

# 高墩连续刚构桥车桥耦合振动分析

刘华全<sup>1</sup>, 杨得海<sup>2</sup>, 蔡成奇<sup>1</sup>, 黄桢明<sup>1</sup>, 陈周奇<sup>1</sup>

(1. 海峡(福建)交通工程设计有限公司, 福建 福州 350004; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

**摘要:**为研究移动车辆荷载作用下车辆-桥梁系统的动力响应特性,以某三跨高墩连续刚构桥为对象,采用2轴7自由度车辆模型加载,探究车辆速度、行车数量及车辆载重因素对车桥系统动力响应的影响。结果表明:车辆的行驶速度基本不会影响桥梁的位移响应峰值,车辆以相同速度通过桥梁时,桥梁各跨的位移响应峰值存在差异,车桥发生共振时的车速为40 km/h;随着行车数量的增加,桥梁各跨跨中处于较大位移响应的持续时间明显加长,桥梁中跨跨中的位移响应峰值在2辆车行驶时取得极大值,而车辆的加速度峰值与加权加速度均方根值在6辆车通过桥梁时取得极大值;随着车辆载重的增加,桥梁的位移及加速度响应总体呈增长趋势,而桥梁的冲击系数与车辆各项动力指标的响应则呈下降趋势。

**关键词:**高墩连续刚构桥;车桥耦合振动;行驶速度;行车数量;车辆载重

**中图分类号:**U441.3

**文献标志码:**A

## 0 引言

车辆在过桥时引起桥梁振动,反过来桥梁振动也引起车辆振动,这种车辆与桥梁之间的相互作用问题称为车桥耦合振动问题<sup>[1-3]</sup>。桥梁与车辆间产生的耦合振动容易导致桥梁结构出现疲劳、变形过大等问题,还可能影响车辆的行车安全性与乘坐舒适性等。故探究车辆过桥时桥梁与车辆系统动力响应的影响因素十分必要。

长久以来,较多学者就移动车辆过桥问题展开了深入的研究。邓可等<sup>[4]</sup>提出了车辆荷载冲击作用下桥梁效应极值外推方法,评估了常见车辆荷载作用下中、小跨桥梁的安全水平;韩艳等<sup>[5]</sup>基于Ansys软件分析了路面粗糙度、行车速度、行车数量和行车间距对钢管混凝土拱桥动力响应的影响;安里鹏等<sup>[6]</sup>建立了空间7自由度车辆模型,分析了移动车辆荷载作用下大跨度连续梁桥的动力响应特性,并评价了桥梁的振动舒适性;顾颖等<sup>[7]</sup>研究了移动车辆荷载对斜拉桥动力响应的影响因素,重点分析了车速对桥梁位移、加速度及冲击系数的影响;Yang等<sup>[8]</sup>根据现场实测车辆响应数据,对桥梁的模式和损伤进行识

别;罗晓桐<sup>[9]</sup>基于Ansys软件和Matlab自编程序分析了移动车辆作用下大跨度公铁两用斜拉桥的动力响应特性,重点研究了车辆类型、行车速度、车辆重量以及路面平整度等因素对桥梁动力响应的影响;Zhu等<sup>[10]</sup>为提高车-桥随机分析效率,选择在虚拟激励法中引入自适应积分选点。

本文以某高墩连续刚构桥为研究对象,基于有限元软件Midas/Civil建立桥梁模型,车辆则采用2轴7自由度模型,应用自编程序求解车桥系统的动力响应,并探究车辆行驶速度、行车数量及车辆载重因素对车桥系统动力响应的影响规律,为实际工程抑振、减振提供参考。

## 1 工程概况

选取中国东南山区某高墩连续刚构桥为工程背景,该桥的跨径布置为3×40 m,立面图如图1所示,桥梁的单幅桥横桥向共布置11片T梁,桥面全宽26 m,其标准横断面图如图2所示。桥墩采用箱墩与柱墩两种形式,沿着墩身间隔一定距离设置有系梁。箱墩采用群桩基础,柱墩在墩底采用单桩基础,典型的箱墩截面如图3所示。T梁采用C50混凝土,柱墩

