

跳车冲击下车桥耦合振动参数影响性分析

李雪峰¹, 张智越^{1,2}, 肖润生³

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 230009 合肥; 2. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 300300 天津; 3. 安徽省七星工程测试有限公司, 230088 合肥)

摘要: 研究车辆在不同参数影响下发生跳车, 对桥梁车桥耦合响应的影响。以三跨变截面连续梁桥为研究对象, 将变截面梁划分为有限个微段, 进行受力分析得出桥梁振动方程; 并选用 1/4 车辆模型, 运用达朗贝尔原理建立车辆的振动方程; 再联立计算得到车桥耦合振动方程, 借助 Newmark- β 法求解车桥耦合方程。结果表明: 不考虑几何非线性后, 跳车冲击作用下, 悬架及轮胎系统的刚度对桥梁的位移响应没有明显影响; 并非车辆速度越快车桥耦合位移响应就越明显; 车质量对车桥耦合响应有显著影响, 车辆越重, 桥梁位移响应越剧烈。

关键词: 跳车冲击; 车桥耦合; 参数影响性; 连续梁桥; 几何非线性

中图分类号: U441+.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-4939(2025)03-0620-09

Parameters influence analysis of vehicle bridge coupling vibration under vehicle jumping impact

LI Xuefeng¹, ZHANG Zhiyue^{1,2}, XIAO Runsheng³

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, 230009 Hefei, China;

2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., 300300 Tianjin, China;

3. Anhui Qixing Engineering Testing Co., Ltd., 230088 Hefei, China)

Abstract: The influence of vehicle bridge coupling response under vehicle jumping impact with different parameters was studied. The variable cross-section beam was divided into finite micro segments and the vibration equation of the bridge was obtained through force analysis. The 1/4 vehicle model was selected and the vibration equation of the vehicle was established by using the D'Alembert principle. Then the vehicle bridge coupled vibration equation was obtained and solved with the Newmark- β method. The results show that the stiffness of suspension and tire system has no significant effect on the displacement response of the bridge under vehicle jumping impact without considering the geometric nonlinearity. It is not that the faster the vehicle speed is, the more obvious the vehicle bridge coupling displacement response is. The vehicle weight has a significant effect on the vehicle bridge coupling response. The displacement response is more intense as the vehicle becomes heavier.

Key words: jumping impact; vehicle-bridge coupling; parameter influence; continuous bridge; eometric non-linearity

收稿日期: 2022-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 878234)

通信作者: 李雪峰, 副教授。E-mail: hfgdlxf@126.com

引用格式: 李雪峰, 张智越, 肖润生. 跳车冲击下车桥耦合振动参数影响性分析[J]. 应用力学学报, 2025, 42(3): 620-628.

LI Xuefeng, ZHANG Zhiyue, XIAO Runsheng. Parameters influence analysis of vehicle bridge coupling vibration under vehicle jumping impact [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(3): 620-628.

车辆驶过桥梁时产生的一系列耦合作用,引起桥梁的振动就是车桥耦合振动。20世纪80年代以来,我国高速公路和高等级铁路等方面的桥梁基础设施建设发展迅速,每日各种类型的车辆在桥上通行,使桥梁结构处于耦合振动的状态,运营长时间内,桥梁的病害问题趋于显现,严重影响桥梁的使用寿命,当路面不平整或者有障碍物时,导致车辆在行驶过程中发生跳车,还会加剧车桥耦合振动响应。文献[1]建立了铁路曲线梁桥车桥耦合振动方程,以激励非线性振动数值算法为基础,再编制分析软件VCBID得到车桥耦合振动响应。文献[2]选用1/2车辆模型,将连续梁桥划分为平面梁单元,综合运用振型叠加法和Newmark- β 积分进行求解车桥耦合振动方程。文献[3]研究了以某连续梁桥为计算实例,采用ANSYS建立了车辆和桥梁的有限元模型,研究了在不同车辆质量、不同车辆刚度、不同行车速度下桥梁动力响应的规律。文献[4-5]基于Hertz弹性接触理论,研究了混凝土徐变发生变化的路面不平整对车桥耦合振动的影响。文献[6]基于车桥耦合理论,运用欧拉-柏努利梁假设和达朗贝尔原理,再结合试验建立了考虑跳车的车桥耦合模型,借助Runge-Kutta法对其进行求解。文献[7-8]以简支梁桥作为研究对象,在考虑桥头跳车的车桥耦合动力响应,分析了在不同桥头高差、不同车速下桥梁的振动响应规律。文献[9]选用半车模型和Euler-Bernoulli梁,借助区间算法对车桥耦合系统的动力学分析,研究了未知参数下的车桥耦合区间动力响应。文献[10-11]诸多专家学者研究并提出了预防桥头跳车的措施,借助AEM(analog equation method)法对车辆与桥梁之间的耦合作用进行数值求解,在考虑车轮的实际跳变下,建立了考虑随机波纹在移动荷载下的车桥耦合振动模型。

与之前的大部分研究不同,本研究以三跨变截面连续梁桥作为研究对象,通过理论推导与数值模拟相结合的方式,研究了跳车冲击作用下的桥梁结构振动响应,得出在不同参数影响下桥梁振动响应的变化,分析其对桥梁产生的危害,以为桥梁的运营及维护提供具有指导意义的参考数据。

