



# 百龙滩改建船闸下游引航道口门区 通航水流条件试验研究

赵家强<sup>1</sup>, 原学明<sup>2</sup>, 于广年<sup>1</sup>

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456;  
2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 百龙滩改建船闸尺度提升较大, 限于下游山区峡谷弯曲型河道条件, 船闸平面布置难度极大。采用 1:80 整体水工物理模型, 研究下游引航道口门区的通航水流条件, 并提出通航条件的改善措施。结果表明: 电站、溢流坝下泄水流交汇后, 因隔流堤束窄导致河道纵向持续收缩, 水流归于窄深河槽且动力持续增强, 隔流堤后河道突扩, 引航道口门区形成较大横流和回流等不良流态, 通航条件较差。通过高陡边坡开挖拓宽河道、隔流堤开孔透水以及设置透水桩等工程措施, 可显著降低主流与口门区的相对流速梯度, 有效改善横流超标及回流等不良流态问题, 显著提升通航条件。

**关键词:** 峡谷弯曲河道; 引航道; 口门区; 隔流堤开孔; 透水桩

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0145-07

## Experimental research on navigable flow conditions in entrance area of downstream approach channel of renovated ship lock at Bailongtan

ZHAO Jiaqiang<sup>1</sup>, YUAN Xueming<sup>2</sup>, YU Guangnian<sup>1</sup>

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;  
2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** The scale of the renovated ship lock at Bailongtan has been greatly improved, but due to the curved river conditions in the downstream mountainous canyon, the layout of the ship lock is extremely difficult. By utilizing a 1:80 overall hydraulic physical model, the navigation flow conditions in the entrance area of the downstream approach channel are investigated, and measures to improve navigation conditions are proposed. The results show that after the confluence of flow discharged from the power station and the overflow dam, the continuous longitudinal contraction of the channel due to the narrowing effect of the diversion dike causes the flow to concentrate into a narrow and deep riverbed with persistently increasing dynamics. The sudden expansion of the channel behind the diversion dike leads to unfavorable flow patterns such as significant cross flows and back-flow in the entrance area of the approach channel, resulting in poor navigation conditions. By implementing engineering measures such as excavating high and steep slopes to widen the river channel, and widening the gorge's high side slopes, creating permeable openings in the diversion dike, and installing permeable piles, the relative velocity gradient between the main flow and the entrance area can be significantly reduced. This effectively mitigates issues such as excessive cross-flow and back-flow, substantially improving navigation conditions.

**Keywords:** curved river channel in canyon; approach channel; entrance area; impermeable dike with holes; permeable pile

收稿日期: 2025-03-14

作者简介: 赵家强(1986—), 男, 高级工程师, 从事通航水力学研究工作。

船闸作为内河航运系统中的关键节点设施,其通过能力直接决定了整个航道网络的运输效率和经济效益。随着航运业的发展,许多早期建设的船闸由于设计标准落后、技术条件有限等原因,逐渐无法满足日益增长的航运需求,主要体现在船闸通过能力不足、船舶大型化趋势导致现有船闸尺寸受限、配套设施不足、以及部分老旧船闸存在安全隐患等方面,因此,对现有船闸进行改建升级,成为提升航运效率、保障航运安全的重要举措。然而,改扩建船闸面临已有枢纽建筑物和河道特性等多重制约,使得其技术问题相较枢纽同期建设的船闸较为复杂<sup>[1-4]</sup>。

山区峡谷弯曲型河道船闸改建,因河道本身具有弯曲、河床断面狭窄、水位流量变幅大及流态复杂等特性<sup>[5]</sup>,技术难度相对更大,难以找到较长的顺直河段或微弯段来满足船闸和上、下引航道及口门区布置的需要,限制了直线段布置条件。

