

文章编号: 1007- 2985(2006) 02- 0074- 03

结构损伤识别的柔度差值曲率法

肖调生, 阳 勇

(湖南科技职业学院机电工程与技术系, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 简支梁与悬臂梁的多个算例表明: 结构损伤识别的柔度差值曲率法仅需低阶的模态参数即可获得很好的损伤识别精度, 对于轻微损伤与多处同时损伤的识别也是灵敏可靠的。

关键词: 结构; 损伤识别; 柔度; 柔度差值曲率; 模态参数

中图分类号: O329; TU317

文献标识码: A

基于结构损伤前后动力参数的改变可以进行结构损伤的诊断, 近年来, 一些研究者利用模态柔度的改变量对结构进行损伤识别, 指出模态柔度或振型对局部损伤更敏感, 可以更好地识别结构损伤。Raghavendrachar M 等^[1]通过对一个三跨度混凝土桥的数值分析和实验研究证明了模态柔度比固有频率或振型对局部损伤更敏感; Pandey A K 等^[2-3]认为柔度矩阵可以容易和精确地从结构的低阶振动模态建立, 在其损伤识别研究中采用柔度的改变量作为损伤识别指标; Zhao J 等^[4]将固有频率和模态振型与模态柔度进行灵敏度对比, 也证明了模态柔度比固有频率和模态振型对损伤更敏感。

虽然利用损伤前后模态柔度的改变可以进行结构损伤识别, 但由于总体柔度矩阵中的每一列代表在某个自由度施加单位力后各个观测点的位移, 而位移是典型的累加量, 位移改变最大处与损伤最大处并不必然趋于一致, 有损悬臂梁的弯曲振动实验证实, 基于柔度改变的损伤定位方法存在模糊或者错误定位的问题, 不利于工程中的实际应用。笔者提出利用结构损伤前后柔度差值曲率进行损伤识别, 对悬臂梁与简支梁损伤诊断的数值模拟分析, 表明了该方法对于结构损伤识别的有效性。

1 基本原理

利用模态数据, 损伤结构的柔度矩阵

$$F = \Phi \Omega^{-1} \Phi^T = \sum_{i=1}^n \Phi_i \Phi_i^T / \omega_i^2 \quad (1)$$

可以表示^[2]。式中: F 为结构的柔度矩阵; $\Omega = \text{diag}(\omega_i^2)$; Φ_i 为按相应模态质量归一化第 i 阶振型向量。

若结构损伤前后的柔度矩阵分别为 F_p 和 F_b , 那么柔度矩阵的改变量为

$$\Delta F = F_b - F_p \quad (2)$$

在这里, 笔者仅以结构横向振动的振型分量来计算与分析柔度矩阵。 δF 表示 ΔF_j 在 j 列中全部元素中的最大值所组成的一个 N 维行向量。

$$\delta F = \{\delta F_j\} = \{\text{Max} |\Delta F_{i,j}|\} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

结构出现损伤时, 其损伤前、后柔度差值 δF 必然发生变化, 而损伤处的柔度差值 δF 必然有较大的改变, 变化的程度可以通过对坐标位置的一阶导数、二级导数的作用, 即求柔度差值 δF 的曲率, 变得显而易见。若计算出柔度差值 δF , 则结构的柔度差值曲率可通过中间差分格式近似求得

$$\delta F''_j = \frac{\delta F_{j+1} - 2\delta F_j + \delta F_{j-1}}{(\Delta x)^2} \quad (4)$$

从数学意义上讲, 柔度差值的曲率反映了结构损伤后柔度差值变化的急剧程度, 显然在损伤处, 损伤前后柔度变化要大, 表现为柔度差值的曲率大; 而结构完好处的柔度差值的曲率要小, 或近似于 0, 基于此, 就可以识别结构的损伤位置。

* 收稿日期: 2006- 02- 27

作者简介: 肖调生(1965-), 男, 湖南省洞口县人, 硕士, 湖南科技职业学院副教授, 主要从事机械设计、CAD/CAM 教学与研究。

2 分析模型

本文选择梁作为损伤识别研究的模型, 其结构尺寸为: $1\ 000\ \text{mm} \times 30\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$. 力学参数为: $E = 2.058 \times 10^{11}\ \text{Pa}$; $\rho = 7\ 860\ \text{kg/m}^3$, 有限元分析划分为 20 个单元.

实际工程结构中的损伤, 如裂纹的产生、材料弹性模量的降低, 都会引起结构刚度的降低, 但对质量影响较小. 在有限元计算中, 以刚度的下降模拟结构单元的损伤程度.

