



龙溪口枢纽最低蓄水位下船闸上游 通航条件及改善措施

李泳龙, 吴礼国, 程艳, 付文周

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 岷江龙溪口航电枢纽工程第 3 期导流期间利用右岸船闸临时通航, 由于上游蓄水位相对较低, 汛期大流量条件下船闸上游引航道口门区与连接段水域存在较大的通航风险。为确保施工期通航安全, 结合枢纽施工导流及通航模型试验结果, 开展了最低蓄水位下船闸上游通航条件数值模拟研究, 并提出优化上引航道左导墙结构形式、降低鸡公嘴开挖高程以及抛填深沱等工程措施。结果表明, 上游通航水流条件明显改善, 可满足施工期通航要求。

关键词: 施工期通航; 通航条件; 改善措施

中图分类号: U641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)10-0013-06

Flow conditions for navigation and improvement measures of upstream of ship lock under lowest water level of Longxikou Junction

LI Yonglong, WU Liguo, CHENG Yan, FU Wenzhou

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: During the third phase diversion period of Longxikou Navigation-power Junction project in the Minjiang River, the ship lock arranged on the right bank will be used for temporary navigation. Due to the relatively low upstream water level, there is a large navigation risk in the entrance area and connecting section of the upstream approach channel of the lock under the condition of large flow in flood season. To ensure the navigation safety during the construction period, we carry out the numerical simulation study on the navigation conditions at the upstream of the ship lock under the lowest pool level in combination with the results of the diversion and navigation model test of the junction construction, and propose the engineering measures such as optimizing the left guide wall structure of the upper approach channel, reducing the excavation elevation of Jigongzui and filling the deep pool. The results indicate that the upstream navigation flow conditions are significantly improved, which can meet the navigation requirements during the construction period.

Keywords: navigation during construction period; navigation condition; improvement measure

岷江乐山—宜宾 162 km 航道是四川省着力打造西部综合交通枢纽的“一横五纵多线”航道布局中重要的“五纵”之一, 向内连接成都、川南等城市群, 向外经长江直通上海, 也是四川重大技术装备制造产业出川运往沿海及国外的唯一水上通道^[1]。岷江龙溪口航电枢纽工程在施工期的

首要任务是保障航道的畅通, 确保重大件水上运输安全^[2]。

为确保岷江龙溪口航电枢纽工程第 3 期导流期间通航安全, 通过对船闸上引航道左导墙不同结构形式、鸡公嘴不同开挖高程、上游不同蓄水水位等边界条件下的通航水流条件分析, 为工程设计决策和施工期通航安全保障提供技术支撑。

收稿日期: 2023-06-07

作者简介: 李泳龙 (1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计。

1 工程概况

1.1 基本情况

岷江龙溪口航电枢纽工程是岷江高等级航道建设近期梯级渠化的最下游一级，上游距犍为梯级约 31.8 km，下游与 81 km 航道整治工程相接。枢纽工程等别为二等大(2)型，主要建筑物包括船闸、泄洪冲砂闸、发电厂房、鱼道、非溢流重力和库区堤防工程等，枢纽正常蓄水位 317 m，校核洪水位以下总库容 3.24 亿 m³，建设 1 座Ⅲ级船闸(预留二线船闸位置)，船闸有效尺度为 220 m×34 m×4.5 m(长×宽×门槛水深)，设计水头 17.94 m，可通行 2×1 000 t 船队，单向年通过能力 1 357 万 t，工程布置见图 1。



图 1 龙溪口航电枢纽工程布置

1.2 船闸上引航道布置

龙溪口船闸上引航道采用曲线进闸直线出闸布置方式，宽度由 34 m 逐渐向内侧拓宽为 60 m，上引航道设计顶高程 319.6 m，设计底高程 304.5 m。

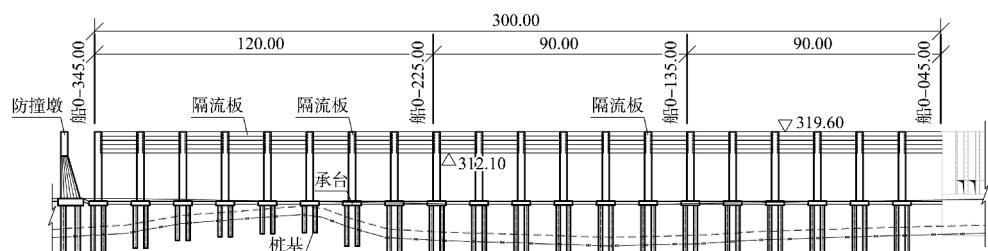
右导墙为主导航墙兼作调顺段，采用 $y=x^2/1300$ 曲线形态，沿船闸轴线方向投影长 187.89 m，后接 16 个间距 20 m 的靠船墩组成的总长 318 m 的停泊段。上引航道停泊段上游连接段航道右岸有一个凸嘴，因形似鸡啄米称为鸡公嘴。为拓宽上引航道口门区与连接段水域，改善船舶进出船闸的航行条件，需要对鸡公嘴进行适当的开挖，设计初始方案开挖高程考虑施工期通航水深要求确定为 304.5 m。