针对不同的船闸改扩建工程存在的问题,提出改善通航条件的工程措施包括:赵志舟等<sup>[6]</sup>建立峡谷型弯曲河道枢纽通航建筑物概化模型,研究下游引航道长度、隔流墙堤头布置形式、堤身开孔等工程措施对乌江银盘电站下游引航道口门区通航条件的影响,提出合理的引航道布置方式;张爱平等<sup>[7]</sup>提出延长上游导流堤、调整透空堤范围、调整航线等改善措施,解决了山区河势受限段改建船闸通航问题;王建平等<sup>[8]</sup>针对弯曲河道船闸口门区受三维螺旋流和口门区水流特性共同影响下水流条件较差的问题,提出将工程措施前置上移,并由“点”形改为“线”形,以调整河势为手段削弱弯道螺旋流的不利影响,构建口门缓流区,再辅以局部工程措施进一步改善口门区的横向流速和回流流速;路莅枫等<sup>[9]</sup>总结国内外透空式导流结构改善船闸引航道口门区通航条件的应用情况,对比研究多种透空式导流结构的整治措施对水流条件的改善效果,提出了适用于山区复杂条件下改善船闸口门区通航水流条件的新型结构导流屏。

百龙滩水电站现有船闸等级偏低、尺度小、通过能力低,不适应水路运量增长发展的需求,更无法满足当前水运规划的航道等级标准和预测的中远期过坝货运量要求,迫切需要改建。而船闸下游为典型峡谷河道,河槽窄深且纵向持续收缩,电站尾水渠与下游航道斜向连接,船闸中心线与下游航道中心线夹角约为 $55^{\circ}$ ,河道狭窄弯曲,自身条件有限,极大制约了船闸下游引航道口门区的平面布置。本文为研究百龙滩改建船闸平面布置与通航水流条件的问题,开展了整体定床物理模型试验,验证确定新建船闸平面布置方案的可行性及改善通航水流条件的措施,并在此基础上提出满足要求的船闸平面布置方案。

## 1 工程概况

百龙滩水电站是红水河梯级开发的第七级电站,是一座以发电为主,兼有航运等综合利用效益的中型水电枢纽工程,其上游距大化水电站 27.6 km,下游距乐滩水电站 76.2 km。枢纽由混凝土重力式溢流坝、河床式厂房、开关站、船闸、冲沙闸、接头坝组成。碾压混凝土溢流坝布置于左岸主河道上,为开敞式自由泄流,总长 274 m,最大坝高 28 m。堰顶高程 126、130 m,长度均为 100 m;碾压混凝土接头坝顶高程 135 m、长 74 m。发电厂房布置于右岸滩地上,厂房两侧各设 4 m×8 m(宽×高)冲沙孔 1 个,进水口高程 93 m。

百龙滩水电站现有通航建筑为 500 吨级船闸,布置在右岸滩地岸边,总长 1 099.8 m,通航流量  $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 。上游引航道、闸首、闸室按  $2\times 500\text{ t}$  驳船队远景通航尺寸要求设计,下游引航道按  $2\times 250\text{ t}$  驳船队尺寸要求设计,闸室有效尺寸为  $120\text{ m}\times 12\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ (长×宽×吃水)。改建船闸拟将现有船闸及右侧冲沙闸拆除,并在此基础上重建,按Ⅲ级 1 000 吨级船闸标准建设(兼顾通航  $2\times 1\,000\text{ t}$  吨级顶推船队),闸室有效尺度为  $230\text{ m}\times 23\text{ m}\times 5\text{ m}$ (长×宽×门槛水深)。百龙滩枢纽河段河势见图 1。

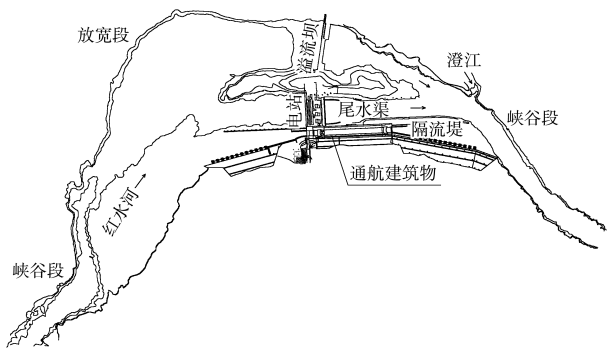


图 1 百龙滩枢纽河段河势  
Fig. 1 River regime of Bailongtan Hydro-junction

2 模型设计及验证

根据模型试验要求, 依据重力相似理论, 综合考虑模型雷诺数、枢纽上下游地形条件、模型供水流量和试验场地等因素, 整体模型设计为正态, 几何比尺为 1:80。考虑到模型上、下游边界条件对通航试验水流条件的影响, 模型上游模拟至枢纽上游 2.3 km, 下游模拟至枢纽以下约 2.5 km, 模拟总长约 4.8 km。

