

桥梁冲击系数影响规律研究

傅远红¹, 傅晨曦², 张泽龙³

(1. 南京市六合区公路事业发展中心, 江苏 南京 211500; 2. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014;

3. 东南大学, 江苏 南京 211189)

摘要: 桥梁在车辆荷载作用下的振动响应具有复杂性和不确定性。冲击系数作为衡量桥梁动力效应的重要指标, 受到车辆类型、车速及桥梁纵向位置等多因素影响。为揭示各因素对冲击系数的影响规律, 基于 ANSYS 有限元分析平台, 构建了车-桥耦合动力计算模型, 模拟不同类型车辆在多种工况下的过桥情形, 开展系列数值仿真研究, 并以 312 国道宁镇界至七乡河段为例, 通过提取桥梁不同纵向位置的竖向位移动力放大系数, 分析了车速、车辆类型与响应位置之间的耦合关系。结果表明: 高速状态下桥梁冲击效应显著增强, 跨中位置的动态响应最为敏感; 2 轴车辆产生的冲击系数较规范值更大。研究结果可为冲击系数合理修正和桥梁动力安全评估提供理论依据。

关键词: 桥梁工程; 桥梁冲击系数; 车-桥耦合; 动力响应; 有限元分析

中图分类号: U441+.3; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)12-0297-05

Study on Factors Influencing Bridge Impact Coefficients

FU Yuanhong¹, FU Chenxi², ZHANG Zelong³

(1. Nanjing Liuhe District Highway Development Center, Nanjing 211500, China; 2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 3. Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The vibration response of bridge under vehicle loads is characterized by complexity and uncertainty. The impact coefficient, as an important indicator for measuring the dynamic effect of bridges, is influenced by multiple factors, such as vehicle type, vehicle speed and longitudinal position along the bridge. To reveal the influence laws of various factors on the impact coefficient, based on the ANSYS finite element analysis platform, a vehicle-bridge coupled dynamic calculation model is established to simulate the bridge crossing situations of different types of vehicles under various working conditions, and a series of numerical simulation studies are carried out. Taking the Ningzhenjie - Qixianghe section of National Highway 312 as an example, the vertical displacement dynamic amplification coefficients at the different lengthwise positions of the bridge are extracted to analyze the coupling relationship between the vehicle speed, vehicle type and the response position. The results indicate that under the high-speed conditions, the impact effect of bridges is significantly enhanced, and the dynamic response at the mid-span position is the most sensitive. The impact coefficient generated by two-axle vehicles is larger than the specified value. The research results can provide a theoretical basis for the reasonable correction of impact coefficients and the dynamic safety assessment of bridges.

Keywords: bridge engineering; bridge impact coefficient; vehicle-bridge coupling; dynamic response; finite element analysis

0 引言

桥梁振动响应实质上会受到多种因素的共同影响, 因此桥梁动力冲击系数是一个受多因素影响的综合性系数, 仅孤立考虑桥梁跨径或基频等单一参数, 难以全面反映实际结构的动力响应特征^[1-2]。众

多研究表明, 桥梁的振动响应受各类车辆参数的影响。

在车辆参数方面, 车辆的质量、阻尼以及车速等均会影响桥梁的振动响应^[3]。研究表明, 随着车辆质量的增加, 桥梁的动挠度会随之增大, 并且上下波动效应更加明显, 更容易对桥梁结构造成破坏, 桥梁冲击系数则随车辆质量的增加而减小^[4]。此外, 车速对桥梁振动响应的影响较为复杂, 一些研究发现, 冲击系数随着车速的增加而增大, 也有研究表明, 冲击系数并不随车速单调增大或减小^[5]。国内外学者

收稿日期: 2025-03-17

作者简介: 傅远红(1978—), 男, 学士, 工程师, 从事装配式建筑研究工作。

通信作者: 傅晨曦(1986—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事桥梁工程设计与研究工作。电子信箱: 274292857@qq.com

