

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.260



开放科学(资源服务)标识码OSID:



考虑区分车辆运行状态的桥梁车载 统计分析及模拟

杨东辉^{1,2}, 管泽鑫¹, 伊廷华¹, 李宏男¹

(1. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁大连 116024; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641)

摘要: 动态称重系统作为桥梁结构健康系统的重要组成部分之一, 能提供丰富的车辆荷载监测数据, 在此基础上建立能反映实际交通状况的车辆荷载模型, 对桥梁结构的安全评估、车致疲劳分析等具有重要意义。提出一种能考虑区分车辆运行状态的随机车流模拟方法和流程, 在车辆荷载统计分析过程中通过各时段的车流量密集程度区分车辆运行状态, 针对不同运行状态, 引入单峰和多峰概率分布模型, 对车重、车速、车间距等车辆荷载统计参数进行概率拟合, 通过K-S检验获得车辆荷载参数的最优概率分布; 通过Monte Carlo抽样模拟随机车流, 进而分解为随机加载流; 基于某实际桥梁的车辆荷载监测数据, 对车辆荷载模拟方法的合理性进行验证。结果表明: 采用区分车辆运行状态模拟的随机车流对桥梁结构进行加载, 获得的钢箱梁跨中底板应力幅值和应力循环次数与实际车流加载结果接近。相比之下, 如果不考虑区分车辆运行状态, 得到的应力幅值和循环次数都明显小于实际车流的加载结果, 这对于桥梁结构的车致疲劳分析偏于危险。

关键词: 结构健康监测; 动态称重; 车载统计分析; 随机车流; 车辆运行状态

中图分类号: U447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)06-0085-09

Statistical analysis and simulation of vehicle load considering traffic states division

YANG Donghui^{1,2}, GUAN Zexin¹, YI Tinghua¹, LI Hongnan¹

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510006, P. R. China)

Abstract: The weigh-in-motion system is one of the important part of the bridge structure health system, which can provide abundant vehicle load monitoring data. On this basis, establishment of vehicle load model that can

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(52078102、52050050、51978128); 亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题(2020ZB)

作者简介: 杨东辉(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事桥梁结构健康监测和性能评估研究, E-mail: dhyang@dlut.edu.cn。
伊廷华(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: yth@dlut.edu.cn。

Received: 2021-09-28

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52078102, 52050050, 51978128); Open Projects of State Key Laboratory of Subtropical Architectural Science (No. 2020ZB)

Author brief: YANG Donghui (1985-), PhD, associate professor, main research interests: bridge structural health monitoring and performance evaluation, E-mail: dhyang@dlut.edu.cn

YI Tinghua (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yth@dlut.edu.cn.

reflect the actual traffic conditions is of great significance for safety assessment and vehicle-induced fatigue analysis of bridge structures. This paper proposes a random traffic flow simulation method and process that considering different traffic states. In the process of vehicle load statistical analysis, the traffic states are divided by the vehicle flow intensity in each period. For different traffic states, the common single-peak probability distribution models and the multi-peak one are introduced to carry out probability fitting for vehicle weight, vehicle speed and vehicle spacing, and the optimal probability distribution of vehicle load parameters can be obtained by K-S test. The Monte-Carlo method is used to simulate random traffic flow, and then decomposed into random loading flow. Finally, the rationality of the vehicle load simulation method is verified based on the vehicle load monitoring data of an actual bridge. The results show that when the different traffic states are considered for random traffic flow simulation, the stress amplitudes and stress cycle times of the steel box girder lower flange at mid-span are close to the results induced by the actual traffic flow. By contrast, when the different traffic states are not distinguished for traffic flow simulation, the stress amplitude and the number of cycles obtained are significantly smaller than the actual, which would lead to risky results for the vehicle-induced fatigue analysis of the bridge structure.

