

基于应变能量分布变化的大跨桥损伤识别*

曾欣^{1,2}, 徐赵东¹

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室 南京, 210096)

(2. 苏州工业园区设计研究院 苏州, 215021)

摘要 为满足结构在线健康监测大量数据快速计算的要求,以测试的应变信号为基础,探究结构在不同输入下的损伤识别方法。该方法在传统的以曲率模态为基础的能量损伤指标理论上,提出基于应变能量分布变化的损伤指标法(DIM),通过损伤前后结构的响应求出结构各单元的相对应变比能,获得各单元的DIM,进而根据其峰值位置和大小判别结构损伤位置与损伤度。采用该方法对一大跨斜拉桥进行数值分析,结果表明,该方法能够准确地识别出结构的损伤位置,且对结构在损伤前后受不同激励作用的情况均有效,抗噪声污染能力较强。

关键词 损伤识别; 应变能量分布; 大跨斜拉桥; 应变频响函数; 损伤指标法

中图分类号 U446.2; U446.3

引言

大跨斜拉桥结构使用期间由于环境等各种不利因素的影响,在结构上积累起裂缝、腐蚀和变形,造成结构局部刚度降低。一旦发生工程意外,后果不堪设想。因此,研究大跨斜拉桥结构的损伤识别方法具有重要意义。目前部分学者^[1-4]在该领域进行了一些理论研究和试验探索。1991年, Pandey 等通过计算,研究了曲率模态的变化与损伤的关系,清华大学邓焱也做过类似的计算,并通过位移模态的差分运算求取应变模态。郑明刚分析了应变模态应用于桥梁健康监测的可行性,并指出高阶应变模态相对低价应变模态而言对损伤更为敏感。但实际工程中由于测量技术的限制,复杂结构的高阶模态往往测试不到,因此许多学者提出了基于不完备模态和扩展模态技术的损伤识别方法,但仅限于数值模拟计算,而且对结构发生的多处损伤也无法全部精确识别出来。为了避免结构模态参数的求解,徐赵东提出了损伤识别的能量法,但要求损伤前后激励一致,离实际工程应用仍有不少工作要做。因此,在前人的研究成果上,笔者提出了基于应变的频响函数能量谱损伤指标DIM,不仅避免了复杂的模态计算,而且在损伤指标中剔除了激励的影响,能识别出结构的多处损伤。

1 基于应变能量分布变化的损伤指标法

1.1 损伤变量定义

对于一般的弹塑性材料,可以用受损材料的有效刚度表征材料的损伤,定义损伤度

$$\alpha = 1 - (EI)^d / (EI)^u \quad (1)$$

其中: $(EI)^u$, $(EI)^d$ 分别为材料无损和有损时的有效刚度。

受损构件在受环境作用时,其内部各点损伤状态不一,相应的损伤度的值也不同。为简便,设受损构件内部各点的损伤量相同,损伤度可作为损伤因子定位构件的损伤以及可表征其损伤程度。

1.2 基于应变的频响函数能量谱

应变在工程中容易获得,但工程中获得的动应变一般受激励的影响,不能直接完全反应结构的内在动力特征。为了在获得的动应变中剔除激励的影响,由文献[5-6]可知,可以通过频响函数实现这一目的。为此笔者提出了基于应变的频响函数

$$H_{ip}^s(\omega) = \varepsilon_i(\omega) / f_p(\omega) \quad (2)$$

工程中,频响函数可通过互功率谱密度函数除以自功率谱密度函数获得

$$H_{ip}^s(\omega) = G_{pp}^e(\omega) / G_p^f(\omega) \quad (3)$$

其中: $G_{ip}^s(\omega)$ 为用平均周期图方法处理得到的随机

* 国家支撑计划资助项目(编号:2011BAK02B03);江苏省“333”高层次人才培养资助项目;江苏省六大人才高峰资助项目
收稿日期:2010-05-11;修改稿收到日期:2010-09-25

振动的激励力 $f_p(\omega)$ 和响应应变 $\varepsilon(\omega)$ 之间的平均单边互谱密度; $G_{pp}^f(\omega)$ 为激励力 $f_p(\omega)$ 的平均单边自谱密度。

如果式(3)中响应信号存在噪声,而激励信号不存在噪声,则按照上式(3)计算将得到频响函数的最佳估计,它与激励力无关,且抗噪性能强^[7]。可以得到基于应变的频响函数能量谱为

$$e_h = \int_{-\infty}^{+\infty} |H_{lp}^\varepsilon(\omega)|^2 d\omega \quad (4)$$

