

## 车辆参数对大跨钢管混凝土拱桥车桥耦合振动响应的影响规律研究

于鹏<sup>1</sup>,余存<sup>1</sup>,任兆永<sup>1</sup>,覃玉海<sup>1</sup>,贺盛<sup>1,2</sup>,王龙林<sup>3†</sup>

- [1. 广西大学 土木建筑工程学院,广西 南宁 530004;  
2. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室(广西大学),广西 南宁 530004;  
3. 广西博世科环保科技股份有限公司,广西 南宁 530007;  
4. 广西交科集团有限公司,广西 南宁 530207]

**摘 要:**车辆运行会引起桥梁振动,随着跨径增大,桥梁非线性增加,车桥耦合作用愈加明显.本文以 575 m 大跨钢管混凝土拱桥广西平南三桥为研究对象,对其开展了脉动试验和现场无障碍行车试验,同时建立了精细化车桥耦合有限元模型,进行了不同车速、车重影响下的车桥耦合振动响应分析,探索其响应规律,并提取桥梁重要截面处的冲击系数与现行规范计算值比较,讨论现行规范对该桥的适用性.结果表明:计算结果与现场脉动试验结果吻合良好,不同工况下的动应变时程曲线变化趋势基本一致.车速在 20 km/h~60 km/h 范围内,该桥的动力响应与车速大小无明显关系,当车速超过 60 km/h 时,挠度会随车速增加而急剧增大.车重增加会导致该桥最大动挠度增加,冲击系数减小,但桥梁实际的总响应并未减小.因此,严格控制过桥车辆的速度和车重,可有效降低行车荷载对桥梁的冲击效应.

**关键词:**车桥耦合响应;大跨钢管混凝土拱桥;现场试验;精细化有限元;冲击系数

**中图分类号:**U441.7

**文献标志码:**A

## Study on Influence Law of Vehicle Parameters on Vehicle-bridge Coupling Vibration Response of Long-span Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge

YU Peng<sup>1</sup>, YU Cun<sup>1</sup>, REN Zhaoyong<sup>1</sup>, QIN Yuhai<sup>1</sup>, HE Sheng<sup>1,2</sup>, WANG Longlin<sup>3†</sup>

- [1. School of Civil Engineering and Construction, Guangxi University, Nanning 530004, China;  
2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of the Ministry of Education (Guangxi University), Nanning 530004, China;  
3. Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanning 530007, China;  
4. Guangxi Jiaoke Group Limited, Nanning 530207, China]

**Abstract:** Vehicle traveling can cause bridge vibration. As the span increases, bridge non-linearity increases and vehicle-bridge interaction becomes more pronounced. In this paper, a 575m long-span concrete-filled steel tubular arch bridge, Guangxi Pingnan Third Bridge, is taken as the study objective. Pulsation tests and accessibility

\* 收稿日期:2024-01-25

**基金项目:**广西重点研发计划资助项目(桂科 AB22036007), Guangxi Key R&D Program (Gui Ke AB22036007);广西高校引进海外高层次人才“百人计划”资助项目, Research Grant for 100 Talents of Guangxi Plan

**作者简介:**于鹏(1987—),男,广西桂林人,广西大学副教授,博士研究生

† 通信联系人, E-mail: wl1955@163.com

field tests were carried out on it. Meanwhile, a refined vehicle-bridge coupling finite element model was established. Vehicle-bridge coupling vibration response under different vehicle speeds and vehicle weights was analyzed to explore its response law. Besides, the dynamic coefficient of control sections of the bridge is also calculated and compared with that calculated by the current code to discuss the applicability of the current code to this bridge. The results show that the numerical results are in good agreement with the results of the field pulsation tests, and the trend of the dynamic strain time course curve under different conditions is basically the same as that of the field tests. There is no significant relationship between the dynamic response of the bridge and the vehicle speed within the speed range of 20 km/h to 60 km/h. When the vehicle exceeds 60 km/h, the deflection increases sharply with the speed. The increase in vehicle weight leads to an increase in the maximum dynamic deflection of the bridge and a decrease in the impact coefficient, but the actual total response of the bridge does not decrease. Therefore, the speed and weight of the vehicles crossing the bridge should be strictly controlled to effectively reduce the impact effect of the traffic load on the bridge.

**Key words:** vehicle-bridge coupling response; long-span concrete-filled steel tube arch bridge; field test; refined finite element; impact coefficient

车桥耦合振动响应主要包括桥梁振动响应和车辆振动响应,反映桥梁振动响应大小的指标通常包括动挠度、动应变及冲击系数等<sup>[1]</sup>.桥梁在车辆激励下的振动响应是桥梁结构设计是否符合正常使用要求的重要评判依据,因此,开展公路车桥耦合振动响应研究对桥梁的健康监测具有重要意义.

车桥耦合行为已被广泛研究<sup>[2-6]</sup>.Wills等首次开展了针对车桥耦合振动问题的一系列铁路桥梁模型试验研究,其结果表明桥梁振动使其结构承受比列车静载作用下更大的变形和应力,车辆引起的动力效应不可忽视<sup>[7]</sup>.为了获取真实的动力响应,Deslandres等率先在Pontoise公路桥上开展了一系列动力试验,其结果表明公路车桥耦合振动问题激励机理复杂<sup>[8]</sup>.瑞士联邦材料研究实验室(EMPA)<sup>[9]</sup>根据266座不同类型公路桥梁现场动载试验数据,推导了桥梁基频相关动力冲击系数计算公式,提出了充分考虑车辆参数的新型车桥耦合振动系统,其计算方法更具实用性<sup>[10]</sup>.Chen和Cai<sup>[11]</sup>开展了考虑风荷载和车辆荷载同时作用的桥梁结构疲劳性能研究,首次提出了风-车-桥耦合作用下大跨桥梁疲劳研究的分析框架.Deng和Cai<sup>[12]</sup>提出了一种利用桥梁振动响应直接识别动态车辆荷载的新方法,进而构建了一种基于车辆在桥面上行驶时接触点位移协调和相互作用力的车桥耦合振动系统,试验证明该系统能准确识别车辆动态轴向荷载.但目前学者对于公路拱桥的

车桥耦合振动研究却较少<sup>[13]</sup>.

结合数值模拟和现场试验的车桥耦合分析已被证实是一种分析桥梁动力性能的高效方法<sup>[14]</sup>.Li等<sup>[15]</sup>以一座跨径为108 m的中承式钢管混凝土拱桥为研究对象,建立了12自由度双轴三维汽车有限元模型,结合数值模拟和现场试验,研究了考虑路面平整度和行车速度的车桥耦合振动响应.蒋培文等<sup>[16-17]</sup>建立了连续体桥梁的精细化有限元模型,综合考察了总跨数、墩高、中跨跨径、路面平整度等级等多个设计参数对车桥耦合振动的影响,现场试验结果表明该精细化车桥耦合有限元分析模型具有较高的准确性.陈水生、桂水荣等<sup>[18-21]</sup>以某简支桥为例,对比了精细化有限元模型与传统MATLAB弹簧-质量-阻尼数值分析车桥耦合模型计算结果,发现精细化有限元模型计算车桥耦合振动响应更加准确.

拱桥具有刚度高、稳定性强等特点,因而被广泛用于公路、铁路交通系统中.随着中国钢管混凝土拱桥设计和施工水平的显著提升,其跨径也在逐步攀升<sup>[22]</sup>.2019年底,广西平南三桥顺利通车,其主桥跨径达575 m,刷新了钢管混凝土拱桥最大跨径的世界纪录.目前,我国现行规范《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)<sup>[23]</sup>中的冲击系数计算公式仅考虑桥梁结构的几何参数,然而随着桥梁跨径的提升,以往的计算方法可能不再适用.此外,其并未考虑车桥耦合振动的影响,这对于车桥耦合效应不明显的中

小跨度桥梁而言影响较小,但对于车桥耦合效应较大的大跨度桥梁影响较大,同时,国内外对大跨钢管混凝土拱桥车桥耦合振动效应的设计和评估尚无具体规范<sup>[24]</sup>.因此,开展大跨钢管混凝土拱桥车桥耦合振动效应研究具有重要意义.

本文以 575 m 大跨钢管混凝土拱桥广西平南三桥为研究对象,开展了现场脉动试验和无障碍行车试验,同时借助有限元软件建立精细化模型,分析大跨钢管混凝土拱桥车桥耦合振动响应行为,研究车速、车重对挠度和冲击系数的影响规律,提出了适用于平南三桥的动力冲击系数.

## 1 现场试验

### 1.1 工程概况

本文研究对象为广西平南三桥,是主跨径 575 m 的中承式拱桥,拱肋部分的计算矢跨比 1/4,拱轴系数为 1.50.该桥面道路为等级二级的公路,设计通车时速 60 km/h.桥梁现场实拍图和结构示意图分别如图 1 和图 2 所示.