1 车桥耦合振动方程

1.1 车辆振动方程的建立

将车辆分为车身和悬架及轮胎2个组成部分,2

部分通过弹簧及阻尼器连接,假定车辆为刚体不发生变形,车辆模型中的弹簧不会出现弹簧失效的情况。1/4车辆模型如图1所示。

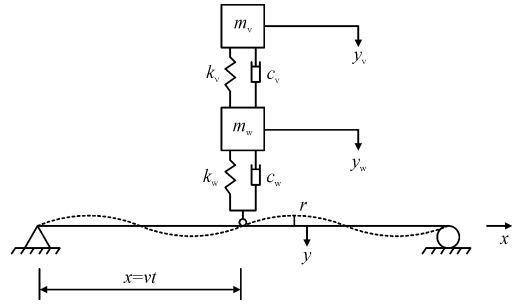


图1 1/4车辆模型

Fig. 1 1/4 vehicle model

图1中: y 为桥梁在车轮位置竖向位移; x 为车辆在桥上的某点位移; r 为路面不平整度数值; y_v 、 y_w 分别为车身与轮胎竖向位移; m_w 为悬架与车轮总质量; m_v 为车身质量; k_w 、 c_w 分别为车轮的刚度和阻尼系数; k_v 、 c_v 分别为连接车身与悬架系统的弹簧刚度和阻尼系数。

运用D'Alembert原理,通过对车身及悬架与轮胎的受力分析,得到二者的动平衡方程分别为

对车身可得

$$m_v \ddot{y}_v + c_v (\dot{y}_v - \dot{y}_w) + k_v (y_v - y_w) = 0 \quad (1)$$

对轮胎及悬架可得

$$m_w (\ddot{y}_w + \ddot{y} - \ddot{r}) + c_w (\dot{y}_w - \dot{y} + \dot{r}) + k_w (y_w - y + r) - c_v (\dot{y}_v - \dot{y}_w) - k_v (y_v - y_w) = 0 \quad (2)$$

其中: \dot{r} 为路面不平整引起的竖向速度; \ddot{r} 为路面不平整引起的竖向加速度,分别为

$$\dot{r} = \frac{r(x_i) - r(x_{i-1})}{\Delta t} \quad (3)$$

$$\ddot{r} = \frac{\dot{r}(x_i) - \dot{r}(x_{i-1})}{\Delta t} \quad (4)$$

将式(1)、式(2)改写为矩阵形式可得

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Y}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Y}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{Y}_v = \mathbf{P}_v \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & m_w \end{bmatrix}, \mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} c_v & -c_v \\ -c_v & c_v + c_w \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_v + k_w \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_v = \begin{bmatrix} y_v \\ y_w \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ m_w \ddot{r} - m_w \ddot{y} + c_w (\dot{y} - \dot{r}) + k_w (y - r) \end{bmatrix}$$

1.2 桥梁振动方程的建立

本研究以变截面连续梁桥为研究对象,将变截

面梁划分为 n 个等截面的微小梁段, 考虑梁段承受一分布外荷载 $P(x, t)$ 作用, 基于文献[12]对任一长度为 dx 的微段隔离体进行受力分析的计算模型, 如图2所示。

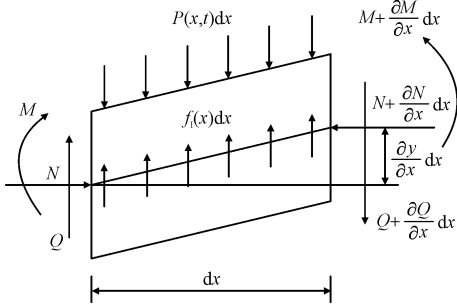


图2 梁段隔离体计算模型

Fig. 2 Beam segment isolation body calculation model

图2中: $P(x, t)$ 为随 x 及时间 t 变化的外荷载; M 为梁段截面的弯矩; Q 为梁段截面的剪力; N 为梁段的轴向压力; $f_1(x) = m(x)\ddot{y}$ 为惯性力, 其中 $m(x)$ 为梁单位长度质量; y 为隔离体的竖向位移。

由竖向力平衡能够得到

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -P(x, t) + m(x)\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (6)$$

由力矩平衡能够得到

$$\frac{\partial M}{\partial x} = Q - N\frac{\partial y}{\partial x} \quad (7)$$

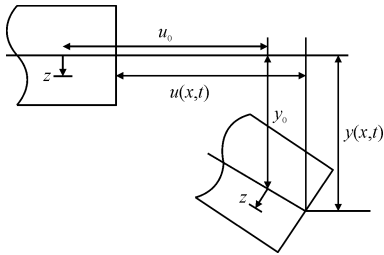


图3 梁段变形图

Fig. 3 Beam segment deformation

基于欧拉-伯努力梁理论, 如图3所示, 设位于梁中性轴 x 处一点轴向位移为 u_0 , 竖向位移为 y_0 ; 截面上任意一点的轴向位移为 u , 竖向位移为 y ; 其截面上任一点到中性轴的距离为 z , 可得

$$u(x, z, t) = u_0(x, t) - z\frac{\partial y_0(x, t)}{\partial x} \quad (8)$$

$$y(x, z, t) = y_0(x, t) \quad (9)$$

根据大横向位移、中等转动、小应变的假定, 并忽略梁的轴向压力对梁截面的影响, 能够得到梁的几何非线性关系式

$$\xi_x = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 - z\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (10)$$

