

文章编号:1673-2049(2011)01-0027-06

基于固有模态函数振动传递率的结构损伤识别

顾建祖, 郝文峰, 骆英, 汤灿

(江苏大学 机械工业机械结构损伤检测评估技术重点实验室, 江苏 镇江 212013)

摘要:提出了无需量测外荷载的新的结构损伤识别方法,将经验模态分解应用于结构损伤识别,通过求振动响应信号固有模态函数的振动传递率,构建结构损伤识别参数;通过对预置不同开胶损伤程度的玻璃幕墙试件进行动态测试,得到不同损伤程度下玻璃幕墙的固有模态函数振动传递率,并根据振动传递率的差别来识别和评估玻璃幕墙开胶损伤程度。研究表明:与传统方法相比,该方法无需量测外荷载也能精确识别结构损伤,通过损伤参数值也能判断损伤大小。

关键词:经验模态分解;固有模态函数;振动传递率;损伤识别;玻璃幕墙

中图分类号:TU311.3 **文献标志码:**A

Structural Damage Identification Based on Intrinsic Mode Function Vibration Transmissibility

GU Jian-zu, HAO Wen-feng, LUO Ying, TANG Can

(Chinese Machinery Industry Key Laboratory for Mechanical Structure Damage Detection Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: A novel structural damage identification method without excitation measurement was proposed. Empirical mode decomposition (EMD) was applied to structural damage identification. Through seeking the vibration transmissibility of vibration response signal intrinsic mode function (IMF), a set of structural damage identification parameters were constructed. Through the dynamic testing on different pre-damage degrees of glass curtain walls, the intrinsic mode function vibration transmissibilities under different damage degrees were got in terms of the differences of vibration transmissibility to identify and assess the damage degrees of glass curtain walls. Study results show that compared with traditional methods, this method can accurately identify the structural damage without excitation measurement. The severity of damage can be assessed through the damage parameter values.

Key words: empirical mode decomposition; intrinsic mode function; vibration transmissibility; damage identification; glass curtain wall

0 引言

结构动力检测的关键是从损伤结构的振动信号

中提取损伤特征,为了挖掘这些损伤特征,前人做过较多研究,包括时间序列分析^[1-2]、频谱分析^[3-4]以及时频分析^[5-6]等。以傅里叶变换为基础的谱分析方

收稿日期:2010-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(10672068);国家自然科学基金项目(50875114);建设部研究开发项目(2008K322)

作者简介:顾建祖(1961-),男,江苏常熟人,副教授,E-mail:gujianzu@ujs.edu.cn。

法被广泛应用于时频分析,它提供了一种计算能量-频率分布的方法。傅里叶谱分析方法是假设系统是线性的以及信号是平稳的为前提的,但结构振动信号是多种动力作用的结果,表现为非平稳特征,对这类信号进行傅里叶变换只能分别给出信号在时域或频域的统计平均结果,无法满足结构损伤检测的要求。为了解决这些问题,人们提出了时频分析方法,包括短时傅里叶变换、Wigner-Ville 分布以及小波分析等。小波分析能同时提供振动信号的时域和频域的局部化信息,具有多尺度特性和“数学显微”特性,这些特性使得小波分析能识别振动信号中的突变成分,因此近几年来小波分析被广泛地用于结构损伤检测^[7-8],但是,小波分析本质上是可调的窗口傅里叶变换,由于小波基函数的长度有限,在对信号作小波变换时会产生能量泄露,从而要对信号在时域和频域作精确分析会有较大的困难;另一方面,一旦选择了小波基和分解尺度,所得到的结果是某一固定频段的信号,这一频段只与信号的采样频率有关而与信号本身无关,从这一方面来讲小波分析不具有自适应性。1998 年 Huang 等^[9]提出一种被称为经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的信号处理方法,应用效果优于其他的信号处理方法^[10-12]。在信号分析中,时间尺度和随时间尺度分布的能量是信号的最重要参数,EMD 方法是基于信号局部特征的信号分解方法,能把复杂信号分解为有限的固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)之和,每一 IMF 所包含的频率成分不仅与采样频率有关,而且最重要的是随信号本身变化而变化,因此 EMD 方法是自适应的信号处理方法,非常适合处理非线性和非平稳信号。

