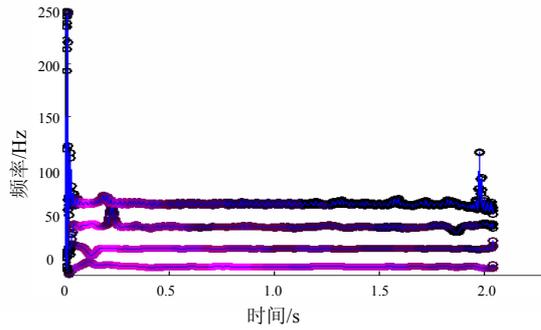


图10 四阶模态响应的瞬时频率(第2层信号)
Fig.10 Instantaneous frequency by signals of the 2nd floor

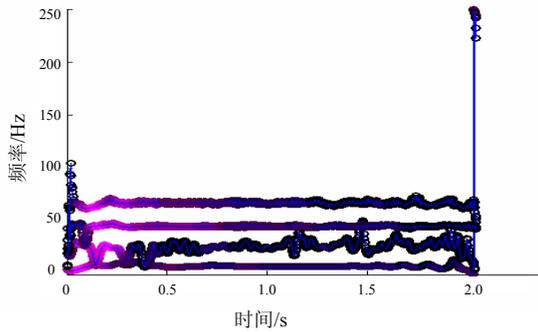


图11 四阶模态响应的瞬时频率(第3层信号)
Fig.11 Instantaneous frequency by signals of the 3rd floor

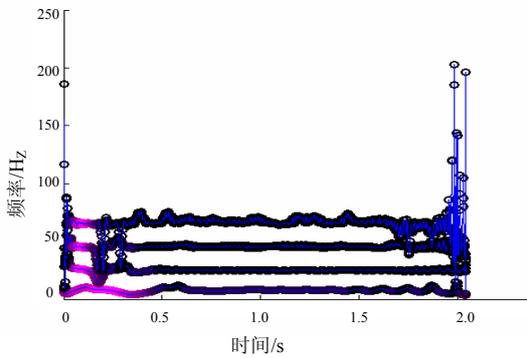


图12 四阶模态响应的瞬时频率(第4层信号)
Fig.12 Instantaneous frequency by signals of the 4th floor

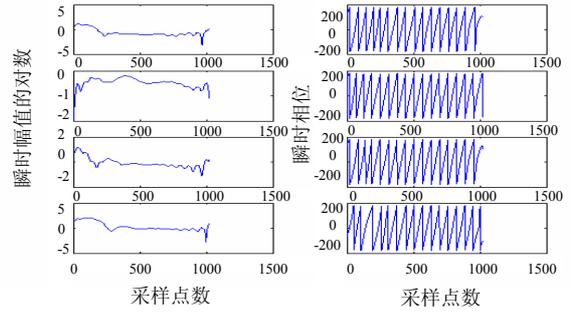


图13 模态1 瞬时幅值的对数和瞬时相位(1层~4层信号)
Fig.13 Instantaneous magnitude logarithm and phase of the first modal by signals of the four floors

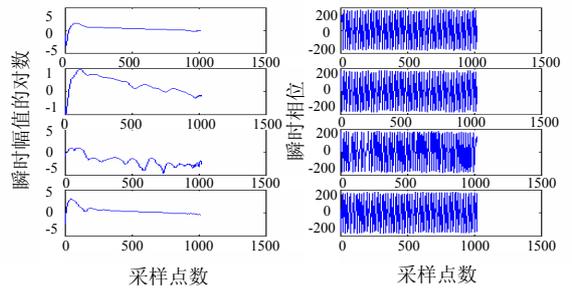


图14 模态2 瞬时幅值的对数和瞬时相位(1层~4层信号)
Fig.14 Instantaneous magnitude logarithm and phase of the second modal by signals of the four floors

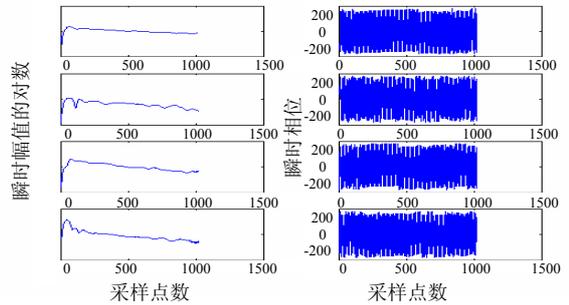


图15 模态3 瞬时幅值的对数和瞬时相位(1层~4层信号)
Fig.15 Instantaneous magnitude logarithm and phase of the third modal by signals of the four floors

