

文章编号:1006-1355(2018)02-0133-05

跳车冲击过程中的桥梁动态位移响应分析

周子骥, 高芳清, 米聪聪

(西南交通大学 力学与工程学院, 成都 610031)

摘要:以1/4简构车辆和含阻尼简支梁桥为对象,建立可描述跳车冲击过程的车桥耦合振动分析模型。采用Newmark- β 积分法获得车桥耦合系统振动响应的数值解。在不同高度、不同跳车位置以及不同车速等工况下,重点讨论跳车冲击过程中桥梁竖向动态位移响应的表现特征。数值分析表明:在文中考虑的跳车冲击工况下,桥梁竖向动态位移存在显著差异;不同跳车高度对动态位移峰值影响很小;不同跳车位置时的竖向动态位移表现各有不同,靠近跨中处,在桥梁前半跨发生跳车冲击对桥梁竖向动态位移值的影响明显大于后半跨,远离跨中处,桥梁前半跨动态位移值与后半跨相近,且最大竖向动态位移表现出滞后特征;不同车速对桥梁竖向位移值影响不同。

关键字:振动与波;车桥耦合振动;跳车冲击;竖向动态位移;跳车高度

中图分类号:O422.6

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.02.026

Analysis of Dynamic Displacement Response of Bridges under Vehicle's Impact

ZHOU Ziji, GAO Fangqing, MI Congcong

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With a quarter of the simplified vehicle and the damped simply supported girder bridge as the object, the vehicle-bridge coupling dynamic model is established for analyzing the impact process between the vehicle and the bridge. The numerical solution of vehicle-bridge coupling vibration response is obtained by using Newmark- β integral method. The displacement responses of the vehicles under the conditions of different impact heights, impact positions on the bridge and two vehicles impacts are derived. Characteristics of the vertical dynamic displacement of the bridge under the impact of the vehicle jumping are discussed. The numerical analysis shows that the different heights of the vehicle jolting have little influences on the peak value of the vertical displacement response. The vertical dynamic displacement of the bridge is different when the vehicle jumps at different positions. Near the middle of the span, the influence of the vehicle jumping on the vertical displacement of the front half-span is much larger than that of the rear half-span. While for the position far away from the middle of the span, the dynamic displacement value of the front half-span of the bridge is close to that of the rear half span. The maximum vertical dynamic displacement of the bridge demonstrates hysteresis characteristics. The influence of different speed on the vertical displacement of bridge is different.

Keywords: vibration and wave; vehicle-bridge coupling vibration; vehicle impact; vertical dynamic displacement; jumping height

随着现代交通事业的快速发展,公路车辆的运行荷载及速度均有大幅度提高,车辆对桥梁结构的动力作用显著增加^[1-2]。多年来众多学者运用车辆和桥梁动力学的知识对车-桥耦合振动问题进行了深入探讨。陈水生运用量纲分析法和相似原理推导出车-桥耦合振动缩尺模型相似比关系,通过模型试

验研究了跳车冲击下的车-桥耦合振动^[3]。XW Liu运用半解析法研究车轮瞬时跳跃时的车桥动力相互作用问题^[4]。刘钰采用Euler-Bernoulli桥梁模型、两个自由度的四分之一车辆模型,建立了车辆过桥时由于桥面不平度引起的跳车情况下的车桥耦合振动计算模型,通过数值模拟来研究跳车情况下桥梁的动力响应^[5]。但二者均忽略了车辆下落时的冲击作用。樊建平等于简单的车桥耦合模型,结合车桥耦合与非耦合动力学方程,考虑车辆在不平顺轨道曲线上运行时,当离心力大于车辆自重时发生的跳

收稿日期:2017-10-24

作者简介:周子骥(1991-),男,硕士研究生。研究方向为结构振动与控制。

E-mail: 1090258416@qq.com

车情况^[6]。但此情况是基于不平顺轨道导致的随机跳车,有较大偶然性。因此,有必要深入研究跳车冲击下的车-桥耦合振动。

跳车冲击过程是指车辆通过桥面时,由于障碍物导致桥面存在高度差而使车辆发生起跳和冲击过程。作者结合简支梁桥特点,考虑车辆经过桥面时发生起跳和冲击过程,建立跳车冲击过程时的车-桥耦合系统振动方程。考虑不同起跳高度、冲击位置和车辆速度,将桥梁和车辆分别考虑为2个接触力和位移相互协调的随时间变化的子系统。采用Newmark- β 隐式积分法计算^[7]。最后运用MATLAB编程获得微分方程数值解。讨论跳车发生时不同的跳车高度、桥面冲击位置以及车辆速度等工况下车辆对桥梁竖向位移的影响。

