基于SIMPACK的大跨连续 - 刚构体系车桥 耦合振动响应研究

张文涛,陈 宁*

湖南科技大学土木工程学院,湖南 湘潭

收稿日期: 2025年5月27日; 录用日期: 2025年6月20日; 发布日期: 2025年6月30日

摘要

随着交通运输业的快速发展,大跨连续-刚构体系桥在路网中的应用日益广泛。然而,车辆与桥梁之间的耦合效应会对桥梁结构的安全性、耐久性以及车辆行驶的舒适性产生重要影响。本文基于多体动力学 (MBD)与有限元分析(FEA)方法,在SIMPACK软件中建立车辆多体动力学模型,并结合ANSYS软件建立 大跨连续-刚构体系桥有限元模型,开展车桥耦合仿真分析。结果表明:单车通过五跨连续-刚构体系 桥梁时,各跨跨中的竖向位移时程响应关于中跨跨中对称。路面不平度激励下行车舒适性随车速增加而逐 渐降低;冲击系数在部分计算工况将超过规范限值。

关键词

桥梁工程,车桥耦合,ANSYS,SIMPACK,大跨连续 - 刚构桥,多体动力学,有限元分析,动态响应

Research on Vehicle-Bridge Coupling Vibration Response of Long-Span Continuous-Rigid Frame System Based on SIMPACK

Wentao Zhang, Ning Chen*

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: May 27th, 2025; accepted: Jun. 20th, 2025; published: Jun. 30th, 2025

*通讯作者。

Abstract

With the rapid development of the transportation industry, the application of long-span continuous-rigid frame bridge in the road network is becoming more and more extensive. However, the coupling effect between the vehicle and the bridge will have an important impact on the safety and durability of the bridge structure and the comfort of the vehicle. In this paper, based on multi-body dynamics (MBD) and finite element analysis (FEA) methods, a vehicle multi-body dynamics model is established in SIMPACK software, and a finite element model of a long-span continuous-rigid frame system bridge is established in combination with ANSYS software to carry out vehicle-bridge coupling simulation analysis. The results show that when the bicycle passes through the five-span continuous-rigid frame system bridge, the vertical displacement time history response of each span is symmetrical about the middle span of the middle span. The road roughness has a significant effect on the vehicle-bridge coupling vibration. The impact coefficient of the bridge gradually increases with the increase of the roughness level, and the driving comfort gradually decreases with the increase of the vehicle speed under the B-level road roughness excitation. The impact coefficient will exceed the standard limit in some calculation conditions.

Keywords

Bridge Engineering, Vehicle-Bridge Coupling, ANSYS, SIMPACK, Long-Span Continuous-Rigid Frame Bridge, Multibody Dynamics, Finite Element Analysis, Dynamic Response

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC Open Access

1. 引言

大跨连续刚构桥是一种结合了连续梁桥和刚构桥特点的桥梁形式,具有结构刚度大、抗震性能好、施工方便等优点,广泛应用于跨越河流、峡谷和海峡等复杂地形条件。随着桥梁工程技术的不断进步,大跨连续刚构桥在跨度、设计理论和施工技术等方面取得了显著进展,截至2024年,中国公路桥梁的总数已超过100万座[1],总里程位居世界第一。这些桥梁遍布全国各地,连接了城市与乡村、山区与平原,极大地改善了交通条件,促进了区域经济发展。然而,大规模基建项目的实施不仅带来了交通便利和经济效益,也对桥梁结构的安全性、耐久性和使用性能提出了更高的要求。

车桥耦合振动是指车轮和桥梁相互作用,引起桥梁运动的一种现象。当车轮驶过桥梁时,车轮与桥 梁之间会形成相互作用力,这些力会向桥梁传递,引起桥梁的振动。如果桥梁受到的振动力超过了其耐 受程度,就会出现碎裂、倒塌等情况。车辆与桥梁之间的动态相互作用不仅影响桥梁的结构安全性和耐 久性,还会对车辆的行驶平稳性和乘客的舒适性产生重要影响。

