

基于曲率模态的结构损伤识别方法的缺陷分析及其改进

常 军

(苏州科技学院土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘 要: 针对于曲率模态方法识别结构损伤状况在实际应用中的不足, 特别是多点损伤位置识别效果的不理想, 对曲率模态方法进行了改进. 通过在曲率模态方法中引入频率的影响, 建立结构损伤位置识别指标. 采用改进前后的曲率模态方法对一多点损伤的简支梁数值模型进行对比研究, 结果表明改进后的曲率模态方法的识别准确率达 100%, 比传统曲率模态方法的识别效果要好得多. 改进的曲率模态方法可作为结构健康监测和结构状态评估的依据, 可直接应用于实际工程中.

关键词: 损伤识别; 频率; 曲率模态; 损伤定位; 缺陷分析

中图分类号: TU399

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)04-0515-05

飞机、桥梁、建筑物和海洋平台等大型结构对现代社会的发展起到了非常关键的作用. 了解这些结构的健康状况是进一步发挥其作用的必要前提. 桥梁作为生命线工程的关键部位, 了解其健康状况尤为重要. 桥梁健康监测系统是实时了解其健康状况的先进手段之一. 为实时了解结构的健康状况, 国内外许多大桥都安装了结构健康监测系统^[2]. 而结构损伤识别则是结构健康监测的主要内容之一. 目前常用的损伤识别方法有: 振型法、频率法、模态修正法和曲率模态法等. 这些方法都有其不足^[1], 如振型法能够识别出结构的损伤位置, 但灵敏度欠佳, 实际应用性较差; 频率法能够识别出结构是否存在损伤, 但很难判断出损伤的具体位置及损伤程度; 模态修正法的识别精度较高, 但假设条件较多, 且识别过程较复杂, 实际应用性不高; 曲率模态方法虽然可以灵敏地识别出损伤位置, 但由于没有考虑到频率对结构损伤的影响, 经常导致损伤判断错误. 鉴于此, 文章综合了曲率模态方法和频率方法, 提出了改进的曲率模态方法. 该方法综合了曲率模态方法和频率法两者的优点.

1 曲率模态方法的基本原理

由于曲率模态方法本身所具有的优势, 国内外许多人员都对其进行了研究, 并取得了一定的成果^[2-7].

从理论上讲, 有两种情况可引起结构损伤: 即质量变化和刚度减小. 但在土木工程领域中, 结构损伤只表现为刚度的减小.

在实际操作中, 由于曲率模态无法直接测出, 通常采用对振型进行差分处理而获得.

根据材料力学的知识, 可得下式:

$$C_m = \frac{M_m}{E_m I_m} \quad (1)$$

式中: m 为截面位置, $E_m I_m$ 为抗弯刚度; M_m 为弯矩; C_m 为曲率.

(1)式表明: 曲率与截面抗弯刚度成反比. 则损伤导致的刚度降低会导致结构曲率明显增加. 从理论上讲, 结构发生损伤后, 损伤区域的曲率会大幅度增加, 而其他区域的曲率会稍有降低.

对于均匀划分为 m 个单元的梁来说, j 节点截面曲率为:

收稿日期: 2012-11-13 修改稿日期: 2013-07-29

基金项目: 江苏省自然科学基金项目: BK2007549; 建设部研究开发项目: 2008-K2-35

作者简介: 常 军(1973-), 男, 江苏丰县人, 博士, 副教授, 主要从事结构健康监测方面研究.

$$C_i(j) = \frac{\varphi_i(j+1) - 2\varphi_i(j) + \varphi_i(j-1)}{l^2} \quad (2)$$

其中: $\varphi_i(j-1), 2\varphi_i(j), \varphi_i(j+1)$ 分别为第 i 阶归一化振型在 $j-1, j, j+1$ 点的竖向位移; l 为两节点间距.

但在实际应用及数值模拟过程中发现,该方法的使用是有缺陷的,具体如下:(1)曲率模态虽然在局部损伤比较敏感,但对于较小的损伤识别效果较差;(2)当结构发生多处损伤时,较小的损伤不容易识别出来;(3)当结构发生多处损伤时,容易识别出本来不是损伤的损伤,即虚假损伤;(4)曲率模态识别结构损伤位置时干扰太多,影响识别效果.

