



# 常山江阁底枢纽通航水流条件及 方案优化试验研究

韩康, 余凯文, 赵建钧, 韩昌海

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要:** 常山江阁底枢纽处于“S”形弯曲河段中部, 上游引航道处于河道凹岸主槽, 下游引航道处于河道下弯道凸岸, 引航道口门区及连接段水流条件复杂, 流速指标难以满足通航安全要求。针对坝址河段的特点和枢纽设计通航要求, 依托1:80正态枢纽整体水力学模型, 研究上下游引航道口门区及连接段的通航水流特性, 并提出优化布置方案。结果表明, 合理疏浚河道并适当调整引航道航线布置, 可改善引航道口门区及连接段的水流条件, 使口门区流速指标满足通航要求, 实现船舶安全通航和枢纽正常运行。

**关键词:** 阁底枢纽; 弯曲河段; 引航道; 口门区; 通航水流条件

**中图分类号:** U 61

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)08-0139-06

## Experimental study on navigation flow condition and scheme optimization of Gedi junction in Changshan River

HAN Kang, YU Kai-wen, ZHAO Jian-jun, HAN Chang-hai

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and  
Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The Gedi junction in the Changshan River is located in the middle of the “S”-shaped curved river section. The upstream approach channel is on the concave bank of the river channel, the downstream approach channel is on the convex of the bank, and the flow condition of the approach entrance area and the connecting section is complex, so the velocity index cannot satisfy the requirements of safe navigation. Based on the physical model with a scale of 1: 80, we study the navigable flow characteristics of the approaching entrance area and the connecting section of the upstream and downstream approach channel and propose the optimized layout scheme. The results show that reasonably dredging the convex bank along the channel and properly regulating the route layout of the approach channel can improve the navigable flow conditions of the approach entrance area and the connecting section, so that the velocity indexes of the approach entrance area can meet the demand of codes concerning the navigable flow, which achieves safe navigation of ships and normal operation of the hydro-junction.

**Keywords:** Gedi junction; curved river; approach channel; approaching entrance area; navigation condition

在山区弯曲河道上, 航电枢纽工程往往具有“弯道多、滩多、直线段短”等共同特征, 使得引航道口门区及连接段的通航水流条件极为复杂和特殊, 难以满足船舶进出引航道口门区的要求<sup>[1-2]</sup>。基于山区河流的特点, 半开敞式、开敞式

引航道被广泛应用<sup>[3]</sup>, 同时通过导流墩、导航墙透孔、丁潜坝等工程措施改善引航道口门区的不利水流流态<sup>[4-8]</sup>。但由于问题的复杂性和特殊性, 许多航电枢纽通航问题仍然需要专门采取物理模型试验方法研究解决, 并不断地总结经验。常山

收稿日期: 2020-11-16

作者简介: 韩康(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事水利工程、水力学及河流动力学研究。

江为山溪性河流，水面比降大，水浅、滩多，河道弯道多、直线段短。阁底枢纽为常山江干流航运梯级开发工程，处于“S”形弯曲河道上，上游引航道处于凹岸主槽，采用半开敞式引航道，由于近坝区河道束窄和弯道水流的影响，引航道和口门区易形成斜向水流和回流区，给通航造成不利影响。下游引航道口门区处于下弯道凸岸，水流主流流向与引航道夹角较大，口门区水流条件复杂，影响通航安全。为此，通过通航枢纽整体物理模型试验，研究论证枢纽通航水流条件，提出引航道布置方案，使枢纽水流条件满足通航要求。

1 工程概况

常山江为钱塘江南源上游干流，自辉埠—双港口河段，全长约 51.1 km，共分为六级开发。各

梯级都以航运为主，兼顾发电和改善水环境等综合性利用；航道按Ⅳ级标准疏浚，为实现常山江 500 吨级船舶通航功能创造条件。阁底枢纽为常山江航运开发工程的第 3 个梯级。水库正常蓄水位为 78.50 m，库容 651 万 m<sup>3</sup>。枢纽处于“S”形弯曲河段中部位置，工程自左向右依次布置电站、泄洪闸和船闸，其中电站装机 2 台，装机容量 4.5 MW；泄洪闸共 20 孔，底板高程 72.50 m，泄流总净宽为 244 m，分左、右 2 个区，由纵向导墙分开。船闸位于枢纽右侧，设计运行水头 6.0 m，船闸闸室有效尺寸为 180.0 m×23.0 m×4.0 m(长×宽×门槛水深)，船闸设计通航 500 吨级船舶。上游引航道位于坝上水库中，采用开敞式直线布置；下引航道口门区处于下弯道凸岸，因受河道地形限制，下游靠船段与下游导航段之间用弯曲段连接。阁底枢纽总体布置见图 1。