3 算例与分析

3.1 简支梁与悬臂梁损伤定位

两端铰支的简支梁, 设第 9 单元分别有 25%、45%、65% 的损伤, 利用前 3 阶模态参数计算得损伤前后柔度差值 δF 与柔度差值的曲率, 结果分别如图 1 所示. 由图得知: 根据结构前 3 阶模态参数计算的柔度差值曲率变化曲线, 在损伤处曲率突变为最大, 而未损伤单元的曲率几乎等于“0”, 由此可以十分明显地识别出结构的损伤位置; 随着单元损伤程度的增加, 柔度差值的曲率随之增大, 分析曲率的变化程度还能够诊断结构的损伤大小.

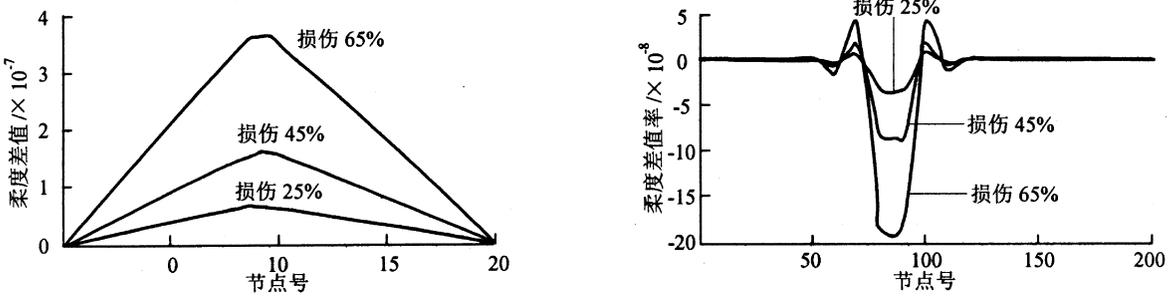


图 1 简支梁损伤前后的柔度差值与柔度差值曲率的变化曲线

将上述分析模型的改为悬臂支撑, 令单元 9 同样产生 25%、45%、65% 的损伤, 得出结构柔度差曲率变化曲线如图 2 所示. 图示结果与简支梁一致, 同样能清楚地给出损伤位置信息. 但柔度差值的最大值出现在梁的自由端, 并未发生在损伤位置, 损伤位置的识别显得模糊不清.

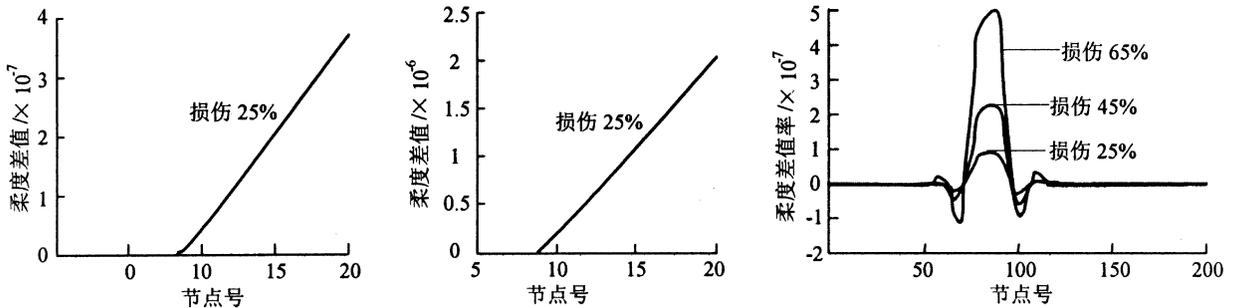


图 2 悬臂梁损伤前后的柔度差值与柔度差值曲率的变化曲线

3.2 轻微损伤定位

为探明柔度差值曲率法在小损伤情形下的识别灵敏度, 设结构在第 4 单元产生 5% 的轻微损伤, 得悬臂梁与简支梁柔度差值曲率如图 3 所示, 图中不同支承方式的结构在损伤处的曲率均产生显著的变化, 能获得清晰的损伤识别结果.

