

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.01.014

车辆参数对车-桥耦合系统 变截面连续梁桥损伤识别的影响

黄鹏飞¹, 李雪峰¹, 茆尚权²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中建四局第六建设有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要:文章研究车-桥耦合系统的非线性振动特性,采用有限分段思想,建立 1/4 车辆模型和变截面连续梁桥的车-桥耦合振动方程,在 MATLAB 环境下编制基于 Runge-Kutta 算法的车-桥耦合振动数值分析程序,得到桥梁跨中位移响应;以某三跨混凝土连续梁桥为算例,分析车桥质量比、车辆速度、车辆弹簧刚度、信噪比 4 组参数的变化对变截面连续梁桥损伤识别的影响。结果发现:车桥质量比和信噪比较大时,桥梁损伤识别效果较好;较低的行车速度有利于桥梁的损伤识别研究;车辆弹簧刚度的影响非常小,可忽略不计。

关键词:变截面连续梁桥;车-桥耦合振动;车辆参数;损伤识别

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)01-0088-09

Influence of vehicle parameters on damage identification of continuous beam bridge with variable cross-section based on vehicle-bridge coupling system

HUANG Pengfei¹, LI Xuefeng¹, MAO Shangquan²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. China Construction Fourth Engineering Bureau Sixth Construction Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: The nonlinear vibration characteristics of vehicle-bridge coupling system are studied. After establishing the vehicle-bridge coupling vibration equation of the common quarter vehicle model and continuous beam bridge with variable cross-section through the finite segmentation idea, the Runge-Kutta method was used to compile the corresponding numerical simulation program of vehicle-bridge coupling vibration under the MATLAB environment. The mid-span displacement response of bridge was obtained. Taking a three-span concrete continuous beam bridge as an example, the influence of four groups of parameters, including vehicle-bridge mass ratio, vehicle speed, vehicle spring stiffness and signal-to-noise ratio(SNR), on the damage identification of continuous beam bridge with variable cross-section was analyzed. The results show that when the vehicle-bridge mass ratio and SNR are large, the performance of bridge damage identification is better; lower driving speed is conducive to the bridge damage identification research; the influence of vehicle spring stiffness is very small, which can be ignored.

Key words: continuous beam bridge with variable cross-section; vehicle-bridge coupling vibration; vehicle parameter; damage identification

近些年来,车-桥耦合振动理论取得较大发展,基于该理论的桥梁损伤识别方法也得到越来越多研究者的关注,与传统的静力损伤识别方法

相比,这种动力损伤识别方法能够取得更好的识别效果。文献[1]通过对车辆加速度响应进行快速傅里叶变换,提取桥梁的一阶频率;文献[2]提

收稿日期:2021-08-20;修回日期:2021-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878234)

作者简介:黄鹏飞(1997—),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.

出需要消除环境因素的干扰,得到的结构频率才会更精确;文献[3]用短时频域分解法处理车辆加速度响应,估算桥梁模态,通过数值案例可知,该方法对路面不平整度和噪声因素比较敏感,需要结合其他方式进行桥梁损伤识别,如对桥施加外部激励等;文献[4]将损伤识别与遗传算法相结合,通过车辆的加速度响应进行损伤定位与定量分析,并证明该方法在噪声和路面不平顺条件下也可以正常使用;文献[5]将灵敏度分析方法用于桥上运动车辆加速度信号的分析处理中,再结合最小二乘法和正则化方法对桥梁结构进行损伤识别,结果表明,该方法在路面不平顺和噪声等级较高的情况下,损伤识别效果并不理想;文献[6]对车辆的位移时程响应进行小波变换,数值算例表明,裂缝损伤程度越大越容易被识别,但对车速比较敏感;文献[7]将模态应变能和遗传算法相结合,提出一种多阶段损伤检测方法的理论,用车辆的振动响应成功实现两跨连续梁桥的损伤位置和损伤程度识别;文献[8]分析车辆悬架非线性和桥梁几何非线性对连续梁桥耦合振动响应的影响,结果表明,两者在一定程度上都能抑制桥梁的竖向跨中位移。

目前,桥梁损伤识别研究大多针对简支梁和等截面连续梁等简单桥梁结构,并且基本上都是从有限元软件直接提取振动响应数据。本文基于有限分段思想将变截面连续梁分成 j 个梁段, $j \rightarrow \infty$ 时可以将各梁段视为等截面,从而建立 1/4 车辆模型和变截面连续梁桥的耦合振动方程,然后在 MATLAB 环境下编制基于 Runge-Kutta 算法的车-桥耦合振动数值分析程序,得到桥梁跨中的竖向位移,最后结合桥梁结构损伤前、后振型函数及自振频率的变化,通过实际算例探讨车桥质量比、车辆速度、车辆弹簧刚度及信噪比 4 组参数的变化对损伤识别的影响。

1 车-桥耦合振动方程建立

1.1 车辆模型建立

1/4 车辆模型如图 1 所示,将梁桥简化成梁单元模型,车辆简化为两自由度的弹簧-阻尼系统。图 1 中: m_w 为悬架和车轮的总质量; m_v 为车体质量; k_w 、 c_w 分别为悬架体系的刚度和阻尼; k_v 、 c_v 分别为车体的刚度和阻尼; y_w 、 y_v 分别为悬架体系和车体的动挠度; $y(x, t)$ 为车辆作用点的动挠度。

