集束群钉装配式钢-混组合梁桥自振特性与车桥耦合分析

范 亮[1,2]，曾 文[1]，文 强[1]，赵富裕[3]，徐英铭[4]

（1. 重庆交通大学 土木工程学院，重庆 400074；2. 重庆交通大学 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室，重庆 400074；3. 中国建筑第八工程局有限公司西南分公司，成都 610041；4. 重庆市开州区交通局，重庆 405400）

摘 要：为研究考虑集束群钉非连续剪力连接影响的装配式钢-混组合梁桥动力特性，基于欧拉梁理论和Rayleigh-Ritz法，推导了该类组合梁桥自振特性理论公式，构建了多点不连续剪力约束的装配式组合梁桥车桥耦合模型，分析了路面不平整度、车速、车体质量和集束度对组合梁桥车载动力响应及冲击效应影响特征。结果表明：集束度越大，无剪力连接区越长，桥梁刚度和固有频率越低；路面不平整度提高，冲击系数增大；车速对动力响应影响呈非线性，当车速由100 km/h提高至120 km/h时，冲击系数突增68.10%，车速对动力性能影响显著；车辆质量越大，冲击系数越大，动力响应越强；集束度由0增至0.31时，最大动位移增长较静位移增长略高，冲击系数降低5.25%，集束度对冲击系数影响不显著。

关键词：桥梁工程；车桥耦合；自振特性；有限元；不平整度；冲击系数

中图分类号：TU318.1 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2025)07-2354-11

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230871

Vibration characteristics of prefabricated steel-concrete composite beam bridges with clustered grouping bolt connection and analysis of vehicle-bridge coupling

FAN Liang[1,2], ZENG Wen[1], WEN Qiang[1], ZHAO Fu-yu[3], XU Ying-ming[4]

(1. *School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*; 2. *State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*; 3. *Southwest Branch, China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu* 610041, *China*; 4. *Chongqing Kaizhou District Transportation Bureau, Chongqing* 405400, *China*)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of assembled steel-concrete composite beam bridges considering the influence of discontinuous shear connection caused by cluster-group bolts, a theoretical formula for the self-vibration characteristics of this type of composite girder bridges based on the Euler beam theory and Rayleigh-Ritz method was proposed. A coupled model of the assembled composite beam bridge with multi-point discontinuous shear constraints was established to analyze the effects of road

收稿日期：2023-08-16.

基金项目：国家自然科学基金项目(U20A20312)；重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0103).

作者简介：范亮(1979-)，女，教授，博士. 研究方向：桥梁工程. E-mail：fanliang@cqjtu.edu.cn

roughness, vehicle speed, vehicle mass, and clustering degree on the dynamic response of the composite beam bridge under vehicle loading and the impact characteristics. The results indicate that as the clustering degree increases and the length of the shear-free connection zone becomes longer, the bridge stiffness and natural frequency decrease. An increase in road roughness leads to a higher impact coefficient. The influence of vehicle speed on dynamic response shows nonlinearity, and when the vehicle speed increases from 100 km/h to 120 km/h, the impact coefficient suddenly increases by 68.10%, significantly affecting the dynamic performance. A greater vehicle mass results in a larger impact coefficient and stronger dynamic response. For clustering degrees ranging from 0 to 0.31, the increase in maximum dynamic displacement is slightly higher than the increase in static displacement, leading to a decrease of 5.25% in the impact coefficient. The effect of clustering degree on the impact coefficient is not significant.

Key words: bridge engineering; vehicle-bridge coupling; natural vibration characteristics; finite element; road roughness; impact coefficient

0　引　言

国内外学者针对桥梁与车辆共同作用下的车与桥耦合振动问题进行了大量的深入研究[1,2]，形成了完整的车桥耦合振动体系[3]，明确了桥型和车辆行驶工况对桥梁振动的影响[4,5]。剪力键成簇布置的集束群钉装配式钢-混组合梁桥作为一种新型桥梁结构，受到了广泛的关注和应用。与传统的混凝土梁桥相比，钢-混组合梁桥利用剪力连接件组合钢梁和混凝土板，充分发挥两者优势，具有较高的承载能力和装配施工率。然而，钢-混组合梁桥在运行过程中面临更为显著的振动问题，影响桥梁的安全性和使用寿命[6]，特别是非连续布置集束群钉的装配式组合梁桥，桥梁刚度和界面滑移受到该类间断剪力连接件的影响[7-9]，其车桥耦合振动将更为显著。因此，对集束群钉装配式钢-混组合梁桥的自振特性与车桥耦合作用进行研究具有重要意义。

学者针对不同桥型桥梁的车桥耦合特性进行了研究。Gao等[10]推导了斜拉桥和车辆的耦合振动方程，提出了基于多尺度模型的大跨度斜拉桥车桥耦合振动分析通用方法。范晨等[11]研究了大跨钢箱梁桥的车桥耦合动力特性，认为车辆载荷对桥梁仅产生局部作用，对桥梁局部疲劳累积具有显著影响。贺建帅等[12]建立了简支梁桥车轨耦合振动模型，分析轨道变形与列车行车安全性的关系，并提出了一种地震作用下的桥梁行车安全性快速评估方法。李慧乐等[13]针对钢桁架桥梁进行随机振动分析，提出了一种基于车桥耦合系统随机振动分析的钢桥疲劳可靠度评估新方法。杨星星[14]建立全桥有限元模型，运用多元线性回归原理建立了钢桁梁桥结构基频估算公式。

学者们亦研究了各类组合结构桥梁的动力性能，通过理论分析、数值模拟和实验测试等方法，探索了组合桥梁的固有频率、振型、振动幅值等振动特性[15-17]。Zhang等[18]研究了风-车-桥系统耦合振动的机理，认为车辆行驶时的竖向加速度在很大程度上受到风向波动和道路不平顺度的影响。Zeng等[19]针对地震荷载下车桥耦合系统开展了研究，强调了地震引起的桥梁振动对乘坐舒适性的不利影响。冀伟等[20]运用D′Alembert原理推导出波形钢腹板PC箱梁桥的扭转振动频率方程，分析了自由扭转扭矩和约束扭转扭矩对波形钢腹板PC简支箱梁桥扭转振动频率的影响，认为约束扭转扭矩对扭转振动频率的影响较大。罗锟等[21]制作相似比10∶1的轨道-箱梁耦合模型，研究了轨道板密度和弹性模量等对耦合系统的影响。然而，目前集束群钉装配式钢-混组合梁桥车桥耦合等动力学行为分析还较为缺乏，有待深入研究。

