

简支梁桥损伤程度识别的模拟和试验*

安永辉, 欧进萍

(大连理工大学土木工程学院 大连, 116023)

摘要 在结合钢桁桥损伤程度识别方法的基础上,提出了适用于简支梁结构的两种损伤程度识别方法:整体振型的相关系数法和保证准则法,将其应用到实验室简支梁结构上分别进行数值模拟和试验。脉冲激励下的结果表明,两种方法能较准确地识别损伤单元的等效损伤程度,具有很强的抗噪能力。最后,探讨了激励对提出方法的影响,为工程应用奠定了基础。

关键词 简支梁桥; 损伤程度识别; 损伤识别; 相关系数; 保证准则

中图分类号 U448.21+7; U441+.4

引言

土木工程结构在其服役过程中不可避免地产生损伤积累,甚至导致突发事故^[1]。已建成使用的许多结构急需采用有效手段监测和评定其损伤状况^[2]。损伤程度识别作为损伤识别的最后一个阶段,也是损伤识别的关键阶段,决定着结构的安全程度。基于动力参数的损伤识别方法包括自然频率^[3]、模态振型^[4]、频响函数^[5]、局部模态刚度^[6]和柔度矩阵^[7-11]等。这些方法仅能定位损伤而不能识别损伤程度,或者由于噪声等影响识别精度较低。研究一种受噪声影响较小、识别精度高的损伤程度识别方法仍是迫切需要解决的问题。识别损伤程度关键要把握两点^[12]: a. 使用什么物理量做为指标才能更好地识别损伤程度。结构损伤在物理空间的表现之一为刚度下降,在模态空间的表现之一为振型变化^[13],通常可以选取这些损伤表现进行识别。根据结构发生损伤引起的结构物理参数的变化可以判断结构是否存在损伤以及损伤的位置和程度^[14]。 b. 基于什么数学工具来处理 and 比较选定的指标,进而如何建立与损伤程度的联系。这两点直接关系到损伤程度的识别精度。

结合信号处理技术及相关计算理论,发展并完善用于损伤评估的有限元模型修正方法,是结构健康监测的发展方向之一^[15]。笔者在文献^[12]中提出

了用于钢桁桥结构损伤程度识别的模型修正方法的4种目标函数,其中两种基于局部振型,但由于结构形式的差异,这两种方法不能直接用在简支梁结构上。在此基础上,笔者做了进一步探讨,使得这两种目标函数同样能适用于简支梁结构的损伤程度识别。为了验证该方法是否可行,在实验室简易简支梁结构上分别进行了数值模拟和试验,探讨不同的激励形式对方法的影响,同时还研究了提出的损伤程度识别方法在桁架桥结构和简支梁结构上使用的区别,扩大了本研究方法的适用性。

1 简支梁损伤程度识别方法

结构损伤识别中,前期的损伤定位工作确定了损伤单元的位置和数量,在此基础上从整体振型的相关系数法和保证准则法两个方法入手识别简支梁结构的损伤程度,损伤单元刚度为 $(EI)_{\text{damaged}} = x(EI)$, x 为刚度折减系数,多损伤时为 x_1, x_2, \dots ,具体流程如图1所示。

1.1 方法中用于比较的数学工具

1.1.1 相关系数 ρ_{XY}

随机变量 X 和 Y 的相关系数^[16] ρ_{XY} 为

$$\rho_{XY} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Cov}(X, X)\text{Cov}(Y, Y)}} \quad (1)$$

其中: $\text{Cov}(X, Y)$ 为 X 和 Y 的协方差; ρ_{XY} 为用来表征

* 国家自然科学基金重点资助项目(90815022);铁道部科技研究开发计划资助项目(2008G015-C)