### 1.2 脉动试验

为得到该桥的主要振型,将传感器布置在目标



图 1 实桥航拍图

Fig.1 Aerial photo of the bridge

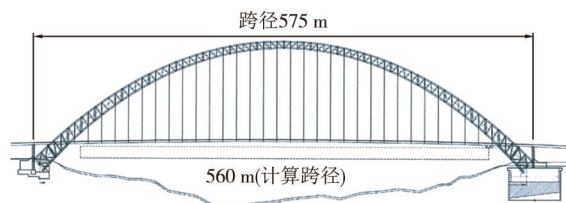


图 2 结构示意图

Fig.2 Structure diagram

振型的峰值和节点处,中间过渡位置应根据需要适当加密测点.在本次模态试验中,测点设置在上、下游吊杆与桥面的相交处.传感器采用 DH5907N 型双向速度拾振器,拾振器使用黄油作为耦合剂粘贴于护栏内沿处,并调节至速度档.全桥各布置 64 个测点,脉动试验测点具体布置情况如图 3 所示,图 4 为现场安装照.

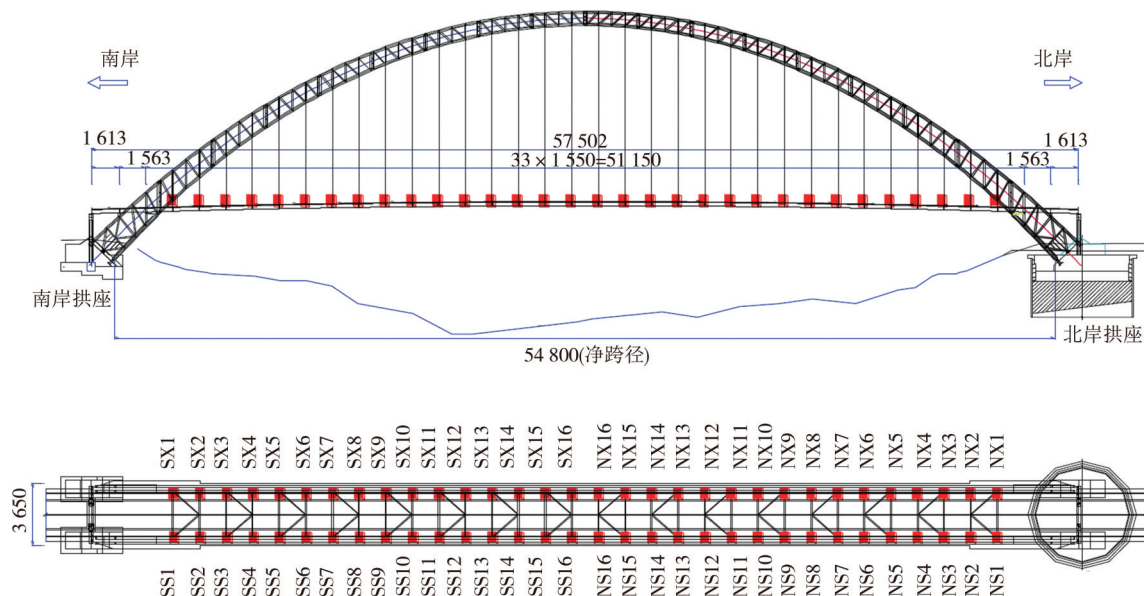


图 3 测点布置图(“■”为拾振器,单位:cm)

Fig.3 Layout of the measurement points(“■” are pickups, unit: cm)

### 1.3 无障碍行车试验

本次无障碍行车试验选用与桥梁日常运营条件相接近的 32 t 重载车作为加载车辆.试验过程中,四

辆相同型号车辆以不同的速度(20 km/h、40 km/h、60 km/h)通过试验桥梁,测试结构的动力响应(主要为动应变),图 5 为试验用车示意图.试验车辆以相



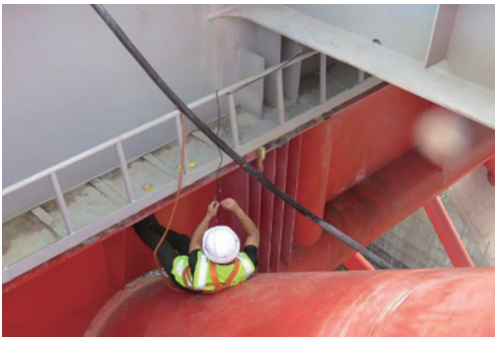
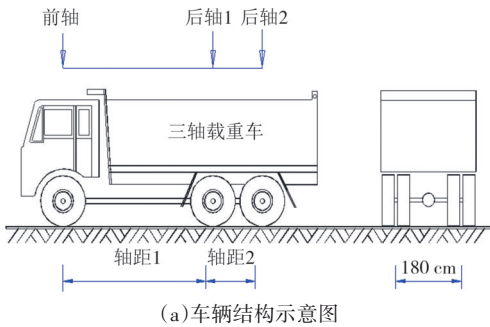


图4 拾振器现场安装照  
Fig.4 Photo of the on-site installation of vibration pickup

同的速度并排行驶,并沿桥面行车道匀速往返,使结构产生受迫振动.钢管拱肋动应变监测断面选定为拱肋的 $L/2$ 截面,合计布置4个应变传感器,测点布置如图6所示,借助DH5908N无线动态应变测试分析系统采集各测点处的时程动应变.



(a)车辆结构示意图  
(b)现场试验车辆示意图  
图5 试验用车示意图  
Fig.5 Diagram of the test vehicle

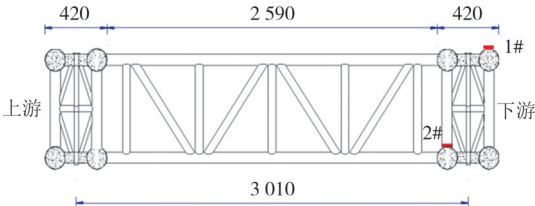


图6  $L/2$ 拱肋截面动态应变传感器布置图  
 (“■”为传感器,单位:cm)  
Fig.6 Arrangement of dynamic strain measurement points at the  $L/2$  arch rib sections (“■” are pickups, unit: cm)

2 数值计算

2.1 桥梁模型

本文采用ABAQUS软件建立空间桥梁模型,为提高建模效率,主要采用节点单元和梁单元对桥梁结构进行离散化处理.全桥模型由9 771个梁单元、72个杆单元和788个壳单元组成.除支座约束外,其他边界的约束方式如下:1)吊杆与拱肋、主梁之间采用铰接约束;2)主横梁与主纵梁之间采用刚性连接;3)拱肋与肋间横梁采用刚性连接;4)桥面板与桥面横纵梁采用刚性连接.桥梁有限元模型如图7所示.

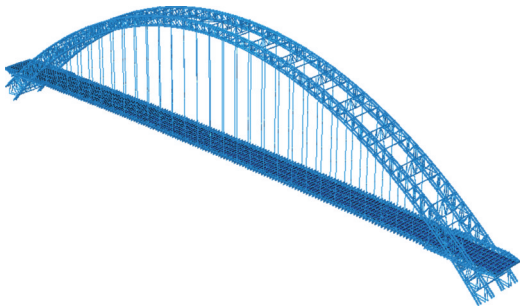


图7 某大跨钢管混凝土拱桥有限元模型  
Fig.7 Finite element model of a long-span concrete-filled steel tube arch bridge

在对脉动试验中仪器采集到的响应信号进行频谱分析后,才可确定桥梁的自振频率.本次试验主要采用传递率法对该桥的模态参数进行识别分析,具体识别结果如图8所示,频谱图中的每个峰值代表着1阶模态.根据图8可以清楚地识别出该桥各阶自振频率以及对应的阻尼比.

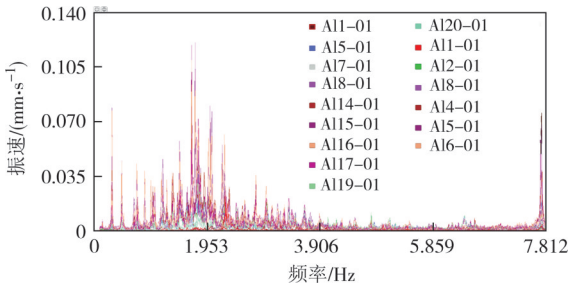


图8 实测竖向振动传递率频谱图  
Fig.8 Measuring vertical vibration transmissibility spectrum

本文采用Lanczos法进行模态分析,桥梁前两阶自振频率及振型部分对比如表1、图9和图10所示.由表1、图9和图10可知,该桥的前两阶振型包括两个竖向变形和一个扭转变形,实测结果与仿真结果

基本一致.其中,相对误差最大仅为2.9%,最小为1.3%,模态保证标准值大于0.9,表明该桥梁模型与实际情况相符,可用于开展车桥耦合仿真研究.

