

公路桥梁车辆荷载模型综述

任永明^{1,2}, 陈水生¹, 王春彩³

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 黄河水利职业技术大学, 河南 开封 475004;
3. 开封大学土木建筑工程学院, 河南 开封 475004)

摘要:为适应公路桥梁数字化转型对车辆荷载建模分析的要求, 分析总结了车辆荷载的特点, 基于随机因素数量及其复杂性的分类方法将车辆荷载模型分为单因素车辆荷载模型、车辆荷载谱、随机车流荷载模型和车辆荷载理论模型四种, 并以此分类为基础分别论述了各类车辆荷载模型的特点、建模方法、发展现状、存在问题及应用展望。结果表明: 现有各车辆荷载建模方法多是对未知随机过程的抽样分析, 通常是低效并带有局限性的, 形成的荷载模型并不通用; 实际应用中, 应结合单因素车辆荷载模型、车辆荷载谱和随机车流荷载模型的特点, 选择合适的建模方法以满足应用需求; 随机车流荷载模型是目前对车辆荷载最全面的建模描述, 其基本的研究方向集中于涵盖更多的荷载参数、理清各参数间的相关性和更高效的建模方法等内容; 车辆荷载理论模型发展不成熟, 是车辆荷载进一步研究的主要方向。随着社会的发展, 建立通用性的、自动化的车辆荷载模型成为模型发展的基本趋势。

关键词:桥梁工程; 车辆荷载模型; 综述; 荷载建模方法; 车辆荷载谱; 随机车流; 随机过程理论

中图分类号: U441+.2

文献标志码: A

Summary of Vehicle Load Model of Highway Bridge

Ren Yongming^{1,2}, Chen Shuisheng¹, Wang Chuncai³

(1. School of Civil & Architectural Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Yellow River Conservancy Technical University, Kaifeng 475004, China;
3. School of Civil & Architectural Engineering, Kaifeng University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In order to meet the requirements of vehicle load modeling and analysis for the digital transformation of highway and bridge, the characteristics of vehicle load are analyzed and summarized. Based on the classification method of the number and complexity of random factors, vehicle load models are divided into single factor vehicle load model, vehicle load spectrum, random traffic load model and vehicle load theoretical model. Based on this classification, the characteristics, modeling methods, development status, existing problems and application prospects of various vehicle load models are discussed. The results indicate that existing vehicle load modeling methods mostly rely on sampling analysis of unknown random processes, which are often inefficient and limited, and the resulting load models are not universal; In practical applications, appropriate modeling methods should be selected based on the characteristics of single factor vehicle load models, vehicle load spectra, and random traffic load models to meet application requirements; The random traffic load model is currently the most

comprehensive modeling description of vehicle loads, and its basic research direction focuses on covering more load parameters, clarifying the correlation between various parameters, and more efficient modeling methods; The development of vehicle load theoretical model is not mature, which is the main direction of further research on vehicle load. With the development of society, the establishment of universal and automatic vehicle load model has become the basic trend of model development.

Key words: bridge engineering; vehicle load model; review; load modeling method; vehicle load spectrum; random traffic flow; stochastic process theory

根据《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》以及《数字中国建设整体布局规划》的要求,公路的数字化转型,尤其是公路桥梁的数字化监测和智能感知愈加受到重视。目前,我国基本完成了首批644座长大桥梁监测系统的建设,初步构建了长大桥梁监管体系,并正在谋划建设覆盖近百万中小桥梁的监测体系。车辆荷载是桥梁监测体系的重要内容,针对监测获得的海量数据进行建模分析,形成方便可用的车辆荷载模型是实现桥梁数字化监测和车路协同的重要环节。

公路上的车辆荷载是一个涉及众多复杂随机因素的高维随机过程,其复杂性主要表现在以下几个方面:①营运车辆本身的变量众多,主要包括:车辆类型、车重、轴重、轴间距、车长、车速等;②车辆运行环境中的影响因素众多,主要有:道路类型、道路等级、车道数量、车辆运行时段、交通流量、交通组织规则等;③车辆荷载受地域性因素影响,包括:道路沿线产业布局、社会经济发展程度、汽车工业发展趋势、资源配置需求等;④交通政策和法规情况也会对车辆荷载产生重大影响。这些复杂的因素多为不同类型且相互影响的随机变量,多具有统计规律不明,研究困难的特点,使车辆荷载成为高度复杂的随机过程。

车辆荷载数据采集是车辆荷载研究的前提,精准高效的车辆荷载数据采集方法为车辆荷载模型的发展提供坚实的数据支持。移动荷载称重系统(WIM)是目前主要的交通车流数据采集方法,可以有效采集车辆的车型、车重、轴重、轴距、车速等众多车辆荷载数据,但该系统存在施工交通干扰大、成本高等问题,而桥梁称重系统(B-WIM)通过桥梁

响应反算识别荷载参数,具有设备安装方便、成本低的优点,但目前数据精度相对较低。随着人工智能和大数据分析技术的发展,车辆荷载数据采集方法呈现出多源融合发展的趋势。张建亮^[1]以YOLOv5s的车辆识别方法基础,提出了基于车流视频和收费站ETC系统数据融合的车载分布识别方法。周煜辉^[2]基于压电传感阵列的桥梁结构振动响应智能感知理论研究,提出了一种基于勒让德神经网络(LNN)的交通荷载智能识别方法。袁彪^[3]结合桥梁动态称重和移动荷载识别方法的优点,提出基于深度学习和多源信息融合的YOLOv5 DeepSORT-BP(简称YD-BP方法)移动荷载识别方法。

鉴于车辆荷载具有复杂性和随机性,国内外学者目前从实际应用需求出发建立了多种形式的车辆荷载模型。陈艾荣等^[4]依据使用目的和分析阶段不同,将车辆荷载的研究分为规范静载的力的组合模式和结构动力分析的车流模式。为满足公路桥梁设计需要,英国的BS153、BS5400、美国AASHTO以及中国的JTGD60等众多规范在实测车辆荷载的基础上先后建立了多种形式的标准车辆荷载模型,如今应用比较广泛的是局部荷载加集中力的形式。