运用 d'Alembert 原理对悬架体系和车体进

行受力分析。

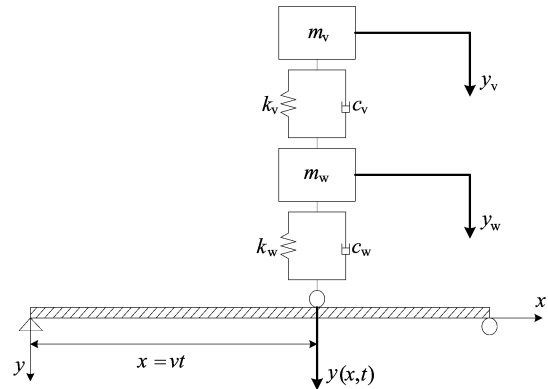


图 1 1/4 车辆非线性模型

1/4 车辆模型的振动平衡方程用矩阵形式可表示为:

$$M_v \ddot{Y}_v + C_v \dot{Y}_v + K_v Y_v = F_v \quad (1)$$

其中

$$Y_v = \begin{bmatrix} y_v \\ y_w \end{bmatrix}; \quad M_v = \begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & m_w \end{bmatrix};$$

$$C_v = \begin{bmatrix} c_v & -c_v \\ -c_v & c_v + c_w \end{bmatrix}; \quad K_v = \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_v + k_w \end{bmatrix};$$

$$F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ c_w \dot{y}(x, t) + k_w y(x, t) \end{bmatrix}。$$

1.2 桥梁模型建立

采用文献[9]分析方法建立变截面连续梁桥的动力平衡方程,根据有限分段思想在梁轴线位置处取长度为 dx 的单元体进行研究,假定轴向压应力 F_N 为常值应力,且包含预应力 V ,其受力情况如图 2 所示。

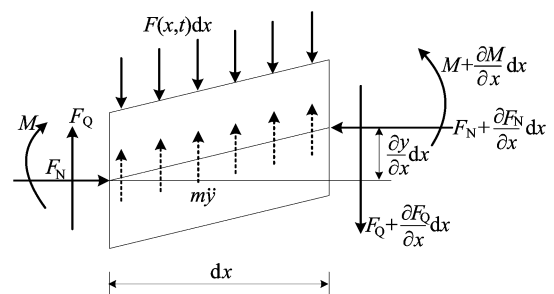


图 2 梁单元体计算模型

图 2 中: M 、 F_Q 、 F_N 分别为截面弯矩、剪力和轴力; $\frac{\partial y}{\partial x}$ 为截面处角位移; $F(x, t)$ 为车辆行驶过程中对桥梁的作用力。

根据该单元体竖向力和力矩的平衡,可得:

$$m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F(x, t) + \frac{\partial F_Q}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} + F_N \frac{\partial y}{\partial x} = F_Q \quad (3)$$

设 $u(x, t)$ 、 $y(x, t)$ 分别为梁上荷载沿 x 、 y 方向的位移, 由 Euler-Bernoulli 梁理论可得:

$$u(x, z, t) = u_0(x, t) - z \frac{\partial y_0(x, t)}{\partial x} \quad (4)$$

$$y(x, z, t) = y_0(x, t) \quad (5)$$

其中: $u_0(x, t)$ 、 $y_0(x, t)$ 分别为中性轴上任意位置的轴向位移和横向位移; z 为梁截面上某一点与中性轴的距离; t 为时间。

混凝土梁的轴向应力较小, 可忽略 $u_0(x, t)$ 的影响, 根据梁的大位移小应变效应, 其几何非线性关系式为:

$$\xi_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 - z \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (6)$$

其中, ξ_x 为距梁起点 x 处的轴向应变。

根据文献[10]中 Kelvin-Voigt 模型, 应力-应变本构关系为:

$$\sigma_x = E \xi_x + \alpha \dot{\xi}_x \quad (7)$$

其中: σ_x 为应力; E 为梁的弹性模量; α 为桥梁材料的黏性系数。

由 σ - M 关系式可得:

$$M = b \int_{-h(x)/2}^{h(x)/2} \sigma_x z dz \quad (8)$$

其中: b 为截面宽度; $h(x)$ 为截面高度。

由 σ - F_N 关系式可得:

$$F_N = b \int_{-h(x)/2}^{h(x)/2} \sigma_x dz \quad (9)$$

联立(6)~(9)式, 代入(3)式求解, 得到剪力 F_Q , 对 F_Q 求关于 x 的偏导后代入(2)式, 可得:

$$\begin{aligned} m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + 2E \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} + E \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \\ \alpha I \frac{\partial^4 \dot{y}}{\partial x^4} + 2\alpha \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^3 \dot{y}}{\partial x^3} + \alpha \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \dot{y}}{\partial x^2} + V \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \\ \frac{3}{2} EA \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{E}{2} \frac{\partial A}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^3 - \\ \alpha \frac{\partial A}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} - 2\alpha A \frac{\partial y}{\partial x} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} - \\ \alpha A \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 \dot{y}}{\partial x^2} = F(x, t) \end{aligned} \quad (10)$$

1.3 车-桥耦合方程的建立与求解

令 $r(x)$ 为桥面不平整度函数, x 为车辆在桥上的位置, 则车辆对桥的作用力 $P(t)$ 、 $F(x, t)$ 为:

$$\begin{aligned} P(t) = (m_v + m_w)g - k_w[y_w - y(x, t) - \\ r(x)] - c_w[\dot{y}_w - \dot{y}(x, t) - \dot{r}(x)] \end{aligned} \quad (11)$$

$$F(x, t) = \delta(x - vt)P(t) \quad (12)$$

其中: δ 为 Dirac 函数; v 为车辆行驶速度。将

$y(x, t)$ 按照振型分解法分离变量后可得:

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_i(x) q_i(t) \quad (13)$$

其中: $\Phi_i(x)$ 、 $q_i(t)$ 分别为梁的第 i 阶模态函数和模态坐标。

运用振型分解法进行求解, 然后用伽辽金法进行化简, 整理后的结果联立(3)式, 可得变截面连续梁桥的车-桥耦合振动方程为:

$$\mathbf{M}(t)\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{C}(t)\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K}(t)\mathbf{Y} = \mathbf{P}(t) \quad (14)$$

其中: $\mathbf{M}(t)$ 为 $(N+2n)$ 阶广义的车-桥耦合质量矩阵, N 为桥梁振动方程所取阶数, n 为车辆数; $\mathbf{C}(t)$ 为 $(N+2n)$ 阶广义阻尼矩阵; $\mathbf{K}(t)$ 为 $(N+2n)$ 阶广义刚度矩阵; $\mathbf{P}(t)$ 为 $(N+2n)$ 阶车-桥耦合作用外力向量; \mathbf{Y} 为 $(N+2n)$ 阶车-桥耦合位移向量。