本文基于大跨连续 - 刚构体系桥(即边跨 + 次中跨 + 中跨 + 次中跨 + 边跨)五跨结构建立 ANSYS 有限元模型,并进行相应的模态分析,以多体动力学 SIMPACK 软件建立三种不同类型的车辆模 型,考虑路面不平度激励,通过刚柔耦合法构建了大跨连续 - 刚构体系的车桥耦合振动模型,对比分析 了车重、不平顺等级、桥梁阻尼、车辆数目排列方式等对车桥耦合振动响应及行车舒适性的影响。

本文的研究技术路线如图1所示。



Figure 1. Technical route of this article 图 1. 本文技术路线

2. 车 - 桥耦合系统的建立

2.1. 车辆模型

在车辆多体动力学系统中,各构件以刚体的形式存在于系统之中,其运动方程如下:

$$\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{\nu}} \boldsymbol{Z}_{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{\nu}} \boldsymbol{Z}_{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{K}_{\boldsymbol{\nu}} \boldsymbol{Z}_{\boldsymbol{\nu}} = \boldsymbol{F}_{\boldsymbol{\nu}} \tag{1}$$

式中: M_v — 一车辆的整体刚度矩阵; C_v — 一车辆的整体阻尼矩阵; K_v — 一车辆的整体刚度矩阵; F_v — 一车辆的荷载列向量; $\ddot{Z}_v \propto \dot{Z}_v$ — 一车辆的加速度、速度和位移矢量。

单个车辆为分析其动力学过程,将其简化为车体、轮轴和车轮三种刚体构建组成,且这三种刚体不 发生形变,除轮轴外每个刚体均考虑前后、左右、上下、摇头、点头、侧滚 6 个方向的自由度,各个刚 体之间通过力元和铰接相互连接。车辆在桥面行驶时,车辆各部件沿纵向,即桥梁跨径方向的振动以及 由此对桥梁本身的横竖向振动影响很小,可以忽略不计,故在模型仿真动力学分析中不考虑这一自由度。 简化自由度后便为只考虑车体其他方向的五个自由度,以及车轮的横竖向自由度;按上述方法,将三种 车辆分别简化为一个具有 13、17、21 个自由度的二、三、四轴车辆动力学模型。自由度表示如下:

$$U = \left(Z_{\nu}, Y_{\nu}, \varphi_{\nu}, \theta_{\nu}, \phi_{\nu}, Z_{s1}, Y_{s1}, Z_{s2}, Y_{s2}, Z_{s3}, Y_{s3}, Z_{s4}, Y_{s4}\right)$$
(2)

$$U = \left(Z_{v}, Y_{v}, \varphi_{v}, \theta_{v}, \varphi_{v}, Z_{s1}, Y_{s1}, Z_{s2}, Y_{s2}, Z_{s3}, Y_{s3}, Z_{s4}, Y_{s4}, Z_{s5}, Y_{s5}, Z_{s6}, Y_{s6}\right)$$
(3)

$$U = \left(Z_{\nu}, Y_{\nu}, \varphi_{\nu}, \theta_{\nu}, \phi_{\nu}, Z_{s1}, Y_{s1}, Z_{s2}, Y_{s2}, Z_{s3}, Y_{s3}, Z_{s4}, Y_{s4}, Z_{s5}, Y_{s5}, Z_{s6}, Y_{s6}, Z_{s7}, Y_{s7}, Z_{s8}, Y_{s8}\right)$$
(4)

式中:v表示车体,s表示车轮;Y表示横向,Z表示竖向, φ 表示摇头, ϕ 表示侧滚, θ 表示点头;车辆动力学模型如下图 2 所示。

2.2. 桥梁柔性体模型

桥梁模型作为车辆行驶的承载结构,一般以柔性体的形式存在于整个耦合仿真系统中,柔性体上任意一点的位置 P 可表达为[2] [3]:



$$\boldsymbol{r}^{p}(\boldsymbol{c},\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{A}(t) \big(\boldsymbol{r} + \boldsymbol{c} + \boldsymbol{u}(\boldsymbol{c},t) \big)$$
(5)

