

# 基于SIMPACK平台的随机车流与风联合 作用下桥梁动力响应分析

熊涛<sup>1</sup>, 韩艳<sup>2</sup>, 马行川<sup>1</sup>, 李前名<sup>1</sup>, 严乃杰<sup>3</sup>, 张非<sup>2</sup>, 胡朋<sup>2\*</sup>

(1. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司武汉分公司, 湖北武汉 430074; 2. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南长沙 410114; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京市 100081)

**摘要:**为解决传统随机车流与风联合作用下桥梁动力响应计算的耗时问题, 该文先以某钢箱连续梁桥为工程背景, 在商业软件Ansys和SIMPACK中分别建立桥梁有限元模型和车辆模型, 依次计算单个车辆荷载作用下、风荷载作用下以及多个车辆荷载作用下的桥梁动力响应, 以验证桥梁动力响应的可叠加性。在此基础上, 采用蒙特卡罗法生成随机车流样本, 通过已验证的桥梁动力响应可叠加性, 计算得到不同随机车流状况、不同车速以及不同风速时随机车流与风联合作用下的桥梁动力响应。研究结果表明: 桥梁动力响应叠加方法能有效提高计算效率; 风荷载主要影响桥梁的横向响应, 而车辆荷载主要影响桥梁的竖向响应; 随着车流由稀疏变成密集, 桥梁主跨的竖向位移与速度的标准差及其增幅均大于边跨的, 而边跨的竖向加速度标准差及其增幅却大于主跨的; 随着车速提高, 桥梁的竖向位移标准差和竖向速度标准差均逐渐变大, 而边跨的竖向加速度标准差先增加后减小; 随着风速的提高, 桥梁的横向响应标准差总体上逐渐变大, 且主跨的增幅要大于边跨的。

**关键词:** 随机车流; 风荷载; 连续梁桥; 动力响应; SIMPACK

中图分类号: U442

文献标志码: A

## Dynamic Response Analysis of Bridge under Combined Action of Random Traffic Flow and Wind Based on SIMPACK Platform

XIONG Tao<sup>1</sup>, HAN Yan<sup>2</sup>, MA Xingchuan<sup>1</sup>, LI Qianming<sup>1</sup>, YAN Naijie<sup>3</sup>, ZHANG Fei<sup>2</sup>, HU Peng<sup>2\*</sup>

(1. Wuhan Company, China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China; 2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To deal with the time-consuming problem of calculating the dynamic responses of the bridge under the combined action of random traffic flow and wind, a steel box continuous girder bridge was taken as the engineering background, and the finite element model of the bridge and the vehicle model were established in the commercial software Ansys and SIMPACK, respectively. Then, the dynamic responses of the bridge subjected to the single vehicle load, wind loads, and multiple vehicle loads were calculated to verify the superposability of the dynamic responses of the bridge. On this basis, the Monte Carlo method was used to generate the random traffic flow samples. By using the verified superposability of the dynamic responses of the bridge, the dynamic responses of the bridge under the combined action of random traffic flow and wind were calculated under different random traffic flow conditions, different vehicle speeds, and different wind speeds. The research results show that the superposition method of the dynamic responses of the bridge proposed in this paper can effectively improve the calculation efficiency. The wind load mainly affects the lateral response of

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 52178451, 52008396, 52178452); 湖南省自然科学基金资助项目(编号: 2024JJ2002)

作者简介: 熊涛, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: 34449011@qq.com

\*通信作者: 胡朋, 男, 博士, 教授. E-mail: hupeng@csust.edu.cn

the bridge, while the vehicle load mainly affects the vertical response of the bridge. As the traffic flow changes from sparse to dense, the standard deviation values of the vertical displacement and vertical velocity of the main span of the bridge and their increases are larger than those of the side span, while the standard deviation values of the vertical acceleration of the side span and their increases are larger than those of the main span. As the vehicle speed increases, the standard deviation values of the vertical displacement and the vertical velocity of the bridge gradually increase, while those of the vertical acceleration of the side span first increase and then decrease. As the wind speed increases, the standard deviation values of the lateral response of the bridge gradually increase, and the increase of the main span is greater than that of the side span.

**Keywords:** random traffic flow; wind load; continuous girder bridge; dynamic response; SIMPACK

## 0 引言

随着中国国民经济的快速发展,中国对交通基础设施的建设日益重视。预计到2035年,中国高速公路总里程将达到16.2万 km<sup>[1]</sup>。高速公路快速发展的同时,其车流量也随之快速增长,而桥梁作为高速公路中的重要组成部分<sup>[2]</sup>,承担着连接咽喉要道的重要作用。一方面,随机车流荷载的快速增长给桥梁的安全性和耐久性带来重大挑战;另一方面,随着中国沿海和西部强风区高速公路网的修建和运营,桥梁在强风环境下的运营安全问题也越来越受到重视。因此,开展随机车流与风联合作用下桥梁动力响应的研究非常必要。

