

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.01.013

基于车桥耦合振动的等截面连续梁桥多损伤识别研究

束晓宇¹, 李雪峰¹, 王成玉²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学设计院(集团)有限公司, 安徽 合肥 230051)

摘要:文章选用 1/4 车辆模型,用单元刚度的减少模拟裂缝损伤,对等截面连续梁桥进行损伤识别研究。利用 MATLAB 中的 Cftool 模块拟合离散的振型数据得到振型函数,再利用 MATLAB 模拟车辆匀速驶过桥梁的过程,求解车桥耦合振动方程,可得车辆与桥梁特殊位置的响应。研究表明:通过车体竖向速度响应比无损时增大的位置可以识别桥梁的损伤跨;根据车辆行驶到损伤跨时对应的该跨跨中竖向位移响应与无损时存在偏差的位置,可以识别桥梁存在损伤的范围;通过偏差的大小可以判断损伤的大小。

关键词:等截面;连续梁桥;车桥耦合;多损伤;损伤识别

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)01-0081-08

Research on multi-damage identification of continuous beam bridge with constant cross-section based on vehicle-bridge coupling vibration

SHU Xiaoyu¹, LI Xuefeng¹, WANG Chengyu²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Hefei University of Technology Design Institute(Group) Co., Ltd., Hefei 230051, China)

Abstract: By selecting a quarter vehicle model, bridge crack damage was simulated with the reduction of unit stiffness, aiming at the identification of multiple damages of continuous beam bridge with constant cross-equal section. The vibration mode function was obtained by fitting the discrete vibration mode data of the bridge through the Cftool module in the MATLAB software. Then the MATLAB software was used to simulate the process of the vehicle traveling through the bridge at a constant speed, and the equation of the vehicle-bridge coupling vibration was solved. Finally, the vibration response of vehicle and bridge at special positions was calculated. The results show that the damaged span of the bridge can be identified according to the position where the vertical speed response of the vehicle body increases compared with non-damage conditions; the range of damage can be identified according to the position where the vertical displacement response in the middle of the damaged span deviates from that without damage when the vehicle travels to the damaged span; the size of the damage can be identified according to the size of the deviation.

Key words: constant cross-section; continuous beam bridge; vehicle-bridge coupling; multi-damage; damage identification

对于车桥耦合振动的桥梁损伤识别问题,国内外有许多学者进行了大量的研究,大部分是以车桥耦合振动系统为基础,通过对车辆以及桥梁

结构的振动响应的研究分析,从而实现对桥梁结构损伤的识别。文献[1]列出了假设损伤的结构刚度会发生变化,车辆过桥时对结构的振动产生

收稿日期:2021-08-18;修回日期:2021-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878234)

作者简介:束晓宇(1996—),男,安徽合肥人,合肥工业大学硕士生;

李雪峰(1980—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:hfutlxf@163.com.

的影响以识别结构损伤的方法;文献[2]研究了车辆参数的选择对简支梁桥的振动响应的影响,并考虑了路面不平顺因素的影响;文献[3]假设损伤桥梁结构参数发生变化,通过车辆行驶过桥梁时,车辆的振动响应识别桥梁结构参数的变化;文献[4]以简支梁受移动荷载作用时的跨中加速度响应为原始信号,用经验模态分解的方法对桥梁的多处损伤进行识别,且降低了损伤识别中噪音的影响;文献[5]以车辆引起桥梁产生的振动响应为基础,用聚类分析法对桥梁结构的损伤进行识别;文献[6]基于车桥耦合振动分析的基本理论,通过静力实验得出的数据来实现对公路桥梁的损伤识别;文献[7]以简支梁桥为研究对象,在车桥耦合动力响应的基础上,利用 EMD 分解和 Hilbert 谱分析的方法,实现对桥梁结构的损伤识别;文献[8]在考虑了路面不平整因素的基础上,建立车桥耦合有限元模型,计算出车辆的振动响应,利用遗传算法对桥梁结构不同类型的损伤进行识别。

与大部分研究不同,本文的损伤识别方法只需要在车辆和桥梁的某些特殊位置布置传感器,基本不影响桥梁的正常运营,检测方法简单且节约成本,是对车桥耦合振动原始信号的研究,无须进行信号处理。

1 车桥耦合振动方程建立

1.1 车辆振动方程

1/4 车辆模型如图 1 所示。

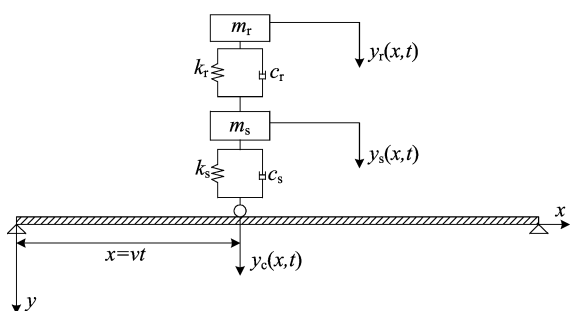


图 1 1/4 车辆模型

图 1 中: m_r 为车体的质量; $y_r(x,t)$ 为车体自身的竖向位移; k_r 、 c_r 分别为连接车体与悬架系统之间弹簧的刚度和阻尼系数; m_s 为车辆悬架和车轮的总质量; $y_s(x,t)$ 为车辆悬架车轮系统的竖向位移; k_s 、 c_s 分别为车辆悬架车轮系统弹簧的刚度和阻尼系数; $y_c(x,t)$ 为桥梁在与车辆轮胎接触点的竖向位移。