其中, z 为截面上某点与中性轴的距离。

根据 Kelvin-Voigt 模型^[13], 应力 σ_x 与应变 ξ_x 本构关系式

$$\sigma_x = E\xi_x + E\delta\dot{\xi}_x \quad (11)$$

其中: E 为弹性模量; δ 为桥梁材料阻尼比; σ_x 、 ξ_x 分别为连续梁桥距桥梁起点 x 处截面的轴向应力和应变。

弯矩-应力关系式为

$$M = -b\int_{-\frac{h(x)}{2}}^{\frac{h(x)}{2}}\sigma_x z dx \quad (12)$$

$$M = EI(x)\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \delta EI(x)\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right) \quad (13)$$

轴力-应力关系式为

$$N = b\int_{-\frac{h(x)}{2}}^{\frac{h(x)}{2}}\sigma_x dx \quad (14)$$

$$N = \frac{1}{2}EA(x)\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 + \delta EA(x)\left[\frac{\partial y}{\partial x}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)\right]^2 \quad (15)$$

其中: b 为梁截面的宽度; $h(x)$ 梁截面的高度; $I(x)$ 和 $A(x)$ 分别为 x 处梁截面惯性矩和截面积。

先将式(13)、式(15)代入式(7)中求得剪力 Q , 再将求得的 Q 值代入式(6)中, 得到振动微分方程。由于各微段截面为等截面, 所以 $m(x)$ 、 $I(x)$ 和 $A(x)$ 为常数, 即有 $\frac{\partial I(x)}{\partial x} = \frac{\partial I^2(x)}{\partial x^2} = 0$, $\frac{\partial A(x)}{\partial x} =$

$\frac{\partial A^2(x)}{\partial x^2} = 0$, 进而化简为

$$m(x)\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI(x)\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \delta EI(x)\frac{\partial^4}{\partial x^4}\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right) + \frac{3}{2}EA(x)\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2\delta EA(x)\frac{\partial y}{\partial x}\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right) + \delta EA(x)\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right) = P(x, t) \quad (16)$$

根据振型分解法可用于求解桥梁的非线性振动方程式(15), 设 $\varphi_i(x)$ 为连续梁的第 i 阶模态函数; $q_i(t)$ 为连续梁的第 i 阶模态坐标, 则能够将 $y(x, t)$ 进行分解为

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty}\varphi_i(x)q_i(t) \quad (17)$$

将式(17)代入式(16), 同时在方程两侧乘以 $\varphi_n(x)$, 再将方程沿整个连续梁桥取积分。取任意梁段 i 的振型函数为

$$\varphi_i(x) = A_i \sin[\lambda_i(x - x_{i-1})] + B_i \cos[\lambda_i(x - x_{i-1})] +$$

$$C_i \sin h[\lambda_i(x-x_{i-1})] + D_i \cos h[\lambda_i(x-x_{i-1})] \quad P(x,t) = (m_v + m_w)g - m_v \ddot{y}_v - m_w(\ddot{y}_w + \ddot{y} - \ddot{r}) + k_w(y_w - y + r) + c_w(\dot{y}_w - \dot{y} + \dot{r}) \quad (18) \quad (19)$$

其中, λ_i 为梁段 i 的频率特征值。

$P(x,t)$ 为车辆驶过桥梁过程中产生的作用力, 其中, ρ 为桥梁材料的密度。

由车辆系统振动平衡方程可得

最终整理可得^[14]

$$\begin{aligned} \ddot{q}_n(t) \int_0^l \varphi_n^2(x) m(x) dx + q_n(t) \int_0^l \varphi_n(x) EI(x) \frac{\partial^4 \varphi_n(x)}{\partial x^4} dx + \dot{q}_n(t) \int_0^l \delta \varphi_n(x) EI(x) \frac{\partial^4 \varphi_n(x)}{\partial x^4} dx + \\ \varphi_n(x) k_w \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) q_i(t) - q_n^3(t) \int_0^l \frac{3}{2} \varphi_n(x) EA(x) \left[\frac{\partial \varphi_n(x)}{\partial x} \right]^2 \frac{\partial^2 \varphi_n(x)}{\partial x^2} dx - \\ q_n^2(t) \dot{q}_n(t) \int_0^l 3\delta \varphi_n(x) EA(x) \left[\frac{\partial \varphi_n(x)}{\partial x} \right]^2 \frac{\partial^2 \varphi_n(x)}{\partial x^2} dx + \varphi_n(x) m_v \ddot{y}_v + \varphi_n(x) m_w \ddot{y}_w + \varphi_n(x) m_w \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) \ddot{q}_i(t) - \\ \varphi_n(x) k_w y_w - \varphi_n(x) c_w \dot{y}_w + \varphi_n(x) c_w \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) \dot{q}_i(t) = \varphi_n(x) (m_v + m_w) g + \varphi_n(x) k_w r + \varphi_n(x) c_w \dot{r} + \varphi_n(x) m_w \ddot{r} \end{aligned} \quad (21)$$

1.3 车桥耦合方程的建立

前面两节分别建立了车辆振动方程和桥梁振动方程, 将二者联立起来即可得到相应的车桥耦合方程为

当车辆遇障碍物腾空时, 车辆与桥面间不接触没有作用力, 此时车辆与桥梁为独立个体, 车身及悬架系统的受力分析如图4所示。

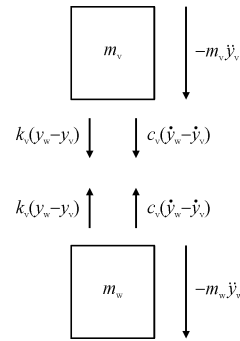


图4 车辆腾空下车桥耦合系统受力分析

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX + HX^2\dot{X} + QX^3 = P \quad (22)$$