混凝土等级为 C35,箱墩则采用 C40,桩基及承台均采用 C30 混凝土。

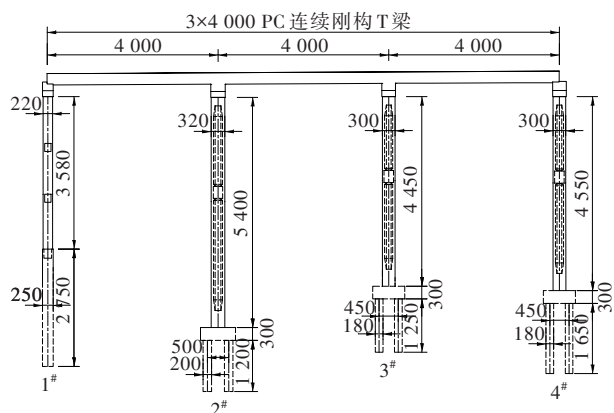


图 1 连续刚构桥立面图(单位:cm)

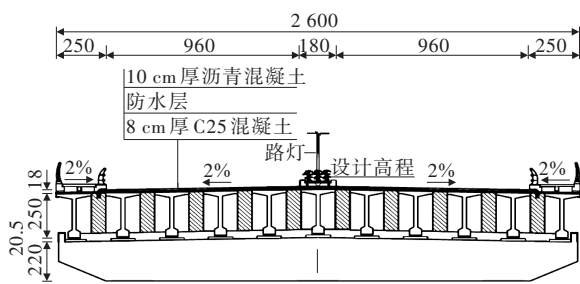


图 2 T梁段标准横断面图(单位:cm)

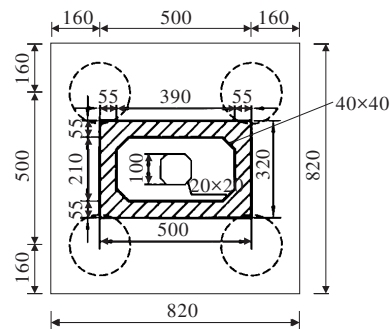


图 3 承台及箱墩截面尺寸(单位:cm)

## 2 车桥耦合系统分析模型

### 2.1 车辆模型

本文车辆采用 2 轴 7 自由度空间模型(图 4)。将车辆简化为具有弹簧悬挂装置的多自由度振动系统。车辆模型由 3 部分组成:车体、悬挂体系以及 4 个轮胎。对应的 7 个自由度分别为车体的浮沉、侧倾、俯仰自由度以及 4 个轮胎的竖向平动自由度。车辆模型的悬挂体系采用线性弹簧加阻尼器模拟,轮胎则简化为集中于车轴的质量、线性弹簧与阻尼器。

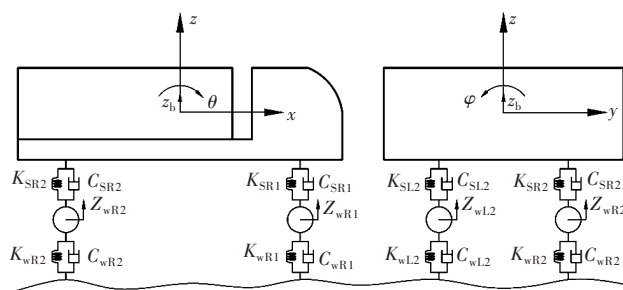


图 4 2轴 7 自由度车辆模型

注: $Z_{wij}$ 为车辆 4 个轮胎的竖向位移( $i=R,L$ 分别表示右侧和左侧, $j=1,2$ 分别表示前、后,下同); $K_{Sij}$ 、 $C_{Sij}$ 为悬挂体系的刚度与阻尼; $K_{wij}$ 、 $C_{wij}$ 为车轮的刚度与阻尼; $Z_b$ 、 $\theta$ 、 $\varphi$ 为车体质心处的竖向位移、俯仰角以及侧倾角。

车辆各个自由度处的运动方程可根据达朗贝尔原理得出,然后将各个自由度位置处的运动方程整合成车辆系统的运动微分方程<sup>[11]</sup>。本文拟采用双轴厢式货车车辆模型来研究车桥系统的动力响应特性,相关参数如表 1 所示。

表 1 双轴厢式货车基本参数

车体质量/kg	车体俯仰转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	车体侧倾转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	悬挂体系刚度系数/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	悬挂体系阻尼系数-前轮/( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	悬挂体系阻尼系数-后轮/( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	车轮刚度系数/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	车体质心至前轮距离/m	车体质心至后轮距离/m	车轮轴距/m
4 480	5 516	1 349	399 000	23 210	5 180	351 000	2.6	5.0	1.1

### 2.2 桥梁模型

采用有限元软件 Midas/Civil 建立桥梁模型,桥梁上部 T 梁采用“梁格法”建立,将宽 26 m 的 T 梁划分为若干个大小相近的梁格。墩柱和桩基均以梁单元模拟,并计入场地位置处桩土效应的影响,以《公

