

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.08.067

极端荷载作用下公路桥梁荷载概率模型研究

封伟,郭强,樊泽

(西安市政设计研究院有限公司,陕西 西安 710000)

摘要:我国桥梁设计规范中对极端荷载组合系数没有明确的规定,在以结构可靠度为基础的概率极限状态设计法中,由于公路桥梁各种作用比较多且大多随时间变化的范围比较大,各种作用的组合也比较复杂,所以必须选择合理的概率模型才能保证计算出真实合理的结构可靠度。通过查阅文献并结合 WIM 系统统计的车辆数据分析,建立了公路桥梁永久荷载及其效应概率分布模型;基于 Matlab 软件,在汽车车重总体服从多峰分布的基础上对实测数据进行训练拟合,建立了汽车荷载效应的概率模型并确定了汽车荷载分级加载方式,为公路桥梁可靠度研究和求解极端荷载组合系数奠定了基础。

关键词:公路桥梁;极端荷载;永久荷载;汽车荷载;概率模型;可靠度

中图分类号: U442

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)08-0266-04

0 引言

911 事件后,美国将结构物设计的战略目标扩展到结构多灾害防御,在公路桥梁方面,联邦公路局资助设立在布法罗大学的 MCEER 多学科地震工程研究中心进行桥梁多灾害设计理论的研究。我国也应赶上这一步伐,将多场、多灾害下的桥梁防灾减灾作为前瞻性课题加以研究。

极端荷载组合中分项系数的选取是这一研究领域首要解决的基础性问题。其选取的基础是在特定桥梁目标可靠指标的前提下,通过抗力模型 R 与作用效应模型 S 求得^[1]。

荷载概率模型是求解桥梁可靠度的基础。永久荷载、汽车荷载均为与时间有关的随机过程,因此,运用概率论计算结构可靠度进而研究极端荷载组合中分项系数的选取就成为一个可行的方法^[2-5]。

综上所述,针对桥梁永久荷载和汽车重载的荷载模型研究是进行极端荷载组合分项系数选取的关键。

1 永久荷载

永久荷载包括结构和非结构部分的重量,有时也称之为自重。永久荷载的主要特征可描述如下^[6]:

- (1)在任意时刻发生的概率接近或等于 1。
- (2)通常可忽略其随时间的变化。
- (3)通常量级的不确定性与其他类型荷载相比

较小。

根据《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999),对桥梁的永久作用概率分布模型做了统计。统计表明,永久作用分布类型为正态分布,其平均值与 1 相近,标准差很小,因此其变异系数很小。在进行可靠度研究和极端荷载组合时,由于永久荷载对最终的失效概率贡献较小和永久荷载自身的稳定特性,在进行极端荷载组合时,可以忽略其随时间的变异性。

1.1 永久荷载概率分布模型

根据《公路工程结构可靠度设计统一标准》,永久荷载的统计参数见表 1。

表 1 永久荷载统计参数

恒荷载种类	分布类型	平均值 / 标准值	变异系数
沥青混凝土桥面	密度	0.998 8	0.044 6
	重量	0.989 4	0.111 4
水泥混凝土桥面	密度	0.987 0	0.040 2
	重量	0.986 5	0.098 3
构件	重量	1.021 2	0.046 0

1.2 永久荷载效应模型

公路桥涵结构的永久荷载指桥梁构件和桥面磨耗层的重量。20 世纪 90 年代结合《公路工程结构可靠度设计统一标准》的编制,曾对全国范围内的一些代表性地区进行了公路桥梁永久荷载的实测统计分析,结果见表 2^[1]。

表 2 公路桥梁永久荷载概率分布

分布类型	平均值 / 标准值	变异系数
正态分布	1.014 8	0.043 1

收稿日期: 2022-09-13

作者简介: 封伟(1990—),男,硕士,工程师,注册土木工程师,主要从事桥梁设计工作。

2 汽车荷载

汽车荷载标准是公路桥梁设计的重要依据之一,其不仅与桥梁的耐久性、安全性和适用性有关,还关系到车辆轴重、总重、运输安全等,同时也是各级管理单位对运输车辆进行管理的基础和标准。汽车荷载在桥梁设计中有着重要的地位,直接影响桥梁结构的承载能力。本文基于 Matlab 软件,在汽车车重总体服从多峰分布的基础上对实测数据进行训练拟合,建立了汽车荷载效应的概率模型。