表1 前两阶桥面自振频率对比

Tab.1 Comparison of the first two orders of self-oscillation frequencies

阶次	实测频率/ Hz	计算频率/ Hz	相对误差/ %	振型主要特性
1	0.313	0.317	1.3	1阶竖向弯曲(反对称)
2	0.483	0.468	3.1	2阶竖向弯曲(对称)

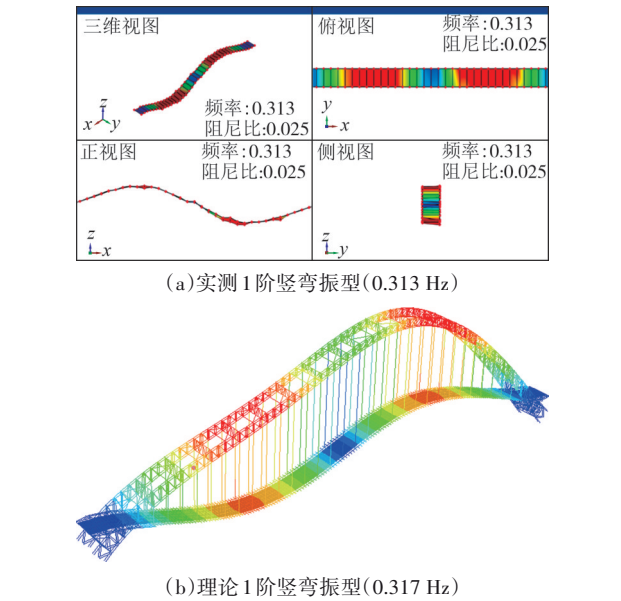


图9 实测1阶竖弯振型与理论值对比

Fig.9 Comparison of measured 1st order vertical bending vibration pattern with theoretical values

2.2 车辆模型

本文所建立的车辆模型为三轴空间模型(共包含九个自由度),模型主要构件包括车身、悬架、车轮三部分.在上述部件当中,6个悬架和6个车轮仅存在竖向自由度( $Z_{w1} \sim Z_{w6}$ 、 $Z_1 \sim Z_6$ ),车身包括竖向、首尾俯仰及侧向翻滚的自由度( $Z_v$ 、 $\theta$ 、 $\phi$ ),车身、车轮的质量分别为 $m_v$ 、 $m_1 \sim m_6$ ,悬架质量计入车身质量中, $I_p$ 、 $I_r$ 分别为车身的首尾俯仰质量惯性矩、侧向翻滚惯性矩.悬架和车轮均考虑采用线性弹簧阻尼单元模拟, $K_{s1} \sim K_{s6}$ 、 $K_1 \sim K_6$ 分别为悬架和车轮的刚度, $C_{s1} \sim C_{s6}$ 、 $C_1 \sim C_6$ 分别为悬架和车轮的阻尼.本文的九自由度三轴空间汽车理论模型如图11所示.

将图11的车辆理论模型写成矩阵形式如式(1)所示:

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{z}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{z}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{z}_v = \mathbf{F}_{vb} + \mathbf{F}_{vg}$$

(1)

式中: $\mathbf{M}_v$ 、 $\mathbf{C}_v$ 和 $\mathbf{K}_v$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度

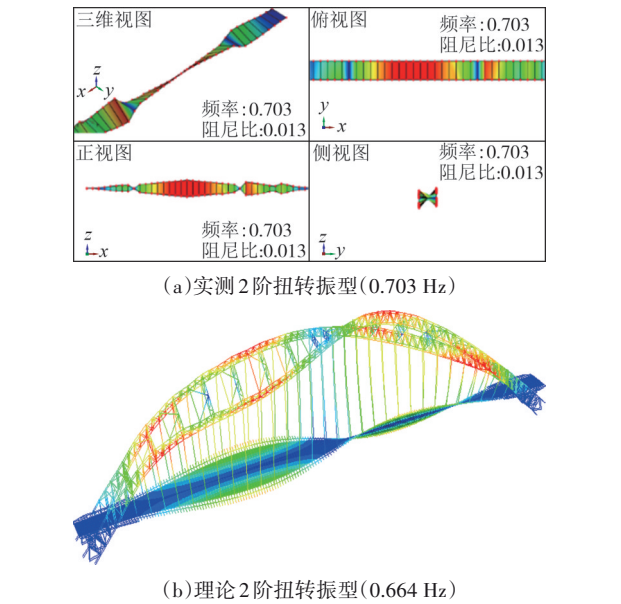


图10 实测2阶扭转振型与理论值对比

Fig.10 Comparison of measured 2nd order torsional vibrations pattern with theoretical values

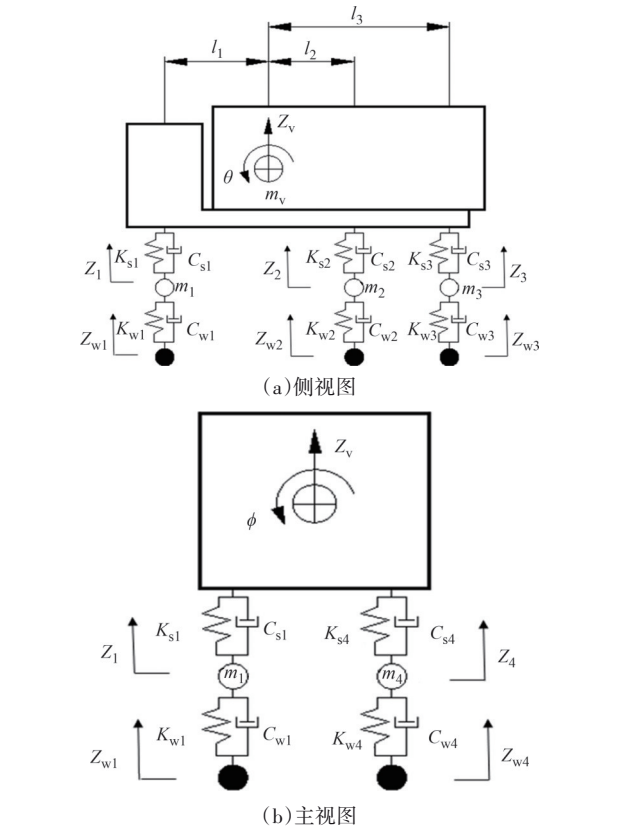


图11 车辆理论模型图

Fig.11 Vehicle theoretical model diagram

矩阵,下标v代表车辆模型; $\ddot{\mathbf{z}}_v$ 、 $\dot{\mathbf{z}}_v$ 和 $\mathbf{z}_v$ 分别为加速度矩阵、速度矩阵和位移矩阵; $\mathbf{F}_{vb}$ 为车辆模型在行驶过程中所承受的桥梁作用力矩阵; $\mathbf{F}_{vg}$ 为车辆所受的重力荷载矩阵.

车辆建模参数根据现场试验用车(江淮某型号自卸渣土车)选取,具体参数如表 2 所示.此外,为保证车辆行驶过程中主要受力构件不受影响并尽可能简化模型,本文做出以下假设:1)汽车全程匀速行驶;2)车辆之间的相互作用被忽略;3)不考虑悬架自身的变形;4)不包括悬架元件的非线性特性(弹簧和阻尼).

表 2 车辆模型参数表

Tab. 2 Vehicle model parameter table

参数	符号	单位	数值
车身质量	$m_v$	kg	32 000
点头转动惯量	$\theta$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	148 895.8
翻滚转动惯量	$\phi$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	37 223.9
前轮质量	$m_1, m_4$	kg	490
后轮质量	$m_2, m_3, m_5, m_6$	kg	710
前、后悬架刚度	$K_{11}, K_{14}$	N/m	243 000, 1 970 000
前、后轮刚度	$K_{12}, K_{13}; K_{15}, K_{16}$	N/m	875 000; 350 000
前、后悬架阻尼	$C_{11}, C_{12}$	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	2 190, 7 880
前、后轮阻尼	$C_{12}, C_{13}; C_{15}, C_{16}$	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	2 000; 2 000
轴距	$l_1, l_2, l_3$	m	2.0, 2.7, 3.4

其中,车身采用 R3D4 离散刚体单元,车轮采用 C3D8R 实体单元,悬架系统的刚度采用 SPRING4 弹簧单元,悬架系统的阻尼采用 DASHPOTA 阻尼单元.车轮模型采用线弹性橡胶材料,各车轮中心分别设置参考点“RP-WHEEL”,将车轮中心参考点与车轮内径表面耦合,通过释放“UR2”实现车轮绕车轴方向的旋转.最后,依据上述方法建立的车辆模型如图 12 所示.

2.3 不平整路面模型

大量的车桥耦合研究和实测结果表明<sup>[25-26]</sup>,路面平整度曲线与高斯随机分布函数高度相符,它们都具有平稳性以及均值为零等特征.因此,车桥耦合分析中,功率谱密度函数通常可用于生成不平整路面.结合相关研究<sup>[27]</sup>,本文拟采用《机械振动 道路路面谱测量数据报告》(GB/T 7031—2005)<sup>[28]</sup>中的相关参数用于生成不平整路面模型,路面随机不平整功率谱密度的表达如式(2)所示:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left| \frac{n}{n_0} \right|^{-w}$$

(2)

式中: $n$ 为空间频率, $n=\frac{1}{\lambda}$ ;  $n_0$ 为空间参考频率,一般  $n_0=0.1/\text{m}$ ;  $G_q(n_0)$ 为路面平整度系数,与路面等级有关,具体取值参照表 3;  $w$ 为频率指数.

