

在役大跨径曲弦桁梁桥车桥耦合振动分析

周瑞娇, 王 艳, 陈 淮

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为研究在役曲弦桁梁桥的动力性能和车桥振动响应, 基于考虑跳车脱空时段的车桥耦合振动分析方法, 进行在役曲弦桁梁桥车桥耦合振动分析。以 122 m 跨径彩虹桥为计算示例, 建立桥梁有限元模型, 分析桥梁动力特性, 并计算空间车队过桥动力响应, 探讨车速、车辆数量、车队分布及路面不平度等因素对在役曲弦桁梁桥动力响应的影响。结果表明: 桥面系竖向刚度相对较弱, 桥面局部振动易被激发; 桥面竖向振动及各动力响应随着汽车数量、布载车道数量增加而显著增大; 桥梁下弦跨中位移冲击系数超过规范设计值, 桥面振动程度较大; 车辆中、后轮易发生跳车, 路面等级越高, 发生脱空次数越多, 在路面等级良好状态下汽车也会出现跳车现象。

关键词: 车桥耦合振动; 在役桥梁; 曲弦桁梁桥; 动力响应; 跳车

中图分类号: U441+.2; U448.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)01-0103-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.01.011

引 言

很多桥梁在长期运营后, 桥面存在坑槽、伸缩缝破损等病害, 桥梁行车时振动剧烈^[1]。因此, 在役桥梁的车振问题是在役桥梁加固维修时必须考虑和解决的问题。

当在役桥梁桥面出现一定程度损伤时, 易导致汽车发生跳车现象。目前, 大多数车桥耦合振动研究通常针对新建桥梁, 可考虑随机车流、车辆制动等复杂场景^[2-4], 采用车轮与桥面密贴假定^[5-8], 所用的车桥耦合分析方法没有完全描述车辆跳起过程, 无法考虑车辆跳车时车轮与桥面脱空时段的影响。在考虑跳车的车桥耦合振动研究中, Liu 等^[9]在车轮与桥面之间采用 Hertz 弹簧建立轮轨之间的接触, 运用半分离迭代的半解析方法研究了 10 个自由度车辆跳车脱空时的车桥相互作用问题; 樊建平等^[10]以离心力与车重大小作为车轨分离判别条件, 进行了 1/4 车模型通过简支梁的数值分析, 分别给出车桥耦合振动与非耦合振动时的振动方程, 计算了跳车脱空时间、跳车高度和回落冲击力; 刘钰等^[11]进行了单轴车辆通过简支梁的数值分析, 分别建立了考虑车桥相互作用的耦合振动方程与车辆跳起时的车辆及桥梁各自振动方程; Zhu 等^[12]通过引入 1/4 单轴车模型车轮和桥梁在接触点的相对位移之间的线性互补关系, 将动力相互作用问题转化为线性互补问题, 避免了数值模拟中反复迭代的过程。Bazea 等^[13]进

行了单自由度车辆模型通过简支桁梁桥时的车桥耦合振动分析, 采用模态叠加法求解车辆与桥梁振动方程, 对比了是否考虑车轮跳起回落冲击作用下的桥梁动力响应。

以上研究大多数是基于简单车型进行跳车分析, 没有开展多自由度空间车辆模型以及车队过桥时考虑跳车过程的研究, 这是由于车轮数量越多, 出现车轮完全脱空、部分车轮脱空、车轮全部与桥面接触等情况的判断、计算、编程及计算收敛均越复杂。本文采用可以考虑空间车辆(车队)跳车脱空时段的车桥耦合振动分析方法, 以 122 m 跨径彩虹桥为计算示例, 建立空间车辆(车队)模型, 基于有限元程序 ANSYS 进行在役桥梁车桥耦合振动分析, 为该桥梁的加固维修提供参考。

1 车桥耦合振动分析方法

1.1 车桥耦合振动模型

桥梁模型可根据桥梁结构实际特点, 在有限元程序 ANSYS 内选择合适的单元进行模拟, 建立相应的空间三维模型。

车辆模型采用弹簧-阻尼-质量系统模拟, 在有限元程序 ANSYS 中, 车辆模型中的一系和二系弹簧、阻尼采用弹簧单元 Combin14 模拟, 车轮、悬架、车体质量采用集中质量单元 Mass21 模拟, 车架采用刚性梁单元或 MPC184 单元模拟。

收稿日期: 2020-10-10; 修订日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408557); 河南省科技攻关项目(152102310295)。

车辆一系弹簧下端设置1个无质量的节点 m_m ，用接触单元 Conta175 模拟，将接触单元定义为接触面，与节点 m_m 直接接触的桥面定义为目标面，用目标单元模拟，在接触面与目标面之间建立接触对。采用1个接触“弹簧”在接触面与目标面之间建立两者之间力的平衡和位移协调关系，如图1所示。两者接触面间的弹簧压缩量为 Δ (侵入量)，接触力满足平衡方程 $F = k\Delta$ ，其中， k 为接触刚度^[14]。采用扩展的拉格朗日算法，将接触刚度定义在经验范围，打开自动修正接触刚度系数功能进行计算。

车辆在桥梁上的移动通过对车辆模型的节点施加变化的纵向水平位移实现。初始车辆模型先约束车辆节点纵向水平位移及车轮底竖向位移，当车辆的车轮移动到桥面上与桥面接触时，再将车轮底部竖向位移约束移除，通过接触单元传递车桥相互作用力。车体可移动到桥面梁(板)上任何非节点位置，不必考虑车体每步必须移动到梁(板)节点位置，只需将时间步设置在动力分析必要的精度范围，桥面单元长度不必刻意限制，具有一定单元数目即可。

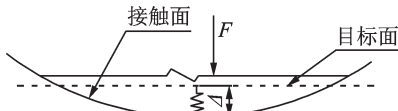


图1 接触弹簧

Fig. 1 Contact spring

根据《车辆振动输入与路面平度表示方法》(GB/T7031-1986)中建议的公路路面位移功率谱密度函数，采用快速傅里叶变换方法^[15]，基于 MATLAB 平台编制程序，得到 A, B, C 级路面的随机路面不平度样本，如图2所示。

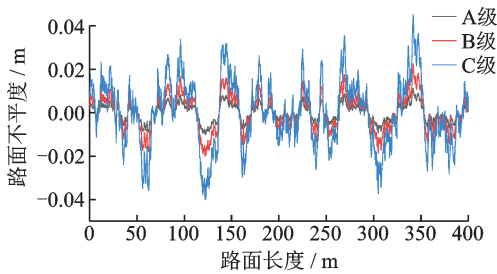


图2 A, B, C 级路面不平度样本

Fig. 2 Road surface roughness samples of grade A, B, C

1.2 方法原理

将桥梁进行有限元离散，得到桥梁振动方程为：

$$M_b \ddot{u}_b + C_b \dot{u}_b + K_b u_b = F_b \quad (1)$$

式中 M_b, C_b, K_b 分别为桥梁质量、阻尼、刚度矩阵； F_b 为车辆作用在桥梁上的荷载列阵，路面平整时可以表示为： $F_b = TN^T F = RF$ ，其中， F 为车辆与桥