式中: A为由参考坐标系到惯性坐标系体的转换旋转矩阵; r为体在参考坐标系中的位置; c为点 P在体的参考坐标系非变形状态下的位置; u(c,t)为柔性体变形向量。

通过形函数 $\varphi_i(c)$ 和振型坐标 $q_i(t)$ 的线性组合,柔性体的变形 u(c,t) 的 Ritz 近似为:

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{c},t) = \sum_{j=1}^{n_q} \varphi_j(\boldsymbol{c}) q_j(t)$$
(6)

根据 Ritz 和 Hamilton 原则,采用变分法,运动方程可描述为[4]:

$$M(q) \begin{cases} \alpha \\ \dot{\omega} \\ \dot{q} \end{cases} + k_{\omega} (\omega, q, \dot{q}) + k(q, \dot{q}) = h$$
(7)

式中: M 为质量矩阵; k_{ω} 为回转和离心项广义矩阵; k < h 分别为内力、外力的广义力矩阵; $\alpha < \omega < q$ 为与时间相关的向量,分别表示绝对加速度、角速度和模态坐标。

2.3. 车桥耦合振动理论

车轮和桥面的接触点位置,车轮与桥面所受荷载是一组大小相等,方向相反的相互作用力,由此分 别建立动力学方程如下,联立求得车桥耦合振动方程。

$$\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{\nu}} \boldsymbol{\ddot{Z}}_{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{\nu}} \boldsymbol{\dot{Z}}_{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{K}_{\boldsymbol{\nu}} \boldsymbol{Z}_{\boldsymbol{\nu}} = \boldsymbol{F}_{\boldsymbol{\nu}\boldsymbol{b}} + \boldsymbol{F}_{\boldsymbol{\nu}\boldsymbol{g}}$$
(8)

$$\boldsymbol{M}_{b}\boldsymbol{\ddot{Z}}_{b} + \boldsymbol{C}_{b}\boldsymbol{\dot{Z}}_{b} + \boldsymbol{K}_{b}\boldsymbol{Z}_{b} = \boldsymbol{F}_{bv}$$

$$\tag{9}$$

式中: M_v 、 M_b 、 C_v 、 C_b 、 K_v 、 K_b 分别表示为车辆与桥梁的质量、阻尼、刚度矩阵, \ddot{Z}_v 、 \ddot{Z}_b 、 \dot{Z}_v 、 \dot{Z}_b 、 Z_v 、 Z_b 分别表示车辆与桥梁的加速度、速度和位移矩阵; F_{vb} 和 F_{bv} 表示为车辆和桥梁的相互作用 力, F_{vv} 表示车辆所受的重力荷载矩阵。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_{b} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{M}_{v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{Z}}_{b} \\ \ddot{\boldsymbol{Z}}_{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{b} + \boldsymbol{C}_{b-b} & \boldsymbol{C}_{b-v} \\ \boldsymbol{C}_{v-b} & \boldsymbol{C}_{v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{Z}}_{b} \\ \dot{\boldsymbol{Z}}_{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{b} + \boldsymbol{K}_{b-b} & \boldsymbol{K}_{b-v} \\ \boldsymbol{K}_{v-b} & \boldsymbol{K}_{v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{Z}_{b} \\ \boldsymbol{Z}_{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{b-r} \\ \boldsymbol{F}_{v-r} + \boldsymbol{F}_{vg} \end{bmatrix}$$
(10)

式中: C_{b-b} 、 C_{b-v} 、 C_{v-b} 、 K_{b-b} 、 K_{b-v} 、 K_{v-b} 、 F_{b-r} 、 F_{v-r} 为与时间变量相关的附加项。