Keywords: structural health monitoring; weigh-in-motion; vehicle load statistical analysis; random traffic flow; traffic states

车辆荷载作为桥梁运营期间的主要活载,对桥梁的安全可靠性有着举足轻重的影响,因此,如何基于实测数据建立准确可靠且能够反映实际交通状况的车辆荷载模型对桥梁的设计、安全评估、疲劳寿命预测及养护维修都具有重要意义。由于车辆荷载运营状态是一个复杂的随机过程,实时车流量密度、车辆类型、车重、车速、车间距以及车辆横向位置等均具有很强的随机性,需要对车辆荷载的实测数据进行精细化统计分析,获得车辆荷载各参数的概率类型,从而建立能够反映实际车辆运营状态的随机车流模型。

学者们对基于动态称重(Weigh-In-Motion, WIM)系统的车辆荷载进行了统计分析,O'Connor等^[1]、Kim等^[2]根据WIM记录的车辆荷载特征,使用蒙特卡罗(Monte Carlo, M-C)法进行随机车流模拟,并通过与实测数据对比验证了模拟结果的有效性。孙守旺等^[3]在监测数据的基础上计算实际运行车辆参数,建立了车辆荷载统计模型。刘扬等^[4]基于实测数据建立了符合宜泸高速行车车速、车距和轴重参数的概率模型,对比了公路设计荷载作用下简支梁桥的荷载效应值。Chen等^[5]采用WIM系统对不同等级道路的监测数据,对车辆荷载特征进行了系统研究,建立了反映不同等级道路上车辆车速、轴重、车辆总重量等参数的概率模型。Wang等^[6]在模拟大跨度悬索桥的交通荷载时,考虑车辆增长和车辆季节性效应,结合蒙特卡罗法进行了交通微仿真模拟。宗周红等^[7]基于江苏省高速公路桥

梁的实测车辆数据,计算汽车荷载效应极值的概率分布,并建立了江苏省高速公路桥梁汽车荷载模型。劳家荣等^[8]提出了基于随机车流的桥梁作用效应的极值概率分析方法,推测实际车流长期作用下的桥梁最大荷载效应。黄侨等^[9]以南京长江三桥的实测数据为依据,建立车辆荷载相关参数的统计模型,结合有限元模型计算车辆荷载模型下斜拉索的腐蚀疲劳寿命。袁伟璋等^[10]基于京珠、粤赣和渝湛3条高速的运营车辆荷载实测数据,建立随机车流模型,对既有桥梁进行剩余服役期内可靠度评估。以上学者都使用模拟的车辆荷载模型对桥梁车致荷载效应进行了评估,但车辆荷载模拟流程中还存在对车辆运行状态区分考虑不完善的问题,导致模拟的随机车流不够精细,可能影响后续桥梁评估结果。

笔者提出考虑区分车辆运行状态的桥梁车载统计分析及模拟方法。根据各时段实际车流量密度分布情况区分不同车辆运行状态;针对不同车辆运行状态,引入单峰和多峰概率分布模型,对车重、车速、车间距等车辆荷载统计参数分别进行概率拟合,从而获得最优概率分布模型;进而介绍不同车辆运行状态下的随机车流模拟流程;最后以实际桥梁为例,分别加载区分车辆运行状态、不区分车辆运行状态的模拟车流以及实际监测数据生成的车流,对比分析结果,验证所提区分方法的有效性。与以往研究相比,所提方法对目标桥梁车辆运行状态的区分更有针对性和普适性,对不同运行状态下

的各车辆荷载统计参数分别选取最优概率模型,使模拟的随机车流更精细、更符合实际情况,从而提高后续对桥梁各种分析评估的准确性。

1 车辆运行状态区分

在对车辆荷载数据进行统计分析时,受行驶人员作息、节假日以及高峰拥堵等客观因素的影响,不同时段的车流密度、车速、重车出现概率、车间距会有较大差异,因此,为建立与实际交通情况相适应的车辆荷载模型,需区分不同车辆运行状态并分别进行统计分析和模拟,以提高后续对桥梁分析评估的准确性。