(14) 式为时变的二阶非线性微分方程组, 所取阶数越大, 计算精度越高, 但工作量也相应变大, 经试算可知, 选取前 3 阶振型可以兼顾精度和工作量。本文采用 MATLAB 编制基于 Runge-Kutta 算法的耦合振动模拟程序进行求解, 模拟流程如图 3 所示。

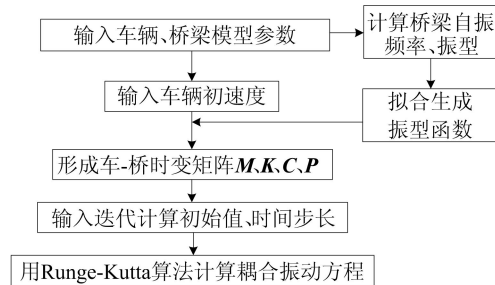


图 3 车-桥耦合振动模拟流程

2 车辆参数对桥梁损伤识别的影响

以某三跨混凝土连续梁桥为例。桥梁参数如下: 桥梁跨径为 $(27.92+42.00+27.92)$ m; 梁体为 C50 混凝土, 弹性模量 $E=34.5$ GPa; 混凝土密度 $\rho=2.5 \times 10^3$ kg/m³, 泊松比 $\nu=0.2$ 。箱梁跨中、支点处横截面尺寸分别如图 4、图 5 所示 (单位为 cm)。

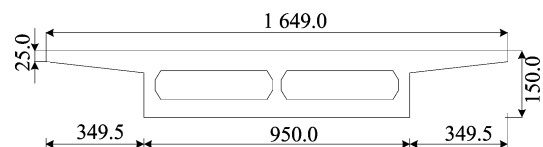


图 4 箱梁跨中横截面

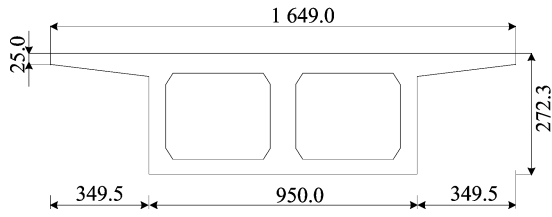
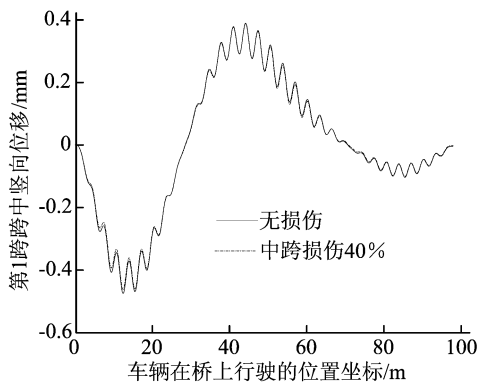


图 5 箱梁支点横截面

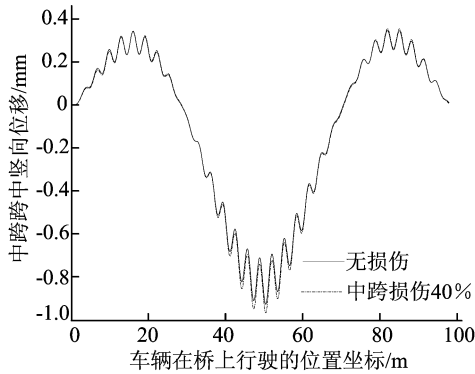
车辆参数如下:车身质量 $m_v = 3.85 \times 10^4$ kg; 车身与悬架系统之间弹簧刚度 $k_v = 5.07$ MN/m, 阻尼 $c_v = 3.82 \times 10^5$ kg/s; 车辆悬架与车轮的总质量 $m_w = 8.66 \times 10^3$ kg; 车辆悬架与车轮系统弹簧刚度 $k_w = 8.56$ MN/m, 阻尼 $c_w = 1.96 \times 10^5$ kg/s。

2.1 不同车桥质量比对桥梁损伤识别的影响

工况 1 假定桥梁损伤位于中跨跨中附近位置, 损伤程度取抗弯刚度折减 40%, 车辆移动速度设定为 10 m/s, 桥梁模型总质量为 2 486.59 t, 车辆模型总质量为 10 t, 车桥质量比为 0.004, 车辆其他参数不变, 分别计算无损伤、中跨受损伤桥梁的跨中竖向位移响应, 结果如图 6 所示。



(a) 第1跨跨中竖向位移



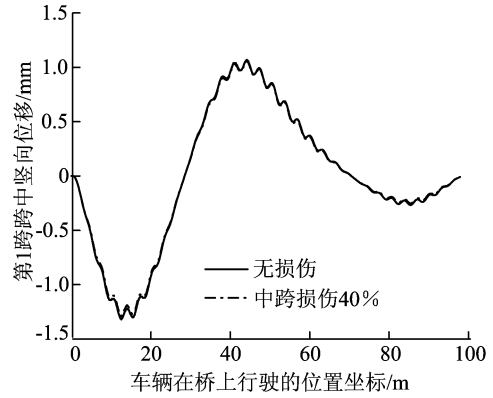
(b) 中跨跨中竖向位移

图 6 车桥质量比为 0.004 时无损伤、受损伤桥梁跨中竖向位移

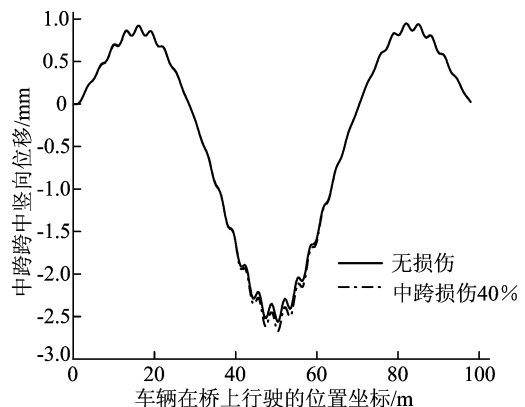
由图 6 可知, 当车桥质量比为 0.004 时, 无损伤、受损伤桥梁的跨中竖向位移响应曲线波动明

