

基于车辆 WIM 监测数据的大跨桥梁作用效应极值分析

劳家荣¹, 谭皓², 鲁乃唯^{3*}

(1. 广西桂龙高速公路有限公司, 广西 南宁 530000; 2. 长沙市望城区公路养护中心; 3. 长沙理工大学 土木工程学院)

摘要:在中国交通荷载急剧增长的现实情况下,重载交通下既有桥梁的结构安全问题日益突出。为了推测实际车流长期作用下的桥梁最大荷载效应,提出了基于随机车流的桥梁作用效应极值概率分析方法。首先,基于某高速公路车辆的动态称重数据建立了随机车流荷载模型,并提取了关键车队加载工况;其次,模拟了某悬索桥的车桥耦合振动效应的位移时程曲线,建立了最优的 Rice 界限跨阈率模型;最后,分析了交通量线性增长对桥梁极值的影响,校验了设计作用标准值。数值分析结果表明:Rice 界限跨阈率模型可捕捉车辆荷载的动力效应,从而实现动力效应极值分析;当交通量的年线性增长率为4%时,桥梁位移极值增加约7.7%,极值增长速率逐步降低;在设计标准值的1950年重现期条件下,某悬索桥的位移极值上限为1.9 m,满足变形上限 $L/300$ 的要求。

关键词:桥梁工程;动态称重;随机车流;极值;跨阈率

1 前言

随着中国交通运输行业的快速发展,交通荷载急剧增加,重载交通下既有桥梁的运营安全问题日益突出,由于车辆超载导致的桥梁倒塌案例已数不胜数。在交通荷载持续增长的现实背景下,亟需评估实际交通荷载下既有桥梁的安全水平,为限载超载车辆与修订设计车载模型奠定基础。

通常,公路桥梁的车辆荷载效应分析主要有两种方法:首先是基于桥梁结构健康监测系统的位移、应力、索力等数据的统计分析,该方法可直接用到关键构件疲劳损伤分析、极值外推等,但数据仅适用于特定桥梁,且对传感器精度要求高;其次是基于桥梁动态称重(WIM)系统监测车流数据的桥梁作用效应模拟方法,由于WIM数据易于获得、数据类型多、数据量庞大,该方法可用于研究车辆参数变化对桥梁作用效应的影响。随着WIM传感器技术和计算方法的发展,WIM数据已用于重载车辆监控,如欧洲限载方案就是基于WIM数据研究。

公路桥梁车辆荷载效应极值的研究对象多集中于中小跨桥梁。由于大跨桥梁的交通量多且受多车同时

作用效应明显,车辆密集程度对作用效应影响显著。李元吉等通过随机车流模型研究了拱桥的荷载效应极值,认为6%的交通量增长会导致桥梁弯矩极值增长约9.5%;Ruan等通过对斜拉桥车辆荷载模型的模拟研究,识别了车辆荷载的关键加载工况;Lu等基于WIM数据,研究了多种车辆荷载工况下斜拉桥的最大位移;Micu等基于图像数据中的车辆长度,研究了悬索桥的车辆荷载效应极值问题;Yu等用非平稳贝叶斯方法预测了考虑交通增长的桥梁荷载效应最大值;邓可等研究了考虑车桥耦合振动效应的中小跨径桥梁车载动力效应极值;JTGD60—2015《公路桥涵设计通用规范》提高了中小跨度桥梁的车辆荷载标准。但是,如何更加切实地模拟实际车流作用下大跨桥梁的车辆荷载效应,并据此进行精确的极值外推分析仍然需要更多的研究工作。

该文基于某高速公路的长期车流监测数据,研究某悬索桥的车辆荷载效应极值。首先,对大量WIM数据进行统计分析,建立随机车流荷载概率模型,筛选出关键荷载工况;其次,基于界限跨阈理论提出一种评估桥梁车辆荷载效应极值的概率分析方法;最后,以大跨悬索桥为研究对象,应用所提出的随机车流模型和极值概率分析方法,研究运营期内主梁的位移极值,并

收稿日期:2020-04-20(修改稿)

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号:2015CB057705);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2018JJ3540)