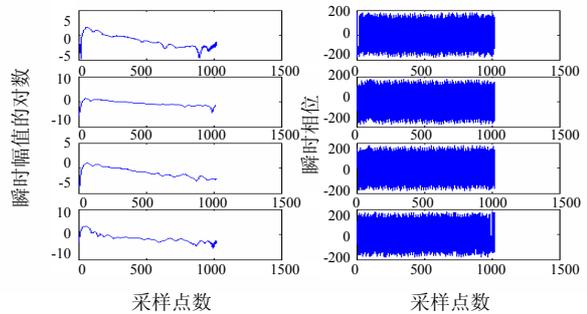


图16 模态4 瞬时幅值的对数和瞬时相位(1层~4层信号)
Fig.16 Instantaneous magnitude logarithm and phase of the fourth modal by signals of the four floors

从图 5~图 8 可以看出,采用峰频带通滤波技术对加速度信号进行预处理以后,其 EMD 分解结果不存在模态混叠现象,但带通滤波和 EMD 分解产生了明显的端点效应。此外,脉冲衰减响应信号后半部分数据点的幅值较小,容易受地脉动和测试噪声的干扰,信噪比相对较低。因此,为了消除端点效应的影响,提高参数识别精度,截取 180 点~840 点或 0.36s~1.68s 上的数据进行模态分析和计算。

图 9~图 12 描述的瞬时频率反映了结构各阶模态的阻尼固有频率。在剔除端点效应的影响以后,瞬时频率只在结构阻尼固有频率附近作小幅波动。因此,可以将瞬时频率的统计平均值取为结构各阶模态的阻尼固有频率。需要说明的是,任取其中一层测点的信号来分析都可识别出 4 阶模态的阻尼固有频率,本文考虑到第 2 层测试信号的瞬时频率相对较为平稳,阻尼固有频率的识别结果源自第 2 层测试信号。当然,将基于各层测试信号的识别结果的平均值作为最终的结果也是可以的。

将 180 点~840 点有效区间的瞬时幅值对数曲线拟合成一条直线,基于该直线的斜率和阻尼固有频率可进一步求取结构各阶模态的固有频率和阻尼比(见表 1、表 2),识别结果同样源自第 2 层测试信号。根据表 1 固有频率识别结果与计算结果比较可知,相对于纯剪切层模型,弯剪层模型更能反映框架结构整体横向振动的动力特性。纯剪切层模型的刚度明显偏大,而弯剪层模型的刚度则稍微偏低。

表 1 框架结构固有频率

Table 1 Natural frequencies of the concrete frame structure

阶次	试验识别值/ Hz	剪切层模型		弯剪层模型	
		计算值/Hz	误差/(%)	计算值/Hz	误差/(%)
一阶	7.82	10.47	33.9	7.29	-6.78
二阶	24.98	33.49	34.1	23.49	-5.96
三阶	45.49	55.23	21.4	43.39	-4.62
四阶	67.41	70.11	4.01	64.66	-4.08

表 2 框架结构阻尼比

Table 2 Damping ratio of the concrete frame structure

阶次	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶
阻尼比	0.0031	0.0039	0.0032	0.0040

振型向量及其相位可以通过 180 点~840 点有效区间内不同楼层同一阶模态响应的瞬时幅值或瞬时相位的统计平均值来刻画,框架结构规一化的振型识别结果见表 3、图 17。

为了便于与传统 HHT 方法进行比较,图 18、

图 19 以第 2 层信号为例,分别给出了未经滤波预处理的 EMD 分解结果及相应四阶模态的瞬时频率。将图 18、图 19 分别与图 6、图 10 比较,可以看出,传统的 HHT 方法存在明显的模态混叠现象,很难准确识别出各阶模态参数。

表 3 框架结构振型

Table 3 Model shape of the concrete frame structure

一阶振型		二阶振型		三阶振型		四阶振型	
向量	相位/(°)	向量	相位/(°)	向量	相位/(°)	向量	相位/(°)
0.32	128	1.00	-25.8	1.00	-92.8	0.62	-63.5
0.57	145	0.99	-32.6	0.32	96.6	1.00	115
0.76	147	0.09	145	0.98	94.3	0.85	-76.5
1.00	149	0.95	153	0.55	-84.7	0.34	136

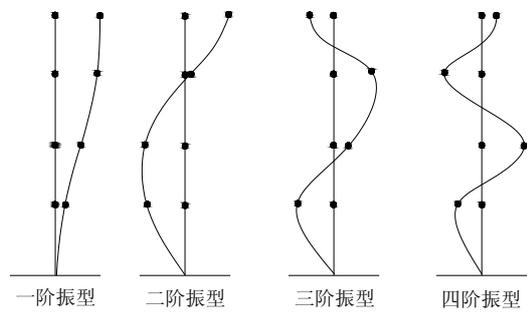


图 17 框架结构振型图

Fig.17 Sketch of model shape of the concrete frame structure

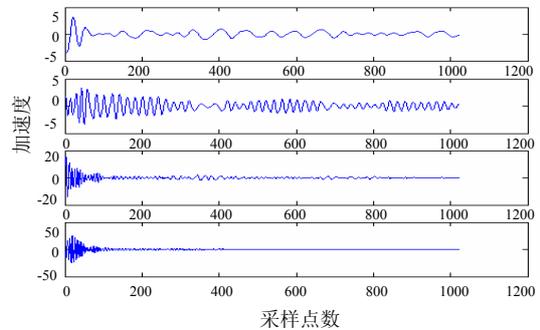


图 18 EMD 分解的四阶模态响应(未经带通滤波处理)

