

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.153

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 曲线连续梁桥在车辆制动作用下的动力响应

陈水生, 罗浩, 桂水荣

(华东交通大学土木建筑学院, 南昌 330013)

**摘要:**以某一匝道公路曲线连续箱梁桥为例, 分析了该类桥梁的空间车桥耦合振动问题。用 ANSYS 软件模拟梁桥, 选用典型的三轴空间车辆模型, 采用模态综合法编制公路曲线车桥耦合振动响应 MATLAB 程序, 获得了车辆制动作用下曲线连续梁桥的动力响应及冲击系数, 研究了初速度、制动位置、制动力上升时间、桥面平整度等参数对冲击系数的影响。结果表明: 车辆制动时, 主梁最大挠度、挠度和内力冲击系数没有随初速度的增大而单调递增或递减, 但均明显大于车辆以相同初速度匀速行驶时的结果, 且可能超过规范值。在桥前半跨内制动时, 挠度和跨中剪力冲击系数大于在后半跨度内制动情况, 同时, 当车辆制动位置大于半跨且越靠近支点时, 车辆制动时挠度和内力冲击系数越接近匀速时的结果。随着曲率半径的增大, 桥梁的挠度、弯矩和扭矩冲击系数逐渐减小, 而剪力冲击系数逐渐增大; 弯桥的挠度、弯矩和扭矩冲击系数大于直线桥结果, 紧急制动易于加剧桥梁的振动。

**关键词:**曲线连续梁桥; 车辆制动; 动力响应; 冲击系数; Runge-Kutta 算法

**中图分类号:** U443.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2020)02-0095-12

## Dynamic response of curved continuous girder bridge under vehicle braking

Chen Shuisheng, Luo Hao, Gui Shuirong

(School of Civil Engineer and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China)

**Abstract:** The coupling vibration of space vehicle-bridge of this kind of bridge was analyzed basing on a curved continuous box girder bridge on an ramp. The ANSYS software was used to simulate the beam bridge, and the typical three-axis space vehicle model was selected. The dynamic response and impact of the curved continuous box girder bridge under the braking effect of the vehicle were obtained by the MATLAB program of the highway curve using the modal comprehensive method. And the influence of initial speed, braking position, braking rising time and bridge deck smoothness on dynamic impact coefficient was studied. The results showed that the maximum deflection, deflection and internal force impact coefficient of the main girder do not increase or decrease monotonously with the increase of initial speed, but they are obviously larger than the results when the vehicle runs at the same initial speed and may exceed the

**收稿日期:** 2019-05-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(51468018); 江西省自然科学基金(20181BAB206043, 20181BAB206041)

**作者简介:** 陈水生(1968-), 男, 教授, 博士, 主要从事土木工程结构振动及控制、地震响应分析及减隔震研究, E-mail: Shschen@126.com.

**Received:** 2019-05-29

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51468018); Jiangxi Natural Science Foundation (No. 20181BAB206043, 20181BAB206041)

**Author brief:** Chen Shuisheng (1968-), professor, PhD, main research interests: structural vibration and control of civil engineering, seismic response analysis and seismic isolation research, E-mail: Shschen@126.com.

standard value. The impact coefficient of deflection and mid-span shear force in front half-span braking is greater than that in the back half-span braking. At the same time, when the braking position of the vehicle is greater than half-span and closer to the fulcrum, the impact coefficient of deflection and internal force is closer to the result of uniform speed braking. With the increase of curvature radius, the impact coefficient of deflection, bending moment and torsion of bridge decreases gradually, while the impact coefficient of shear force increases gradually. In addition, the impact coefficients of deflection, bending moment and torsion curved bridges are larger than those of straight bridges and emergency braking tends to aggravate bridge vibration.

**Keywords:** curved continuous beam bridge; vehicle braking; dynamic response; impact coefficient; Runge-Kunta algorithm

近年来,随着公路建设、城市基础设施和交通系统的迅速发展,越来越多曲线桥应用于高速公路的跨河联通、大型城市立交匝道和桥梁桥头引道中,因此,车辆作用下曲线梁桥振动问题值得关注。

目前,车桥耦合振动问题的研究大多数假设车辆在桥上匀速行驶,而在实际情况中,由于路线线形的变化等因素,车辆一般都是变速行驶的。当变速车辆行驶在桥上时,系统受力和积分时间步长不断改变<sup>[1]</sup>,这使得车桥耦合问题变得更为复杂。研究表明,在进行复杂的车桥系统动力研究时,采用更为精确的二维或三维模型对结果准确性有明显的影 响<sup>[2-3]</sup>。Law 等<sup>[4]</sup>通过建立静刹车模型,分析了当车辆在不同桥面平整度下刹车时简支梁桥的动力响应变化规律。Ju 等<sup>[5]</sup>采用 1/2 车辆模型进行研究,提出了适用于分析变速车辆作用下直线梁车桥耦合系统动力响应的有限元方法。Deng 等<sup>[6-7]</sup>基于三维车桥振动模型,研究了汽车制动时简支梁桥与预应力混凝土简支梁桥的动力响应和冲击系数及其影响因素。方志等<sup>[8]</sup>采用车辆变速行驶时路面随机激励的时域模型,建立了二维车桥耦合系统无量纲运动微分方程。殷新锋等<sup>[9]</sup>将沥青混凝土面体系模拟成 kelvin 模型支承的无限长梁,发现车辆刹车产生的动力冲击系数可能会超过规范值。邵元等<sup>[10]</sup>采用三维多自由度车辆模型,并考虑路面不平度影响,对钢管混凝土拱桥结构进行变速车辆的车桥耦合模拟,分析了变速车辆荷载对吊杆产生的轴向和弯曲作用的影响。颜轶航等<sup>[11]</sup>以斜拉桥为桥梁研究对象,分析了列车制动力作用下的梁轨动力响应,研究了制动力作用位置、制动距离和斜拉桥结构体系等影响参数。

上述研究大多数是以简支梁桥等直线桥为研究对象,而对于曲线梁桥在制动作用下的动力响应研究较少,因此,有必要对曲线梁桥进行相关研究。笔者通过建立车辆制动作用下的三维有限元车桥模型进行研究,选用典型的三轴重车模型和工程实例中曲线桥的空间模型,研究初速度、制动位置、制动上升时间、桥面平整度等参数对曲线梁桥动力响应的影响,并将中国现行规范中的冲击系数值作为参照,对计算结果作对比分析。

## 1 车桥耦合振动分析模型

### 1.1 车辆模型

车辆模型选用典型的三轴重车,将其简化为车体、车轴、轮胎和弹簧式悬架支撑系统组成的空间体系。该车模型具有 16 自由度,包括车体竖向和横向振动、纵向俯仰和侧翻振动,其中,悬架支撑系统和轮胎均模拟为线弹性弹簧和阻尼器且质量集中在车轴上。三维车辆模型如图 1 所示。车辆动力特性参数同文献[12]。假定车辆运动过程中各集中质量所受的离心力均作用于质心处。