为研究集束群钉装配式钢-混组合梁桥的自振特性与动力响应，本文将采用欧拉梁理论和Rayleigh-Ritz法，推导考虑集束度的桥梁自振特性理论分析方法，通过引入有剪力连接区刚度B_1和无剪力连接区刚度B_2，采用分段积分集束栓钉和非集束栓钉区域的方法建立自振频率与振型求解方程；同时构建典型装配式组合梁桥车桥耦合模型，研究路面不平整度、车辆速度、车体质量和集束度[22,23]对桥梁动力响应的影响规律。

1 集束群钉装配式钢-混组合梁桥

集束群钉装配式钢-混组合梁桥结构形式见图 1,在预制桥面板与钢梁间通过集束群钉和后浇预留孔形成钢混剪力连接,集束群钉可以确保钢箱梁和混凝土结构之间的力学性能协同。该桥型具有工厂化制作、装配化施工的优势,已被广泛应用于多个大型基础设施项目(如广深港高铁、京津冀快速铁路、长江三桥等)中,成为现代桥梁工程建设中一种重要的桥型选择。

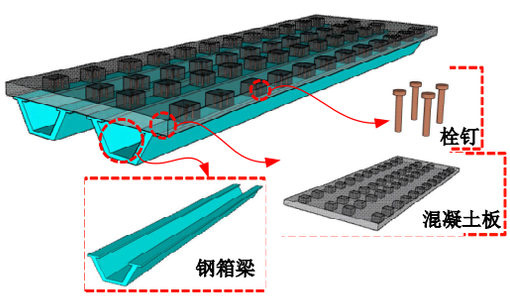


图 1 集束栓钉连接的钢-混组合梁桥结构

Fig. 1 Steel-concrete composite bridge structure connected by cluster bolts

2 自振特性理论推导

以钢梁的左端支座为坐标原点,梁的纵向为 x 轴建立坐标系,组合梁的剪力连接区布置如图 2 所示,图中 a、b 分别为有剪力连接区和无剪力连接区沿梁纵向的长度。组合梁桥有如下基本假定:①混凝土板与钢梁之间不会因竖向掀起而脱离;②混凝土板与钢梁均按照欧拉梁理论考虑,忽略转动惯量和剪切变形;③阻尼的作用忽略不计;④混凝土板与钢梁之间光滑,即可忽略混凝土与钢梁之间的黏结力;⑤孔内的剪力均匀分布。

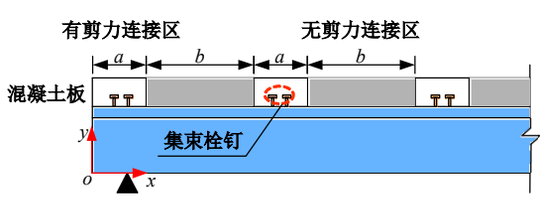


图 2 组合梁的剪力连接区布置

Fig. 2 Shear connection area arrangement of composite beams

沿梁长均布剪力键的钢梁与混凝土之间完全抗剪连接时截面刚度 B_1' 为[24]:

$$B_1' = E_S I_O + E_S A_O d_c^2 \tag{1}$$

式中:$I_O = I_S + \frac{I_C}{\alpha_E}$;$A_O = \frac{A_S A_C}{\alpha_E A_S + A_C}$;$\alpha_E = \frac{E_S}{E_C}$;$I_O$ 和 I_S 分别为钢梁和混凝土翼板的惯性矩;d_c 为钢梁形心到混凝土翼板形心的距离;A_S 和 A_C 分别为钢梁截面面积和混凝土翼板截面面积;E_S 和 E_c 分别为钢梁和混凝土的弹性模量。

考虑栓钉在钢梁上集束布置,有剪力连接区截面刚度 B_1 为:

$$B_1 = E_S I_O + \gamma E_S A_O d_c^2 \tag{2}$$

式中:$\gamma = \frac{\lambda\eta l}{a}$,$\lambda$ 为集束度,$\lambda = \frac{n_s n_q}{N}$,$n_s$ 为一个集束栓钉群中栓钉的数量,n_q 为箱梁集束栓钉群个数,N 为栓钉总数,$\eta = \frac{N}{n_f}$,η 为抗剪连接度,n_f 为单跨简支梁完全抗剪连接时所需集束栓钉数量,l 为梁的总长。

无剪力连接区截面刚度 B_2 为:

$$B_2 = E_S I_S + E_C I_C \tag{3}$$

取钢梁截面上距中性轴距离为 m 的任意点 P,梁振动过程中与截面上其他所有点有相同的竖向位移 u,由截面转动产生 x 方向的位移 $n = -mu'$,如图 3 所示,该点轴向应变 ε_x 为:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial(-mu')}{\partial x} = -mu'' \tag{4}$$

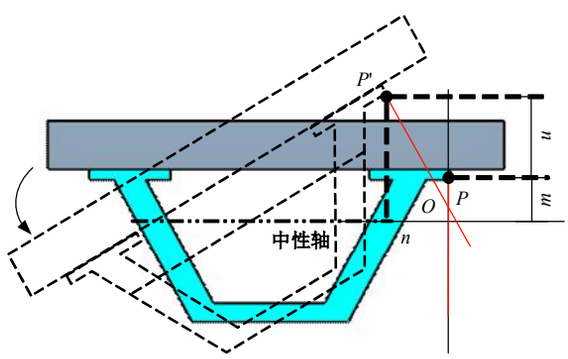


图 3 截面上某点的位移图

Fig. 3 Displacement diagram at a certain point on cross-section

基于欧拉梁理论,不考虑截面剪切变形、忽略转动惯量,梁的势能(即应变能)由弯曲变形引起:

$$U = \frac{1}{2}\int_V \sigma_x \varepsilon_x \mathrm{d}V = \frac{1}{2}\int_V E(-mu')^2 \mathrm{d}V = \frac{1}{2}\int_0^l EI(u'')^2 \mathrm{d}x \tag{5}$$