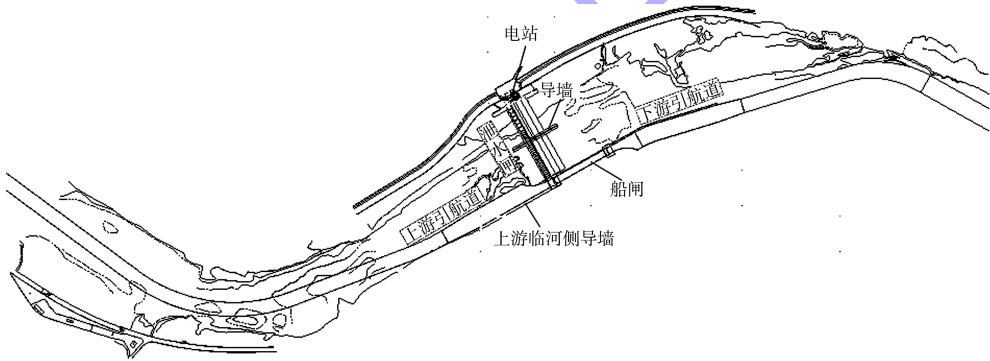


图 1 阁底枢纽总体布置

依据船闸总体设计规范，Ⅳ级航道船闸上下游引航道口门区最大流速限值满足：1) 口门区平行航线的纵向流速≤2.00 m/s，垂直航线的横向流速≤0.30 m/s，回流流速≤0.40 m/s；2) 引航道导航和调顺段内宜为静水区；3) 制动段和停泊段水面纵向流速≤0.5 m/s，横向流速≤0.15 m/s。

2 模型设计

模型几何比尺为 1:80，满足重力相似准则，模拟枢纽上游河道、枢纽建筑物及上下游引航道及连接段。模型上游边界布置于上弯道上游 500 m(距坝线约 1.9 km)，下游边界布置于杨家埠大桥

下游(约坝下 1.7 km)，全长约 3.6 km 河段。流量采用标准矩形量水堰测控，误差范围≤1%。水位采用高精度无线数传自动跟踪水位计及测针测量，精度 0.02 mm。流速采用 DPJ 旋浆流速仪测量，起动流速 1 cm/s，精度 0.01 cm/s。

3 上游引航道通航试验

3.1 原设计方案通航水流条件

上游引航道处于凹岸主槽，航线与河道主流连接顺畅。上游引航道采用开敞式布置，即上游临河侧不设导航隔水墙，可提高通航效率。上游引航道总长 320.0 m，其中靠船段长 220.0 m、导航段长 100.0 m，上游引航道底宽 60.0 m。

闸底枢纽最大通航流量应根据实际水文条件、下游已建枢纽通航标准、枢纽布置和运行等因素并结合水工模型试验综合确定。常山江为山区河流, 航道等级为Ⅳ级, 下游衢江已建小溪滩枢纽最大通航流量为 1 380 m<sup>3</sup>/s, 为此开展了 600、800、1 062、1 234 m<sup>3</sup>/s 流量下的通航水流条件试验, 上游水库水位为正常蓄水位 78.5 m。上游引

航道采取开敞式布置, 船舶上行出闸迅速, 省去了外导航墙, 工程造价相对较低, 但靠近船闸一侧泄水闸泄水时对船舶影响较大。为了降低水流对上游引航道影响, 保证引航道内水流满足通航要求, 在电站满发后, 剩余水量通过均匀开启左侧区域泄水闸孔泄洪。各试验工况下上游引航道及门口区最大流速值如表 1 所示。

