

# 桥梁静载试验方案自动布载及程序实现

苟洁<sup>1</sup>, 朱浩<sup>2,3</sup>

(1. 武汉交通职业学院, 湖北 武汉 430065; 2. 中交第二航务工程局有限公司; 3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室)

**摘要:**为了解决桥梁静载试验中传统手工算法效率低且无法保证非控制截面内力是否超限等问题,该文基于 Matlab 程序开发平台,根据影响线基本原理,利用 Midas/Civil 桥梁模型导出的影响线,开发了一种可实现车辆自动化布载方案的计算程序。该程序能对车辆加载方案(包括车型、车间距和加载模式)进行自动搜索,并能生成相应加载方案的 Midas 静力荷载工况命令流,通过命令流与 Midas 软件可实现交互式校核,实现对控制截面和非控制截面的内力检算。以某双曲拱桥为例,开展了车辆自动化布载方案研究,结果表明:程序计算速度快,加载效率高,交互式功能可在一定程度上对相关截面进行承载能力验算,确保静载试验方案的安全性。

**关键词:**静载试验;桥梁工程;试验方案;影响线;Midas/Civil

## 1 引言

随着中国经济的高速发展,对交通运输事业的重点投入,中国逐渐成为世界桥梁大国之一。桥梁从过去的梁桥、拱桥,发展到现在的悬索桥、斜拉桥等,其形

式不再单一,结构变得独特,造型逐渐新颖。但随着技术的日益成熟,各种桥梁事故却频有发生。桥梁的建造过程或是使用过程中,其结构的整体性最为重要。桥梁竣工验收之前,桥梁静载试验是对其承载能力判定以及施工质量检验的重要途径。

桥梁静载试验因其重要性广受业内关注,但静载

表 1 锚梁、锚杆安装最大偏差统计

项目	锚梁安装		锚杆安装	
	规定值或 允许偏 差/mm	实测最大 误差绝对 值/mm	规定值或 允许偏 差/mm	实测最大 误差绝对 值/mm
x 轴	±10	8.6	±10	8.0
y 轴	±5	4.1	±5	3.5
z 轴	±5	3.9	±5	4.5

6 800 t,针对此庞大工程,提出了锚固系统分层安装施工工艺,研发了混凝土台阶+型钢混合型支架系统。工程实践证明:该施工工艺可以增强支架稳定性,降低安全风险,同时形成的混合型支架系统可以减小累积变形效应,有效避免重复调整,提高了锚固系统的安装精度及安装工效。支架总用钢量 510 t,占锚固系统总重量的 7.5%,减少了钢材的用量,节约了成本。该施工工艺适用于重量大、对支架稳定性及精度要求高的

大型锚固系统的安装施工。

## 参考文献:

- [1] 马碧波,马秀君,吕建伟. 秀山大桥锚体及锚固系统设计[J]. 桥梁建设,2017(2).
- [2] 许红胜,黄娟,杨红,等. 地锚式悬索桥锚固系统施工定位支架优化研究[J]. 公路,2016(11).
- [3] 肖仕周,王强,祝长春,等. 海外大型悬索桥型钢锚固系统安装定位技术[J]. 公路,2017(11).
- [4] 葛文璇,徐贵娥,陈静. 南京长江四桥北锚碇工程锚体及锚固系统施工技术[J]. 施工技术,2012(11).
- [5] 冯玉祥,薛光雄,杨敏. 马鞍山大桥悬索桥主缆锚固系统安装工艺研究[C]. 中国交通建设股份有限公司 2013 年现场技术交流会论文集,2013.
- [6] 贾立峰,王子相. 分布传力式主缆锚固系统设计关键技术[J]. 公路,2018(7).
- [7] 方鸿斌,田明,易继武. 矮寨大桥锚碇锚固系统测量定位[J]. 中外公路,2018(5).