收稿日期:2011-05-30;修改稿收到日期:2011-09-01

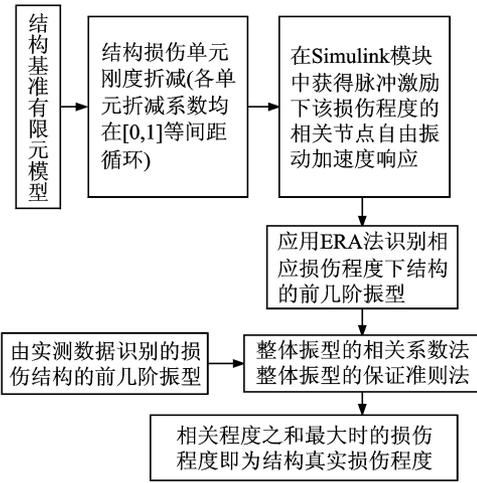


图 1 简支梁的两种损伤程度识别方法流程

$$\rho_{\phi} = \begin{bmatrix} \rho_{\phi_{11}} & \rho_{\phi_{12}} & \cdots & \rho_{\phi_{1j}} \\ \rho_{\phi_{21}} & \rho_{\phi_{22}} & \cdots & \rho_{\phi_{2j}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{\phi_{i1}} & \rho_{\phi_{i2}} & \cdots & \rho_{\phi_{ij}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\rho_{\phi_i} = \sum_{j=1}^j |\rho_{\phi_{ij}}| \quad (4)$$

其中: $\rho_{\phi_{ij}}$ 为第 i 种损伤程度工况下第 j 阶振型的相关系数^[12]; ρ_{ϕ_i} 为第 i 种损伤程度工况下的相关系数之和^[12]。

$\max(\rho_{\phi_i})$ 所对应的 i 即为所求的损伤程度工况编号, 根据 i 得到与真实损伤结构最接近的损伤程度。

1.2.2 整体振型的保证准则法

用 MAC 代替 ρ , 计算出第 i 种损伤下的振型模态保证准则之和 MAC_{ϕ_i} ^[12], $\max(\text{MAC}_{\phi_i})$ 对应的 i 即为所求的损伤程度工况编号。

2 数值模拟及试验模型设计

为了验证该方法在简支梁上是否可行, 在实验室制作了一个简易等截面简支钢管梁模型作为研究对象。

2.1 简易简支梁模型

如图 2 所示, 简支梁模型由矩形钢管加工而成, 外截面尺寸为 $100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 壁厚为 2.6 mm , 计算跨径为 2.4 m 。为了模拟简支梁不同位置的损伤以及多损伤组合工况, 要求实验室能简单快速地制造损伤, 同时又能将损伤恢复以便别的位置模拟损伤。为此, 在钢管上一些位置设置顶板开洞和底板开洞, 在每个洞口外表面罩上一个比洞口略大的同厚度钢片, 四角用螺栓牢固后视为无损结构, 拆掉钢片后的结构为损伤结构。拆掉一个或多个钢片分别对应发生一个或多个损伤。

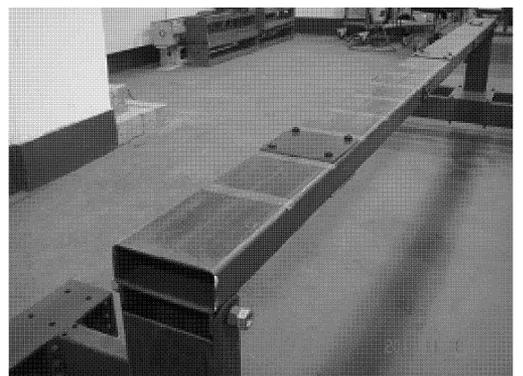


图 2 实验室简易简支梁模型

X, Y 之间的线性关系紧密程度; 当 $|\rho_{XY}|$ 的值越接近于 1, X, Y 的线性相关程度越好; 当 $|\rho_{XY}|$ 的值越接近于 0, Y 与 X 的线性相关程度越差。

此处的随机变量可理解为用来表示随机现象各种结果的变量, 随机现象则为在一定条件下并不总是出现相同结果的现象。结构的振型会随着损伤位置和损伤程度的不同而不同, 从这个意义上讲, 文中 X, Y 分别指数值计算振型向量和实测振型向量, $\text{Cov}(X, Y)$ 和 ρ_{XY} 的值可在 Matlab 里分别基于命令 Cov 和 corrcoef 直接计算。