传统的动力参数,除固有频率外,均需在量测荷载谱、动力响应的基础上由模态分析获取^[13-14]。然而,工程实际中的许多荷载谱是难以精确量测的,如风荷载、地震荷载等环境激励情形,因此,荷载谱量测使这些动力参数在工程应用上具有一定的局限性^[15-18]。1999 年 Zhang 等^[19]提出基于振动传递率的损伤识别方法,弥补了传统方法的不足。

本文中笔者采用经验模态分解和振动传递率相结合的方法来提取结构损伤特征向量,以此判断损伤程度,为结构的损伤识别提供一种新的分析方法。

1 理论分析

1.1 EMD 方法

EMD 方法将一个复杂的信号分解为若干个固

有模态函数之和,根据文献[9]可以采用 EMD 方法,通过下面步骤对信号 $x(t)$ 进行分解:

(1)首先确定信号所有的局部极值点,然后采用三次样条线将所有的局部极大值点连接起来,形成上包络线。

(2)用三次样条线将所有极小值点连接起来,形成下包络线,上下包络线应该包含所有的数据点。

(3)上下包络线的平均值记为 m_1 ,可求出

$$x(t) - m_1 = h_1 \quad (1)$$

理想地,如果 h_1 是第 1 个 IMF,那么 h_1 就是 $x(t)$ 的第 1 个 IMF 分量。

(4)如果 h_1 不满足 IMF 的条件,把 h_1 作为原始数据,重复步骤 1~3,得到上下包络线的平均值 m_{11} ,再判断 $h_{11} = h_1 - m_{11}$ 是否满足 IMF 的条件,若不满足,则重复循环 k 次,得到 $h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}$,使得 h_{1k} 满足 IMF 的条件。记 $c_1 = h_{1k}$,则 c_1 为信号 $x(t)$ 的第 1 个满足 IMF 条件的分量。

(5)将 c_1 从 $x(t)$ 中分离出来,得到

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (2)$$

将 r_1 作为原始数据,重复步骤 1~4,得到 $x(t)$ 的第 2 个满足 IMF 条件的分量 c_2 ,重复循环 n 次,得到信号的第 n 个满足 IMF 条件的分量 c_n ,则

$$\left. \begin{aligned} r_2 &= r_1 - c_2 \\ r_n &= r_{n-1} - c_n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: r_n 为残余函数,代表信号的平均趋势。

当 r_n 成为一个单调函数,不能再从中提取满足 IMF 条件的分量时,循环结束。这样得到

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (4)$$

式中: c_i 为第 i 个 IMF 分量。

因此,可以把任何一个信号 $x(t)$ 分解为 n 个固有模态函数和一个残余函数之和, c_1, c_2, \dots, c_n 分别包含了信号从高到低不同频率段的成分,而且不是等带宽的。

1.2 振动传递率

不同于频响函数,振动传递率的输入和输出是具有相同意义的物理量。设作用于点 m 的激励为 $f_m(t)$,结构中激励产生的动力效应由近力点 p 向远力点 q 传递,将点 p, q 产生的力和运动响应(位移、速度、加速度)分别记为 $r_p(t), r_q(t)$ 。对 $r_p(t), r_q(t)$ 进行时频变换得到 $R_p(\omega), R_q(\omega)$ 。

振动传递率 $T_{pq}(\omega)$ 定义为

$$T_{pq}(\omega) = \frac{R_p(\omega)}{R_q(\omega)} \quad (5)$$

式(5)说明振动传递率是一个复合函数,具有幅频特性和相频特性。

将式(5)进行转化,即

$$T_{pq}(\omega) = \frac{R_p(\omega)/F_m(\omega)}{R_q(\omega)/F_m(\omega)} = \frac{H_{pm}(\omega)}{H_{qm}(\omega)} \quad (6)$$

