

利用组合参数的结构损伤识别及试验研究*

唐和生¹ 薛松涛^{1,2} 陈 蔚¹ 王远功¹

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 日本近 大学理工学部建筑学科, 日本)

摘 要 利用状态向量直接求导的新方法, 全面地分析了基于结构振动模态参数(频率、特征向量和动柔度)关于设计参数(质量、刚度和阻尼)的相对灵敏度。该方法比传统的方法计算简单方便, 而且弥补了传统方法中参数考虑不全的缺点, 这样更符合实际工程。对一框架结构进行了数值模拟分析, 研究表明动柔度矩阵关于结构刚度灵敏度相对于其他模态参数为最高, 振型次之, 频率为最小, 这对选取损伤特征参数时有重要参考价值。提出由结构前几阶固有频率变化率、频率变化比值以及动柔度置信因子构成的组合参数作为神经网络的输入向量的损伤识别方法, 对于多种工况进行了框架结构模型的振动试验。试验结果表明: 采用组合参数训练的神经网络, 对结构损伤位置和程度识别较采用单一参数具有更好的识别效果。

关键词: 结构损伤识别, 组合参数, 神经网络, 相对灵敏度

中图分类号: TU973.2 **文献标识码:** A

0 引 言

振动诊断方法作为一种无损检测技术与神经网络方法对结构损伤进行识别是近年来的热门研究课题。神经网络能够充分逼近任意复杂的非线性映射关系, 能够学习与适应不确定性系统的动态特性, 具有很强的鲁棒性和容错性, 将其应用于振动诊断方法的结构损伤识别中, 可以较好地解决综合诊断和预测中的非线性以及不确定性系统的辨识问题, 这使它成为代表未知模型系统的一个强有力的工具, 这一特性对那些必须考虑非线性的土木工程领域越来越有吸引力^[1,2]。

在利用神经网络进行结构状态监测与损伤识别时, 首先必须确定合适的特征参数, 用来表征结构状态的变化。选用什么参数作为损伤识别指标对提高损伤识别的准确性和可靠性极为重要, 因此恰当地选择特征参数是识别的关键。另外, 单一的损伤特征参数是难以完整描述结构不同类型的损伤、损伤位置与程度的。因此, 本文首先采用状态向量直接求导方法分析了损伤特征参数(振动模态参数)的相对灵敏度问题, 该方法比传统的方法, 如矩阵摄动法^[3]、模态法^[4]计算简单方便, 而且弥补了传统方法中参数考虑不全情况, 这样更符合实际工程。通过灵敏度分析, 选取灵敏度高的特征参数(动柔度)组成的组合特征参数向量进行结构损伤识别, 通过振动试验加以验证该方法的有效性。

1 损伤结构的动态特征参数灵敏度分析

灵敏度分析是工程研究中一个很重要而又能够获得良好效益的领域。因而在许多方面获得了应用。早期灵敏度分析主要用来估计自动控制系统数学模型中可变参数的影响。近来, 灵敏度分析在结构优化设计中获得了广泛的应用。设计人员对它产生了浓厚的兴趣, 但是由于各种导数的计算, 所需机时较长, 耗费较大。因而人们致力于研究各种导数的有效计算方法, 发展和应用近似的灵敏度分析方法^[5-8], 评价分析模型的改进和设计, 以使灵敏度分析更好地为优化设计所利用。

1.1 模态参数的相对灵敏度分析

研究表明, 特征参数灵敏度与损伤模式分类之间有非常密切的关系, 直接关系到识别成败, 是最基本最重要的指标。采用灵敏度高的参数作为神经网络的输入可以提高识别效果, 下面进行的特征选择作为神经网络的输入向量主要是以特征参数的灵敏度作为其评价指标。

定义函数 $y = y(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 对 x_i 的相对灵敏度定义为

$$\eta(y | x_i) = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{\Delta y / y}{\Delta x_i / x_i} = \frac{x_i}{y} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (x_i \in R, y \in C) \quad (1)$$