根据达朗贝尔原理分别对车体和悬架车轮系

统进行分析,可以分别得出两者的振动平衡方程,具体如下。

对于车体,有

$$m_r \ddot{y}_r + c_r (\dot{y}_r - \dot{y}_s) + k_r (y_r - y_s) = 0 \quad (1)$$

对于悬架车轮系统,有

$$m_s \ddot{y}_s + c_s (\dot{y}_s - \dot{y}_c) + k_s (y_s - y_c) - c_r (\dot{y}_r - \dot{y}_s) - k_r (y_r - y_s) = 0 \quad (2)$$

将以上 2 个方程转化为矩阵形式:

$$\mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{Y}}_r + \mathbf{C}_r \dot{\mathbf{Y}}_r + \mathbf{K}_r \mathbf{Y}_r = \mathbf{F}_r \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{Y}_r = \begin{bmatrix} y_r \\ y_s \end{bmatrix}; \mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} m_r & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix}; \mathbf{C}_r = \begin{bmatrix} c_r & -c_r \\ -c_r & c_r + c_s \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_r = \begin{bmatrix} k_r & -k_r \\ -k_r & k_r + k_s \end{bmatrix}; \mathbf{F}_r = \begin{bmatrix} 0 \\ c_s \dot{y}_c + k_s y_c \end{bmatrix}。$$

1.2 路面不平度

本文以 GB 7031—2005 功率谱为基础,采用三角级数叠加法中的正弦波叠加法进行路面不平度的模拟。

GB 7031—2005 功率谱路面不平度功率谱表达式为:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left| \frac{n}{n_0} \right|^{-\omega} \quad (4)$$

其中: n 为有效频率带中的空间频率; n_0 为空间参考频率值,取值为 0.1 m^{-1} ; $G_q(n_0)$ 为当空间频率值为 n_0 时的路面功率谱密度; ω 为频率指数,一般情况下 $\omega=2$ 。

假设车辆匀速行驶速度为 v ,根据 $f=vn$ 将空间频率 n 转化为时间频率 f ,得到关于时间频率的功率谱密度函数为:

$$G_q(f) = \frac{G_q(n)}{v} = G_q(n_0) n_0^2 \frac{v}{f^2} \quad (5)$$

假定频率区间为 (f_1, f_2) ,将整个区间划分为 N 个小区间,每个小区间段上的功率谱值近似为该小区间段中心频率的功率谱密度函数,可得各小区间段的功率谱函数为:

$$\gamma = G_q(f_{\text{mid}-i}) \Delta f_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

其中: Δf_i 为第 i 个小区间段间隔的频率; $G_q(f_{\text{mid}-i})$ 为第 i 个小区间段中心频率 $f_{\text{mid}-i}$ 所对应的功率谱密度函数。

已知振幅与功率谱之间的关系为 $A=\sqrt{\gamma}$,将各个小区间段的正弦波函数进行叠加即为整个区间段对应时间范围内的随机路面位移函数,具体公式如下:

$$r(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{G_q(f_{\text{mid}-i}) \Delta f_i} \sin(2\pi f_{\text{mid}-i} t + \varphi_i),$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (7)$$

其中, $\varphi \in [0, 2\pi]$ 为正弦波函数的相位差。

假设车辆匀速沿桥面方向行驶的路程为 x , 则 $x = vt$, 再由 $f = vm$ 可得路面不平度关于路程坐标 x 的函数为:

$$r(x) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(2\pi n_{\text{mid}-i} x + \varphi_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (8)$$

1.3 桥梁模型的建立

本文将桥梁截面简化为面积相等的矩形, 将钢筋等效成混凝土, 考虑梁体受到均布竖向外力 $f(x, t)$ 以及轴向力。

根据文献[9]对连续梁单元体进行受力分析, 如图 2 所示。

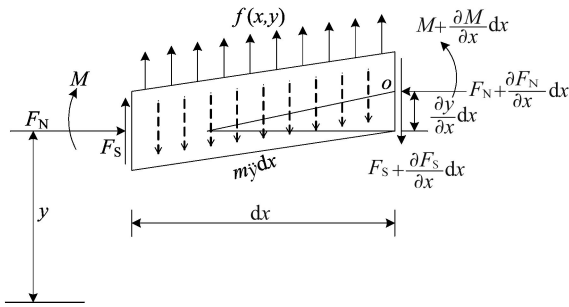


图 2 梁单元体的计算模型

图 2 中: m 为单元体的质量; y 为单元体的竖向位移, $\ddot{y} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$; F_N 为单元体的轴向压力; F_S 为单元体截面处的剪力; M 为截面处的弯矩; $f(x, t)$ 为车辆行驶在桥梁上时对桥梁产生的作用力; $\frac{\partial y}{\partial x}$ 为单元体的角位移。