近十几年来,各国学者对风、车、桥三者组成的耦合系统开展了大量研究。Cai等<sup>[3]</sup>提出了强风作用下三维车-桥耦合系统的动力分析框架,通过数值算例对桥上行驶的车辆进行了动力响应分析;Xu等<sup>[4]</sup>、Guo<sup>[5]</sup>建立了脉动风作用下车辆通过桥梁时的风-车-桥耦合振动分析框架;韩万水等<sup>[6]</sup>建立了考虑结构和气动荷载非线性以及桥梁抖振响应影响的风-汽车-桥梁系统空间耦合振动分析模型,并分析了不同路面状况、车速和路面粗糙度下桥上汽车的安全性和舒适性;韩艳等<sup>[7]</sup>通过建立风-车-桥耦合振动分析模型,考虑了桥梁抖振力空间相关性,分析了强风作用下车辆和桥梁的动力响应。针对桥上随机车流情况,李永乐等<sup>[8]</sup>基于元胞自动机原理建立了随机交通流模型,利用Ansys和Matlab混合编程技术考虑了风、随机车流与桥梁的相互作用,并以某公路悬索桥为背景,分析了在风、随机车流荷载单独作用以及两者联合作用下的桥梁纵向动力响应;韩万水等<sup>[9-10]</sup>利用实际交通信息模拟了随机车流数据,研究了随机

车流在稀疏、密集运营状态和车流相向、单向行驶下桥梁动力响应;朱金等<sup>[11]</sup>根据桥址处风浪观测数据和桥上实测车流数据,建立桥址处风浪联合概率模型和随机车流模型,预测了在随机车流、风和波浪荷载长期作用下沿海大跨度斜拉桥拉索的疲劳寿命;Han等<sup>[12]</sup>建立壳-梁混合单元有限元模型,采用蒙特卡罗方法生成随机车流样本,通过应力分析法获得了随机车流和风荷载联合作用下桥梁关键部位的应力响应,并考虑了风荷载、交通量增长和车辆轴重增长对桥梁关键部位疲劳可靠性的影响。

传统的自编程序方法能较准确地分析风-车-桥系统耦合振动响应,但自编程序的编程过程复杂且耗时较长,功能上很难具备通用性。相对于风-车-桥耦合振动系统的自编程序,通用商业软件如SIMPACK具有建模效率高、建模过程简单、荷载施加方便等优点,这些优点使得SIMPACK商业软件在多体动力学领域得到了广泛应用<sup>[13]</sup>。通过SIMPACK商业软件平台,胡朋等<sup>[14]</sup>建立了风-车-桥系统耦合振动仿真模型,分析了运动车辆气动力展向相关性对桥上运动车辆响应的影响;韩艳等<sup>[15]</sup>基于SIMPACK软件平台建立了列车-轨道-桥梁三维多体动力学系统模型,研究了非定常气动力荷载对桥上列车行车安全性和舒适性的影响;徐昕宇<sup>[13]</sup>在SIMPACK软件中采用刚柔耦合法建立了风-车-桥系统耦合振动模型,研究了山区非均匀风场下车-桥系统的动力响应特性。需要说明的是,目前采用SIMPACK商业软件平台建立的多数是单辆汽车或单辆列车的仿真模型。针对桥上随机车流问题,若在SIMPACK中直接建立三维随机车流模型,不但建模工作量大,而且还需要强大的计算资源,这使得整个计算过程非常耗时。因此,本文采用SIMPACK

商业软件平台分析桥上随机车流与风联合作用下的桥梁动力响应,目前相关研究非常少见。

针对传统随机车流与风联合作用下桥梁动力响应计算的耗时问题,本文提供了一种简单且高效的基于叠加原理的计算方法。首先,利用商业软件平台SIMPACK分别模拟在单辆汽车作用下的桥梁动力响应和风荷载作用下的桥梁动力响应;其次,在验证叠加原理适用的前提下,使用Matlab自编程序运用蒙特卡罗法模拟随机车流,利用随机车流样本进行车辆荷载作用下的桥梁动力响应叠加,并与风荷载作用下的桥梁动力响应叠加,以最终生成随机车流和风荷载联合作用下桥梁的动力响应。在此基础上,对比在不同随机车流状况、不同车速和不同风速时,随机车流和风荷载联合作用下桥梁的动力响应。

## 1 桥梁和汽车多体系统动力模型的建立

以主跨为180 m的三跨连续钢箱梁桥为工程背景,该桥主梁采用单箱变截面钢箱梁形式,如图1所示。跨中截面与支点截面处梁高分别为4.5 m与9.0 m,梁宽为13.0 m,桥面为单向三车道,采用上层行车下层行人的双层交通模式,其中桥梁主跨跨中截面如图2所示。

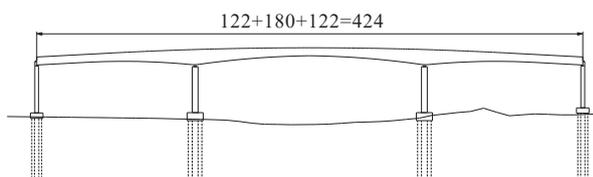


图1 大桥布置图(单位:m)  
Figure 1 Layout of bridge (unit: m)

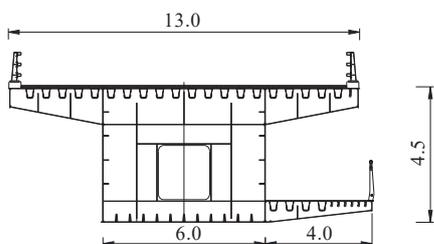


图2 桥梁跨中截面形式(单位:m)

Figure 2 Mid-span section form of bridge (unit:m)

采用通用有限元分析软件Ansys建立桥梁三维有限元分析模型,并生成\*.cdb和\*.sub信息文件,然后将桥梁模型导入SIMPACK中,最后利用SIMPACK中的汽车模块建立三维车辆模型。现实

生活中车辆类型众多,本文选取常见的3类车辆,即V1(小型汽车)、V2(微型汽车)和V3(大型汽车)进行建模分析。汽车模型主要由车体、车轮、弹簧、阻尼以及悬挂系统组成,车辆参数根据文献[16]取值。最后建立的汽车-桥梁多体系统动力模型如图3所示,3类车辆的示意如图4所示。