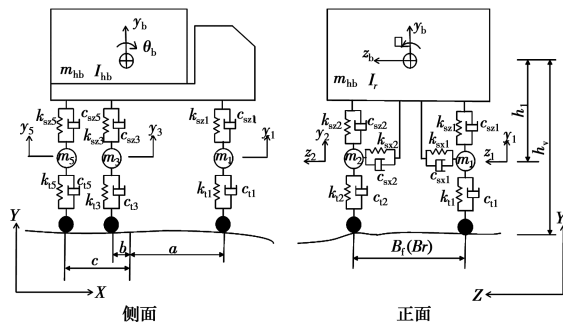


图 1 车辆计算模型简图

Fig. 1 Vehicle calculation model diagram

根据 D'Alembert 原理,建立车辆振动方程为

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Z}} + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Z}} + \mathbf{K}_v \mathbf{Z} = \mathbf{F}_v^{\text{int}} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{F}_v^{\text{int}}$ 为车辆振动引起的荷载向量; $\mathbf{M}_v$ 、 $\mathbf{C}_v$ 、 $\mathbf{K}_v$ 分别为车辆系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\mathbf{Z} = \{y_1 \ z_1 \ \dots \ y_6 \ z_6 \ y_b \ z_b \ \theta_b \ \phi\}^T$ 为车辆各自由度向量。

当车辆以速度  $v(t)$  行驶在曲率半径为  $R$  的曲线梁桥时,荷载向量中需考虑离心力,其中车体和轮轴质心处产生的离心力  $F_c(t)$  分别为

$$\mathbf{F}_c(t) = \begin{cases} -m_{\text{hb}} \frac{v(t)^2}{R_{\text{hb}}} \\ -m_i \frac{v(t)^2}{R_i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R_{\text{hb}}$ 和  $R_i$ 分别为车体重心和轮轴质心所处曲线的半径。由式(2)可知,车辆车速随时间变化而变化,而车体和轮轴所受离心力与车速的二次方成正比。

## 1.2 桥梁模型

在笛卡尔坐标系下的桥梁运动方程可表示为

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_b \mathbf{U} = -\mathbf{F}_{\text{bv}}^{\text{int}} - \mathbf{F}_g \quad (3)$$

式中: $\mathbf{F}_{\text{bv}}^{\text{int}}$ 为车辆振动时各车轮作用于桥面板的荷载向量; $\mathbf{F}_g$ 为车辆自重产生的荷载向量; $\mathbf{U}$ 为单元节点位移向量; $\mathbf{M}_b$ 、 $\mathbf{C}_b$ 、 $\mathbf{K}_b$ 分别为桥梁系统的质量、阻尼及刚度矩阵。

采用模态综合法,取  $r$  阶模态,式(3)可转换成模态方程,即

$$\mathbf{I} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{X} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Omega} \mathbf{q} = -\mathbf{\Phi}^T (\mathbf{F}_{\text{bv}}^{\text{int}} + \mathbf{F}_g) \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix}_{r \times r}$ ;  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & 2\xi_i \omega_i & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix}_{r \times r}$ ;  $\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & \omega_i^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix}_{r \times r}$ ;  $\mathbf{\Phi}$  为  $r$  阶模态向量矩阵; $\xi_i$  为第  $i$  阶阻尼比; $\omega_i$  为第  $i$  阶自振频率; $\mathbf{q}$  为模态广义坐标列阵。

## 1.3 模拟桥面平整度

一般将桥面平整度作为空间频率函数,视其为零均值的平稳随机过程<sup>[13]</sup>。通过傅里叶变换后,以此谱密度函数采用谐波叠加法模拟得到桥面平整度函数,则桥面平整度样本可表示为<sup>[14]</sup>

$$r(x) = \sum_{j=1}^m \sqrt{2} A_j \sin(2\pi x n_{\text{mid},j} + \theta_j) \quad (5)$$

式中: $A_j$ 为每段频率对应的平整度幅值; $x$ 为车辆行驶方向位移; $n_{\text{mid},j}$ 为每段空间频率的中值; $\theta_j$ 为均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 上相互独立的随机变量; $m$ 为空间频率的划分段数。国际标准化组织将路面平整度分为 A 到 E 共 5 个等级<sup>[15]</sup>。

## 1.4 车桥耦合模型

假定车辆在行驶过程中,车轮与桥面始终保持接触状态,则可通过车轮与桥面接触处的相互作用力和位移变形协调条件将车辆与桥梁两子系统进行相关联。同时,考虑桥面平整度的影响,可得第  $i$  个车轮与桥梁之间的相互作用力为

$$F_{\text{vi}}^{\text{int}} = -F_{\text{bv},i}^{\text{int}} = k_{ti} d_{\text{vb},i} + c_{ti} \dot{d}_{\text{vb},i} \quad (6)$$

$$d_{\text{vb},i} = z_i - r_i - \bar{w}_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (7)$$

式中: $d_{\text{vb},i}$ 为第  $i$  个车轮相对于桥面的竖向位移; $z_i$ 为第  $i$  个车轮处的车轮竖向位移; $r_i$ 为第  $i$  个车轮处的桥面平整度幅值; $\bar{w}_i$ 为第  $i$  个车轮处桥面初始位移量; $k_{ti}$ 为第  $i$  个车轮的刚度, $c_{ti}$ 为第  $i$  个车轮的阻尼。

采用空间单元模拟桥梁模型,用壳单元模拟桥面板及铺装层,当车辆在桥面上行驶时,需要通过插值函数将车轮处作用力等效到桥梁单元节点上,其插值函数  $N$  可表示为<sup>[16]</sup>

$$\mathbf{N} = [N_i \ N_j \ N_m \ N_n] \quad (8)$$

而

$$\mathbf{N}_s = \frac{1}{8} [(\xi_0 + 1)(\eta_0 + 1)] (2 + \xi_0 + \eta_0 - \xi^2 - \eta^2) \cdot \\ b\eta_1 (\xi_i + 1)(\eta_0 + 1)^2 (\eta_0 - 1) - \\ a\xi_i (\xi_i + 1)^2 (\xi_0 - 1)(\eta_0 + 1) = \\ [N_{ys} \ N_{\hat{z}s} \ N_{\hat{r}s}] \quad (s = i, j, m, n) \quad (9)$$

式中: $\xi = (x - x_c)/a$ ;  $\eta = (z - z_c)/b$ ;  $\xi_0 = \xi^2$ ;  $\eta_0 = \eta^2$ ;  $x_c$ 、 $z_c$ 为单元中心的坐标; $a$ 、 $b$ 为单元长度。

