



东江下矶角枢纽船闸上引航道口门区 通航水流条件试验研究

彭永勤¹, 彭 涛²

(1. 重庆交通大学, 重庆 400016; 2. 中煤科工集团重庆设计研究院, 重庆 400016)

摘要: 针对东江下矶角枢纽坝上游 1.3 km 处凸嘴及右岸副坝端头挑流造成的下游右侧(靠岸侧)上引航道口门区形成回流区、横向流速和回流流速严重超标问题, 建立 1:100 比尺的正态物理模型, 对在坝上游右岸凸嘴进行开挖、缩短库区右岸副坝长度并优化副坝端头与山体的连接形式、缩短上引航道长度等优化调整方案进行比选, 对上引航道口门区通航水流条件进行研究。结果表明: 上述措施对改善上引航道口门区通航条件是有效的, 并确定了下矶角枢纽船闸上引航道布置推荐方案。

关键词: 上引航道; 口门区; 通航水流条件; 开挖整治

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0115-09

Experimental study on navigable flow condition of upstream approach channel's entrance area in Dongjiang River Xiaojiaojiao hub

PENG Yong-qin¹, PENG Tao²

(1.Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China; 2.CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400016, China)

Abstract: Regarding the problem that the protruding mouth 1.3 km upstream of the Dongjiang Xiaojiaojiao pivotal dam and the tip of the secondary dam on the right bank causes a backflow area at the entrance area of the upper approach channel on the downstream right side(ashore side), the lateral velocity and the backflow velocity seriously exceed the standard, we establish a normal physical model with a scale of 1:100, compare the optimization and adjustment schemes including excavating the bulge on the right bank upstream of the dam, shortening the secondary dam on the right bank of the reservoir area, optimizing the connection form between the end of the secondary dam and the mountain, and shortening the upper approach channel, and study the navigable flow condition at the entrance area of the approach channel. The results show that above measures are effective to the improvement of the navigable condition of the entrance area of the approach channel, and the recommended scheme for the arrangement of the approach channel of Xiaojiaojiao junction shiplock is determined.

Keywords: upstream approach; entrance area; navigable flow condition; excavation

船闸上下游引航道与河流相连接的口门区及连接段是过闸船舶(队)进出引航道的咽喉, 船闸引航道口门区水流条件是影响船舶航行安全和通航效率的重要因素, 因此研究改善船闸引航道口

门区水流条件具有重要意义。国内已有大量对引航道通航水流条件进行研究的成果: 张绪进等^[1]对郁江贵港枢纽二线船闸上引航道口门区通航水流条件进行研究, 主要针对贵港河段河道窄深、

口门区布置处于两弯道连接的过渡段、边界条件对上引航道口门区通航水流条件影响较大的问题进行研究, 提出一、二线船闸共用上引航道、适当加长原一线导墙长度的措施, 改善了口门区的水流条件; 刘中峰等^[2]对孟洲坝枢纽二线船闸上引航道通航水流条件进行研究, 认为采用加长隔流墙并设置透水段等措施对方案进行优化, 口门区通航水流条件得到明显改善, 且船模通航试验显示船舶操纵参数未超出规范限值, 可满足安全通航要求; 王云莉等^[3]对北江蒙里枢纽上游引航道通航水流条件进行了研究, 提出一、二线船闸分开布置, 二线船闸外导墙延长至 375 m, 堤头段开孔的方案。改善了上游口门区及连接段的斜流、回流等不利流态; 周玉洁等^[4]对犍为航电枢纽船闸上引航道口门区通航条件进行研究, 提出减短外导墙长度、导墙开孔的方案, 改善了上游口门区通航水流条件; 黄明海^[5]和黄国兵等^[6]采用二维非恒定流数学模型, 模拟了三峡工程上、下游引航道在不同布置方案和各种枢纽运行方式下的引航道内非恒定水流; 李一兵等^[7]通过对通航水流条件、实船航行情况和船模航行试验资料的分析, 提出修筑隔流堤对改善葛洲坝三江下引航道口门区通航条件是有效的; 李明德等^[8]通过对株洲枢纽船闸下引航道口门区及连接段的河道右岸滩地采用综合整治措施, 较好地解决了下引航道口门区及连接段通航、淤积等问题; 朱红等^[9]对顺直河段船闸下游引航道口门区在无、有导流墩情况下的水流条件进行概化试验研究, 认为导流墩是削弱口门区回流、减小横向流速的有效工程措施; 黄伦超等^[10]对株洲航电枢纽工程施工期通航水流条件进行了研究。从国内研究现状可知: 上引航道位于库区, 主要通过加长隔流墙、导墙开孔等措施改善口门区通航水流条件; 下引航道位于减脱水段, 主要通过疏浚开挖、加长隔流墙等措施改善口门区通航水流条件。

为研究下矶角枢纽船闸上引航道通航水流条

件, 并提出优化改善措施, 笔者基于 2019 年开展的东江河源—石龙航道扩能升级工程下矶角枢纽水工模型试验研究成果^[11], 提出开挖坝上游右岸凸嘴、缩短库区右岸副坝长度、优化副坝端头与山体的连接形式和缩短上引航道长度等措施对上引航道口门区通航条件进行改善。