式中 R 与 C 分别代表实数与复数域。

对于结构振动系统而言, 动态特征灵敏度可理解为结构特征参数(特征值 λ 和特征向量 ϕ)对结构物理

* 国家杰出青年科学基金项目(59925820)

收稿日期: 2003-05-19

第一作者 唐和生 男, 博士, 1973年生

参数(或设计变量)的改变率,即所谓特征值绝对灵敏度 $\partial\lambda/\partial p_m$ 和特征向量绝对灵敏度 $\partial\varphi/\partial p_m$, 两者总称为绝对特征灵敏度. p_m 为结构物理参数(包括质量、刚度及阻尼, 本文考虑的是刚度问题, 主要考虑的损伤是由刚度降低而产生的)或设计变量.

在结构的损伤检测中, 结构的各种振动参数对于结构损伤的敏感程度是不相同的, 要比较确定哪一种振动参数的变化更能相对较为明显地反映结构的损伤, 有必要对比计算各种动力特征参数对损伤的灵敏度, 从而为在结构损伤检测和健康监测中选择合适的损伤特征参数提供方便.

(1) 特征值和特征向量的相对灵敏度

考虑一多自由度阻尼系统结构的特征值和特征向量问题

$$(\lambda^2 M + \lambda C + K)\varphi = 0 \tag{2}$$

式中 λ 和 φ 分别是特征值和特征向量, M 、 C 、 K 分别为结构质量、阻尼和刚度矩阵.

为了分析上式的阻尼系统的特征值和特征向量问题, 使用状态空间法, 重新组装(2)式如下

$$Az = \lambda Bz \tag{3}$$

式中 $A = \begin{bmatrix} -K & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix}$, $z = \begin{bmatrix} \varphi \\ \lambda\varphi \end{bmatrix}$

由(3)式可得第 j 阶特征向量的归一化问题

$$\phi_j^T (2\lambda_j M + C)\phi_j = 1 \tag{4}$$

考虑式(2)的第 j 阶模态特征值和特征向量问题

$$(\lambda_j^2 M + \lambda_j C + K)\phi_j = 0 \tag{5}$$

对式(5)就设计参数 p 进行偏微分运算可得

$$(\lambda_j^2 M + \lambda_j C + K) \frac{\partial \phi_j}{\partial p} + (2\lambda_j M + C)\phi_j \frac{\partial \lambda_j}{\partial p} - (\lambda_j^2 \frac{\partial M}{\partial p} + \lambda_j \frac{\partial C}{\partial p} + \frac{\partial K}{\partial p})\phi_j \tag{6}$$

同样对归一化式(4)进行运算, 由于

$$\frac{\partial \phi_j^T}{\partial p} (2\lambda_j M + C)\phi_j = \phi_j^T (2\lambda_j M + C) \frac{\partial \phi_j}{\partial p} \tag{7}$$

可得

$$\phi_j^T (2\lambda_j M + C) \frac{\partial \phi_j}{\partial p} + \phi_j^T M \phi_j \frac{\partial \lambda_j}{\partial p} = -\frac{1}{2} \phi_j^T (2\lambda_j \frac{\partial M}{\partial p} + \frac{\partial C}{\partial p})\phi_j \tag{8}$$

重新组装式(7)和式(8)得

$$A_j^\# \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_j}{\partial p} \\ \frac{\partial \lambda_j}{\partial p} \end{Bmatrix} = f_j \tag{9}$$

式中 $A_j^\# = \begin{bmatrix} \lambda_j^2 M + \lambda_j C + K & (2\lambda_j M + C)\phi_j \\ \phi_j^T (2\lambda_j M + C) & \phi_j^T M \phi_j \end{bmatrix}$,

$$f_j = \begin{Bmatrix} -(\lambda_j^2 \frac{\partial M}{\partial p} + \lambda_j \frac{\partial C}{\partial p} + \frac{\partial K}{\partial p})\phi_j \\ -\frac{1}{2} \phi_j^T (2\lambda_j \frac{\partial M}{\partial p} + \frac{\partial C}{\partial p})\phi_j \end{Bmatrix}$$

