

桥梁荷载试验车辆自动化布载程序对比分析

刘旭政^{1,2}, 汤仲训¹, 贾丽华³, 王 鹏⁴

(1. 华东交通大学土木建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学土木工程国家实验教学示范中心, 江西 南昌 330013; 3. 杭州市地铁集团有限责任公司运营分公司, 浙江 杭州 310017; 4. 广深铁路股份有限公司广州南高铁工务段, 广东 广州 511400)

摘 要 目的 为解决传统桥梁荷载试验车辆布载方案设计中存在的计算繁琐、耗时较长以及加载方案优化的问题, 自主研究开发一套“索吊桥梁荷载试验车辆自动化布载程序(CSBVL)”。方法 综合考虑了多目标约束及优化布载设计, 采用 Python 编程语言编制了 CSBVL 自动化布载程序; 以一座跨径为 100 m 系杆拱桥为例, 分别采用 CSBVL 程序与某商业软件的试验自动化加载模块对荷载试验车辆布置方案进行自动化计算, 从软件计算效率、非控制截面加载效率和布载结果优化多个方面进行对比分析。结果 在某些常用试验参数设定下, 该商业软件计算的布载方案存在非控制截面加载效率的最大值超出规定值的 8.6%, 危害荷载试验时桥梁结构安全; CSBVL 计算得出的布载方案能够在满足桥梁静载试验的规范的基础上, 通过“性价比”评价得出兼顾经济性、安全性的布载方案。结论 与某商业软件相比, CSBVL 具有自动化程度高、布载方案经济、安全等优势, 可以广泛应用于各类桥梁的荷载试验方案设计中, 具有很好的推广应用价值。

关键词 桥梁荷载试验; 试验车辆布载; CSBVL 程序; 性价比法; 试验荷载效率

中图分类号 TU997

文献标志码 A

Comparison and Analysis on Testing Vehicle Automatic Layout Program for Bridge Load Test

LIU Xuzheng^{1,2}, TANG Zhongxun¹, JIA Lihua³, WANG Peng⁴

(1. School of Civil Engineer and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013; 3. Operation Branch of Hangzhou Metro Group Co. Ltd., Hangzhou, China, 310017; 4. Guangshen Railway Co. Ltd., Guangzhou South High-speed Railway Works Section, Guangzhou, China, 511400)

Abstract: To solve the problems of complicated calculation, long time-consuming and optimization of loading scheme in the design of traditional bridge load test vehicle layout, a set of automatic

收稿日期: 2020-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52068026, 51468019)

作者简介: 刘旭政(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事桥梁结构安全性评价方面研究。

layout programs-" Cable-suspender Bridge Testing Vehicle Safety Layout Program(CSBVL)" was researched and developed. Combined with the multi-objective restriction and optimization method, the CSBVL was programmed with Python language. Then, the testing vehicle layout of a 100-m length tied arch bridge was calculated and compared with the CSBVL program and certain commercial automatic layout software. The calculation efficiency, non-critical section loading efficiency, and loading scheme result optimization were analyzed with two methods. The comparison results show that the loading scheme calculated by the commercial software has a maximum loading efficiency of a non-critical section that exceeds 8.6% of the specified value and endangers the safety of the bridge structure during the load test. While, the loading scheme calculated by the CSBVL program can satisfy the specifications of the bridge static load test, and the calculated loading scheme can meet the requirement of economic and safety through the performance-price ratio evaluation. Compared with commercial software, CSBVL has the advantages of a high degree of automation, economical and safe loading scheme, and can be widely used in the design of load test schemes for various bridges, and has a good value in popularization and application.