目前,针对密集运行状态和一般运行状态还没有明确的区分界限,对车辆运行状态的区分多是沿用中国规范修订时给出的车辆时间间隔是否超过3 s的标准,将车辆区分为一般运行状态和密集运行状态。宗周红等^[11]以汽车通过同一监测断面的时间间隔是否超过2 s为标准来区分车辆运行状态,建立车间距模型,两种模型分别服从威布尔分布和伽马分布;王强等^[12]以车辆行驶间距是否超过44.35 m为标准,将车辆运行状态区分为密集、一般两种状态;鲁乃唯^[13]将每个车道内车距为100 m以内的车辆定义为密集运行车辆,车距100 m以上的车辆定义为稀疏运行车辆。这些方法虽然能满足特定桥梁的某种评估要求,但针对符合实际交通流情况的车辆荷载精细化模拟还存在以下问题:1)区分限值设置没有明确依据,且划分限制的设置不具有普适性,不能反映不同桥梁的真实交通情况,具有一定的局限性;2)多数学者对区分的运行状态仅在车间距统计分析中体现,未考虑不同运行状态下重车出现概率、车速等的差异;3)在随机车流模拟过程中未能体现不同车辆运行状态出现的比例。

根据以往研究,结合实际情况分析可以发现,车流量高峰一般出现在白天^[14],重车在夜间行驶概率较高,拥堵时段车速较低。因此,结合不同时段可能存在的车辆行为,参考交通流划分相关文献^[15],根据实际车流情况,以各时段车流量大小及比例为标准进行运行状态区分。区分原则:1)各车道分别进行运行状态区分;2)一般运行状态时段车流量小于最高车流量的1/3及以下,密集运行状态时段车流量大于最高车流量的1/3,由于日车流量一般呈M型分布,如图1所示,故一般区分为车辆密集的白天运行时段和车辆稀疏的夜间运行时段。

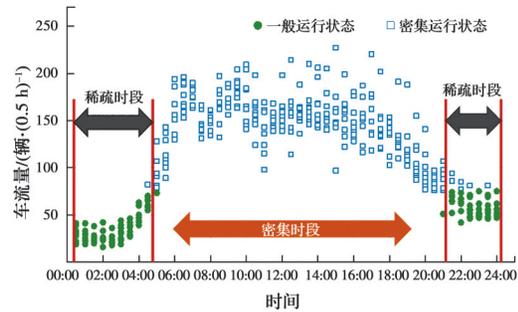


图1 车辆运行状态时段区分

Fig. 1 Division of traffic states period

2 车辆荷载特征统计分析

2.1 车型确定及车流量统计

由于桥梁道路管理模式以及车道功能等因素的差异,不同运行状态、不同车道通过的车辆类型和所占比例不同,不同车辆类型的轴型、轴间距和轴重比差异对桥梁产生的作用效应也不同,故需依据实测车辆轴型、载重情况对车辆类型进行区分^[16],区分标准:1)轴数相同的车辆归为同一类;2)在轴数相同的车型中,载重情况类似的车辆归为同一类;3)对于数量占比相对较少的车型,可将其归到相似载重的车型里或做忽略处理。

车流量为单位时间内通过某路段的车辆数,是反映车辆荷载大小及分布的重要参数。车流量分析需包含不同车型的车流量及比例分析、不同时段车流量分析、不同车道车流量分析,从而可以确定各车型车辆所占比例、区分车辆不同密集程度运行时段以及体现交通量的横向分布。

2.2 车重、车速、车间距概率模型建立

桥梁结构在车辆荷载作用下经历的应力值大小主要取决于车辆的重量,相关研究表明^[1-5],不同车型的车重具有完全不同的分布,相同车型的车重具有极其相似的分布,小型车辆一般符合单峰概率分布,而重型车辆因为载重类型差异较大,一般符合多峰分布。因此,为对不同车型的车重进行精确分析,引入正态分布、对数正态分布、广义极值分布^[17]、威布尔分布以及伽马分布等单峰分布对小型车辆进行概率拟合,引入高斯混合模型^[18](Gaussian Mixture Model, GMM)对大型车辆进行概率拟合。

车速是进行桥梁结构动力分析研究的重要参数之一,且速度分布与车辆类型及车道有着较大关系,故在进行车速统计分析时需根据不同车道、不同车型进行车速拟合,确定其概率模型。车速概率模型一般呈对称单峰分布,多符合正态分布^[19-20]。

目前,有些 WIM 监测系统无法直接测量车间距,故需要根据前车车速以及相邻两车到达时间乘积来确定。车间距在不同运行状态下可能符合对数正态分布^[14]、广义极值分布、伽马分布、威布尔分布^[11]等单峰分布。

在密集运行状态和一般运行状态下分别对车重、车速和车间距数据使用多种概率曲线拟合,并进行 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验,根据检验结果确定最优概率分布模型,适用的常用概率分布模型如表 1 所示。

