

文章编号:1671-8879(2008)03-0063-05

基于过桥汽车动力响应的桥梁损伤识别

王树栋^{1,2}, 卜建清^{2,3}, 娄国充^{1,2}

(1. 北京交通大学 土木与建筑工程学院, 北京 100044; 2. 石家庄铁道学院 土木工程分院, 河北 石家庄 050043; 3. 铁道科学研究院, 北京 100081)

摘要:为了识别桥梁结构的损伤,提出了由过桥汽车的加速度响应识别桥梁损伤的灵敏度分析方法。将桥梁等效为等长的欧拉梁单元,汽车等效为单自由度 3 参数模型,将桥梁各单元抗弯刚度的减小(即损伤的程度)定义为损伤因子。根据损伤因子,采用最小二乘法和正则化方法,可用测试得到的汽车加速度响应识别桥梁损伤。结果表明:损伤识别结果对汽车参数变化比较敏感,汽车过桥行驶速度和采样频率对迭代次数有显著影响;损伤识别误差随着桥面不平顺和测试噪声的增加而加大。

关键词:桥梁工程;损伤识别;车-桥系统;正则化方法;加速度响应

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A

Bridge damage identification by dynamic response of passing vehicle

WANG Shu-dong^{1,2}, BU Jian-qing^{2,3}, LOU Guo-chong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043,
Hebei, China; 3. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to evaluate the bridge damage, this paper presents a detection method from the acceleration response of the vehicle moving on a simply supported bridge based on dynamic response sensitivity analysis. In this method, the bridge is considered as Euler beam element and the moving vehicle is modeled as an one-degree-freedom system with three parameters (mass, stiffness and damping), the reduction of bending stiffness of each element is defined as damage factor. With damage factor, the identification can be realized based on the combination of least-squares method and regularization technique from vehicle acceleration measurement. The simulated results indicate that the identified damage is sensitive to vehicle parameters, the vehicle speed and sampling frequency affect the identified results heavily, the identified errors rise with the increase of surface roughness and noise level. 5 tabs, 2 figs, 9 refs.

Key words: bridge engineering; damage detection; vehicle-bridge system; regularization technique; acceleration response

收稿日期:2007-06-01

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2006000394)

作者简介:王树栋(1969-),男,山西平遥人,石家庄铁道学院副教授,北京交通大学博士研究生,E-mail:wangshud@vip.163.com

0 引言

近几十年来,结构损伤识别一直是国内外研究的热门课题,文献[1]提出了基于损伤机理的结构损伤安全评定方法的设想,采用局部无损探测和整体、长期健康监测相结合的损伤判断、定位技术,在正确诊断桥梁损伤的基础上,综合应用损伤力学、疲劳断裂和可靠度理论等多种方法进行损伤安全评定。国内外诸多科研工作者提出了许多结构损伤识别方法,Doebeling等[2]详细地总结了根据系统动力特性变化识别结构损伤的方法,这类方法的最大不足就是用整体的参数识别结构局部的损伤,而且不适用于识别时变系统的损伤;Cattarius等[3]提出用结构振动响应时程识别智能结构的损伤;Li等[4]提出了由系统时域动力响应识别损伤结构各单元的特性参数;Yang等[5]分析过桥汽车的动力响应,得到了桥梁的基本频率,说明过桥汽车的动力响应可以反映出桥梁参数的变化。本文受此启发,提出用过桥汽车动力响应在时域识别桥梁的损伤,其中汽车在车-桥系统中起着“传感器”的作用。

1 汽车-桥梁耦合振动分析

1.1 3参数汽车模型

如图1所示的单一自由度3参数汽车模型包括质量 m_v 、阻尼 c_v 和弹簧刚度 k_v ,振动方程为

$$m_v y + k_v [y - w(x(t)) - r(x(t))] + c_v [\dot{y} - \dot{w}(x(t))] = 0 \quad (1)$$

式中: y 、 \dot{y} 、 \ddot{y} 分别为汽车的垂向位移、速度和加速度响应; $w(x(t))$ 、 $\dot{w}(x(t))$ 分别为车桥接触点距离桥梁左端 $x(t)$ 处桥梁的垂向挠度和导数; $r(x(t))$ 为前述车桥接触点处桥面的不平顺大小。

