

文章编号:1671-1637(2012)06-0020-09

## 双层公路钢桁梁桥车桥耦合振动

刘永健<sup>1</sup>, 刘世忠<sup>1,2</sup>, 米静<sup>1</sup>, 程高<sup>1</sup>

(1. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 太原科技大学 交通与物流学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**为研究车桥耦合振动对双层公路钢桁梁桥冲击效应的影响,基于分离法,以车轮与桥面接触点为界,将车桥耦合振动系统分为车辆与桥梁2个子系统,分别采用虚功原理与有限元法建立各自的运动方程,并通过车轮与桥面接触处的位移协调条件及车桥相互作用力的平衡关系相联系,采用迭代法求解系统响应。以某双层公路简支钢桁梁桥为研究对象,应用ANSYS软件建立三维梁格有限元模型,分析了车速、桥梁阻尼、桥面平整度及不同加载模式对车桥耦合振动的影响。研究表明:车速与双层钢桁梁桥冲击系数之间没有规律性的函数关系;桥梁阻尼增大,能使钢桁梁桥杆件内力、位移冲击系数适当降低;桥面平整度是车桥耦合振动的一个重要激励,桥面状况越差则车辆振动越强烈,对桥梁的整体和局部产生的冲击作用越大;单双层加载模式的不同对桥梁整体的动力响应改变不大,但是对局部动力响应的影响比较明显,应在桥梁设计时考虑局部冲击效应的影响。

**关键词:**桥梁工程;双层公路钢桁梁桥;分离法;冲击效应;车桥耦合振动;数值模拟;冲击系数

**中图分类号:**U441.3 **文献标志码:**A

### Vehicle-bridge coupled vibration of highway double-deck steel truss bridge

LIU Yong-jian<sup>1</sup>, LIU Shi-zhong<sup>1,2</sup>, MI Jing<sup>1</sup>, CHENG Gao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064,

Shaanxi, China; 2. School of Transportation and Logistics Engineering, Taiyuan University of

Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** In order to study the impact effect of vehicle-bridge coupled vibration on highway double-deck steel truss bridge, contact point between wheel and bridge surface was regarded as fringe, vehicle-bridge coupled vibration system was divided into vehicle subsystem and bridge subsystem based on separation method. The motion equations of vehicle subsystem and bridge subsystem were established respectively by using virtual work principle and finite element method. Vehicle subsystem was connected with bridge subsystem through displacement coordination condition and the balance relation of vehicle-bridge interaction at contact point between wheel and bridge surface, and system response was obtained by using iterative method. A highway double-deck simply-supported steel truss bridge was taken as study case, 3D beam grillage finite element model was established by using ANSYS software, and the influences of vehicle speed, bridge damping, bridge surface roughness and different loading modes on vehicle-bridge coupled vibration were studied. Analysis result indicates that there is not very regular

收稿日期:2012-08-02

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090205110002);国家自然科学基金项目(51178051)

作者简介:刘永健(1966-),男,江西玉山人,长安大学教授,工学博士,从事钢桥与组合结构桥梁理论及应用研究。

function relation between vehicle speed and the impact factor of highway double-deck steel truss bridge. The impact factors of internal force and displacement for all bars become smaller with the increase of bridge damping. Bridge surface roughness is an important incentive for vehicle-bridge coupled vibration, poor bridge surface can make vehicle vibration more intense, and can induce greater impact effect on the whole and part of bridge. When loading modes of single layer and double-layer are different, the whole dynamic responses of bridge change little, the local dynamic responses of bridge are more obvious, so local impact effect should be considered in the design of bridge. 4 tabs, 7 figs, 21 refs.

**Key words:** bridge engineering; highway double-deck steel truss bridge; separation method; impact effect; vehicle-bridge coupled vibration; numerical simulation; impact factor

**Author resume:** LIU Yong-jian(1966-), male, professor, PhD, +86-29-82334577, steellyj@126.com.

## 0 引 言

随着中国经济的增长和社会的发展,对交通基础设施建设的需求快速增加,与此同时,公路桥梁建设所受的限制条件日趋复杂,为此大量新型结构形式、新技术不断涌现。双层钢桁梁桥占地面积小,可以充分发挥桥位之利,通行能力大,能有效地缓解交通压力,将逐渐成为我国公路钢桁桥的一种发展趋势<sup>[1-2]</sup>。双层钢桁桥在力学行为上表现为空间性强,受力复杂,而且由于车道多,使得上下层各杆件的动力响应极为复杂,动力耦合效应也更为明显。在长期运营后,由于桥面平整度持续变差,车辆自身振动越加剧烈,将会使桥梁结构产生更大的动力响应,桥梁结构的安全性及使用寿命都将面临更为严峻的挑战,已成为桥梁设计与运营阶段必须加以考虑和解决的问题<sup>[3-5]</sup>。

对公路桥车桥耦合振动最早的研究可追溯至 19 世纪末法国工程师 Deslandres 对巴黎附近 Pontoise 桥所做荷载动力试验<sup>[6]</sup>,此后国内外学者对公路桥车桥耦合振动问题进行了大量深入研究,已取得了丰富的成果。Kawatani 等采用 2 轴汽车模型研究了一座简支梁桥的非平稳随机振动<sup>[7]</sup>;Wang 等将桥梁模拟为平面杆件系统,汽车模拟为 7 自由度的 3 轴车辆模型,并考虑车辆悬挂系统的非线性,运用振型叠加法求解了一大跨公路斜拉桥的车桥耦合作用<sup>[8]</sup>;Chatterjee 等把桥梁理想化为正交各向异性板和集中质量分布模拟的梁,分析了车辆刹车对桥梁动力性能的影响<sup>[9]</sup>;Zheng 等应用修正的振动梁函数法对多跨连续梁桥车振问题进行了理论分析<sup>[10]</sup>;沈火明等应用达朗伯原理推导了二分之一车辆模型作用下简支梁桥车桥耦合振动方程,结合 Ruge-Kutta 法对车桥耦合问题进行数值求解<sup>[11]</sup>;严

