

# 下承式钢箱系杆拱桥在多车荷载作用下的动力响应分析

陈水生, 陈 潇, 赵 辉, 桂水荣

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘 要** 目的 研究钢箱系杆拱桥车桥耦合振动响应并分析多车荷载对该类型桥梁车桥耦合振动的影响。方法 以舍里甲大桥为工程背景, 基于 ANSYS 软件建立该桥的有限元模型, 并将 3 轴汽车简化为三维 9 自由度车辆模型; 结合模态综合法, 采用 Newmark- $\beta$  数值方法计算得到桥梁的位移及其动力放大系数。结果 车辆偏载对主梁竖向挠度冲击系数的影响较小; 多车荷载对桥梁动力响应具有较大影响, 主梁竖向挠度冲击系数随横向加载车辆数量的增加而减小, 横向双车、横向三车对比横向单车冲击系数分别减小 33.98% 和 43.32%; 随纵向加载车辆数量的增多出现较大波动, 纵向多车工况下冲击系数小于单车工况, 纵向双车、纵向三车的冲击系数分别比纵向单车减小 26.39% 和 18.06%; 两车开对比两车同向行驶的主梁挠度冲击系数减小了 51.40%; 桥梁部分构件的局部动力冲击系数大于桥梁整体动力冲击系数, 其中短吊杆的动力冲击系数相比于长吊杆增大 72.5%。结论 多车荷载作用下的主梁竖向挠度冲击系数均小于单车荷载作用, 按单车荷载作用下冲击系数计算汽车荷载效应是较为安全的。

**关键词** 钢箱系杆拱桥; 多车荷载; 车桥耦合振动; 冲击系数

中图分类号 TU279; U441.3

文献标志码 A

## Dynamic Response Analysis of Steel Box Tied-arch Bridge under Multi-vehicle Loading

CHEN Shuisheng, CHEN Xiao, ZHAO Hui, GUI Shuirong

(Department of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013)

**Abstract:** The purpose of this paper is to study the influence of multi-vehicle load on the vehicle bridge coupling vibration response of steel box tied arch bridge. Taking Shelijia bridge as the engineering background, the finite element model of the bridge was established based on ANSYS

收稿日期: 2020-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(12062006); 江西省自然科学基金项目(20181BAB206043, 20181BAB206041)

作者简介: 陈水生(1968—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事车桥耦合振动及控制方面研究。

software, and the 3-axis vehicle was simplified to a 3-D 9-DOF vehicle model. Combined with the mode synthesis method, Newmark- $\beta$  numerical method was used to calculate the displacement and dynamic amplification factor of the bridge. The impact factor of the vertical deflection of the main beam is less affected by the vehicle eccentric load; the dynamic response of the bridge is greatly affected by the multi-vehicle load. The impact factor of the vertical deflection of the main beam decreases with the increase in numbers of the transverse loading vehicles, the impact factor of two vehicle and three vehicle decreases by 33.98% and 43.32% respectively compared with that of single vehicle, and fluctuated with the increase in numbers of the longitudinal loading vehicles, the impact factor of longitudinal multi vehicle condition is smaller than that of single vehicle, and the impact factor of longitudinal two vehicle and longitudinal three vehicle is 26.39% and 18.06% lower than that of single vehicle. The deflection impact factor of the main beam with two cars opposite running is 51.40% lower than that of the main beam running in the same direction. The local dynamic impact factor of some components of the bridge is greater than the overall dynamic impact factor of the bridge, and the dynamic impact factor of the short hanger is 72.5% higher than that of long hanger. Conclusion: the impact factor of the vertical deflection of the main beam under multi-vehicle load is less than that of the single vehicle load. It is safe to calculate the vehicle load effect according to the impact factor under the single vehicle load.

**Key words:** steel box tied arch bridge; multi vehicle load; vehicle bridge coupling vibration; impact factor

钢箱系杆拱桥由于受力性能良好、造价较低、施工周期短等特点在我国大量修建。但是由于其结构自重较轻、刚度较小,因此桥梁动力问题较为突出。特别是下承式拱桥吊杆较长,桥梁整体性较差且活载占比较大,加上此类桥梁结构体系众多使其在车辆荷载作用下的振动机理变得更加复杂,故对该类型桥梁在车辆作用下的动力响应进行研究显得尤为重要。

目前,针对钢箱系杆拱桥计算方法和静力分析的研究较多<sup>[1-4]</sup>,较好地完善了钢箱系杆拱桥的力学理论;但对钢箱系杆拱桥车致振动的研究较少。许多学者已经对传统梁式桥的车桥耦合振动进行了较多的研究<sup>[5-7]</sup>。Huang Dongzhou<sup>[8-9]</sup>采用11自由度的车辆模型进行车桥耦合振动数值模拟,研究了跨度、矢跨比和车速对中承式拱桥冲击系数,及内力放大系数的影响。L. Paolo等<sup>[10]</sup>对铁路系杆拱桥展开研究,详细分析了桥梁结构刚度和移动列车荷载的质量、加速度对下承式系杆拱桥冲击系数的影响。He Xuhui等<sup>[11]</sup>研究了内斜角对大跨度钢箱提