面接触处接触力， N 为车桥接触点所在桥梁单元形函数矩阵； T 为接触单元的位置扩展矩阵，其元素由 0 或 1 构成；接触点位移 u_c 与桥梁节点位移列阵 u_b 的转换矩阵 $R, R = TN^T$ 。

将各车轮底节点作为独立自由度节点，可以考虑车辆与桥梁接触与脱离情况，多自由度车辆模型对应的车桥耦合系统振动方程为：

$$\begin{bmatrix} M_v & 0 \\ 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_v \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_v & 0 \\ 0 & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_v \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_v & 0 \\ 0 & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_v \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{gr} \\ RF_r \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中 M_v, C_v, K_v 分别为车辆的质量、阻尼、刚度矩阵； f_{gr} 为车辆荷载列阵，包含所受重力、外荷载及每个车轮接触力，其表达式为： $f_{gr} = \{\dots G_i \dots G_m \dots -F_i \dots\}^T$ ；其中， G_i 为第 i 个车轮竖向自由度对应的荷载分量； G_m 为车体重量荷载； F_i 为各车轮与桥面接触力。

$$G_i = \begin{cases} -m_i g + k_i r(t) + c_i \dot{r}(t), & \Delta_i \leq 0 \\ -m_i g, & \Delta_i > 0 \end{cases} \quad (3a)$$

$$F_i = \begin{cases} (z_{mi} - u_{ci}) k_{mi}, & \Delta_i \leq 0 \\ 0, & \Delta_i > 0 \end{cases} \quad (4a)$$

$$F_i = \begin{cases} (z_{mi} - u_{ci}) k_{mi}, & \Delta_i \leq 0 \\ 0, & \Delta_i > 0 \end{cases} \quad (4b)$$

式中 第 i 个车轮重力为 $m_i g$ ，车轮刚度为 k_i ，阻尼为 c_i ，其对应下方独立自由度节点竖向位移为 z_{mi} ，与 z_{mi} 接触的桥面位移为 $u_{ci} = Ru_b$ ， k_{mi} 为第 i 个车轮与桥面的接触刚度； Δ_i 为第 i 个车轮与桥面的接触侵入量， $\Delta_i = z_{mi} - u_{ci}$ 。

式(2)中， $F_r = \{\dots F_{ir} \dots\}^T$ ，IF $\Delta_i \leq 0$ ， $F_{ir} = (z_{mi} - u_{ci}) k_{mi} - k_i r_i(t) - c_i \dot{r}_i(t)$ ；IF $\Delta_i > 0$ ， $F_{ir} = 0$ 。车轮接触力为非零值时的迭代计算及方程的求解由程序自动完成。

文献[16]已论证，每个时间步内，路面不平度对车桥耦合振动系统的影响相当于在对应车轮和与桥面接触点自由度上施加一对大小相等、方向相反的作用力，作用力的大小为 $k_i r(t) + c_i \dot{r}(t)$ 。因此采用在车轮和桥面接触位置自由度方向上施加一对作用力和反作用力来模拟路面不平度对整个系统的影响，节点力大小为 $k_i r(t) + c_i \dot{r}(t)$ 。

具体车桥耦合分析方法的验证过程详见文献[16]。

1.3 方法的实现

基于有限元程序 ANSYS 平台，采用 APDL 参数化设计语言编制程序，实现考虑汽车跳车脱空时段的车桥耦合振动整体时变系统分析，具体步骤如下：

(1) 基于 ANSYS 平台建立桥梁计算模型，确定瞬态分析的时间步长和阻尼参数。

(2)建立汽车或车队的有限元模型,确定车辆和车道等参数信息。

(3)基于MATLAB平台编制程序生成路面不平度样本并存入表数组,编制路面不平度节点力子程序。

(4)进入ANSYS平台瞬态分析功能,确定车辆初始状态,开始车辆过桥的时程分析。

(5)将车辆过桥划分为若干时间步,在每个时间步内,给车辆(车队)节点施加匀速递增纵向水平位移,以 $F=0, \Delta > 0$ 为条件判断车轮与桥梁接触状态。

(6)当车轮与桥面接触时,将路面不平度引起的节点力施加到车轮和桥面对应自由度上;当车轮与桥面脱离时,不再施加由路面不平度引起的节点力作用。

(7)进行当前时间步车桥耦合系统动力响应求解分析。

(8)重复步骤(5)~(7),直至车辆完全通过桥梁。

(9)进入时间历程后处理器提取计算结果。

(10)计算结束。

2 桥梁有限元模型的建立及验证

目前针对新建简支桥梁、连续梁桥开展的车桥耦合振动研究较多^[17-19],而关于桥面破损严重的大跨径在役桥梁的车桥耦合振动研究较少。本文以郑州市北三环快速路彩虹桥122 m跨径桥梁为工程示

例进行在役桥梁车桥耦合振动分析。彩虹桥由4跨筒支钢管混凝土曲弦桁梁桥组成,桥面宽28.8 m,主桁间距16.4 m,其中最大跨径为122 m。122 m跨径桥梁主桁上弦杆采用钢管混凝土构件,下弦杆为开口钢箱梁截面,其内穿钢绞线和拉筋,并灌注高强砂浆;主桁竖腹杆和斜腹杆均采用 $\Phi 600 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的钢管,2榀主桁顶部设置5道桁式一字型风撑。桥面5 m设置1道横梁,其截面为开口钢箱梁,横梁上方预埋钢筋深入桥面现浇层与桥面相连,现浇桥面下方采用55 mm厚的预制钢筋混凝土空心桥面板。全桥采用16Mnq钢材,所有钢件连接均为焊接,如图3所示。彩虹桥运营20余年,受桥下铁路高压线净空不足的影响,桥梁不便大修,桥梁构件出现了不同程度的损伤、锈蚀,目前桥梁的主要病害^[20-21]有:(1)桥面存在多处坑槽,路面凹凸不平;(2)伸缩缝破损、露筋严重,局部修补后仍严重变形;(3)桥道板多处混凝土剥落、渗水、钢筋锈蚀,且横向联系不足,多处下挠,错台严重;(4)桥面纵缝、横缝较多;(5)其他病害:横撑局部脱漆、锈蚀严重;个别腹杆凹陷;桥面排水系统差,桥面多处积水等。桥梁桥面病害如图4所示。