对单元体进行受力分析, 由竖直方向受力平衡可得:

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = f(x, t) + \frac{\partial F_S}{\partial x} \quad (9)$$

将单元体对图 2 中 o 点取矩, 可得 $M_o = 0$, 计算整理得:

$$\frac{\partial M}{\partial x} + F_N \frac{\partial y}{\partial x} = F_S \quad (10)$$

假设梁上的荷载沿 x 方向的位移为 $u(x, t)$, 沿 y 方向的位移为 $v(x, t)$, 根据欧拉伯努利梁的理论可得:

$$u(x, z, t) = u_0(x, t) - z \frac{\partial v_0(x, t)}{\partial x} \quad (11)$$

$$v(x, z, t) = v_0(x, t) \quad (12)$$

其中: $u_0(x, t)$ 为中性轴上任一点的轴向位移;

$v_0(x, t)$ 为中性轴上任一点的横向位移; z 为梁截面上任一点与中性轴之间的距离; t 为时间。

由大横向位移、小应变效应可得梁应变与位移之间的几何非线性关系为:

$$\xi_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - z \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (13)$$

轴向位移 $u_0(x, t)$ 对梁的影响通常可以忽略, 则可得梁的应变为:

$$\xi_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - z \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (14)$$

$$\dot{\xi}_x = \frac{\partial \xi_x}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} - z \frac{\partial^3 v}{\partial^2 x \partial t} = \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} - z \frac{\partial^2 \dot{v}}{\partial x^2} \quad (15)$$

由 Kelvin-Voigt 模型^[10] 可得应力与应变之间的本构关系为:

$$\sigma_x = E(\xi + \eta \dot{\xi}) \quad (16)$$

其中: σ_x 为应力; η 为桥梁材料的阻尼。

将(14)式、(15)式同时代入(16)式, 可得:

$$\sigma_x = E \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - z \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right] + E\eta \left(\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} - z \frac{\partial^2 \dot{v}}{\partial x^2} \right) \quad (17)$$

根据弯矩与应力之间的关系, 有

$$M = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x z dx = -EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \eta EI \frac{\partial^2 \dot{y}}{\partial x^2} \quad (18)$$

其中, b, h 分别为梁截面的宽度和高度。

根据轴力与应力之间的关系, 有

$$F_N = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz = \frac{1}{2} EA \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 + \eta EA \left(\frac{\partial y}{\partial x} \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} \right) - P \quad (19)$$

其中, P 为预应力产生的轴力。

将(18)式、(19)式同时代入(10)式, 再将结果代入(9)式, 可得:

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \eta EI \frac{\partial^4 \dot{y}}{\partial x^4} - \frac{3}{2} EA \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - 2\eta EA \frac{\partial y}{\partial x} \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \eta EA \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 \dot{y}}{\partial x^2} + P \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = f(x, t) \quad (20)$$

车辆行驶在桥梁上时, 对桥梁产生的作用力主要有: 车辆整体的自重产生的荷载, 在车辆模型中简化为车体的自重和车辆悬架车轮系统的自重; 车辆在行驶过程中车轮会发生变形引起的弹性力和阻尼力。在建立桥梁振动平衡方程时, 还

需考虑桥面不平整因素的影响,模拟的桥面不平整函数为 $r(x)$,则可得车辆在桥上行驶时对桥的作用力 $Q(t)$ 为:

$$Q(t) = (m_r + m_s)g - k_s[y_s - y_c - r(x)] - c_s[\dot{y}_s - \dot{y}_c - \dot{r}(x)] \quad (21)$$

$$f(x, t) = -\delta(x - vt)Q(t) \quad (22)$$

其中: δ 为 Dirac 函数,运用振型分解的方法对桥梁的非线性振动方程(20)式进行求解,设 $\varphi(x)_i$ 、 $\lambda(t)_i$ 分别为等截面连续梁的第 i 阶的模态函数和模态坐标,则可将 $y(x, t)$ 分解为:

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi(x)_i \lambda(t)_i \quad (23)$$

设桥梁全长为 L ,将(23)式代入(20)式,同时将方程两边乘以 $\varphi(x)_n$,对方程在整个等截面连续梁桥进行积分,代入(21)式、(22)式,并运用伽辽金法^[11]进行化简,由于结果较为复杂,为了简化,可记为:

$$\beta_{1,n} = m \int_0^L \varphi(x)_n^2 dx \quad (24)$$

$$\beta_{2,n} = EI \int_0^L \varphi^{(4)}(x)_n \varphi(x)_n dx \quad (25)$$

$$\beta_{3,n} = \int_0^L \varphi''(x)_n \varphi(x)_n dx \quad (26)$$

$$\beta_{4,n} = EA \int_0^L [\varphi'(x)_n]^2 \varphi''(x)_n \varphi(x)_n dx \quad (27)$$