表 1 车辆荷载统计分析常用概率分布模型
Table 1 Probability distribution model of vehicle load statistical analysis

分布模型	概率密度函数	适用参数
正态分布	$f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	车重、车速
对数正态分布	$f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	车重、车间距
广义极值分布	$f(x \mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}-1} \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\}$	车重、车间距
威布尔分布	$f(x \lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right]$	车重、车间距
伽马分布	$f(x \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha x^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\beta x)$	车重、车间距
GMM	$f(x M, w, \mu, \sigma) = \sum_{i=1}^M w_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right]$	车重

注:GMM 有 3 个参数,其中: i 为高斯分量个数; w_i 为表示第 i 个高斯分布的权系数; μ_i 和 σ_i 为相应的均值和方差。

3 随机车流模拟

在获得车辆荷载相关要素统计特征之后,将车辆荷载各统计参数作为互相独立且互不影响的随机变量,采用蒙特卡罗抽样方法对不同运行状态下的随机车流进行模拟,具体步骤如下:

步骤 1: 确定随机车流参数模拟顺序。随机车流模拟过程中依次考虑车道选择、车辆运行状态区分、抽样车辆总数、车辆类型比例 p 、车重、车速以及车间距概率模型。

步骤 2: 随机车流的模拟。首先确定待模拟车道,然后将该车道不同车辆运行状态下车流量、车辆类型、车重、车速以及车间距分别依次进行随机数抽样,生成符合指定分布的随机数作为模拟数据样本,得到以车辆为单位的包含车速随机序列、车重随机序列及车间距随机序列的随机车辆流,具体模拟流程如图 2 所示。

步骤 3: 将随机车流转化为随机车辆加载流。根据各类车型车辆的车轴间距、轴重的分配比例以及相邻车辆的车辆间距,将随机车流分解为以轴重随机序列、距离随机序列和车速随机序列组成的随机加载流。

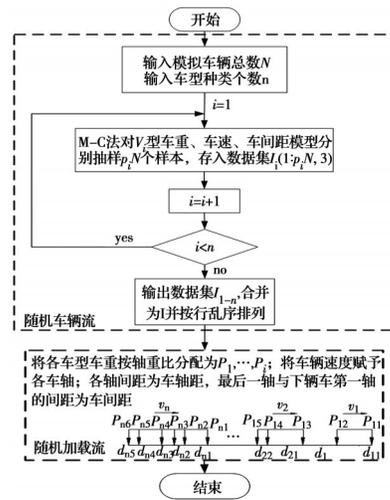


图 2 随机车流模拟流程

Fig. 2 Flow chart of random traffic flow simulation

4 案例分析及理论验证

以某装有 WIM 监测系统的大跨度悬索桥为例,桥梁全长 1 280 m,双向六车道,选取该桥梁 20 d 车辆荷载数据作为研究样本,介绍考虑区分车辆运行状态的随机车流模拟方法,并通过有限元加载与

实测车流进行对比验证。

4.1 车流量、车型、车轴间距和车轴重比

对连续 20 d 车辆荷载实测数据各时段总车流进行分析,分布情况如图 3 所示,可以发现:日车流量高峰期发生在 05:00—21:00 之间,全天车流最高峰值出现在 18:00;日车流量低谷期发生在 21:00—次日 05:00 之间,全天车流量的最低值出现在凌晨 03:00 左右。

