

文章编号: 1000-4750(2011)11-0038-07

基于车激响应和灵敏度分析的 桥梁结构损伤识别方法研究

*战家旺¹, 夏 禾¹, 陈上有², De Roeck G³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中交公路规划设计院有限公司桥梁技术中心, 北京 100088;

3. 鲁汶大学土木工程系, 鲁汶 B3001, 比利时)

摘 要: 提出了一种利用桥梁结构在车辆荷载作用下在线响应评估结构性损伤的方法。以单元弯曲刚度的变化量为识别指标, 基于车桥动力相互作用理论计算车激桥梁响应以及响应对损伤指数的灵敏度, 以结构不同状态下的响应残差为约束条件, 利用最小二乘法求解灵敏度方程得到各单元的损伤指数, 然后通过有限元更新技术和反复迭代, 最终实现对桥梁损伤的定位和定量分析。分析了测量噪声和轨道不平顺对损伤识别结果的影响规律。数值算例表明, 所提的损伤识别方法对轨道不平顺和量测噪声不敏感, 可以利用加速度、速度或者位移响应有效识别桥梁的绝对损伤或相对损伤。

关键词: 桥梁; 损伤识别; 有限元模型更新; 车激响应; 灵敏度分析; 损伤指数

中图分类号: U441.3 文献标志码: A

DAMAGE DETECTION OF BRIDGES BASED ON TRAIN-INDUCED BRIDGE RESPONSE AND SENSITIVITY ANALYSIS

*ZHAN Jia-wang¹, XIA He¹, CHEN Shang-you², De Roeck G³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Bridge Technology Development Center, CCCC Highway Consultants CO., Ltd, Beijing 100088, China;

3. Department of Civil Engineering, Catholic University of Leuven, Leuven B3001, Belgium)

Abstract: A damage evaluation method for bridges, using their online dynamic responses under passing vehicles, is proposed. The perturbation of the elemental flexural stiffness is used as an index for bridge damage identification. The train-induced bridge responses and the response sensitivities to the damage indexes are calculated based on the train-bridge dynamic interaction theory. Using the response differences between different states as restriction conditions, the sensitivity equation is solved by the least-squares method to get the damage indices, and then the damages are located and quantified by the finite element model updating technique and numerical iteration. A numerical example shows that the proposed damage identification method is insensitive to the railway irregularities and the measurement noises, and that the absolute damage or relative damage of the structure can be effectively identified by acceleration, velocity or deflection responses in railway bridges.

Key words: bridge; damage detection; finite element model updating; train-induced response; sensitivity analysis; damage index

收稿日期: 2010-03-02; 修改日期: 2010-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078029); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009JBM061); 比利时-中国政府间合作项目(BIL07/07);

中国交通建设股份有限公司科技研发项目: 铁路、轻轨、公铁(轨)桥梁车-桥耦合振动仿真分析研究

作者简介: *战家旺(1979—), 男, 河北沧县人, 讲师, 博士, 从事桥梁结构动力检测与损伤诊断研究(E-mail: jwzhan@bjtu.edu.cn);

夏 禾(1951—), 男, 北京人, 教授, 硕士, 博导, 从事桥梁与结构动力学研究(E-mail: hxia@center.njtu.edu.cn);

陈上有(1982—), 男, 江西萍乡人, 工程师, 硕士, 从事桥梁结构动力分析研究(E-mail: shangyou0507@163.com);

De Roeck G (1951—), 男, 比利时鲁汶人, 比利时鲁汶大学土木系终身教授, 博士, 从事结构损伤诊断和模态识别研究(E-mail: Guido.Deroeck@bwk.kuleuven.be).

由于车辆、风等动荷载的反复作用以及材料老化和环境灾害等因素的影响,桥梁结构中会不可避免的出现各种损伤,从而引起结构模态参数的变化。利用结构动力特性识别损伤已经成为当前土木工程结构中的一个研究热点,各国学者进行了大量研究。从结构健康监测的角度考虑,利用结构在运营车辆作用下的时域动力响应或者车辆响应进行损伤评估是一种实用有效的方法。Cattarius 等研究了利用结构时域动力响应识别智能结构损伤的方法^[1]。Majumder 等提出了同时使用桥梁响应和车辆响应识别桥梁结构损伤的方法^[2]。Zhu 等利用移动汽车荷载作用下的动力响应来识别混凝土简支梁的损伤^[3]。Lu 等总结了结构在各种动力荷载作用下的响应灵敏度的特征并应用在结构损伤识别工作中^[4]。卜建清等研究了利用汽车激励下桥梁响应识别桥梁损伤的灵敏度方法^[5],计算了 3 参数车辆和 5 参数车辆响应对桥梁单元损伤的灵敏度,并利用车体响应进行了损伤识别,取得了较好的应用效果^[6]。

