

基于应变模态小波变换的框架 结构损伤识别研究

管德清*¹, 黄燕²

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410076; 2. 湖南交通职业技术学院, 长沙 410004)

摘要:采用应变模态的小波变换方法研究了框架结构的损伤识别问题。以有限元分析求解含裂缝平面框架应变模态为基础,利用 Gauss2 小波对框架的应变模态进行小波变换,再用 db3 小波对应变模态小波变换系数进行去噪处理,最后通过对去噪处理后的小波系数模极大值点来识别框架结构裂缝的位置,建立了基于应变模态小波变换识别平面框架损伤的方法。以一层平面框架为例,分别给出了框架梁含有裂缝、框架柱含有裂缝、框架梁和柱均含有裂缝的有限元模型,计算得到结构的应变模态,并通过应变模态小波分析来识别平面框架裂缝的位置。从识别结果发现,经小波去噪处理后应变模态小波系数的模极大值点能够有效识别框架结构的损伤,数值计算验证了方法的有效性。本文研究对工程结构损伤诊断有参考价值。

关键词:结构损伤识别; 应变模态; 小波变换; 小波去噪
中图分类号:TU317⁺5; TN911.6 **文献标识码:**A

1 引言

框架是土木工程中常见的基本结构形式,在许多工程结构中得到广泛应用。由于结构局部损伤而导致结构整体破坏的事故时有发生,因而研究框架结构的损伤识别方法不仅具有重要的理论意义,而且对于工程应用有参考价值。将结构动力学原理和现代损伤识别技术相结合对结构进行损伤诊断的研究已成为相关科技工作者关注的热点。结构模态参数(振动频率、振型和模态阻尼等)是结构物理特性参数(质量、刚度、阻尼)的函数,结构损伤的发生必然导致结构物理特性发生变化,即结构参数发生改变,利用现代测试技术准确地测出这些参数变化,就可对结构损伤状况进行诊断^[1]。近年来的研究表明,对结构局部损伤直接定位最好选取局域量,其中,应变类参数如应变模态、曲率模态等优于位移类参数如位移模态、柔度矩阵等^[2,3]。Yao G. C. 等^[4]分别用位移振型(DMS)和应变振型(SMS)研究了五层框架结构局部损伤问题,结果说明位移振型对结构某些位置的损伤不敏感,而应变

振型则对不同位置的损伤都较敏感。Li Y. Y. 等^[5]基于 Rayleigh-Ritz 理论,通过对有损伤的板类结构的应变模态进行分析,得到应变模态曲线,根据连续性条件和残余应变模态曲线法,用灵敏度指标来识别结构损伤的位置。小波分析作为一种具有多分辨率的时频分析方法,可以将交织在一起的各种不同频率组成的混合信号分解成不同频段的子信号,因而在特征提取、信号奇异性检测及信号去噪等方面有着独特的优势,它在结构损伤识别中的应用开始受到研究人员的关注。Hou 等^[6]应用 db 小波分解对 ASCE 的基准(Benchmark)模型(即一座四层的钢框架模型)进行了损伤识别研究。Huang C. S. 等^[7]对三层不对称钢框架的加速度响应连续小波变换方法来识别结构的损伤。Ovanesova A. V. 等^[8]对在支座和梁柱连接节点附近含有裂缝平面框架的动力参数用离散小波变换进行了损伤检测研究。王俊等^[9]通过对脉冲激励下有缺陷的框架结构模型的响应信号分析,利用小波包分解来识别结构的缺陷位置。李洪泉等^[10]以钢筋混凝土框架模型振动试验为基础,应用小波变换将模型地震反应信号按不同频段分解,分析结构地震损伤反应信号的局部特征,从而确定结构的损伤位置。岳林等^[11]提出了一种基于 Morlet 小波 FIR 滤波器组滤除脉冲激励下输出信号的噪声

收稿日期:2008-08-23;修改稿收到日期:2009-06-17.

基金项目:国家自然科学基金(50578018);湖南省优秀
博士论文基金资助项目.

作者简介:管德清*(1961-),男,博士,教授
(E-mail:csdq@126.com);
黄燕(1982-),女,硕士.

