

文章编号:1001-7372(2018)07-0092-09

# 中国公路车-桥耦合振动车辆模型研究

邓露<sup>1</sup>,段林利<sup>2</sup>,何维<sup>2</sup>,冀伟<sup>3</sup>

(1. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室,湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082; 3. 兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**为了提出适用于中国车-桥耦合振动分析的车辆动力分析模型,首先基于中国桥梁规范中的设计车辆荷载,结合大量调查统计数据 and 等效静力分析方法,初步拟定车辆动力分析模型的几何尺寸、质量、刚度、阻尼等参数取值,并与国内外广泛采用的几种车辆模型的参数取值进行对比。接着选取4座钢筋混凝土简支梁桥并建立其三维有限元模型,基于车-桥耦合振动数值模拟分析车辆模型的刚度、阻尼等参数对桥梁上动力冲击系数的影响,并对比几个不同车辆模型对动力冲击系数的影响。最后,选择中国湖南省境内一座实桥和几辆不同轴数的重车开展实桥试验,将实测动力冲击系数与所提车辆模型数值模拟获得的冲击系数进行对比。结果表明:动力冲击系数随车辆总质量的增大而减小,随车辆整体刚度的增大而增大,但随车辆整体阻尼的增大呈先减小后增大的趋势;单个车轴的刚度和阻尼对动力冲击系数的影响不明显;车辆总质量是导致不同车辆模型作用下动力冲击系数差异的主要因素;数值模拟结果与实测结果吻合良好,验证了所提车辆模型及参数取值的合理性;该车辆模型可用于中国的设计车辆荷载作用下桥梁的动力响应分析和相关研究,也可用于估算重量相当的不同类型车辆对桥梁的动力冲击效应。

**关键词:**桥梁工程;车辆模型;数值模拟;现场试验;冲击系数

**中图分类号:**U441.3 **文献标志码:**A

## Study on Vehicle Model for Vehicle-bridge Coupling Vibration of Highway Bridges in China

DENG Lu<sup>1</sup>, DUAN Lin-li<sup>2</sup>, HE Wei<sup>2</sup>, JI Wei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Wind Engineering and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University,

Changsha 410082, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University,

Changsha 410082, Hunan, China; 3. School of Civil Engineering,

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** To design an analytical vehicle model for studying vehicle-bridge coupled vibration, based on the design vehicle loads in the Chinese bridge design code and a combination of a large amount of survey data and their equivalent analysis, parameters such as geometric size, mass, stiffness, and damping of the vehicle model were determined. These parameters were compared with the parameters of vehicle models adopted worldwide. Subsequently, four simply supported reinforced-concrete bridges were selected, and finite-element models were established. Based on the numerical simulation of vehicle-bridge coupling vibration, the effects of vehicle parameters, such as stiffness and damping, on the dynamic impact factors of the selected bridges were

收稿日期:2017-09-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51478176);国家自然科学基金青年科学基金项目(51708269)

作者简介:邓露(1984-),男,湖南双峰人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dengl@hnu.edu.cn。

studied. The effects of the different vehicle models on the dynamic impact factor were also compared. Finally, field tests were conducted on a real bridge in Hunan province, and several trucks with different numbers of axles were used. The measured dynamic impact factors were compared with the simulated impact factors obtained using the proposed vehicle model. The results show that the dynamic impact factor decreases with increase in gross vehicle weight but increases with increase in the overall stiffness of the vehicle. With the increase in overall damping, the dynamic impact factor first decreases and then increases. In addition, the stiffness or damping of a single axle has a small influence on the impact factor. The gross vehicle weight is the main factor that is attributable for the difference in the impact factor induced by different vehicle models. The simulation results are in good agreement with the test results, indicating the rationality of the proposed vehicle model and its parameters. The proposed vehicle model can be used for numerical simulation of the dynamic response of bridges subjected to design vehicle loads and related research, as well as in the estimation of the dynamic loading effect on bridges subjected to different types of vehicles with similar weight.

**Key words:** bridge engineering; vehicle model; numerical simulation; field test; impact factor

## 0 引言

移动车辆荷载引起的桥梁振动及对桥梁的冲击作用一直是桥梁界关注的重要问题之一。桥梁设计规范中一般采用动力冲击系数(IM)来表征车辆荷载对桥梁的动力冲击效应。动力冲击系数受到诸多因素的影响,且其相互影响关系复杂<sup>[1]</sup>。因此,桥梁规范在计算冲击系数时只考虑桥梁基频或跨径的做法均不够准确。

现场试验是研究车-桥耦合振动最可靠的手段。然而,桥梁现场试验通常需要阻断交通,且人力、物力、财力花费巨大。近年来,随着计算机和有限元技术的飞速发展,数值模拟已成为研究车-桥耦合振动问题最实用、高效的方法。为了准确地了解重车对桥梁的动力冲击作用,为桥梁规范制定和工程实践提供指导,需要建立合理的车辆动力分析模型。此种模型应既能合理代表现实中卡车的力学性能,又能为设计提供参考和指导。目前国际上最常用的车辆动力模型有 Wang 等<sup>[2]</sup>提出的三轴车模型和 Harris 等<sup>[3]</sup>、Obrien 等<sup>[4]</sup>提出的五轴车模型。前者对应美国 AASHTO 桥梁规范中的 HS20-44 设计卡车<sup>[5]</sup>,该卡车模型已被许多学者用于车-桥耦合振动的相关研究中<sup>[6-7]</sup>,其车辆模型的参数则引自文献<sup>[8]</sup>。Obrien 等<sup>[4]</sup>采用的五轴车模型及其参数取值则参考了欧洲大量卡车的统计数据。然而,中国目前尚未有合适的可供参考的车辆动力分析模型,其相关研究采用的车辆模型大多参考国外文献,缺乏科学依据<sup>[9-11]</sup>。