1.1.2 模态保证准则

模态保证准则(modal assurance criterion, 简称 MAC)是模态分析中常用的工具, 通常用来确定模态振型的阶数, 笔者将其用来识别单元的损伤程度, 定义^[17]为

$$\text{MAC}(\phi_i, \phi_j) = \frac{|\phi_i^T \phi_j|^2}{\phi_i^T \phi_i \phi_j^T \phi_j} \quad (2)$$

MAC 取值为 $[0, 1]$, 其意义为 ϕ_i, ϕ_j 两振型之间的相关程度。当 MAC 为 1 时, 表明两振型完全一致; 当 MAC 为 0 时, 表明两振型完全无关。

1.2 简支梁损伤程度识别方法

1.2.1 整体振型的相关系数法

此处使用简支梁的整体振型来识别损伤程度。以结构实测加速度识别的竖向整体振型 ϕ_{dam} (即 Y 向量) 为目标向量, 在有限元模型里令损伤单元的损伤程度 x 均从 0 到 1 同时进行循环, 在 Simulink 里获得相关节点的加速度。基于 ERA^[18] 法识别出相应损伤程度工况下的竖向振型 ϕ_x (即 X 向量), 求出对应振型相关系数 $\rho_{\phi_{\text{dam}, \phi_x}}$ 。所有循环的损伤程度工况下的前 j 阶振型相关系数为矩阵^[12] ρ_{ϕ}

2.2 模型测试及有限元建模

如图3(a)所示,沿梁纵向每隔12 cm划分一个单元,共20个单元、21个节点。每一个单元刚度矩阵和单元质量矩阵组成总刚度矩阵和总质量矩阵,基于Matlab软件建立该简支梁的有限元模型。真实的无损结构是开洞后又“打补丁”而成的,不可避免造成质量和刚度不均,但由于补丁壁厚非常小且固定牢靠,补丁处刚度实际变化较小,可近似认为刚度均匀,只修正质量即可。经过详细质量修正后,有限元模型与真实结构的前两阶竖向频率如表1所示。该Matlab有限元模型较好地反映了实际结构,将其当作基准有限元模型。

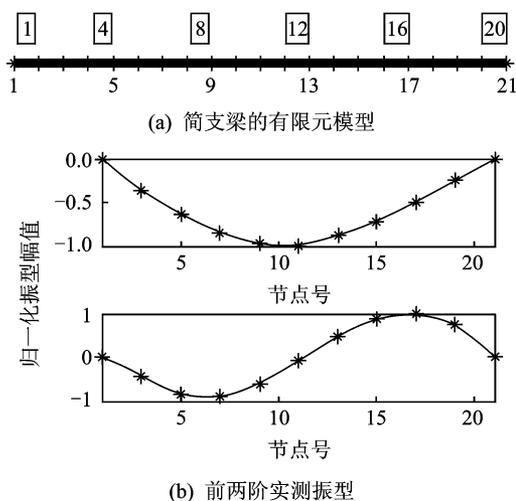


图3 数值模型

表1 模型的实测频率和计算频率

竖向模态	实测频率/Hz	计算频率/Hz	误差/%
1	23.1	22.7	1.73
2	94.8	93.0	1.90

3 损伤程度识别的数值模拟

以多损伤工况为例进行损伤程度识别。假设损伤定位已经确定出损伤单元为3和7。在结构的Matlab有限元模型里将这两个单元的刚度分别折减为原来的60%和50%,在节点17输入阶跃脉冲激励,在Simulink模块里对损伤结构进行仿真分析,输出的损伤结构测点加速度噪声水平设为5%,采样频率为1.2 kHz。