作者简介:劳家荣,男,硕士。E-mail: Laojiarong129@126.com

*通信作者:鲁乃唯,男,博士,副教授。E-mail: lunaiweide@163.com

分析交通量增长对极值概率的影响规律。

2 基于 WIM 数据的随机车流模型

2.1 某高速公路车辆 WIM 数据统计分析

四川省宜(宾)泸(州)高速公路于 2013 年建成通车,南溪长江大桥是该高速公路跨越长江的交通咽喉通道。为有效监测并控制超载车辆,在该桥梁的塔梁交界处安装了 WIM 系统。WIM 系统于 2017 年监测到最大车重(GVW)达到 164 t,远远超出 55 t 的限载要求。

由于车辆类型多,根据车轴特征将车辆划分为 6 种类型,即 V1~V6。以 V6 车型为例,GVW 和轴重的概率模型如图 1(a)所示。车辆重量服从双峰高斯分布,两个峰值分别对应于卡车的空载状态和满载状态,可采用高斯混合模型(GMM)精确拟合。随着超载车辆的增加,两个峰之间的间隔将变宽。由于车辆间距/间隙对大跨度桥梁的荷载影响具有显著影响,根据两车辆的行驶速度和车头时距计算车距。图 1(b)为车距的统计数据及对数正态分析拟合参数。

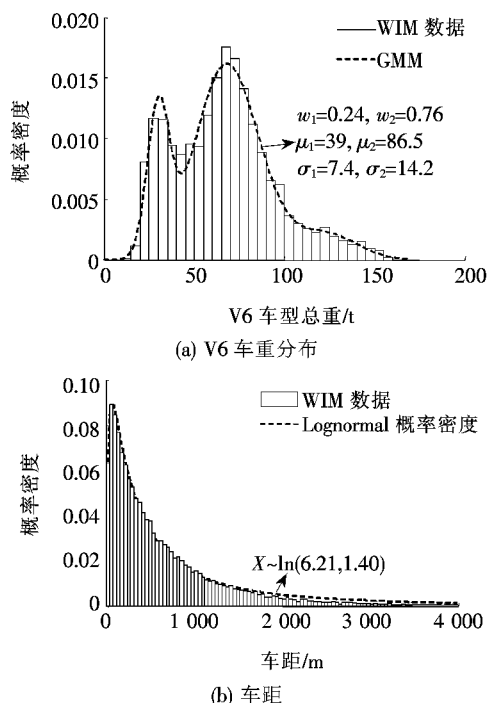


图 1 车流参数的概率分布

由图 1 可得:图 1(a)的高斯混合模型(GMM)较为准确地拟合了车重的概率分布,其中 w 、 μ 、 σ 分别为正态分布函数的权重、均值和标准差。值得说明的是,国外研究者普遍剔除了节假日数据,而该文则为工作

日和节假日所有数据,这样在中国更具有代表性。

2.2 随机车流关键荷载工况

随机车流采用 Monte Carlo 抽样(MCS)模拟得出,关键步骤如下:首先,基于 MCS 方法生成各个车辆的全局参数,包括车型、行驶车道、行驶速度和车重;其次,根据车距概率密度函数抽样生成前后两辆车的间距;最后,通过桥梁影响线加载方法筛选出关键荷载工况。将随机车流矩阵以图形的形式表示,如图 2 所示,图中的每个点表示 1 辆车,车型采用不同类型的点符号区分,横坐标为车辆到达时间和行车道,纵坐标为车重。

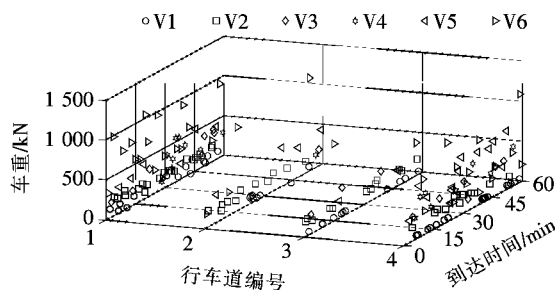


图 2 三维随机车流荷载模型

大跨桥梁主梁的影响线较长,多车效应显著,因此需考虑桥梁上所有车辆的作用效应,巨大的车流数量将导致荷载效应分析耗时长。由于极值概率分析仅需每日荷载效应的一个最大值,因此仅需识别产生最大荷载效应的关键荷载工况。基于以上过程,可高效筛选出关键荷载工况。由于实测车流量的密集状态时长约为 10 h,因此该文将 1 d 的车流时长等效为 10 h。采用影响线加载方法识别出日随机车流样本中的关键荷载工况,如图 3 所示。