结构动力分析的车流模型研究一直以来广受关注,研究人员针对建模方法、模型精细程度、模型参数相关性等内容进行了广泛的探索。罗轩^[5]、祝青鑫等^[6]、赵楷林^[7]针对具体的地区和桥梁监测所得数据研究了具体的车辆荷载建模方法及荷载特性;Mu等^[8]进行了公路桥梁重车专用车道车辆荷载适应性研究;Wang等^[9]基于WIM数据提出并验证了一种考虑车辆到达顺序和轴重相关性的随机交通

流的精细仿真方法。车辆荷载谱也是一种重要的车辆荷载模型,其研究涉及标准疲劳荷载的制定和应用。周泳涛等^[10]对全国范围内8条典型高速实测车辆荷载数据进行统计分析并建立标准疲劳车荷载模型。韦港荣^[11]、吕志林等^[12]基于具体地区的实测车辆信息建立疲劳车辆荷载模型实现具体结构的疲劳寿命分析预测。

目前,车辆荷载的研究对象多是特定地区一段时间内的车辆荷载数据,研究者需先拿到这些数据然后再进行统计、建模并分析,这一过程繁琐且低效,显然与公路桥梁数字化发展趋势不相符。本文通过针对车辆荷载模型建模方法、研究现状、应用与展望等方面进行总结和梳理,探讨车辆荷载研究适应公路桥梁数字化监测的发展方向,实现车辆荷载数据高效利用的途径与方法,希望藉此给各相关研究者以参考。

1 车辆荷载模型分类

车辆荷载模型目前没有统一的分类方法。任伟新、赵少杰^[13]认为车辆荷载模型按照应用类型可分为静力车辆荷载模型和疲劳车辆荷载模型两类,按照研究方法可以分为静态模型和交通荷载流模

拟荷载模型两种。陈艾荣等^[14]则将汽车作用的研究分为汽车荷载的具象时-空分布研究和抽象时-空分布研究两类,其中抽象时-空分布的车辆模型包括车辆荷载谱和由交通流计算得到的荷载效应的概率统计及其极值概率分布研究。陈艾荣等^[14]将车辆荷载的研究分为规范静载的力的组合模式和结构动力分析的车流模式。

事实上,车辆荷载的建模分析是面向实际需求的,如制定某桥梁的限载值、制定行业性的设计荷载标准、针对某桥梁进行疲劳分析等,这些应用需求的满足对车辆荷载模型的要求是不同的。作者认为根据满足应用需求所需要考虑的随机因素的数量进行模型分类是适当的,如在疲劳分析中一般不考虑荷载施加的先后次序,仅关注荷载大小及其出现频率等即可,这种荷载模型就可以与随机车流荷载模型区分开来。另外考虑到用数学解析式表达的车辆荷载理论模型是对荷载更本质的描述,发展尚不成熟,因此进行单列。综上所述,这里将车辆荷载模型分为单因素车辆荷载模型、车辆荷载谱、随机车流荷载模型、车辆荷载理论模型等四种,各车辆模型所含变量及其表现形式如表1所示。

表1 车辆荷载模型分类
Tab.1 Vehicle load model cassification

分类名称	考虑随机因素	荷载模型的表现形式	典型应用场景
单因素车辆荷载模型	车辆总重或轴重等	随机变量的概率分布	车辆荷载标准制定等
车辆荷载谱	车总重、轴重、轴间距、车型	典型车辆的参数代表值及其出现频率	结构疲劳分析
随机车流荷载模型	车型、车总重、轴重、轴间距、车辆间距、车速、时间、车道分布等	自然车队数值模拟车流	车辆荷载效应分析车辆荷载标准制定结构疲劳分析等
车辆荷载理论模型	车总重、车间距、交通量、时间等	车辆荷载的数学表达	车辆荷载效应评估等

2 车辆荷载建模方法及其特点

2.1 单因素车辆荷载模型

单因素车辆荷载模型是根据应用需求针对某一参数(通常是车辆总重或轴重)进行统计分析建立起来的荷载模型,其实质是针对某一随机变量进行抽样推断整体概率分布的过程。

车辆总重在众多车辆荷载影响因素中是最受关注的因素。“公路桥梁车辆荷载研究”课题组(后简称为:课题组)^[15]基于实测车重数据进行概率分布的拟合检验,认为车重服从对数正态分布。贡金

鑫^[16]采用多个正态分布的加权和并结合分段函数来模拟非治超地区车辆总重的概率分布。Hou^[17]认为设定适当阈值屏蔽掉数量巨大的小车数据后建立的车重概率模型更为合适。

轴重也是车辆荷载重要研究参数,王强^[18]以轮轴为对象开展研究,统计分析认为可以用三峰正态分布拟合轮轴重量;赵少杰等^[19]认为车辆荷载大多呈现多峰厚尾的分布特征,采用分段函数结合多个高斯分布函数进行数据拟合处理,建立了轮轴重的分段截尾的多重混合高斯概率分布模型。

单因素车辆荷载模型是对车辆某变量现状的

描述,代表了统计期间荷载变量所服从的概率分布,常用于为车辆荷载标准提供参考。但是工程中仅仅掌握车重、轴重的现状概率分布不能满足进行桥梁工程设计、评估和预测的荷载要求,还需要建立更为详细的多因素车辆荷载模型,而单因素车辆荷载模型往往是建立复杂车辆荷载模型的基础和前提,是不可或缺的。

2.2 车辆荷载谱

车辆荷载谱通常指车辆荷载类型与其所占频率的一一对应关系。建立典型车辆荷载谱的目的在于用少数的几种具体车型和交通量代替复杂的实际交通车辆,从而实现对总体车辆荷载作用过程和作用频率等的简单化表征。

2.2.1 疲劳荷载谱建立过程

疲劳车辆荷载谱是最具代表性和最常用的车辆荷载谱,此处用疲劳车辆荷载谱为例说明建立典型车辆荷载谱的基本过程。

1) 车辆数据统计。车辆数据统计首先需要结合相应规范及该地区车辆组成的特点对车辆进行分类。车辆初步分类以统计方便为准则,按照车轴数量、客货类型、车轴布局类型等划分,这里称其为统计车型,数据统计按照统计车型进行轴重及轴距的分类统计。在统计车型的基础上,为便于车辆荷载谱的应用,以车轴数量或客货类型等将统计车型合并为较少的几种,称其为代表车型。统计所得数据可以采用加权平均的方法得到每个统计车型的平均车重、平均轴距及其出现频次,也可分别按照代表车型进行轴重及轴间距的概率密度分布拟合,得到各代表车型的轴重、轴间距的概率分布函数。