在这些利用车激响应识别桥梁损伤的研究中,大多是将车辆对桥梁的作用力简化为移动荷载,有的研究者考虑了车桥动力相互作用,但是将车辆简化为单自由度的移动质量块或者少量自由度的单辆汽车模型,这难以反映实际运营荷载的复杂状况。既有文献中尚未见到利用复杂车辆编组列车作用下的结构响应识别铁路桥梁绝对损伤及不同状态下相对损伤的相关报道。

本文用多节车辆组成的列车模型来模拟复杂的铁路运营荷载,每节车考虑了 10 个自由度,建立了车桥动力相互作用分析模型,计算了桥梁响应及其对单元损伤指数的灵敏度,并构建了灵敏度矩阵。以单个测点的实测响应和计算响应的差值为约束条件建立了灵敏度方程,然后利用最小二乘法和有限元模型更新技术求解得到了各单元的损伤指数,从而实现对桥梁损伤的定位和定量评估。文中还研究了测量噪声和铁路轨道不平顺对损伤识别结果的影响规律。利用本文所提损伤识别方法,以一个三跨连续梁作为算例,对桥梁的绝对损伤和相对损伤进行了识别。

1 车桥动力相互作用分析

本文仅研究车桥系统的竖向振动响应,因此只在 X - Z 平面内进行分析。车桥动力相互作用分析采

用的系统模型由列车子系统和桥梁子系统组成,两个子系统通过假定的轮轨关系连接在一起。

1.1 车辆模型

列车子系统由数个二维车辆单元组成,每个车辆单元包括 1 个车体、2 个转向架、4 个轮对以及各构件间的弹簧-阻尼悬挂系统。车体和转向架考虑 Z 和 R_y 这 2 个方向的自由度,轮对仅考虑 Z 方向的自由度,因此每个四轴车辆单元共有 Z_{ci} 、 R_{ci} 、 Z_{ti1} 、 R_{ti1} 、 Z_{ti2} 、 R_{ti2} 、 Z_{wi11} 、 Z_{wi12} 、 Z_{wi21} 、 Z_{wi22} 这 10 个自由度,如图 1 所示。

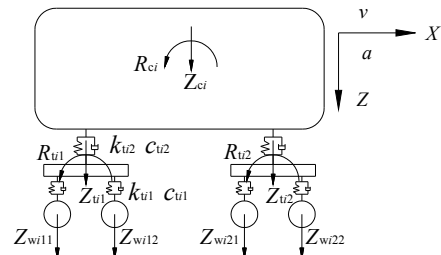


图 1 车桥动力相互作用模型

Fig.1 Train-bridge dynamic interaction model

1.2 桥梁模型

桥梁单元为 X - Z 平面内的二维欧拉梁单元,采用 Rayleigh 阻尼模型时,桥梁阻尼矩阵 C_b 可表示为质量矩阵 M_b 和刚度矩阵 K_b 的线性组合:

$$C_b = \alpha M_b + \beta K_b \quad (1)$$

$$\text{式中: } \alpha = 4\pi \frac{\xi_1 f_1 f_2^2 - \xi_2 f_1^2 f_2}{f_2^2 - f_1^2}; \quad \beta = \frac{1}{\pi} \frac{\xi_2 f_2 - \xi_1 f_1}{f_2^2 - f_1^2};$$

f_1/Hz 和 f_2/Hz 分别为桥梁的第一阶和第二阶自振频率; ξ_1 和 ξ_2 分别为相应的阻尼比。

1.3 轮轨关系

车桥相互作用模型中,一般假定是轮对自由度不独立,而是视为车辆系统和桥梁系统之间的联系,此时轮对位移 Z_w 和桥梁位移 Z_b 的关系为:

$$Z_{w_{ijl}} = Z_b(x_{ijl}) + Z_s(x_{ijl}) \quad (2)$$

式中: x_{ijl} 是第 i 节车辆中第 j 个转向架上第 l 个轮对在桥梁上的位置; Z_s 是轨道不平顺。

1.4 车桥动力响应求解

车桥系统耦合振动方程如下:

$$\begin{bmatrix} M_{vv} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_v \\ \ddot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{vv} & C_{vb} \\ C_{bv} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_v \\ \dot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{vv} & K_{vb} \\ K_{bv} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_v \\ X_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_v \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: M_{vv} 、 K_{vv} 和 C_{vv} 分别为列车的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; \dot{X}_b (或 \dot{X}_v) 和 \ddot{X}_b (或 \ddot{X}_v) 分别

