



桃源枢纽二线船闸平面布置方案优化试验研究*

周 丁¹, 李 帆², 陈沁芷³

(1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011;

2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200; 3. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要:为解决桃源枢纽碍航、堵船等问题,消除安全隐患,主动适应沅水水运大通道的发展要求,拟在桃源枢纽右岸新建二线船闸。该二线船闸属于改扩建工程,其布置不仅需要满足船舶通航需求,还需统筹考虑行洪能力、对既有建筑物的影响、征地拆迁等因素,技术难度远高于新建工程。针对右岸场地新建二线船闸平面布置方案,采用1:100整体定床物理模型研究4种方案下的引航道口门区通航水流条件、河道行洪能力等,确定修改方案4为推荐方案。试验结果表明,减小隔水墙长度并结合河床疏挖措施,能够有效增加河道行洪能力,减小工程实施后的水位壅高;调整航槽与水流方向一致并辅以拓宽浚深的措施,能够有效避免引航道口门区横向跌流,减小口门区回流强度;通过增设航槽短潜坝,可在不影响河道行洪能力的前提下,减小流向引航道的流量,从而减弱口门区回流强度。研究成果可为类似工程提供参考。

关键词: 二线船闸; 模型试验; 通航水流条件; 行洪能力

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0162-12

Experimental study on layout optimization of second-line ship lock in Taoyuan Hub

ZHOU Ding¹, LI Fan², CHEN Qinzhi³

(1. Hunan Provincial Water Transportation Construction & investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China;

2. Hunan Province Communications, Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China;

3. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To solve the problems of navigation obstruction, ship blockage and other problems at Taoyuan Hub, eliminate safety risks, and actively adapt to the development requirements of the Yuan River water transport channel, it is planned to build a new second-line ship lock on the right bank of Taoyuan Hub. This second-line ship lock is a reconstruction and expansion project, whose layout not only needs to meet the navigation requirements of ships, but also needs to take into account factors such as flood discharge capacity, impact on existing buildings, land expropriation and demolition, etc. The technical difficulty is much higher than that of a new construction project. Aiming at the plane layout scheme of the new second-line ship lock on the right bank site, this paper adopts the 1:100 integral fixed bed physical model to study the navigable flow conditions in the entrance area of the approach channel and the flood discharge capacity of the river under 4 schemes, and finally determines the modification Scheme 4 as the final recommended scheme. The test results show that reducing the length of the barrier wall combined with the measures of riverbed dredging can effectively increase the flood discharge capacity of the river and reduce the water level after the implementation of the project. By adjusting the direction of the channel and the water flow, and extending the dredging depth, the transverse fall in the entrance area of the approach channel can be avoided and the backflow intensity in the entrance area can be reduced. By adding a short submerged dam, the flow to the approach channel can be reduced without affecting the flood discharge capacity of the channel, thus weakening the backflow intensity in the mouth area. The research results can provide reference for similar projects.

Keywords: second-line ship lock; model test; navigable flow condition; flood discharge capacity

收稿日期: 2024-12-23

***基金项目:** 重大水利枢纽既有通航设施通过能力提升技术及示范项目(2016YFC0402007)

作者简介: 周丁(1987—),男,高级工程师,从事水运、水利工程建设管理工作。

桃源枢纽是规划沅水国家高等级航道最下游一个梯级, 工程河段航道规划为 1 000 吨级, 已建 1 座 500 吨级船闸。随着沅水航道运量增加, 船舶大型化, 现有船闸已成为制约沅水下游高等级航道发展的瓶颈, 堵船现象严重^[1]。为解决桃源枢纽碍航、堵船等问题, 消除安全隐患, 主动适应沅水水运大通道的发展要求, 拟建桃源枢纽二线船闸。船闸改扩建工程往往会受地质条件、通航建筑物等多重因素制约, 设计及建设难度均较一线船闸更大^[2]。

船闸引航道口门区通航水流条件是船闸平面布置的关键控制因素之一, 其好坏直接影响过闸船舶的安全, 因此, 改善引航道口门区通航水流条件具有重要的现实意义。目前已有大量关于引航道口门区及连接段通航水流条件的研究成果: 王建平等^[3]通过优化下游口门区河段左右岸的开挖范围, 导航建筑物采用透水排桩等措施进行治理; 喻涛等^[4]针对平陆运河与沙坪河交汇河段航道内横向流速大的问题, 采取“调顺水流+消能”相结合的思路对治理方案进行设计和改进; 唐立模等^[5]采用整体定床物理模型, 优化航道及上游隔流堤并下移下游待闸锚地, 有效改善鄱阳湖上游口门区横向流速超标等问题; 陈明慧等^[6]利用延长导航墙长度, 设置导流墩的办法, 较好解决了澧水青山船闸上游口门区水流条件不满足规范要求的问题。陈建等^[7]建立龙潭水电站船闸整改物理模型, 提出优化上、下游引航道导航墙延长方案, 使东江龙潭水利枢纽船闸满足规范要求。

桃源枢纽二线船闸建设工程需遵循安全性、经济性、生态环保等设计原则^[8], 工程紧邻电站、泄洪闸、土石副坝等已有建筑物, 周边分布大量居民和基本农田, 涉河建筑物相关性较强, 征地拆迁矛盾突出, 加之下游出口为弯道, 上游建有桃源沅水大桥, 上下游航道的平顺连接性较差, 通航环境复杂, 这些因素导致二线船闸平面布置方案设计难度非常大, 为了得到安全经济的船闸平面布置方案, 开展物理模型试验研究尤为重要。

1 工程概况

电站枢纽工程布置横跨双洲岛, 如图 1 所示, 从左至右依次布置为: 左岸土石副坝、左河槽 14 孔泄洪闸、双洲土石副坝(1)、现有船闸、双洲土石副坝(2)、电站厂房、右河槽 11 孔泄洪闸、右岸土石副坝等。坝顶轴长 1 315 m, 坝顶高程 50.70 m(1985 国家高程基准), 两岸建有防洪大堤。枢纽现有通航建筑物为Ⅳ级, 单级船闸布置在河道江心洲双洲的左侧, 闸室有效尺度为 120.0 m×18.0 m×3.5 m(有效长度×闸室宽度×门槛水深), 设计最大过坝船型为 2×500 t 顶推船队。桃源枢纽所在航道规划等级为Ⅲ级, 二线船闸设计为 1 000 吨级船闸, 闸室有效尺度均为 280 m×34 m×4.0 m, 设计代表船型为 1 000 吨级货船, 船型尺度为 85.0 m×10.8 m×2.0 m(长×宽×满载吃水)。