1 跳车冲击过程的车桥耦合系统模型

结构振动反应中阻尼主要来源包括结构材料内摩擦、干摩擦、结构构件的塑性耗能等。材料内阻尼是指由结构材料的分子之间或晶粒界面之间的错动、滑移等引起的耗散能量,是弹性结构中阻尼的主要来源之一,在结构振动中不可忽略^[8]。因此采用1/4车辆模型动荷载与含阻尼简支梁,简化系统如图1所示。

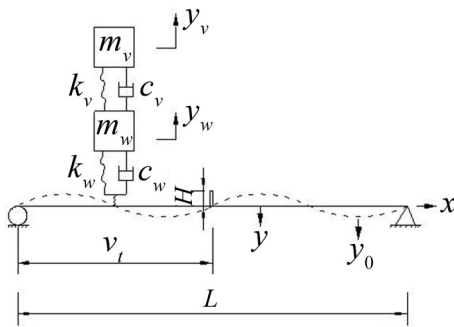


图1 车桥耦合系统模型

图1中 y_w 、 y_v 与 y 分别表示车轮、车体和桥的位移; m_w 、 m_v 分别为车轮及底盘和车体的质量; c_w 、 c_v 分别是车轮和车体的阻尼; k_w 、 k_v 分别是车轮和车体的刚度。桥梁长度为 L , 单位长度质量为 m , 结构阻尼系数为 η , 抗弯刚度为 EI 。 H 为障碍物高度。

1.1 车辆与桥面接触

车辆轮胎与桥面保持接触时,系统中车-桥耦合方程为

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

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

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \eta EI \frac{\partial^5 w(x,t)}{\partial x^4 \partial t} + m \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = [m_v \ddot{y}_v + m_w \ddot{y}_w + (m_v + m_w)g] \delta(x - vt) \quad (3)$$

车辆作用下的桥梁竖向振动按照假设模态展开为

$$w(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) \quad (4)$$

其中 $\phi_i(x)$ 为均匀简支梁的模态函数, $\phi_i(x) = \sqrt{2/mL} \sin(i\pi x/L)$, $q_i(t)$ 是第 i 阶模态响应。把式(4)代入式(3)得

$$m \phi_i(x) \ddot{q}_i(t) + \eta EI \phi_i^4(x) \dot{q}_i(t) + EI \phi_i^4(x) q_i(t) = [m_v \ddot{y}_v + m_w \ddot{y}_w + (m_v + m_w)g] \delta(x - vt) \quad (5)$$

由 $\phi_i(x)$ 正交性,可以得到

$$\ddot{q}_i(t) + \eta w_i^2 \dot{q}_i(t) + w_i^2 q_i(t) = [m_v \ddot{y}_v + m_w \ddot{y}_w + (m_v + m_w)g] \phi_i(vt) \quad (6)$$

式中: $w_i = (\frac{i\pi}{L})^2 \sqrt{\frac{EI}{m}}$, 车体和车轮的频率与阻尼

比分别是 $w_v = \sqrt{\frac{k_v}{m_v}}$, $w_w = \sqrt{\frac{k_w}{m_w}}$, $2\xi_v w_v = \frac{c_v}{m_v}$,

$2\xi_w w_w = \frac{c_w}{m_w}$, 令 $m_v + m_w = m_t$, 将上述公式代入式

(1)、式(2)、式(6)中得到

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + K q = Q \quad (7)$$

其中: M 、 C 和 K 分别为 $(i+2)$ 阶质量、阻尼和刚度矩阵, Q 为 $(i+2)$ 阶荷载向量, q 为 $(i+2)$ 阶向量。表达式如下

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ m_v/m_w & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ -m_v \phi_1 & -m_w \phi_1 & 1 & 0 & \cdots \\ -m_v \phi_2 & -m_w \phi_2 & 0 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 2\xi_v w_v & -2\xi_v w_v & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 2\xi_w w_w & 2\xi_w w_w \phi_1 & 2\xi_w w_w \phi_2 & \cdots \\ 0 & 0 & \eta w_1^2 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \eta w_2^2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} w_v^2 & -w_v^2 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & w_w^2 & w_w^2 \phi_1 & w_w^2 \phi_2 & \cdots \\ 0 & 0 & w_1^2 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & w_2^2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0 \\ -2\xi_w w_w \dot{y}_0 - w_w^2 y_0 \\ m_t g \phi_1 \\ m_t g \phi_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad q = \begin{bmatrix} y_v \\ y_w \\ q_1 \\ q_2 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