篮拱桥动力性能影响。张耀等<sup>[12]</sup>利用ANSYS软件分析了车速、车重以及路面等级对钢管混凝土系杆拱桥在车辆荷载作用下的整体及局部部位动力响应的影 响。W. Charles等<sup>[13]</sup>通过数值模拟和现场实验,得到了下承式钢箱系杆拱桥的整体动力放大系数和不同构件的局部动力放大系数并进行对比分析。

但是,现有钢箱系杆拱桥的动力研究主要针对单车荷载作用下的振动响应,而对多车荷载作用下的钢箱系杆拱桥车桥耦合响应研究较少。基于此,笔者假定多车荷载由一组同类型、等间距的车辆构成,考虑桥梁阻尼、车辆偏载、车辆行驶方向和桥面不平顺的影响,研究钢箱系杆拱桥在多车荷载作用下的挠度冲击系数变化规律,为钢箱系杆拱桥的设计、维护、加固提供参考。

## 1 车桥耦合振动分析模型

### 1.1 车辆模型

车辆选用三轴货车,并简化为9自由度的弹簧-质量-阻尼体系计算模型,考虑车

体竖向振动、俯仰振动和侧翻振动及每个车轮的竖向振动,其简图如图1所示。图中车辆参数表示如下:前轮质量 $m_1 = m_2 = 297$  kg;中轮质量 $m_3 = m_4 = 466$  kg;后轮质量 $m_5 = m_6 = 466$  kg;车体质量 $m_{hb} = 30\,542$  kg;前轴悬架刚度 $k_{s1} = k_{s2} = 6.3 \times 10^5$  N/m;前轴车轮刚度 $k_{t1} = k_{t2} = 2.8 \times 10^6$  N/m;前轴悬架阻尼系数 $c_{s1} = c_{s2} = 2.73 \times 10^3$  N/m;前轴车轮阻尼系数 $c_{t1} = c_{t2} = 0$ ;中轴悬架刚度 $k_{s3} = k_{s4} = 7.9 \times 10^5$  N/m;中轴车轮刚度 $k_{t3} = k_{t4} = 3.39 \times 10^6$  N/m;中轴悬架阻尼系数 $c_{s3} = c_{s4} = 3.8 \times 10^3$  N/m;中轴车轮阻尼系数 $c_{t3} =$

$c_{t4} = 0$ ;后轴悬架刚度 $k_{s5} = k_{s6} = 7.9 \times 10^5$  N/m;后轴车轮刚度 $k_{t5} = k_{t6} = 3.39 \times 10^6$  N/m;后轴悬架阻尼系数 $c_{s5} = c_{s6} = 3.8 \times 10^3$  N/m;后轴车轮阻尼系数 $c_{t5} = c_{t6} = 0$ ;车体侧翻转动惯量 $I_r = 6\,893$  kg·m<sup>2</sup>;车体仰俯转动惯量 $I_{hp} = 55\,259$  kg·m<sup>2</sup>;车辆轴距 $B = 1.8$  m;前轴到车辆质心距离 $a = 3.4$  m;中轴到车辆质心距离 $b = 0.2$  m;后轴到车辆质心距离 $c = 1.4$  m; $\varphi$ 为侧倾角; $\theta_b$ 为仰俯角; $z_b$ 为车体竖向位移; $z_1 \sim z_6$ 为车辆悬架位移坐标。

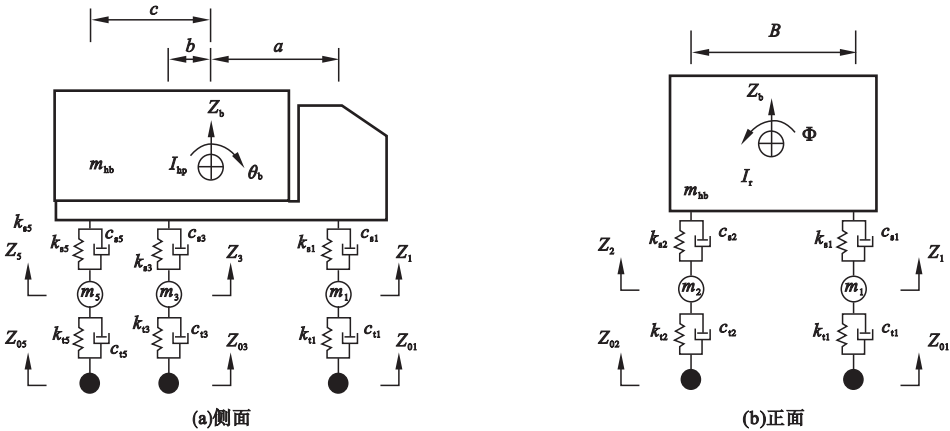


图1 车辆模型简图

Fig. 1 Vehicle model diagram

根据 D' Alembert 原理建立车辆运动方程

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

式中: $\mathbf{M}_v$ 为车辆系统的质量矩阵; $\mathbf{C}_v$ 为车辆系统的阻尼矩阵; $\mathbf{K}_v$ 为车辆系统的刚度矩阵; $\mathbf{Z} = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5 \ z_6 \ z_b \ \theta_b \ \varphi]$ 为车辆自由度列向量; $\mathbf{F}_v^{\text{int}}$ 为车辆振动引起的荷载向量。

