



汉江碾盘山枢纽工程二线船闸通航 水流条件优化试验研究

徐俊锋, 赵家强

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 碾盘山枢纽已实现一期蓄水目标, 针对碾盘山枢纽拟建二线船闸265 m设计方案上下游引航道口门区与主航道夹角较大、二线船闸通航水流条件不佳以及坝下河床调整变化造成枯水期航道出浅和航宽不足等问题, 通过船闸通航水流条件及自航船模试验, 开展碾盘山二线船闸方案优化试验研究。提出拟建二线船闸上游新建430 m导堤、下游进行复式开挖和喇叭口状开槽疏浚及坝下航道整治时低水期封堵左汊的工程措施, 优化方案实施后现有一线船闸上下游通航条件有所改善, 新建二线船闸通航水流条件较设计方案亦有所改善。船模试验验证表明, 船舶通过引航道口门区及连接段时, 航向能够保持稳定, 舵角、漂距等参数均达标, 通航安全性可靠。

关键词: 船闸; 口门区; 连接段; 通航水流条件

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0137-10

Experimental study on optimization of navigation flow conditions of second-line ship lock of Nianpanshan hub project in Hanjiang River

XU Junfeng, ZHAO Jiaqiang

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT,

Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin 300456, China)

Abstract: The first-phase water storage target of the Nianpanshan hub has been achieved. In response to the problems existed in the proposed 265 m design scheme of the second-line ship lock at Nianpanshan hub, such as the large angle between the upstream and downstream diversion channels and the main channel, the poor navigation water conditions of the second-line ship lock, and shallowing of the channel and insufficient navigation width during the dry season due to the adjustment of the riverbed downstream of the dam, an optimization test study of the second-level ship lock scheme is carried out through tests of the navigation water conditions of the ship lock and self-propelled ship models. Engineering measures are proposed, such as building a 430 m guide dike upstream of the proposed second-line ship lock, conducting double-digging and trumpet-shaped slot dredging downstream, and blocking the left branch during the low-water period when the downstream channel is being rectified. After the implementation of the optimization scheme, the navigation conditions upstream and downstream of the existing first-line ship lock are improved, and the navigation flow conditions of the proposed second-line ship lock are also improved compared to the design scheme. The ship model verification shows that the ship can maintain a stable course when passing through the approach channel entrance and connection section, and the parameters such as rudder angle and drift distance all meet the standards, ensuring reliable navigation safety.

Keywords: ship lock; entrance area; connection section; navigation flow condition

碾盘山电站厂房与一线船闸之间的重力坝段长度仅为35 m, 不具备布置二线船闸条件, 二线

闸位选择在一线船闸右侧空间受限的岗地区域。已建一线船闸周边建筑物分布较为集中, 二线船

收稿日期: 2025-06-05 录用日期: 2025-06-27

作者简介: 徐俊锋(1983—), 男, 博士, 副研究员, 从事港口航道及水利工程研究工作。

闸布置受已建闸坝、电站厂房、高压线塔、管理区等现状建筑物限制。在综合考虑以上因素基础上,从通航水流条件、对已建通航建筑影响、上下游最低通航水位、工程征地拆迁投资等方面进行比选,提出二线船闸总体布置的初步方案^[1]。

以往工程改善口门区水流条件的措施包括:实施局部河道地形整治工程,包括疏浚关键河段或加固岸坡以稳定流态^[2];采用开孔透水式导流堤结构,增强水流渗透性,降低局部涡流强度^[3];设置潜坝工程,通过调整断面分流比,主动阻隔主流进入口门区;优化泄水闸调度策略,通过科学调控泄洪流量与时机减小口门区水流扰动^[4];调整导流堤(导航墙)的长度与走向,优化其平面布置以引导主流远离口门区^[5]等。本研究借鉴这些改善引航道口门区水流条件的成功经验,通过船闸整体定床模型试验,提出适合碾盘山二线船闸口门区通航水流条件的优化措施,以期为类似存在已建一线船闸通航条件有待提高、拟建二线船闸布置亟待优化和坝下航道整治有待加强等多重约束,需要协同优化多元矛盾的新建二线船闸

建设工程提供技术参考。

1 工程概况

碾盘山水利水电枢纽位于汉江中下游干流湖北省钟祥市境内,是汉江梯级开发自下而上的第二级,枢纽上距雅口航运枢纽 64 km、下距兴隆水利枢纽 112 km,以发电、航运为主,兼顾灌溉、供水功能,碾盘山枢纽平面布置见图 1。枢纽船闸设计等级为Ⅲ级,按单线单级建设,可通航 1 000 吨级一顶四驳双排双列船队,船闸有效尺度为 200 m×23 m×4.0 m(有效长度×有效宽度×门槛水深)。枢纽于 2018 年 10 月开工建设,目前已实现一期蓄水 46.08 m 目标,船闸已正式通航,库区航道可满足至雅口坝下千吨级航道要求,设计蓄水位 50.8 m 根据库区情况择期完成。碾盘山枢纽设计洪水标准为 100 a 一遇,洪峰流量 23 000 m³/s(100 a 一遇),枢纽上游设计洪水位 50.8 m,下游设计洪水位 48.56 m;校核洪水标准为 300 a 一遇,洪峰流量 27 700 m³/s,枢纽上游校核洪水位 50.8 m,下游校核洪水位 49.58 m。



