文章编号: 1007 - 6069(2011)01 - 0072 - 06

基于 Hilbert-Huang 变换和随机减量技术的模态参数识别

韩建平[1,2],李 林[1],王洪涛[1],钱 炯[3]

(1. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3. 安吉县规划与建设局,浙江 安吉 313300)

摘 要: 傅里叶分析的信号处理方法对非线性、非平稳信号的处理能力差,传统的模态参数识别方法也存在阻尼比识别精度不高的问题。基于 Hilbert-Huang 变换和随机减量技术提出了一种新的、实用的模态参数识别方法,首先对结构振动信号进行滤波处理和经验模态分解,得到若干阶本征模态响应,然后利用随机减量技术提取自由衰减响应,进而由 Hilbert-Huang 变换得到信号的瞬时特性,最后结合模态识别的基本理论识别结构的模态频率和模态阻尼比。为了验证这一方法的有效性,对 12 层钢筋混凝土框架模型振动台试验一测点的加速度记录进行了处理,识别了模态参数,识别结果与其它识别方法及有限元分析结果的对比表明该方法识别模态频率是可靠的,而模态阻尼比识别的精准性仍然难以确认。

关键词: Hilbert-Huang 变换; 经验模态分解; 随机减量技术; 模态参数识别; 振动台试验

中图分类号: TU202; P315.96 **文献标志码**: A

Modal parameter identification based on Hilbert-Huang transform and random decrement technique

HAN Jianping[1,2], LI Lin[1], WANG Hongtao[1], QIAN Jiong[3]

(1. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730050, China; 3. Planning and Construction Bureau of Anji Country, Anji 313300, China)

Abstract: The approaches based on Fourier analysis are not capable to process nonlinear and non-stationary signal. In addition, most of traditional identification methods suffer from low precision for identifying damping. An approach to identify the structural modal parameters based on Hilbert-Huang transform (HHT) and random decrement technique (RDT) is proposed. First, the original vibration signal is filtered, and several intrinsic mode functions are obtained by empirical mode decomposition (EMD). Then, the free-decay response of the structure is extracted by RDT, and the instantaneous characteristics of the original signal are obtained via Hilbert Transform (HT). Finally, the basic modal analysis theory is adopted to identify modal frequencies and modal damping ratios. In order to validate this approach, the original acceleration record from the shaking table test of a 12-storey RC frame model is processed and modal parameters are identified by the proposed approach. Identified results are also compared with the results from other identification algorithms and finite element analysis. Comparison indicates that the proposed approach is reliable to identify modal frequencies. But it is still difficult to confirm the precision of the identified modal damping ratios.

Key words: Hilbert-Huang transform; empirical mode decomposition; random decrement technique; modal param-

收稿日期: 2010 - 11 - 03; **修订日期**: 2010 - 11 - 18

基金项目: 甘肃省科技攻关项目(2GS057 - A52 - 008)

作者简介: 韩建平(1970 -),男,教授,主要从事工程结构抗震减振、结构健康监测及结构检测鉴定加固等研究. E-mail: jphan@lut.cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

eter identification; shaking table test

引言

基于工程结构振动信号的分析与处理识别结构的模态参数,是结构健康监测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[1]。从 20 世纪 60 年代后期发展至今,国内外对模态分析的研究取得了较大的进展,一些频域、时域方法相继得到应用,但传统的以 Fourier 变换为基础的传统信号处理方法本身的局限性,已不能满足科学技术发展的需要[2]。

国内外许多学者对非线性非平稳信号的模态识别以及如何获得较为精准的模态参数开展了一定的研究,在传统的时域、频域方法的基础上,相继出现了如小波分析、Hilbert-Huang 变换(Hilbert-Huang Transform, HHT) 等新的方法。其中,HHT 由经验模式分解(Empirical Mode Decomposition,EMD) 及 Hilbert 变换(Hilbert Transform) 两部分组成,核心是 EMD。EMD 方法依据数据本身的时间尺度特征进行分解,因此较建立在先验基函数上的傅里叶变换和小波变换更适合于处理非线性、非平稳信号,目前已在许多学科领域的应用中显示出了其独特的优势[3,4]。