收稿日期:2020-03-12

基金项目:湖北省交通科技项目(编号:B2018491)

作者简介:苟洁,女,硕士研究生. E-mail:20456150@qq.com

试验方案设计多止步于手工算法,此法成本高昂,耗时耗力,并且手工对控制截面进行验算时,难以确保所加荷载对非控制截面的影响,易造成其他截面超限,在给桥梁施加实际荷载时引发安全事故。随着计算机技术的成熟,若能预先在桥梁静载试验前进行车辆布载模拟,仿真桥梁各截面的性能状态及响应,势必是解决这一问题的最佳途径。

国内外桥梁静载试验自动化加载的研究较为少见,较多的研究侧重于桥梁性能评估及桥梁荷载试验数据处理及分析。S Ataei 基于统计学与神经网络原理,提出了一种处理桥梁荷载试验数据的双层线性反馈模型;GD Felice 以多跨砌体拱桥为研究对象,采用纤维梁单元对其承载能力进行了评估;于玲对桥梁静载试验中加载过大导致桥梁结构损伤的问题提出了一种基于灰色理论的加载控制方案,预测桥梁加载时的内力值;张彬通过桥梁荷载试验所得的相关数据,基于灰靶理论提出了评价桥梁承载能力的新方法;张宇峰针对桥梁静载试验中传统方法成本高昂、耗时耗力及对正常交通干扰大等缺陷,提出了一种基于影响线对比及模型校准的桥梁结构状态评定方法。

该文主要针对桥梁静载试验方案设计过程中存在的问题,基于结构力学中影响线的基本原理,结合 Midas/Civil 结构计算软件及 Matlab 程序开发平台,以最大加载效率为目标,开发出一种计算效率较高的静载试验方案——车辆自动化布载计算程序。

2 桥梁静载试验及程序设计

根据加载方式的不同,桥梁试验分为静载试验和动载试验,该文主要介绍桥梁静载试验的方法、步骤。桥梁静载试验是指对结构物或者构件分级缓慢施加设计或等效荷载,对结构物或构件在静载作用下的力学响应历程进行观测,然后对试验结果进行分析处理,以验证桥梁结构的设计计算理论,检验施工质量,依据相关规范判别结构的工作性能及使用状态。

2.1 静载试验方法

桥梁静载试验中,根据 JTG/T J21-01-2015《公路桥梁荷载试验规程》及 JTG/T J21-2011《公路桥梁承载能力检测评定规程》要求,以连续梁桥、连续刚构桥、两铰拱桥为例,其主要及附加加载工况见表 1。

静载试验是通过尽可能保证控制截面试验荷载所产生的最不利内力、应力或者应变值与设计时所计算得到的控制截面荷载产生的截面最不利内力、应力或

表 1 几种主要桥型的加载工况

桥梁结构形式	试验加载工况	
	主要工况	附加工况
连续梁桥	①主跨支点截面最大负弯矩;②主跨跨中最大正弯矩;③边跨最大正弯矩	①墩顶支点最大剪力;②墩台最大竖向反力
	①主跨跨中最大正弯矩;②主跨墩顶截面最大负弯矩;③边跨最大正弯矩及挠度	①墩顶截面最大剪力;②中跨桥墩最大竖向反力;③中跨 1/4 截面最大正弯矩和负弯矩;④连续刚构固结墩墩身控制截面的最大弯矩
两铰拱桥	①拱顶最大正弯矩;②拱脚最大水平推力	①1/4 截面最大正弯矩和负弯矩;②1/4 截面负挠度绝对值之和最大

者应变值之比尽可能接近。然而,在试验过程中,试验荷载所产生的效应难免与设计标准荷载作用下的效应有所偏差,所以只能通过静力荷载效率  $\eta_q$  来确定所加荷载的大小和位置,并有以下表达式:

$$\eta_q = \frac{S_s}{S(1+\mu)} \tag{1}$$

式中: $S_s$  为试验荷载作用下,控制截面或部位的内力或变形计算值; $S$  为设计标准活载作用下,控制截面或部位的内力或变形计算值; $\mu$  为按 JTG/T J21-01-2015《公路桥涵荷载试验规程》取用的冲击系数。 $\eta_q$  建议取值为  $0.95 \leq \eta_q \leq 1.05$ 。

