



## 澧水艳洲枢纽船闸改造工程创新与实践\*

周千凯

(湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南长沙 410011)

**摘要:** 针对我国内河航道扩能升级中碍航闸坝船闸改扩建面临的技术难题, 以澧水艳洲枢纽船闸改造工程为研究对象, 系统开展了枢纽总体布置优化、非掩护引航道布置、最末梯级最低通航水位确定、电站船闸结构共用布置创新、高性能材料应用以及狭窄河床施工导流等关键技术研究。通过水工模型试验、实测水文数据分析等方法, 提出将原Z字形坝线调整为一字型新型枢纽布置方案, 使通航流量由原 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 提升至2 a一遇洪水标准 $8\,910\text{ m}^3/\text{s}$ ; 创新采用船闸与电站厂房共用结构, 节约宽度20 m; 在泄水闸消力池内桥墩结构中应用超高性能混凝土, 其抗磨蚀性能达普通混凝土的3倍; 在船闸工程中应用预制混凝土套箱围堰与帷幕灌浆相结合的分期导流工艺, 成功克服狭窄河床高渗透卵石垫层施工难题。结论表明, 该工程实现了通航安全、枢纽运行和防洪调度、生态环保等多目标协同, 为类似碍航闸坝船闸改扩建工程提供了可量化、可推广的技术路径与工程范例。

**关键词:** 船闸改扩建; 枢纽总体布置; 非掩护引航道; 最低通航水位; 新型共用结构; 施工导流

中图分类号: U641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0159-08

### Innovations and practices in ship lock renovation project of Yanzhou Hydro-junction on the Lishui River

ZHOU Qiankai

(Hunan Provincial Water Transport Construction Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China)

**Abstract:** Aiming at the technical challenges faced in the expansion and upgrading of navigation-obstructing dam locks during the capacity enhancement of China's inland waterways, taking the renovation project of the Yanzhou Hydro-junction on the Lishui River as the research object, systematic research is conducted on key technologies such as optimization of the overall hub layout, arrangement of an unprotected approach channel, determination of the minimum navigable water level at the final cascade, innovative shared layout of power plant and lock structures, application of high-performance materials, and construction diversion in narrow riverbeds. Through methods such as hydraulic model tests and analysis of measured hydrological data, a new hub layout scheme is proposed, which adjusted the original Z-shaped dam alignment to a straight-line alignment, increasing the navigable flow discharge from the original  $7,000\text{ m}^3/\text{s}$  to the 2-year recurrence interval flood standard of  $8,910\text{ m}^3/\text{s}$ . Innovatively adopting a shared structure for the ship lock and power plant building, saving a width of 20 m. Ultra-high performance concrete (UHPC) is applied in the bridge pier structures within the stilling basin of the sluice gate, which has three times the abrasion resistance of ordinary concrete. The staged diversion method combining precast concrete enclosure cofferdams with curtain grouting is applied in the ship lock project, successfully overcoming the construction challenges of highly permeable gravel bedding in a narrow riverbed. The conclusions indicate that this project has achieved multi-objective coordination including navigation safety, hub operation,

收稿日期: 2025-08-12 录用日期: 2025-09-12

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFB2605800); 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(202124)

作者简介: 周千凯(1986—), 男, 硕士, 正高级工程师, 注册土木工程师(港口与航道工程), 从事航电枢纽、船闸及航道工程的设计、研究与项目管理工作。

flood control scheduling, and ecological environmental protection, providing a quantifiable and promotable technical path and engineering example for similar renovation projects of navigation-obstructing locks.

**Keywords:** lock renovation; overall hub layout; unsheltered approach channel; minimum navigable stage; innovative shared structure; construction flow diversion

20世纪70年代以来,我国为开展水资源综合利用,多数河流兴建梯级闸坝,为区域电力供应、农田灌溉、水利防洪作出了重要贡献,但受制于对水运交通的重视程度不足,多数闸坝通航建筑物存在等级低、尺度小、通航条件不佳等问题。同时,由于国家基础设施建设和城镇化发展迅速,大量河段无序采砂导致天然水位持续下降,进而引起门槛水深不足、断航情况时有发生。目前,多数梯级渠化河流均预留二线或三线船闸空间,但针对未预留船闸位置或原有为非通航河流的枢纽改造研究较少,作为澧水下游高等级航道瓶颈艳洲枢纽,其碍航问题和复杂边界条件的制约尤为突出,有必要针对该工程案例进一步总结提炼,以期类似工程建设提供思路。