梁的竖向运动动能为:

$$T = \int_V \frac{1}{2}\rho \mathrm{d}V \cdot \dot{u}^2 = \frac{1}{2}\int_0^l \rho A \dot{u}^2 \mathrm{d}x \tag{6}$$

梁自由振动时,在某一阶上的主振动可表示为:

$$u(x,t)=\psi(x)Z_0\sin(\omega t+\varphi) \tag{7}$$

式中：Z_0为广义坐标$Z(t)$的幅值；$\psi(x)$为定义偏转形式的假设形函数。

将梁的振动位移表示成前n阶形函数$\psi(x)$的线性组合：

$$u(x)=\sum_{i=1}^{n}z_i\psi_i(x)=\tilde{\boldsymbol{\psi}}(x)\tilde{\boldsymbol{z}} \tag{8}$$

式中：z_i为广义坐标，随时间变化；$\tilde{\boldsymbol{z}}$为$n\times1$维的广义坐标向量；$\tilde{\boldsymbol{\psi}}(x)$为$1\times n$的形函数矩阵。

将式(8)代入式(6)可得梁的动能T表达式：

$$T=\frac{1}{2}\int_0^l\rho A[\dot{u}(x)]^2\mathrm{d}x=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}m_{ij}\dot{z}_i\dot{z}_j \tag{9}$$

式中：$m_{ij}=\int_0^l\rho A\psi_i(x)\psi_j(x)\mathrm{d}x$；$z_i$为广义速度；$\boldsymbol{M}$为梁的广义质量矩阵，$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}m_{11}&\cdots&m_{1n}\\ \vdots& &\vdots\\ m_{n1}&\cdots&m_{nn}\end{bmatrix}$。

将式(8)代入式(5)可得考虑了集束栓钉连接的梁的势能U表达式：

$$U=\frac{1}{2}\left[\int_0^{\frac{a}{2}}B_1[u''(x)]^2\mathrm{d}x+\frac{1}{2}\int_{\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}+b}B_2[u''(x)]^2\mathrm{d}x+\cdots+\frac{1}{2}\int_{l-\frac{a}{2}-b}^{l-\frac{a}{2}}B_2[u''(x)]^2\mathrm{d}x+\int_{l-\frac{a}{2}}^{l}B_1[u''(x)]^2\mathrm{d}x\right]=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}k_{ij}z_iz_j=\frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{z}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\tilde{\boldsymbol{z}} \tag{10}$$

式中：

$k_{ij}=\int_0^{\frac{a}{2}}B_1\psi''_i(x)\psi''_j(x)\mathrm{d}x+\int_{\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}+b}B_1\psi''_i\psi''_j(x)\mathrm{d}x+\cdots+\int_{l-\frac{a}{2}}^{l}B_1\psi''_i(x)\psi''_j(x)\mathrm{d}x$，$\boldsymbol{K}$为梁的广义刚度矩阵，为对称矩阵，$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}k_{11}&\cdots&k_{1n}\\ \vdots& &\vdots\\ k_{n1}&\cdots&k_{nm}\end{bmatrix}$。

由能量守恒原理推导出Rayleigh商，并将式(8)代入式(11)，可知：

$$\omega=\frac{\int_0^lB(x)[u''(x)]^2\mathrm{d}x}{\int_0^lm[u(x)^2]\mathrm{d}x}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}k_{ij}z_iz_j}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}m_{ij}z_iz_j} \tag{11}$$

ω取驻值的必要条件为$\frac{\partial\omega}{\partial z_i}=0(i=1,2,\cdots,n)$，联立式(11)可得：

$$\sum_{j=1}^{n}(k_{ij}-\omega m_{ij})z_{ij}=0 \tag{12}$$

将式(12)改写为：

$$\boldsymbol{K}\tilde{\boldsymbol{z}}-\omega\boldsymbol{M}\tilde{\boldsymbol{z}}=0 \tag{13}$$

求解式(13)可得n个特征值$\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n$和相应的特征向量$\tilde{\boldsymbol{z}}_r=(z_{1r},z_{2r},\cdots,z_{nr})^{\mathrm{T}}$，$r=1,2,\cdots,n$。

梁的各阶频率为：

$$w_{\mathrm{c}}=\sqrt{\omega_n} \tag{14}$$

对应各阶频率的振型为：

$$\phi_n(x)=\sum_{j=1}^{n}z_{jr}\psi_j(x)=\tilde{\boldsymbol{\psi}}(x)\tilde{\boldsymbol{z}}_r,r=1,2,\cdots,n \tag{15}$$

公式通过引入有剪力连接区刚度B_1和无剪力连接区刚度B_2，采用分段积分集束群钉和无栓钉区域的方法求解自振频率与振型。由公式及其原理可知，集束度越大，无剪力连接区越长，刚度分段差异越显著，整体刚度和固有频率越低。

3　车桥耦合模型

3.1　车辆模型

将车辆简化为多个弹簧-质量-阻尼刚体振动系统。假设如下[25]：

(1)车架和车轴为绝对刚体，车架、车轮与桥面之间形成弹簧阻尼体系；

(2)忽略车体、悬架和车轮在纵向桥面上的振动；

(3)车体质量集中在车体质心处，车轮质量集中在车轴上，车体、车轮、车轴左右对称；

(4)车轮底部与桥面接触点保持不分离。

弹簧质量振动模型如图4所示，车辆模型参数值详见文献[26,27]。

车辆模型的振动方程为：

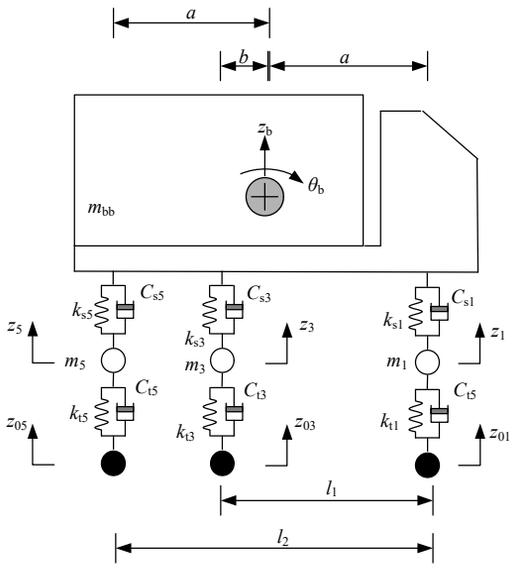
$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{v}}\ddot{\boldsymbol{z}}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{v}}\dot{\boldsymbol{z}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{v}}\boldsymbol{z}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{int}} \tag{16}$$