左导墙为辅导墙，平行船闸轴线布置，总长度为 357 m。设计初始方案主要考虑枢纽建成蓄水后的水流条件，采用 45 m 长实体式进水口段+300 m 长的透空隔流板段+12 m 长的防撞墩段，其中透空隔流板段墩柱共 20 排，间距 15 m，隔流板顶高程 319.6 m，隔流板底高程 312.1 m。

龙溪口船闸上引航道设计初始方案平面布置和左导墙立面见图 2。



a) 平面布置



b) 左导墙立面

图 2 上引航道设计初始方案上引航道平面布置和左导墙立面 (单位: m)

1.3 施工导流通航方案

为确保岷江航道的安全畅通, 龙溪口航电枢纽工程采用 3 期施工导流及通航方案: 第 1 期利用右岸天然航道通航, 同时完成左岸河床疏浚以及临时航道范围内 13 孔泄洪闸的闸墩以下结构施工; 第 2 期利用临时航道通航, 完成右岸船闸和 11 孔泄洪闸施工; 第 3 期控制上游水位保持最低通航水位 307 m 运行, 右岸船闸临时通航, 第 3 期施工导流的第 1 个枯水期完成临时航道范围内泄洪闸剩余施工内容, 电站厂房在左岸全年围堰保护下连续施工^[3], 第 3 期导流通航方案见图 3。

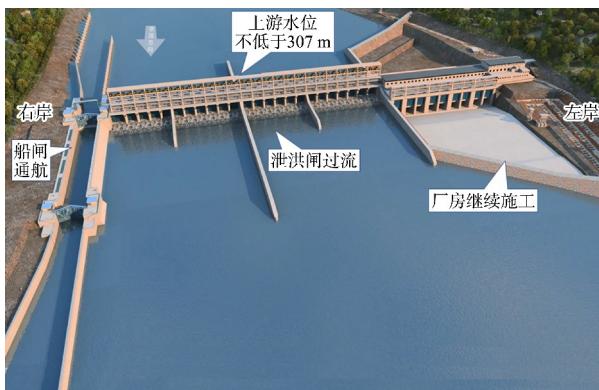


图 3 龙溪口航电枢纽工程第 3 期导流通航方案

2 上引航道左导墙结构形式对通航条件影响

根据施工导流模型试验成果, 由于第 3 期上游蓄水位相对较低, 同时受鸡公嘴挑流及枢纽泄

洪影响, 在上游来流量较大时, 设计初始方案船闸上引航道口门区与连接段流速急, 横流强劲, 同时伴有泡水、漩水, 引航道内回流旺盛, 流态差^[4]。各工况口门区流速见表 1。

实测当流量 $Q=7\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区与连接段纵向、横向、回流最大流速分别为 2.62、1.15、0.70 m/s; 当流量 $Q=8\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 纵向、横向、回流最大流速分别为 2.75、1.44、0.63 m/s; 当流量 $Q=9\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 纵向、横向、回流最大流速分别为 3.13、1.49、1.18 m/s。可以看出在流量 $Q \geq 7\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的各级流量下, 船闸上引航道口门区与连接段流态差, 纵向、横向、回流流速大幅超过 JTJ 305—2011《船闸总体设计规范》^[5]规定的上限值 2.0、0.3、0.4 m/s, 船舶无法安全进出引航道。

