

文章编号:1673-2049(2010)01-0021-04

基于曲率模态小波分析的单塔 斜拉桥损伤识别

管德清,施立成

(长沙理工大学 土木与建筑学院,湖南 长沙 410076)

摘要:基于曲率模态小波分析原理及有限元法分析了含有损伤单元的单塔斜拉桥的振动特性;以 Mexh 小波为母小波,通过对损伤斜拉桥的曲率模态做连续小波变换,由小波系数模极大值位置识别斜拉桥损伤的位置,建立了一种基于曲率模态小波分析识别斜拉桥损伤的方法;采用该方法对单塔斜拉桥的损伤识别进行了计算分析。结果表明:该方法具有有效性,对于各类型桥的损伤诊断具有指导意义。

关键词:曲率模态;小波分析;单塔斜拉桥;有限元法;损伤识别

中图分类号:TU317 **文献标志码:**A

Damage Identification of Single Tower Cable-stayed Bridge Based on Wavelet Analysis of Curvature Mode

GUAN De-qing, SHI Li-cheng

(School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, Hunan, China)

Abstract: Based on the wavelet analysis theory and finite element method, the damage identification method of the curvature modes for beams was presented. The model of finite element method for the single tower cable-stayed bridge was established. The vibration characteristics of beam could be obtained by means of finite element analysis. The curvature modes were analyzed using continuous wavelet transform by Mexh wavelet on multiple scales, and the position of the crack could be identified by the modulus maximum of the wavelet coefficients. A damage identification method based on wavelet analysis of curvature mode was built, which was applied to single tower cable-stayed bridge. The results show that the method is available and can provide reference for damage identification in different bridges.

Key words: curvature mode; wavelet analysis; single tower cable-stayed bridge; finite element method; damage identification

0 引言

随着中国交通事业的快速发展,特大型桥梁结构不断涌现,新旧桥梁数量日益增多。在确保人民

生命财产安全前提下,快速有效地识别桥梁结构的损伤,及时掌握桥梁运营下的健康状况,成为当前桥梁工程研究的热点问题之一。根据结构动力学理论可知,桥梁损伤的存在,必然会影响到桥梁结构的动

收稿日期:2009-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(50578018);湖南省优秀博士论文科研基金项目(2007)

作者简介:管德清(1961-),男,湖南汉寿人,教授,工学博士,E-mail:csgdq@126.com。

态特性,使得各种结构参数在不同程度上受到影响,一般会降低结构的刚度、增大阻尼、改变振动频率与振动模态、引起桥梁结构边界条件的变化等,使其显示出与正常结构不同的动态特性,因此可以利用桥梁系统各种模态参数的变化作为特征值来诊断桥梁的损伤。如何有效地识别桥梁损伤已成为一个重要的研究课题。Kim 等^[1]利用测试频率和模态信息的方法来识别梁的损伤;Pandey 等^[2]用模态曲率来识别损伤,通过对悬臂梁和简支梁的计算分析可知,曲率模态的变化局限于损伤区域附近,在损伤区域之外变化很小,因此可以用这一特性来检测结构的损伤位置;邓焱等^[3]提出了梁的曲率模态与应变模态是直接相关的,通过对实桥标准简支梁损伤的数值仿真,揭示了曲率模态对桥梁损伤的敏感性。

目前各国对于梁的损伤识别,大都是基于固有频率和模态振型的变化来研究的。由于损伤是一种典型的局部现象,而模态参数是结构的整体动力性能指标,所以结构固有频率和振型等动力特性参数对结构损伤有时并不十分敏感,往往只能发现损伤,而无法确定损伤的位置^[4];考虑到小损伤对梁的固有频率影响较小,因此需要有更敏感的检测方法来识别小损伤的位置。近年来,人们成功将小波分析方法应用于结构的损伤诊断领域,而且取得了一定的成果。小波分析方法被誉为“数学显微镜”,它具有空间局部化特性,信号在某点处的小波变换在低尺度上完全由该点附近的局部信息所确定,因而能较好地分析信号的奇异性位置及奇异性的强弱。Liew 等^[5]用离散小波变换对简支梁裂缝位置进行了识别;管德清等^[6]提出了应用转角模态小波变换识别 Timoshenko 梁裂缝的方法,并发现应用转角模态小波变换方法比基本振型小波变换更能有效地识别梁的损伤;Chang 等^[7]则通过对 Timoshenko 梁理论导出的振型函数做了多尺度小波分析,识别出高跨比为 1/80 的悬臂梁内的裂缝;Hong 等^[8]利用 Mexh 小波对梁的基本振型做了多尺度小波分析,准确识别了梁中裂纹位置并讨论了 Lipschitz 指数和损伤程度之间的关系;廖锦翔等^[9]通过小波变换极大值与信号突变点的关系,采用小波变换极大值在多尺度的变换规律来表征信号突变点的性质,进而对桥梁进行损伤识别;Douka 等^[10]应用基本振型的连续小波变换对一带横向开口裂缝的矩形截面悬臂梁进行了损伤识别,并诊断了裂缝的位置和裂缝深度;高宝成等^[11]利用小波分析技术系统地对简支梁裂纹位置进行了识别,尤其是那种不易察觉的