另外,车桥接触力 P_{int} 可以表示为

$$P_{int} = m_v g + k_v [y - w(x(t)) - r(x(t))] + c_v [\dot{y} - \dot{w}(x(t))] = m_v g - m_v \ddot{y} \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度。

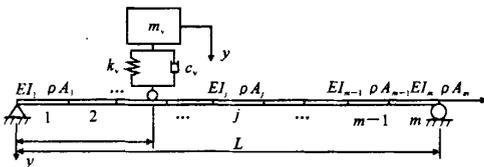


图1 汽车模型与车桥系统

1.2 汽车-桥梁耦合振动方程

将简支梁桥划分为 m 个欧拉梁单元(图1),图中: EI_j 和 ρA_j 分别为单元的刚度及单位质量($j =$

$1, 2, \dots, m$),单元质量和刚度矩阵根据三次插值函数得到, L 为跨度。桥梁的振动方程为

$$M_b \ddot{R} + C_b \dot{R} + K_b R = H_p P_{int} \quad (3)$$

式中: M_b 、 C_b 、 K_b 分别为桥梁的质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{R} 、 \dot{R} 、 R 分别为节点加速度、速度和位移列向量; H_p 为 $N \times 1$ 列向量,车轮所在单元节点自由度对应的元素为非0,其余元素均为0, $H_p = \{0 \ 0 \ 0 \ H_j \ 0 \ \dots \ 0\}^T$, H_j 为汽车在第 j 单元时用局部坐标表示的形函数向量; N 为考虑桥梁边界条件后的总自由度数量。

根据瑞利(Rayleigh)阻尼假设,桥梁的阻尼矩阵可以表示为

$$C_b = \alpha_1 M_b + \alpha_2 K_b \quad (4)$$

式中: α_1 、 α_2 均为瑞利阻尼系数,根据临近的两阶阻尼比和固有频率确定。

把式(2)代入式(3),然后与式(1)组合得到汽车-桥梁耦合振动方程为

$$\begin{bmatrix} M_b & H_p^T m_v \\ 0 & m_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{R} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b & 0 \\ -c_v H_p & c_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{R} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b & 0 \\ -k_v H_p & k_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -H_p^T m_v g \\ k_v r(x(t)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

用Newmark方法求解式(5),可以得到桥梁节点和汽车的动力响应时程。

1.3 桥上路面不平顺模拟

用一组均值为0、且符合稳态高斯分布的随机数表示桥上路面不平顺 $r(x)$ [6]

$$r(x) = \sum_{i=1}^K \alpha_i \cos(2\pi f_i x + \theta_i) \quad (6)$$

式中:不平顺参数 α_i 为余弦波的幅值; θ_i 为在0到 2π 之间符合正态分布的一系列不相关的随机相位角; K 为模拟随机不平顺的点数; x 为桥上某点距桥梁左端的距离; f_i 为位于由功率谱密度 $S_r(f_i)$ 定义域范围 $[f_1, f_u]$ 的空间频率; f_1 、 f_u 分别为截断空间频率的上、下界。

参数 α_i 和 f_i 分别由下式得到

$$\alpha_i^2 = 4S_r(f_i)\Delta f$$

$$f_i = f_1 + (i - 1/2)\Delta f, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中: $\Delta f = (f_u - f_1)/N$; $S_r(f_i) = \bar{\alpha} f_i^{-\beta}$, $\bar{\alpha}$ 为不平顺系数,其数值的大小视路面分级情况[7]确定;指数 β 取1.94。