在简支梁上选择整体振型作为指标进行损伤程度识别。首先,在损伤结构有限元模型里基于Simulink模块获得3,5,7,9,11,13,15,17和19这9

个节点的竖向加速度;然后,识别得到损伤简支梁的前3阶振型作为目标振型向量,按照图1流程,在Matlab有限元模型里令这两个损伤单元的刚度折减系数 x_1, x_2 分别从5%到95%(间隔5%)进行361次循环,提取每次循环下这9个节点的加速度时程;最后,基于ERA法识别相应损伤下的整体振型。前3阶模态相关系数之和及模态保证准则之和如图4和图5所示,当损伤组合循环到第219次时,模态相关系数之和及模态保证准则之和均为最大,此时对应结果为:单元3和7的刚度分别下降为原来的60%和50%,与预设损伤程度一致。

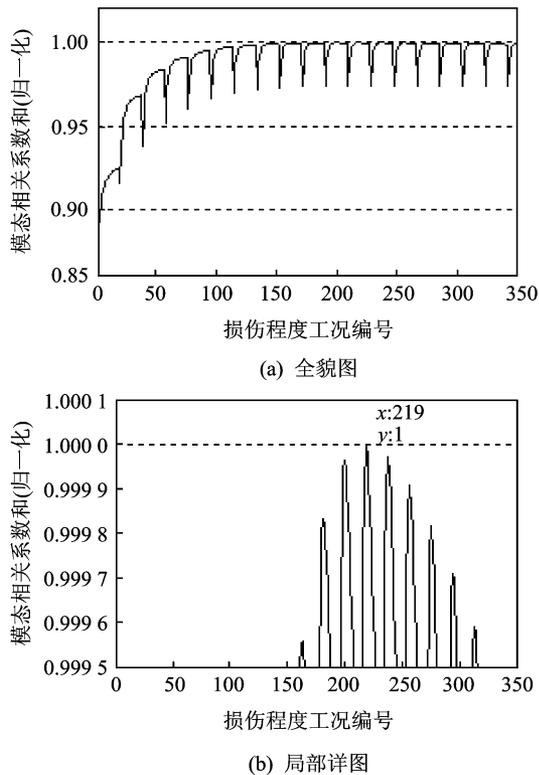


图4 基于方法1的模拟结果

4 损伤程度识别试验

为了验证本研究提出的方法在实际工程中的效果,基于实验室简支梁模型来对试验损伤工况进行损伤单元的程度识别。单元3的尺寸为120 mm×100 mm×40 mm,顶板和底板均有一个60 mm×60 mm的洞口位于其中央位置,如图6(a)所示。

在简支梁结构上均匀安装9个竖向加速度传感器获得竖向加速度。如图6(b)所示,采用NI公司生产的PXI系统同步采集各通道加速度传感器信号,实测时采样频率设为1.2 kHz。在16节点用小锤施加竖向脉冲激励,选用朗斯公司生产的加速度传感

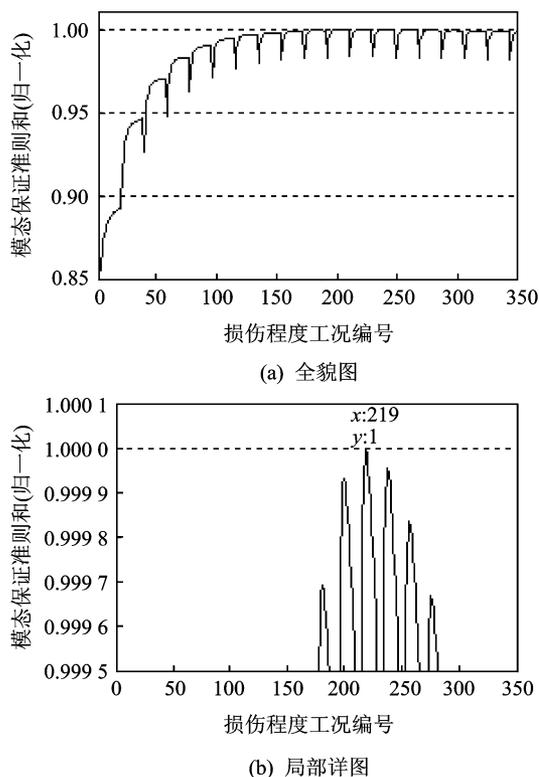
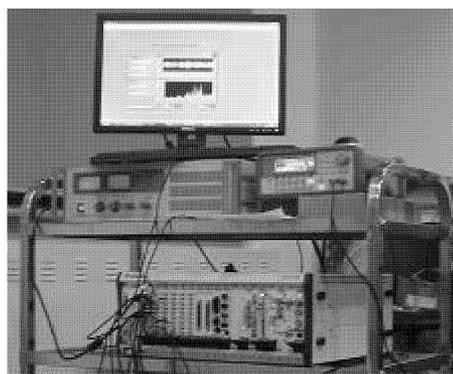