为桥梁(或车辆)的速度和加速度向量; \mathbf{F}_b 和 \mathbf{F}_v 分别为作用在桥梁子系统和列车子系统上的力向量。各矩阵的详细计算方法见参考文献[7]。

由于车辆轮对和桥梁的耦合作用, 桥梁的广义刚度矩阵和阻尼矩阵可表示为^[8]:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{bb} &= \mathbf{K}_b + \mathbf{K}^* = \\ & \mathbf{K}_b + \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 \{m_{w_{ijl}} v^2 \mathbf{H}^T(x_{ijl}) \mathbf{H}_{xx}(x_{ijl}) + \\ & m_{w_{ijl}} a \mathbf{H}^T(x_{ijl}) \mathbf{H}_x(x_{ijl}) + k_{lij}^v \mathbf{H}^T(x_{ijl}) \mathbf{H}(x_{ijl}) + \\ & c_{lij}^v v \mathbf{H}^T(x_{ijl}) \mathbf{H}_x(x_{ijl})\} \quad (4) \\ \mathbf{C}_{bb} &= \mathbf{C}_b + \mathbf{C}^* = \\ & \mathbf{C}_b + \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 [2m_{w_{ijl}} v \mathbf{H}^T(x_{ijl}) \mathbf{H}_x(x_{ijl}) + \\ & c_{lij}^v \mathbf{H}^T(x_{ijl}) \mathbf{H}(x_{ijl})] \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $m_{w_{ijl}}$ 为轮对质量; $\mathbf{H}(x)$ 是桥梁形函数向量; \mathbf{H}_x 和 \mathbf{H}_{xx} 分别为 $\mathbf{H}(x)$ 对 x 坐标的第一阶和第二阶导数; N_c 车辆数; \mathbf{M}^* 、 \mathbf{K}^* 和 \mathbf{C}^* 分别为轮对引起的桥梁附加质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; v 和 a 分别为列车在桥上的移动速度和加速度。

式(3)为时变系数的二阶线性微分方程组, 一般采用 Newmark- β 直接积分方法求解结构响应, 这属于结构动力学的正问题。

1.5 测量噪声模拟

为了研究噪声对识别结果的影响, 向计算响应中添加噪声来模拟现场试验被噪声“污染”的测试数据^[4]:

$$y_m = y_c + e_p N_0 \sigma(y_c) \quad (6)$$

式中: y_c 为原始数据; y_m 为污染后数据; e_p 为噪声等级 ($0 \leq e_p \leq 1$); N_0 为与原始数据等长度的标准正态分布随机向量; $\sigma(y_c)$ 为原始测量数据标准差。

2 基于车激响应的损伤识别

2.1 损伤指数定义

一般认为损伤不改变桥梁的质量, 而只改变单元的刚度, 因此桥梁单元损伤指数可以定义为单元刚度的相对下降率。假定第 j 个单元的损伤指数及参考状态下的弯曲刚度分别为 α^j 和 $(EI)_{\text{refer}}^j$, 则损伤状态下的单元刚度可以表示为:

$$(EI)_d^j = (EI)_{\text{refer}}^j (1 - \alpha^j), \quad 0 \leq \alpha^j \leq 1, \quad j=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中, N 为桥梁单元总数。

2.2 响应对损伤指数灵敏度分析

为了得到单元损伤指数的变化量, 摄动方程可以通过式(3)两边分别对变量 α^j 进行微分得到, 而式(3)中车辆矩阵 \mathbf{M}_{vv} 、 \mathbf{C}_{vv} 、 \mathbf{K}_{vv} 及右端力向量 \mathbf{F}_b 和 \mathbf{F}_v , 矩阵 \mathbf{M}^* 、 \mathbf{C}^* 、 \mathbf{K}^* 、 \mathbf{C}_{vb} 、 \mathbf{K}_{vb} 、 \mathbf{C}_{bv} 和 \mathbf{K}_{bv} 均与单元损伤指数 α^j 无关^[8]。结合式(1)可以得到如下摄动方程:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{vv} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \ddot{\mathbf{X}}_v}{\partial(\alpha^j)} \\ \frac{\partial \ddot{\mathbf{X}}_b}{\partial(\alpha^j)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{vv} & \mathbf{C}_{vb} \\ \mathbf{C}_{bv} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \dot{\mathbf{X}}_v}{\partial(\alpha^j)} \\ \frac{\partial \dot{\mathbf{X}}_b}{\partial(\alpha^j)} \end{Bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{vv} & \mathbf{K}_{vb} \\ \mathbf{K}_{bv} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \mathbf{X}_v}{\partial(\alpha^j)} \\ \frac{\partial \mathbf{X}_b}{\partial(\alpha^j)} \end{Bmatrix} = \\ \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ -\frac{\partial \mathbf{K}_b}{\partial(\alpha^j)} \mathbf{X}_b - \beta \frac{\partial \mathbf{K}_b}{\partial(\alpha^j)} \dot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