志刚等运用有限元法,通过能量谱密度函数研究了桥面平整度对大跨度钢管混凝土拱桥的车桥耦合振动响应<sup>[12]</sup>;丁南宏等采用功率谱密度函数生成随机路面不平整样本,研究了车辆行驶速度和桥面平整度对连拱桥冲击系数的影响<sup>[13]</sup>;王达等基于分离迭代法,通过自编程序分析了随机车流特性、桥面平整度及桥梁结构参数变化对双曲拱桥车桥相互作用的影响<sup>[14]</sup>。然而以往的研究仅限于单层公路桥的车桥耦合振动问题,关于双层公路钢桁梁桥车桥耦合振动的研究尚未见报道。此外,现行规范关于桥梁结构冲击系数计算方法对于双层桥梁是否适用还有待进一步地研究论证,因此,开展双层公路桥车桥耦合振动冲击效应的研究具有重要的理论价值与工程实际意义。

本文将车桥耦合系统分为车辆与桥梁 2 个子系统,通过车轮与桥面接触处的位移协调条件及车桥相互作用力的平衡关系相联系,结合 ANSYS 软件瞬态动力分析功能,利用 APDL 语言自编程序实现了车桥耦合振动响应的数值计算,并与沈火明等研究结果进行对比<sup>[11]</sup>,验证了此方法的正确性与有效性。结合一双层公路简支钢桁梁桥,应用 ANSYS 软件建立空间梁格有限元模型,系统地研究了车速、桥梁阻尼、桥面平整度及不同加载模式对双层钢桁梁桥车桥耦合振动的影响规律。

## 1 车桥耦合振动分析原理

目前,求解车桥耦合振动响应常用方法可分为 2 大类:一类是把车辆与桥梁作为一个整体系统,将车辆与桥梁的所有自由度耦联,建立统一的控制方程组,采用直接积分法进行同步求解,但仅限于简单桥梁;另一类是基于分离法,将车桥系统分为车辆与桥梁 2 个子系统,分别建立车辆与桥梁的运动方程,

两者之间通过轮桥接触处的位移协调条件与相互作用力的平衡关系相联系,采用迭代法求解系统响应,适合复杂结构体系桥梁与多自由度车辆模型的车桥耦合振动分析。后者耦合作用机理明确,求解思路清晰,便于计算程序的编制<sup>[6]</sup>,因此,本文采用其基本原理并结合 ANSYS 软件实现了公路桥车桥耦合振动响应分析。

### 1.1 车辆模型及其运动方程

车桥耦合分析过程中,车辆模型的选取应以既能体现车辆系统的振动特性而又不增加计算难度为原则。二分之一车辆模型不仅可以很好地考虑前后轴之间的耦合关系,比较真实地反映出车辆的振动规律,而且系统自由度也不多,计算简便。

图 1 为两系弹簧-阻尼-质量系统的 4 自由度半车模型,分别将车身、悬架及车轮视为刚体,刚体之间通过弹性与阻尼元件连接。图 1 中: $M$  为车体质量; $I_a$  为车体绕横轴的转动惯量,即车体点头刚度; $Z$  为车体的竖向位移; $\alpha$  为车体绕横轴的转角位移; $L_u$  为车体前后轴之间距离; $m_1$ 、 $m_2$  分别为前后悬挂系统质量与轮对质量之和; $z_1$ 、 $z_2$  分别为前后轮对的竖向位移; $k_{si}$ 、 $k_{ti}$  ( $i=1,2$ ) 分别为上下层前后悬挂系统垂向刚度系数; $c_{si}$ 、 $c_{ti}$  分别为上下层前后悬挂系统垂向阻尼系数; $z'_1$ 、 $z'_2$  分别为支承车体点的自由度(竖向位移); $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为前后轴至车辆重心距离与车辆轴距之比。

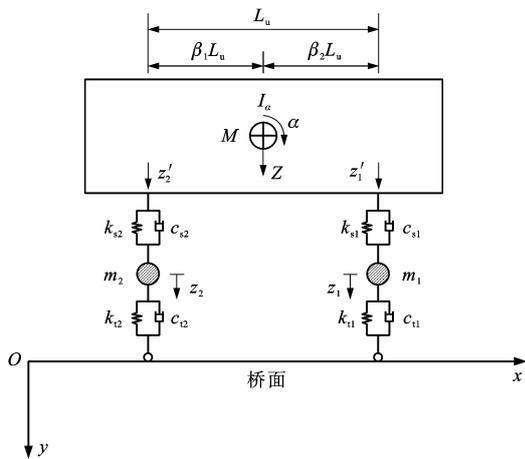


图 1 四自由度半车模型

Fig. 1 1/2 vehicle model with four freedoms

按图 1 中定义坐标系,取车辆系统弹簧的自然平衡位置为坐标起点,由车体位移几何关系可得

$$\begin{cases} Z = \beta_1 z'_2 + \beta_2 z'_1 \\ \alpha = (z'_1 - z'_2)/L_u \end{cases} \quad (1)$$

待求的车辆位移向量为

$$\mathbf{Z}_v = (z_1, z_2, z'_1, z'_2)^T$$

车辆模型所承受的力包括:重力( $Mg$ 、 $m_i g$ )、惯性力( $M\ddot{Z}$ 、 $I_a \ddot{\alpha}$ 、 $m_i \ddot{z}_i$ )、下层悬挂系轮胎力  $F_{ti}$  和上层悬挂系悬置力  $F_{si}$ 。对悬挂系统进行受力分析得

$$\begin{cases} F_{si} = k_{si}(z'_i - z_i) + c_{si}(\dot{z}'_i - \dot{z}_i) \\ F_{ti} = k_{ti}(z_i - y_i) + c_{ti}(\dot{z}_i - \dot{y}_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $y_i$  ( $i=1,2$ ) 为车辆前后轮与桥梁接触位置处桥梁位移。