经等效后,第  $i$  车轮相对于桥面的位移及速度可以表示为

$$d_{\text{vb},i} = z_i - r_i - N_{bi} \mathbf{\Phi} \mathbf{q} \quad (10)$$

$$\dot{d}_{\text{vb},i} = \dot{z}_i - (\dot{r}_i + v N_{bi,x} \mathbf{\Phi} \mathbf{q} + N_{bi} \mathbf{\Phi} \dot{\mathbf{q}}) \quad (11)$$

式中: $N_{bi}$ 为第  $i$  车轮插值函数。

考虑桥面平整度后,将式(10)和式(11)代入式(6),可得车辆作用于桥梁的惯性力为

$$\mathbf{F}_v^{\text{int}} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -k_{t1}(z_1 - r_1 - \mathbf{N}_{b1}\Phi\mathbf{q}) - c_{t1}(\dot{z}_1 - \dot{r}_1 - v\mathbf{N}_{b1,x}\Phi\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{N}_{b1}\Phi\dot{\mathbf{q}}) \\ \vdots \\ 0 \\ -k_{t6}(z_1 - r_1 - \mathbf{N}_{b6}\Phi\mathbf{q}) - c_{t6}(\dot{z}_1 - \dot{r}_1 - v\mathbf{N}_{b6,x}\Phi\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{N}_{b6}\Phi\dot{\mathbf{q}}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

车轮荷载作用于桥梁的竖向荷载矩阵可以写成

$$\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}} = \sum_{i=1}^{nl} \mathbf{N}_i \mathbf{F}_{bvi}^{\text{int}} = \sum_{i=1}^{nl} \mathbf{N}_i (\mathbf{F}_v^{\text{int}} + \mathbf{F}_{gi}^{\text{int}}) \quad (13)$$

式中:  $nl$  为车轮总数。

单个车轮作用于桥梁的荷载写成向量形式

$$\begin{aligned} \mathbf{I}\ddot{\mathbf{q}} + \left( \mathbf{X} - \sum_{i=1}^{nl} \Phi^T \mathbf{N}_i^T c_{ti} \mathbf{N}_i \Phi \cos \gamma \right) \dot{\mathbf{q}} \left[ \boldsymbol{\Omega} - \sum_{i=1}^{nl} \Phi^T \mathbf{N}_i^T (k_{ti} \mathbf{N}_i \Phi + c_{ti} + \mathbf{N}_{i,x} \Phi) \right] \mathbf{q} + \\ \sum_{i=1}^{nl} \Phi^T \mathbf{N}_i^T k_{ti} z_i + \sum_{i=1}^{nl} \Phi^T \mathbf{N}_i^T c_{ti} \dot{z}_i = - \sum_{i=1}^{nl} \Phi^T \mathbf{N}_i (k_{ti} r_i + c_{ti} \dot{r}_i) - \sum_{i=1}^{nl} \Phi^T \mathbf{N}_i^T \mathbf{F}_{gi} \end{aligned} \quad (15)$$

联立式(1)、式(2)和式(14)可得车桥耦合振动方程为

$$\mathbf{M}_{vb} \ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{C}_{vb} \dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}_{vb} \boldsymbol{\delta} = \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_{gc} \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{M}_{vb}$ 、 $\mathbf{C}_{vb}$ 、 $\mathbf{K}_{vb}$  分别为车桥耦合振动系统的广义质量、阻尼和刚度矩阵;  $\mathbf{F}_{gc}$  为车辆自重和离心引起的动荷载向量;  $\mathbf{F}_w$  为桥面平整度引起的动荷载向量;  $\boldsymbol{\delta}$  为桥梁模态广义坐标与车辆系统运动自由度组成的列阵, 即  $\boldsymbol{\delta} = \{q_1 \cdots q_r \quad y_1 \quad z_1 \cdots y_6 \quad z_6 \quad y_b \quad z_b \quad \theta_b \quad \phi\}^T$ 。求解该系统运动方程时, 采用 Runger-Kutta 数值算法求解<sup>[17]</sup>。

车辆制动是通过施加与行驶方向相反的力使车辆减速, 这些力主要为地面通过车轮传给汽车的制动力和空气阻力, 其中, 空气阻力在制动过程中会随着车速的减小而减小且数值较小, 所以, 在分析时可以不考虑<sup>[18]</sup>。因此, 车辆制动效果主要由车轮处的摩擦力决定, 则各轮轴上最大制动力  $F_{f_{\max}}$  和轮胎与桥面间的附着系数  $\phi_f$  相关。为此, 可将制动力假定为一个线性函数, 即制动力先从 0 线性递增至最大值  $F_{f_{\max}}$ , 然后保持恒定直到车辆在桥上停止或驶出桥梁, 其表达式为<sup>[19-20]</sup>

$$F_f = \begin{cases} -F_{f_{\max}} t / t_b, & t < t_b \\ -F_{f_{\max}}, & t \geq t_b \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $F_f$  为车辆所受的制动力;  $t_b$  为制动力的上升

$$\mathbf{F}_{bv}^{\text{int}} = k_{ti}(z_i - r_i - \mathbf{N}\Phi\mathbf{q}) + c_{ti}(\dot{z}_i - \dot{r}_i - v\mathbf{N}_{,x}\Phi\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{N}\Phi\dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{F}_{gi} \quad (14)$$

将式(13)代入式(4)可得

时间, s。

当车辆制动时, 制动力与制动产生作用于车辆质心处的惯性力将形成一对仰俯力矩  $M_0$ , 对桥梁产生相应的冲击效应, 即

$$M_0 = F_f h_v \quad (18)$$

式中:  $h_v$  为车辆质心处距桥面的高度。

## 1.5 数值算法和程序设计

基于通用有限元软件 ANSYS 和 MATLAB 平台, 先由 ANSYS 生成桥梁的有限元模型得到桥梁前 20 阶频率和相应的振动模态, 然后采用 Runge-Kutta 数值算法通过 MATLAB 语言编制相关程序对式(16)进行求解, 并综合考虑了桥面不平度及其速度项。求解流程图见图 2。

## 2 工程实例与桥梁模型

### 2.1 工程概况

位于新余市长青南路立交 A 匝道的普通钢筋混凝土曲线连续箱梁桥<sup>[21]</sup>, 跨径为  $4 \times 20$  m, 主梁为半径 53 m, 宽 8 m, 高 1.3 m 的单箱单室曲形箱梁, 顶板板厚度为 22 cm, 腹板厚度为 45 cm, 底板厚度为 20 cm, 如图 3 所示。