损伤;Shi 等^[12]提出了应用曲率模态小波变换识别连续钢箱梁裂缝的方法。笔者在此基础上,把曲率模态小波变换方法应用到斜拉桥的损伤识别,以一含有损伤单元的单塔斜拉桥为研究对象,通过数值计算得到损伤后的曲率模态,然后对斜拉桥的曲率模态进行连续小波变换,从而识别出斜拉桥的损伤,得到了满意的结果。本文的研究为斜拉桥的损伤识别提供了一种有效的分析方法。

1 理论分析基础

1.1 小波奇异性的识别方法

设函数 $\Psi(t) \in L^1(\mathbf{R}) \cap L^2(\mathbf{R})$, $L^1(\mathbf{R})$ 为实数域可积空间, $L^2(\mathbf{R})$ 为实数域平方可积空间,并且 $\hat{\Psi}(0) = 0$, 即 $\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0$, 则称 $\Psi(t)$ 为一个基本小波或母小波。对母小波 $\Psi(t)$ 做伸缩和平移得

$$\Psi_{a,b}(t) = (\sqrt{|a|})^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbf{R}, a \neq 0 \quad (1)$$

式中: $\Psi_{a,b}(t)$ 为小波函数; a 为尺度因子, 反映信号的频率信息; b 为平移因子, 反映信号的时间信息; t 为连续变量。

母小波还需满足允许条件, 即

$$c_{\Psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (2)$$

式中: c_{Ψ} 为小波变换系数; ω 为圆频率。

由此可见, 小波函数不仅要求具有一定的振荡性, 即它包含着某种频率特征, 而且还要求具有一定的局部性, 即它在一个区间上恒等于 0 或很快地收敛于 0。

设 $\Psi(t)$ 为基本小波函数, $\Psi_{a,b}(t)$ 为连续小波函数, 则对于任意函数或信号 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$, 其连续小波变换的定义为

$$W(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中: $W(a,b)$ 为小波系数; $\Psi^*(\cdot)$ 为函数 $\Psi(\cdot)$ 的复共轭。

连续小波变换可以改写成卷积表达式, 即

$$W(a,b) = (\sqrt{|a|})^{-1/2} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = |a|^{1/2} f^* \bar{\Psi}_{|a|}(b) \right. \\ \left. \bar{\Psi}_{|a|}(b) = |a|^{-1} \Psi^*(-b/a) \right\} \quad (4)$$

式中: f^* 为函数 f 的复共轭。

由此可见, 小波变换也可以看成是信号与滤波器的卷积运算, 从工程意义来看, $\bar{\Psi}_{|a|}(b)$ 可理解成(高通)滤波器。

一般信号的奇异性可分为2种情况:①信号在某一时刻其幅值发生突变,引起信号的非连续,这种类型的突变称为第1种类型的间断点;②信号外观上很光滑,幅值没有发生突变,但是信号的一阶微分有突变发生且一阶微分不连续,这种类型的突变称为第2种类型的间断点。

设 $\theta(t)$ 为一个光滑函数,满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(s) ds = 1$, s 为变量,且 $\theta(s)$ 为 $(1+x^2)^{-1}$ 的高阶无穷小,同时记 $\theta_s(t) = \frac{1}{s}\theta(\frac{1}{s})$,小波函数 $\Psi(t)$ 是它的一阶导数,即 $\Psi(t) = d\theta(t)/dt$,则 $f(t)$ 的连续小波变换为

$$\left. \begin{aligned} W_f(s, u) &= s^{1/2} p(u) = s^{1/2} \frac{d}{du} q(u) \\ p &= f^* \bar{\Psi}_s = f^* \frac{1}{s} \Psi_s^* \left(\frac{1}{s} \right) \\ q &= f^* \bar{\theta}_s = f^* \frac{1}{s} \theta_s^* \left(\frac{1}{s} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