2 桥梁损伤因子灵敏度分析

根据一般情况,认为损伤对桥梁质量没有影响,所以损伤因子 α_i 定义为单元弯曲刚度减少的百分比,则损伤后桥梁单元的弯曲刚度为

$$(EI)_j^1 = (EI)_j^0(1 + \alpha_j^1), -1 \leq \alpha_j^1 \leq 0 \quad (8)$$

式中:\$(EI)_j^0\$ 为桥梁损伤之前 \$j\$ 单元的原始弯曲刚度;\$(EI)_j^1\$ 为桥梁损伤之后 \$j\$ 单元的弯曲刚度。

式(5)两边对损伤因子 \$\alpha_j^1\$ 求一阶导数,可得

$$\bar{M}\dot{S}_j + \bar{C}\dot{S}_j + \bar{K}S_j = \bar{P}_j \quad (9)$$

式中: \$\bar{M} = \begin{bmatrix} M_b & H_p^T m_v \\ 0 & m_v \end{bmatrix}\$; \$\bar{C} = \begin{bmatrix} C_b & 0 \\ -c_v H_p & c_v \end{bmatrix}\$; \$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_b & 0 \\ -k H_c & k_v \end{bmatrix}\$; \$j = 1, 2, \dots, m\$;

$$\dot{S}_j = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{R}_1}{\partial (\alpha_j^1)} & \frac{\partial \dot{R}_2}{\partial (\alpha_j^1)} & \dots & \frac{\partial \dot{R}_N}{\partial (\alpha_j^1)} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial (\alpha_j^1)} \end{bmatrix}^T;$$

$$S_j = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_1}{\partial (\alpha_j^1)} & \frac{\partial R_2}{\partial (\alpha_j^1)} & \dots & \frac{\partial R_N}{\partial (\alpha_j^1)} & \frac{\partial y}{\partial (\alpha_j^1)} \end{bmatrix}^T;$$

$$P_j = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_1}{\partial (\alpha_j^1)} & \frac{\partial R_2}{\partial (\alpha_j^1)} & \dots & \frac{\partial R_N}{\partial (\alpha_j^1)} & \frac{\partial y}{\partial (\alpha_j^1)} \end{bmatrix}^T;$$

$$\bar{P}_j = \begin{bmatrix} -\frac{\partial K_b}{\partial (\alpha_j^1)} R - \alpha_j^1 \frac{\partial K_b}{\partial (\alpha_j^1)} \dot{R} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

式中: \$\dot{R}_1, \dot{R}_2, R_1\$ 分别为节点 1 的加速度、速度和位移; \$\dot{R}_N, \dot{R}_N, R_N\$ 分别为节点 \$N\$ 的加速度、速度和位移。

由于式(9)中的质量矩阵 \$\bar{M}\$、阻尼矩阵 \$\bar{C}\$、刚度矩阵 \$\bar{K}\$ 和力向量 \$\bar{P}_j\$ 都是时变的,所以桥梁节点与汽车的动力响应对损伤因子的一阶灵敏度的时程同样也可用 Newmark 方法求解得到。

3 桥梁损伤识别

3.1 基本原理

研究认为,汽车以常速从桥梁左端通过右端,因此一般情况下汽车的加速度响应比较容易准确地测试,所以用 \$y\$ 表示模拟计算汽车的加速度响应时程; \$y_m\$ 表示模拟汽车加速度实测时域响应; \$\dot{S}\$ 表示汽车加速度响应对桥梁损伤因子的一阶灵敏度。

假设桥梁损伤因子初始向量 \$p_0\$ 为 0,即 \$p_0 = \{\alpha_1^1, \alpha_2^1, \dots, \alpha_m^1\}^T = 0\$,与此相应的汽车加速度响应及其灵敏度分别为 \$y_0\$ 和 \$\dot{S}_0\$,可由式(5)、式(9)得到。汽车的计算响应与模拟测试响应 \$y_r\$ 的差值 \$\Delta y_r\$ 为

$$\Delta y_r = y_m - y_r, r = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

与此相应,桥梁损伤因子差值向量 \$\Delta p_r\$ 也可以通过下面的方程得到

$$\ddot{S}_r \Delta p_r = \Delta y_r = y_m - y_r, r = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

式中: \$\ddot{S}_r\$ 为第 \$r\$ 迭代步的灵敏度,是一个 \$N_i \times m\$ 的矩阵,可以表示为

$$\ddot{S}_r = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_r(1)}{\partial (\alpha_s^1)_r} & \dots & \frac{\partial y_r(1)}{\partial (\alpha_m^1)_r} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial y_r(N_i)}{\partial (\alpha_s^1)_r} & \dots & \frac{\partial y_r(N_i)}{\partial (\alpha_m^1)_r} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: \$N_i\$ 为采样点数; \$r\$ 为迭代次数。

