

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.006

# 广陈塘大桥挂篮施工及结构分析

范文质<sup>1</sup>, 修占国<sup>2</sup>, 刘振华<sup>1</sup>, 袁义臣<sup>1</sup>, 梁平<sup>1</sup>

(1. 中建五局华东建设有限公司, 浙江 平湖 312400;

2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 广陈塘大桥采用(40+70+40) m的预应力连续箱梁结构体系, 该桥上部桥梁结构采用挂篮双悬臂现浇法施工技术。为了保证桥梁施工的安全及稳定性, 结合该连续箱梁截面宽、节段重的基本特点, 采用菱形挂篮施工技术。依据工程实际, 分析了菱形挂篮各个组成系统的施工技术要点及受力机理。基于MIDAS有限元分析软件建立挂篮有限元模型, 分析了最不利工况下挂篮各构件的受力和变形情况, 并进行了挂篮整体抗倾覆验算, 计算结果均满足规范要求, 为以后类似施工提供了借鉴。

**关键词:** 桥梁工程; 箱形梁; 挂篮; 设计; 有限元法

中图分类号: TU445.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)04-0026-05

## Construction and Structural Analysis of Form Traveler in Guangchentang Bridge

FAN Wenzhi<sup>1</sup>, XIU Zhanguo<sup>2</sup>, LIU Zhenhua<sup>1</sup>, YUAN Yichen<sup>1</sup>, LIANG Ping<sup>1</sup>

(1. Huadong Building Co., Ltd. of China Construction Fifth Engineering Bureau, Pinghu, Zhejiang 312400, China;

2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

**Abstract:** Guangchentang bridge is a prestressed continuous and variable cross-section box-girder structural systems with the span (40+70+40) m. The superstructure of this bridge was constructed by the form travelers by the two-cantilever casting method. Considering that the box girder of the bridge was wide and a segment of the girder was heavy, the form travelers to be used for the cantilever construction and the form traveler was designed as the diamond-shape. And this form travelers weighing about 50 t, which was made up of the main truss, walking and anchoring system, sling system, bottom form platform and its formwork support system. In the design of the form traveler, the composition and the working mechanism of each part were analyzed, the software MIDAS was used to develop the finite element model for the traveler, the forces and deformation of the components under the worst load case were analyzed and the overturning resistance of the traveler was calculated. The results of the analysis and calculation proved that all components of the traveler could satisfy the relevant requirement in the codes which could provide reference for future similar construction.

**Keywords:** bridge engineering; box girder; form traveler; design; finite element method

## 1 工程概述

广陈塘大桥, 河面宽度 50 m 左右, 水流平稳无暗流, 河底相对平坦。大桥引桥采用 25 m 预应力混凝土 T 梁, 主桥采用(40+70+40) m 变截面现浇预应力连续箱梁。其主桥截面为单箱单室直腹板结构形式。主桥预应力连续箱梁顶面宽 10.00 m, 翼缘板宽 2.0 m, 跨中梁高 2.6 m, 腹板厚 65 cm~50 cm,

底板厚度为 80 cm(根部)~32 cm(跨中), 悬浇段顶板厚度为 28 cm。

广陈塘大桥桥面公路荷载等级为一级, 桥面净宽 2×12.5 m, 总宽 27.5 m。全桥共 5 联, 总长共计 450 m。为了加快施工速度, 主桥按 7#、8# 墩号对称悬臂现浇施工。除了 0# 梁段在桥墩顶旁搭支架、边跨现浇段搭设满堂支架外, 其余梁段均采用对称挂篮悬浇施工。全桥变截面连续箱梁段 C50 混凝土,

收稿日期: 2018-03-11

修稿日期: 2018-04-09

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目(SKLG2014K011); 中国建筑第五工程局有限公司(030017D119)

作者简介: 范文质(1974—), 男, 湖南益阳人, 主要从事公路工程方面的工作。E-mail: 763770331@qq.com

通信作者: 修占国(1991—), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: xiuzhanguo109@126.com

数量约 3 426 m<sup>3</sup>,其中悬浇最重梁段 1# 块重 123.5 t。大桥的合拢步骤采用:先边跨后中跨的施工顺序<sup>[1-3]</sup>。