为此,本文基于中国桥梁规范中的设计车辆荷载,建立适用于中国车-桥耦合振动分析的车辆动力分析模型。结合统计调查数据和等效分析,初步拟定车辆模型的几何尺寸和刚度阻尼等参数取值。对影响车辆动力特性的重要参数进行参数分析,并对比所提车辆模型与国际上几个常用车辆模型的计算冲击系数。最后,通过实桥试验验证所提车辆模型及参数取值的合理性。研究结果可为车-桥耦合振动相关研究提供参考模型。

## 1 中国车辆模型的初步拟定

### 1.1 车辆模型的提出及参数拟定

国际上,Wang 等<sup>[2]</sup>采用的三轴车模型和 Obrien 等<sup>[4]</sup>采用的五轴车模型的轴距和轴重分布分别参考了桥梁规范中的设计车辆和现实中的代表性车辆而确定。中国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015,以下简称《规范》)中的车辆荷载是根据大量调查采集的试验数据,经过统计分析得出的标准化荷载<sup>[12]</sup>。因此,可根据中国《规范》中的车辆荷载来确定拟提出的车辆模型的车质量、轴数、轴距以及轮距。中国《规范》中车辆荷载的立面布置如图1所示,其轮距为1.8 m。由此拟提出的车辆模型如图2所示。该模型为一种质量-弹簧-阻尼模型,其中车体由位于形心位置、具有转动惯量的质量块模拟,车辆的悬架与车轮由弹簧阻尼体系模拟,是目前国际上常用的一种车辆动力分析模型。

将拟提出的车辆模型的轴重与《规范》中的车辆荷载进行等效静力分析,列出力及力矩的平衡方程为

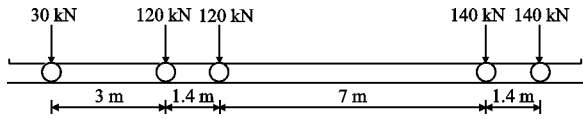


图1 中国《规范》中车辆荷载立面布置  
Fig.1 Elevation View of the Vehicle Loads in the Chinese Code

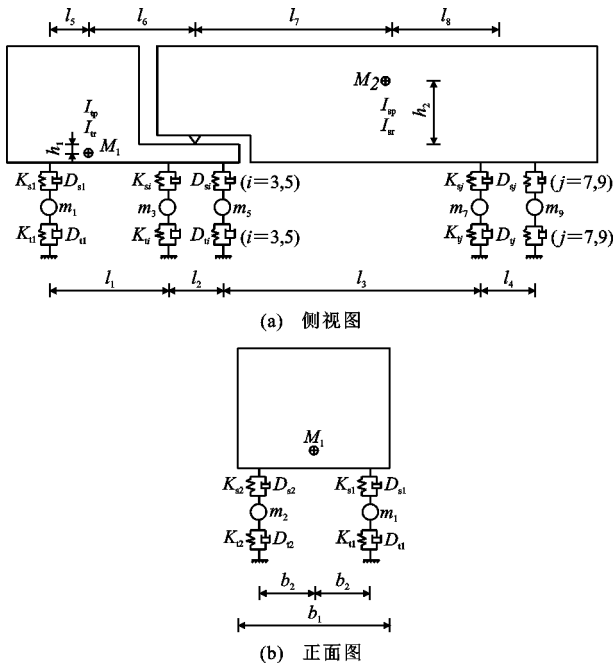


图2 拟定的中国车辆模型  
Fig.2 Proposed Chinese Vehicle Model

$$\left( \sum_{p=1}^2 M_p + \sum_{q=1}^{10} m_q \right) g = 550\,000 \quad (1)$$

$$\left[ \frac{30\,000}{g} - (m_1 + m_2) \right] \left( l_1 + \frac{l_2}{2} \right) - M_1 l_6 = 0 \quad (2)$$

$$\left[ \frac{140\,000}{g} - (m_9 + m_{10}) \right] \left( l_4 + l_3 + \frac{l_2}{2} \right) + \left[ \frac{140\,000}{g} - (m_7 + m_8) \right] \left( l_3 + \frac{l_2}{2} \right) - M_2 l_7 = 0 \quad (3)$$

式中： $M_p$  ( $p=1,2$ )为车体质量； $m_q$  ( $q=1,2,\dots,10$ )为车轴悬挂质量； $l_r$  ( $r=1,2,\dots,8$ )为几何尺寸(图2)； $g$ 为重力加速度，取  $9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。根据规范中的车辆荷载以及式(1)~(3)并参考相关文献可确定车辆模型的尺寸、车体和车轮质量、车体转动惯量的建议取值，如表1所示。

车辆悬架系统参数(包括刚度和阻尼)对车辆的动力特性影响很大，常见的卡车悬架有钢板悬架和空气悬架。根据文献[4]大量调查统计的结果，结合中国某重卡公司提供的数据及中国相关研究中的数据，初步拟定了图2中车辆模型的刚度和阻尼的取值，如表2所示。表2中同时给出了这些参数