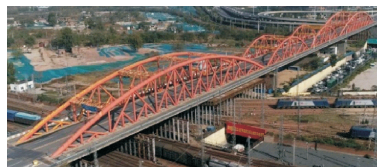
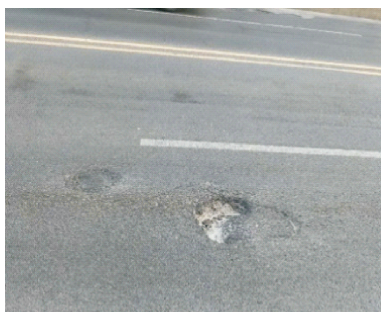


图3 彩虹桥主桥

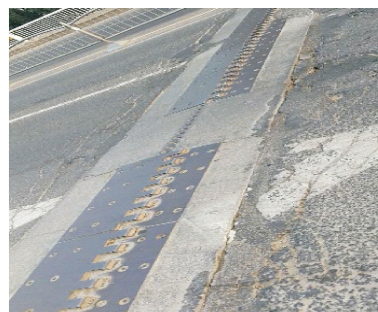
Fig. 3 The main bridge of Rainbow Bridge



(a) 桥面多处坑槽
(a) Potholes on the bridge deck



(b) 伸缩缝破损严重
(b) Seriously damaged expansion joints



(c) 伸缩缝局部翘起
(c) Local warping of expansion joints

图4 桥面病害

Fig. 4 Damages of bridge deck

采用有限元程序ANSYS建立彩虹桥计算模型。主桁上弦杆采用双单元法模拟钢管混凝土构件,即在所有上弦杆对应节点上并行建立2根梁单元,采用beam189梁单元模拟钢管混凝土构件的钢管和内部混凝土;下弦杆对应节点上并行建立3根梁单元和1根杆单元,采用beam189梁单元模拟钢箱梁、箱内砂浆和拉筋,采用link8杆单元模拟预应力钢绞线。主桁腹杆、竖杆均采用beam189单元模

拟。经试算并与桥梁实测频率对比分析,可以看出桥面横梁与上方桥面板连接较弱,所以横梁截面采用开口钢箱梁截面;端横梁、中横梁、风撑等杆件均采用beam188梁单元模拟。由于预制空心桥面板整体性较差,且与上层现浇桥面板连接较弱,因此不考虑预制空心桥面板刚度,仅计入其重量影响,并对桥面板计算模型进行刚度、重度的换算和修正;现浇桥面板采用Shell63壳单元模拟。全桥共计1223个节

点,2157个单元。桥梁计算的边界条件为:分别沿桥梁纵向及横向一侧支承按照固定铰支座模拟,另一侧支承按照滑动铰支座模拟。桥梁空间有限元模型及车辆-桥梁模型如图5,6所示。

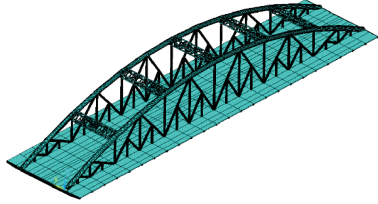


图5 桥梁有限元模型

Fig. 5 Finite element model of bridge

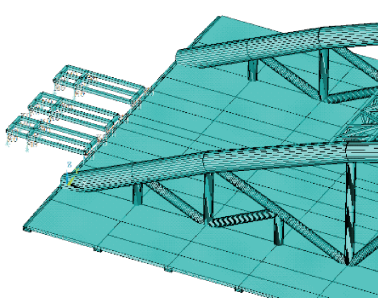


图6 车辆-桥梁模型

Fig. 6 Vehicle-bridge model

采用Lanczos法求解桥梁结构的自振特性,桥梁的前10阶自振特性和前4阶振型图如表1和图7所示。

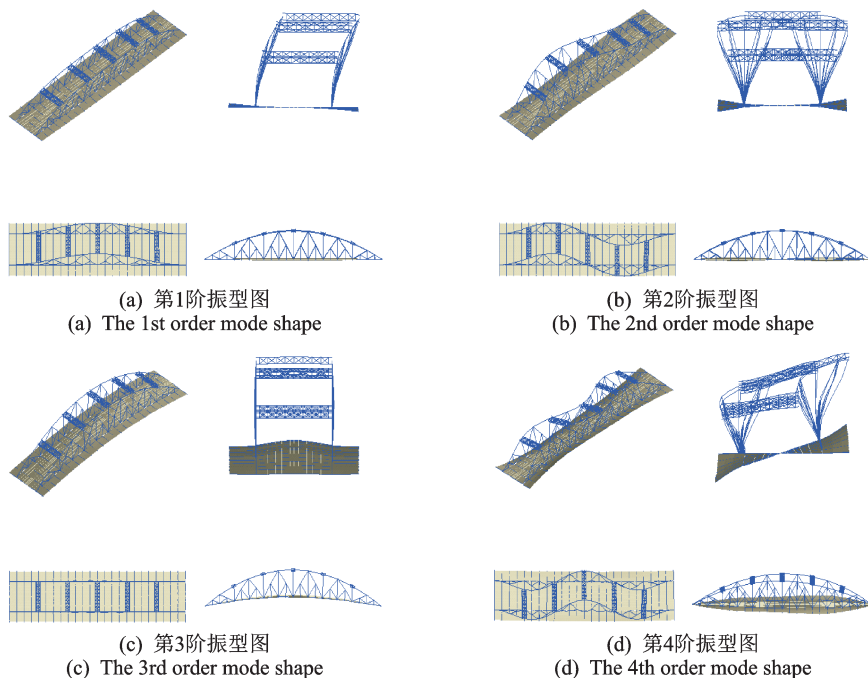
分析表1和图7结果得出:桥梁实测频率值与理论计算值最大偏差在10%以内,说明所建桥梁的有限元模型能够反映结构真实动力特性。桥梁首先发生主桁的面外横向振动,然后才出现全桥竖向和全

表1 桥梁前10阶自振特性

Tab. 1 The first 10 natural vibration characteristics of the bridge

振型阶次	频率/Hz	振型特征描述	实测频率/Hz	误差/%
1	0.708	主桁横向第1阶振动		
2	1.298	主桁横向第2阶振动		
3	1.792	全桥竖向第1阶振动	1.67	-6.81
4	2.111	全桥扭转第1阶振动、桥面板扭转振动	2.18	3.26
5	2.227	主桁横向第3阶振动		
6	2.351	全桥竖向第2阶振动、桥面板竖向振动	2.268	-3.52
7	2.561	全桥扭转第2阶振动、桥面板扭转振动	2.343	-8.52
8	2.900	桥面板局部竖向振动		
9	3.049	桥面板局部竖向振动		
10	3.095	全桥竖向第3阶振动、桥面板竖向振动	2.92	-5.65

