

文章编号: 1674-599X(2020)02-0079-06

山区低等级公路桥梁疲劳荷载谱研究

苏万钦¹, 李睿¹, 刘海证², 李晓章¹

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省建筑工程设计院, 云南 昆明 650041)

摘要: 针对山区低等级公路桥梁的疲劳损伤问题。利用动态称重系统, 统计了云南省道 S306 峨德河桥连续 29 d 的车辆信息, 通过聚类分析法对车辆的车型和车重的分布特性进行了分析, 基于损伤积聚理论和等效损伤原理制定了山区低等级公路专用疲劳车辆荷载谱, 并将其简化后得出标准疲劳车。研究表明: 山区低等级公路上, 33 种车分成 5 类, 以二轴车为主且车重服从对数正态分布, 其它车型的車重服从三维高斯混合分布。标准疲劳车采用加载贡献最大的四轴车和六轴车车型, 两者的加载贡献值为 61.31%。

关键词: 动态称重系统; 聚类分析法; 疲劳荷载谱

中图分类号: U441⁺.4 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.013

Fatigue load spectrum of bridge of mountain low-grade highway

SU Wan-qin¹, LI Rui¹, LIU Hai-zheng², LI Xiao-zhang¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China; 2. Yunnan Construction Engineering Design Institute, Kunming 650041, China)

Abstract: In order to study the fatigue damage characteristic of low-grade highway bridges in mountainous areas, the vehicle information of Yunnan Provincial Highway S306 Edehe Bridge was counted for 29 days using the weight-in-motion system, the vehicle model and vehicle weight distribution characteristics were analyzed by cluster analysis. Based on the damage accumulation theory and the equivalent damage principle, the load spectrum of a fatigue vehicle of low-grade highways in mountainous areas was formulated, and that was simplified to obtain a standard fatigue vehicle. The results show that 33 types of vehicles can be divided into five categories, the two-axle vehicle is dominant, and the vehicle weights follow a lognormal distribution, and the vehicle weights of the other vehicles follow a three-dimensional Gaussian mixed distribution. The standard fatigue car adopts the four-axle and six-axle models with the largest load contribution, and the load contribution value of both is 61.31%.

Key words: weight-in-motion system; cluster analysis method; fatigue load spectrum

车辆荷载是引起桥梁疲劳损伤的主要因素, 而车辆荷载谱则是研究车辆荷载的基础^[1]。英、美等国很早便开展了有关车辆荷载谱的研究并给出疲劳车辆荷载谱及疲劳车辆模型^[2-3]。近年来, 国内学者对此也进行了大量的研究, 狄谨^[4]等人统计了浙江一座港口公路桥梁 1 a 内的通行车辆荷载信息,

整理出了港口公路桥梁疲劳荷载谱。童乐为^[5]等人基于上海市中山路桥的实测交通数据, 编制了适用于上海市桥梁的疲劳荷载谱。李星新^[6]等人根据贵州坝陵河大桥车辆动态称重系统(weight-in-motion system, 简称为 WIM)实测荷载数据, 推导出了最符合梁实际受载情况的三轴疲劳车辆模型。但目前的

收稿日期: 2020-01-02

基金项目: 国家自然科学基金-地区项目基金(51568029)

作者简介: 苏万钦(1995-), 男, 昆明理工大学硕士生。

研究主要集中在城市和高等级公路上,对低等级公路的研究相对匮乏。云南省低等级公路占了总公路里程的90%以上,且超载情况严重,加剧了公路损伤速度。研究山区低等级公路桥梁疲劳荷载谱对低等级公路桥梁的评估和维护具有重大的意义。本研究利用WIM系统,采集云南省道S306峨德河桥连续29d的车辆荷载数据,拟通过聚类分析法划分调查车辆,并分析了代表车型的辆数和车重分布特性^[7]。再基于损伤积聚理论和等效损伤原理制定出山区低等级公路专用疲劳车辆荷载谱^[8],并对其简化后推导出标准疲劳车。

1 交通荷载调查

峨德河桥位于云南省玉溪市新平县境内,桥梁横跨戛洒江,是连接新平县江东和江西2个片区的交通枢纽。利用其配备的WIM可实时监控和统计通过该桥梁的车流的车轴数、车轮数、车辆尺寸、质量和数量等数据。