表1 拟定的中国车辆模型的参数取值

Table 1 Parameters of the Proposed Chinese Vehicle Model

参数类型	取值来源	参数	取值
几何尺寸	《规范》	$b_1/\text{m}$	2.5
		$b_2/\text{m}$	0.9
		$l_1/\text{m}$	3.0
		$l_2/\text{m}$	1.4
		$l_3/\text{m}$	7.0
	文献[13]	$l_4/\text{m}$	1.4
		$l_5/\text{m}$	1.0
		$l_8/\text{m}$	3.2
		$h_1/\text{m}$	0.1
		$h_2/\text{m}$	1.0
平衡方程计算	$l_6/\text{m}$	2.7	
	$l_7/\text{m}$	4.5	
车体质量	平衡方程计算	$M_1/\text{kg}$	2 276.5
		$M_2/\text{kg}$	45 246.0
车轴悬挂质量	文献[4]	$m_1/\text{kg}$	700
		$m_2/\text{kg}$	700
		$m_3/\text{kg}$	1 000
		$m_4/\text{kg}$	1 000
		$m_5/\text{kg}$	1 000
		$m_6/\text{kg}$	1 000
		$m_7/\text{kg}$	800
		$m_8/\text{kg}$	800
		$m_9/\text{kg}$	800
		$m_{10}/\text{kg}$	800
俯仰转动惯量	由以上参数估算获得	$I_{\text{tp}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	20 196.0
		$I_{\text{sp}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	285 990.0
侧翻转动惯量	由以上参数估算获得	$I_{\text{tr}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	2 189.2
		$I_{\text{sr}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	43 512.0

的调查结果和取值依据。

### 1.2 其他车辆模型参数取值对比

中国重卡主要采用钢板悬架，而钢板悬架的刚度比空气悬架大，对桥面的冲击作用一般来说更为显著，因此本文拟提出的中国车辆模型悬架参数以钢板悬架参数作为参考。国际上最常用的车辆模型有Wang等<sup>[2]</sup>的三轴车和Obrien等<sup>[4]</sup>的五轴车模型。为便于后文进行参数比较，除了这2个车辆模型之外，还考虑了与拟提出的车辆模型车型较为相近的Wang等<sup>[7]</sup>提出的五轴车模型。为了方便说明，用“名字-车轴数”命名这几个车辆模型：China-5(提出的车辆模型)、Obrien-5、Wang-3和Wang-5。根据表2及相应参考文献[3]、[6]、[7]中的数据，总结这4个车辆模型的刚度及阻尼参数取值如表3所示，Obrien-5、Wang-3、Wang-5的侧视图如图3所示。从表3可以看出，与其他车辆模型的参数相比，

表 2 初拟中国车辆模型的刚度和阻尼取值

Table 2 Stiffnesses and Dampings of the Proposed Chinese Vehicle Model

参数	文献[4]				中国调查结果范围	文献编号	最终取值
	最小值	最大值	标准差	均值			
钢板悬架刚度 $K_{s1}, K_{s2}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	150	500	70	300	[250,420]	[14]~[16]	300
空气悬架刚度 $K_{s3} \sim K_{s6}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	300	600	50	500	无	无	500
钢板悬架刚度 $K_{s3} \sim K_{s6}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	600	1 500	300	1 000	693	[15]	1 000
空气悬架刚度 $K_{s7} \sim K_{s10}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	250	600	100	400	无	无	400
钢板悬架刚度 $K_{s7} \sim K_{s10}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	1 000	1 500	200	1 250	1 000	[15]	1 250
轮胎刚度 $K_{t1}, K_{t2}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	500	1 500	200	750	[897, 2 580]	[15]~[19]	1 500
轮胎刚度 $K_{t3} \sim K_{t10}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	500	1 500	200	750	[2 000, 3 500]	[16]~[19]	3 000
悬架阻尼 $D_{s1}, D_{s2}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	3	10	2	5	[8, 22]	[20]~[23]	10
悬架阻尼 $D_{s3} \sim D_{s10}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	3	10	2	5	[25, 84]	[15],[18],[19]	53
轮胎阻尼 $D_{t1} \sim D_{t10}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	2	10	1	3	3	[19]	3

表 3 四个车辆模型的刚度和阻尼取值

Table 3 Stiffnesses and Dampings of Four Vehicle Models

车辆模型	China-5	Obrien-5	Wang-3	Wang-5
车质量/t	55	44	32	29
悬架刚度 $K_{s1}, K_{s2}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	300	400	242.6	485.1
悬架刚度 $K_{s3}, K_{s4}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	1 000	1 000	1 903.1	693.1
悬架刚度 $K_{s5}, K_{s6}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	1 000	750	1 969.0	693.1
悬架刚度 $K_{s7} \sim K_{s10}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	1 250	750		679.6
轮胎刚度 $K_{t1}, K_{t2}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	1 500	1 750	875.0	1 402.4
轮胎刚度 $K_{t3}, K_{t4}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	3 000	3 500	3 503.3	2 804.6
轮胎刚度 $K_{t5}, K_{t6}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	3 000	3 500	3 507.4	2 804.6
轮胎刚度 $K_{t7} \sim K_{t10}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	3 000	3 500		2 804.6
悬架阻尼 $D_{s1}, D_{s2}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	10	10	2.1	2.3
悬架阻尼 $D_{s3}, D_{s4}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	53	10	7.8	3.6
悬架阻尼 $D_{s5}, D_{s6}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	53	10	7.1	3.6
悬架阻尼 $D_{s7} \sim D_{s10}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	53	10		37.8
轮胎阻尼 $D_{t1} \sim D_{t6}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	3	0	2	0
轮胎阻尼 $D_{t7} \sim D_{t10}/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	3	0		0

所提车辆模型参数除了悬架阻尼相差较大之外,其他参数均较为接近。事实上,悬架阻尼参数取值是依据表 2 中的中国调查统计数据确定的。

## 2 数值模拟及参数分析

### 2.1 桥梁模型及路面平整度

根据通用图集建立跨径均为 20 m、截面形式分别为 T 梁、箱梁、空心板的 3 座桥梁,分别用 T-20, B-20, K-20 表示。为便于比较,同样根据美国 AASHTO 规范建立一座跨径为 24.38 m 的 T 梁桥,用 T-24 表示。各个桥梁横截面及《规范》建议车辆加载位置如图 4 所示。各桥梁基频及按中国《规范》计算的 IM 值如表 4 所示。