在下一步的迭代中,用更新后的损伤因子向量 \$p_{r+1} = p_r + \Delta p_r\$ (\$r = 0, 1, 2, \dots\$) 进行计算,可以得到新的汽车加速度响应 \$y_{r+1}\$ 和灵敏度 \$\dot{S}_{r+1}\$,并进一步得到 \$\Delta p_{r+1}\$。重复以上的过程,直到识别得到的 \$\Delta p_r\$ 的模小于规定的容许值 \$T_{\text{tolerance}}\$ 为止,即

$$\|\Delta p_r\| < T_{\text{tolerance}} \quad (13)$$

式中: \$\|\Delta p_r\|\$ 为向量的模,在下面的数值模拟中容许值取 \$1.0 \times 10^{-6}\$。

3.2 正则化方法

直接用最小二乘法求解式(11),可以得到 \$\Delta p_r\$,但结果有时不够稳定。引入正则化方法^[8-9]求解下面的方程,得到最优的阻尼最小二乘解为

$$\Delta p_r = (\ddot{S}_r^T \ddot{S}_r + \lambda I)^{-1} \ddot{S}_r^T \Delta y_r \quad (14)$$

式中: \$\lambda\$ 为对应最优解的、非负的正则化参数; \$I\$ 为单位矩阵。

4 数值模拟

在数值模拟中的简支梁桥采用的参数为:跨度 \$L = 30\$ m, 弯曲刚度 \$EI = 2.5 \times 10^{10}\$ N \$\cdot\$ m², 单位长度质量 \$A = 6.0 \times 10^3\$ kg/m, 各阶模态阻尼比 \$\xi = 0.02\$; 汽车的参数为:质量 \$m_v = 4.0 \times 10^3\$ kg, 阻尼 \$c_v = 1.0 \times 10^3\$ N \$\cdot\$ s/m, 刚度 \$k_v = 6.0 \times 10^5\$ N/m。

将简支梁桥划分为等长的 10 个单元,汽车以 20 m/s 的速度匀速通过桥梁,采样频率取 200 Hz,总的采样点数 \$N_i = 300\$,考虑桥上路面不平顺等级 A、B、C、D、E。用计算响应加入白噪声模拟被“污染”的测量响应,计算式为

$$v_m = v_c + E_p N_{\text{oise}} \sigma(v_c) \quad (15)$$

式中: \$v_m\$ 为模拟测量响应; \$v_c\$ 为计算响应; \$E_p\$ 为用百分数表示的噪声水平; \$N_{\text{oise}}\$ 为零均值、单位标准差符合标准正态分布的随机数列向量; \$\sigma(v_c)\$ 为计算响应的标准差。

识别精度用损伤因子的绝对误差 \$[AE]\$ 表示

$$[AE] = \sum_{j=1}^m \|(\alpha_j^1)_r - (\alpha_j^1)_i\| \quad (16)$$

式中: \$(\alpha_j^1)_r, (\alpha_j^1)_i\$ 分别为第 \$j\$ 个单元的真实损伤因子和识别损伤因子。

4.1 桥上路面的不平顺水平对识别结果的影响

假设只有单元 5、7 损失 10% 的刚度,即 \$\alpha_5^1 = \alpha_7^1 = 10\%\$,其余单元没有损伤。采用无噪声汽车加速度响应识别桥梁各单元的损伤因子,桥上路面的不平顺水平从 A 到 E 变化,表 1 给出了识别结果。