由图 3 可得:图 3(a)从 10 h 的随机车流样本中统计出了桥梁主跨 L 长度内的车辆总重,并筛选出了关键荷载工况。图 3(b)将识别出的关键荷载工况组合形成关键随机车流模型。基于该车辆荷载模型即可高效模拟大跨桥梁在运营期内的车辆荷载效应极值。

3 基于跨阈率的极值概率分析方法

3.1 Rice 跨阈率原理

Rice 提出的跨阈率方法是根据随机过程与界限的跨越次数建立概率模型,用于随机过程极值外推分析,其原理见图 4。值得说明的是,该方法仅适用于高斯平稳随机过程。文献[19]等已证明由于大跨桥梁影响线较长,受多个随机变量影响,可假定为高斯平稳随

机过程。因此,该文采用界限跨阈率方法建立随机车载下大跨桥梁作用效应的极值概率模型。

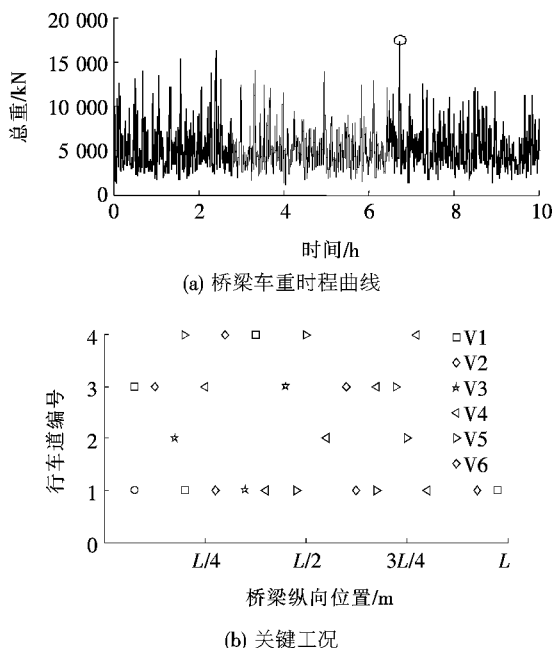


图 3 关键荷载工况识别过程

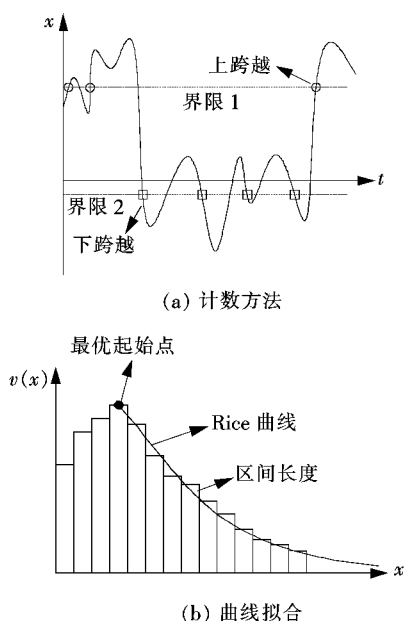


图 4 界限跨阈率原理

图 4(a)中,曲线为随机过程 x 的一个样本值,在该文中表示车辆荷载效应, t 为时间。图 4(b)中 $v(x)$ 为随机变量的跨阈率。Cremona 给出了跨阈率的表达式:

$$v(x) = \frac{\sigma'}{2\pi\sigma} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中: m 和 σ 分别为随机过程 x 的均值和标准差; σ' 为 x 的导数标准差。上述参数均可从图 4(b)所示的曲

线拟合得出。

采用极值外推公式得到最大值:

$$x_{\max}(R_t) = m_{opt} + \sigma_{opt} \sqrt{2 \ln(v_{opt} R_t)} \quad (2)$$

式中: R_t 为重现期; $x_{\max}(R_t)$ 为在 R_t 时间内的随机变量最大值; m_{opt} , σ_{opt} , v_{opt} 分别为最优拟合参数。上述拟合参数的取值对外推精度有较大的影响,通常由 K-S 检验得出最优拟合参数:

$$P(d > D) = Q_k(\sqrt{N}d) =$$

$$2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} e^{-2k^2(\sqrt{N}d)^2} \quad (3)$$