路面不平顺是车-桥耦合振动的主要激励源,对

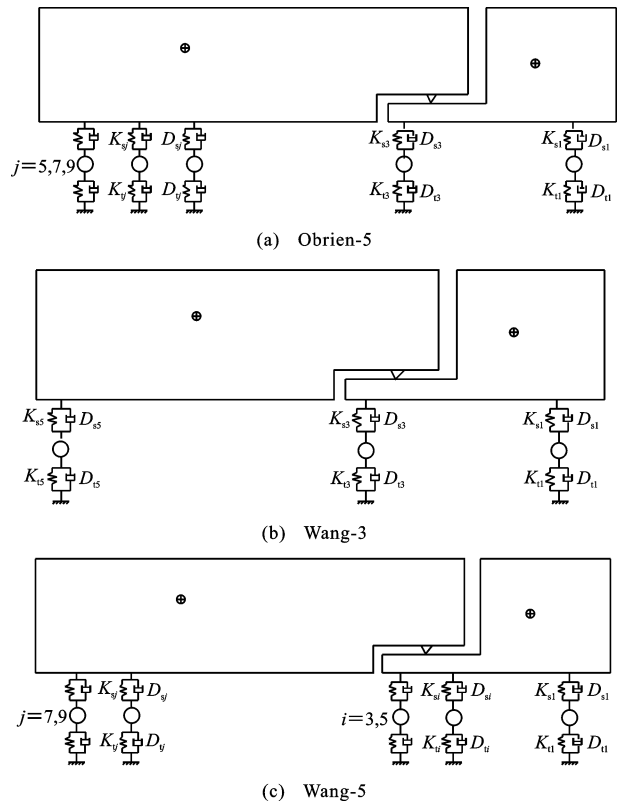


图 3 其他 3 个车辆模型侧视图

Fig. 3 Side Views of Other Three Vehicle Models

车-桥耦合振动的影响较大。车-桥耦合振动的准确模拟取决于对桥梁、车辆、路面平整度 3 个重要因素的准确模拟。路面平整度的建模可以根据实际情况,基于实测数据和数值模拟数据 2 种方法实现。对某座具体桥梁的研究,可以通过激光扫描仪扫描地面轮廓(记录路面上各点的高程),然后建立路面平整度(高程)模型。而在进行路面平整度的相关参数分析时,通常可根据假定的路面平整度等级,基于相应的功率谱密度函数通过逆傅里叶变换

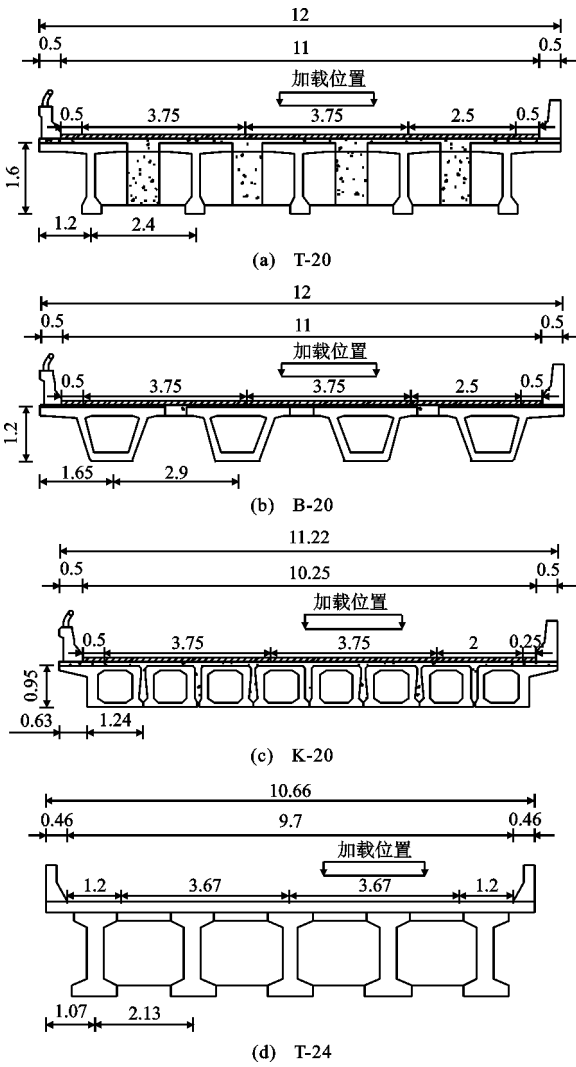


图4 各桥梁横截面及车辆加载位置(单位:m)

Fig. 4 Cross Sections of Bridges and Loading Positions of Vehicles (Unit: m)

表4 各桥梁基频及中国《规范》IM建议取值

Table 4 Fundamental Frequencies of Bridges and Calculated IM Based on the Chinese Bridge Design Code

桥梁	基频/Hz	中国规范计算IM值
T-20	5.87	0.297
B-20	5.11	0.273
K-20	4.60	0.254
T-24	4.60	0.254

生成某种等级下的随机路面不平度模型。

国际标准化组织(ISO)将路面平整度分为A(非常好)~E(非常差)共5个等级。本文采用这5种路面等级,对每种工况都生成20个同等级平整度下的随机路面样本并通过车-桥耦合振动获得动力冲击系数,然后取其平均值进行分析。取20个冲击系数的平均值是为了消除模拟生成的随机路面带来的影响。