2) 等效车辆荷载。建立车辆荷载谱需要将繁多的车辆数据进行等效处理。桥梁结构常用基于累积损伤原理的应力-寿命方法作为疲劳计算理论,该方法多用Palmgren-Miner线性累积损伤准则来确定每一个荷载循环产生的损伤度。Palmgren-Miner线性累积损伤准则忽略应力循环作用的先后顺序和平均应力影响,认为各个应力之间相互独立,各应力循环造成的疲劳损伤可线性叠加。目前,各研究者均是基于以上理论计算车辆的等效轴重和等效轴距,进而组合在一起得到相应的等效车辆。

等效轴重依据等效损伤原理进行计算,在已知轴重概率分布函数的情况下可用公式进行计算

$$P_i = \left(\int_0^\infty f(p_i) p_i^3 dp_i \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中: P_i 为代表车型第 i 个轴的等效轴重; p_i 为代表车型第 i 个轴的轴重随机变量; $f(p_i)$ 为代表车型第 i 个轴的轴重概率分布函数。如未进行轴重概率分布拟合也可用下式计算

$$P_i = \left[\sum (f_j p_{ij}^3) \right]^{1/3} \quad (2)$$

式中: f_j 为第 j 个统计车型所占比例; p_{ij} 为第 j 个统计车型第 i 个轴的轴重。各等效轴重之和为合并后车辆的等效车重。

等效轴距则按照加权平均的方法计算,公式为

$$A_i = \sum f_j A_{ij} \quad (3)$$

式中: A_i 为代表车型第 i 个等效轴距; f_j 为第 j 个统计车型的出现频率; A_{ij} 为代表车型第 j 个统计车型第 i 个轴距。

3) 形成车辆荷载谱。对于等效车辆荷载需进一步分析其在车辆总体中的占比和重要性。占比较小的车型应与相近车型进行合并,而对于数量众多,但疲劳损伤贡献率非常小的车辆,可予以忽略。经过分析处理,得到少数几种等效车辆荷载及其在总体中的相对频率即是疲劳车辆荷载频值谱。实际应用中,通常会进一步将车辆荷载谱中疲劳损伤贡献率最高的车型选出来,等效计算得到标准疲劳车。

2.2.2 车辆荷载谱研究现状

车辆荷载谱是一个简单化的多因素车辆荷载模型,具有形式简单、应用方便、准确可靠等优点,广泛应用于各国公路桥梁相关规范中,并受到广大研究人员的关注和研究。

英国规范(BS 5400)、欧洲规范(Eurocode)、美国AASHTO规范以及我国新版公路桥涵设计规范等都给出了标准车辆荷载频值谱或标准疲劳车等用于桥梁结构的疲劳性能分析。

Moses^[20]研究了AASHTO采用的疲劳设计方法,并总结了桥梁结构设计和鉴定的疲劳评估程序。Laman^[21]研究了5座钢桥的车辆荷载数据及主要构件应变历程,建议选用3轴车代表交通荷载,对于有10轴或11轴车出现的地方则建议采用4轴车作为荷载模型。Chotickai等^[22]研究认为美国现行规范的疲劳车在疲劳验算时会显著高估小跨径桥梁的疲劳损伤程度,提出了两种新的疲劳车模型。

我国科研工作者有针对具体地点建立的车辆荷载谱,如杨泽刚^[23]基于灌河大桥,吕志林^[12]基于长江中下游某钢箱斜拉桥1年实测数据,Chen等^[24]基于广东省3条典型公路,舒小娟等^[25]基于莲城大桥等实测数据,分别建立了相应的疲劳车辆荷载谱。孙东晨^[26]基于某高速实测数据建立了考虑高维随机变量间非线性相关性的随机车流荷载,进而确定了标准疲劳车荷载模型。

还有研究者收集更多地区的车辆荷载数据,通过综合分析建立更大适用范围的车辆荷载谱。周泳涛等^[10]、Liu^[27]、Deng^[28]在全国范围内进行现场交通荷载调查,并最终推导了全国适用的标准疲劳车模型。邢振华等^[29]针对山东高速公路桥梁车辆荷载进行研究建立了山东省高速公路桥梁疲劳车辆荷载模型,Liang^[30]等收集东南六省的车辆数据,建立了包含五种车型的车辆荷载谱。

另一些研究者则考虑了公路等级、发展阶段等不同的影响因素建立更有针对性的车辆荷载谱。Chen^[31]建立了浙江省内不同等级道路的标准疲劳车模型,尹兴^[32]推算出适用于工业化中后期地区的标准疲劳车,邓扬^[33]区分白天和夜间分别建立了疲劳车辆荷载谱,黄炎^[34]建立了超载车辆荷载谱和超载车辆标准车模型。胡翠敏^[35]以动态称重数据为基础,根据多车道荷载差异化分布特征建立由多车道系数和标准疲劳车组成的多车道疲劳荷载模型。

2.3 随机车流荷载模型

随机车流荷载模型是将车辆荷载按照随机车流的形态进行表征的车辆荷载模型,它考虑了车辆荷载的众多关联因素的统计分布特征,以更为真实的交通形态对车辆荷载进行描述。随机车流荷载模型在表现形态上可以是剔除错误数据的自然车

队,也可以是各变量经过分布函数拟合检验,通过Monte Carlo方法生成的数值模拟车流。但是随机车流难以直接进行应用,其描述的车辆荷载的特征是复杂且不明朗的,为此常通过将随机车流加载在桥梁结构上,通过相应的桥梁结构响应的特征来间接反映随机车流的相关特征。随机车流荷载模型应用过程如图1所示。

2.3.1 自然车队

自然车队按照实测车辆数据对桥梁结构进行加载,以车辆荷载响应的统计特征对车辆荷载进行评估和表达。自然车队仅限于表征观测时间内的车辆荷载,其表征的完整程度受观测数据的完整性和准确性影响。