2.4. 车轮与桥面接触

SIMPACK 通过多体动力学模拟汽车车轮与桥梁表面接触的相互作用,将车辆和桥梁视为多个刚体

和柔性体的组合,考虑其运动和受力。车轮围绕车轴作单向转动,刚性车轮与柔性体桥面通过力元接触。 SIMPACK 支持多种接触方式处理车桥之间的耦合关系,包括点接触模型(Point Contact)、面接触模型(Surface Contact)、Hertz 接触模型、非线性接触模型等,能够根据不同的需求模拟车轮与桥面的相互作用,本研究为点接触模型。如下图 3 所示。



Figure 3. Wheel-road contact model 图 3. 车轮与路面接触模型

2.5. 基于 ANSYS 和 SIMPACK 联合仿真方法

通过 ANSYS 进行桥梁有限元建模,对其进行模态与子结构分析,将结构自由度由模型响应主节点的自由度来表达,输出包含桥梁外形信息的.cdb 文件和包含桥梁结构矩阵的.sub 文件,通过接口导入 SIMPACK 中生成.fbi 桥梁柔性体文件;路面不平度作为激励文件施加在道路路线上。车体与车轴采用一系悬挂连接,一系悬挂在 SIMPACJK 中用 5 号力元模拟。力元为多体结构之间理想的传力结构,通过设定相应的刚度和阻尼系数,模拟车体与车轴两个刚体的力学传递特性。桥梁对应点位建立采用移动 marker 点,车轮与桥面接触点采用 43 号力元连接。

根据陈[5]和韩[6]车辆的相关基本参数建立三种车辆耦合振动分析的汽车模型,同时综合考虑车体的 俯仰运动、沉浮振动以及各轮轴悬挂系统的随机振动特性。三种类型车辆的动力学仿真模型如下图 4 所 示。



Figure 4. Three dynamic vehicle models 图 4. 三种动力学车辆模型

本研究基于 SIMPACK 建立的两轴货车、三轴重载车辆和四轴拖挂车辆,在进行仿真分析前,需分别进行静平衡计算,以验证模型建立是否正确以及达到计算要求。验证结果如下,残余加速度分别为 1e-9 m/s², 1e-11 m/s², 1e-7 m/s², 远小于标准值 0.01 m/s²,则可视为模型建立无误。

3. 工程实例与评价标准

3.1. 工程实例

本文以某地区大跨连续 - 刚构体系大桥为研究对象,根据桥梁参数建立迈达斯模型进行静力参数分析,建立有限元 ANSYS 模型将其子结构缩减分析后导入 SIMPACK 中进行车桥耦合振动分析。桥梁的 相关参数如下。 连续梁 - 刚构桥桥跨布置为(80 + 3 × 150 + 80) m, 主梁采用单箱单室截面, 箱底横向水平, 桥梁平 面位于直线上, 采用纵、竖、横三向预应力混凝土结构。单幅桥面宽度: 0.525 m (防撞护栏)+11.95 m (车 行道)+0.525 m (防撞护栏); 主梁立面图如图 5 所示。



图 5. 桥梁侧面图

根据桥梁参数建立采用 beam188 单元建立 ANSYS 有限元模型,共1358 个节点,对桥梁进行自振频率计算,得到下面前 10 阶的振型,由表 1 可知,桥梁的一阶计算频率为 0.858,根据 JTG D60-2015《公路桥涵设计通用规范》计算所得冲击系数规范值为 0.05。

模型进行子结构缩减后导入 SIMPACK,前后频率振型对比如下表1所示。

振型阶次	导入前频率(Hz) (rad/sec)	导入后频率(Hz) (rad/sec)	误差
1	0.858	0.853	0.3%
2	1.007	1.000	0.7%
3	1.079	1.060	1.9%
4	1.224	1.189	2.9%
5	1.266	1.177	3.9%
6	1.321	1.273	4.8%
7	1.421	1.404	1.2%
8	2.049	2.019	1.5%
9	2.238	2.214	1.1%
10	2.255	2.255	0%