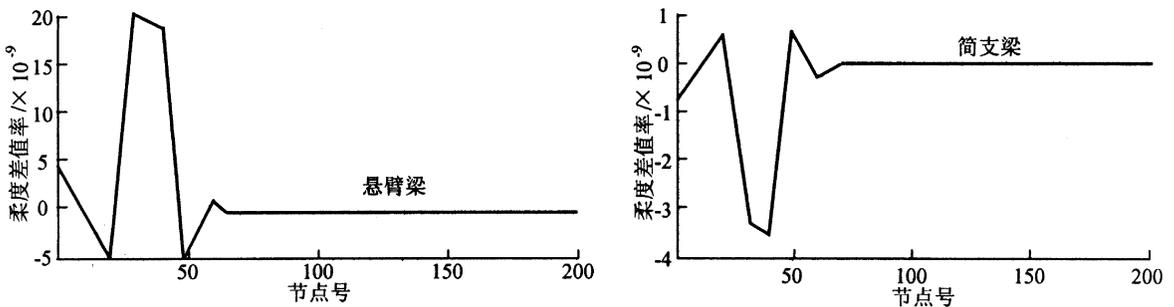


图 3 悬臂梁、简支梁损伤 5% 时柔度差值曲率的变化曲线

3.3 多处损伤定位

在悬臂梁中设第 9 单元损伤 35%, 同时第 17 单元损伤 25%; 简支梁第 3 单元损伤 25%, 第 9 单元损伤 35%, 分别按前 3 阶模态参数计算得结构柔度差值与柔度差值曲率曲线如图 4、5 所示。图中曲线显示, 采用柔度差值曲率法能清楚地识别多处同时损伤的损伤位置; 但悬臂梁结构出现多处损伤时, 用柔度差值法不能给出正确的损伤识别结果, 而图 5 简支梁多处损伤的柔度差值识别结果也是模糊的。

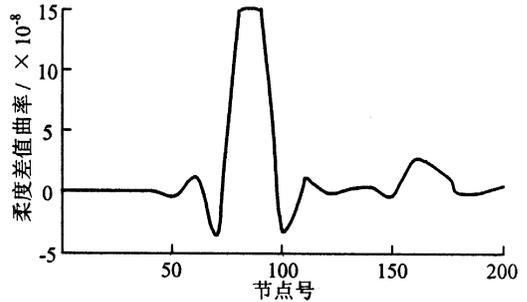
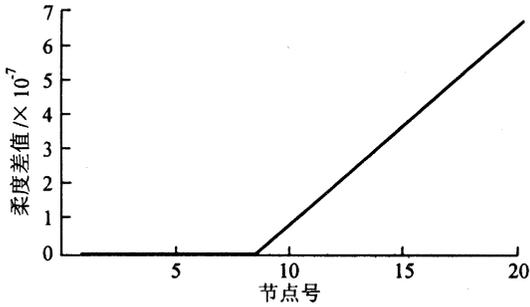


图 4 悬臂梁多处损伤的柔度差值与柔度差值曲率变化曲线

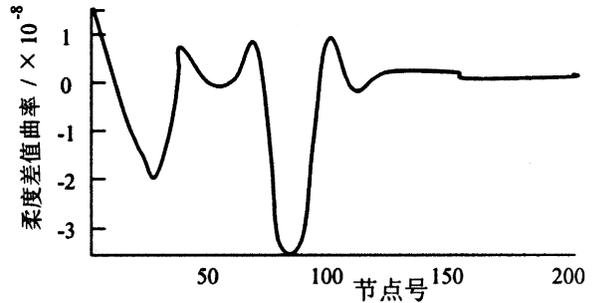
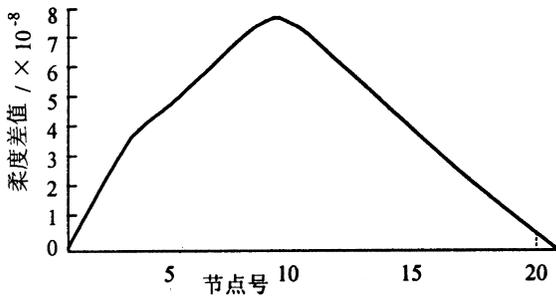


图 5 简支梁多处损伤的柔度差值与柔度差值曲率变化曲线

4 结论

柔度差值曲率法依据低阶的模态参数能准确地识别结构损伤, 轻微损伤与多处同时损伤的算例也表明该方法具有良好的识别可靠性与较高的识别精度。求取柔度差值的曲率需要在进行结构模态参数测试中布置较多的测点, 这显然会给损伤识别带来不便, 笔者尝试用样条对柔度进行插值, 较好地解决了保证识别精度与方便参数测试的矛盾, 算例表明其效果较为理想。

参考文献:

- [1] RAGHAVENDRACHAR M, AKTAN A E. Flexibility by Multireference Impact Testing for Bridge Diagnostics [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8): 2 186- 2 203.
- [2] PANDEY A K, BISWAS M. Damage Detection in Structure Using Changing in Flexibility [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1): 3- 17.
- [3] PANDEY A K, BISWAS M. Experimental Verification of Flexibility Difference Method for Locating Damage in Structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 184(2): 311- 328.
- [4] ZHAO J, DEWOLF J T. Sensitivity Study for Vibrational Parameters Used in Damage Detection [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(4): 410- 416.

Flexibility Differential Curvature Method for Structural Damage Identification

XIAO Tiao sheng, YANG Yong

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Vocational Institute of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The flexibility differential curvature method for structural damage identification is presented. By many examples of simply supported beam and cantilever beam it is showed that: good accuracy of damage identification will be obtained with lower order modal parameter, and minor damage and simultaneous multidamage identification is sensitive and reliable.

Key words: structure; damage identification; flexibility differential curvature; modal parameter (责任编辑 陈炳权)