式中：$\boldsymbol{M}_{\mathrm{v}}$为车辆系统的质量矩阵；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{v}}$为车辆系统的阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{v}}$为车辆系统的刚度矩阵；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{int}}$为车辆振动引起的各自由度惯性荷载列向量；$\boldsymbol{z}$为车辆模型列向量，$\boldsymbol{z}=\left\{z_1\ z_2\ z_3\ z_4\ z_5\ z_6\ z_{\mathrm{b}}\ \theta_{\mathrm{b}}\ \phi\right\}^{\mathrm{T}}$。

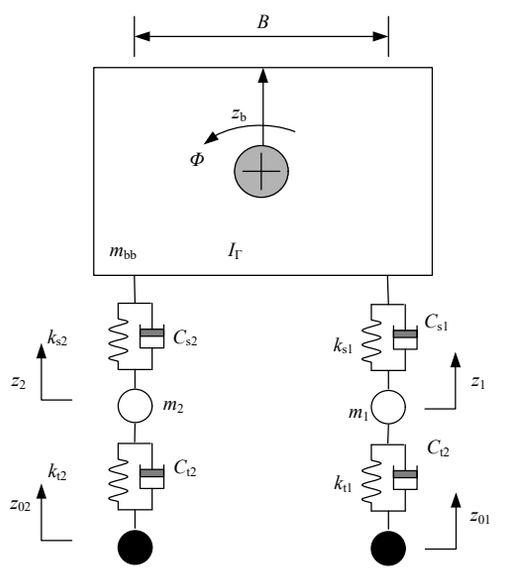
3.2　装配式组合梁桥模型

典型装配式钢-混组合梁桥模型见图5。将钢梁顶面和混凝土板底面栓钉位置进行弹簧连接和竖向耦合，栓钉为2个单向弹簧单元，以此模拟

栓钉的纵横向刚度。考虑实际简支梁的受力情况,模型中的梁约束简化如下:梁一端约束X、Y和Z方向的平动自由度,另一端约束Y和Z方向的平动自由度,均释放沿横向的转动。采用Block Lanczos(分块兰索斯法)提取模态数据。



(a) 侧面



(b) 正面

图4 简化车辆模型图

Fig. 4 Simplified vehicle model

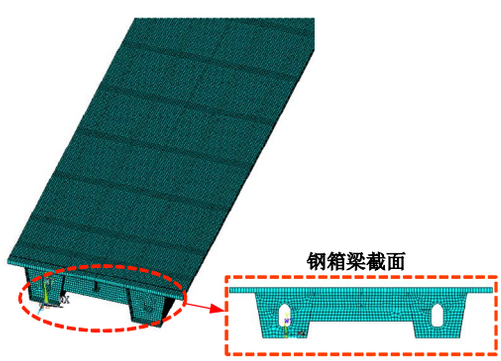


图5 梁桥模型

Fig. 5 Bridge model

3.3 路面不平整度模拟方法

利用谐波叠加法计算路面不平顺模拟函数$r(x)$,见式(17)。采用《车辆振动输入-路面平度表示方法》中建议的功率谱描述路面不平度统计特性[28],将其分为A~H共8个等级,其密度函数见式(18)。

$$\begin{cases} r(x,y)=\sum_{i=1}^{n}G(n_i)\cos(2\pi n_i\sqrt{x^2+y^2}+\varphi_i(x,y)) \\ G(n_i)=\sqrt{4G_q(n_i)\Delta n} \\ n_i=n_d+(i-0.5)\Delta n, \quad i=1,2,\cdots,N \\ \Delta n=(n_u-n_d)/N \end{cases} \tag{17}$$

式中:$G(n_i)$为余弦函数幅值;$\varphi_i(x,y)$为随机相位,其取值范围为$[0,2\pi]$;x、y分别为路面纵向坐标、横向坐标;N为足够大正整数;n_u、n_d分别为路面有效空间上限频率、下限频率。

$$G_d(n)=G_d(n_0)\left(\frac{n}{n_0}\right)^w \tag{18}$$

式中:$G_d(n)$为公路路面位移功率谱密度;n_0为空间参考频率,一般取0.1 m^{-1};$G_d(n_0)$为空间频率取n_0时的路面平度系数;w为频率指数,一般取2;n为空间频率的有效频带中任意频率。

3.4 车桥耦合模型验证

为验证上述建模方法的正确性,以文献[29]中的试验为算例,建立车桥耦合系统模型,将模拟得到跨中动挠度曲线的结果与文献试验结果进行对比验证,如图6所示。

由图6可知,试验和模拟得到的动挠度曲线

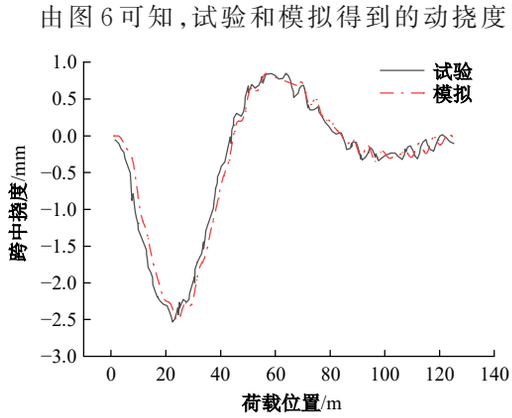


图6 跨中挠度曲线验证

Fig. 6 Mid-span deflection curve verification

相似，表明该建模方法可靠且精度较高，可用于组合梁桥的车桥耦合振动分析。

4　典型装配式组合梁桥动力分析

4.1　工程结构概况

以某跨径 50 m 集束群钉装配式钢-混组合梁桥为例，构造见图 7。桥面板宽 12.75 m，厚 0.25 m，采用 C50 混凝土。钢箱梁由上翼缘板、斜腹板、腹板加劲肋、底板、底板加劲肋以及横隔板组成，采用 Q420 钢材。箱梁高 2.2 m，腹板中心距为 2.8 m，两片钢箱梁中心距为 7.4 m。钢主梁上翼板宽 0.6 m，梁底宽 2.1 m。栓钉为 ML15，直径 22 mm，高 200 mm，栓钉采用 4×3 均匀间距集束式布置，栓钉间纵向间距 150 mm，横向间距 120 mm，钉群间距 1 000 mm。