模拟不平整路面的方法主要包括:三角级数叠加法、AR 积分法和高斯白噪声法等.在这些方法中,

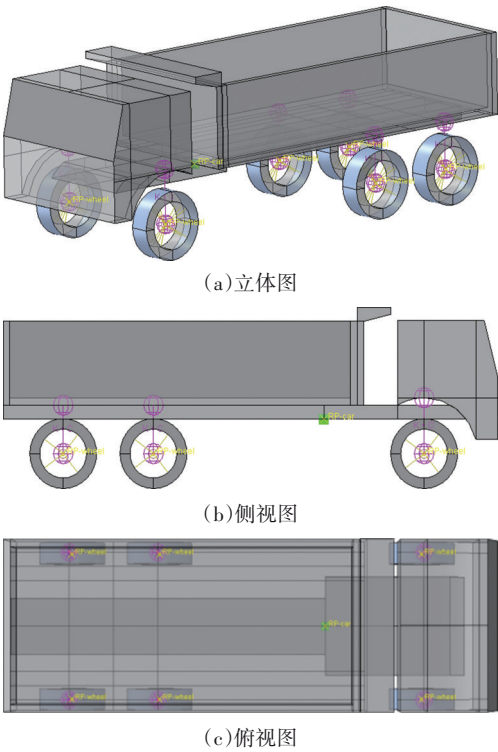


图 12 车辆有限元模型  
Fig.12 Finite element model of vehicle

表 3 各级路面平整度系数参照表  
Tab. 3 Reference table of road roughness coefficients  
at all levels

桥面等级	路面平整度系数/(10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> )		
	最小值	平均值	最大限值
A(路面极好)	8	16	32
B(路面较好)	32	64	128
C(路面一般)	128	256	512
D(路面较差)	512	1 024	2 048

三角级数叠加法应用最为广泛.选用正弦谐波三角级函数的叠加运算,路面平整度的表达如式(3)所示:

$$r(x) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N \sqrt{G_q(n_k) \Delta n} \sin(2\pi n_k x + \varphi_k)$$

(3)

式中: $x$ 为纵桥方向坐标; $N$ 为划分空间频率的频带数; $r(x)$ 为汽车行驶到某距离时的路面平整度值; $G_q(n_k)$ 为根据路面等级标准计算出的功率谱密度函数; $\Delta n$ 为空间频率中的频率间隔, $\Delta n = (n_u - n_l)/N$ ,  $n_u$ 和  $n_l$ 分别表示考虑的空间频率最大值和最小值,为保证因为路面平整度而产生的耦合振动能将车辆的固有频率包含于其中,  $\Delta n$ 一般取 0.011~0.283 之间;  $n_k$ 为在  $[0, 2\pi]$ 内定义的离散空间频率,  $n_k = n_l + \left(k - \frac{1}{2}\right) \Delta n$ ;  $\varphi_k$ 为一组在  $[0, 2\pi]$ 上服从均匀分布的随机数.



根据三角级数叠加法在 MATLAB 编写程序中生成的路面样本如图 13 所示,图中路面平整度系数选用该级路面所对应的系数平均值.本文利用 MATLAB 生成不平整路面样本,然后将其处理成空间坐标,导入到 ABAQUS 桥梁模型的 Inp 文件中,在 Inp 文件中找到相应的节点坐标值,并将其空间坐标相叠加生成粗糙路面.不平整路面有限元模型生成示意图如图 14 所示.

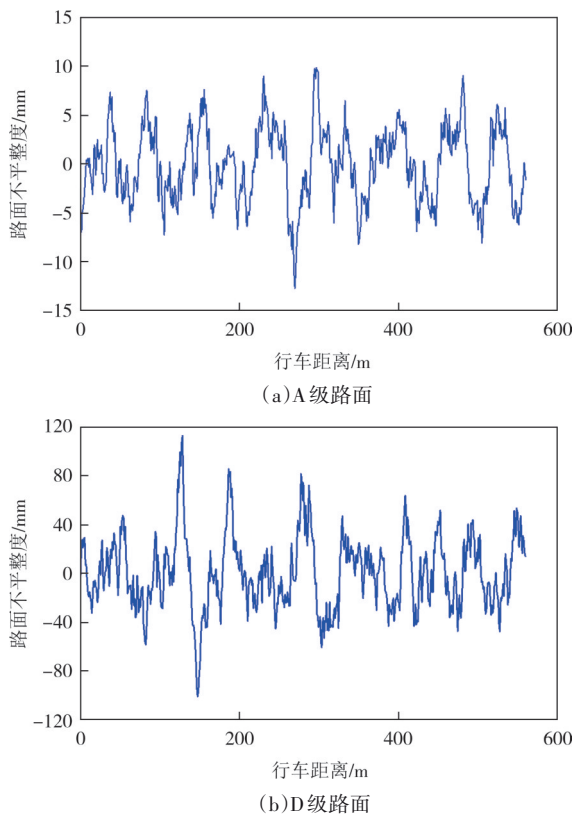


图 13 不同路面样本

Fig.13 Different road surface samples

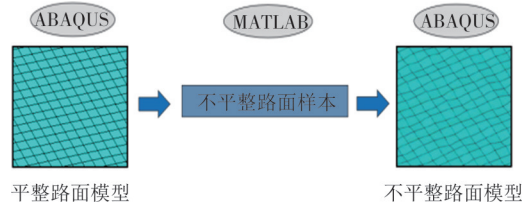


图 14 不平整路面模型生成示意图

Fig. 14 Uneven road surface model generation diagram

2.4 耦合模型验证

本文采用的耦合方法无须自编复杂的车桥耦合分析程序,而是一种仅凭借通用有限元软件即可完成车桥耦合分析的简易方法.具体流程为首先建立空间桥梁模型,对桥梁模型进行模态分析及验证;之后建立汽车模型,对车轮-桥面接触进行设置;最后,为验证该方法的准确性,将模型的计算结果与试验结果进行比较.

在车辆行驶过程中,不考虑车轮与桥面分离的情况下,则车轮和桥面接触点满足位移协调关系和相互作用力关系,将桥梁振动方程与车辆振动方程相结合,可建立车桥耦合振动方程,如式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b & \\ & \mathbf{M}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{z}}_b \\ \ddot{\mathbf{z}}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b + \mathbf{C}_{bb} & \mathbf{C}_{bv} \\ \mathbf{C}_{vb} & \mathbf{C}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{z}}_b \\ \dot{\mathbf{z}}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b + \mathbf{K}_{bb} & \mathbf{K}_{bv} \\ \mathbf{K}_{vb} & \mathbf{K}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_b \\ \mathbf{z}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{bv} \\ \mathbf{F}_{vb} + \mathbf{F}_{vg} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{F}_{vg}$  为车辆所受的重力荷载矩阵; $\mathbf{C}_{bb}$ 、 $\mathbf{C}_{bv}$ 、 $\mathbf{C}_{vb}$ 、 $\mathbf{K}_{bb}$ 、 $\mathbf{K}_{bv}$ 、 $\mathbf{K}_{vb}$ 、 $\mathbf{F}_{bv}$ 、 $\mathbf{F}_{vb}$  为与时间相关的车轮与桥面的接触力.车桥耦合流程如图 15 所示,车桥耦合有限元模型如图 16 所示.

