涪江渭沱枢纽船闸上引航道通航水流条件试验研究

蒲永飞[1]，何进朝[2]，严春浩[2]，邓　海[3]，赵　健[2]

（1. 重庆交通大学 河海学院，重庆 400074；2. 重庆交通大学，重庆西南水运工程科学研究所，重庆 402247；
3. 重庆航运建设发展（集团）有限公司，重庆 401120）

摘要：涪江渭沱枢纽位于山区河流急弯河段，针对其扩建船闸上引航道及口门区因受弯道水流及动静水的共同影响导致出现较强斜向水流的问题，采用物理模型及船模试验方法，对上引航道及口门区进行不同布置方案的通航条件研究，提出改善其通航水流条件的工程措施。结果表明，受上游弯道水流的影响，设计方案船闸上引航道及口门区内流速较大，各级通航流量下水流条件均不能满足船舶安全进出船闸；通过增设隔流墙与潜丁坝、开挖引航道对岸河道底高程、平移船闸及调整船闸轴线角度等工程措施，最终修改方案在流量 $Q\leqslant 5\ 000\ m^3/s$ 情况下上引航道及口门区各流速指标基本符合规范要求；结合船模试验结果，船舶在流量 $Q\leqslant 5\ 000\ m^3/s$ 情况下能够通过上引航道顺利进出船闸。

关键词：渭沱枢纽；船闸上引航道；通航水流条件；物理模型试验；船模试验

中图分类号：U641.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0150-09

Experiment on navigation flow conditions of ship lock upper approach channel of Weituo water control project on the Fujiang River

PU Yongfei[1], HE Jinchao[2], YAN Chunhao[2], DENG Hai[3], ZHAO Jian[2]

(1. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Southwest Water Transport Research Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 402247, China;
3. Chongqing Shipping Construction and Development (Group) Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: Weituo water control project on the Fujiang River is located in a sharp bend section of a mountainous river. To address the problem that the upper approach channel and entrance area of the expanded ship lock are jointly affected by curved flow and dynamic-static water, resulting in strong oblique flow, we conduct physical model and ship model experiments to study the navigation conditions of the upper approach channel and entrance area under different layout schemes, and propose engineering measures to improve the navigation flow conditions. The results show that due to the influence of the water flow in the upstream bend, the flow velocity in the upper approach channel and its entrance area of the ship lock in the design scheme is relatively large, failing to meet the safety requirements for ships entering and exiting the ship lock under all navigable discharges. Through measures such as adding a division wall and submerged spur dike, excavating the riverbed on the opposite bank of the upper approach channel, translating the ship lock and adjusting the axis angle of the ship lock, all flow velocity indicators in the upper approach channel and area of the final modified scheme basically meet the specification requirements at $Q\leqslant 5,000\ m^3/s$. Combined with the ship model experiments results, ships can smoothly enter and exit the ship lock via the upper approach channel at $Q\leqslant 5,000\ m^3/s$.

Keywords: Weituo water control project; upper approach channel of ship lock; navigation flow condition; physical model experiment; ship model experiment

收稿日期：2025-11-09　　**录用日期：**2025-12-12

作者简介：蒲永飞(2001—)，男，硕士研究生，研究方向为水力学及河流动力学。

通信作者：何进朝(1978—)，男，硕士，正高级工程师，从事水运工程水力学研究工作。E-mail:He_98@qq.com

水运工程

涪江干线已明确规划纳入全国内河国家高等级航道网，2035 年三江—合川 354 km 发展目标为Ⅳ级航道，2050 年规划为Ⅲ级航道。渭沱枢纽作为涪江综合利用规划中的最末一个梯级，既有船闸等级为Ⅶ级，为了完成规划航道的提升，拟对渭沱枢纽船闸进行扩能升级改造。船闸改扩建工程因受地形条件、枢纽布置情况等多重因素制约，将面临布置空间受限的问题，设计和建设难度较大[1]。

船闸引航道作为枢纽通航建筑物的重要组成部分，为船舶过坝提供了必要的连接通道，其通航水流条件直接决定船舶进出闸的安全。引航道口门区是指在河流动水与引航道静水的交界区域，由于该区域存在较大的流速梯度，通常存在斜向水流，甚至出现泡漩等恶劣流态，其水流条件同样影响船舶安全进出船闸[2]。很多学者对扩建船闸引航道及口门区通航水流条件开展了大量研究并提出了诸多改善措施，如张湛等[3]对急弯河段已建枢纽新建船闸采用物理模型与自航船模试验，利用延长隔流堤长度减小口门区横向流速峰值、改善流态；方洋等[4]通过优化出导流墩的合理布置参数，有效改善了山区急弯段引航道口门区横流、回流超标等问题；彭伟[5]以弯曲河段船闸为研究对象，通过物理模型与数值模拟，同样探究了导流墩参数对引航道口门区水流条件的影响；李君等[6]针对布置在“S”形急弯凹岸的峡江枢纽船闸，采用顺岸式整治及结合透空隔流导墙方案使船闸上下游引航道及其口门区通航水流条件满足规范要求；陈明等[7]建立二维水流数学模型，对广西左江山秀船闸改扩建工程采取凹岸潜丁坝、凸岸开挖和分水隔墙布置等综合措施有效改善通航水流条件；李召辉等[8]采取增设丁坝、布置透水隔墙、河道局部扩挖等工程措施，有效改善了弯曲河段、狭窄空间的扩建船闸口门区通航水流条件。然而，具体工程的地形及建设情况不同，改善措施需要根据河道水流条件进行选择。