可以看出, 式(3)计算得到的桥梁速度响应 $\dot{\mathbf{X}}_b$ 和位移响应 \mathbf{X}_b 为式(8)右端的输入项。采用 Newmark- β 直接积分法, 可以利用摄动方程求解桥梁各节点响应对损伤指数的灵敏度。

2.3 损伤识别步骤

损伤评估的最终目标是利用迭代的方法找到测点响应和计算响应完全吻合时的损伤指数向量 $\mathbf{A} = \{\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^N\}^T$, 这是典型的结构动力学逆问题, 识别时遵循如下步骤:

第1步: 利用第 k 迭代步的损伤指数 \mathbf{A}_k (一般假定损伤指数初始值 $\mathbf{A}_1 = \mathbf{0}$) 来更新桥梁的有限元模型, 即得第 k 迭代步的刚度矩阵 $(\mathbf{K}_b)_k$ 和刚度矩阵的灵敏度矩阵 $\partial(\mathbf{K}_b)_k / \partial \alpha_k^j$ (下标 k 代表第 k 个迭代步)。首先用式(3)计算结构的位移响应向量 $(\mathbf{X}_b)_k$ 和速度响应向量 $(\dot{\mathbf{X}}_b)_k$, 然后代入式(8), 求解响应对损伤指数的灵敏度 $(\partial \mathbf{X}_b / \partial \alpha_k^j)_k$ 。

第2步: 计算第 $s(s=1, 2, \dots, NP)$ 个测点在第 $i(i=1, 2, \dots, NM)$ 个时间步的位移响应 $u_s^k(t_i)$ 及其对损伤指数的灵敏度 $\frac{\partial u_s^k(t_i)}{\partial \alpha_k^j}$, 然后利用计算得到的响应灵敏度构造灵敏度矩阵, 如下所示:

$$\mathbf{S}_s^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_s^k(t_1)}{\partial \alpha_k^1} & \frac{\partial u_s^k(t_1)}{\partial \alpha_k^2} & \dots & \frac{\partial u_s^k(t_1)}{\partial \alpha_k^N} \\ \frac{\partial u_s^k(t_2)}{\partial \alpha_k^1} & \frac{\partial u_s^k(t_2)}{\partial \alpha_k^2} & \dots & \frac{\partial u_s^k(t_2)}{\partial \alpha_k^N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial u_s^k(t_i)}{\partial \alpha_k^1} & \frac{\partial u_s^k(t_i)}{\partial \alpha_k^2} & \dots & \frac{\partial u_s^k(t_i)}{\partial \alpha_k^N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial u_s^k(t_{NM})}{\partial \alpha_k^1} & \frac{\partial u_s^k(t_{NM})}{\partial \alpha_k^2} & \dots & \frac{\partial u_s^k(t_{NM})}{\partial \alpha_k^N} \end{bmatrix}_{NM \times N} \quad (9)$$

式中： NM 为采用的时域响应点数； NP 为测点总个数。

应用罚函数法^[9]可以得到如下灵敏度方程：

$$\mathbf{S}_s^k \cdot \Delta \mathbf{A}_k = \Delta \mathbf{U}_s^k \quad (10)$$

式中： $\Delta \mathbf{A}_k = \{\Delta \alpha_k^1, \dots, \Delta \alpha_k^i, \dots, \Delta \alpha_k^N\}^T$ 为损伤指数在第 k 步的摄动量； $\Delta \mathbf{U}_s^k = \{u_s^k(t_1) - \hat{u}_s^k(t_1), \dots, u_s^k(t_{NM}) - \hat{u}_s^k(t_{NM})\}^T$ 为第 k 步计算响应和测量响应的差值向量；上标“ \wedge ”表示量测响应。

理论上讲，任一测点的灵敏度矩阵均可以用来进行损伤识别。对于具有 N 个单元的桥梁结构来说，使用的响应时间步数 NM 应远大于 N 以保证式(10)解的唯一性。该方程可用最小二乘法进行求解，如下所示：

$$\Delta \mathbf{A}_k = [(\mathbf{S}_s^k)^T \mathbf{S}_s^k]^{-1} (\mathbf{S}_s^k)^T \Delta \mathbf{U}_s^k \quad (11)$$