1.2 桥梁模型

采用有限元分析方法,将桥梁结构离散其动方程可以写成<sup>[14]</sup>

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_b \mathbf{U} = -\mathbf{F}_v^{\text{int}} - \mathbf{F}_g. \quad (2)$$

式中: $\mathbf{M}_b$ 、 $\mathbf{C}_b$ 和 $\mathbf{K}_b$ 分别为桥梁结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{F}_v^{\text{int}}$ 为车辆振动

引起的荷载向量; $\mathbf{F}_g$ 为车辆自重产生的各车轮作用于桥面板的荷载向量; $\mathbf{U}$ 为桥梁节点位移向量。

采用模态综合法,取桥梁前 $r$ 阶模态使用 Rayleigh 阻尼并通过广义坐标离散,式(2)可以转换为

$$\mathbf{I} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{X} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Omega} \mathbf{q} = -\mathbf{\Phi}^T (\mathbf{F}_b^{\text{int}} + \mathbf{F}_g). \quad (3)$$

式中: $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix}_{r \times r}$ ;  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2\xi_r \omega_r \end{bmatrix}_{r \times r}$ ;

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \omega_r^2 \end{bmatrix}_{r \times r}; \mathbf{\Phi} \text{ 为桥梁 } r \text{ 阶模态向量矩}$$

阵; $q$  为桥梁模态的广义坐标矩阵。

1.3 桥面平整度数值模拟

桥面不平顺是平稳高斯随机过程<sup>[15-17]</sup>, 具有各态历经性,其不平顺高程的描述在国际上通常采用频域方法,用功率谱密度函数来表示。根据桥面不平顺的功率谱密度,采用三角级数叠加法可以得到桥面不平顺激励样本<sup>[18-19]</sup>,其表达式为

$$r(x) = \sum_{j=1}^m \sqrt{2G(n_j)} \sin(2\pi x n_j + \theta_j) . \quad (4)$$

式中: $x$  为车辆行驶方向位移; $m$  为空间频率的划分段数; $G(n_j)$  第  $j$  段空间频率中值所对应的频率谱密度; $n_j$  为第  $j$  段空间频率中值; $\theta_j$  为  $[0, 2\pi]$  上均匀分布的随机变量。

1.4 车桥耦合模型

假定车辆行驶过程中,始终与桥面保持接触,忽略车辆对桥梁的横向和纵向作用,考虑桥面平整度的影响,得到第  $i$  个车轮和桥梁间的相互作用力

$$F_{bv}^{int} = N_i (c_{ii} \Delta_i' + k_{ii} \Delta_i) . \quad (5)$$

式中: $\Delta_i = z_i - r_i - \bar{\omega}_i$  为第  $i$  个车轮与桥面的相对竖向位移; $z_i$  为第  $i$  个车轮的竖向位移; $r_i$  为第  $i$  个车轮处的桥面平整度值; $\bar{\omega}_i$  第  $i$  个车轮处桥面位移; $c_{ii}, k_{ii}$  为第  $i$  个车轮的阻尼和刚度; $N_i$  为第  $i$  个车轮所在单元的形函数。

根据车轮与桥面接触处的位移协调条件和作用力平衡条件,将式(1)、式(3)和式(5)联立,得到车桥耦合时变振动方程:

$$M(t)\ddot{\delta} + C(t)\dot{\delta} + K(t)\delta = F(x,t) . \quad (6)$$

式中: $M(t), C(t)$  和  $K(t)$  分别为广义质量、阻尼和刚度矩阵,并随车辆与桥面接触点位置的变化而变化; $F(x,t)$  为广义荷载矩阵;

$\delta = [q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_r \quad z_1 \quad z_2 \quad \cdots \quad z_b \quad \theta_b \quad \varphi]$  为桥梁前  $r$  阶模态的广义坐标和车辆系统各自由度组成的列阵。车桥耦合的时变系统方程较为复杂一般采用数值方法进行求解,故笔者采用 Newmark- $\beta$  法求解上

式中的时变系统方程。

2 下承式钢箱系杆拱桥车桥耦合响应分析

2.1 桥梁概况及有限元模型建立

舍里甲大桥为跨径 120 m 的下承式钢箱系杆拱桥,道路等级为城市快速路,设计时速 80 km/h,设计荷载为公路-I 级。主梁采用双箱单室钢箱梁,支座处中心梁高 3.5 m,跨中中心梁高 3.0 m,梁顶宽 33.5 m。功能布置为 3.0 m(吊索区)+0.5 m(防撞护栏)+12.25 m(机动车道)+0.5m(防撞护栏)+1.0 m(绿化带)+0.5m(防撞护栏)+12.25 m(机动车道)+0.5m(防撞护栏)+3.0 m(吊索区)。主拱线型采用二次抛物线,其方程为  $y = 180x(120 - x)/120^2$ ,矢高 27 m,矢跨比为 1/4.44,主拱采用钢箱拱,截面尺寸为 2.1×2.75 m;两樨拱肋之间共设 3 道风撑,均采用一字撑。吊杆采用顺桥向单吊杆体系;顺桥向间距 4 m,横桥向间距为 30.5 m,全桥共设 27 组吊杆。在主跨钢梁内、拱脚处布置有 8 组用于平衡拱脚水平推力的系杆,系杆均采用环氧喷涂集束钢绞线形式每个拱侧各有 4 组,每组 37 根钢绞线。桥梁立面图如图 2 所示,主梁横断面及行车道布置如图 3 所示。