表1 不同桥上路面的不平顺水平下损伤因子的识别结果

| 不平顺水平 | 桥梁各单元的损伤因子/% | | | | | | | | | | [AE]/ | 迭代次数/次 |
|-------|--------------|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 单元1 | 单元2 | 单元3 | 单元4 | 单元5 | 单元6 | 单元7 | 单元8 | 单元9 | 单元10 | % | |
| A | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -10.00 | 0.00 | -10.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 35 |
| B | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -10.00 | 0.00 | -10.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 36 |
| C | -0.01 | 0.01 | 0.00 | -0.01 | -9.99 | -0.01 | -9.99 | -0.01 | 0.01 | -0.01 | 0.09 | 34 |
| D | -0.03 | 0.02 | -0.01 | -0.01 | -9.99 | -0.02 | -9.99 | -0.01 | -0.03 | 0.04 | 0.19 | 34 |
| E | -0.05 | 0.02 | -0.01 | -0.01 | -9.99 | -0.03 | -9.99 | -0.02 | 0.04 | -0.06 | 0.26 | 39 |

从表1可以看出,迭代次数几乎没有受到桥上路面的不平顺等级的影响,而识别误差随着桥上路面的不平顺的加剧而增加,最大的识别结果绝对误差为0.26%,对应最恶劣的路面;最小的则为0,对应最好的路面情况。这说明本文提出的桥梁损伤识别方法理论上是正确的,桥上路面的不平顺对识别结果的影响类似于随机噪声。另外,识别结果的误差主要来源于接近桥梁两端的第1、2、9、10单元。

4.2 汽车参数变化对识别结果的影响

假设桥梁的单元1损失5%的刚度,单元7、8损失10%的刚度,即 $\alpha_1^1 = 5\%$, $\alpha_7^1 = \alpha_8^1 = 10\%$ 。为了考察汽车参数变化对识别结果的影响,采用汽车与桥的质量比 θ_m 和第一阶频率比(代表刚度的变化) θ_f 控制汽车的参数变化。桥梁的参数保持不变,汽车的质量和刚度独立变化, θ_m 的取值范围为0.001~0.030, θ_f 的变化范围为0.5~4.0。由无噪声加速度识别各种工况下桥梁各单元的损伤因子,桥上路面的不平顺水平

取C,识别结果见表2、表3。

表2表明,识别结果的绝对误差和迭代次数随着质量比的增大而先增加后减小,即对应最好的识别结果存在着最优的质量比(约为0.015);表3中的结果同样表明,对应最好的识别结果存在着最优的频率比(约为2.5),在实际的应用中,对于给定的桥梁,可以选择比较合适的汽车进行桥梁损伤测试。

4.3 汽车速度和采样频率变化对识别结果的影响

假设桥梁的所有单元均损失5%的刚度,采样频率在100~1000 Hz变化,车速在5~35 m/s变化,桥上路面的不平顺水平取C。表4给出了计算得到的桥梁各单元损伤因子识别结果。

由表4可知,汽车速度和采样频率对识别结果的精度影响不大,而对计算时间的影响却十分明显,因为采样点数 N_s (方程的维数)与汽车速度和采样频率有着直接的关系。实际应用中,可以根据具体情况,选择合理的汽车速度、采样频率。

表2 不同汽车质量下损伤因子的识别结果

| θ_m | 桥梁各单元的损伤因子/% | | | | | | | | | | [AE]/ | 迭代次数/次 |
|------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| | 单元1 | 单元2 | 单元3 | 单元4 | 单元5 | 单元6 | 单元7 | 单元8 | 单元9 | 单元10 | % | |
| 0.001 | -4.69 | -0.14 | 0.08 | -0.05 | 0.05 | -0.07 | -9.95 | -10.04 | 0.03 | -0.02 | 0.84 | 21 |
| 0.005 | -4.84 | -0.06 | 0.04 | -0.02 | 0.01 | -0.01 | -10.00 | -10.00 | -0.01 | -0.01 | 0.32 | 18 |
| 0.010 | -4.95 | -0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | -10.00 | -10.00 | 0.02 | -0.13 | 0.22 | 13 |
| 0.015 | -5.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -10.00 | -10.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 13 |
| 0.020 | -4.96 | -0.02 | 0.00 | 0.01 | -0.02 | 0.02 | -10.01 | -9.99 | 0.01 | -0.04 | 0.13 | 15 |
| 0.025 | -4.99 | -0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -10.00 | -9.99 | -0.05 | 0.28 | 0.36 | 20 |
| 0.030 | -4.99 | -0.01 | -0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | -10.01 | -9.98 | -0.06 | 0.30 | 0.43 | 22 |