的方法,对二维框架结构的四阶模态系统进行仿真。仿真结果表明,在大噪声污染下,原来已经识别不出的参数,经过滤波去噪后,可以识别出来,而且结果良好。管德清等^[12]提出了基于转角模态小波变换识别带刚度下降段的弹性地基梁损伤识别方法,通过数值算例验证了方法的有效性。本文通过对平面框架动力参数的有限元模态分析,提出了运用应变模态小波分析识别框架结构损伤的方法。以一层平面框架为例,分别研究了框架梁含有裂缝、框架柱含有裂缝、框架梁和柱均含有裂缝的识别问题。首先建立框架结构的有限元模型,计算得到结构的应变模态,然后利用 Guass2 小波(即 Mexh 小波)对应变模态进行连续小波变换,再用 db3 小波对应变模态小波变换系数进行去噪处理,最后通过对去噪处理后的小波系数模极大值点来识别框架结构裂缝的位置。从识别结果发现,通过 db3 小波去噪处理后的小波系数图能够有效地识别裂缝的位置。

2 应变模态分析与结构损伤识别原理

对于一个具有阻尼的多自由度系统,系统的运动方程可表示为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

式中 $[M]$ 为质量矩阵, $[C]$ 为阻尼矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{f(t)\}$ 为荷载向量。

记 $\{x\} = \{X\}e^{j\omega t}$, 对应于以上系统的无阻尼自由振动规律可表示为

$$[K]\{\Phi_i\} = \omega_i^2 [M]\{\Phi_i\} \quad (2)$$

式中 ω_i 为第 i 阶模态的振动频率, $\{\Phi_i\}$ 为第 i 阶模态的振型向量(特征向量)。本文采用有限元方法,在做结构的模态分析时用 Lanczos 法,直接生成一组相互正交的 Lanczos 向量,对运动方程进行缩减,然后通过求解缩减了的运动方程的特征值问题,进而就可得到原系统方程的特征解。采用这种方法,将平面框架结构进行有限元计算分析,可求出框架的基本振型和转角模态。弹性梁的转角和应变的关系:

$$\varepsilon = K \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3)$$

式中 x 为沿直梁长度方向坐标, θ 为梁的转角, K 为常量。经离散化处理,有

$$\varepsilon_i = \frac{K(\theta_{i+1} - \theta_i)}{\Delta} \quad (4)$$

式中 θ_i 和 θ_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 截面处梁的转角,

Δ 为两挠度间梁的长度。通过以上计算,可以得到弹性梁的近似应变值,再经过归一化处理可以得到结构的应变模态。

在分析含裂缝框架的抗弯刚度时,用一弹性铰来代替结构中的裂缝^[13]。弹性铰刚度 $k_r = 1/C$, $C = (5.346h/EI)J(\delta)$, $\delta = a/h$, 其中 a 为裂缝深度, h 为截面高度, 而

$$J(\delta) = 1.8624\delta^2 - 3.95\delta^3 + 16.37\delta^4 - 37.22\delta^5 + 76.81\delta^6 - 126.9\delta^7 + 172\delta^8 - 143.97\delta^9 + 66.56\delta^{10} \quad (5)$$

在裂缝截面处有 $EI(v^+) \neq EI(v^-)$, 但结构仍应满足变形协调条件和内力平衡条件, 其中弯矩:

$$EI(v^+) \frac{d^2 u(v^+)}{dx^2} = EI(v^-) \frac{d^2 u(v^-)}{dx^2} \quad (6)$$

由上式可知 $\frac{d^2 u(v^+)}{dx^2} \neq \frac{d^2 u(v^-)}{dx^2}$, 说明损伤梁的转角振型曲线在裂缝截面一阶导数不连续, 即应变模态曲线不连续。因此, 可由应变模态来识别结构的损伤。

3 小波奇异性理论及小波去噪方法

3.1 小波奇异性理论

对于任意的函数或者信号 $f(t)$, 满足 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$, 且 $\psi(t)$ 满足小波容许条件, 则 $f(t)$ 的连续小波变换定义为

$$WT_f(a, b) = [f(t), \phi_{a,b}(t)] = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (7)$$

$f(t)$ 连续小波变换定义的卷积表达式为

$$WT_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt = |a|^{1/2} f * \bar{\psi}_{|a|}(b) \quad (8)$$

式中 $\bar{\psi}_{|a|}(t) = |a|^{-1} \psi^*(-t/a)$, a 为尺度因子, b 为平移因子; a, b 和 $t \in \mathbf{R}$ 且 $a \neq 0$, $\psi(t)$ 为基本小波或称为母小波, $\psi^*(t)$ 表示 $\psi(t)$ 的复共轭。