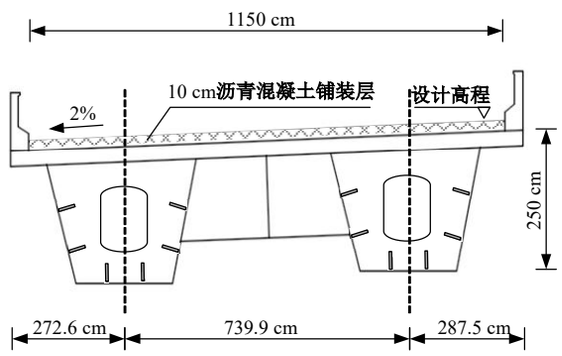


图 7　箱梁桥横断面图

Fig. 7　Cross-sectional view of box girder bridge

4.2　自振特性

基于 ANSYS 有限元软件，依据本文第 3 节建模方法，建立桥梁数值模型，分析得到振型和频率结果见表 1，表中列出数值分析得到的频率值 ω_s 与本文提出的考虑集束度影响的公式计算值 ω_c 误差在 10% 以内，证明考虑集束布置的自振频率公式更适用于集束栓钉连接的钢-混双箱梁桥自振频率计算。

4.3　车-桥耦合系统动力响应分析

4.3.1　路面不平整度的影响

冲击系数是评估车辆通过桥梁时对结构产生的竖向动力效应的增大系数，它是评估桥梁动力性能的重要参数[30]。冲击系数的计算公式参考《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60－2015)：

$$\mu=\frac{Y_{\mathrm{dmax}}}{Y_{\mathrm{jmax}}}-1 \tag{19}$$

式中：Y_{dmax} 为车辆驶过时桥梁结构动力响应的最大值；Y_{jmax} 为相同汽车荷载静止作用在同一截面上所产生的最大静力响应值。

表 1　集束栓钉连接的钢-混双箱梁桥自振频率

Table 1　Natural frequency of steel-concrete twin box girder bridge connected by cluster bolts

阶数	振型图	ω_s /Hz	ω_c /Hz	$\frac{\omega_s-\omega_c}{\omega_s}$ /%
1		2.219	2.023	8.83
2		5.140	4.992	2.88
3		7.338	7.116	3.03
4		7.802	7.234	7.28

为了研究路面不平整度对车桥耦合系统动力性能的影响，模拟了车辆以 80 km/h 的速度分别通过光滑路面、B 级路面、C 级路面和 D 级路面时该桥梁结构的动力响应情况。图 8 展示了跨中截面的竖向位移情况，表 2 列出了施加在光滑路面上的最大动位移 $\Delta_{\max}$、最大静位移 $\Delta'_{\max}$ 和冲击系数 μ，图 9 展示了冲击系数随路面等级变化的趋势。

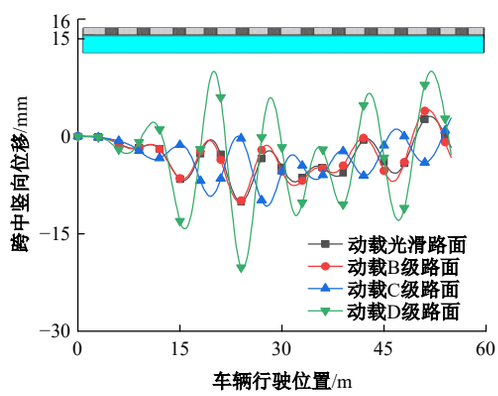


图 8　路面不平整度的动力响应

Fig. 8　Dynamic response to road surface irregularities

表 2　施加在光滑路面上的最大动、静位移与冲击系数

Table 2　Maximum dynamic and static displacements and impact coefficient applied on a smooth road surface

位移与冲击系数	光滑	B 级	C 级	D 级
$\Delta_{\max}$/mm	10.067	10.369	11.040	13.358
$\Delta'_{\max}$/mm	6.329	6.329	6.329	6.329
μ	0.590	0.638	0.744	1.111

可以观察到，随着路面不平整度等级的增加，钢-混凝土箱梁桥跨中的动态位移增大。同时，箱

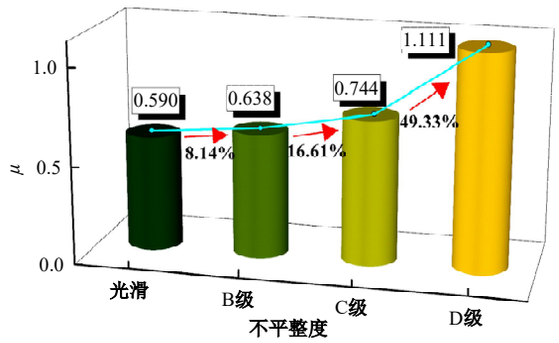


图9 冲击系数随路面等级变化趋势

Fig. 9 Trend of impact coefficient with road grade

梁桥的冲击系数随着路面不平整度等级的增加明显增大,且随着路面不平整度等级的提高,冲击系数的增幅也随之增大。当路面不平整度从C级变为D级时,最大动位移增大21.00%,冲击系数增大49.33%。

分析认为,路面不平整度是车桥耦合系统中引起车辆振动的主要激励源[31]。高速行驶的车辆在不平整的路面上受到的激励会使冲击力的频率与桥梁的基频接近,导致车桥共振现象明显,从而引起显著的动力响应。因此,保持桥面的平整性不仅有助于改善行驶体验,更能维护桥梁结构的安全性和耐久性。

4.3.2 车辆速度的影响

为了研究车辆速度对车桥耦合系统动力性能的影响,进行动力仿真分析,分别考虑了40、60、80、100和120 km/h的车速情况,模拟了车辆在B级路面桥梁上的行驶。通过仿真得到跨中截面的竖向位移情况(见图10)及冲击系数与最大动、静位移的数据(见表3),冲击系数随车辆速度变化的趋势见图11。可以发现,在100 km/h以下的车速范围内,随着车速的增加,梁桥的最大动态位移和冲击系数并未呈现单调递增或递减的趋势。然