图 1 碾盘山枢纽平面布置

Fig. 1 Layout plan of Nianpanshan ship lock

2 模型设计及验证

2.1 物理模型范围比尺

碾盘山枢纽所在河段设计洪水、校核洪水时两侧滩地均为淹没状态,参与行洪,为了准确复演工程河段的行洪状态,研究二线船闸建设对枢

纽泄洪的影响,模型范围需模拟左右两侧大范围参与行洪的滩地。依据现有地形资料,模型的左、右边界至防洪大堤,最大宽度为 4.7 km。模型模拟河段全长约 10.0 km,进口位于坝轴线上游约 4.0 km(主河道里程)处,出口位于坝轴线下游弯

道以下的直线段, 距离枢纽坝线约 6.0 km。依据试验目的和要求, 根据河道特征、河床形态、地形特点, 同时为保证模型的水流运动相似和船模航行相似, 整体模型为定床正态, 几何比尺选用 1:100, 按重力相似准则进行模型设计。

2.2 模型验证

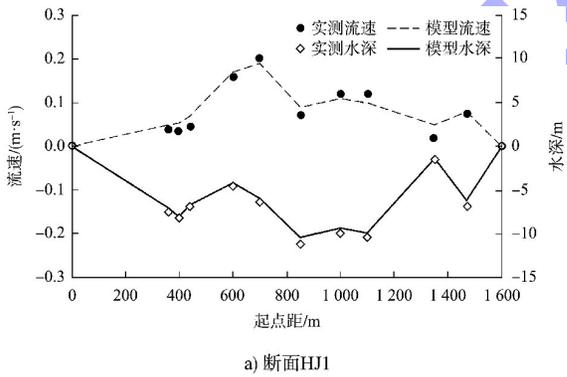
试验开展了模型水位、断面流速分布验证, 模型沿程各水尺水位与实测水位基本一致, 各流

量下模型与原型水位偏差均在 ±0.05 m 以内, 满足模型与原形阻力基本相似要求, 模型水位验证成果见表 1。模型各断面流速分布趋势、主流区位置及流速大小与实测资料基本一致, 模型试验值与实测值最大流量偏差 3.1%, 满足模型水流与原形水流运动基本相似要求, 断面流速分布验证结果见图 2、3。

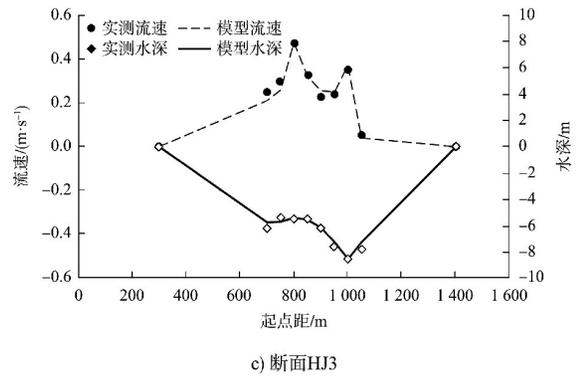
表 1 模型水位验证结果
Tab. 1 Model water level validation results

编号	距离/m	Q=810 m ³ /s			Q=2 700 m ³ /s			Q=8 670 m ³ /s		
		原型	模型	差值	原型	模型	差值	原型	模型	差值
1	-2 950	46.71	46.70	-0.01	-	-	-	-	-	-
2	-1 060	46.63	46.65	0.02	-	-	-	-	-	-
3	-610	46.60	46.61	0.01	-	-	-	-	-	-
4	620	38.18	38.22	0.04	-	-	-	46.10	46.11	0.01
5	1 500	38.14	38.16	0.02	41.63	41.65	0.02	-	-	-
6	2 500	38.10	38.09	-0.01	-	-	-	-	-	-
7	3 700	38.01	38.02	0.01	41.52	41.50	-0.02	-	-	-
8	4 950	37.98	37.98	0.00	-	-	-	-	-	-
9	6 000	-	-	-	-	-	-	45.55	45.55	0.00