采用有限元软件 ANSYS 建立桥梁有限元模型,主梁钢混结合段及拱脚混凝土采用空间实体单元 SOLID65 模拟,钢箱主梁、拱肋、横撑均采用板壳单元 SHELL63 模拟,系杆和吊杆采用空间杆单 LINK10 模拟,桥面板用实体单元 SOLID65 模拟;桥梁有限元模型如图 4 所示。为使桥梁在纵桥向和横桥向均可自由变形,全桥设置 6 个支座,分别为:1 个固定支座设置在黄家湖立交向桥梁中心线处,3 个单向支座分别设置在黄家湖立交向拱脚处和昌航立交向桥梁中心线处,2 个双向支座设置在昌航立交向拱脚处。

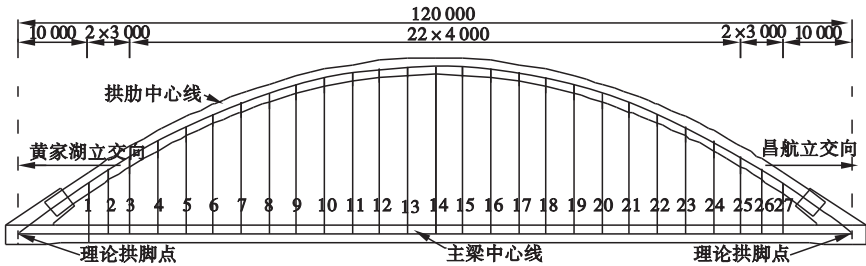


图 2 桥梁立面图

Fig. 2 Elevation of the bridge

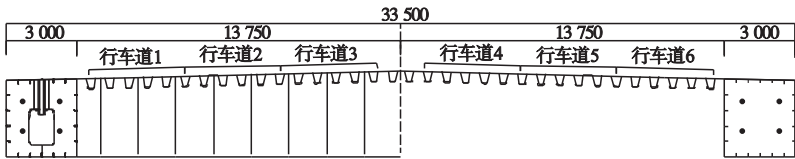


图 3 主梁横截面及行车道布置示意图

Fig. 3 Cross section carriageway of the main beam

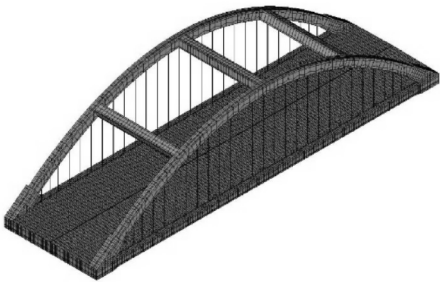


图 4 桥梁有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the bridge

2.2 车辆偏载的影响

为了研究车辆偏载对钢箱系杆拱桥车致振动的影响,设计三种工况进行对比分析。工况 1:车辆荷载布载于 3、4 行车道;工况 2:车辆荷载布载于 2、3 行车道;工况 3:车辆荷载布载于 1、2 行车道。车道纵向加载车辆数均为 1 辆,车辆均加载于车道中心线上,车速取 0~30 m/s,并以 2 m/s 的速度递增,桥梁结构阻尼比为 0.02,桥面路况等级为 A 级。

不同车辆偏载工况,桥梁跨中挠度的最大值见表 1,跨中挠度冲击系数最大值见表 2。分析表 1 和表 2 中 3 种不同荷载工况桥梁动力响应,可知随着车辆荷载偏心距的增加,主梁跨中竖向挠度最大值显著增加,但主梁跨中挠度冲击系数却逐渐减小。

表 1 车辆偏载对跨中挠度的影响

位置	最大挠度/mm		
	工况 1	工况 2	工况 3
桥面板	3.451	4.268	4.714
底板中心	3.573	4.275	4.811

表 2 车辆偏载对跨中挠度最大冲击系数的影响

位置	最大挠度冲击系数		
	工况 1	工况 2	工况 3
桥面板	0.052	0.048	0.047
底板中心	0.053	0.049	0.048

图 5 和图 6 给出了不同车辆偏载工况,行车速度对桥梁跨中挠度和跨中挠度冲击系数的影响。由图 5 可知:不同的车辆偏载工况,主梁跨中截面挠度随车速的变化规律相似;当车速为 0~14 m/s 时主梁挠度最大值随车速的增加而递增,并在速度为 14 m/s 时达到一个峰值,当车速为 15~30 m/s 时主梁挠度最大值出现上下波动。同一行车速度,桥面板挠度随车辆偏心距的增加而增大,工况 2、工况 3 比工况 1 挠度最大值分别增大了 19.65% 和 34.35%。