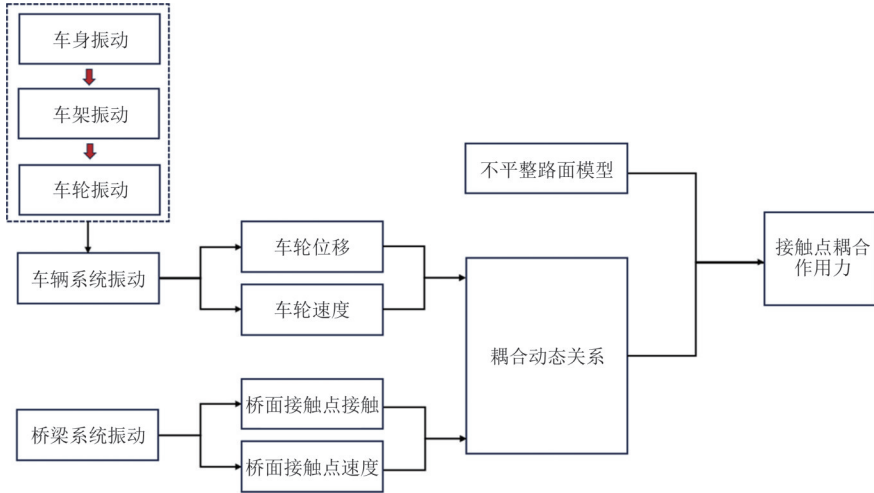


图 15 车桥耦合流程示意图

Fig. 15 Vehicle-bridge coupling process diagram

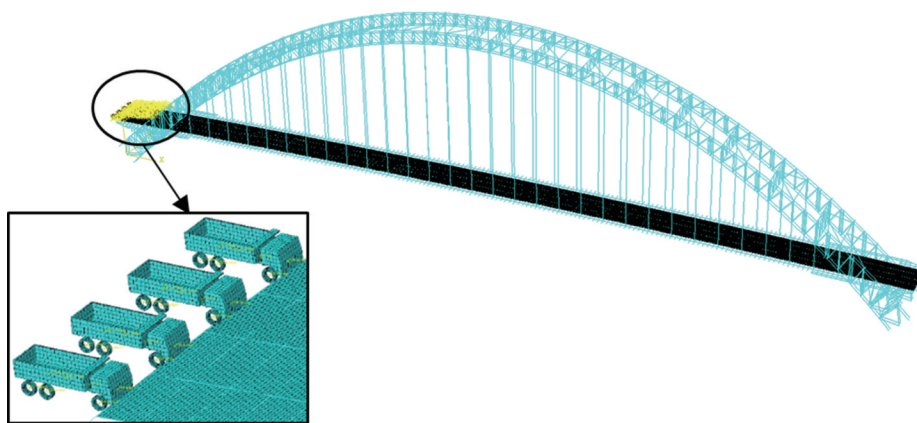


图 16 车桥耦合有限元模型

Fig. 16 Vehicle-bridge coupled finite element model

为保证该车桥耦合仿真模型的准确性,将利用上述车桥耦合仿真模型还原无障碍行车试验.根据现场检测结果,本节分析模型中的路面等级均设为 A 级.具体结果如图 17、图 18 及表 4 所示.

由图 17、图 18 及表 4 的对比结果可知,仿真与试验的动应变时程曲线基本吻合,两者间的相对误差较小,最大仅为 6.7%,最小为 2.1%,满足工程计算的精度要求,说明所建立车桥耦合模型具有较高的计算精度和可靠性.

### 3 车桥耦合振动响应分析

《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)<sup>[29]</sup>冲击系数的计算公式具体如式(5)所示:

$$\mu = \frac{18}{40 + L_0} \quad (5)$$

其中: $L_0$ 为主拱的净跨径.当计算结果 $\mu \leq 0.05$ 时,取 $\mu=0.05$ .本桥主桥跨径为 575 m,可计算得该桥 $\mu=0.029 < 0.05$ ,则 $\mu$ 为 0.05.

本文在研究车桥耦合振动响应时均采用多车速通过桥面的工况,多车行驶与单车行驶时车对桥梁的作用可能会出现不同的影响,所产生的车桥耦合系统振动响应也有可能有所差异.

在车重为 8 t 且其他车辆参数不变的情况下,选取车速分别为 20 km/h 和 60 km/h 的单车模型进行车桥耦合数值模拟.

不同车速下单车和多车在桥面跨中的动挠度时程曲线如图 19 和图 20(c)所示.动力荷载在多车和单车状态下的分布相似,对桥梁的影响差异不大,故二者在变化趋势上趋于一致.

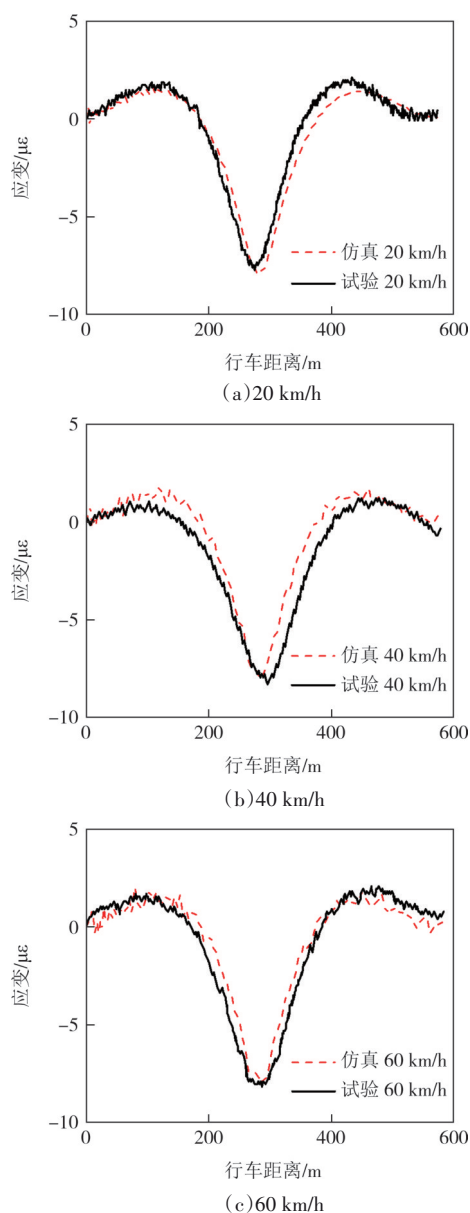


图 17 不同车速下拱肋跨中截面的动应变时程曲线(上弦管)

Fig.17 Dynamic strain time history curves of different speeds in the mid-span section at arch rib(upper chord tube)



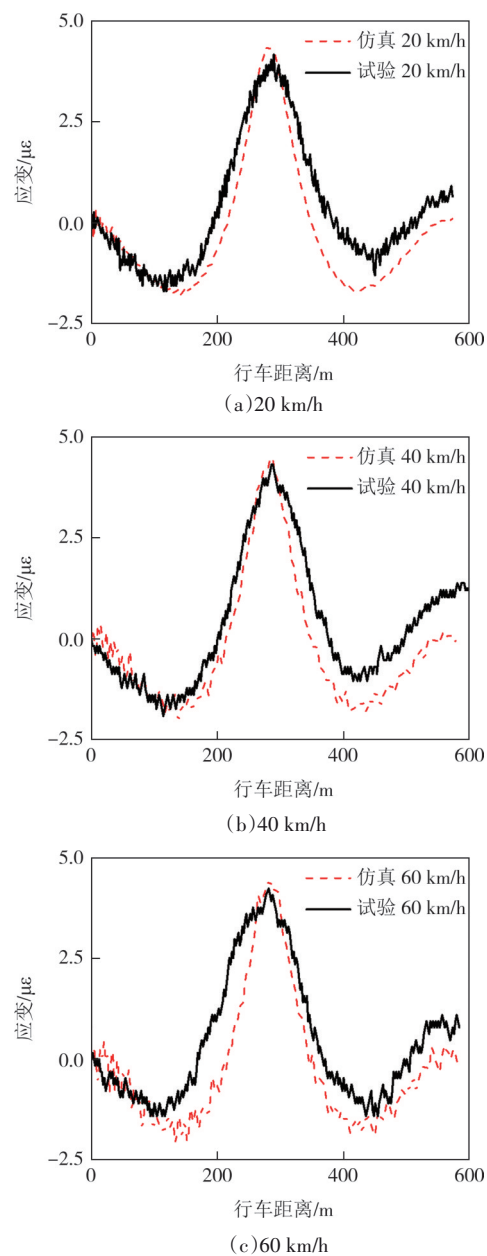


图 18 不同车速下拱肋跨中截面的动应变时程曲线(下弦管)  
Fig.18 Dynamic strain time history curves of different speeds in the mid-span section of arch rib ( lower chord tube )

表 4 不同车速下在拱肋跨中截面的动应变峰值对比  
Tab. 4 Comparison of dynamic strain peaks of different speeds in the mid-span section of arch rib

车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	跨中上弦管			跨中下弦管		
	动应变峰值/με		相对误 差/%	动应变峰值/με		相对误 差/%
	实测值	仿真值		实测值	仿真值	
20	-7.72	-7.88	2.1	4.16	4.37	5.0
40	-8.28	-8.03	3.0	4.31	4.60	6.7
60	-8.15	-7.97	2.2	4.22	4.42	4.7