鉴于该主桥的连续箱梁施工采用对称双悬臂现浇模式,经专家讨论,宜采用菱形挂篮施工。该施工方法不仅能够保证施工过程中的质量与安全问题,而且菱形挂篮的主要受力构件均为二力杆,构件受力与传力方式简单明确。二力杆的受力模式不仅能够充分发挥材料本身性质的优势,而且其结构分布十分明确,组装、锚固及拆除施工方便,结构布置形式更加简明轻巧<sup>[4-5]</sup>。

## 2 挂篮结构组成

该菱形挂篮结构形式主要由主桁架系统(双榀菱形钢桁架)、行走及锚固系统、吊带系统、模板支撑系统、模板系统五大部分组成<sup>[6-7]</sup>。挂篮的各个子系统相互协作、依靠、制约,从而保证正常施工。该挂篮系统适用于最大梁段重 20 t;梁段长 4 m;梁高 7 m;梁宽 13.5 m;走行方式为倒链牵引;挂篮自重为 50 t;倾覆稳定系数空载时为 8.60,灌注时为 2.89。挂篮结构示意图如图 1 所示。

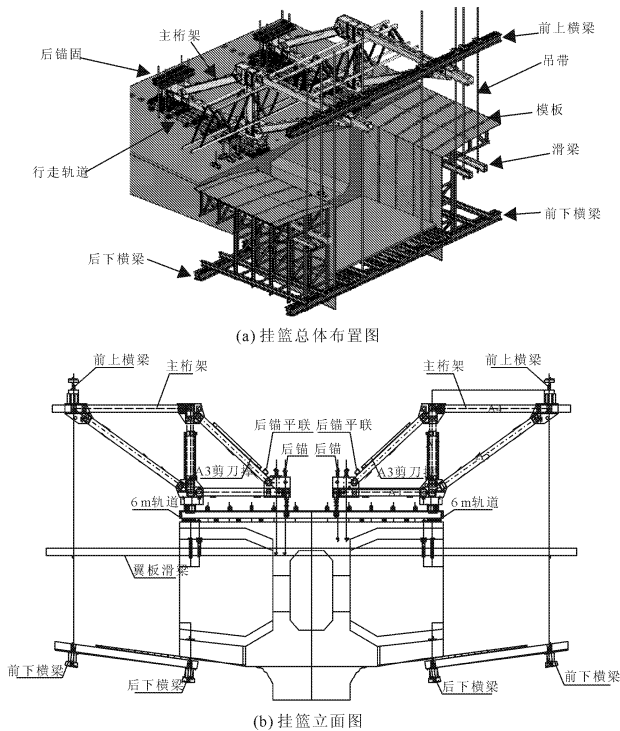


图 1 挂篮结构布置图

### 2.1 主桁架系统

广陈塘大桥的主桥采用单箱单室的连续箱梁结构形式,用于施工的每副挂篮的主桁系统为两榀结

构模式。主桁架由两片菱形的桁片组成。为了提高主桁架系统的稳定性和刚度,防止桁架倾覆。在前、后横梁上设置了两层联结杆件。

主桁架为 Q235B 槽钢双拼结构焊接而成,每一榀菱形主桁架由 9 个单元构件组成,包括 4 个连接件与 5 个连接杆。其主桁架系统的结构组成如图 2 所示。

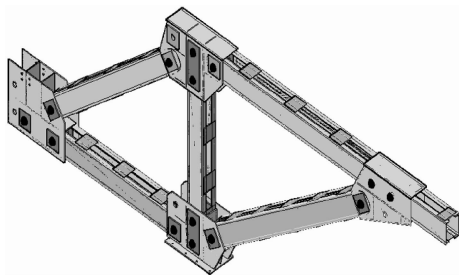


图 2 菱形主桁构造

### 2.2 行走及锚固系统

菱形挂篮系统在悬浇完一段箱梁,通过质量验收,简单清理检查后,方可开始前移<sup>[8]</sup>。通过设置在连续箱梁前端的限位器来保证挂篮系统的行走安全及位移限制。前移牵引工具为 10 t 手拉葫芦,在前移过程中,必须保证两榀主桁架具有时间、位移、速度上的同步,所有的手拉葫芦必须保证同步进行,防止挂篮系统再移动过程中产生受力不均匀,导致构件产生应力集中而破坏。