显, 且十分相似, 竖向位移响应曲线几乎重合或基本一致, 无法清晰识别出桥梁是否受到损伤。

工况 2 车辆系统总质量增加到 30 t, 车桥质量比为 0.012, 其余参数同工况 1, 位移响应如图 7 所示。



(a) 第1跨跨中竖向位移



(b) 中跨跨中竖向位移

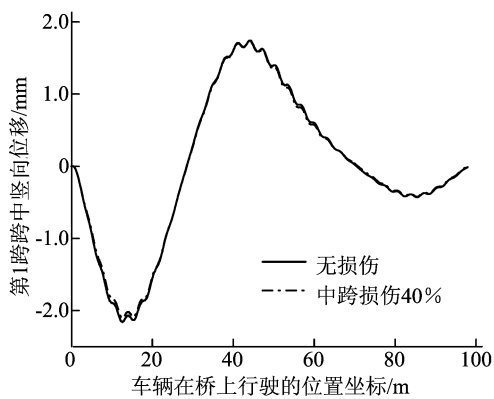
图 7 车桥质量比为 0.012 时无损伤、受损伤桥梁跨中竖向位移

由图 7 可知, 车桥质量比提高为 0.012, 无损伤、受损伤桥梁的跨中竖向位移响应曲线波动明显变弱, 竖向位移响应曲线十分接近, 但是跨中位移开始出现差异, 在车辆行驶到桥梁受损伤位置处差异最为明显。随着车桥质量比增大, 桥梁的第 1 跨跨中和中跨跨中的竖向位移响应也随之变大, 且数值变化程度十分明显, 其中无损伤、中跨受损伤桥梁的中跨跨中曲线第 2 峰峰值分别为 -2.563、-2.670 mm, 两者相差 0.107 mm。

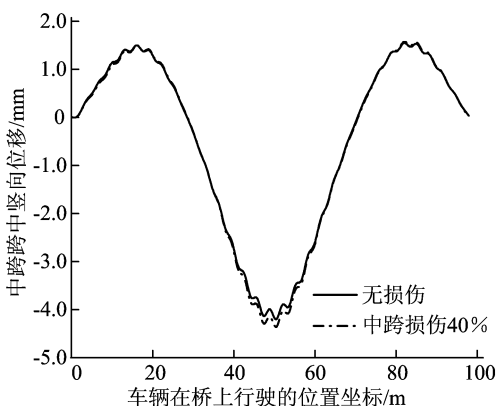
工况 3 车辆系统总质量提高到 50 t, 车桥质量比为 0.020, 其余参数同工况 1, 位移响应如图 8 所示。

由图 8 可知, 车桥质量比达到 0.020, 桥梁跨中竖向位移响应曲线的波动继续变弱, 曲线更加平滑, 无损伤、受损伤桥梁的第 1 跨跨中竖向位移响

应曲线在桥梁局部位置开始出现微弱的偏差,桥梁的中跨跨中位移响应曲线出现明显的差异,且响应数值进一步变大,无损伤、受损伤桥梁的中跨跨中曲线第 2 峰峰值分别为 -4.201 、 -4.357 mm,两者相差 0.156 mm。



(a) 第 1 跨跨中竖向位移



(b) 中跨跨中竖向位移

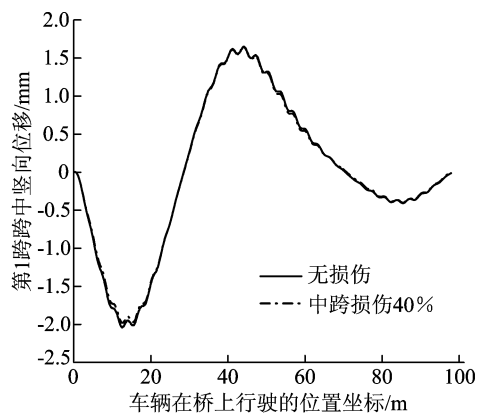
图 8 车桥质量比为 0.020 时无损伤、受损伤桥梁跨中竖向位移

由图 6~图 8 可知,车桥质量比的改变对车-桥耦合振动损伤识别有影响,车桥质量比的不断增大对桥梁跨中竖向位移响应曲线的整体趋势没有太大影响,无损伤桥梁和中跨受损伤桥梁是在几乎相同位置达到曲线峰值,且曲线的波动不断减弱,曲线的波动是由路面不平整因素引起的,由此可知,增大车桥质量比对路面不平整因素有抑制作用。随着车桥质量比增加,桥梁跨中竖向位移数值增大,无损伤桥梁和中跨受损伤桥梁的中跨跨中竖向位移响应差值也增大,中跨受损伤桥梁更容易被识别。因此,在车-桥耦合振动识别变截面连续梁桥损伤研究中,应该选取车桥质量比大的车辆模型。

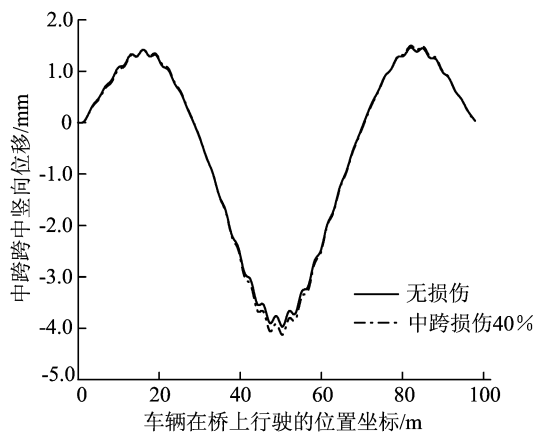
2.2 不同车速对桥梁损伤识别的影响

工况 4 假定桥梁损伤位于中跨跨中附近位

置,损伤程度取抗弯刚度折减 40%,车辆模型总质量取初始参数 47.16 t,车速 10 m/s 匀速驶过无损伤和中跨受损伤连续梁桥,其他参数不变,第 1 跨和中跨跨中竖向位移曲线如图 9 所示。