2.1 汽车荷载标准发展

汽车荷载是公路行业特有的荷载,在以往历次标准的制定中,一般均参考借鉴国外相关荷载标准。1949年之前,我国的公路桥涵汽车荷载标准基本上借用美国相关标准;建国初期则是借鉴原苏联的相关规范标准;20世纪60年代以后,随着我国汽车工业的发展,有关汽车荷载的标准也在不断发展,使之更符合我国在不同时期建造的不同等级的公路桥涵。表3给出了我国公路桥汽车荷载标准的演变过程。

表3 我国公路桥汽车荷载标准的演变

标准名称	汽车荷载标准等级
《公路工程设计准则》(1951年)	汽-13、拖-80;汽-10、拖-60;汽-8、拖-30;汽-6、拖-30
《公路工程设计准则》(1954年、1956年)	汽-18、拖-80;汽-13、拖-80;汽-10、拖-60;汽-8、拖-30;汽-6、拖-30
《公路桥涵车辆荷载及净空标准暂行规定》(试行)(1967年)	汽车-26、拖车-100;汽车-15、拖车-60;汽车-10
《公路工程技术标准》(试行)(1972年)	汽车-20级、挂车-100;汽车-15、挂车-80;汽车-10、履带-50
《公路工程技术标准》(JTJ 001—81)(1981年)	汽车-超20级、挂车-120;汽车-20、挂车-100;汽车-15级、挂车-80;汽车-10、履带-50
《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)	公路-I级、公路-II级

随着我国经济以及汽车制造业的迅猛发展,有必要根据我国实际情况制定相应的汽车荷载标准。我国于2003年颁布的《公路工程技术标准》(JTGB01—2003)和2015年颁布的《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中,标准车辆荷载模式均采用了国外普遍采用的模式,即车道荷载和车辆荷载模式。车辆荷载通过施加集中力进行模拟,如图1所示;车道荷载则采用集中荷载和均布荷载进行模拟,如图2所示。一般情况下,在对桥梁结构进行整体分析计算时应采用车道荷载,局部分析计算时则采用车辆荷载。车辆荷载与车道荷载不叠加作用^[6]。

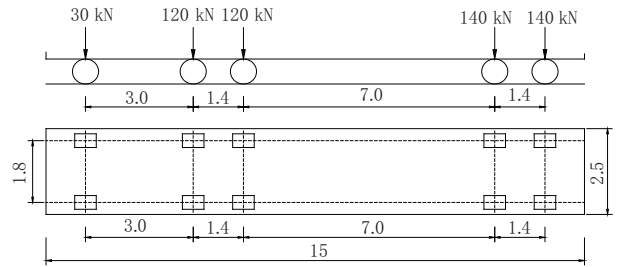


图1 车辆荷载的计算图示(单位:m)

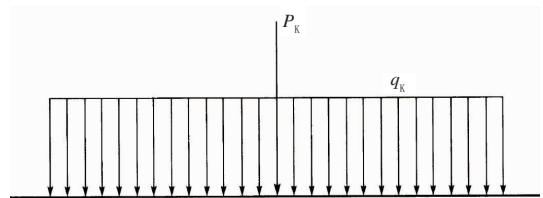


图2 车道荷载的计算图示

表4是我国公路-I级汽车荷载的取值标准,公路-II级则在此基础上乘以0.75进行取值^[7]。

表4 我国规范中关于汽车荷载标准值的规定

均布荷载		10.5 kN/m	
q_k			
车道荷载	集中荷载	计算跨径 ≤ 5 m	180 kN(弯矩计算); 216 kN(剪力计算)
		计算跨径 ≥ 50 m	360 kN(弯矩计算); 432 kN(剪力计算)
	P_k	5 m < 跨径 < 50 m	直线内插
		车辆荷载	车辆中立标准值为 550 kN