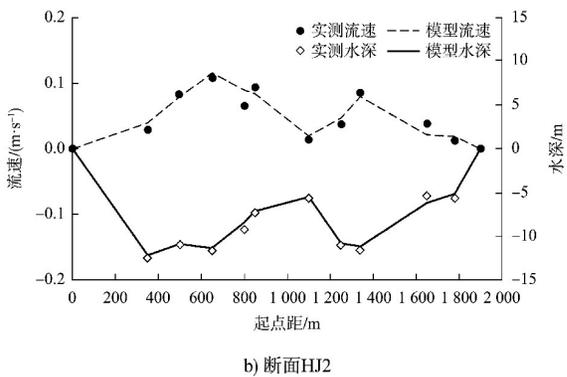
注: Q 为流量。



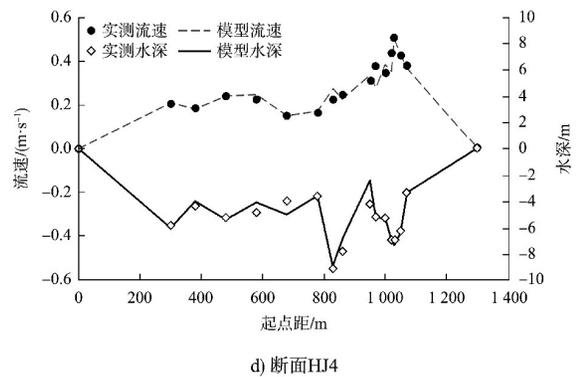
a) 断面HJ1



c) 断面HJ3



b) 断面HJ2



d) 断面HJ4

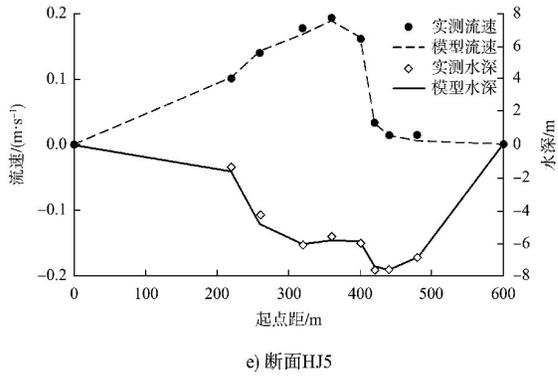


图2 $Q=810\text{ m}^3/\text{s}$ 断面流速分布验证结果
Fig. 2 Validation results of flow velocity distribution at section with $Q=810\text{ m}^3/\text{s}$

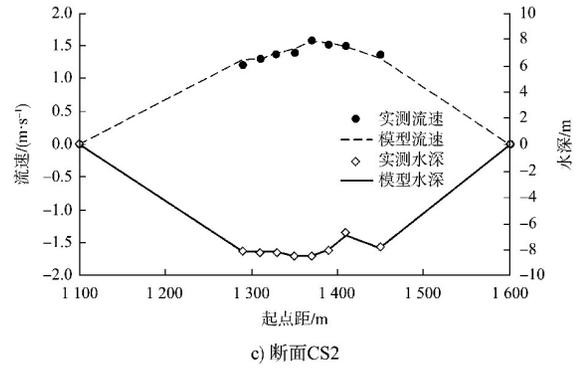
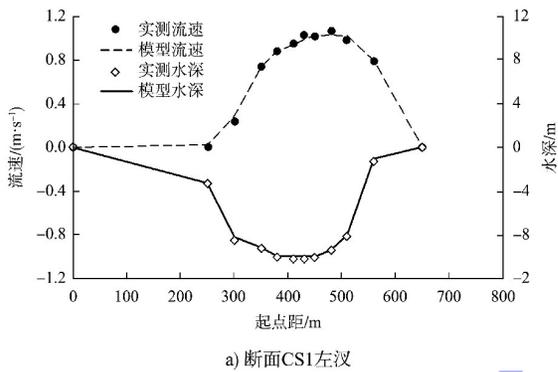
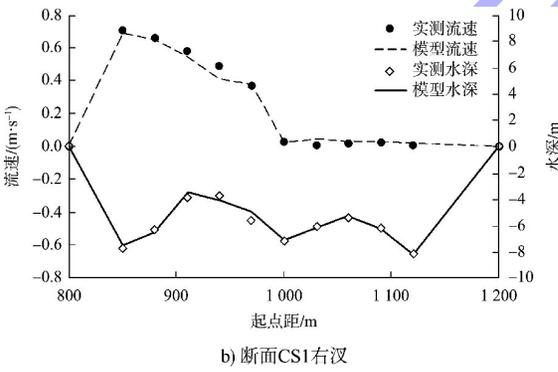


图3 $Q=2\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 断面流速分布验证结果
Fig. 3 Validation results of flow velocity distribution at section with $Q=2,700\text{ m}^3/\text{s}$



a) 断面CS1左汊



b) 断面CS1右汊

3 上游引航道口门区及连接段水流条件

3.1 工程前水流特性

工程前一线船闸上游引航道口门区及连接段最大纵横向流速统计见表2。一期蓄水位运行时，口门区及连接段的流场特征随流量的变化而变化。随着流量增加，纵、横向流速均增大。在较小流量下 ($Q \leq 2\,500\text{ m}^3/\text{s}$)，纵、横向流速均较小；当 $Q \geq 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ，纵向流速超过 0.5 m/s ，横向流速超过 0.2 m/s 。正常蓄水位运行时，纵向流速较一期蓄水位运行时要小， $Q=2\,760\text{ m}^3/\text{s}$ 电站满发时，上游流速增加，连接段口门区最大横向流速小于 0.1 m/s ；电站满发泄水闸控泄时，流速进一步增加，口门区纵向流速可达 0.21 m/s 。

表2 工程前一线船闸上游引航道口门区及连接段最大纵向/横向流速统计

Tab. 2 Statistics of the maximum longitudinal and transverse flow velocities in the entrance area and connection section of the upstream approach channel of the first-line ship lock before the project