依据虚功原理,引入车辆虚位移  $\delta z_i$ 、 $\delta z'_i$  与桥梁虚位移  $\delta y_i$  (相对车辆假设为 0),可推出车辆模型的运动方程为

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Z}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Z}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{Z}_v = \mathbf{G}_v + \mathbf{F}_{vb} \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M\beta_2^2 + I_a/L_u^2 & M\beta_1\beta_2 - I_a/L_u^2 \\ 0 & 0 & M\beta_1\beta_2 - I_a/L_u^2 & M\beta_1^2 + I_a/L_u^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} c_{s1} + c_{t1} & 0 & -c_{s1} & 0 \\ 0 & c_{s2} + c_{t2} & 0 & -c_{s2} \\ -c_{s1} & 0 & c_{s1} & 0 \\ 0 & -c_{s2} & 0 & c_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} k_{s1} + k_{t1} & 0 & -k_{s1} & 0 \\ 0 & k_{s2} + k_{t2} & 0 & -k_{s2} \\ -k_{s1} & 0 & k_{s1} & 0 \\ 0 & -k_{s2} & 0 & k_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{vb} = (k_{t1} y_1 + c_{t1} \dot{y}_1, k_{t2} y_2 + c_{t2} \dot{y}_2, 0, 0)^T$$

$$\mathbf{G}_v = (m_1 g, m_2 g, Mg\beta_2, Mg\beta_1)^T$$

式中: $\mathbf{M}_v$  为车辆质量矩阵; $\mathbf{C}_v$  为车辆阻尼矩阵; $\mathbf{K}_v$  为车辆刚度矩阵; $\mathbf{G}_v$  为车辆重力荷载向量; $\mathbf{F}_{vb}$  为车桥接触处的瞬时耦合力向量。

### 1.2 桥梁运动方程

车桥耦合振动分析中桥梁结构形式是多种多样的,涵盖了梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥等全部桥型。应用有限元软件可以建立各种桥型的三维梁格有限元模型(将桥面系等效为梁格体系),进而形成桥梁整体动力平衡方程。桥梁结构的运动方程<sup>[15]</sup>可统一写为

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{Y}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{Y}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{Y}_b = \mathbf{F}_{bg} + \mathbf{F}_{bv} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{M}_b$  为桥梁质量矩阵; $\mathbf{C}_b$  为桥梁阻尼矩阵; $\mathbf{K}_b$  为桥梁刚度矩阵; $\mathbf{Y}_b$  为桥梁节点的位移向量; $\mathbf{F}_{bg}$  为作用于桥梁上与车桥耦合无关的荷载列向量; $\mathbf{F}_{bv}$  为作用于桥梁节点上的车轮力列向量,与  $\mathbf{F}_{vb}$  互为作用力与反作用力。

### 1.3 桥面平整度及其模拟

桥面的凹凸使实际桥面偏离绝对理论基准面,致使线形不平整。不平整的桥面会使车辆振动加剧,是影响车桥耦合振动的关键因素之一。大量研究表明,桥面不平整是具有零均值、各态历经的平稳高斯随机过程,通常用功率谱来描述桥面的统计特性<sup>[16]</sup>。根据《车辆振动输入 路面平度表示方法》(GB/T 7031—1986)建议的公路路面功率谱密度拟合表达式<sup>[17]</sup>,采用离散傅立叶逆变换法,利用 MATLAB 软件编程模拟了极好、好、一般与差 4 级桥面平整度模型,见图 2。拟合公式为

$$G_x(n) = G_x(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\omega} \quad (5)$$

式中: $n_0$  为参考空间频率,其值为  $0.1 \text{ m}^{-1}$ ;  $n$  为空间频率; $G_x(n_0)$  为参考空间频率  $n_0$  下的路面功率谱密度值,称为路面不平整度系数,它取决于路面等级; $\omega$  为频率指数,取为 2。

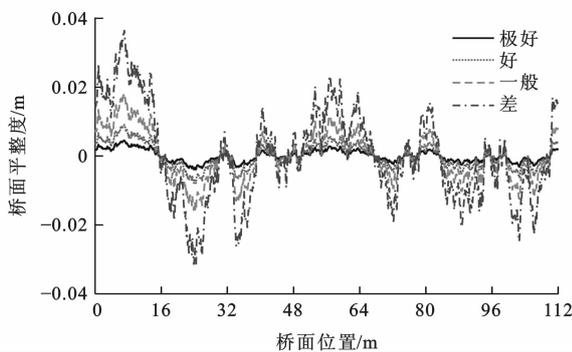


图 2 桥面平整度  
Fig. 2 Bridge surface roughnesses

### 1.4 车桥耦合关系

建立位移联系方程在分析车桥耦合振动中是非常关键的一环,一方面位移联系方程可以直接将桥面不平整度和桥梁位移作为激励输入到车辆运动方程组中,另一方面车辆对桥梁的作用力也是由位移联系方程来求得的。

#### 1.4.1 位移耦合

车辆在桥梁上行驶的整个过程中,假定车轮和桥面始终接触而无跳起,车桥系统中轮对位移就可由桥上对应接触点位移表示,其位移联系方程为

$$\Delta_i = z_i - (-r_i) - y_i \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Delta}_i &= \dot{z}_i - (-r'_i \dot{x}) - y'_i \dot{x} - \dot{y}_i = \\ &\dot{z}_i - (-r'_i v) - y'_i v - \dot{y}_i \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\Delta_i$ 、 $\dot{\Delta}_i$  分别为第  $i$  个车轴轮胎与桥面间竖向位移与速度联系; $r_i$  为第  $i$  个车轮处的桥面平整度; $y'_i$  为第  $i$  个车轮作用位置处桥梁瞬时转角; $v$  为车辆