自然车队原理明确、形式简单、使用方便,是一种广泛应用的车辆荷载形式。Nowak^[31]采用自然车队对不同跨度的简支梁和连续梁进行加载,计算了相应的弯矩和剪力,并利用正态概率纸方法对荷载效应进行了75年期的外推。课题组^[15]在车辆荷载效应计算时也是采用实测自然车队进行加载计算。Miao等^[37]在则选取每日极端车辆荷载组成车队进行加载计算相应车辆荷载效应。另外,朱梅娟^[38]、蔡俊华^[39]、余学志^[40]均是借助交通实测数据形成连续自然车队,通过结构关键效应影响线进行加载计算,然后对效应进行统计分析,运用极值理论得到评估基准期内的汽车荷载效应最大值概率分布。

2.3.2 数值模拟随机车流

数值模拟随机车流是通过计算机随机抽样技术再生成的与实测车流具有相同统计特征的随机车流。该随机车流克服了自然车队样本数量限制,可以实现更加方便高效的应用。目前针对数值模拟随机车流的研究主要集中于车辆荷载参数统计

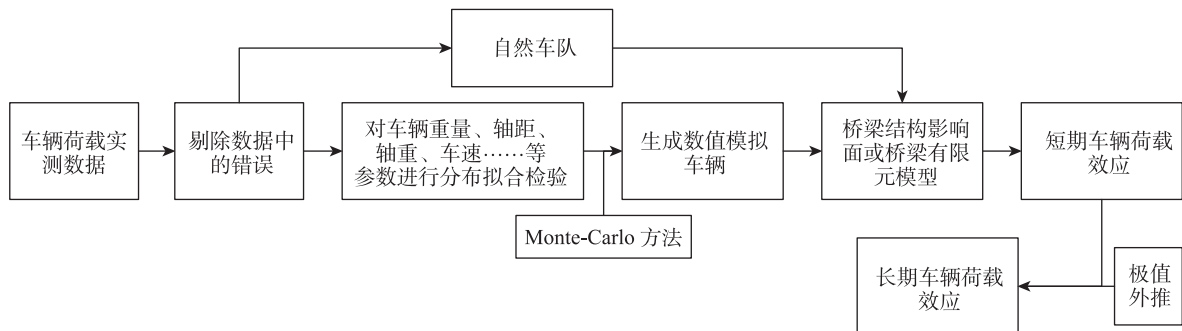


图1 随机车流荷载模型建模及应用流程

Fig. 1 Random traffic load model modeling and application process

分析方法和数值模拟技术两个方面。

一方面是车辆荷载参数统计分析。车辆荷载参数主要包括车辆自身特征参数和交通流特征参数两部分,其中车辆自身特征参数包括:车重、轴数、轴重、轴间距等,交通流特征参数则包括车辆间距、车速、交通量、交通运行状态、车道选择等。车辆荷载参数是相互关联的一个整体,单独的参数统计仅是对车辆荷载一个侧面的刻画,目前各研究多集中于尽可能全面地刻画各变量的统计特征,并逐步拓展到变量之间关联特征的研究。

车辆荷载单个参数的统计分析可以看作对一个未知整体的抽样过程,但是因为车辆荷载的复杂性,各个参数的处理方法并不是确定的,此处简要介绍常见参数处理方法。

1) 分类统计法。分类统计法主要应用于样本数量众多的离散变量,通过将相近的样本进行归类汇总使样本得以处理。车型通常按照车轴数、车轴布置特点、客货类型等划分为较少的几种类型进行统计处理,如王宁^[41]将观测车辆分为15种,祝青鑫等^[6]采用k-means算法,根据车轴距归类出了13类代表车型。另有一天中的时段、车道数量、道路等级等参数本身的类型就比较少,在数值模拟中可以直接枚举进行表达,黄炎^[34]研究了车型占比随时段的变化规律。Chen^[31]分析了道路等级对车流时间特征、车道选择以及车速、车重概率分布特征的影响。刘圆圆^[42]考察了车道数量对货车车道选择行为影响。

2) 概率分布的拟合检验。对于重要的连续随机变量通常需要根据样本统计推断其总体的概率分布函数。车辆荷载参数中,车重、轴重、轴间距、车辆间距、车速等参数都可以按此进行统计分析。张喜刚^[43],赵少杰等^[19]研究发现不同轴组重量的概率分布可由混合高斯分布描述。刘扬^[44]采用高斯

混合建模方式拟合轴重分布。李林春^[45]基于WIM数据建立了车速、车重、车间距的概率函数模型,并利用KS检验方法进行拟合优度检验。课题组^[15]以3s行驶间距为界将交通状态划分为一般运行状态和密集运行状态,经拟合检验发现两种运行状态下车辆间距服从参数不同的对数正态分布,而时间间隔则服从参数不同的伽马分布。

3) 等效处理法。类似于车辆荷载谱对于车辆参数的处理方法,对于一些复杂的车辆荷载参数也可以进行等效处理。在数值模拟中,轴重、轴间距、车速、车流量等都有采用等效处理的案例。杨晓艳^[46]在拟合车重概率分布的基础上,将轴间距和轴重等效成6种代表车型的轴间距和轴重占比。刘扬^[44]将车速分布等效成一天内各时段的平均车速。周剑波^[47]用一天中车流量最大的8h所产生随机车流来等效代替一天的车流量。

(2) 随机车流的数值模拟

随机车流数值模拟通常采用Monte Carlo方法进行随机变量的抽样取值,由此产生的车辆荷载数据即为数值模拟的随机车流。随机抽样应根据变量的属性按照一定的顺序进行,如某车流按照时间平均法进行统计分析,则其时间段的选取就决定了车流的整体特征,应优先进行抽样确定,而车辆轴重和轴间距等具体参数则可在最后进行抽样确定。图2所示为随机车流数值模拟过程的示例。

随机车流模拟中考虑的参数越多往往越能真实地模拟车流,但是过多的参数会造成统计分析的困难并降低车流模拟效率,实际操作中常根据研究目的和参数统计能力等进行选择。研究者在建立随机车流模型过程中最常考虑的车辆荷载参数包括:车型、车重、车辆间距、车速、交通量等。周剑波^[47]、冯海月^[48]、杨晓艳^[46]、张弛^[49]、Liang^[50]等研究者均考虑主要车辆荷载参数建立了不同的数值模拟随机