经过尺度伸缩与时间平移生成小波函数族 $\phi_{a,b}(t)$, 即小波母函数:

$$\phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right), \quad a, b \in \mathbf{R}, a \neq 0 \quad (9)$$

母小波满足如下条件:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (10)$$

从小波的定义可知, 小波函数不仅要求具有一定的震荡性, 即它包含着某种频率特征, 而且还要

求具有一定的局部性,即在一个区间上恒等于0或很快地收敛于0。

综上,式(7)是把函数 $f(t)$ 分解为若干个小波系数 $WT_f(a,b)$, 将小波系数对函数 $f(t)$ 进行重构,即

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} WT_f(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{1}{a^2} da db$$

$$a, b \in \mathbf{R}, a \neq 0 \quad (11)$$

设 $\theta(t)$ 是一个光滑函数,满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(s) ds = 1$ 且 $\theta(s)$ 为 $1/(1+x^2)$ 的高阶无穷小,同时记 $\theta_s(t) = \frac{1}{s} \theta\left(\frac{t}{s}\right)$, 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

$$Wf(s,u) = s^{1/2} (f * \bar{\psi}_s)(u) = s^{1/2} \frac{d}{du} (f * \bar{\theta}_s)(u) \quad (12)$$

可见,小波变换模极大值 $|Wf(s,u)|$ 就是 f 经 $\bar{\theta}_s$ 平滑后的函数的一阶导数的极大值,它们正好对应了信号 $f(t)$ 的突变点,也就是说由小波变换的模极大值找到信号中的突变点,因而可以通过模极大值点的检测来确定奇异点的位置。

3.2 小波去噪方法

一个含噪声的一维信号的模型可以表示成如下形式:

$$x(t) = f(t) + \sigma n(t), \quad t = 0, \dots, n-1 \quad (13)$$

式中 $f(t)$ 为要研究的真实信号, $n(t)$ 为服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布的高斯白噪声, $x(t)$ 为含噪声的信号, σ 为信噪比。对上式作小波变换:

$$W_x(a,b) = [x, \psi_{a,b}] = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbf{R}} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (14)$$

显然

$$W_x(a,b) = [x, \psi_{a,b}] = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbf{R}} [f(t) + \sigma n(t)] \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt =$$

$$|a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbf{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt +$$

$$|a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbf{R}} \sigma n(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt =$$

$$W_f(a,b) + W_{\sigma n}(a,b) \quad (15)$$

由信号与噪声的小波变换在各尺度下的不同传播特性可知,函数 $f(t)$ 的小波变换模极大值将随着尺度 a 的增大而增大,函数 $\sigma n(t)$ 的小波变换模极大值随着尺度的增大而减小。

根据以上小波分析原理,在实际检测突变信号,选择小波基时,要求基本小波函数满足定区间的紧支撑和足够的消失矩。本文选用具有二阶消失矩的 Gauss 函数的二阶导数 Mexh 小波作为母小波对框架的应变模态进行连续小波变换,然后再选用 db3 小波对应变模态小波变换系数进行软阈值去噪处理,去噪后的小波系数模极大值即对应于框架裂缝位置。

4 数值模拟分析

根据上述原理,本文研究了一层框架结构的裂缝识别问题。该框架为梁柱节点刚接,两端支座固结的超静定平面框架。组成框架的各杆件均为等截面直杆,假定各部分的长度均为 1200 mm,截面尺寸为 50 mm × 30 mm,材料为钢材 Q235,弹性模量 $E = 2.1 \times 10^{11}$ N/m²,密度 $\rho = 7800$ kg/m³,泊松比 $\mu = 0.3$,框架的尺寸如图 1 所示。利用有限单元法分析框架的动力特性时,将框架的每个杆件均等分为 1200 个单元。由 A-B-C-D 的顺序给框架所有单元在整体坐标系下编号为 1 ~ 3600。应用 Lanczos 法共计算分析了具有三种不同裂缝工况下框架结构的应变模态。工况 I: 框架梁 BC 含有裂缝; 工况 II: 框架柱 AB 和 CD 含有裂缝; 工况 III: 框架梁 BC 和柱 AB 含有裂缝。然后利用 Gauss2 小波(即 Mexh 小波)对其应变模态进行多尺度小波变换,再用 db3 小波对应变模态小波变换系数进行去噪处理,最后通过去噪后的小波系数模极大值