式中: d 为变量; D 为拟合分布函数与原数据的差值; Q_k 为与区间数量 N 相关的函数。满足上述关系的变量值即为最优拟合参数。

根据极值概率的物理意义,可得出该极值在桥梁生命周期内的概率分布函数:

$$F_{\max}(x, T) = 1 - \left[1 - \exp\left(-\frac{T}{R_t}\right) \right] \exp\left\{ -T v_0 \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \right\} \quad (4)$$

式中: T 为桥梁运营周期(年)。

由式(4)可以看出,该函数类似于极值-I型分布函数。根据首超失效准则,可以计算出失效概率:

$$p(a, T) \cong 1 - \exp\left[-\int_0^T v(a, t) dt\right] \quad (5)$$

式中: a 为随机过程 x 的某个界限值。对桥梁工程而言,该界限值可按照规范取值为主梁位移上限值、弯矩抗力值等。

3.2 随机车流作用效应的跨阈率分析方法

基于上述分析原理可知,随机车流作用效应跨阈率分析的关键在于求得式(1)中的 3 个未知参数。该文采用大量随机车流模拟的方法获得如图 4(a)所示的作用效应样本曲线,再由图 4(b)所示的曲线拟合方法获得 3 个未知参数,关键步骤如下:首先,将如图 3 所示的随机车流荷载模型加载至桥梁有限元模型,进行静力或动力分析,获得作用效应(应力、弯矩、位移等)时程曲线;其次,通过计数方法统计时程曲线的跨越次数,并生成跨越次数柱状图;再次,由 K-S 检验方法获得最优拟合参数;最后,基于跨阈率模型进行极值外推和概率分析。

4 某悬索桥动位移极值分析

4.1 主梁位移跨阈率分析

某公路悬索桥主跨 $L = 820$ m, 主梁为钢箱加劲

梁,双向四车道,详细参数见文献[18]。应用上述随机车流荷载模型和极值概率分析方法,分析该桥梁主梁 $L/4$ 点(L 为主桥跨径)的位移极值。

首先,考虑从随机车流模型中提取两个最不利荷载工况样本,分析静力与动力效应对跨阈率的影响。图 5 为静位移与动位移的时程曲线,静力分析由桥梁的位移影响线加载得出,动力分析由车—桥耦合振动模型得出,车速 v 取 20 m/s,路面平整度(RRC)取为“一般”。以界限车位移 $a=0.667$ m 为例,样本 1 的静位移与动位移跨越次数分别为 $N_s^1=1, N_d^1=2$; 样本 2 的静位移与动位移跨越次数分别为 $N_s^2=0, N_d^2=2$ 。由此可见,虽然静位移与动位移时程曲线相近,但二者跨越界限的次数不同。

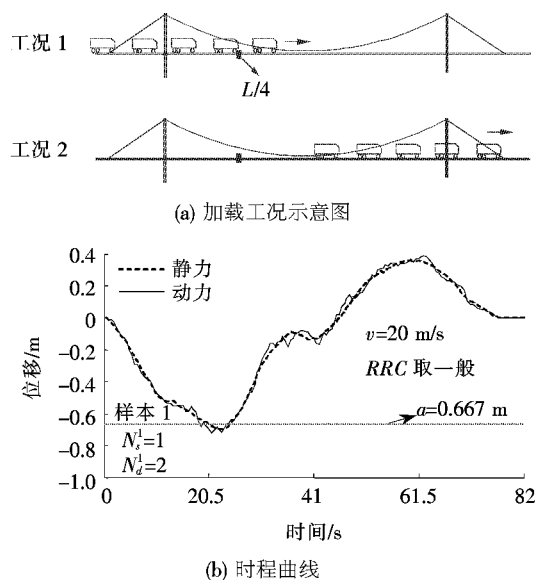


图 5 关键车流作用下桥梁的位移

为了分析随机车流作用下桥梁作用效应的界限跨阈率概率特征参数,从 1 000 个时程分析样本中提取主梁 $L/4$ 点的动位移界限跨阈次数,由 K-S 检验方法拟合柱状图的最优曲线参数,如图 6 所示。由图 6 可以看出:拟合曲线与柱状图的尾部贴合精度较好,可用于极值概率与外推分析。