### 2.2 车-桥耦合动力响应求解理论

车辆在桥上行驶时,可通过车轮与桥面接触点处的位移和接触力之间的关系,建立车-桥耦合系统的动力学方程为<sup>[24]</sup>

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_b \\ \mathbf{M}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{d}}_b \\ \ddot{\mathbf{d}}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b + \mathbf{C}_{b-b} & \mathbf{C}_{b-v} \\ \mathbf{C}_{v-b} & \mathbf{C}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{d}}_b \\ \dot{\mathbf{d}}_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_b + \mathbf{K}_{b-b} & \mathbf{K}_{b-v} \\ \mathbf{K}_{v-b} & \mathbf{K}_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d}_b \\ \mathbf{d}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_b \\ \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_G \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{M}_v, \mathbf{C}_v, \mathbf{K}_v$ 分别为车辆质量、阻尼、刚度矩阵; $\mathbf{M}_b, \mathbf{C}_b, \mathbf{K}_b$ 分别为桥梁质量、阻尼、刚度矩阵; $\mathbf{d}_b$ 为桥梁位移矢量; $\dot{\mathbf{d}}_b, \ddot{\mathbf{d}}_b$ 分别为 $\mathbf{d}_b$ 的一、二阶导,下同; $\mathbf{d}_v$ 为车辆位移矢量; $\mathbf{F}_G$ 为车辆重力矢量; $\mathbf{C}_{b-b}, \mathbf{C}_{b-v}, \mathbf{C}_{v-b}, \mathbf{K}_{b-b}, \mathbf{K}_{b-v}, \mathbf{K}_{v-b}, \mathbf{F}_b$ 和 $\mathbf{F}_v$ 分别为由车-桥相互作用力引起的随时间变化的量。

式(4)的具体求解过程详见文献[24]。车-桥耦合振动分析程序的精度已通过实桥试验进行了验证<sup>[25]</sup>。

### 2.3 刚度与阻尼参数分析

综合考虑表2,3中的数据,大致确定了参数分析中变量的取值范围。分别调整车辆的整体刚度和阻尼参数取值,研究其对冲击系数的影响,如图5所示。由图5可以看出,总体而言,冲击系数随整体刚度的增大而增大,随整体阻尼的增大先减小后增大。文献[3]中研究阻尼对冲击系数的影响也得出类似规律。

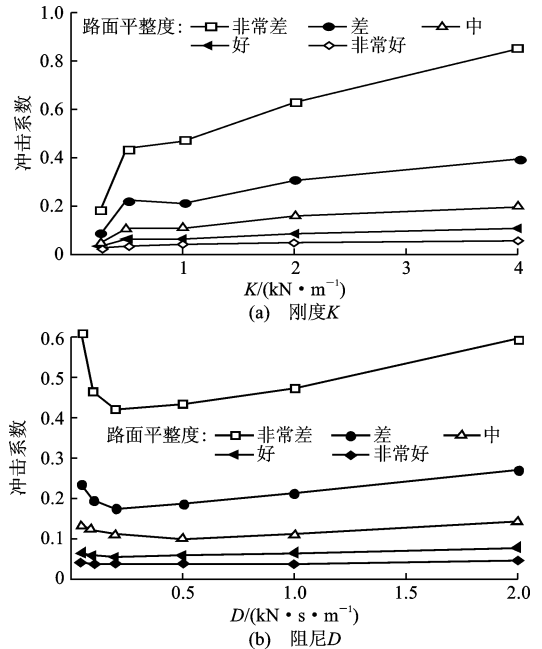


图5 冲击系数随整体刚度和阻尼变化的情况  
Fig. 5 Variation of Impact Factors with Change in Overall Stiffness and Damping

为研究单个重要刚度和阻尼参数对冲击系数的影响,将表 3 中国际上最常用车辆模型的刚度和阻尼参数与初步拟定的车辆模型的对应参数进行对比,发现悬架刚度  $K_{s3}, K_{s4}$ 、悬架刚度  $K_{s5}, K_{s6}$ 、悬架刚度  $K_{s7} \sim K_{s10}$ 、悬架阻尼  $D_{s3} \sim D_{s10}$  和轮胎阻尼  $D_{t1} \sim D_{t10}$  这 5 种参数取值相差较大,分别进行参数分析,研究这些参数对冲击系数的影响程度。

取跨径为 20 m 的 T 梁桥在车速分别为 10, 15, 20, 25, 30  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  下的工况进行分析,冲击系数取所提车辆模型 China-5 在 5 个车速下计算的平均值。在不同路面平整度下,冲击系数随参数的变化情况如图 6 所示。

定义绝对差值为参数变化后的冲击系数与参数变化前的冲击系数差值的绝对值,定义绝对差值平均值为 5 种速度下绝对差值的平均值,某参数变化过程中绝对差值平均值的最大值用 MD 表示。各个参数的 MD 如表 5 所示。从图 6 和表 5 可以看出,在给定范围内,单个参数对冲击系数的影响均不太显著。相比其他参数,悬架阻尼  $D_{s3} \sim D_{s10}$  对冲击系数的影响较大,该参数对冲击系数的影响与图 5(b)的结果类似。

## 2.4 各个车辆模型的对比

各个车辆模型对应的冲击系数均取 4 座桥梁、5 个车速共 20 个工况下的平均值。对不同的车辆模型,冲击系数随路面平整度的变化情况如图 7 所示。从图 7 可以看出,在不同路面平整度下,冲击系数由大至小对应的车辆模型均一致,依次为 Wang-5, Wang-3, Obrien-5 和 China-5。