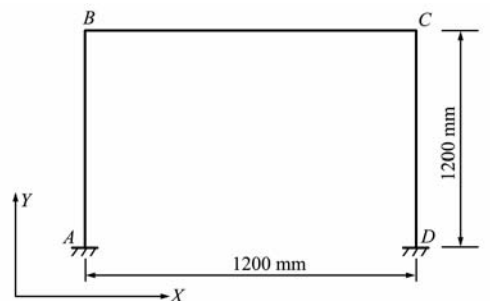


图1 平面框架计算模型

Fig. 1 Analytical model for one-story plane frame

点来识别这三种工况下裂缝的位置,并对识别结果进行对比分析。

4.1 框架梁 BC 含有裂缝

假设在距框架梁 B 节点 1/3 处的 1500 号单元有一条 1 mm 宽、3 mm 深的裂缝。用 Guass2 小波作为母小波,对有裂缝梁的框架应变模态进行小波变换,得到如图 2 所示的小波系数图,发现除 1500 处出现模极大值外仍有许多不规则突起,再用 db3 小波对应变模态小波系数进行去噪处理,如图 3 所示。可以看到,仅在 1500 号裂缝单元处出现了小波系数模的极大值。

4.2 框架柱 AB 和 CD 均含有裂缝

假设在框架左柱距 A 支座 2/3 处(即 800 号单元)和在框架右柱距 B 支座 1/2 处(即 3001 号单元)各有一条 1 mm 宽、3 mm 深的裂缝。用 Guass2 小波对此工况下的应变模态进行连续小波变换,得到如图 4 所示的小波系数图,发现也有许多不规则的突起,再用 db3 小波对应变模态小波系数进行去噪处理,如图 5 所示。从中可以看到,经

db3 小波去噪处理后的尺度 1 上的小波系数图中有且仅有两个奇异点,位置分别在 800、3001 号单元,正好对应着在此工况下两条裂缝的位置。

4.3 框架梁 BC 和柱 AB 含有裂缝

假设在框架左柱距 A 支座 2/3 处(即 800 号单元)和框架梁距 C 节点 1/3 处(即 2100 号单元)上各有一条 1 mm 宽、2 mm 深的裂缝。同样使用 Guass2 小波对此工况下的应变模态进行尺度 1 和尺度 3 连续小波变换,得到如图 6 所示的小波系数图,发现稠密的噪声使得奇异点的位置不很明晰;再用 db3 小波对应变模态小波系数进行去噪处理,如图 7 所示。从中可以看到,经 db3 小波去噪处理后的尺度 1 上的小波系数图中仅在 800、2100 号单元处出现模的极大值,说明仅在这两个单元处有裂缝。

通过上述三种工况下的计算分析,说明应变模态小波变换及小波去噪方法能有效地识别框架结构的损伤。

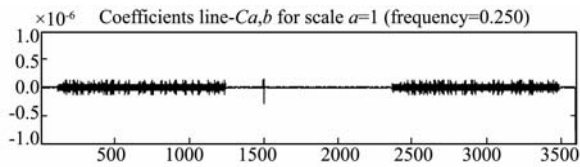


图2 框架梁含有裂缝在尺度 1 上应变模态 Guass2 小波变换系数
Fig. 2 Wavelet coefficients line of strain mode of the frame beam with a crack for scale $a=1$ using gauss2 wavelet

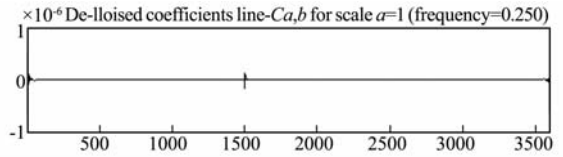


图3 框架梁含有裂缝在尺度 1 经 db3 小波去噪后的小波系数
Fig. 3 Denoised wavelet coefficients line of strain mode of the frame beam with a crack for scale $a=1$ using db3 wavelet