1 工程概况

拟建的下矶角枢纽位于广东省惠州市上游约 34 km 的东江干流上, 是东江干流上的第 13 个梯级(图 1)。主要建筑物从左至右依次为左岸副坝、门机平台、电站安装场、主厂房、20 孔泄水闸、双线船闸及右岸副坝(为保护右岸基本农田修建的堤坝), 总宽度为 773 m(图 2)。水库正常蓄水位为 17.74 m, 设计洪水位为 22.82 m, 校核洪水位为 23.64 m。拟建泄水闸共计 20 孔, 阀孔宽 14 m, 阀后接长 28 m、深 2.5 m 的消力池; 拟建双线船闸有效尺度分别为 220 m×23 m×4.5 m(长×宽×槛上水深)和 220 m×16 m×4.5 m; 电站装机 4 台灯泡贯流式机组, 总装机容量 28 MW。

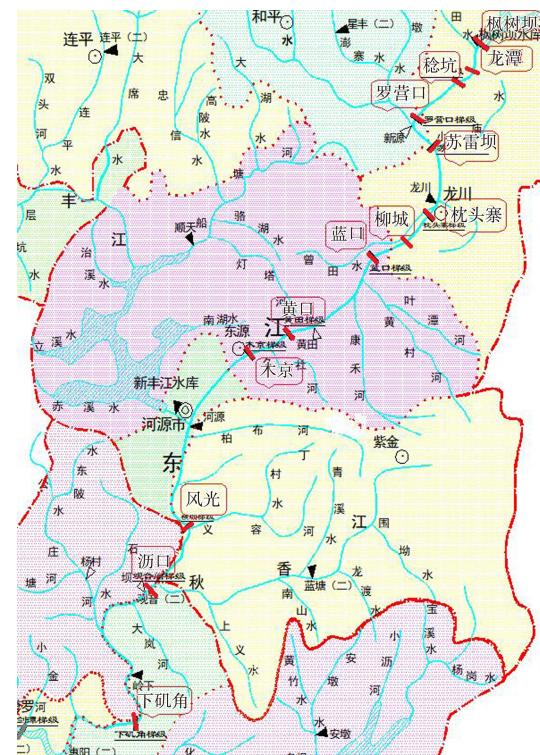


图 1 东江水系及梯级枢纽布置

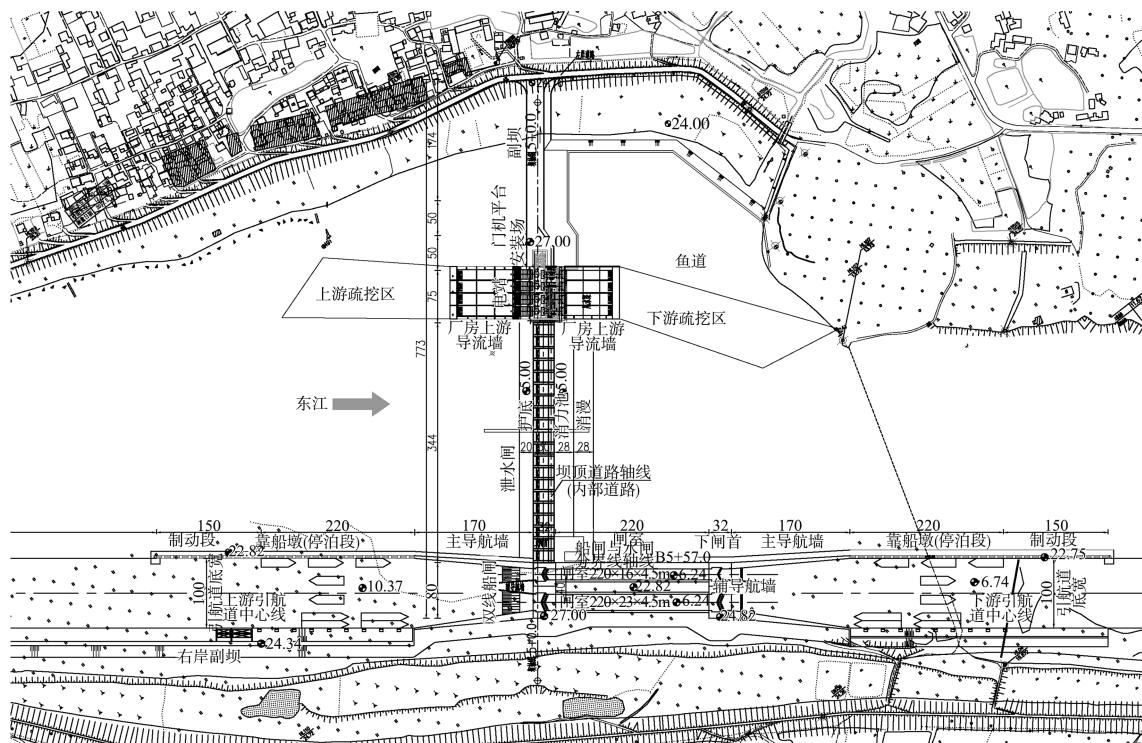


图 2 下矶角枢纽平面布置 (单位: m)

根据航运规划、航道规划、水运量预测、船型等要求,东江干流上的下矶角枢纽工程通航等级为Ⅲ等,船闸设计代表船型为1 000吨级货船,代表船型尺度为49.9 m×12.8 m×2.3 m(长×宽×吃水),船闸最高通航水位按10 a一遇洪水水位确定,对应流量为7 600 m³/s,最低通航水位保证率为95%。船闸引航道及口门区最大表面纵向流速不超过2.0 m/s,横向流速不超过0.3 m/s,回流流速不超过0.4 m/s。