Key words: bridge load test; test vehicle load layout; CSBVL program; performance-price ratio method; test load efficiency

桥梁结构在运营期间由于自然环境、材料劣化、施工缺陷、超载等不利因素的影响,结构的安全性和承载能力都会受到一定的影响^[1]。桥梁荷载试验是检验桥梁结构承载力最直接有效的方式之一^[2-6]。传统的桥梁荷载试验车辆布载方案存在计算繁琐、耗时较长以及加载方案优化的问题。一些学者对于桥梁荷载试验车辆的自动化布载开展了相关研究,取得了一些研究成果。彭俊杰等^[7]分析研究了桥梁静载试验加载方案的设计及优化,对桥梁检测中的加载方案选择提出了一些思路和方法,并编制了相应的计算程序。石永燕等^[8]根据连续函数的性质证明了车辆加载方程实根的存在,实现了车辆自动化快速布载系统。刘思孟等^[9]在现有荷载试验布载方法的基础上提出了一种弯矩控制并又考虑挠度效率的荷载试验布载方法。吕毅刚^[10]基于 Visual C++ 语言,针对桥梁荷载试验横向分配系数开发了桥梁荷载试验横向分布自动计算软件,能方便的给定加载车辆位置并求出各个主梁的横向分配系数。还有部分学者^[11-13]运用 C++ Builder、VBA 等计算机编程语言,结合荷载试验现场情况编

制了一些车辆自动化布载程序。这些自动化程序大多数没有考虑非控制截面加载效率超标的问题,少数学者^[14]通过控制车辆纵向间距的大小来简单考虑。目前对于桥梁在试验过程中非控制截面加载效率存在超标的问题研究不深入,且对最优加载方案的选择问题研究较少。课题组对于这一问题进行了持续深入研究,黄晓鹤^[15]对索吊桥梁静载试验时的安全布载问题展开研究,并对几类典型的大跨度索吊桥梁的敏感工况的加载方式提出了改进的布载方案。赵军^[16]分析确定了敏感工况的加载超标问题,基于 MATLAB 软件编写了车辆安全自动加载程序。王鹏^[17]采用 Python 语言编制了索吊桥梁荷载试验自动化安全布载程序,并选用梁拱组合桥和悬索桥验证了程序的可行性。

基于上述研究分析,笔者首先介绍了课题组开发完成的 CSBVL 程序的编制原理及流程,并以一座计算跨径为 100 m 系杆拱桥为例,分别采用 CSBVL 程序与某商业软件的试验自动化加载模块对荷载试验车辆布置方案进行了自动化计算,并从软件计算效率、非控制截面加载效率和布载结果优化多个方

面进行了对比分析,研究结果对桥梁静载试验的实际工程应用具有重要参考意义和推广应用价值。

1 CSBVL 车辆自动化布载程序

针对车辆布载中存在的手工、经验计算难度大、耗时长等问题,本课题组基于 Python 编程语言编制了车辆自动化安全布载程序^[17] (Cable-Suspender Bridge Testing Vehicle Safety Layout, CSBVL)。CSBVL 主要包括四部分功能,分别为试验参数设置、试验项目影响线的输入、试验工况加载效率计算及车辆布置方案确定、计算结果显示。依据《公路桥梁荷载试验规程》^[18]中对桥梁静载试验荷载效率的规定,确保最终计算结果能够满足静载试验安全要求。

CSBVL 计算前首先要对试验相关设置参数进行设定,包括桥梁的影响线文件以及目标工况截面的活载效应值等。参数设定完成后,程序可自动计算出满足荷载试验规范要求的车辆加载位置,并确定最优试验车辆。最后程序列出最优车辆布载方案的详细计算结果以及车辆位置布置图。程序算法流程图如图 1 所示。

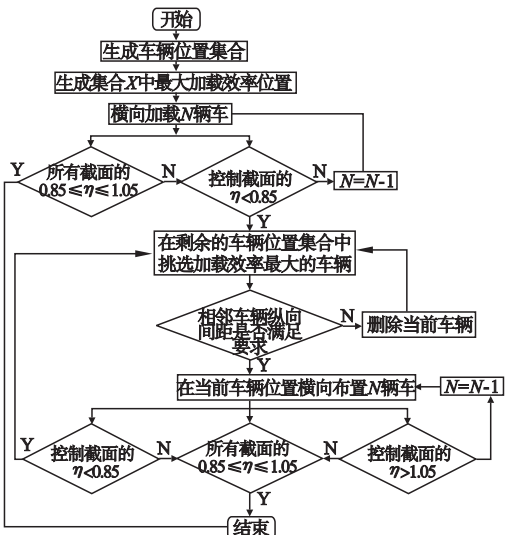


图 1 CSBVL 程序流程图

Fig. 1 Flow chart of CSBVL program

桥梁静载试验布载方案的确定需要综合考虑其安全性和经济性,桥梁结构类型以及跨径等因素的差异也对布载方案中试验车辆轴重、间距的选择有影响。CSBVL 程序通过引入“性价比法”^[17]对布载方案中不同试验车辆的布载结果进行汇总评分比较,确定性价比最高的试验车辆类型。布载方案中试验车辆的汇总评分见式(1)、(2)。