表3 不同汽车刚度下损伤因子的识别结果

| θ_f | 桥梁各单元的损伤因子/% | | | | | | | | | | [AE]/ | 迭代次数/次 |
|------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| | 单元1 | 单元2 | 单元3 | 单元4 | 单元5 | 单元6 | 单元7 | 单元8 | 单元9 | 单元10 | % | |
| 0.5 | -4.99 | -0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -5.01 | -9.99 | -0.05 | 0.26 | 0.34 | 11 |
| 1.0 | -4.88 | -0.01 | -0.02 | 0.01 | 0.01 | -0.02 | -4.97 | -10.05 | 0.14 | -0.36 | 0.87 | 10 |
| 1.5 | -4.77 | -0.09 | 0.04 | -0.02 | 0.02 | -0.01 | -4.99 | -10.00 | 0.01 | -0.02 | 0.45 | 10 |
| 2.0 | -4.92 | -0.03 | 0.02 | -0.01 | 0.00 | 0.01 | -5.01 | -9.99 | -0.01 | 0.04 | 0.22 | 14 |
| 2.5 | -4.99 | 0.00 | -0.01 | 0.02 | -0.02 | 0.02 | -5.02 | -9.98 | -0.02 | 0.04 | 0.18 | 9 |
| 3.0 | -4.71 | -0.11 | 0.03 | -0.01 | 0.02 | 0.01 | -4.97 | -10.02 | 0.02 | -0.03 | 0.57 | 11 |
| 3.5 | -4.65 | -0.14 | 0.07 | -0.05 | -0.04 | -0.01 | -4.94 | -10.10 | 0.01 | -0.02 | 0.85 | 13 |
| 4.0 | -4.51 | -0.16 | 0.07 | -0.06 | -0.04 | -0.02 | -4.92 | -10.12 | 0.11 | -0.15 | 1.30 | 13 |

表 4 不同车速和采样频率下的桥梁损伤因子识别结果

| 汽车速度 / (m · s ⁻¹) | 20 | 20 | 20 | 20 | 5 | 15 | 25 | 35 | |
|-------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 采样频率 / Hz | 100 | 200 | 500 | 1 000 | 100 | 100 | 100 | 100 | |
| 桥梁各单元的损伤因子 / % | 单元 1 | -5.00 | -4.99 | -4.99 | -4.87 | -4.90 | -5.00 | -5.01 | -5.01 |
| | 单元 2 | -10.00 | -10.01 | -9.99 | -10.05 | -10.03 | -10.00 | -10.00 | -10.00 |
| | 单元 3 | 0.00 | 0.01 | -0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | -0.01 | 0.00 |
| | 单元 4 | -10.00 | -10.01 | -9.97 | -10.00 | -10.01 | -10.00 | -9.99 | -10.00 |
| | 单元 5 | 0.00 | 0.00 | -0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -0.02 | -0.01 |
| | 单元 6 | -15.00 | -15.00 | -14.97 | 0.00 | 15.00 | -15.00 | -14.98 | -14.99 |
| | 单元 7 | 0.00 | 0.00 | -0.02 | 0.00 | -0.01 | 0.00 | -0.02 | -0.02 |
| | 单元 8 | -10.00 | -10.01 | -9.99 | -10.02 | -9.99 | -10.00 | -9.97 | -9.99 |
| | 单元 9 | 0.00 | 0.09 | 0.01 | 0.11 | -0.04 | 0.00 | -0.05 | -0.01 |
| | 单元 10 | 0.00 | -0.35 | -0.03 | -0.30 | 0.11 | 0.00 | 0.18 | 0.02 |
| [AE] / % | 0.00 | 0.49 | 0.21 | 0.63 | 0.33 | 0.00 | 0.35 | 0.09 | |
| 迭代次数 / 次 | 21 | 10 | 13 | 17 | 10 | 14 | 15 | 15 | |
| 计算时间 / s | 44.6 | 44.8 | 147.9 | 433.1 | 89.0 | 41.2 | 26.3 | 22.5 | |