速度; $x$  为位移。

#### 1.4.2 力学耦合

车桥耦合振动系统中,车辆与桥梁 2 个独立子系统之间耦合作用是通过轮桥接触点的相互作用力相联系,两者之间的相互作用力可描述为

$$F_{vi} = k_{vi} \Delta_i + c_{vi} \dot{\Delta}_i \quad (8)$$

## 2 车桥耦合振动分析方法及算例验证

### 2.1 车桥耦合振动分析方法

基于 ANSYS 平台,采用 APDL 语言编程求解车辆运动方程与车桥作用力,并利用 ANSYS 软件瞬态动力分析功能自编宏文件实现了车桥耦合振动分析,计算求解流程见图 3,具体方法步骤如下。

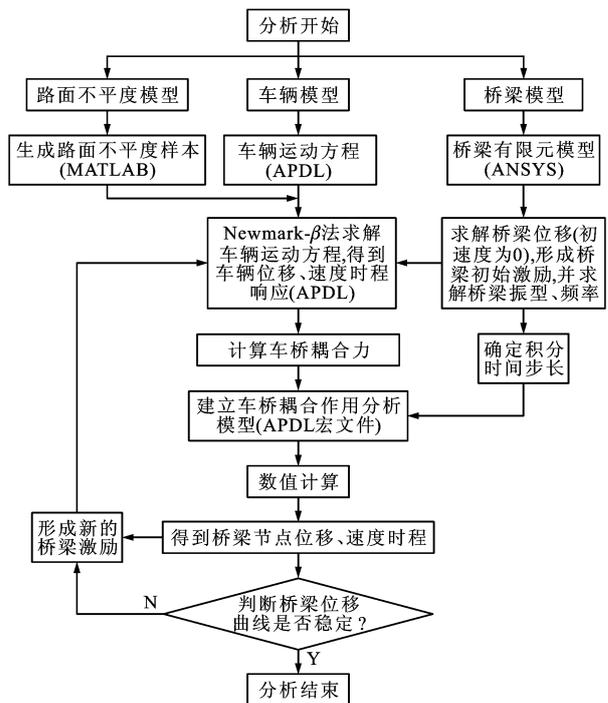


图 3 车桥耦合振动计算流程

Fig. 3 Solution flow of vehicle-bridge coupled vibration

Step 1:利用 ANSYS 软件建立桥梁空间梁格有限元模型(桥面用梁格等效替代),进行模态分析与静力求解,得到桥梁振型、频率与挠度。

Step 2:根据有限元计算的桥梁基频,结合梁格模型单元长度,综合考虑车速、车辆固有频率等因素,选取合适的时间积分步长  $\Delta t$ ,一般积分步长可取为  $\Delta t \leq T/15$ <sup>[18]</sup>,其中  $T$  为桥梁自振周期。

Step 3:通过 MATLAB 编程生成桥面不平度样本,根据位移耦合关系,将桥面不平度和 Step 1 中求得的桥梁挠度一起作为引起车辆系统发生振动的初始激励(车辆初始条件由车辆上桥前 50 m 的车辆振

动分析获得,桥梁初速度取为0),利用 APDL 语言结合 Newmark- $\beta$ 法自编程求解车辆运动方程,得到车辆位移-时间、速度-时间响应时程序列。根据力学耦合关系,依据式(8)计算车桥作用力。

Step 4:将 Step 3 中求得的车桥耦合力加载到桥梁有限元模型上,利用 ANSYS 瞬态动力分析功能进行求解,得到桥梁结构各点的瞬时动力响应值。

Step 5:将求出的桥梁位移和速度作为新的激励,重复 Step 3,修正车辆方程,得到新的车桥相互作用力,再重复 Step 4,求出新的桥梁结构动力响应,如此循环直至相邻两次分析求得的桥梁位移响应曲线基本重合为止。

## 2.2 算例验证

为验证本文方法与自编程程序的正确性与精度,应用本文方法对某简支梁算例<sup>[11]</sup>进行求解。车辆为2轴半车模型(图1),参数按表1取值,简支梁桥梁参数如下:计算跨径为32 m,抗弯刚度为 $3.5 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,单位长度质量为 $5.41 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。车辆速度分别取为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 与 $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,不考虑桥梁阻尼与桥面平整度影响。

本文计算结果与文献[11]按 Ruge-Kutta 法计算结果比较见图4,可以看出本文计算结果与文献[11]计算结果基本吻合,不同行车速度下2种方法跨中位移最大相对误差均小于5%,因此,本文计算方法精度较高,可以应用其进行车桥耦合振动相关问题的分析与研究。

表1 技术参数

Tab.1 Technical parameters

1/2 车辆模型参数	参数取值
$k_{si}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$2.535 \times 10^6$
$c_{si}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$1.96 \times 10^5$
$k_{ti}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	$4.28 \times 10^6$
$c_{ti}/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$9.8 \times 10^4$
$m_i/\text{kg}$	4 330
$M/\text{kg}$	$3.85 \times 10^4$
$I_a/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$2.466 \times 10^6$
$L_u/\text{m}$	8.4

## 3 双层公路钢桁梁桥车桥耦合振动分析

### 3.1 工程概况

某双层公路简支钢桁梁桥全长为112 m,桁间距为18 m,主桁立面采用有竖杆的华伦式桁架,桁高为10 m,节间长度为8 m。桥面系采用纵横梁支撑钢筋混凝土桥面板体系,桥面板用一定间距的锚栓