已建碍航枢纽进行通航建筑物改造技术难度大、制约因素多,涉及枢纽安全、发电、防洪、环保等诸多复杂因素。为解决澧水艳洲枢纽船闸通航瓶颈问题。近年来,组织设计和开展了一系列关键技术研究,包括:弯曲分汊河段枢纽水流特性与通航条件改善措施研究、电站、泄水闸与船闸共用渠道通航水流条件研究、基于生态与通航多目标优化的分汊河段扩建船闸关键技术研究等多个关键技术研究,本文总结了艳洲枢纽船闸建设过程中系统开展的异形枢纽总体布置优化、非掩护引航道布置、最末梯级最低通航水位确定、电站船闸结构共用布置创新、高性能材料应用及狭窄河床施工导流等关键技术研究。目前,艳洲枢纽船闸改造工程已于2021年开工建设,并于2025年建成通航,其成功案例可为解决我国类似航道扩能升级中碍航闸坝船闸改造难题提供借鉴。

## 1 工程概况

艳洲枢纽为澧水干流最下游梯级,为日调节水库,是一座以发电为主,兼顾航运、公路交通和灌溉的综合利用工程。工程始建于1976年10月,船闸工程于1994年7月竣工。原枢纽船闸布置于右汊临中洲,船闸等级为300吨级,船闸尺度为 $130\text{ m}\times 12\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ (有效长度 $\times$ 宽度 $\times$ 门槛水深)。由于坝顶桥梁净高不足,下游常年采砂引起河床下切等影响,通航净高和船闸门槛水深常年不满足要求,成为制约澧水高等级航道的瓶颈。

项目腹地有葛洲坝特种水泥、安徽海螺水泥、南方新材料、石门电厂等大型适水企业,其原材料及产品运输对水运通道需求迫切<sup>[1]</sup>。根据运量预测,艳洲枢纽过坝量为2300万t/a,为匹配通过能力,该次艳洲改扩建船闸标准采用2000吨级,设计通过能力为2420万t/a,船闸尺度为 $280\text{ m}\times 34\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 门槛水深)。

## 2 原枢纽总体布置特点和难题

### 2.1 原枢纽布置特点和制约条件

艳洲原枢纽坝线采用Z字形布置,原枢纽建筑物从左至右分别为乔家河电站、20孔泄水闸、鱼嘴连接坝段、滚水溢流坝、300吨级船闸、艳洲电站。左岸为现有澧县县城,坝址上游320m有澧县自来水厂取水口,右岸为城头山地质公园彭山园区,原艳洲枢纽没有预留扩建船闸位置。坝址左汊河道和艳洲涉及一级水源保护区,现有300吨级船闸不具备原址改扩建条件,左岸为澧县县城和防洪大堤,无通航建筑物布置空间,且不能影响电站运行及大坝安全,建设条件复杂。枢纽改造前总体布置见图1。

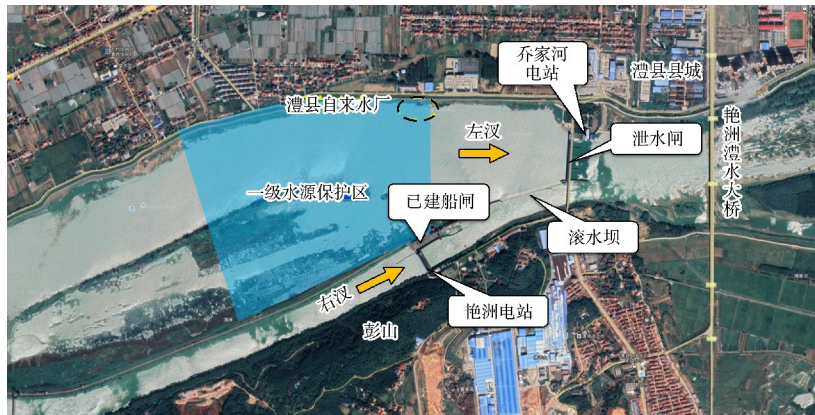


图1 原艳洲枢纽总体布置(改造前)

Fig. 1 Original layout plan of Yanzhou Hydro-junction( pre-renovation)