## 2.5 车质量的影响

由表 3 可知,车辆模型 Obrien-5(44 t)、Wang-3(32 t)、Wang-5(29 t)与提出的车辆模型 China-5(55 t)的车质量有较大差别,且中国重车的质量差异也较大。为研究车质量对冲击系数的影响,通过改变模型 China-5 的质量(其参数保持不变),以跨径为 20 m 的 T 梁桥为例,计算 5 个车速下冲击系数的平均值进行分析。图 8 为在不同路面平整度下,用车辆模型 China-5 计算的冲击系数随车质量的变化情况。由图 8 可以看出,冲击系数基本上随车质量增加而减小。其他文献也得到了相同的规律,原因在于车质量增加虽然会导致桥梁静力响应的增大,但由车辆振动引起的桥梁动力响应的增大值基本保持不变,因此导致了冲击系数随车质量增加而减小<sup>[26]</sup>。中国的公路设计车辆荷载与其他大部分国家相比较,因此,采用合适的车辆质量进行

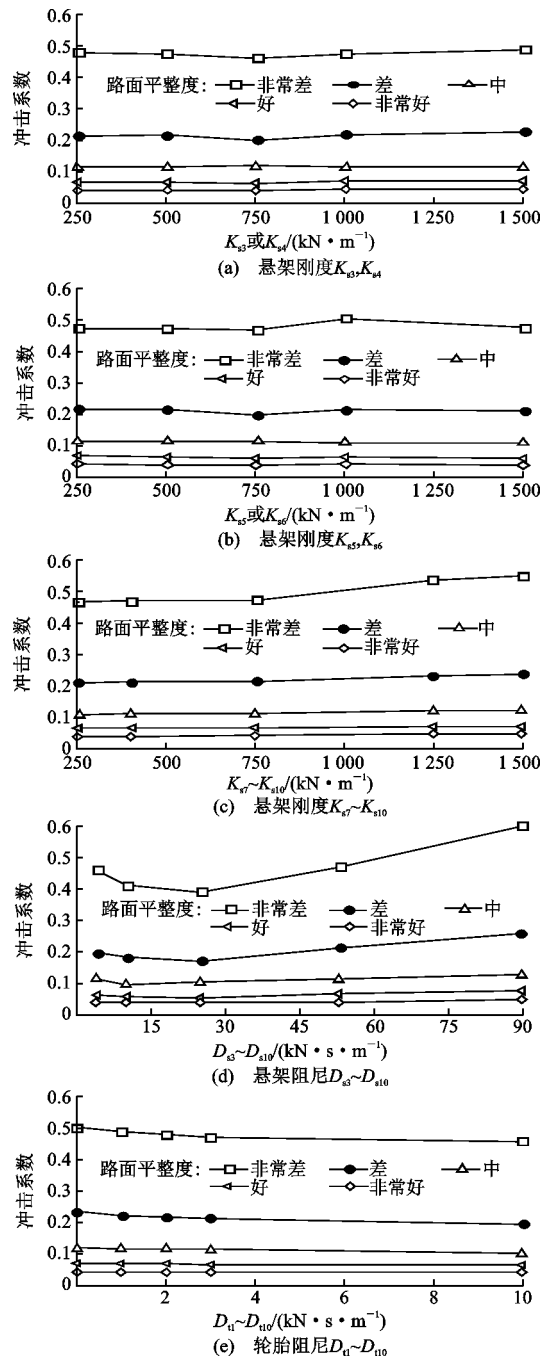


图 6 冲击系数随各个参数变化的情况

Fig. 6 Variation of Impact Factors with Different Parameters

表 5 各参数的 MD 值

Table 5 MDs of Different Parameters

参数	不同路面平整度下的 MD 值				
	非常差	差	中	好	非常好
$K_{s3}, K_{s4}$	0.027	0.020	0.013	0.005	0.002
$K_{s5}, K_{s6}$	0.045	0.019	0.014	0.008	0.003
$K_{s7} \sim K_{s10}$	0.067	0.025	0.013	0.010	0.010
$D_{s3} \sim D_{s10}$	0.139	0.049	0.020	0.014	0.006
$D_{t1} \sim D_{t10}$	0.045	0.025	0.012	0.008	0.004

数值模拟获得的动力冲击系数数值可以避免不必要的

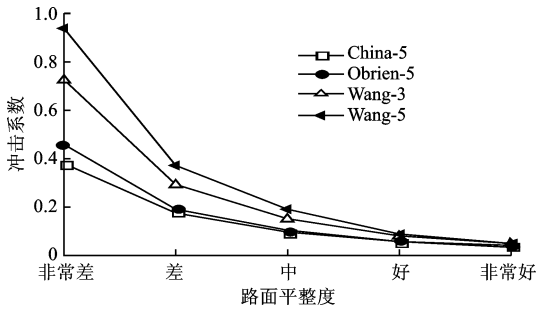


图7 不同车辆模型在不同路面平整度下的冲击系数

Fig. 7 The Variation of Impact Factors with Different Vehicle Models and Road Surface Roughnesses

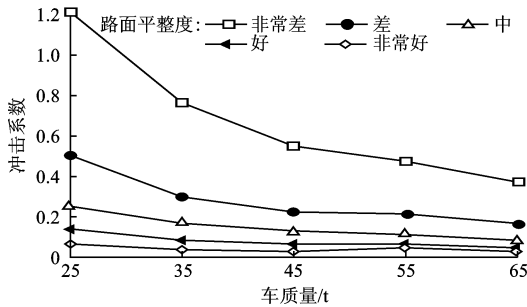


图8 不同路面平整度下冲击系数随车质量的变化情况

Fig. 8 Variation of Impact Factors with the Variation of Truck Weights and Road Surface Roughnesses