经过连续29d(2018年3月)的监测,剔除了受不良因素干扰或WIM系统本身缺陷^[9]导致异常的数据后,一共获得49199辆车的样本数据。其中,V1~V16为二轴车、V17~V22为三轴车、V23~V27为四轴车、V28~V29为五轴车及V30~V33为六轴车。参考《中国汽车车型手册》^[10],根据轴数、轮数、乘客数(客车)或满轴载荷分配(货车)、车辆尺寸及最小离地间隙对车型进行分类,依此将该公路上的车型分为33种,其中,有9种客车车型(V1~V9)和24种货车车型(V10~V33)。

2 交通荷载聚类分析

2.1 聚类分析指标

选取车轴数、车轮数、体积形状、最小离地距离^[11]、客车座位或货车吨位、破坏系数以及车辆折算系数作为聚类分析指标^[12]。

车轴数、车轮数、体积形状、最小离地距离由WIM系统监测所得;客车座位及货车吨位通过查询《中国汽车车型手册》^[10]可确定。

破坏系数为轴重对道路、桥梁等的破坏程度,其计算式为:

$$EF = \left(\frac{n}{n_0} \right)^m \quad (1)$$

式中: n 为车辆的轴重, t ; n_0 为标准轴量,取 $10t$; m 为计算常数一般取4.55。

车辆折算系数是表征各类车辆占用道路程度的系数,参考《云南省公路情况调查》^[13]进行整理。

2.2 聚类分析结果

运用spss19统计分析软件对7个指标进行聚类分析。其中,组与组之间考虑平均联结及度量标准使用区间平方Euclidean距离,得出各代表车型之间关系的树状图,如图1所示。

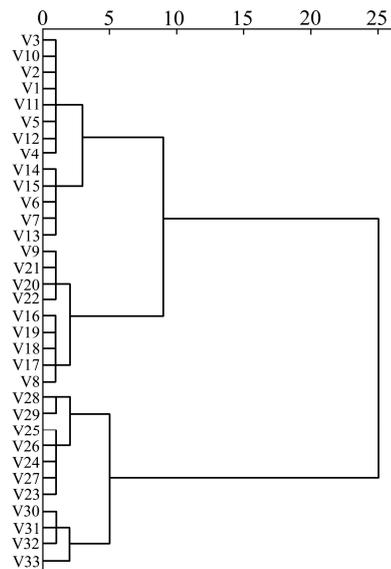


图1 使用平均联结(组间)的树状

Fig. 1 Treemap using average joins (between groups)

从图1可看出,样本可分为4类,分别是{V1-V7,V10-V15}, {V8,V9,V16-V22}, {V23-V29}和{V30-V33}。考虑到V1~V9为客车,V16为二轴车,所以将V8、V9、V16归入第一类车;V28和V29为五轴车,所以将其从第三类中分出,归入第四类。因此,样本最终为5类,分别为{V1~V9,V10~V16}、{V17~V22}、{V23~V27}、{V28~V29}及{V30~V33}。于是,将云南省低等级公路车型划分为5类,见表1。

2.3 车型比例分析

将有效车辆样本车型归类后,得到第一类车辆有46966辆,占95.46%;第二类车、第三类车分别为885辆和887辆,各占1.8%;第四类车辆有225辆,占0.46%;第五类有236辆,占0.48%。与高等级公路对比,低等级公路的通行能力有限,其二轴车是低等级公路的主要通行车辆,随着车辆轴数的增加,车辆比例逐渐减小。

2.4 车重分布特征

据研究表明:交通流的车重数据一般服从正态

表 1 云南省低等级公路交通车型分类表

Table 1 Classification of low-grade highway traffic vehicles in Yunnan Province

类型	车型种类
第一类	小轿车, 面包车, 越野车, 小于 2 吨货车, 旅行车等
第一类	双轴客车和货车
第二类	3 轴客车和货车(后双轴)
第二类	3 轴货车(双前轴)
第二类	2 轴 6 轮牵引车+1 轴半挂车(1+1+1)
第三类	4 轴大型货车
第三类	2 轴 6 轮牵引车+2 轴半挂车(1+1+2)
第四类	2 轴 6 轮牵引车+3 轴半挂车(1+1+3)
第四类	3 轴 10 轮牵引车+2 轴半挂车(1+2+2)
第五类	3 轴 10 轮牵引车+3 轴半挂车(1+2+3)
第五类	3 轴 8 轮牵引车+3 轴半挂车(2+1+3)