### 2.2 建立有限元模型

因曲线箱梁桥的梁截面主轴和作用荷载通常不处于同一个平面内, 所以, 其振动属于空间振动问

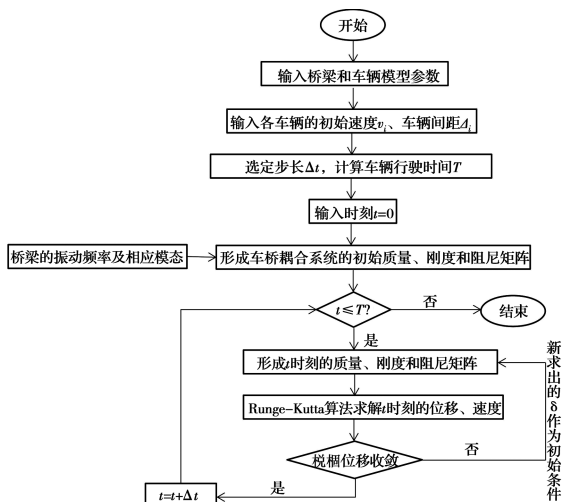


图 2 车桥耦合振动响应求解流程图

Fig. 2 Flow chart of vehicle-bridge coupled vibration response

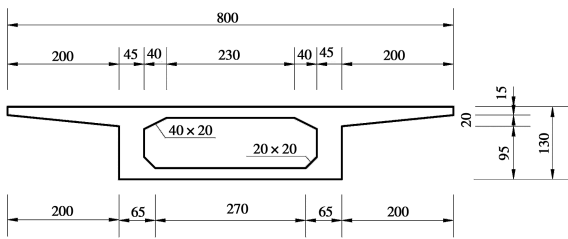


图 3 主梁跨中截面示意图(单位:cm)

Fig. 3 Schematic diagram of the cross section of the main beam

题,需选用空间单元对结构进行离散。在模拟过程中,桥面板及桥面铺装采用 shell63 单元,曲线梁采用 solid73 空间单元<sup>[22]</sup>,纵向每 0.5 m 为一单元进行离散,横向根据截面的变化而灵活划分。截面钢筋根据截面等效刚度予以考虑,则其材料弹性模量为 34.5 GPa,密度为 2 600 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为 0.167。正中间墩采用三向固结,内侧墩采用固定竖向和横向,端部墩对竖向和扭转进行约束。曲线梁桥有限元模型如图 4 所示。

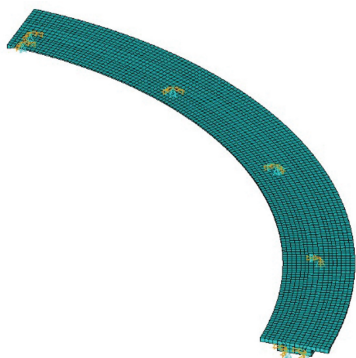


图 4 曲线梁桥有限元模型

Fig. 4 Curved beam bridge finite element model

### 2.3 动力特性分析

通过 ANSYS 软件模态分析的子空间迭代法计算该曲线梁桥的动力特性,结果如表 1 所示。由表 1 可知,该曲线梁桥的基频为 4.721 Hz,对应的振型为面内扭转和横向振动,在其他低阶模态中均出现扭转,而箱型截面具有较好的抗扭性能,说明了箱型截面对于曲线梁桥的适用性。前 10 阶模态中,竖向弯曲、侧向振动和扭转均存在低阶模态中,说明曲线桥梁的变形主要来源于竖弯、侧移和转动。

表 1 桥梁动力特性表

Table 1 Dynamic characteristics of bridge

模态阶数	频率/Hz	振型特点
1	4.721 0	面内扭转和侧向振动
2	5.253 9	平面内扭转
3	5.601 3	一阶侧向弯扭耦合振动
4	5.966 8	一阶反对称竖向弯曲振动
5	7.174 3	一阶对称竖向弯曲振动
6	8.779 1	二阶反对称竖向弯曲振动
7	9.681 1	反对称扭转振动
8	11.325	二阶对称竖向弯曲振动
9	13.045	一阶反对称竖向弯扭振动
10	14.945	对称扭转振动

## 3 冲击系数计算及参数分析

### 3.1 冲击系数计算

冲击系数可定义为:在行驶车辆作用下,桥梁某一位置处产生的最大动力响应的增值与相应位置处最大静力响应之比,即

$$IM = \frac{y_{dmax}}{y_{smax}} - 1 \quad (19)$$

式中: $y_{dmax}$  和  $y_{smax}$  分别为某一位置处最大动响应和最大静响应,包括位移响应和内力响应,其中,由不同的响应得到的冲击系数值不一定相同<sup>[23]</sup>。目前,《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)中冲击系数是依据结构基频确定<sup>[24]</sup>,由此可得曲线梁桥冲击系数的规范值为  $\mu = 0.176 7 \ln(4.72) - 0.015 7 = 0.25$ 。笔者对桥梁的跨中、关键截面处的挠度和内力冲击系数进行了计算与分析。

### 3.2 参数分析

车辆采用三轴车辆模型,车辆的重心高度取为  $h_v = 1.0$  m,车辆靠曲线外侧偏心 2.1 m 行驶。桥梁为半径为 53 m 的曲线梁桥,桥面平整度等级为“A 级”,结构阻尼比为 2%。

3.2.1 初速度的影响 为了分析初速度对主梁动

力响应的影响规律,取车辆初速度为  $v=10\sim 50$  m/s,以 2 m/s 递增;轮胎与路面间的附着系数取为 0.70<sup>[25]</sup>,即制动力为 0.7  $W$  ( $W$  为车重);车辆制动位置设置在曲线梁桥第二跨的 1/4 处,即 25 m 处;制动力上升时间为 0 s。桥面平整度等级为“A 级”。

从图 5~图 7 可以看出,当车辆制动时,主梁最大挠度、挠度和内力冲击系数没有随初速度的变化出现单调递增或递减现象,这与关于车辆匀速行驶时桥梁动力响应的研究结论相同<sup>[17]</sup>。其中,当车速大于 40 m/s 时,桥梁的挠度冲击系数出现明显减小,主要原因是当车速为 40 m/s 时,车辆振动频率接近桥梁自振频率,桥梁的动力响应达到峰值,而当车速继续增大时,车辆作用于桥上的时间变短,并且车辆振动频率逐渐远离桥梁自振频率,动力响应明显降低。由图 7 可知,支点截面的内力冲击系数虽与初车速不存在单调性,但整体上会随着初车速的增大而增大。此外,相较于车辆匀速行驶,车辆制动时主梁的挠度与内力冲击系数明显要大,所以在设计中计算汽车荷载的效应时,不仅要考虑设计车速范围内最大的冲击系数,还应考虑设计车速范围内制动时最大的冲击系数。