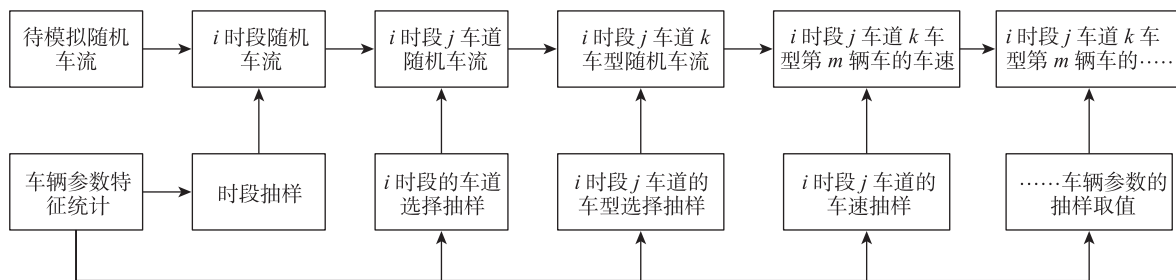


图2 随机车流数值模拟流程示例

Fig. 2 Example of numerical simulation flow of random traffic flow

车流,其主要区别是采用不同的方法对车辆荷载参数进行分布拟合。除此以外,韩万水^[51]等还考虑了车辆悬挂系统、路面粗糙度、障碍物等参数进行随机车流建模分析。宗周红^[52]、Kim^[53]等建立的随机车流荷载模型则考虑了参数相关性。孟垂进^[54]研究了车辆荷载各参数的时变特征,建立了基于不同时段统计特征参数的白天和夜间的车队时变荷载模型。林诗枫等^[55]、黄侨等^[56]建立的随机车流在考虑车速和车辆间距过程中同时基于车辆跟驰模型将车辆相应的驾驶行为考虑了进去。胡金凤^[57]、周永兵等^[58]则是基于元胞自动机技术从微观层面将车辆的加速、减速、超车等具体交通行为考虑进来形成随机车流进行研究。

2.4 车辆荷载理论模型

按照随机过程理论建立起来的车辆荷载理论模型通常有明确的解析表达式,各参数意义清楚,简洁明晰的理论荷载模型便可降低车辆荷载建模和应用难度、并拓展荷载模型的应用范围。然而,因为车辆荷载参数众多,各参数间相互关联,建立完全的理论荷载模型仍极为困难。目前,各研究者多考虑相对重要的车辆荷载影响因素(如车辆总重、车辆间距、交通量等)进行理论分析和建模,而其他的荷载因素则进行简化处理。

如果把车辆通过特定断面的时间看作是一个点,就可以把车辆通过桥梁这一问题简化成为一维的随机点过程,因此,在桥梁车辆荷载随机过程的研究中,常使用泊松过程、更新过程等典型随机点过程进行车辆荷载建模。Ghosn等^[59]基于马尔科夫更新过程计算车辆在桥面上各个位置的概率,通过卷积方法计算出桥梁在指定服役期内的最大荷载效应。课题组^[15]用滤过Poisson随机过程描述一般运行状态下的车重荷载随机过程,用滤过Weibull随机过程描述密集运行状态下的车重随机过程。Croce等^[60]在欧洲车辆统计资料基础上,应用平衡更新过程对车辆荷载效应进行了研究。王磊^[61]、陈照全^[62]采用卷积公式、平衡更新过程理论并依据已有数据建立了既有公路桥梁车辆荷载效应模型。叶际斌^[63]基于车辆荷载出现的统计规律,提出 n 辆车连续到达的概率密度函数的通用表达式及解析表达式。Liu等^[64]提出了能够综合考虑车重和车速两个因素的2维复合泊松过程车辆荷载模型。

交通量是表达交通车辆数目在时间维度上分

布的一个指标,也可以看作是一个随机过程。余志武^[65]基于多年连续观测的交通量数据建立了基于灰色-马尔可夫随机过程的公路交通量预测模型。

另外一些研究者采用了不同的方法进行车辆荷载模型的建模和分析。Chen等^[66]将车辆荷载模型分解成位置模型和总重模型两部分,采用无向图模型(UGM)对桥面重车的空间分布进行建模分析。王强^[18]则突破车辆整体研究的思维,将车辆荷载解构成轮轴荷载进行研究,分别建立了车辆荷载多峰正态-泊松更新随机场模型和多峰正态更新随机场模型。

3 车辆荷载模型的应用与展望

3.1 车辆荷载模型的应用

车辆荷载模型是从不同角度对现状交通荷载的概括和描述,其建立目的是为了从复杂的交通调查数据中获得所需车辆荷载信息,为桥梁结构设计、可靠性评估、结构寿命预测及交通政策的制定等提供依据。

目前发展的车辆荷载模型中,单因素车辆荷载模型主要用于描述车重或轴重的概率分布现状,其概率密度小的尾部代表着车辆荷载的最大值情况,可以为桥梁结构设计荷载的确定提供依据,也能在桥梁运营管理中为车辆限载规定提供依据。车辆荷载谱中常用的是疲劳车辆荷载谱,主要用于桥梁结构疲劳性能分析和使用寿命预测。

随机车流荷载模型因考虑变量众多,对车辆荷载的描述更为全面,因此也有着最为广泛的应用。该模型常应用于桥梁中的车辆荷载标准值的制定,通常基于该模型计算车辆荷载效应最大值分布,并以此为基础确定车辆荷载标准值。英国、欧洲、美国、中国等国桥梁中的汽车设计荷载标准值多是以此方法为基础确定。随机车流荷载模型另一个重要的应用是桥梁结构疲劳性能分析,其应用仍是计算应力幅频值谱,并依据等效损伤原理进行结构疲劳寿命分析。随机车流还可以应用于其他具体的场景,如陈水生等^[67-69]基于随机车流荷载模型提出了桥梁车致裂缝宽度极值预测方法,韩大章等^[70]基于随机车流研究了大跨钢桥伸缩缝纵向位移响应及病害控制问题。

车辆荷载理论模型中基于车辆到达桥梁这一随机过程所建立的车辆荷载模型,在已知车辆荷载

截口分布的基础上可推导设计基准期内车辆荷载最大值分布,为车辆荷载标准值的确定提供依据。

车辆荷载应根据应用需求并结合桥梁结构特性等因素来选择建模方法。若实际应用中仅关注车辆荷载的个别参数,如制定小跨径桥梁限载值或进行桥梁结构的局部受力分析时非常关注车辆轴重,则可建立相应的单因素车辆荷载模型;若进行结构疲劳分析等仅关注车辆荷载大小、尺寸、数量等自身参数的研究时,可忽略荷载出现次序及其分布,此时选择建立车辆荷载谱模型;若应用中需要关注车辆荷载更全面的信息时,可通过建立数值模拟随机车流荷载模型进行分析;车辆荷载理论模型虽具有明确的数学解析表达,但随着其涵盖变量的增加而形成高维随机过程的计算是及其困难的。