桥扭转振动,说明主桁面外刚度相对最为薄弱。桥梁除主桁横向振动、全桥竖向和扭转振动等形式外,桥梁整体振动还常耦合有桥面局部振动,以及单一形式的桥面局部竖向振动。这是因为桥面系由2根下弦杆和横梁组成,2根下弦杆横向间距16.4 m,中间无任何纵横向构造措施减小横向跨径,导致横梁跨径较大;此外,位于下弦杆外侧横梁各有长5.7 m的悬挑段,其端部也没有相应支撑和连接;而且横梁截面为开口钢箱梁截面,经过长期运营,横梁与桥面连接被削弱,桥面板出现较多裂缝,以上均说明桥面



(a) 第1阶振型图
(a) The 1st order mode shape

(b) 第2阶振型图
(b) The 2nd order mode shape

(c) 第3阶振型图
(c) The 3rd order mode shape

(d) 第4阶振型图
(d) The 4th order mode shape

图7 桥梁振型图

Fig. 7 Modal shapes of bridge

系局部刚度较弱,易出现局部振动。

3 在役桥梁车桥耦合振动影响因素分析

基于所建的彩虹桥有限元模型,选用文献[22]的汽车模型进行考虑跳车脱空时段的在役桥梁车桥耦合振动分析,汽车参数如表 2 所示,所选车辆的竖向振动频率在国内常规三轴载重汽车的频率范围内^[22]。根据受力最不利原则,选取彩虹桥下弦跨中和桥面跨中为位移计算截面;上、下弦端部和下弦跨中为内力计算截面。根据规范(JTG D60—2015)附录,汽车荷载的冲击系数定义为:

$$\eta = \frac{Y_{d\max}}{Y_{j\max}} \quad (5)$$

式中 $Y_{d\max}$ 为在汽车过桥时的效应时间历程曲线上,最大静力效应处量取的最大动力效应值; $Y_{j\max}$ 为在汽车过桥时的效应时间历程曲线上,最大静力效应处量取的最大静力效应值。

3.1 车速影响

考虑 C 级路面,进行 1 排车(横向沿车道布置 4 辆汽车)分别沿 4 个车道中心线以 20, 40, 60, 80, 100 km/h 的速度匀速通过桥梁时的动力响应分析。计算得到桥梁在不同车速下的冲击系数如表 3 所示,不同车速下的动力响应如图 8 所示。

由表 3 和图 8 可知,桥梁下弦跨中位移冲击系数随着车速的增加先减小后逐渐增大;大多数下弦跨中位移冲击系数比桥面跨中位移冲击系数大;整体位移冲击系数随车速变化无明显规律,这是由于过桥车辆的车轮对桥面没有形成周期性激励,因此桥梁动位移峰值对应的所谓共振车速这一现象不明显。下弦跨中位移冲击系数全部超过根据规范计算得到的设计冲击系数 1.087。上、下弦端部轴力冲击

表 2 汽车计算参数

Tab. 2 Calculational parameters of vehicle

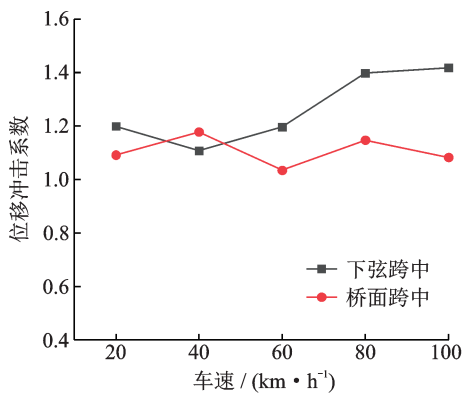
参数	数值
前轴-中轴轴距/m	4
中轴-后轴轴距/m	1.4
左右轮距/m	1.8
前轴-车体中心距离/m	3.7
车体质量(包括载重)/kg	15000
车体俯仰惯性矩/(kg·m ²)	40000
车体侧倾惯性矩/(kg·m ²)	10000
前轴悬挂系统刚度/(N·m ⁻¹)	300000
中、后轴悬挂系统刚度/(N·m ⁻¹)	1300000
前轴悬挂系统阻尼/(N·s·m ⁻¹)	5000
中、后轴悬挂系统阻尼/(N·s·m ⁻¹)	5000
前轴质量/kg	500
中、后轴质量/kg	1000
前轮刚度/(N·m ⁻¹)	700000
中、后轮刚度/(N·m ⁻¹)	2250000
前轮阻尼/(N·s·m ⁻¹)	6000
中、后轮阻尼/(N·s·m ⁻¹)	12000

表 3 桥梁在不同车速下的冲击系数

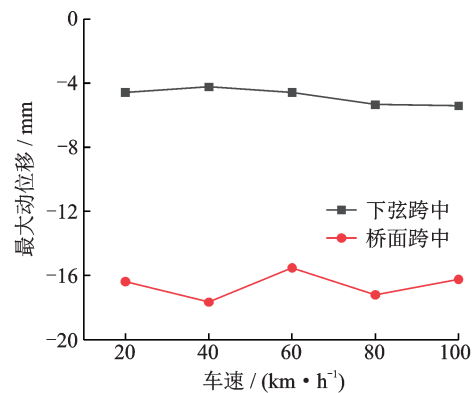
Tab. 3 Impact coefficients of the bridge at different speeds of vehicles

位移/内力 冲击系数	车速/(km·h ⁻¹)				
	20	40	60	80	100
下弦跨中位移	1.199	1.108	1.196	1.398	1.418
桥面跨中位移	1.092	1.178	1.035	1.147	1.083
上弦端部轴力	1.192	1.361	1.245	1.739	1.815
下弦端部轴力	1.122	1.245	1.147	1.578	1.652
下弦跨中轴力	1.256	1.058	1.097	1.172	1.274

系数在车速为 40 km/h 时出现局部小峰值,然后从 60 km/h 开始随着车速的增加呈增大趋势;上弦端部轴力冲击系数比下弦轴力冲击系数大。位移冲击系数与内力冲击系数随车速变化规律也不一致。