挂篮的锚固系统是安全施工的重要保证工程,主要由斜拉索、锚箱、后锚杆等锚固形式组成<sup>[9]</sup>。斜拉索锚固于横梁底面的锚箱内,锚箱则焊接于横梁上,并设置加劲板进行稳定处理。为了便于锚固系统的操作,在横梁前端底板位置处开人洞并设置吊笼。充分利用已完成梁端的底板、翼缘板和预埋孔,将后锚点设置在已完成梁段的顶板或底板上。在设置锚固系统时要保证锚件与被锚件的受力均匀,防止锚固失效。图 3 为后锚压梁及轨道锚固示意图。

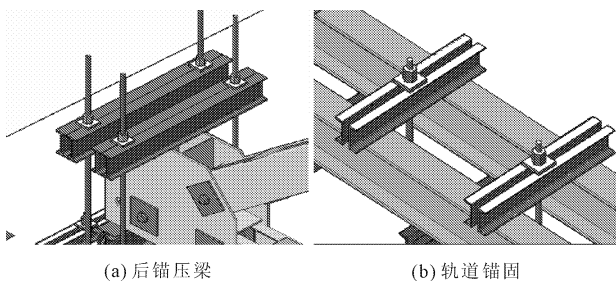


图 3 挂篮锚固示意图

### 2.3 吊带系统

吊带系统是保证模板和浇筑施工的前提手段,

需保证在最不利工况下能够安全运行。吊带系统主要与主桁架、已完成梁段、滑梁等构件相连接,如图 1(a)所示。吊杆构件采用长度不一的  $\Phi 32$  mm 精轧螺纹钢组成。吊带系统的上端主要与前上横梁及已完成箱梁的顶面翼缘板以及底板上。下端则与底板平台、侧模和内模的支撑滑梁连接,吊带系统需控制整体倾斜度,保证施工质量。

## 2.4 模板支撑系统

模板支撑系统主要为模板架设及混凝土浇筑系统服务,主要由挂篮底部的下横梁构件、底模板支撑的纵向分配梁及侧模板支撑架等组成<sup>[10]</sup>;横梁包括前、后下横梁各一根,前下横梁与主桁架的前上横梁上通过吊杆相连接,后下横梁则通过吊杆与已完成段箱梁的底板相连;纵向分配梁支撑于前、后下横梁上,底模板平台下的纵向分配梁采用加密处理。侧模模板支撑搭设于前、后下横梁与纵向分配梁上,如图 1(a)所示。纵向分配梁采用 I28 工字钢、16 mm 厚钢板焊接而成。纵向分配梁单节长度为 4.26 m。待连续箱梁施工结束后,底平台系统与挂篮整体同步向前移动,保证移动过程中的稳定性。其整体如图 4 所示。

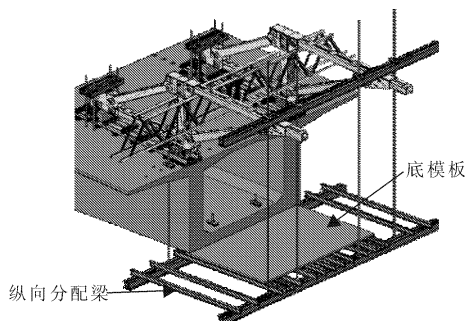


图 4 底平台系统示意图

## 2.5 模板系统

模板系统的稳定、可靠性是保证正常混凝土浇筑的前提条件,需保证模板连接可靠、易脱模、不漏浆等基本技术要求<sup>[11]</sup>。模板系统主要由外模和内模组成。

外模采用钢模,钢模板具有循环利用及抵抗变形能力大的优势。外模板与内模采用螺杆连接,外加支撑固定,保证内外模板协调工作,极大提高稳定性。面板由 6 mm 钢板加型钢带组成,外模单节长 4.8 m。模板骨架由槽钢焊接而成,与面板焊接牢固。

侧模支撑于外滑梁上,外滑梁每侧两根,共四根,由双[32 槽钢和双[25 槽钢与 10 mm 厚钢板焊接

而成,外滑梁前端通过吊杆与前上横梁连接,后端与完成段箱梁的翼缘板混凝土连接。

内模由面板、内模桁片、连接件等构件组成。面板采用 1.5 cm 竹胶板,下铺 10 cm × 10 cm 木方,支撑于桁架片上,桁架片支撑在内滑梁上。内模侧模采用竹胶板后背木方加钢管用对拉杆与外模拉紧固定,以此保证内模板的稳定性。

## 3 挂篮设计计算

### 3.1 挂篮主要设计参数

设计荷载及组合:

- (1) 梁段混凝土重量:  $2.65 \text{ t/m}^3$ 。
- (2) 人群及机具荷载取  $2.5 \text{ kN/m}^2$ 。
- (3) 超载系数取 1.05。
- (4) 新浇混凝土动力系数取 1.2。
- (5) 挂篮行走时的冲击系数取 1.3。
- (6) 抗倾覆稳定系数 2.0。
- (7) 荷载组合<sup>[12-13]</sup>:

① 强度计算:混凝土自重 + 挂篮自重 + 施工、人、机自重 + 动力附加系数。

② 刚度计算:混凝土自重 + 挂篮自重 + 施工、人、机自重。

③ 行走稳定性验算:挂篮自重 + 冲击附加系数。

### 3.2 各杆件计算分析

基于 MIDAS/Civil 建立该施工挂篮系统的有限元计算模型(如图 5 所示),对挂篮的各杆件进行计算分析。挂篮系统的各个构件的结构承载力验算采用容许应力法<sup>[14]</sup>。该菱形挂篮构件的材质均为 Q235B,其容许正应力为  $[\sigma] = 145 \text{ MPa}$ <sup>[15]</sup>。

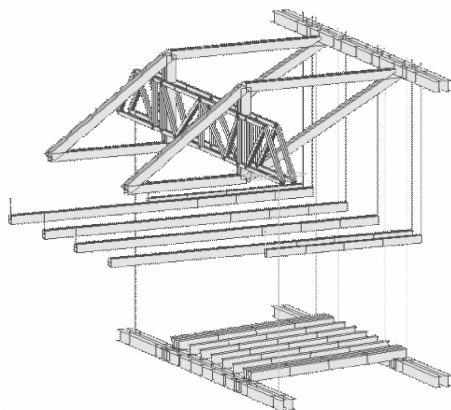


图 5 挂篮有限元模型

为了减少计算过程,优化挂篮的结构验算,只需考虑该施工过程中最不利施工工况下挂篮各杆件的

内力即可满足所有工况条件。选取各个工况下最重节段的混凝土浇筑施工工况,计算该挂篮系统中各杆件的应力和变形值。其计算结果如表 1 所示。

表 1 各个构件的应力及位移计算结果

构件名称	规格	最大应力 /MPa	最大挠度 /mm	工况
底纵梁	H350Q235	89.9	5.6	1#块施工
腹纵梁	H350Q235	115.9	7.2	1#块施工
外滑梁	2[32a Q235	124.8	4.7	8#块施工
外导梁	2[28a Q235	71.1	5.2	8#块施工
前上横梁	2H400Q235	78.4	9.2	8#块施工
前下横梁	2H400Q235	36.6	9.4	1#块施工
后下横梁	2H400Q235	42.8	10.7	1#块施工
主桁 A5 压杆	2[32a Q235	76.3	—	1#块施工
主桁 A3 拉杆	2[32a Q235	83.8	—	1#块施工

由表 1 计算结果知,挂篮最大应力为 124.8

MPa,对应的施工工况为 8# 块施工,最大应力构件位置为外滑梁上。挂篮最大挠度值为 10.7 mm,对应的施工工况为 1# 块施工,最大挠度构件为后下横梁上。通过对各阶段浇筑最不利工况的计算,挂篮的各个构件的应力计算结果均小于许用应力,且最大竖向位移均小于 20 mm。所以,各构件的应力及变形均满足规范要求,施工过程中能够满足强度、刚度、稳定性的基本要求。

### 3.3 吊杆计算分析

依据该菱形挂篮吊带系统的设计,整个挂篮的吊带系统共分为 20 根长短不一的吊杆,对称分布。其中,底篮吊杆共计 8 根,滑梁吊杆共计 12 根。所有吊杆均采用 Q235B 材质的  $\Phi 32$  mm 精轧螺纹钢,其抗力为 500 kN。依据不同工况条件下的有限元模拟计算,确定最不利工况条件下吊杆受力情况。其计算结果如图 6 所示。