2 模型设计与相似性验证

建立 1:100 比尺的物理模型, 模型范围从坝轴线上游约 5.0 km 开始至坝轴线下游约 5.5 km 为止, 模拟原型河道总长约 10.5 km, 对上引航道口门区通航水流条件进行研究。模型进口位于岭下浅滩的顺直段, 包括上游铁冶派急弯段和上游 1.3 km 右岸凸嘴(图 3); 模型出口位于横沥镇渔民新村。模型进出口均有足够长的顺直过渡段, 能够确保工程河段水流条件的相似性。

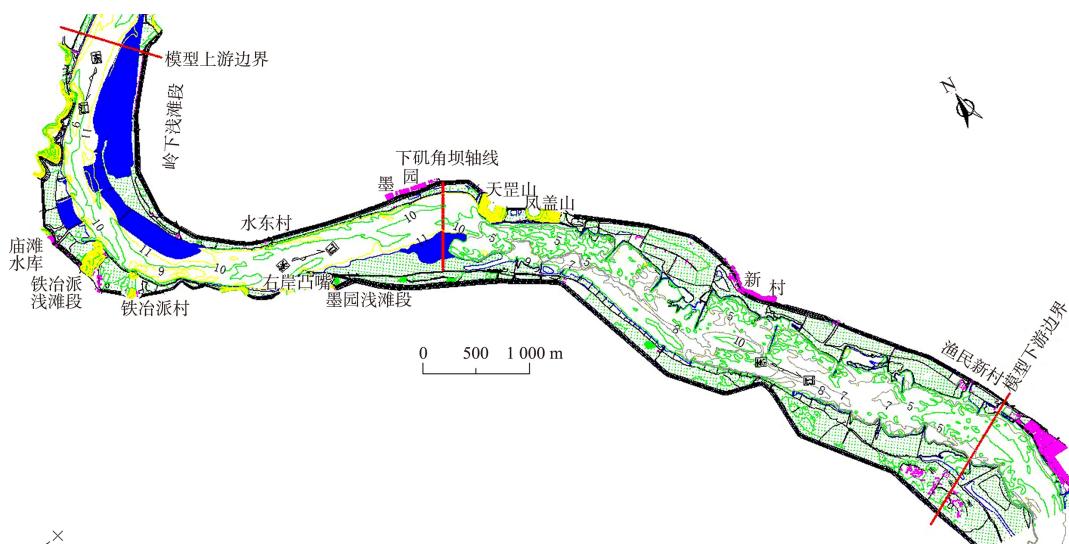


图 3 下矶角枢纽河段河势

河道模型的制作以断面板法为主, 同时辅以等高线法相配合。模型底部填筑块石与河砂混合料, 表层采用水泥砂浆抹面进行硬化处理, 泄水闸及电站等枢纽主要过水建筑物用有机玻璃板制作。在模型平面上用三角网和主、副导线进行控制, 高程由水准仪进行测定。制模河段全长约 10.5 km, 共塑造 190 个断面控制河道地形, 断面间距 60~80 cm(模型值)。对局部地形变化较大的河段和部位适当加密断面板, 并辅以等高线法相配合, 以准确控制河床地形。制模过程中严格控制精度, 制模结束后进行系统的检验, 以确保模型平面误差小于 0.5 cm(模型值), 高程误差小于 1 mm(模型值), 且不存在系统误差, 从而保证了模型与原型河床达到几何相似的要求。

为满足枢纽模型试验研究和验证的需要, 模型中共布置 17 对水尺, 水面线、流速验证试验所采用的原型观测流量为 335、1 036 m³/s。模型水面线验证成果见表 1, 断面流速验证成果见图 4, 流向验证成果见图 5。

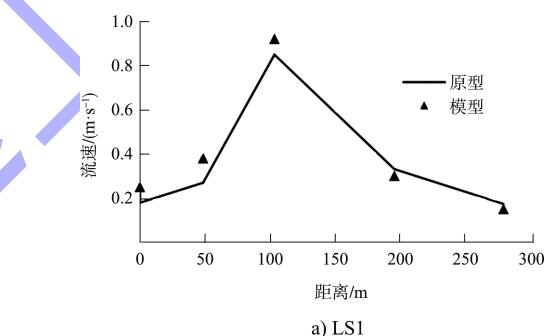
由表 1 可知, 除个别水尺水位与原型水位相差达到 0.11 m 外, 其余大部分水尺相差均在 ± 0.1 m 以内, 说明模型河道与原型河道基本上达到了阻力相似的要求。

表 1 下矶角枢纽模型水位验证

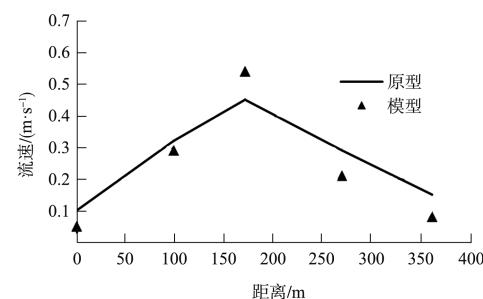
$Q_{\text{断面}}/(m^3 \cdot s^{-1})$	水尺编号	原型水位/m	模型水位/m	差值/m
335	1 [#]	12.10	12.21	0.11
	2 [#]	11.97	12.05	0.08
	3 [#]	11.90	11.95	0.05
	4 [#]	11.88	11.85	-0.03
	5 [#]	11.78	11.86	0.08
	6 [#]	11.75	11.76	0.01
	7 [#]	11.72	11.72	0.00
	8 [#]	11.70	11.71	0.02
	9 [#]	11.67	11.67	0.00
	10 [#]	11.66	11.59	-0.07
	11 [#]	11.64	11.60	-0.04
	12 [#]	11.63	11.57	-0.05
	13 [#]	11.59	11.58	-0.01
	14 [#]	11.57	11.57	0.01
	15 [#]	11.55	11.55	0.01
	16 [#]	11.54	11.53	-0.01
	17 [#]	11.53	11.52	-0.01