(a) 第 1 跨跨中竖向位移



(b) 中跨跨中竖向位移

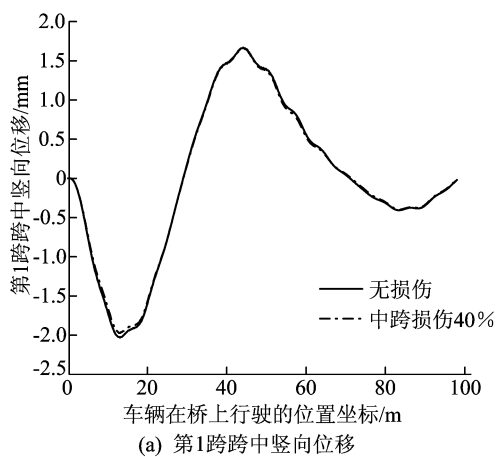
图 9 车速 10 m/s 时无损伤、受损伤桥梁跨中竖向位移

由图 9 可知,车辆以 10 m/s 匀速通过桥梁时,无损伤、中跨受损伤桥梁的第 1 跨跨中竖向位移响应、中跨跨中竖向位移响应的波动是一致的,都在相同的位置附近达到波峰、波谷。车辆分别在无损伤和中跨受损伤桥梁上行驶,行驶到第 1 跨跨中位置时,第 1 跨跨中竖向位移响应曲线有小幅的变化,但不是很明显,此时中跨跨中竖向位移响应曲线几乎没有变化;车辆继续行驶,当行驶到中跨跨中位置即损伤位置时,第 1 跨跨中竖向位移响应曲线很难观察到区别,但是中跨跨中竖向位移响应曲线变化差异明显,无损伤、受损伤桥梁中跨跨中曲线第 2 峰峰值分别为 -3.968 、 -4.126 mm,两者差值为 0.158 mm。

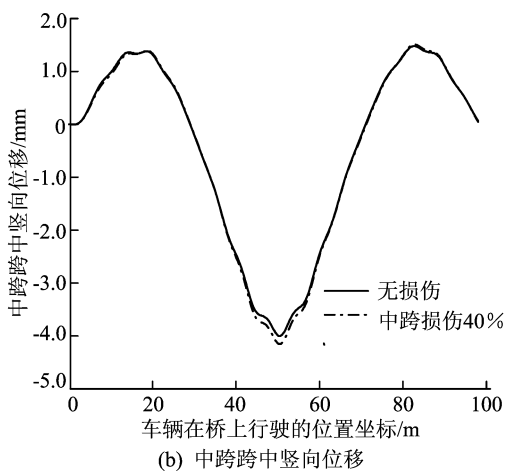
工况 5 提高车速至 20 m/s,其余参数不变,竖向位移曲线如图 10 所示。

由图 10 可知,车辆以 20 m/s 匀速通过桥梁

时,无损伤、受损伤桥梁的第 1 跨跨中竖向位移响应、中跨跨中竖向位移响应也具有相似的规律性,但和 10 m/s 匀速通过桥梁时的位移响应曲线有所区别,速度的提高使桥梁跨中竖向位移响应曲线的波动明显变弱。车速的提高使得桥梁跨中竖向位移响应曲线峰值发生相应变化,无损伤、受损伤桥梁的中跨跨中曲线第 2 峰峰值分别为 -4.001、-4.163 mm,两者差值为 0.162 mm。



(a) 第1跨跨中竖向位移



(b) 中跨跨中竖向位移

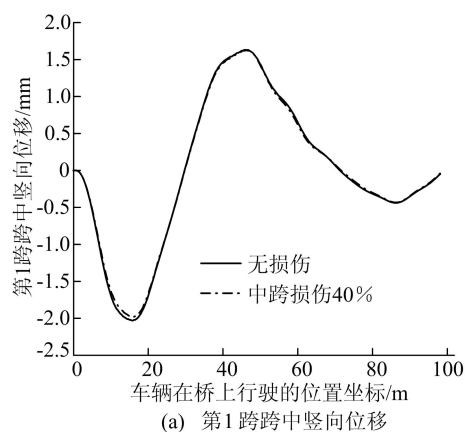
图 10 车速 20 m/s 时无损伤、受损伤桥梁跨中竖向位移

工况 6 继续提高车速至 30 m/s,其余参数不变,竖向位移曲线如图 11 所示。

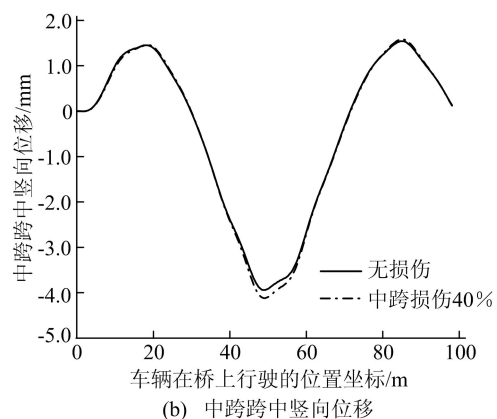
由图 11 可知,车辆以 30 m/s 匀速过桥,跨中竖向位移响应依然具有相似性,并且位移响应曲线波动继续变弱。车速的提高使中跨跨中竖向位移响应曲线第 2 峰峰值的差值进一步扩大为 0.185 mm,但是曲线峰值出现位置却向桥头方向移动,对车-桥耦合振动变截面连续梁桥损伤识别造成一定的干扰。