式(9)是一线性代数方程组, 解此线性方程组就可得到结构振型和特征值对参数 p (k_{ij} 或 m_{ij}) 的灵敏度. 如式(10)所示, 式中为了区别矩阵与向量的乘积符号的不同, 星号表示正常运算关系, 圆点表示点乘运算关系.

$$\begin{Bmatrix} \eta(\phi_j | p) \\ \eta(\lambda_j | p) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi_j}{\partial p} \\ \frac{\partial \lambda_j}{\partial p} \end{Bmatrix} = [A_j^\#]^{-1} * f_j = \begin{Bmatrix} \frac{p}{\phi_j} \\ \frac{p}{\lambda_j} \end{Bmatrix} = f_j \tag{10}$$

此方法具有直接求解计算简便和数值计算稳定性好的优点.

(2) 模态柔度的相对灵敏度

考虑线性结构略去结构体系阻尼情况将振型正则化, 模态柔度矩阵 F 是结构损伤检测中另外一种结构动态参数, 它是结构模态频率和振型的函数, 模态柔度矩阵定义为:

$$F = \Phi^T \Lambda^{-1} \Phi = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n] \tag{11}$$

式中, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_i)$ 或 $\text{diag}(\omega_i^2)$, $i = 1, 2, \dots, n$; Φ 为模态振型矩阵.

由式(11)可得第 k 个模态柔度 f_k 为

$$f_k = \{f_{1k}, \dots, f_{lk}, \dots, f_{nk}\}^T \tag{12}$$

其中

$$f_{lk} = \sum_{s=1}^n \frac{1}{\lambda_s} \phi_{sl} \phi_{sk} \tag{13}$$

(13)式对参数 p_m 的导数为

$$\frac{\partial f_k}{\partial p_m} = \sum_{s=1}^n \left[-\frac{1}{\lambda_s^2} \frac{\partial \lambda_s}{\partial p_m} \phi_{sl} \phi_{sk} + \frac{1}{\lambda_s} \left(\frac{\partial \phi_{sl}}{\partial p_m} \phi_{sk} + \phi_{sl} \frac{\partial \phi_{sk}}{\partial p_m} \right) \right] \tag{14}$$

当 $l = k$ 时

$$\frac{\partial f_k}{\partial p_m} = \sum_{s=1}^n \left[\frac{2}{\lambda_s} \frac{\partial \phi_{sl}}{\partial p_m} \phi_{sl} - \frac{1}{\lambda_s^2} \frac{\partial \lambda_s}{\partial p_m} \phi_{sl}^2 \right] \tag{15}$$

由(1)、(14)、(15)式可得到柔度的灵敏度表达式

$$\eta(f_{lk} | p_m) = \frac{p_m}{f_{lk}} \cdot \frac{\partial f_{lk}}{\partial p_m} \tag{16}$$

式中 p_m 为质量 m_{ij} 、 c_{ij} 或刚度 k_{ij} .

以下是对一五层剪切框架结构(单层刚度和质量分别是 $2.08e4kN/m$ 、 $5.0e4kN$)的分析结果, 如图1、图2所示分别表示了三者灵敏度之间的最大值和最小值的比较.

由图1、图2可知, 柔度关于刚度的灵敏度最高, 振型次之, 频率为三者之中的最小者. 通过对模态参数关于刚度变化的灵敏度分析可知, 固有频率、模态

振型、柔度三者的灵敏度是不一样的, 而且它们之间的差距还是相当大的, 这给我们选择特征参数提供了有用的参考。

2 组合参数的选取

采用神经网络进行振动法损伤识别, 是近年来一



图1 频率、振型、柔度的相对灵敏度最大值

通过对固有频率、模态振型、柔度三者相对灵敏度分析可知, 结构动柔度矩阵的灵敏度高于其他模态参数的灵敏度, 更加适合作为神经网络输入参数。以动柔度作为损伤识别参数有其显著优点, 实际上动柔度包含了结构的频率和模态振型内容, 另外, 只需测量前几阶模态参数就可以获得近似程度相当好的动柔度值。因此, 本文在模态确认准则^[5]的理论启发下, 提出利用不完整的动柔度置信因子作为组合参数输入向量的一部分来进行结构损伤识别, 从而提高损伤识别率。