渭沱枢纽位于涪江下游弯曲河段，属于典型山区河流，水流受河床、岸坡等边界条件作用，主流沿弯道凹岸运动，致使岸边水流流速大、流态复杂。渭沱枢纽扩建船闸上引航道及口门区受弯道水流及动静水的共同影响，引航道内出现较强的斜向水流，容易导致船舶进闸时出现横漂，严重影响船舶安全。因此需要对渭沱枢纽船闸上引航道及口门区的通航水流条件进行研究，改善上引航道的通航水流条件。

1　工程概况

涪江是嘉陵江右岸的最大支流，发源于岷山东麓，在重庆市合川区汇入嘉陵江，流域面积 3.64 万 km^2，干流河长 670 km，平均坡降 5.6 ‰。渭沱枢纽坝址位于涪江干流下游河段，是涪江综合利用规划中的最末一个梯级，下距涪江河口约 23 km，是一座以发电为主，兼顾航运、发电、灌溉等综合效益的水利枢纽工程。坝址上游河道弯曲，下游急弯，整体呈“几”字形急弯，床面狭窄，两岸山高坡陡。枢纽坝顶全长 738 m，从右至左依次布置有右岸连接坝段、既有船闸（Ⅶ级）、电站厂房、14 孔泄洪闸、溢流坝，左岸连接坝段，水库正常蓄水位 206 m。为实现涪江航道等级提升至 III 级，需要在既有船闸右侧新建一座 1 000 吨级船闸。船闸扩建工程实施后既有船闸计划改造为鱼道，对扩建船闸的引航道水流条件及运行不会产生影响。

2　物理模型试验

2.1　模型设计

根据坝址河段河势条件、枢纽及新建船闸布置特征，物理模型模拟河道从坝址上游约 3.4 km 至坝下游约 3.5 km，总长约 6.9 km，进出口与试验段保持足够距离，满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》[9]对于研究范围的要求，模型范围见图 1。根据模型试验研究内容及模型场地等多方面要求，模型采用几何比尺为 1∶100 正态模型，按重力相似准则进行设计，各项物理量相似比尺见表 1。

水运工程

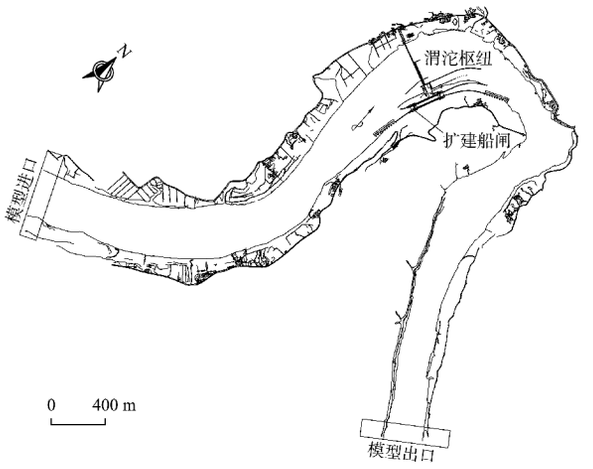


图 1　物理模型范围

Fig. 1　Scope of physical model

表 1　模型各物理量相似比尺

Tab. 1　Similarity scales of physical quantities in model

物理量	比尺符号	关系式	比尺数值
长度	λ_L	–	100
面积	λ_S	$\lambda_S=\lambda_L^2$	10 000
时间	λ_t	$\lambda_t=\lambda_L^{0.5}$	10
流速	λ_v	$\lambda_v=\lambda_L^{0.5}$	10
流量	λ_Q	$\lambda_Q=\lambda_L^{2.5}$	100 000
糙率	λ_n	$\lambda_n=\lambda_L^{1/6}$	2.15

河道地形根据 2024 年 10 月实测地形资料制作，采用断面板法进行控制，断面间距 50～70 cm，共塑造 132 个断面。物理模型地形高程误差控制在±1 mm 内，建筑物模型高程误差控制在±0.3 mm 内，平面距离误差控制在±10 mm 内，满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》关于模型制作的精度要求。

2.2　模型验证

采用 2024 年 10 月 24 日实测资料，对上游河道沿岸水面线、流速进行验证，验证流量 $Q=520\ m^3/s$。河道糙率相似的本质是河道瞬时水面线相似，模型河道采用水泥砂浆抹面糙率偏小，实测模型水位偏低。因此，对模型河床采用卵石梅花型加糙，达到了模型河道水边线与原型河道水边线基本相似，即河床阻力相似。模型水位与原型水位差值在±0.04 m 之间，验证结果见图 2。原型流速实测断面位于枢纽上游约 1.35 km 处，模型与原型断面流速差值在±0.03 m/s 之间，验证结果见图 3。根据水位及流速验证结果，模型与原型相似性较好，符合 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》的要求。