根据桃源枢纽主要建筑物分布情况, 分别从左岸、双洲、右岸 3 处场地分析二线船闸布置条件。其中, 左岸场地紧邻桃源县主城区, 为避免城区征地拆迁, 左岸新建二线船闸需布置于左汊第 1~3 孔泄洪闸之间, 从而需要拆除一线船闸下游左隔水墙, 拆除还建 3 孔泄洪闸, 对大坝主体结构、河段行洪等影响大; 河中双洲场地新建二线船闸需拆除现有船闸, 将造成至少断航 3~4 a, 对航运影响较大; 右岸场地新建二线船闸可布置于泄洪孔与防洪大堤之间, 船闸主体工程可布置于下游河滩地, 整体征地拆迁难度较小, 船闸布置条件较好。综上, 推荐在右岸场地新建二线船闸。

本文针对右岸场地新建二线船闸平面布置方案, 采用 1:100 整体定床物理模型研究在不同试验流量工况、不同方案下的引航道口门区通航水流条件、河道行洪能力等, 结合相应的工程措施, 最终得到船闸平面布置推荐方案。

为了准确获知各级流量的水流特性和通航水流条件, 根据桃源枢纽的主要运行方式、单机及满发流量、防洪标准、桃源站水文统计资料等, 结合主要特征流量, 拟定 8 级流量, 见表 1。

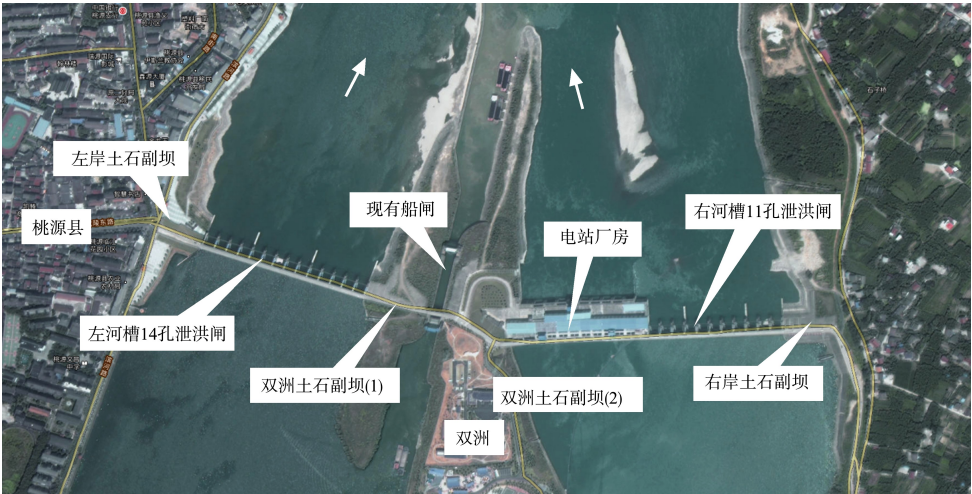


图 1 桃源枢纽主要构筑物分布
Fig.1 Distribution of main structures at Taoyuan Hub

表 1 试验基础流量工况
Tab.1 Basic flow conditions of test

工况	总流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	泄洪流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	发电流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	坝上水位/m	桃源站 水位/m	尾门 水位/m	备注
1	217	0	217	39.50	27.63	27.50	设计流量,泄洪闸全闭
2	3 699	0	3 699	39.50	32.52	32.40	9 台机满发流量,泄洪闸全闭
3	6 000	2 301	3 699	39.50	34.39	34.20	8 台机满发流量,控泄
4	8 800	6 888	1 912	39.50	36.23	36.10	停机流量,9 台机控发,控泄
5	13 000	13 000	0	39.50	38.67	38.46	常见洪水流量,停机控泄
6	19 000	19 000	0	42.00	41.63	41.41	$P=50\%$ 流量,停机敞泄
7	20 600	20 600	0	42.56	42.31	42.04	$P=10\%$ 流量(最高通航),停机敞泄
8	28 100	28 100	0	45.30	45.06	44.79	$P=2\%$ 流量(防洪标准),停机敞泄

2 原设计方案

2.1 平面布置

原设计方案紧靠右岸新建二线船闸，如图 2 所示，船闸主体结构布置在枢纽下游，以减少施工期对枢纽泄水闸和挡水线的不利影响。同时，

为避免大范围改移堤防，减少征地拆迁，上、下游引航道紧沿河岸呈折线形布置，为严格保护基本农田，下游引航道紧依基本农田边线偏向河侧，其转弯角取整为 10° 。

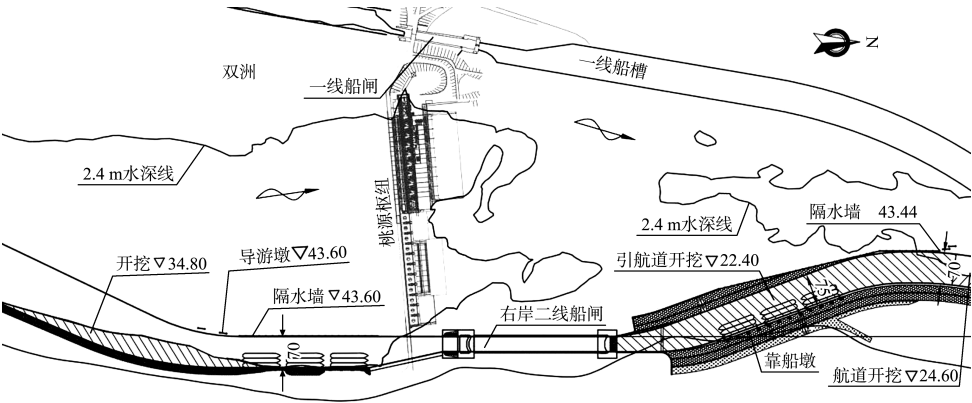


图 2 原设计方案平面布置 (单位: m)
Fig.2 Plane layout of original design scheme (unit: m)

2.2 存在问题

对 50 a 一遇洪水流量 $Q=28\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ 进行水位、流速等测试, 经分析发现, 原设计方案对行洪能力影响明显, 主要体现在:

1) 下游河段流速分布出现大幅调整。如图 3

所示, 对二线船闸原设计方案与工程前的局部流场进行对比, 可见在坝下 900~3 000 m 的河段内, 流速分布调整显著, 右侧原主流带变成了缓流区, 河心流速最大增加 2.0 m/s 左右, 说明船闸对洪水流场的影响十分明显。

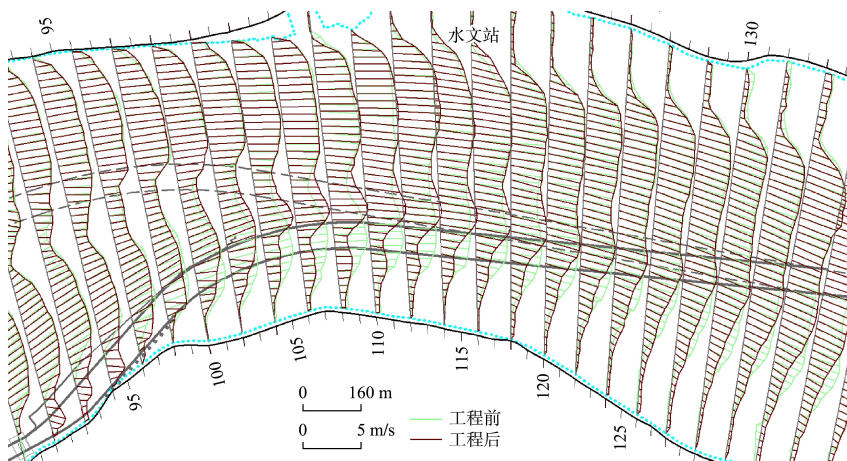


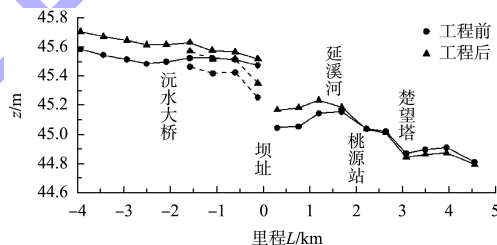
图 3 原设计方案与工程前局部流场对比

Fig. 3 Local flow field comparison between original design scheme and pre-construction

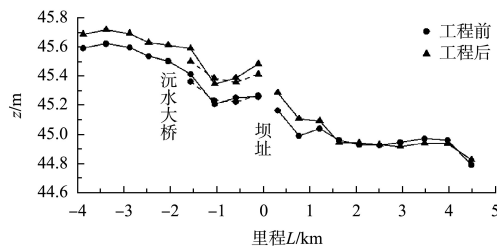
2) 坝上、坝下壅水明显, 最高接近 0.2 m。如图 4 所示, 对比工程前后的水位可见, 左、右槽坝下及上游水位明显高于工程前, 左槽坝上、坝下最大壅高均约 0.13 m, 且未见尖灭趋势; 右槽坝上、坝下最大壅高分别为 0.18、0.12 m (壅高 0.23 m 的测点在上游引航道内), 基本未见尖灭趋势。

经分析发现, 影响行洪能力的原因主要是隔水墙占据了较大的过水面积。上游过水面积最大束窄在大坝稍上, 虽然占全断面面积不大 (6.4%), 但却占了右槽过水面积的 11.5%。下游隔水墙段末端正好是弯顶, 也是河段最窄之处, 其占据断面河宽约 1/3, 堤头位置占据全断面过水面积的 17.5%。下游隔水不仅占据了较大的过水面积, 且处于主流带和较窄断面, 同时在惯性的作用下, 水流过下游堤头后继续收缩, 堤头断面实际上阻挡的过流量占比大于过水面积占比, 而引起水位的明显壅高。

从行洪能力的影响看, 原设计方案基本不可行, 故未再进行其他流量工况的试验, 直接进行方案优化试验。



a) 左岸



b) 右岸

注: 虚线为双洲侧水位。

图 4 原设计方案与工程前水位对比

Fig. 4 Water level comparison between original design scheme and pre-construction

3 修改方案 1 试验

3.1 平面布置

在原设计方案基础上进行优化得到修改方案 1, 如图 5 所示, 上游与原设计方案相同, 下游不考

虑大范围改移堤防和征地拆迁问题,引航道及连接段航槽直接取直。此外,下游堤头及口门区段左侧采用 1:10 缓坡开挖,以避免横向跌流,右

侧仍采用 1:2 斜坡开挖,下游航槽两侧开挖边坡为 1:2。方案调整后,下游过水面积最大减小率降为 3.3%。

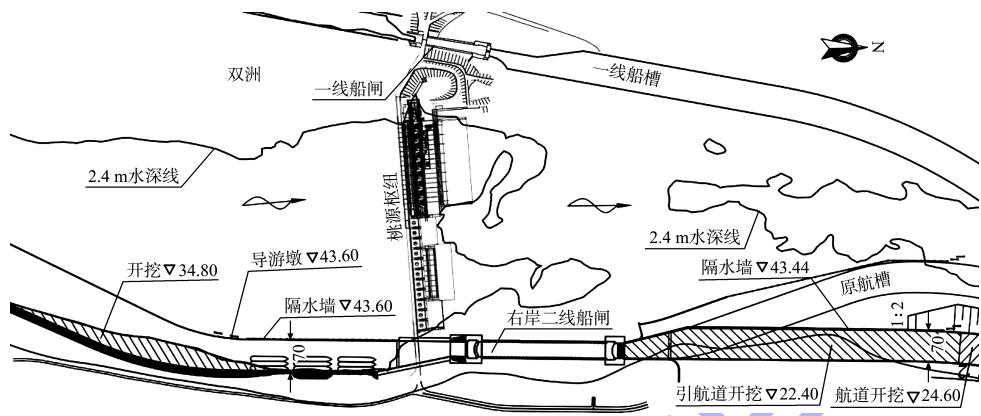


图 5 修改方案 1 平面布置 (单位: m)
Fig. 5 Plane layout of modification Scheme 1 (unit: m)

3.2 优化效果分析

3.2.1 洪水水位变化

本方案对主要流量工况进行测试。对工程前后洪水水位变化进行分析可知,各级洪水流量下左岸和右岸下游的水位变化均不超过 0.05 m,说

明该方案对左槽和右槽下游河段的行洪能力基本无影响。右岸上游 $Q=28\,100\text{ m}^3/\text{s}$ 的最大壅高为 0.11 m(引航道外),说明上游隔水墙对行洪能力存在一定影响,不过尖灭趋势较明显,壅高 0.05 m 的范围仅在坝前 3.0 km 内。