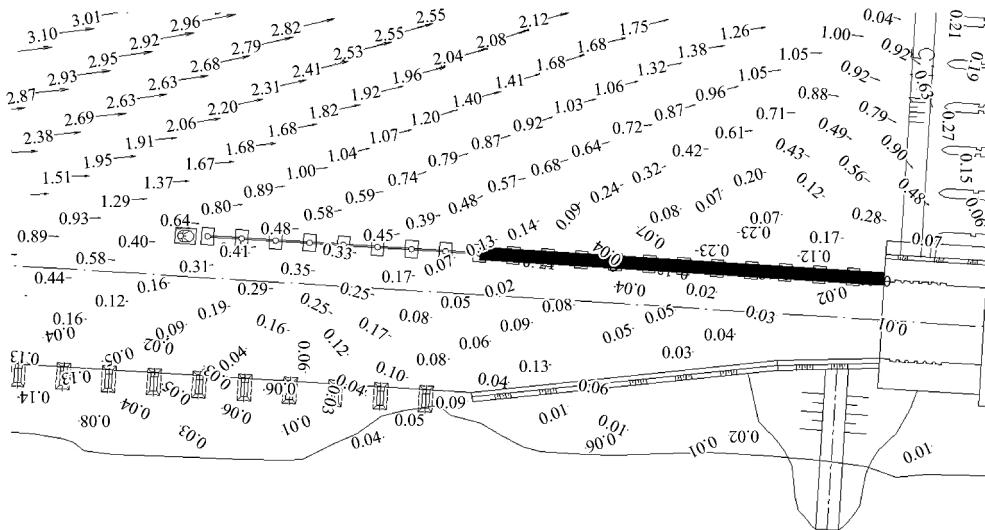
试验同时发现上引航道内出现明显回流, 主要是因为第 3 期导流期间上游控制水位 307.0 m 低于设计初始方案隔流板底高程 312.1 m, 隔流板未能发挥阻隔水流减少泄洪影响的作用, 故模型继续对船闸上引航道左导墙不同结构形式下引航道内的回流进行了试验观测, 实测流量 $Q=9\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 各工况引航道回流结果见表 2。对比不同方案船闸上引航道口门区与连接段的流速分布可以看出, 工况 2 引航道内回流区域和流态已基本满足要求, 工况 2 模型试验的流场见图 4。

表 1 设计初始方案船闸上引航道口门区流速

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流向	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)				
		0~400 m	0~300 m	0~200 m	0~100 m	0~000 m
7 000	纵向	0.19~2.62	0~1.11	0	0~0.15	0~0.08
	横向	0.03~1.15	0~0.57	0~0.57	0~0.24	0~0.04
	回流	0	0.02~0.33	0.17~0.70	0.19~0.33	0.04~0.11
8 000	纵向	0.08~2.75	0~0.29	0	0~0.69	0~0.29
	横向	0.07~1.44	0~0.26	0.08~0.22	0~0.13	0~0.13
	回流	0	0.10~0.17	0.26~0.63	0.10~0.39	0~0.02
9 000	纵向	0.10~3.13	0~0.41	0~0.62	0	0
	横向	0.22~1.49	0~0.88	0~0.33	0.01~0.06	0.02~0.04
	回流	0	1.04~1.18	0.40~0.79	0.67~1.00	0.21~0.71

表 2 $Q=9\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时各工况引航道内回流结果

工况	左导墙结构形式	回流区域和流态	回流最大流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	345 m 长实体结构	主河道动水沿透空段进入引航道内出现大范围回流区	0.81
2	225 m 长实体结构、120 m 长透空结构	基本为静水区域, 回流范围大幅压缩, 主要位于岸边, 强度减弱, 流态为边壁回流	0.14
3	45 m 长实体结构、300 m 长透空结构	基本为静水区域, 回流主要位于岸边, 且强度较弱	0.12

图 4 $Q=9\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时工况 2 模型试验流场 (单位: m/s)

3 上游蓄水位对通航条件影响

考虑到在鸡公嘴设计高程 304.5 m 基础上继续深挖实施难度较大, 提出适当抬高上游库水位以满足通航要求, 模型试验观测水库水位分别保持 308、310 和 312 m 运行, Q 为 6 000、7 000 和 8 000 m^3/s 共 3 级流量船闸上引航道口门区与连接段的通航水流条件, 试验结果见表 3。

表 3 各工况上引航道口门区与连接段流速

上游蓄 水位/m	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	连接段最大 流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	口门区最大流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
			纵向	回流
308	6 000	2.15	1.71	0.58
	7 000	2.57	1.90	1.10
310	6 000	1.38	1.26	0.51
	7 000	2.07	1.17	0.40
312	6 000	1.19	0.86	0.42
	7 000	1.61	1.14	0.37
	8 000	1.83	0.98	0.43

试验结果表明, 随着上游库水位抬高, 库区水深增加, 流速减缓, 连接段流速峰值降低, 横流减小, 上引航道口门区与连接段回流强度减弱,

范围压缩。根据施工导流试验和船模试验结果, 上游库水位抬高至 312 m, 在 $Q \leq 7\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 300 和 1 万 t 船舶均可以顺利进出船闸上引航道, $Q=8\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 船模试验最大舵角和最低航速均劣于安全指标, 船舶航行安全无法得到保证。