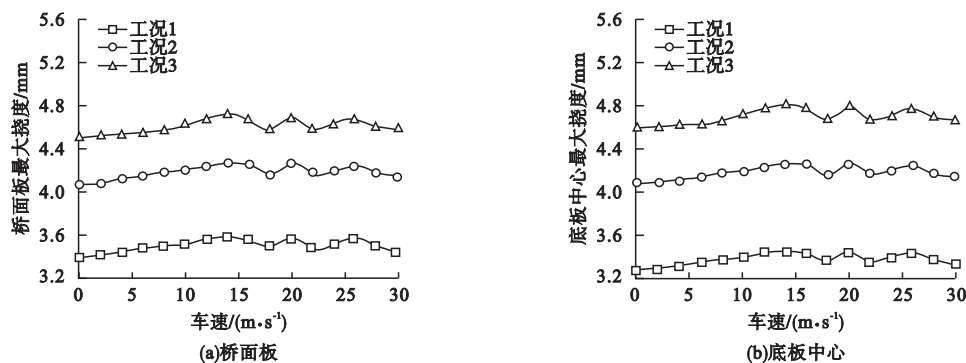


图 5 车辆偏载对跨中挠度的影响

Fig. 5 The influence of vehicle eccentric load on mid span deflection

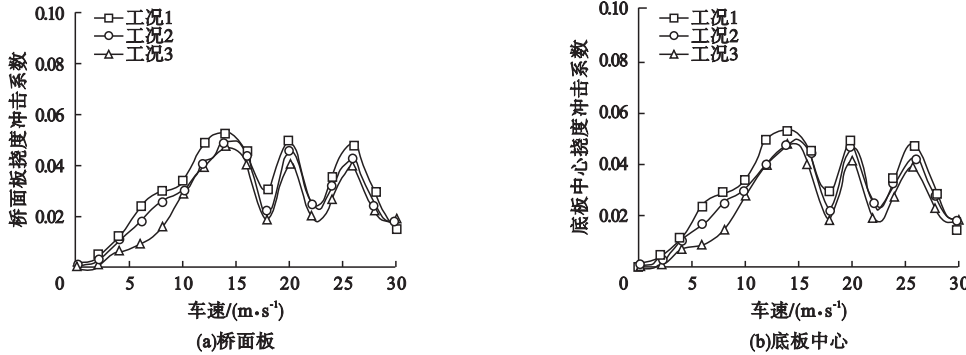


图 6 车辆偏载对跨中挠度最大冲击系数的影响

Fig. 6 The influence of vehicle eccentric load on maximum impact factor of midspan deflection

由图 6 可知,工况 1、工况 2、工况 3 主梁跨中截面挠度冲击系数随车速的变化规律大致相同;当车速为 0 ~ 14 m/s 时主梁跨中挠度冲击系数随车速递增,并在车速为 14 m/s 时达到峰值,当车速为 14 ~ 30 m/s 时挠度冲击系数随车速的增加出现上下波动。主梁跨中挠度冲击系数随车辆荷载偏心距的增加而减小,工况 2 和工况 3 比工况 1 冲击系数最大值分别减小 7.69% 和 9.62%。将主梁挠度和主梁挠度冲击系数二者结合起来分析,车辆荷载偏心距最大时虽然其冲击系数稍有降低但结构挠度更大,故车辆偏载对主梁竖向挠度冲击系数的影响较小。

此外,冲击系数并不随车速的增大而单调递增或递减;因此,在桥梁设计时应采用设计车速范围内的最大冲击系数来计算汽车荷载的冲击效应。且在设计车速范围内,相同车速条件下箱梁底板中心处挠度及其冲击

系数均稍大于正交异性钢桥面板处,其差值分别为 3.79% 和 5.88%。因此笔者选取主梁跨中底板中心处进行车致振动响应分析。

2.3 横向车辆数量的影响

为了研究横向车辆数量对钢箱系杆拱桥车致振动的影响,设计三种工况进行对比分析。工况 4:横向单车,车辆布载于行车道 1;工况 5:横向三车,车辆布载于行车道 1、2、3;及 2.2 节中工况 3,车辆布载于行车道 1、2;车辆均加载于车道中心线上,车速取 0 ~ 30 m/s,并以 2 m/s 的速度递增,桥梁结构阻尼比为 0.02,桥面路况等级为 A 级。

不同横向加载车辆数量,跨中挠度冲击系数最大值如表 3 所示。分析表 3 中 3 种不同横向加载车辆数量,桥梁动力响应可知,随着横向加载车辆数量的增加主梁跨中的挠度最大冲击系数变化较大。

表 3 横向加载车辆数量对挠度最大冲击系数的影响

位置	最大冲击系数		
	工况 4	工况 3	工况 5
桥面板	0.073	0.047	0.041
底板中心	0.072	0.048	0.041

不同横向加载车辆数量,跨中挠度冲击系数随车速的变化规律如图 7 所示。从图 7 可知:工况 3、工况 4、工况 5 跨中挠度冲击系数随车速的变化规律大致相同;且随着横向加载车辆数量的增加,主梁挠度冲击系数减小,工况 3(横向双车)和工况 5(横向三车)较工况 4(纵向单车)冲击系数分别减小 33.98% 和 43.32%。

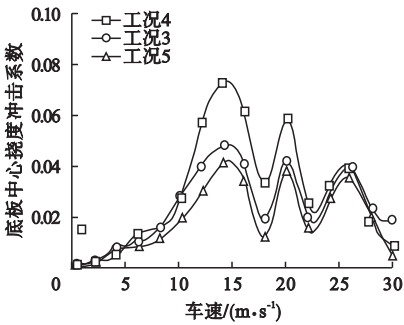


图 7 横向加载车辆数量对主梁跨中挠度最大冲击系数的影响

Fig. 7 The influence of lateral loading vehicles on the maximum impact factor of span deflection

