

文章编号: 1674-599X(2020)01-0050-06

## 交通量持续增长下既有拱桥车载效应极值概率

余浩然, 鲁乃唯, 刘扬

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 为了准确评定交通量持续增长下既有桥梁的运营安全水平, 提出基于“时间划分-极值概率累加”的改进广义极值分布, 捕捉到了车载效应的时变特征, 并经典算例验证了该方法的适用性。基于 WIM 实测车流数据, 预测了交通量增长和超载率限制下某拱桥的最大弯矩。研究表明: 交通量的增长会导致桥梁车载效应极值显著增大。当年交通增长率为 2%~4%时, 既有拱桥弯矩的最大值增加 10%~15%; 当年交通量增长率为 4%时, 该拱桥弯矩的最大值将大于其设计标准值, 应对桥梁车流量进行交通管制。超载率限制对桥梁车载效应极值有显著影响。当超载率上限为 50%~200%时, 该拱桥弯矩的最大值减小至 70%~82%。

**关键词:** 桥梁工程; 交通量; 极值; 车载效应; 既有拱桥

中图分类号: U441<sup>+</sup>.2

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.009

### The probability of vehicle-effect extreme value of existing arch bridges with continuous increase of traffic volume

YU Hao-ran, LU Nai-wei, LIU Yang

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to accurately assess the operational safety level of existing bridges under the continuous growth of traffic volume, a time-varying feature of the improved generalized extreme value distribution (GEV) based on “time division-extreme probability accumulation” is proposed, and the applicability of the method is verified by a typical example. Based on WIM measured traffic data, the maximum bending moment of existing arch bridges under traffic volume growth and overload rate limit is predicted. The results show that the increase of traffic volume leads to a significant increase in the extreme value of the on-board effect of the bridge. When the annual traffic growth rate is 2%~4%, the maximum bending moment of the existing arch bridge increases by 10%~15%. When the annual traffic growth rate is 4%, the maximum bending moment of the arch bridge will be greater than the design standard value, and the traffic volume of the bridge should be controlled. The overload rate limit has a significant impact on the extreme value of the on-board effect of the bridge. The limit of overload rate has a significant impact on the extreme value of bridge vehicle effects. When the upper limit of overload rate is 50%~200%, the maximum bending moment is reduced to 70%~82%.

**Key words:** bridge engineering; traffic volume; extreme value; vehicle effect; existing arch bridge

据交通运输部公布的数据, 中国 2018 年公路货运量同比增长 7.3%。其中: 新疆维吾尔自治区公路货运量的增长率高达 13.7%, 远高于欧盟等发达

国家(1.5%~2%)的。随着中国公路车流量和车载重量的持续增长, 超载已成为导致桥梁垮塌的主要原因之一<sup>[1]</sup>, 桥梁的实际车流荷载或已超出设计值。

收稿日期: 2019-11-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(2015CB057705); 国家自然科学基金资助项目(51908068)

作者简介: 余浩然(1995-), 男, 长沙理工大学硕士生。

中国现行《公路桥涵通用设计规范(JTG D60—2015)》<sup>[2]</sup>将车道荷载中集中荷载  $P_k$  的起始计算标准由 180 kN 提高至 270 kN。因此, 在中国公路货运量长期保持增长的趋势下, 研究交通量持续增长下桥梁车载效应极值概率是准确评定既有桥梁运营安全的一个重要内容。

桥梁运营期内车载效应极值概率分析是桥梁工程领域的研究重点, 也是桥梁安全验算的重要内容。通常的研究思路为: 先基于 WIM 数据模拟随机车流; 其次, 求解荷载效应时程曲线, 并提取最大效应值; 再采用极值外推方法(如: GEV 分布、Rice 公式及 Nowak 法等<sup>[3]</sup>), 外推一定重现期内的效应最大值。