根据实测数据,将车型分为 6 种类型,其轴型、轴间距、轴重比例以及各车型在车道所占比例结果如表 2 所示。可以看出,快车道小型车占比较高,慢

车道大型车占比较高。

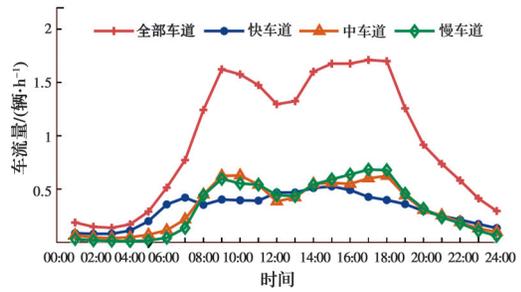


图 3 各车道的车流量时段分布
Fig. 3 Time distribution of traffic flow in each lane

表 2 车型分类

Table 2 Vehicle classification

车辆类型	各车道车辆所占比/%			车辆轴型	车轴距 /m					轴重比	
	快车道	中车道	慢车道		L1	L2	L3	L4	L5		
C1	86.70	18.00	19.00		2.6					0.41:0.59	
C2	10.60	8.82	9.80		4.5					0.38:0.62	
C3	0.57	5.25	4.20		3.5	1.3				0.25:0.26:0.49	
C4	0.27	11.79	16.00		2	5.5	1.3			0.21:0.27:0.26:0.26	
C5	0.30	14.73	15.00		3	6	1.3	1.3			0.19:0.25:0.20:0.18:0.18
C6	1.59	41.36	36.00		3	1.3	6.5	1.3	1.3	0.14:0.17:0.17:0.18:0.17:0.17	

4.2 车重

首先使用简单概率分布将实测车辆荷载车重数据进行拟合,若 K-S 检验通过,则选择最优概率分布,若不通过,则使用高斯混合分布进行拟合。不同运行状态下车重不同,故需分别进行统计分析,以密集运行状态下 C1 和 C5 型车车重数据为例,展示概率拟合过程,如图 4 所示,C5 型车车重拟合结果如表 3 所示。表 4 为密集运行状态下 6 种车型统计分析得到的最优概率模型及其参数,可以看出,小型车多符合简单单峰分布,大型车因载重情况不同,多符合多峰分布。

4.3 车速和车间距

对各车型实测车速进行统计分析可以发现,各车型车速均符合正态分布,结果如表 5 所示,两种运行状态下各时段车速分布情况及两种状态下车速

均值如图 5 所示。可以看出,随着载重能力的增加,车速均值会有一定的减少,白天运行状态下车速分布较为集中且车速较慢,夜间运行状态下车速分布较为分散且车速较快。

对车间距的统计分析需要区分不同密集程度的运行状态。根据如图 1 所示的日时间段车流量变化特征,将车辆运行状态区分为车流量较大的白天运行状态和车流量较小的夜间运行状态。最终取白天时段为 05:00—21:00,夜间时段为 21:00—24:00、00:00—05:00。两种运行状态的车间距概率模型如表 6 所示,白天运行状态符合广义极值分布,夜间运行状态符合伽马分布。

4.4 随机车流模拟及对比验证

根据随机车流模拟流程,采用蒙特卡罗抽样分别生成两种状态下的随机车流,慢车道 1 h 的随机

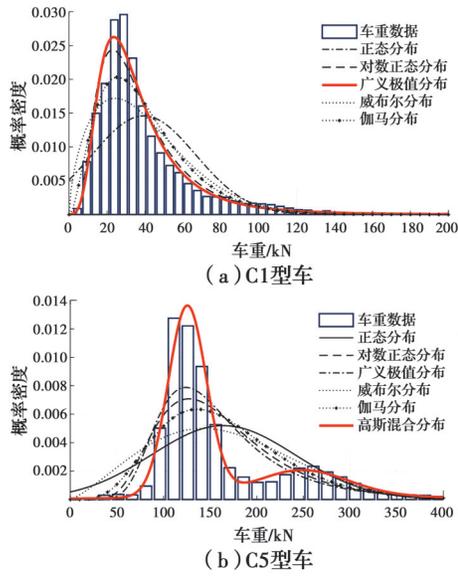


图 4 车重概率密度分布

Fig. 4 Probability distribution of vehicle weight

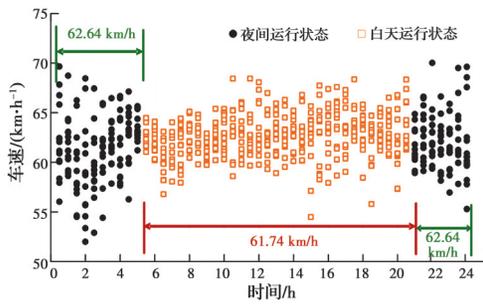


图 5 车速时段分布

Fig. 5 Time distribution of vehicle speed

车辆流如图 6 所示,明显看出两种运行状态的车流量差异。将各车道分别按照其车辆荷载统计参数模型抽样得到随机车流,进而分解成随机加载流,可进行有限元加载。因各车道车流分别抽样模拟已具有很大随机性,且同一车道各车辆车速随机,车间距时刻变化,故不再考虑车辆换道及加、减速问题。