由图 9~图 11 可知:车速的改变并没有影响桥梁跨中竖向位移响应变化规律,竖向位移响应

具有相似性,曲线的波峰、波谷位置十分接近。随着车速不断提高,中跨跨中竖向位移曲线第 2 峰峰值的差值不断增大,但差值的增大幅度较小,车速 10 m/s 时差值为 0.158 mm,车速 30 m/s 时差值为 0.185 mm,仅相差 0.027 mm,对桥梁损伤识别研究的影响不大;同时速度提高使桥梁跨中竖向位移响应曲线的波动性变弱,跨中竖向位移响应的峰值也向桥头方向移动,对损伤识别研究造成一定的干扰。在实际试验中,车辆行驶速度越快,外界的干扰越多,信号数据的采集越困难,会导致采集的数据不准确,因此在车-桥耦合振动识别变截面连续梁桥损伤后续研究中,采用行车速度为 10 m/s。



(a) 第1跨跨中竖向位移



(b) 中跨跨中竖向位移

图 11 车速 30 m/s 时无损伤、受损伤桥梁跨中竖向位移

2.3 不同弹簧刚度对桥梁损伤识别的影响

工况 7 车身与悬架系统之间弹簧的刚度 k_v 、车辆悬架与车轮系统弹簧的刚度 k_w 取值均为 500 kN/m,车速设定为 10 m/s,其他参数不变,匀速驶过无损伤桥梁和受损伤桥梁,计算第 1 跨跨中和中跨跨中竖向位移响应曲线,结果如图 12 所示。

由图 12 可知,当车辆弹簧刚度为 500 kN/m

时,桥梁跨中竖向位移响应曲线的波动较微弱,曲线总体平滑,在局部位置有小幅振动。从图 12b 可以看出,无损伤、受损伤桥梁曲线几乎重合,仅在受损伤单元附近出现差异,两者第 2 峰峰值分别为 -3.917 、 -4.061 mm,两者差值为 0.144 mm。

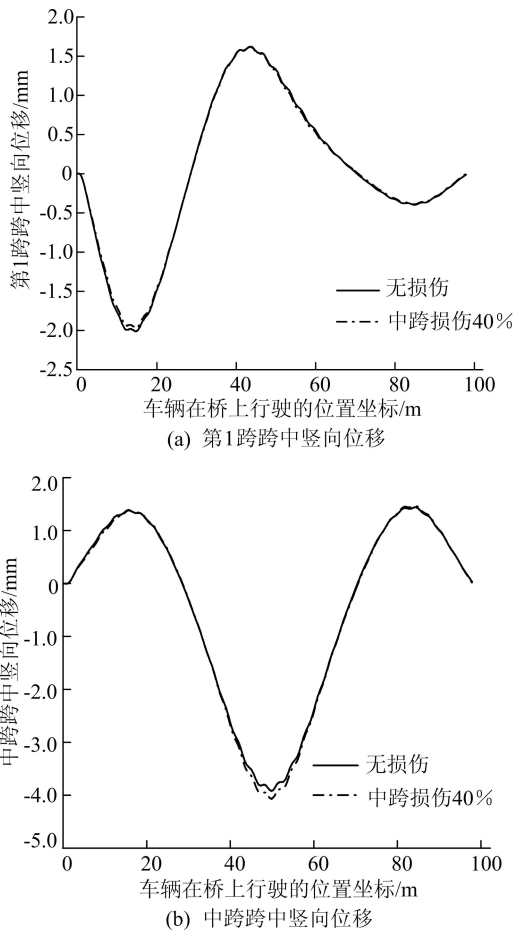


图 12 k_v, k_w 为 500 kN/m 时无损伤、受损伤桥梁跨中竖向位移

工况 8 车辆系统弹簧刚度为 $5\ 000$ kN/m,其余参数同工况 7,跨中竖向位移响应如图 13 所示。由图 13 可知,车辆系统弹簧刚度的增加使得桥梁跨中竖向位移响应曲线的波动稍变大,但没有影响曲线整体的波动趋势。由图 13b 可知,无损伤、受损伤桥梁的曲线第 2 峰峰值依然存在差距,两者分别为 -3.936 、 -4.080 mm,两者差值为 0.144 mm,和工况 7 的差值一样,没有变化。

工况 9 车辆系统弹簧刚度为 $50\ 000$ kN/m,计算得到桥梁跨中竖向位移响应,如图 14 所示。

从图 14 可以看出,车辆系统弹簧刚度提高到 $50\ 000$ kN/m 后,桥梁跨中竖向位移响应曲线的波动性明显增强,但 2 种情形的曲线几乎重合,无明显差异,很难进行损伤识别研究。