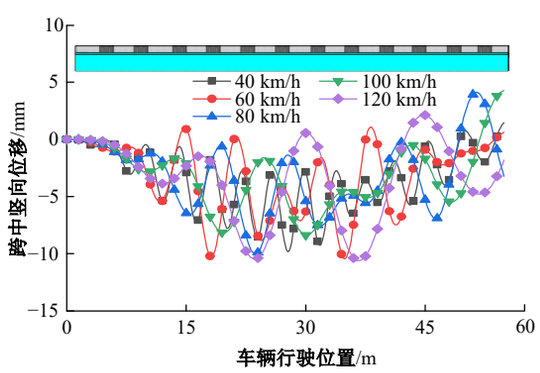


图10 不同车辆速度动力响应

Fig. 10 Dynamic response at different vehicle speeds

表3 仿真得到的最大动、静位移与冲击系数

Table 3 Maximum dynamic and static displacements and impact coefficient obtained through simulation

位移与冲击系数	车速/(km·h^{-1})				
	40	60	80	100	120
Δ_{max}/mm	9.822	10.636	10.369	8.989	10.800
Δ'_{max}/mm	6.329	6.329	6.329	6.329	6.329
μ	0.552	0.681	0.638	0.420	0.706

而,当车速从100 km/h提高到120 km/h时,箱梁桥的动力响应发生了显著变化,跨中最大动态位移增加20.15%,冲击系数的涨幅达68.10%。因此,在箱梁桥的运营和维护中,车速超过100 km/h时应加强冲击效应分析。综上,车辆速度对箱梁桥的动力性能影响显著。超过一定速度范围后,车桥耦合系统的动态响应显著增加,冲击系数和跨中竖向位移均呈现上升趋势。

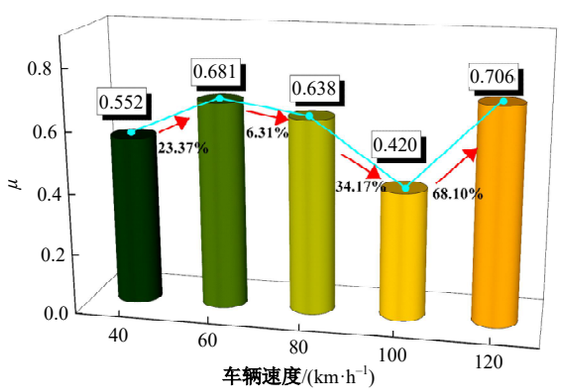


图11 冲击系数随车辆速度变化趋势

Fig. 11 Trend of impact coefficient varying with vehicle speed

4.3.3 车体质量的影响

为了研究车体质量对车桥耦合系统动力性能的影响,分别对15、20、25、30和35 t的车体质量进行模拟。以车辆80 km/h的速度为例,分析结果见图12,冲击系数与最大动、静位移见表4,冲击系数随车体质量变化的趋势见图13。可以发现,随着车体质量的增加,梁桥跨中的最大竖向动态位移随之增加,且冲击系数随着车体质量的增加呈递增趋势。当车体质量增加到35 t时,与15 t相比,最大动位移增加165.57%,最大静位移增加114.16%,冲击系数增加90.9%。分析认为,由于质量更大的车辆在高速行驶时对桥梁结构输入更多的能量,导致桥梁的动力响应更强,冲击系数也更大。限制车辆的总质量可以有效控制桥梁受到的动力影响,确保桥梁的结构安全和耐久性。

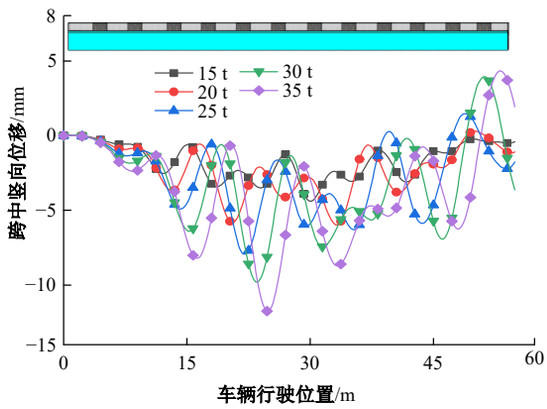


图 12　不同车体质量动力响应

Fig. 12　Dynamic response to different vehicle masses

表 4　车体质量模拟得到的最大动、静位移与冲击系数

Table 4　Maximum dynamic and static displacements and impact coefficien obtained from simulation of vehicle body mass

位移与冲击系数	车体质量/t				
	15	20	25	30	35
Δ_{max}/mm	4.560	6.091	8.122	10.150	12.110
Δ'_{max}/mm	3.354	4.311	5.268	6.225	7.183
μ	0.360	0.413	0.542	0.630	0.687

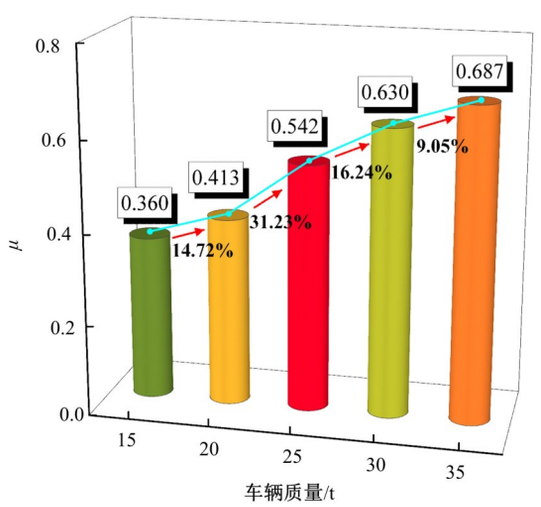


图 13　冲击系数变化趋势

Fig. 13　Trend of impact coefficient changes

4.3.4　集束度的影响

为研究栓钉布置集束度对车桥耦合系统动力性能的影响，分别对集束度为 0（栓钉均布）、0.04、0.06、0.08、0.12 和 0.31 等 6 种情况进行模拟。以车辆 80 km/h 的速度为例得到相应的结果见图 14，冲击系数与最大动、静位移见表 5，冲击系数随集束度变化的趋势见图 15。观察发现：均布栓钉情况下最大动位移、静位移均最小，而冲击系数最大；随着集束度由 0 增大到 0.31，最大动位移增大 3.9%，最大静位移增大 7.33%，冲击系数减小 8.61%。分析认为：集束度越大桥梁刚度越小，桥梁受力变形增大，导致最大动、静位移同时增大；同时，较柔的主梁通过振动消弱了冲击作用，一定程度上降低了冲击系数。