$$C_i = \frac{N \times R}{\eta} \tag{1}$$

$$C = \sum_i C_i \tag{2}$$

式中: N 为试验车辆总数量; R 为试验车辆布置排数; η 为试验加载效率; C_i 为单个工况评分; C 为某一质量的试验车辆汇总评分。

依照每一吨轴重所能产生的效率最高,通过将不同质量的试验车辆的汇总评分采用内插法归一化处理为 $[60, 100]$ 内的换算评分,建立性价比得分计算公式(3),计算其性价比得分,最终选出性价比最高的试验车辆重量。经上述公式的评比,可确定出最优的试验车辆重量,并给出安全性、经济性最优的布载方案。

$$V = \frac{H}{M} \tag{3}$$

式中: V 为某一质量的试验车辆性价比得分; H 为某一质量的试验车辆换算评分; M 为试验车辆总质量。

2 工程背景

2.1 工程概况

笔者选取一座计算跨径 100 m 的系杆拱桥荷载试验方案设计为研究对象。该桥拱轴线为二次抛物线,矢跨比为 1/5,矢高 20 m。拱肋采用哑铃型钢管砼,截面高 2.6 m。全桥共设置吊杆 18 对,间距 5.1 m。全线采用双向四车道高速公路标准,设计行车速度 80 km/h,设计荷载为公路-I 级。该桥总体布置图见图 2 所示。

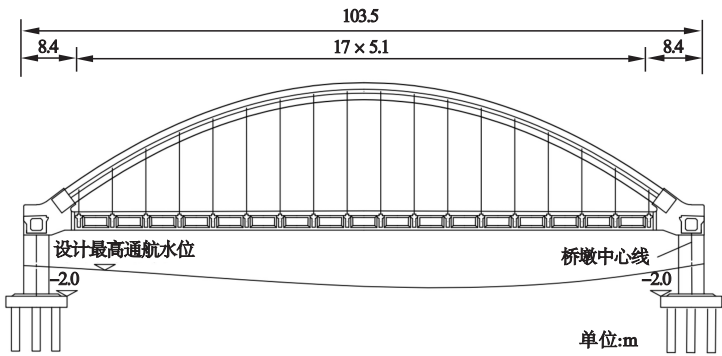


图2 桥梁总体布置图

Fig. 2 Bridge general layout

2.2 有限元模型

采用 Midas/Civil2019 建立本桥的有限元计算分析模型。主拱采用哑铃型截面,使用施工联合截面进行模拟,混凝土强度标号为 C50,钢管材料采用 Q345 钢。横梁、系梁均采用梁单元模拟,吊杆采用桁架单元模拟,单根拱肋设置 18 根刚性吊杆。吊杆下端与系梁共用节点,两端拱脚处采用一般支撑的约束形式模拟。全桥模型共划分 458 个节点,758 个单元。有限元计算分析模型如图 3 所示。

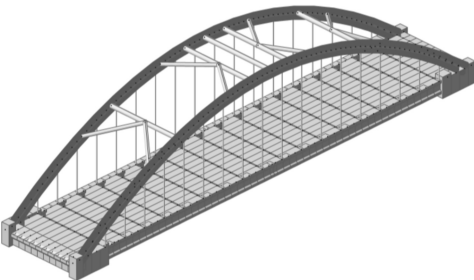


图3 有限元计算分析模型

Fig. 3 Finite element model

2.3 荷载试验工况

桥梁静载试验应按照桥梁结构的最不利受力原则和代表性原则确立试验工况和测试截面^[19]。对于组合体系桥梁,依据结构受力特点和荷载试验规程确定试验工况及相应的测试截面,该系杆拱桥确定的试验加载工况详见表 1。