Fig.18 The results of EMD by signals not be filtered

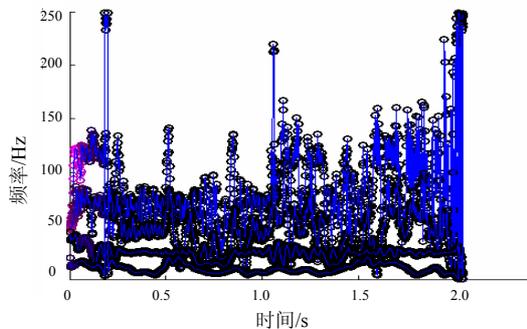


图 19 四阶模态响应的瞬时频率(未经带通滤波处理)

Fig.19 Instantaneous frequency by signals not be filtered

4 结论

本文提出的基于峰频带通信号希尔伯特-黄变换(HHT)的结构模态参数识别方法将小波包带通滤波技术与 HHT 模态识别技术结合,抑制了信号分解过程中的模态混叠现象,提高了算法的稳定性和可靠性。钢筋混凝土框架结构模型的试验模态分析结果不仅验证了该方法是有效的,而且表明,与纯剪切层模型比较,弯剪层模型更能反映框架结构整体横向振动的动力特性。

对于模态参数不变或慢变的结构而言,采用去端点法消除信号在带通滤波及 EMD 分解过程中所产生的端点效应,可以大大提高分解信号的信噪比和模态参数的识别精度。

参考文献:

- [1] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [C]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903—995.
- [2] Yang J N, Lei Y, Pan Shuwen, et al. System identification of linear structures based on Hilbert-Huang spectral analysis: Part 1 normal modes [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2003, 32(9): 1443—1467.
- [3] 陈隽, 徐幼麟, 李杰. Hilbert-Huang 变换在密频结构阻尼识别中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(4): 34—42.
Chen Jun, Xu Youlin, Li Jie. Hilbert-Huang transform for damping ratio identification of structures with closely spaced modes of vibration [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(4): 34—42. (in Chinese)
- [4] 顾远生, 李春祥, 刘畅. 基于希尔伯特-黄变换的超高层建筑模态参数识别[J]. 建筑科学, 2009, 25(3): 44—48, 38.
Gu Yuansheng, Li Chunxiang, Liu Chang. Identification of modal parameters of super high buildings based on Hilbert-Huang transform [J]. Building Science, 2009, 25(3): 44—48, 38. (in Chinese)
- [5] Chen Jun, Xu Youlin, Zhang R C. Modal parameter identification of Tsing Ma suspension bridge under typhoon victor: EMD-HT method [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92: 805—827.
- [6] 寇立秀, 金峰. 基于 HHT 方法的结构模态参数识别[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 45—49.
Kou Lihang, Jin Feng. Modal parameter identification for engineering structures based on HHT method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 45—49. (in Chinese)
- [7] 段希波, 张计光, 颜勇. 基于 Hilbert-Huang 变换的多自由度参数辨识[J]. 上海大学学报, 2006, 12(4): 403—407.
Duan Xibo, Zhang Jiguang, Yan Yong. Identification of modal parameters of multiple degree-of-freedom system based on Hilbert-Huang transform [J]. Journal of Shanghai University, 2006, 12(4): 403—407. (in Chinese)
- [8] 黄天立, 楼梦麟. 基于 HHT 的非线性结构系统识别研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 80—83.
Huang Tianli, Lou Menglin. System identification of nonlinear structures based on HHT [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 80—83. (in Chinese)
- [9] 韩建平, 李达文, 王飞行. 基于 Hilbert-Huang 变换和随机子空间识别的模态参数识别[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(1): 53—59.
Han Jianping, Li Dawen, Wang Feixing. Modal parameter identification based on Hilbert-Huang transform and stochastic subspace identification [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(1): 53—59. (in Chinese)
- [10] Xu Y L, Chen S W, Zhang R C. Modal identification of Di Wang Building under Typhoon York using the Hilbert-Huang transform method [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2003, 12(1): 21—47.
- [11] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995: 66—108.
Cui Jintai. Introduction of wavelet analysis [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995: 66—108. (in Chinese)
- [12] 倪振华. 振动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989: 61—67.
Ni Zhenhua. Vibration dynamics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989: 61—67. (in Chinese)