路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)中推荐的“ $m$  法”来计算桩基不同高度处的土弹簧刚度<sup>[12]</sup>,施加在桩基的各个节点上。边界条件方面,2#、3#墩和主梁间设置刚性连接,1#、4#墩与主梁间设置为简支。最终建成连续刚构桥有限元分析模型如图 5

所示,全桥共计1 972个单元,1 436个节点。

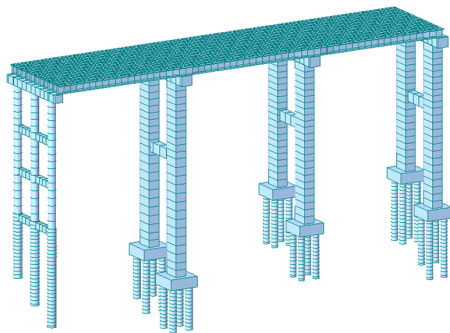


图5 连续刚构桥有限元分析模型

2.3 桥面不平顺

桥面不平顺作为车桥系统的主要激励源,可近似地采用静态随机过程来描述。本文参考文献[13]生成了相应的路面不平顺谱(图6),以此作为高墩连续刚构桥车桥系统的输入激励。

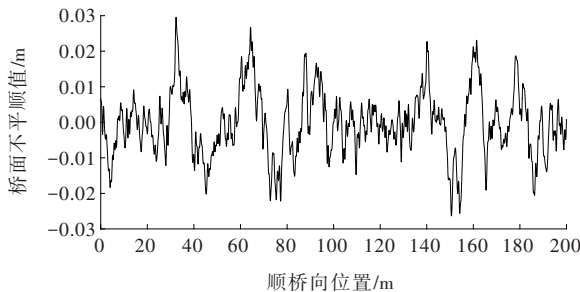


图6 典型的路面不平顺谱

2.4 车辆耦合振动模型建立与求解

根据达朗贝尔原理及有限元分析理论,桥梁与车辆的运动微分方程可表示为:

$$\begin{cases} [M_b]\{\ddot{u}_b\}+[C_b]\{\dot{u}_b\}+[K_b]\{u_b\}=\{F_{bt}\} \\ [M_v]\{\ddot{u}_v\}+[C_v]\{\dot{u}_v\}+[K_v]\{u_v\}=\{F_{vt}\} \end{cases} \quad (1)$$

式中:[ $M_b$ ]、[ $C_b$ ]与[ $K_b$ ]分别为桥梁系统的质量、阻尼与刚度矩阵,桥梁的质量与刚度矩阵可根据有限元分析模型直接得到; $\{u_b\}$ 与 $\{F_{bt}\}$ 分别为桥梁系统的位移与荷载向量;桥梁结构的阻尼则采用 Rayleigh 阻尼,可通过[ $M_b$ ]与[ $K_b$ ]的线性组合得出;[ $M_v$ ]、[ $C_v$ ]与[ $K_v$ ]分别为车辆系统的质量、阻尼与刚度矩阵, $\{u_v\}$ 与 $\{F_{vt}\}$ 分别为车辆系统的位移与荷载向量。

本文先采用 Midas/Civil 软件建立桥梁三维模型,再结合自编程序求解车辆通过高架广场连续刚构桥时车桥系统的动力响应。该程序主要采用分离迭代法求解计算,可以输出桥梁指定位置处的竖向位移及加速度等动力指标,还可以输出车体的竖向、