表1 试验加载工况及活载效应值

Table 1 Test loading conditions and live load effect values

工况	测试项目	活载效应值
1	拱顶最大正弯矩	1 787.6 kN·m
2	拱脚最大负弯矩	- 815.3 kN·m
3	拱肋 L/4 最大正弯矩	2 341.2 kN·m
4	吊杆最大拉力增量	156.4 kN
5	主梁跨中最大正弯矩	2 314.5 kN·m

3 自动化布载计算及结果对比分析

3.1 CSBVL 和某商业布载软件的参数设定

使用荷载试验车辆自动化布载程序进行计算首先要对试验相关设置参数进行设定。CSBVL 需对控制截面以及非控制截面活载效应值、桥梁基本参数、车辆类型参数进行设置;同时还应输入车辆轴间距、车轮距,程序将自动生成总轴质量分别为 30 t、33 t、35 t、37 t、40 t、42 t、45 t 共 7 种常用试验车辆类型;此外,还需设置桥长、桥宽以及桥面分隔类型参数用于车辆位置布置图的绘制。某商业软件通过有限元模型的导入,需要对试验车辆类型、相邻车辆最小纵向间距、车辆移动步长、试验荷载效率等参数进行设定。两种布载软件试验车辆均采用三轴车^[20],车轴间距为 4 m+1.4 m,相邻车辆最小纵向间距为 4 m(前车后轴与后车前轴间距),车辆移动步长为 1 m,目标试验荷载效率取值 0.85~1.05。程序参数设定界面如图 4、图 5 所示。

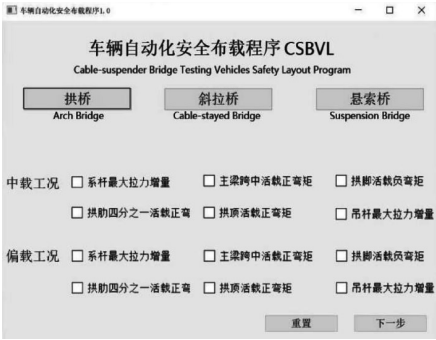


图 4 CSBVL 参数设定界面

Fig. 4 Parameter setting interface of CSBVL

3.2 计算结果及效率对比

笔者对某座系杆拱桥进行自动布载计算分析,CSBVL 分别取质量为 30 t、33 t、35 t、37 t、40 t、42 t、45 t 共 7 种试验车辆对大桥的

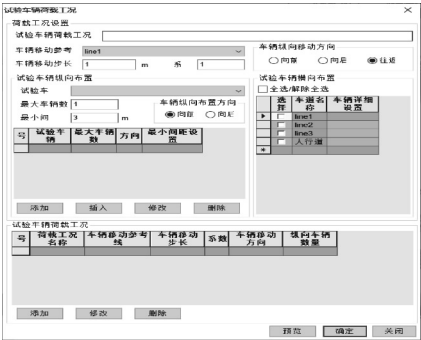


图 5 商业软件参数设定界面

Fig. 5 Parameter setting interface of commercial software

5 个工况进行计算。商业布载软件单次只能计算 1 种重量的试验车辆,因篇幅所限,笔者展示了两两种布载软件采用 40 t 试验车辆的布载结果,如表 2 所示。

表 2 两种布载软件对 40 t 车辆的计算结果

Table 2 Calculation results of 40 t vehicle by two deployment software

车辆质量/t	工况	加载类型	CSBVL		商业软件	
			荷载效率	车辆/台	荷载效率	车辆/台
40	1	中载	0.95	4	0.92	4
		偏载	0.95	4	0.95	4
	2	中载	0.95	4	0.93	4
		偏载	0.89	3	0.95	4
	3	中载	0.95	4	0.89	4
		偏载	0.90	3	0.95	4
	4	中载	0.89	5	0.95	5
		偏载	0.95	4	0.95	4
	5	中载	0.94	4	0.94	4
		偏载	0.94	4	0.94	4