基于 WIM 数据的公路桥梁车载效应极值概率研究不仅适用于评定既有桥梁的运营安全, 也可用于校验既有设计的车载模型。例如: Soriano<sup>[4]</sup>等人在纽约等多地的 WIM 监测数据的基础上, 对典型小跨径桥梁的荷载效应进行了外推分析。Enright<sup>[5]</sup>等人采用欧洲 4 个国家的 WIM 监测数据, 重点研究了中、小跨径桥梁的交通荷载效应极值外推和标准值, 并分析了车辆动力效应、多车效应及超载影响等。其研究结果为欧洲 EC-LM1 规范的修订提供了基础。张喜刚<sup>[6-11]</sup>等人对中国多个地域国道和高速公路的 WIM 数据进行了统计分析与极值外推, 研究了适用于中国交通荷载特点的车辆荷载模型, 其结果表明: 实测车流荷载在桥梁运营安全评估中具有重要性。因此, 作者拟提出基于“时间划分-极值概率累加”的极值概率分析方法, 采用改进的 GEV 分布捕捉车载效应的时变特征, 经算例验证该方法的适用性; 并基于 WIM 实测车流数据预测交通量增长和超载率限制下既有拱桥的最大弯矩, 分析交通量增长和超载率限制对桥梁车载效应极值的影响。

### 1 桥梁时变极值外推方法

#### 1.1 经典 GEV 分布的极值外推理论

根据经典极值理论, 独立同分布的随机变量的最大值分布可采用 GEV 分布来描述。GEV 分布是一种包含 Gumbel 分布、Weibull 分布和 Frechet 分布的一般形式。其极值的累积分布函数(cumulative distribution function, 简称为 CDF)可表示为:

$$G(x) = \exp \left\{ - \left( 1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} \right\}, 1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} > 0. \tag{1}$$

式中:  $\mu, \sigma$  和  $\xi$  分别为分布函数的位置、尺度和形状参数, 且  $\mu, \sigma$  和  $\xi$  均大于 0。

当  $\xi=0$  时, 函数的分布为 Gumbel 分布; 当  $\xi>0$  时, 函数的转换为 Frechet 分布; 当  $\xi<0$  时, 函数的转换为 Weibull 分布。

针对桥梁车辆荷载极值的问题, 处理极值数据的常见方法是将数据分组为具有相同持续时间的区间, 并提取每个区间内最大值来拟合 GEV 分布。如: 某桥梁的日最大效应值为  $X_i$ , 则该桥梁在  $n$  d 内的最大效应值为:

$$M_n = \max \{ X_1, X_2, \dots, X_n \}. \tag{2}$$

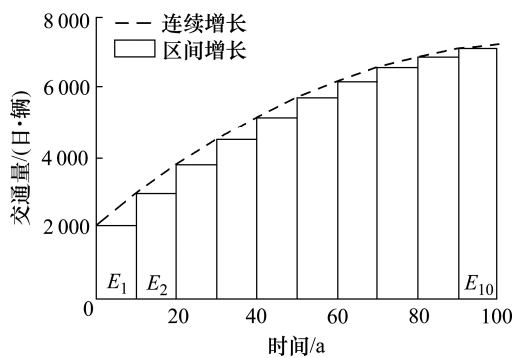
式中:  $X_i$  为服从独立同分布的随机变量。

假定  $X_i$  的分布函数为  $F(X_i)$ , 则  $M_n$  的分布函数可表示为:

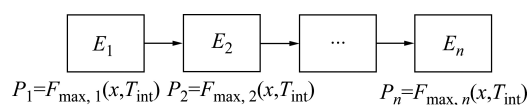
$$F(M_n \leq x) = \prod_{i=1}^n F(X_i \leq x) = F^n(x). \tag{3}$$

#### 1.2 基于交通量区间增长模型的改进 GEV 分布

交通量的增长会导致桥梁车载效应转换为非平稳随机过程, 经典极值外推方法无法给出准确的外推值。因此, 本研究提出了改进的 GEV 分布, 研究交通量区间增长下桥梁车载效应极值概率。交通量区间增长的极值概率模型如图 1 所示, 其表达式为:



(a) 交通量区间增长示意



(b) 区间极值 CDF 组成的累加系统

图 1 考虑交通量区间增长的极值概率模型

Fig. 1 Extreme probability model considering the growth of traffic volume interval

$$F_{\max}^G(x, T) = \prod_i^{N_{\text{int}}} F_{\max, i}(x, T_{\text{int}}) \quad (4)$$

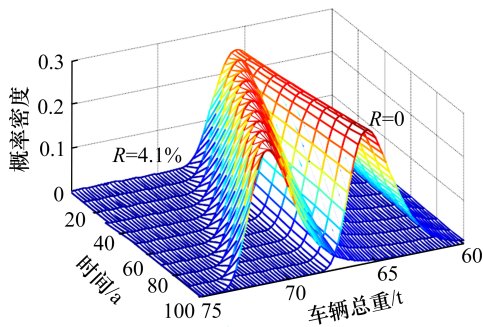
在图 1 中,  $E_i$  为第  $i$  个区间内的极值;  $F_{\max, i}(x, T_{\text{int}})$  为第  $i$  个时间区间  $T_{\text{int}}$  内荷载效应  $x$  的极值概率分布函数;  $F_{\max}(x, T)$  为桥梁运营期  $T$  时间内  $x$  的最大值。

## 2 算例分析

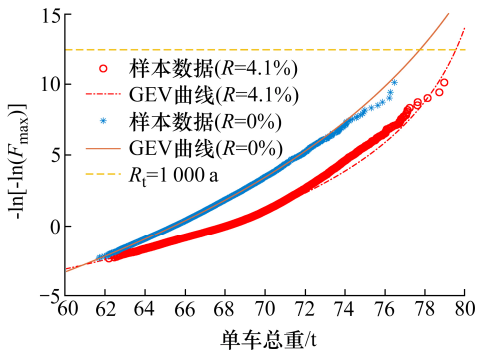
### 2.1 车重极值的外推分析

在 Leahy<sup>[12]</sup>等人给出的经典算例基础上, 采用改进的 GEV 分布, 外推  $R_t=1\ 000\ \text{a}$  时车辆总重的最大值。

算例: 取 100 a 样本数据, 每个时间区间时长为 1 a, 考虑每年的工作日有 250 d, 交通量为 1 000 veh/d, 车辆总重服从正态分布  $N(50\ \text{t}, 5)$ , 假定货车数量年增长率  $R$  为 4.1%。分析结果如图 2 所示。



(a) GEV 分布的概率密度曲线



(b) GEV 分布的 CDF 曲线

图 2 算例的计算结果

Fig. 2 Calculation result of the example

从图 2(a)中可以看出, 车重极值概率密度(PDF)曲线随时间变化和交通量增长呈现显著偏移, 表现了时变非平稳特征。从图 2(b)中可以看出, GEV 分布曲线随交通量增长呈现显著偏移, 经典的 GEV 分布外推值失真; 而采用“时间划分-极值概率累

加”的改进 GEV 分布可给出较为准确的外推值。该算例验证了该方法可适用于解决车载效应时变极值外推问题。

### 2.2 交通量持续增长的极值外推分析

在分析算例的基础上, 根据 WIM 实测车流数据, 提出了“时间划分-极值概率累加”的方法。采用基于交通量区间增长模型的改进 GEV 分布外推车载效应最大值, 分析步骤如图 3 所示。