俯仰、侧倾位移及加速度等,求解分析流程见图7。

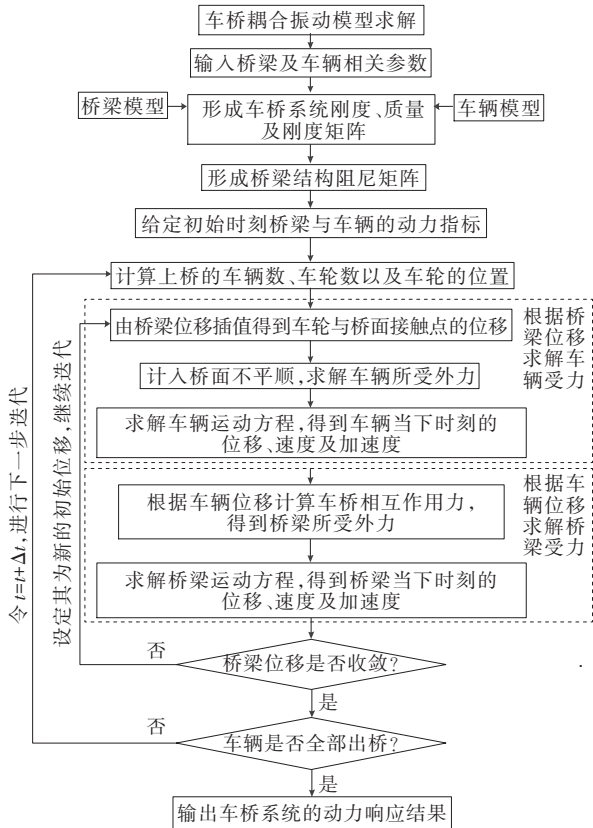


图7 车桥耦合系统振动求解流程

2.5 模型验证

采用自编程序和通用有限元软件 Midas/Civil 分别对该桥进行特征值分析,桥梁前5阶自振频率及振型描述如表2所示, $f_1$ 和 $f_2$ 分别为自编程序和 Midas/Civil 中桥梁模型的自振频率。

表2 桥梁前5阶自振频率及振型

模态阶数	$f_1/\text{Hz}$	$f_2/\text{Hz}$	振型描述
1	2.97	3.04	正对称竖弯
2	3.04	3.12	反对称竖弯
3	3.44	3.49	梁体正对称扭转
4	3.67	3.56	梁体反对称扭转
5	3.95	4.08	梁体跨中扭转

由表2可知:自编程序与 Midas/Civil 软件计算的桥梁模型自振频率结果吻合较好,初步说明自编程序建立的车桥计算模型准确可靠。

3 车桥耦合系统动力响应影响参数分析

以2.2节建立的3×40 m高墩连续刚构桥为研究

对象,采用2轴厢式货车模型(图4),参数按照表1取值,探究车辆速度、行车数量、车辆载重因素对车桥系统动力响应的影响规律。计算时间取车队的第1辆车驶入车道作为零点,车队最后1辆车离开桥梁后继续行驶30 m为时间终点。输出的结果中,桥梁的冲击系数定义为动载挠度与准静载挠度(车辆速度设置为5 km/h,其余参数均与动载时一致)的比值。车辆的加权加速度均方根值按照时域积分方法计算<sup>[13]</sup>。

### 3.1 行驶速度的影响

为分析车辆不同行驶速度对车桥系统动力响应的影响,计算假定连续刚构桥的同向两车道上分别布设有4辆厢式货车,车辆间距为20 m,车队自桥梁左端分别以  $v=20$  km/h、40 km/h、60 km/h 及 80

km/h的速度匀速行驶至桥梁的右端,假定桥面粗糙度等级为B级。经过分析,提取出不同速度车辆通过高墩连续刚构桥时桥梁与车辆系统的动力响应结果。图8为不同速度的车辆通过连续刚构桥时桥梁第1跨与第2跨跨中位置的竖向位移及加速度响应曲线。表3为不同速度车辆通过连续刚构桥时桥梁前两跨跨中位置的位移及加速度响应峰值、冲击系数及车队中第1辆车的各项动力指标响应峰值。

由图8及表3可知:

(1) 桥梁位移响应。随着车辆不断靠近桥梁各跨跨中,各跨中的位移响应逐步增大,在车辆到达跨中位置处取得极大值,在车辆进入临近跨时,该跨的位移动力响应曲线出现反弯。车辆的行驶速度对桥