2.2 汽车荷载概率分布及特征

公路桥梁汽车荷载属于可变作用,在概率极限状态设计法中,其标准值通过概率统计得出^[8]。随着社会的快速发展,我国汽车的车型、车重、轴重和车距等各项参数都发生了很大的变化。参考党栋^[9]文中对华南某大桥汽车荷载 WIM 系统统计的实测车辆数据,计算出具有代表性的汽车荷载概率分布,然后结合可靠度理论^[4],利用 Monte Carlo 法产生基于实测车辆的随机车流数据。根据公路-I级汽车荷载取值标准,确定不同车型所对应的的车道荷载标准值,并最终计算出各级汽车总重的概率分布。

经过长达1周的观测记录,为了方便统计,将车型分为以下7种:小客车、大客车、2轴货车、3轴货车、4轴货车、5轴货车、6轴货车。分别统计各个车型数量,得到每种车型的数量见表5,所占比例见图3。

表5 各个车型车辆数统计 单位:辆

小客车	大客车	2轴货车	3轴货车	4轴货车	5轴货车	6轴货车
55 615	12 777	14 436	4 042	2 369	6 732	1 920

综合分析统计各个种类车型的重量、轴重等参数,分别得到车重-频率间的直方图(见图4)。

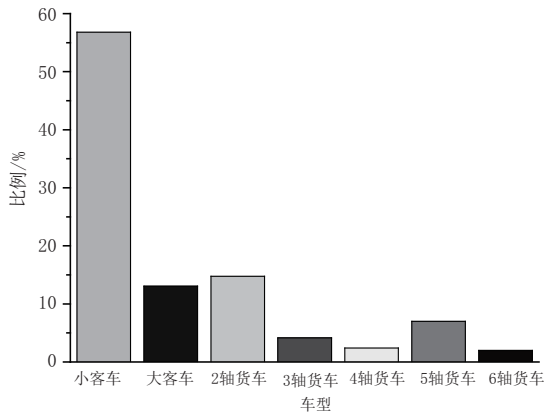
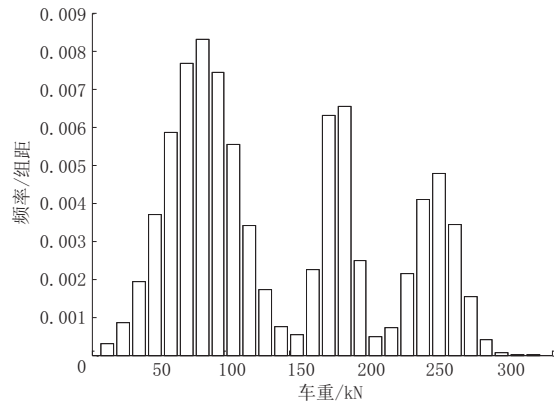
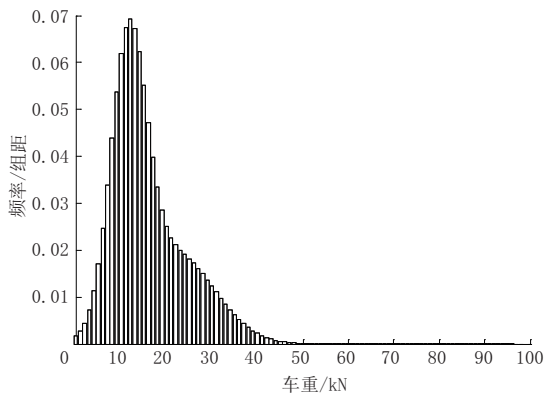