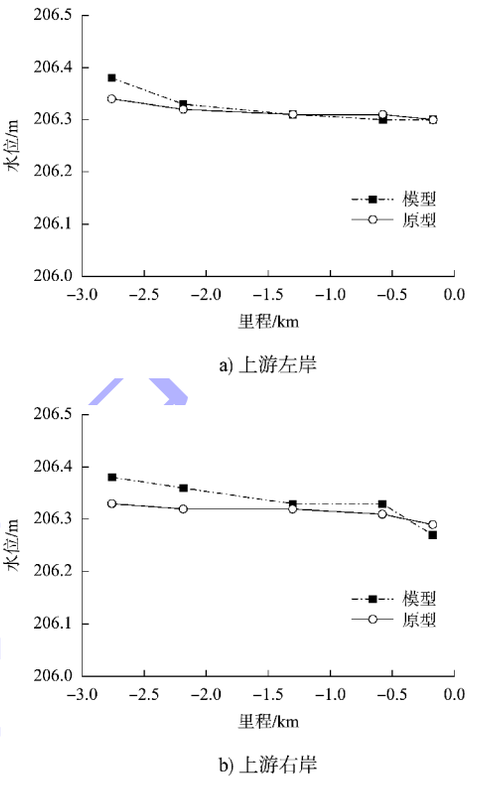


图 2　河道沿岸水面线验证结果

Fig. 2　Verification results of water surface profile along riverway

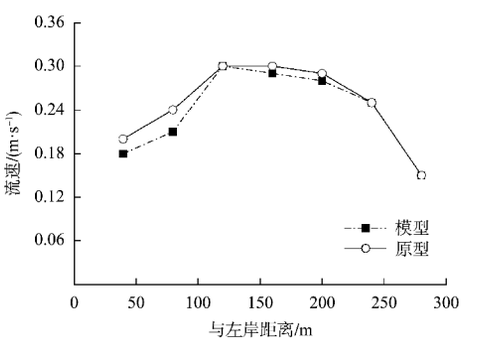


图 3　断面流速验证结果

Fig. 3　Verification results of flow velocity at various cross-sections

2.3　试验条件

枢纽溢流坝坝顶高程为 206.00 m，泄洪闸数量为 14。根据枢纽调度方式，当来流量 535 $m^3/s<Q<7\ 900\ m^3/s$，通过开启泄洪闸控制泄洪量，尽量维持坝前水位在正常蓄水位 206.00 m，直至 14 扇闸门全开自由泄流。对于船闸上引航道口门

区及引航道内的通航水流条件，模型开展了 5 级流量试验，Q 依次为 2 000、3 000、4 000、5 000、5 580 m^3/s，试验工况见表 2。

表 2　物理模型试验工况
Tab. 2　Physical model experiment conditions

工况	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	坝前水位/m	坝下水位 m	枢纽运行方式
1	2 000	206	201. 05	电厂满发；泄洪闸 7#~9#全开、6#控开
2	3 000	206	201. 52	电厂满发；泄洪闸 6#~10#全开、11#控开
3	4 000	206	202. 43	电厂满发；泄洪闸 7#~13#全开、14#控开
4	5 000	206	203. 34	电厂满发；泄洪闸 6#~14#全开、5#控开
5	5 580（设计最大通航流量）	206	203. 87	电厂满发；泄洪闸 4#~14#全开

3　引航道通航条件

3. 1　通航水流条件试验

3. 1. 1　通航水流条件评判标准

根据 JTJ 305—2025《船闸总体设计规范》[10]（简称《规范》），船闸上引航停泊段、制动段及其口门区通航水流标准如下。

1）单线船闸非灌泄水期间，引航道导航调顺段内宜为静水区，上游停泊段水面最大纵向流速不应大于 0. 5 m/s，横向流速不应大于 0. 15 m/s。

2）制动段水流条件宜与停泊段一致，无法满足时应通过模型试验确定允许流速。当流量较大，制动段水流条件难以满足要求时，经专题论证，船舶可采取直接进闸方式，此时制动段水流条件标准可与口门区一致。

3）口门区水面最大纵向流速不宜大于 2. 0 m/s。直线布置的引航道的口门区水面最大横向流速 v_T 不宜大于 0. 3 m/s；当 0. 3 m/s $< v_T \leqslant$ 0. 4 m/s 时，口门区的宽度宜在最小宽度 B_0 的基础上增加 0. 5b_c（b_c 为设计船型宽度）；当 0. 4 m/s $< v_T \leqslant$ 0. 5 m/s 时，口门区的宽度宜在最小宽度 B_0 的基础上增加 1. 0b_c。口门区水面最大纵向流速大于 0. 5 m/s 时，应开展专题研究，采用实船试验或模拟试验等方法验证工程方案的可行性。