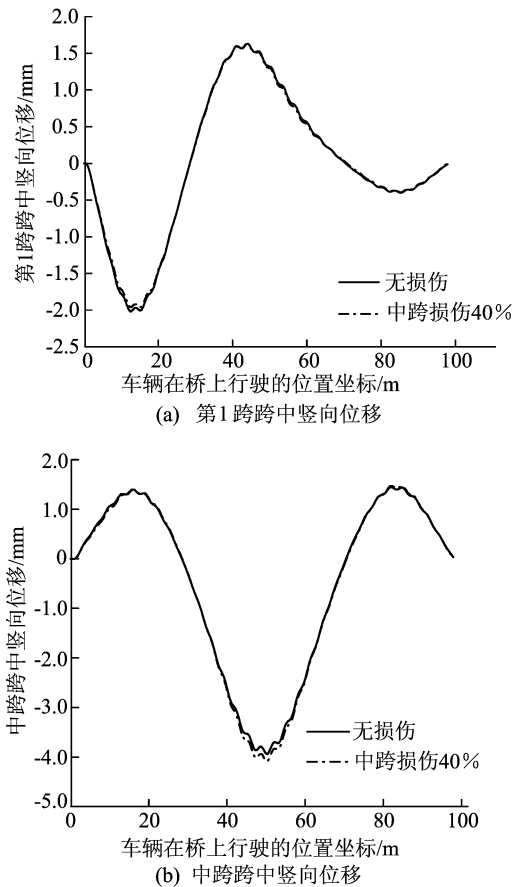


图 13 k_v, k_w 为 $5\ 000$ kN/m 时无损伤、受损伤桥梁跨中竖向位移

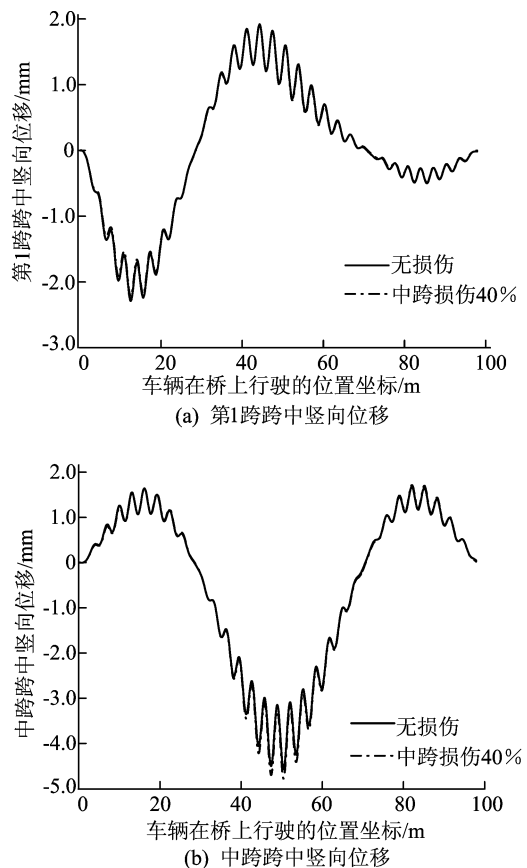


图 14 k_v, k_w 为 $50\ 000$ kN/m 时无损伤、受损伤桥梁跨中竖向位移

由图 12~图 14 可知,改变车辆系统弹簧刚度后,桥梁跨中竖向位移曲线总体走向没有改变,但是提高弹簧刚度使曲线波动性变得更加明显,曲线的波动性与路面不平整度相关,可知车辆系统弹簧刚度的升高对路面不平整因素有放大作用。对比工况 7 和工况 8,无损伤、受损伤桥梁中跨跨中竖向位移响应曲线第 2 峰峰值差值大小一样,说明在一定范围内,弹簧刚度参数对车-桥耦合振动识别桥梁损伤的影响很小,可以忽略不计。

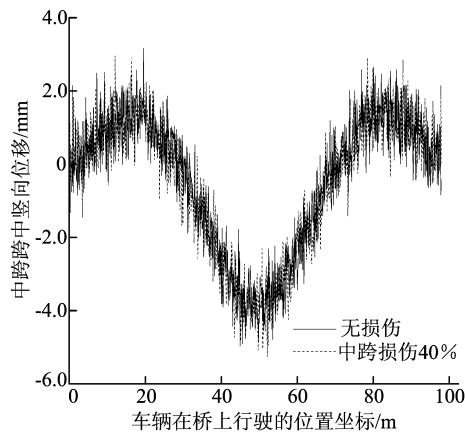
2.4 不同信噪比对桥梁损伤识别的影响

车-桥耦合振动得到的位移响应存在噪声的影响,因此在图 3 流程中生成的位移响应部分加入不同信噪比下的高斯白噪声,分析噪声对桥梁损伤识别的影响。信噪比 R_{SN} 计算公式为:

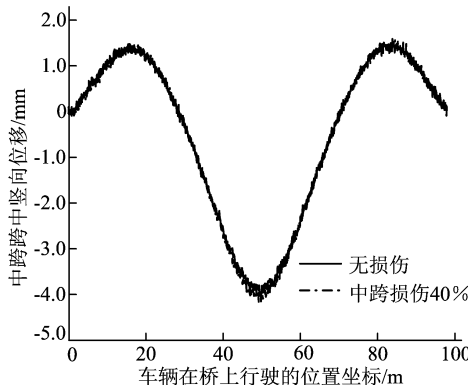
$$R_{SN} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^Q y(i)^2}{\sum_{i=1}^Q z(i)^2} \right] \quad (15)$$

其中: $y(i)$ 为纯信号序列; $z(i)$ 为高斯白噪声序列; Q 为项数; i 为从 1 开始增大到 Q 的整数。

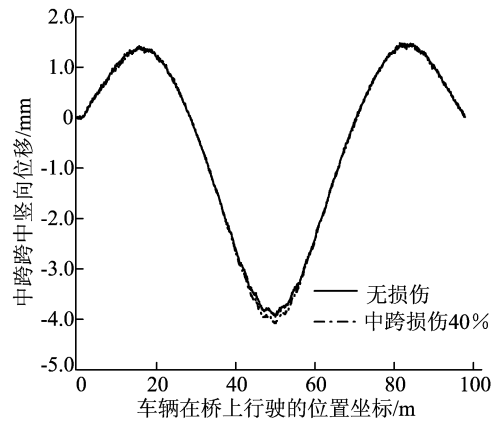
车辆模型总质量取初始参数 47.16 t,车速取 10 m/s,车辆系统弹簧刚度取 500 kN/m,采样频率为 100 Hz,信噪比取 20、30、40 dB,刚度折减 40%,计算无损伤、中跨受损伤桥梁的跨中竖向位移响应,结果如图 15 所示。



(a) 信噪比为 20 dB



(b) 信噪比为 30 dB



(c) 信噪比为 40 dB

图 15 3 种信噪比条件下无损伤、受损伤桥梁跨中竖向位移

由图 15 可知:当信噪比为 20 dB 时,位移响应被噪声所淹没,信号完全失真;当信噪比增加到 30 dB 时,曲线的细节波动性明显降低,无损伤、受损伤桥梁跨中位移开始出现差异,当车辆行驶到桥梁跨中受损伤位置时差异最为明显,两者峰值相差 0.165 mm,比无噪声时大 0.021 mm,说明在一定情况下噪声可以对位移响应产生影响;当信噪比进一步提高为 40 dB 时,曲线逐渐逼近图 12b 中的无噪声曲线,细节波动性进一步降低,无损伤、受损伤桥梁跨中位移差异更加明显,2 条曲线第 2 峰峰值分别为 -3.994、-4.159 mm,两者差值为 0.136 mm,损伤识别效果比无噪声时低 0.008 mm,可以忽略不计。综上可以看出,随着信噪比提高,位移响应曲线逐渐逼近于无噪声曲线,损伤识别效果也越来越好。