4.2 交通量增长下的极值分析

车辆荷载是一种可变作用,但与风荷载、温度作用等不同,车辆荷载水平受交通量增长与限载措施的影响较大。据相关文献介绍,中国当前货运量年增长率约为 6%。由于交通量增长率在前期增长高,而后期较为平稳,在交通工程领域常通过“S”形增长模型描述。为了简化分析该文采用的交通量线性增长方式,即假定交通量增长率 R_{ADTT} 分别为 1%、2%、3%、

4%。则可得到界限跨越率曲线,如图 7 所示。由图 7 可以看出:随着交通量的增长,界限跨阈率向右偏移,且峰值显著增加。

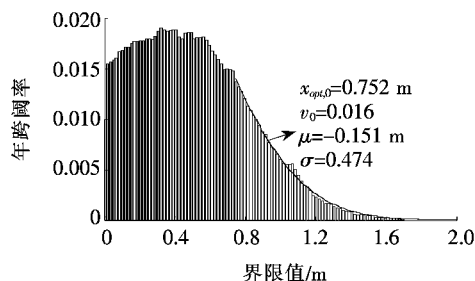


图 6 随机车流作用效应的界限跨阈率拟合曲线

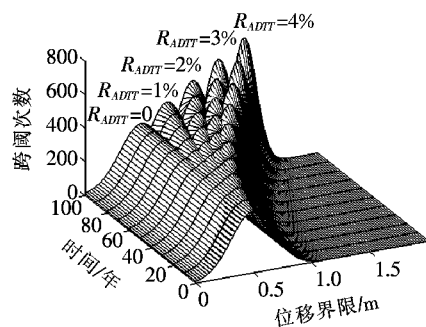


图 7 交通量增长对界限跨阈率的影响

基于如图 7 所示的界限跨阈率曲线,应用公式(4)计算得到桥梁在 100 年运营期内的位移极值,如图 8 所示。当交通量增长率分别为 0、1%、2%、3%、4% 时,对应的桥梁位移极值分别为 1.42、1.46、1.50、1.52 和 1.53 m。由图 8 可以看出:交通量增长 4% 导致的桥梁位移极值增加约 7.7%,随着交通量的增长,桥梁位移极值的增长速度有所降低。

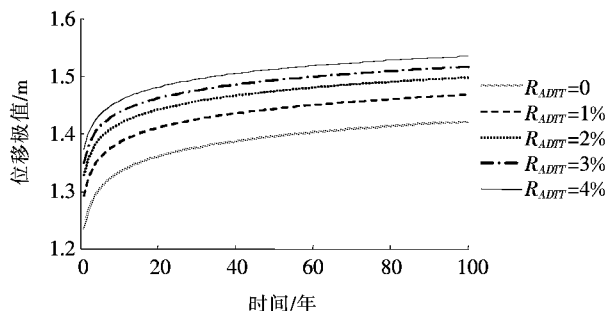


图 8 主梁位移极值外推

为了研究车载效应极值的概率分布特征,采用式(2)、(3)进行极值概率分布和首超概率分析。将极值概率分布函数由 Gumbel 分布表示,可得到如图 9 所示曲线。考虑桥梁 100 年的运营期,概率保证率为 95%,即重现期为 1950 年,对应的位移极值为 1.7~1.9 m。

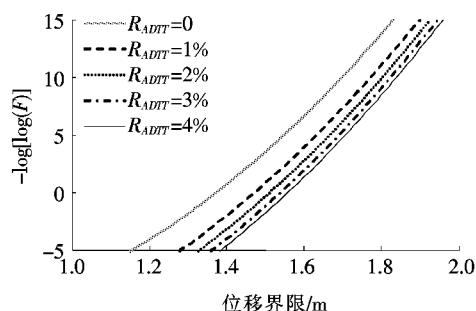


图 9 主梁位移极值概率的 Gumbel 曲线

根据 JTG D65—05—2015《公路悬索桥设计规范》要求,悬索桥位移上限为 $a=L/300=2.73$ m。该文分析得出的车辆荷载作用效应极值远小于规范上限值,表明在考虑交通量增长的情况下该桥梁的适用性满足要求。

5 结论

(1) 随机车流荷载模型包含实际车辆荷载的概率特征参数,通过大量的荷载工况模拟可获得桥梁荷载效应极值的概率模型,再由 Rice 界限跨阈率模型可捕捉车辆荷载动力效应的极值概率信息,从而形成一种分析大跨桥梁车辆荷载效应极值概率的可行方法。