表 1 原设计方案上游引航道及门口区特征流速

流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	电站过流/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	泄水闸 泄水	最大实测流速值/(m·s <sup>-1</sup> )								
			口门区			停泊段			导航段		
			纵向	横向	回流	纵向	横向	回流	纵向	横向	回流
600	116	13 <sup>#</sup> ~17 <sup>#</sup>	0.70	0.11	0.00	0.45	0.12	0.09	0.06	0.09	0.09
800	116	13 <sup>#</sup> ~17 <sup>#</sup>	0.87	0.15	0.00	0.56	0.14	0.09	0.00	0.04	0.09
1 062	116	13 <sup>#</sup> ~17 <sup>#</sup>	1.18	0.13	0.00	0.80	0.24	0.09	0.09	0.13	0.11
1 234	116	13 <sup>#</sup> ~18 <sup>#</sup>	1.40	0.21	0.00	0.91	0.23	0.10	0.22	0.11	0.15

由表 1 可知, 当流量为 600 m<sup>3</sup>/s 时, 上游引航道导航段内水面基本无波动, 处于静水区; 停泊段内存在弱回流, 最大回流流速 0.09 m/s, 最大纵向流速 0.45 m/s, 最大横向流速不大于 0.15 m/s; 口门区和连接段的纵向流速基本在 1.00 m/s 以内, 航线最大横向流速不大于 0.30 m/s。因此, 当来流量小于 600 m<sup>3</sup>/s 时, 上游引航道及口门区各项流速指标均满足通航要求。

当流量为 800 m<sup>3</sup>/s 时, 上游引航道导航段也基本为静水区; 停泊段内仅最上游航道中心线最

大流速 0.58 m/s, 其他停泊段区域流速均不大于 0.50 m/s, 横向流速不大于 0.15 m/s; 口门区和连接段的纵向流速不大于 1.50 m/s, 航线最大横向流速不大于 0.30 m/s。此时, 上游引航道及口门区各项流速指标基本满足通航要求。

当流量大于 800 m<sup>3</sup>/s 时, 引航道内停泊段最大纵、横向流速指标均不能满足通航要求(图 2)。因此, 为提高最大通航流量, 须进一步优化上游引航道设计方案。

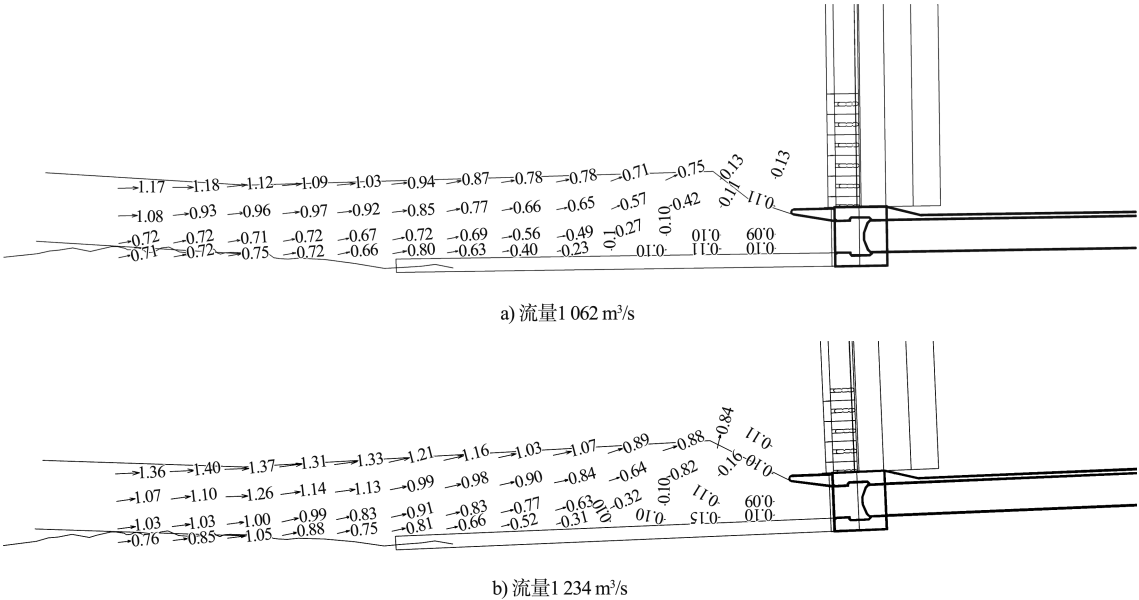


图 2 不同来流量下上游引航道平面流速分布 (单位: m/s)