对桥梁冲击系数与车速关系的研究并未达成共识,这说明车速可能与其他多种因素共同作用而影响桥梁的振动响应^[6]。因此在研究桥梁结构振动时,应充分考虑车辆参数、不同纵向位置等多方面因素的影响^[7]。

1 车-桥耦合动力计算模型建立

1.1 车辆模型

采用 ANSYS 有限元软件建立车辆模型,车体、车轮用梁单元模拟以形成车辆骨架,采用质量单元调整车体和车轮的质量特性,利用刚臂单元和弹簧阻尼单元模拟不同构件间的连接,并根据需要约束相应的节点自由度^[8]。通过调整单元参数,可以达到将车辆模拟成多刚体模型或者柔性体模型的目的^[9]。由于本文主要关注桥梁结构的响应而非车辆自身的响应,在此采用多刚体模型来模拟车辆的构件。

根据国内外的研究,本研究选取了相关参数较为成熟、典型和常用的 4 种车辆模型进行分析。第 1 车型为 5 轴大货车(车重 70 t),包含 3 节车身;第 2 车型为 2 轴货车(车重 27 t);第 3 车型为中等客车(车重 6 t);第 4 车型为小汽车(车重 2 t)。第 2~4 车型均为 2 轴汽车。4 种车辆类型及其配置参数见表 1。

表 1 车辆类型及其配置参数

车辆类型	车长/m	轴距/m	轴重分配比例
5 轴货车	16.8	3.0;6.0;1.3;1.3	0.1:0.3:0.2:0.2:0.2
2 轴货车	6.0	4.0	0.35:0.65
2 轴客车	8.5	4.5	0.46:0.54
2 轴汽车	4.5	2.6	0.44:0.56

1.2 车辆计算工况

本文采用 4 种计算工况,即 5 轴大货车、2 轴货车、中等客车和小汽车这 4 种类型车辆以单车形式排队过桥工况(单车道偏载),车速为 40~100 km/h。

1.3 车-桥耦合计算

由于车-桥梁耦合系统是一个时变系统,同时具有非线性特征,因此可在时域内进行车-桥耦合系统的动力响应分析。采用基于模态叠加法的数值计算方法来求解车-桥耦合动力响应^[10]。车辆-桥梁系统动力学方程为:

$$\begin{cases} \ddot{q}_v + 2\xi_v\omega_v\dot{q}_v + \omega_v^2q_v = \Phi_v^Tf_v \\ \ddot{q}_b + 2\xi_b\omega_b\dot{q}_b + \omega_b^2q_b = \Phi_b^Tf_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为模态坐标矩阵; Φ 为模态位移矩阵; ω 为模态圆频率矩阵; ξ 为模态阻尼矩阵; f 为荷载矩阵;下

标 v 和 b 代表车辆和桥梁。

式(1)中的 2 个方程分别为车辆和桥梁动力学方程^[11-12]。

可采用分离迭代法和分离同步法进行车-桥耦合振动方程的求解。

采用分离迭代法求解时,分别建立车辆子系统和桥梁子系统,然后通过车轮、路面接触位置的位移协调条件和车轮-路面相互作用力的关系建立联系,采用迭代法求解动力方程。数值求解时可采用 Runge-kutta 法、新型显示法、Newmark 法等多种方法进行求解^[10]。

其计算流程如下:首先,分别建立车辆子模型和桥梁子模型,进行模态分析并导出各个子系统的振型;然后,生成路面粗糙度随机样本和随机车流工况,根据车道和车速设置空间车辆的分布情况;接下来,通过动力耦合方程求解车辆过桥时引起的车-桥耦合系统振动响应;最后,提取动力计算结果进行进一步的分析^[13]。

2 工程实践

2.1 工程背景

本文以 312 国道宁镇界—七乡河段工程为例,探讨桥梁振动影响要素及规律。

312 国道宁镇界—七乡河段工程起于栖霞区与镇江句容市交界处,向西与规划七乡河过江通道南接线、仙麒大道(城市三环路)交叉,接 312 国道、346 国道南京龙潭港至绕越高速公路段。项目全长 1.998 km,主路采用一级公路兼顾市域快速路标准,辅道采用城市道路标准;主线高架采用双向 6 车道断面,断面宽度 27.05 m,主路设计车速 80 km/h,辅道设计车速 50 km/h。