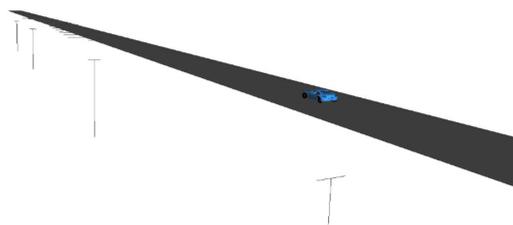


图3 汽车-桥梁多体系统动力模型(以单车为例)  
Figure 3 Dynamic model of vehicle-bridge multi-body system (taking a single vehicle as the example)

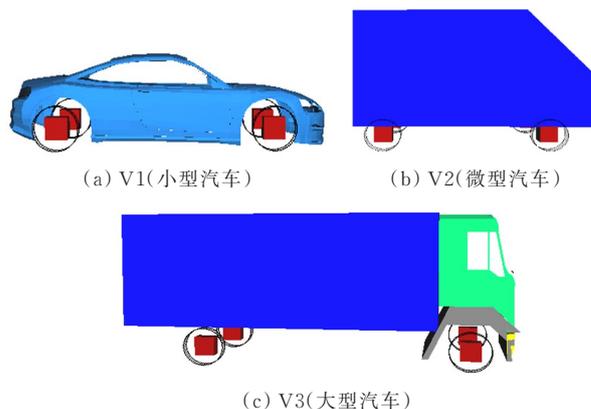


图4 3类车辆示意

Figure 4 Three types of vehicles

计算中,桥梁上的风荷载考虑为静风力和抖振力,抖振力公式采用Davenport准定常抖振力理论<sup>[17]</sup>,其中脉动风速时程采用谐波合成法生成<sup>[18]</sup>,如式(1)、(2)所示。而车辆上的风荷载考虑为静风力,将路面平整度作为激励输入。本研究中,车辆三分力系数参考已有文献[16]取值,而桥梁三分力系数采用流体动力学数值模拟计算得到。最终得到的车辆和桥梁的三分力系数如表1所示,其中 $C_D$ 、 $C_L$ 和 $C_M$ 分别为 $0^\circ$ 攻角下车辆或桥梁的阻力系数、升力系数与力矩系数。

$$X_j(p\Delta t) = \sum_{m=1}^j \operatorname{Re} \left[ \sum_{l=0}^{M-1} B_{jm}(l\Delta\omega) \exp\left( ilp \frac{2\pi}{M} \right) \right] \quad (1)$$

$$B_{jm}(l\Delta\omega) = \begin{cases} 2\sqrt{\Delta\omega} H_{jm}(l\Delta\omega) \exp(i\varphi_{m1}), & 0 \leq l < N \\ 0, & N \leq l < M \end{cases} \quad (2)$$

式中： $X_j$ 为第 $j$ 列的脉动风速时程； $j, \rho, l, M$ 均为整数； $j=1, 2, \dots, n, n$ 为风场模拟点位数； $\rho=0, 1, \dots, M-1$ ； $l=0, 1, \dots, M-1$ ； $M=2\pi/(\Delta\omega\Delta t)$ ， $\Delta\omega$ 为圆频率增量， $\Delta\omega=\omega_{up}/N$ ， $\omega_{up}$ 为圆频率上限， $\Delta t$ 为模拟时间间隔； $N$ 为频率等分点数； $i$ 为虚数单位； $H_{jm}(l\Delta\omega)$ 为互谱密度矩阵进行Cholesky分解后的矩阵； $\varphi_{ml}$ 为独立随机相位，取值范围为 $[0, 2\pi]$ 。

表1 车辆和桥梁的三分力系数  
Table 1 Three-component coefficients of vehicles and bridge

项目	$C_D$	$C_L$	$C_M$	
车辆	V1	0.790	0.160	0.620
	V2	0.920	0.080	0.810
	V3	1.780	0.260	1.650
支点截面	1.181	0.474	-0.185	
桥梁	跨中截面	0.466	-0.103	0.034
	四分点截面	0.716	0.123	-0.093

## 2 桥梁动力响应叠加原理的验证

前文已述，在计算随机车流与风联合作用下桥梁动力响应时，由于车辆数量较多，若直接使用SIMPACK软件建立所有三维车辆模型并进行仿真计算分析，则计算过程非常耗时，普通计算机难以承

受。为此，本文提出一种实用且高效的随机车流与风联合作用下桥梁动力响应分析方法。首先，采用SIMPACK软件平台建立单个三维车辆模型，并分别计算单个车辆模型作用下桥梁动力响应和风荷载作用下的桥梁动力响应；然后通过Matlab自编程序运用蒙特卡罗法模拟桥上随机车流，根据生成的随机车流样本，进行车辆作用下和风荷载作用下桥梁动力响应叠加，最终实现随机车流和风荷载联合作用下桥梁动力响应的仿真模拟。值得注意的是，桥梁动力响应符合线性叠加原理是该方法适用的前提，下文将对桥梁动力响应的叠加性原理进行验证。由于本文的桥梁为双幅钢箱连续梁桥，两幅桥梁相互独立，而每幅桥梁均设计为单向三车道，因此根据实际情况，下文模拟单幅桥梁的单向行车情况。

### 2.1 单车时车辆荷载和风荷载作用下桥梁动力响应

为了验证单车时车辆荷载与风荷载作用下桥梁动力响应满足叠加原理，以V3车型为例，开展风速为10 m/s的风荷载作用、车速为25 m/s的车辆荷载作用以及风荷载与车辆荷载共同作用的3种工况下桥梁动力响应分析。研究中重点考察桥梁竖向和横向的跨中位移、速度和加速度响应，结果如图5所示。