续表1

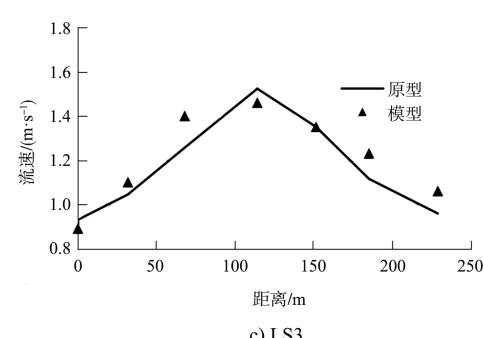
$Q_{\text{断面}}/(m^3 \cdot s^{-1})$	水尺编号	原型水位/m	模型水位/m	差值/m
1 036	1 [#]	13.60	13.70	0.10
	2 [#]	13.45	13.54	0.09
	3 [#]	13.31	13.34	0.03
	4 [#]	13.12	13.19	0.07
	5 [#]	12.89	12.95	0.06
	6 [#]	12.72	12.75	0.04
	7 [#]	12.61	12.60	-0.01
	8 [#]	12.46	12.48	0.02
	9 [#]	12.41	12.38	-0.03
	10 [#]	12.35	12.26	-0.09
	11 [#]	12.24	12.17	-0.07
	12 [#]	12.16	12.12	-0.04
	13 [#]	12.04	12.05	0.01
	14 [#]	11.97	11.97	0.00
	15 [#]	11.89	11.86	-0.03
	16 [#]	11.87	11.85	-0.02
	17 [#]	11.82	11.83	0.01



a) LS1



b) LS2



c) LS3

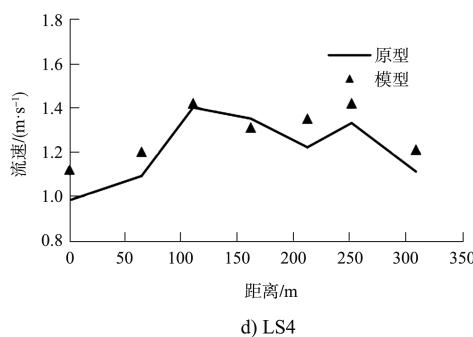


图4 下矶角枢纽模型断面流速验证

由图4可知,除个别测点略有差异外,其余绝大多数测点模型实测的流速值与原型值相差很小,差值基本控制在10%以内,说明模型河道流速的大小及分布与原型河道基本相似。

由图5可知,各河段模型表流流线与原型基本重合,说明模型表面流向与原型基本一致。因此,模型河道的表流流速流向与原型河道基本相似。

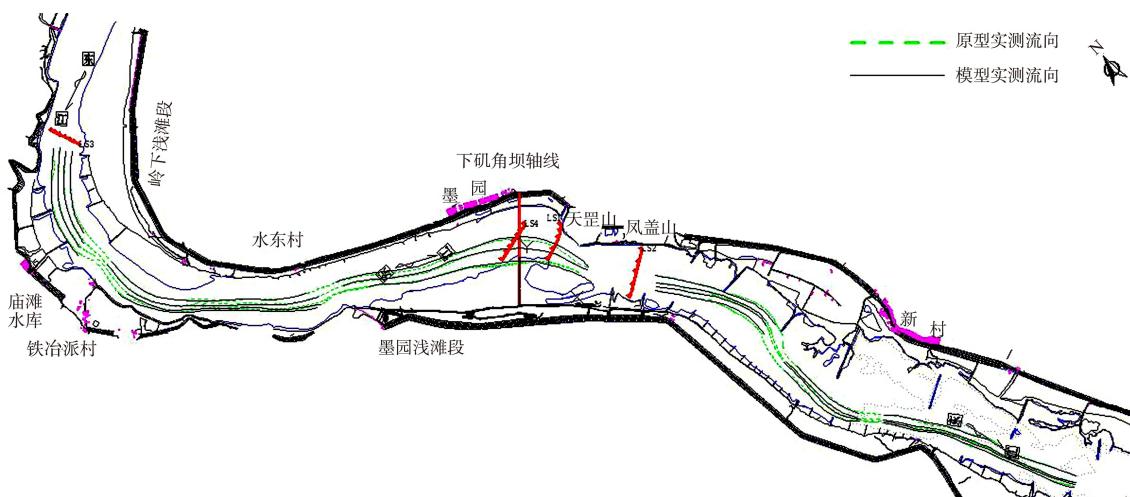


图5 下矶角枢纽模型断面流向验证

综上所述,下矶角枢纽模型的比尺和范围合理。模型相似性验证结果说明,该模型达到了几何相似、河床阻力相似和水流运动条件的相似要求,可以在此基础上开展对下矶角枢纽工程方案的试验研究工作。

3 设计方案船闸上引航道口门区的通航水流条件

根据设计拟定的水库运行方式、枢纽通航论证和规范规定,确定船闸上引航道口门区通航水流条件的试验工况(表2)。各测流断面纵横向流速变化范围见表3。 $Q=7600\text{ m}^3/\text{s}$ 时船闸上引航道口门区水流流态见图6。