根据表中布载结果,所有工况控制截面的试验荷载效率均在0.85~1.05,符合规范要求,CSBVL 和商业布载软件完成所有工况试验均需要 5 辆 40 t 车。两种布载软件均可根据布载结果输出车辆布载示意图,以工况 4 为例,依据吊杆弯矩影响线,在中载工况下 CSBVL 需要 5 辆车,商业布载软件需要 5 辆车。加载车辆布置示意如图 6 所示。

商业布载软件单次计算只能考虑 1 种质量的试验车辆,同时需要根据经验输入试验车辆的数量进行试算,计算过程繁琐、复杂。

而 CSBVL 能够进行同时计算多种车辆质量的试验,并根据输入的试验荷载效率直接算出所需的试验车辆数量,大大提高了计算效率。

3.3 非控制截面的荷载效率对比

索吊桥梁在进行静载试验时,应该在满足工况控制截面的荷载效率的同时,保证非控制截面的荷载效率不超标。本桥中以典型工况(吊杆最大拉力增量)的中载为例,考察非控制截面的荷载效率的超标问题。控制截面为吊杆 188#单元,非控制截面为 188#单元

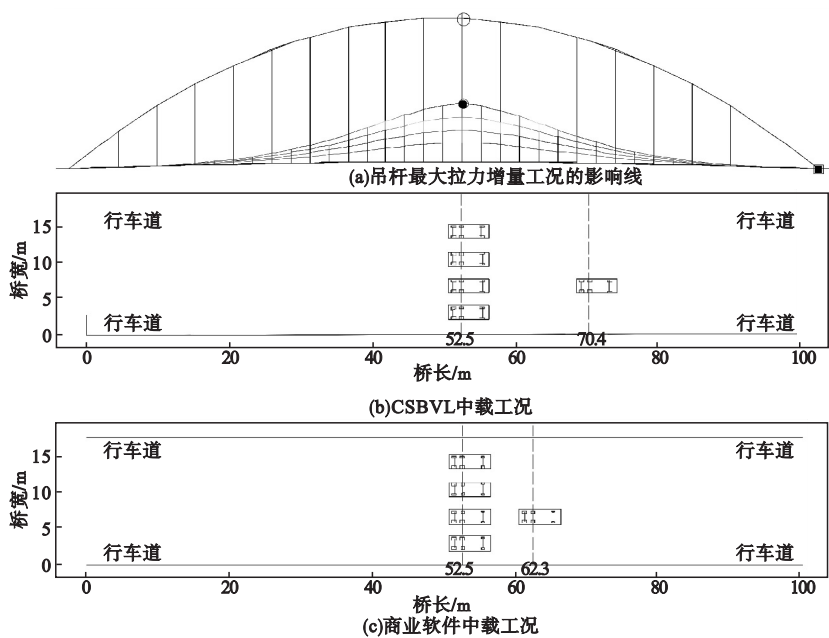


图 6 车辆布载示意图
Fig. 6 Schematic diagram of vehicle layout

影响线最大值附近的主拱(208#单元)、吊杆(187#单元)和主梁(160#、159#单元)截面。根据布载结果,两种程序计算出的布载方式中非控制截面的荷载效率如图 7 所示。

1.9%、7.6% 和 8.6%。因此,CSBVL 可以保证非控制截面的荷载效率满足安全要求,而商业软件则无法保证非控制截面的荷载效率不超标。

3.4 车辆自动布载优化对比

静载试验方案中最佳试验车辆的质量应通过评比方法来确定。文中商业布载软件对于布载结果不具备优化评比功能。CSBVL 对布载结果中不同重量的试验车辆进行汇总评分比较。因篇幅所限,仅展示工况 1 计算结果,表 3 为工况 1 在不同质量的试验车辆所对应的计算评分。

根据“性价比”分析,将 CSBVL 对各试验车辆的布载结果汇总得分归一化处理为 [60,100] 内的换算评分,即 30 t 试验车辆设成 60 分,45 t 试验车辆设为 100 分,其余试验车辆评分按内插法换算,再将换算得分除以试验车辆质量,即可得出不同质量试验车辆的性价比。评比结果如表 4 所示。根据计算结果,42 t 试验车辆的性价比评分是最高的,每吨荷载产生的加载效率最大,因此,42 t 试验车辆为最优荷载类型。