则结果为:

$$\begin{aligned} & \beta_{1,n} \ddot{\lambda}(t)_n + \eta \beta_{2,n} \dot{\lambda}(t)_n + (\beta_{2,n} + P\beta_{3,n}) \lambda(t)_n - \\ & \frac{3}{2} \beta_{4,n} \lambda(t)_n^3 - 3\eta \beta_{4,n} \lambda(t)_n^2 \dot{\lambda}(t)_n - \\ & k_s \varphi(x)_n \sum_{i=0}^{\infty} \varphi(x)_i \lambda(t)_i - c_s \varphi(x)_n \sum_{i=0}^{\infty} \varphi(x)_i \dot{\lambda}(t)_i + \\ & k_s \varphi(x)_n [y_s - r(x)] + c_s \varphi(x)_n [\dot{y}_s - \dot{r}(x)] = \\ & (m_r + m_s) g \varphi(x)_n \end{aligned} \quad (28)$$

(28)式即为计算得到的桥梁每阶自振频率适用的非线性振动方程,该方程比较复杂,需要将方程组进行降阶后再计算。

1.3 车桥耦合方程的建立及求解

本文已建立了移动车辆模型和桥梁非线性模型,将车辆和桥梁的振动相结合即可得相应的车桥耦合方程。

车桥耦合振动方程为:

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}(t) \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}(t) \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}(t) \mathbf{X} + \\ & \mathbf{S}(t) \mathbf{X}^3 + \mathbf{D}(t) \dot{\mathbf{X}} \mathbf{X}^2 = \mathbf{F}(t) \end{aligned} \quad (29)$$

其中: $\mathbf{M}(t)$ 为广义质量矩阵; $\mathbf{C}(t)$ 为广义阻尼矩阵; $\mathbf{K}(t)$ 为广义刚度矩阵; $\mathbf{S}(t)$ 、 $\mathbf{D}(t)$ 为由非线性因素引起的相关矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 为外力作用的向量; \mathbf{X} 为广义位移向量。

为得到车桥耦合振动系统的振动响应,对运动方程进行求解常用数值方法,本文选用 Newmark- β 法对车桥耦合方程进行求解。

2 连续梁桥的多损伤识别研究

桥梁存在多处损伤时,每处的损伤均会对桥梁本身的振动响应产生影响,在桥梁同一个位置处的影响可能会出现叠加或消除的作用,仅根据桥梁本身的振动响应规律可能很难识别出桥梁损伤情况,因此加入车体竖向速度响应分析来辅助识别。

损伤识别流程和准则为:先根据车体竖向速度响应判断损伤跨,与无损相比出现增大现象的跨段为损伤跨;再根据损伤跨的跨中竖向位移响应与无损时的偏差判断损伤位置,偏差最大处近似为损伤位置;最后根据车体竖向速度响应或跨中竖向位移响应偏差的大小判断损伤的大小。

本文选用(20+25+20) m 的等截面连续梁桥为研究对象,使用 C50 混凝土,其密度 $\rho = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 3.45 \times 10^{10} \text{ Pa}$,惯性矩 $I = 1.2801 \text{ m}^4$,混凝土材料的阻尼比为 0.02。

车辆模型的参数为: $m_r = 3.85 \times 10^4 \text{ kg}$, $c_r = 3.82 \times 10^5 \text{ kg/s}$, $k_r = 5.07 \times 10^6 \text{ N/m}$, $m_s = 8.66 \times 10^3 \text{ kg}$, $k_s = 8.56 \times 10^6 \text{ N/m}$, $c_s = 1.96 \times 10^5 \text{ kg/s}$ 。

2.1 第 1 跨和中跨跨中损伤分析

假设第 1 跨和中跨的跨中出现同程度的损伤,损伤程度分别为刚度折减 30%、50%,车辆以 36 km/h 的速度匀速驶过桥梁,先计算出车辆驶过损伤桥梁时的车体竖向速度响应,与驶过无损桥梁时的响应对比,结果如图 3 所示。