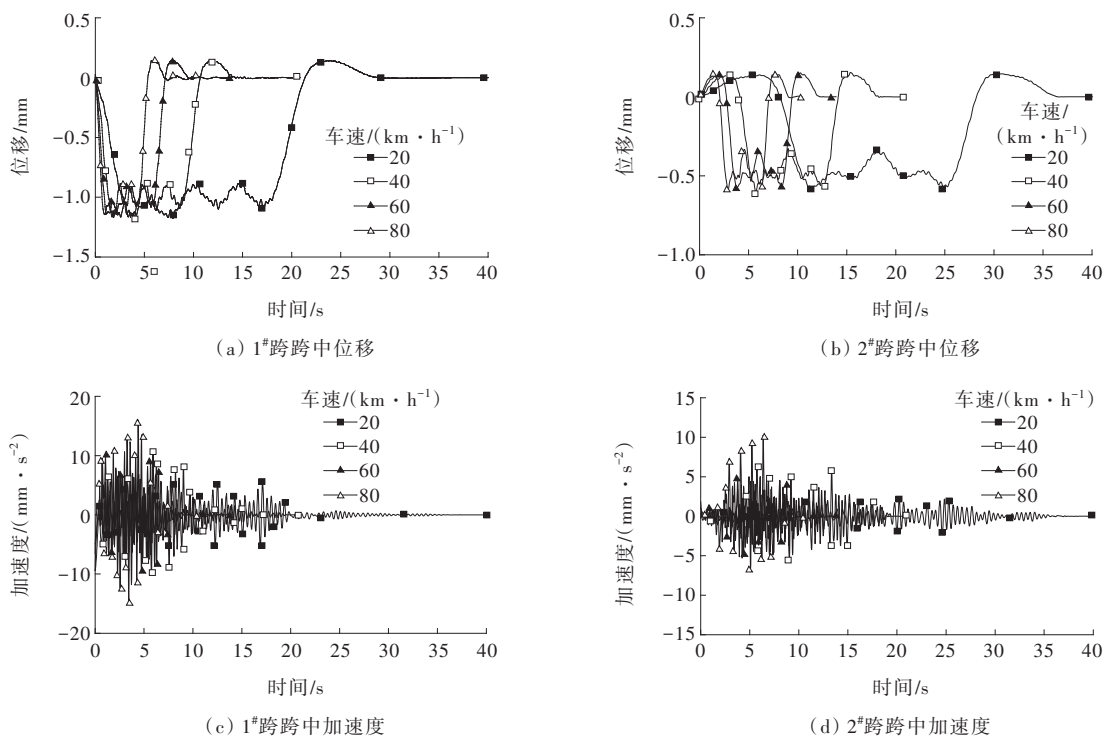


图8 不同车速下桥梁各跨跨中竖向位移及加速度响应

表3 不同车速下车桥系统各项动力指标响应峰值

车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	桥梁动力响应						车辆动力响应(车体质心)		
	竖向位移/mm		竖向加速度/(mm·s <sup>-2</sup> )		冲击系数		竖向位移/	竖向加速度/	加权加速度均方
	1 <sup>#</sup> 跨跨中	2 <sup>#</sup> 跨跨中	1 <sup>#</sup> 跨跨中	2 <sup>#</sup> 跨跨中	1 <sup>#</sup> 跨跨中	2 <sup>#</sup> 跨跨中	m	(m·s <sup>-2</sup> )	根值/(m·s <sup>-2</sup> )
80	1.167	0.591	16.014	10.265	1.146	1.078	0.030	1.937	0.625
60	1.165	0.581	10.068	5.022	1.125	1.194	0.030	2.188	0.788
40	1.169	0.607	10.885	6.268	1.187	1.184	0.039	3.822	0.961
20	1.175	0.587	6.541	2.227	1.114	1.182	0.037	2.064	0.806



梁各跨跨中的位移响应峰值基本无影响,只是不同行车速度下,桥梁跨中达到最大位移响应的时刻不一致。对比图8(a)、(b)可以看出:当车辆以相同速度通过桥梁时,1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>跨跨中的位移响应峰值也存在差异,究其原因是连续刚构桥各跨的支撑体系及刚度不同所致,连续刚构桥的两边墩采用简支的约束体系,其对主梁的约束力不如中间两主墩的固结支撑体系,且1<sup>#</sup>墩为柱墩,其支撑刚度比其余箱墩小。

(2) 桥梁加速度响应。随着车辆速度的提高,桥梁跨中的加速度响应总体呈增长趋势。当车辆速度分别为20 km/h、80 km/h时,桥梁各跨跨中位置处的加速度响应峰值分别取得极小值和极大值;桥梁的冲击系数方面,车辆的行驶速度对桥梁各跨的冲击系数无明显影响规律,当车辆的速度分别为40 km/h、60 km/h时,连续刚构桥的第1、2跨冲击系数取得极大值,这可能是由于车桥系统发生共振的车速为40~60 km/h,因此车辆在以这两个车速通过桥梁时,对桥梁产生的冲击效应较为明显。

(3) 车辆动力响应。随着车速的增加,车队中头车的各项动力指标呈先增后减趋势,各项指标在车速为40 km/h时取得极大值,在车速为80 km/h时取得极小值,结合桥梁冲击系数随车辆速度变化的响

应规律,可初步判定40 km/h为车桥发生共振时的车速。这是由于当汽车以该车速过桥时,汽车荷载作用于桥梁的激励频率与桥梁结构竖弯振型的频率较为接近,从而引发车桥系统共振。

### 3.2 行车数量的影响

为分析行车数量对车桥系统动力响应的影响,连续刚构桥的同向两车道上分别布设有2辆、4辆、6辆及8辆厢式货车,各车辆的间距为15 m,车队以60 km/h的速度从桥梁的左端匀速行驶至桥梁的右端。桥面的粗糙度等级为B级。图9为不同数量车辆通过全桥时桥梁各跨跨中位置的位移及加速度响应曲线。表4为不同数量车辆通过全桥时车桥系统各项动力指标的响应峰值。