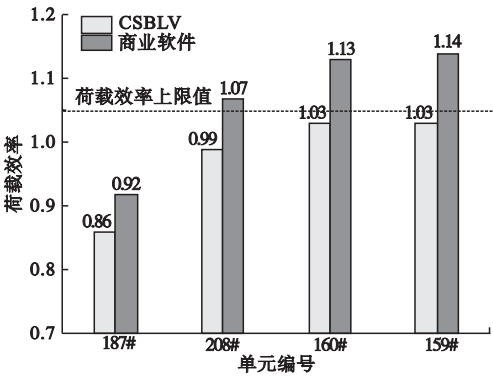


图 7 非控制截面试验荷载效率

Fig. 7 Non-critical cross-sections test load efficiency

根据非控制截面试验荷载效率结果,CSBVL 的布载结果中非控制截面的荷载效率均小于 1.05,分别为 0.86、0.99、1.03 和 1.03。而商业软件布载结果中共有 3 个非控制截面的荷载效率超出 1.05,分别为 1.07、1.13 和 1.14,超出各自安全荷载效率

表 3 工况 1 对应不同质量的试验车辆的评分表

Table 3 Condition 1 corresponds to the score table under different test vehicle weights					
车辆质量/t	加载类型	加载效率	车辆/台	车辆排数/排	得分/分
30	中载	0.95	6	2	31.57
	偏载	0.95	6	3	
33	中载	0.97	6	2	30.93
	偏载	0.97	6	3	
35	中载	1.01	6	2	27.67
	偏载	0.95	5	3	
37	中载	0.95	5	2	18.94
	偏载	0.95	4	2	
40	中载	0.97	5	2	18.55
	偏载	0.97	4	2	
42	中载	0.95	4	1	10.53
	偏载	0.95	3	2	
45	中载	0.99	3	1	8.97
	偏载	1.01	3	2	

表 4 试验车辆性价比评分表

Table 4 Grades of various test vehicle's weights considering ratio between performance and price

车辆质量/t	换算评分/分	性价比/分
30	60.0	2.00
33	67.6	2.05
35	72.9	2.08
37	79.7	2.15
40	88.7	2.22
42	97.2	2.31
45	100	2.22

4 结 论

(1)在某些试验车辆参数设定下,两种布载程序均能计算出符合试验规程的车辆布载方案。商业布载软件计算时需要根据经验输入设定参数进行试算,且只能考虑一种质量的试验车辆;而 CSBVL 能够同时计算多种质量的试验车辆,自动化程度更高。

(2)CSBVL 布载结果中非控制截面的试验荷载效率均小于 1.05;而商业布载软件在某些设定参数下,其计算结果中存在非控制截面的试验效率超出规定值的布载形式,

危害荷载试验时桥梁结构安全。

(3)在此算例中,CSBVL 采用“性价比”分析确定布载方案中 42 t 试验车辆为性价比最优的试验车辆;商业布载软件对于布载结果没有优化分析功能。

(4)CSBVL 具有操作便捷、计算快速以及多种试验车辆同步计算的优点,同时能兼顾布载方案的经济性、安全性,可以广泛应用于各类桥梁的荷载试验方案设计中,具有很好的推广应用价值。

参考文献

[1] 贺栓海,赵祥模,马建,等.公路桥梁检测及评价技术综述[J].中国公路学报,2017,30(11):63-80.
(HE Shuanhai, ZHAO Xiangmo, MA Jian, et al. Review of highway bridge inspection and condition assessment [J]. China journal of highway and transport, 2017, 30 (11) : 63 - 80.)

[2] 湛润水,胡钊芳.公路桥梁荷载试验[M].北京:人民交通出版社,2003.
(SHEN Runshui, HU Zhaofang. Load test of highway bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.)