3.2 车辆荷载模型研究展望

车辆荷载模型能够对复杂的车辆荷载监测数据进行处理,得到桥梁的设计、运营维护和交通管理等需要的相关车辆荷载信息。但随着公路数字化转型的发展,车路协同及荷载的智能感知等智能交通建设内容对车辆荷载模型提出了更高的应用要求。总结现有研究成果,笔者认为目前的车辆荷载模型研究应在以下几个方面进一步发展。

1) 加强公路车辆荷载监测方法的研究,一方面是提高测量精度,增加测量内容,另一方面则是降低测量设备安装成本,发展轻量化监测技术,提高车辆荷载在各桥梁结构上的监测覆盖范围。

2) 利用人工智能和深度学习技术进行多模态数据融合研究,整合称重、视频、气象等数据进行荷载数据采集和数据分析研究,并逐步发展车辆荷载模型的建模自动化技术。

3) 提高桥梁上车辆荷载监测数据的利用效率,一方面应改进数据处理方法,提高数据处理效率;另一方面则需进一步挖掘数据应用场景。

4) 加强车辆荷载模型通用性研究,目前已有车辆荷载模型都有其局限性,这极大地提高了车辆荷载建模成本,限制了车辆荷载模型的应用。笔者认为增强车辆荷载本质规律的认识、进一步发展理论模型是提高车辆荷载模型通用性的有效途径。

5) 进一步完善随机车流荷载模型,从多因素耦合分析和建模方法等方面入手,通过对模型实际应用效果评估,逐步提高建模效率和模型精细化程度。

4 结束语

本文对公路桥梁车辆荷载模型进行了梳理分析,采用考察车辆荷载模型包含变量的多少及建模复杂程度的方法将车辆荷载进行分类综述,得出以下结论。

1) 公路桥梁车辆荷载具有复杂性和高度随机性,目前的研究主要采用抽样统计分析的方法形成对荷载某些特征的片面描述,属于一种无奈和低效的手段。随着公路数字化转型,有必要从车辆荷载的数据采集、建模方法等角度进行研究,进而实现车辆荷载数据的实时处理和高效利用。

2) 当实际应用中关注车辆荷载自身的少数参数特征时,依据监测数据进行针对性的统计分析,并建立相应的单因素车辆荷载模型是最简单的车辆荷载建模方法。

3) 随机车流荷载模型本质上仍是对未知随机过程的抽样分析,是根据部分监测数据对整体随机过程的推断。但因同时考虑的因素较多,导致荷载模型的准确性难以保证,其基本的研究方向集中于涵盖更多的荷载参数、理清各参数间的相关性和更高效的建模方法等内容。该类型的荷载模型理论上可以实现对车辆荷载的全面描述,是目前各研究者最常用的建模方法。

4) 车辆荷载谱是随机车流的简化表达,其形式更为简单,应用方便,目前是进行疲劳性能分析的主要车辆荷载形式。

5) 车辆荷载理论模型是对荷载更全面和更本质意义上的表达尝试,虽然面临诸多困难,发展并不成熟,却是车辆荷载进一步研究的主要方向。

6) 随着社会发展,建立通用性的、自动化的车辆荷载模型成为模型发展的基本趋势。

参考文献:

- [1] 张建亮. 基于多信息融合的桥梁车载时空分布识别及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
ZHANG J L. Research on recognition and application of space-time distribution of bridge vehicles based on multi-information fusion[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [2] 周煜辉. 数据驱动的桥梁交通荷载智能识别研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
ZHOU Y H. Data-driven based intelligent identification of moving load on bridges[D]. Hangzhou: Zhejiang Uni-

- versity, 2023.
- [3] 袁彪. 基于深度学习和多源信息融合的中小桥车辆荷载识别[D]. 西安: 长安大学, 2023.
YUAN B. Dynamic load identification of vehicles in medium and small bridges based on deep learning and multi-source information fusion[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [4] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2024[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(12): 1-160.
- [5] 罗轩. 超大跨径悬索桥汽车荷载模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
LUO X. Research on automobile load model for extra-large span suspension bridges[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [6] 祝青鑫, 王浩, 陈铮一, 等. 基于WIM的江苏省干线公路桥梁车辆荷载统计模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(6): 1148-1155.
ZHU Q X, WANG H, CHEN Z Y, et al. Statistic model of vehicle loads for arterial highway bridges in Jiangsu Province based on WIM system[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(6): 1148-1155.
- [7] 赵楷林. 基于长期监测数据的栖霞山长江大桥车辆荷载模型研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
ZHAO K L. Study on vehicle load model of Qixiashan Yangtze River bridge based on long-term monitoring data [D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [8] MU M H, SUN X H, LEI C, et al. Study on the adaptability of vehicle loads in special lanes for trucks on highway bridges[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2023: 6044359.
- [9] WANG D, ZHAO Y, WANG J F, et al. Establishment and effect analysis of traffic load for long-span bridge via fusion of parameter correlation[J]. Structures, 2323, 55: 1992-2002.
- [10] 周泳涛, 翟辉, 鲍卫刚, 等. 公路桥梁标准疲劳车辆荷载研究[J]. 公路, 2009, 54(12): 21-25.
ZHOU Y T, ZHAI H, BAO W G, et al. Research on standard fatigue vehicular load for highway bridges[J]. Highway, 2009, 54(12): 21-25.
- [11] 韦港荣. 实测车流作用下拱桥吊杆疲劳寿命预测方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
WEI G R. Research on fatigue life prediction method of arch bridge suspender under measured traffic flow[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [12] 吕志林, 姜旭, 强旭红, 等. 钢箱梁斜拉桥等效疲劳车辆荷载模型分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2197-2208.
LÜ Z L, JIANG X, QIANG X H, et al. Equivalent fatigue vehicle load model of steel box girder in cable-stayed bridges[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2197-2208.
- [13] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2014[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 1-96.
- [14] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1-97.
- [15] “公路桥梁车辆荷载研究”课题组. 公路桥梁车辆荷载研究[J]. 公路, 1997, 42(3): 8-12.
- [16] 贡金鑫, 李文杰, 赵君黎, 等. 公路桥梁车辆荷载概率模型研究(一): 非治超地区[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6): 40-45.
GONG J X, LI W J, ZHAO J L, et al. Research on probabilistic model of highway bridge vehicle loads(1): non-controlling area[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 40-45.
- [17] HOU N, SUN L M, CHEN L. Modeling vehicle load for a long-span bridge based on weigh in motion data[J]. Measurement, 2021, 183: 109727.
- [18] 王强. 基于轮轴特征的公路桥梁车辆荷载模型研究[D]. 福州: 福州大学, 2010.
WANG Q. Study on live load model for highway bridges based on the characters of wheel axles[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010.
- [19] 赵少杰, 任伟新. 公路桥梁车辆荷载截尾分段概率模型及应用[J]. 中国公路学报, 2017, 30(6): 260-267.
ZHAO S J, REN W X. Piecewise truncation probability distribution model of vehicle loads for highway bridges and its application[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6): 260-267.
- [20] MOSES F, SCHILLING C G, RAJU K S. Fatigue evaluation procedures for steel bridges[C]// Washington: Trans-