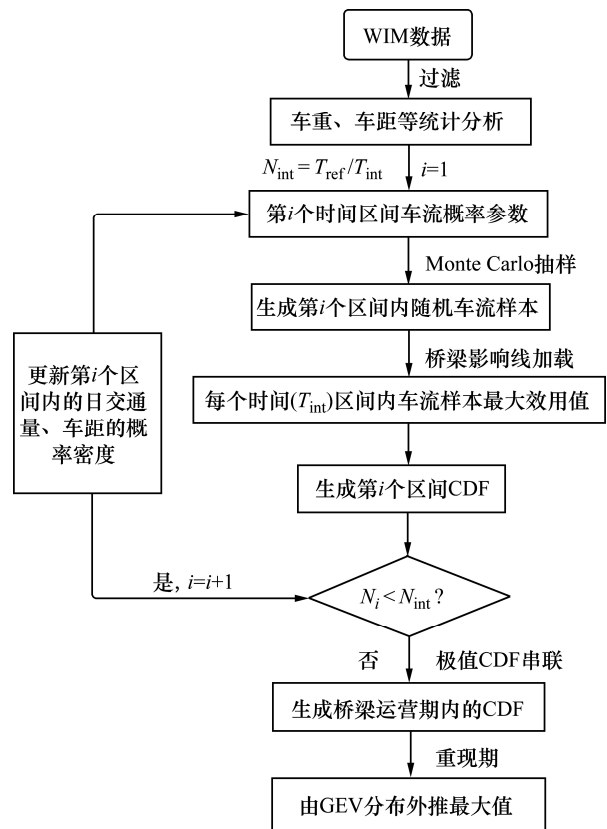


图 3 交通量持续增长的极值外推分析流程

Fig. 3 Extreme value extrapolation analysis process for continuous growth of the traffic load

在图 3 中, 其步骤为: ①划分区间的数量和长度。基于 WIM 数据, 建立第一个时间区间的车流概率模型, 由交通量区间增长模型不断更新其后的车流概率模型。②逐步将每个时间区间内的随机车流模型加载至影响线并求解荷载效应时程曲线, 再提取每个时间区间  $T_{\text{int}}$  内的最大效应值。③将每个区间内的极值 CDF 进行累加, 根据累加后的极值概率模型外推一定重现期的最大值效应。其分析结果的精度与效率取决于区间的长度和数量。若一个时间区间被认为是足够小的(如: 1 d), 即假设 1 d 中交通量是稳定不变的<sup>[13]</sup>, 则在该时间区间内的时

变性可以被忽略, 分析的结果近似于精确解; 若划分区间长度过大, 则计算结果可能失真。因此, 区间长度和数量的选择决定了外推精度。

### 3 工程实例

#### 3.1 工程背景

某拱桥位于湖南省, 其主跨为 60 m, 矢高为 10 m, 拱轴系数为 1.662。设计汽车荷载为公路 II 级。该拱桥平均车流量约为 1 140 veh/d, 6 轴车货车占比为 15.49%, 车型比例和车重概率分布见文献 [14-15]。桥梁的有限元模型如图 4 所示。

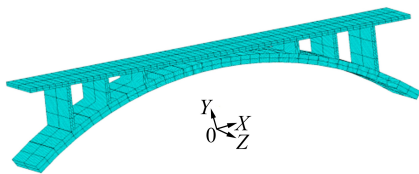


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

#### 3.2 随机车流作用效应分析

为了建立该拱桥弯矩极值概率模型, 提取了 10 kN 移动力作用下主拱圈跨中节点弯矩影响线, 如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 车辆加载至 L/4 跨和 3L/4 跨节点时会产生最不利弯矩。将随机车流模型加载至主拱圈跨中节点弯矩影响线并求解其时程曲线, 再提取日区间的最大效应值, 如图 6 所示。

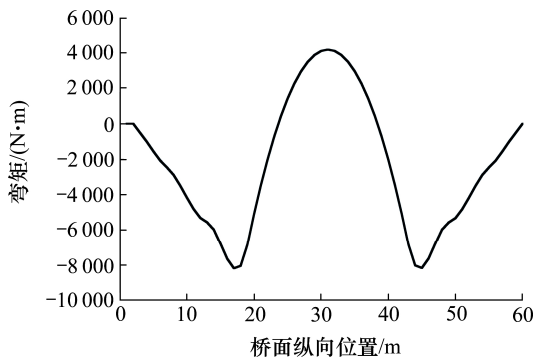


图 5 主拱圈跨中弯矩影响线

Fig. 5 The influence line of the main arch ring mid-span bending moment

#### 3.3 交通量的增长对车载效应极值的影响

用公路 II 级汽车荷载模型计算出拱桥主拱圈跨中节点的设计车辆荷载作用弯矩标准值  $M_d$  约为 1 416 kN·m。本研究假定年交通量增长率  $R=0\%, 2\%$