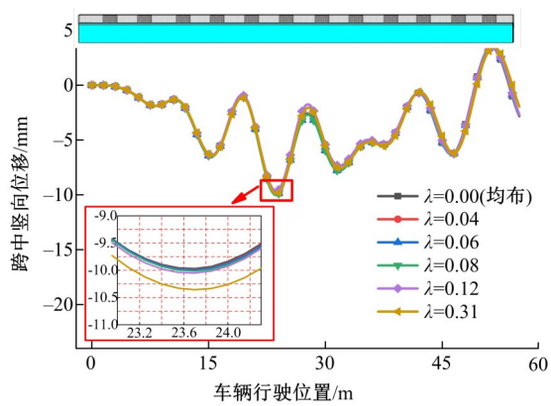


图 14　不同集束度动力响应

Fig. 14　Dynamic response to different cluster degrees

表 5　集束度模拟得到的最大动、静位移与冲击系数

Table 5　Maximum dynamic and static displacements and impact coefficients obtained from bundle degree simulation

位移与冲击系数	集束度					
	0（均布）	0.04	0.06	0.08	0.12	0.31
Δ_{max}/mm	9.967	9.986	9.994	10.016	10.051	10.356
Δ'_{max}/mm	6.263	6.300	6.315	6.347	6.400	6.722
μ	0.592	0.585	0.583	0.578	0.571	0.541

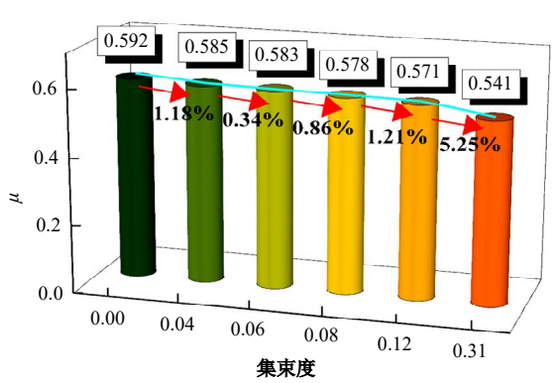


图 15　冲击系数随集束度变化趋势

Fig. 15　Trend of impact coefficient changes with cluster degree

5　结　论

（1）将装配式钢-混组合梁桥简化为有剪力连接区和无剪力连接区的分段刚度梁，并建立自振特性理论分析公式。由公式可知，集束度越大，刚度分段差异越显著，整体刚度和固有频率越低。

（2）当路面不平整度从 C 级路面变为 D 级路

面时,装配式组合梁桥最大动位移增大21.00%,冲击系数增大49.33%,高速行驶车辆在不平整路面上受到的激励使冲击力的频率与桥梁基频接近,增强车桥共振现象,从而引起显著的动力响应。

(3)在100 km/h以下的车速范围内,随着车速的增加,装配式组合梁桥的最大动态位移和冲击系数未呈现单调递增或递减的趋势。当车速从100 km/h提高到120 km/h时,跨中最大动位移增加20.15%,冲击系数增加68.10%。超过一定速度范围后,车桥耦合系统的动态响应显著增加,冲击系数和跨中竖向位移均呈现上升趋势。

(4)随着车体质量的增加,装配式组合梁桥的竖向位移增加,冲击系数随车体质量的增加呈递增趋势。当车体质量增加到35 t时,与15 t相比,最大动位移增加165.57%,最大静位移增加114.16%,冲击系数增加90.9%。限制车辆的总质量可以有效控制桥梁受到的动力影响,确保桥梁的结构安全和耐久性。

(5)集束度由0增大到0.31时,最大动位移增大3.9%,最大静位移增大7.33%,冲击系数减小8.61%。可见,随着集束度增大,装配式组合梁桥刚度减小,最大动、静位移同时增大;集束度增大时,较柔的主梁通过振动消弱了冲击作用,一定程度上减小了冲击系数。

参考文献:

[1] 韩万水, 陈艾荣. 侧风与桥梁振动对车辆行驶舒适性影响研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(4): 55-60.
Han Wan-shui, Chen Ai-rong. Effects of crosswind and bridge motion on ride comfort of road vehicles[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4): 55-60.

[2] Miguel L F F, Lopez R H, Torii A J, et al. Robust design optimization of TMDs in vehicle - bridge coupled vibration problems[J]. Engineering Structures, 2016, 126(1): 703-711.

[3] Wang L, Kang X, Jiang P. Vibration analysis of a multi-span continuous bridge subject to complex traffic loading and vehicle dynamic interaction[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(1): 323-332.

[4] Liu Y, Kong X, Cai C S, et al. Driving effects of vehicle-induced vibration on long-span suspension bridges[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 24(2): 1873-1891.

[5] 周勇军, 赵煜, 贺全海, 等. 刚构-连续组合桥梁冲击系数多因素灵敏度分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3): 97-101.
Zhou Yong-jun, Zhao Yu, He Quan-hai, et al. Muti-parameters sensitivity analysis of impact factors for rigid-continuous combined bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3): 97-101.

[6] 樊小虎, 吴红林. 车桥耦合振动研究方法综述[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(14): 4090-4099, 4106.
Fan Xiao-hu, Wu Hong-lin. Literature review of addressing interaction of vehicle-bridge vibration[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(14): 4090-4099, 4106.

[7] Gao Y M, Fan L, Yang W, et al. Mechanical behavior of prefabricated steel-concrete composite beams considering the clustering degree of studs[J]. Steel and Composite Structures, 2022, 45(3): 433-444.

[8] 范亮, 邬江红, 谭阳, 等. 集束钉群装配式钢-混组合梁界面滑移特性研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(18): 86-91.
Fan Liang, Wu Jiang-hong, Tan Yang, et al. Research on interface slip properties of assembled steel-concrete composite beams with cluster nail groups[J]. Building Structure, 2022, 52(18): 86-91.