考虑结构动力特性, 固有频率是进行结构损伤识别输入参数的一个较好选择, 这是因为固有频率可以在结构的一个点上测得, 并且与测点位置相对独立, 是一个能反映结构整体的动力特征。但是对于模态测试的不完整性, 使仅用单一模态参数作为输入向量的神经网络进行结构损伤识别变得不实用。识别的最终目标是利用各种信息提高识别率, 单维的信息显然具有其局限性, 根据信息论的原理, 由单维信息融合起来的多维信息, 其信息含量比任何一个单维信息量都要大, 因此进行信息融合就显得很有意义。在此基础上, 本文引入的组合参数作为神经网络的输入向量, 如式(17)所示。

$$INPUT = \{FR_i, RF_i, FMAC_i\} \quad (17)$$

式中, 频率变化比值 FR_i 为 $FR(i, j) = \Delta\omega_i / \Delta\omega_j$, 取 $i = j$, 频率变化率 RF_i 为 $RF(i) = \Delta\omega_i / \omega_i$, $\Delta\omega_i$ 、 $\Delta\omega_j$ 分别为损伤引起的第 i 、 j 阶频率的变化; 动柔度置信因子 $FMAC_i$ 为 $FMAC(i, j) =$

$[(f_i^A)^T f_j^B]^2 / (f_i^A)^T f_j^A (f_i^B)^T f_j^B$, 式中, f_i^A 为结构在损伤前的第 i 阶动柔度向量, f_j^B 为结构在损伤前的第 j 阶动柔度向量。由(13)式可知, 随着频率的增大, 高频项的影响会变得越来越小, 以至可忽略不计, 只需测量前 s ($s < n$) 个模态参数即可获得精度较好的动柔度矩阵, 这种

个热门的研究课题, 但是, 采用什么参数作为神经网络的输入向量最合适, 一直没有一个满意的答案。Kaminski^[9]提出, 神经网络输入参数的选择及其表达式形式会直接影响损伤识别的结果, 神经网络用于结构损伤识别的关键是用什么损伤特征参数作为神经网络的输入参数。



图2 频率、振型、柔度的相对灵敏度最小值

近似不仅使计算、测量简便, 而且也有实际意义。

3 框架结构模型损伤的振动试验研究

为了验证层间剪切结构损伤识别组合参数, 进行了框架结构的损伤试验, 刚度损伤采用有限元进行数值模拟。

框架模型共有4层。跨度330mm, 层高350mm, 底层柱底与底板连接加腋。梁截面为T型, 由两个30mm×10mm的矩形梁拼接而成。柱截面为70mm×10mm。模型结构的参数如表1。

表1 四层框架结构模型参数

构件	截面形状	截面面积 (m ²)	截面惯性矩 (m ⁴)	弹性模量 (N/m ²)	密度 (Kg/m ³)
梁	T形	6×10 ⁻⁴	8.50×10 ⁻⁸	3×10 ⁹	1.2×10 ³
柱	矩形	7×10 ⁻⁴	5.8333×10 ⁻⁹	3×10 ⁹	1.2×10 ³

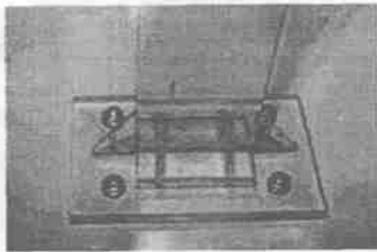
模型均用有机玻璃制作, 梁与柱的节点连接用专门的化学溶剂粘接。模型采用多层单榀单跨框架, 为了减少框架平面外振动对实验结果的影响, 将柱的平面外刚度设计为远远大于平面内刚度。模型结构柱与支座连接的照片如图3(a)所示。