## 2.4 纵向车辆数量的影响

为了研究纵向车辆数量对钢箱系杆拱桥车致振动的影响,设计三种工况进行对比分析。工况 6:纵向双车,车辆布载于行车道 1、纵向车辆数为 2;工况 7:纵向三车,车辆布载于行车道 1、纵向车辆数为 3;及 2.3 节中工况 4,车辆布载于行车道 1、纵向车辆数为 1。车辆间距取  $d = 5\text{ m}$ ,车辆均加载于车道中心线上;车速取  $0 \sim 30\text{ m/s}$ ,并以  $2\text{ m/s}$  的速度递增;桥梁结构阻尼比为 0.02;桥面路况等级为 A 级。

不同纵向加载车辆数量,桥梁跨中挠度冲击系数最大值见表 4。分析表 4 中 3 种不同荷载工况,桥梁动力响应可知:纵向加载车辆数

量对主梁跨中挠度冲击系数有很大影响,纵向多车工况(工况 6、工况 7)相较于纵向单车工况(工况 4)冲击系数显著降低。其中纵向双车(工况 6)和纵向三车(工况 7)的最大冲击系数分别比纵向单车降低 26.39% 和 18.06%。

表 4 纵向加载车辆数量对跨中挠度最大冲击系数的影响

位置	最大冲击系数		
	工况 4	工况 6	工况 7
桥面板	0.073	0.057	0.060
底板中心	0.072	0.053	0.059

图 8 为纵向加载车辆数量对跨中挠度冲击系数的影响。由图 8 可知:当车速为  $0 \sim 16\text{ m/s}$  时,单车工况的冲击系数大于其他两种工况;车速为  $18 \sim 30\text{ m/s}$  时,纵向三车和纵向双车工况的挠度冲击系数围绕单车工况挠度冲击系数曲线上下波动。当速度为  $18\text{ m/s}$  时和  $22\text{ m/s}$  时纵向双车工况下的冲击系数最大; $30\text{ m/s}$  时纵向三车工况下的冲击系数最大;其他车速条件下均为单车工况下的冲击系数最大。此外,由于纵向多排车辆在桥梁不同位置产生振动,这种振动是不同步的,桥梁振动响应会因为相互叠加而不同;所以纵向多车工况下的冲击系数随速度的变化关系与单车工况有所不同,且随纵向加载车辆数量的增多主梁竖向挠度冲击系数波动较大。

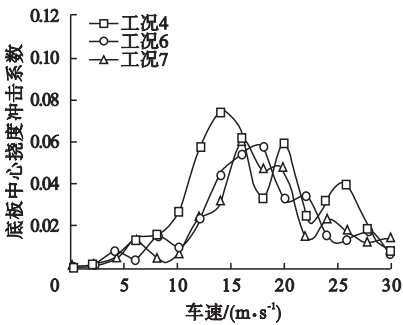


图 8 纵向加载车辆数量对跨中挠度最大冲击系数的影响

Fig. 8 The influence of longitudinally loading vehicles on the maximum impact factor of span deflection

2.5 车辆行驶方向的影响

为了研究车辆行驶方向对钢箱系杆拱桥车致振动的影响,设计三种工况进行对比分析。工况 8:车辆布载于 3、4 行车道,两车对开;2.2 节中工况 1,车辆荷载布载于 3、4 行车道,两车同向行驶;2.3 节中工况 4,车辆布载于行车道 1。车辆均加载于车道中心线上;车速取 0~30 m/s,并以 2 m/s 的速度递增;桥梁结构阻尼比为 0.02;桥面路况等级为 A 级。

不同加载工况,桥梁跨中挠度冲击系数最大值见表 5。分析表 5 中 3 种不同荷载工况下桥梁动力响应可知,随着车辆行驶方向的改变主梁跨中的挠度最大冲击系数减小。

表 5 车辆行驶方向对跨中挠度最大冲击系数的影响  
Table 5 Influence of vehicles direction on maximum impact factor of midspan deflection

位置	最大挠度冲击系数		
	工况 4	工况 1	工况 8
桥面板	0.073	0.052	0.026
底板中心	0.072	0.053	0.025

图 9 为车辆不同行驶方向对跨中挠度冲击系数的影响。由图 9 可知:不同的荷载工况,主梁跨中截面挠度冲击系数随车速的变化规律相似;当车速为 0~4 m/s 和 30 m/s 时,双车对开工况的冲击系数大于其他两种工况;车速为 8~28 m/s 时,两车对开工况主梁冲击系数小于两车相向行驶工况(工况 8)和单车工况(工况 4);双车对开工况冲击系数最大值比两车同向行驶工况和单车工况分别减小了 52.83% 和 65.28%。

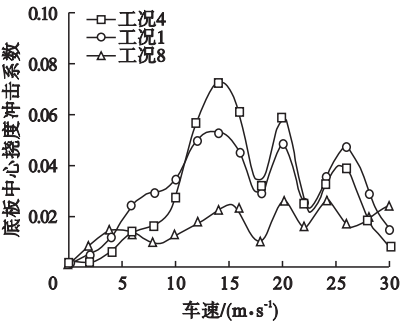


图 9 车辆行驶方向对跨中挠度最大冲击系数的影响  
Fig. 9 The influence of vehicle direction on maximum impact factor of spande flection