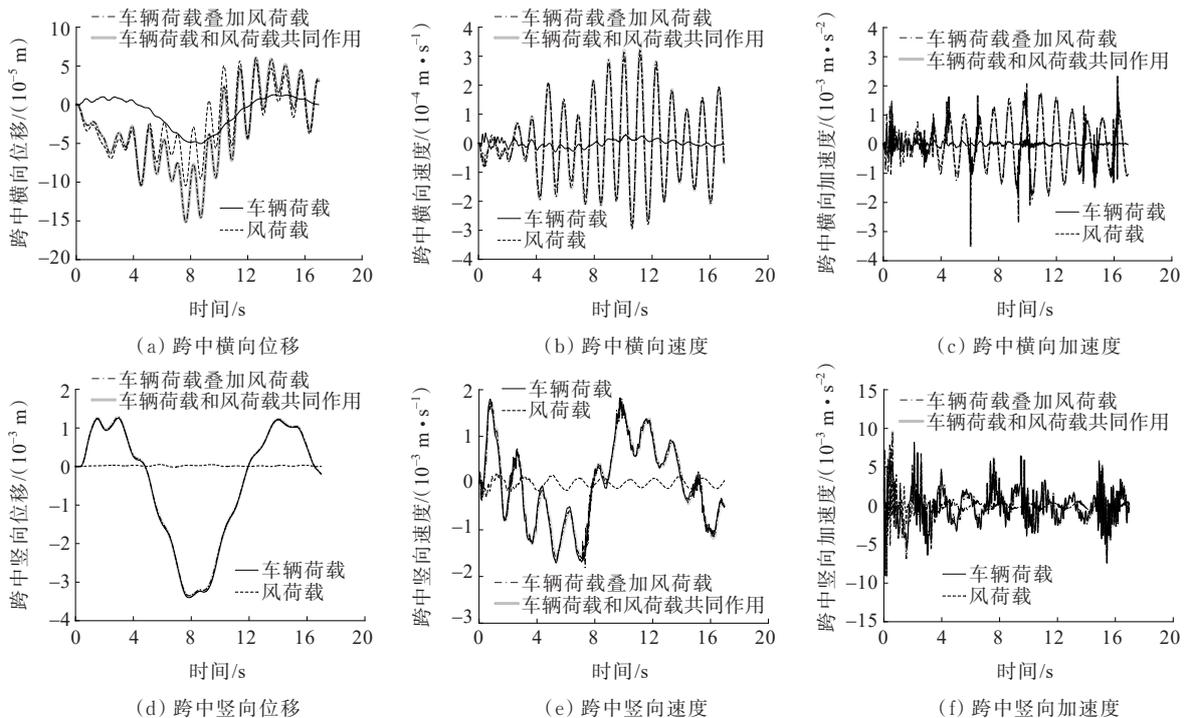


图5 单车车辆荷载与风荷载作用下桥梁跨中动力响应

Figure 5 Dynamic responses of bridge at mid-span under single vehicle load and wind load

由图5可知:①风荷载作用下的桥梁动力响应与车辆荷载作用下的桥梁动力响应线性叠加曲线与其共同作用时,桥梁动力响应曲线完全重合。由此可知,风荷载作用下的桥梁动力响应与车辆荷载作用下的桥梁动力响应符合线性叠加性;②桥梁的横向响应主要受风荷载影响,而桥梁的竖向响应主要受车辆荷载影响。

## 2.2 单车时车辆荷载和多车时车辆荷载作用下桥梁动力响应

由上文的分析可知,车辆荷载对桥梁的竖向响应影响较大,而对桥梁的横向响应影响较小。因此,以下分析车辆荷载作用下桥梁动力响应是否符合线

性叠加原理时,只对桥梁的竖向响应进行分析。研究中在SIMPACK软件建立V1、V2和V3三种车型的单车-桥梁模型和双车-桥梁模型,并对其桥梁竖向动力响应进行对比,结果如图6所示。

由图6可知:V1车型和V2车型单车作用下桥梁竖向响应的线性叠加曲线(V1+V2)与两车共同作用(V1V2)下的桥梁竖向响应曲线完全重合。与此同时,V2车型和V3车型单车作用下桥梁竖向响应的线性叠加曲线与两车共同作用下的桥梁竖向响应曲线也完全重合。由此可知,随机车流作用下桥梁动力响应也符合线性叠加原理。