式中: $F_m(\omega)$ 为点 m 的时频变换函数; $H_{pm}(\omega)$ 、 $H_{qm}(\omega)$ 分别为点 p 、 q 的频响函数。

式(6)给出了振动传递率的又一个定义形式,即 m 点激励下, $T_{pq}(\omega)$ 是关于 p 、 q 两点的频响函数的比率。

式(7)可计算 $T_{pq}(\omega)$ 的幅频特性,则有

$$|T_{pq}(\omega)| = \left| \frac{R_p(\omega)}{R_q(\omega)} \right| = \left| \frac{H_{pm}(\omega)}{H_{qm}(\omega)} \right| \quad (7)$$

当取加速度响应时,若 p 、 q 两点的加速度响应分别为 $a_p(t)$ 、 $a_q(t)$, 相应的傅里叶变换分别为 $A_p(\omega)$ 、 $A_q(\omega)$, 则加速度振动传递率 $T_{pq}^a(\omega)$ 定义为

$$T_{pq}^a(\omega) = \frac{A_p(\omega)}{A_q(\omega)} = \frac{H_{pm}^a(\omega)}{H_{qm}^a(\omega)} \quad (8)$$

振动传递率不仅可以反映结构的动力学特性,而且是频响函数的函数,其中荷载只作为动力源而没有参与运算,从而避免了对其进行量测,这在损伤检测中具有重要意义。对于离散多自由度平动线性系统,振动传递率只反映 2 个测试点之间结构的动力学特性,这与频响函数不同。因此,在结构振动无损检测中,只要荷载能够对结构进行充分激励,那么频响函数就消除了荷载谱不一致的影响,而振动传递率则彻底摆脱了荷载谱的量测,具有更强的工程适用性。

1.3 IMF 振动传递率

将 EMD 方法和振动传递率相结合,求信号经 EMD 分解后的固有模态函数 IMF,再将 IMF 进行时频变换,求 2 个测点相应 IMF 振动传递率,通过比较损伤前后相应 IMF 振动传递率的变化识别损伤。基于 IMF 振动传递率的结构损伤识别流程见图 1,其中, $F(\omega)$ 为时频变换函数, $F_p(\omega)$ 、 $F_q(\omega)$ 分别为点 p 、 q 的 IMF 傅里叶变换函数。

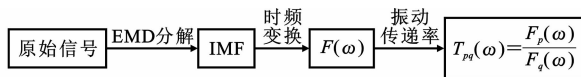


图 1 基于 IMF 振动传递率的结构损伤识别流程

Fig. 1 Flow of Structural Damage Identification

Based on IMF Vibration Transmissibility

建立损伤识别参数 D , 即

$$D = \int_{f_1}^{f_2} |T^d - T^h| df / \int_{f_1}^{f_2} |T^h| df \quad (9)$$

式中: T^h 、 T^d 分别为结构在健康和损伤状态时的振

动传递率; f_1 、 f_2 为频率。

2 试验方案

本试验采用如图 2 所示的测试系统。幕墙试件尺寸为 $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$, 玻璃板与副框间硅酮胶厚度为 6 mm 。试验时将玻璃幕墙试件固定, 在玻璃板上布置 8 个加速度测点, 见图 3。在幕墙试件中心点 P 进行激振, 在图 3 所示的测点位置布设传感器, 使用双通道示波器分别在组合 A(测点 1、2)、组合 B(测点 1、3)、组合 C(测点 1、4)、组合 D(测点 5、7)、组合 E(测点 6、8) 进行瞬态脉冲动力响应信号的采集。通过对响应信号的分析处理, 研究不同开胶程度对 5 种组合的振动传递率的影响, 力求找到幕墙开胶程度与振动传递改变率之间的内在关系。