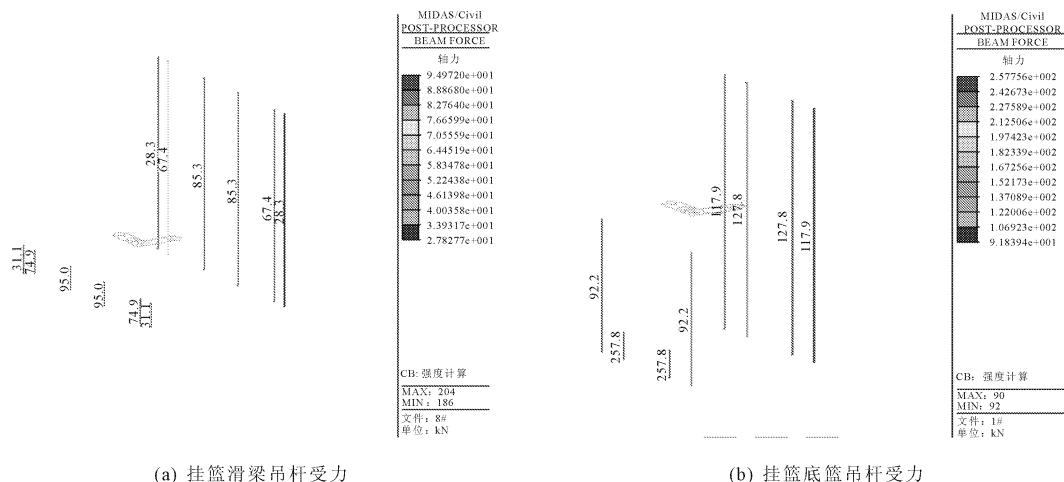


图 6 吊杆的计算结果

由最不利工况下吊带的最终计算结果可知,吊杆整体受力呈对称分布,该分布状态可保证底平台系统防止倾斜变形。滑梁吊杆在 8# 块施工条件下表现为最不利受力状态,最大受力吊杆为后下横梁与已浇筑箱梁连接的吊杆,最大受力为 95 kN。底篮吊杆在 1# 块施工条件下表现为最不利受力状态,最大受力吊杆与挂篮滑梁吊杆一致,最大受力为 257.8 kN < 500 kN,满足设计要求。

### 3.4 挂篮主桁架抗倾覆验算

挂篮主桁架后锚系统采用 4 根材质为 Q235B 的  $\Phi 32$  mm 精轧螺纹钢,如图 3(a)所示。锚固安全系数取 2.0。其主桁架的后锚抗倾覆计算示意图如图 7 所示。

后锚点在浇筑 8# 块 4 m 节段混凝土时,后锚点的锚力达到最大值,最大为 569 kN。由模拟计算可

知,倾覆力为 437.4 kN,倾覆弯矩  $M = P \times L = 437.4 \times 5.3 = 2318.22$  kN·m,后锚点共设置 4 根  $\Phi 32$  mm 精轧螺纹钢,则后锚点的抗力共计为  $P_1 = 4 \times 500 = 2000$  kN。抗倾覆弯矩  $M_1 = P_1 \times L_1 = 2000 \times 4.05 = 8100$  kN·m。抗倾覆系数为  $K = M_1/M = 3.49 > 2$ ,满足规范要求。

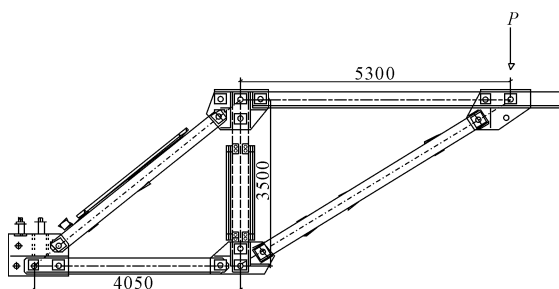


图 7 后锚抗倾覆计算示意图

## 4 挂篮测试

挂篮的理论计算可作为挂篮设计的重要依据,但往往与实践应用存在一定的误差。然而,挂篮的现场预压测试,不仅能够验证挂篮设计及模拟计算的合理性,而且能提前消除挂篮的主桁架系统、吊带及底篮系统的非弹性变形。挂篮现场测试主要包括挠度变形和应力测试。挂篮测试过程中,施加荷载的安全系数取 1.2<sup>[16]</sup>。

由现场测试结果表明,整个挂篮系统在最大设计荷载作用下,挂篮的各个杆件的挠度及变形均满足规范设计要求。挂篮主桁结构的实际受力均小于理论计算值,原因在于理论计算过程中,处于安全设计的理念,考虑了较大的安全系数,导致具有较大的安全储备。