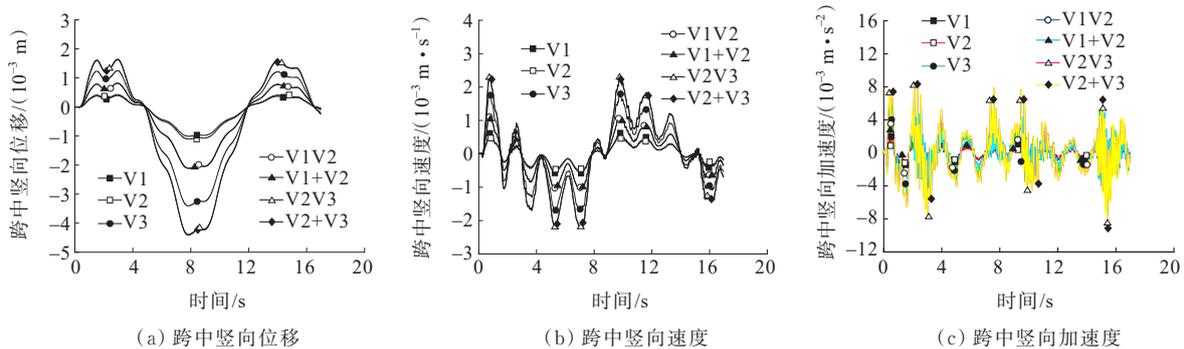


图6 不同车辆作用下桥梁跨中动力响应

Figure 6 Dynamic responses of bridge at mid-span with different vehicles

由以上分析可知,单车时车辆荷载与风荷载作用下的桥梁动力响应满足叠加性,同时单车车辆荷载与多车车辆荷载作用下的桥梁动力响应也满足叠加性。因而,随机车流与风荷载作用下的桥梁动力响应可简化为多个单车荷载作用下的桥梁动力响应与风荷载作用下的桥梁动力响应叠加,由此可大大简化其计算过程。

## 2.3 计算效率分析

为考察该叠加方法的计算效率,分析了风荷载作用下,桥上无车辆荷载和有单车荷载、双车荷载的计算用时,同时与叠加方法的计算用时进行对比,结果如表2所示。

由表2可知:无车辆荷载的工况比有车辆荷载的工况计算用时要短,且随着车辆数量的增加其计算用时变长。而采用叠加原理的计算用时比直接计算用时短,如单车荷载作用时,叠加原理的计算用时为直接计算用时的63.5%;双车荷载作用时,叠加原理的计算用时为传统直接计算用时的46.3%。以此类

推,当车辆更多时,节省时间的比例将越显著。因此,本文提出的叠加原理方法可以显著地提高随机车流与风荷载联合作用下桥梁动力响应的计算效率。

表2 不同工况下计算时间对比

Table 2 Comparison of calculation time under different working conditions

项目	工况	计算用时/s
桥上车辆情况	无车辆荷载	159
	单车荷载	255
	双车荷载	352
叠加原理	单车荷载	162
	双车荷载	163

## 3 随机车流下桥梁动力响应分析

基于上述分析,本文采用叠加原理的方法考察不同随机车流状况、不同车速以及不同风速等因素对桥梁动力响应的影响。

### 3.1 不同随机车流下桥梁动力响应分析

在公路运营过程中,每天的交通量不同,同时每个时间段的交通量也不同,但是由于驾驶员的生活工作习惯,以及天气等自然环境的影响,总体上可以分为几种典型的车流,如密集运营状态下车流、一般运营状态下车流和稀疏运营状态下车流。本文选取V1(小型汽车)、V2(微型汽车)、V3(大型汽车)为代表车型进行随机车流模拟。虽然车辆过桥是一个非常复杂的过程,但车型、车距以及车道也服从一定概率密度分布。相关研究发现<sup>[19]</sup>,运营状态的车距通常服从Weibull分布或者Gamma分布,车型和车道一般服从均匀分布,而车速服从高斯分布。

本文使用蒙特卡罗方法,运用Matlab程序语言,编写随机车流程序。当进行随机车流模拟时,假设车型和车道车辆参数服从均匀分布,稀疏运营和一般运营状态下车距服从Weibull分布,密集运营状态下车距服从Gamma分布,车速为25 m/s,日平均交通量为600辆,抽样生成稀疏车流、一般车流和密集车流3个典型的随机车流样本,模拟时长为10 min,各随机车流数据样本如图7所示。

基于上述随机车流数据,开展了风速为10 m/s时上述3种车流状态下的风-车-桥耦合振动分析。根据上文分析,车辆荷载主要影响桥梁的竖向响应,由此,图8给出了各随机车流状态下桥梁的竖向动力响应。