其中: M 、 C 、 K 分别为连续梁桥车桥耦合 $n+2$ 阶广义质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; P 为 $n+2$ 阶荷载向量; X 为 $n+2$ 阶广义位移向量; H 、 Q 分别为 $n+2$ 阶非线性因素影响的相关矩阵。

Fig.4 Force analysis of vehicle vacating and axle coupling system

1.4 跳车冲击下车桥耦合方程的建立及求解

跳车冲击作用分为以下5个阶段: ①车辆行驶未遇到障碍物仅考虑路面不平整的情况下; ②车辆遇到障碍物发生起跳腾空; ③车辆重新回到梁上对梁施加一个冲击力, 冲击力由0达到峰值; ④冲击力渐渐回落; ⑤最后车辆恢复正常行驶状态。

由此, 可列 m_v 和 m_w 的平衡方程

$$m_v \ddot{y}_v + c_v(\dot{y}_v - \dot{y}_w) + k_v(y_v - y_w) = 0 \quad (23)$$

$$m_w \ddot{y}_w - c_v(\dot{y}_v - \dot{y}_w) - k_v(y_v - y_w) = 0 \quad (24)$$

当车辆未遇到障碍物之前以及车辆落地冲击回稳之后, 在这2个阶段内车桥耦合方程同式(22)未发生变化。

车辆与桥面没有接触, 桥面没有受外力作用, 结合式(23)、式(24), 同时式(21)等号右边项的作用力为0, 可得方程

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^l \varphi_n(x) m(x) \varphi_i(x) \ddot{q}_i(t) dx + \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^l \varphi_n(x) EI(x) \frac{\partial^4 \varphi_i(x)}{\partial x^4} q_i(t) dx + \\ \sum_{i=1}^{\infty} \delta \int_0^l \varphi_n(x) EI(x) \frac{\partial^4 \varphi_i(x)}{\partial x^4} \dot{q}_i(t) dx - \frac{3}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^l \varphi_n(x) EA(x) \left[\frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x} q_i(t) \right]^2 \frac{\partial^2 \varphi_i(x)}{\partial x^2} q_i(t) dx - \\ \sum_{i=1}^{\infty} 2\delta \int_0^l \varphi_n(x) EA(x) \frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x} q_i(t) \frac{\partial^2 \varphi_i(x)}{\partial x^2} q_i(t) \frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x} \dot{q}_i(t) dx - \\ \sum_{i=1}^{\infty} \delta \int_0^l \varphi_n(x) EA(x) \left[\frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x} q_i(t) \right]^2 \frac{\partial^2 \varphi_i(x)}{\partial x^2} \dot{q}_i(t) dx = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

整理可得车辆腾空过程中车桥耦合方程

$$M_1 \ddot{X}_1 + C_1 \dot{X}_1 + K_1 X_1 + H_1 X_1^2 \dot{X}_1 + Q X_1^3 = P_1 \quad (26)$$

其中, M_1 、 C_1 、 K_1 、 P_1 、 X_1 、 H_1 、 Q_1 分别为车辆腾空状态下 $n+2$ 阶广义质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、荷载向量、位移向量、非线性因素影响的相关矩阵。

当车辆落地冲击桥面时, 车辆与桥梁将再次接

$$P_2 = \begin{bmatrix} \varphi_1 \left[\frac{F_{\max}}{\Delta t_1} (t - t_2) + k_w r + c_w \dot{r} + m_w \ddot{r} \right] & \varphi_2 \left[\frac{F_{\max}}{\Delta t_1} (t - t_2) + k_w r + c_w \dot{r} + m_w \ddot{r} \right] & \dots \\ \varphi_n \left[\frac{F_{\max}}{\Delta t_1} (t - t_2) + k_w r + c_w \dot{r} + m_w \ddot{r} \right] & 0 & m_w \ddot{r} - c_w \dot{r} - k_w r \end{bmatrix}^T \quad (28)$$

车辆冲击回稳阶段: 冲击力达到峰值后将逐渐下降, 直至车辆恢复正常行驶, 该时段的车桥耦合振动方程为

$$P_3 = \begin{bmatrix} \varphi_1 \left[F_{\max} - \frac{F_{\max}}{\Delta t_1} (t - t_3) + k_w r + c_w \dot{r} + m_w \ddot{r} \right] & \varphi_2 \left[F_{\max} - \frac{F_{\max}}{\Delta t_1} (t - t_3) + k_w r + c_w \dot{r} + m_w \ddot{r} \right] & \dots \\ \varphi_n \left[\frac{F_{\max}}{\Delta t_1} (t - t_2) + k_w r + c_w \dot{r} + m_w \ddot{r} \right] & 0 & m_w \ddot{r} - c_w \dot{r} - k_w r \end{bmatrix}^T \quad (30)$$

常用的时域逐步积分方法有4种, 本研究使用适用于计算的 Newmark- β 法求解车桥耦合方程。该方法简化了线性加速度法, 在位移计算过程中, 还能跳过位移对时间的求导(即速度和加速度)等一系列值, 最终成功得出车桥耦合振动的系统响应。