1.3 损伤指标 DIM

Kim 等^[8]在模态灵敏度的基础上,根据结构损伤前后模态特性的发展形成了DIM。笔者本文运用该思想,将此指标应用到梁单元的频响函数能量谱上,而不局限于单一的曲率模态。

假设梁分成 N 个单元,如图1所示。

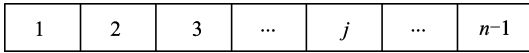


图1 梁模型图

公式推导如下:

梁的应变能为

$$U = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^l EI \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx d\omega \quad (5)$$

其中: v 为梁的挠度。

梁的位移响应为

$$Y = \sum_{i=1}^m q_r \varphi_r \quad (6)$$

模态权重 q_r 是由于激励信号中不同频率段的激励成分决定的,因此在同一激励下,各种模态的权重也为 q_r 。由此可得弯曲产生的挠度

$$v = \sum_{i=1}^m q_r \varphi_r \quad (7)$$

梁轴向应变为

$$\varepsilon(x, \omega) = \sum_{i=1}^n q_r \phi_r \quad (8)$$

其中: ϕ_r 为 r 阶曲率模态。

梁的应变为曲率,应变模态也称为曲率模态

$$\varepsilon(x, \omega) = \frac{d^2 v}{dx^2} = \sum_{i=1}^m q_r \frac{d^2 \varphi_r}{dx^2} \quad (9)$$

结合式(8)可得

$$\phi_r = d^2 \varphi_r / dx^2 \quad (10)$$

将式(2,4,9)代入式(5),得到梁在外激励持续作用下的能量

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l EI \int_{-\infty}^{+\infty} (\varepsilon(x, \omega))^2 d\omega dx = \frac{1}{2} \int_0^l EI \int_{-\infty}^{+\infty} (H_{lp}^\varepsilon(x, \omega))^2 d\omega dx =$$

$$\frac{1}{2} \int_0^l EI e_h(x) dx \quad (11)$$

其中: l 为梁的长度。

第 j 单元梁的应变能为

$$U_j = \frac{1}{2} \int_{a_j}^{a_{j+1}} (EI)_j e_h(x) dx \quad (12)$$

则第 j 单元对整体的相对比能为:

$$F_j = \frac{U_j}{U} = \frac{\frac{1}{2} (EI)_j \int_{a_j}^{a_{j+1}} e_h(x) dx}{U} \quad (13)$$

其中:当 j 单元尺寸足够小时, $(EI)_j$ 可以看成常数。

结构的损伤主要发生在某一局部区域,可以假设结构损伤前后各区域的相对比能保持不变为

$$F_j^u = F_j^d \quad (14)$$

其中:上标 d 表示破坏后的状态;上标 u 表示未破坏时的状态。

如果第 k 单元发生破坏,则

$$\frac{\frac{1}{2} (EI)_k^u \int_{a_k}^{a_{k+1}} e_h^u(x) dx}{U^u} = \frac{\frac{1}{2} (EI)_k^d \int_{a_k}^{a_{k+1}} e_h^d(x) dx}{U^d} \quad (15)$$

假设梁在全长范围内其弹性刚度 EI 为常数,那么上式可以写成破坏区域刚度的比值

$$(\text{DIM})_k = \frac{(EI)_k^u}{(EI)_k^d} = \frac{\int_{a_k}^{a_{k+1}} e_h^d(x) dx / \int_0^l e_h^d(x) dx}{\int_{a_k}^{a_{k+1}} e_h^u(x) dx / \int_0^l e_h^u(x) dx} \quad (16)$$

由于理论误差、计算误差、模型误差以及噪声等因素的影响,不发生损伤的单元DIM值会在1附近波动;因此,通过概率分布趋势取得变量 β 以考虑这些误差引起的DIM值的波动:当 $(\text{DIM})_k > 1 + \beta$ 时,第 k 单元发生损伤;当 $(\text{DIM})_k \leq 1 + \beta$ 时,第 k 单元未发生损伤。

将式(1)代入式(16),可得DIM与损伤度 α 的关系为

$$(\text{DIM})_k = \frac{(EI)_k^u}{(EI)_k^d} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (17)$$

$$\alpha = 1 - 1/(\text{DIM})_k \quad (18)$$

1.4 噪声影响

工程中测试的应变数据不可避免的会受到噪声的影响,考虑如下

$$\varepsilon(t) = \tilde{\varepsilon}(t) + \mu\% \times \text{randn}(n) \times \max |\varepsilon(t)|$$

其中: μ 为加入噪声的百分水平; $\text{randn}(n)$ 为随机产生的服从正态分布的随机数列; $\varepsilon(t)$ 为含噪声污染的损伤识别输入数据。