根据实测资料, 模型开展了流量为 1 720 m<sup>3</sup>/s 的水位及断面流速验证。验证结果表明, 沿程测点的模型水位与天然水位差均在±0.1 m 以内, 见表 1。各测流断面流速分布与原型基本一致, 流量偏差在 5% 以内, 见图 2, 验证结果满足相关规范要求。

| 表 1 沿程水位模型与实测偏差值                                                                      |     |        |        |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------|--------|-------|
| Tab. 1 Deviation value between water level model along the way and actual measurement |     |        |        |       |
| 枢纽                                                                                    | 水尺号 | 实测水位/m | 模型水位/m | 差值/m  |
| 枢纽上游                                                                                  | 尺 1 | 127.26 | 127.27 | 0.01  |
|                                                                                       | 尺 2 | 127.26 | 127.27 | 0.01  |
|                                                                                       | 尺 3 | 127.26 | 127.26 | 0.00  |
| 枢纽下游                                                                                  | 尺 4 | 116.82 | 116.75 | -0.07 |
|                                                                                       | 尺 5 | 116.64 | 116.65 | 0.01  |
|                                                                                       | 尺 6 | 116.61 | 116.64 | 0.03  |
|                                                                                       | 尺 7 | 116.60 | 116.59 | -0.01 |
|                                                                                       | 尺 8 | 116.58 | 116.58 | 0.00  |

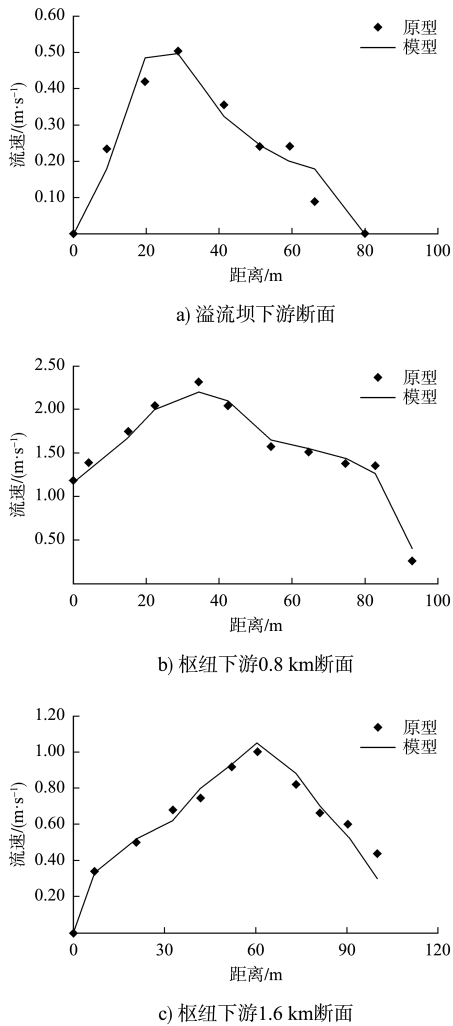


图 2  $Q=1\,720\text{ m}^3/\text{s}$ , 各测流断面平均流速分布验证  
Fig. 2 Verification of average flow velocity distribution at each flow measurement section under  $Q=1\,720\text{ m}^3/\text{s}$

3 设计方案通航水流条件

3.1 下游引航道平面布置

百龙滩船闸位于一个大型“几字湾”处, 受电站周边地形所限, 船闸闸位选择空间有限, 根据船闸闸位比选结果, 推荐扩建船闸布置于右岸原船闸和冲沙闸的位置, 尽量利用原有建筑物进行改造, 并尽量减少扩建船闸对电站厂房的影响和电站运行的影响<sup>[10]</sup>。改建船闸布置于中间顺直过渡段右岸滩地, 左侧与电站相邻, 船闸主体段布置在坝轴线以下, 船闸中心线和坝轴线正交, 闸室有效尺度为 230 m×23 m×5 m (长×宽×门槛水深), 船闸主体段长 315 m, 由上闸首、闸室和下