4 鸡公嘴不同开挖高程对通航条件影响

随着工程实施至 2 期施工末期, 枢纽工程在第 3 期导流第 1 个汛期前能达到形象面貌逐渐清晰, 预计枢纽主体进度能满足蓄水条件, 但库区移民及防护工程进度滞后导致枢纽仅蓄水至施工期通航最低蓄水位 307 m。由于上游蓄水位相对较低, 汛期大流量条件下船闸上游引航道口门区与连接段水域存在较大的通航风险, 急需寻求工程措施改善上游最低蓄水位下的通航水流条件。因此, 采用数值模拟分析在鸡公嘴原设计高程 304.5 m 基础上继续开挖以及调整闸门开启方式对通航条件影响^[6]。试验共拟定 14 种工况, 各工况的条件见表 4。

表 4 上引航道数值模拟工况

工况	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	鸡公嘴开挖 高程/m	深沱回填 高程/m	闸门 开启方式
1	7 000	304.5	不回填	1# ~ 10# , 24#
2	7 000	304.5	284.0	1# ~ 10# , 24#
3	7 000	302.5	不回填	1# ~ 10# , 24#
4	7 000	302.5	284.0	1# ~ 10# , 24#
5	7 000	300.5	284.0	1# ~ 10# , 24#
6	7 000	298.5	284.0	1# ~ 10# , 24#
7	7 000	298.5	284.0	1# ~ 7# , 21# ~ 24#
8	7 000	298.5	284.0	14# ~ 24#
9	8 000	298.5	284.0	1# ~ 13# , 24#
10	8 000	298.5	284.0	1# ~ 10# , 21# ~ 24#
11	8 000	298.5	284.0	10# ~ 24#
12	9 000	298.5	284.0	1# ~ 13# , 24#
13	9 000	298.5	284.0	1# ~ 10# , 21# ~ 24#
14	9 000	298.5	284.0	10# ~ 24#