- portation Research Board Executive Committee 1987, 1987:1-94.
- [21] LAMAN J A, NOWAK A S. Fatigue-load models for girder bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(7): 726-733.
- [22] CHOTICKAI P, BOWMAN M D. Truck models for improved fatigue life predictions of steel bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(1): 71-80.
- [23] 杨泽刚. 典型高速公路实际运行车辆荷载模型研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- YANG Z G. Research on load model of actual operating vehicles on typical highway[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [24] CHEN W Z, XU J, YAN B C, et al. Fatigue load model for highway bridges in heavily loaded areas of China[J]. Advanced Steel Construction, 2015, 11(3): 322-333.
- [25] 舒小娟, 李勇光. 莲城大桥疲劳荷载车辆模型研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2022, 31(2): 9-11.
- SHU X J, LI Y G. Study on fatigue load vehicle model of Liancheng Bridge[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2022, 31(2): 9-11.
- [26] 孙东晨. 考虑多参数相关性的疲劳车辆荷载模型研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.
- SUN D C. Study on fatigue vehicle load model considering multi-parameter correlation[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2023.
- [27] LIU Y, LI D R, ZHANG Z H, et al. Fatigue load model using the weigh-in-motion system for highway bridges in China[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(6): 04017011.
- [28] DENG L, NIE L, ZHONG W J, et al. Developing fatigue vehicle models for bridge fatigue assessment under different traffic conditions[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(2): 04020122.
- [29] 邢振华, 周广利, 刘恩广, 等. 山东省高速公路桥梁车辆荷载研究[J]. 山东交通科技, 2022(3): 33-40.
- XING Z H, ZHOU G L, LIU E G, et al. Study on the vehicle load of bridge on Shandong expressway[J]. Shandong Jiaotong Keji, 2022(3): 33-40.
- [30] LIANG Y Z, XIONG F. Study of a fatigue load model for highway bridges in Southeast China[J]. Gradevinar, 2020, 72(1): 21-32.
- [31] CHEN B, YE Z N, CHEN Z S, et al. Bridge vehicle load model on different grades of roads in China based on Weigh-in-Motion (WIM) data[J]. Measurement, 2018, 122: 670-678.
- [32] 尹兴, 黄海云, 张俊平, 等. 标准疲劳车荷载模型研究[J]. 公路工程, 2017, 42(4): 124-127.
- YIN X, HUANG H Y, ZHANG J P, et al. Study on standard fatigue vehicle load model[J]. Highway Engineering, 2017, 42(4): 124-127.
- [33] 邓扬, 颜巍, 刘扬, 等. 基于WIM数据的公路桥梁车辆疲劳荷载模型研究[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 164-171.
- DENG Y, YAN W, LIU Y, et al. Study on fatigue load model of highway bridge based on WIM data[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(1): 164-171.
- [34] 黄炎. 货运繁重公路车辆荷载谱及正交异性钢桥面板疲劳研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- HUANG Y. Vehicular loading spectrum and fatigue investigation into orthotropic steel bridge decks on heavy freight transportation highway[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [35] 胡翠敏. 随机车流荷载作用下桥梁多车道疲劳车辆荷载模型及结构疲劳寿命评估[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- HU C M. Multi-lane fatigue load model and fatigue life assessment of bridges under multi-lane random traffic loadings[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [36] NOWAK A S. Live load model for highway bridges[J]. Structural Safety, 1993, 13(1/2): 53-66.
- [37] MIAO T J, CHAN T H T. Bridge live load models from WIM data[J]. Engineering Structures, 2002, 24(8): 1071-1084.
- [38] 朱梅娟. 典型超重车辆对公路桥梁可靠性的影响规律研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- ZHU M J. Study on the influence law of typical overweight vehicles on the reliability of highway bridges[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [39] 蔡俊华. 基于WIM数据的斜拉桥评估汽车荷载模型研究及应用[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 173-177.
- CAI J H. Investigation and application of vehicle load model for cable-stayed bridge evaluation based on WIM data[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2): 173-177.
- [40] 余学志. 中小跨径梁桥车辆荷载效应模型研究及拓宽可靠度分析[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2019.
- YU X Z. Study on vehicle load effect model and reliability analysis of widening for small-span and medium-span beam bridge[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2019.
- [41] 王宁. 城市桥梁汽车荷载效应及设计荷载模型研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.