为了模拟结构刚度的降低, 试验时在结构模型的柱上切口。有切口时, 为了减少质量的损失, 在需要模拟损伤的一段范围内切多个薄的切口, 切口与切口之间距离较小, 这样可使中间未切口的部分对于刚度的贡献可不考虑, 而结构的质量只有较小的变化, 从而可认为只有局部刚度的降低而没有质量的损失。损伤的模拟情况照片如图3(b)所示。

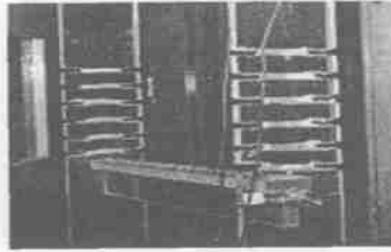
用未损伤与损伤情况下的实测数据来训练神经网络, 为了验证本文提出的组合参数向量的优越性, 分别采用了两种不同参数作为神经网络的输入向量, 一个是频率变化率和频率变化比值组成的参数向量, 另外

一个是采用本文提出的组合参数向量, 网络结构采用12-20-4(输入节点为12, 式(17)中 $i = 1, \dots, 4$, 隐层节点为20, 输出节点为4), 网络采用L-M算法^[10], 采用频率变化率和频率变化比值组成的参数向量识别结果如图4所示。

图4(a)和4(b)是用频率变化率和频率变化比值组成的输入参数向量的神经网络识别结果, 从图可以看出利用此组合参数能够定位单损伤, 但是损伤程度识别效果不是很好, 而且还出现了错误的识别结果, 如第四层出现了9%的损伤。

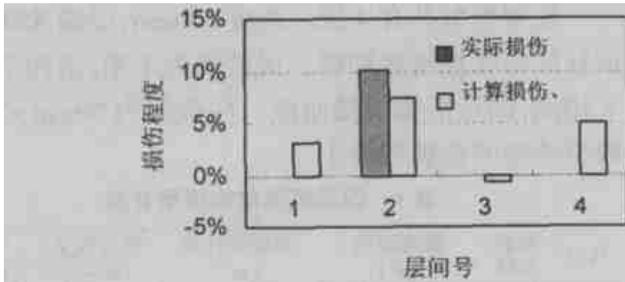


(a) 柱与底板的连接

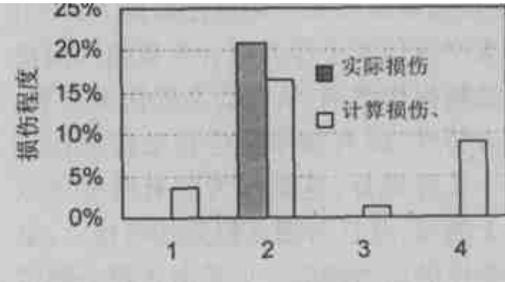


(b) 柱损伤的模型

图3 框架结构模型试验图



(a) 损伤 11%



(b) 损伤 21.6%

图4 第二层单损伤测试识别结果图

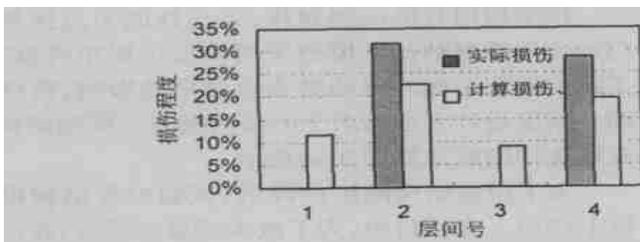


图5 第二层(31.7%)第四层(28.6%)多损伤

采用本文提出的组合参数向量识别结果如图7。

由图7(a)和7(b)可以看出利用组合参数能够准确定位单损伤, 相对于图4(a)、(b)来说错误识别减少。但是由于测量仪器精度问题, 实测数据模型误差的存在, 因此为单损伤程度识别存在比较大的误差, 最大绝对误差达到4%左右。