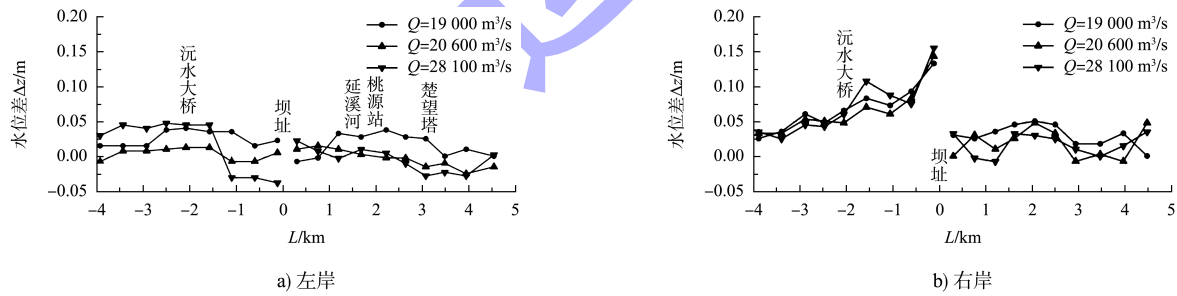


图 6 修改方案 1 岸边水位变化
Fig. 6 Shoreline water level variations of modification Scheme 1

3.2.2 二线船闸口门区、连接段通航水流条件

JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[9] 规定,引航道及口门区纵向表面流速不超过 2.0 m/s,横向表面流速不超过 0.3 m/s,回流流速不超过 0.4 m/s。

对各流量下的表面流场进行测试,在此基础上统计分析二线船闸上、下游口门区及连接段的纵、横、回流强度,如图 7 所示,试验表明,虽

然上游引航道的纵流横流、口门区的横流、连接段的纵流横流略有超标,但超标幅度很小,并且从纵、横流分布看,超标仅出现在个别测点,口门区、连接段右侧存在不小于 70 m 宽的非超标区,无碍通航。下游仅在连接段出现纵流横流超标,但超标有限,且超标的横向范围不到 30 m,无碍通航。

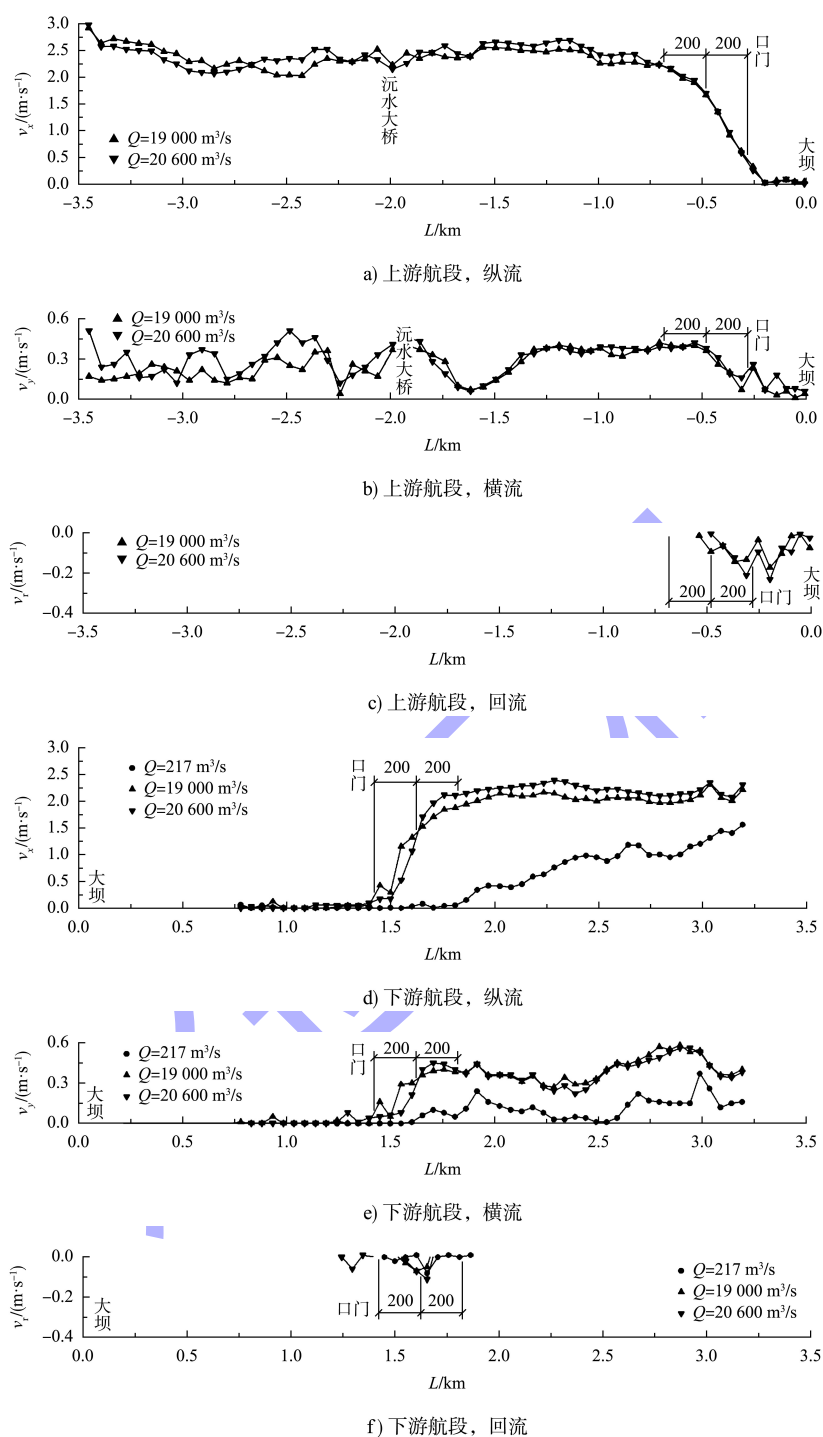


图7 修改方案1最大纵、横、回流沿程变化

Fig. 7 Maximum longitudinal flow, lateral flow, and backflow variations of modification Scheme 1