图5 基于方法2的模拟结果



(a) 试验损伤工况图



(b) 测试系统

图6 试验模型及设备

4.1 损伤单元等效刚度确定

4.1.1 理论计算方法

由于单元3是非均匀损伤(一部分损伤,其余无损),其均匀损伤区域损伤程度可利用材料力学公式计算(刚度 EI 为原来的45.5%)。单元3整体等效刚度的计算考虑如下。

对于等截面简支梁的任一小段单元,假设其受弯矩 M 处处相等(在任一小段近似认为),则该段的最大总弯曲变形为段内各分段最大弯曲变形之和。

由于弯曲正应变 $\epsilon = \frac{M_y}{EI}$,弯曲变形为 $L\epsilon$,故

$$L \frac{M_{y_{max}}}{EI} = L_1 \frac{M_{y_{max}}}{EI_1} + L_2 \frac{M_{y_{max}}}{EI_2} \quad (5)$$

由于等截面简支梁 y_{max} 处处相等,则

$$\frac{L}{EI} = \frac{L_1}{EI_1} + \frac{L_2}{EI_2} \quad (6)$$

其中: EI 为任一小段的等效刚度; EI_1, EI_2 分别为 L_1 段和 L_2 段的刚度。

由此计算出单元3的等效刚度为原来的62.5%。

4.1.2 数值模拟方法

在有限元模型中将单元3按照试验预设损伤再次细化为3个单元,即洞口单独为一个单元,洞口左、右无损区域各为一个单元,如图7所示。在细化后的有限元模型里令均匀损伤单元的刚度折减为45.5%,基于文中两种方法求出整体单元3的损伤后的等效刚度均为原来的62%(精确到1%)。这与理论计算值62.5%吻合,证明了本研究方法是准确的,同时也说明计算所用的数值模型与实际结构吻合。

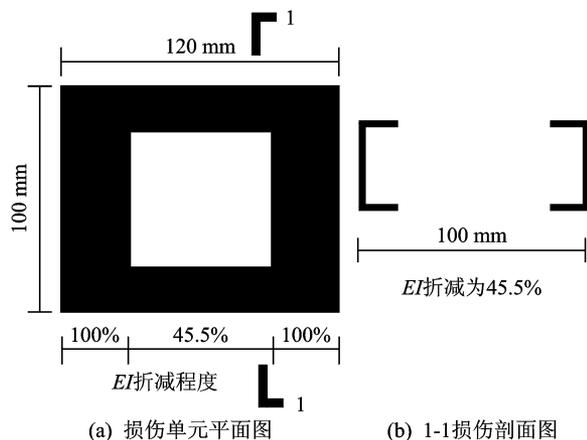


图7 单元3损伤示意图

4.2 试验结果

基于图1所示流程进行识别,步骤为:

器(灵敏度为1 527~2 048 mV/g)同时采集测点的竖向加速度。

1) 在Matlab 模型里令单元3 的刚度折减系数 x 从5%到95%(间隔5%)进行19 次循环,得到竖向相应的整体振型(0 噪声下)。求出模态相关系数之和和模态保证准则之和,如图8(a)和9(a)所示。当 x 为0.60 时,整体振型的相关系数之和最大;当 x 为0.65 时,整体振型保证准则值之和最大。

2) 分别令损伤程度 x 在0.55~0.65 和0.60~0.70 之间再次识别,结果如图8(b)和9(b)所示。基于方法1 和方法2 的二次识别结果分别为:单元3 刚度下降为原来的61%和66%。两种方法的试验结果均与理论计算值62.5%非常接近,分别相差1.5%和3.5%,识别成功。