从图8和9结构模型多损伤识别结果与实际损伤比较可以看出, 在结构多损伤的情况下, 可以确定结构

图5和图6是用频率变化率和频率变化比值组成的输入参数向量的神经网络多损伤识别结果, 由结构模型多损伤识别结果与实际损伤比较可以看出, 在结构多损伤的情况下, 虽然可以确定结构损伤发生的位置, 但是损伤程度识别的误差最大绝对值达到了12%, 同样也出现了错误的损伤识别, 如第一和第四层都出现了损伤。这主要是由于模型误差和测量误差造成的, 由结构损伤程度的计算结果可以看出, 误差较大。

图6 第二层(31.7%)第三层(21.3%)多损伤

损伤发生的位置, 但是由于模型误差测量的存在, 所以对于结构损伤程度的计算结果, 误差较大, 最大绝对误差达到了5%。

以上对不同组合参数作为神经网络的输入向量计算结果与实验结果比较, 再次验证了本文提出的组合参数在结构单损伤和多损伤识别中的优越性。虽然识别结果有一定的误差, 在进一步减小实验模型误差和提高测量仪器精度情况下可减小识别误差。

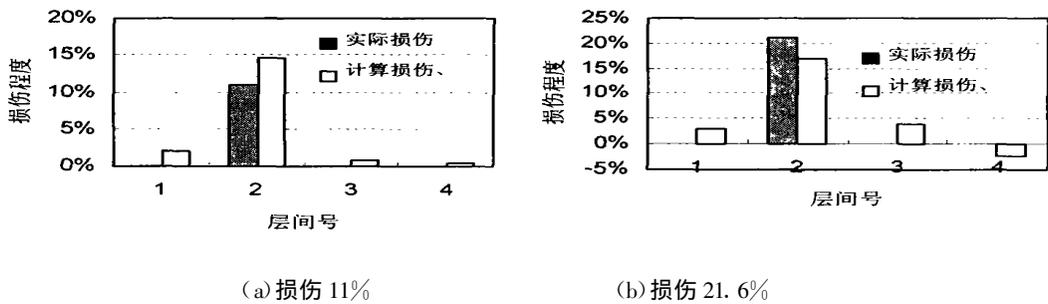


图7 第二层单损伤测试识别结果图

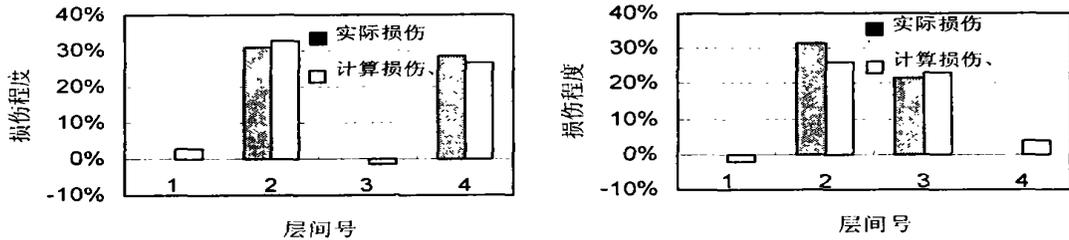


图8 第二层(31.7%)第四层(28.6%)多损伤

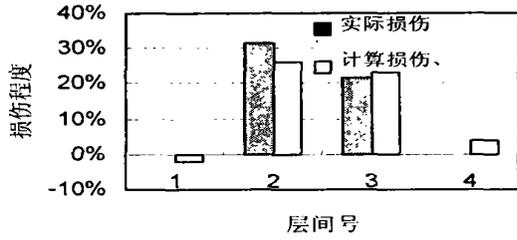


图9 第二层(31.7%)第三层(21.3%)多损伤

4 小 结

1) 本文采用状态向量直接求导方法, 全面地分析了结构振动模态参数(频率、特征向量和动柔度)关于设计参数(质量、刚度和阻尼)的相对灵敏度。该方法比传统的方法计算简单方便, 而且弥补了传统方法中参数考虑不全情况, 这样更符合实际工程; 对一框架结构进行数值模拟分析表明动柔度矩阵关于结构刚度灵敏度相对于其他模态参数为最高, 振型次之, 频率为最小, 这为损伤特征参数向量的选取提供了理论基础。