表2 船闸上游引航道口门区通航水流条件试验工况

流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	坝前水位/m	开闸方式	备注
823.6	17.74	电站满发, 泄洪闸关闭	电站满发流量
1 800	17.74	电站满发, 1#、3#、4#、5#和7#闸开1.5 m, 2#和6#闸开2.0 m	敞泄分界流量
1 800	14.03	电站停机, 全闸敞泄	敞泄分界流量
3 000	15.66	电站停机, 全闸敞泄	常年洪水
4 650	17.42	电站停机, 全闸敞泄	$P=50\%$
6 700	19.51	电站停机, 全闸敞泄	$P=20\%$
7 600	20.34	电站停机, 全闸敞泄	$P=10\%$ (最高通航流量)

表 3 设计方案船闸上引航道口门区纵、横向流速

流量及工况	断面位置	流速/(m·s ⁻¹)			流量及工况	断面位置	流速/(m·s ⁻¹)		
		纵向	横向	回流			纵向	横向	回流
$H_{\pm} = 17.74 \text{ m}$, $Q = 823.6 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站满发	1	0	0~0.01	0.10~0.15	$Q = 4650 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站停机, 全闸敞泄	1	0~1.12	0.04~0.11	0~0.16
	2	0	0~0.01	0.09~0.23		2	0~1.29	0.03~0.12	0~0.20
	3	0	0~0.01	0.06~0.26		3	0~1.26	0.02~0.07	0~0.21
	4	0	0~0.03	0.07~0.22		4	0~1.34	0.03~0.14	0~0.07
	5	0	0~0.04	0.04~0.18		5	0~1.51	0.01~0.22	0~0.02
	6	0	0~0.04	0.24~0.34		6	0~1.15	0.11~0.28	0~0.12
$H_{\pm} = 17.74 \text{ m}$, $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站满发	1	0~0.08	0~0.02	0~0.15	$Q = 6700 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站停机, 全闸敞泄	1	0~1.04	0.03~0.36	0~0.62
	2	0~0.27	0~0.05	0~0.18		2	0~1.07	0.06~0.24	0~0.72
	3	0~0.27	0~0.03	0~0.20		3	0~1.30	0.03~0.12	0~0.77
	4	0~0.33	0.01~0.08	0~0.25		4	0~1.45	0.03~0.10	0~0.62
	5	0~0.34	0.02~0.08	0~0.28		5	0~1.43	0.08~0.21	0~0.82
	6	0~0.35	0.02~0.10	0~0.30		6	0~1.89	0.06~0.15	0~1.03
$Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站停机, 全闸敞泄	1	0~0.44	0.01~0.08	0~0.05	$Q = 7600 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站停机, 全闸敞泄	1	0~0.26	0.32~0.77	0~0.67
	2	0.08~1.01	0.01~0.14	0		2	0~1.08	0.21~0.62	0~0.86
	3	0~1.12	0.02~0.15	0~0.05		3	0~1.16	0.03~0.09	0~1.24
	4	0~1.14	0~0.14	0~0.12		4	0~0.96	0.23~0.35	0~1.10
	5	0~1.30	0~0.13	0~0.06		5	0~1.25	0.32~0.68	0~0.77
	6	0~1.34	0.04~0.10	0		6	0~2.32	0.10~0.27	0~0.93
$Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站停机, 全闸敞泄	1	0~0.71	0.01~0.10	0~0.25		1	0~0.26	0.32~0.77	0~0.67
	2	0~1.02	0.03~0.21	0~0.36		2	0~1.08	0.21~0.62	0~0.86
	3	0~1.00	0.01~0.11	0~0.50		3	0~1.16	0.03~0.09	0~1.24
	4	0~0.96	0.01~0.10	0~0.25		4	0~0.96	0.23~0.35	0~1.10
	5	0~1.06	0.02~0.08	0~0.09		5	0~1.25	0.32~0.68	0~0.77
	6	0~1.39	0.02~0.13	0~0.23		6	0~2.32	0.10~0.27	0~0.93

注：1. 引墙堤头外 150 m 范围内为口门区，其后为连接段；2. 表中断面位置 1~6 分别表示：0-546.3 m (距外引墙堤头 0 m)；0-596.3 m (距外引墙堤头 50 m)；0-646.3 m (距外引墙堤头 100 m)；0-696.3 m (距外引墙堤头 150 m)；0-746.3 m (距外引墙堤头 200 m)；0-796.3 m (距外引墙堤头 250 m)

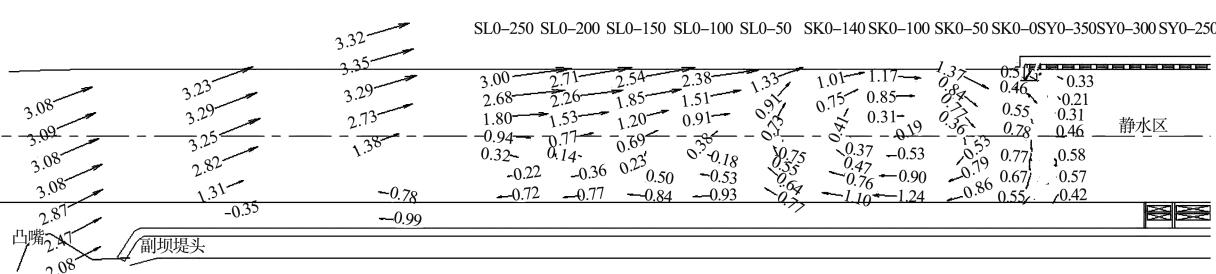


图 6 船闸上引航道口门区水流流态 ($Q=7600 \text{ m}^3/\text{s}$)