(a) Impact coefficients of displacements at mid-span



(b) Maximum dynamic displacements of mid-span

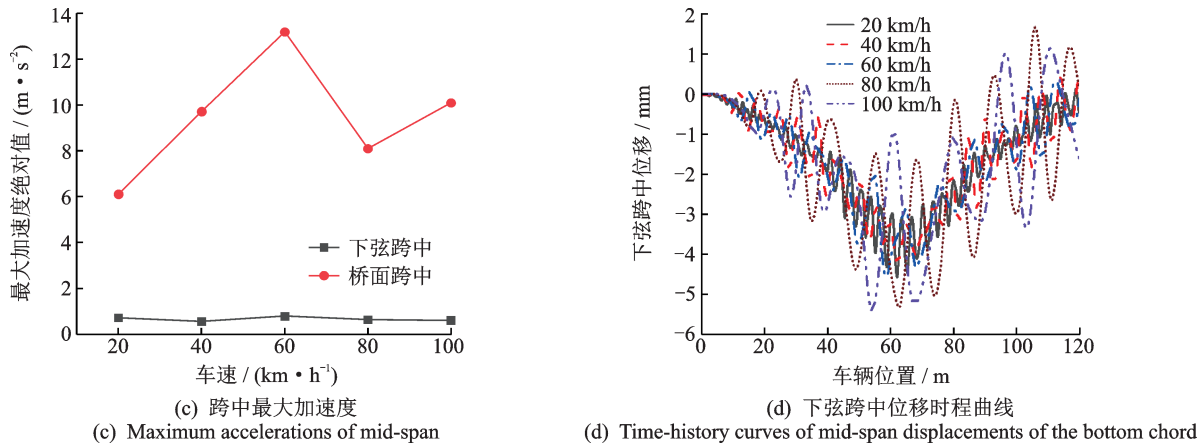


图8 桥梁在不同车速下的动力响应

Fig. 8 Dynamic responses of the bridge at different speeds of vehicles

桥面跨中最大动位移和最大加速度绝对值比下弦大很多,说明桥面竖向刚度明显弱于主桁下弦竖向刚度;由桥梁的各动力响应可知,城市快速路限速范围内,车速为80 km/h时主桁动力响应最大,桥面加速度及动位移随车速变化波动较大。

车道2上的车辆以车速为80 km/h过桥时,轮接触力时程曲线如图9所示。图中车轮接触力多次为0,说明车轮发生跳车现象,车轮脱空时间段持续时间大多在1~5个时间步范围,表明本文方法考虑了车轮与桥面的脱空时段效应。分析所有工况下车轮接触力时程结果可知,车辆在4种车速通过桥梁时,车辆中、后轮均发生与桥面脱空情况,车速大小与脱空情况无正比例关系。

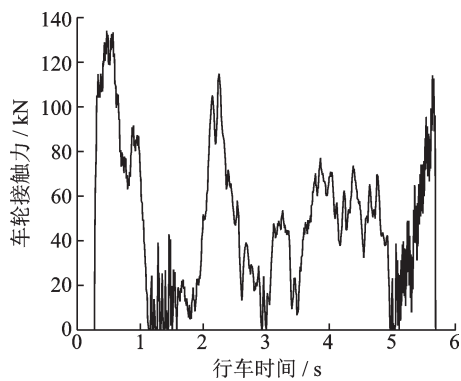


图9 车速80 km/h时车辆中轮接触力时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of the contact force of middle wheel of a vehicle at the speed of 80 km/h

3.2 汽车数量影响

汽车以80 km/h的车速匀速通过桥梁,汽车纵向间距20 m,分别进行1~5排车沿4个车道中心线同向行驶时的动力响应分析,C级路面。计算得到桥梁在不同汽车数量下的冲击系数如表4所示,不同汽车数量下的动力响应如图10所示。

由表4和图10可知,桥面最大动位移和加速度峰值均显著大于下弦,随着汽车数量增加显著增大,

表4 桥梁在不同汽车数量下的冲击系数

Tab. 4 Impact coefficients of the bridge under different number of vehicles

位移/内力 冲击系数	汽车排数				
	1排	2排	3排	4排	5排
下弦跨中位移	1.398	1.597	1.571	1.674	1.645
桥面跨中位移	1.147	1.399	1.377	1.379	1.379
上弦端部轴力	1.739	1.656	1.464	1.436	1.388
下弦端部轴力	1.578	1.530	1.351	1.310	1.259
下弦跨中轴力	1.172	1.278	1.286	1.249	1.240

说明桥面竖向刚度较弱,其振动对车排数量较为敏感。桥梁下弦跨中位移和加速度在4排车时最大,所以1个车队4排车为最不利车队布置。下弦跨中位移冲击系数全部超过根据规范计算得到的设计冲击系数1.087。

3.3 车队分布影响

将车队分别布置在单车道车道1(靠近下弦侧车道)、单车道车道2(靠近桥面跨中车道)、偏载2个车道、偏载3个车道、满布4个车道共5种工况开展车桥耦合振动分析,1个车队纵向布置4排车,C级路面。计算得到桥梁在不同车队分布下的冲击系数如表5所示,不同车队分布下的动力响应如图11所示。

表5 桥梁在不同车队布置下的冲击系数

Tab. 5 Impact coefficients under different arrangements of motorcade

位移/内力 冲击系数	车队分布				
	车道1	车道2	2车道	3车道	4车道
下弦跨中位移	1.687	1.859	1.622	1.667	1.674
桥面跨中位移	1.488	1.315	1.300	1.375	1.379
上弦端部轴力	1.358	1.470	1.407	1.441	1.436
下弦端部轴力	1.179	1.332	1.245	1.295	1.309
下弦跨中轴力	1.070	1.333	1.125	1.192	1.249