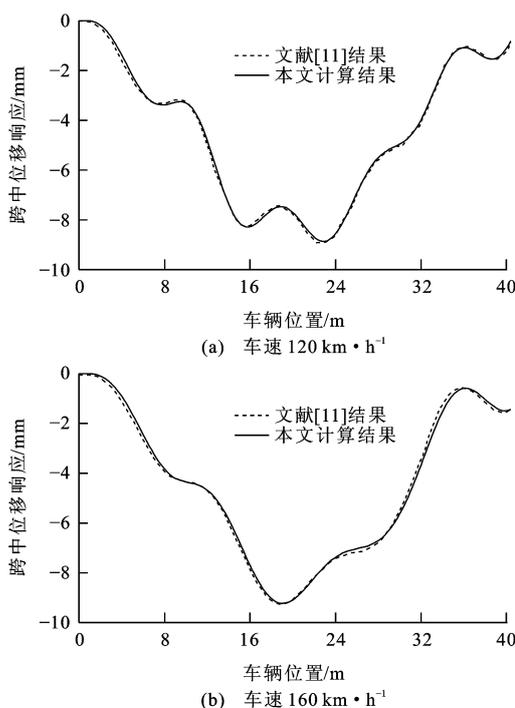


图4 简支梁跨中位移响应曲线

Fig.4 Response curves of mid-span vertical displacement for simply-supported beam

固定于纵梁上翼缘,上下两层均设有平联。全桥共8个车道,上下两层各4车道,大桥总体布置见图5,其中④号纵梁为中纵梁(位于横桥向中间位置)。

### 3.2 桥梁有限元模型及车辆技术参数

本文采用大型通用有限元程序 ANSYS 建立全桥空间梁格有限元模型,桥面板采用梁格模拟<sup>[19-20]</sup>,桥面板梁格仅与纵梁耦合,共计10 936个节点,5 798个梁单元,见图6。加载车辆采用双轴4自由度半车模型,技术参数按表1取值。

### 3.3 冲击系数

参考《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)<sup>[21]</sup>中冲击系数的定义,将钢桁梁桥各杆件响应(位移与轴力)冲击系数定义为

$$\mu_R = \frac{R_{dmax} - R_{smax}}{R_{smax}} \quad (9)$$

式中: $R_{dmax}$ 为动力分析时钢桁桥杆件动力响应最大值; $R_{smax}$ 为静力作用下钢桁桥杆件响应最大值。

### 3.4 车桥耦合振动影响参数分析

#### 3.4.1 车辆速度

为研究车辆速度对车桥耦合振动的影响,分别求解车速为72、108、144  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时桥梁的振动响应,计算时桥梁阻尼比 $\zeta$ 取为0.03,加载方式为上下层4车道布载。不同车速时桥梁上下层主要杆件动力响应计算值见表2。

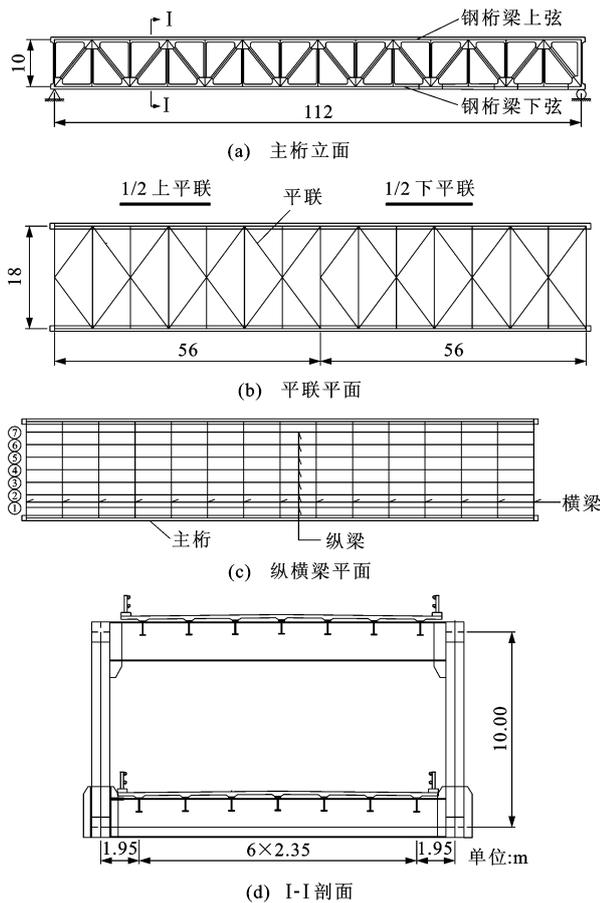


图 5 桥梁总体布置

Fig. 5 General layout of bridge

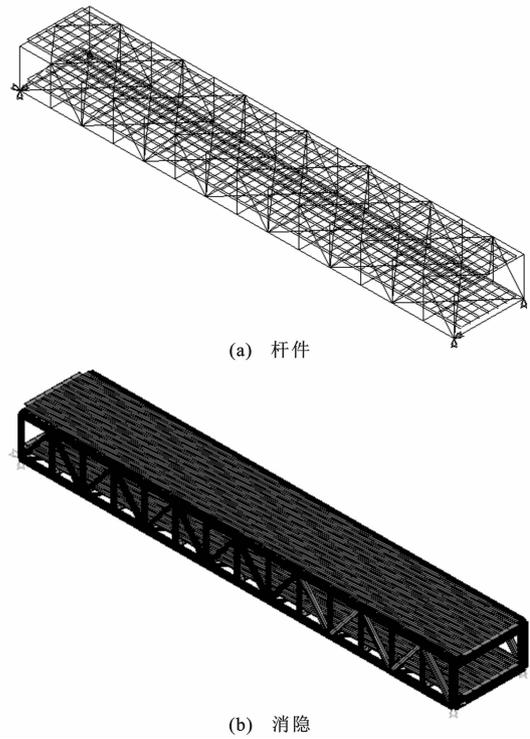


图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element models

从表 2 可以看出,双层桥各杆件动力响应与车速之间没有规律性的变化趋势,冲击系数并非随车速增长而成线性增加趋势。当车速从  $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  增大到  $144 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,各杆件冲击系数先减小后