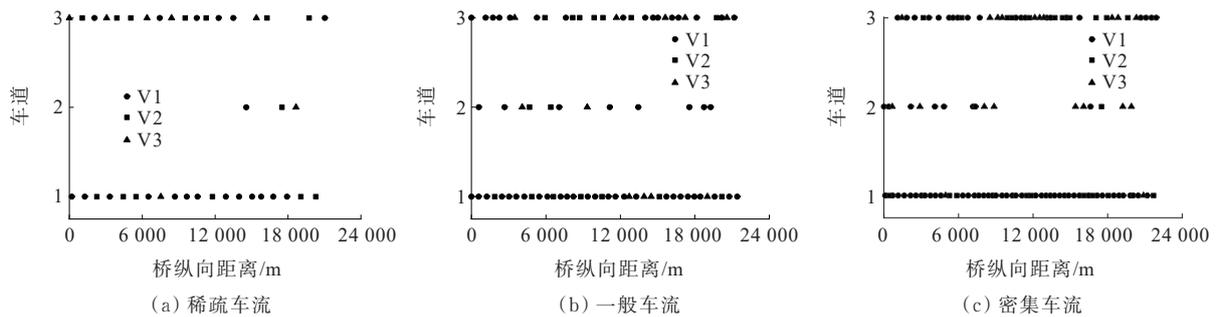


图7 随机车流样本

Figure 7 Samples of random traffic flow

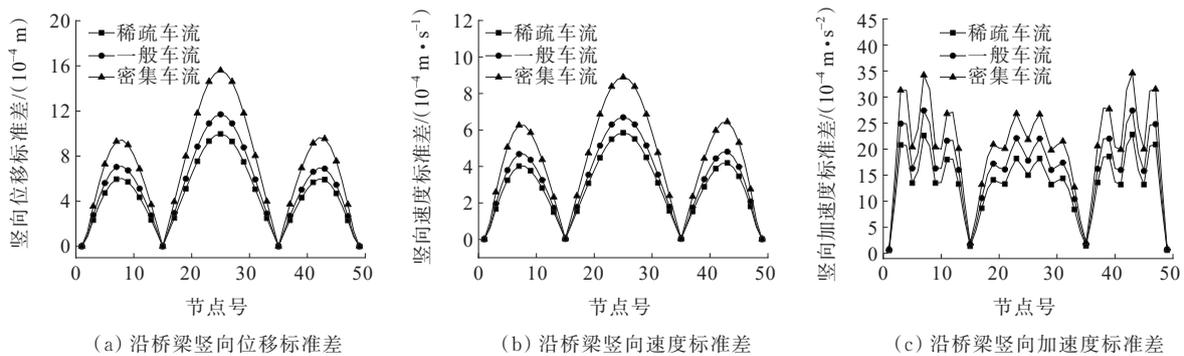


图8 不同车流情况下桥梁动力响应值

Figure 8 Dynamic response values of bridge under different traffic flows

由图8可知:

(1) 总体上,不同车流状况下桥梁的竖向位移和速度标准差沿桥梁纵向呈“M”形分布,其中桥梁主跨跨中(25号节点)的竖向位移和速度标准差均为边跨跨中(7、43号节点)的1.5倍左右。而不同车流状况下桥梁的竖向加速度沿桥梁纵向总体上呈“M”形分布,但在主跨和边跨中出现多个峰值,并且边跨处的竖向加速度标准差值要大于主跨的。

(2) 当车流由稀疏变为密集时,桥梁的竖向响应逐渐变大,同时桥梁竖向响应增幅也逐渐变大,表明车流运营状态越密集对桥上的竖向响应影响越大。

(3) 当车流由稀疏变为密集时,桥梁的竖向位移标准差和竖向速度标准差的增幅由跨中向桥墩处(1、15、35及49号节点)逐渐变小,说明车流运营状态疏密程度对桥梁竖向位移和速度的标准差的影响由跨中向桥墩方向依次减弱。而桥梁竖向加速度是在

峰值处增幅较大,且边跨处的竖向加速度及其增幅要大于主跨的。

### 3.2 不同车速下桥梁动力响应分析

为对比不同车速下一般情况的随机车流对桥梁动力响应的影 响,开展了风速为 10 m/s,车速分

别为 17 m/s、20 m/s、23 m/s、25 m/s、27 m/s 以及 30 m/s 共 6 种工况下桥梁动力响应分析。同理,考察不同车速下桥梁动力响应时,重点考察桥梁的竖向位移、竖向速度和竖向加速度标准差等桥梁响应指标<sup>[20]</sup>。图 9 为不同车速下桥梁响应指标值。

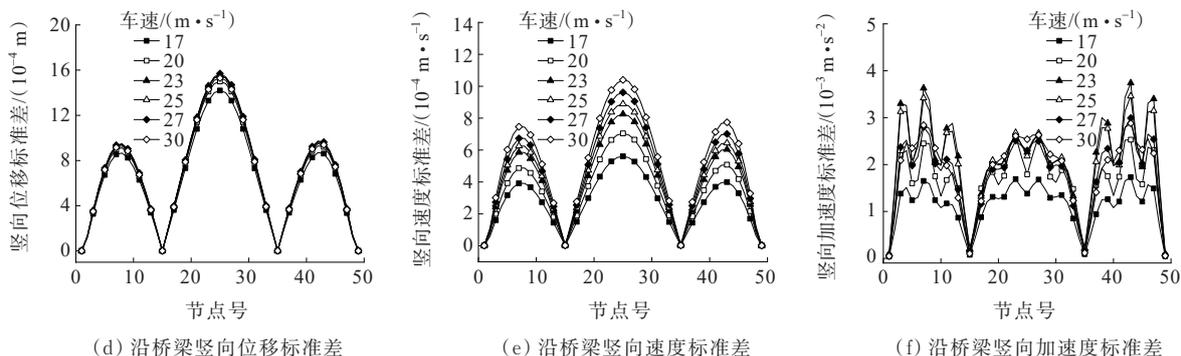


图9 不同车速下桥梁动力响应值

Figure 9 Dynamic response values of bridge under different vehicle speeds

由图 9 可知:桥梁的竖向位移标准差和竖向速度标准差沿桥纵向呈“M”形分布,桥墩处标准差为零值,跨中处标准差最大,且沿主跨跨中对称分布,其中主跨跨中的标准差比边跨跨中的标准差大。而桥梁竖向加速度标准差沿桥纵向虽然大致呈“M”形分布且沿主跨跨中对称分布,但在边跨和主跨的竖向加速度标准差沿桥纵向出现多个峰值,并且高车速下边跨跨中的标准差比主跨跨中的标准差要大。此外,注意到边跨跨中的竖向加速度标准差最大,但主跨竖向加速度标准差最大值不是在跨中,而是在跨中出现一个“V”形分布。

当车速从 17 m/s 提高到 30 m/s 时,随着车速的提高,桥梁竖向位移标准差和竖向速度标准差总体上增大,尤其是跨中的增幅最大,越靠近桥墩增幅越小,且主跨的增幅比边跨大。此外,注意到随着车速的提高,桥梁竖向速度标准差比竖向位移标准差的增幅要大,这说明桥梁的竖向速度响应对车速较敏感。随着车速的提高,桥梁边跨的竖向加速度标准差先增加后减小,当随机车流车速为 23 m/s 时,桥梁边跨的竖向加速度标准差达到最大值。而桥梁主跨的竖向加速度标准差总体上随着车速的提高而逐渐增大,如当随机车流车速为 30 m/s 时,桥梁主跨的竖向加速度标准差最大;但同时注意到随着车速的提高,桥梁竖向加速度的增幅逐渐变小,这说明车速达