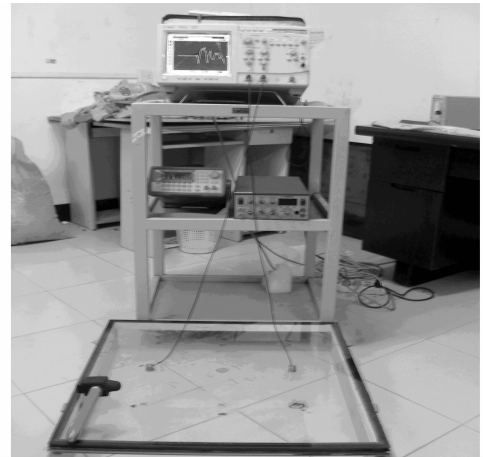


图 2 试验测试系统

Fig. 2 Experiment Testing System

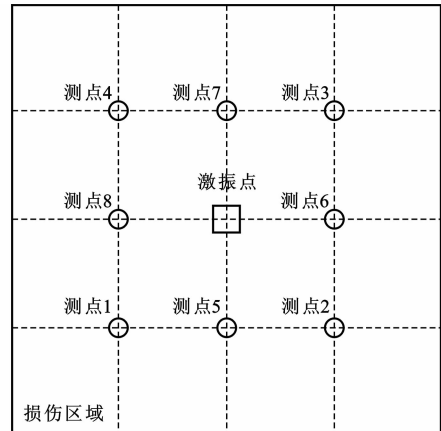


图 3 加速度测点布置

Fig. 3 Measuring Point Locations of Acceleration

3 试验结果分析

由试验测点组合, 取 EMD 分解的前 3 阶固有模态函数的傅里叶变换谱, 根据式(9)建立损伤指

标,其值见图 4,其中,D1F12 表示测点 1、2 经傅里叶变换得到的 1 阶 D 值,以此类推。

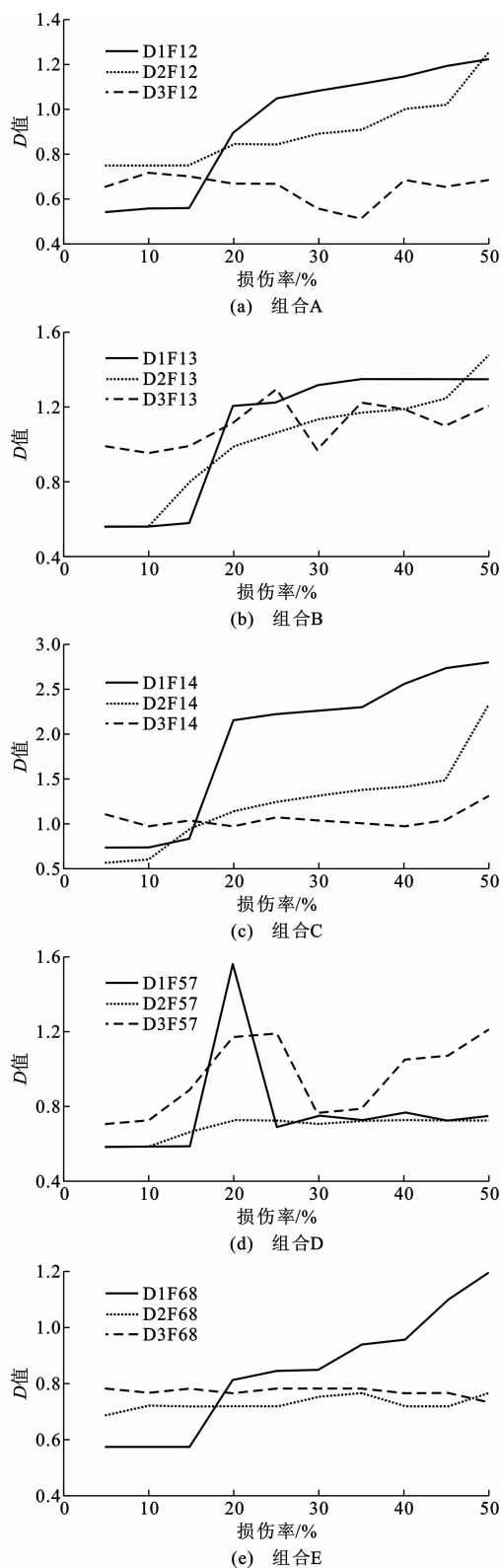


图 4 不同损伤率下的 D 值

Fig. 4 Values of D of Different Damage Ratios

由图 4 可见,大部分损伤指标都是随损伤率的增大而变大。1 阶变化最大,2 阶次之,3 阶最小。

除组合 D 外,其他组合的 1 阶 D 值均能反映损伤情况[图 4(a)、(b)、(c)、(e)],组合 A、B、C 的 2 阶 D 值[图 4(a)~(c)]能较好反映损伤情况。3 阶 D 值不能反映损伤情况。综上所述,建议采用组合 A、B、C 的 1、2 阶 D 值作为损伤指标。布置传感器测点时,应尽量将其中一个布置在损伤附近(如图 3 中的测点 1),才能很好地反映损伤情况。