2 车桥耦合振动参数影响性分析

本研究基于三跨变截面连续梁桥, 桥跨为(27.92+42+27.92)m, 单箱双室截面, 梁体采用C50混凝土材料, 弹性模量为 $E = 3.45 \times 10^{10}$ Pa, 混凝土密度为 $\rho = 2.5 \times 10^3$ kg/m³, 泊松比 $\delta = 0.02$ 。路面不平整度为B级, 障碍物高度为0.05 m, 车速 $v = 20$ m/s。1/4 车辆模型参数为 $m_v = 3.85 \times 10^4$ kg; $m_w = 8.66 \times 10^3$ kg; $k_v = 3.396 \times 10^6$ N/m; $k_w = 8.56 \times 10^6$ N/m; $c_v = 2.292 \times 10^5$ kg/s; $c_w = 1.96 \times 10^5$ kg/s。忽略桥梁的几何非线性, 研究跳车冲击作用下车辆在不同参数影响下的车桥耦合振动响应。

2.1 不同跳车高度车桥耦合振动响应分析

选取不同障碍物高度分别为0.03、0.05、0.08、0.1 m, 以车速20 m/s研究不同跳车高度下车桥耦合振动响应, 计算结果如图5所示。

触, 桥梁受到从0逐渐增大的冲击力, 该时段的车桥耦合振动方程为

$$M_2 \ddot{X}_2 + C_2 \dot{X}_2 + K_2 X_2 + H_2 X_2^2 \dot{X}_2 + Q X_2^3 = P_2 \quad (27)$$

其中: $M_2 = M$; $C_2 = C$; $K_2 = K$; $H_2 = H$; $Q_2 = Q$; P_2 为车辆落地冲击状态下 $n+2$ 阶荷载向量。

$M_3 \ddot{X}_3 + C_3 \dot{X}_3 + K_3 X_3 + H_3 X_3^2 \dot{X}_3 + Q X_3^3 = P_3$ (29)
其中: $M_3 = M$; $C_3 = C$; $K_3 = K$; $H_3 = H$; $Q_3 = Q$; P_3 为车辆冲击回稳状态下 $n+2$ 阶荷载向量。

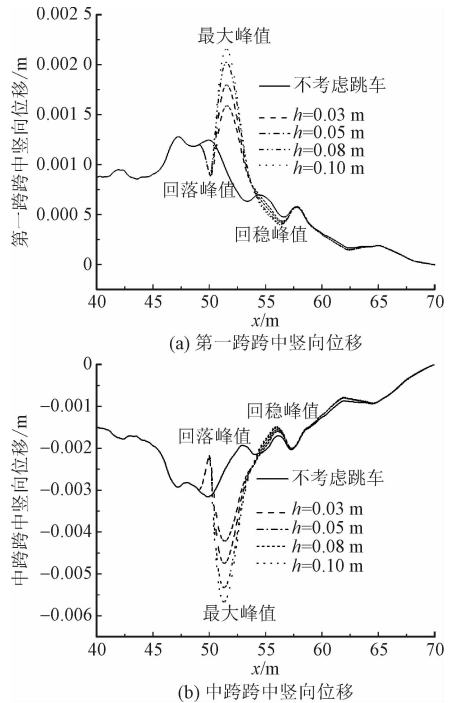


图5 不同跳车高度桥梁跨中竖向位移
Fig. 5 Vertical displacement of mid-span at different vehicle jumping heights

由图5可知, 车辆落地后开始冲击桥面, 随着跳车高度的增加, 最大峰值逐渐增大, 中跨跨中位移峰值超过了5 mm, 是不考虑跳车峰值的2.61倍。随着跳车高度的增加, 回落峰值的出现时刻逐渐滞后,

由于跳车高度越高,车辆腾空的时间越长,桥梁恢复变形的时间越长,腾空结束后落地位置逐渐滞后,桥梁达到回落峰值时刻晚于腾空结束的时刻,第一跨最晚滞后了0.021 5 s,中跨则为0.016 5 s。当冲击结束车辆恢复正常行驶状态后,位移响应并不是马上恢复稳定,在一段时间内来回颠簸,且始终小于不考虑跳车情况下的位移,出现回稳峰值,这都是桥梁

发生位移变形后的回弹,后来逐渐趋于稳定且和不考虑跳车情况下的位移曲线逐渐重合。

2.2 不同轮胎刚度下车桥耦合振动响应分析

轮胎刚度分别选取 2×10^6 、 5×10^6 、 8×10^6 N/m,其他车辆参数不变,研究不同轮胎刚度下的桥梁动态响应。计算结果如表1所示。

表1 跳车冲击下不同轮胎刚度跨中竖向位移峰值情况

Tab.1 Peak value of mid-span vertical displacement with different tire stiffness under vehicle jumping impact

轮胎刚度/ ($10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$)	参数	第一跨跨中位移($v=20 \text{ m/s}$)			中跨位移峰值情况($v=20 \text{ m/s}$)			
		第一峰值	第二峰值	最大峰值	第一峰值	第二峰值	最大峰值	第三峰值
2	峰值/mm	-1.47	1.14	2.33	0.60	-2.79	-6.23	0.68
	车辆位置/m	13.20	47.20	53.20	18.80	49.10	53.00	80.60
5	峰值/mm	-1.41	1.21	2.34	0.57	-2.93	-6.24	0.74
	车辆位置/m	13.20	47.30	53.20	20.10	49.10	53.00	80.30
8	峰值/mm	-1.39	1.26	2.32	0.62	-2.99	-6.21	0.80
	车辆位置/m	10.60	47.30	53.10	20.10	49.10	52.90	79.80