## 2.2 船闸下游口门区、桥区通航条件复杂

已建船闸上游口门区临近艳洲电站, 下游口门区临近滚水坝, 超  $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$  流量泄流, 严重影响下游口门区通航条件, 坝下  $800\text{ m}$  又存在艳洲澧水大桥, 主通航孔位于左岸, 航道处于 S 形弯道, 若在原有闸址改扩建船闸, 将受到现有枢纽布置的制约, 口门区及桥区水流条件无法满足通航标准要求<sup>[2]</sup>。

## 2.3 船闸布置影响枢纽泄流能力

为满足通航要求, 需要对原艳洲电站、滚水坝进行拆除后重建。右汊河床仅  $126\text{ m}$ , 需布置船闸、电站及泄水闸, 在狭窄河床条件下, 施工期行洪及新建泄水闸泄流能力是否满足设计洪水标准存疑, 狭窄空间下布置多个挡水建筑物面临困难。

## 2.4 桥墩位于泄水闸和电站高速水流区

为方便后期电站运维, 电站检修桥梁下部结构位于电站和泄水闸消力池内, 水流翻滚磨蚀大, 对桥梁结构耐久性提出更高要求。

## 3 枢纽改造后总体布置及引航道布置特点

### 3.1 枢纽改造后总体布置

为彻底规避下游口门区及桥区通航水流条件, 将原枢纽坝线由 Z 字形调整为一字形, 即拆除原枢纽艳洲电站、300 吨级船闸、滚水坝, 新建 2 000 吨级船闸、还建电站、5 孔泄水闸(替代原滚水坝), 同时将位于下游引航道口门区的艳洲澧水大桥引桥部分改造为主通航孔, 以满足净空要求。枢纽改造后总体布置见图 2。

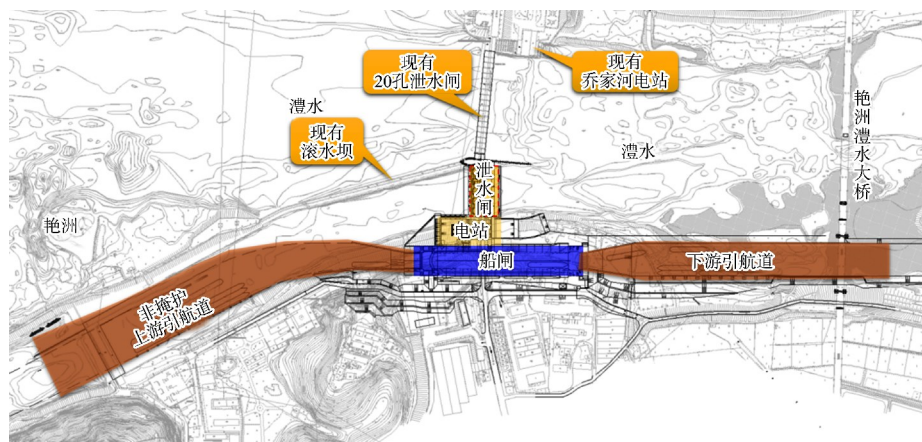


图2 艳洲枢纽总体布置(改造后)

Fig. 2 Overall layout plan of Yanzhou Hydro-junction( post-renovation)

上下游引航道采用不对称布置形式,上游采用直进曲出,下游采用曲进曲出,上下游主导航墙、靠船墩均布置在右侧,上游辅导航墙布置在电站引水渠与引航道之间,兼有隔水墙作用,下游辅导航墙布置在电站尾水渠边缘,与船闸隔水墙衔接。受限于上游直线段不足,创新采用非掩护引航道布置,即停泊段外置,上游制动段与停泊段之间采用弯道衔接,引航道采用曲线布置形式,利用现有右汊河道,河道宽度约为94~130 m,停泊段位于艳洲右汊河道右岸岸侧。自上闸首往上游分别为导航段144 m、曲线调顺段225 m、停泊段280 m、制动段225 m。

若按规范要求设置上游直线段,将侵占一级水源保护区,其保护区内自来水厂取水关系到澧县全城群众饮水安全问题,因此引航道只能采用曲线布置,并利用现有右汊河道作为引航道,相应拆除现有艳洲电站和300吨级船闸。鉴于现有河床宽度约为120 m,按照JTS 305—2025《船闸总体设计规范》<sup>[3]</sup>要求,考虑停靠两列船宽、富余宽度和通航水域共需70 m。