表 2 不同车速时主要杆件动力响应

Tab. 2 Dynamic responses of main bars at different vehicle speeds

参数	杆件	挠度/mm				轴力/kN			
		$72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$144 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	静力	$72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$144 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	静力
最大动力 响应	上层中纵梁跨中	-33.50	-33.00	-35.30	-30.20	120.00	125.20	124.00	107.10
	上弦杆跨中	-28.40	-28.00	-30.30	-25.20	2 298.00	2 266.00	2 404.00	2 022.00
	下层中纵梁跨中	-34.60	-34.10	-36.30	-31.30	-113.60	-112.10	-119.20	-102.20
	下弦杆跨中	-28.90	-28.50	-30.80	-25.70	-2 610.00	-2 658.00	-2 732.00	-2 310.00
冲击 系数	上层中纵梁跨中	0.11	0.09	0.17	—	0.12	0.17	0.16	—
	上弦杆跨中	0.13	0.11	0.20	—	0.14	0.12	0.19	—
	下层中纵梁跨中	0.11	0.09	0.16	—	0.11	0.10	0.17	—
	下弦杆跨中	0.13	0.11	0.20	—	0.13	0.15	0.18	—

增大,但总体来讲,较高的行车速度会对桥梁产生更大的冲击效应。

### 3.4.2 桥梁阻尼

为研究桥梁阻尼对双层桥车桥耦合振动的影响,分别求解阻尼比  $\zeta$  为 0.01、0.03、0.05 时桥梁的动态响应。桥面状况选用理想光滑桥面,加载方式为上下层 4 车道布载,不同阻尼比时桥梁上下层主要杆件动力响应计算值见表 3。

对比表 3 中不同阻尼比时桥梁跨中弦杆与纵梁的响应值及冲击系数,可以看出,随着阻尼比的增大,桥梁上下层各杆件位移、轴力及其冲击系数都呈减小趋势,这是由于高阻尼能够增大结构能量耗散,可以在一定程度上降低结构的动力响应幅度。实际桥梁设计时,可以考虑适当增大桥梁结构的阻尼,如引入新材料,使用抗震支座等,以减少车桥耦合振动。

表3 不同阻尼比时主要杆件动力响应

Tab.3 Dynamic responses of main bars with different damping ratios

参数	杆件	挠度/mm				轴力/kN			
		$\zeta=0.01$	$\zeta=0.03$	$\zeta=0.05$	静力	$\zeta=0.01$	$\zeta=0.03$	$\zeta=0.05$	静力
最大动力响应	上层中纵梁跨中	-33.20	-33.00	-32.90	-30.20	117.90	117.50	117.40	107.10
	上弦杆跨中	-28.10	-28.00	-27.90	-25.20	2 258.00	2 252.00	2 247.00	2 022.00
	下层中纵梁跨中	-34.20	-34.00	-33.90	-31.30	-111.70	-111.60	-111.40	-102.20
	下弦杆跨中	-28.60	-28.50	-28.40	-25.70	-2 589.00	-2 577.00	-2 570.00	-2 310.00
冲击系数	上层中纵梁跨中	0.10	0.09	0.09	—	0.10	0.10	0.10	—
	上弦杆跨中	0.12	0.11	0.11	—	0.12	0.11	0.11	—
	下层中纵梁跨中	0.09	0.09	0.09	—	0.09	0.09	0.09	—
	下弦杆跨中	0.12	0.11	0.11	—	0.12	0.12	0.11	—

3.4.3 桥面平整度

为探讨桥面平整度对双层桥车桥耦合振动的影响,采用本文桥面平整度的模拟方法,模拟了理想(光滑)、极好、好、一般与差5种桥面状况,分析了不同桥面平整状况对桥梁动力响应的影响,限于篇幅有限,仅列出了部分计算结果。计算时车辆速度取为  $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,桥梁阻尼比取  $0.03$ ,加载方式为上下层4车道布载。比较图7中杆件轴力时程与轴力冲击系数可以发现:5种不同桥面平整度状态下上

弦杆跨中最大轴力分别为  $2\ 252$ 、 $2\ 274$ 、 $2\ 298$ 、 $2\ 344$ 、 $2\ 436 \text{ kN}$ ,对应的轴力冲击系数分别为  $0.11$ 、 $0.12$ 、 $0.14$ 、 $0.16$ 、 $0.20$ ;上层中纵梁跨中最大轴力分别为  $117.5$ 、 $118.7$ 、 $120.0$ 、 $122.6$ 、 $127.8 \text{ kN}$ ,对应的轴力冲击系数分别为  $0.10$ 、 $0.11$ 、 $0.12$ 、 $0.14$ 、 $0.19$ 。说明桥梁结构在理想、极好、好、一般及差5种桥面状况下的动力响应依次呈增大趋势,即桥面越粗糙对应的动力响应幅度越大,且增加的幅值也越明显。