无损伤情况下 IMF2 的振动传递率见图 5。3 种损伤情况下(损伤率分别为 10%、30%、50%)组合 C 的 IMF2 经傅里叶变换后的振动传递率见图 6,而其振动传递改变率见图 7。

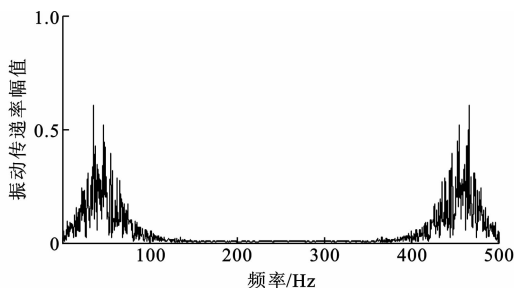


图 5 无损伤情况下 IMF2 的振动传递率

Fig. 5 Vibration Transmissibilities of IMF2 Without Damage Condition

由图 5、6 可见,不同损伤情况下的振动传递率不同,且随损伤率的增大变化加大。损伤率由 10% 变化到 50%,其振动传递率由峰值向两边发生变化,损伤率为 10% 时仅两峰值频率变化较大(无损时幅值为 0.6,损伤率为 10% 时接近 0.7),随损伤率的增大,其振动传递率由峰值频率向两边各频率变化都增大,损伤率为 50% 时各频率均有较大变化(200~300 Hz 区间的传递率为 0.1,无损时极小,而峰值处由 0.6 增大到 1.7),且峰值处变化最大。图 7 反映的情况与图 6 相同,随着损伤率的增大,各频率振动传递改变率增大,也是由峰值向两边发生变化,且峰值处最大(峰值处由 0.75 左右变化到 2.7 左右,200~300 Hz 区间的传递率也由极小变化到 0.2 左右)。

4 结 语

(1)将 EMD 方法和振动传递率相结合,通过求相应 IMF 振动传递率,比较损伤前后相应 IMF 振动传递率的变化来识别损伤是可行的,其在玻璃幕墙开胶损伤识别应用中具有很好的效果,所建立的损伤指标也能较好地反映损伤情况。