 Table 1. Frequency change before and after bridge model import

 表 1. 桥梁模型导入前后频率变化

从上表 1 中可以看出,桥梁模型导入前后前 10 阶模态基本一致,最大误差为第六阶模态,误差为 4.8%, SIMPACK 在进行计算时,一般只需要前几阶模态满足要求即可达到计算的精度,故可认为桥梁模 型在导入前后满足车桥耦合计算的要求。

3.2. 路面不平度

研究表明,桥梁上的路面不平度可视为平稳的高斯随机过程,一般采用级数方法生成相应的功率谱 密度函数描述其统计特性进行模拟。忽略桥梁平面的横向相关性,以桥梁跨径方向为横坐标,则路面不 平度便可表示为关于桥长方向的一维随机过程。

相应的功率谱密度函数根据路面等级的不同,可表示如下[7]:

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\omega}$$
(11)

式中,*n*为空间频率,为波长 λ 的倒数; *n*₀为空间参考频率,取 0.1 m⁻¹; *ω*为拟合功率谱密度函数的指数,一般取 2, *G_a*(*n*₀)为路面不平整系数。国际标准 ISO-8608 按功率谱密度分为 "A、B、C、D、E"由好到差 5 个等级,分别取路面不平整系数为 2×10⁻⁶ m³、6×10⁻⁶ m³、20×10⁻⁶ m³、60×10⁻⁶ m³、200×10⁻⁶ m³; 本研究按照国际标准取值。采用谐波叠加法原理[8],选取三角级数进行叠加生成逼近的任意一个波形,以桥梁起点为初始坐标原点,沿桥梁跨径方向距离起点坐标为*x* 值的任意一点路面不平度可表示为:

$$r(x) = \sum_{k=1}^{N} a_k \cos(\omega_k x + \varphi_k)$$
(12)

式中, $a_k = \sqrt{4G_d(n_k)\Delta n}$; $\Delta n = (n_k - n_l)/N$; $n_k = n_l + (k - 1/2)\Delta n$, $k = 1, 2, \dots, N$; $n_k \approx n_l$, 为空间频率的 上限和下限; 原频率 $\omega_k = 2\pi n_k$; φ_k 为相位角。

本文采用德国功率谱密度函数,取A、B、C、D、E5个等级,计算结果生成的路面不平度样本如图 6所示。



Figure 6. Road surface irregularity of each grade 图 6. 各等级路面不平度

表 2 表明路面不平度 A、B、C、D、E5 个等级的最大峰值依次是 0.65、1.39、2.0、4.77、7.48 cm, 随着路面功率谱密度值的不断增大,相应的路面起伏也在增大,桥面状况恶化加剧,平顺性减小。

3.3. 冲击系数

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60-2015),冲击系数 μ 的计算公式[9]:

$$\mu = \frac{Y_{dmax}}{Y_{jmax}} - 1 \tag{13}$$

式中: *Y_{dmax}*表示车辆通过桥梁时,桥梁产生的最大动力响应值, *Y_{jmax}*表示通过桥梁时,桥梁的最大静力 响应值,两者均为时程曲线中的最大值,可以体现车辆通过桥梁的动力响应情况。

可以用极低速 0.5 m/s 的车速通过桥梁时,此时对应的最大动响应即为 Y_{jmax},其余正常速度下的动响 应即为 Y_{dmax}。

3.4. 舒适度评价指标

Sperling 指标是一种广泛应用的乘车舒适度评价指标。主要考虑为振动加速度信号的功率谱密度,对 其进行频域分析计算,得出反应乘坐舒适度的数值,确定出个体对于振动的敏感程度。计算方法[10]如下 表2所示。