2.6 桥面平整度的影响

为了研究桥面平整度对钢箱系杆拱桥车致振动的影响,选取 2.2 节中横向单车工况;桥面平整度取光滑路面、A 级路面、B 级路面、C 级路面四个等级,车辆加载于车道中心线上;车速取 0~30 m/s,并以 2 m/s 的速度递增;桥梁结构阻尼比为 0.02。

图 10 为不同路面等级条件的主梁跨中挠度冲击系数曲线。由图 10 可知:随桥面路况等级的降低主梁跨中挠度冲击系数显著增大;与光滑路面时的挠度冲击系数相比,A 级、B 级、C 级路面冲击系数分别增大 3.781 倍、4.307 倍、5.770 倍,说明桥面平整度对主梁的冲击效应有较大影响,因此在桥梁后期运营过程中应注意加强桥面的维护和保养。

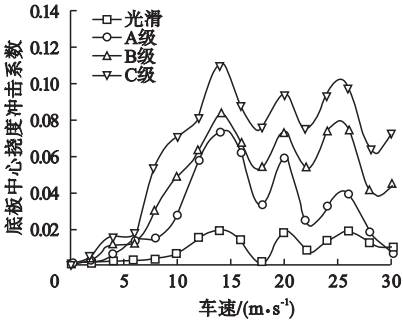


图 10 不同路面等级条件下主梁跨中挠度冲击系数随车速变化曲线

Fig. 10 The impact factor of midspan deflection of main girder with vehicle speed under different pavement grades

2.7 桥梁结构局部振动响应分析

通常在进行桥梁设计时规范所给出的车辆荷载冲击系数为桥梁整体冲击系数,它被应用于桥梁结构所有构件的设计。但就桥梁结构而言,其不同构件受到来自车辆荷载的冲击效应并不相同。若将桥梁结构中某一构件所受到的动力冲击效应称为“局部冲击”,则所对应的动力放大系数即为局部动力放大系数。

为了研究钢箱系杆拱桥在移动车辆荷载作用下的局部振动响应,选取 2.3 节中的单车工况(工况 4),车辆沿行车道 1 车道中心线行驶;车速取 0~30 m/s,并以 2 m/s 的速



度递增;桥梁结构阻尼比为 0.02;桥面路况等级为 A 级。选取桥梁的 2 号吊杆(短吊杆)、14 号吊杆(长吊杆)及拱肋拱顶截面进

行内力响应分析。  
图 11 为单车荷载工况下桥梁部分构件内力冲击系数。

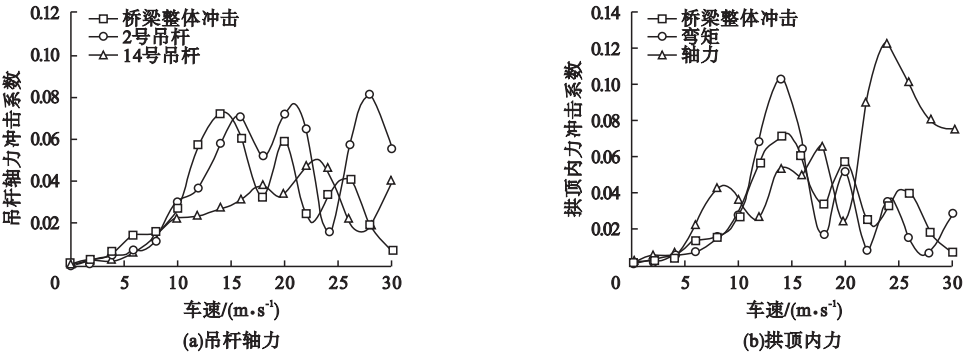


图 11 桥梁部分构件内力冲击系数

Fig. 11 Internal force impact factor of some bridge components

由图 11 可知:2 号吊杆(短吊杆)轴力最大冲击系数及拱肋拱顶截面轴力、弯矩最大冲击系数均大于桥梁的整体最大冲击系数,其中 2 号吊杆(短吊杆)轴力最大冲击系数与桥梁整体冲击系数的差值为 13.88%;拱肋拱顶截面轴力、弯矩最大冲击系数与桥梁整体冲击系数的差值分别为 71.12% 和 43.69%。拱肋轴力和弯矩最大冲击系数相差较大,其差值为 19.42%;短吊杆的冲击效应大于长吊杆,其冲击系数比长吊杆增大 72.5%。因此,仅以一个整体冲击系数来体现车辆荷载对桥梁结构不同构件的动力冲击效应是不合理的,应根据设计需要和不同的研究对象选用相对应的局部冲击系数。

3 结 论

- (1)车速对下承式钢箱系杆拱桥的车辆冲击效应有重大影响,但是冲击系数并不随车速的增大而单调递增或递减。因此,在桥梁设计时宜采用设计车速范围内的最大冲击系数来计算其冲击效应。
- (2)横向多车对下承式钢箱系杆拱桥的动力响应具有较大影响;不同的横向加载车辆数量,主梁挠度冲击系数随车速的变化规律相同;但随着横向加载车辆数量的增加,冲