分布、对数正态分布、威布尔分布、伽马分布及高斯混合分布等^[12]。本研究先假设车重服从前 4 种分布, 然后通过极大似然估计法求得具体的相关特征参数, 并使用 K-S 检验表(显著水平取 0.05)对每类分布及得到的结果进行假设检验, 确定分布类型和概率密度函数。若车重数据均不满足这 4 种分布方式, 则通过 MATLAB 中的最大期望(EM)算法, 拟合得到多维高斯混合分布曲线。车重分布特征分析过程见表 2, K-S 检验结果见表 3。

由表 3 可知, 除第一类车重服从对数正态分布外, 其余 4 类均不满足这 4 种分布类型。通过 EM 算法计算得到其余 4 类车重服从三维高斯混合分布。5 类车型概率密度函数分别为式(2)~(6), 拟合

表 2 车重分布特征参数

Table 2 Vehicle weight distribution characteristic parameters

车型	正态分布		伽马分布		对数正态分布		威布尔分布	
	位置参数	形状参数	形状参数	尺度参数	位置参数	形状参数	比例参数	形状参数
第一类	5.54	6.46	1.50	3.69	1.34	0.75	5.80	1.11
第二类	30.81	15.24	3.14	9.82	3.26	0.66	34.69	2.10
第三类	31.07	17.74	2.65	11.72	3.24	0.69	35.01	1.82
第四类	31.30	14.14	4.38	7.14	3.32	0.51	35.44	2.42
第五类	31.81	18.39	2.45	12.99	3.24	0.72	35.77	1.78

表 3 K-S 检验过程

Table 3 K-S inspection process

分布类型	统计量差					拒绝域临界值					K-S 检验				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
正态分布	0.298 2	0.077 5	0.116 0	0.150 7	0.091 1	0.063 0	0.045 4	0.045 5	0.089 8	0.068 9	拒绝	拒绝	拒绝	拒绝	拒绝
伽马分布	0.217 7	0.070 0	0.061 8	0.125 9	0.105 5	0.006 3	0.045 4	0.045 5	0.089 8	0.068 9	拒绝	拒绝	拒绝	拒绝	拒绝
对数正态分布	0.151 7	0.111 2	0.104 4	0.119 1	0.138 4	0.160 3	0.045 4	0.045 5	0.089 8	0.068 9	接受	拒绝	拒绝	拒绝	拒绝
威布分布	0.200 1	0.052 4	0.063 9	0.142 3	0.078 4	0.006 3	0.045 4	0.045 5	0.089 8	0.068 9	拒绝	拒绝	拒绝	拒绝	拒绝

注: I-V 分别为第一类至第五类车型。

结果如图 2 所示。

$$f(x) = \frac{62465}{x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(x)-1.34]^2}{1.125}} \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{0.29}{5.23 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-14.93}{5.23} \right)^2} + \frac{0.26}{4.64 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-51.89}{4.64} \right)^2} + \frac{0.45}{4.3 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-29.24}{4.3} \right)^2} \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{0.25}{4.77 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-56.98}{4.77} \right)^2} + \frac{0.21}{2.56 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-9.57}{2.56} \right)^2} + \frac{0.51}{4.92 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-27.16}{4.92} \right)^2} + \frac{0.34}{3.89 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-47.37}{3.89} \right)^2} + \frac{0.25}{3.88 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-33.37}{3.88} \right)^2} \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{0.41}{2.45 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-16.62}{2.45} \right)^2} \quad (5)$$

$$+ \frac{0.38}{3.82 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-12.74}{3.92} \right)^2} + \frac{0.18}{2.29 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-61.45}{2.29} \right)^2} + \frac{0.44}{4.85 \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-35.76}{4.85} \right)^2} \quad (6)$$

式中： x 为车重， t 。

除第一类车重服从对数正态分布外，其余4类皆服从三峰正态混合分布，第一类车主要为两轴载客车辆与部分小型货车，其余4类车以货车为主，根据《汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质

量限值(GB1589-2016)》^[14]规定二轴车至六轴车最大允许总质量分别为18,25,35,43和49 t，第二类至第四类车型函数拟合图的三峰分别对应货车空载状态、正常载货状态及超载状态。因此，图2符合车辆实际运营情况，并且可以看出货车超载严重，第二类和第三类车超载率极高，这对桥梁的正常运营造成了极大的安全隐患。