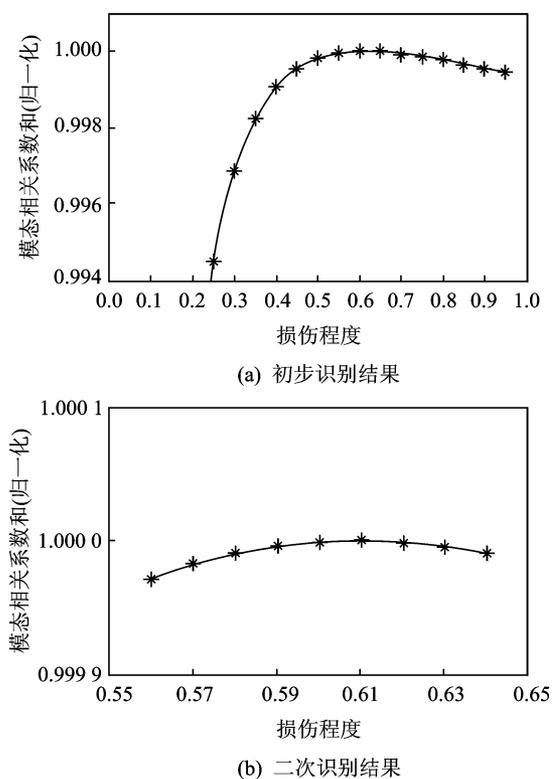


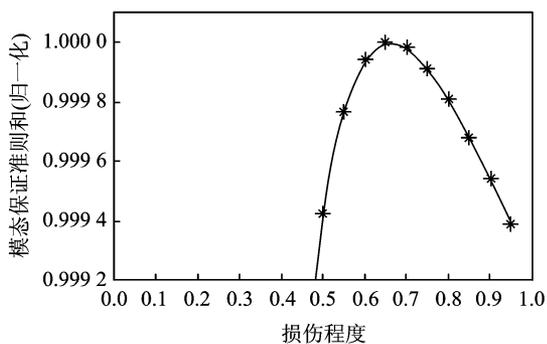
图8 基于方法1 的试验结果

5 说明及讨论

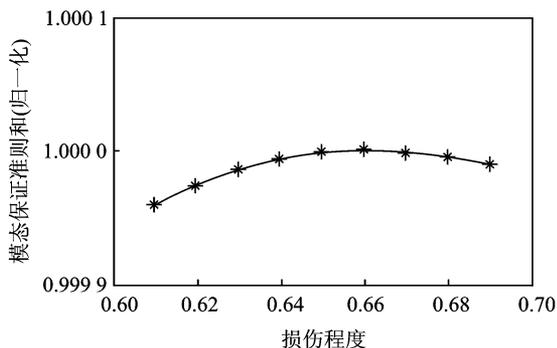
1) 本研究所用振型不必进行幅值归一化处理,无论是使用相关系数法还是保证准则法,均不影响计算结果。

2) 本研究使用整体振型来识别简支梁结构。局部振型不能被用来识别简支梁损伤单元的损伤程度,这是由结构形式决定的。简支梁各单元直线串连,某单元的损伤会导致整体振型发生变化。如图3(a)所示,当单元3 损伤时,单元2,3,4 组成的子结构的局部振型不能较好地识别单元3 的损伤程度,往

往需要选择包含3 在内的更大范围的子结构局部振型才能满足识别要求,这里采用整体振型进行识别。



(a) 初步识别结果



(b) 二次识别结果

图9 基于方法2 的试验结果

3) 文中结构激励形式为脉冲激励,可以选择任意节点施加脉冲激励,但必须一致,也就是说实测损伤结构加速度时的激励位置应该和有限元模型中循环计算时的激励位置相同;脉冲激励的幅值大小对计算结果没有影响。

6 结论

1) 提出了两种适用于简支梁结构的损伤程度识别方法:整体振型的相关系数法和保证准则法。数值模拟的结果表明,这两种方法均可行且识别结果较为精确,具有较强的抗噪性,便于在实际工程中使用。