### 3.2 上游非掩护引航道技术要点及试验结果

与常规船闸布置考虑工况不同,艳洲船闸上游引航道为非掩护引航道<sup>[4]</sup>,且电站、泄水闸与船闸引航道共用同一渠道,需考虑“3种控制性工况”和“通航水流条件与停泊条件”。采用物理模型试验,结合枢纽不同调度方式,选取最小通航流量(98 m<sup>3</sup>/s)至最大通航流量(8 910 m<sup>3</sup>/s)共七级流量设置,开展逐级试验分析,提出“3种控制性工况”:1)最大通航流量工况,重点分析引航道停泊段和导航调顺段通航水流条件,鉴于该工况上下游水位差不超过0.3 m,叠加船闸灌泄水后引起的流速较小可忽略不计,可不作为引航道停泊条件的控制工况;2)最大水头(13.97 m)灌泄水工况,重点分析引航道停泊段船舶停泊条件;3)电站满发流量(541 m<sup>3</sup>/s)叠加对应水位的船闸灌泄水工况,既分析引航道停泊段和导航调顺段通航水流条件,又重点分析叠加船闸灌水时的停泊

条件。

试验表明,第1种控制性工况最大通航流量(2 a一遇流量为8 910 m<sup>3</sup>/s),最大纵向流速1.47 m/s,最大横向流速0.28 m/s,满足JTS 305—2025《船闸总体设计规范》中引航道流速要求;第2种控制性工况最大水头灌泄水工况(上游40.20 m,下游26.23 m),引航道内最大流量为446.42 m<sup>3</sup>/s,最大流速为0.42 m/s,满足JTS 306—2001《船闸输水系统设计规范》<sup>[5]</sup>中引航道流速要求0.5 m/s;第3种为电站满发流量叠加对应水位船闸灌泄水工况(上游40.20 m,下游32.57 m),叠加船闸灌泄水流量后,相同点位增加流速范围在0.07~0.12 m/s,共用渠道内最大瞬时流量为887.7 m<sup>3</sup>/s(其中电站满发流量541 m<sup>3</sup>/s,船闸灌泄水峰值流量346.7 m<sup>3</sup>/s),最大流速0.49 m/s,满足JTS 306—2001《船闸输水系统设计规范》中引航道流速要求0.5~0.8 m/s的下限值,需在实际运行中予以关注。

### 4 船闸下游最低通航水位的确定

考虑到类似河段最末梯级下游最低通航水位持续下行末端梯级船闸出现坝下河床冲刷导致枯水位下降的现象较为普遍,如湘江长沙综合枢纽坝下预留远期下切1.5 m,在10 a后其坝下河床高程已低于原设计预留的下切值,沅水桃源水电站受湖区采砂影响,设计500吨级船闸全年近一半时间门槛水深不达标。但以上案例,要么未考虑坝下水位下切,要么对其预估不足,导致预留的防御性余量不够<sup>[6]</sup>。

艳洲枢纽为澧水干流最末端梯级,其坝下为天然河道,且工程河段范围内近年来频繁的人类活动导致该段河床形态发生了巨大变化,河床普遍下切1~5 m,导致下游航道水深不足。为分析未来水位下切情况,系统性逐段分析了从艳洲坝址到澧水入洞庭湖(南嘴水文站)沿程水面线趋势,并采用数模计算和实测2013—2019年下游石龟山站、南嘴站、草尾站95%保证率水位的降落值<sup>[7]</sup>。

同时，综合考虑下游常德—鮎鱼口 2 000 吨级航道建设和澧水下游河道采砂规划的实施情况，分析认为，下游洞庭湖大部分为生态保护红线和水产种质保护区，均为禁采区，近期大范围采挖可能性较低，综合考虑近期下游最低通航水位采用津市站 95% 保证率水位 27.73 m，远期考虑河道下切，采用南嘴水文站 95% 保证率水位 26.23 m，即下切值采用 1.5 m。枢纽坝下沿程水面实测比降见图 3。

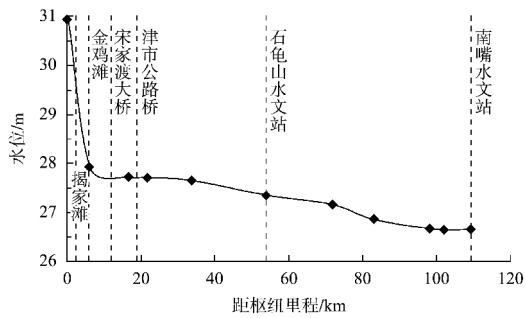


图 3 枢纽坝下至南嘴水文站沿程水位实测值(95%保证率)