3 疲劳荷载谱分析

3.1 典型车辆荷载谱

将调查所得33种代表车型和5类划分结果对应分析，根据聚类分析结果整理出超过30 kN(除V1~V3和V10~V11外)的云南省低等级公路上的典型车辆荷载谱，如图3所示。

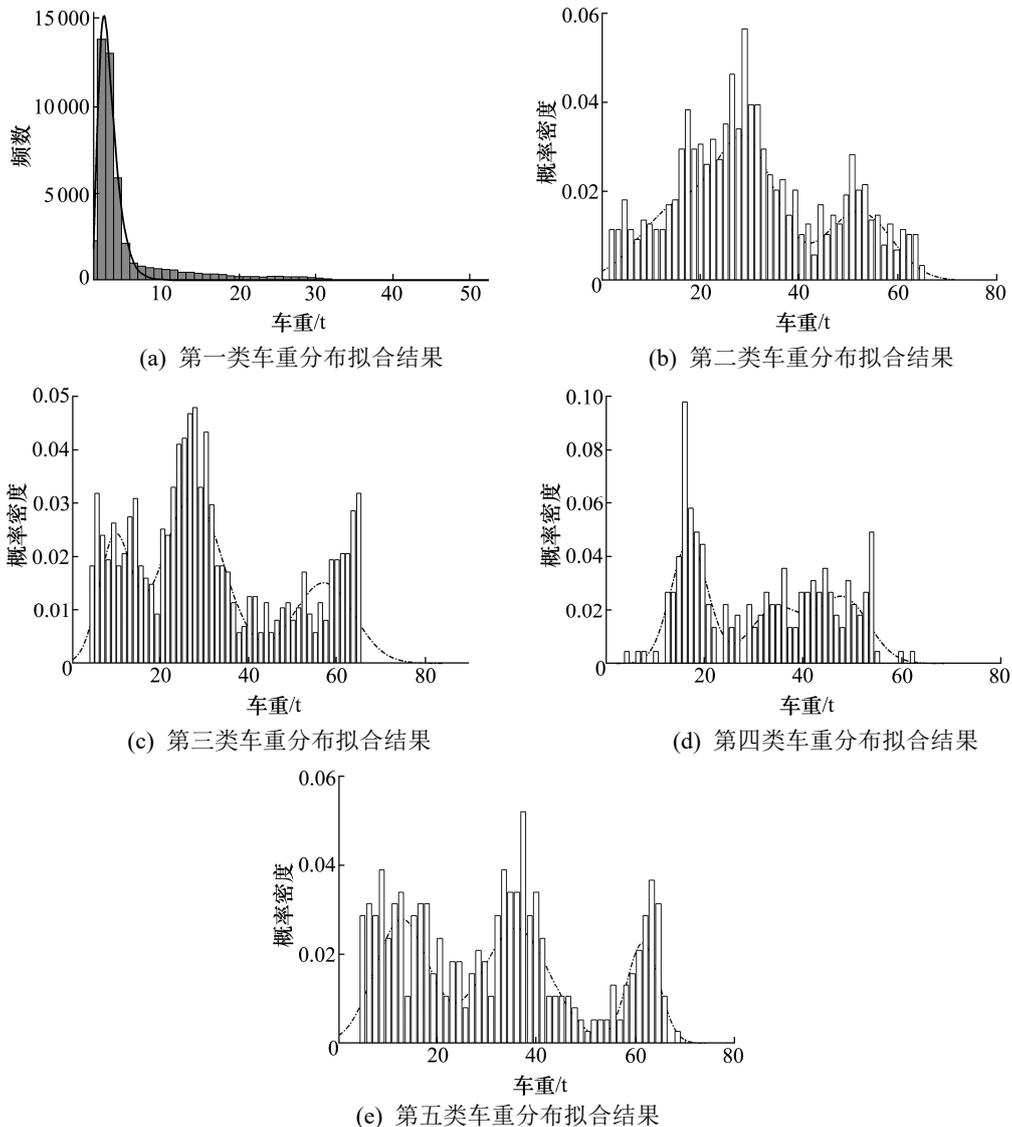


图2 各类车重分布拟合结果

Fig. 2 All types of vehicle weight distribution

3.2 专用车辆荷载谱

基于损伤积聚理论和等效损伤原理, 分别对 5 类车型进行轴重和轴距的等效计算, 获得每类车型中对桥梁损伤加载影响最大的代表车型, 并基于此便可推导出专用疲劳荷载谱。