3.2.3 总体评价

二线船闸上、下游口门区和连接段通航水流条件较好,通航流量基本达到10 a一遇。虽然上游洪水水位壅高达0.11 m,但壅水范围有限,下游引航道、口门区淤积的可能性不大,修改方案1基本可行。

4 修改方案2试验

虽然从通航水流条件和行洪能力等方面考虑修改方案1是可行的,但其下游引航道采用直出方式,导致移堤范围和征地拆迁量巨大,并涉及占用基本农田,征拆费用高达42 300万元,需要进一步研究兼顾安全、经济、合规的方案。考虑

到原设计方案紧依基本农田边线偏出，移堤和拆迁范围较小，征拆费用减少约 8 100 万元，其主要问题是下游隔水墙占据过水断面过大致壅水偏高，而下游隔水墙长度约 770 m，有缩短的可能性，故仍以原设计方案为基础进行优化。

4.1 平面布置

在原设计方案基础上进行优化得到修改方案 2，如图 8 所示，上游与原设计方案基本相同，但在坝上游采用扩大断面开挖，目的是扩大过水断面以弥补上游隔水墙占据的断面(修改方案 1 表明

上游壅水稍偏高)；保证下游引航道长度 500 m，取消隔水墙末端 270 m，使过水断面最大束窄率从原设计的 17.5%降至 4.3%；由于下游口门区航段流向与原航槽的交角较大，对下游引航道进行调整，使航槽与水流方向保持一致，减少流态的不稳定性和水流的分散效果；为避免横向跌流，下游堤头及口门区段左侧采用 1:10 缓坡开挖，同时将该区域航槽向右侧适当扩展并挖深，以解决口门区回流较强的问题。

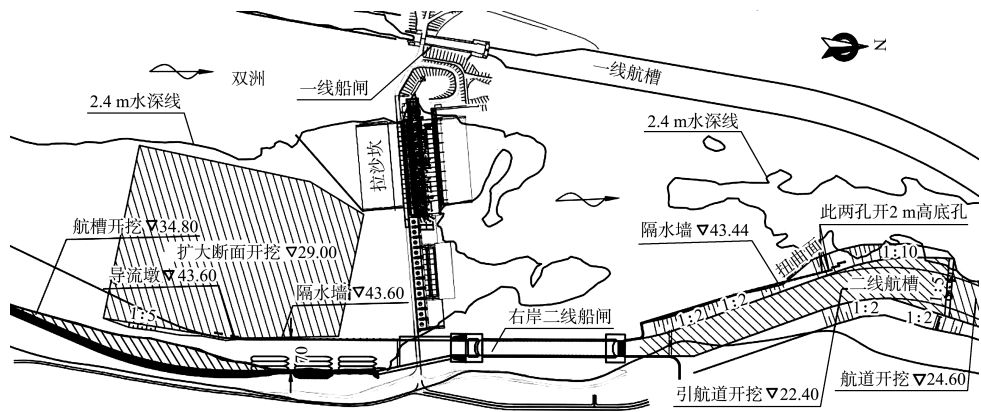


图 8 修改方案 2 平面布置 (单位: m)
Fig. 8 Plane layout of modification Scheme 2 (unit: m)

4.2 优化效果分析

修改方案 2 在水位壅高问题上得到明显改善，如图 9 所示，在洪水期 ($Q=28\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$) 的情况

下，工程后水位壅高控制在 0.05 m 以内，说明上游采用扩大断面开挖、下游减小隔水墙长度可以明显减小工程引起的水位壅高。

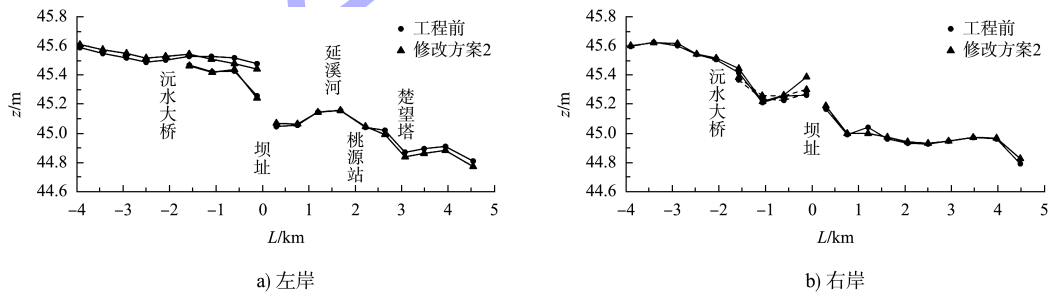


图 9 修改方案 2 与工程前的水位对比
Fig. 9 Water level comparison between modification Scheme 2 and pre-construction

5 修改方案 3 试验

虽然上游采用扩大断面开挖可以明显减小工程引起的水位壅高，解决上游隔水墙对行洪能力的影响问题。但经调研发现，开挖区域紧邻电站

和泄洪闸，其施工引起的浑浊水流可能对电站的水轮机及其他建筑产生影响，实施难度较大。因此，需另寻优化方案。

5.1 平面布置

该方案只在修改方案 2 的基础上做 2 处修改, 一是取消上游扩大断面开挖, 将地形恢复到工程

前; 二是将上游隔水墙缩短 100 m, 适当减小占据的过水面积和上游壅水, 平面布置见图 10。

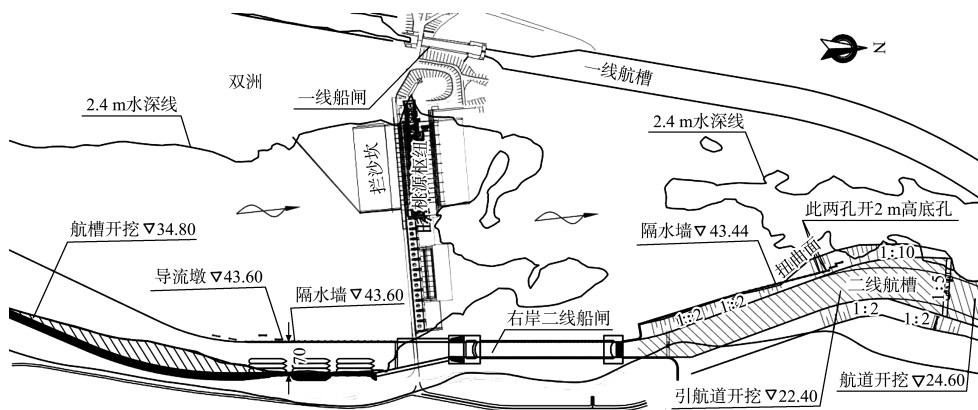


图 10 修改方案 3 平面布置 (单位: m)
Fig. 10 Plane layout of modification Scheme 3 (unit: m)