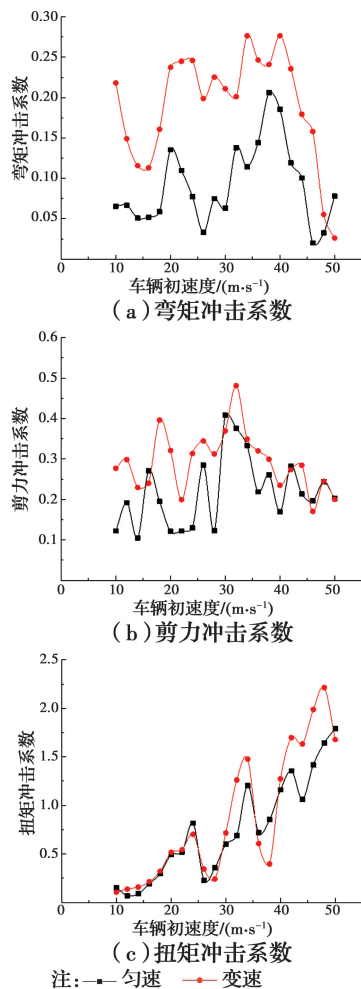
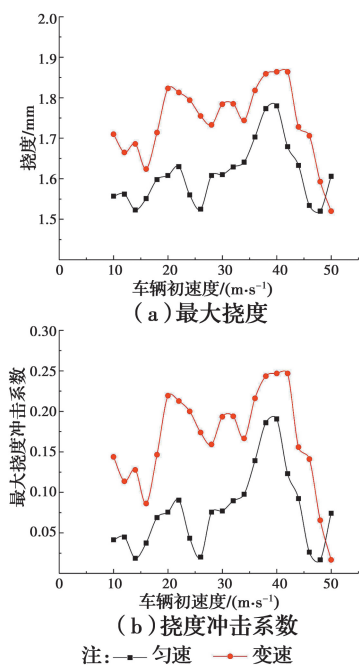


图 6 不同初速度下跨中内力冲击系数

Fig. 6 Internal force impact coefficient of mid-span section at different initial velocities

1/8、1/4、3/8、跨中处和 3/4 处。取车辆初速度  $v=20$  m/s,制动力为 0.7  $W$ ,制动力上升时间为 0 s;桥面平整度等级为“A 级”。车辆制动位置对冲击系数的影响见表 2。

表 2 车辆制动位置对冲击系数的影响

Table 2 Effect of braking position on impact coefficient of vehicles

制动位置	跨中挠度	跨中内力			支点内力		
		弯矩	剪力	扭矩	弯矩	剪力	扭矩
支点	0.081	0.096	0.298	0.253	0.133	0.347	0.678
1/8L	0.148	0.143	0.206	0.368	0.137	0.434	0.759
1/4L	0.219	0.238	0.321	0.516	0.222	0.343	0.938
3/8L	0.210	0.143	0.118	0.503	0.188	0.429	0.925
1/2L	0.110	0.136	0.121	0.492	0.222	0.436	0.912
3/4L	0.080	0.135	0.120	0.492	0.195	0.454	0.902
匀速行驶	0.076	0.135	0.121	0.492	0.195	0.454	0.902

图 5 不同初速度下最大挠度与挠度冲击系数

Fig. 5 Maximum deflection and deflection impact coefficient at different initial velocities

3.2.2 制动位置的影响 为研究制动位置对桥梁动力响应的影响,制动位置分别取第 2 跨的支点、

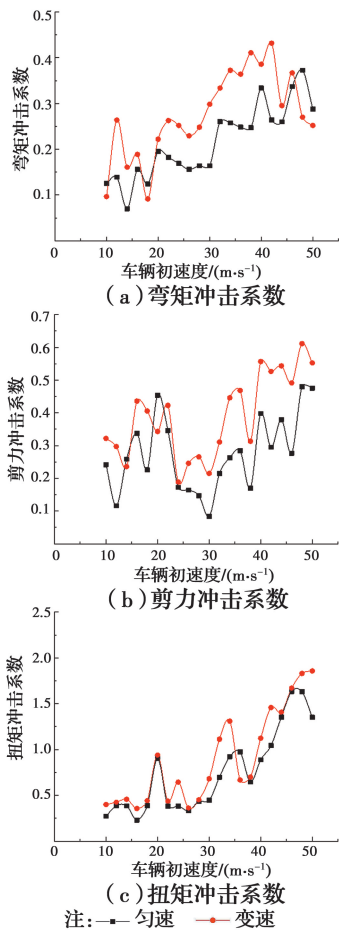


图 7 不同初速度下支点内力冲击系数

Fig. 7 Internal force impact coefficient of fulcrum section at different initial velocities

由表 2 可知,当初车速为 20 m/s 时,车辆在各制动位置处制动时的挠度冲击系数均大于匀速工况,而跨中和支点内力冲击系数不一定大于匀速工况,其中,跨中内力冲击系数会随着制动位置的增长而先增大后减小。车辆在桥前半跨内制动时,挠度和跨中剪力冲击系数大于在后半跨度内制动,而其他内力冲击系数没有出现该规律。此外,当车辆制动位置  $> 1/2L$  且越靠近支点时,车辆制动时挠度和内力冲击系数越接近匀速时的结果。

3.2.3 制动力上升时间的影响 通常制动力上升时间在 0.3~0.6 s 范围内,为分析制动力上升时间对曲线梁桥冲击效应的影响,分别取 0、0.3、0.45、0.6 s。取车辆初速度为  $v = 10 \sim 50$  m/s,以 2 m/s 递增;制动力为 0.7 W (W 为车重),制动位置为第 2 跨的 1/4 处,即 25 m 处;桥面平整度等级为“A 级”。由图 8~图 10 可以看出,总体而言,随着制动力上升时间的延长,主梁挠度和内力冲击系数逐渐减小且减幅也逐渐变小,说明紧急制动易于加剧桥梁的

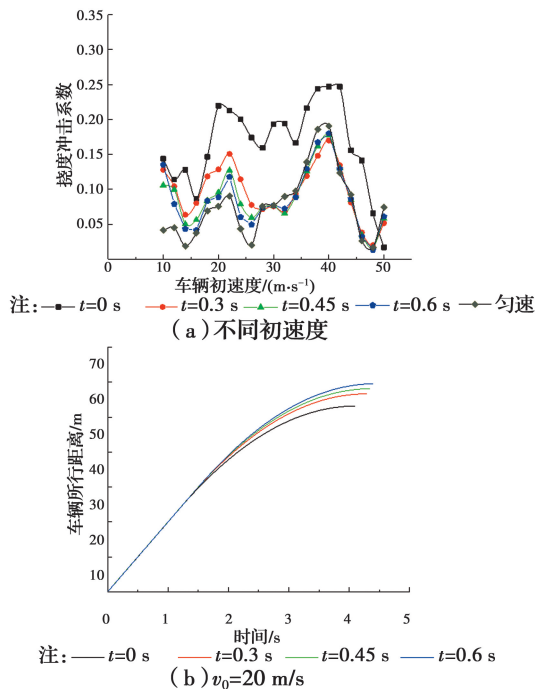


图 8 不同制动力上升时间下跨中挠度冲击系数和车辆制动曲线  
Fig. 8 Deflection impact coefficient of mid-span section with different rising time of braking force and vehicle braking curve