## 5 结 语

论文基于广陈塘大桥施工过程中采用菱形挂篮双悬臂浇筑,通过对挂篮系统的各个部分的施工分析,通过有限元模型计算及抗倾覆验算,对施工过程中存在的最不利工况下挂篮的受力情况进行受力分析,计算结果满足施工及规范的要求。

该挂篮结构已在广陈塘大桥的施工中成功应用,说明选用菱形挂篮施工在广陈塘大桥预应力混凝土箱型连续梁的方案是合理可行的。该挂篮具有较高的行走效率,结构安全可靠的优点。为以后类似施工提供了借鉴。

### 参考文献:

[1] 白晓红.挂篮吊架施工连续刚构边跨现浇段及合龙段

的研究[J].四川建筑科学研究,2013,39(2):390-393.

- [2] 王 义.某连续梁桥悬臂施工过程的仿真分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(4):106-109.
- [3] 袁伟明,于伟强,何 斌.合拢方案对大跨径预应力连续箱梁的影响分析[J].中外建筑,2018(4):155-157.
- [4] 苏 鹏.连续刚构桥梁高墩悬臂施工监控与稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):216-220.
- [5] 赖引明,柴 伟,冯志杰.复合式牵索挂篮行走系统技术研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(3):241-244.
- [6] 刘铁军.浅谈桥梁的挂篮施工技术构建[J].施工技术,2017,46(S2):888-889.
- [7] 赵金祥.嘉绍跨海大桥北副航道桥挂篮设计[J].桥梁建设,2013,43(2):116-120.
- [8] 孙新海,赵东升,刘红芳.悬臂现浇箱梁挂篮设计与反力预压技术研究[J].公路,2016,61(5):90-93.
- [9] 郑 锐.论述桥梁连续梁挂篮施工技术难点[J].施工技术,2015,44(S2):249-250.
- [10] 施 展.分析预应力混凝土连续梁桥挂篮施工技术[J].佳木斯职业学院学报,2018(3):498.
- [11] 丁文宏.基于工程实例的桥梁挂篮施工技术[J].建筑技术开发,2018,45(6):58-59.
- [12] 严任苗.合肥市派河大桥挂篮悬浇施工稳定性探析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2009,32(5):734-737.
- [13] 陈文灿.澜石大桥三角挂篮设计及施工要点[J].四川建筑科学研究,2006,32(1):153-156.
- [14] 黄坤全,彭旭民.空腹式连续刚构桥施工过程受力特性分析[J].桥梁建设,2011(3):40-43.
- [15] 张洪斌,雷 贇,马 敏,等.三榀菱形挂篮在宽幅箱梁悬浇过程中力学特性研究[J].施工技术,2017,46(17):37-40.
- [16] 谭 潇,熊咸玉.菱形挂篮验算简化分析对比研究[J].施工技术,2016,45(S2):291-294.

(上接第 10 页)

- [10] 纪忠华,胡勐乾,王 璐,等.基于 MIKE21 模型的滨海核电站厂址防洪评价研究[J].水利水电技术,2016,47(1):132-137.
- [11] 韩 帅,马 军,王淑云.MIKE 21 在莽山水库坝下河道数模中的应用[J].水利与建筑工程学报,2014,12(3):147-150,177.
- [12] 李 彬.桥梁对河流阻水影响的一个综合判别指标[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(2):68-71.
- [13] 曾琼佩,王义刚,黄惠明,等.感潮河段桥梁壅水计算方法比较及敏感性分析[J].长江科学院院报,2015,32(7):58-63.
- [14] 金 玲,许士国,于德全.中小河流洪水风险分析中的

洪水演进计算研究[J].水电能源科学,2014,32(10):48-51,176.

- [15] 任梅芳,徐宗学,苏广新.基于二维水动力模型与经验公式的桥梁壅水计算及其对比分析[J].水力发电学报,2017,36(5):78-87.
- [16] 王 珍,赵吉国.大魁河大桥斜交桥墩附近水流特性研究[J].广东水利水电,2013(11):17-20.
- [17] 常 狄,陈 雪.基于 MIKE21 二维数值模拟的不同桥墩概化方式下河道壅水计算结果对比分析[J].水利科技与经济,2017,23(2):29-32.
- [18] 张大茹,王向东,朱毕生.山区河道跨河工程的防洪影响研究[J].泥沙研究,2015(2):17-23.