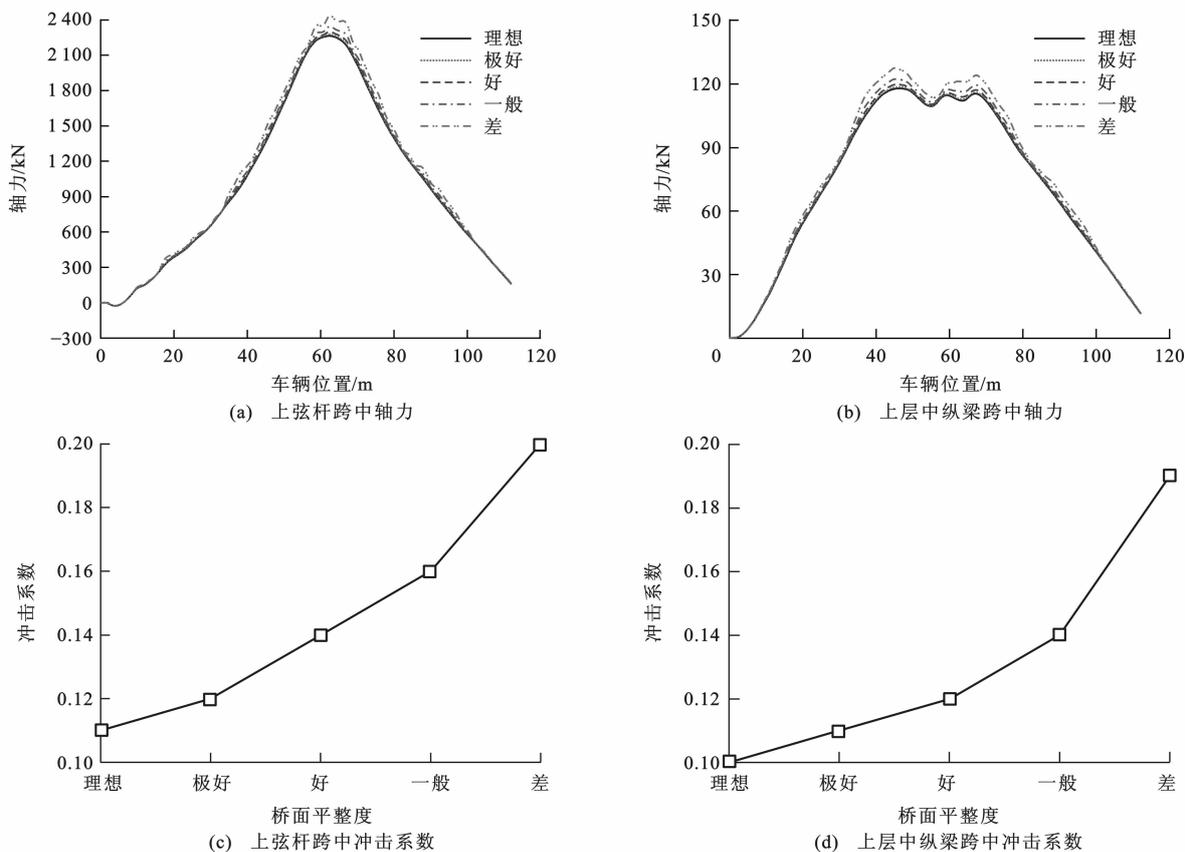


图7 不同桥面平整度时主要杆件轴力时程与冲击系数

Fig.7 Axial force time histories and impact factors of main bars with different bridge surface roughnesses

可见,桥面平整度对桥梁结构的动力响应有着十分显著的影响,桥面破损或粗糙越严重,对应的动力冲击系数越大。实桥在运营过程中,应加强桥面养护,确保桥面平整,以减小对桥梁的冲击效应,确保桥梁的安全性与可靠性。

3.4.4 单双层加载模式

为研究加载模式的不同对双层桥车桥耦合振动的影响,分析求解了双层加载、上层加载、下层加载 3 种加载模式时的桥梁动力响应。不同加载模式时桥梁上下层主要杆件动力响应计算值见表 4。

表 4 不同加载模式时主要杆件动力响应

Tab. 4 Dynamic responses of main bars with different loading modes

参数	杆件	挠度/mm			轴力/kN		
		双层加载	上层加载	下层加载	双层加载	上层加载	下层加载
最大动力 响应	上层中纵梁跨中	-33.00	-20.00	-13.10	117.50	62.70	59.80
	上弦杆跨中	-28.00	-14.10	-13.90	2 252.00	1 166.00	1 089.00
	下层中纵梁跨中	-34.00	-13.40	-20.80	-111.60	-58.30	-54.00
	下弦杆跨中	-28.50	-14.10	-14.40	-2 577.00	-1 273.00	-1 306.00
冲击 系数	上层中纵梁跨中	0.09	0.10	0.08	0.10	0.10	0.08
	上弦杆跨中	0.11	0.12	0.10	0.11	0.13	0.10
	下层中纵梁跨中	0.09	0.10	0.09	0.09	0.10	0.09
	下弦杆跨中	0.11	0.12	0.10	0.12	0.13	0.11

4 结 语

(1)双层公路钢桁桥各杆件动力响应与车速之间没有规律性的变化趋势,冲击系数并非随车速增长而成线性增加趋势,但总体来讲,较高的行车速度会对桥梁结构产生更大的冲击效应。

(2)阻尼能消耗振动能量,可以在一定程度上降低结构的动力响应。实际桥梁设计时,可以考虑适当增大桥梁结构的阻尼,如引入新材料,使用抗震支座等,以减少车桥耦合振动对桥梁的冲击作用。

(3)桥面平整度是双层公路钢桁桥车桥耦合振动的一个重要激励,桥面平整度的好坏在很大程度上决定着结构冲击系数的大小,桥面状况越差,车辆振动越强烈,车辆对桥梁结构产生的冲击作用力越大,与之对应的桥梁结构产生的冲击效应越明显。在桥梁运营养护过程中,应注意保证桥面的平整,以减少对桥梁的冲击作用,提高桥梁的承载力与耐久性。

(4)单双层加载模式的不同对桥梁整体的动力响应改变不大,但是对其局部动力响应的影响则比较明显,应在桥梁设计时考虑局部冲击效应的影响。

通过对表 4 计算结果及杆件响应时程进行分析,可以得出:2 种单层加载模式下主桁的动力响应变化不大,主桁不同部位响应冲击系数变化不明显;2 种单层加载模式下纵梁的动力响应变化比较明显,车辆荷载对荷载所在位置处纵梁的冲击作用显著,所以对于双层钢桁桥来说,移动荷载对桥梁局部振动的贡献较大,设计时应考虑局部冲击效应的影响;双层加载模式下杆件冲击系数较上层单层加载模式下的冲击系数有所减小,这主要由于双层桥上下层荷载间的耦合作用所致。