- 击系数最大值减小。
- (3)纵向加载车辆数量对下承式钢箱系杆拱桥的动力响应具有很大影响;多车工况下冲击系数最大值小于单车工况,随加载车辆数量增多冲击系数出现较大波动。
- (4)车辆行驶方向对下承式钢箱系杆拱桥的动力响应具有很大影响;两车对开相较于横向单车和两车同向,其冲击系数最大值显著减小。
- (5)桥面平整度对下承式钢箱系杆拱桥的冲击效应具有重大影响,因此在桥梁后期运营过程中应注意加强桥面的维护和保养。
- (6)下承式钢箱系杆拱桥的部分构件的动力冲击系数大于桥梁整体动力冲击系数,其中短吊杆的动力冲击系数大于长吊杆。

参考文献

[ 1 ] 黄帅. 下承式钢箱拱肋系杆拱桥受力性能研究[D]. 西安:长安大学,2010.  
(HUANG Shuai. Research on mechanical behavior of through steel box arch ribs tied arch bridge [D]. Xi'an:Chang'an University,2010. )  
[ 2 ] TAN Yonggang, YAO Yuanbin. Optimization of hanger arrangement in pedestrian tied arch bridge with sparse hanger system [J]. Advances in structural engineering, 2019, 22 (12):2094-2604.  
[ 3 ] WU Wenqing, WANG Hao, ZHU Yanjie. New hanger design approach of tied-arch bridge to

- enhance its robustness [J]. Journal of civil engineering. 2018, 22(11): 4547-4554.
- [4] 孟杰. 系杆拱桥结构体系研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2002.  
(MENG Jie. Research on tied arch bridge structure system [D]. Changsha: Hu'nan University, 2002.)
- [5] PAGNONCELLI A P, MIGUEL L F F. Methodology to obtain dynamic response of road bridges considering bridge-vehicle interactions. [J] Practice periodical on structural design and construction, 2019, 24(3): 04019010.
- [6] 邓露, 何维, 俞扬. 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 Lu, HE Wei, YU Yang. Research progress in theory and applications of highway vehicle-bridge coupling vibration [J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(7): 38-54.)
- [7] 陈水生, 罗浩, 桂水荣. 曲率半径对连续曲线梁桥车桥耦合振动的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 290-298.  
(CHEN Shuisheng, LUO Hao, GUI Shuirong. Effect of curve radius on vehicle-bridge coupled vibration of continuous curved girder bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(2): 290-298.)
- [8] HUANG Dongzhou. Dynamic and impact behavior of half-through arch bridges [J]. Journal of bridge engineering, 2005, 10(2): 133-141.
- [9] HUANG Dongzhou. Vehicle-induced vibration of steel deck arch vridges and analytical methodology [J]. Journal of bridge engineering, 2012, 17(2): 241-248.
- [10] PAOLO L, ARTURO P, ALESSANDRO D. Dynamic behavior of tied-arch bridges under the action of moving loads [J]. Mathematical problems in engineering, 2016, 2016: 2749720-2749736.
- [11] HE Xuhui, WEI Biao, ZOU Yunfeng, et al. Dynamic characteristics and seismic response analysis of a long-span steel-box basket-handle railway arch bridge [J]. Journal of vibroengineering, 2015, 17(5): 1392-8716.
- [12] 张耀, 孙增寿. 基于车桥耦合振动的钢管混凝土系杆拱桥动力响应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(1): 103-110.  
(ZHANG Yao, SUN Zengshou. Analysis of concrete-filled steel tubular tied-arch bridge under travelling vehicles [J]. Journal of railway science and engineering, 2016, 13(1): 103-110.)
- [13] CHARLES W, ROEDER C, MACRAE P C. Dynamic response and fatigue of steel tied-arch bridge [J]. Journal of bridge engineering, 2000, 5(1): 14-21.
- [14] 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.  
(GUI Shuirong, CHEN Shuisheng, WAN Shui. Analysis of consistent stimulus of road roughness on vehicle-bridge coupling nonstateonary random vibrations [J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2018, 38(5): 908-915.)
- [15] DENG Lu, WANG Fang, HE Wei. Dynamic impact factors for simply-supported bridges due to vehicle braking [J]. Advances in structural engineering, 2015, 18(6): 791-801.
- [16] 陈宝春, 陈康明, 赵秋. 中国钢拱桥发展现状调查与分析[J]. 中外公路, 2011(2): 121-127.  
(CHEN Baochun, CHEN Kangming, ZHAO Qiu. Investigation and analysis on the development of steel arch bridge in China [J]. Journal of China foreign highway, 2011(2): 121-127.)
- [17] 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.)
- [18] 陈水生, 赵辉, 李锦华, 等. 车桥耦合振动的非平稳桥面激励的模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 290-298.  
(CHEN Shuisheng, ZHAO Hui, LI Jinhua, et al. Simulation of nonstationary bridge deck excitation of vehicle-bridge coupling vibration [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(5): 808-818.)
- [19] 陈水生. 公路车桥耦合振动响应计算方法对比研究[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(3): 18-25.  
(CHEN Shuisheng. Comparative research on the calculating methods for coupling highway vehicle-bridge system [J]. Journal of east China jiaotong university, 2011, 28(3): 18-25.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)