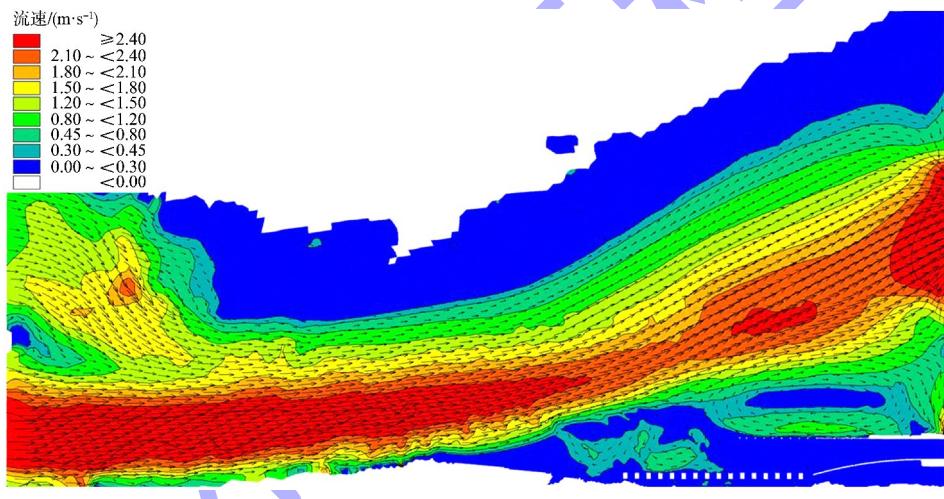


图 5 工况 6 上引航道数值模拟流场

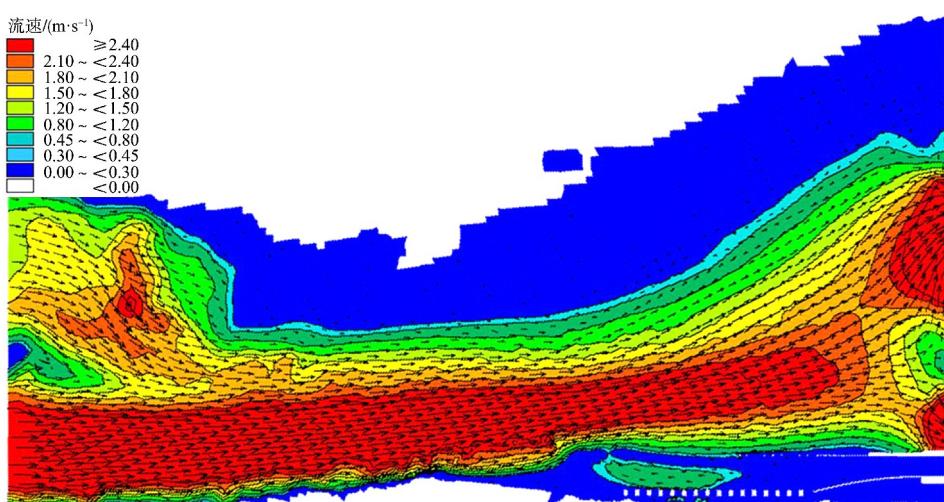


图 6 工况 10 上引航道数值模拟流场

将各工况的纵向流速、横向流速以及回流流速综合对比, 当流量 $Q=7\,000\,\text{m}^3/\text{s}$, 开启 1#~10# 和 24# 闸门时, 继续深挖鸡公嘴并抛填深沱, 通航水流条件有所改善, 其中工况 6 的水流流态总体较好, 各项流速基本满足规范限值要求。工况 6 上引航道数值模拟流场见图 5。

继续分析闸门开启位置及流量大小对水流条件的影响。通过对不同流量下的各方案对比分析发现, 当开启靠近船闸的 4 孔闸门(21#~24#)时, 测点范围内流速流态整体较好。当 $Q \leq 8\,000\,\text{m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区与连接段仅局部区域流速指标超过允许值, 已经满足通航要求, 工况 10 上引航道数值模拟流场见图 6。

综合以上分析,岷江龙溪口航电枢纽工程第3期导流期间最终采用以下通航方案:1)深挖鸡公嘴至高程298.5 m,抛填深沱至高程284.0 m;2)流量接近7 000 m³/s时,开启1#~7#和21#~24#闸门泄流,控制上游水位不低于307 m,船闸通航;3)流量接近8 000 m³/s时,开启1#~10#和21#~24#闸门泄流,控制上游水位不低于307 m,船闸通航;4)流量超过8 000 m³/s时,船闸停航。

5 结论

1) 船闸上引航道左导墙局部采用实体结构可以减小引航道内的回流范围和强度。上游仅蓄水至307 m,左导墙采用225 m长实体结构+120 m长透空结构,当 $Q \leq 9 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,引航道内通航水流条件基本满足要求。

2) 随着上游库水位抬高,上引航道口门区与连接段回流强度减弱、范围压缩。上游库水位抬高至312 m,当 $Q \leq 7 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,300和1万t船舶均可以顺利进出船闸上引航道。

3) 上游仅蓄水至307 m时,深挖鸡公嘴至高程298.5 m,抛填深沱至高程284.0 m,通航水流条件有所改善。当 $Q \leq 8 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,上引航道口门区与连接段仅局部区域流速指标超过允许值,

满足通航要求。

4) 通过对通航水流条件的分析,本文提出优化上引航道左导墙结构形式、降低鸡公嘴开挖高程以及抛填深沱等工程措施,为工程设计决策和施工期通航安全保障提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 刘峰钻.岷江龙溪口航电枢纽工程施工期通航问题研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [2] 四川省交通勘察设计研究院有限公司.岷江龙溪口航电枢纽工程施工期通航保障实施方案专题报告[R].成都:四川省交通勘察设计研究院有限公司,2020.
- [3] 李志伟,张毅驰.岷江龙溪口航电枢纽工程施工期导流与通航方案设计[J].陕西水利,2022(2):112-115.
- [4] 重庆西南水运工程科学研究所.龙溪口航电枢纽工程施工导流与通航水工模型试验研究[R].重庆:重庆西南水运工程科学研究所,2020.
- [5] 中交水运规划设计院.船闸总体设计规范:JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 四川省交通勘察设计研究院有限公司.岷江龙溪口航电枢纽工程施工期通航保障实施方案三期通航方案局部调整报告[R].成都:四川省交通勘察设计研究院有限公司,2022.

(本文编辑 王璁)

(上接第8页)

- [12] 国务院.大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例[A].北京:国务院,2017.
- [13] 罗玉林.当前水利工程征迁工作难点分析及对策思考[J].江苏水利,2014(10):42-43.
- [14] 四川省扶贫和移民工作局,四川省发展和改革委员会.关于在全省大中型水利水电工程试行先移民后建设有关问题的通知:川扶移民规安[2010]202号[A].成都:四川省扶贫和移民工作局,2010.
- [15] 国家发改委.关于做好水电工程先移民后建设有关工

作的通知[A].北京:国家发改委,2012.

- [16] 国土资源部.关于加强耕地保护促进经济发展若干政策措施的通知:国土资发[2000]408号[A].北京:国土资源部,2000.
- [17] 彭和平.制度学概论[M].北京:国家行政学院出版社,2015.
- [18] 席酉民,尚玉钒.和谐管理理论[M].北京:中国人民大学出版社,2002.

(本文编辑 王璁)