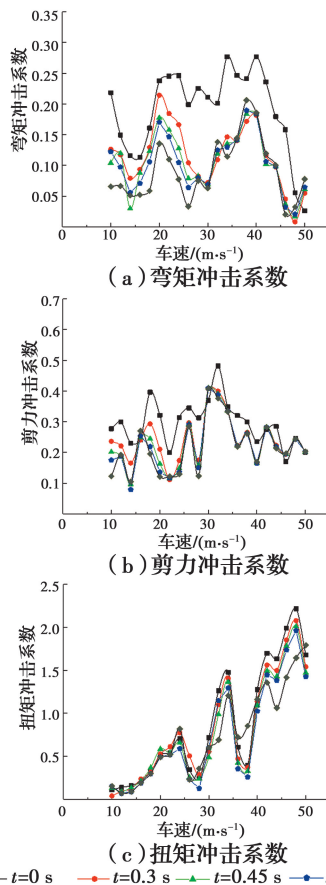


图 9 不同制动力上升时间下跨中内力冲击系数  
Fig. 9 Internal force impact coefficient of mid-span section under different braking force rising time

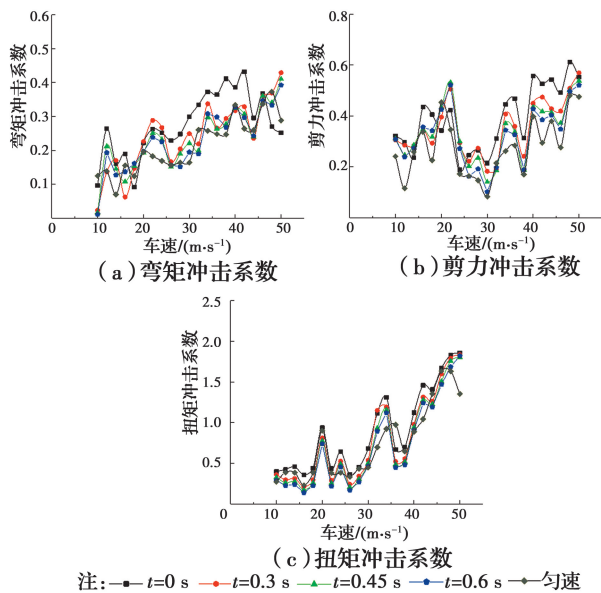


图 10 不同制动力上升时间下支点内力冲击系数

Fig. 10 Internal force coefficient of fulcrum section under different braking force rising time

振动;除此之外,在不同制动力上升时间情况下,车辆制动时桥梁结构冲击系数均比同样初速度匀速行驶时的结果要大。当车速在  $28\sim 50$  m/s 范围内时,制动力上升时间的延长对挠度和跨中剪力冲击系数的影响较小,而跨中扭矩和支点内力冲击系数依然随之减小,说明该速度范围内,跨中扭矩和支点内力冲击系数对制动上升时间的变化更敏感。图 8(b) 为初速度为  $20$  m/s 时不同制动力上升时间下车辆制动曲线,从图 8(b) 可知,随着制动力上升时间的延长,车辆制动所需距离逐渐增大,但增大的幅度逐渐减小,表明制动力上升时间延长至一定时,车辆制动所行驶的距离趋于恒定。

3.2.4 桥面平整度的影响 为获得桥面平整度对梁桥动力响应的影响规律,取文献[15]中 A 级、B 级、C 级和 D 级桥面平整度样本进行分析。同样,取车辆初速度为  $v=10\sim 50$  m/s,以  $2$  m/s 递增,其中,车速最大值取为  $50$  m/s,研究桥面平整度在较高车速下的影响规律;制动力为  $0.7W$ ,制动位置为第 2 跨的  $1/4$  处,制动力上升时间为  $0$  s。

由图 11~图 13 可以看出:1) 挠度和内力冲击系数会随着桥面平整度等级的降低而显著增大,且增幅也随之增大。2) 当车辆行驶在各不同桥面平整度等级的路面上,制动力作用下的挠度和内力冲击系数均大于匀速工况下的挠度和内力冲击系数。3) 当路面平整度为“A 级”时,车辆制动作用下挠度冲击系数与匀速时冲击系数均小于规范值,说明中

国规范适用于此种路况下冲击系数的确定;而当路面等级为“B 级”及以下较差工况时,车辆以某速度值匀速行驶时冲击系数虽符合规范要求,但以该速度发生制动时,冲击系数可能超过规范值。

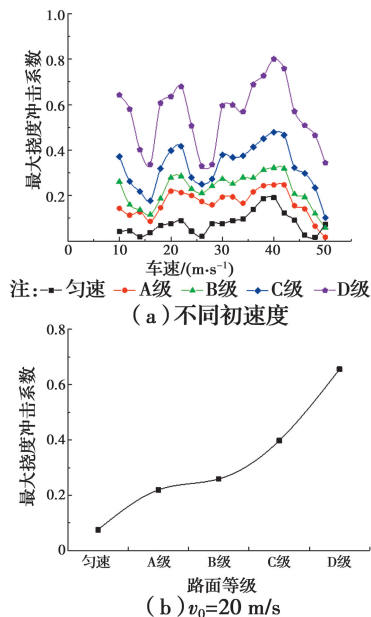


图 11 不同桥面等级对挠度冲击系数的影响

Fig. 11 Effect of different deck grades on deflection impact coefficient

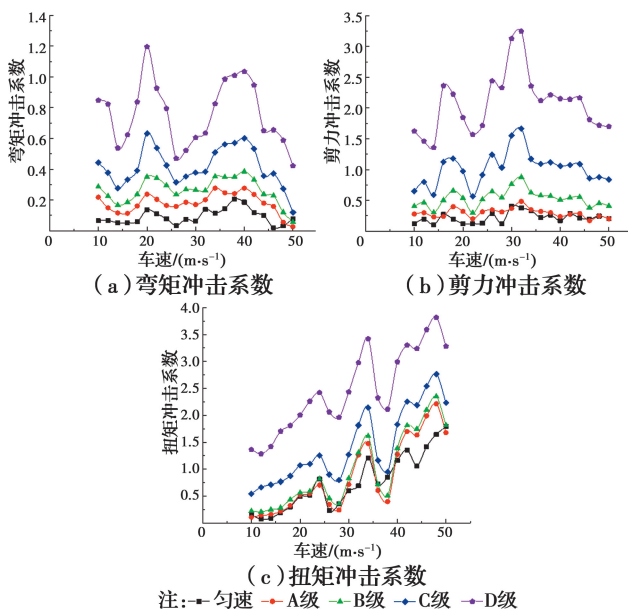


图 12 不同桥面等级下跨中内力冲击系数

Fig. 12 Internal force impact coefficient of mid-span section under different deck grades

3.2.5 曲率半径的影响 曲率半径是弯桥与直线桥的主要区别,也是影响结构动力响应的重要因素。分别对曲率半径由  $60$  m 到  $300$  m,以  $60$  m 为间距递增的曲线梁桥以及直线梁桥进行分析。取车辆初