1.2 车辆离开桥面过程

跳车即车辆轮胎受到障碍物影响而腾起,与桥面发生脱离,即 $t_s \leq t < t_s + t_L$ 。 t_L 表示车辆离开桥面腾空时间。系统中车-桥的非耦合方程为

$$m_v \ddot{y}_v + c_v (\dot{y}_v - \dot{y}_w) + k_v (y_v - y_w) = 0 \quad (8)$$

$$m_v \ddot{y}_v + m_w \ddot{y}_w = 0 \quad (9)$$

$$\ddot{q}_i(t) + \eta w_i^2 \dot{q}_i(t) + w_i^2 q_i(t) = 0 \quad (10)$$

写成矩阵形式

$$\mathbf{M}_2 \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_2 \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_2 \mathbf{q} = \mathbf{Q}_2 \quad (11)$$

其中: \mathbf{M}_2 、 \mathbf{C}_2 、 \mathbf{K}_2 矩阵和 \mathbf{Q}_2 、 \mathbf{q} 向量分别为

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ m_v/m_w & 1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 2\xi_v w_v & -2\xi_v w_v & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & \eta w_1^2 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \eta w_2^2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} w_v^2 & -w_w^2 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & w_1^2 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & w_2^2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \mathbf{q} = \begin{bmatrix} y_v \\ y_w \\ q_1 \\ q_2 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

跳车持续时间为 t_L

$$y + y_0 + y_w + H - 0.5g \cdot t_L^2 \geq 0$$

2 路面不平顺模型

路面不平度是服从高斯概率分布且具有零均值的均匀随机场。国内外学者通常采用路面功率谱密度函数(PSD)来表示路面不平度^[9]。即

$$G_r(n) = G_r(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \quad (12)$$

其中: n 为空间频率, 单位为 m^{-1} , n_0 是参考空间频率, 一般 $n_0 = 0.1 m^{-1}$; $G_r(n_0)$ 为路面不平顺系数, 单位是 m^2/m^{-1} , w 为频率指数, 一般 $w=2.0$ 。

根据文献[5], 桥上路面不平顺可以描述为一个高斯随机过程。采用 Fourier 逆变换法将路面功率谱生成随机激励时域模型为

$$y_0(x) = \sum_{n=1}^N \sqrt{4\pi G_r(n_i) \Delta n} \cos(2\pi n_i x + \theta_i) \quad (13)$$

式中: θ_i 为 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机数; n_i 是空间频率, $G_r(n_i)$ 为路面功率谱函数。

ISO/TC108/SC2N67 中提出按路面功率谱密度函数可以把路面不平顺分为 8 级。其中 A 级路面的不平顺系数 $G_r(n_i) = 16 \times 10^{-6} m^2/m^{-1}$ 。

3 方程求解

本文采用 Newmark- β 积分法计算。该积分法是一种将线性加速度法普遍化的方法, 在位移计算中不要求解速度、加速度等中间值, 因此计算更为简单、快捷。Newmark- β 法假定

$$\dot{X}_{n+1} = \dot{X}_n + [(1-\beta)\ddot{X}_n + \beta\ddot{X}_{n+1}]\Delta t \quad (14)$$

$$X_{n+1} = X_n + \dot{X}_n \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \gamma\right)\ddot{X}_n + \gamma\ddot{X}_{n+1}\right]\Delta t^2 \quad (15)$$

式中: Δt 为时间积分步长, β 、 γ 为控制方程的独立参数, 下标 n 代表 $t = n\Delta t$ 瞬时, $n+1$ 表示 $t = (n+1)\Delta t$ 瞬时。当 $\beta \geq 0.5$, $\gamma \geq 0.25(0.5 + \beta^2)$ 时, Newmark- β 积分法是无条件稳定的。因此, 本文取 $\beta = 0.5$, $\gamma = 0.25$ 。