2 数值分析验证

2.1 模型说明和计算

为了验证 DIM 的损伤识别方法,笔者选取了 1 个三跨(200 m+400 m+200 m)的斜拉桥模型,桥以及箱梁模型如图 2 所示。

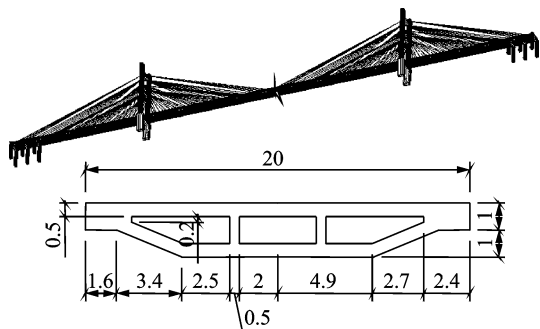


图2 斜拉桥模型和箱梁模型(单位:m)

假设箱梁单元 2(坐标: -13~ -8 m)和单元 38(坐标: -284~ -276 m)两处同时发生损伤,损伤量分别为 10%, 30% 和 70%, 用来模拟轻微、中等、严重损伤工况。由于 Taft 和 El Centro 两种波的频谱特性相差大, 共同反应了一般的地震输入过程, 具有广泛的代表性。将它们作为输入激励时, 能将结构的各种动力特征都激发出来。因此, 选用 Taft 和 El Centro 波作为结构损伤前后的两种不同输入激励。

分析的各种工况如表 1 所示, 计算出各种工况的 DIM 值如图 3~图 7 所示。

表 1 损伤工况表

编号	单元 2 和 38 损伤量/%	噪声
1	10	无
2	10	5%
3	30	无
4	30	10%
5	70	10%

2.2 DIM 损伤识别效果

由图 3、图 5 可知, 在无噪声污染的工况下, 不论发生何种程度的损伤, 大部分单元的 DIM 值在 1 附近, 表明这些单元没有发生损伤。图中的 DIM 的峰值处对应的单元即为发生损伤的单元。通过各种工况的对比可以发现, DIM 损伤指标可以准确地识别出损伤单元的位置, 但与损伤处相邻区域单元的 DIM 值有所改变。因此, 需通过 DIM 的突变峰值判断损伤的发生。

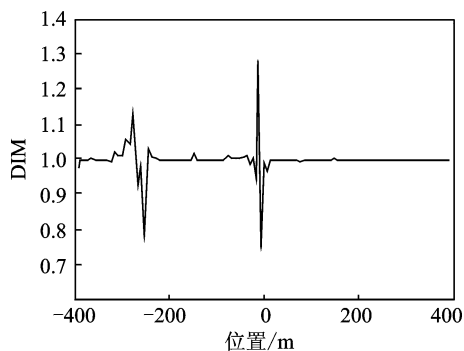


图3 工况 1 各单位损伤指标

2.3 噪声对 DIM 指标识别效果的影响

在有噪声的工况下, 如图 4、图 6 所示。对于轻微损伤工况(图 4), 由于噪声百分比相对损伤程度比较接近, 使得图 4 中误判了两处没有发生损伤的单元。但对于中度损伤的工况, 图 5(无噪声)和图 6(有噪