在车速为 60 km/h 且其他车辆参数不变的情况下,选取车重分别为 2 t 和 8 t 的单车模型进行车桥耦

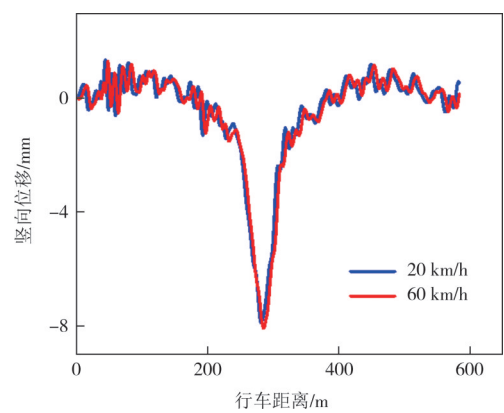
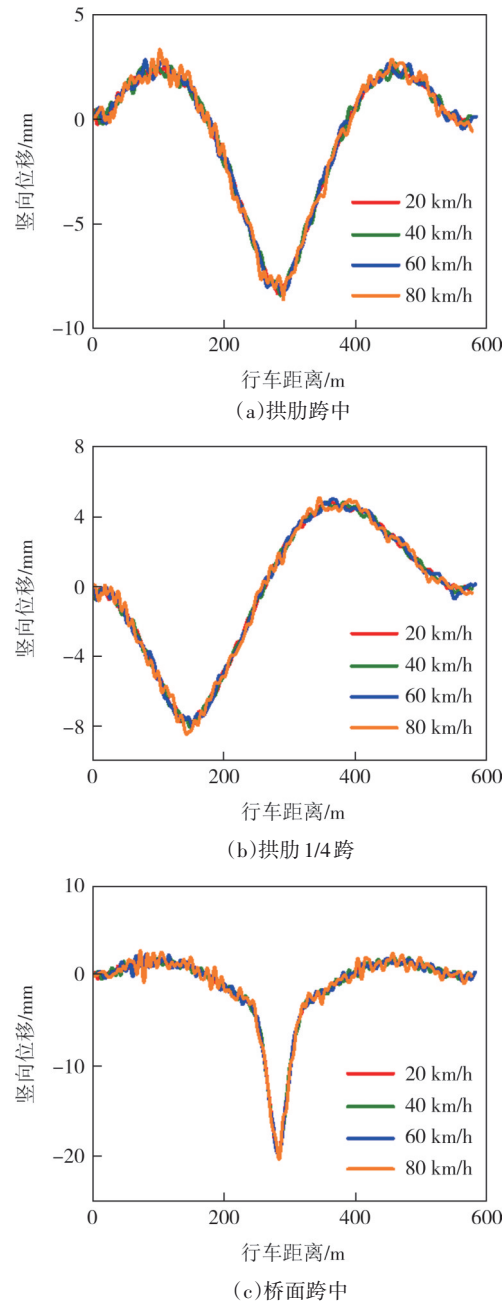


图 19 不同车速下桥面跨中动挠度时程曲线  
Fig.19 Dynamic deflection time history curves of different vehicle speeds in the mid-span of the bridge deck



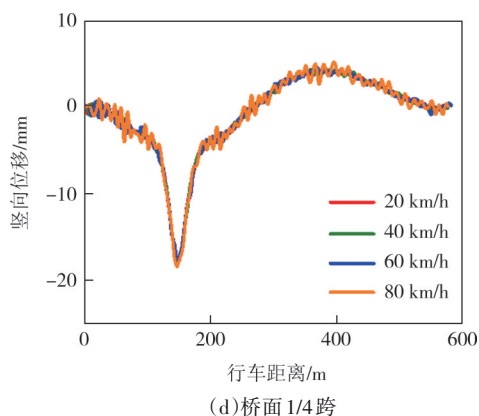


图20 不同车速下各截面处动挠度时程曲线

Fig. 20 Dynamic deflection time history curves of different speeds at each section

合数值模拟.

不同车重下单车和多车在桥面跨中的动挠度时程曲线如图21和22(c)所示.在多车和单车状态下,桥梁受到的动力传递都是相对均匀的,差异性较小,所以二者在变化趋势上趋于一致.

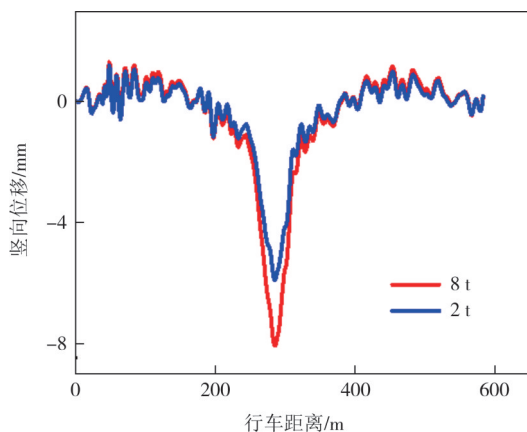


图21 不同车重下桥面跨中动挠度时程曲线

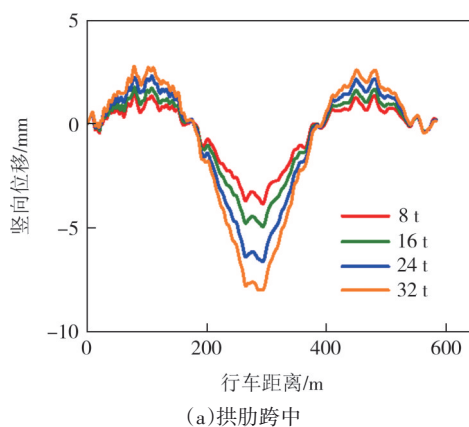
Fig.21 Dynamic deflection time history curves of different vehicle weights in the mid-span of the bridge deck

### 3.1 车辆速度对耦合振动的影响

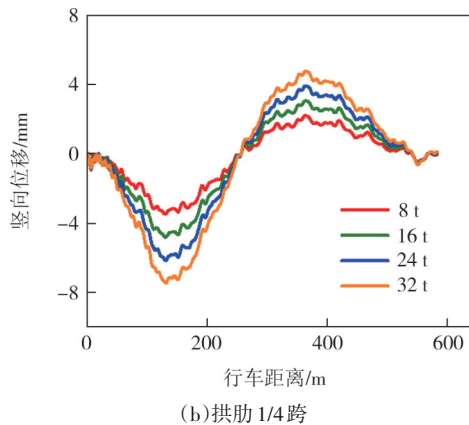
车速是影响车桥耦合动力冲击系数的重要因素,然而现研究对于冲击系数与车速的关系暂无统一的定论<sup>[30-32]</sup>.因此,展开二者关系的研究是有意义的,本节将开展大跨度钢管混凝土拱桥在不同车速作用下的车桥耦合振动响应研究.

在车重为32 t且其他车辆参数不变的情况下,选取车速分别为20 km/h、40 km/h、60 km/h和80 km/h的车辆模型进行车桥耦合数值模拟.

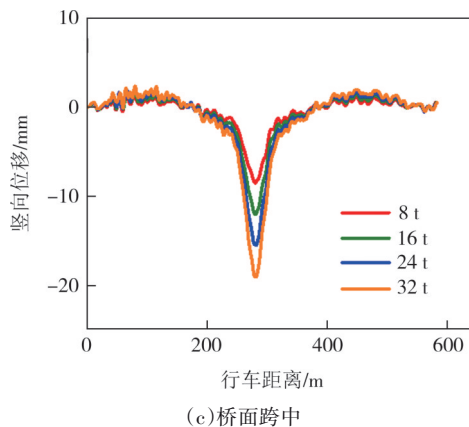
不同车速下动挠度时程曲线及最大动挠度随车



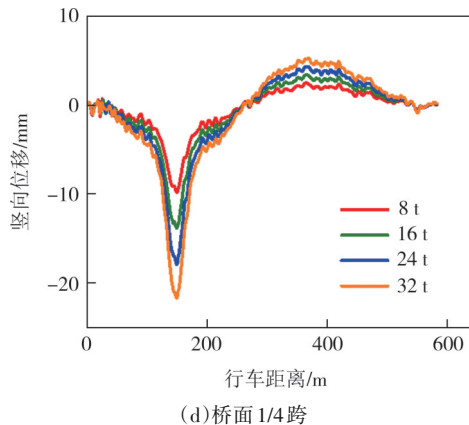
(a)拱肋跨中



(b)拱肋1/4跨



(c)桥面跨中

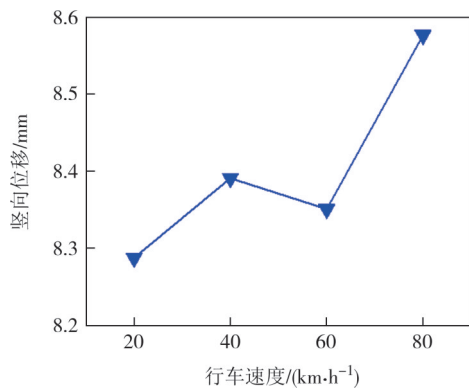


(d)桥面1/4跨

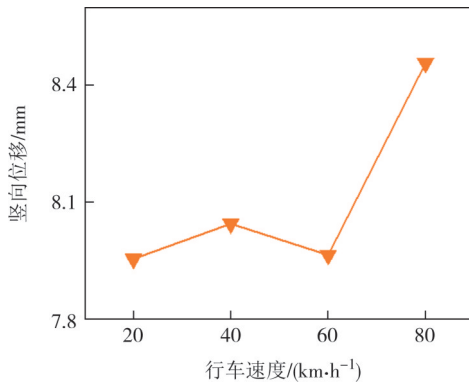
图22 不同车重下各截面处动挠度时程曲线

Fig.22 Time history deflection curves of different vehicle weights at each section

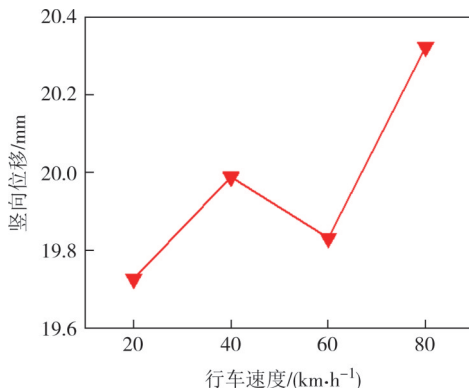
速的变化趋势分别如图 20 和图 23 所示.随着车速增加,桥梁最大动挠度在行车荷载作用下出现先增大后减小再增大的情况.当车速在低速区(20~40 km/h)时,桥面跨中动挠度上升幅度最大,为 1.3%;桥面 1/4 跨动挠度上升幅度最小,为 1.1%.当车速在中速区(40~60 km/h)时,拱肋 1/4 跨动挠度下降幅度最大,为 1.0%;拱肋跨中动挠度下降幅度最小,为 0.5%.当车速在高速区(60~80 km/h)时,拱肋 1/4 跨处动挠度上升幅度最大,为 6.1%;拱肋跨中处动挠度上升幅度最小,为 2.4%.因此,在实际运营中,严格遏制过桥时的超速现象,可有效缓解车辆荷载对桥梁结构的冲击效应.