渭沱枢纽扩建船闸设计船型为 1 000 吨级干散货船，尺寸为 63 m×11. 0 m×(2. 2~2. 6)m(总长×型宽×设计吃水)。根据《规范》规定，单线船闸计算得到的引航道最小宽度 B_0 为 49. 5 m，实际取值为 60 m。因此，渭沱枢纽新建船闸停泊段纵、横流速限值分别为 0. 50、0. 15 m/s；制动段和口门区纵、横流速限值分别为 2. 0、0. 5 m/s。

3. 1. 2　设计方案

设计方案扩建船闸有效尺度为 190 m×23 m×4. 2 m(长×宽×门槛水深)，中心线较既有船闸轴线向岸侧偏移 65 m，由于枢纽下游为急弯河道，若上闸首前沿与枢纽轴线一致则下引航道布置空间不足，因此将上闸首布置于枢纽轴线上游侧 165 m，上闸首及部分闸室为枢纽挡水建筑物的组成部分。上游引航道导航调顺段长度为 146 m，停泊段长度为 180 m，引航道水深 4. 2 m，宽度 60 m，上引航道平面布置见图 4。根据口门区水流条件，上引航道制动段长度确定为 3 倍代表船长，近似取 190 m；口门区长度为 2. 5 倍代表船长，近似取 160 m。

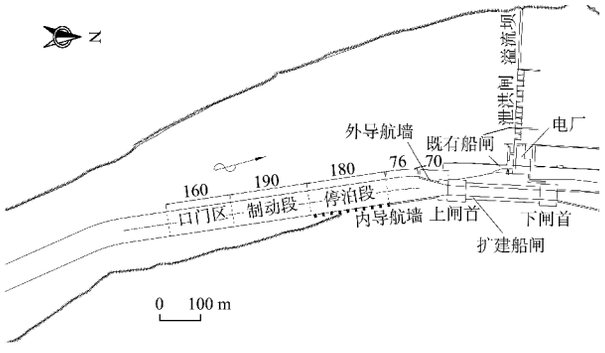


图 4　设计方案船闸上引航道平面布置(单位：m)
Fig. 4　Planar layout of ship lock's upper approach channel in design scheme(unit:m)

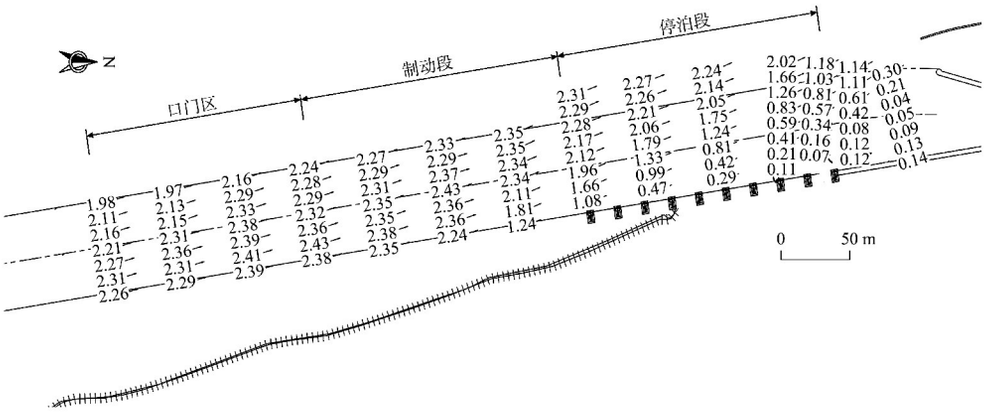
因枢纽上游河段为一条向左弯曲狭窄河道，河道主流出弯后沿右岸而下。设计方案船闸上引航道位于河道右岸，距离弯道出口较近，且由于上游引航道外导航墙较短，未对停泊段及制动段起到掩蔽作用，河道主流直冲上引航道从而导致口门区、制动段、停泊段流速较大，纵、横向流速均存在超标，各工况引航道通航水流条件见表 3(未含工况 3)，典型流量引航道流速分布见图 5。

水运工程

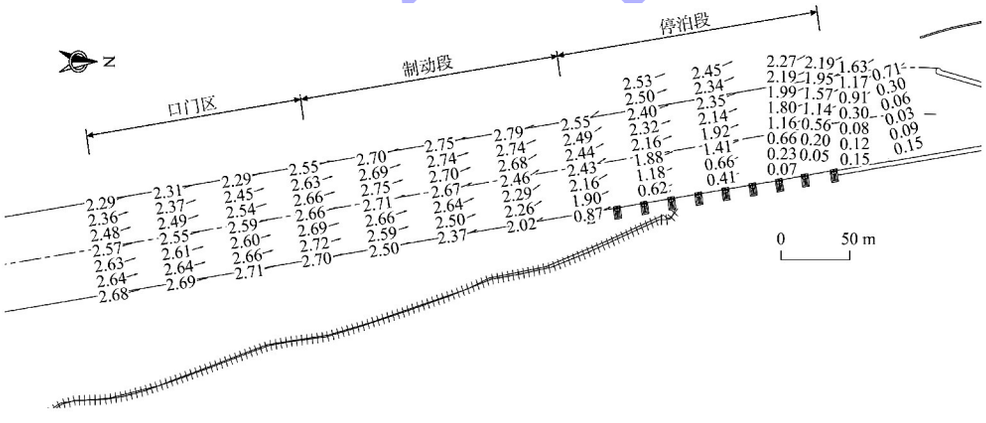
表 3　设计方案船闸上引航道通航水流条件

Tab. 3　Navigation flow conditions of ship lock's upper approach channel in design scheme　　m/s