上述试验表明：在流量 $Q \leq 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水库保持正常蓄水位 17.74 m 运行、电站发电的情况下，整个上游库区的水流均较为平静，上引航道口门区及连接段的通航水流条件好；在流量 $1800 \text{ m}^3/\text{s} < Q \leq 4650 \text{ m}^3/\text{s}$ 、电站停机、枢纽敞泄情况下，上引航道口门区及连接段水域的流速明显增大，受上游右岸凸嘴（距坝轴线约 1.3 km ）

及副坝堤头段伸入河床挑流等的影响，在其下游右侧(靠岸侧)的上引航道口门区形成回流区，随流量的增加，回流区范围和强度逐渐增大，但上引航道口门区及连接段的水流条件仍满足规范要求；当流量 $Q > 4650 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，上游凸嘴及副坝堤头段的挑流作用更加明显，上引航道口门区的回流区范围和强度进一步增大。口门区的横流和回

流均超出规范的规定值。

4 优化调整方案船闸上引航道口门区的通航水流条件

优化调整方案主要是通过坝上游右岸凸嘴采取开挖措施(2种开挖方案进行比较), 同时缩短库区右岸副坝长度, 并优化副坝端头与山体的连接形式, 缩短上引航道长度, 以达到调顺上引航道口门区通航水流条件的目的。其主要修改措施如下(图7)。

1) 对坝上游右岸凸嘴(距坝约1.3 km)采取开挖措施。①开挖方案1(对应优化调整方案1): 开挖坡比1:1, 坡脚高程11.0 m, 两级台阶高程分别

为20、30 m, 见图8a); ②开挖方案2(对应优化调整方案2): 开挖坡比1:2, 坡脚高程11.0 m, 见图8b)。

2) 缩短库区右岸副坝长度, 并优化副坝端头与山体的连接形式, 以减小凸嘴和副坝端头的挑流对上引航道口门区通航水流条件的影响。将副坝长度缩短至1 032.54 m, 使整治后的上游凸嘴岸线与右岸副坝平顺衔接, 以减小其挑流对口门区水流条件的影响。

3) 将船闸上引航道减短100 m, 减短后的上引航道总长度为440 m。

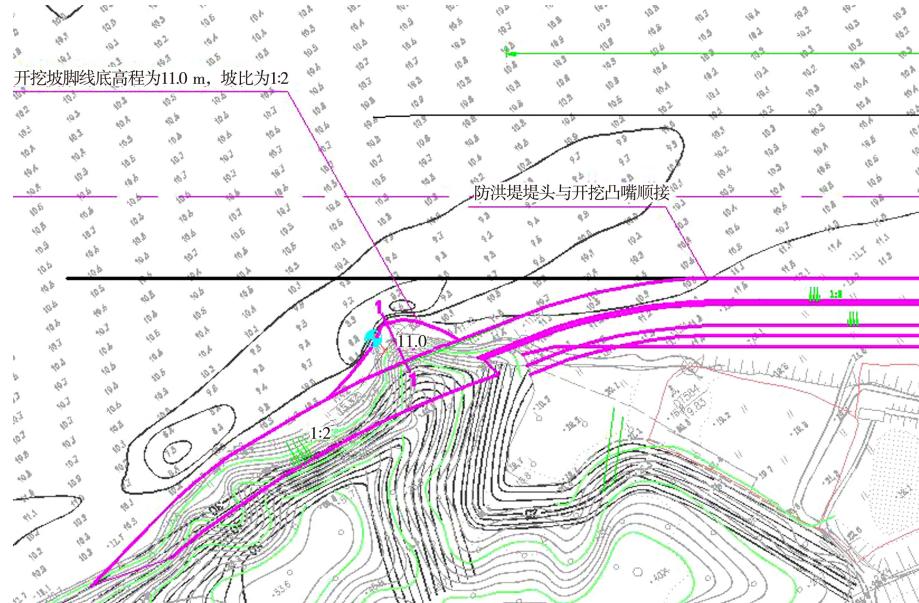
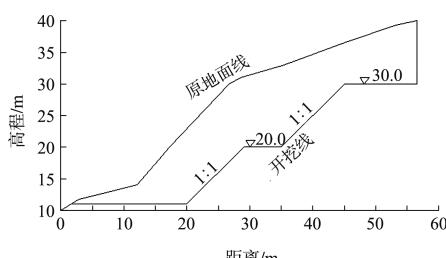
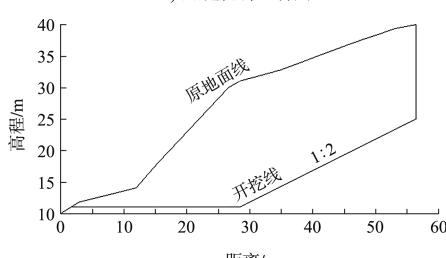