保守设计与评估。

为了有效对比车型及车轴(包括轮胎)的刚度和阻尼对车辆动力冲击作用的影响,保持车辆模型China-5的几何尺寸、刚度、阻尼、车轮质量不变,通过调整车体质量来改变车质量,使其分别与车辆模型Obrien-5, Wang-3, Wang-5的质量相同。在不同路面平整度下,用车辆模型Obrien-5, Wang-3, Wang-5和调整车质量后的车辆模型China-5计算的冲击系数如表6所示。由表6可以发现:相同车质量的情况下,用新提出的车辆模型计算得到的冲击系数与用其他车辆模型计算得到的冲击系数较为接近。这表明在车质量接近的前提下,提出的车辆模型与其他3个车辆模型对桥梁的动力冲击作用较为一致,验证了所提车辆模

型参数的合理性。而提出的刚度和阻尼参数取值虽然与其他车辆模型略有不同,但却是基于中国调查统计数据获得,能真实代表中国实际重卡的刚度与阻尼参数取值,因而能更准确地反映中国卡车的力学性能。

结合图8和表6可以发现:车质量可能是导致用所提车辆模型计算得到的冲击系数与用其他车辆模型计算得到的冲击系数产生差距的主要原因。

表6 不同工况下的冲击系数

Table 6 Impact Factors in Different Conditions

车辆模型	车质量/ t	不同路面平整度下的冲击系数				
		非常差	差	中	好	非常好
Obrien-5	44	0.623	0.279	0.146	0.083	0.050
China-5		0.602	0.261	0.131	0.066	0.032
Wang-3	32	0.737	0.299	0.161	0.084	0.052
China-5		0.858	0.370	0.193	0.096	0.045
Wang-5	29	1.077	0.478	0.225	0.097	0.048
China-5		1.012	0.437	0.227	0.113	0.054

### 3 计算实例与验证

以湖南省衡阳市王木塘高架桥为例开展试验研究,验证所提车辆模型的合理性。该桥全长共五联,每联三跨,每跨20 m,单幅桥面净宽11.75 m。桥梁上部结构采用先简支后连续的空心板梁,每跨由10片预应力空心板组成,空心板梁横截面宽为1.24 m,高为0.95 m。桥面铺装采用10 cm厚现浇C50混凝土层。桥面平整度属于ISO规范的非常好与好之间。

选用几种不同类型的重车进行跑车试验。如图9所示。调整所提车辆模型的车质量与试验车质量相同(其他参数保持不变),根据实桥试验的工况用提出的车辆模型进行数值模拟。实测和模拟获得的冲击系数如表7所示。从表7可以看出:模拟结果与实测结果能较好地吻合,验证了所提车辆模型及参数取值的合理性。基于表7的结果可知:所提车辆模型及参数可用于粗略估算相同车质量、不同车型重卡的冲击系数。



(a) 三轴车



(b) 四轴车



(c) 六轴车

图9 现场试验车辆

Fig. 9 Vehicle in Field Test

表7 实测与数值模拟结果对比

Table 7 Comparison of the Results by Field Test and Numerical Simulation

车质量/t	轴数	速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	冲击系数 实测值	冲击系数 模拟值
55.06	3	8.8	0.052	0.055
		17.9	0.050	0.052
		25.7	0.072	0.075
		36.6	0.041	0.050
49.27	4	52.3	0.056	0.054
		62.7	0.065	0.072
60.12	6	51.8	0.036	0.029
		64.1	0.050	0.042

## 4 结 语

(1)本文基于中国桥梁规范设计车辆荷载,建立了适用于中国桥梁设计和评估的车辆动力分析模型,并基于调查统计数据 and 等效分析方法,对车辆模型的几何尺寸、质量、刚度、阻尼等参数提出了建议取值。最后通过实桥试验验证了所提车辆模型及其参数取值的合理性。

(2)合理的车辆动力分析模型是研究公路车-桥耦合振动问题的一个关键因素。本文所提出的车辆动力分析模型及其参数取值可用于中国设计车辆荷载作用下桥梁的动力响应模型及动力冲击系数估算,可为中国公路车-桥耦合振动问题的研究提供重要参考。

(3)由于现实中的车型及其参数具有较强的随机性,本文中调查统计数据不能覆盖所有情况,今后可根据更新、更全面的统计数据进一步完善车辆模型及参数。

### 参考文献:

### References:

[1] 李小珍,张黎明,张洁.公路桥梁与车辆耦合振动研究现状与发展趋势[J].工程力学,2008,25(3):230-240.  
LI Xiao-zhen, ZHANG Li-ming, ZHANG Jie. State-of-the-art Review and Trend of Studies on Coupling Vibration for Vehicle and Highway Bridge System [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (3): 230-240.

[2] WANG T L, HUANG D Z, SHAHAWY M. Dynamic Response of Multigirder Bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118 (8): 2222-2238.

[3] HARRIS N K, OBRIEN E J, GONZÁLE A. Reduction of Bridge Dynamic Amplification Through Adjustment of Vehicle Suspension Damping [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302 (3): 471-485.

[4] OBRIEN E J, CANTERO D, ENRIGHT B, et al. Characteristic Dynamic Increment for Extreme Traffic Loading Events on Short and Medium Span Highway Bridges [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (12): 3827-3835.

[5] AASHTO LRFD, Bridge Design Specifications [S].

[6] SHI X, CAI C S, CHEN S. Vehicle Induced Dynamic Behavior of Short-span Slab Bridges Considering Effect of Approach Slab Condition [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13 (1): 83-92.