具体情况请参见第3部分的数值模拟案例.

2 曲率模态方法的改进

由无阻尼结构自由振动动力方程,得第 i 阶频率为:

$$\omega_i^2 = \frac{\{\Psi_i^\epsilon\}^T [K_\epsilon] \{\Psi_i^\epsilon\}}{\{\Psi_i^\epsilon\}^T [M_\epsilon] \{\Psi_i^\epsilon\}} \quad (3)$$

式中: $M_\epsilon = [B] - T[M][B] - 1$; $K_\epsilon = [B] - T[K][B] - 1$; $\{\epsilon\} = [\Psi^\epsilon]\{q\}$; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\epsilon\}$ 为单元应变向量; $[M]$ 为质量矩阵; $[B]$ 为转换矩阵; $\{q\}$ 为模态坐标向量; $[\Psi^\epsilon]$ 为应变模态.

对第 i 阶动力学摄动方程展开并整理得:

$$\Delta\omega_i^2 = \frac{\{\varphi_i\}^T [\Delta K] \{\varphi_i\}}{\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\}} \quad (4)$$

设 $r(x)$ 是某点到中性面的距离,则该点在 x 方向的应变为

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} r(x) = v''(x)r(x) = r(x) \sum_{r=1}^{\infty} \varphi_r''(x) Q_r e^{j\omega t} \quad (5)$$

此处 u 为 x 方向的变形位移,由于模态具有叠加性,应变模态 $\{\psi_i\}$ 与曲率模态 $\{\varphi_i\}$ 的关系表示为:

$$\{\psi_i\} = r(x)\{\varphi_i\} \quad (6)$$

将(6)式代入(4)式,化简得 $[K_\epsilon]\{\varphi_i\} - \omega_i^2[M_\epsilon]\{\varphi_i\} = 0$ (7)

当一个 n 自由度无阻尼自由振动系统出现损伤时,由方程(7)得

$$([K_\epsilon] + [\Delta K] - (\omega_i^2 + \Delta\omega_i^2)[M_\epsilon])\{\varphi_i\} + \{\Delta\varphi_i\} = 0 \quad (8)$$

其中 $[\Delta K] = \sum_{e=1}^{E_d} \alpha_e K_e$, e 为损伤单元; α_e 为刚度下降系数; E_d 为损伤单元总数. 如只有1处损伤,或多处损伤程度相同,则 α_e 为常数.

$$\{\Delta\varphi_i\} = \sum_{k=1}^N C_{ik} \{\varphi_i\} \quad (9)$$

式中: N 为单元个数; k 为单元数; C_{ik} 为损伤单元曲率改变系数. 得

$$\{\Delta\varphi_i\} = \sum_{r=1}^n \frac{-\{\varphi_r\}^T [\Delta K] \{\varphi_i\}}{\omega_{r0}^2 - \omega_{i0}^2} \{\varphi_r\} \quad (r \neq i) \quad (10)$$

由式(10)可以推导出任意阶模态的损伤指标为:

$$C_3 = \frac{\{\varphi_i\}}{\omega_i^2} - \frac{\{\varphi_i\}^d}{(\omega_i^d)^2} \quad (11)$$

由于 $\{\varphi_i\}^d = \{\varphi_i\} + \{\Delta\varphi_i\}$ 和 $(\omega_i^d)^2 = \omega_i^2 + \Delta\omega_i^2$, 整理得:

$$C_3 = \frac{\{\varphi_i\}}{\omega_i^2} - \frac{\{\varphi_i\}^d}{(\omega_i^d)^2} = \frac{\{\varphi_r\}^T \sum_{e=1}^{E_d} K_e \{\varphi_i\} - \{\varphi_r\}^T [K_e] \{\varphi_i\} \sum_{r=1}^n \frac{-\{\varphi_r\}^T \sum_{e=1}^{E_d} K_e \{\varphi_i\}}{\omega_r^2 - \omega_i^2} \{\varphi_r\}}{\{\varphi_i\}^T [K] \{\varphi_i\} \left(\frac{\{\varphi_i\}^T [\Delta K] \{\varphi_i\}}{\alpha_e} + \{\varphi_r\}^T \sum_{e=1}^{E_d} K_e \{\varphi_i\} \right)} \quad (12)$$

从公式(12)可明显看出该指标仅与损伤位置的有关,可以进行损伤位置识别.