2) 基于神经网络结构损伤识别问题, 由结构前几阶固有频率变化率、频率变化比值、模态振型变化率和动柔度置信因子构成的组合参数作为神经网络的输入向量, 通过对一个四层结构振动试验进行了研究分析, 采用不同的输入参数进行比较分析分析结果表明, 带有动柔度置信因子的组合参数作为神经网络输入向量来训练神经网络, 识别单损伤和多损伤的效果都很好, 特别是在多损伤识别时体现出本文提出的组合参数的优越性, 大大提高了多损伤的识别精度, 克服了单用频率和模态作为神经网络输入向量在识别多损伤时精度差以及错误识别的缺点。

参 考 文 献

- 1 Elkorty M F, Chang K C, Lee G C. Neural Network Trained by Analytically Simulated Damage States. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, 1993, 7(2): 130—145
- 2 Chung-Bang Yun, Eun Young Bahng. Substructural identification using neural networks. *Computers & Structures* 2000, 77: 41—52
- 3 Chen J C, Garbs J A. Analytical Model Improvement Using Modal Test Data. *AIAA J.*, 1980, 18(6)
- 4 Fox R L, Kapoor M P. Rate of Change of Eigenvalue and Eigenvectors. *AIAA J.*, 1968, 6(6)
- 5 张德文, 魏阜旋. 模型修正与破坏诊断. 北京: 科学出版社, 1999
- 6 Lee I W, Kim D O. Natural Frequency and Mode Shape Sensitivities of Damped System; Part I, Distinct Natural Frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 223(3): 399—412
- 7 Lee I W, Kim D O. Natural Frequency and Mode Shape Sensitivities of Damped System; Part II, Multiple Natural Frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 223(3): 413—424
- 8 张阿舟. 实用振动工程(2). 北京: 航空工业出版社, 1997
- 9 Kaminski P C. The approximate location of damage through the analysis of natural frequencies with artificial neural network. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 1995, 209: 117—123
- 10 *Neural Network Toolbox User's Guide*. The Mathworks, Inc 1994

PRESENT DEVELOPING SITUATION AND RESEARCH ADVANCES IN THE FIELD OF STRUCTURAL DAMAGE DETECTION

Wang Shuxin^{1, 2} *Jiang zhe*²

(1. Department of Watercraft engine, Zhenjiang college of watercraft, Zhenjiang 212003;

2. Institute of vibration and noise, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract The research methods, the present developing situation and research advances in the field of structural damage detection are briefly summarized and reviewed, and those in which the identification technique is employed on the base of vibration response and characteristic parameters of structures are the main concerns. The method and application of smart detection method in the structural damage detection are presented and the future research trends on damage detection of structures are outlined.

Key words: damage detection, structural vibration, smart detection, the present developing situation, review and advances

PERFORMANCE ASSESSMENT OF MODELING OF STIFFNESS-DASHPOT BASED ACTIVE MULTIPLE TUNED MASS DAMPERS

Li Chunxiang

(School of Civil Engineering and Mechanics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Abstract New modeling of stiffness-dashpot based Active Multiple Tuned Mass Dampers (SD-AMTMD) is proposed in the present paper. Employing the derived transfer function of the structure with SD-AMTMD, the dynamic magnification factor of the structure with SD-AMTMD is formulated. The assessment criterion of optimum parameters and effectiveness of SD-AMTMD is defined as the minimization of minimum values of maximum dynamic magnification factors of the structure with SD-AMTMD. The criterion used to evaluate the SD-AMTMD stroke is the maximum dynamic magnification factors of SD-AMTMD. Parametric studies of the effects of the stiffness ratio are then carried out on the optimum parameters, effectiveness, and stroke of SD-AMTMD using the assessment criterion defined above. For the purpose of comparison, the numerical results of AMTMD, namely SD-AMTMD with the stiffness ratio equal to zero, are also taken into consideration.