在 $t = (n+1)\Delta t$ 瞬时, 如果车辆未遇障碍物时, 即当 $t < t_s$, 将 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{Q} 代入微分方程式(7), 可得

$$\ddot{X}_{n+1} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{P}_{n+1} \quad (16)$$

其中:

$$\mathbf{P}_{n+1} = \mathbf{Q}_{n+1} - \mathbf{K}_{n+1} - (\mathbf{C}_{n+1} + \mathbf{K}_{n+1}\Delta t)\dot{X}_n - [(1-\beta)\mathbf{C}_{n+1} + \left(\frac{1}{2} - \gamma\right)\mathbf{K}_{n+1}\Delta t]\ddot{X}_n - [\mathbf{C}_{n+1}\beta + \mathbf{K}_{n+1}\Delta t]\ddot{X}_{n+1}\Delta t$$

在 $t = (n+1)\Delta t$ 瞬时, 如果车辆遇上障碍物而腾起, 即当 $t_s \leq t < t_s + \Delta t$, 则将 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{Q} 代入微分方程式(11), 可得

$$\ddot{X}_{n+1} = \mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{P}_{n+1} \quad (17)$$

其中:

$$\mathbf{P}_{n+1} = \mathbf{Q}_{2,n+1} - \mathbf{K}_{2,n+1} - (\mathbf{C}_{2,n+1} + \mathbf{K}_{2,n+1}\Delta t)\dot{X}_n - [(1-\beta)\mathbf{C}_{2,n+1} + \left(\frac{1}{2} - \gamma\right)\mathbf{K}_{2,n+1}\Delta t]\ddot{X}_n - [\mathbf{C}_{2,n+1}\beta + \mathbf{K}_{2,n+1}\Delta t]\ddot{X}_{n+1}\Delta t$$

在 $t = (n+1)\Delta t$ 瞬时, 如果车辆下落冲击桥面, 即当 $t = t_s + t_L$, 则将 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{Q} 代入微分方程式(7), 并需考虑车辆自由落下的速度 gt_L 。可得

$$\ddot{X}_{n+1} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{P}_{n+1} \quad (18)$$

其中:

$$\mathbf{P}_{n+1} = \mathbf{Q}_{n+1} - \mathbf{K}_{n+1} - (\mathbf{C}_{n+1} + \mathbf{K}_{n+1}\Delta t)(\dot{X}_n - gt_L) - [(1-\beta)\mathbf{C}_{n+1} + \left(\frac{1}{2} - \gamma\right)\mathbf{K}_{n+1}\Delta t]\ddot{X}_n - [\mathbf{C}_{n+1}\beta + \mathbf{K}_{n+1}\Delta t]\ddot{X}_{n+1}\Delta t$$

在 $t = (n+1)\Delta t$ 瞬时, 如果车辆下落与桥面接触后, 即当 $t > t_s + \Delta t$, 将 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{Q} 代入微分方程式(7), 可得

$$\ddot{X}_{n+1} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{P}_{n+1} \quad (19)$$

其中:

$$\mathbf{P}_{n+1} = \mathbf{Q}_{n+1} - \mathbf{K}_{n+1} - (\mathbf{C}_{n+1} + \mathbf{K}_{n+1}\Delta t)\dot{X}_n - [(1-\beta)\mathbf{C}_{n+1} + \left(\frac{1}{2} - \gamma\right)\mathbf{K}_{n+1}\Delta t]\ddot{X}_n - [\mathbf{C}_{n+1}\beta + \mathbf{K}_{n+1}\Delta t]\ddot{X}_{n+1}\Delta t$$

4 算例与分析

桥的参数为: $EI = 2.05 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $m = 9.36 \times 10^3 \text{ kg/m}$, $L = 24 \text{ m}$ 。车辆的参数为: $m_v = 15670 \text{ kg}$, $m_w = 2530 \text{ kg}$, $C_v = 10000 \text{ Ns/m}$, $C_w = 5000 \text{ Ns/m}$, $k_v = 1.8 \times 10^6 \text{ N/m}$, $k_w = 3.5 \times 10^6 \text{ N/m}$ 。结构阻尼参数 $\eta = 0.001$ 。

4.1 不同起跳高度时的跳车冲击过程计算结果及分析

桥面不平顺取 A 级路面不平度,速度取 $v=10$ m/s。考虑车辆起跳高度 $H=0.03、0.05、0.1$ m 时,冲击点选择为跨中。比较在不同起跳高度的情况下,跳车冲击对桥面的竖向动态位移响应的影响。