3 数值模拟

采用数字模拟方法设计一长 8.0 m 的工字型钢梁,如图 1 所示. 支座为 1 个纵向约束和 2 个竖向约束. 钢材密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$,杨氏模量为 $2.1\times 10^5\text{ MPa}$,截面面积为 $1.472\times 10^3\text{ m}^2$,惯性距为 $3.779\times 10^{-6}\text{ m}^4$. 把结构分成 16 等分,共 17 个节点,从左向右编号(如图 1). 假设四种损伤工况,见表 1 所示.

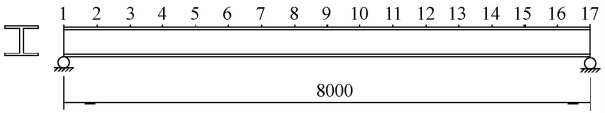


图 1 结构模型
Fig. 1 Structural mode

表 1 损伤工况		
Tab.1 Damage cases		
损伤工况	损伤位置	损伤程度/%
工况 1	距左支点 1/4 跨处	5
工况 2	距左支点 1/4 跨处	25
工况 3	距左支点 1/4、3/4 跨处	10,30
工况 4	距左支点 1/4、3/4 跨处	5,50

根据模拟计算出每种工况的前四阶振型,工况 3 损伤前后的前 4 阶振型如图 2 所示.

在各种工况下,结构损伤前后的频率如表 2 所示.

表 2 损伤前后前四阶频率				
Tab.2 The first 4 frequencybefore and after damage				
工况	一阶频率	二阶频率	三阶频率	四阶频率
工况 1	3.901 2	18.434	34.903	63.996
工况 2	3.858 3	18.231	34.762	63.235
工况 3	3.760 1	17.893	33.767	60.987
工况 4	3.692 5	17.013	32.934	59.932
无损	3.910 3	18.638	35.174	64.511

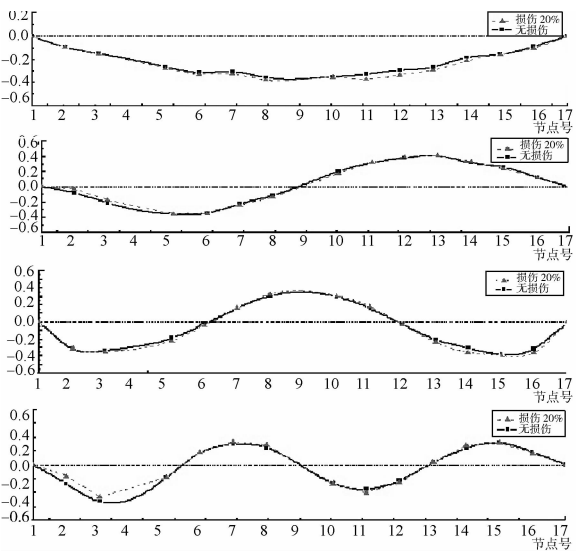


图 2 工况 3 的前 4 阶振型
Fig.2 The first 4 mode shapes of case 3

基于传统曲率模态方法及改进方法的识别结果如图 3~6 所示.

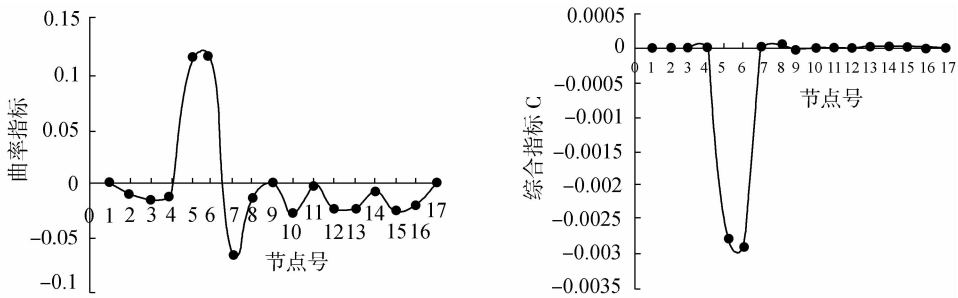


图 3 工况 1 识别结果:曲率模态方法(左);改进方法(右)
Fig.3 Identification results of case 1: curvature mode(left); improved method(right)