文中基于 Hilbert-Huang 变换和随机减量技术(Random Decrement technique,RDT) 提出了一种新的、实用的模态参数时域识别方法,首先对结构振动信号进行滤波处理和经验模态分解,得到若干阶本征模态响应,然后利用随机减量技术提取自由衰减响应,进而由 Hilbert-Huang 变换得到信号的瞬时特性,最后结合模态识别的基本理论识别结构的模态频率和模态阻尼比。为了验证这一方法的有效性,对 12 层钢筋混凝土框架模型振动台试验一测点的加速度记录进行了处理,识别了模态参数,并将识别结果与其它识别方法及有限元分析的结果进行了对比。

1　基于 HHT 和 RDT 的模态参数识别方法

1.1　随机减量技术(RDT)

时域法识别模态参数的初始输入数据是结构的自由衰减响应或脉冲响应。基于环境激励下识别结构模态参数提取自由衰减响应常用的方法是随机减量技术(Random Decrement Technique, RDT) 或自然激励技术(Natural Excitation Technique,NExT) 。

随机减量技术的主要思想是利用平稳随机振动信号均值为零的性质,将包含有确定性振动信号和随机信号两种成分的实测振动响应信号进行辨别,将确定性信号从随机信号中分离出来,得到自由衰减振动响应信号[4]。

对于某线性系统,在任意激励下某测点的受迫振动响应可表示为:

$$y(t) = y(0)\,D(t) + \dot{y}(0)\,V(t) + \int_0^t h(t-\tau)\,f(\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{1}$$

式中: $D(t)$ 为初始位移为 1 且初始速度为 0 的系统自由振动响应; $V(t)$ 为初始位移为 0 且初始速度为 1 的系统自由振动响应; $y(0)$ 和 $\dot{y}(0)$ 分别为系统振动的初始位移和初始速度; $h(t)$ 为系统的单位脉冲响应函数; $f(t)$ 为外部激励。

选取一个适当的常数去截取该系统的振动响应信号 $y(t)$,可得到一系列不同的交点时刻 t_i($i=1,2,\cdots,N$) ,对于自 t_i 时刻开始的响应 $y(t-t_i)$ 可以表示为:

$$y(t-t_i) = y(t_i)\,D(t-t_i) + \dot{y}(0)\,V(t-t_i) + \int_i^t h(t-\tau)\,f(\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{2}$$

将 $y(t-t_i)$ 的一系列时间 t_i 起始点移至坐标原点,可获得相应的一系列时移后的函数 x_i($i=1,2,\cdots,N$) :

$$x_i(t) = AD(t) + \dot{y}(t_i)\,V(t) + \int_0^t h(t-\tau)\,f(\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{3}$$

取 $x_i(t)$ 的统计平均,得:

$$x(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i(t) \approx E\left[AD(t) + \dot{y}(t_i)\,V(t) + \int_0^t h(t-\tau)\,\mathrm{d}\tau\right]$$

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\approx AD(t) + E[\dot{y}(t_i)]V(t) + \int_0^t h(t-\tau)E[f(\tau)]\mathrm{d}\tau \tag{4}$$

$f(t)$ 若是平稳的随机激励且均值为0，则系统振动响应 $y(t)$、$\dot{y}(t)$ 同样是均值为0的平稳随机过程，即有 $E[f(t)]=0$、$E[\dot{y}(t_i)]=0$，则

$$x(t) \approx AD(t) \tag{5}$$

式(5)中的 $x(t)$ 为初位移为 A、初速度为0的自由振动响应。

1.2 基于 HHT 和 RDT 的模态参数识别方法

假定 $x(t)$ 是一个环境激励下得到的结构的加速度响应信号。首先由 $x(t)$ 的傅里叶谱得到结构前 n 阶固有频率($\omega_1,\omega_2,\omega_2\cdots,\omega_n$)的初步估计，例如第1阶固有频率 $\omega_{1L}<\omega_1<\omega_{1H}$。然后，将 $x(t)$ 通过一个带通滤波器，如果要得到第 j 阶模态响应，就选取带通滤波频率为 $\omega_{jL}<\omega_{jH}$，依次类推，从而得到 n 个时间序列信号，记为 $x_j(t)$ ($j=1,2,3\cdots,n$)。滤波的截止频率 ω_{jL}、ω_{jH}应选择合理，通常要求滤波频率区间越窄越好，但要保证所关注的模态频率在滤波频率区间内。