Table 2. Comfort calculation

表 2. 舒适度计算

振动	频率	计算
	$0.5 \text{ Hz} < f \le 5.9 \text{ Hz}$	$F(f) = 0.325 f^2$
竖向振动	$5.9 \text{ Hz} < f \le 20 \text{ Hz}$	$F(f) = 400/f^2$
	20 Hz < f	F(f) = 1
	$0.5 \text{ Hz} < f \le 5.4 \text{ Hz}$	$F(f) = 0.8f^2$
横向振动	5.4 Hz < $f \le 26$ Hz	$F(f) = 650/f^2$
	26 Hz < <i>f</i>	F(f) = 1

$$W_{i} = 0.896 \sqrt[10]{\frac{a^{3}}{f}} \cdot F(f)$$
(14)

$$W = \sqrt[10]{W_1^{10} + W_2^{10} + \dots + W_n^{10}}$$
(15)

其中: W_i 为无量纲参数; a为振动加速度(m/s²); f为振动频率; F(f)为频率加权函数,反映人体对不同频率振动的敏感程度。

4. 车桥系统动力响应

4.1. 车速对桥梁动力响应的影响

为了研究不同车速对车桥耦合振动动力学响应的影响,采取控制变量法,将车体重量(两轴和三轴车辆)、桥面不平整度(B级)作为恒定值不变,计划设置40、60、80、100、120 km/h 共五种不同速度分别匀 速直线通过桥梁,计算分析各个响应状态下的桥梁位移、振动加速度、动力冲击系数等反应趋势。

选定桥梁阻尼为 0.02, 基准车速 60 km/h, 路面不平度 A 级, 两轴车辆(左)与三轴车辆(右)分别匀速 通过 610 米连续 - 刚构体系桥梁时, 各跨跨中位移挠度时程曲线如图 7 所示。



Figure 7. Vertical displacement time history curve of each span 图 7. 各跨跨中竖向位移时程曲线

从图中可以看出,两轴、三轴车辆通过桥梁时的位移时程响应趋势变化基本相同,三轴车辆行驶产 生的动力时程较大,这与车辆的重量有关。车辆从左往右行驶经过五跨桥梁,各跨跨中的竖向挠度时程 曲线峰值基本上都发生在车辆行驶在所在跨中间位置,车辆行驶在次中跨跨中时竖向挠度最大,中跨跨 中竖向挠度较次中跨更小,边跨跨中竖向位移挠度最小。跨中位置在同等动力荷载作用下,两端固结的 桥梁比支座连接的竖向挠度更小;边跨至过渡墩一侧的桥梁由于跨径变小,相应的挠度也较小。

此外,车辆行驶在其余跨时,对本跨跨中的影响亦有区别。从图中可以看出,车辆行驶在次中跨时, 对边跨跨中的时程响应影响较大;两轴车辆行驶时,使得位移上升了 0.3 mm,三轴车辆使得位移上升了 1.8 mm。次中跨跨中位移时程响应在车辆行驶在边跨时影响较大,次中跨时影响较小,这同样是因为固 结墩刚性节点和支座墩连接的区别。中跨跨中挠度受相邻两跨车辆动力荷载传递的影响最小,车辆行驶 在次中跨左时,对次中跨右的挠度时程曲线也有轻度影响,反之亦然。

4.1.1. 桥梁跨中竖向位移与车速的关系

两轴车辆行驶时,中跨跨中竖向位移时程曲线在不同车速状态下的响应如图 8 所示,从图中可以看 出,不同车速下最大竖向位移值都在 0.7 mm 上下浮动,可知车速对中跨跨中的最大位移影响并不显著; 从趋势上看,车速增大,相应的跨中竖向位移轻度增大。为了验证结论,增强对比,选用不同车速下的 边跨和次中跨的跨中位移时程响应添加对照,如下图所示。





从图 9 可以看出,边跨跨中的位移时程响应随车速的变化并不明显,车辆在行驶到跨中位置竖向位移最大,峰值在 0.35 mm 上下浮动;同时,在车辆行驶到次中跨跨中位置时,会带动边跨跨中向上振动,振动幅值随车速变化不明显,均在 0.3 mm 上下浮动。从速度分析比较,车速在 120 km/h 时跨中竖向挠度最大。