3.2 优化方案通航水流条件

船闸引航道通航水流条件是影响船舶安全进出闸的重要因素。目前,改善引航道水流条件的措施主要有 2 类:1)修筑建筑物,如导流墩、隔流堤、导航墙等;2)优化疏浚,如调整河流与主航道线夹角、清淤、浚深和优化导航建筑物尺寸、拓宽航道等<sup>[9]</sup>。结合阁底枢纽上游 0.5~1.0 km 河段明显缩窄的特点,对上游左岸岸边进行开挖疏浚,以扩大过水断面面积,降低上游引航道流速。开挖范围及高程见图 3。

开挖后的上游通航水流条件明显改善。由表 2 可知,当来流量小于 1 062 m<sup>3</sup>/s 时,上游引航道及口门区各项流速指标基本满足通航要求;当来流量为 1 234 m<sup>3</sup>/s 时,上游引航道导航段内流速大

于 0.15 m/s,停泊段最大纵向流速 0.69 m/s,最大横向流速 0.33 m/s,均超出设计规范要求,不满足通航要求。因此,来流量为 1 062 m<sup>3</sup>/s 可作为上游最大通航流量,通过上游开挖方案最大通航流量基本满足设计要求。

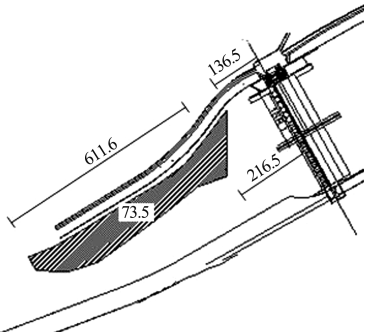


图 3 上游左岸开挖范围及高程 (单位: m)

表 2 优化方案上游引航道及口门区特征流速

流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	电站过流/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	泄水闸 泄水	最大实测流速值/(m·s <sup>-1</sup> )								
			口门区			停泊段			导航段		
			纵向	横向	回流	纵向	横向	回流	纵向	横向	回流
600	116	13 <sup>#</sup> ~17 <sup>#</sup>	0.52	0.08	0.00	0.36	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09
800	116	13 <sup>#</sup> ~17 <sup>#</sup>	0.70	0.11	0.00	0.47	0.10	0.09	0.00	0.04	0.09
1 062	116	13 <sup>#</sup> ~17 <sup>#</sup>	0.70	0.13	0.00	0.53	0.14	0.09	0.00	0.06	0.09
1 234	116	13 <sup>#</sup> ~18 <sup>#</sup>	1.10	0.15	0.00	0.69	0.33	0.11	0.17	0.30	0.15

4 下游引航道通航试验

4.1 原设计方案通航水流条件

口门区水流条件复杂是山区河道航电枢纽引航道布置的常见问题,阁底枢纽下游引航道因受河道地形限制,口门区处于下弯道凸岸,同时由于河道中心滩地对水流分叉的影响,水流主流流向与引航道夹角较大,对通航水流条件造成不利影响。为保证通航安全,针对下游引航道口门区及连接段的通航水流条件开展试验研究,首先试验选取电站满发流量 116 m<sup>3</sup>/s 和 1 062 m<sup>3</sup>/s。其中,1 062 m<sup>3</sup>/s 流量运行方式为在电站满发后,剩余水量通过均匀开启最左侧 5 孔泄洪闸下泄,维持水库水位为正常蓄水位 78.5 m。

实测流速测量结果表明:下泄流量 116 m<sup>3</sup>/s 时,下游引航道口门区及连接段最大纵向流速 2.33 m/s,最大横向流速 0.81 m/s,最大回流流速 1.41 m/s;下泄流量 1 062 m<sup>3</sup>/s 时,下游引航道口

门区及连接段最大纵向流速 3.97 m/s,最大横向流速 1.88 m/s,最大回流流速 1.64 m/s。无论是大流量,还是小流量,下游引航道口门区及连接段水流流速都远远超出通航要求。

原设计方案不能满足通航要求的主要原因是下游引航道口门区及连接段布置在凸岸滩地位置,受滩地分流的影响,口门区及连接段水流集中并与航线产生较大夹角(图 4)。可通过调整引航线或对下游滩地进行疏浚开挖,使下游水流分散,从而改善口门区及连接段水流条件。



a) 流量116 m<sup>3</sup>/s





b) 流量1 062 m<sup>3</sup>/s

注: 箭头表示主流流向。

图 4 原方案下游引航道口门区流态

4.2 优化方案口门区通航水流条件

针对原方案存在的口门区及连接段流速明显, 且航线产生较大夹角导致横向流速过大的问题, 提出 3 种优化方案, 如图 5 所示。各优化方案流速测量结果如表 3 所示。