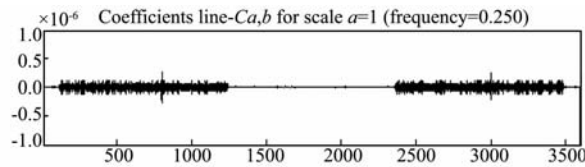


图4 框架柱含有裂缝在尺度 1 上应变模态 Guass2 小波变换系数
Fig. 4 Wavelet coefficients line of strain mode of each frame column with a crack for scale $a=1$ using gauss2 wavelet

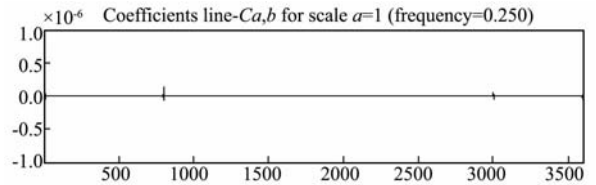


图5 框架柱含有裂缝在尺度 1 上经 db3 小波去噪后的小波系数
Fig. 5 Denoised wavelet coefficients line of strain mode of each frame column with a crack for scale $a=1$ using db3 wavelet

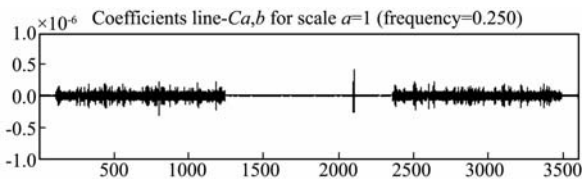


图6 框架梁和柱含有裂缝在尺度 1 上应变模态 Guass2 小波变换系数
Fig. 6 Wavelet coefficients line of strain mode of each frame beam and column with a crack for scale $a=1$ using gauss2 wavelet

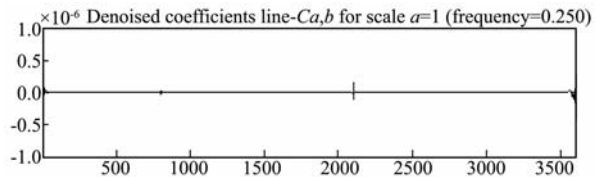


图7 框架梁和柱含有裂缝在尺度 1 上经 db3 小波去噪后的小波系数
Fig. 7 Denoised wavelet coefficients line of strain mode of each frame beam and column with a crack for scale $a=1$ using db3 wavelet

5 结 论

通过对框架结构应变模态的有限元计算分析,根据小波奇异性原理及小波去噪方法,成功地识别了平面框架的损伤,并通过分析可以得到如下结论。

(1) 通过有限元计算分析,求解含有裂缝平面框架的应变模态,再经过小波变换及去噪处理来识别框架结构裂缝的方法是可行的,数值计算分析结果验证了本文方法的正确性。

(2) 用 Guass2 小波分别对三种不同损伤情况下平面框架的应变模态进行了连续小波变换,发现小波系数图中含有大量的噪声,影响对奇异点位置的识别效果。

(3) 通过 db3 小波对平面框架应变模态的小波变换系数进行去噪处理,发现采用软阈值法能够很好地去除噪声,保留有用信号,经过去噪处理后的小波系数图能够有效地识别裂缝位置。

(4) 本文提出的基于应变模态小波分析识别平面框架裂缝的方法,在工程实际应用中,可以通过实测得到结构的应变参数,再经过归一化处理,利用小波方法对这些模态参数进行小波分析来识别结构已有的损伤,因而本文方法对工程应用有参考价值。

参考文献(References):

- [1] 李德葆,陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社,2001. (LI De-bao, LU Qiu-hai. *Experiment Modal Analysis and Application*[M]. Beijing: Science Press,2001. (in Chinese))
- [2] Guido De Roeck, Ren Wei-xin. Structural damage identification using modal data. 2; test verification[J]. *ASCE Journal of Structural Engineering*,2002,**128**(1):96-104.
- [3] Abdel Wahab M M. Damage detection in bridges using modal curvatures; application to a real damage scenario[J]. *Journal of Sound and Vibration*,1999,**226**(2):217-235.
- [4] Yao G C, et al. Damage diagnosis of steel frame using vibrational signature analysis[J]. *Journal of Engineering Mechanics*,1992,**118**(9):1949-1961.
- [5] Li Y Y, Cheng L, Yam L H, Wong W O. Identification of damage locations for plate-like structures using

damage sensitive indices; strain modal approach[J]. *Computers & Structures*,2002,**80**(25):1881-1894.