4.4 不同噪声水平对识别结果的影响

假设桥梁对称地沿跨中发生损伤,单元 1、2、9、10 损失 5% 的刚度,单元 3、4、7、8 损失 10% 的刚度,中间的单元 5、6 损失 15% 的刚度,即 $\alpha_1^1 = \alpha_2^1 = \alpha_9^1 = \alpha_{10}^1 = 5\%$, $\alpha_3^1 = \alpha_4^1 = \alpha_7^1 = \alpha_8^1 = 10\%$, $\alpha_5^1 = \alpha_6^1 =$

15%, 桥上路面的不平顺水平取 C。表 5 给出了对应不同噪声水平情况下的桥梁各单元损伤因子识别结果;图 2 为无噪声响应情况下损伤因子随迭代次数的变化情况。

从表 5 可以看出,测试响应的噪声水平对迭代

表 5 不同噪声水平下的桥梁损伤因子识别结果

| 噪声水平 / % | 桥梁各单元的损伤因子 / % | | | | | | | | | | [AE] / % | 迭代次数 / 次 |
|----------|----------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|----------|----------|
| | 单元 1 | 单元 2 | 单元 3 | 单元 4 | 单元 5 | 单元 6 | 单元 7 | 单元 8 | 单元 9 | 单元 10 | | |
| 0 | -4.98 | -4.99 | -10.02 | -9.97 | -15.02 | -14.99 | -10.01 | -9.98 | -5.04 | -5.08 | 0.24 | 35 |
| 1 | -5.07 | -5.05 | -10.09 | -10.10 | -14.90 | -14.92 | -9.96 | -9.91 | -5.12 | -4.81 | 0.93 | 36 |
| 5 | -5.19 | -5.13 | -10.28 | -10.21 | -14.82 | -14.83 | -9.89 | -9.77 | -5.29 | -4.77 | 2.02 | 38 |
| 10 | -5.33 | -5.21 | -10.35 | -10.27 | -14.70 | -14.65 | -9.71 | -9.65 | -5.36 | -4.55 | 3.26 | 39 |

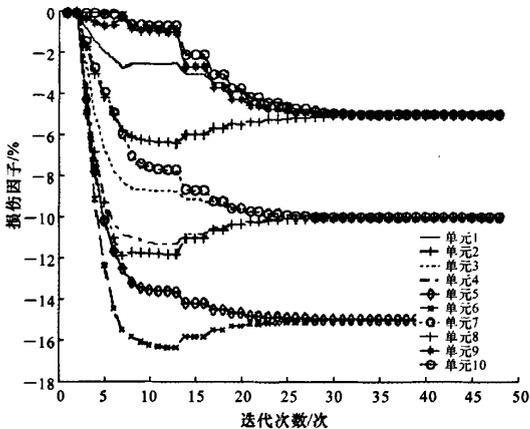


图 2 桥梁各单元的损伤因子随迭代次数的变化

次数影响不大,而识别结果的精度随着噪声水平的提高而增加,对应 10% 噪声水平的识别绝对误差为 3.26%,这样的结果在实际应用中是可以接受的。由图 2 也可看出,桥梁各单元的损伤因子都可以快速的收敛到真实值。

5 结 语

(1) 损伤识别的误差随着桥上路面的不平顺水平和测试噪声水平的提高而增加,但是识别结果对桥上路面的不平顺和测试噪声不是很敏感,不平顺对识别结果的影响类似于随机噪声。

(2) 汽车质量、刚度等参数对损伤识别精度有影响,存在最优的汽车桥梁质量比和频率比。

(3) 汽车行驶速度和采样频率对计算时间有显著的影响,而对识别精度影响不大。

(4) 对单个损伤与多个不同水平的损伤,本文方法都可以准确地识别出来。

(5) 数值模拟表明,本文提出的基于灵敏度分析的桥梁损伤识别方法理论上是正确的,识别结果是可信的。在实际的应用中,应该根据具体情况选择合理的汽车速度、采样频率以及测试的汽车。