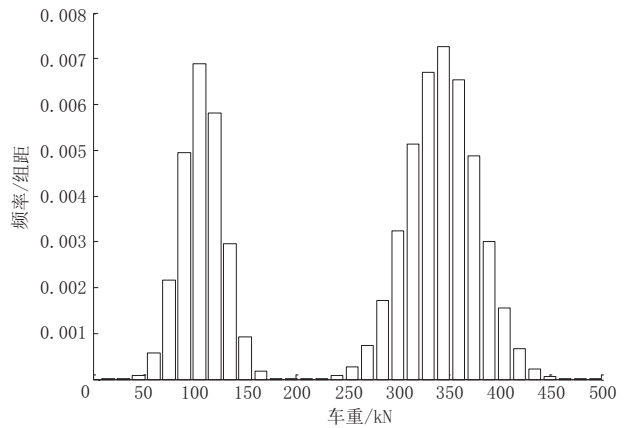
图3 车型比例统计图



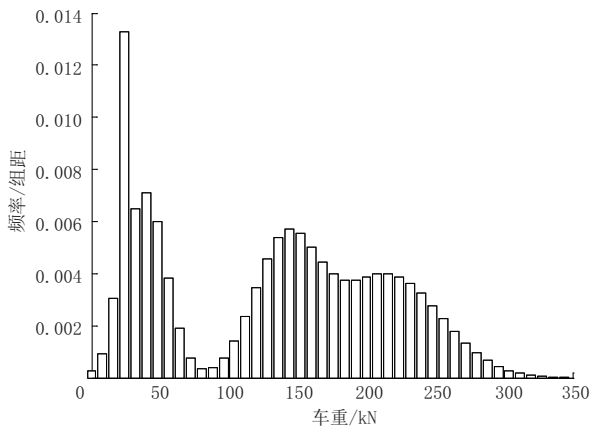
(d) 3轴货车



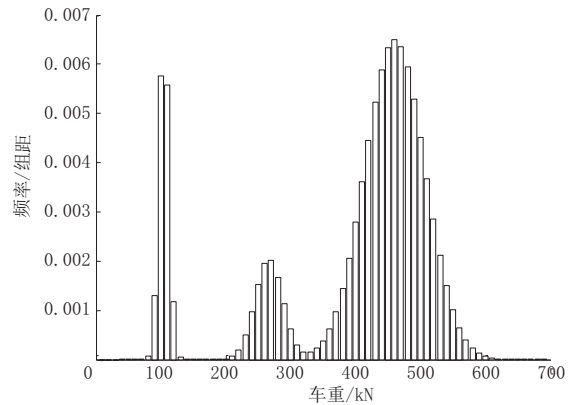
(a) 小客车



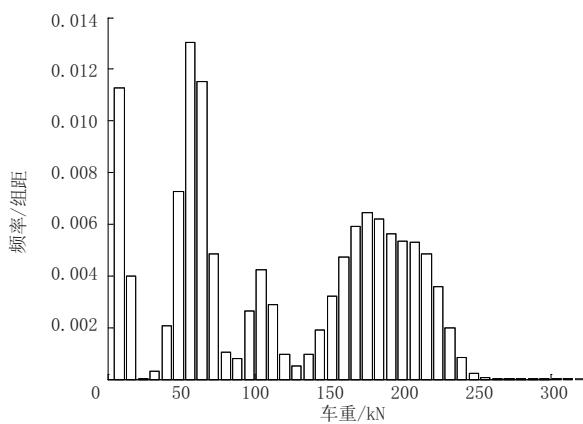
(e) 4轴货车



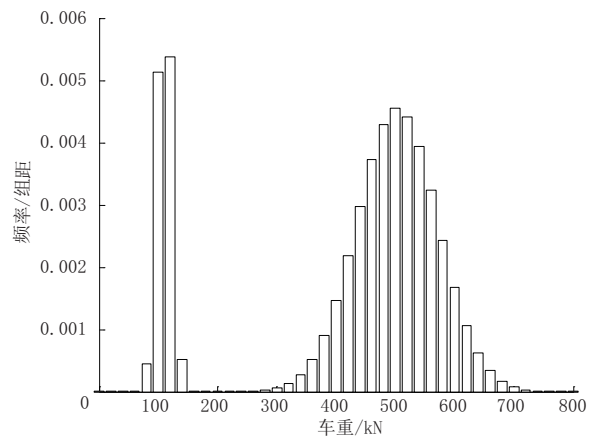
(b) 大客车



(f) 5轴货车



(c) 2轴货车



(g) 6轴货车

图4 各车型车重-频率直方图

2.3 重车概率分布拟合

由图4可知,当车重大于300 kN时,其概率密度分布大致服从正态分布。因此,将车重以50 kN为间隔,划分为:0~50、50~100、100~150、150~200、200~250、250~300、300~350、350~400、400~450、450~500、500~550、550~600、600~650、650~700、700~750、750~800、800~850 kN共17个区段,相应区段的汽车数量统计见表6。