由表1可知,随着轮胎刚度的增大,第1跨位移略微增大,中跨位移也略微增大,跳车冲击下轮胎刚度对车桥耦合响应影响很小,可忽略不计。

2.3 不同悬架刚度下车桥耦合振动响应分析

其他车辆参数保持不变,仅更改悬架刚度,悬架刚度分别选取为 1×10^6 、 3×10^6 、 5×10^6 、 7×10^6 、 9×10^6 N/m,研究不同悬架刚度下的桥梁动态响应,计算结果如表2所示。

表2 5种不同悬架刚度下跨中位移最大峰值

Tab.2 Peak value of mid-span displacement with five different suspension stiffnesses

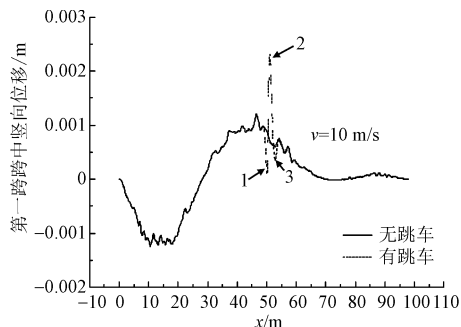
参数	$k_v / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$				
	1×10^6	3×10^6	5×10^6	7×10^6	9×10^6
第一跨最大 峰值/mm	2.208	2.294	2.385	2.234 6	2.279
中跨最大 峰值/mm	-5.91	-6.13	-6.36	-6.26	-6.10

由表2可知,随着悬架刚度的增加,跳车最大峰值呈先增大后减小的趋势,综合考虑车轮和悬架刚度来看,其对跳车作用下桥梁的响应影响并不明显。结合轮胎刚度影响分析,选择合适的悬架和车轮刚度,只对于跳车冲击下车内乘客的舒适性具有较大的影响。

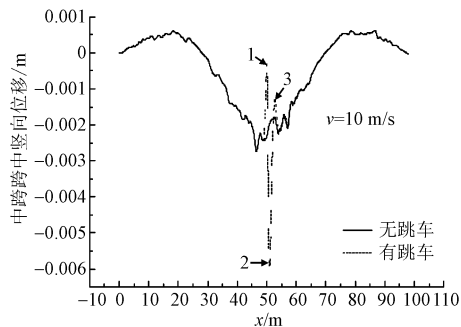
2.4 不同车速下车桥耦合振动响应分析

2.4.1 工况1

车辆以10 m/s匀速通过变截面连续梁桥,计算有、无跳车的位移响应,如图6所示。



(a) 第一跨跨中竖向位移



(b) 中跨跨中竖向位移

图6 车速10 m/s跳车冲击跨中竖向位移

Fig.6 Vertical displacement of mid-span under vehicle jumping impact with a speed of 10 m/s

由图6知,车速以10 m/s匀速过桥时,当车辆遇到障碍物将腾空,腾空后跨中位移将回弹趋于0值,达到下降峰值点1,车辆下落冲击桥面,达到最大峰值点2,第一跨最大峰值为车辆不发生跳车时的1.92倍,中跨最大峰值为不发生跳车时的2.43倍,后位移开始恢复,达到回稳峰值点3,后约53~57 m的范围内,2条位移曲线基本重合。

2.4.2 工况2

提高车速,车辆以20 m/s匀速通过变截面连续梁桥,计算有、无跳车的位移响应,如图7所示。

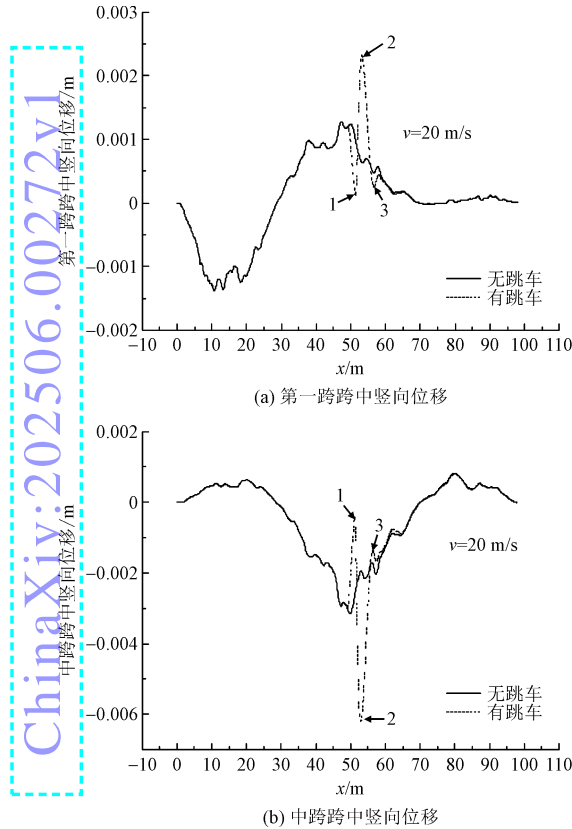


图7 车速20 m/s有、无跳车下桥梁跨中竖向位移
Fig.7 Vertical displacement of mid-span under vehicle jumping impact with a speed of 20 m/s