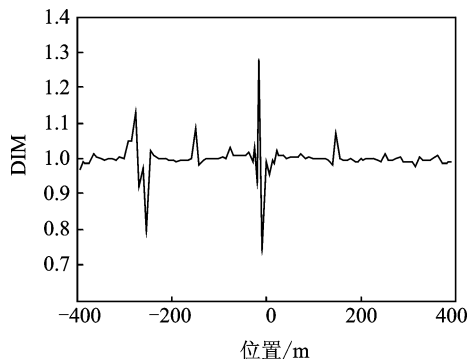


图4 工况 2 各单位损伤指标

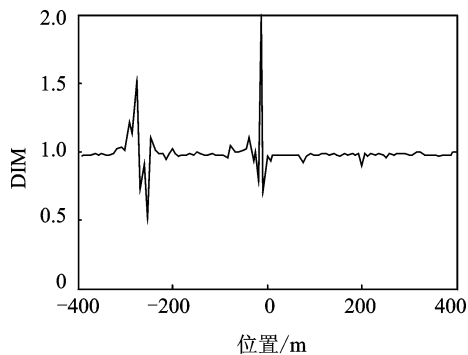


图5 工况 3 各单位损伤指标

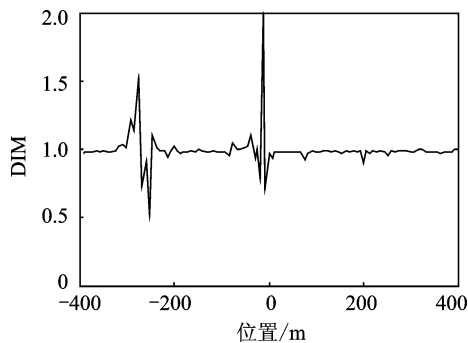


图6 工况 4 各单位损伤指标

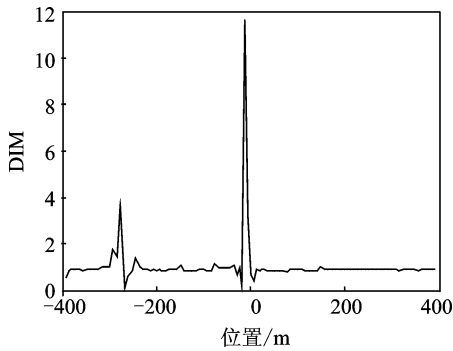


图7 工况5各单元损伤指标

声)几乎相同,表明DIM指标抗噪能力很强的特性。

2.4 DIM指标对损伤程度的判断

为了进一步确定结构中各单元的损伤量,可以通过式(18)计算出损伤单元的损伤程度,并与理论假设进行对比,对比的结果见表2、表3。

表2 单元2损伤程度 %

理论损伤程度	DIM	计算损伤度 α	误差
10	1.28	21.87	11.87
30	1.99	49.80	14.80
70	11.6	91.37	18.37

表3 单元38损伤程度 %

理论损伤程度	DIM	计算损伤度 α	误差
10	1.13	11.50	1.50
30	1.51	33.77	3.77
70	3.68	72.83	2.83

由表2、表3可知,通过DIM值计算出的损伤程度 α 比理论值偏大一点,可以推出计算得到的损伤单元的DIM值较真实值偏大,即式(16)后的 β 是正值。在工程应用上,通过大量数据的统计趋势及概率分析求得 β ,从而降低对损伤程度的估计误差。

3 结论

1) 该方法避免了用结构的模态参数作为损伤识别的输入参数,计算快捷简便,满足结构在线健康监测系统的要求。

2) 损伤区域的DIM较为突出,能定位损伤单元和确定损伤程度。

3) DIM与结构损伤前后的不同输入激励无关,工程应用前景好。

参 考 文 献

[1] 袁爱民,戴航,孙大松. 基于EI及MAC混合算法的斜拉桥传感器优化布置[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(1): 55-59.

Yuan Aimin, Dai Hang, Sun Dasong. Optimal sensor placement of cable-stayed bridge using mixed algorithm based on effective independence and modal assurance criterion methods[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1): 55-59. (in Chinese)

- [2] 董聪,范立础,陈肇元. 结构智能健康诊断的理论与方法[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(1): 11-22.
Dong Cong, Fan Lichu, Chen Zhaoyuan. Theory and method for structural intelligent health diagnosis[J]. China Railway Science, 2002, 23(1): 11-22. (in Chinese)
- [3] 薛祥,霍达,滕海文. 基于空间小波分析的桥梁损伤识别[J]. 中外公路, 2005, 25(6): 92-95.
Xue Xiang, Huo Da, Teng Haiwen. Damage detection for bridges based on spatial wavelet analysis[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25(6): 92-95. (in Chinese)
- [4] 赵学风,段晨东,刘义艳,等. 基于小波包变换的支持向量机损伤诊断方法[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2): 104-107.
Zhao Xuefeng, Duan Chendong, Liu Yiyan, et al. Diagnosis of structure damage by support vector machine based on wavelet packet transform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 104-107. (in Chinese)
- [5] Wu Zhishen, Xu Zhaodong. Energy damage detection strategy based on acceleration responses for long-span bridge structures[J]. Engineering Structures, 2007, 29: 609-617.
- [6] 巫可益,徐赵东. 基于频响函数谱能量的网架损伤识别方法[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 179-183.
Wu Keyi, Xu Zhaodong. Damage detection for reticulated structures based on spectrum energy of frequency response function [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 179-183. (in Chinese)
- [7] 欧进萍,王光远. 结构随机振动[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [8] 李贵炳. 结构损伤识别指标法及其实现[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(5): 613-618.
Li Guibing. The index method on structural damage identification and its implementation [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34(5): 613-618. (in Chinese)

第一作者简介:曾欣,男,1987年8月生,硕士研究生。主要研究方向为桥梁健康监测、城市基础设施物联网及大跨结构。

E-mail: zhdxu@yahoo.com.cn