为考察结构应力、变位随荷载或内力变化的关系,防止结构意外受损,各加载工况的荷载应分级逐渐施加到控制荷载,一般分为 3~4 级。分级加载应满足以下原则:逐渐增加加载车辆;先轻后重;加载车位于内力影响线的不同部位;加载车依次装载重物。正式加载前,需对结构进行必要的预加载,以达到检查试验装置仪器是否工作正常的目的,并使结构进入正常工作状态。

2.2 静载试验程序设计

桥梁静载试验方案设计主要受到技术条件和经济状况两方面的制约,技术层面主要体现在车辆的加载位置、车辆间距等因素;经济层面主要体现在加载车的总重、类型及数量等因素。从现场试验的情况来看,一方面,为节约成本一般尽可能地采用大吨位车辆以减少加载车辆数量;另一方面,为了便于操作,多采用相同车型(相同重量、相同车轴)的车辆进行加载。因此,根据上述控制条件,可以人为地减少静载试验方案设计时的影响因素。

该程序从加载车辆效率最大化的角度出发,桥梁控制截面的内力,优先采用多车并行的加载模式,此时能最大程度地发挥加载车辆的效率。其次,可采用不同类型车辆按照前后布载的方式进行加载。该程序适用于多车道桥梁、多种类型车辆(不同车轴数、不同重量)混合布置、单排或多排车辆同时加载的静载试验方案计算。以双向六车道的双幅桥梁为例,单向三车道布载时,优先采用3台重车并行模式(定义为加载模式1),其次采用2台重车并行和1台重车前后布载模式(定义为加载模式2),再者采用1台重车与1台轻车并行后再和一台重车前后布载模式(定义为加载模式3)。三车道桥梁的加载模式如图1所示,其他多车道的桥梁加载模式以此类推。

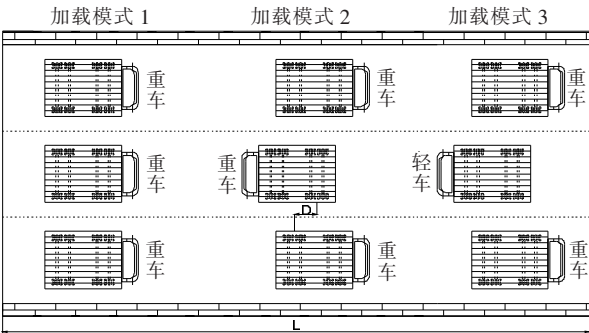


图1 三车道桥梁的加载模式

整个静载试验方案中,加载车型可以根据实际情况确定,加载车数在允许的情况下宜尽量减少,因此,加载模式1最重要的是确定加载车的车辆总重,可以根据控制截面中的最大控制内力,通过试算的方式确定车辆总重。桥梁其他控制截面的内力,可依据模式1确定的车型和总重,根据程序自动搜索加载车辆间距和加载车的位置。如图1所示,该程序的车辆间距 $D$ 定义为前后两辆车后轴之间的距离,预设的搜索范围 $D \in [-5\text{ m}, 5.0\text{ m}]$ ,可根据实际情况调整。车辆在桥上的加载位置 $X$ 以车列通过整个桥梁为搜索范围,并考虑车辆长度 $L_v$ 的影响,搜索位置 $X$ 的范围为 $[-L_v + L/2, L_v + L/2]$ ,其中 $L$ 为桥梁全长。