[9] 范亮,徐英铭,谭阳. 集束群钉式装配组合梁界面滑移计算[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(9): 2533-2541.
Fan Liang, Xu Ying-ming, Tan Yang. Interface slip calculation of prefabricated steel-concrete composite beams with clustering studs[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(9): 2533-2541.

[10] Gao Y, Zhang H H, Jiang B J. Analysis on the vehicle-bridge coupled vibrations of long-span cable-stayed bridge based on multiscale model[J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(1): 402-410.

[11] 范晨, 王莹, 李兆霞. 以疲劳评估为目标的大跨钢箱梁桥车桥耦合动力分析方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(6): 236-242.
Fan Chen, Wang Ying, Li Zhao-xia. Vehicle-bridge coupling dynamic analysis method for the fatigue assessment of a long-span steel box-girder bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(6): 236-242.

[12] 贺建帅, 李奇, 王君杰. 高铁桥梁震时行车安全性评价的梁端变位限值研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 20(5): 1543-1554.

He Jian-shuai, Li Qi, Wang Jun-jie. Beam end displacement limits for high-speed railway bridges traffic safety evaluation during earthquake[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 20(5): 1543-1554.

[13] 李慧乐，夏禾. 基于车桥耦合随机振动分析的钢桥疲劳可靠度评估[J]. 工程力学，2017，34(2)：69-77.
Li Hui-le, Xia He. Fatigue reliability evaluation of steel bridges based on coupling random vibration analysis of train and bridge[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 69-77.

[14] 杨星星. 中小跨径钢桁梁桥的静动力特性研究[D]. 扬州：扬州大学土木工程学院，2018.
Yang Xing-xing. Research on static and dynamic characteristics of medium and small span steel truss girder bridges[D]. Yangzhou: College of Civil Engineering, Yangzhou University, 2018.

[15] 邓露，陈雅仙，韩万水，等. 中小跨径公路混凝土简支梁桥冲击系数研究及建议取值[J]. 中国公路学报，2020，33(1)：69-78.
Deng Lu, Chen Ya-xian, Han Wan-shui, et al. Studying impact factors for short-and medium-span simply supported concrete highway bridges and its suggested values[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 69-78.

[16] 李喜梅，王新，母渤海，等. 车辆荷载作用下双工字钢-混组合连续梁桥振动控制研究[J]. 中国公路学报，2022，35(7)：173-183.
Li Xi-mei, Wang Xin, Mu Bo-hai, et al. Research on vibration control of twin-I steel-concrete composite continuous girder bridge under vehicle load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7): 173-183.

[17] 李慧乐. 基于车桥耦合振动的桥梁动应力分析及疲劳性能评估[D]. 北京：北京交通大学土木工程学院，2016.
Li Hui-le. Dynamic stress analysis and fatigue performance assessment of bridges based on vehicle-bridge coupling vibration[D]. Beijing: College of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2016.

[18] Zhang M J, Li Y L, Wang B. Effects of fundamental factors on coupled vibration of wind-rail vehicle-bridge system for long-span cable-stayed bridge[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(5): 1264-1272.

[19] Zeng Q, Dimitrakopoulos E G. Seismic response analysis of an interacting curved bridge-train system under frequent earthquakes[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(7): 1129-1148.

[20] 冀伟，蔺鹏臻，邓露，等. 波形钢腹板PC简支箱梁桥的扭转振动频率分析[J]. 振动、测试与诊断，2017，37(4)：769-774，845.
Ji Wei, Lin Peng-zhen, Deng Lu, et al. Analysis the torsional vibration frequencies of PC box girder bridge with corrugated steel webs[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 769-774, 845.

[21] 罗锟，王鹏生，雷晓燕，等. 轨道-箱梁耦合振动模型试验设计与验证[J]. 铁道学报，2023，45(2)：139-145.
Luo Kun, Wang Peng-sheng, Lei Xiao-yan, et al. Model test design and verification of track-box girder coupling Vibration[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(2): 139-145.

[22] Deng L, Yu Y, Zou Q, et al. State-of-the-art review of dynamic impact factors of highway bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(5): 1-14.

[23] 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 bridge[J]. Journal of Dynamics and Control, 2016, 14(4): 289-300.

[24] 聂建国，刘明，叶列平. 钢-混凝土组合结构[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.

[25] 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.
An Li-peng, Li De-jian, Hu Li-hua, et al. Vehicle-bridge coupled dynamic response and parameter influence analysis on highway large span continuous girder bridge[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(6): 942-949, 1099.

[26] 桂水荣. 基于桥面不平顺公路梁桥车桥耦合随机振动研究[D]. 南京：东南大学土木工程学院，2017.
Gui Shui-rong. Research of deck irregularity excitation on highway vehicle-bridge coupling random vibrations[D]. Nanjing: College of Civil Engineering, Southeast University, 2017.

[27] 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)：908-915，1077.
Gui Shui-rong, Chen Shui-sheng, Wan Shui. Analy-

sis of consistent stimulus of road roughness on vehicle-bridge coupling nonstationary random vibrations [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 908-915, 1077.

[28] 徐华. 考虑车桥耦合振动的正交异性钢桥面板疲劳性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学土木工程学院, 2021.
Xu Hua. Fatigue behavior of orthotropic steel deck considering vehicle bridge coupling vibration[D]. Chongqing: College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, 2021.

[29] 王运金, 桂水荣, 陈水生. 连续梁桥车桥耦合振动分析的数值解法[J]. 华东交通大学学报, 2007(4): 25-29.
Wang Yun-jin, Gui Shui-rong, Chen Shui-sheng. An efficient algorithm for coupled vibration analysis of continuous bridges under moving vehicle[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007(4): 25-29.

[30] 周勇, 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 Yong, Xue Yu-xin, Li Ran-ran, et al. State-of-the-art of theory and applications of bridge dynamics load allowance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 31-50.

[31] 韩万水, 马麟, 院素静, 等. 路面粗糙度非一致激励对车桥耦合振动系统响应影响分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 81-90.
Han Wan-shui, Ma Lin, Yuan Su-jing, et al. Analysis of the effect of inconsistent stimulus of surface roughness on vehicle-bridge coupling vibrations[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 81-90.