对每一个时间序列信号 $x_j(t)$ 进行经验模态分解，并近似认为得到的第1阶本征模态函数(IMF)就是对应的结构第 j 阶模态响应，记为 $x_j'(t)$。至此，结构的加速度响应信号已经被分解成结构的每1阶模态响应，即将复杂的时间序列分解成从高频到低频的若干阶基本时间序列[6]。由于得到的各阶模态响应 $x_j'(t)$ 是平稳的随机信号，适合运用随机减量技术得到相应的自由衰减响应信号[7]。

假设由随机减量得到的相应于 $x_j'(t)$ 的自由衰减信号为 $X_j(t)$，并将其表示成如下形式，

$$X_j(t) = U_{0j}\mathrm{e}^{-\xi_j\omega_{nj}t}\cos(\omega_{dj}t-\alpha_j) \tag{6}$$

式中：ω_{nj}为第 j 阶模态的无阻尼圆频率；ξ_j 为第 j 阶模态的阻尼比；ω_{dj}为第 j 阶模态的有阻尼圆频率。

对 $X_j(t)$ 进行 Hilbert 变换，

$$Y_j(t) = \mathrm{HT}[X_j(t)] = \frac{1}{\pi}P\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{X_j(\tau)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau \tag{7}$$

式中，P 为柯西主分量。

建立解析方程，

$$Z_j(t) = X_j(t) + iY_j(t) = U_j(t)\mathrm{e}^{i\theta_j(t)} \tag{8}$$

一般结构的阻尼较小，频率相对较大，由式(6)、式(8)，幅值 $U_j(t)$ 和相位 $\theta_j(t)$ 可进一步表示为：

$$U_j(t) = U_{0j}\mathrm{e}^{-\xi_j\omega_{nj}t} \tag{9}$$

$$\theta_j(t) = \omega_{dj}t - a_j \tag{10}$$

对幅值取对数、对相位求导，分别可得，

$$\ln U_j(t) = -\xi_j\omega_{nj}t + \ln U_{0j} \tag{11}$$

$$\frac{d\theta_j(t)}{dt} = \omega_{dj} \tag{12}$$

由式(12)可求得有阻尼固有圆频率ω_{dj}，式(11)表示一直线方程，该直线的斜率即为 $-\xi_j\omega_{nj}$，因此利用 $\omega_{dj}=\omega_{nj}\sqrt{1-\xi_j^2}$，即可确定系统无阻尼固有圆频率 ω_{nj}、阻尼比 ξ_j。但在实际的运算处理过程中，由于 RDT 技术提取自由衰减响应和数值处理等多方面的误差将会导致 $\ln U_j(t)$、$\theta_j(t)$ 不会是理想的直线，因此其斜率需要借助最小二乘拟合得到。

上述基于 HHT 和 RDT 识别模态参数的完整步骤如图1所示[8,9]。



图1 基于 HHT 和 RDT 识别模态参数的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of modal parameter identification based on HHT and RDT

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　基于振动台试验数据的 12 层钢筋混凝土框架结构模型模态参数识别

2.1　试验概况

选择同济大学土木工程防灾国家重点实验室完成的 12 层钢筋混凝土框架模型振动台试验的加速度记录数据进行分析处理，并识别该模型结构的模态参数。

试验模型为单跨 12 层钢筋混凝土框架结构，几何相似关系为 1/10，原型及模型结构、测点布置及试验方案详见“12 层钢筋混凝土标准框架振动台模型试验的完整数据”[10]。此处仅对峰值加速度为 0.09g 的 El Centro 波激励下顶层测点 *A*7 的 *x* 方向加速度响应记录进行处理并据此识别模态参数。