由图9及表4可知:① 桥梁位移响应。随着车道上行车数量的增加,桥梁各跨跨中处于峰值响应附近的时长明显增加,即位移响应曲线与时间轴围成的面积随行车数量的增加而增大。桥梁第1跨的位移响应峰值与车辆的数量无关,而桥梁第2跨跨中的位移响应峰值在2辆车行驶时取得极大值,这是由于桥梁的最大跨度为40 m,同一跨度内最大容许2辆车同时行驶,当超过2辆车通过桥梁时,后面的车辆在前面2辆车的相邻跨行驶时会抵消掉一部分前面2辆车的作用效应。车辆数量对桥梁的加速度响应基

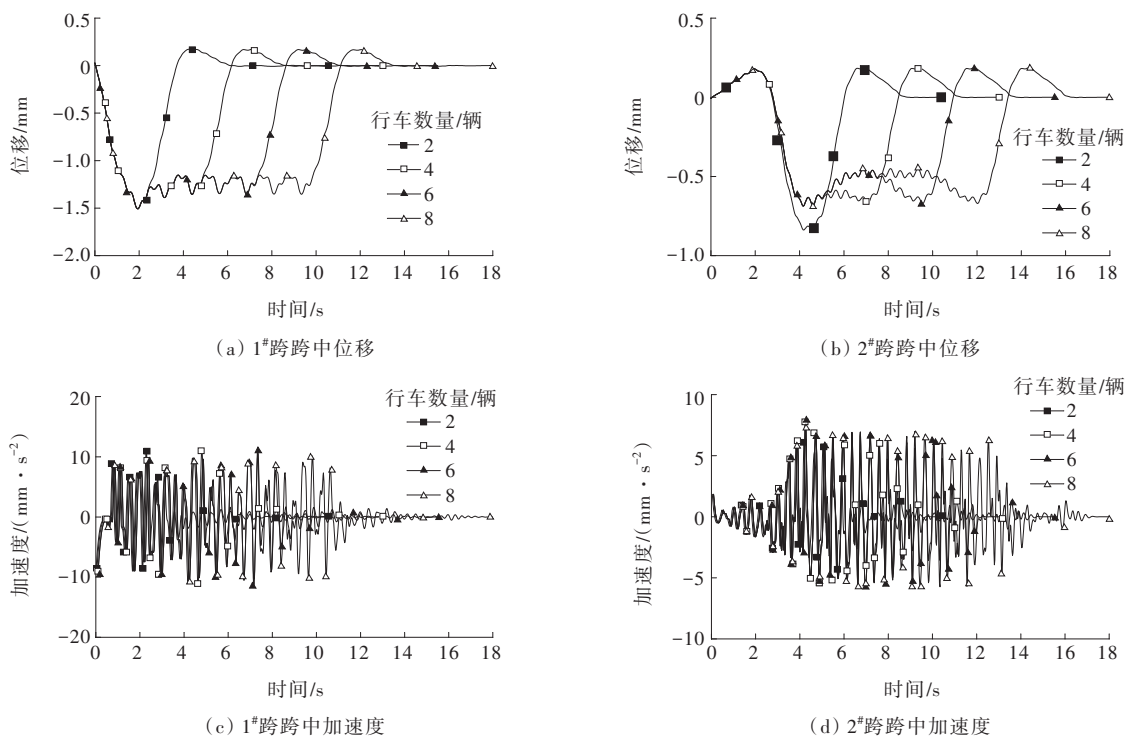


图9 不同行车数量时桥梁各跨跨中竖向位移及加速度响应

本无影响;② 冲击系数。随着车辆数量的增加,整体上,桥梁前两跨的冲击系数呈先增后减趋势,桥梁第1跨跨中的冲击系数在4辆车行驶时取得极大值,而桥梁第2跨跨中的冲击系数在6辆车行驶时取得极