表6 各车重区间汽车数量统计表

编号	车重区间/kN	数量/辆
1	0~50	61 735
2	50~100	7 503
3	100~150	5 700
4	150~200	7 503
5	200~250	5 059
6	250~300	1 994
7	300~350	814
8	350~400	1 094
9	400~450	1 908
10	450~500	2 388
11	500~550	1 272
12	550~600	383
13	600~650	101
14	650~700	21
15	700~750	3
16	750~800	0
17	800~850	0

汽车数量总体服从多峰分布^[10],不利于统计分析。由表6可知,0~50 kN的汽车数量最多,占63.3%,

表7 各级车辆车队荷载换算为车道荷载的标准值

荷载	主车总重/kN											
	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	
$L \leq 5 \text{ m}$	$q_k / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	6.67	7.71	8.65	9.60	10.50	11.50	12.50	13.40	14.30	15.30	16.20
	P_k / kN	203	219	235	251	270	282	296	314	322	345	366
$L \geq 50 \text{ m}$	$q_k / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	6.67	7.71	8.65	9.60	10.50	11.50	12.50	13.40	14.30	15.30	16.20
	P_k / kN	271	292	313	334	360	376	395	418	429	460	489

注:桥涵跨径为 $5 \text{ m} < L < 50 \text{ m}$ 时, q_k 和 P_k 值采用直线内插求得。

分别以350、400、450、500、550、600、650、700、750、800、850 kN共计11个级别的重车为研究对象,再以相应的车道荷载模式加在桥梁模型中,计算得到其效应值,并由2.3节拟合得到的重车荷载概率分布,得到其效应分布模型。然后与永久荷载和极端荷载(如地震荷载)作用进行组合,分析桥梁在极端荷载作用下,重车过桥对结构响应的影响,分析汽车荷载在极端荷载组合中发挥的作用。

属于主要车辆,但车重较小的车对桥梁影响较小。图5为重车即车重为300~850 kN区段的频率直方图及其拟合曲线。由图5可见,当车重大于300 kN时,车重概率密度曲线大致呈正态分布,而车重较大时对桥梁结构的影响也较大,因此在考虑地震荷载与汽车荷载组合时只考虑与重车荷载的组合(考虑极端情况)。

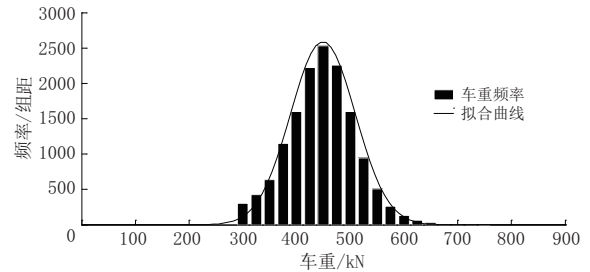


图5 车重-频率直方图与拟合曲线

由重车车重频率的正态分布拟合求得,重车总重服从均值为449.13 kN,方差为 154.62^2 的正态分布。

2.4 汽车荷载加载方式

在进行桥梁可靠度计算或对极端荷载组合系数进行研究时,由于是对桥梁的整体分析,因此汽车荷载加载方式选用车道荷载(利用影响线加载)。为与现行标准中公路-I级和公路-II级中的汽车荷载形式一致,简化计算,采用等效荷载换算,统一用车道荷载形式来表示,即均布荷载 q_k 和集中荷载 P_k 。各级重车荷载换算的车道荷载标准值见表7。

3 结语

(1)根据相关规范,对永久荷载及其效应的分布进行了研究总结,提出了永久荷载及其效应的分布模型。

(2)基于Matlab软件,结合实测轴载数据,在汽车车重总体服从多峰分布的基础上对实测数据进行训练拟合,建立了汽车荷载效应的概率模型,并确定

(下转第274页)