水位	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	纵向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		横向流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		备注
		口门区	连接段	口门区	连接段	
一期蓄水位	2 500	0.18	0.22	0.18	0.20	电站满发、泄水闸控泄
	5 000	0.70	0.64	0.15	0.16	电站关闭、控泄
	8 000	0.97	1.07	0.30	0.20	
	11 200	1.03	1.22	0.35	0.32	敞泄
正常蓄水位	1 200	0.60	0.67	<0.10	0.16	敞泄(生态调度流量)
	2 760	0.21	0.14	<0.10	<0.10	满发
	5 000	0.32	0.28	<0.15	0.15	
	8 000	0.56	0.49	0.28	0.18	电站满发、控泄
	12 000	0.78	0.78	0.30	0.18	
	13 500	1.16	1.25	0.32	0.33	敞泄

工程前一线船闸下游口门区及连接段最大纵向流速统计见表 3。一期蓄水位运行最小通航流量 $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 引航道内基本为静水; 口门区航段纵、横向流速稍大; 流量增大 ($Q=1\ 680\sim 11\ 200 \text{ m}^3/\text{s}$) 时, 航道流速仍较低, 口门区流速增大, 纵、横向流速均小于 1.21 和 0.33 m/s ,

航道通航水流条件满足要求。设计蓄水位运行下, $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 口门区航段横向流速大于 0.3 m/s ; $Q=2\ 760\sim 13\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 口门区和连接段流速虽有所增大, 但纵、横向流速均不超标, 航道通航水流条件满足要求。

表 3 工程前一线船闸下游引航道口门区及连接段最大纵向/横面流速统计

Tab. 3 Statistics of the maximum longitudinal and transverse flow velocities in the downstream approach channel entrance area and connection section of the first-line ship lock before the project

水位	流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	纵向流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		横向流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		备注
		口门区	连接段	口门区	连接段	
一期蓄水位	500	0.32	1.25	0.54	0.55	电站发电
	1 680	0.32	1.05	0.26	0.34	满发
	5 000	0.91	1.13	0.24	0.22	电站关闭、控泄
	8 000	1.18	1.41	0.25	0.26	
	11 200	1.21	1.47	0.33	0.35	敞泄
正常蓄水位	500	0.34	1.27	0.55	0.57	电站发电
	1 200	0.65	1.22	0.32	0.34	敞泄(生态调度流量)
	2 760	0.41	1.07	0.31	0.33	满发
	5 000	1.03	1.16	0.25	0.32	电站满发、控泄
	12 000	0.72	1.21	0.28	0.24	
13 500	0.90	1.25	0.34	0.22	敞泄	

3.2 设计方案试验结果

方案布置: 二线船闸布置于碾盘山枢纽右岸、一线船闸右侧, 一、二线船闸中心线平行, 间距 265 m , 二线船闸与一线船闸的上闸首上游端线齐平, 主体段位于坝轴线下游。船闸主体段总长 380.0 m , 其中上闸首长 38.0 m , 闸室长 300.0 m , 下闸首长 42.0 m 。坝下直河口滩段航道整治平面

布置方案: 一线船闸下游引航道隔流堤左侧原围堰疏浚范围为自电站尾水出口下游 100 m 至口门区透水桩段, 长 840 m , 宽 100 m , 疏浚底高程 36 m 。一、二线船闸连接段航道底高程按照设计水位下 3.5 m 控制, 心滩右侧采取复式开挖, 开挖底高程 36 m , 开挖范围自一线口门区末段至心滩滩尾, 长 $1\ 380 \text{ m}$, 碾盘山二线船闸设计方案平面布置见图 4。