2.2　模型结构模态参数识别

根据模型结构的特性和激励形式，选取结构顶层 *X* 方向测点 *A*7 为研究对象，对该测点在 El Centro 波激励下的加速度响应信号进行分析和处理，图 2 为该测点的加速度响应时程曲线。对该测点的加速度记录进行傅里叶分析，其傅里叶谱如图 3 所示。观察其傅里叶谱，可以了解结构前几阶模态频率的大概范围。由图 3 可知，结构的第 1 阶固有频率范围为 3.5Hz $<f_1<$ 4.5Hz，第 2 阶固有频率范围为 14Hz $<f_2<$ 16Hz，第 3 阶固有频率范围为 27.5Hz $<f_3<$ 28.5Hz。

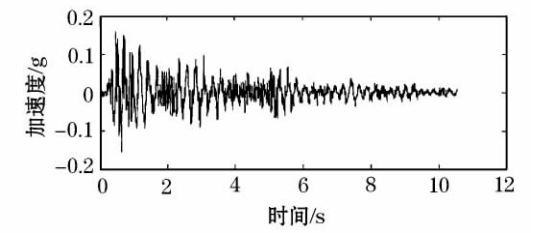

图 2　测点 *A*7 加速度响应时间历程

Fig. 2　Acceleration response time history at *A*7 gauge point

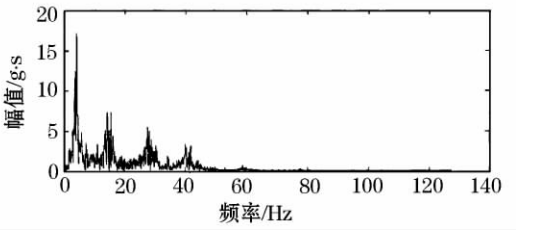

图 3　测点 A7 加速度响应的傅里叶谱

Fig. 3　Fourier spectrum of the acceleration response at *A*7 gauge point

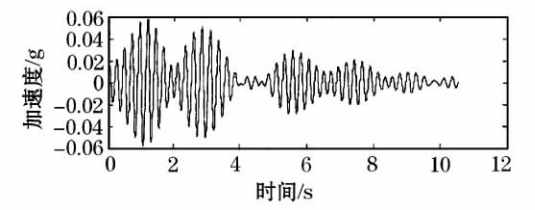

图 4　第 1 阶模态响应

Fig. 4　Response of the 1st Mode

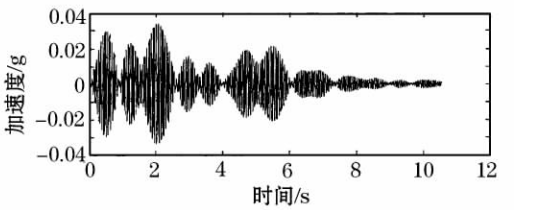

图 5　第 2 阶模态响应

Fig. 5　Response of the 2nd Mode

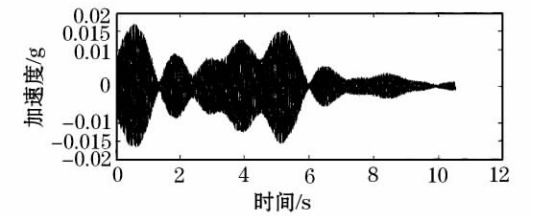

图 6　第 3 阶模态响应

Fig. 6　Response of the 3rd Mode

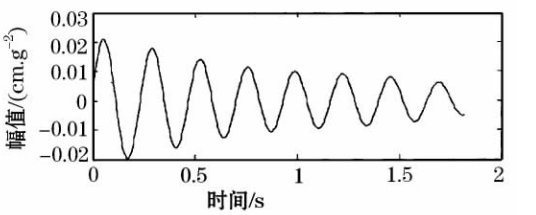

图 7　第 1 阶模态的自由衰减响应

Fig. 7　Free-decay response of the 1st mode

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

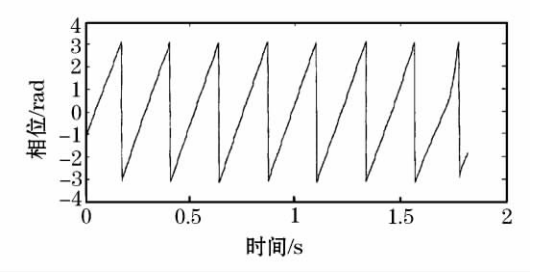

图 8 第 1 阶模态自由衰减响应的相位

Fig. 8 Phase of the free-decay response of the 1st mode

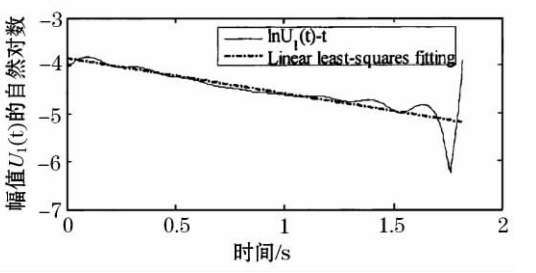

图 9 第 1 阶模态自由衰减响应的 $\ln U_1(t) - t$ 曲线及最小二乘线性拟合

Fig. 9 $\ln U_1(t) - t$ curve of the free-decay response of the 1st mode and its linear least-squares fitting

通过带通滤波和 EMD 可以得到模型结构的前 3 阶模态响应，分别如图 4 ~ 图 6 所示。对各阶模态响应进行随机减量处理，可以得到相应模态的自由衰减响应，其中第 1 阶模态的自由衰减响应如图 7 所示。分别对各阶模态的自由衰减响应进行 Hilbert 变换得到其幅值和相位信息，其中第 1 阶模态自由衰减响应的相位曲线图 8 所示，第 1 阶段自由衰减响应幅值的自然对数曲线 $\ln U_1(t) - t$ 及其最小二乘线性拟合如图 9 所示，由图 8 和图 9 直线的斜率最终可以确定模态频率以及模态阻尼比。

对前 3 阶模态的识别结果及其与其它识别算法的识别结果和有限分析结果的对比如表 1 所示。

表 1 识别结果及其与其它识别算法识别结果和有限元分析结果的对比