工况	口门区		制动段		停泊段	
	纵向流速	横向流速	纵向流速	横向流速	纵向流速	横向流速
1	0. 58～0. 94	0. 04～0. 17	0. 66～0. 96	0. 06～0. 25	0. 04～0. 91	0. 04～0. 33
2	0. 96～1. 38	0. 12～0. 19	1. 02～1. 53	0. 12～0. 26	0. 02～1. 29	0. 04～0. 54
4	1. 75～2. 26	0. 15～0. 34	1. 82～2. 31	0. 15～0. 66	0. 02～2. 21	0. 05～1. 19
5	1. 84～2. 65	0. 18～0. 35	1. 91～2. 75	0. 23～0. 85	0. 03～2. 49	0. 04～1. 41



a) Q=5 000 m³/s



b) Q=5 580 m³/s

图 5　设计方案典型流量上引航道流速分布(单位：m/s)

Fig. 5　Flow velocity distribution of upper approach channel at typical flow quantities in design scheme(unit：m/s)

可以看出：1)各级流量下，上引航道导航调顺段不满足静水条件，停泊段的纵、横向流速均远超《规范》要求的 0. 50、0. 15 m/s。2)制动段在流量 Q≤3 000 m³/s 时，纵、横向流速峰值均低于《规范》限值；但当流量增至 5 000 m³/s 时，最大纵、横向流速分别为 2. 31、0. 66 m/s，均超过《规范》要求的 2. 00、0. 5 m/s；在设计最大通航流量 5 580 m³/s 下，制动段最大纵、横向流速分别为 2. 79、0. 85 m/s，更是远超《规范》限值。3)口门区同样在 Q≤3 000 m³/s 时纵、横向流速均满足《规范》要求；当流量增至 5 000 m³/s 时，最大纵、横向流速分别为 2. 26、0. 34 m/s，纵向流速超过《规范》限值 2. 00 m/s；在设计最大通航流量 Q = 5 580 m³/s 下，最大纵、横向流速分别为 2. 65、0. 35 m/s，纵向流速更是远超《规范》限值。因此，设计方案船闸上引航道的通航水流条件较差，船舶无法安全进出船闸，

需要采取有效的改善措施。

3.1.3　修改方案 1

上游引航道修改方案 1 在设计方案的基础上在船闸上引航道外侧增设 350 m 隔流墙，改善停泊段的水流条件。同时，在枢纽上游弯曲河段边滩处增设顶高程为 204 m 的潜丁坝，利用潜丁坝的挑流作用，将凹岸(右岸)侧主流挑向河心(左岸)侧，减小上引航道制动段及口门区内的流速改善通航水流条件，修改方案 1 船闸上引航道平面布置见图 6。

通过增设隔流墙和潜丁坝，相较于设计方案，各级流量的停泊段纵、横向流速分别降至 0.50、0.15 m/s 以下，均低于《规范》限值，减小了 80%～95%。但枢纽上游河道狭窄，潜丁坝挑流有限，上引航道靠河心侧区域及隔流墙堤头处横流较大，致使口门区和制动段在流量 Q>4 000 m^3/s 后约 50% 区域的纵、横向流速超过《规范》限值。各级流量下修改方案 1 引航道通航水流条件见表 4(未含工况 1)。另外，隔流墙的布置减小了上游河道过流断面积，导致枢纽上游洪水期水位与河道现状相比，出现局部壅水现象。

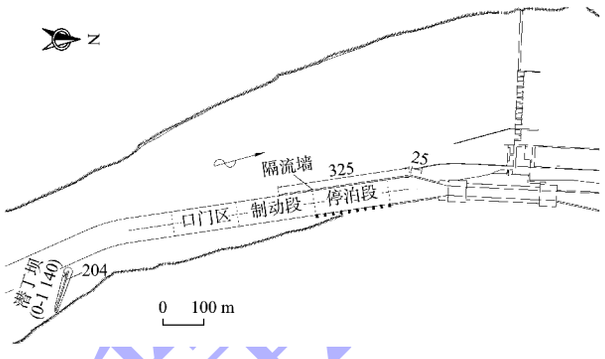


图 6　修改方案 1 船闸上引航道平面布置(单位：m)

Fig. 6　Planar layout of ship lock's upper approach channel in modified scheme 1(unit：m)

表 4　修改方案 1 船闸上引航道通航水流条件

Tab. 4　Navigation flow conditions of ship lock's upper approach channel in modified scheme 1　　m/s