根据以上理论,基于 Matlab 程序开发平台,编制桥梁静载试验自动化布载计算程序,计算流程如图2所示。

3 实例分析

3.1 工程概况

320国道上某悬链线双曲拱桥跨径组合为5×

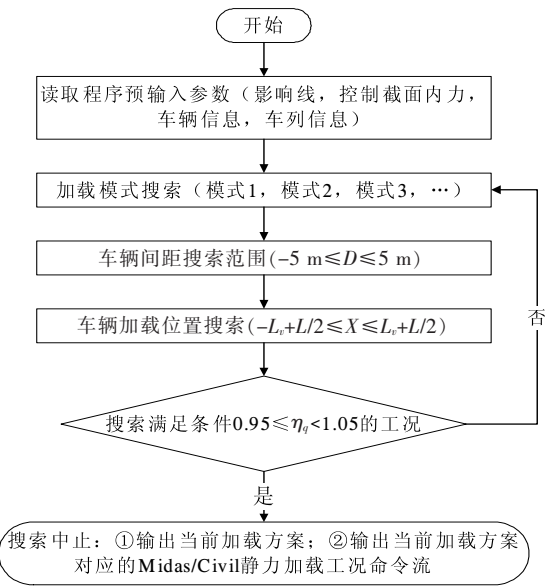


图2 静载试验自动化布载程序

20.0 m,桥梁全长125.0 m,沿横向布置10片拱肋,拱肋间距为1.35 m。该桥始建于1965年,原设计荷载为:汽车—15级,挂车—80。因近年来交通流量增大,为满足市区交通需要,对该桥进行加固维修,加固设计荷载为:城—A级。桥梁墩台均为片石混凝土重力式墩台。桥梁总体布置图和加固后的横向布置图分别如图3、4所示。

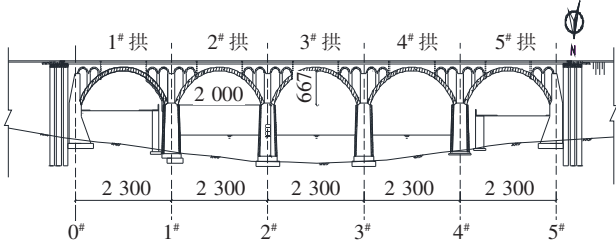


图3 桥梁总体布置图(单位:cm)

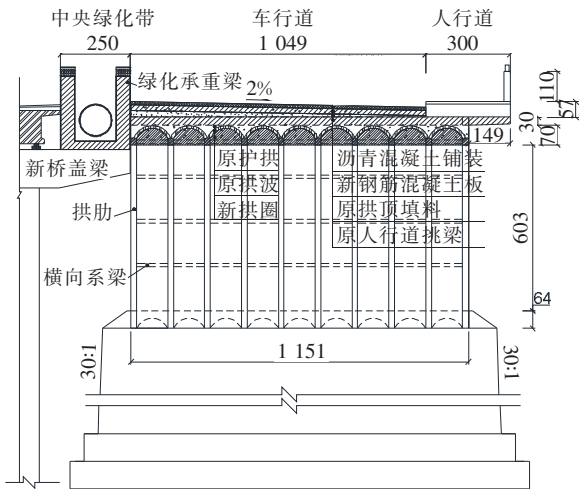


图4 加固后的横向布置图(单位:cm)

3.2 程序计算效率

该拱桥为 5 跨等跨度双曲拱桥,因结构具有对称性,根据 JTG/T J21-01-2015《公路桥梁荷载试验规程》,可取半幅桥梁的主要控制截面作为加载对象,针对 1<sup>#</sup>拱、2<sup>#</sup>拱和 3<sup>#</sup>拱,每一桥孔取拱脚最大负弯矩、拱顶最大正弯矩以及拱跨四分点的最大正/负弯矩为控制弯矩,合计共 12 个加载工况,静力加载工况如表 2 所示。

通过程序计算得到各工况下车辆布载方案、计算结果及计算时间如表 3 所示。

由表 3 可知:该程序能快速有效地计算出最优的加载位置及相关参数。根据该程序求得的相关参数信息,以工况 1、工况 4 和工况 12 为例,绘制的影响线及车辆布载方案如图 5 所示。

表 2 桥梁加载工况

位置	工况
1 <sup>#</sup> 拱	工况 1:1 <sup>#</sup> 拱脚
	工况 2:1 <sup>#</sup> 1/4 拱
	工况 3:1 <sup>#</sup> 1/4 拱(最大负弯矩)
	工况 4:1 <sup>#</sup> 拱顶
2 <sup>#</sup> 拱	工况 5:2 <sup>#</sup> 拱脚
	工况 6:2 <sup>#</sup> 3/4 拱
	工况 7:2 <sup>#</sup> 3/4 拱(最大负弯矩)
	工况 8:2 <sup>#</sup> 拱顶
3 <sup>#</sup> 拱	工况 9:3 <sup>#</sup> 拱脚
	工况 10:3 <sup>#</sup> 1/4 拱
	工况 11:3 <sup>#</sup> 1/4 拱(最大负弯矩)
	工况 12:3 <sup>#</sup> 拱顶