Table 1 Identified results and comparison with the results from the other identification algorithms and finite element analysis

模态	HHT + RDT		FFT		有限元	HHT + NExT[10]		ERA[11]		RFP[11]	
阶数	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%	频率/Hz	阻尼比/%
1	3.7615	3.87	4.1758	11.91	3.8028	4.1678	6.80	3.5631	5.93	3.5452	5.46
2	14.3306	2.51	14.5203	5.81	14.4281	14.5622	6.37	14.0841	4.14	13.9624	4.80
3	27.4806	1.93	27.6171	4.68	27.8172	27.9869	4.89	27.1828	3.69	27.1739	3.81

3 结论与讨论

基于 Hilbert-Huang 变换和随机减量技术提出了一种模态参数的时域识别方法，并对一 12 层钢筋混凝土框架模型振动台试验测点的加速度记录进行了处理，识别了模态参数，并将识别结果与其它识别方法及有限元分析的结果进行了对比。对比结果表明该方法识别模态频率是可靠的。

基于 FFT 的半功率带宽法对低阶模态阻尼比的识别结果明显高于本方法、文献［11］中的 HHT + NExT 方法以及文献［12］中特征系统实现算法(ERA) 、有理多项式方法(RFP) 的识别结果，若将基于 FFT 方法的阻尼比的识别结果用于结构动力分析，必然会低估结构的响应，从而使设计偏于不安全。

较基于 FFT 的半功率带宽法，本方法对模态阻尼比的识别结果有了较大的改善，但本方法与作者之前所做的其它方法，如 HHT 结合自然激励技术、ERA、RFP 等的结果相比仍然有一定的差异，因此模态阻尼比识别的精准性仍然难以确认。

因此，阻尼比的识别仍然是一个需要进一步研究的问题，国内外学者都在这方面进行探索。Pines 和 Salvino 提出了基于 HHT 变换的希尔伯特阻尼谱[13]，将阻尼损失系数看做是时间和瞬时频率的函数，从而得到阻尼关于时间和频率的分布，定性地判断阻尼的大小; 石春香、罗奇峰等将 Hilbert 阻尼谱应用到对深圳罗湖商务大厦模型振动台试验数据的处理分析中并得到了较好的结果[14]; Ceravolo 提出了一种基于能量谱来识别瞬时阻尼比的方法，通过能量谱和频域传递函数平方的能量尺度近似的假定，建立目标函数再经优化处理得到[15]; 黄方林(2002) 等提出了通过响应时间历程与时间轴所围面积之间的关系来识别阻尼比系数的方法[16]; 张之颖等提出了应用改进的随机减量技术和 ITD(Ibrahim Time Domain) 法相结合的思想有效地识别出阻尼比[17]。以上方法对于实际的工程结构动力特性参数的识别，特别是阻尼比的准确识别有一定的参考意义。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献

[1] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B, Shevitz D W. 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] 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.
ZHONG Youming, QIN Shuren, TANG Baoping. Study on a new transform method for vibration signal[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15 (2): 233 -238.