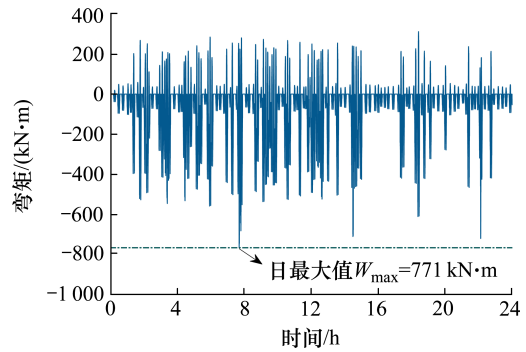


图 6 随机车流作用下主拱圈跨中弯矩时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of the mid-span bending moment of the main arch ring under random traffic flow

和 4%, 取 10 a 的样本数据, 每个时间区间时长为 1 a, 每年工作日取 250 d。基于图 6 中的弯矩时程曲线, 采用考虑交通量区间增长的改进 GEV 分布外推  $R_t=2\ 000\ a$  的主拱圈跨中弯矩的最大值。其结果如图 7 所示。

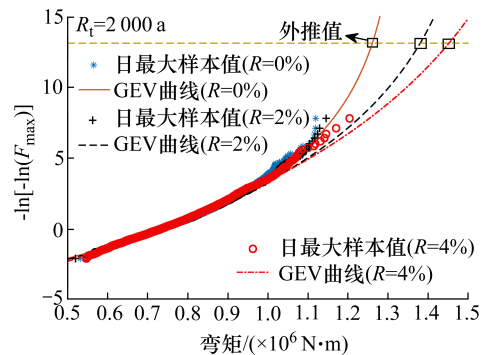


图 7 交通量的增长对拱桥极值外推的影响

Fig. 7 Impact of traffic growth on extreme extrapolation of arch bridges

从图 7 中可以看出, 交通量的增长会导致桥梁车载效应极值的显著增大。当年交通量增长率为 0%、2% 和 4% 时, 该拱桥在  $R_t=2\ 000\ a$  对应的弯矩的最大值分别为 1 261, 1 383 和 1 455 kN·m, 与设计标准值的比分别为 0.88, 0.97 和 1.02。当年交通量增长率为 2%~4% 时, 既有拱桥的弯矩的最大值增加 10%~15%。当年交通量增长率为 4% 时, 该拱桥的弯矩的最大值将大于其设计标准值。表明: 需要对桥梁车流量进行交通管制。

#### 3.4 超载率对车载效应极值的影响

由该算例的分析可知, 在未控制超载车辆时, 该拱桥的弯矩的最大值为 1 455 kN·m ( $R=4\%$ )。假定车辆的超载率  $\alpha$  (实际超载重量与限载重量的比例)

控制上限为 200%、100%和 50%，仅保留随机车流中未超出该比例的车辆，取年交通量增长率  $R=4\%$ ，重新模拟车流过桥梁响应极值，其结果如图 8 所示。

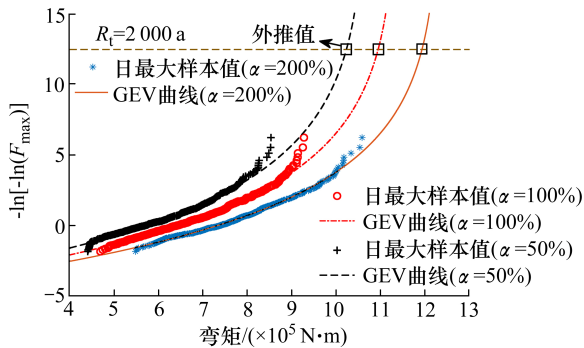


图 8 超载率的限制对拱桥极值外推的影响( $R=4\%$ )

Fig. 8 Effect of overload rate limitation on arch extrapolation( $R=4\%$ )