3 结 论

(1) 车桥质量比越大,对路面不平整因素的抑制作用越大,同时更加容易识别中跨受损伤桥梁与无损伤桥梁之间的区别,因此建议使用较重的车型进行车-桥耦合振动桥梁损伤识别研究。

(2) 车辆速度的提高会减弱桥梁跨中竖向位移响应曲线的波动性,同时跨中竖向位移响应的峰值不规律地向桥头方向移动,对桥梁损伤识别研究有一定的干扰作用,因此建议使用较低的行车速度。

(3) 车辆模型中,弹簧刚度的大小和路面不平整因素之间有一定的联系,但是对车-桥耦合振动桥梁损伤识别影响不大,可忽略此因素的影响。

(4) 信噪比较低时损伤识别效果较差,甚至完全被噪声淹没,但随着信噪比提高,位移响应曲

(下转第 117 页)

[参 考 文 献]

- [1] 周璞,侯华丽,刘天科. 我国矿产资源综合区划模型与实证研究[J]. 中国矿业,2016,25(2):115-119,124.
- [2] 师跃华. 矿产资源型城市综合承载力评估及时空分异研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
- [3] 梁元,罗德江,骆毓燕,等. 资源型城市县域矿业经济区评价指标体系及方法[J]. 中国矿业,2017,26(12):134-138.
- [4] 胡小平. 我国矿产资源经济区划与产业布局[J]. 地域研究与开发,1998,17(2):50-56.
- [5] 安徽省人民政府. 安徽省主体功能区规划(2016-2020)[EB/OL]. (2013-12-04)[2021-07-10]. <http://www.ah.gov.cn/public/1681/96760.html>.
- [6] 吴绍洪. 综合区划的初步设想:以柴达木盆地为例[J]. 地理研究,1998,17(4):32-39.
- [7] 何贤杰. 矿产区划,夯实找矿基础[N]. 中国国土资源报,2012-06-06(7).
- [8] 侯华丽,吴尚昆,张玉韩,等. 对我国开展矿产资源综合区划相关问题的思考[J]. 国土资源科技管理,2015,32(3):78-83.
- [9] 侯华丽. 我国主要固体矿产资源开发功能区划研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.
- [10] 马吉宇. 基于聚类分析的我国铁矿资源勘查开发基地划分研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.
- [11] 李雯燕,米文宝. 地域主体功能区划研究综述与分析[J]. 经济地理,2008,28(3):357-361.
- [12] 侯华丽,张玉韩. 我国矿产资源开发功能区划实证研究[J]. 中国国土资源经济,2016,29(5):12-17,49.
- [13] KOHONEN T. Self-organization and associated memory [M]. Berlin:Springer-Verlag,1987:1-65.
- [14] 吴聘奇,黄民生. SOM网络在福建省城市职能分类中的应用[J]. 经济地理,2005,25(1):68-70,83.
- [15] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队. 安徽统计年鉴:2019[M]. 北京:中国统计出版社,2019:16-24.
- [16] 侯华丽,张玉韩,吴尚昆,等. 基于多要素的中国固体矿产资源丰度评价[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(2):240-244.
- [17] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002:448-456.
- [18] 国土资源部. 矿产资源登记统计管理办法[EB/OL]. (2004-01-09)[2021-07-10]. <http://www.gov.cn/gongbao/content/2004/content-62948.html>.
- [19] 沈明,沈镭,钟帅,等. 基于生态敏感条件的中国资源型城市去产能空间格局优化[J]. 资源科学,2016,38(10):1962-1974.
- [20] 金凤君,王成金,李秀伟. 中国区域交通优势的甄别方法及应用分析[J]. 地理学报,2008,63(8):787-798.
- [21] 张玉韩,吴尚昆,董延涛. 长江经济带矿产资源开发空间格局优化研究[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(4):839-852.

(责任编辑 张淑艳)

(上接第 95 页)

线逐渐逼近于无噪声曲线,损伤识别效果也越来越好。基于车-桥耦合振动理论得到的位移响应信噪比较高,因此本文的方法具有实际意义,后续需要加强降噪研究。

[参 考 文 献]

- [1] YANG Y B, LIN C W, YAU J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [C]//WANG C M, LIU G R, ANG K K. Proceedings of the Second International Conference on Structural Stability and Dynamics. [S. l.]: World Scientific Publishing Company, 2002:172-180.
- [2] SALAWU O S. Detection of structural damage through changes in frequency:a review[J]. Engineering Structures, 1997,19:718-723.
- [3] MALEKJAFARIAN A, OBRIEN E J. Identification of bridge mode shapes using short time frequency domain decomposition of the responses measured in a passing vehicle [J]. Engineering Structures,2014,81:386-397.
- [4] LI Z H, AU F T K. Damage detection of bridges using response of vehicle considering road surface roughness[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2015,15(3):1450057-1-1450057-28.
- [5] 王树栋,卜建清,娄国充. 基于过桥汽车动力响应的桥梁损伤识别[J]. 长安大学学报(自然科学版),2008,28(3):67-71,104.
- [6] NGUYEN K V, TRAN H T. Multi-cracks detection of a beam-like structure based on the on-vehicle vibration signal and wavelet analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010,329:4455-4465.
- [7] LI Z H, AU F T K. Damage detection of a continuous bridge from response of a moving vehicle[J]. Shock and Vibration, 2014,2014:146802.
- [8] 袁家冬. 变截面连续梁桥车桥耦合振动非线性分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
- [9] 战家旺,夏禾,陈上有. 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[J]. 工程力学,2011,28(11):38-44.
- [10] SIMSEK M, KOCATÜRK T. Nonlinear dynamic analysis of an eccentrically prestressed damped beam under a concentrated moving harmonic load[J]. Journal of Sound and Vibration,2009,320:235-253.

(责任编辑 张淑艳)