工况	口门区		制动段		停泊段	
	纵向流速	横向流速	纵向流速	横向流速	纵向流速	横向流速
2	0.51～1.31	0.06～0.32	0～1.25	0～0.46	0～0.13	0～0.02
3	0.70～1.62	0.08～0.45	0～1.57	0～0.47	0～0.23	0～0.03
4	0.93～2.14	0.10～0.53	0～2.11	0～0.62	0～0.36	0～0.04
5	1.02～2.36	0.15～0.61	0～2.29	0～0.88	0～0.41	0～0.09

3.1.4　修改方案 2

修改方案 2 在修改方案 1 的基础上对枢纽上游左岸河床底高程进行开挖，开挖底高程由 196 m 均匀放坡至 195 m，通过扩大过流断面的面积，解决枢纽上游局部壅水现象和减小上引航道口门区与制动段的流速。其次，将船闸向右岸平移 5 m，同时以船闸轴线中心点逆时针旋转 0.5°，使上游引航道更贴近岸边，远离河道主流范围，并在隔流墙堤头处每间隔 5 m 开设 4 个宽 4 m、高 5 m 的底孔，修改方案 2 船闸上引航道平面布置见图 7。

通过对左岸河床底高程开挖及船闸平面位置的平移并转向，引航道通航水流条件得到进一步改善，修改方案 2 引航道通航水流条件见表 5，典型流量引航道流速分布见图 8。

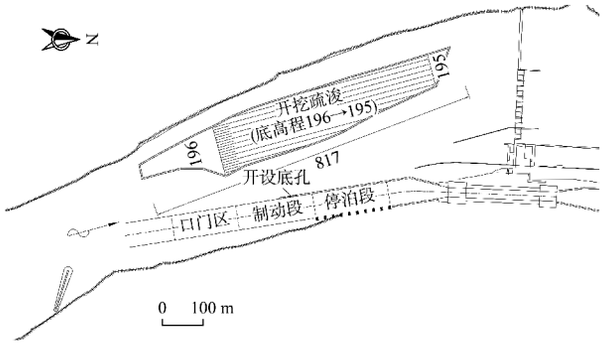


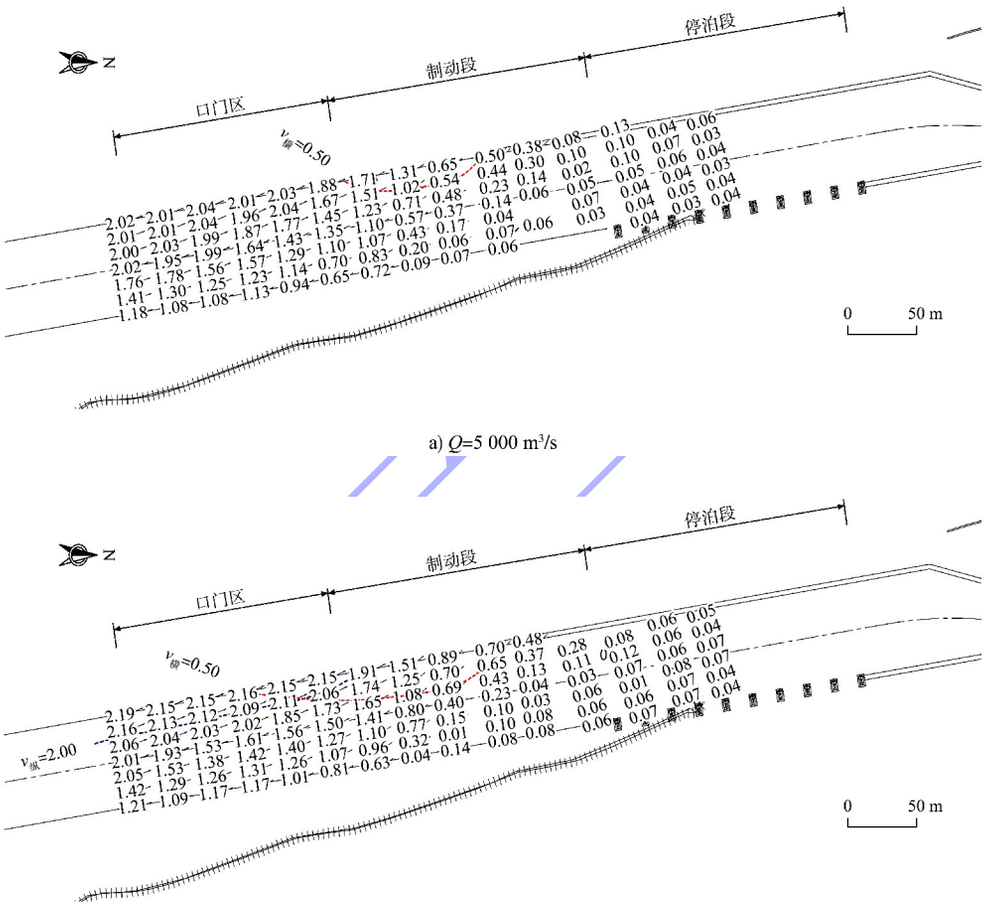
图 7　修改方案 2 船闸上引航道平面布置(单位：m)

Fig. 7　Planar layout of ship lock's upper approach channel in modified scheme 2(unit：m)