5.2 优化效果分析

5.2.1 洪水水位变化

该方案左岸及两岸下游各级流量水位变化均在 0.04 m 范围内, 如图 11 所示, 说明对左槽及下游行洪能力基本无影响。右槽上游各级流量水位壅高均降至 0.1 m 以下, 其中 $Q = 28\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ 时壅高最大, 出现在坝前约 1.5 km 处, 壅高 0.09 m (引航道内水尺壅高 0.14 m), 说明上游隔水墙缩短 100 m 后, 水位降落了 0.02 m, 对右槽行洪能力的影响已经不大。

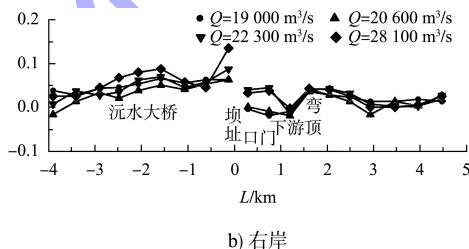
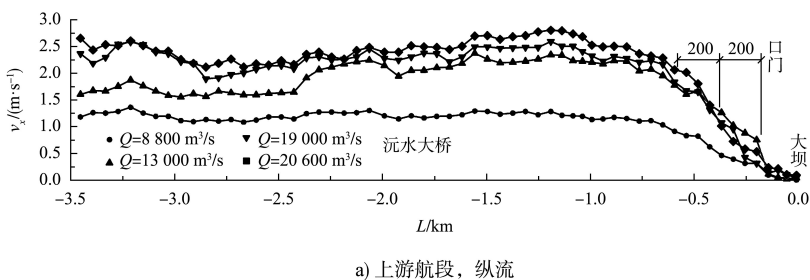
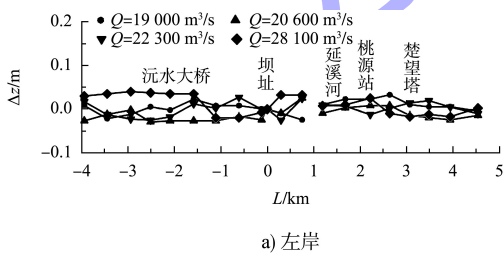


图 11 修改方案 3 岸边水位变化
Fig. 11 Shoreline water level variations of modification Scheme 3

5.2.2 二线船闸口门区、连接段通航水流条件

该方案对 9 级流量进行了全面的流速测试, 统计的最大纵、横、回流见图 12。分析结果表明, 下游各区间纵、横、回流均不超标, 满足通航要求, 上游连接段的虽有横流超标 0.16 m/s, 但由于连接段航槽有所展宽, 其右侧有约 70 m 宽的非超标区, 基本满足通航要求。



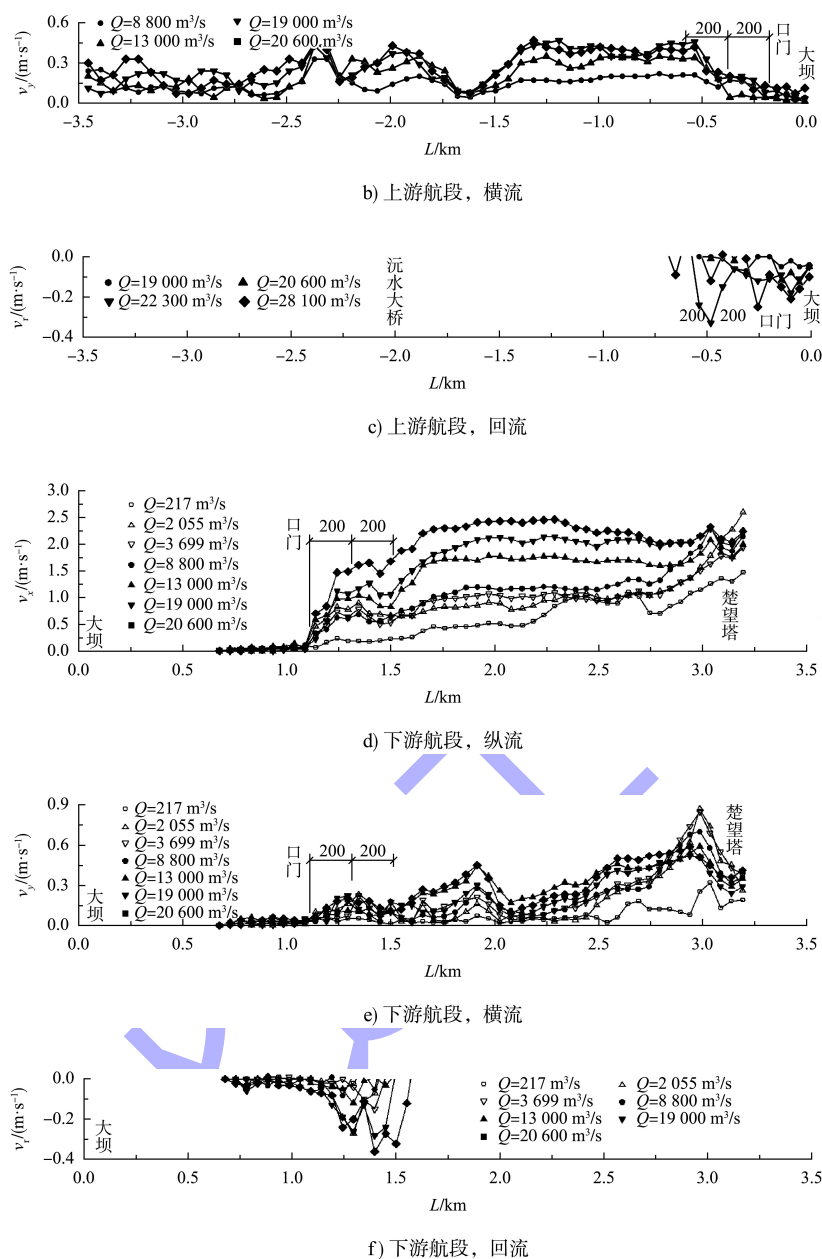


图 12 修改方案 3 最大纵、横、回流沿程变化

Fig. 12 Maximum longitudinal flow, lateral flow, and backflow variations of modification Scheme 3