(2)将一种新的非线性、非平稳信号的处理方

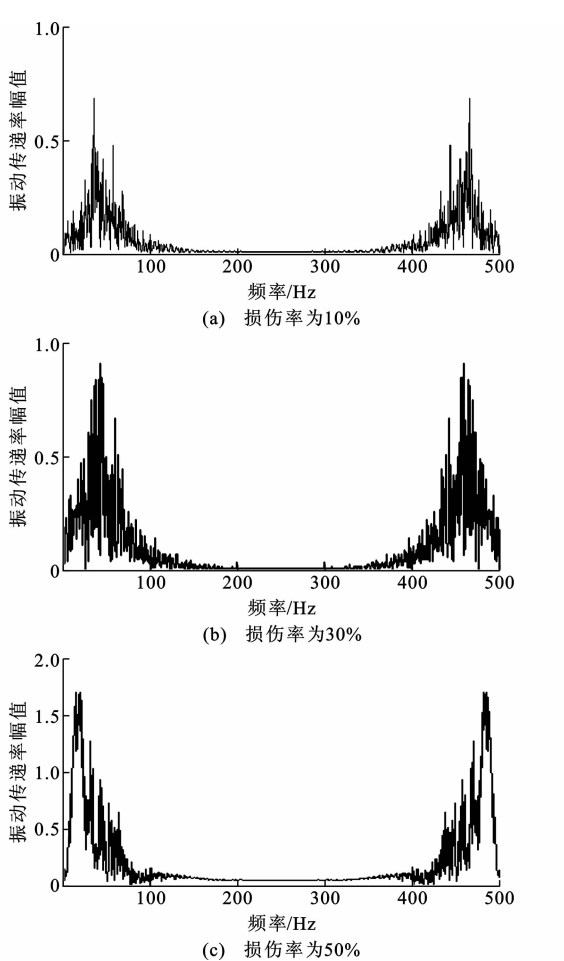


图 6 3 种损伤情况下 IMF2 的振动传递率

Fig. 6 Vibration Transmissibilities of IMF2 with Three Different Damage Conditions

法——EMD 方法引入结构损伤识别中,为结构损伤识别提供了一种新的分析方法,该方法能够有效地提高信噪比,突出结构损伤的信息特征,应用结果表明该方法能够有效地突出损伤特征,可大大地提高损伤识别的准确性。将振动传递率引入结构损伤识别中,从根本上解决了荷载谱量测问题,在很大程度上消减了量测噪声,较好地消除了环境可变性带来的干扰,从而使振动传递率量测具有可重复性,具有更好的工程适用性。将两者结合的动力检测方法,弥补了传统动力检测信号分析方法的不足,解决了动力检测荷载谱量测的问题,为动力检测提供了新的研究思路。

参考文献:

References:

[1] SOHN H, FARRAR C R. Damage Diagnosis Using Time Series Analysis of Vibration Signals[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 3(10): 446-451.

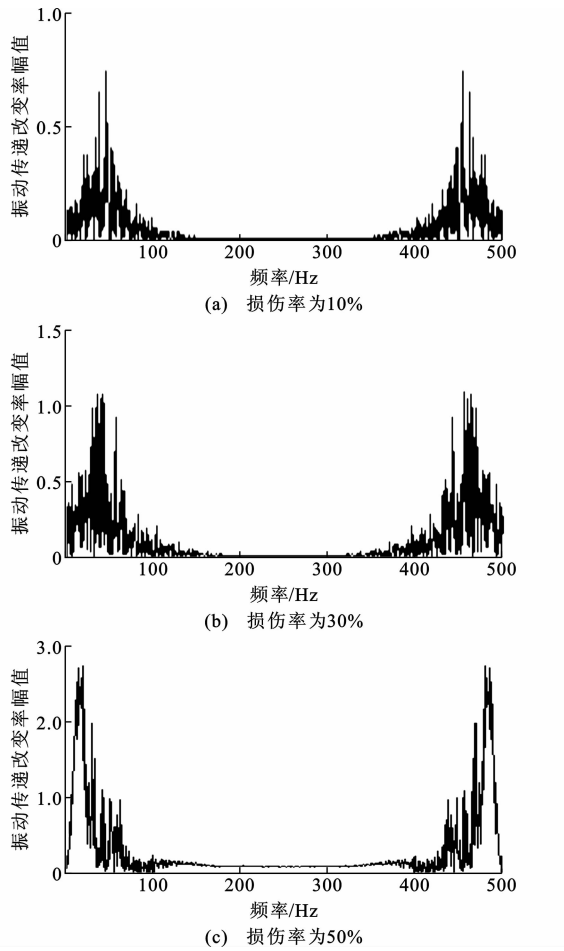


图 7 3 种损伤情况下 IMF2 的振动传递改变率

Fig. 7 Variation Rates of Vibration Transmissions of IMF2 with Three Different Damage Conditions

[2] 胡 为,胡静涛.改进的符号时间序列分析方法及其在电机故障诊断中的应用[J].仪器仪表学报,2009, 30(4):760-766.

HU Wei, HU Jing-tao. Improved Symbolic Time Series Analysis Method and Its Application in Motor Fault Diagnosis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(4): 760-766.