[7] WANG T L, LIU C. Influence of Heavy Trucks on Highway Bridges [R]. Tallahassee: Florida Department of Transportation, 2000.

[8] FENVES S J, VELETOS A S, SIESS C P. Dynamic Studies of Bridges on the AASHO Test Road [R]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1962.

[9] 韩万水,闫君媛,武隽,等.基于长期监测的特重车流作用下桥梁动态放大系数研究[J].振动工程学报,2014,27(2):222-232.  
HAN Wan-shui, YAN Jun-yuan, WU Jun, et al. Analysis of Bridge Dynamic Amplification Factors Under Extra-heavy Truck Scenarios Based on Long-term Monitoring Data [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27 (2): 222-232.

[10] 丁勇,黄奇,谢旭,等.载重汽车-桥梁伸缩缝跳车动力荷载计算方法与影响因素分析[J].土木工程学报,2013,46(7):98-107.  
DING Yong, HUANG Qi, XIE Xu, et al. A Computational Method for the Dynamic Load in Heavy-vehicle Bumping at the Bridge Expansion Joint and Analysis of the Influencing Factors [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (7): 98-107.

[11] 王达,刘扬,黄平明.随机车流作用下双曲拱桥车-桥耦合振动研究[J].中国公路学报,2009,22(6):67-73.  
WANG Da, LIU Yang, HUANG Ping-ming. Research on Vehicle-bridge Coupled Vibration for Two-way Curved Arch Bridge Under Random Traffic Flow [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22 (6): 67-73.

[12] 陈名扬,王起才.车辆荷载和车道荷载对桥梁结构可靠



- 度的影响[J]. 公路交通技术, 2012(5): 67-72.
- CHEN Ming-yang, WANG Qi-cai. Influences of Loads on Vehicles and Lanes on Reliability of Bridge Structures [J]. Technology of Highway and Transport, 2012 (5): 67-72.
- [13] 李海青. 半挂汽车列车结构参数与状态估计研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- LI Hai-qing. Research on Structural Parameters and State Estimation of Tractor-semitrailer [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [14] 唐应时, 柴天, 和进军, 等. 基于接触摩擦的少片变截面钢板弹簧的刚度分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(3): 694-698.
- TANG Ying-shi, CHAI Tian, HE Jin-jun, et al. Analysis of Stiffness of Taper Leaf Spring Based on Contact Friction [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40 (3): 694-698.
- [15] 朱若城. 提高半挂汽车列车操纵稳定性的参数优化匹配研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- ZHU Ruo-cheng. Research on Parameter Optimization Matching for Improving Handling Stability of Tractor-semitrailer [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [16] 王伟. 基于 ADAMS 的半挂牵引车行驶稳定性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- WANG Wei. Research on Driving Stability for Semi-trailer Tractor Based on ADAMS [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [17] 何新维. 某重型载货车平衡悬架钢板弹簧数值分析及试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- HE Xin-wei. Numerical Analysis and Experimental Research for Balanced Suspension's Leaf Spring of a Heavy Vehicle [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [18] 刘献栋, 吕海波, 张红卫, 等. 半挂汽车列车结构参数及模型处理方式对平顺性的影响[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2015, 34(5): 139-144, 164.
- LIU Xian-dong, LU Hai-bo, ZHANG Hong-wei, et al. Effect of Structure Parameters and Model Processing Method of Tractor-semitrailer Combination on the Ride Performance [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Nature Science Edition, 2015, 34 (5): 139-144, 164.
- [19] 郑仲浪, 吕彭民. 大型货车对路面的动作用力[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(2): 101-106.
- ZHENG Zhong-lang, LU Peng-min. Dynamic Load of Large Trucks Acting on Pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29 (2): 101-106.
- [20] 杨道斋, 张洪信, 张铁柱, 等. 兼顾平顺性和路面损伤的货车悬架特性优化[J]. 青岛大学学报: 工程技术版, 2005, 20(3): 39-42.
- YANG Dao-zhai, ZHANG Hong-xin, ZHANG Tie-zhu, et al. Optimization of Suspension Characteristics of Freight Car with Consideration of Ride Comfort and Pavement Damage [J]. Journal of Qingdao University: Engineering and Technology Edition, 2005, 20 (3): 39-42.
- [21] 丁飞. 重型商用车液压互联悬架系统特性分析及设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- DING Fei. Characteristic Analysis and Design of Hydraulically Interconnected Suspensions for Commercial Heavy Trucks [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [22] 黄剑锋. 重型商用牵引车悬架阻尼特性匹配研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- HUANG Jian-feng. Research on Matching Damping to Suspension of Heavy Commercial Tractor [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [23] 徐强, 骆汉丰, 李亮. 重型牵引车空气悬架参数匹配优化[J]. 合肥学院学报: 自然科学版, 2014, 24(3): 53-57.
- XU Qiang, LUO Han-feng, LI Liang. Heavy Tractor Matching Air Suspension Parameters Optimization [J]. Journal of Hefei University: Nature Science, 2014, 24 (3): 53-57.
- [24] 邓露, 何维, 王芳. 不同截面类型简支梁桥动力冲击系数研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14): 70-75.
- DENG Lu, HE Wei, WANG Fang. Dynamic Impact Factors for Simply Supported Bridges with Different Cross-section Types [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34 (14): 70-75.
- [25] 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.
- [26] 邓露, 王维. 公路桥梁动力冲击系数研究进展[J]. 动力学与控制学报, 2016, 14(4): 289-300.
- DENG Lu, WANG Wei. Research Progress on Dynamic Impact Factors of Highway Bridges [J]. Journal of Dynamics and Control, 2016, 14 (4): 289-300.