闸首组成,新建船闸采用不对称布置形式,船舶上、下行过闸时均为曲线进闸,直线出闸。

受河势条件限制,船闸下游口门区较为弯曲,引航道中心线与下游航道中心线夹角约  $55^\circ$ ,原河道弯曲半径较小,通过将口门区左侧河道及岸坡进行开挖拓宽及高陡边坡<sup>[11]</sup>处理,开挖底高程 105 m,桩顶高程 150 m,增加弯道段口门区航道弯曲半径至 480 m;口门区后段航道处于河道中部,直接与主航道相衔接。引航道长约 305 m,底高程 105.0 m。引航道左侧布置隔流堤,通过利用原船闸隔流堤并在其基础上加高,长度约 245 m,顶高程 128.0 m;停泊段及主导航墙布置于引航道右岸,长度分别为 230、111.3 m,顶高程 130.45 m。百龙滩改建船闸下游引航道设计方案平面布置见图 3。

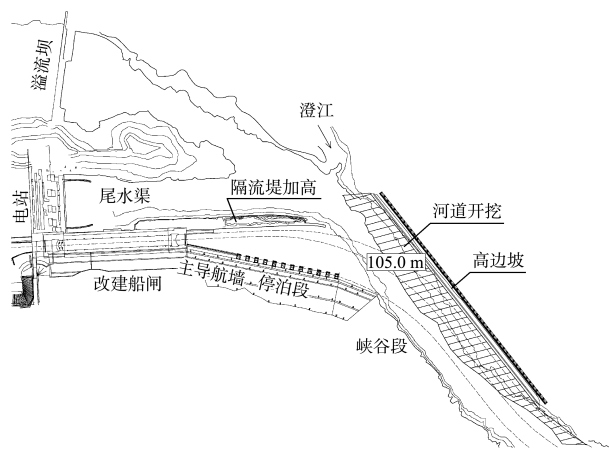


图3 百龙滩船闸下游引航道平面布置(设计方案)  
Fig. 3 Plan layout of downstream approach channel of Bailongtan Ship Lock (design scheme)

### 3.2 通航水流条件分析

试验对下游引航道口门区及连接段通航水流条件进行研究,试验工况分别选取 1 150、2 180  $\text{m}^3/\text{s}$  (电站满发)、3 500  $\text{m}^3/\text{s}$  (现状最高通航流量)以及 5 000  $\text{m}^3/\text{s}$  (工程河段通航限制流量)。

试验结果表明,河道及左侧岸坡开挖拓宽后,主流流速有所降低,但水流过隔流堤堤头后逐渐向右侧航道扩散,加之航道弯曲,口门区弯顶段附近水流与航道存在约  $15^\circ \sim 20^\circ$  的交角。流量  $Q \leq 2\,180\, \text{m}^3/\text{s}$  时,船闸口门区中段航道左侧(隔流堤下游 100~250 m 范围)水流纵向流速约 1.30~1.80 m/s,最大横向流速 0.35~0.46 m/s,见图 4,横向流速超出规范要求;此外,受口门区动静水流速梯度

较大影响,斜向水流在右侧凸岸制动段形成回流,并延伸至停泊段,导致该区域形成长约 260 m 的顺时针回流区,其中停泊段后段 100 m 范围最大回流流速达到 0.70 m/s,水流条件较差。船模试验表明,上行船舶无法顺利靠泊。

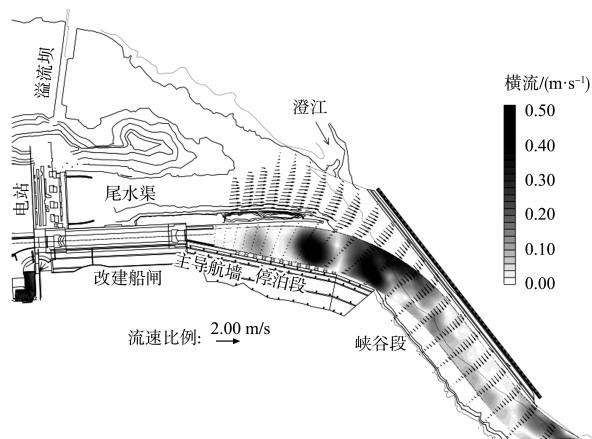


图4  $Q=2\,180\, \text{m}^3/\text{s}$ , 下游引航道口门区横向流速分布(设计方案)  
Fig. 4 Horizontal velocity distribution in entrance area of downstream approach channel under  $Q=2\,180\, \text{m}^3/\text{s}$  (design scheme)