- [6] Hou Z, Noon K, Amand M, St R. Wavelet-based approach for structural damage detection[J]. *Journal of Engineering Mechanics*,2000,**126**(7):677-683.
- [7] Huang C S, Su W C. Identification of modal parameters of a time invariant linear system by continuous wavelet transformation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*,2007,**21**(4):1642-1664.
- [8] Ovanosova A V, Suárez L E. Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures[J]. *Engineering Structures*,2004,**26**(1):39-49.
- [9] 王 俊,汪凤泉,韩晓林,等. 基于小波分解的框架结构缺陷识别方法[J]. 振动、测试与诊断,2002,**22**(4):315-318. (WANG Jun, WANG Feng-quan, HAN Xiao-lin. Wavelet-based method for frame structure damage detection[J]. *Journal of Vibration Measurement & Diagnosis*,2002,**22**(4):315-318. (in Chinese))
- [10] 李洪泉,董 亮,吕西林. 基于小波变换的结构损伤识别与试验分析[J]. 土木工程学报,2003,**36**(5):52-57. (LI Hong-quan, DONG Liang, LÜ Xi-lin. Identification of structural damage and test study based on wavelet transform[J]. *China Civil Engineering Journal*,2003,**36**(5):52-57. (in Chinese))
- [11] 岳 林,张令弥. 脉冲激励下信号去噪新方法研究和仿真[J]. 振动工程学报,2003,**16**(3):335-338. (YUE-Lin, ZHANG Ling-mi. Study and simulation on new signal de-noise method under impulse excitation[J]. *Journal of Vibration Engineering*,2003,**16**(3):335-338. (in Chinese))
- [12] 管德清,黄 燕. 基于转角模态小波分析的弹性地基梁损伤识别研究[J]. 振动与冲击,2008,**27**(5):44-47. (GUAN De-qing, HUANG Yan. Damage identification of elastic foundation beams based on wavelet transform of rotation mode[J]. *Journal of Vibration and Shock*,2008,**27**(5):44-47. (in Chinese))
- [13] 任宜春,易伟建. 基于小波分析的梁裂缝识别研究[J]. 计算力学学报,2005,**22**(4):399-404. (REN Yi-chun, YI Wei-jian. Crack identification by means of the wavelet analysis[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*,2005,**22**(4):399-404. (in Chinese))

Joint simulation method in conception design of car body structure

PAN Xing-chen¹, HOU Wen-bin¹, ZHANG Yu², LIU Bing², HU Ping^{*1}

(1. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. R&D Center, FAW Changchun 130023, China)

Abstract: The way of non-coupling was introduced to use as a method to simulate the detailed joint model in the conception design. Based on interactional effect among each branch of the detailed joint model, the non-coupling way is described as a principle to make a conceptual joint model. Considered the physical property of the detailed joint model, the non-coupling way could make each branch of the joint model be independent in the angle displacement and be consistent with other in the linear displacement. So the conceptual joint is made of the torsion springs and ball link in this paper. The torsion springs control the angle displacement of the branch of the joint model and the ball link makes each branch be relative in linear displacement. The stiffness of torsion spring could be obtained by solution of stiffness equations which could be got through analyzing the detailed joint model by the FEM software. This method to simulate detailed model has been validated by experiments, and the results have been proved feasible.

Key words: concept design; joint; non-coupling; simulation

(上接第 329 页)

Damage identification of frame structure by means of wavelet analysis of strain mode

GUAN De-qing^{*1}, HUANG Yan²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

2. Hunan Communication Polytechnic College, Changsha 410004, China)

Abstract: Based on wavelet transform of strain mode, the damage identification of plane frame was studied in this paper. Solving strain modal parameters of plane frames with cracks by means of the finite element theory, applying the gauss2 wavelet transform to analyse the stain mode of plane frame, and denoising the wavelet coefficients of the strain mode by db3 wavelet, then the location of crack of the plane frame could be identified by the maximum of wavelet coefficients after denoising. Therefore, this method was proposed for damage identification of plane frames based on strain mode. Taking one-story plane frame for example, three finite element models, including a frame beam with a crack, each frame column with a crack, and each frame beam and column with a crack, were set up separately, then the above-mentioned method was applied to identify the location of the crack. The results show that the method is effective, and it may be useful in damage identification and diagnosis in structures.

Key words: structural damage identification; strain mode; wavelet transform; wavelet denoising