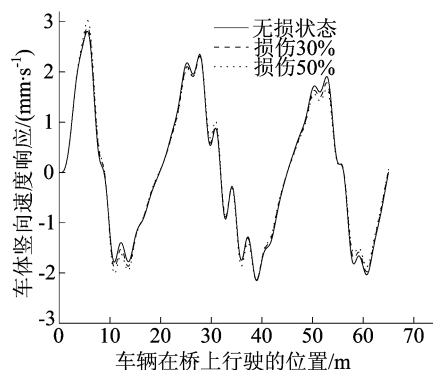


图 3 第 1 跨和中跨跨中损伤时车体竖向速度响应

由图 3 可知,当车辆行驶到损伤桥梁的第 1 跨和中跨时,会出现车体竖向速度响应比无损状态时大的位置;车辆行驶到损伤桥梁的第 3 跨时,大部

分位置的车体竖向速度响应比无损状态时要小,且偏差较大;在桥梁的第1跨损伤分别为30%、50%时,车辆分别行驶到桥梁6.7、6.4 m处车体竖向速度响应与无损状态时偏差最大,分别为0.127 43、0.253 77 mm/s;在桥梁的中跨损伤分别为30%、50%时,车辆分别行驶到桥梁29.9、30.0 m处车体竖向速度响应与无损状态时偏差最大,分别为0.046 88、0.150 35 mm/s。

由以上现象可知桥梁的第1跨和中跨存在损伤,第3跨不存在损伤,但损伤的具体范围难以判断。再计算连续梁桥每一跨跨中竖向位移响应,分别与对应的无损状态时对比,结果如图4所示。

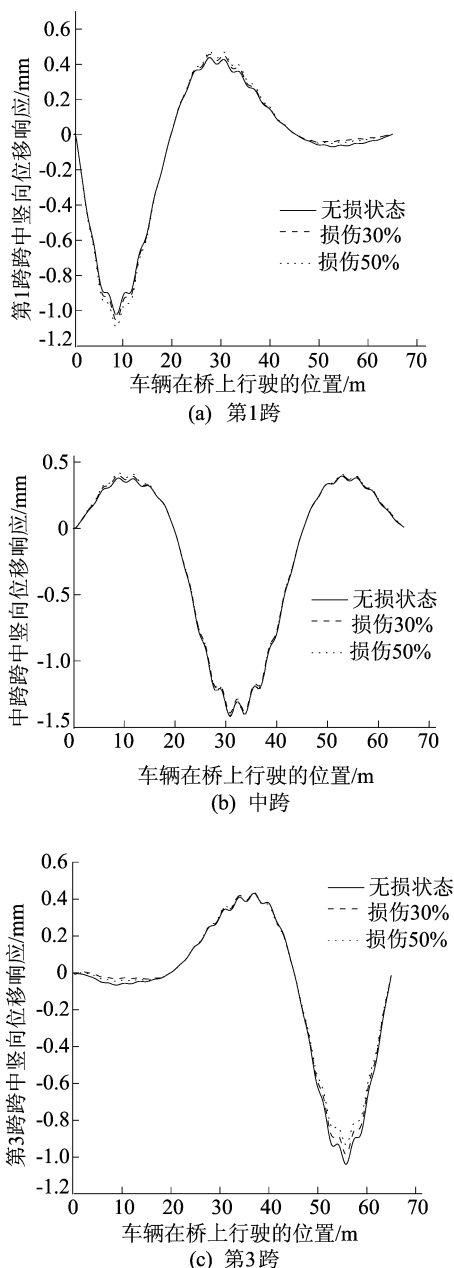


图4 第1跨和中跨跨中损伤时各跨跨中竖向位移响应

由图4可知,车辆行驶到损伤桥梁的第1跨和中跨跨中时,分别对应的该跨跨中竖向位移响应与无损状态相比有偏差,偏差较小;当车辆行驶到第3跨时,随着损伤程度的增加,第3跨跨中竖向位移响应与无损状态相比越来越小,偏差较大。由图4a可知,损伤分别为30%、50%时,车辆分别行驶到桥梁的9.0、8.7 m处第1跨跨中位移响应与无损状态相比偏差最大,分别为0.035 88、0.074 26 mm,可判断出桥梁第1跨的损伤位置位于偏差范围内。由图4b可知,损伤分别为30%、50%时,车辆分别行驶到桥梁的27.8、26.7 m处中跨跨中位移响应与无损状态相比偏差最大,分别为0.031 27、0.028 42 mm,可判断出桥梁中跨的损伤位置位于偏差范围内。

由以上分析可判断出桥梁第1跨和中跨损伤位置存在的范围,桥梁的损伤程度可根据车辆行驶到无损的第3跨时,车体竖向速度响应或第3跨跨中竖向位移响应与相应无损状态的偏差判断。

2.2 第1跨和第3跨跨中损伤分析

假设第1跨和第3跨的跨中出现同等程度的损伤,损伤程度仍然分别为刚度折减30%、50%,车辆仍然以36 km/h的速度匀速驶过桥梁,先计算出车辆驶过损伤桥梁时的车体竖向速度响应,与车辆驶过无损桥梁时的车体竖向速度响应对比,结果如图5所示。