图7与图6对比能发现,随着车速增大至20 m/s时,2条位移曲线变得光滑了,曲线的变化规律与图6基本一致,当车辆行驶到52.9 m时,中跨位移达到最大峰值-6.19 mm,是不发生跳车时的1.96倍,车辆继续行驶到53.1 m时,第一跨位移达到最大峰值2.32 mm,是不发生跳车时的1.81倍。

2.4.3 工况3

继续提高车速,车辆以30 m/s匀速通过变截面

连续梁桥,计算有、无跳车的位移响应,如图8所示。

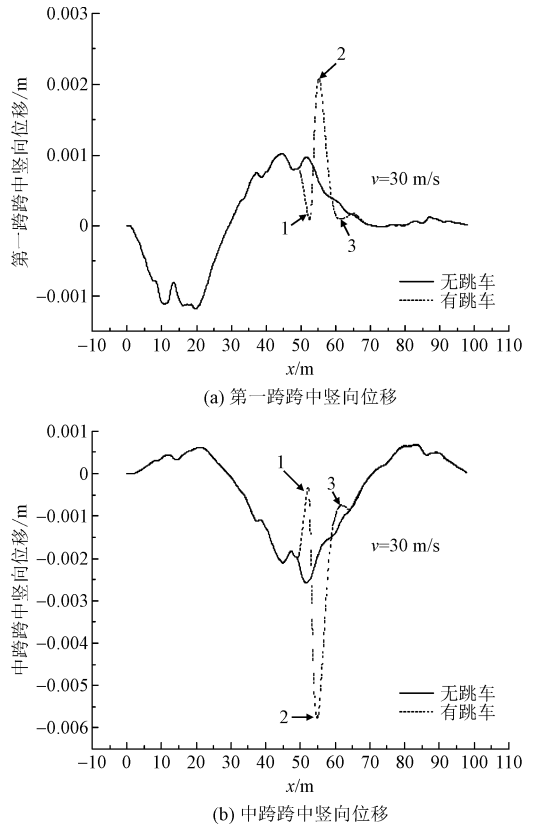


图8 车速30 m/s有、无跳车下桥梁跨中竖向位移
Fig.8 Vertical displacement of mid-span under vehicle jumping impact with a speed of 30 m/s

由图8可知,车速增加至30 m/s时,位移曲线变得更加光滑了,曲线变化规律与图7和图6一致,当车辆行驶到54.8 m时,中跨位移达到最大峰值-5.77 mm,是不发生跳车时的3.52倍,车辆继续行驶到55.2 m时,第一跨位移达到最大峰值2.08 mm,是不发生跳车时的1.89倍。

由图6~图8可知,随着车速增大,开始出现车辆腾空冲击桥面的位置远离中跨跨中,导致最大峰值点也远离中跨跨中。当发生跳车时,桥梁跨中位移响应随车速的增大出现先增大后减小的趋势,车速为20 m/s时,第一跨和中跨跨中位移峰值最大。因此,在此车速附近存在一个或数个由速度控制的共振点。

2.5 不同车质量下车桥耦合振动响应分析

车辆系统总质量分别设定为10、30、50 t,其他车辆参数不变, m_w 、 m_v 以1:4比例分配,研究不同车质量下桥梁的动态响应,计算结果如图9所示。

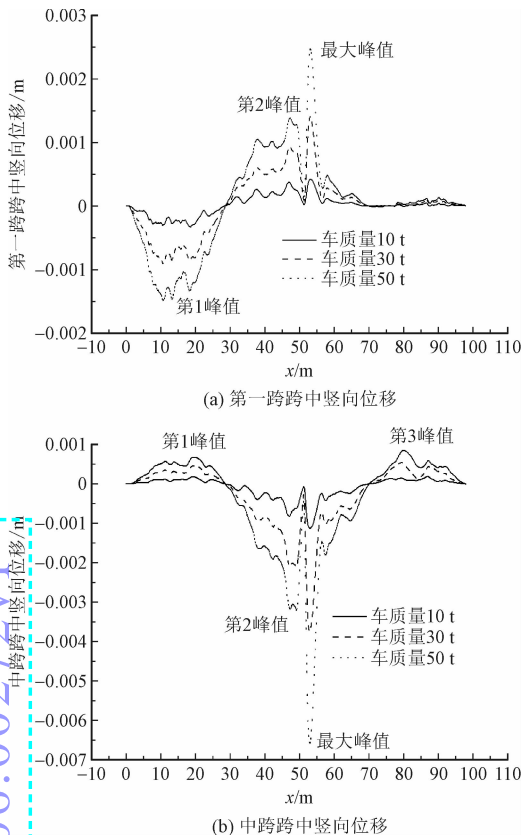


图9 不同车质量下桥梁跨中竖向位移

Fig.9 Vertical displacement of mid-span under different vehicle weights

由图9可知,车质量对不同跨的跨中位移响应均有显著影响,当车辆以20 m/s匀速通过桥梁第一跨时,随着车质量的增大,曲线波动幅度逐渐增大,位移响应逐渐增大,第一跨跨中竖向位移第1峰值最大增加至-1.54 mm,中跨跨中竖向位移第1峰值最大增加至0.67 mm。当车辆行驶到中跨跨中遇到障碍物发生跳车,在跳车冲击下,车辆越重,峰值越大,位移响应越剧烈,跨中竖向位移最大峰值的绝对值随着车质量增大近似线性增加。因此,跳车冲击作用下车桥耦合作用显著,位移响应显著增加。