随流量增加,河道主流及口门区航道流速快速增长,流量 3 500、5 000  $\text{m}^3/\text{s}$  时口门区弯顶段横流超标范围及强度进一步加剧,横向流速最大达到 0.40~0.65 m/s,见图 5,而纵向流速则增长至 2.00~2.30 m/s,均超出规范要求。引航道及口门区回流范围及流速也进一步增长,流量 5 000  $\text{m}^3/\text{s}$  时,停泊段后段 130 m 回流流速达到 0.60~1.00 m/s,最大回流位于停泊段后段 130 m 范围,对船舶进出闸及靠泊安全均产生较大不利影响。

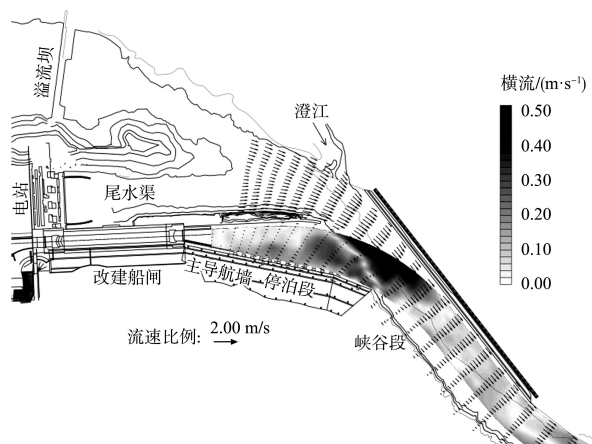


图5  $Q=5\,000\, \text{m}^3/\text{s}$ , 下游引航道口门区横向流速分布(设计方案)  
Fig. 5 Horizontal velocity distribution in entrance area of downstream approach channel under  $Q=5\,000\, \text{m}^3/\text{s}$  (design scheme)

4 通航水流条件优化试验研究

设计方案通航水流条件试验表明, 船闸下游引航道中心线与主河道夹角较大, 隔流堤束窄河道导致水流集中, 而在堤头后水流则快速扩散并以较大角度斜穿口门区航道, 同时由于口门区动静水流速梯度大, 各因素叠加作用下, 口门区弯顶段横流超标明显; 同时引航道停泊段及口门区前段形成大范围回流区等不良流态, 危害船舶进出船闸及靠泊安全。

为改善百龙滩改建船闸下游引航道口门区存在的横流超标及回流等不利通航因素, 研究提出隔流堤开孔透水、航线调整、开挖区域进口拓宽以及口门区布置透水桩等措施, 各修改措施平面布置见图 6, 各方案改善措施对比分析见表 2。

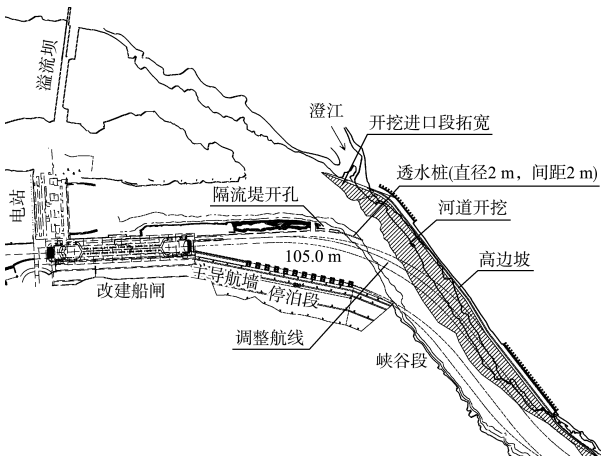


图 6 百龙滩改建船闸下游引航道各修改措施平面布置  
Fig. 6 Plan layout of various modification measures for downstream approach channel of renovated ship lock at Bailongtan