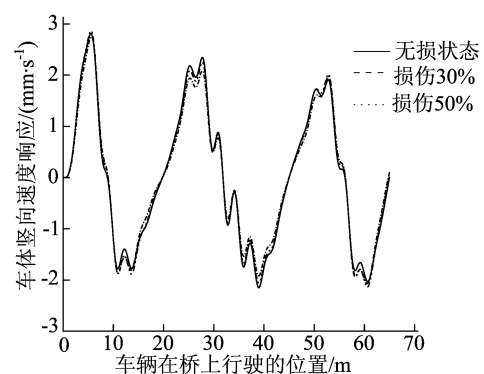


图5 第1跨和第3跨跨中损伤时车体竖向速度响应

由图5可知,车辆行驶到损伤桥梁第1跨和第3跨时,会出现车体竖向速度响应比无损状态时大的位置;车辆行驶到损伤桥梁的中跨时,大部分位置的车体竖向速度响应比无损状态时要小,且偏差较大;在桥梁第1跨损伤分别为30%、50%时,车辆分别行驶到桥梁12.7、7.7 m处车体竖向速度响应与无损状态时偏差最大,分别为

0.126 89、0.163 89 mm/s;在桥梁第 3 跨损伤分别为 30%、50%时,车辆分别行驶到桥梁 59.2、54.6 m 处车体竖向速度响应与无损状态时偏差最大,分别为 0.141 65、0.159 96 mm/s。

由以上现象可以判断出桥梁的第 1 跨和第 3 跨存在损伤,中跨不存在损伤。再计算连续桥梁每一跨跨中竖向位移响应,分别与对应的无损状态时对比,结果如图 6 所示。

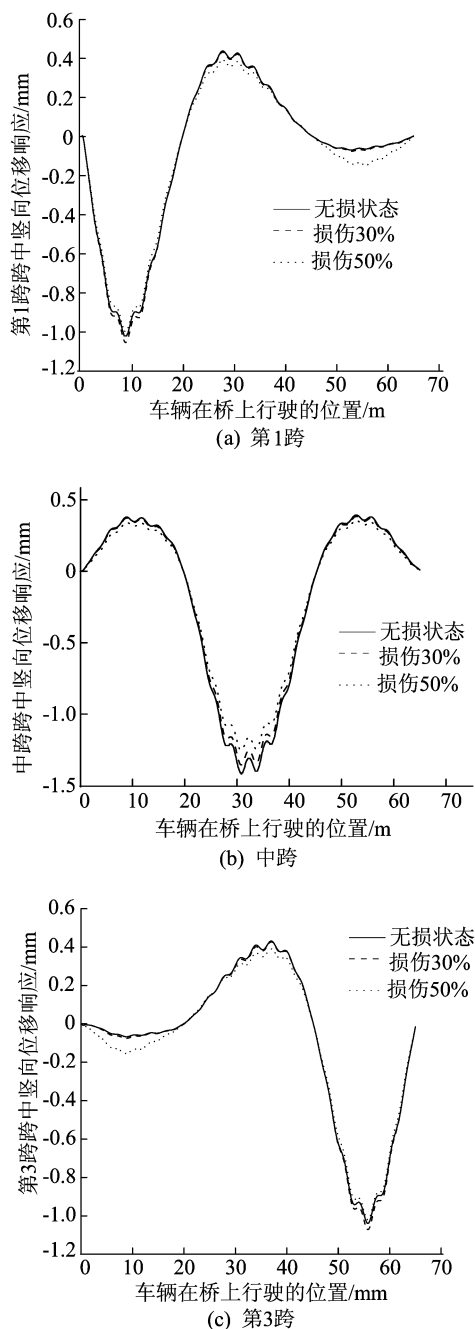


图 6 第 1 跨和第 3 跨跨中损伤时各跨跨中竖向位移响应

由图 6 可知,车辆行驶到损伤桥梁的第 1 跨和第 3 跨时,分别对应的该跨跨中竖向位移响应

与无损状态存在偏差的位置范围较大;当车辆行驶到损伤桥梁的中跨时,随着损伤程度的增加,中跨跨中竖向位移响应比无损状态时越来越小。

由图 6a 可知,损伤分别为 30%、50%时,车辆分别行驶到桥梁的 9.0、14.8 m 处第 1 跨跨中位移响应与无损状态相比偏差最大,分别为 0.033 86、0.039 55 mm,由此可判断出桥梁第 1 跨的损伤位置位于偏差范围内。

由图 6c 可知,损伤分别为 30%、50%时,车辆分别行驶到桥梁的 55.9、49.8 m 处第 3 跨跨中位移响应与无损状态相比偏差最大,分别为 0.032 55、0.037 89 mm,由此可判断出桥梁第 3 跨的损伤位置位于偏差范围内。

由以上分析可以判断出桥梁第 1 跨和第 3 跨跨中损伤位置存在的范围,桥梁损伤程度可根据车辆行驶到无损的中跨时,车体竖向速度响应或中跨跨中竖向位移响应与相应无损状态的偏差判断。