等效轴重和等效轴距^[15]分别按照式(7)和(8)进行计算。

$$W_{ej} = \left[\sum f_i W_{ij}^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

式中: f_i 为第 i 辆车在同一类车型中出现的频率;

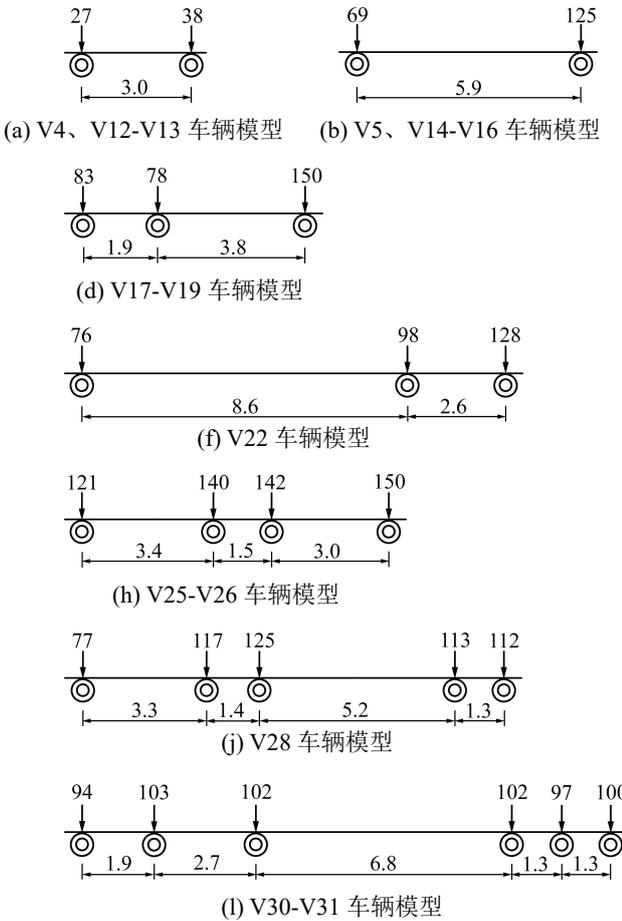


图 3 典型车辆荷载模型

Fig. 3 Typical vehicle load model

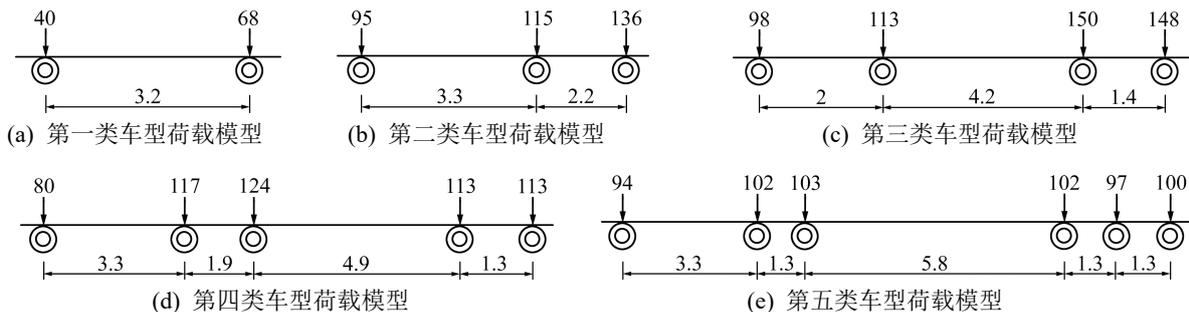


图 4 专用车辆荷载模型

Fig. 4 Special vehicle load model

W_{ij} 为第 i 辆车的第 j 个轴的轴重; W_{ej} 为该类模型车辆第 j 个轴的等效轴重; m 为钢结构构造细节 S-N 疲劳曲线的斜率, 取值为 3。

$$A_j = \sum f_i A_{ij} \quad (8)$$

式中: A_{ij} 为同一类车型中第 i 辆车的第 j 个轴距; A_j 为分类模型车辆的第 j 个轴距。

根据式(7),(8)分别计算各类车的等效轴重和等效轴距, 得到专用车辆荷载谱, 如图 4 所示。

3.3 标准车辆荷载谱

通过专用疲劳荷载谱计算出不同车型对桥梁

结构的相对破坏能力^[16],进而找到对桥梁损害贡献率最大的车型,然后以该车型作为原型推导出标准车辆荷载谱。

根据 $S-N$ 疲劳曲线幂函数方程,可认为变幅荷载所致疲劳损伤与常幅荷载所致疲劳损伤的 $S-N$ 曲线有相同的规律,即可定义损伤贡献率为:

$$\lambda = \frac{D_i}{D} = \frac{r_i w_i^m}{\sum_{i=1}^n (r_i w_i^m)} \quad (9)$$