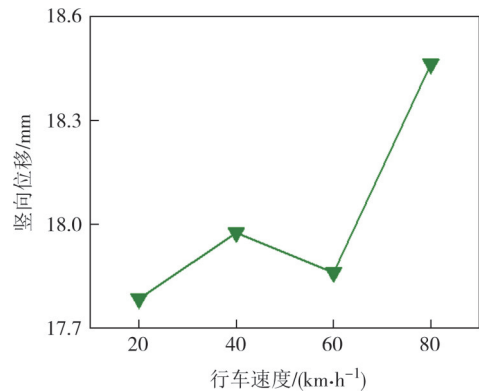
(a) 拱肋跨中



(b) 拱肋 1/4 跨



(c) 桥面跨中



(d) 桥面 1/4 跨

图 23 不同车速下各截面处最大挠度变化趋势图

Fig.23 Variation trend of maximum deflection of different speeds at each section

从图 24 可见,随着车速增加,桥梁动力冲击系数在行车荷载作用下出现先增大后减小再增大的情况.当车速在低速区(20~40 km/h)时,桥面跨中冲击系数上升幅度最大,为 49.8%;桥面 1/4 跨的冲击系数上升幅度最小,仅为 39.9%.当车速在中速区(40~60 km/h)时,拱肋 1/4 跨的冲击系数下降幅度最大,为 29.0%;拱肋跨中的冲击系数下降幅度最小,仅为 11.1%.当车速在高速区(60~80 km/h)时,拱肋 1/4 跨冲击系数上升幅度最大,为 250.4%;拱肋跨中的冲击系数上升幅度最小,仅为 70.1%.当车速在 20~60 km/h 的区间内,各截面冲击系数均低于规范值.当车速达 80 km/h 时,各截面冲击系数均高于规范值,拱肋 1/4 跨处冲击系数更是高于规范值 41.9%.

### 3.2 车辆载重对耦合振动的影响

当前,国内外大部分的研究表明,行车荷载作用

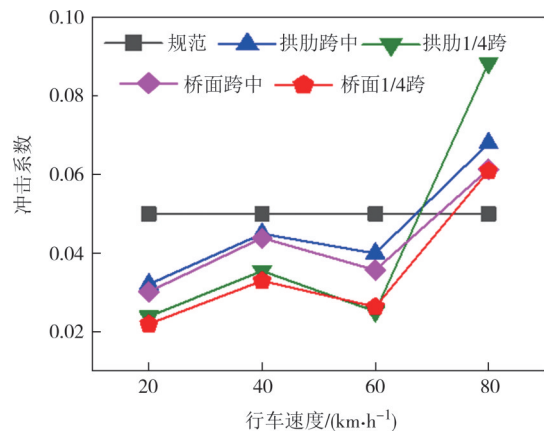


图 24 不同车速下各截面处冲击系数

Fig.24 Impact coefficient of different vehicle speeds at each section

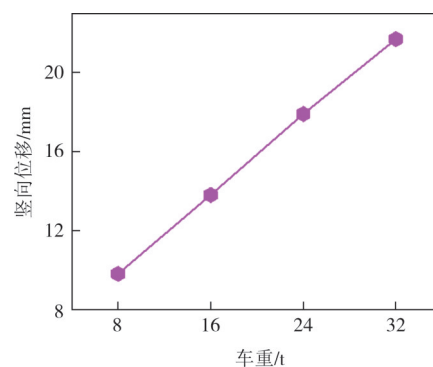


下的桥梁冲击系数与车重呈负相关<sup>[33-34]</sup>.然而,车重越大并不意味着车辆动载带给桥梁的总响应越小,因为动力冲击系数是最大动力响应与最大静力响应的比值,冲击系数不一定会随着车重的增加而增大.本节将开展大跨度钢管混凝土拱桥在不同车重作用下的车桥耦合振动响应研究.

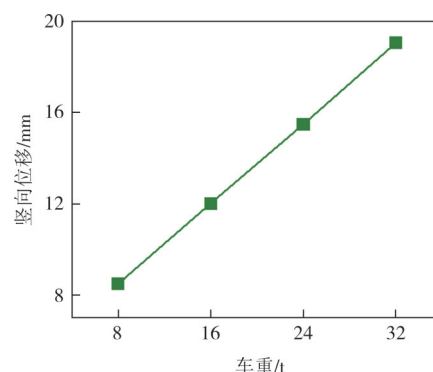
在保持其他车辆参数不变的情况下,分别选取车重为 8 t、16 t、24 t、32 t 的车辆模型进行车桥耦合数值模拟.每组工况均设定车速 60 km/h 的汽车匀速通过桥面.

不同车重下的动挠度时程曲线及最大动挠度随车重的变化趋势分别如图 22 和图 25 所示.由图可知,在行车荷载作用下,桥梁最大动挠度随车重增加而增大,且近乎呈线性关系.当车重从 8 t 增加到 32 t 时,拱肋跨中最大动挠度上升 108.2%,拱肋 1/4 跨最大动挠度上升 114.6%,桥面跨中最大动挠度上升 124.0%,桥面 1/4 跨最大动挠度上升 120.4%.其中,桥面跨中最大动挠度提升最明显,拱肋跨中的最大动挠度提升最小.因此,在桥梁动力设计中使用的冲击系数应与设计车辆荷载相关联.

如图 26 所示,在行车荷载作用下,桥梁动力冲击系数随车重增加而减小.车重增加对各截面冲击



(c) 桥面跨中

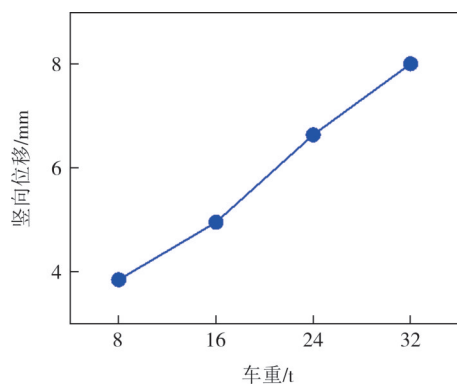


(d) 桥面 1/4 跨

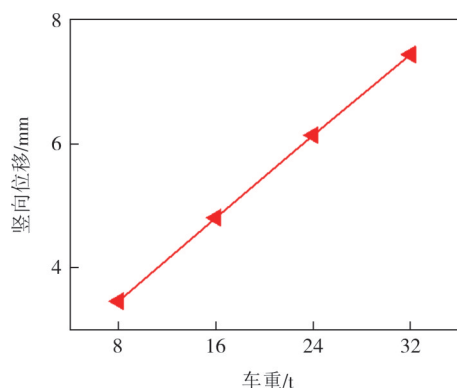
图 25 不同车重下各截面处最大挠度变化趋势

Fig.25 The maximum deflection change trend diagram of different vehicle weights at each section

系数的影响均较大,当车重增大到一定数值后,冲击系数的下降幅度趋于平缓.当车重从 8 t 增加到 32 t 时,拱肋跨中冲击系数下降 89.4%,拱肋 1/4 跨冲击系数下降 72.1%,桥面跨中冲击系数下降 53.9%,桥面 1/4 跨冲击系数下降 68.8%.其中,拱肋跨中冲击系数降低最为明显,桥面跨中的冲击系数降低最小.当车重在 8~32 t 范围内时,各关键截面的冲击系数大部分是低于现行规范值的,只有当车重较轻时,个别截面