由图 3~6 可以清楚地看出:传统的曲率模态识别结构损伤位置方法能够识别出比较明显的损伤位置;但对于多点损伤识别效果较差,对于损伤程度较低的识别结果效果更差. 而改进的损伤识别方法不仅能够识别出单点损伤位置,而且对于多点损伤位置也能有效地识别出来,同时对于小损伤识别效果也比较理想. 对于多点损伤,虽然改进的损伤识别方法不能识别出具体的损伤程度,但可以定性地识别各点间的相对损伤大小.

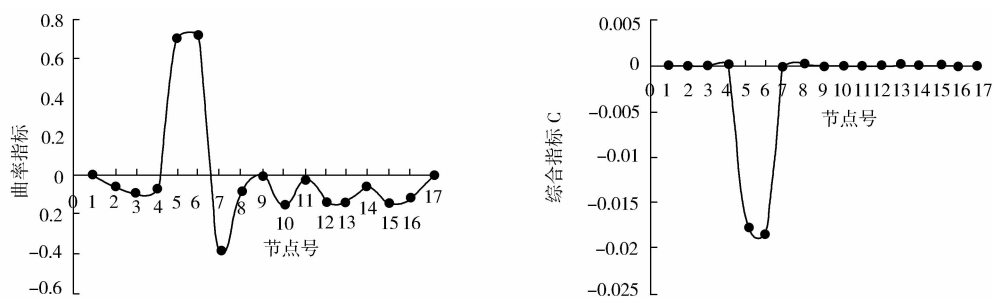


图4 工况2识别结果:曲率模态方法(左);改进方法(右)

Fig. 4 Identification results of case 2: curvature mode(left); improved method(right)

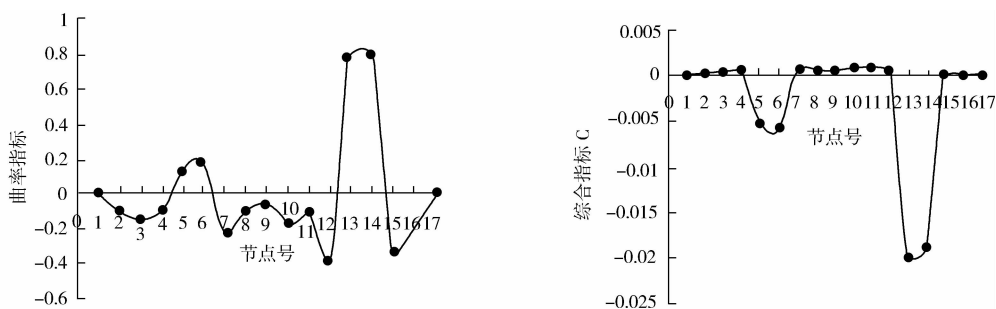


图5 工况3识别结果:曲率模态方法(左);改进方法(右)

Fig. 5 Identification results of case 3: curvature mode(left); improved method(right)

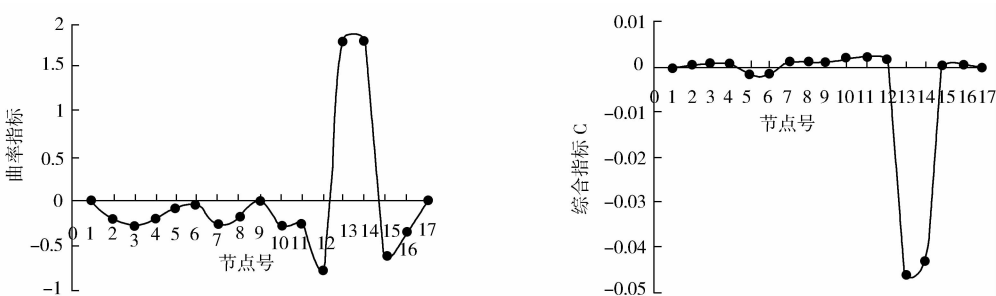


图6 工况4识别结果:曲率模态方法(左);改进方法(右)

Fig. 6 Identification results of case 4: curvature mode(left); improved method(right)