从图 8 中可以看出，超载率的限制对桥梁车载效应极值有显著影响。在年交通量增长率确定的情况下，严格控制超载率上限，车载效应极值显著减小。当车辆的超载率  $\alpha$  控制上限为 200%、100%和 50%时，该拱桥在  $R_t=2\ 000$  a 对应的弯矩的最大值分别为 1 194、1 096 和 1 023  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ，与其设计标准值的比分别为 0.82、0.75 和 0.70。当超载率上限为 50%~200%时，既有拱桥的弯矩的最大值减小至 70%~82%。表明：交通量的增长和超载率的限制对桥梁荷载效应极值的影响较大。在预测桥梁荷载效应极值时，应考虑交通量增长和超载率的影响。

## 4 结论

1) 典型算例分析结果表明：在考虑交通量增长的情况下，经典的 GEV 分布外推值失真，而基于“时间划分—极值概率累加”的改进 GEV 分布可给出较为准确的外推值。

2) 某拱桥的算例分析结果表明：交通量的增长会导致桥梁车载效应极值的显著增大。当年交通增长率为 2%~4%时，既有拱桥的弯矩的最大值增加 10%~15%；当年交通增长率为 4%时，该拱桥的弯矩的最大值将大于其设计标准值，应对桥梁车流量进行交通管制。

3) 当超载率上限为 50%~200%时，既有拱桥的弯矩的最大值减小至 70%~82%。超载率的限制对桥梁车载效应极值有显著影响。在年交通量增长率

确定的情况下，严格控制超载率上限，显著减小了桥梁车载效应极值。

## 参考文献(References):

- [1] 刘扬,李胜兰,邓扬.超载对 RC 梁桥疲劳可靠性的影响分析[J].交通科学与工程,2014,30(3):30-34,75.(LIU Yang,LI Sheng-lan,DENG Yang.Analysis of the effect of overload on the fatigue reliability of RC beam bridges[J].Journal of Transport Science and Engineering,2014,30(3):30-34,75.(in Chinese))
- [2] 中交公路规划设计院有限公司.JTG D60—2015,公路桥涵通用设计规范[S].北京:人民交通出版社,2015.(CCCC Highway Consultants Co.,Ltd..JTG D60—2015,General design code for highway bridges and culverts[S].Beijing:China Communications Press,2015.(in Chinese))
- [3] 刘浪,尤吉.公路桥梁车辆荷载效应的外推计算[J].土木工程学报,2015,48(4):59-64.(LIU Lang, YOU Ji. Extrapolation of vehicle load effect on highway bridges[J].Journal of Civil Engineering,2015,48(4):59-64.(in Chinese))
- [4] Soriano M,Casas J R,Ghosn M.Simplified probabilistic model for the maximum traffic load from weigh-in-motion data[J].Structure & Infrastructure Engineering,2017,13(4):454-467.
- [5] Enright B,Obrien E J.Monte Carlo simulation of the extreme traffic loading on short and medium span bridges[J].Structure & Infrastructure Engineering,2012,9(12):1-16.
- [6] 张喜刚.公路桥梁汽车荷载标准研究[M].北京:人民交通出版社,2014.(ZHANG Xi-gang.Study on vehicle load standards for highway bridges[M]. Beijing: China Communications Press,2014.(in Chinese))
- [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,2015,28(6):59-66.(YANG Xiao-yan,GONG Jin-xin,FENG Yun-fen.Partial coefficients and the reliability of vehicle loads on bridges with different spans[J].China Journal of Highway and Transport,2015,28(6):59-66.(in Chinese))
- [8] 阮欣,周可攀,周军勇.某八车道高速公路车流特性及荷载效应[J].同济大学学报:自然科学版,2015,43(4):555-561.(RUAN Xin,ZHOU Ke-pan,ZHOU Jun-yong.Traffic characteristics and load effects of an eight-lane