大值;③ 车辆动力响应。车辆的数量对车队中头车车体的竖向位移无明显影响。头车车体的加速度峰值以及加权加速度均方根值在6辆车通过桥梁时取得极大值。

表 4 不同行车数量时车桥系统各项动力指标响应峰值

行车数量/ 辆	桥梁动力响应						车辆动力响应(车体质心)		
	竖向位移/mm		竖向加速度/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ )		冲击系数		竖向位移/ m	竖向加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	加权加速度均方 根值/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
	1 <sup>#</sup> 跨跨中	2 <sup>#</sup> 跨跨中	1 <sup>#</sup> 跨跨中	2 <sup>#</sup> 跨跨中	1 <sup>#</sup> 跨跨中	2 <sup>#</sup> 跨跨中			
8	1.507	0.687	10.958	7.985	1.146	1.078	0.031	2.163	0.798
6	1.507	0.687	11.536	7.985	1.125	1.194	0.031	2.192	0.829
4	1.507	0.687	11.357	7.985	1.187	1.184	0.031	2.023	0.752
2	1.507	0.847	11.039	6.297	1.114	1.182	0.030	2.024	0.774

### 3.3 车辆载重的影响

为分析车辆载重对车桥系统动力响应的影响,假定连续刚构桥的同向两车道上分别布设有4辆载重10 t、5 t、2 t以及0的厢式货车,车辆间距为20 m。车队以60 km/h的速度从桥梁的左端匀速行驶至桥梁的右端,桥面的粗糙度等级为B级。图10为不同载重车辆通过全桥时桥梁前两跨跨中位置的位移与加速度响应时程曲线。表5为不同载重车辆通过全桥时桥梁与车辆各项动力指标的响应峰值。

由图10及表5可以看出:① 车辆载重对桥梁

系统的动力响应影响规律十分明显,随着车辆载重的增加,桥梁各跨跨中的位移响应峰值基本呈线性增长,桥梁跨中的加速度总体呈增长趋势,而桥梁跨中的冲击系数则呈下降趋势。由此可知:超载不仅会直接影响桥梁结构的内力,也会明显影响桥梁结构的动力响应。在实际工程中,应避免超载现象的出现;② 车辆响应。随着车辆载重的增加,车队中头车的竖向加速度峰值及加权加速度均方根值不断减小,因为车辆越重,行车的平稳性与舒适性越好。