Fig. 3 Measured water surface elevation along reach from the hydro-junction downstream to Nanzui Hydrological Station(95% assurance rate)

### 5 新型船闸及电站厂房共用结构布置

根据枢纽改造总体布置，需在原枢纽右侧河道 126 m 宽度范围内依次布置 5 孔泄水闸、3 台机组、2 000 吨级船闸。由于下游河道右岸为蓄洪垸堤防，船闸轴线位置布置受限，且泄水闸受泄流能力控制，电站布置空间严重不足。

为此，考虑电站厂房安装层下游结构为素混凝土，船闸临电站侧为闸室墙，创新采用了船闸闸墙与电站厂房侧向防洪墙共用结构的设计方案<sup>[8-10]</sup>，并将输水系统主廊道布置于厂房安装层以下，不仅大幅节省空间(约 20 m)，且节省闸室墙混凝土约 2.1 万 m<sup>3</sup>，节省工程费用 1 475 万元。由于船闸下游引航道只能布置于下游艳洲澧水大桥桥跨位置，船闸轴线位置布置受限，且艳洲右汊河床狭窄，必须布置 5 孔泄水闸才能满足枢纽泄流条件，因此将船闸与电站厂房部分结构共用，节省布置宽度 20 m，解决了狭窄空间下多建筑物的布置问题，见图 4。在实施阶段需特别注意电站厂房结构缝的竖向止水和水平止水的设置问题，统筹结构受力和止水效果。

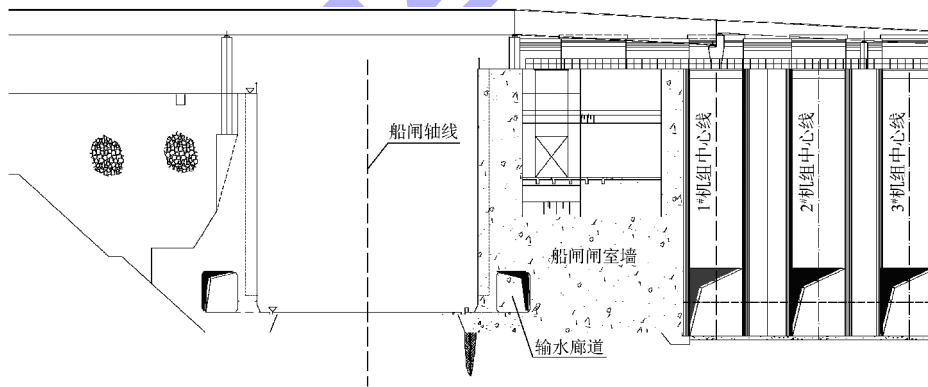


图 4 新型船闸及电站厂房共用结构布置

Fig. 4 Integrated structural layout of the new ship lock and powerhouse

### 6 超高性能混凝土在检修桥的应用

艳洲电站检修桥桥墩位于泄水闸消力池内，根据模型试验，最大水流速度超过 20 m/s，冲刷强度极高，桥墩需要强大的抗冲刷性能<sup>[11]</sup>，为此创新性地将致密、抗高压冲刷的超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 应用于该区域桥墩，用以抵抗高速水流的冲刷，有效解决

了传统桥墩外贴钢板容易锈蚀以及内部掏空难以监测的问题，并成功授权一种抗冲刷组合桥墩等专利 2 项。

电站检修桥 1#~7# 桥墩墩柱(高程 37.2 m 以下位置): UHPC R150 抗冲刷混凝土。采用的 UHPC R150 与普通混凝土主要性能指标对比，见表 1。UHPC 的组成部分包括水泥、矿物掺合料、

细集料、钢纤维(体积含量不低于2.5%)、纳米二氧化硅或纳米碳酸钙、外加剂等材料。因桥墩位于消力池内部,施工时应先完成桥梁基础施工,

再开始浇筑消力池底板结构,见图5。普通混凝土接UHPC界面则需要在施工时将接触面UHPC设置成凹凸锯齿状(凹槽深度20 cm,凹槽间距20 cm)。

表1 UHPC与普通混凝土的主要性能指标对比

Tab. 1 Comparison of main performance indicators between UHPC and conventional concrete