(2) 当交通量年线性增长率为 4% 时,某悬索桥主梁位移极值增加约 7.7%,随着交通量的持续增长,桥梁位移极值的增长速率有所降低。

(3) 根据中国桥梁设计规范对车辆荷载标准值的概率保证率取值 95%,该悬索桥的位移极值概率模型可取标准值为 1.9 m,满足设计规范对主梁变形 $L/300$ 要求。

参考文献:

- [1] Obrien E, Bordallo—Ruiz, A, Enright B. Lifetime Maximum Load Effects on Short—Span Bridges Subject to Growing Traffic Volumes[J]. Structural Safety, 2014, 50: 113—122.
- [2] 鲁乃唯, 刘扬, Noori Mohammad. 交通量持续增长下大跨度桥梁荷载极值效应分析[J]. 工程力学, 2018(7).
- [3] 李松辉, 徐忠燕, 蒋含亮. 超重车辆对公路桥梁安全性的影响[J]. 公路交通科技, 2015(9).
- [4] 罗媛, 颜东煌, 袁明, 等. 随机重载车辆作用下简支梁桥疲劳可靠度评估[J]. 中外公路, 2017(3).
- [5] 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(2).
- [6] OBrien E J, Enright B. Modeling Same—Direction Two—Lane Traffic for Bridge Loading[J]. Structural Safety, 2011, 33(4): 296—304.
- [7] 杨晓艳, 贡金鑫, 冯云芬. 不同跨径桥梁车辆荷载分项系数及可靠度[J]. 中国公路学报, 2015(6).
- [8] Mandić Ivanković A, Skokandić D, Žnidarič A. Bridge Performance Indicators Based on Traffic Load Monitoring [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15 (7): 899—911.
- [9] Yan Donghuang, Luo Yuan, Lu Naiwei, et al. Fatigue Stress Spectra and Reliability Evaluation of Short to Medium Span Bridges Subject to Impacts of Stochastic Traffic Loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(12).
- [10] 韩万水, 刘焕举, 包大海, 等. 大跨钢桁梁悬索桥风—车—桥分析系统建立与可视化实现[J]. 土木工程学报, 2018(3).
- [11] 李元吉, 鲁乃唯, 罗媛, 张亚海. 随机车流作用下拱桥荷载效应极值外推与校验[J]. 中外公路, 2018(4).
- [12] Ruan, X., Zhou, J. Y., Shi, X. F., et al. A Site—Specific Traffic Load Model for Long—Span Multi—Pylon Cable—Stayed Bridges [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13: 494—504.
- [13] Lu, N., Liu, Y., Beer, M. Extrapolation of Extreme Traffic Load Effects on A Cable—Stayed Bridge Based on Weigh—In—Motion Measurements[J]. International Journal of Reliability and Safety, 2018, 12(1—2): 69—85.
- [14] Micu, E. A., Malekjafarian, A., OBrien, E. J., et al. Evaluation of the Extreme Traffic Load Effects on The Forth Road Bridge Using Image Analysis of Traffic Data [J]. Advanced Engineering Software, 2019, 137.
- [15] Yu, Y., Cai, C. S., He, W., et al. Prediction of Bridge Maximum Load Effects Under Growing Traffic Using Non—Stationary Bayesian Method[J]. Engineering Structures, 2019, 185: 171—183.
- [16] 邓可, 杨永红, 鲁乃唯, 等. 基于实测车流的中小跨径桥梁车载动力效应极值研究[J]. 中外公路, 2019(5).
- [17] 梅朝. 新旧规范中交通荷载分析方法对比分析[J]. 中外公路, 2019(1).
- [18] 刘扬, 鲁乃唯, 邓扬. 基于实测车流的钢桥面板疲劳可靠度评估[J]. 中国公路学报, 2016(5).
- [19] Caprani CC, Obrien EJ, Lipari A. Long—Span Bridge Traffic Loading Based on Multi—Lane Traffic Micro—Simulation[J]. Engineering Structures, 2016, 115: 207—219.
- [20] Cremona, C. Optimal Extrapolation of Traffic Load Effects[J]. Structural Safety, 2001, 23: 31—46.
- [21] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [22] JTG D65—05—2015 公路悬索桥设计规范[S].