到一定程度时,车速的提高对主跨的竖向加速度的影响较小。

### 3.3 不同风速下桥梁动力响应分析

为对比不同风速下一般情况的随机车流对桥梁动力响应的影 响,开展了车速为 25 m/s,风速分别为 5 m/s、10 m/s、15 m/s 共 3 种工况下桥梁动力响应分析。根据前文分析,对于不同风速下桥梁动力响应重点考察桥梁的横向位移、横向速度和横向加速度标准差等桥梁响应指标。图 10 为不同风速下桥梁各响应指标值。

由图 10 可知:总体上桥梁横向位移标准差和横向速度标准差沿桥纵向呈“M”形分布,桥墩处标准差最小,跨中处标准差最大。横向位移标准差沿主跨跨中对称分布,而横向速度标准差不是对称分布,沿行车方向第 3 跨跨中的速度标准差要大于第 1 跨跨中的,这与车辆行驶在第 1 跨时处于上坡阶段而车辆行驶在第 3 跨时处于下坡阶段有关。与此同时,桥梁的横向加速度标准差沿桥纵向出现多个峰值,主跨跨中的桥梁横向响应比边跨跨中的桥梁横向响应要大很多,其中主跨跨中横向位移标准差是边跨的 2 倍多,横向加速度标准差是边跨的 3 倍多,而横向速度标准差达到了边跨的 4 倍多。

当风速从 5 m/s 提高到 15 m/s 时,桥梁横向响应标准差随风速的提高而增加,其中主跨的横向位移、

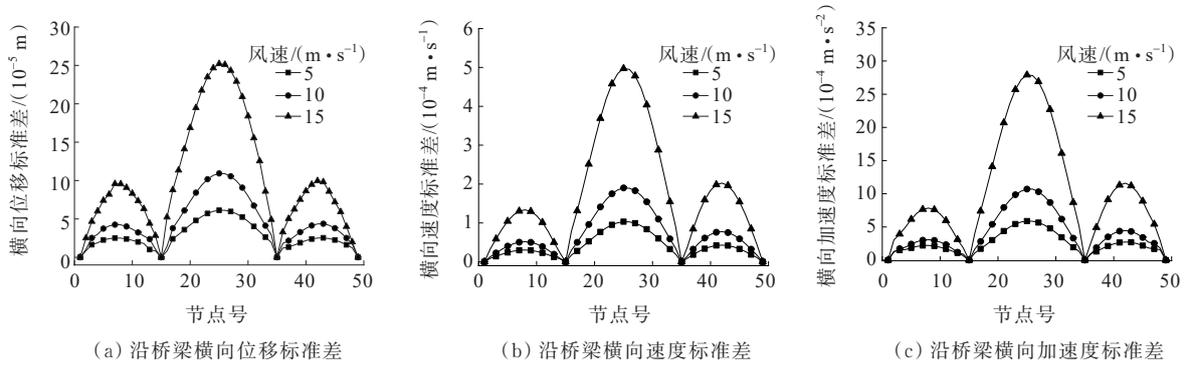


图10 不同风速下桥梁动力响应指标值

Figure 10 Dynamic response index values of bridge under different wind speeds

速度以及加速度标准差的增幅比边跨要大。值得注意的是,随着风速的增加,桥梁的横向位移、速度以及加速度标准差的增幅越来越大,这说明风速越高对桥梁的横向响应的影响就越显著。

#### 4 结论

为解决传统的随机车流与风联合作用下桥梁动力响应计算的耗时问题,本文基于叠加原理提出了一种实用且高效的计算方法,通过建立风-车-桥系统耦合振动仿真模型,考察了不同工况下桥梁的动力响应。主要得到以下结论:

(1) 采用 SIMPACK 商业软件建立单车和多车模型,并分别计算车辆荷载作用下、风荷载作用下的桥梁动力响应,经检验,车辆荷载与风荷载作用下的桥梁动力响应符合线性叠加原理。

(2) 本文提出的叠加原理方法使计算效率显著提高,当单车荷载作用时,叠加原理的计算用时为传统直接计算用时的 63.5%,双车荷载作用时,叠加原理的计算用时为传统直接计算用时的 46.3%。以此类推,当车辆更多时,节省时间的比例越显著。

(3) 通过对桥梁在随机车流和风荷载联合作用下的动力响应计算分析可知,风荷载主要影响桥梁的横向响应,而车辆荷载主要影响桥梁的竖向响应。随着车流由稀疏变成密集,桥梁主跨的竖向位移与速度的标准差及其增幅均大于边跨的,但边跨的竖向加速度标准差及其增幅却大于主跨的。随着车速的提高,桥梁的竖向位移标准差和竖向速度标准差逐渐变大,其中跨中的增幅最大,越靠近桥墩增幅越小,而边跨的竖向加速度标准差先增加后减小。随着风速的提高,桥梁的横向响应标准差总体上逐渐