5.2.3 总体评价

修改方案 3 的二线船闸上游口门区、连接段满足通航要求, 下游口门区、连接段通航水流条件较好, 通航流量可到 10 a 一遇。洪水水位最大壅高降到了 0.09 m, 且壅水范围有限, 河段流速分布形式和主流位置基本未变, 引航道淤积的可能性不大。因此, 修改方案 3 为相对较优的方案。但是, 修改方案 3 也存在不足之处, 一是上游停泊段长度稍有不足, 停泊段长度不小于 280 m 只能达到

$Q=13\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 不过之上流量也基本能达到 260 m, 二是上游引航道出现 0.21 m/s 的最大回流。

6 修改方案 4 试验

主要针对修改方案 3 上游引航道停泊段还存在一定程度的回流不足, 对其进行局部优化, 希望进一步改善停泊水流条件。

6.1 平面布置

以修改方案 3 为基础方案, 如图 13 所示, 基

于减小右侧航槽流量分布的思路做 2 处修改,一是将上游右侧航槽开挖区底部高程从 34.8 m 提高至 35.4 m,保证航深 3.0 m;二是上游连接段布置 2 道短潜坝,顶部高程 35.4 m,长度分别为

21、39 m, 右侧接开挖区左缘。潜坝占据面积微小, 远小于开挖增大的面积, 对洪水位基本无影响^[10]。

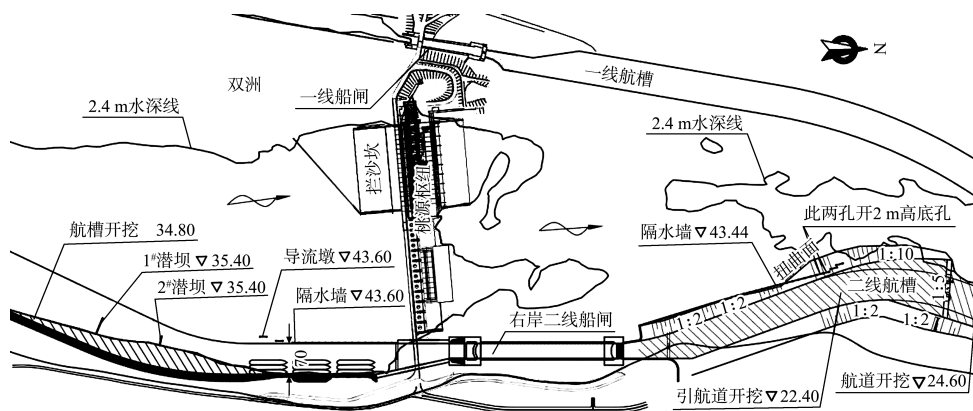


图 13 修改方案 4 平面布置 (单位: m)

Fig. 13 Plane layout of modification Scheme 4 (unit: m)

6.2 优化效果分析

考虑到 $Q=20\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 时引航道内回流最强, 故仅对此流量下进行测试。如图 14 所示, 上游引航道内最大回流降到了 0.11 m/s , 约减小 $1/2$, 同时上游口门区、连接段水流条件未见明显恶化。

另外,满足停泊条件的长度超过 280 m,基本满足要求。由此可见,修改方案 4 由于减小航槽挖深,增设航槽短潜坝,适当减小了流向上游引航道的流量,继而减弱了上游引航道回流强度,因此达到了进一步改善停泊条件的目的。

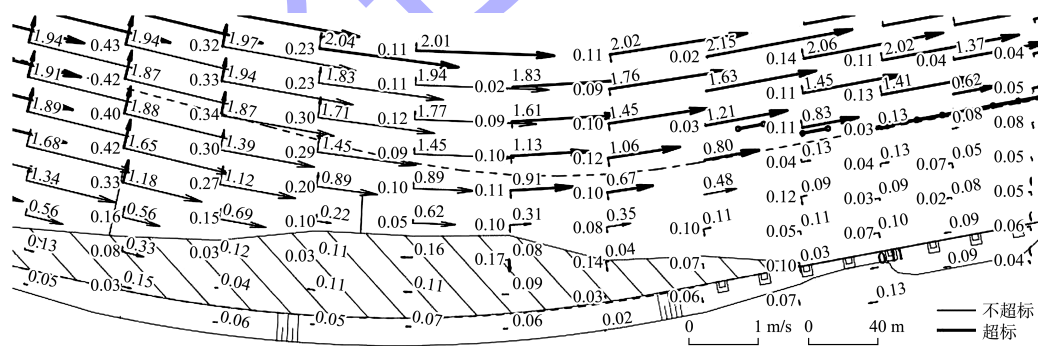


图 14 修改方案 4 上游引航道、口门区纵、横流分布

Fig. 14 Longitudinal and lateral flow distribution in upstream channel and lock area of modification Scheme 4

6.3 综合比选

不同方案的综合比选见表 2。

综上,修改方案4 移堤、征地安置量较小,不涉及基本农田,对周边建筑物影响较小,在通航水流条件方面具有明显优势,仅在行洪能力方

面稍劣于修改方案 2, 但修改方案 2 需要对上游进行大范围开挖, 可能对电站的水轮机以及其他建筑产生影响, 不具备可行性。因此, 综合比较认为右岸新建船闸修改方案 4 具有优势, 可作为二线船闸平面布置推荐方案。

表 2 不同方案综合比选
Tab. 2 Comprehensive comparison of different schemes

方案	行洪能力	通航水流条件	其他影响
原设计方案	坝上、坝下壅水明显,最高接近 0.2 m,行洪能力不满足要求	-	征拆费用较修改方案 1 减少 8 100 万元
修改方案 1	各级洪水流量下左岸和右岸下游的水位变化均不超过 0.05 m,虽然右岸上游洪水水位壅高为 0.11 m,但壅水范围有限,基本满足要求	通航水流条件较好,通航流量基本能达到 10 a 一遇	移堤范围和征地拆迁量巨大,征拆费用达 43 200 万元,并涉及基本农田
修改方案 2	各级洪水流量下水位壅高控制在 0.05 m 以内,满足要求	通航水流条件较好,通航流量基本能达到 10 a 一遇	上游开挖的区域紧邻电站和泄洪闸,其施工引起的浑浊水流可能对电站的水轮机以及其他建筑产生影响,不具备可行性
修改方案 3	各级洪水流量下左岸和右岸下游的水位变化均不超过 0.04 m,上游洪水水位壅高为 0.09 m,壅水范围有限,基本满足要求	通航水流条件较好,但上游停泊段长度稍有不足,口门区回流较大	同原设计方案
修改方案 4	同修改方案 3	通航水流条件较好,上游引航道回流明显改善,停泊段长度满足要求,通航流量基本能达到 10 a 一遇	同原设计方案