2.3 第 1 跨 3/5 处和中跨跨中损伤分析

假设桥梁的第 1 跨的 3/5 位置处和中跨跨中同时出现相同程度的损伤,损伤程度分别为刚度拆减 30%、50%,车辆的速度为 36 km/h,计算车辆驶过损伤桥梁时的车体竖向速度响应,与车辆驶过无损桥梁时的车体竖向速度响应进行对比,结果如图 7 所示。

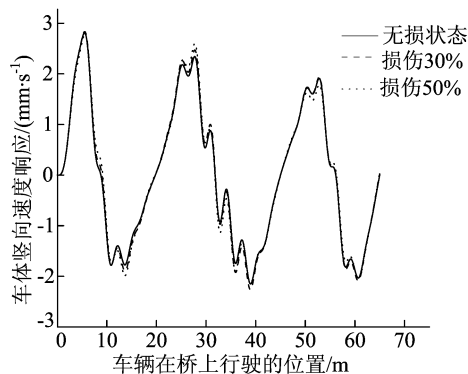


图 7 第 1 跨 3/5 处和中跨跨中损伤时车体竖向速度响应

从图 7 可以看出,当车辆行驶到损伤桥梁的第 1 跨和中跨时,会出现车体竖向速度响应比无损状态时大的位置,且第 1 跨的偏差较小,中跨的偏差较大;车辆行驶到损伤桥梁的第 3 跨时,会出现车体竖向速度响应比无损状态时小的位置,偏差较小;在桥梁第 1 跨损伤分别为 30%、50%时,车辆分别行驶到桥梁的 14.0、13.8 m 处车体竖向速度响应与无损状态时偏差最大,分别为

0.122 58、0.211 95 mm/s;在桥梁中跨损伤分别为 30%、50%时,车辆分别行驶到桥梁的 36.0、28.0 m处车体竖向速度响应与无损状态时偏差最大,分别为 0.177 56、0.259 81 mm/s。

由以上分析可以判断出桥梁的第 1 跨 3/5 处和中跨存在损伤,第 3 跨不存在损伤。计算连续梁桥每一跨跨中竖向位移响应,分别与对应的无损状态时对比,结果如图 8 所示。

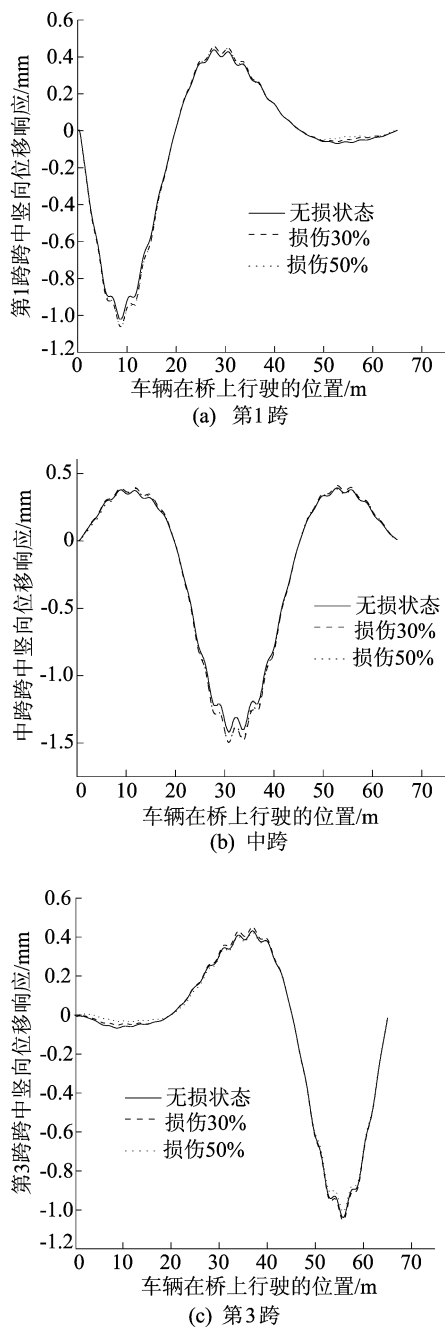


图 8 第 1 跨 3/5 处和中跨跨中损伤时各跨跨中竖向位移响应

从图 8 可以看出,当车辆行驶到桥梁的第 1 跨和中跨时,分别对应的该跨跨中竖向位移

响应比无损状态时大,且第 1 跨的偏差较小,中跨的偏差较大;当车辆行驶到第 3 跨时,第 3 跨跨中竖向位移响应比无损状态时小,且偏差较小。

由图 8a 可知,损伤分别为 30%、50%时,车辆均行驶到桥梁的 11.6 m 处第 1 跨跨中位移响应与无损状态相比偏差最大,分别为 0.040 72、0.051 08 mm,可判断出桥梁第 1 跨的损伤位置位于偏差范围内。

由图 8b 可知,损伤分别为 30%、50%时,车辆均行驶到桥梁的 30.7 m 处中跨跨中位移响应与无损状态相比偏差最大,分别为 0.083 55、0.081 87 mm,可判断出桥梁中跨的损伤位置位于偏差范围内。