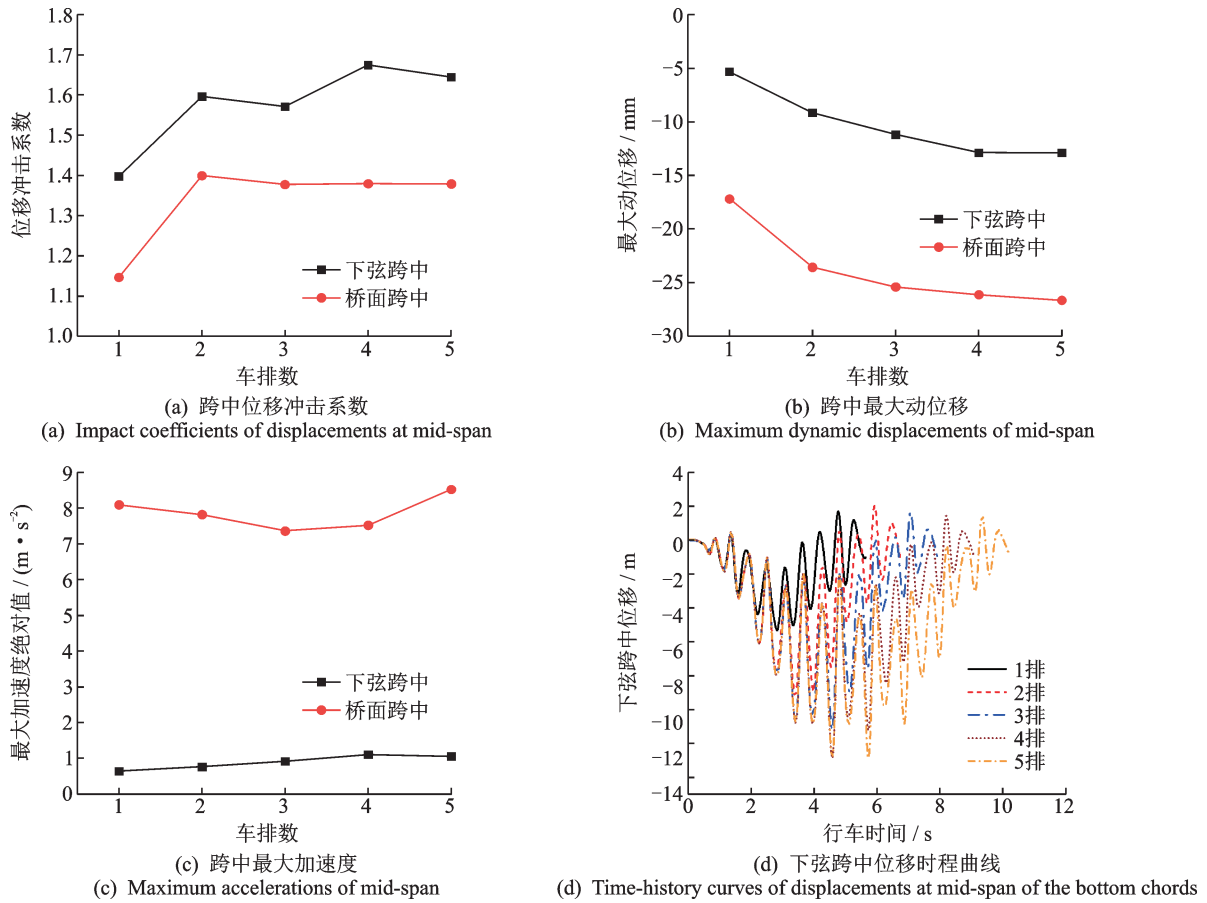


图 10 桥梁在不同汽车数量时的动力响应

Fig. 10 Dynamic responses of the bridge under different number of vehicles

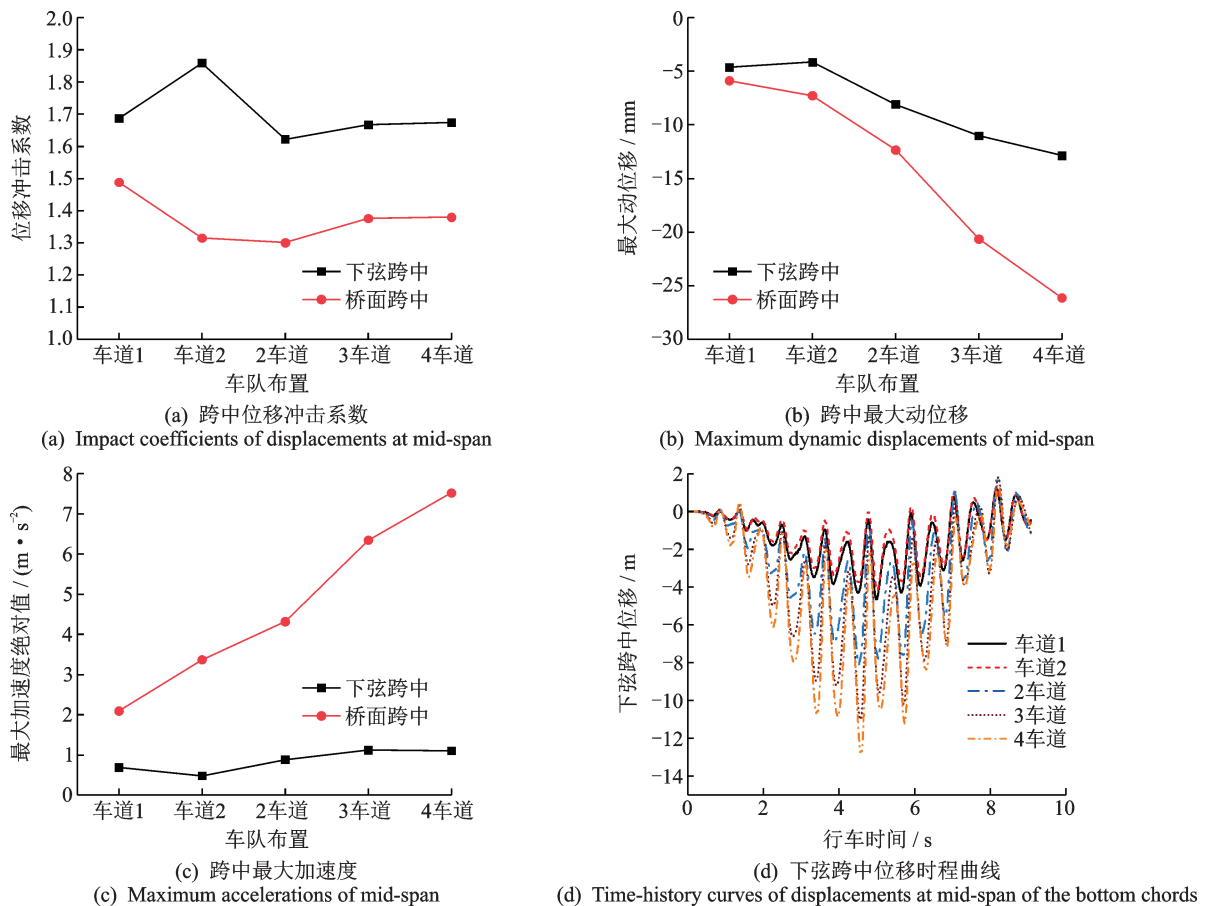


图 11 桥梁在不同车队布置时的动力响应

Fig. 11 Dynamic responses of bridge under different arrangements of motorcade

由表 5 和图 11 可知,桥梁跨中位移冲击系数多车道布载时比单车道布载时小,车队布置在车道 2 上的冲击系数大于布置在车道 1 上的冲击系数,多车道布载时冲击系数差别较小。下弦跨中和桥面跨中最大动位移随着布载车道数量增加逐渐增大。桥梁跨中位移冲击系数和跨中最大动位移曲线的变化规律不一致,这是因为冲击系数除了与跨中最大动位移响应成正比关系外,同时还与跨中最大静位移成反比例关系,跨中最大动位移最大时,而对应最大静位移也较大时,则对应冲击系数不一定最大。

下弦跨中最大加速度多车道布载比单车道布载大,超过 2 个车道以上的多车道布载时的下弦跨中最大加速度较为接近,偏载布置 3 个车道时略大;桥面跨中加速度则随着车队布置车道数量的增加整体上显著增加,说明桥面板竖向振动对布载车队数量的影响较为敏感,布载车队数量越多加速度越大。整体上桥面最大动位移和加速度均显著大于下弦,