对案例桥梁有限元模型跨中底部分别加载 24 h WIM 系统实际监测数据生成的车流和 24 h 根据实

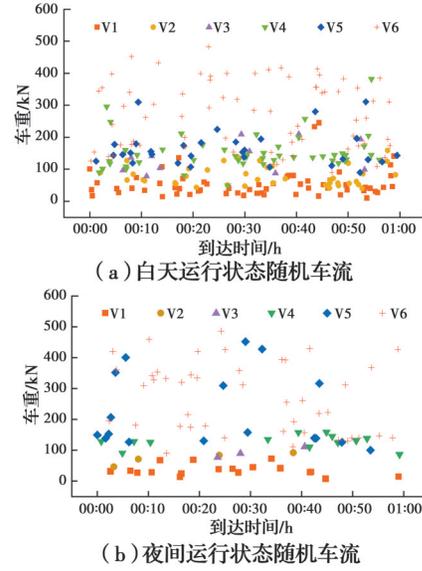


图 6 两种运行状态下随机车流

Fig. 6 Random traffic flow under two vehicle operating status

表 3 C5 型车车重不同分布的 K-S 检验结果

Table 3 K-S test results of different distributions for 5-axle vehicle weight

分布类型	分布参数			K-S 检验参数		结果	
	参数	参数值	参数值	检验值	临界值		
正态分布	μ	164.06 kN		0.216	0.043	不接受	
	σ	76.78 kN					
对数正态分布	μ	163.25 kN		0.141	0.043	不接受	
	σ	69.4 kN					
广义极值分布	μ	163.36 kN		0.119	0.043	不接受	
	σ	73.7 kN					
	ξ	0.13					
威布尔分布	μ	164.42 kN		0.180	0.043	不接受	
	σ	77.9 kN					
伽马分布	μ	164.06 kN		0.169	0.043	不接受	
	σ	67.8 kN					
GMM	w_i	0.69	0.22	0.10	0.028	0.043	接受
	μ_i	125.43 kN	248.95 kN	246.55 kN			
	σ_i	20.43 kN	48.43 kN	137.22 kN			

注:参数 μ 为均值; σ 为标准差。

表 4 各车型车重概率分布模型

Table 4 Probabilistic distribution model of vehicle weight

车辆类型	概率分布类型	μ /kN	σ /kN	ξ	车辆类型	概率分布类型	M	w_i	μ_i /kN	σ_i /kN
C1	广义极值	39.50	29.56	0.25	C4	GMM	1	0.03	265.31	109.95
							2	0.65	111.51	16.85
							3	0.33	145.75	49.71
C2	广义极值	69.50	28.82	0.04	C5	GMM	1	0.69	125.43	20.43
							2	0.22	248.95	48.43
							3	0.10	246.55	137.22
C3	对数正态	107.54	48.63		C6	GMM	1	0.59	306.16	52.58
							2	0.04	362.03	186.14
							3	0.37	138.41	28.15

表 5 各车型车速概率模型

Table 5 Probabilistic distribution model of vehicle speed

车型	车速均值/(km·h ⁻¹)	车速标准差/(km·h ⁻¹)
C1	66.15	13.30
C2	63.12	11.91
C3	61.87	11.91
C4	61.36	9.34
C5	62.37	10.08
C6	57.72	13.19

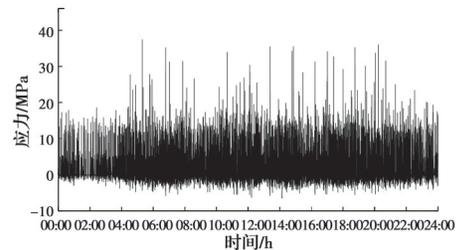
表 6 车间距概率模型

Table 6 Probabilistic distribution model of vehicle spacing

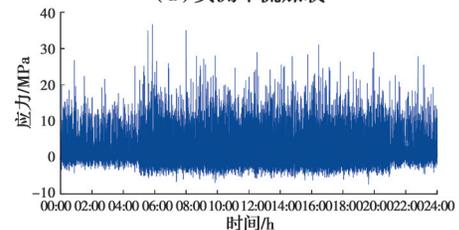
运行状态	分布类型	车间距均值/m	车间距标准差/m
白天状态	广义极值	251	392
夜间状态	伽马分布	740	720