类别	抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa	弹性模量/ GPa	材料断裂韧性/ (kJ·m <sup>-2</sup> )	氯离子扩散系数/ (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	冻融剥离/ (g·cm <sup>-2</sup> )	吸水特征/ (kg·m <sup>-3</sup> )	磨损 系数
UHPC	150~230	25~60	40~60	20~40	<0.01×10 <sup>-11</sup>	7	0.2	1.32
普通混凝土	30~60	2~5	30~40	0.12	>1.0×10	>1 000	2.7	4
UHPC/普通混凝土	约4倍	约10倍	约1.2倍	约200倍	约1/100	约1/140	约1/13	约1/3

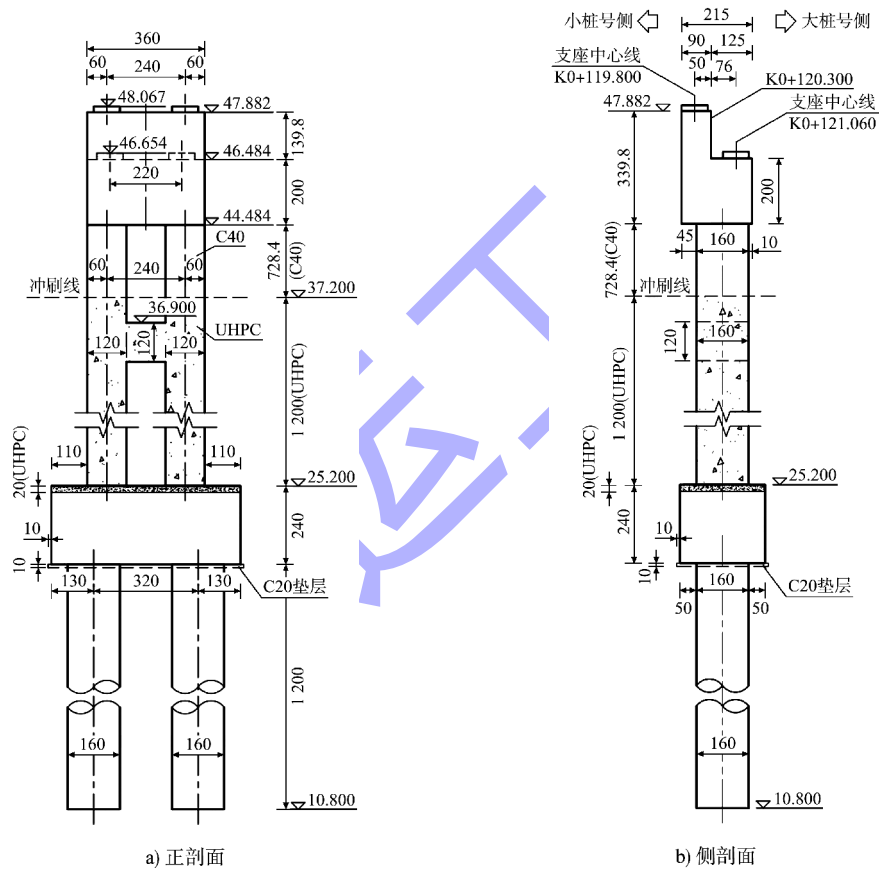


图5 电站检修桥断面结构布置(尺寸:cm;高程:m)

Fig. 5 Section structure layout of powerhouse service bridge( dimension:cm;elevation:m)

### 7 狭窄河床施工导流及预制混凝土围堰结构

原有右汊上游存在原艳洲电站,若采用全河床拦断全年围堰,需补偿3 a施工期电费损失,因此采用分期导流方式。考虑到右汊河床宽度仅126 m,为有效减小河床占压空间,左侧纵向围堰采用混凝土重力式,分为水下混凝土与水上混凝土两部分,设计标准为10 a一遇洪水位,对应流量为14 200 m<sup>3</sup>/s。根据设计施工水位,水下混凝土的

顶高程设计为33.0 m,宽度为4 m,高度平均6 m,采用C20混凝土浇筑,围堰底部砂卵石覆盖层防渗采用帷幕灌浆封闭,待水下混凝土基础部分围堰闭气后,继续浇筑上部围堰结构混凝土浇筑,见图6。

考虑到纵向围堰水下混凝土施工难度<sup>[12-14]</sup>,创新将预制拼装混凝土套箱工艺应用于船闸工程,现场利用横向围堰戗堤作为施工拼装和吊装平台,由200 t履带吊现场吊装(个别吊距超限采用300 t