说明桥面竖向刚度较弱。

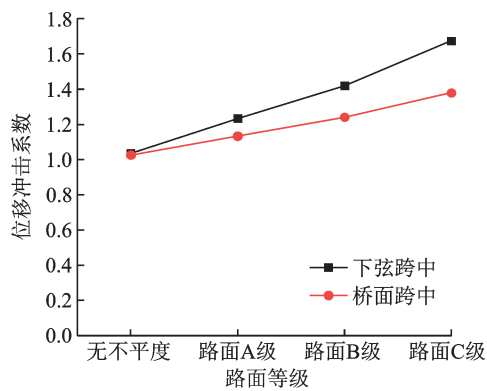
3.4 路面不平度影响

进行无路面不平度、路面不平度分别为 A 级、B 级、C 级路面 4 种工况下的车桥耦合振动分析,桥梁的车队布置为:纵向 4 排车横向满布 4 车道。计算得到桥梁在不同路面不平度下的冲击系数如表 6 所示,不同路面不平度下的动力响应如图 12 所示。

表 6 桥梁在不同路面不平度等级下的冲击系数

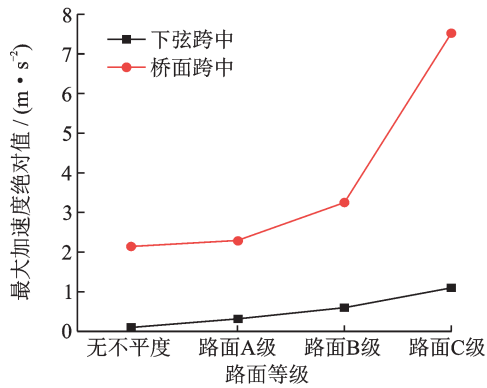
Tab. 6 Impact coefficients of bridge with different grades of road surface roughness

位移/内力 冲击系数	路面不平度等级			
	无不平度	路面 A 级	路面 B 级	路面 C 级
下弦跨中位移	1.034	1.233	1.419	1.674
桥面跨中位移	1.025	1.133	1.240	1.379
上弦端部轴力	1.001	1.089	1.243	1.436
下弦端部轴力	1.021	1.102	1.180	1.309
下弦跨中轴力	1.017	1.100	1.163	1.249



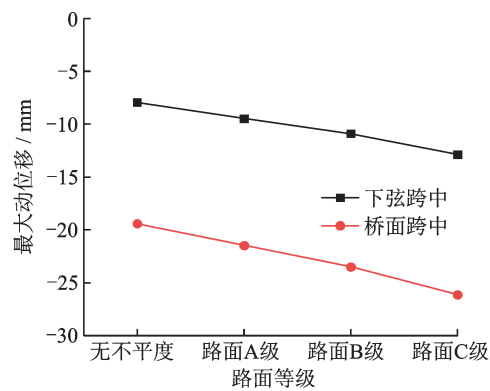
(a) 跨中位移冲击系数

(a) Impact coefficients of displacements at mid-span



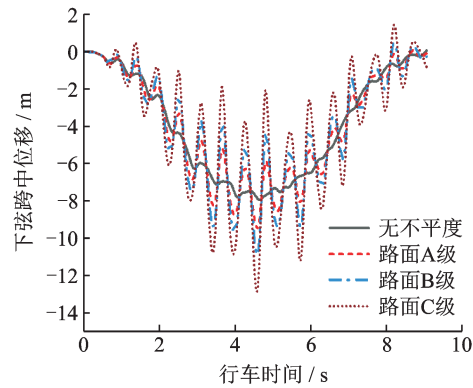
(c) 跨中最大加速度

(c) Maximum accelerations of mid-span



(b) 跨中最大动位移

(b) Maximum dynamic displacements of mid-span



(d) 下弦跨中位移时程曲线

(d) Time-history curves of displacements at mid-span of the bottom chords

图 12 桥梁在不同路面不平度等级下的动力响应

Fig. 12 Dynamic responses of bridge with different grades of road surface roughness

分析计算结果可以得出,桥梁各动力响应随着路面不平度等级的增加逐渐增加,其在 B 级路面向 C 级路面过渡中增加较多,且桥面振动加速度对路面不平度的敏感程度比下弦大。桥梁在 A 级路面的下弦跨中位移冲击系数已经接近或超过规范设计冲击系数值,桥面跨中加速度峰值较大,说明桥面竖向刚度薄弱,桥面竖向振动较大。

在 B 级和 C 级路面下,车道 2 上的第 1 排车辆的后轮接触力时程曲线如图 13 所示。

通过分析可知,在两种路面不平度下,车辆中、后轮多次发生跳车现象,跳车时车轮脱空时间段大多持续在 1~6 个时间步范围,脱空时间很小,符合物理概念,说明本文方法可考虑车轮与桥面的脱空时段效应影响。由图 13 可知,在 B 级路面下该车辆

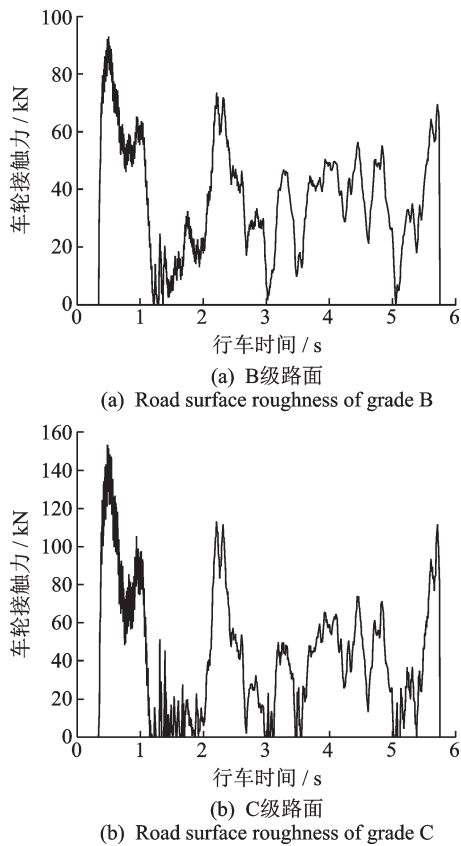


图13 车辆后轮接触力时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of the contact force of rear wheel of a vehicle

后轮已经开始发生跳车(脱空)现象,C级路面下,车轮发生跳车(脱空)的次数更多,且还出现连续跳车情况,所以随着路面不平度等级增加,车轮发生跳车次数逐渐增多。

4 结 论

(1)依据提出的建模方法进行了在役大跨径曲弦桁梁桥车桥耦合振动分析,不仅可以考虑复杂的桥梁类型及空间车辆模型或车队,而且能够考虑车轮与桥面的脱空时段效应影响,并进一步实现复杂车辆连续跳车的车桥耦合振动计算,扩大了车桥振动研究范畴。

(2)在役桥梁各位移、内力计算截面冲击系数随车速的增加波动变化,桥梁车速为80 km/h时主桁动力响应最大。桥梁整体动位移和加速度响应随车速变化规律不一致。

(3)桥面竖向振动及各动力响应随着汽车数量、布载车道数量增加而显著增大,桥面跨中最大动位移和加速度均显著大于下弦;多车道车队布载时,下弦冲击系数小于单车道车队布载时的冲击系数,且下弦跨中最大加速度大于单车道车队布载时的跨中最大加速度;当车队布载车道数 ≥ 2 时,不同布载车道数情况下的桥梁下弦跨中动力响应较为接近。