测数据统计分析模拟的随机车流,所得应力结果分别如图 7(a)、(b)所示,将应力时程每 5 min 取一次均值,结果对比如图 7(c)所示,可以看出,应力时程曲线大小及时段变化特征相似,验证了随机车流模拟的真实性。

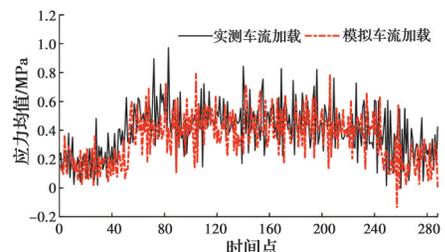
分别模拟 7 d 不考虑运行状态区分随机车流模型(模型 1)、考虑运行状态区分随机车流模型(模型 2),与实际车流一起分别进行有限元加载,得到应力时程曲线通过雨流计数法计算应力幅值均值和循环次数如表 7 所示,可以看出,考虑运行状态区分的加载结果与实际车流相近,而不考虑区分运行状态的加载结果明显小于实际车流应力,这对于桥梁结构的车致疲劳分析偏于危险。



(a) 实测车流加载



(b) 模拟车流加载



(c) 加载结果对比

图 7 实测和模拟车流加载结果

Fig. 7 Results of measured and simulated traffic flow loading

表 7 3 种车流模型加载结果

Table 7 Loading results of three traffic flow models

车流类型	应力幅值均值/MPa	日均循环次数
实际车流	4.36	9 939
模型 1	4.08	9 089
模型 2	4.45	9 949

5 结论

针对目前车辆荷载模拟时车辆运行状态区分没有明确标准、限值取值不能适用于不同桥梁实际情况等问题,基于WIM系统监测数据提出了一种可考虑区分车辆运行状态的随机车流模拟方法和流程,并以某桥梁实测数据为例,对所提方法进行验证,主要研究结论如下:

1)日车流量高峰期发生在05:00—21:00之间,低谷期发生在21:00—24:00、00:00—05:00之间。小型车多集中于快车道,大型车集中于中车道和慢车道,小型车车重符合单峰分布,大型车车重符合多峰分布。各车型车速均符合正态分布,随着载重量的增加,车速减小。

2)结合实测车流量时段分布情况,将车辆运行状态区分为白天运行状态和夜间运行状态,案例桥梁白天运行状态车间距符合广义极值分布,夜间运行状态车间距符合伽马分布,白天运行状态下车速分布较为集中且车速较慢,夜间运行状态下车速分布较为分散且车速较快。对比以往按照固定限制区分得到的密集、一般运行状态,其更符合不同的实际交通流情况。

3)介绍了将模拟的随机车辆流转化为随机加载流的方法,通过有限元加载可以得到车辆荷载对桥梁的作用效应,从而可以进行桥梁结构设计复核、桥梁结构预警和桥梁车致疲劳评估及预测等工作。分别加载实测车流和模拟车流,通过对比荷载响应结果,验证了所介绍的随机车流模拟方法能够很好地模拟真实的车流情况。

4)对比实际监测数据生成的车流、不考虑运行状态区分模拟车流、考虑运行状态区分模拟车流加载的3种情况可以发现,考虑运行状态区分模拟车流加载得到的应力幅值均值与实际车流加载结果接近,不考虑运行状态区分模拟车流加载得到的应力幅值均值小于实际车流,说明不考虑区分车辆运行状态的模拟结果偏于危险,验证了区分方法的有效性。从理论上说明了所提方法的普适性,并以实例初步验证了相关结论,但由于缺少其他桥梁公路的车辆荷载数据,所得结论的普适程度还有待更多实例验证。

参考文献

[1] O'CONNOR A, O'BRIEN E J. Traffic load modelling and factors influencing the accuracy of predicted

extremes [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32(1): 270-278.

[2] 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.

[3] 孙守旺, 孙利民. 基于实测的公路桥梁车辆荷载统计模型 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 198-204.