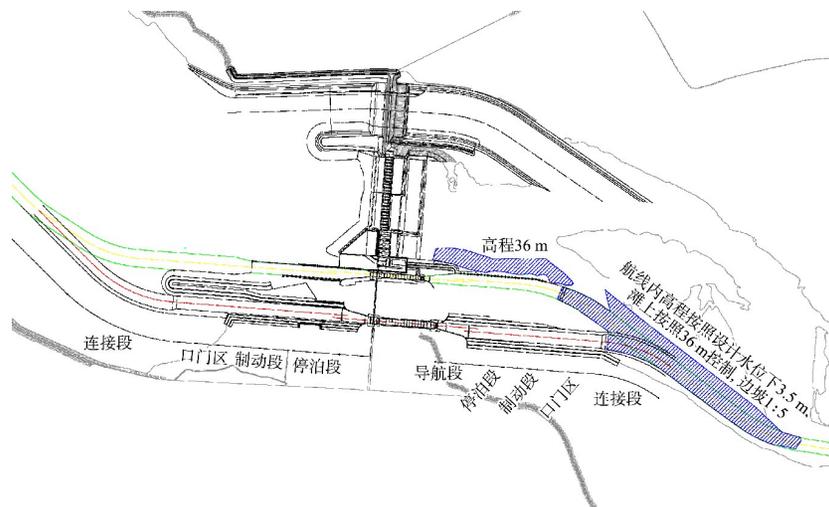


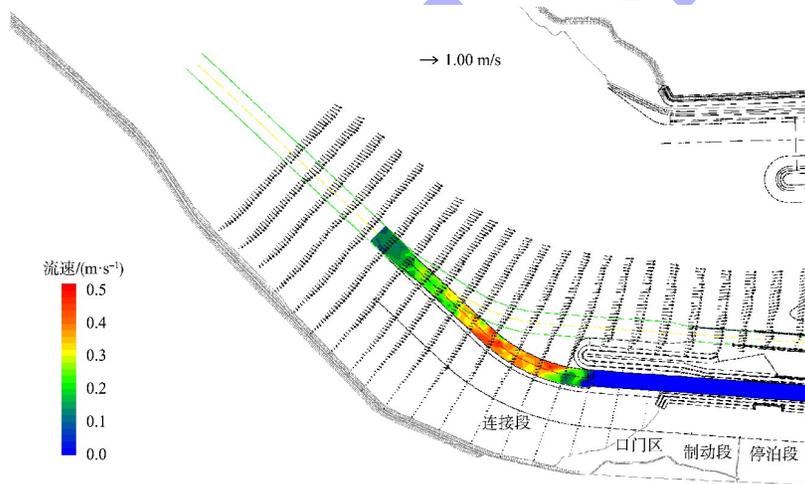
图 4 碾盘山二线船闸设计方案平面布置

Fig. 4 Layout plan of Nianpanshan second-line ship lock design scheme

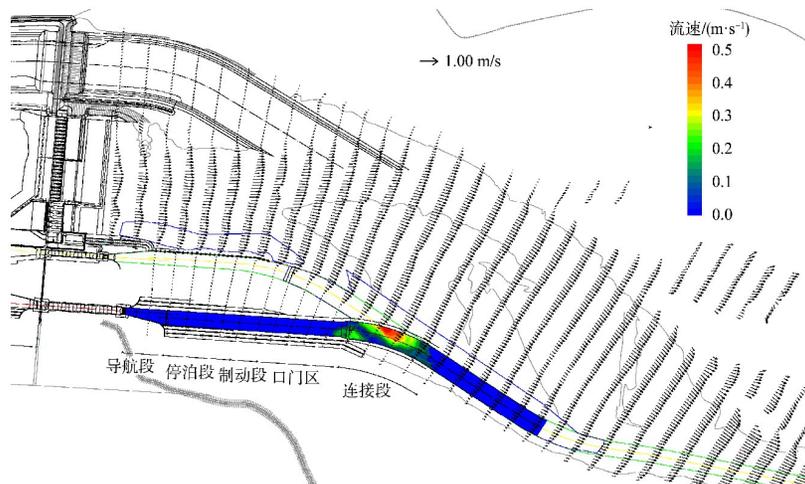
二线船闸建成后，一线船闸引航道制动段、停泊段及口门区通航水流条件中洪水条件以下时有一定改善，该段纵向流速变化不大，但横向流速大幅降低。分析其原因，主要为二线船闸的隔流堤建设改变了一线船闸上游引航道及口门区的水流结构，阻挡了河道右侧水流在一线船闸制动段的大角度斜穿流态，工程前后该段水流与航道交角由 $12^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 降至 $5^{\circ}\sim 7^{\circ}$ ，从而使得各工况下横向流速明显降低。

设计方案实施后流速分布见图5。1) 二线船闸上游引航道范围内通航水流条件达标，引航道内纵、横流速均小于 0.10 m/s 。口门区纵向流速峰值为 0.17 m/s ，连接段在二线船闸最大通航流量 $Q=17\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 时纵向流速为 1.35 m/s ，横向流速为 0.47 m/s ，基本满足要求，见图5a)。经船模试

验论证，船舶均能够顺利通过口门区及连接段航道进出船闸，航态较好，航行参数满足要求(舵角小于 20° ，漂角小于 10°)。2) 二线船闸下游引航道范围内通航水流条件达标，引航道内纵、横流速均小于 0.15 m/s 。口门区纵向流速峰值为 0.35 m/s ，横向流速峰值为 0.32 m/s ，满足控制指标要求；连接段在 $Q=8\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，一期蓄水位条件下横向流速为 0.52 m/s ，正常蓄水位条件下横向流速为 0.58 m/s ，局部较大范围超标，见图5b)。3) $Q=17\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，二线船闸下游引航道停泊段、制动段及口门区前段仍为缓流区，变化趋势不大；口门区后段及连接段因右岸滩地大范围过流，形成不同范围的缓流、回流区，受局部河岸及滩地地形影响，横向流速分布不均，但整体较小，通航水流条件较好，见图5c)。



a) 二线船闸上游引航道口门区及连接段($Q=17\ 000\text{ m}^3/\text{s}$)



b) 二线船闸下游引航道口门区及连接段($Q=8\ 000\text{ m}^3/\text{s}$)