2) 首次引入相关系数这一数学概念以及用于定阶的模态保证准则作为简支梁结构识别损伤程度的工具,基于这两个工具的计算结果较为接近。实际应用中可用两种方法的计算结果互相检验,相差不大时取平均值作为最终结果。

3) 在设计制作的矩形钢管等截面简支梁概念模型上验证了这两种方法的可行性:单元3 损伤后的等效刚度试验识别结果分别为原来的61%和66%,均与理论计算结果62.5%吻合。

参 考 文 献

- [1] 欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全度评定[C] // 走向世纪的中国力学—中国科协第9次“青年科学家论坛”报告文集. 北京:清华大学出版社,1996:179-189.
- [2] 欧进萍,关新春. 土木工程智能结构体系的研究与发展[J]. 地震工程与工程振动,1999,19(2):21-28.
Ou Jinping, Guan Xinchun. State-of-the-art of smart structural systems in civil engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999,19(2): 21-28. (in Chinese)
- [3] Morassi A. Damage detection and generalized Fourier coefficients [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007,302:229-259.
- [4] Huth O, Feltrin G, Maeck J, et al. Damage identification using modal data: experiences on a prestressed concrete bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 2005,12:1898-1919.
- [5] Liu X, Lieven N A J, Escamilla-Ambrosio P J. Frequency response function shapebased methods for structural damage localization[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2009,23(4):1243-1259.
- [6] Perera R, Huerta C, Orquín JM. Identification of damage in RC beams using indexes based on local modal stiffness[J]. Construction and Building Materials, 2008,22:1656-1667.
- [7] Bernal D. Load vectors for damage localization[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002,128(1):7-14.
- [8] Bernal D. Flexibility-based damage localization from stochastic realization results[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006,132(6):651-658.
- [9] Gao Y. Structural health monitoring strategies for smart sensor networks [D]. Urbana-Champaign: Graduate College of the the University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005.
- [10] Gao Y, Spencer Jr B F, Bernal D. Experimental verification of the flexibility-based damage locating vector method[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(10):1043-1049.
- [11] An Yonghui, Ou Jinping. Experimental and numerical studies on accurate damage location based on the SDLV method[C] // 5th World Conference on Structural Control and Monitoring. Tokyo:[s. n.], 2010.
- [12] An Yonghui, Ou Jinping. Experimental and numerical studies on model updating method of damage severity identification utilizing four cost functions[J]. Journal of Structural Control and Health Monitoring, 2013, 20:107-120.
- [13] 郑飞,许金余,颜祥程. 利用单元模态应变能法的地下框架结构损伤诊断[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(6):642-645.
Zheng Fei, Xu Jinyu, Yan Xiangcheng. Damage diagnosis of underground frame structure using method of element modal strain energy[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010,30(6):642-645. (in Chinese)
- [14] 王正盛. 特征值反问题的结构探伤方法[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(4):446-450.
Wang Zhengsheng. Inverse eigenvalue procedures for damage detection in structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4): 446-450. (in Chinese)
- [15] 何浩祥,闫维明,张爱林,等. 基于支持向量机的张弦梁损伤识别试验[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(1):45-49.
He Haoxiang, Yan Weiming, Zhang Ailin, et al. Analysis of wind-induced displacement response and wind-resistant capability of huge gas tank[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1):45-49. (in Chinese)
- [16] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2001:129-131.
- [17] Allemang R J, Brown D L. A correlation coefficient for modal vector analysis[C] // Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference. Orlando: Union College Press, 1982:110-116.
- [18] Juang J N, Pappa R S. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1985,8(5):620-627.



第一作者简介:安永辉,男,1986年2月生,博士。主要研究方向为桥梁结构的损伤识别、健康监测。曾发表《Experimental and numerical studies on model updating method of damage severity identification utilizing four cost functions》(《Journal of Structural Control and Health Monitoring》2013, Vol. 20)等论文。

E-mail: anyh03@lzu.cn