2.2 桥梁有限元模型建立

根据设计图纸,在 ANSYS 中建立 2 跨 30 m 简支梁有限元模型(见图 1)。主梁、盖梁、墩柱、承台构件采用 SOLID45 实体单元,桥面附属设施采用 MASS21 质量单元模拟。



图 1 简支梁有限元模型

2.3 车辆过桥冲击系数分析

车辆过桥冲击系数是表征车辆动态荷载对桥梁结构动力放大效应的关键参数,其定义为桥梁结构在车辆移动荷载作用下产生的最大动态响应(如位移、应力或加速度)与对应静态响应的比值^[14]。

根据车-桥耦合计算模型的计算流程,计算5轴货车、2轴货车、2轴客车、2轴汽车这4种类型车辆以单车的形式在靠近中央分隔带的1车道行驶过桥时桥梁的动力响应,并根据不同纵向位置处的竖向动位移与静位移,计算竖向位移动力放大系数。

车道示意图见图2。

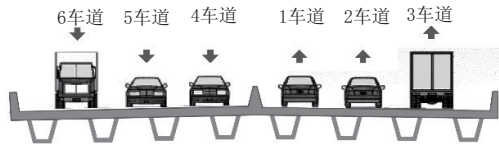


图2 车道示意图

图3至图6为5轴货车、2轴货车、2轴客车、2轴汽车这4种类型车辆以单车的形式过桥时,桥梁墩顶、1/8跨、1/4跨和跨中4个纵向位置处的竖向位移动力放大系数随车速的变化曲线。

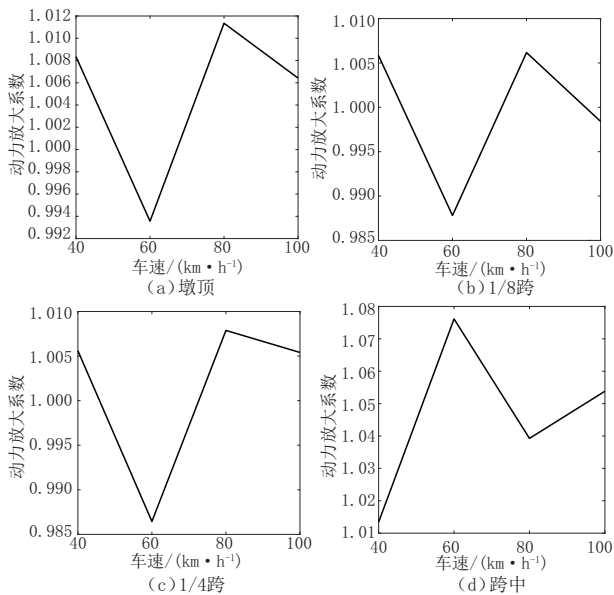


图3 桥梁竖向位移动力放大系数,5轴货车

整理4类车辆以不同速度过桥时,桥梁顶、1/8跨、1/4跨和跨中4个纵向位置处动力放大系数计算数据,具体数值见表1至表4。

由表2可知,对于5轴货车,桥梁竖向位移动力放大系数在跨中位置随着车速的增大而显著增长,尤其是从40 km/h到100 km/h,跨中位置的动力放大系数从1.013增加到1.054。其他纵向位置对车速变化较为敏感,但变化幅度小,例如墩顶位置的位移动力放大系数基本在0.994到1.011之间波动。这是因