表1 模型参数分析结果

试件编号	屈服荷载 /kN	极限荷载 /kN	屈服位移 /kN	极限位移 /mm	初始刚度 /(kN·mm ⁻¹)	延性系数	刚度折减系数
S1	619.04	760.23	35.23	222.24	44.37	6.31	15.26
S2	617.22	768.23	38.37	219.56	42.20	5.72	14.19

比,结论如下:

(1)根据有限元软件后处理结果可知,承插式桥墩与现浇结构在受力、变形以及损伤状态等均与实际情况较为符合,表明所建立的有限元模型可靠。

(2)承插式桥墩与现浇桥墩在承载能力、刚度、延性均保持一致。因此,可认为其具有等同现浇的性能,在实际工程中可进行推广使用。

参考文献:

[1] 姜海西,卫张震.承插式预制拼装桥墩抗震性能研究综述[J].城市道桥与防洪,2017(12):56-59.
 [2] 耿佳硕.采用UHPC现浇湿接缝连接的装配式桥墩抗震性能研究[D].郑州:郑州大学,2019.
 [3] 王瑞龙,马磊,黄虹.灌浆套筒连接装配式桥墩建设思考及对策研究[J].中国市政工程,2021(4):63-65,110.
 [4] 宋来健.装配式高速铁路桥墩抗震性能试验研究[D].南京:东南大学,2021.
 [5] 刘阳.灌浆套筒连接装配式桥墩节点力学性能研究[D].广州:华南理工大学,2020.
 [6] 禹智涛,潘浩,贺绍华.预应力轴压比对节段拼装桥墩力学性能影响分析[J].广东工业大学学报,2019,36(4):85-91.

[7] 徐艳,曾增,葛继平,等.承插式预制拼装桥墩的最小合理承插深度[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(12):1706-1711.
 [8] 陈明珠.预制混凝土桥墩与承台承插式窄缝连接直剪性能研究[D].广州:广东工业大学,2021.
 [9] Wang Z, Li T, Qu H, et al.Seismic Performance of Precast Bridge Columns with Socket and Pocet Connections Based on Quasi-Static Cyclic Tests: Experimental and Numerical Study[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(11).
 [10] 钱辉,叶晨阳,李宗翱,等.自复位承插式多节段预制桥墩抗震性能理论分析[J].地震工程与工程振动,2021,41(1):35-43.
 [11] 钱辉,叶晨阳,李宗翱,等.自复位承插式多节段预制桥墩抗震性能数值模拟[J].土木工程学报,2020,53(S2):301-308.
 [12] 马军卫.新型全装配式混凝土框架-剪力墙结构抗震性能研究[D].南京:东南大学,2018.
 [13] 张劲,王庆扬,胡守营,等.ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数验证[J].建筑结构,2008(8):127-130.
 [14] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
 [15] 徐刚.新型装配式混凝土夹心剪力墙结构抗震性能试验研究[D].南京:东南大学,2020.
 [16] 徐刚.新型装配式混凝土夹心剪力墙结构抗震性能试验研究[D].南京:东南大学,2020.

(上接第269页)

了汽车荷载分级加载方式。

(3)永久荷载及汽车重载在公路桥梁上概率分布模型的建立,为公路桥梁可靠度研究和求解极端荷载组合系数奠定了基础。

参考文献:

[1] 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.
 [2] HWANG H H M, USHIBA H, SHINOZUKA M. Reliability analysis of code-designed structures under natural hazards[R]. NY, SUNY Buffalo: Report to MCEER,1982.
 [3] HOLMES W T. The 1997 NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures[J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(1):101-114.
 [4] LUCO N, KARACA E.Extending the USGS national seismic hazard

maps and shake maps to probabilistic building damage and risk maps [C]//10th Int'Conf on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering.[S.l.]:[s.n.],2007:55-65.
 [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50153—2008,工程结构可靠性设计统一标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
 [6] 邹天一.结构可靠度[M].北京:人民交通出版社,1998.
 [7] 中华人民共和国交通运输部.JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
 [8] 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠度理论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
 [9] 党栋.公路桥梁设计荷载及其组合研究[D].西安:长安大学,2012.
 [10] 李文杰,穆少华,赵君黎,等.中国公路桥梁汽车荷载标准适应性研究[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会2013年全国桥梁学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2013:120-126.