式中: D_i 为第 i 种车型对桥梁造成的损伤; D 为不同车型对桥梁造成的损伤之和; r_i 为每类代表车型出现的频率; w_i 为第 i 种车型的等效车重。

由式(9)分别计算出 5 类车的疲劳加载贡献率,计算结果见表 4。

表 4 疲劳加载贡献

Table 4 Fatigue loading contributions

车型	总轴重/kN	数量/辆	加载率/%	加载贡献率/%
I	108	25 474	91.94	11.76
II	346	885	3.20	13.46
III	509	887	3.20	42.85
IV	547	225	0.81	13.47
V	598	236	0.85	18.46

从表 4 可以看出,加载贡献率主要受总轴重影响,车数影响不大。第三类车(总轴重 509 kN),加载贡献率最大,为 42.85%,其次为第五类车(总轴重 598 kN),加载贡献率为 18.46%;数量最多的第一类车(总轴重 108 kN),加载贡献率最小,仅为 11.76%。采用加载贡献最大的第三类(四轴车)和第五类(六轴车)车型为云南省低等级公路的标准疲劳车^[17],两者的加载贡献值为 61.31%。

4 结论

基于云南省峨德河桥交通调查数据,分析了山区低等级公路交通荷载组成及分布,并研究了适用于低等级公路的疲劳荷载谱,得出以下结论:

1) 山区低等级公路上的车型可以划分为五类,以第一类为主;第一类车重服从对数正态分布,其余四类车服从三峰正态混合分布;第二类和第三类车超载率极高,对桥梁的正常运营造成了极大的安全隐患。

2) 第三类和第五类车型为云南省低等级公路的标准疲劳车。

参考文献(References):

- [1] 王荣辉,池春,陈庆中,等.广州市高架桥疲劳荷载车辆模型研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2004,32(12):94-96.(WANG Rong-hui,CHI Chun,CHEN Qing-zhong, et al.Study on the model of the fatigue-loaded vehicles in Guangzhou trestle bridges[J].Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition,2004,32(12):94-96. (in Chinese))
- [2] AASHTO G. Guide specifications for fatigue evaluation of existing steel bridges[S].Washington,D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials,1990.
- [3] 刘国军,魏召兰,杨永清.城市桥梁汽车荷载调查与疲劳荷载模型研究[J].公路交通科技,2014,31(6):86-93.(LIU Guo-jun,WEI Zhao-lan,YANG Yong-qing.Research on vehicle loads and fatigue load model of urban road bridge [J].Highway Communications Science and Technology, 2014,31(6):86-93.(in Chinese))
- [4] 狄谨,王杰,朋茜,等.港口公路桥梁疲劳荷载谱研究与应用[J].长安大学学报:自然科学版,2018,38(4):48-55.(DI Jin,WANG Jie,PENG Qian,et al.Research and application of fatigue load spectrum of port highway bridges[J]. Journal of Chang'an University:Natural Science Edition, 2018,38(4):48-55.(in Chinese))
- [5] 童乐为,沈祖炎,陈忠延.城市道路桥梁的疲劳荷载谱[J].土木工程学报,1997,30(5):20-27.(TONG Le-wei,SHEN Zu-yan,CHEN Zhong-yan.Fatigue load spectrum for urban road bridges[J].China Civil Engineering Journal, 1997,30(5):20-27.(in Chinese))
- [6] 李星新,任伟新,钟继卫.西南山区高速公路桥梁标准疲劳车辆荷载研究[J].振动与冲击,2012(15):103-107.(LI Xing-xin,REN Wei-xin,ZHONG Ji-wei.Standard fatigue truck on montane speedway bridge[J].Journal of Vibration and Shock,2012(15):103-107.(in Chinese))
- [7] 胡森林.广西地区高速公路桥梁疲劳荷载谱研究[J].公路工程,2019,44(1):212-218.(HU Sen-lin. Fatigue load spectrum of highway bridges in Guangxi[J].Highway Engineering,2019,44(1):212-218.(in Chinese))
- [8] 邵雨虹,吕彭民.九江长江大桥疲劳车辆荷载谱[J].长安大学学报:自然科学版,2015(35):50-56,64.(SHAO Yu-hong,LÜ Peng-min.Load spectrum of fatigue vehicles for Jiujiang yangtze river bridge[J].Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2015(35):50-56,64. (in Chinese))