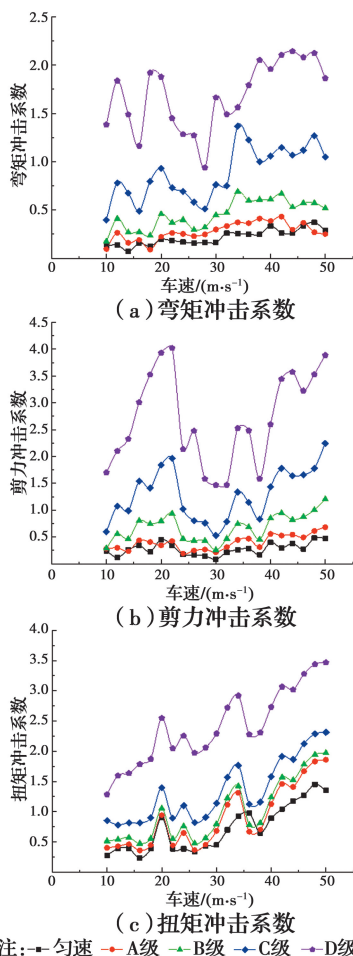


图 13 不同桥面等级下支点内力冲击系数

Fig. 13 Internal force impact coefficient of fulcrum section under different deck grades

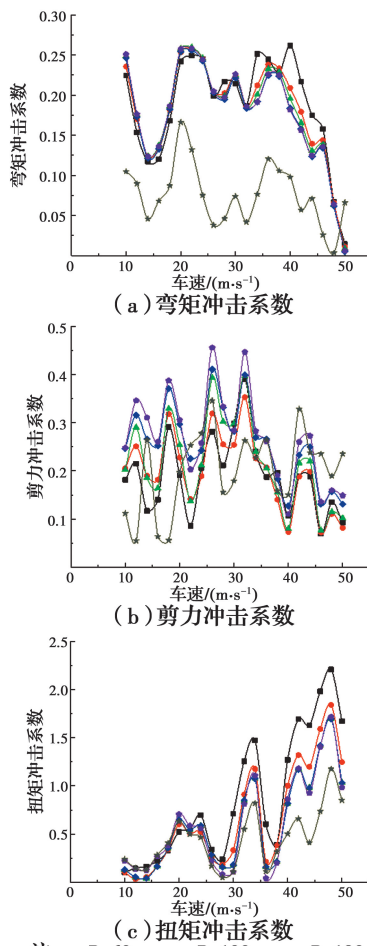


图 15 不同曲率半径下跨中内力冲击系数

Fig. 15 Internal force impact coefficient of mid-span section under different radius of curvature

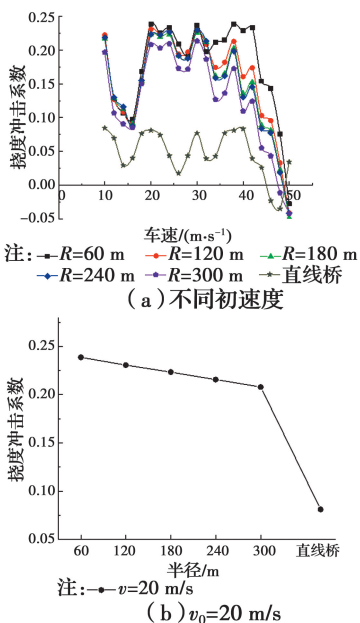


图 14 曲率半径对跨中挠度与挠度冲击系数的影响  
Fig. 14 Effect of radius of curvature on the deflection coefficient of mid-span deflection and deflection coefficient

速度为  $v=10\sim 50$  m/s,以 2 m/s 递增;制动力为  $0.7W$ ( $W$  为车重),制动位置为第 2 跨的  $1/4$  处,即 25 m 处,制动力上升时间为 0 s;桥面平整度等级为“**A 级**”。

由图 14 可知,车辆制动时,桥梁的挠度冲击系数随着曲率半径的增大而减小,且减小幅度逐渐变小;且弯桥动力响应明显大于直线桥。从图 15~图 16 可以看出,内力存在不同的动力响应规律。当车速为  $10\sim 20$  m/s 时,不同曲率半径下弯矩冲击系数随车速变化曲线基本重合;当车速为  $20\sim 50$  m/s 时,弯矩冲击系数随着曲率半径的增大而逐渐减小。扭矩冲击系数随曲率半径的增大而减小,而剪力冲击系数随之增大。此外,弯桥的弯矩和扭矩冲击系数同样大于直线桥结果,剪力冲击系数则不存在这样的规律。因此,在设计曲线梁桥时,不能简单套用直线桥情况的汽车效应理论,还需要考虑曲率半径

这一重要影响因素。

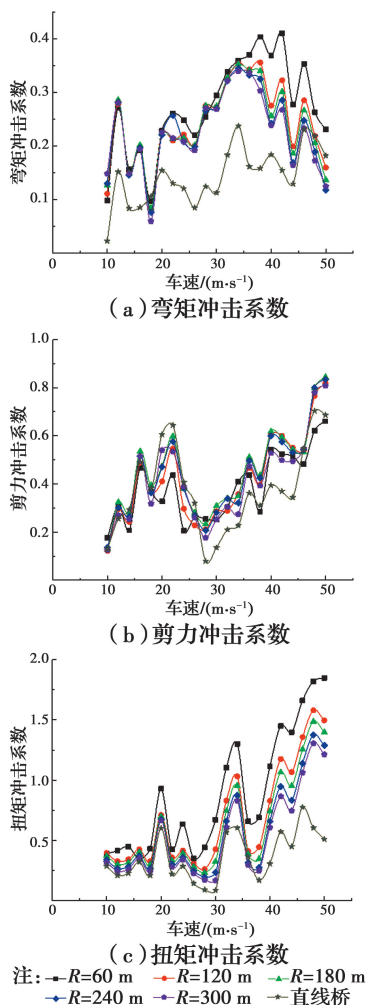


图 16 不同曲率半径下支点内力冲击系数

Fig. 16 Internal force impact coefficient of fulcrum section under different radius of curvature

## 4 结论

结合工程实例中混凝土曲线连续箱梁桥分析公路曲线车桥耦合振动问题,研究了初速度、制动位置、制动上升时间和桥面平整度等因素对结构冲击系数的影响规律,得到以下结论。

1)初速度对动力冲击系数的影响较复杂。当车辆制动时,主梁最大挠度、挠度和内力冲击系数没有随初速度的变化出现单调递增或递减现象。与车辆匀速行驶的结果相比,车辆制动时主梁的挠度与内力冲击系数明显要大,在设计中应考虑设计车速范围内制动时的最大冲击系数。