表 3 加载工况计算结果

工况	理论弯矩值/ (kN·m)	试验弯矩值/ (kN·m)	效率 系数	车辆位 置/m	车辆间 距/m	加载 模式	运行时 间/s
1	-909.3	-897.1	0.98	-45.30	2.2	模式 2	22
2	864.8	853.8	0.98	-44.50	0.1	模式 2	39
3	-465.5	-461.5	0.99	-35.90	1.0	模式 2	32
4	842.7	828.8	0.98	-40.90	0	模式 1	1
5	-815.9	-804.5	0.98	-26.00	0	模式 1	1
6	847.7	844.1	0.99	-11.30	0.7	模式 2	33
7	-446.6	-439.9	0.98	-20.50	2.3	模式 2	19
8	895.2	885.6	0.99	-16.50	0.6	模式 2	36
9	-792.9	-792.4	1.00	-3.00	4.0	模式 2	2
10	850.3	840.4	0.99	0.30	-0.4	模式 2	46
11	-448.3	-444.6	0.99	10.00	1.1	模式 2	30
12	917.8	901.2	0.98	6.00	0.0	模式 2	41

为对比自动化布载计算程序的正确性,将该计算程序在各工况下计算所得的车辆加载方案输入到 Midas/Civil 中,在已加载车辆类型和车辆间距的情况下,运用 Midas 移动荷载功能寻找对控制截面最不利的加载位置。以工况 1 为例,计算结果如图 6 所示。由图 6 可知:自动化布载计算程序运算所得的车辆布载位置与 Midas 计算所得的布载位置吻合良好,表明程序能自动地搜索到正确的加载位置。为了验证计算程序的效率,分别采用该计算程序与 Midas 对加载工况进行计算,自动化布载计算程序在各工况下的运行时间及累计时间与 Midas 计算时间对比情况如图 7 所示。由图 7 可知:运用 Midas 软件移动荷载功能进行

静载工况加载方案的计算,即使预先确定了加载车辆类型及车辆间距等参数已大大减轻试算工作量的情况下,所需时间仍远超过自动化布载计算程序所需的时间,这主要是源于该程序基于影响线的基本原理,不需要进行有限元计算,大大节约了计算工作量,而 Midas 的计算效率基于有限元计算,随着结构计算规模的增大而逐渐增大。