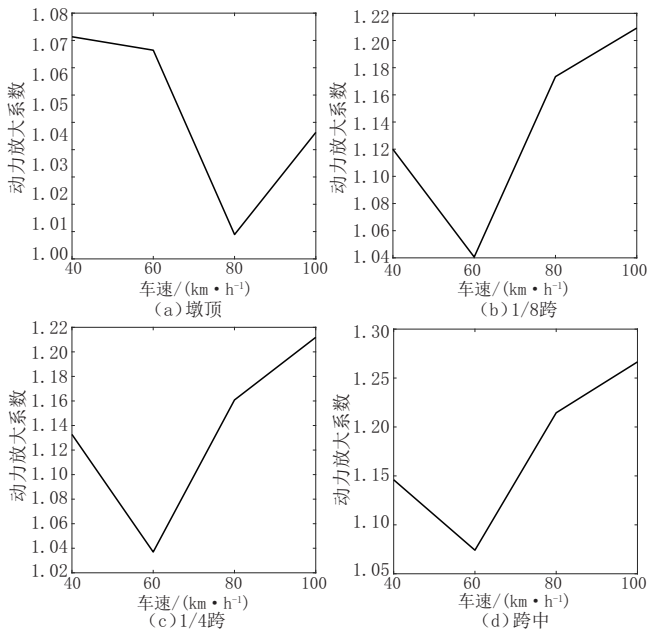


图4 桥梁竖向位移动力放大系数,2轴货车

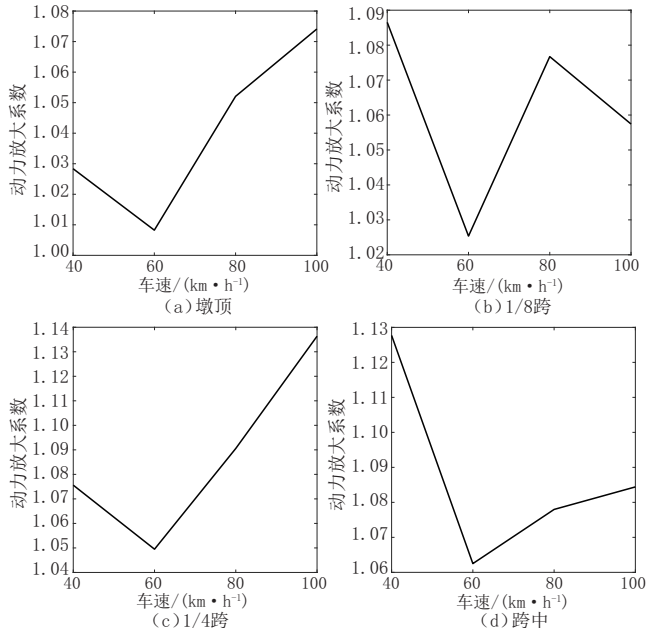


图5 桥梁竖向位移动力放大系数,2轴客车

为5轴货车重量较大,低速时桥梁响应更趋于静态效应,动力放大系数较低。高速下动态效应显现,但由于多轴分散负载,整体变化幅度相对较小。5轴货车行驶车速在60 km/h时,桥梁竖向位移动力放大系数出现了小于1的情况,这是因为5轴货车固定轴距而引起的激励频率大于自振频率,避开了共振区,且两者差别越大,动力放大系数越小,起到了一定的消振作用。

由表3可知,2轴货车行驶时桥梁竖向位移动力放大系数在100 km/h时达到最大值,各位置均高于低速工况。动力放大系数在墩顶位置和1/8跨位置略低,跨中位置稍高。特别是高速情况下(如100 km/h),