(下转至第 21 页)

- (ZHANG Guang-wu.Stability analysis model of tunnel face closed to fault based on silo theory[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2016,12(S2):663-668.(in Chinese))
- [9] 潘峰,陈文胜,丁博,等.竖向分层土主动土压力的分析与计算[J].交通科学与工程,2019,35(2):1-5,50.(PAN Feng, CHEN Wen-sheng,DING Bo,et al.Analysis and calculation of the active earth pressure of the vertical stratified soil[J].Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(2):1-5,50.(in Chinese))
- [10] 傅家俊,尹泉,傅鹤林,等.基于优化的灰色离散 Verhulst 新陈代谢模型的基坑沉降预测[J].公路工程,2019,44(2):19-22,120.(FU Jia-jun,YIN Quan,FU Helin,et al. Settlement prediction of foundation pit based on optimized grey discrete verhulst metabolic model[J]. Highway Engineering,2019,44(2):19-22,120.(in Chinese))
- [11] Horn M.Horizontal earth pressure on perpendicular tunnel face[C]//Proceedings of the Hungarian National Conference of the Foundation Engineer Industry. Budapest,Hungary:Hungary Press,1961:7-16.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50911—2013,城市轨道交通工程监测技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.GB 50911—2013,Code of monitoring measurement of urban rail transit engineering[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2013.(in Chinese))

(上接第84页)

- [9] 陈斌.基于 WIM 的疲劳荷载模型和钢桥疲劳性能评估方法研究[D].杭州:浙江大学,2018.(CHEN Bin.Research on fatigue load model based on WIM and fatigue performance evaluation method of steel bridge[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2018.(in Chinese))
- [10] 中国汽车技术研究中心.中国汽车车型手册[M].山东:山东科学技术出版社,1993.(China Automotive Technology and Research Center.China automotive model manuals[M].Ji'nan:Shandong Science and Technology Press,1993.(in Chinese))
- [11] 杨伟斌,吴光强,秦大同,等.汽车性能数据库的建模[J].重庆大学学报:自然科学版,2006,29(1):8-11.(YANG Wei-bin,WU Guang-qiang,QIN Da-tong,et al.Modeling of automobile performance database[J].Journal of Chongqing University:Natural Science Edition,2006,29(1):8-11.(in Chinese))
- [12] 段雪岩.高原山区高速公路桥梁疲劳荷载谱[D].昆明:昆明理工大学,2017.(DUAN Xue-yan.Fatigue load spectrum of highway bridges in plateau and mountain areas[D].Kunming:Kunming University of Science and Technology,2017.(in Chinese))
- [13] 云南省公路交通情况调查(2016 年分析资料汇编)[M].云南省公路局,2017.(Survey of highway traffic in Yunnan province (compilation of analysis data in 2016) [M].Yunnan Provincial Highway Bureau,2017.(in Chinese))
- [14] 中国第一汽车集团公司.GB1589-2016,汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值[S].北京:中国标准出版社,2016.(China First Automobile Works Group. GB1589-2016, Car, trailer and car train dimensions, axle loads and mass limits[S].Beijing:China Standards Press, 2016.(in Chinese))
- [15] 苏建明,周广利,王娜,等.济青高速公路桥梁疲劳荷载车辆模型研究[J].公路交通科技:应用技术版,2018(5).(SU Jian-ming,ZHOU Guang-li,WANG Na,et al.Research on fatigue load vehicle model of Jiqing expressway bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development:Application Technology Edition,2018(5). (in Chinese))
- [16] 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 Ze-gang.Study on the load model of a typical highway actual running vehicle[D]. Nanjing:Southeast University,2015.(in Chinese))
- [17] 宋秀华,肖新辉,鲁乃唯.基于疲劳损伤的中小跨径桥梁限载取值研究[J].交通科学与工程,2019,35(2):58-63. (SONG Xiu-hua,XIAO Xin-hui,LU Nai-wei.Study on load limiting value of medium and small span bridges based on fatigue damage[J].Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(2):58-63.(in Chinese))