(a) 拱肋跨中



(b) 拱肋 1/4 跨

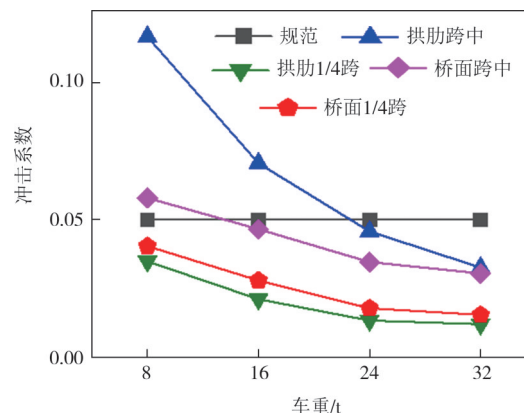


图 26 不同车重下各截面处冲击系数

Fig.26 Impact coefficient of different vehicle weights at each section

的冲击系数高于规范值,建议在后续设计中将轻车重下的冲击系数值纳入设计考虑。

## 4 结论

本文以 575 m 大跨钢管混凝土拱桥广西平南三桥为研究对象,在现场试验和仿真分析的基础上,开展车桥耦合振动响应分析,研究了车速、车重对挠度和冲击系数的影响规律,主要结论如下:

1) 根据现场脉动试验结果可知,该桥基频为 0.313 Hz,属柔性桥梁,结构整体性高,其竖向刚度小于扭转刚度。

2) 建立了精细化车桥耦合仿真模型,经与现场试验数据对比后发现,桥梁模型的模态分析结果和现场脉动试验结果吻合良好,最大误差仅为 2.9%。此外车桥耦合仿真模型的最大误差仅为 6.7%。所建立模型可用于此类桥梁的车桥耦合问题分析。

3) 该桥在限速范围内( $\leq 60$  km/h)的最大动挠度和冲击系数与车速间无明显关系。但当车辆超速( $> 60$  km/h)后,最大动挠度和冲击系数随着车速提升而大幅增大。

4) 该桥最大动挠度随车重增加而增大,冲击系数随车重增加而减小,但桥梁实际的总响应并未减小。严格控制过桥车辆的速度和车重,可有效降低行车荷载对桥梁的冲击效应。

## 参考文献

- [1] 邓露,王维,孔烜,等. 公路车桥耦合振动理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
DENG L, WANG W, KONG X, et al. Theory and application of vehicle-bridge coupling vibration in road vehicles and bridges[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [2] ANTOLÍN P, ZHANG N, GOICOLEA J M, et al. Consideration of nonlinear wheel-rail contact forces for dynamic vehicle-bridge interaction in high-speed railways[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(5): 1231-1251.
- [3] AN L P, LI D J, YU P, et al. Numerical analysis of dynamic response of vehicle-bridge coupled system on long-span continuous girder bridge[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2016, 6(4): 186-194.
- [4] 王艳,刘哲,周瑞娇,等. 基于车桥耦合振动分析的大跨径曲弦桁梁桥加固方案评价研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(14): 199-209.  
WANG Y, LIU Z, ZHOU R J, et al. Evaluation of the reinforcement scheme for a long-span curved truss bridge based on vehicle-bridge coupled vibration analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(14): 199-209. (in Chinese)
- [5] ZHANG N, XIA H, GUO W W, et al. Vehicle-bridge interaction analysis of heavy load railway[J]. Procedia Engineering, 2010, 4: 347-354.
- [6] 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)
- [7] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 修订版. 北京: 中国铁道出版社, 2010.  
LI G H. Stability and vibration of bridge structure[M]. Revised Edition. Beijing: China Railway Publishing House, 2010. (in Chinese)
- [8] 张为民. 大跨度混凝土公路桥梁冲击系数的探讨[D]. 上海: 同济大学, 2009.  
ZHANG W M. Discussion of impact factors of large span highway concrete bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [9] CANTIENI R. Dynamic load testing of highway bridges[R]. Zurich, Swiss: Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, 1983.
- [10] WANG T L, HUANG D Z. Cable-stayed bridge vibration due to road surface roughness[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(5): 1354-1374.
- [11] CHEN S R, CAI C S. Equivalent wheel load approach for slender cable-stayed bridge fatigue assessment under traffic and wind: feasibility study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6): 755-764.
- [12] DENG L, CAI C S. Identification of dynamic vehicular axle loads: theory and simulations[J]. Journal of Vibration and Control, 2010, 16(14): 2167-2194.
- [13] 姚敦荣, 邓年春. 大跨度钢管混凝土拱桥车桥耦合振动分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3693-3704.  
YAO D R, DENG N C. Vehicle-bridge coupling vibration analysis of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3693-3704. (in Chinese)
- [14] 周勇军, 薛宇欣, 李冉冉, 等. 桥梁冲击系数理论研究和应用进展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 31-50.  
ZHOU Y J, XUE Y X, LI R R, et al. State-of-the-art of theory and applications of bridge dynamic load allowance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 31-50. (in Chinese)
- [15] LI Y, LIU Y, SUN H. Impact effect statistic investigation of concrete filled steel tube arch bridge under moving vehicles based on the field test and simulation analysis[M]//Bridge Maintenance, Safety and Management. Boca Raton: CRC Press, 2012: 3404-3411.
- [16] 蒋培文, 贺拴海, 宋一凡, 等. 大跨径连续梁多工况车桥耦合振

- 动规律分析[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(7): 62-67.
- JIANG P W, HE S H, SONG Y F, et al. Analysis of vehicle-bridge coupled vibration with several driving conditions of big-span continuous beam[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(7): 62-67. (in Chinese)
- [17] 蒋培文. 公路大跨径连续体系桥梁车桥耦合振动研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- JIANG P W. Coupled vibration between vehicles and highway long-span continuous series bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [18] 陈水生, 宋元, 桂水荣, 等. 公路连续梁桥在横向多车作用下的振动响应研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 497-504.
- CHEN S S, SONG Y, GUI S R, et al. Studies on vibration response of the continuous girder highway bridge under horizontal multi-vehicle loads [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(4): 497-504. (in Chinese)
- [19] 桂水荣, 陈水生, 赵辉, 等. 基于LS-DYNA公路桥梁车桥耦合振动模型[J]. 公路交通科技, 2013, 30(7): 40-45.
- GUI S R, CHEN S S, ZHAO H, et al. Model of highway bridge subjected to vehicle-bridge coupled vibration based on LS-DYNA [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(7): 40-45. (in Chinese)
- [20] 桂水荣, 陈水生. 单车荷载作用下T型刚构桥车致振动响应研究[J]. 华东交通大学学报, 2009, 26(4): 23-29.
- GUI S R, CHEN S S. Vehicle-induced dynamic response analysis of T-type rigid-frame bridge under a vehicle load [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2009, 26(4): 23-29. (in Chinese)
- [21] 陈水生, 葛世祺, 桂水荣, 等. 基于车桥耦合振动的公路梁桥行车舒适性分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(1): 1-9.
- CHEN S S, GE S Q, GUI S R, et al. Analysis on driving comfort of highway beam bridge based on vehicle-bridge coupling vibration [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(1): 1-9. (in Chinese)
- [22] ZHENG J L, WANG J J. Concrete-filled steel tube arch bridges in China [J]. Engineering, 2018, 4(1): 306-331.
- [23] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- General design specifications for highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communication Press, 2015. (in Chinese)
- [24] 蔺鹏臻, 王亚朋. 基于车-桥耦合振动的铁路钢管混凝土系杆拱桥冲击系数研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(6): 115-120.
- LIN P Z, WANG Y P. Impact factor calculation of railway concrete-filled steel tubular tied-arch bridges based on vehicle-bridge coupling vibration analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(6): 115-120. (in Chinese)
- [25] LIU C H, HUANG D Z, WANG T L. Analytical dynamic impact study based on correlated road roughness [J]. Computers & Structures, 2002, 80(20/21): 1639-1650.
- [26] OLIVA J, GOICOLEA J M, ANTOLÍN P, et al. Relevance of a complete road surface description in vehicle-bridge interaction dynamics [J]. Engineering Structures, 2013, 56: 466-476.
- [27] 谢娟娟, 李晋, 田震, 等. 考虑路面不平顺随机性的汽车过桥动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(14): 299-306.
- XIE J J, LI J, TIAN Z, et al. Dynamic response analysis of vehicles crossing a bridge considering the randomness of road surface roughness [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(14): 299-306. (in Chinese)
- [28] 机械振动 道路路面谱测量数据报告: GB/T 7031—2005[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局, 中国国家标准化管理委员会, 2005.
- Mechanical vibration—Road surface profiles—Reporting of measured data: GB/T 7031—2005 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration, 2005. (in Chinese)
- [29] 公路钢管混凝土拱桥设计规范: JTG/T D65—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Specifications for design of highway concrete-filled steel tubular arch bridges: JTG/T D65—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [30] LI H Y, WEKEZER J, KWASNIEWSKI L. Dynamic response of a highway bridge subjected to moving vehicles [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(5): 439-448.
- [31] GAO Q F, WANG Z L, LI J, et al. Dynamic load allowance in different positions of the multi-span girder bridge with variable cross-section [J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(4): 2035-2039.
- [32] DENG L, CAI C S. Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete bridges [J]. Engineering Structures, 2010, 32(1): 21-31.
- [33] HUANG D Z, WANG T L, SHAHAWY M. Impact studies of multigirder concrete bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(8): 2387-2402.
- [34] HUANG D Z. Vehicle-induced vibration of steel deck arch bridges and analytical methodology [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(2): 241-248.