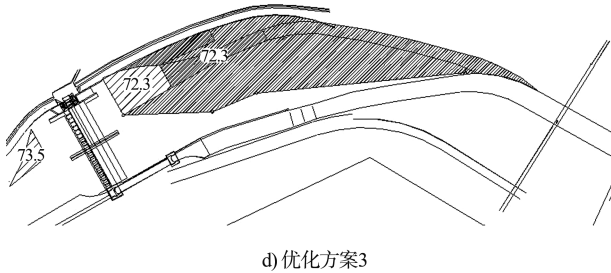
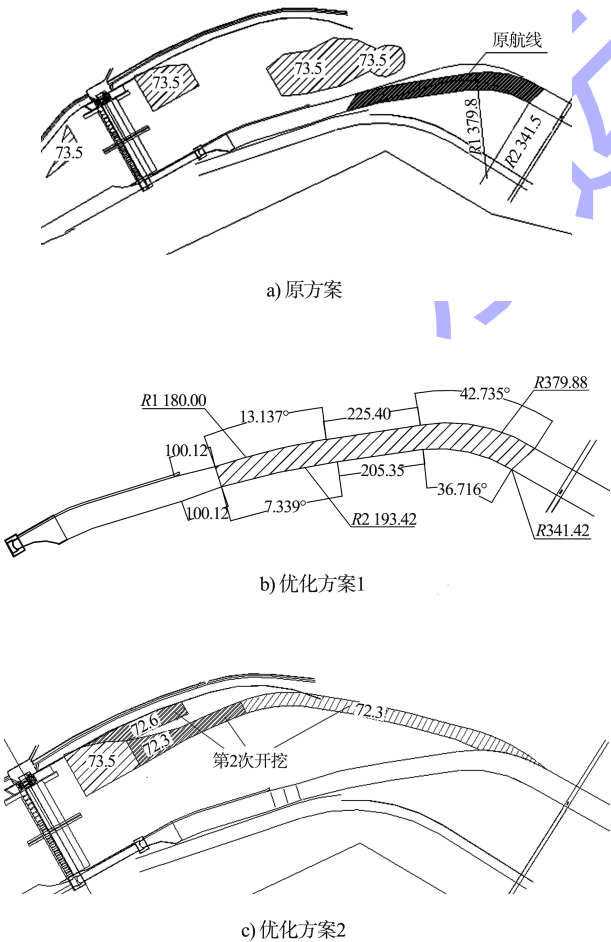


图 5 下游引航道优化方案

表 3 优化方案下游引航道口门区特征流速

优化方案	下泄流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	最大流速测量值/(m·s <sup>-1</sup> )		
		纵向	横向	回流
1	1 062	1.59	0.49	0.45
2	116	0.80	0.23	0.35
	1 062	1.59	0.59	0.61
3	600	1.05	0.32	0.10
	800	1.22	0.36	0.32
	1 062	1.46	0.37	0.31
	1 234	1.51	0.35	0.27

1) 优化方案 1。对电站下游区域和下游引航道口门区及航道左侧地形较高处进行开挖疏浚, 开挖高程至 73.50 m, 并将下游航线尽量向右岸布置, 以减小航线和流向夹角, 从而减小横向流速, 见图 5b)。由流速数值可见, 下泄流量 1 062 m<sup>3</sup>/s 下游引航道口门区及连接段 200 m 范围内(3 倍船长)最大纵向流速 1.59 m/s, 最大横向流速 0.49 m/s, 最大回流流速 0.45 m/s, 改善不明显, 最大横向和回流流速超出规范要求。

2) 优化方案 2。在优化方案 1 开挖的基础上, 对下游河道原滩地进行二次开挖, 以减少右侧水流流量, 进而减小口门区流速, 见图 5c)。下泄流量 1 062 m<sup>3</sup>/s 下游引航道口门区及连接段 200 m 范围内最大纵向流速 1.59 m/s, 最大横向流速 0.59 m/s, 最大回流流速 0.61 m/s, 最大横向流速和回流流速仍不满足规范要求。