4 结 论

(1)改进的曲率模态方法是在传统的曲率模态方法中考虑了频率的影响,建立了结构损伤位置识别指标;(2)与传统的曲率模态方法相比,改进的曲率模态方法识别结构损伤位置效果要好的多;(3)在损伤程度较小的情况,改进的曲率模态方也能有效地将损伤位置识别出来;(4)改进的曲率模态方法在多点损伤识别中比传统曲率模态方法更具有优势;(5)对于多点损伤位置识别,虽然改进的曲率模态方法不能识别出具体的损伤程度,但能够定性地识别出其损伤的相对大小;(6)文中提出的改进曲率模态识别结构损伤位置方法可用于在役桥梁的损伤识别、健康监测的输入及结构状态评估。

参考文献 References

- [1] 李大军,李学军,霍 达.基于振动的桥梁损伤识别方法的现状与发展[J]. 工程建设与设计,2004(9):44-47.
LI Da-jun, LI Xue-jun, HUO Da. A summary review of structural damage identification methods[J]. Construction & Design For Project, 2004(9):44-47.

- [2] WA HAB M A, ROECK G D. Damage detection in bridges using modal curvatures; Application to a Real Damage Scenario[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226(2): 217-235.
- [3] PANDEY M B, SAMMAN M. Damage detection from Changes in Curvature Mode Shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [4] PANDEY A K, BISWAS M. Damage detection in structures using change in flexibility[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1): 3-17.
- [5] 常 军. 基于曲率模态的钢筋混凝土梁多点损伤位置识别[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(4): 24-27.
CHANG Jun. Curvature modal based many damage locations identification of reinforced concrete beam [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 24-27.
- [6] 常 军, 顾 坚, 孟 浩. 不中断运营的既有桥梁模态参数识别[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2010, 35(1): 131-135.
CHANG Jun, Gu Jian, Meng Hao. Structural modal parameter identification without interrupting operation of in-service bridge[J]. Journal of Guangxi University: Nat Sci ED, 2010, 35(1): 131-135.
- [7] 赵 俊, 程良彦, 马宏伟. 基于曲率模态的拱板结构损伤识别[J]. 暨南大学学报: 自然科学版, 2008, 29(5): 470-476.
ZHAO Jun, CHENG Liang-yan, MA Hong-wei. The damage detection in the arch basing on the changes in curvature mode shape[J]. Journal of Jinan University: Natural Science, 2008, 29(5): 470-476.
- [8] 王成强, 陈怀海, 姜双燕, 等. 基于转角模态曲率的损伤识别研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(3): 24-27.
WANG Cheng-qiang, CHEN Huai-hai, JIANG Shuang-yan, et al. Research on the damage identification based on rotational mode shape curvature [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009, 24(3): 24-27.
- [9] 丁 阳, 张玉峰, 李忠献. 大跨度空间网格结构的损伤定位[J]. 建筑结构学报, 2006, vol. 27(1): 16-23.
DING Yang, ZHANG Yu-feng, LI Zhong-xian. Damage localization for long-span spatial lattice structures [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(1): 16-23.
- [10] 谢开仲, 林海英, 梁寿宗. 钢管混凝土提篮拱损伤识别方法[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2010, 35(1): 96-100.
XIE Kai-zhong, LIN Hai-ying, LIANG Shou-zong. A method for damage detection of concrete-filled steel tube basket handle arch[J]. Journal of Guangxi University: Nat Sci ED, 2010, 35(1): 96-100.

Defect analysis and improvement of structural damage location identification method based on curvature mode

CHANG Jun

(School of Civil Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China)

Abstract: In order to overcome the defects of curvature mode in identifying structural damage condition in practical applications, an improved curvature mode for identification of structural damage location is presented. The basic idea of the improvement is to introduce frequency to the curvature mode identification of structural damage location and building up a structural damage identification indicator. A numerical case of a simple support beam with multiple damages is used to compare the result of the traditional curvature mode method and the improved method. The results show that the curvature mode identification method is less effective, while the identification accuracy of improved method presented herein can reach 100%. The improved curvature mode method can be used as the basis for structural health monitoring and structural assessment, and can be directly applied to actual engineering.

Key words: damage identification; frequency; curvature mode; damage localization; defect analysis