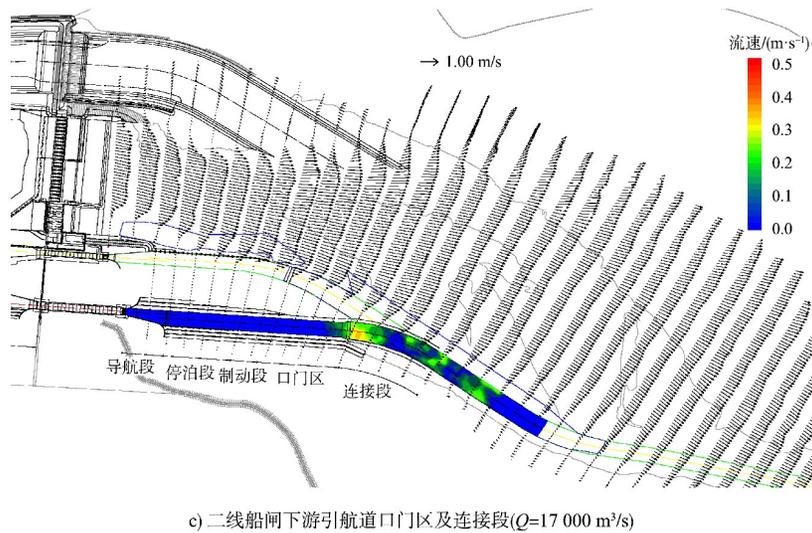


图 5 设计方案实施后横向流速分布

Fig. 5 Transverse velocity distribution after the implementation of the design scheme

3.3 优化方案思路

二线船闸设计方案中, 上游引航道口门区通航条件良好, 船模试验表明该航段横流影响较小 ($<0.3 \text{ m/s}$), 且水域宽阔便于船舶调整航态, 完全满足通航要求。下游引航道口门区位于缓流和回流区, 纵向流速 ($\leq 1.0 \text{ m/s}$) 与横向流速 ($\leq 0.3 \text{ m/s}$) 均符合规范控制指标要求^[6-9]。但连接段在电站关闭、泄水闸控泄时出现较大范围水流流速超标情况。为此, 优化方案应重点解决两

大关键问题: 1) 通过复式开挖优化航道结构来调整心滩两汉分流比, 并解决下游水深不足导致的 2 000 吨级代表船型通航受限问题, 优化方案试验结果表明, 采用复式开挖较整体开挖的工程量减少, 泥沙淤积量亦有所减少, 2021 年(典型年)复式开挖与整体开挖淤积量对比见表 4; 2) 采用水流流态调整与航道结构优化相结合的方式, 重点改善下游连接段弯顶区域横向流速超标问题, 从而全面提升二线船闸通航条件^[10-11]。

表 4 2021 年复试开挖与整体开挖淤积量对比

Tab. 4 Comparison of siltation volumes between trial excavation and overall excavation in 2021

开挖方式	淤积区面积/ km^2	冲刷区面积/ km^2	淤积区平均淤积厚度/ m	冲刷区平均冲刷厚度/ m	淤积区淤积量/ 万 m^3	冲刷区冲刷量/ 万 m^3	平均冲刷厚度/ m
整体	0.14	0.05	1.23	1.65	17.31	9.01	0.43
复式	0.12	0.07	1.16	1.51	14.39	10.20	0.22

3.4 优化方案试验结果

方案布置: 1) 在原有设计方案基础上, 对一线船闸隔流墙左侧的清障范围进行了调整, 恢复原横向围堰电站下游区域, 仅拆除右缘长约 570 m 的纵向围堰, 控制高程 36 m; 2) 右汉切滩将原滩复式开挖进口处拓宽为喇叭口; 3) 心滩左汉新建一条潜坝直 XJB1#, 对直加 1# 坝进行修复, 潜坝的坝顶高程为 36 m, 同时对潜坝和直加 1# 坝的头部进行护滩, 护滩带带宽 60 m, 厚 0.6 m, 同时按照不高于施工水位 38.4 m 进行控制。二线船闸优化方案布置见图 6。

工程实施后, 在不同流量条件下, 通过采取开挖进口处拓宽为喇叭口以调整水流流向、设置左汉 36 m 潜坝以及调整围堰拆除范围等措施, 有效改善了通航水流条件。在 $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 通航水深满足要求, 口门区连接段最大横流变化不大且局部范围超标, 但横流超标范围明显减小, 与设计方案相比, 口门区最大横向流速有所增加, 但喇叭口措施有效缩小了超标范围, 确保了船舶航行安全, 见图 7a)。随着流量增加至 $Q=1\ 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q=2\ 760 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 与设计方案相比, 口门区最大横向流速分别有所减少, 连接段无显著变化, 通航水

流条件得到明显改善。最小通航流量 $Q=500\text{ m}^3/\text{s}$ 至最大通航流量 $Q=17\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 内, 在左汊 36 m 潜坝、泄水闸下游围堰拆除优化及心滩右汊进口拓宽的综合优化方案影响下, 右汊河道主流略向左偏移, 右岸侧

的口门区和连接段通航水流条件整体较设计方案有所改善, 见图 7b)、c)。船模验证表明, 船舶通过引航道口门区及连接段时航向能够保持稳定, 舵角、漂距等参数均达标, 通航安全性可靠。