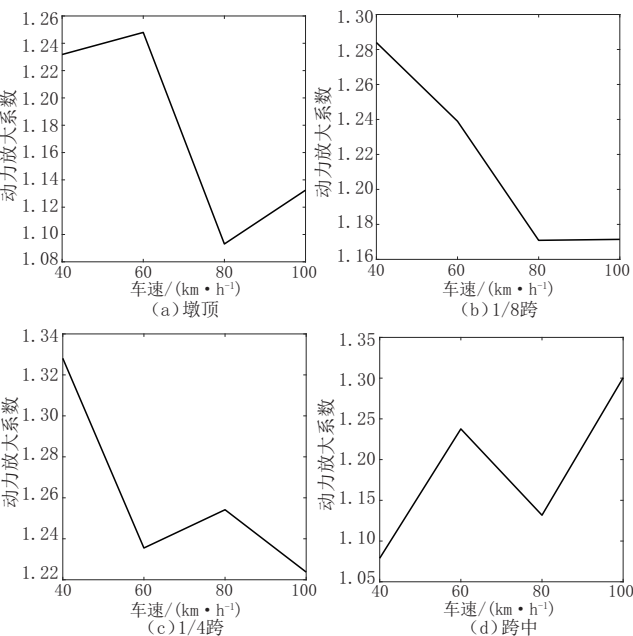


图6 桥梁竖向位移动力放大系数,2轴汽车

表2 以不同车速过桥时5轴货车的位移动力放大系数

车速/ (km·h ⁻¹)	纵向位置			
	墩顶	1/8跨	1/4跨	跨中
40	1.008	1.006	1.006	1.013
60	0.994	0.988	0.986	1.076
80	1.011	1.006	1.008	1.039
100	1.006	0.998	1.005	1.054

表3 以不同车速过桥时2轴货车的位移动力放大系数

车速/ (km·h ⁻¹)	纵向位置			
	墩顶	1/8跨	1/4跨	跨中
40	1.071	1.120	1.133	1.146
60	1.066	1.041	1.037	1.074
80	0.999	1.173	1.161	1.214
100	1.036	1.209	1.212	1.266

表4 以不同车速过桥时2轴客车的位移动力放大系数

车速/ (km·h ⁻¹)	纵向位置			
	墩顶	1/8跨	1/4跨	跨中
40	1.028	1.086	1.076	1.128
60	1.008	1.025	1.049	1.062
80	1.052	1.077	1.090	1.078
100	1.074	1.057	1.136	1.084

表5 以不同车速过桥时2轴汽车的位移动力放大系数

车速/ (km·h ⁻¹)	纵向位置			
	墩顶	1/8跨	1/4跨	跨中
40	1.232	1.284	1.328	1.079
60	1.248	1.239	1.234	1.238
80	1.093	1.171	1.254	1.132
100	1.132	1.171	1.224	1.300

跨中位置的位移动力放大系数达到最大值1.266,说明跨中是桥梁响应的最显著区域。

由表4可知,随着车速的增加,2轴客车过桥时

桥梁位移动力放大系数整体表现为跨中处大于墩顶处,其数值在不同纵向位置处表现不同,在墩顶位置及1/4跨位置处的位移动力放大系数随着车速增加存在明显增大趋势,但高速状态下1/8跨和跨中位置处的位移动力放大系数低于较低速度状态下。

由表5可知,对于2轴汽车,桥梁竖向位移动力放大系数随着车速变化显著,且不同纵向位置的变化趋势不一致。跨中位置处变化幅度最大,其数值从40 km/h的1.079增加到100 km/h的1.300,1/4跨位置的动力放大系数在车速为40、60 km/h时较高,但在80、100 km/h时略有下降。

当桥梁基频满足 $1.5\text{ Hz}\leq f\leq 14\text{ Hz}$ 时,在《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)中,冲击系数 μ 的计算式为:

$$\mu = 0.1767\ln f - 0.0157 \tag{2}$$

式中: f 为桥梁结构的基频。该项目桥梁结构基频 f 约为4 Hz,根据式(2)计算的桥梁位移动力放大系数约为1.229。

不同车辆类型的数值模拟计算结果与按照规范计算结果相比,5轴货车因轴距分布分散了动态荷载,冲击系数普遍低于规范值。2轴车辆中,客车因其轴距更长,荷载分布更为分散,有限元计算结果相较于规范计算值更小;货车和小汽车轴载更为集中,有限元计算结果与规范计算值更为接近,且轴距更短的2轴小汽车使桥梁产生了更大的位移动力放大系数。在冲击系数的计算中,可更为全面地考虑轴距分布的差别性以及桥梁振动响应的空间非均匀性,而非单一根据结构基频计算结果。