7 结 论

1) 改扩建船闸工程属续建项目,布置和建设受既有建筑物和复杂水文地质环境双重制约,技术难度远高于新建工程。船闸平面布置应统筹考虑通航水流条件、行洪能力、对既有建筑物的影响、征地拆迁等因素,满足安全性、经济性、生态环保等要求。

2) 通过右岸新建船闸原设计方案以及 4 个修改方案的试验研究,得出修改方案 4 移堤、征地安置量较小,不涉及基本农田,对周边建筑物影响较小,满足行洪能力和通航水流条件要求,通航流量可达 10 a 一遇($Q=20\ 600\ \text{m}^3/\text{s}$),综合考虑将右岸新建船闸修改方案 4 作为推荐方案。

3) 通过减小隔水墙长度,结合河床疏挖措施,能够有效增加河道行洪能力,减小工程实施后的水位壅高。调整航槽方向与水流方向一致,并辅以拓宽浚深的措施,能够避免引航道口门区横向跌流,减小口门区回流强度。通过增设航槽短潜坝,可在不影响河道行洪能力的前提下,减小流向引航道的流量,从而减弱口门区回流强度。此类布置方式可为类似工程提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 重庆交通大学. 沅水桃源枢纽二线船闸建设工程船闸

布置及通航条件物理模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.

Chongqing Jiaotong University. Research report on physical model test of ship lock layout and navigation conditions for the second-line ship lock project of Taoyuan Hub on the Yuan River [R]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.

[2] 刘达, 黄本胜, 邱静, 等. 飞来峡水利枢纽新建二、三线船闸通航水流条件的试验研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(12): 58-60.

LIU D, HUANG B S, QIU J, et al. Experimental study on navigation flow condition for newly built second-line and third-line ship locks of Feilaixia Water Control Project[J]. Water resources and hydropower engineering, 2015, 46(12): 58-60.

[3] 王建平, 杨聿, 张金明, 等. 大藤峡水利枢纽船闸下游引航道口门区方案优化研究[J]. 人民珠江, 2016, 37(4): 59-64.

WANG J P, YANG Y, ZHANG J M, et al. A study on the layout optimization for the entrance area of downstream approach channel of datengxia water conservancy navigation lock[J]. Pearl River, 2016, 37(4): 59-64.

[4] 喻涛, 李娅, 何俊辉, 等. 平陆运河与沙坪河交汇河段通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2024 (4): 93-100, 156.

YU T, LI Y, HE J H, et al. Experimental research on

- navigable flow conditions in intersection of Pinglu Canal and Shaping River [J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 93-100, 156.
- [5] 唐立模, 房新宇, 林青炜, 等. 鄱阳湖水利枢纽航道通航水流条件及优化措施试验研究[J]. 水运工程, 2023(11): 99-105.
- TANG L M, FANG X Y, LIN Q W, et al. Experimental study on navigable flow condition and optimization measures of navigation channel of Poyang Lake water control project[J]. Port & waterway engineering, 2023(11): 99-105.
- [6] 陈明慧, 刘筹资, 夏波, 等. 青山枢纽船闸上游口门区通航水流条件优化试验研究[J]. 水运工程, 2022(9): 122-127.
- CHEN M H, LIU C Z, XIA B, et al. Optimization test on navigable flow conditions in upstream entrance area of ship lock of Qingshan Junction [J]. Port & waterway engineering, 2022(9): 122-127.
- [7] 刘志敏, 李志成. 湘祁二线船闸平面布置方案及设计优化创新[J]. 水运工程, 2023(1): 137-142.
- LIU Z M, LI Z C. Layout plan and optimal design innovation of Xiangqi second-line ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2023(1): 137-142.
- [8] 陈建, 张会杰, 汪越, 等. 东江龙潭水电枢纽船闸整改工程通航水流条件及改善措施[J]. 水运工程, 2022(12): 114-119.
- CHEN J, ZHANG H J, WANG Y, et al. Navigational flow conditions of ship lock rectification project for Longtan hydropower project on East River and improvement measures[J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 114-119.
- [9] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [10] 徐金环. 航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- XU J H. Channel regulation [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- (本文编辑 王传瑜)
-
- (上接第 161 页)
- [10] 周华兴, 郑宝友. 关于深水、浅水与限制性航道界定的探讨[J]. 水运工程, 2006(1): 53-58, 67.
- ZHOU H X, ZHENG B Y. Discussion on defining deep water, shallow water and restricted channel [J]. Port & waterway engineering, 2006(1): 53-58, 67.
- [11] TARAFDER M S, SUZUKI K. Computation of free surface flow around a ship in shallow water using a potential based panel method [J]. International shipbuilding progress, 2006, 53(1): 33-54.
- [12] PAVKOV M, MORABITO M. Experimental investigation of trimaran models in shallow water[J]. Journal of ship production and design, 2014, 30(2): 66-78.
- [13] YUN K H, PARK B, YEO D J. Experimental study of ship squat for KCS in shallow water[J]. Journal of the society of naval architects of Korea, 2014, 51(1): 34-41.
- [14] ELSHERBINY K, TERZIEV M, TEZDOGAN T, et al. Numerical and experimental study on hydrodynamic performance of ships advancing through different canals[J]. Ocean engineering, 2020, 195: 106696.
- [15] FERZIGER J H, PERIC M, STREET R L. Computational methods for fluid dynamics [M]. New York: Springer, 2019.
- [16] 张岩, 吴伊平, 崔鹏义, 等. 丁坝长度对弯道水力特性影响的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 164-170.
- ZHANG Y, WU Y P, CUI P Y, et al. Numerical simulation for the effect of spur dike lengths on the hydraulic characteristics of the bend[J]. Journal of water resources and water engineering, 2019, 30(1): 164-170.
- [17] 王忠明. 伽利略相对性原理及其动力学应用[J]. 物理教师, 2012, 33(2): 40-41.
- WANG Z M. Galileo's principle of relativity and its dynamics application[J]. Physics teacher, 2012, 33(2): 40-41.
- (本文编辑 赵娟)