(下转第 100 页)

拌装置的主要参数。其中,主叶片安装角、主副叶片排列关系、单轴搅拌臂相位和双轴搅拌臂排列是影响搅拌质量的首要参数。

(3)对目前普遍使用的双卧轴式搅拌机给出了各搅拌装置参数的合理取值范围和相互匹配关系,其研究成果对双排搅拌叶片在其他类型的强制式搅拌机应用也具有指导意义。

参考文献:

References:

- [1] Ferraris C F. Concrete mixing methods and concrete mixers: State of the art[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2001,106(2):391-399.
- [2] 冯忠绪,赵利军,姚运仕,等.搅拌机低效区及其消除方法[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(6):82-85. FENG Zhong-xu, ZHAO Li-jun, YAO Yun-shi, et al. Mixing inefficient zone of concrete mixer and its eliminating methods [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2005,25(6):82-85.
- [3] 冯忠绪,王卫中,赵利军,等.节约型搅拌技术研究[J].中国公路学报,2006,19(6):118-122. FENG Zhong-xu, WANG Wei-zhong, ZHAO Li-jun, et al. Research on saving mixing technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006,19(6):118-122.
- [4] 冯忠绪,赵利军,姚运仕.可消除搅拌低效区的搅拌装置的设计方法:中国,200310105952.1[P].2007-11-07.
- [5] 冯忠绪.混凝土搅拌理论与设备[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 赵利军,冯忠绪,姚运仕,等.搅拌机叶片安装角的确定方法[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(5):99-102. ZHAO Li-jun, FENG Zhong-xu, YAO Yun-shi, et al. Method for determining setting angle of mixer's blades [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2006,26(5):99-102.
- [7] 王卫中,冯忠绪.双卧轴搅拌机搅拌臂布置形式的研究[J].中国工程机械学报,2004,2(4):475-481. WANG Wei-zhong, FENG Zhong-xu. Research on mixing arms' arrangement of twin-shaft mixer[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2004,2(4):475-481.
- [8] 赵利军,冯忠绪.双卧轴搅拌机叶片排列的试验[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(2):94-96. ZHAO Li-jun, FENG Zhong-xu. Test of blades arrangement for twin shaft mixer [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2):94-96.
- [9] 冯忠绪,王卫中,姚运仕,等.搅拌机合理转速研究[J].中国公路学报,2006,19(2):116-120. FENG Zhong-xu, WANG Wei-zhong, YAO Yun-shi, et al. Study of mixer rational rotation speed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006,19(2):116-120.
- [10] Yang Y B, Lin C W, Yau J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272(6):471-493.
- [11] Honda H, Kajikawa Y, Kobori T. Spectra of road surface roughness on bridges [J]. Journal of the Structural Division,1982,(3):1956-1966.
- [12] 卜建清,娄国充,罗韶湘.汽车对桥梁冲击作用分析[J].振动与冲击,2007,(1):52-55. BU Jian-qing, LOU Guo-chong, LUO Shao-xiang. Analysis on impact effects of bridge due to moving vehicle [J]. Journal of Vibration and Shock,2007,(1):52-55.
- [13] Law S S, Chan T H T, Zhu X Q, et al. Regularization in moving force identification [J]. Journal of Engineering Mechanics,2001,127(2):136-148.
- [14] Zhu X Q, Law S S. Moving loads identification through regularization[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002,128(9):1011-1025.

(上接第67页)

参考文献:

References:

- [1] 王春生,陈惟珍,陈艾荣.桥梁损伤安全评定与维护管理策略[J].交通运输工程学报,2002,2(4):21-28. WANG Chun-sheng, CHEN Wei-zhen, CHEN Ai-rong. Damage safety assessment and maintenance management strategy of bridges [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2002,2(4):21-28.
- [2] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. The Shock and Vibration Digest,1998, 30 (2): 91-105.
- [3] Cattarius J, Inman D J. Time domain analysis for damage detection in smart structures [J]. Mechanical System and Signal Processing,1997,11(3):409-423.
- [4] Li X L, Haldar A. Element level system identification with unknown input with Rayleigh damping [J]. Journal