同其他逆问题类似，式(11)是一个病态方程，解不稳定。本文采用 Tikhonov 开发的有阻尼最小二乘正则化方法^[10]和奇异值分解技术来进行伪逆求解，此时式(10)可以表示为：

$$\Delta \mathbf{A}_k = [(\mathbf{S}_s^k)^T \mathbf{S}_s^k + \lambda \mathbf{I}]^{-1} (\mathbf{S}_s^k)^T \Delta \mathbf{U}_s^k \quad (12)$$

式中： \mathbf{I} 为单位矩阵； λ 为正则化参数。

此时，式(11)的求解相当于求下方方程的最小值，这属于一个优化求解问题。

$$J(\Delta \mathbf{A}_k, \lambda) = \|\mathbf{S}_s^k \Delta \mathbf{A}_k - \Delta \mathbf{U}_s^k\|^2 + \lambda \|\Delta \mathbf{A}_k\|^2 \quad (13)$$

式(12)中的第 2 项为式(11)解的稳定提供了约束。当 λ 趋近于 0 时，估计向量 $\Delta \mathbf{A}_k$ 等价于用最小二乘法求得的解。本文采用 Hansen 基于 L-曲线法开发的 Matlab 软件包^[11]来确定最优正则化参数 λ 。

利用式(12)得到损伤指数向量的增量后，即可进行损伤指数向量的更新：

$$\mathbf{A}_{k+1} = \mathbf{A}_k + \Delta \mathbf{A}_k \quad (14)$$

第 3 步：重复第 1 步和第 2 步，直到满足如下的收敛准则：

$$\|\mathbf{A}_{k+1} - \mathbf{A}_k\| / \|\mathbf{A}_{k+1}\| \leq \varepsilon \quad (15)$$

式中： $\|\cdot\|$ 表示向量的模； ε / (%) 为容许误差。

以上推导是针对位移响应进行的，利用速度响应和加速度响应时的损伤识别程序相同，只需将式(10)中的灵敏度矩阵和响应差值向量更换即可。

3 数值算例

本文以一座三跨连续梁为例来验证所提出的损伤识别方法。

桥梁跨度为 25m+25m+25m，有限元模型由 30 个 2.5m 长的单元组成，共有 31 个节点，如图 2 所示。桥梁的参数为：弹性模量 $E=35.5\text{GPa}$ ；截面积 $A=3.0\text{m}^2$ ；截面惯性矩 $I=0.84\text{m}^4$ ；单位长度质量 $\bar{m}=15\text{t/m}$ 。

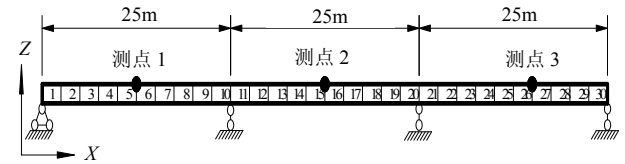


图 2 桥梁模型简图

Fig.2 Layout of the bridge model

采用由 4 节车辆组成的列车模型，车辆的参数如表 1 所示。

表 1 车辆主要参数

Table 1 Main parameters of the vehicle

车辆参数/单位	数值	车辆参数单位	数值
车辆全长 L / m	22.5	一系竖向弹簧刚度 k_1^v / (kN/m)	2976
车辆定距 $2s$ / m	15.6	二系竖向弹簧刚度 k_2^v / (kN/m)	1060
固定轴距 $2d$ / m	2.5	一系竖向阻尼 c_1^v / (kN · s/m)	15
车体质量 M_c / t	40.99	二系竖向阻尼 c_2^v / (kN · s/m)	30
转向架质量 M_t / m	4.36	车体点头转动惯量 $J_{c\phi}$ / (t · m ²)	1959
轮对质量 m_w / t	1.77	转向架点头转动惯量 $J_{t\phi}$ / (t · m ²)	1.47

3.1 识别误差

采用相对误差来评估损伤指数的识别精度，定义如下：

$$RE = \|\mathbf{A}_{id} - \mathbf{A}_t\| / \|\mathbf{A}_{id}\| \quad (16)$$

式中： \mathbf{A}_{id} 和 \mathbf{A}_t 分别为识别出来的损伤指数向量和真实损伤指数向量。

3.2 利用不同类型响应识别单损伤

假设仅第 7 单元发生损伤，即 $\alpha^7 = -30\%$ ，而即 $\alpha^j = 0\%$ ($j \neq 7, j = 1, 2, \dots, 30$)。