Figure 9. The mid-span displacement response time history of side span and sub-middle span at different speeds 图 9. 不同车速下边跨、次中跨跨中位移响应时程

次中跨跨中位移时程的图形曲线显示,跨中竖向位移峰值出现在车辆行驶在对应跨中位置,在 0.9 mm 上下浮动;车辆在相邻跨行驶时,对本跨的跨中位移振动亦有影响,在边跨跨中位置时影响最大,于 0.3 mm 上下浮动,在中跨行驶时对次中跨的影响较小,中跨跨中位置时于 0.1 mm 上下浮动。

选取上述两轴车辆以 60 km/h 速度行驶,各跨跨中的振动加速度如下图所示。其中中跨振动加速度 峰值最大,为0.0097 m/s²;次中跨次之,为0.0067 m/s²;边跨的振动加速度最小。且从图中可以看出, 左右边跨和次中跨的振动响应关于中跨对称分布,峰值几乎相等。为对比不同车速下的桥梁跨中振动加 速度,选取前面具有代表性的左次中跨和中跨的时程响应,进行不同车速下的比照分析,如下图所示。

由图 10 可知,振动加速度峰值同样出现在车辆行驶在跨中位置时。次中跨的振动加速度随车速变化 趋势明显,随车速的增大振动加速度峰值在逐渐增大,最大值为 0.0096 m/s²。相对而言,车速 80、100、 120 km/h 比车速 40、60 km/h 的振动响应更大,其中最大值出现在车速 80 km/h 行驶时,相应的振动加速 度最大值为 0.0132 m/s²。这可能与中跨两侧固结,次中跨一端支座连接有关。



图 10. 跨中竖向振动加速度

4.1.2. 冲击系数与车速的关系

由图 11 可以看出,各跨冲击系数随车速的变动并非呈现单一的线性关系,在现有的车辆参数下,两 轴车辆中跨的冲击系数随车速的增加而总体趋势在增大,在车速 100 km/h 时,冲击系数有些许下降,这 可能是因为这种状态下车辆的荷载频率与桥梁的自振频率并不接近,桥梁的自振频率大于车辆荷载频率 的影响,从而减少共振效应,进一步降低冲击系数;其它跨跨中冲击系数较小,随车速的变化并无明显 趋势,在 0.02~0.06 之间上下浮动。三轴车辆的冲击系数变化幅度较二轴车辆更缓,由于车体体积、质量、 轴距等相对于二轴车辆更大,相应的车辆对桥梁的荷载频率在降低,对桥梁自振的干扰影响在增强。

行车舒适度主要与车辆振动加速度有关,主要为通过测量汽车行驶过程中的座椅、地板等位置的振动加速度,进行计算得出 Sperling 指标。以两轴和三轴车辆分别以五种车速匀速通过桥梁,相应的舒适度指标变化如图 12 所示。

图 12 显示两轴和三轴车辆的 Sperling 指标较大,从图上看,两轴和三轴车辆随车速的增大而呈逐渐 增大态势,随车速的增加而增加,表明单一车辆的车速与舒适度指标成线性递增关系。此外,两轴车辆 与三轴车辆相比,整体的行车舒适性下降,这可能与三轴车辆的弹簧阻尼增大,整体减振效应增强有关。



Figure 11. Impact coefficient at different speeds 图 11. 不同车速下的冲击系数



Figure 12. Driving comfort changes with vehicle speed 图 12. 行车舒适性随车速变化

4.2. 路面不平度对车桥耦合振动响应的影响

研究路面不平度对车桥振动的影响,选取桥梁阻尼、车重(两轴和三轴)、车速 60 km/h 等不变量,路 面不平度 A、B、C、D、E 共五种等级工况,等级程度由左往右表明路况破环程度逐渐加剧。以两种车型 分别匀速通过大跨连续刚构桥,采用五种不同的桥面平整度,计算分析相应的路面不平度对桥梁振动加 速度的影响。