总体而言,车速对冲击系数和动力放大系数的影响具有显著规律性。随着车速的增加,尤其是在中速到高速(60~100 km/h)区间,车辆对桥梁的动态激励效应加剧,导致冲击系数和动力放大系数显著上升。特别是高速(80 km/h及以上)时,冲击系数和动力放大系数在跨中位置达到最大值,反映了车辆与桥梁的共振效应及车辆激励频率与桥梁振动模式的匹配。高速行驶时,车辆的动能较大,且与桥梁的振动频率更容易产生共振^[15],导致动态效应明显增强。

普遍来说,跨中位置对动态效应的响应最为敏感,跨中位置的竖向位移动力放大系数数值普遍较高,尤其在高速情况下,跨中位置的竖向位移动力放大系数普遍呈现出增大的趋势。而墩顶和1/8跨位置在车辆过桥时相对于跨中处表现为更小的竖向位

移动力放大系数,因为这些位置离支撑结构较近,振动产生的动态响应较小。

3 结 语

(1)车速是桥梁竖向位移动力放大系数的主要影响因素:高速下(80 km/h及以上),车辆对桥梁的动态作用显著增强,动力放大系数显著提高。特别是2轴货车和2轴汽车,高速引发的桥梁振动模态激发效应更为显著。

(2)桥梁竖向位移动力放大系数在不同纵向位置处的大小具有一定规律性:跨中位置的动力放大系数始终较高,因为跨中是桥梁动力响应的集中区域;墩顶位置的动力放大系数对车速变化较为不敏感,通常低于其他位置。

(3)车辆类型决定了桥梁位移动力放大系数的变化特征:不同类型车辆具有不同的轴距及轴重分布特性,5轴货车因多轴荷载分布,在一定程度上对动力效应存在一定抵消作用,而2轴车辆因轴载更为集中,使其局部冲击系数较规范值更大。

参考文献:

[1] 周勇军,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.

[2] 施颖,宣纪明,宋一凡.不平整度桥面下连续梁桥车桥耦合振动分析[J].桥梁建设,2009(6):15-18;22.

[3] 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.

[4] 蔺鹏臻,侯帅龙,王亚朋.高速铁路下承式连续刚构-拱组合桥的冲击系数研究[J].中国铁道科学,2023,44(3):73-80.

[5] 王亚东,石兴娜.车辆冲击荷载作用下桥梁振动响应分析[J].中国民航大学学报,2021,39(4):60-64.

[6] 周勇军,赵洋,赵煜,等.基于动载试验荷载效率的简支梁桥冲击系数研究[J].振动与冲击,2021,40(20):207-216.

[7] 桂水荣,陈水生,任永明.先简支后连续梁桥车辆冲击系数影响因素研究[J].公路交通科技,2011,28(5):54-60.

[8] 沈海鹏,陈徐均,黄恒,等.考虑路面不平顺的车桥耦合振动分析方法[J].陆军工程大学学报,2023,2(5):84-92.

[9] 邓露,段林利,何维,等.中国公路车-桥耦合振动车辆模型研究[J].中国公路学报,2018,31(7):92-100.

[10] 周勇军,薛宇欣,高徐军,等.基于模态叠加法的公路简支梁桥动力放大系数研究[J].交通运输工程学报,2023,23(6):146-155.

[11] 韩智强,谢刚,李路遥,等.大跨连续梁桥车桥耦合振动响应[J].科学技术与工程,2022,22(11):4588-4595.

[12] 王俊霞,左新黛,申林,等.基于车桥耦合振动的连续梁桥动力特性研究[J].公路交通科技,2024,41(4):73-79.

[13] 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.

[14] 邓露,何维,俞扬,等.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.

[15] 王贵春,李武生.基于车桥耦合振动的车辆舒适性分析[J].振动与冲击,2016,35(8):224-230.