假设分别采用编号为 1~3 的测点响应进行损伤

识别, 其离桥梁左端的距离分别为 10m、37.5m 和 65m(图 2)。

为模拟列车上桥时振动初始条件, 列车从桥前 150m 处由静止开始行驶。列车以 20m/s 的速度从左端上桥并匀速通过, 分别计算得到了各测点的竖向位移、竖向速度和竖向加速度响应。数据中分别加入幅值为 5%和 10%的噪声, 并以之为输入进行了损伤识别。轨道不平顺取美国 4 级谱、美国 5 级谱和美国 6 级谱(不平顺幅值随等级的增加而减小)。

表 2 不同类型响应下的识别结果

Table 2 Identification results with different types of response

测点	噪声水平/(%)	位移响应识别结果			速度响应识别结果			加速度响应识别结果		
		RE/(%)	α^7	迭代次数	RE/(%)	α^7	迭代次数	RE/(%)	α^7	迭代次数
2	0	0.89	29.73	376	1.25	29.62	399	1.68	29.49	289
	5	2.77	29.16	414	2.145	29.35	412	2.74	29.17	346
	10	3.50	28.94	480	2.84	29.14	496	5.54	28.32	406

利用 1 号测点、2 号测点和 3 号测点的加速度响应识别出的损伤对比结果如图 3 所示。可以看出, 利用 3 个测点响应识别出的桥梁损伤非常接近, 这表明测点位置对识别结果影响很小。

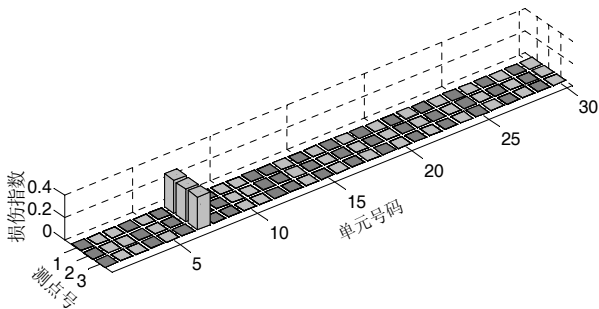


图 3 不同测点下的识别结果

Fig.3 Identified damage from different measurement points

利用测点 3 的加速度响应识别出的损伤指数随迭代步数的变化规律见图 4。

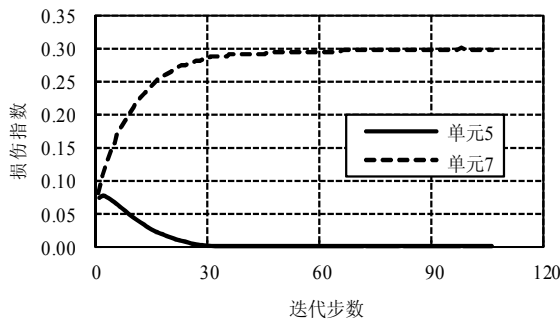


图 4 损伤指数随迭代步数的变化规律

Fig.4 Damage indices versus iteration step

可以看出, 单元的损伤指数迅速收敛到其真实值, 如果仅对损伤进行定位, 只需要少量的迭代次数即可。

采样频率为 200Hz, 采用的输入采样点数为 1500。

当轨道不平顺谱为美国 5 级谱时, 采用测点 2 的位移、速度和加速度响应的识别结果列于表 2。可以看出, 利用噪声“污染”后的位移响应、速度响应和加速度响应均能正确地识别出损伤。但随着噪声水平增加, 识别误差增大, 达到稳定解所需要的迭代次数也增加。迭代次数均达到几百次, 这是因为式(15)中设定的容许误差值过小, 如果增大容许误差, 则迭代次数可大幅减少。

3.3 多损伤识别

假设桥梁第 5 个、第 15 个和第 25 个单元同时发生损伤, $\alpha^5 = 20\%$, $\alpha^{15} = 40\%$, $\alpha^{25} = 30\%$; $\alpha^j = 0 (j \neq 5, 15, 25)$ 。轨道不平顺采用美国 6 级谱, 列车的参数和运行初始条件与 3.2 节相同。测量得到的加速度数据中分别加入幅值为 1%、5%和 10%的噪声。

利用不同测点的加速度响应时的损伤识别结果如图 5 所示。不同噪声水平下的识别结果见图 6。

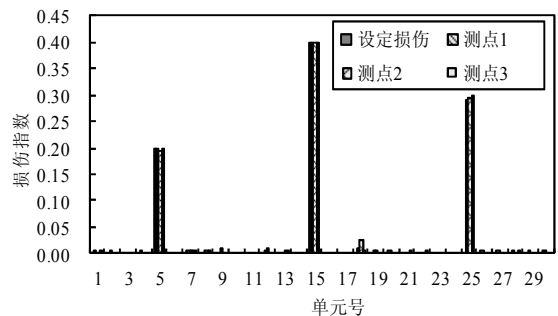


图 5 不同测点下的识别结果(10%噪声)