由以上分析可以判断出桥梁第 1 跨 3/5 处和中跨跨中损伤位置存在的范围,桥梁损伤程度可根据车辆行驶到无损伤的第 3 跨时,车体竖向速度响应或第 3 跨跨中竖向位移响应与相应无损状态的偏差判断。

3 结 论

(1) 根据车辆分别驶过损伤桥梁与无损桥梁时的车体竖向速度响应,可以判断出损伤跨以及车辆行驶过损伤跨时出现车体竖向速度响应增大的位置。

(2) 对比损伤桥梁与无损状态对应的每一跨跨中竖向位移响应,通过偏差的位置可判断出桥梁损伤的范围。

(3) 根据车体竖向速度响应或每一跨的跨中竖向位移响应与对应无损状态的偏差程度可判断桥梁的损伤程度。

(4) 本文的损伤识别方法有一定的误差,虽无法做到准确识别损伤位置和定量识别损伤的程度,但具有一定的精度,可用于定性的判断。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] KAWATANI M, KOBAYASHI Y, TAKAMORI K. Nonstationary random analysis with coupling vibration of bending and torsion of simple girder bridges under moving vehicles [J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1997, 1997(570): 231-238.
- [3] 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.

(下转第 103 页)

- 2274-2280.
- [3] 赵龙飞. 交通荷载作用下埋地管道变形特性研究[D]. 郑州:郑州大学,2017.
- [4] 杨辉,王婷,雷铮强,等. 管土接触作用下埋地管道力学分析[J]. 石油矿场机械,2015,44(7):44-47.
- [5] 肖成志,王嘉勇,杨爱克. 静载作用下埋地管道数值模拟及其力学性能分析[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(1):22-29,167.
- [6] ONATE E,ROJEK J. Combination of discrete element and finite element methods for dynamic analysis of geomechanics problems[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering,2004,193(27/28/29):3087-3128.
- [7] 张华,陆阳. 基于有限差分与离散元耦合的支挡结构数值计算方法[J]. 岩土工程学报,2009,31(9):1402-1407.
- [8] 倪小东,朱春明,王媛. 基于三维离散-连续耦合方法的堤防工程渗透变形数值模拟方法[J]. 土木工程学报,2015,48(增刊1):159-165.
- [9] 叶成银,龚维明,周马生,等. 沉桩过程三维离散-连续耦合数值模拟分析研究[J]. 公路,2019,64(4):61-67.
- [10] 谭鑫,胡政博,冯龙健. 软土中碎石桩模型试验的三维离散-连续介质耦合数值模拟[J]. 岩土工程学报,2021,43(2):347-355.
- [11] YIN Z Y,WANG P,ZHANG F. Effect of particle shape on the progressive failure of shield tunnel face in granular soils by coupled FDM-DEM method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2020,100:103394.
- [12] 傅金阳,谢佳伟,房雅楠,等. EPB 盾构开挖面稳定性的 PFC-FLAC 耦合分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(5):116-121.
- [13] MICHAEL M,VOGEL F,PETERS B. DEM-FEM coupling simulations of the interactions between a tire tread and granular terrain[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2015,289:227-248.
- [14] GUO N,ZHAO J. A coupled FEM/DEM approach for hierarchical multiscale modelling of granular media[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering,2014,99(11):789-818.
- [15] 肖成志,王嘉勇,何晨曦. 静/动载作用下埋地管道力学性能的试验分析[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(3):747-754.
- [16] 常明丰,盛燕萍,牛晓博,等. 沥青混合料颗粒间接触力链及位移场细观分析[J]. 材料导报,2015,29(20):153-156.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 87 页)

- [4] MEREDITH J,GONZALEZ A,HESTER D. Empirical mode decomposition of the acceleration response of a prismatic beam subject to a moving load to identify multiple damage locations[J]. Shock and Vibration,2012,19(5):845-856.
- [5] 单德山,李乔. 基于车致振动的桥梁损伤识别[J]. 西南交通大学学报,2009,44(1):60-65.
- [6] 邑强. 基于车桥耦合振动分析的公路桥梁损伤识别方法研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [7] 鞠炳照. 基于车桥耦合振动的混凝土简支梁桥损伤诊断方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [8] 毛云霄,王英杰,肖军华,等. 基于过桥车辆响应的遗传算法桥梁损伤识别[J]. 振动测试与诊断,2018,38(4):696-703.
- [9] 盛宏玉. 结构动力学[M]. 2 版. 合肥:合肥工业大学出版社,2007:211-212.
- [10] SIMSEK M,KOCATURK T. Nonlinear dynamic analysis of an eccentrically prestressed damped beam under a concentrated moving harmonic load[J]. Journal of Sound and Vibration,2008,320(1):235-253.
- [11] 肖勇刚,罗素红. 车桥耦合系统的非线性动力分析[J]. 振动与冲击,2007,26(8):104-108.

(责任编辑 闫杏丽)