图7 优化调整方案平面布置



a) 开挖方案1断面1-1



b) 开挖方案2断面1-1

图8 凸嘴横断面开挖

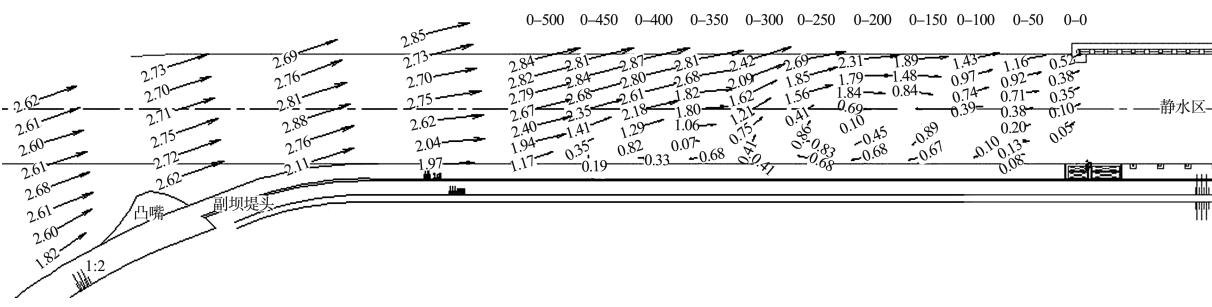
对于2种优化调整方案, 试验实测了各工况下的流速分布资料(表4), $Q=7 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 下试验结果见图9。由实测流速分布资料与流态观测结果可知: 优化调整方案1在 $4 560 \text{ m}^3/\text{s} < Q \leq 7 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区部分区域的纵、横向流速指标均超过了规范要求。优化调整方案2实施后, 在流量 $Q=1 800 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水库保持正常蓄水位和泄水闸全部开启泄洪2种工况下, 船闸上引航道口门区的流速小, 通航水流条件良好; 在 $1 800 \text{ m}^3/\text{s} < Q \leq 4 650 \text{ m}^3/\text{s}$ 、电站停机、枢纽敞泄洪水时, 上引航道口门区无回流流态, 各项流速指标满足规范要求; 在 $4 560 \text{ m}^3/\text{s} < Q \leq 7 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区出现回流现象, 其最大纵横向流速及回流

流速虽已逐渐接近规范的界限值，但仍能满足要求，实现安全通航的需要。2个方案中，优化调整

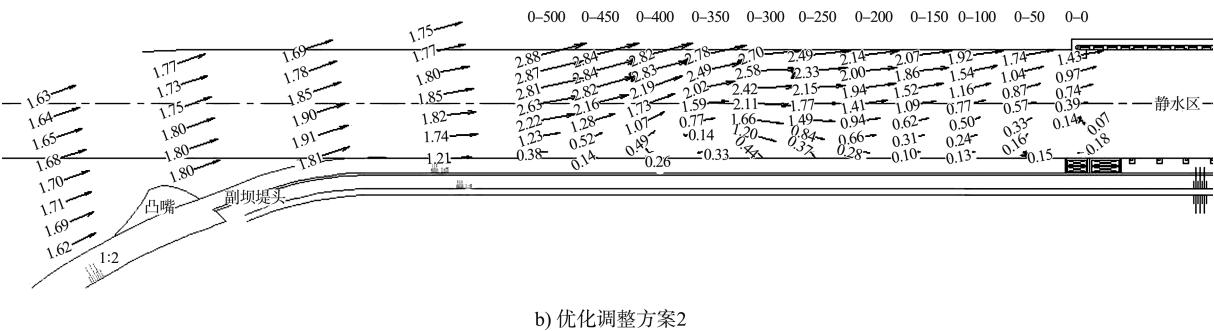
方案 2 改善上引航道口门区通航水流条件的效果更佳。

表 4 优化调整方案时船闸上引航道口门区纵、横向流速

流量及工况	断面位置	方案 1 流速/(m·s ⁻¹)			方案 2 流速/(m·s ⁻¹)		
		纵向	横向	回流	纵向	横向	回流
$H_{\perp} = 17.74 \text{ m}$, $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站满发	1	0.08~0.20	0.02~0.13	0	0~0.16	0.01~0.09	0~0.06
	2	0.26~0.52	0~0.15	0	0~0.49	0.04~0.14	0~0.04
	3	0.33~0.66	0.01~0.13	0	0.14~0.59	0.05~0.14	0
	4	0.40~0.69	0~0.10	0	0.25~0.66	0.05~0.13	0
	5	0.46~0.74	0~0.06	0	0.31~0.78	0.02~0.14	0
	6	0.50~0.77	0.02~0.07	0	0.37~0.77	0.02~0.12	0
$Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站停机, 全闸敞泄	1	0.01~0.23	0~0.19	0	0.05~0.13	0.01~0.11	0
	2	0.05~0.80	0.05~0.26	0	0.05~0.70	0.01~0.26	0
	3	0.37~1.16	0.07~0.28	0	0.23~0.86	0.05~0.24	0
	4	0.59~1.17	0.04~0.21	0	0.41~1.10	0.04~0.21	0
	5	0.86~1.14	0.02~0.18	0	0.67~1.05	0.02~0.11	0
	6	0.84~1.18	0.04~0.12	0	0.65~1.12	0~0.16	0
$Q = 4650 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站停机, 全闸敞泄	1	0~0.94	0.03~0.36	0~0.06	0.02~0.33	0~0.13	0
	2	0.03~1.45	0~0.36	0	0.02~1.59	0.01~0.29	0
	3	0.09~1.63	0.01~0.33	0	0.05~1.66	0.01~0.29	0
	4	0.23~1.82	0.02~0.28	0	0.13~1.83	0~0.28	0
	5	0.23~1.86	0.04~0.24	0	0.24~1.95	0.02~0.25	0
	6	0.27~1.88	0.01~0.22	0	0.64~2.00	0~0.27	0
$Q = 6700 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站停机, 全闸敞泄	1	0~0.93	0.08~0.18	0~0.33	0~1.21	0.01~0.27	0~0.28
	2	0~1.12	0.07~0.34	0~0.23	0~1.55	0.02~0.25	0~0.35
	3	0~1.58	0.03~0.44	0~0.08	0~1.77	0.02~0.08	0~0.31
	4	0.08~1.84	0.01~0.40	0	0~1.95	0~0.13	0~0.32
	5	0.10~1.97	0.01~0.43	0	0~2.24	0.07~0.30	0~0.34
	6	0.10~2.23	0~0.34	0	0~2.18	0.11~0.32	0~0.35
$Q = 7600 \text{ m}^3/\text{s}$, 电站停机, 全闸敞泄	1	0.08~1.14	0.02~0.23	0	0~1.37	0.06~0.26	0~0.16
	2	0~1.71	0.02~0.39	0~0.21	0~1.69	0.04~0.30	0~0.12
	3	0~2.07	0.05~0.31	0~0.3	0.13~1.85	0.01~0.28	0
	4	0~2.34	0.02~0.20	0~0.3	0.10~1.96	0.02~0.26	0
	5	0~2.47	0~0.39	0~0.37	0.27~2.06	0.04~0.29	0
	6	0~2.55	0.01~0.55	0~0.16	0.25~2.48	0~0.27	0