Fig.5 Identified damage from different measurement points

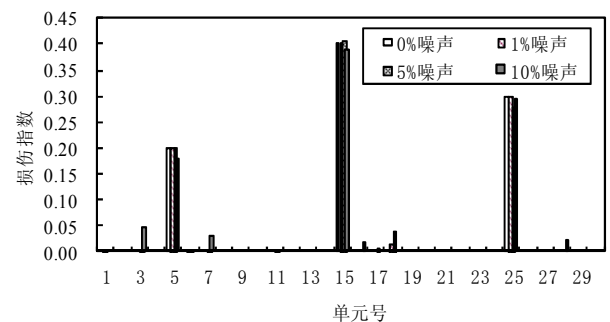


图 6 不同噪声水平下的识别结果

Fig.6 Identified damage with different noise levels

为了研究轨道不平顺对损伤识别结果的影响情况,考虑了另一损伤工况,即3单元、12单元和28单元分别发生30%、20%和40%损伤。测点位置选在距离左端13m处。分别以美国不平顺谱4级~6级情况下噪声水平为10%时的加速度响应为输入进行损伤识别,伤识别结果如图7所示。各单元损伤指数随迭代步数的变化规律见图8。

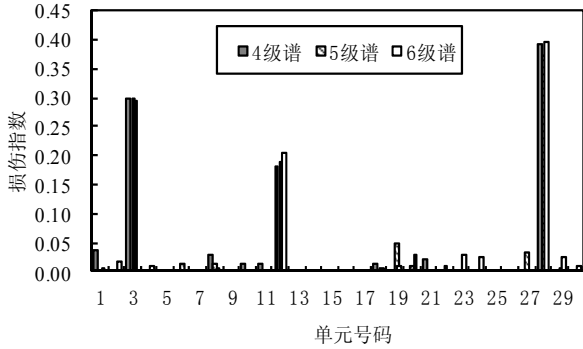


图7 不同不平顺等级下的识别结果(10%噪声)

Fig.7 Identified damage under different irregularity conditions

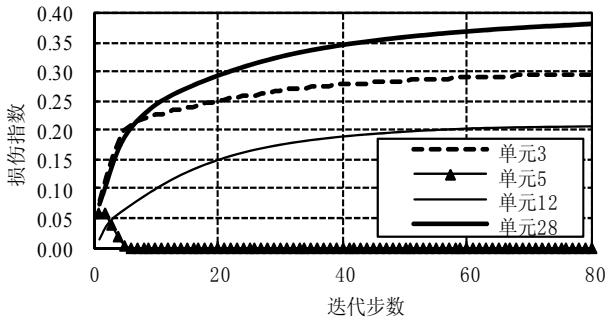


图8 损伤指数随迭代步数的变化规律

Fig.8 Damage indices versus iteration step

从上面分析结果可以看出:

1) 利用不同测点的损伤识别结果基本相同(图5),这说明测点位置对识别结果影响不大,所以损伤识别时可以灵活选择测点位置。

2) 利用噪声水平为1%~10%之间的测试动力响识别出来的损伤与没有噪声时的损伤识别结果基本一致,这说明本文所提的损伤识别方法对噪声不太敏感,抗噪能力较强(图6)。

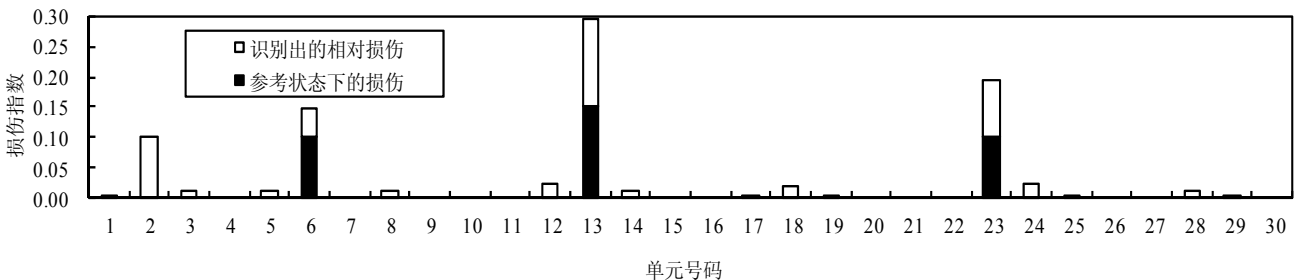


图9 相对损伤识别(10%噪声)

Fig.9 Relative damage identification (10% noise)