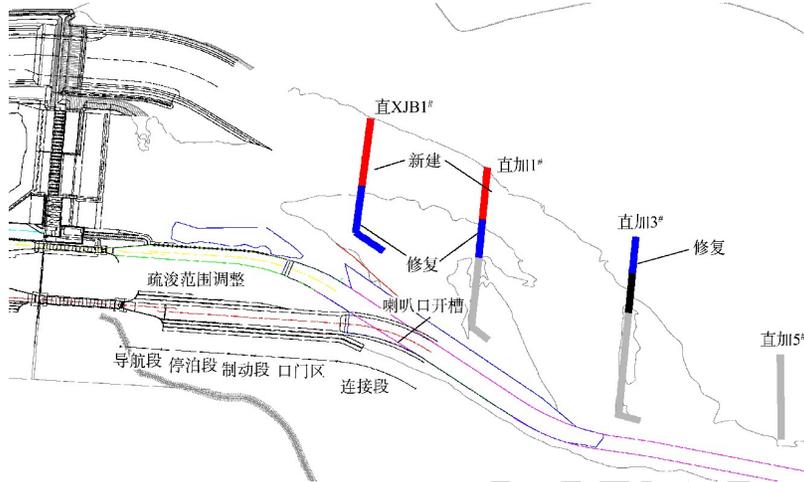
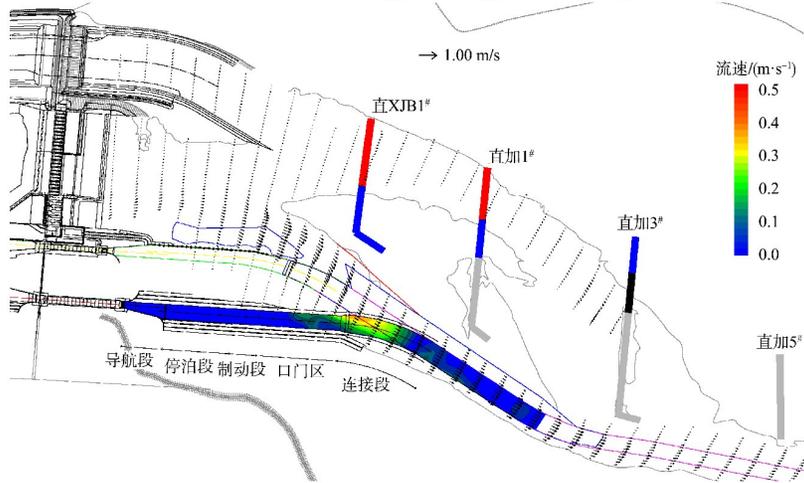
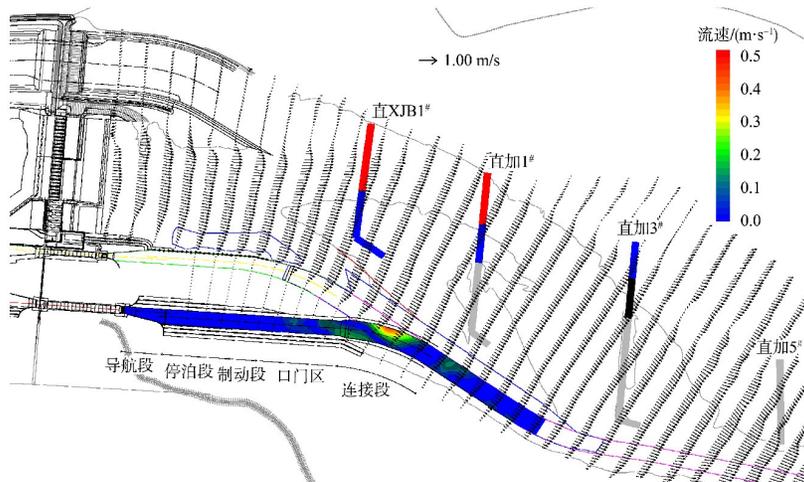


图 6 二线船闸优化方案布置
Fig. 6 Optimized scheme layout for second-line ship lock



a) $Q=500\text{ m}^3/\text{s}$



b) $Q=8\ 000\text{ m}^3/\text{s}$

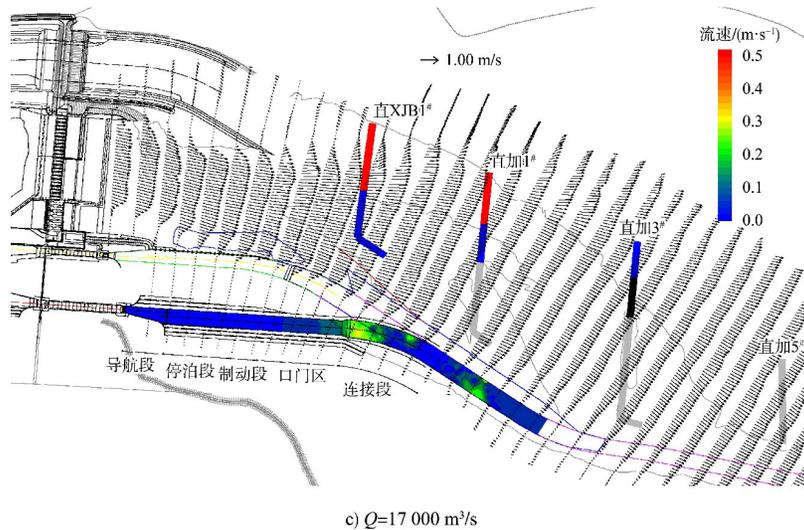


图7 优化方案实施后二线船闸下游引航道口门区及连接段横向流速分布

Fig. 7 Transverse velocity distribution in the entrance area and connection section of the downstream approach channel of the second-line ship lock after the implementation of the optimized scheme