(4)桥梁各动力响应均随路面不平度等级的增

加逐渐增大,桥梁下弦跨中位移冲击系数全部超过规范设计值,桥面振动程度较大。

(5)B级和C级路面的车队过桥分析中,车辆均发生了中、后轮脱空现象;路面等级越高,发生脱空次数越多,而且也说明在路面良好状态下(B级)汽车已开始出现跳车现象,且在C级路面情况下出现连续跳车现象;车速与车轮脱空次数无正比关系。

参考文献:

- [1] 夏禾,张楠,郭薇薇,等.车桥耦合振动工程[M].北京:科学出版社,2014:13-15.
- [2] 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 Lu, Wang Fang. 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.
- [3] Law S S, Zhu X Q. Bridge dynamic responses duo to road surface roughness and braking of vehicle[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005,282(12):805-830.
- [4] 李岩,吴志文,蔡明,等.一种随机车流与桥梁耦合振动的分析方法[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(3):46-52.
Li Yan, Wu Zhiwen, Cai Ming, et al. An analysis method for coupled vibration random traffic flow and bridge [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3):46-52.
- [5] Jin Zhibin, Pei Shiling, Li Xiaozhen, et al. Probabilistic evaluation approach for nonlinear vehicle-bridge dynamic performances [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 339: 143-156.
- [6] 韩万水,王涛,李永庆,等.基于模型修正梁格法的车桥耦合振动分析系统[J].中国公路学报,2011,24(5):47-55.
Han Wanshui, Wang Tao, Li Yongqing, et al. Analysis system of vehicle-bridge coupling vibration with grillage method based on model updating[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011,24(5):47-55.
- [7] Yin Xinfeng, Fang Zhi, Cai C S, et al. Non-stationary random vibration of bridges under vehicles with variable speed[J]. Engineering Structures, 2010,32:2166-2174.
- [8] 朱劲松,香超,祁海东.大跨度悬索桥冲击系数影响因素研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(4):413-422.
Zhu Jinsong, Xiang Chao, Qi Haidong. Study of influencing factors of impact coefficient of long-span suspension bridge [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(4):413-422.
- [9] Liu X, 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.
- [10] 樊建平,曹高威,胡隽,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.
- Fan Jianping, Cao Gaowei, Hu Jun, et al. Dynamic analysis of vehicle-bridge interaction considering the action of jump impacting force[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2016, 37(6): 553-558.
- [11] 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(S2): 141-145.
- Liu Yu, Fan Chenguang, Gao Fangqing, et al. Analysis of vehicle-bridge coupling vibration under the condition of considering the vehicle pitching[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2): 141-145.
- [12] Zhu D Y, Zhang Y H, Ouyang H. A linear complementarity method for dynamic analysis of bridges under moving vehicles considering separation and surface roughness[J]. Computers and Structures, 2015, 154: 135-144.
- [13] Bazea L, Ouyang H. Dynamics of a truss structure and its moving-oscillator exciter with separation and impact-reattachment[C]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science, 2008, 464(2098): 2517-2533.
- [14] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 376-386.
- [15] 刘献栋, 邓志党, 高峰. 公路路面不平度的数值模拟方法研究[J]. 北京航空航天大学学报. 2003, 29(9): 843-846.
- Liu Xiandong, Deng Zhidang, Gao Feng. Research on the method of simulating road roughness numerically[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2003, 29(9): 843-846.
- [16] 王艳. 基于车桥耦合振动的在役桥梁动力性能分析及评价研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- Wang Yan. Dynamic performance analysis and evaluation for in-service bridge based on vehicle-bridge coupled vibration[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [17] Zhang Nan, Xia He. Dynamic analysis of coupled vehicle-bridge system based on inter-system iteration method[J]. Computers & Structures, 2013, 114-115: 26-34.
- [18] 邓子铭, 郭向荣, 张志勇. 地震作用对钢桁梁桥车桥系统耦合振动的影响分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(1): 184-191.
- Deng Ziming, Guo Xiangrong, Zhang Zhiyong. Coupled vibration of train-bridge system of steel truss bridge with seismic effect[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(1): 184-191.
- [19] 刘永健, 刘世忠, 米静, 等. 双层公路钢桁梁桥车桥耦合振动[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(6): 20-28.
- Liu Yongjian, Liu Shizhong, Mi Jing, et al. Vehicle-bridge coupled vibration of highway double-deck steel truss bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(6): 20-28.
- [20] 河南省公路工程试验检验中心有限公司. 郑州市北环跨铁路枢纽站立交桥荷载试验报告[R]. E2008-072, 2008.
- [21] 河南省公路工程试验检验中心有限公司. 郑州市北环跨铁路枢纽站立交桥荷载试验报告[R]. E2010-062, 2010.
- [22] 李伟钊. 基于动力测试的公路混凝土梁式桥工作性能评定方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- Li Weizhao. Research on working performance evaluation methods for highway concrete girder bridges based on dynamic testing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

Analysis of vehicle-bridge coupled vibration of long-span curved truss bridge in service

ZHOU Rui-jiao, WANG Yan, CHEN Huai

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to study the dynamic performance and vehicle-bridge vibration responses of the curved-string truss bridge in service, the vehicle-bridge coupled vibration analysis of the curved-string truss bridge in service are carried out based on the vehicle-bridge coupled vibration analysis method which can consider the period of vehicle jumping. The Rainbow Bridge with span of 122 m is taken as an example, the finite element model of the bridge is set up to analyze the dynamic characteristics of the bridge and the dynamic responses of the bridge are calculated while space motorcades cross the bridge, and then, the influences of factors such as speed, number of vehicles, motorcade distribution and road surface roughness on the dynamic responses of the curved-string truss bridge in service are discussed. The result shows that the vertical stiffness of the bridge deck is relatively weak, and the local vibration of the bridge deck is easy to be excited; the vertical vibration and the dynamic responses of the bridge deck increase significantly with the number of vehicles and the number of loaded lanes; the impact coefficient of mid-span displacement of the bottom chords exceed the value of design standard, and the bridge deck vibrates always with a greater degree; the middle and rear wheels of the vehicles are prone to jump, the higher the grade of road surface roughness is, the more jumps of vehicles will occur, and the vehicles are also prone to jump when the road surface roughness is in good conditions.

Key words: vehicle-bridge coupled vibration; in-service bridges; curved-string truss bridge; dynamic response; jump of wheel

作者简介: 周瑞娇(1997—),女,硕士研究生。电话:18236549987;E-mail:18236549987@163.com。

通讯作者: 王 艳(1980—),女,博士,副教授。电话:(0371)67781680;E-mail:zzdxwang@126.com。