- WANG N. Research on vehicle load effect and design load model of urban bridge[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.
- [42] 刘圆圆. 公路桥梁分车道荷载差异及其对结构性能的影响研究[D]. 广州: 广州大学, 2020.
- LIU Y Y. Investigation of lane load disparities and their effects on structural performances of highway bridges [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020.
- [43] 张喜刚 等. 公路桥梁汽车荷载标准研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- ZHANG X G. Study on vehicle load standard of highway bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [44] 刘扬, 张海萍, 鲁乃唯, 等. 基于 WIM 的随机车流建模和简支梁桥荷载效应研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(5): 13-18.
- LIU Y, ZHANG H P, LU N W, et al. Study of random vehicle flow modeling and load effect of simply-supported beam bridge based on WIM data[J]. Bridge Construction, 2015, 45(5): 13-18.
- [45] 李林春. 基于长期 WIM 数据的公路桥梁车辆荷载模型及效应研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- LI L C. Vehicle load model and effect study of highway bridge based on long-term WIM data[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [46] 杨晓艳. 公路桥梁车辆荷载及可靠度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- YANG X Y. Studies on vehicle loads of highway bridge and reliability[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [47] 周剑波. 基于随机车流的桥梁动力特性与可靠性研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- ZHOU J B. The dynamic characteristics and reliability of bridge based on random traffic flows[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [48] 冯海月. 采用广义 Pareto 分布进行车辆荷载效应极值估计的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- FENG H Y. Estimation of extreme vehicle load effect based on generalized pareto distribution[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [49] 张弛, 高震, 薛丽. 公路桥梁车辆荷载极值模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(4): 31-36.
- ZHANG C, GAO Z, XUE L. Study on extreme value model of highway bridge vehicle load[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2018, 40(4): 31-36.
- [50] LIANG Y Z, XIONG F. Multi-parameter dynamic traffic flow simulation and vehicle load effect analysis based on probability and random theory[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(8): 3581-3591.
- [51] 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 W S, MA L, WANG B, 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.
- [52] 宗周红, 杨泽刚, 夏叶飞, 等. 拥堵运行状态下新沂河大桥车辆荷载模型[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 44-51.
- ZONG Z H, YANG Z G, XIA Y F, et al. Vehicle load model for Xinyi River Bridge under congested running status[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2): 44-51.
- [53] KIM J, SONG J. A comprehensive probabilistic model of traffic loads based on weigh-in-motion data for applications to bridge structures[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(8): 3628-3643.
- [54] 孟垂进. 基于 WIM 数据的公路桥梁车辆荷载时间演变特性及荷载效应研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022.
- MENG C J. Research on time evolution characteristics and load effect of vehicle load on highway bridges based on WIM data[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022.
- [55] 林诗枫, 黄侨, 任远, 等. 基于南京长江三桥的车辆荷载模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 365-370.
- LIN S F, HUANG Q, REN Y, et al. Traffic load model based on the third Nanjing Yangtze River bridge[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(2): 365-370.
- [56] 黄侨, 朱志远, 任远, 等. 基于车辆荷载模型的斜拉索索力随机模拟及疲劳分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(2): 12-22.
- HUANG Q, ZHU Z Y, REN Y, et al. Cable force simulation and fatigue analysis for stay cable based on traffic load model[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(2): 12-22.
- [57] ZENG P, WANG R H, SUN Z, et al. Deflection analysis of long-span girder bridges under vehicle bridge interaction using cellular automaton based traffic microsimulation[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2019, 16(5): 5652-5671.
- [58] 周永兵, 李睿, 刘海证, 等. 基于元胞自动机的随机车流模拟与桥梁疲劳响应分析[J]. 公路交通科技, 2020, 37(5): 83-91, 122.

- ZHOU Y B, LI R, LIU H Z, et al. Simulation of random traffic flow and analysis on bridge fatigue response based on CA[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(5): 83-91, 122.
- [59] GHOSN M, MOSES F. Markov renewal model for maximum bridge loading[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(9): 1093-1104.
- [60] CROCE P, SALVATORE W. Stochastic model for multi-lane traffic effects on bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(2): 136-143.
- [61] 王磊, 张建仁. 基于平衡更新过程的既有桥梁车辆荷载效应模型[J]. 中国公路学报, 2008, 21(5): 50-56.
- WANG L, ZHANG J R. Vehicle load effect model for existing bridge based on equilibrium renewal process[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(5): 50-56.
- [62] 陈照全. 既有桥梁车辆荷载的随机过程模型研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
- CHEN Z Q. Research on traffic load stochastic process model of existing bridge[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007.
- [63] 叶际斌. 既有桥梁车辆荷载行进过程数学模型构建[J]. 福建工程学院学报, 2017, 15(3): 215-218.
- YE J B. Construction of mathematical model for vehicles' loaded passing existing bridge[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2017, 15(3): 215-218.
- [64] LIU Y, LI D R, LI Y Q, et al. Modeling vehicle traffic loads by the 2D compound Poisson process[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2018, 34(5): 607-617.
- [65] 余志武, 朱红兵, 蒋丽忠, 等. 公路桥梁车辆荷载随机过程模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10): 3131-3135.
- YU Z W, ZHU H B, JIANG L Z, et al. Vehicles load stochastic process model of highway bridges[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(10): 3131-3135.
- [66] CHEN Z C, BAO Y Q, CHEN J H, et al. Modelling the spatial distribution of heavy vehicle loads on long-span bridges based on undirected graphical model[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(11): 1485-1499.
- [67] 陈水生, 赵辉, 朱朝阳, 等. 随机车载下的桥梁裂缝宽度极值预测方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 82-87.
- CHEN S S, ZHAO H, ZHU C Y, et al. Extreme value prediction method of crack width of bridge under random vehicle load[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 82-87.
- [68] 陈水生, 葛世祺, 桂水荣, 等. 基于车桥耦合振动的公路桥梁行车舒适性分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(1): 1-9.
- CHEN S S, GE S Q, GUI S R, et al. Analysis on driving comfort of highway beam bridge based on vehicle-bridge coupling vibration[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(1): 1-9.
- [69] 陈水生, 桂水荣, 赵辉, 等. 公路桥梁车-桥耦合振动分析模型、试验与应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2023.
- CHEN S S, GUI S R, ZHAO H, et al. Vehicle-bridge coupling vibration analysis of highway bridges[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2023.
- [70] 韩大章, 郭彤, 黄灵宇, 等. 随机车辆荷载下大跨钢桥伸缩缝纵向位移响应及病害控制研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 172-178.
- HAN D Z, GUO T, HUANG L Y, et al. A study on longitudinal displacements and damage control of expansion joints of long-span steel bridges under stochastic traffic loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 172-178.



第一作者: 任永明(1984—), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为桥梁结构荷载。E-mail: 278455596@qq.com.



通信作者: 陈水生(1968—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为土木工程结构振动及控制。E-mail: shschen@126.com.