参 考 文 献 :

References :

[ 1 ] 刘永健,刘 剑,刘君平,等. 刚性悬索加劲钢桁梁桥施工阶段全桥模型试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(2):72-78.  
LIU Yong-jian, LIU Jian, LIU Jun-ping, et al. Integral model test of steel truss bridge stiffened with rigid cables in construction stage [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2): 72-78. (in Chinese)

[ 2 ] 刘永健,刘世忠,张俊光,等. 三桁钢桁梁桥横桥向内力调整方法及影响参数[J]. 广西大学学报:自然科学版,2011,36(1):75-82.  
LIU Yong-jian, LIU Shi-zhong, ZHANG Jun-guang, et al. Internal force adjustment of three main trusses and the parameters that influence it in steel truss bridge with three main trusses and double decks[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2011, 36(1): 75-82. (in Chinese)

[ 3 ] 刘永健,张俊光,黄健超,等. 双层桥面三桁刚性悬索加劲钢桁梁桥全桥试验模型[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(3):61-65.  
LIU Yong-jian, ZHANG Jun-guang, HUANG Jian-chao, et al. Test model of whole bridge of double-deck and three main trusses steel bridge with rigid cable[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(3): 61-65. (in Chinese)

- [4] 方秦汉,高宗余,李加武. 中国铁路钢桥的发展历程及展望[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(4):1-5.  
FANG Qin-han, GAO Zong-yu, LI Jia-wu. Development course and prospect of steel railway bridges in China[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(4): 1-5. (in Chinese)
- [5] 米 静. 车桥耦合振动对双层钢桁桥的冲击作用研究[D]. 西安:长安大学,2011.  
MI Jing. Study on the dynamic response of double-deck steel truss bridge under moving vehicles[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] KAWATANI M, KOMATSU S. Nonstationary random response of highway bridges under a series of moving vehicles[J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 1988, 5(2): 285-292.
- [8] 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.
- [9] CHATTERJEE P K, DATTA T K, SURANA C S. Vibration of continuous bridges under moving vehicles[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(5): 619-632.
- [10] ZHENG D Y, CHEUNG Y K, AU F T K, et al. Vibration of multi-span non-uniform beams under moving loads by using modified beam vibration functions[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 212(3): 455-467.
- [11] 沈火明,肖新标. 求解车桥耦合振动问题的一种数值方法[J]. 西南交通大学学报,2003,38(6):658-662.  
SHEN Huo-ming, XIAO Xin-biao. Numerical method for vehicle-bridge coupled vibrations[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(6): 658-662. (in Chinese)
- [12] 严志刚,陈彦江,盛洪飞. 钢管混凝土拱桥在车辆荷载作用下的非线性动力响应分析[J]. 中国公路学报,2003,16(1):58-61,67.  
YAN Zhi-gang, CHEN Yan-jiang, SHENG Hong-fei. Dynamic nonlinear response analysis of arch bridges of concrete filled steel tube due to the vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 58-61, 67. (in Chinese)
- [13] 丁南宏,林丽霞,孙迎秋,等. 公路连拱桥在单车荷载下振动的理论和试验研究[J]. 兰州交通大学学报:自然科学版,2005,24(3):28-32.  
DING Nan-hong, LIN Li-xia, SUN Ying-qiu, et al. Theoretical and experimental study of highway arcade bridge's vibration under single vehicle load[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University: Natural Sciences, 2005, 24(3): 28-32. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 米 静,刘永健,刘 剑. 车-桥耦合振动冲击效应对简支板的影响[J]. 中国科技论文在线,2010,5(7):516-521.  
MI Jing, LIU Yong-jian, LIU Jian. Impact influence of vehicle-bridge coupled vibration on simply-supported slab[J]. Science-paper Online, 2010, 5(7): 516-521. (in Chinese)
- [16] 王 达,韩万水,黄平明,等. 桥面平整度对大跨度悬索桥车桥耦合振动的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(4):53-58.  
WANG Da, HAN Wan-shui, HUANG Ping-ming, et al. Influence of bridge surface roughness on vehicle-bridge coupled vibration of long-span suspension bridge [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 53-58. (in Chinese)
- [17] GB/T 7031—1986, 车辆振动输入 路面平度表示方法[S].  
GB/T 7031—1986, vehicle vibration-describing method for road surface irregularity[S]. (in Chinese)
- [18] 施 颖,宋一凡,孙 慧,等. 基于 ANSYS 的公路复杂桥梁车桥耦合动力分析方法[J]. 天津大学学报,2010,43(6):537-543.  
SHI Ying, SONG Yi-fan, SUN Hui, et al. Dynamic analysis method of vehicle-bridge coupling for complicated bridges based on ANSYS[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(6): 537-543. (in Chinese)
- [19] 刘其伟,王成明,李 捷. 装配式空心板桥荷载横向分布计算方法比较分析[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(2):100-105.  
LIU Qi-wei, WANG Cheng-ming, LI Jie. Comparison and analysis of calculation method of transverse load distribution for fabricated hollow slab bridges[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2): 100-105. (in Chinese)
- [20] 李德建,彭 彦. 既有简支铰接空心板梁桥结构状况动力评估[J]. 建筑科学与工程学报,2009,26(4):24-29.  
LI De-jian, PENG Yan. Dynamic assessment about existing simply-supported hinge joint cellular slab bridges[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 24-29. (in Chinese)
- [21] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范[S].  
JTG D60—2004, general code for design of highway bridges and culverts[S]. (in Chinese)