表 2 各修改方案采取的措施及效果分析  
Tab. 2 Measures taken in each modification scheme and effectiveness analysis

| 修改方案    | 改善措施                                                         | 效果分析                                                                                          |
|---------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1-1、1-2 | 引航道隔流堤堤头上游 20 m 开 2 孔, 开孔宽度 10 m, 孔间距 20 m, 底高程分别为 112、115 m | 开孔底高程 115 m 时停泊段回流基本消失, 但下游凸岸侧制动段仍存在小范围回流(约 0.50 m/s), 口门区弯顶段横向流速略有减小(0.40~0.60 m/s), 仍超出规范要求 |
| 2       | 在隔流堤开孔 115 m 方案基础上, 将左岸开挖区域进口拓宽以调顺岸线, 同时航线稍作调整               | 口门区弯顶段横向流速减小至 0.40~0.54 m/s; 停泊段下游凸岸侧制动段存在的回流仍难以有效改善                                          |
| 3       | 在方案 2 基础上, 沿隔流堤下游布置多个透水桩, 桩中心间距 4 m, 总长约 52 m                | 口门区弯顶段航道流速有所减缓, 水流平顺, 最大横流降至 0.42 m/s; 停泊段下游凸岸侧回流强度及范围得到改善, 回流流速基本在 0.40 m/s 内                |

4.1 修改方案 1

针对设计方案中存在的问题, 本研究开展了隔流堤开孔两种不同底高程的修改方案试验。具体方案如下: 1) 在隔流堤堤头上游 20 m 处开设 2 孔, 开孔宽度为 10 m, 孔间距为 20 m, 底高程为 112.0 m; 2) 相同位置开设相同尺寸的 2 孔, 底高程调整为 115.0 m。

试验结果表明, 隔流堤开孔具有双重作用: 一方面, 能够分散主流, 有效减小口门区航道的动静水流速梯度; 另一方面, 通过引入少量水流, 改变引航道及口门区的水流结构, 从而消除或减弱口门区及停泊段后段的回流现象。具体而言, 当开孔底高程为 112.0 m 时, 由于进流量显著增加且形成较为集中的横向底流, 水流冲击停泊段岸坡后四向扩散, 导致引航道内流态较差, 改善效果有限。相比之下, 当开孔底高程为 115.0 m

时, 引航道停泊段的回流结构基本消散, 仅在停泊段下游凸岸侧制动段存在小范围回流, 且流速降低至最大 0.50 m/s 左右, 改善效果显著。然而, 口门区弯顶段的横流因主流流速降低而略有减小, 但由于水流扩散后仍以较大角度斜穿, 横向流速超标的改善效果并不明显。综上所述, 开孔底高程为 115.0 m 的方案在改善引航道停泊段回流方面效果显著, 但在口门区横向流速超标问题的改善上仍需进一步优化。

4.2 修改方案 2

根据河势条件, 下引航道口门区横流较大的主要原因在于该段河道狭窄弯曲、主流流速较大且弯顶段航道水流斜穿角度大。为此在修改方案 1-2 基础上, 将河道左侧开挖区域上游进口适当拓宽以调顺岸线, 进一步引导主流通过开挖区域左

侧下行;同时,将航线向右稍做调整,以避开主流并减小水流与航线的夹角。

试验结果表明,修改方案 2 在最大通航流量为  $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时,口门区弯顶段的横流流速减小至  $0.40\sim 0.54\text{ m/s}$ ,具有一定改善效果,但仍难以改变隔流堤后水流扩散的流速流态分布,相应停泊段下游凸岸侧制动段的回流问题仍未得到有效解决,导致船舶停靠仍存在一定困难,需进一步优化。

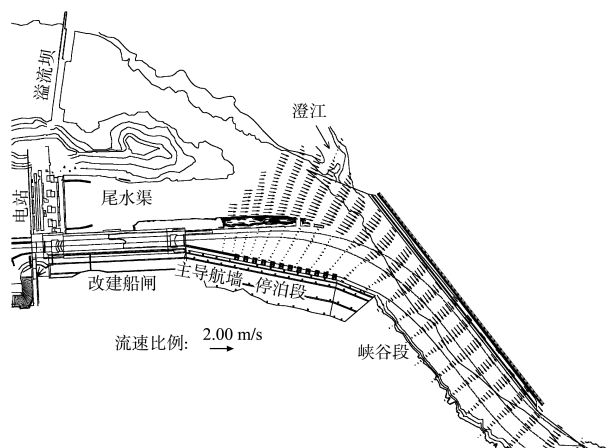


图 7 修改方案 2: 下游引航道口门区流速分布 ( $Q=5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ )

Fig. 7 Modification scheme 2: flow velocity distribution in entrance area of downstream approach channel ( $Q=5,000\text{ m}^3/\text{s}$ )

#### 4.3 修改方案 3

结合研究河段峡谷型河道水深大、水流三维流速分布等条件,经综合比较导流墩、透水桩对隔流堤后水流调整改善效果、适用性以及施工等因素,试验最终选取了透水桩导流形式。修改方案 3 在上述方案基础上,沿隔流堤下游布置多个透水桩,试验结果表明,适宜透水率条件下的透水桩可有效减弱主流斜向快速扩散,可使水流在弯顶段下游相对平顺进入航道,各工况下口门区弯顶段航道流速有所减缓,流量  $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时最大横流降至  $0.42\text{ m/s}$ ,见图 8、9。船闸下游引航道口门区特征流速见表 3。相应对岸凸岸侧制动段得到有效掩护,原先回流不良流态形成机制得到抑制,各工况下该区域由回流转变为缓流区,流速基本在  $0.40\text{ m/s}$  内,流态明显优化,通航条件得到改善,可满足最高通航流量  $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时的通航要求,建议作为推荐方案。

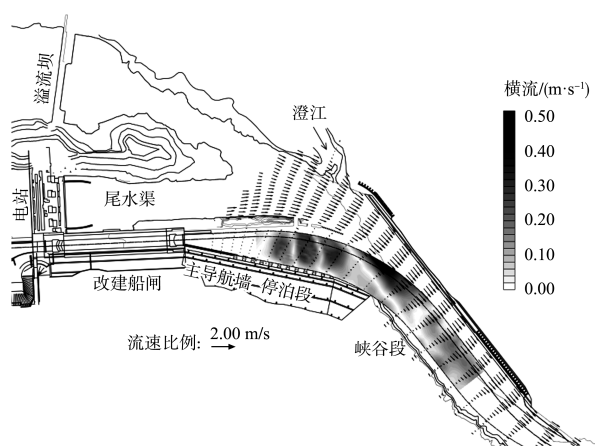


图 8 修改方案 3: 改建船闸下游引航道口门区横向流速分布 ( $Q=5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ )

Fig. 8 Modification scheme 3: horizontal velocity distribution in entrance area of downstream approach channel of renovated ship lock ( $Q=5,000\text{ m}^3/\text{s}$ )



图 9 修改方案 3: 下游引航道口门区水流流态 ( $Q=5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ )

Fig. 9 Modification scheme 3: flow regime in entrance area of downstream approach channel ( $Q=5,000\text{ m}^3/\text{s}$ )

表 3 修改方案 3: 船闸下游引航道口门区特征流速  
Tab. 3 Modification scheme 3: characteristic flow velocity in entrance area of downstream approach channel of ship lock

| $Q/$<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 最大纵向流速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 最大横向流速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 最大回流流速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1 150                                        | 1.58                                          | 0.23                                          | 0.17                                          |
| 2 180                                        | 1.67                                          | 0.28                                          | 0.22                                          |
| 3 500                                        | 1.93                                          | 0.35                                          | 0.31                                          |
| 5 000                                        | 2.25                                          | 0.42                                          | 0.36                                          |

#### 5 结语

1) 百龙滩枢纽下游为山区峡谷弯曲型河道,受下游引航道隔流堤束窄河道影响,水流集中于窄、深河槽,隔流堤后又快速扩散,口门区弯顶段水流斜穿导致横流显著超标,同时凸岸侧制动段、停泊段产生大范围回流区,通航水流条件较差。

2) 修改方案 1 通过隔流堤开孔, 可起到一定分散主流效果, 减小口门区航道动静水流速梯度; 同时引进少量水流, 改变了引航道及口门区水流分布结构, 起到减弱停泊段和制动段回流的效果。

3) 修改方案 2 继续采取左岸开挖区域进口拓宽, 从而调顺岸线, 以引导主流充分利用开挖区域下行, 并结合航线调整等措施, 口门区弯顶段横流持续减小, 具有一定改善效果。