3 结论

1)随着跳车高度的增加,回落峰值的出现时刻逐渐滞后,由于车辆腾空时间越长,桥梁恢复变形时间越长,腾空结束后落地位置逐渐滞后;当冲击结束车辆恢复正常行驶状态后,位移响应并不是马上恢复稳定,在一段时间内来回颠簸,且始终小于不考虑跳车情况下的位移,出现回稳峰值,这是由于桥梁发生位移变形后的回弹。

2)综合考虑车轮和悬架刚度来看,当选取3种不同轮胎刚度和悬架刚度时,对跳车冲击下桥梁位移响应影响不明显,可以忽略。

3)随着车速增加,桥梁位移响应先增大后减小。因此,路面平整度为B级,车速20 m/s下存在1个或数个由速度控制的共振点,车辆在该工况下发生跳车,桥梁竖向位移显著增加,峰值达到最大。

4)随着车质量增大,车桥耦合振动响应越明显,当车辆行驶至中跨跨中遇到障碍物发生跳车时,车辆越重,位移峰值越大,桥梁竖向振动响应越剧烈,最大峰值随车质量近似线性增加。因此,有必要在桥梁运营期间,采取措施对车辆限载。

参考文献:

- [1] 单德山,李乔.铁路曲线连续梁车桥耦合振动分析[J].中国铁道科学,2004,25(5):61-66.
SHAN Deshan, LI Qiao. Analysis of vehicle-bridge coupling vibration on railway curve continuous beam bridge [J]. China railway science, 2004, 25(5): 61-66 (in Chinese).
- [2] 王运金,桂水荣,陈水生.连续梁车桥耦合振动分析的数值解法[J].华东交通大学学报,2007,24(4):25-29.
WANG Yunjin, GUI Shuirong, CHEN Shuisheng. An efficient algorithm for coupled vibration analysis of continuous bridges under moving vehicle [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, 24(4): 25-29 (in Chinese).
- [3] 李忠.车辆荷载作用下连续梁桥动力响应仿真分析[J].交通科技,2012(5):31-33.
LI Zhong. Simulation analysis of dynamic response of continuous girder bridge under vehicle loads [J]. Transportation science & technology, 2012(5): 31-33 (in Chinese).
- [4] 杨宏印,陈志军,张海龙.弹性接触下车辆一变截面梁桥竖向振动分析[J].公路,2013(10):97-102.
YANG Hongyin, CHEN Zhijun, ZHANG Hailong. Vertical vibration of non-uniform continuous bridge travelled by vehicle considering elasticity contact [J]. Highway, 2013(10): 97-102 (in Chinese).
- [5] 杨宏印,曹鸿猷,陈志军,等.高速铁路变截面梁桥车致振动及徐变影响分析[J].土木工程与管理学报,2015,32(2):31-36.
YANG Hongyin, CAO Hongyou, CHEN Zhijun, et al. Analysis of vibration of non-uniform girder bridge under trains and influence of creep in high-speed railway [J]. Journal of civil engineering and management, 2015, 32(2): 31-36 (in Chinese).
- [6] 程永春,谭国金,刘寒冰,等.简支梁桥动态检测中跳车激励方法理论研究[J].振动工程学报,2009,22(5):474-479.
CHENG Yongchun, TAN Guojin, LIU Hanbing, et al. Research of vehicle bump excitation in dynamic detection of simple supported bridge [J]. Journal of vibration engineering, 2009, 22(5): 474-479 (in Chinese).

- [7] 殷立辉. 桥头跳车对简支梁桥动力性的影响[J]. 交通标准化, 2011(14):142-144.
YIN Lihui. Dynamic effect of simply supported girder bridges under influence of bridgehead vehicle-jumps[J]. Communications standardization, 2011(14):142-144 (in Chinese).
- [8] 殷立辉, 曹楠楠. 车桥耦合系统桥头跳车动力效应分析[J]. 黑龙江水专学报, 2010, 37(1):60-62.
YIN Lihui, CAO Nannan. Analysis of dynamic effect against vehicle-bridge coupled system under the influence of vehicle's bridge-head jumping[J]. Journal of Heilongjiang hydraulic engineering, 2010, 37(1):60-62 (in Chinese).
- [9] LIU N G, GAO W, SONG C M, et al. Interval dynamic response analysis of vehicle-bridge interaction system with uncertainty[J]. Journal of sound and vibration, 2013, 332(13):3218-3231.
- [10] LIU X W, LUO H Z, HUANG X C. Simulation of vehicle-bridge coupling vibration considering the transient jump of the wheel[J]. International journal of computational methods, 2008, 5(4):595-606.
- [11] ZHAO H L, HUI Z J, LIN J. Study on soft foundation settlement analysis and treatment of bridge-head[J]. Advanced materials research, 2013, 779-780:632-635.
- [12] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [13] ŞİMŞEK 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(1/2):235-253.
- [14] 李雪峰, 袁家冬, 茆尚权. 考虑几何非线性的变截面连续梁桥车桥耦合振动分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(6):2426-2433.
LI Xuefeng, YUAN Jiadong, MAO Shangquan. Vehicle-bridge coupled vibration analysis of continuous variable section bridge by considering geometric nonlinearity[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(6):2426-2433 (in Chinese).

(编辑 吕茵)

ChinaXiv:202506.00272v1