4 结语

桥梁静载试验方案设计中应尽可能地提高加载车的加载效率,不仅要确保加载控制截面的效率系数,还



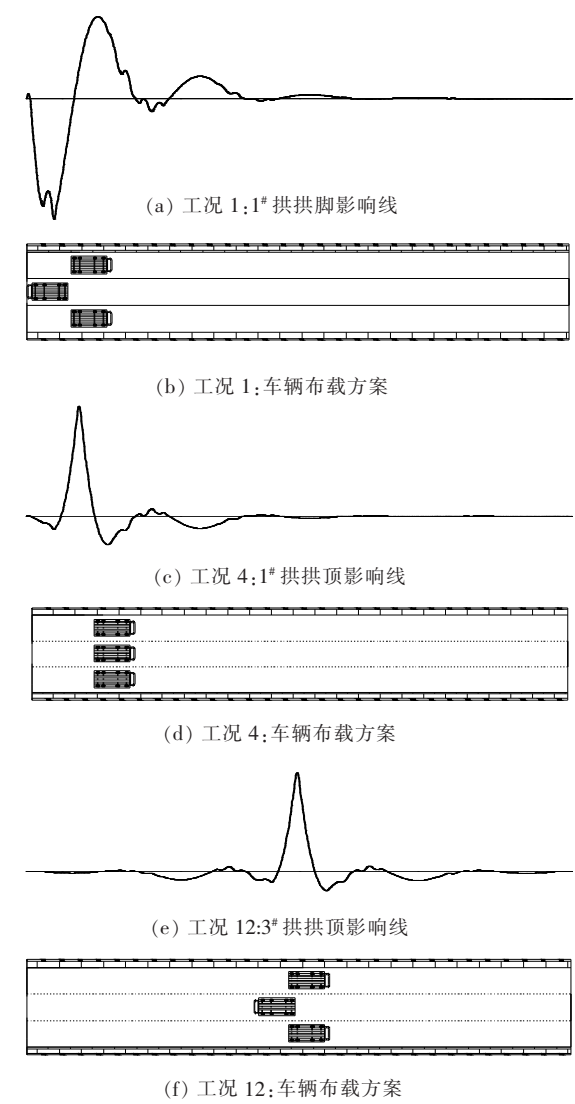


图5 几种工况的影响线及车辆布载方案

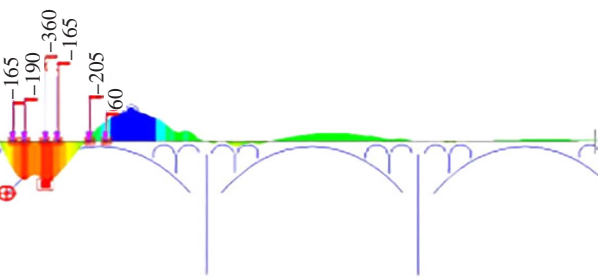


图6 Midas 计算出的荷载布置图(单位:kN)

要确保非控制截面不会超限。该文阐述了桥梁静载试验加载的基本原理,从加载车辆效率最大化的角度出发,编写了桥梁静载试验自动化布载计算程序,进行了加载方案优化。该程序的优势在于可根据桥梁现场环

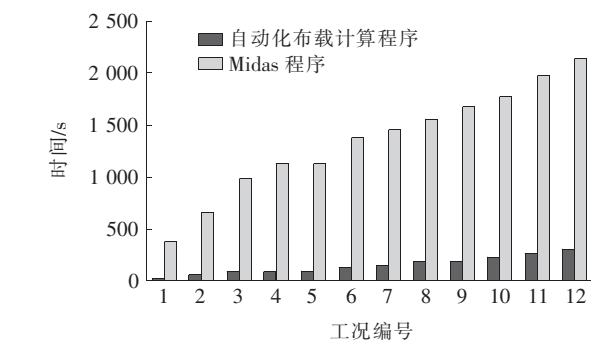


图7 各工况累计运行时间对比图

境条件修正车型、车辆数等相关参数,具有较高的灵活性和实用性,可达到节约经济成本的目的。此外,由于利用影响线的基本原理进行计算,计算效率高,且能从一定程度上保证非控制截面不会超限,确保了试验过程的安全性。

参考文献:

[1] S Ataei, AA Aghakouchak, MS Marefat, et al. Sensor Fusion of a Railway Bridge Load Test Using Neural Networks[J]. Expert Systems with Applications, 2005, 29 (3):678—683.

[2] GD Felice. Assessment of the Load—Carrying Capacity of Multi—Span Masonry Arch Bridges Using Fibre Beam Elements[J]. Engineering Structures, 2009, 31(8):1 634—1 647.

[3] 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, 2016(6).

[4] H. René S, U. Becker, H. Manz. Grey Systems Theory Time Series Prediction Applied to Road Traffic Safety in Germany[J]. IFAC—Papers Online, 2016, 49 (3): 231—236.

[5] 张忠强,崔兵,栗硕. 灰色理论模型在桥梁领域的应用研究[J]. 山西建筑学报, 2016(9).

[6] 张彬,滕飞. 现役桥梁承载能力的灰靶理论评价[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2015(4).

[7] 徐林明,李美娟,戴前智. 基于灰靶理论的动态评价方法[J]. 系统科学与数学学报, 2017(1).

[8] 张宇峰,段鸿杰,马志国. 基于准静态荷载试验的梁式桥梁状态快速评定[J]. 现代交通技术, 2009(5).

[9] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 4 版. 北京:人民交通出版社, 2016.

[10] JTG/T J21—01—2015 公路桥梁荷载试验规程[S].