3) 优化方案 3。在优化方案 1 的基础上, 将下游河道全部开挖清淤至 72.3 m 高程, 如图 5d) 所示。该修改方案中口门区水流条件改善明显, 口门区及连接段水流平稳, 水面波动较小。下泄流量

600 m<sup>3</sup>/s 时,下游引航道口门区及连接段最大纵向流速 1.05 m/s,个别测点最大横向流速 0.32 m/s,最大回流流速 0.10 m/s,满足规范要求;下泄流量 800 m<sup>3</sup>/s 时,下游引航道口门区及连接段最大纵向流速 1.22 m/s,个别测点最大横向流速 0.36 m/s,最大回流流速 0.32 m/s,满足规范要求;下泄流量 1 062 m<sup>3</sup>/s 时,下游引航道口门区及连接段最大纵向流速 1.46 m/s,个别测点最大横向流速 0.37 m/s,最大回流流速 0.31 m/s,满足规范要求;下泄流量 1 234 m<sup>3</sup>/s 时,下游引航道口门区及连接段最大纵向流速 1.51 m/s,个别测点最大横向流速 0.35 m/s,最大回流流速 0.27 m/s,满足规范要求。

综上所述,阁底枢纽下游引航道口门区及连接段布置在滩地右侧,受滩地分流的影响,口门区及连接段水流集中且与航线夹角较大,导致下游引航道口门区流速指标超出规范要求。通过合理疏浚整治河道凸岸滩地和调整下游航线位置,改善了下游引航道口门区及连接段的水流条件,在 116~1 234 m<sup>3</sup>/s 流量下满足通航要求。

5 结论

1)上游引航道原设计方案下,上游最大通航流量为 800 m<sup>3</sup>/s,不满足设计通航要求。通过对上游左岸岸边开挖疏浚,改善了上游引航道及口门区及连接段的通航水流条件,提升了上游通航能力。下泄流量 1 062 m<sup>3</sup>/s 时,口门区及连接段最大纵向流速由 1.18 m/s 降低至 0.70 m/s,停泊段最大纵向流速由 0.80 m/s 降低至 0.53 m/s,上游最大通航流量由 800 m<sup>3</sup>/s 提升到了 1 062 m<sup>3</sup>/s,上游通航流量基本满足设计要求。

2)下游引航道原设计方案下,无论大流量还

是小流量,下游引航道口门区及连接段流速指标均远远超出通航要求。通过合理疏浚整治河道凸岸滩地和调整下游航线位置,改善了下游引航道和口门区以及连接段的通航水流条件,提升了下游引航道通航能力。下泄流量 1 062 m<sup>3</sup>/s 时,口门区和连接段最大纵向流速由 3.97 m/s 降低至 1.46 m/s,最大横向流速由 1.88 m/s 降低至 0.37 m/s,最大回流流速 1.64 m/s 降低至 0.31 m/s,最大通航流量提升到了 1 234 m<sup>3</sup>/s。

参考文献:

[1] 韩昌海,杨宇,李艳富,等.微弯河段航电枢纽引航道口门区凸岸布置[J].水运工程,2014(10):121-125.

[2] 韩昌海,余之光,杨宇.小溪滩枢纽通航建筑物平面优化布置[J].水运工程,2013(6):99-102.

[3] 余之光,韩昌海,彭赤彬,等.弯曲河道通航枢纽平面布置研究概述[J].人民珠江,2014,35(6):102-105.

[4] 杨宇,李艳富,韩昌海,等.贵州清水江城景水电站通航水流条件优化试验研究[J].水运工程,2016(12):126-131.

[5] 魏晶,宋根才,蒋峰.郁江老口枢纽船闸布置与通航水流条件分析[J].西部交通科技,2012(8):144-146,152.

[6] 彭伟.弯曲河段船闸引航道通航水流条件及改善措施研究[D].长沙:长沙理工大学,2010.

[7] 郝品正,李军,徐国兵.微弯分汊河段航电枢纽总体布置与通航条件优化试验研究[J].水运工程,2004(11):66-69.

[8] 李艳富,杨宇,韩昌海,等.瓯江三溪口航电枢纽引航道布置优化试验研究[J].水利水运工程学报,2014(2):89-94.

[9] 陈明,段黎明,王多银,等.融江麻石船闸改扩建工程下引航道通航水流条件模型试验[J].水运工程,2020(7):175-180,193.

( 本文编辑 郭雪珍 )