2)车辆在桥前半跨内制动时,挠度和跨中剪力冲击系数大于在后半跨度内制动情况,而其他内力

冲击系数没有出现该规律。此外,当车辆制动位置大于半跨且越靠近支点时,车辆制动时挠度和内力冲击系数越接近匀速时的结果。

3)制动力上升时间是动力冲击系数的重要影响因素之一。随着制动上升时间的延长,主梁挠度和内力冲击系数逐渐减小,且减幅也逐渐变小,说明紧急制动加剧桥梁的振动。

4)桥面平整度对结构动力响应有显著影响。挠度和内力冲击系数会随着桥面工况的下降而显著增大,且增幅也随之增大。当桥面处于“B级”及以下较差工况时,车辆以某速度值匀速通过桥梁的冲击系数虽符合规范要求,但以该速度发生制动时,冲击系数可能超过规范值。在曲线桥梁设计中,计算车辆荷载效应时应考虑车辆制动作用的影响。

5)当车辆制动时,随着曲率半径的增大,桥梁的挠度和扭矩冲击系数逐渐减小,且减小幅度逐渐变小,而剪力冲击系数随之增大;当车速为20~50 m/s时,弯矩冲击系数随之逐渐减小。此外,弯桥的挠度、弯矩和扭矩冲击系数大于直线桥结果。

## 参考文献:

- [1] 彭献, 刘子建, 洪家旺. 匀变速移动质量与简支梁耦合系统的振动分析[J]. 工程力学, 2006, 23(6): 25-29. PENG X, LIU Z J, HONG J W. Vibration analysis of a simply supported beam under moving mass with uniformly variable speeds [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(6): 25-29. (in Chinese)
- [2] GUPTA R K, TRAILL-NASH R W. Bridge dynamic loading due to road surface irregularities and braking of vehicle [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1980, 8(2): 83-96.
- [3] MICHALTSOS G T. Dynamic behaviour of a single-span beam subjected to loads moving with variable speeds [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 258(2): 359-372.
- [4] LAW S S, ZHU X Q. Bridge dynamic responses due to road surface roughness and braking of vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 282(3/4/5): 805-830.
- [5] JU S H, LIN H T. A finite element model of vehicle-bridge interaction considering braking and acceleration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303(1/2):

- 46-57.
- [6] DENG L, WANG F. Impact factors of simply supported prestressed concrete girder bridges due to vehicle braking [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(11): 06015002.
- [7] DENG L, WANG F, HE W. Dynamic impact factors for simply-supported bridges due to vehicle braking [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2015, 18(6): 791-801.
- [8] 方志, 殷新锋, 彭献. 非匀速车辆与随机路面桥梁的耦合振动分析[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(1): 30-36.  
FANG Z, YIN X F, PENG X. The coupled vibration analysis of with uneven surface and speed-varying vehicle [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(1): 30-36. (in Chinese)
- [9] 殷新锋, 方志. 车辆制动作用下的车辆-路面-桥梁系统随机振动分析[J]. *计算力学学报*, 2010, 27(5): 936-941.  
YIN X F, FANG Z. Random vibration analysis of vehicle-pavement-bridge system under vehicle braking [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2010, 27(5): 936-941. (in Chinese)
- [10] 邵元, 孙宗光, 陈一飞. 变速车辆作用下拱桥吊杆的动态内力分析[J]. *工程力学*, 2017, 34(Sup1): 179-184, 191.  
SHAO Y, SUN Z G, CHEN Y F. Analysis of the dynamic stress response of the hangers in arch bridge under speed-varying vehicle [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(Sup1): 179-184, 191. (in Chinese)
- [11] 颜铁航, 吴定俊, 李奇. 列车制动下铁路斜拉桥梁轨动力相互作用研究[J]. *中国铁道科学*, 2019, 40(1): 31-38.  
YAN Y H, WU D J, LI Q. Dynamic interaction between beam and track of railway cable-stayed bridge under train braking [J]. *China Railway Science*, 2019, 40(1): 31-38. (in Chinese)
- [12] 桂水荣, 陈水生, 万水. 基于路面一致激励车桥耦合非平稳随机振动分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(5): 908-915, 1077.  
GUI S R, CHEN S S, WAN S. Analysis of consistent stimulus of road roughness on vehicle-bridge coupling nonstationary random vibrations [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(5): 908-915, 1077. (in Chinese)
- [13] CHEN S R. Dynamic performance of bridges and vehicles under strong wind [D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2004: 60-74.
- [14] 桂水荣, 陈水生, 万水. 路面谱函数对车桥耦合随机振动敏感性分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2018, 38(2): 353-359, 422-423.  
GUI S R, CHEN S S, WAN S. Sensitivity analysis of vehicle-bridge coupling random vibration based on road roughness spectral function [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(2): 353-359, 422-423. (in Chinese)
- [15] Mechanical vibration-road surface profiles; Reporting of measured data: ISO 8068: 1995 [S]. Geneva: ISO, 1995.
- [16] 胡于进, 王璋奇. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.  
HU Y J, WANG Z Q. Finite element analysis and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [17] 邓露, 何维, 俞扬, 等. 公路车-桥耦合振动的理论和应用研究进展[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(7): 38-54.  
DENG L, HE W, YU Y, et al. Research progress in theory and applications of highway vehicle-bridge coupling vibration [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(7): 38-54. (in Chinese)
- [18] 代汝泉. 汽车运行性能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.  
DAI R Q. Vehicle performance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [19] GUPTA R K, TRAILL-NASH R W. Vehicle braking on highway bridges [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1980, 106(4): 641-658.
- [20] 黄新艺. 混凝土连续曲线梁桥在车辆荷载作用下的动力响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
HUANG X Y. Dynamic response research of continuous curved concrete bridges under moving vehicles [D]. Harbi: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [21] 晏路曼, 陈水生. 公路曲线梁桥车桥耦合振动分析[C]//第六届全国土木工程研究生学术论坛, 北京, 2009.  
YAN L M, CHEN S S. Vibration analysis of vehicle-bridge coupling system on highway horizontally curved beam bridge [C]// The 6th National Civil Engineering

- Graduate Academic Forum, Beijing, 2009. (in Chinese)
- [22] AWALL M R, HAYASHIKAWA T, MATSUMOTO T, et al. Effects of bottom bracings on torsional dynamic characteristics of horizontally curved twin I-girder bridges with different curvatures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, 11(2): 149-162.
- [23] 邓露, 王芳. 汽车制动作用下预应力混凝土简支梁桥的动力响应及冲击系数研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(9): 52-58.
- DENG L, WANG F. Study of the dynamic responses and impact factors of simply-supported prestressed concrete girder bridges due to vehicle braking [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(9): 52-58. (in Chinese)
- [24] 公路桥涵设计通用规范: TG D60-2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- General code for design of highway bridges and culverts: JTG D60-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [25] 吴际璋. 汽车构造(下册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- WU J Z. *Automobile structure (volume 2)* [M]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)

(编辑 胡玲)