变大,且主跨的增幅大于边跨的增幅。

(4) 由于叠加原理的局限性,本文提出的计算方法只适用于跨径较小,非线性效应不明显的桥梁。对于大跨径桥梁,由于非线性效应较明显,不同荷载作用下的桥梁动力响应可能不满足线性叠加原理,还需深入研究。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 田新元.2035年我国公路网总规模将达约46.1万公里[N].中国经济导报,2022-07-14.  
TIAN Xinyuan. The total scale of China's highway network will reach 461 000 kilometers by 2035[N]. China Economic Herald,2022-07-14.
- [2] 叶代成.钢箱梁自行车桥的活荷载取值研究[J].中外公路,2020,40(5):134-140.  
YE Daicheng. Study on live load value of steel box girder bicycle bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020,40(5):134-140.
- [3] CAI C S, CHEN S R. Framework of vehicle-bridge-wind dynamic analysis[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2004,92(7/8):579-607.
- [4] XU Y L, GUO W H. Dynamic analysis of coupled road vehicle and cable-stayed bridge systems under turbulent wind[J]. Engineering Structures,2003,25(4):473-486.
- [5] GUO W H. Dynamic analysis of coupled road vehicle and long span cable-stayed bridge systems under cross winds [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2003.
- [6] 韩万水,陈艾荣.风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[J].土木工程学报,2007,40(9):53-58.  
HAN Wanshui, CHEN Airong. Three-dimensional coupling

- vibration of wind-vehicle-bridge systems[J]. China Civil Engineering Journal,2007,40(9):53-58.
- [7] 韩艳,陈浩,刘跃飞,等.桥梁抖振力空间相关性对风-车-桥耦合动力响应的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(9):82-88.  
HAN Yan, CHEN Hao, LIU Yuefei, et al. Effect of the coherence of buffeting forces of bridges on the coupled dynamic responses of wind-vehicle-bridge system[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2015,42(9):82-88.
- [8] 李永乐,钱逸哲,朱金,等.随机风、车流联合作用下大跨公路悬索桥纵向振动特性研究[J].中国公路学报,2021,34(4):93-104.  
LI Yongle, QIAN Yizhe, ZHU Jin, et al. Longitudinal vibration characteristics of a long-span highway suspension bridge under stochastic wind and traffic loads [J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(4):93-104.
- [9] 韩万水,陈艾荣.随机车流下的风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[J].土木工程学报,2008,41(9):97-102.  
HAN Wanshui, CHEN Airong. Three-dimensional coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems under random traffic flow[J]. China Civil Engineering Journal,2008,41(9):97-102.
- [10] 韩万水,马麟,汪炳,等.随机车流-桥梁系统耦合振动精细化分析与动态可视化[J].中国公路学报,2013,26(4):78-87.  
HAN Wanshui, MA Lin, WANG Bing, et al. Refinement analysis and dynamic visualization of traffic-bridge coupling vibration system[J]. China Journal of Highway and Transport,2013,26(4):78-87.
- [11] 朱金,吴梦雪,尹力,等.随机车流-风联合作用下沿海大跨度斜拉桥拉索疲劳寿命预测[J].中国公路学报,2020,33(11):182-194.  
ZHU Jin, WU Mengxue, YIN Li, et al. Fatigue life prediction of cables used in coastal long-span cable-stayed bridges under stochastic traffic and wind loads[J]. China Journal of Highway and Transport,2020,33(11):182-194.
- [12] HAN Y, LI K, CAI C S, et al. Fatigue reliability assessment of long-span steel-truss suspension bridges under the combined action of random traffic and wind loads[J]. Journal of Bridge Engineering,2020,25(3):1084-0702.
- [13] 徐昕宇.复杂山区铁路风-车-桥系统耦合振动研究[D].成都:西南交通大学,2017.  
XU Xinyu. Coupling vibration of wind-rail vehicle-bridge system in complex mountainous terrain[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2017.
- [14] 胡朋,张非,韩艳,等.车辆气动力展向相关性传递函数及其对桥上运动车辆响应的影响[J].中国公路学报,2021,34(4):140-151.  
HU Peng, ZHANG Fei, HAN Yan, et al. Transfer function of spanwise correlation of vehicle aerodynamic forces and its effects on the responses of a vehicle running on a bridge [J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(4):140-151.
- [15] 韩艳,刘叶,胡朋.非定常气动荷载对桥上列车行驶安全舒适性影响分析[J].铁道科学与工程学报,2020,17(1):118-128.  
HAN Yan, LIU Ye, HU Peng. Impact analysis of unsteady aerodynamic loads on the safety and comfort of trains running on bridges[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2020,17(1):118-128.
- [16] 韩万水.风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究[D].上海:同济大学,2006.  
HAN Wanshui. Three-dimensional coupling vibration of wind-vehicle-bridge system[D]. Shanghai: Tongji University,2006.
- [17] 陈政清.桥梁风工程[M].北京:人民交通出版社,2005.  
CHEN Zhengqing. Bridge wind engineering[M]. Beijing: China Communications Press,2005.
- [18] 胡朋,林伟,阳德高,等.横风作用下移动车辆脉动风速谱[J].中国公路学报,2018,31(7):101-109.  
HU Peng, LIN Wei, YANG Degao, et al. Fluctuation wind speed spectrum of a moving vehicle under crosswinds[J]. China Journal of Highway and Transport,2018,31(7):101-109.
- [19] 鲍卫刚,李扬海,郑绍圭,等.公路桥梁车辆荷载研究[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十二届年会论文集(下册).广州,1996.  
BAO Weigang, LI Yanghai, ZHENG Shaogui, et al. Research on vehicle loads on highway bridges[C]// Proceedings of the 12th annual meeting of the bridge and structural engineering society of the Chinese society of civil engineering (Volume 2),Guangzhou,1996.
- [20] 林家琛,吴玉,王旭.移动荷载作用下组合式沥青路面结构受力特性分析[J].中外公路,2022,42(1):43-47.  
LIN Jiachen, WU Yu, WANG Xu. Analysis of mechanical characteristics of composite asphalt pavement under moving load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(1):43-47.