- expressway[J].Journal of Tongji University:Natural Science,2015,43(4):555-561.(in Chinese))
- [9] 夏坚,宗周红,杨泽刚,等.基于 GPS 的大跨斜拉桥车辆荷载模型[J].中国公路学报,2016,29(1):44-52.(XIA Jian, ZONG Zhou-hong,YANG Ze-gang,et al.GPS-based vehicle load model for long-span cable-stayed bridges[J]. China Journal of Highway and Transport,2016,29(1): 44-52.(in Chinese))
- [10] 鲁乃唯,刘扬,肖新辉.实测车流作用下大跨桥梁荷载效应极值外推法[J].交通运输工程学报,2018,18(5):47-55. (LU Nai-wei,LIU Yang,XIAO Xin-hui.Extreme value extrapolation method for load effects of long-span bridges under measured traffic flow[J].Journal of Transportation Engineering, 2018, 18(5): 47-55. (in Chinese))
- [11] 鲁乃唯,刘扬,Mohammad N.交通量持续增长下大跨桥梁时变极值外推分析[J].工程力学,2018,35(7):159-166. (LU Nai-wei, LIU Yang, Mohammad N. Time-varying extreme value extrapolation analysis of long-span bridges under continuous traffic growth[J]. Engineering Mechanics,2018,35(7):159-166.(in Chinese))
- [12] Leahy C,Obrien E,O'Connor A.The effect of traffic growth on characteristic bridge load effects[J]. Transportation Research Procedia,2016,14:3990-3999.
- [13] 邱国阳,朱立伟.基于动态称重算法的车辆荷载分布规律的研究[J]. 公路工程, 2018, 43(6): 257-262. (QIU Guo-yang, ZHU Li-wei. Research on vehicle load distribution based on dynamic weighing algorithm[J]. Highway Engineering,2018,43(6):257-262.(in Chinese))
- [14] 李元吉,鲁乃唯,罗媛.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):101-105.(LI Yuan-ji, LU Nai-wei,LUO Yuan.Extrapolation and verification of extreme load effect of arch bridge under random traffic flow[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018(4): 101-105.(in Chinese))
- [15] 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 Nai-wei. Study on the probability model and the reliability of dynamic response of the stiffening beam of the suspension bridge under random traffic flow[D]. Changsha:Changsha University of Science & Technology, 2014.(in Chinese))

(上接第 37 页)

- [8] 王筵铸,王旭东,张龙生,等.橡胶沥青配伍性及黏附性能研究[J].公路交通科技,2019,36(3):34-41,72.(WANG Yan-zhu,WANG Xu-dong,ZHANG Long-sheng,et al. Study on the compatibility and adhesion properties of rubber asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(3): 34-41, 72. (in Chinese))
- [9] 张广泰,方烁,叶奋.双螺杆挤出胶粉改性沥青流变性能研究[J].中国公路学报,2019,32(5):57-63,99.(ZHANG Guang-tai,FANG Shuo,YE Fen.Study on rheological properties of twin-screw extrusion rubber modified asphalt[J].China Journal of Highway and Transport,2019, 32(5): 57-63,99.(in Chinese))
- [10] 徐鸥明,张鸿,曹志飞,等.经济型低胶粉掺量橡胶沥青混合料路用性能研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2019,38(5):52-56.(XU Ou-ming,ZHANG Hong,CAO Zhi-fei,et al.Study on road performance of economical low-gase powder rubber asphalt mixture[J].Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2019, 38(5):52-56.(in Chinese))
- [11] 祝谭雍,程其瑜,许兵,等.稳定型橡胶沥青再生应力吸收层技术性能研究[J].公路交通科技,2018,35(12):35-41. (ZHU Tan-yong,CHENG Qi-yu,XU Bing,et al.Study on technical performance of stabilized rubber asphalt regenerated stress-absorbing layer[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(12):35-41.(in Chinese))
- [12] 杨茂军.胶粉表面处治对橡胶沥青中高温性能影响研究[J].公路,2019,64(2):33-38.(YANG Mao-jun.Study on the effect of rubber powder surface treatment on high temperature performance of rubber asphalt[J].Highway, 2019,64(2):33-38.(in Chinese))