跳车冲击过程对桥梁竖向动态位移响应有着显著影响,其位移峰值均超过 8 mm。随着起跳高度的增加,桥梁竖向动态位移随之增加,但是增加幅度较小。起跳高度 $H=0.05$ m 与 $H=0.1$ m 和 $H=0.03$ m 与 $H=0.05$ m 时,桥梁竖向动态位移增加幅度均不超过 0.5 mm;

因此,虽然跳车冲击对桥梁的影响非常显著,但是不同起跳高度对桥梁竖向位移响应的影响很小。

4.2 不同起跳位置的车辆冲击过程计算结果及分析

当 $v=10$ m/s 时,考虑在桥面不同位置处发生跳车冲击过程。比较在不同等级路面、桥面冲击位置不同的情况下,跳车冲击对桥面的竖向动态位移响应的影响,见图 2。

车辆过桥计算结果表明:发生跳车冲击的位置对桥梁竖向动态位移影响有差异。在桥梁跨中处发生跳车冲击,其对桥梁竖向动态位移影响明显,达到

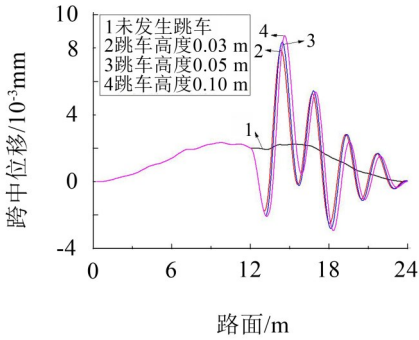


图 2 不同跳车高度工况下桥梁竖向位移响应

峰值;但是其峰值并不在桥面跨中处。桥梁前半跨跨中附近发生跳车冲击对桥梁竖向动态位移值的影响明显大于后半跨;远离跨中处,桥梁前半跨竖向位移值与后半跨相近。此外,在桥梁上 16 m 以后发生跳车冲击,其冲击作用对桥梁最大竖向动态位移值影响无明显差异。最后,跳车冲击作用对桥梁最大竖向动态位移值有滞后作用,其峰值没有立刻表现出来,而是向后推移了一段距离。

4.3 不同车辆速度工况下的跳车冲击过程计算结果及分析

桥面不平顺取 A、C 级路面不平度,障碍物高度 $H=0.03$ m,车辆速度 $v=10、20、30$ m/s 时,考虑在桥梁

表 1 A 级桥面不同位置发生跳车时桥梁最大竖向位移值/mm

起跳高度 /m	6 m 处	8 m 处	10 m 处	12 m 处	14 m 处	16 m 处	18 m 处
0.03	5.9	5.6	7.2	8.6	5.6	4.7	4.7
0.05	6.1	5.7	7.4	9.6	6.2	4.7	4.7
0.10	5.4	5.8	6.9	9.8	6.8	4.7	4.7

表 2 桥梁最大竖向位移值对应的 A 级桥面位置/m

起跳高度 /m	6 m 处	8 m 处	10 m 处	12 m 处	14 m 处	16 m 处	18 m 处
0.03	10.1	11.9	11.6	13.5	15.3	11.0	11.0
0.05	10.0	11.9	11.5	13.4	15.2	11.0	11.0
0.10	10.0	11.9	11.4	13.2	15.1	11.0	11.0

表 3 C 级桥面不同位置发生跳车时桥梁最大竖向位移值/mm

起跳高度 /m	6 m 处	8 m 处	10 m 处	12 m 处	14 m 处	16 m 处	18 m 处
0.03	6.1	5.0	7.4	9.3	5.4	6.0	6.0
0.05	6.2	5.1	7.4	10.8	6.0	6.0	6.0
0.10	5.4	5.3	6.9	11.0	6.7	6.0	6.0

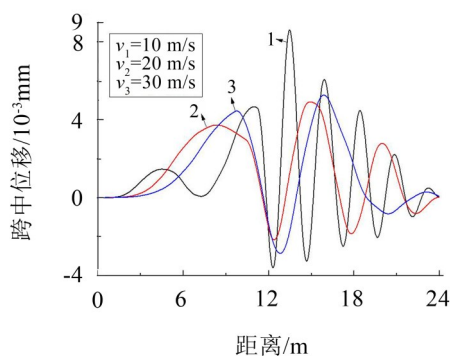
表 4 桥梁最大竖向位移值对应的 C 级桥面位置/m

起跳高度 /m	6 m 处	8 m 处	10 m 处	12 m 处	14 m 处	16 m 处	18 m 处
0.03	10.1	12	11.6	13.5	15.2	10.8	10.8
0.05	9.9	11.6	11.4	13.4	10.7	10.7	10.7
0.10	9.8	11.8	11.4	13.1	15.0	10.7	10.7