履带吊)。预制混凝土套箱分为 4 块，为减轻质量采用框架梁板结构，并设置钢筋混凝土暗梁 (150 mm×100 mm)，板厚 100 mm，套箱高度采用 6 000 mm，施工现场见图 7。一期围堰于 2022 年汛前完成填筑和浇筑，并经受住了 3 个洪水期考验。

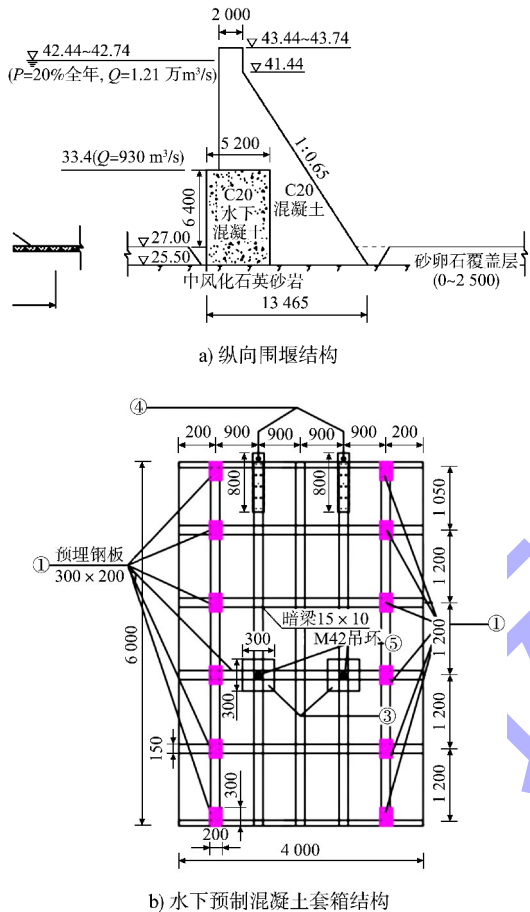


图 6 预制混凝土套箱纵向围堰结构布置 (尺寸:mm;高程:m)

Fig. 6 Structural layout of longitudinal cofferdam with precast concrete enclosure (dimension;mm;elevation;m)

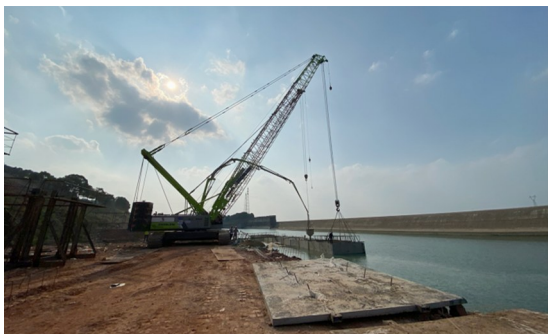


图 7 预制混凝土套箱围堰施工现场

Fig. 7 Construction site of precast concrete enclosure cofferdam

## 8 结语

1) 采用一字形坝线重组枢纽布置，彻底规避原 S 形弯道航段与桥区不良流态，将最大通航流量从 7 000 m<sup>3</sup>/s 提升至 8 910 m<sup>3</sup>/s(2 a 一遇)，显著提升通航保证率。为规避河势和生态环保等限制条件，实践了非掩护引航道布置，采用物理模型试验研究进行验证，满足规范要求。但受限于枢纽调度的复杂性，非掩护引航道在船闸与电站联合运行中的长时段水流非恒定态特性需进一步观测。

2) 针对最下游梯级船闸最低通航水位确定难题，系统性逐段分析下游各河段水面比降控制性趋势，并充分考虑拟实施的航道工程和采砂影响，对水工结构按照下游控制性水文站南嘴水文站 95% 保证率水位远期预留 1.5 m，确保足够门槛水深，未来可根据水位下降情况，根据需要适当疏浚以适应远期水位下降。

3) 将船闸闸室墙与电站厂房侧墙共用结构，节约横向布置宽度 20 m，减少混凝土用量 2.1 万 m<sup>3</sup>，降低工程造价约 1 475 万元，为狭窄河床条件下枢纽建筑物紧凑布置提供了成功技术案例。

4) 在泄水闸消力池内桥墩结构中应用 UHPC 材料，其抗压强度达 150 MPa、磨耗系数仅为普通混凝土的 1/3，有效解决了高速水流环境下桥墩抗冲刷与耐久性难题。受限于研究时间，UHPC 桥墩长期在高速含沙水流下的性能演化需持续跟踪监测。

5) 提出基于预制混凝土套箱与帷幕灌浆的组合式导流工艺，实现狭窄卵石质河床条件下分期施工，纵向围堰经受 3 个汛期考验，为类似工况施工导流提供了可靠案例。

## 参考文献:

[1] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 澧水石门至澧县航道建设工程初步设计文件[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2020.

Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd. Preliminary design report for Lishui Shimen-Lixian waterway construction project[R].

- Changsha: Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 2020.
- [2] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 澧水石门至澧县航道建设工程艳洲枢纽改造工程整体模型试验报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2020.
- Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT. Comprehensive physical model test report for Yanzhou Hub retrofit in Lishui Shimen-Lixian waterway construction project [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, 2020.
- [3] 船闸总体设计规范: JTS 305—2025 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2025.
- Code for master design of shiplocks: JTS 305-2025 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2025.
- [4] 周千凯, 乾东岳, 凌威. 非掩护引航道通航控制标准分析方法[J]. 水利水运工程学报, 2025(6): 37-45.
- ZHOU Q K, QIAN D Y, LING W. Analysis method for navigation control standards of non-sheltered approach channels[J]. Hydro-science and engineering, 2025(6): 37-45.
- [5] 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- Design code for filling and emptying system of shiplocks: JTJ 306-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [6] 唐蔚, 周千凯, 周乐序, 等. 艳洲枢纽下游设计最低通航水位论证[J]. 水运工程, 2022(11): 128-132.
- TANG W, ZHOU Q K, ZHOU L X, et al. Demonstration of design lowest navigable water level downstream from Yanzhou Hydro-junction[J]. Port & waterway engineering, 2022(11): 128-132.
- [7] 彭厚德, 周千凯. 径流式枢纽改扩建船闸确定最低通航水位的方法[J]. 水运工程, 2019(3): 62-66.
- PENG H D, ZHOU Q K. Method of determining the lowest navigable water level of run-of-the-river hub ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 62-66.
- [8] 金国强, 张公略, 李浙江, 等. 富春江船闸扩建改造工程创新设计与实践[J]. 水运工程, 2018(2): 98-104.
- JIN G Q, ZHANG G L, LI Z J, et al. Innovative design and practice of reconstruction project of Fuchunjiang ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2018(2): 98-104.
- [9] 李召辉, 原学明. 百龙滩船闸改扩建总体布置方案[J]. 水运工程, 2025(6): 136-143.
- LI Z H, YUAN X M. General layout scheme of Bailongtan ship lock renovation and expansion[J]. Port & waterway engineering, 2025(6): 136-143.
- [10] 陈明, 李初民, 王多银, 等. 左江山秀船闸改扩建工程引航道通航水流条件[J]. 水运工程, 2021(11): 66-73.
- CHEN M, LI R M, WANG D Y, et al. Navigation flow conditions in approach channel of reconstruction and extension project for Shanxiu ship lock located in the Zuojiang River [J]. Port & waterway engineering, 2021(11): 66-73.
- [11] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.
- Editorial Board of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's bridge engineering research: 2024 [J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(12): 1-160.
- [12] 周千凯, 李帆, 周林辉, 等. 沅水桃源枢纽二线船闸整体布置试验研究[J]. 水运工程, 2025(1): 145-153, 198.
- ZHOU Q K, LI F, ZHOU L H, et al. Test on overall layout of second ship lock at Taoyuan Hub in Yuan River [J]. Port & waterway engineering, 2025(1): 145-153, 198.
- [13] 熊英建, 李贵阳. 艳洲枢纽工程一期纵向围堰方案研究[J]. 水运工程, 2023(12): 178-182.
- XIONG Y J, LI G Y. Longitudinal cofferdam scheme for Yanzhou hub project phase I [J]. Port & waterway engineering, 2023(12): 178-182.
- [14] 唐宏斌, 熊英建, 姜兴良. 艳洲枢纽横向土石围堰的防渗设计和结构稳定性研究[J]. 水运工程, 2023(7): 174-179, 195.
- TANG H B, XIONG Y J, JIANG X L. Impermeability design and structural stability of transverse earth-rock cofferdam of Yanzhou Hub [J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 174-179, 195.