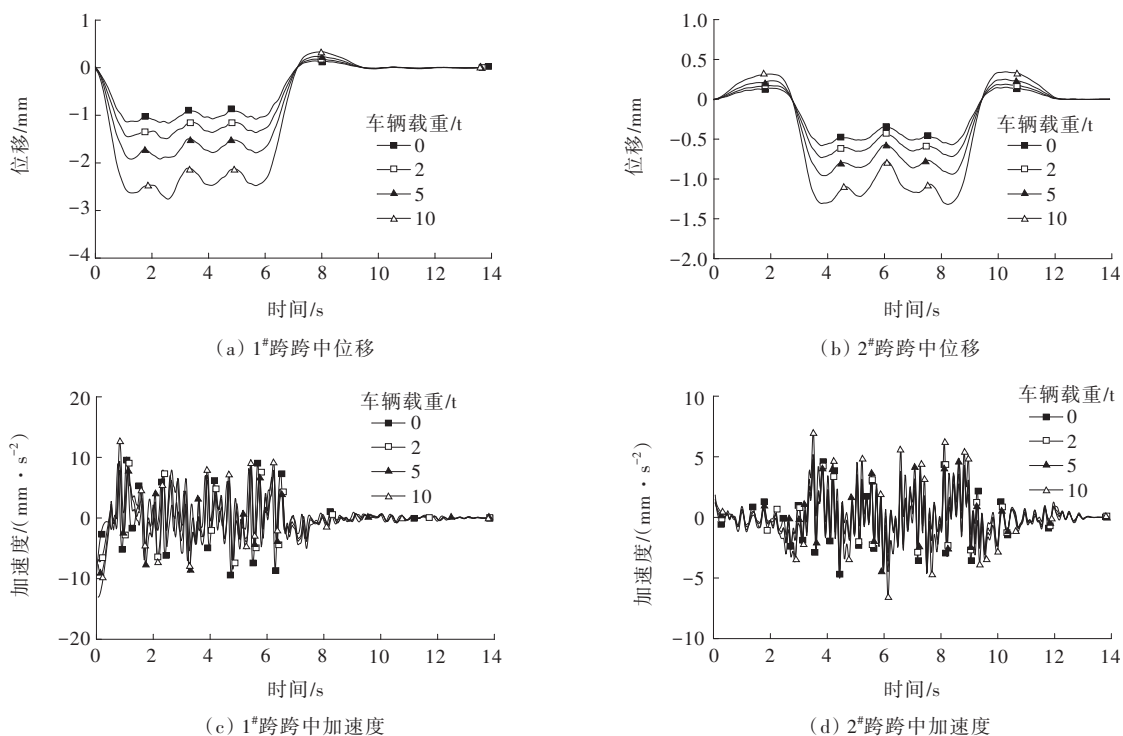


图 10 不同车辆载重时桥梁各跨跨中竖向位移及加速度响应

表5 不同车辆载重时车桥系统各项动力指标响应峰值

车辆载重/ t	桥梁动力响应						车辆动力响应(车体质心)		
	竖向位移/mm		竖向加速度/(mm·s <sup>-2</sup> )		冲击系数		竖向位移/	竖向加速度/	加权加速度均方
	1 <sup>#</sup> 跨跨中	2 <sup>#</sup> 跨跨中	1 <sup>#</sup> 跨跨中	2 <sup>#</sup> 跨跨中	1 <sup>#</sup> 跨跨中	2 <sup>#</sup> 跨跨中	m	(m·s <sup>-2</sup> )	根值/(m·s <sup>-2</sup> )
10	2.761	1.319	13.043	7.171	1.051	1.017	0.038	0.818	0.294
5	1.921	0.957	9.353	5.202	1.069	1.076	0.029	0.965	0.323
2	1.490	0.731	9.491	4.766	1.091	1.087	0.028	1.425	0.447
0	1.165	0.581	10.068	5.022	1.125	1.194	0.030	2.188	0.788

4 结论

基于Midas/Civil有限元软件建立高架广场连续刚构桥的分析模型,本文采用2轴7自由度车辆模型加载,应用自编程序求解车桥耦合振动响应,以此探究车辆速度、行车数量及车辆载重因素对车桥系统动力响应的影响,主要得到如下结论:

(1) 车辆的行驶速度对桥梁各跨跨中的位移响应峰值基本无影响。当车辆以相同速度通过桥梁时,桥梁各跨跨中的位移响应峰值存在差异,这是由于桥梁各跨的支撑体系及刚度不同所致。随着车辆速度的提高,桥梁跨中的加速度响应总体呈增长趋势,而车辆的各项动力指标呈先增后减趋势。车桥系统发生共振时的车速为40 km/h。

(2) 随着同一车道上行车数量的增加,桥梁各跨跨中处较大位移响应的时长明显增加。桥梁中跨跨中的位移峰值响应在2辆车行驶时取得极大值,这取决于桥梁跨度和各车辆间的距离。车辆数量对桥梁的加速度响应基本无影响。桥梁中跨跨中的冲击系数与车辆的加速度响应峰值在6辆车行驶时取得极大值。

(3) 随着车辆载重的增加,桥梁各跨跨中的位移响应峰值基本呈线性增长,桥梁跨中的加速度峰值总体呈增长趋势,而桥梁跨中的冲击系数与车辆的各项动力指标响应峰值则呈下降趋势。

参考文献:

[1] 李小珍,强士中.列车-桥梁耦合振动研究的现状与发展

趋势[J].铁道学报,2002,24(5):112-120.

[2] 李小珍,王铭,晋智斌等.车-桥耦合振动2020年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(S1):135-141.

[3] 朱劲松,香超,祁海东.考虑车桥耦合效应的大跨悬索桥钢-混组合梁疲劳损伤评估[J].振动与冲击,2021,40(5):218-229.

[4] 邓可,杨永红,鲁乃唯,等.基于实测车流的中小跨径桥梁车载动力效应极值研究[J].中外公路,2019,39(5):75-80.

[5] 韩艳,李浩,薛繁荣.基于车桥耦合的钢管混凝土拱桥车桥冲击系数研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(3):493-499.

[6] 安里鹏,李德建,胡立华,等.高速公路大跨度连续梁桥车桥耦合动力响应与参数影响分析[J].应用力学学报,2015,32(6):942-949,1099.

[7] 顾颖,靳帮虎.移动车辆荷载作用下高低塔斜拉桥动力响应时程分析[J].中外公路,2018,38(3):190-194.

[8] YANG Y B,ZHANG B,CHEN Y N,et al.Bridge damping identification by vehicle scanning method[J].Engineering Structures,2019,183:637-645.

[9] 罗晓桐.汽车荷载作用下大跨度斜拉桥的动力响应分析[D].北京:北京交通大学,2018.

[10] ZHU S Y,LI Y L,TOGBENOU K,et al.An efficient optimization algorithm to study the stochastic responses of vehicle-bridge coupling systems[J].Computing in Science and Engineering,2019,21(3):6-17.

[11] 张黎明.大跨度连续刚构桥车桥耦合振动研究[D].成都:西南交通大学,2007.

[12] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG 3363—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

[13] 胡秀月.公路高墩大跨连续刚构桥车桥耦合振动研究[D].成都:西南交通大学,2010.