[3] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903 -995.

[4] 公茂盛,谢礼立. HHT 方法在地震工程中的应用之初步探讨[J]. 世界地震工程,2003,19(3):39 -43.
GONG Maosheng,XIE Lili. Discussion on the application of HHT method to earthquake engineering[J]. World Enrthquake Engineering,2003,19(3):39 -43.

[5] Ibrahim S R. Random decrement technique for modal identification of structures[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1977, 14 (11): 696 -700.

[6] 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): 383 -388.
CHEN Jun, XU Youlin. Application of HHT for modal parameter identification to civil structures[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16 (3): 383 -388.

[7] Ibrahim S R. Efficient random decrement computation for identification of ambient responses[C]//Proceeding of 19th IMAC, Florida, USA, February 5 -8, 2001: 1 -6.

[8] Huang NE,shen I,Long S R,et al. The empirical mode dewmposition and hilbert spectrum for nonlinear and nonstationalry time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical,Physical and Engineering Sciences,1998,454: 903 -995.

[9] Yang J N, Lei Y, Pan S, Huang N. System identification of linear structures based on Hilbert-Huang spectral analysis. Part 1: Normal modes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32 (9): 1443 - 1467.

[10] 吕西林, 李培振, 陈跃庆. 12 层钢筋混凝土标准框架振动台模型试验的完整数据[R]. 上海: 同济大学,2004.
LÜ Xilin, LI Peizhen,CHEN Yueqing. Complete data of shaking table test on a 12-storey reinforced concrete frame model[R]. Shanghai: Tongji University,2004.

[11] 韩建平, 李达文. 基于 Hilbert-Huang 变换和自然激励技术的模态参数识别[J]. 工程力学, 2010, 27 (8): 54 -59.
HAN Jianping,LI Dawen. Modal parameter identification based on Hilbert-Huang transform and natrual excitation technique[J]. Engineering Mechanics, 2010,27 (8): 54 -59.

[12] 韩建平, 王飞行, 李　慧. 基于振动台试验的模态参数识别算法比较研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 25 (3): 57 -60.
HAN Jianping,WANG Feixing,LI Hui. Comparison of modal parameter identification algorithms based on shaking table model test data[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Urban Science Edition),2008, 25 (3): 57 -60.

[13] Pines D, Salvino L. Structural health monitoring using empirical mode decomposition and the Hilbert phase[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294 (1 -2): 97 -124.

[14] 石春香, 罗奇峰, 施卫星. 基于 Hilbert-Huang 变换方法的结构损伤诊断[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(1): 16 -20.
SHI Chunxiang,LUO Qifeng, SHI Weixing. Hilbert-Huang transform based approach for structural damage detection[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2005, 33(1): 16 -20.

[15] Ceravolo R. Use of instantaneous estimators for the evaluation of structural damping[J]. Journal of Sound and Vibration,2004: 385 -401.

[16] 黄方林, 何旭辉, 陈政清,等. 识别结构模态阻尼比的一种新方法[J]. 土木工程学报,2002, 35 (6): 20 -23.
HUANG Fanglin,HE Xuhui, CHEN Zhengqing, et al. A new approach for identification of modal damping rations for a structure[J]. China Civil Engneering Journal, 2002, 35 (6): 20 -23.

[17] 张之颖,谭高铭,吕西林. 环境激励下房屋建筑阻尼比的识别方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 39 (6): 767 -772.
ZHANG Zhiying,TAN Gaoming,LÜ Xilin. Study on the identification method of damping for the building under ambient excitation[J]. Journal of XI'AN University of Architecture and Technology(Natural Science Edition), 2007, 39 (6): 767 -772.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net