小波系数模极大值 $|W_f(s, u)|$ 就是信号 $f(t)$ 经 $\bar{\theta}_s$ 磨光后的函数的一阶导数极大值,它们恰好对应信号 $f(t)$ 的突变点^[13-16],即由小波系数的模极大值找到信号中的突变点。在对信号进行多尺度分析时,当所用小波函数为某一光滑函数的一、二阶导数时,在信号突变点处小波系数的绝对值比较大,因而可以通过模极大值点的检测来确定奇异点的位置。

在实际检测突变信号时,要求基本小波函数满足定区间上的紧支撑和足够的消失矩。本文中选用了 Mexh 小波对单塔斜拉桥的曲率模态进行小波变换,该函数满足小波允许条件和紧支性要求。

1.2 曲率模态的损伤识别原理

曲率模态是结构的中性面变形模态,能够反映结构局部特性的变化,具有正交性和叠加性,对局部结构的敏感性大大高于位移模态。对应于振动位移模态,曲率模态属于承弯结构振动特性的特殊表现形式。

根据材料力学可知,梁的曲率 ρ 为

$$\rho = \frac{M}{EI} \quad (6)$$

式中: M 为梁的截面弯矩; E 为梁的弹性模量; I 为梁的截面惯性矩。

梁的曲率还可定义为

$$\rho = \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (7)$$

式中: θ 为梁的转角; y 为梁的位移模态。

将式(6)带入式(7)并利用中心差分法可得

$$\rho = \frac{M}{EI} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{l^2} = \phi_n''(x) \quad (8)$$

式中: i 为第 i 个测点; l 为 2 个测点之间的距离; $\phi_n''(x)$ 为梁的第 n 阶曲率模态振型。

由式(8)可知,结构的局部损伤会导致结构局部刚度 EI 下降,从而引起曲率模态振型 $\phi_n''(x)$ 数值发生突变,因此,通过对曲率模态振型 $\phi_n''(x)$ 的突变分析,可以诊断结构的损伤。本文中对损伤后斜拉桥的曲率模态进行了连续小波变换,通过小波系数模极大值判定损伤的存在,从而确定其位置。

2 有限元模型

本文中选用 1 座单塔双索面斜拉桥作为研究对象,跨径为 84 m+84 m,总长 168 m,塔高 56 m,桥面宽 15 m,梁高 1.0 m。为方便叙述,假定两跨分别为 I 跨和 II 跨。采用有限元法分析梁的动力特性时,沿主梁方向划分 55 个单元,单元间距为 3 m,主塔和主梁采用 Beam4 单元模拟,斜拉索采用 Link10 单元模拟。单塔双索面斜拉桥模型如图 1 所示。

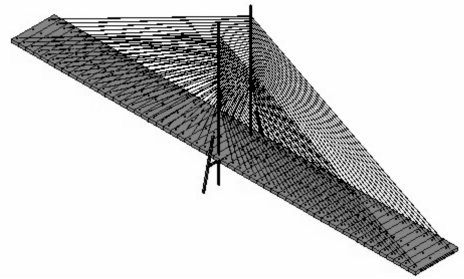


图1 单塔双索面斜拉桥模型

Fig. 1 Model of Single Tower Cable-stayed Bridge with Double Cable Planes

采用有限元法分析斜拉桥的动力特性时,可通过斜拉桥主梁局部刚度 EI 下降来模拟损伤带的存在。计算时提取桥面中轴线 56 个节点模态振型,对其进行连续小波变换。应用 Lanczos 法做结构的模态分析,共计算了 4 种工况:工况 1, I 跨跨中有 1 条损伤带;工况 2, I 跨有 2 条损伤带;工况 3, I、II 跨中各有 1 条损伤带;工况 4, I 跨有 2 条损伤带, II 跨有 1 条损伤带。利用 Mexh 小波对其曲率模态进行小波变换,通过小波系数模极大值点来识别这 4 种工况下损伤的位置,并对识别结果进行对比分析。