表 5　修改方案 2 船闸上引航道通航水流条件

Tab. 5　Navigtion flow conditions of ship lock's upper approach channel in modified scheme 2　　m/s

工况	口门区			制动段			停泊段		
	纵向流速	横向流速	回流流速	纵向流速	横向流速	回流流速	纵向流速	横向流速	回流流速
1	0.24～0.87	0.03～0.20	0	0～0.80	0.01～0.25	0～0.01	0～0.27	0～0.05	0～0.12
2	0.50～1.31	0.04～0.29	0	0～1.25	0～0.35	0～0.08	0～0.08	0～0.06	0～0.06
3	0.40～1.77	0.09～0.38	0	0～1.51	0.01～0.43	0～0.07	0～0.31	0～0.05	0～0.07
4	1.16～2.00	0.16～0.47	0	0～1.97	0.01～0.53	0～0.07	0～0.38	0～0.06	0～0.07
5	1.08～2.17	0.12～0.54	0	0～2.14	0.03～0.60	0～0.18	0～0.48	0～0.08	0～0.07



a) Q=5 000 m³/s

b) Q=5 580 m³/s

图 8　修改方案 2 典型流量上引航道流速分布(单位:m/s)

Fig. 8　Flow velocity distribution of upper approach channel at typical flow quantity in modified scheme 2(unit:m/s)

可以看出:1)停泊段在各级流量下各流速指标均未超过《规范》限值,满足《规范》要求。2)制动段在 Q≤4 000 m³/s 时,纵、横向流速指标均低于《规范》限值;当 Q=5 000 m³/s 时,在靠河心侧长度约 90 m、宽 10 m 区域(约占制动段面积的 7.89%)横向流速超标,其峰值为 0.53 m/s;当 Q=5 580 m³/s 时,在靠河心侧长约 100 m、宽 25 m 区域(约占制动段面积的 21.93%)纵、横向流速均超过《规范》限值,其峰值分别为 2.14 、0.60 m/s,较设计方案分别减小 22%、29%,但仍不满足《规范》要求。3)口门区在 Q≤5 000 m³/s 时,同样仅在靠河心侧边缘出现横向流速超标,纵向流速均小于 2.00 m/s;当 Q=5 580 m³/s 时,口门区靠河心侧长约 120 m、宽 15 m 区域(约占口门区面积的

18.75%)纵、横向流速超过《规范》限值，其峰值分别为 2.17、0.54 m/s，纵向流速峰值较设计方案减小 18%，但同样仍不满足《规范》要求。因此，需要开展船模试验进一步验证方案合理性。

3.2　船模试验

针对修改方案 2，对扩建船闸开展自航船模航行试验，采用船型为 1 000 吨级机动货船。自航船模比尺与物理模型比尺一致，均为 1∶100 的正态模型，船模尺寸为 68 cm×10.8 cm×2.6 cm(总长×型宽×设计吃水)。船模试验航段包括新建船闸上引航道停泊段、制动段、口门区及上游航槽，试验航段长约 1 100 m，流量 Q 为 3 000、4 000、5 000、5 580 m^3/s 的试验结果见表 6。

表 6　船闸上引航道船模试验结果

Tab. 6　Ship model experiment results of ship lock's upper approach channel

流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	航向	最大舵角/(°)		最大漂角/(°)		航速/($m \cdot s^{-1}$)	
		右	左	右	左	右	左
3 000	上行	14.06	16.94	3.39	10.75	2.97	1.60
	下行	22.12	21.84	6.94	8.41	4.16	2.82
4 000	上行	16.36	17.67	11.17	12.48	3.77	1.53
	下行	22.52	15.99	4.88	11.16	4.56	3.73
5 000	上行	19.84	13.94	13.23	18.05	2.48	1.51
	下行	23.46	21.26	6.04	14.18	4.28	3.86
5 580	上行	15.92	21.91	10.50	22.07	2.58	1.45
	下行	28.78	26.43	8.23	15.86	5.31	4.11

注：所有数据均已换算为原型值。

上行出闸时，各级流量下的最大舵角为 21.91°，低于试验安全舵角限值 25°；最小航速为 1.45 m/s，大于规《规范》值 0.50 m/s。下行进闸时，在流量 $Q \leqslant 5\,000$ m^3/s 情况下，最大舵角与最小航速均优于安全限值；在流量 $Q = 5\,580$ m^3/s 情况下，由于口门区斜横流较大，船舶下行进闸受流压影响，操纵难度较大，最大舵角为 28.78°，超过试验安全舵角限值 25°，不满足船舶安全进闸要求。因此，只要操作得当，在上游 $Q \leqslant 5\,000$ m^3/s 时 1 000 吨级机动货船可顺利进出船闸，船模试验航迹线见图 9。