SUN S W, SUN L M. Statistic model of vehicle loads for highway bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(2): 198-204. (in Chinese)

[4] 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. (in Chinese)

[5] 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.

[6] WANG F Y, XU Y L. Traffic load simulation for long-span suspension bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(5): 05019005.

[7] 宗周红, 薛程, 杨泽刚, 等. 基于WIM的江苏省高速公路桥梁汽车荷载模型 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 143-152.

ZONG Z H, XUE C, YANG Z G, et al. Vehicle load model for highway bridges in Jiangsu Province based on WIM [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(1): 143-152. (in Chinese)

[8] 劳家荣, 谭皓, 鲁乃唯. 基于车辆WIM监测数据的大跨桥梁作用效应极值分析 [J]. 中外公路, 2020, 40(3): 114-118.

LAO J R, TAN H, LU N W. Study on extreme load effects on large bridges based on vehicle wim monitoring data [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3): 114-118. (in Chinese)

[9] 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. (in Chinese)

[10] 袁伟璋, 黄海云, 张俊平, 等. 基于实际运营车辆荷载

- 效应的既有桥梁可靠度研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(6): 239-244.
- YUAN W Z, HUANG H Y, ZHANG J P, et al. Study on the reliability of an existing bridge based on the actual operating vehicle load effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(6): 239-244. (in Chinese)
- [11] 宗周红, 李峰峰, 夏叶飞, 等. 基于WIM的新沂河大桥车辆荷载模型研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(5): 29-36.
- ZONG Z H, LI F F, XIA Y F, et al. Study of vehicle load models for Xinyi river bridge based on WIM data [J]. Bridge Construction, 2013, 43(5): 29-36. (in Chinese)
- [12] 王强, 苏成. 公路桥梁车辆行驶间距研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 96-102.
- WANG Q, SU C. A probe into travel spacing of vehicles on highway bridges [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(3): 96-102. (in Chinese)
- [13] 鲁乃唯. 随机车流下悬索桥加劲梁动力响应概率模型与可靠度研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- LU N W. Probability model of dynamic responses and reliability assessment for stiffening girders of suspension bridges under random traffic flow [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] 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 W S, CHEN A R. Three-dimensional coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems under random traffic flow [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(9): 97-102. (in Chinese)
- [15] 关伟, 何蜀燕. 基于统计特性的城市快速路交通流状态划分[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(5): 42-50.
- GUAN W, HE S Y. Phase identification of urban freeway traffic based on statistical properties [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(5): 42-50. (in Chinese)
- [16] 李明, 刘扬, 杨兴胜. 考虑轴重相关的随机车流荷载效应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(1): 78-88.
- LI M, LIU Y, YANG X S. Random vehicle flow load effect considering axle load [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(1): 78-88. (in Chinese)
- [17] 陈兴旺. 广义极值分布理论在重现期计算的应用[J]. 气象与减灾研究, 2008, 31(4): 52-54.
- CHEN X W. Application of generalized extreme value distribution theory in calculating return periods [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2008, 31(4): 52-54. (in Chinese)
- [18] 刘扬, 张海萍, 邓扬, 等. 公路桥梁车辆荷载建模方法及疲劳寿命评估[J]. 应用力学学报, 2016, 33(4): 652-658, 740.
- LIU Y, ZHANG H P, DENG Y, et al. Research on probabilistic model of highway vehicle loads and fatigue life assessment of highway bridges [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(4): 652-658, 740. (in Chinese)
- [19] 阎莹, 王晓飞, 张宇辉, 等. 高速公路断面运行车速分布特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(7): 171-176.
- YAN Y, WANG X F, ZHANG Y H, et al. Research on section operating speed distribution characteristics of expressway [J]. China Safety Science Journal (CSSJ), 2008, 18(7): 171-176. (in Chinese)
- [20] 陈达章, 石雪飞. 扩建桥梁车辆荷载特性及多车道荷载模型研究[J]. 公路, 2021, 66(6): 176-183.
- CHEN D Z, SHI X F. Study on vehicle load characteristics and multi-lane load model of extended bridge [J]. Highway, 2021, 66(6): 176-183. (in Chinese)

(编辑 胡玲)