[3] 贾毅,霍龙飞,李福海,等.某宽幅简支梁桥荷载试验研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(5):847-854.
(JIA Yi, HUO Longfei, LI Fuhai, et al. Load test study of a wide-simple supported beam bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu

- university (natural science), 2017, 33 (5): 847 - 854.)
- [4] 于玲,宋吉宏,姜毅超,等.基于灰色理论对桥梁荷载试验的控制[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(6):1083-1089.
(YU Ling, SONG Jihong, JIANG Yichao, et al. Bridge load test based on the grey theory [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32 (6): 1083 - 1089.)
 - [5] CAI C S, SHAHAWY M. Understanding capacity rating of bridges from load tests [J]. Practice periodical on structural design and construction, 2003, 8 (4): 209 - 216.
 - [6] MOEN C D, SHAPIRO E E, HART J. Structural analysis and load test of a nineteenth-century iron bowstring arch-truss bridge [J]. Journal of bridge engineering, 2013, 18 (3): 261 - 271.
 - [7] 彭俊杰,张慧,李修君.桥梁静载试验加载方案研究[J].中外公路,2014,34(6):188-190.
(PENG Junjie, ZHANG Hui, LI Xiujun, et al. Research on loading scheme of bridge static load test [J]. Journal of China & foreign highway, 2014, 34 (6): 188 - 190.)
 - [8] 石永燕,王云莉.静载试验车辆自动加载算法及系统[J].公路交通技术,2003(6):50-52.
(SHI Yongyan, WANG Yunli. Automatic rapid loading algorithm and system of bridges' static load test [J]. Technology of highway and transport, 2003 (6): 49 - 51.)
 - [9] 刘思孟,刘国金,周建庭.基于内力控制兼顾挠度荷载效率的桥梁荷载试验布载方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2005,24(1):16-18.
(LIU Simeng, LIU Guojin, ZHOU Jianting. Research on bridge load test method based on internal force control and deflection load efficiency [J]. Journal of Chongqing jiaotong university, 2005, 24 (1): 16 - 18.)
 - [10] 吕毅刚,陈立忠.中小桥梁荷载试验横向分布自动加载软件研究[J].中外公路,2011,31(02):158-161.
(Lü Yigang, CHEN Lizhong. Research on automatic loading software for transverse distribution of medium and small bridge load tests [J]. Journal of China & foreign highway, 2011, 31 (2): 158 - 161.)
 - [11] 江浩.变截面弯箱梁自动布载程序设计[D].福州:福州大学,2005.
(JIANG Hao. Automatic layout program for curved box girder with variable section [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.)
 - [12] 王凌波,贺拴海,蒋培文,等.大跨径桥梁荷载试验加载方案算法设计[J].武汉理工大学学报,2011,33(2):77-81.
(WANG Lingbo, HE Shuanghai, JIANG Peiwen, et al. A loading test algorithms design for big-span bridges [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2011 (2): 77 - 81.)
 - [13] 杨正斌.桥梁荷载试验车辆自动化布载算法研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
(YANG Zhengbin. Research on automated loading algorithm of vehicle for bridge load test [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.)
 - [14] 杨美云.桥梁荷载试验车辆自动化布载研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
(YANG Meiyun. Study on the vehicle automatic loading for bridge loading test [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.)
 - [15] 黄晓鹤.索吊桥梁荷载试验安全布载方式研究[D].南昌:华东交通大学,2015.
(HUANG Xiaohu. Researches on safety arrangement of bridges with cables or suspenders in loading test [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2015.)
 - [16] 赵军.索吊桥荷载试验车辆安全布载程序设计[D].南昌:华东交通大学,2017.
(ZHAO Jun. The design of vehicle safety test for load test of suspension bridge [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2017.)
 - [17] 王鹏.索吊桥荷载试验车辆安全布载程序优化[D].南昌:华东交通大学,2018.
(WANG Peng. Optimization on programming of vehicle safety layout of bridges with cables or suspenders [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.)
 - [18] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21-01—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Load test methods for highway bridge: JTG/T J21 - 01—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.)
 - [19] 鲁力.黄坪大桥加固技术及静载试验研究[D].绵阳:西南科技大学,2017.
(LU Li. Study on strengthening technology and static load test of Huang Ping Bridge [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.)
 - [20] 白午龙.中美印桥梁设计规范汽车荷载比较[J].城市道桥与防洪,2019(3):79-82.
(BAI Wulong. Comparison of motor vehicle loading in norms for bridge design in China, USA and India [J]. Urban roads bridges & flood control, 2019 (3): 79 - 82.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:刘永军)