3) 各轨道不平顺条件下的识别结果基本吻合(图7),这说明该方法对轨道不平顺也不敏感。实际分析表明,随着不平顺程度的增加,达到稳定解时所需要的迭代次数有所增加。

4) 在迭代的初始阶段各单元损伤指数的收敛速度非常快,而在迭代的后期各单元的损伤指数非常缓慢地趋向于真实值(图8)。因此,如果仅进行损伤定位,只需要少量的迭代次数即可,这样可以节省大量计算时间。

3.4 相对损伤识别

采集桥梁健全状态下的模态数据,然后采用有限元模型更新技术来得到桥梁的基准有限元模型^[12]。这种情况下通过比较损伤前后的动力响应识别出的损伤为绝对损伤。当仅知道桥梁某一损伤状态下的模型信息并将之当作基准模型时,识别出来的损伤是相对损伤。

对大部分既有桥梁来讲,其初始健全状态下的信息是未知的,但是可以通过一定的测试手段了解其在某一时刻的工作状态。假如以 t_1 时刻的桥梁模型为基准,利用其后某一时刻 t_2 时的响应进行识别,则识别出的损伤是两个时间点的相对损伤变化量。

假定作为基准时间点的 t_1 时刻6号、13号和23号单元分别发生了程度为10%、15%和10%的损伤,而 t_2 时刻2号、6号、13号和23号单元的绝对损伤分别为10%、15%、30%和20%。此时,4个单元的假定相对损伤分别为10%、5%、15%和10%。

以测点1在 t_2 时刻损伤状态下的加速度响应为输入,并以 t_1 时刻的桥梁模型为基准模型识别出的桥梁损伤如图9所示。

从图9中可以看出:识别出的相对损伤与 t_1 时刻参考损伤的总和与 t_2 时刻的假定绝对损伤非常接近;尽管噪声水平达到10%,各单元的损伤增加量均被正确识别。

4 结论

本文的主要工作和结论如下:

(1) 提出了一种利用车激响应和灵敏度分析的铁路桥梁无损检测时间域迭代方法。

(2) 只需要一个测点的响应即可较准确地识别桥梁的绝对损伤或相对损伤。测点的位置对识别结果影响不大。

(3) 所提方法对线路的不平顺条件不敏感。

(4) 所提方法的抗噪声能力较强,即使噪声水平达到 10%,也能识别出 5%的桥梁局部损伤。

(5) 位移响应、速度响应和加速度响应均可以作为损伤识别的输入数据,但是由于位移不太容易测量,速度信号应用也较少,因此建议实际应用中优先选用加速度响应来进行桥梁损伤识别。

参考文献:

- [1] Cattarius J, Inman D J. Time domain analysis for damage detection in smart structures [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997, 11(3): 409—423.
- [2] Majumder L, Manohar C S. A time domain approach for damage detection in beam structures using vibration data with a moving oscillator as an excitation source [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 268: 699—716.
- [3] Zhu X Q, Law S S. Damage detection in concrete bridge structures under moving vehicular loads [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2007, 129(1): 58—65.
- [4] Lu Z R, Law S S. Features of dynamic response sensitivity and its application in damage detection [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 303: 305—329.
- [5] 卜建清, 王树栋, 罗韶湘. 由车激响应识别桥梁损伤的灵敏度方法[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(7): 41—45.
- [6] Bu Jianqing, Wang Shudong, Luo Shaoxiang. Bridge damage identification using dynamic response induced by a passing vehicle based on response sensitivity analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(7): 41—45. (in Chinese)
- [7] Bu J Q, Law S S, Zhu X Q. Innovative bridge condition assessment from dynamic response of a passing vehicle [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2006, 132: 1372—1378.
- [7] 夏禾, 张楠. 车辆与结构动力相互作用 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] Xia He, Zhang Nan. Dynamic interaction of vehicles and structures [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [8] 陈上有. 基于车桥耦合振动分析的桥梁结构参数识别与损伤诊断方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [9] Chen Shangyou. Study on bridge structural parameters identification and damage detection techniques based on bridge-vehicle coupled vibration analysis [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [9] Friswell M I, Mottershead J E. Finite element model updating in structural dynamics [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1995.
- [10] Tikhonov A M. On the solution of ill-posed problems and the method of regularization [J]. *Soviet Mathematics*, 1963, 4: 1035—1038.
- [11] Hansen P C. Regularization tools—A Matlab package for analysis and solution of discrete ill-posed problem [Z]. Version 4.1, 2008.
- [12] Teughels A, Maeck J, De Roeck G. Damage assessment by FE model updating using damage functions [J]. *Computers and Structures*, 2002, 80(25): 1869—1879.