4) 峡谷型河道考虑水深大、水流三维流速分布等因素, 经综合比较导流墩、透水桩等对水流扩散调整的效果, 适宜透水率条件下的透水桩改善效果更好, 可有效减弱主流斜向快速扩散, 修改方案 3 口门区弯顶段横向流速改善显著, 原凸岸侧回流形成机制也得到抑制, 通航条件大幅改善。

#### 参考文献:

- [1] 杨峰, 普晓刚, 金辉, 等. 洪江枢纽扩建船闸下游通航条件试验研究[J]. 水道港口, 2021, 42(1): 84-88.  
YANG F, PU X G, JIN H, et al. Experimental study on navigation conditions downstream of Hongjiang Junction expansion shiplock[J]. Journal of waterway and harbor, 2021, 42(1): 84-88.
- [2] 刘春泽, 曹凤帅, 唐颖, 等. 葛洲坝枢纽船闸扩能工程平面尺度方案对比[J]. 水道港口, 2020, 41(2): 172-178.  
LIU C Z, CAO F S, TANG Y, et al. Comparison of plane dimension schemes for Capacity Expansion Project of Gezhouba Junction[J]. Journal of waterway and harbor, 2020, 41(2): 172-178.
- [3] 吴霜, 张绪进, 谢春航, 等. 白石窑一线船闸改扩建下引航道口门区通航水流条件研究[J]. 水道港口, 2022, 43(2): 200-207.  
WU S, ZHANG X J, XIE C H, et al. Research on navigable flow conditions of the lower approach channel of the first-line ship lock of Baishiyao in entrance area[J]. Journal of waterway and harbor, 2022, 43(2): 200-207.
- [4] 普晓刚, 王能, 金辉, 等. 洪江枢纽改建船闸上游航道通航条件试验研究[J]. 水道港口, 2024, 45(4): 511-517.  
PU X G, WANG N, JIN H, et al. Experimental research on navigation conditions in upstream channel of reconstructed lock at Hongjiang Hydro-junction[J]. Journal of waterway and harbor, 2024, 45(4): 511-517.
- [5] 徐红. 乌江峡谷弯曲型河道通航建筑物引航道通航条件概化模型试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.  
XU H. Experimental study on navigation flow conditions at navigation building approach channel of winding canyon river with generalized model in Wujiang River [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.
- [6] 赵志舟, 王多垠, 徐红, 等. 乌江峡谷型弯曲河道通航建筑物口门区通航条件试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(5): 812-815.  
ZHAO Z Z, WANG D Y, XU H, et al. Study of navigation condition in the entrance area of approach channel of hydro-complex in Wujiang River[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University ( natural sciences ), 2008, 27 ( 5 ): 812-815.
- [7] 张爱平, 普晓刚, 王能, 等. 山区河势受限段改建船闸上游通航条件试验研究[J]. 水道港口, 2019, 40(4): 421-425.  
ZHANG A P, PU X G, WANG N, et al. Study on navigation conditions of upper reaches of the reconstructed lock in restricted section of river in mountainous area[J]. Journal of waterway and harbor, 2019, 40(4): 421-425.
- [8] 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.
- [9] 路莅枫, 王能, 普晓刚. 山区复杂条件下已建船闸通航条件改善措施研究[J]. 水道港口, 2018, 39(5): 579-583.  
LU L F, WANG N, PU X G. Study on improvement measures of navigation conditions of ship locks constructed under complex conditions in mountainous areas[J]. Journal of waterway and harbor, 2018, 39(5): 579-583.
- [10] 尹超裕. 百龙滩水电站船闸改扩建工程改造方案[J]. 珠江水运, 2024(22): 142-144.  
YIN C Y. Reconstruction scheme of ship lock reconstruction and expansion project of Bailongtan Hydropower Station[J]. Pearl River water transport, 2024(22): 142-144.
- [11] 易放辉, 黄圣平, 张聪, 等. 复杂环境下改建船闸高陡边坡组合支护技术[J]. 水运工程, 2025(2): 225-231.  
YI F H, HUANG S P, ZHANG C, et al. Combined supporting technology for high and steep slope of modified ship lock under complex environment[J]. Port & waterway engineering, 2025(2): 225-231.

( 本文编辑 赵娟 )