[3] GUEDES S C, GARBATOV Y, VON SELLE H. Fatigue Damage Assessment of Ship Structures Based on the Long-term Distribution of Local Stresses[J]. International Shipbuilding Progress, 2003, 50(1/2): 35-55.

[4] 赵慧敏,夏超英,肖云魁,等.柴油发动机曲轴轴承振动信号的双谱分析[J].振动、测试与诊断,2009, 29(1):14-18,114.

ZHAO Hui-min, XIA Chao-ying, XIAO Yun-kui, et al. Bispectrum Analysis for Vibration Data of Crankshaft Bearing in Diesel Engine[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1):

- 14-18, 114.
- [5] STASZEWSKI W J, ROBERTSON A N. Time-frequency and Time-scale Analyses for Structural Health Monitoring[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 365(1851): 449-478.
- [6] 侯立群, 欧进萍. 基于时频分析的运营桥梁模态参数识别方法[J]. 振动工程学报, 2009, 22(1): 19-25.
HOU Li-qun, OU Jin-ping. Modal Parameters Identification of Bridge in Service Based on Time-frequency Analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(1): 19-25.
- [7] 滕海文, 许树峰, 李秀芬, 等. 结构裂缝损伤识别的连续小波分析方法[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 155-157, 185.
TENG Hai-wen, XU Shu-feng, LI Xiu-fen, et al. Continuous Wavelet Analysis for Crack Detection in Structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 155-157, 185.
- [8] GOKDAG H, KOPMAZ O. A New Damage Detection Approach for Beam-type Structures Based on the Combination of Continuous and Discrete Wavelet Transforms[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 324(3/4/5): 1158-1180.
- [9] HUANG N, SHEN Z, LONG S, et al. The Empirical Model Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] YANG J N, LEI Y, HUANG N E. Damage Identification of Civil Engineering Structures Using Hilbert-Huang Transform[C]//Stanford University. Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford: Stanford University, 2001: 544-553.
- [11] ZHANG R R, MA S, SAFAK E, et al. Hilbert-Huang Transform Analysis of Dynamic and Earthquake Motion Recordings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(8): 861-875.
- [12] HUANG Y X, SCHMITT F G, LU Z M, et al. Analysis of Daily River Flow Fluctuations Using Empirical Mode Decomposition and Arbitrary Order Hilbert Spectral Analysis[J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(1/2): 103-111.
- [13] 孙晓丹, 欧进萍. 基于动力检测的损伤指标评价方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(1): 9-13.
SUN Xiao-dan, OU Jin-ping. Assessment of Vibration-based Damage Indexes in Structural Health Monitoring[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1): 9-13.
- [14] LU Z R, LIU J K, HUANG M, et al. Identification of Local Damages in Coupled Beam Systems from Measured Dynamic Responses[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 326(1/2): 177-189.
- [15] 刘义艳, 段晨东, 巨永锋, 等. 基于神经网络与特征融合的损伤诊断方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 106-110.
LIU Yi-yan, DUAN Chen-dong, JU Yong-feng, et al. Diagnosis Method of Structure Damage Using Neural Network and Feature Fusion[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 106-110.
- [16] 张刚刚, 王春生, 徐岳. 基于径向基函数神经网络的斜拉桥损伤识别[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 49-53.
ZHANG Gang-gang, WANG Chun-sheng, XU Yue. Damage Detection of Cable-stayed Bridge Based on RBF Neural Network[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 49-53.
- [17] 向天宇, 赵人达. 结构损伤识别的双重网格算法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 94-97.
XIANG Tian-yu, ZHAO Ren-da. Dual Mesh Method for Structure Damage Detection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 94-97.
- [18] 田洁, 周楠. 填充墙框架结构在地震作用下的滞回特性与损伤分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(2): 189-195.
TIAN Jie, ZHOU Nan. Hysteretic Response and Damage Analysis of Masonry Infilled Frames Under Severe Earthquake[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(2): 189-195.
- [19] ZHANG H, SCHULZ M J, NASER A, et al. Structural Health Monitoring Using Transmittance Functions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(5): 765-787.