a) 优化调整方案1

图9 船闸上引航道口门区水流流态($Q=7600 \text{ m}^3/\text{s}$)

4 结论

1) 下砾角枢纽建成后, 因坝上游 1.3 km 处凸嘴及右岸副坝端头的挑流影响, 在下游右侧(靠岸侧)的上引航道口门区形成回流区, 使横向流速和回流流速严重超标。

2) 通过对坝上游右岸凸嘴进行开挖、缩短库区右岸副坝长度, 并优化副坝端头与山体的连接形式、缩短上引航道长度等优化调整措施进行方案比选, 确定下砾角枢纽船闸上引航道布置推荐方案为优化调整方案 2。

3) 在推荐方案下, $Q \leq 7600 \text{ m}^3/\text{s}$ ($P=10\%$) 的各级通航流量工况时, 船闸上引航道口门区的水流相对较平缓, 其各项流速指标均完全满足规范要求, 较好地解决了口门区横流和回流较大的问题, 取得了较好的效果。

参考文献:

[1] 张绪进, 宁武, 周家渝. 郁江贵港枢纽二线船闸上引航道口门区通航水流条件试验研究[J]. 中国科技信息, 2013(3): 109-110.

(上接第 103 页)

[27] QIANG Y, TIAN G, LIU Y, et al. Energy-efficiency models of sustainable urban transportation structure optimization[J]. IEEE access, 2018(6): 18192-18199.

[28] 吴兆麟, 朱军. 海上交通工程[M]. 2 版. 大连: 大连海事大学出版社, 2004.

[29] 王岩, 孙寿保, 徐峰, 等. 提升尹公洲段航道通过能力的探讨[J]. 水运工程, 2020(12): 161-165, 190.

[30] 李绍武, 曾冬, 祁泽鹏. 秦皇岛港航道通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2016(11): 108-113.

[31] 唐颖, 薛晓晓, 商剑平. 广州港深水航道通过能力仿真

- [2] 刘中峰, 刘达, 黄本胜, 等. 孟洲坝枢纽二线船闸上引航道通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2019(1): 119-125.
- [3] 王云莉, 孙国栋, 李艳, 等. 北江蒙里枢纽上游引航道通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2016(4): 105-112.
- [4] 周玉洁, 张绪进. 碧水航电枢纽船闸上引航道口门区通航条件研究[J]. 吉林水利, 2011(3): 14-18.
- [5] 黄国兵. 三峡工程上游引航道非恒定流数值分析与计算[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 10-14.
- [6] 黄明海, 黄国兵. 三峡工程引航道通航水流数值模拟应用研究[J]. 湖北水力发电, 2007(3): 36-39.
- [7] 李一兵, 李发忠. 葛洲坝三江下引航道口门区通航条件改善措施探讨[J]. 水道港口, 2005, 26(3): 154-158.
- [8] 李明德, 黄伦超, 桑雷. 株洲枢纽船闸下引航道口门区整治措施及效果分析[J]. 水运工程, 2006(8): 79-82.
- [9] 朱红, 郝品正. 导流墩改善船闸引航道口门区水流条件试验研究[J]. 水道港口, 2005(2): 109-112.
- [10] 黄伦超, 江诗群, 刘诚. 湘江株洲枢纽工程施工期通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2001(11): 31-34.
- [11] 张绪进, 彭永勤. 东江河源至石龙航道扩能升级工程下砾角枢纽水工模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西科水运工程咨询中心, 2019. (本文编辑 郭雪珍)
- [27] QIANG Y, TIAN G, LIU Y, et al. Energy-efficiency models of sustainable urban transportation structure optimization[J]. IEEE access, 2018(6): 18192-18199.
- [28] 吴兆麟, 朱军. 海上交通工程[M]. 2 版. 大连: 大连海事大学出版社, 2004.
- [29] 王岩, 孙寿保, 徐峰, 等. 提升尹公洲段航道通过能力的探讨[J]. 水运工程, 2020(12): 161-165, 190.
- [30] 李绍武, 曾冬, 祁泽鹏. 秦皇岛港航道通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2016(11): 108-113.
- [31] 唐颖, 薛晓晓, 商剑平. 广州港深水航道通过能力仿真
- [32] 王娜玲. 珠三角内河航道网络结构及其优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [33] 熊海鸥. 低碳背景下广东省航运业发展对策研究[J]. 广州航海学院学报, 2017, 25(3): 23-25.
- [34] 丁之仪, 陈汨梨, 封学军. 内河航道能力提升对区域交通系统的节能减排效果[J]. 水运工程, 2019(1): 113-118.
- [35] 解天荣, 王静. 交通运输碳排放量比较研究[J]. 综合运输, 2011(8): 1-5. (本文编辑 武亚庆)