4 结语

1) 根据碾盘山一线船闸通航水流条件分析, 建议在进行二线船闸设计方案布置时, 上游导流堤应相对较长, 以期新建导流堤对现有一线船闸能起到一定遮挡作用。同时, 为增大二线船闸下游航槽内流速, 减少泥沙淤积, 应对一线船闸下游引航道隔流堤左侧原围堰疏浚; 为解决二线船闸连接段航道水深不足问题, 应对相应区域进行疏浚开挖。

2) 二线船闸设计方案上游新建导堤长约430 m, 能有效遮挡一线船闸引航道口门区, 一线口门区通航水流条件改善, 二线船闸上游口门区及连接段航道内设计代表船型及兼顾船型均可顺利通过, 航行参数可满足船舶安全航行要求。二线船闸下游, $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时受航道整治影响, 水位有所降低, 仍无法满足2 000吨级单船航行要求, 在电站关闭、泄水闸控泄条件下, 连接段内水流流速大, 较大范围内存在超标情况。

3) 针对设计方案下游水深不足及连接段较大

范围内横向流速超标情况, 优化方案主要通过复式开挖来解决水深不足问题, 在二线口门区连接段附近进行喇叭口状开槽疏浚, 解决二线船闸连接段弯顶附近航道横流较大而引起的通航条件差的问题。

4) 设计方案坝下河床尚未冲淤平衡, 中洪水期泥沙易在坝下右汊航道内淤积, 且汛后退水快、动力不足, 航道内的落淤泥沙不能及时被冲刷带走而造成枯水期航道出浅、航宽不足, 针对这些问题, 提出优化方案——在坝下直河口滩段整治时应在低水期封堵左汊、加大右汊航槽冲刷。

5) 优化方案通过调整一线船闸右侧清障范围、右汊切滩喇叭口布局、新建心滩左汊潜坝直XJB1#、修复直加1#坝及护滩工程后, 通航水流条件优良, 船舶航态更加平稳; 二线船闸下游通航水流条件较二线设计方案亦有所改善; 船模验证表明, 船舶通过引航道口门区及连接段时航向能够保持稳定, 舵角、漂距等参数均达标, 通航安全性可靠。

参考文献:

- [1] 内河通航标准: GB 50139—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Navigation standard of inland waterway: GB 50139-2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [2] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
ZHANG R J. River sediment dynamics [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002.
- [3] 郑红杰. 上游引航道透空隔流堤布置与通航水流条件优化 [J]. 水运工程, 2022(12): 146-151.
ZHENG H J. Layout of open-type separation levee and optimization of navigation flow conditions in upstream approach channel [J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 146-151.
- [4] 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.
- [5] 祁永升, 许光祥, 李昌耀. 改善二线船闸下游引航道口门区流态的补流措施研究 [J]. 水运工程, 2023(7): 157-163, 224.
QI Y S, XU G X, LI C Y. Supplementary flow measures to improve flow pattern at entrance area of downstream approach channel of second ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 157-163, 224.
- [6] 赵家强, 于广年. 韩江东溪船闸通航水流条件优化试验研究 [J]. 水运工程, 2019(10): 134-140.
ZHAO J Q, YU G N. Experimental study on navigation flow condition of Dongxi ship lock in Hanjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2019(10): 134-140.
- [7] 于广年, 赵家强. 七星墩船闸上游口门区及连接段通航水流条件优化试验研究 [J]. 水运工程, 2022(5): 110-114.
YU G N, ZHAO J Q. Optimization of navigable flow conditions at upstream entrance area and connecting section for Qixingdun ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2022(5): 110-114.
- [8] 王熔荣, 赵根生, 张首元, 等. 导流墩对急弯河道下游口门区水流条件的改善作用 [J]. 水运工程, 2023(3): 99-104.
WANG R R, ZHAO G S, ZHANG S Y, et al. Improvement effect of diversion pier on flow conditions in downstream entrance area of sharp bend channel [J]. Port & waterway engineering, 2023(3): 99-104.
- [9] 郑宝友, 陈波. 船闸上游口门区连接段为弯道的通航水流条件 [J]. 水道港口, 2005, 26(2): 99-102, 108.
ZHENG B Y, CHEN B. Test on navigation flow condition of curving connect section of upstream lock entrance [J]. Journal of waterway and harbor, 2005, 26(2): 99-102, 108.
- [10] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 汉江碾盘山船闸扩建工程整体水工物理模型试验研究报告 [R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2025.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT. Experimental study report on the overall hydraulic physical model of Nianpanshan lock reconstruction and expansion project of Hongshui River [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, 2025.
- [11] 王建平, 邢方亮, 陈奕芬. 弯曲河道船闸口门区通航水流条件优化 [J]. 水运工程, 2019(11): 86-91.
WANG J P, XING F L, CHEN Y F. Optimization of navigable flow condition of ship lock entrance area in curved river [J]. Port & waterway engineering, 2019(11): 86-91.

(本文编辑 王传瑜)