3 数值分析

以 Mexh 小波为母小波,对有损伤的桥梁曲率模态进行连续小波变换,得到各工况在尺度 1 上的曲率模态小波系数,如图 2 所示。

工况 1:假设在 I 跨跨中处有 1 条损伤带,损伤 15%。分析发现小波系数曲线上有 1 个明显的突变

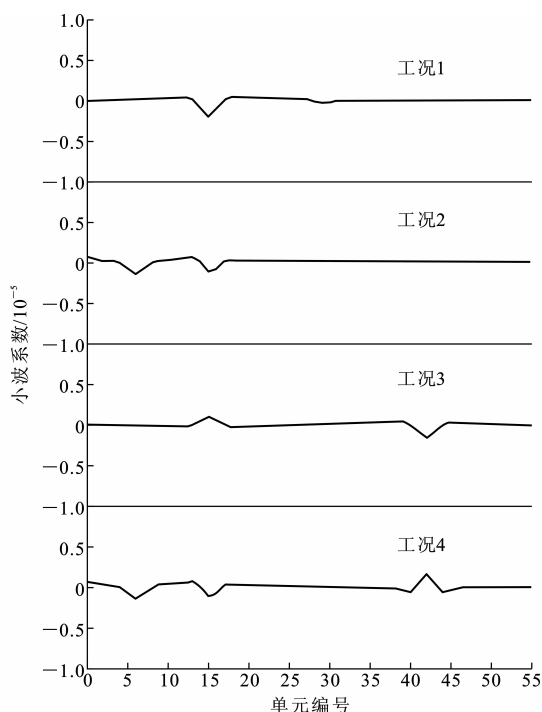


图2 各工况在尺度1上的曲率模态小波系数

Fig. 2 Wavelet Coefficients of Curvature Mode for Scale 1 Under Different Conditions

点,恰好对应着1条损伤带的位置。

工况2:假设在I跨20、42 m处各有1条损伤带,损伤15%。分析发现小波系数曲线上有2个明显的突变点,恰好对应着2条损伤带的位置。

工况3:假设在I跨42 m和II跨126 m处共有2条损伤带,损伤15%。分析发现小波系数曲线上有2个明显的突变点,恰好对应着2条损伤带的位置。

工况4:假设在I跨20、42 m和II跨126 m处共有3条损伤带,损伤15%。分析发现小波系数曲线上有3个明显的突变点,恰好对应着3条损伤带的位置。

通过以上计算分析可知,利用本文中所建立的损伤识别方法能够有效地识别单塔斜拉桥的损伤。

4 结 语

(1)采用曲率模态小波分析方法能够识别斜拉桥的损伤,首先通过有限元法计算求得损伤斜拉桥的曲率模态,然后利用小波系数模极大值识别其损伤的位置。数值分析证明了该方法的有效性。

(2)用有限元法分析损伤斜拉桥的振动特性,然后用Lanczos法计算曲率模态,最后对斜拉桥的曲率模态进行小波分析的方法可以用于斜拉桥的损伤识别。

(3)本文中提出的单塔斜拉桥的损伤识别方法,从原理上可以方便地推广到多塔斜拉桥以及其他类型桥梁的损伤识别问题中,因而该方法对于各类型桥梁的损伤诊断具有指导意义。

(4)采用该方法解决工程实际中斜拉桥的损伤识别问题时,可以用实测得到的模态参数,通过对斜拉桥的曲率模态进行小波变换,利用小波系数模极大值可识别斜拉桥的损伤,为斜拉桥的损伤诊断提供了参考。

参考文献:

References:

- [1] KIM J T, STUBBS N. Improved Damage Identification Method Based on Modal Information[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 252(2): 223-238.
- [2] PANDEY A K, BISWAS M, SAMMAN M M. Damage Detection from Changes Incurvature Mode Shapes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [3] 邓 焱, 严普强. 梁及桥梁应变模态与损伤测量的新方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(11): 123-127.
DENG Yan, YAN Pu-qiang. New Approach for Strain Modal Measurement and Damage Detection of Bridges [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(11): 123-127.
- [4] 孙增寿, 韩建刚, 任伟新. 基于曲率模态和小波变换的结构损伤识别方法[J]. 振动、测试与诊断, 2005, 25(4): 263-267.
SUN Zeng-shou, HAN Jiang-gang, REN Wei-xin. Structural Damages Identification Based on Curvature Mode and Wavelet Transform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2005, 25(4): 263-267.
- [5] LIEW K M, WANG Q. Application of Wavelet Theory for Crack Identification in Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(2): 152-157.
- [6] 管德清, 蒋 欣. 基于小波分析的 Timoshenko 梁裂缝识别研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(5): 67-70.
GUAN De-qing, JIANG Xin. Crack Identification of a Timoshenko Beam by Means of Wavelet Analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(5): 67-70.
- [7] CHANG C C, CHEN L W. Detection of the Location and Size of Cracks in the Multiple Cracked Beam by Spatial Wavelet Based Approach[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(1): 139-155.