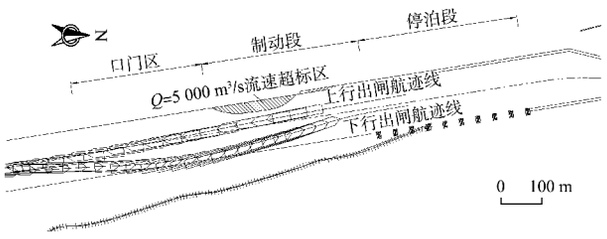


图 9　船模试验航迹线

Fig. 9　Ship model experiment track line

3.3　最大通航流量确定

根据规范，当论证得到的船闸最大通航流量低于 GB 50139—2014《内河通航标准》[11]规定的洪水频率标准对应的流量时，应分析洪水停航历时，确定的多年日均流量小于或等于最大通航流量的时间占比不宜低于 99%。

通过分析 2003—2023 年(7 669 d)渭沱枢纽坝下水位流量资料，统计多年日均流量未超过各级通航流量的时间占比，即各级流量通航保证率，结果见表 7。

表 7　各级流量通航保证率

Tab. 7　Navigation guarantee rate for various discharge levels

流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	超过流量时间/d	年均超过流量时间/d	未超过流量时间/d	通航保证率/%
2 000	265	12.62	7 404	96.54
3 000	135	6.43	7 534	98.24
4 000	83	3.95	7 586	98.92
5 000	49	3.24	7 620	99.36
5 580	41	2.33	7 628	99.47

流量为 5 000 与 5 580 m^3/s 时的通航保证率均满足大于 99%的要求，年均仅相差 0.9 d。根据最终修改方案通航水流条件及船模试验结果，$Q \leqslant 5\,000$ m^3/s 时上引航道及口门区各流速指标基本符合《规范》要求，1 000 吨级机动货船可顺利进出船闸；$Q = 5\,580$ m^3/s 时上引航道制动段及口门区均存在部分区域纵、横向流速超标，1 000 吨级机动货船下行进闸不能满足船舶安全进闸要求。因此，建议将渭沱枢纽新建船闸最大通航流量调整为 5 000 m^3/s。

4　结论

1）受上游弯道水流的影响，渭沱枢纽扩建船闸原设计方案上引航道及口门区的通航水流条件

均较差，无法满足船舶安全进出船闸。通过增设隔流墙与潜丁坝、开挖河道底高程、平移船闸及调整船闸轴线角度，减小了引航道内及口门区的流速，使其通航水流条件得到了极大改善。最终修改方案在 $Q \leqslant 5\ 000\ m^3/s$ 时上引航道及口门区各流速指标基本符合《规范》要求；在 $Q = 5\ 580\ m^3/s$ 时上引航道制动段及口门区均存在靠河心侧区域纵、横向流速超标。

2）对最终修改方案进行船模试验，在 $Q \leqslant 5\ 000\ m^3/s$ 时，1 000 吨级机动货船上、下行船舶的舵角和最低航速均符合《规范》要求；但在 $Q = 5\ 580\ m^3/s$ 时，船舶下行进闸受流压影响最大舵角为 28.78°，超过试验安全舵角限值 25°。

3）通过统计各级通航流量的通航保证率，流量为 5 000 与 5 580 m^3/s 时的通航保证率均满足大于 99%的《规范》要求。结合通航水流条件及船模试验结果，建议将渭沱枢纽扩建船闸最大通航流量调整为 5 000 m^3/s。

参考文献：

[1] 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 conditions of newly built second-line and third-line shiplocks of Feilaixia Water Control Project[J]. Water resources and hydropower engineering, 2015, 46(12): 58-60.

[2] 刘芷妍. 弯曲河流船闸扩能通航水流条件研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
LIU Z Y. Research on navigable flow conditions of the approach channel of enlarged capacity of meandering river[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.

[3] 张湛, 刘洋, 赵凯. 急弯河段新建船闸上游引航道通航条件研究[J]. 水运工程, 2024(7): 104-110, 116.
ZHANG Z, LIU Y, ZHAO K. Study on navigable conditions of the upper approach channel of a newly-built ship lock in a sharply meandering river reach[J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 104-110, 116.

[4] 方洋, 尚倩倩, 许慧, 等. 山区急弯段船闸引航道口门区导流墩布置[J]. 水运工程, 2025(8): 118-126.
FANG Y, SHANG Q Q, XU H, et al. Layout of diversion piers at entrance area of ship lock approach channel in mountainous sharp bends [J]. Port & waterway engineering, 2025(8): 118-126.

[5] 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.
PENG W. Research and improving on flow conditions at the entrance of approaching channel of curved reach[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010.

[6] 李君, 赵建钧, 洪娟, 等. 船闸凹岸布置上下游引航道水流条件优化[J]. 水运工程, 2016(12): 101-105, 131.
LI J, ZHAO J J, HONG J, et al. Flow condition optimization for upstream and downstream approach channels when ship lock lies on concave bank[J]. Port & waterway engineering, 2016(12): 101-105, 131.

[7] 陈明, 李礽民, 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.

[8] 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. Overall layout scheme for reconstruction and expansion of bailongtan ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2025(6): 136-143.

[9] 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

[10] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2025[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2025.
Code for overall design of navigation locks: JTJ 305-2025[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2025.

[11] 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Navigation standards of inland waterway: GB 50139-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

（本文编辑 王璁）

水运工程