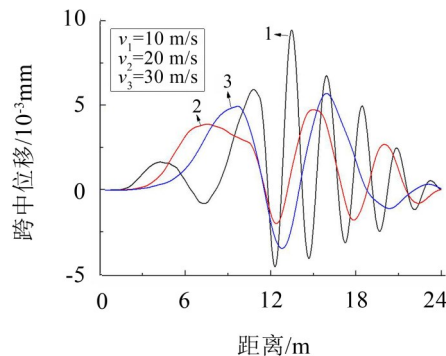
跨中处发生跳车冲击现象。比较不同车速的工况下,跳车冲击对桥面的竖向动态位移响应的影响。

在不同速度工况下的跳车冲击过程计算结果表明:未发生跳车时,车辆速度越大,造成桥梁竖向位移值越大。当发生跳车时,车速 $v=10$ m/s造成的桥

梁竖向位移值最大, $v=20$ m/s造成的竖向位移值最小,两者差值超过4 mm。跳车冲击后,各车速对桥梁竖向位移值影响差异不显著。路面不平顺度越大,车辆引起的桥梁竖向位移值越大,见图3。



(a) A级路面



(b) C级路面

图3 不同速度工况下桥梁竖向位移响应

5 结 语

车辆过桥面发生跳车冲击时,在不同的跳车高度、桥面发生跳车的位置和不同车速工况下,车辆对桥梁冲击作用有显著差异。

(1) 跳车冲击对桥梁竖向动态位移值有明显影响,其值是不考虑跳车冲击的数倍,但是不同跳车高度对桥梁竖向动态位移值影响很小。

(2) 桥面发生跳车冲击的不同位置对桥梁竖向动态位移值有显著差异。在桥梁前半跨跨中附近发生跳车冲击对桥梁竖向动态位移值的影响明显大于后半跨;远离跨中处,桥梁前半跨动态位移值与后半跨相近;造成桥梁最大竖向动态位移值的冲击点是桥梁跨中位置,但是其峰值却不在桥面跨中;在跳车冲击作用下,桥梁最大竖向动态位移表现滞后特征。

(3) 不同车辆速度对桥梁动态竖向位移值影响不同,并且需要结合车辆运行的不同状态综合考虑。

(4) 路面不平顺度同样会影响车辆对桥梁的作用。

因此,防止跳车冲击、对桥梁跨中附近障碍物重点清理以及加强桥面跨中后端附近的桥梁安全系数是保证桥梁结构安全的重要措施。同时,在研究车-桥耦合动力响应问题时,应该同时考虑车辆的不同

运行状态与速度。

参考文献:

- [1] 夏禾. 车桥耦合振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 王贵春, 陈卫丽. 基于车桥耦合振动的大跨度斜拉桥冲击系数研究[J]. 公路工程, 2015(6): 119-124.
- [3] 陈水生, 魏方龙, 桂水荣. 车桥耦合模型试验中试验模型特性的确定与实测分析[J]. 中外公路, 2013, 33(3): 89-94.
- [4] LIU X W, XIE J, WU C, et al. Semi-analytical solution of vehicle - bridge interaction on transient jump of wheel[J]. Engineering Structures, 2008, 30(9): 2401-2412.
- [5] 刘钰, 范晨光, 高芳清, 等. 考虑跳车情况下的车-桥耦合振动研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(2): 141-145.
- [6] 樊建平, 曹高威, 胡隼, 等. 跳车冲击力作用下车桥耦合动力学数值分析[J]. 固体力学学报, 2016, 37(6): 553-558.
- [7] 王海波, 陈伯望, 余志武. 结构动力方程Newmark- β 方法递推简化分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(3): 47-52.
- [8] 夏修身, 陈兴冲, 李建中. 隔震桥梁合理结构阻尼模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(1): 140-145.
- [9] 中华人民共和国机械工业部. GB7031-1986 车辆振动输入路面平度表示方法[S]. 1986.