- 地震工程, 2005, 21(1): 55-60.
- ZHANG Yun-feng, ZHOU Li-jian. Dynamic Response Spectrum Analysis of Standing Tank Systems[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2005, 21(1): 55-60.
- [12] HARRIS H G, SABNIS G M. Structural Modeling and Experimental Techniques[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc, 1983: 48-62.
- [13] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- ZHU Bo-long. Structural Seismic Test[M]. Beijing: Seismic Press, 1989.
- [14] 樊永宁, 解盘石, 来兴平, 等. 深部复杂应力环境下巷道破坏固-流耦合数值模拟分析[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(1): 1-4.
- FAN Yong-ning, XIE Pan-shi, LAI Xing-ping, et al. Numerical Simulation on Solid-fluid Couple Characteristics of Roadway in Deep-mine and Complex Conditions[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(1): 1-4.
- [15] 郭健, 刘伟庆. 钢筋混凝土异形柱框架-短肢剪力墙结构振动台试验与理论分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(5): 610-615.
- GUO Jian, LIU Wei-qing. Shaking Table Test and Theoretical Analysis on RC Frame-short Pier Shear Wall Structure with Special-shaped Columns[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(5): 610-615.
-
- (上接第 24 页)
- [8] HONG J C, KIM Y Y, LEE H C, et al. Damage Detection Using the Lipschitz Exponent Estimated by the Wavelet Transform: Applications to Vibration Modes of a Beam[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(7): 1803-1816.
- [9] 廖锦翔, 袁明武, 张劲泉. 小波变换在桥梁结构损伤识别中的应用[J]. 公路交通科技, 2004, 21(11): 30-34.
- LIAO Jin-xiang, YUAN Ming-wu, ZHANG Jin-quan. Application of Wavelet Transform on Damage Detection of Bridge Structure[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(11): 30-34.
- [10] DOUKA E, LOURIDIS S, TROCHIDIS A. Crack Identification in Beams Using Wavelet Analysis[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(13/14): 3557-3569.
- [11] 高宝成, 时良平, 史铁林, 等. 基于小波分析的简支梁裂缝识别方法研究[J]. 振动工程学报, 1997, 10(1): 81-85.
- GAO Bao-cheng, SHI Liang-ping, SHI Tie-lin, et al. Identification of Simple-supported Beam Cracks by Means of the Wavelet Analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 1997, 10(1): 81-85.
- [12] SHI L C, GUAN D Q, JIANG Z K. Research on Damage of Continuous Steel Girders Identification by Wavelet Analysis of the Curvature Mode[C]//IC-
- ASS. Proceedings of Sixth International Conference on Advances in Steel Structures. Hong Kong: ICASS, 2009: 201-209.
- [13] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- SUN Yan-kui. Wavelet Analysis and Its Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [14] 赵治刚, 谭云亮, 王斐峰. 钢纤维混凝土试验研究与疲劳破坏模拟[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(2): 40-43.
- ZHAO Zhi-gang, TAN Yun-liang, WANG Fei-feng. Experimental Study and Fatigue Failure Simulation on Steel Fiber Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(2): 40-43.
- [15] 康彤. 低应变反射波法检测与钻芯法检测的可靠性分析与对策[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(7): 43-45.
- KANG Tong. Analysis and Countermeasure of Dependability of Low-strain Reflected Wave Test and Drilling Core Test[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006, 23(7): 43-45.
- [16] 赵煜, 刘波. 大曲率连续钢箱梁桥剪力滞试验与分析[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(3): 311-316.
- ZHAO Yu, LIU Bo. Test and Analysis of Shear Lag for Continuous Steel Bridge with Large Curvature[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(3): 311-316.