Key words: stiffness-dashpot-based AMTMD, vibration control, optimality, damping

ANALYSIS ON STRUCTURAL DAMAGE IDENTIFICATION AND ITS EXPERIMENTAL STUDY BASED ON COMBINED PARAMETERS

*Tang Hesheng*¹ *Xue Songtao*^{1, 2} *Chen Rong*¹ *Wang Yuangong*¹

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092;

2. Department of Architecture, School of Science and Engineering, Kinki University, Osaka, Japan)

Abstract By using direct differential with respect to space state vector of a structure, a new method presented in the thesis analysis the relative sensitivity of structural vibration modal parameters (frequency, eigenvector and dynamic flexibility) and transfer functions to design parameters, such as, mass, stiffness and damping. The method is simpler and more convenient than the traditional ones, and it remedies the shortages of those methods in which less parameters are taken into account, and is more suitable to practical engineering. The numerical simulation of a frame model as an example is carried out, which shows that the dynamic flexibility matrix has the highest sensitivity to structural stiffness than any other modal parameters, the next are mode shapes and the last are natural frequencies. This conclusion is valuable for extracting character parameters of damages.

A neural network-based approach is proposed for detection of changes in characteristics of structures. The combined parameters are presented as the input parameters of neural networks in structural damage identification, which are processed in ac-

cordance with change rates of several natural frequencies, change of ratios of several natural frequencies, change rates of modes and assurance criterions of flexibilities. Some experiments of the four-story frame with different damage extents and different damage locations are conducted, which indicate that the combined damage parameters will be more suitable for the input patterns of neural networks than either of the other parameters alone.

Key words: structural damage identification, combined damage parameters, neural networks, the relative sensitivity

INVESTIGATION ON VIBRATION TESTING FOR SYSTEM-LEVEL EQUIPMENTS

Wang Kesheng¹ Lei Yongjun² Zhu Xiaoying³

(1. Department of Mechanical Engineering, Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072;

2. College of Astronautics and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073;

3. Department of Material Science and Engineering, Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072)

Abstract During the development of spacecrafts such as rockets, missiles and satellites as well as armored vehicles, identification of system-level equipment and performance of vibration testing play very important roles. Environmental vibration testing can check if engineering structure or instrument could endure predicted vibration environment and assure integrity of structure or high precision and good performance of instrument under real environment. So, it becomes more and more an indispensable means of accomplishing these demands. In the paper, the current development and difficult points in vibration testing technology are briefly analyzed. The band vale technology, the data processing of testing and measurement and the simulation of force (including force measurement instrument) in vibration testing are investigated. The methods and means of improving the effect of vibration testing are also put forward.

Key words: vibration testing, environmental simulation, analysis of testing, system-level equipment

ADAPTIVE INVERSE CONTROL BASED ACTIVE NOISE CONTROL SYSTEM IN DUCT

Yu Huamin¹ Zhu Haichao² Shi Yin²

(1. Power Eng. College, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033;

2. Research Inst. of Vibration & Noise, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033)

Abstract The feedforward ANC is effective to attenuate wide-band acoustical noise, and therefore has get wide application. In the feedforward ANC, when the traditional FXLMS algorithm is applied directly, non-minimum phase (NMP) of the secondary-path transfer function will lead to the performance degradation. In the paper, a new NMP adaptive inverse control based FXLMS algorithm is proposed. The real-time ANC experiments on the fan duct system are implemented, and its results show that the proposed algorithm has advantages over standard feedforward FXLMS algorithm.

Key words: adaptive inverse control, active noise control (ANC), FXLMS algorithm, non-minimum phase (NMP)

THREE STEPS METHOD INTEGRATED WITH STATISTICAL TECHNIQUES FOR STRUCTURAL DAMAGE DIAGNOSIS

Xie Jun Han Dajian

(Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Zhou Yishu

(College of Urban and Rural Construction, Agricultural University of, Baoding 071001)

Abstract Structural damage diagnosis is one of core contents of the structure health monitoring. A new three steps structural damage diagnosis procedure, including damage detection, damage element selecting & searching and damage inversion at element level, is developed on the basis of partial work of previous authors. The procedure is combined with statistical tech-