车辆以 60 km/h 行驶通过桥梁,由 4.1 可知,桥梁的各跨跨中振动加速度左右边跨和次中跨的振动加速度对称,故选取一边的桥梁跨径进行分析路面不平度对其的影响。如下图所示,(左)两轴车辆和(右)三轴车辆从上往下依次为边跨、次中跨和中跨,三跨跨中振动加速度随路面不平度的时程响应,具体分析如下。

图 13 表明整体上桥梁各跨中的振动加速度响应与路面不平度等级成正相关,不平顺程度越大,桥梁 的振动响应越大,振动幅值在逐渐增大。从两轴车辆行驶在桥面,相应的跨中振动加速度响应得出:边 跨和次中跨的振动加速度幅值在 0.04 m/s² 内,且受相邻跨径的影响较大,两者振动效应互相影响的趋势 明显,影响程度约为振动响应峰值的一半。



Figure 13. Vibration acceleration response under road irregularity 图 13. 路面不平度下的振动加速度响应

三轴车辆由于车重、体型增大,对桥梁的动荷载传递能力在增强,尤其在路面不平度的情况下,相应振动响应也被逐渐放大。从图上分析可以得到,各跨振动加速度随着路面不平度等级增加的增长幅值较两轴车辆有了较大的提高,振动峰值由 0.06 m/s²升级到 0.3 m/²;且中跨振动响应较其他跨反应更剧烈。

5. 结论

 当车辆以某种特定工况通过五跨连续刚构桥时,各跨跨中的竖向位移关于中跨中心纵向镜像对称, 位移相差很小,故在进行其他单一变量影响下的振动响应分析时,可仅选择半边进行分析。

2) 车速对车桥耦合振动响应有重大影响。当控制其余变量不变,车速增大时,各跨跨中竖向位移增 幅并不明显,而振动加速度峰值随车速的增大而缓慢增大;车速变化与冲击系数并无明显的线性关系, 各跨冲击系数随车速的增加变化也并不相同。在B级路面条件下,行车舒适性随着车速的增大而逐渐减 小。车辆的不同行驶速度将产生不同的轮-桥接触力,对桥梁的动荷载冲击效应不同,则车桥耦合振动 响应也不同。

3) 路面不平度对桥梁的振动响应以及行车舒适性有重要的影响。路面不平度等级越高,粗糙度越强, 桥梁的振动响应越大,竖向位移和加速度振动幅值也越大,乘车舒适性也越来越差;冲击系数随粗糙度 越强而直线上升,成正相关,边跨和中跨在部分路面等级中超过规范限值。

参考文献

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.

- [2] Dietz, S., Hippmann, G. and Schupp, G. (2002) Interaction of Vehicles and Flexible Tracks by Co-Simulation of Multibody Vehicle Systems and Finite Element Track Models. *Vehicle System Dynamics*, 37, 372-384. <u>https://doi.org/10.1080/00423114.2002.11666247</u>
- [3] Rose, M., Keimer, R., Breitbach, E.J. and Campanile, L.F. (2004) Parallel Robots with Adaptronic Components. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **15**, 763-769. <u>https://doi.org/10.1177/1045389x04043900</u>
- [4] Wallrapp, O. (1994) Standardization of Flexible Body Modeling in Multibody System Codes, Part I: Definition of Standard Input Data. *Mechanics of Structures and Machines*, 22, 283-304. <u>https://doi.org/10.1080/08905459408905214</u>
- [5] 陈宁. 侧风作用下桥上汽车行车安全性及防风措施研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [6] 韩万水.风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[D]:[博士学位论文].上海:同济大学,2006.
- [7] 李运通. 公铁两用简支钢桁梁桥车桥耦合振动分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [8] 郑海腾, 李尚平, 李冰, 等. 基于谐波叠加法的标准路面谱重构[J]. 机械研究与应用, 2014, 27(6): 82-83, 86.
- [9] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [10] 何涛.风载作用下斜拉桥车桥耦合振动及行车舒适性研究[D]:[硕士学位论文]. 厦门:厦门理工学院,2016.