



岷江龙溪口航电枢纽工程引航道口门区 通航水流条件影响及对策

关英俊¹, 杨 宇², 腾树强³

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
3. 四川港航建设工程有限公司, 四川 乐山 610023)

摘要: 岷江龙溪口航电枢纽工程是岷江乐山—宜宾段航道等级提升的第 4 级。该工程引航道通航水流条件是保障四川重大件水路运输通道安全的重要因素。采用 1:100 整体水工模型进行试验, 分析各种通航工况下的通航水流条件, 并针对上引航道通航水流条件不满足规范要求存在的问题, 提出改善引航道口门区通航水流条件, 提高最大通航安全流量的综合性工程措施, 较好地解决了枢纽上游引航道及口门区的通航安全问题, 研究成果可作为类似工程借鉴和参考。

关键词: 口门区; 水流条件; 船闸; 模型试验

中图分类号: U653

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)10-0027-06

Influence of navigable flow conditions and countermeasures for approach channel at entrance area of Longxikou Navigation-power Junction project in Minjiang River

GUAN Yingjun¹, YANG Yu², TENG Shuqiang³

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

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Sichuan Port & Waterway Construction Engineering Co., Ltd., Leshan 610023, China)

Abstract: Longxikou Navigation-power Junction project in Minjiang River is the fourth level of the upgrade of the waterway from Leshan to Yibin of Minjiang River, and the navigable flow condition of the approach channel of the project is an important factor to ensure the safety of heavy and large waterway transportation channels in Sichuan. This paper uses the 1:100 physical hydraulic model to conduct tests and analyzes the navigable flow conditions under various navigable conditions. In view of the problem that the navigable flow conditions of the upper approach channel do not meet the requirements of the code, the paper proposes comprehensive engineering measures to improve the navigable flow conditions of the approach channel at the entrance area and increase the maximum navigable safety flow. It solves the navigation safety problem of the upper approach channel and entrance area of the junction, and the research results can provide a reference for similar projects.

Keywords: entrance area; flow condition; ship lock; model experiment

渠化工程^[1]已成为改善天然河流通航水流条件、提高航道等级的重要手段。船闸作为渠化工程的通航建筑物, 其通航安全至关重要, 特别是引航

道口门区的通航水流条件^[2]。目前, 国内外对引航道口门区的通航水流条件研究已有大量成果, 周权^[3]对白石窑一线船闸闸室尺度变更后下引航道通

收稿日期: 2023-06-07

作者简介: 关英俊 (1984—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计。

航水流条件进行试验研究,为改善引航道口门区通航水流条件,提出了合理的开挖范围和引航道布置形式。郑红杰^[4]对透空隔流堤不同角度情况下对口门区的水流条件进行研究,得出对弯道下游内侧布设上游船闸入口和上游引航道口门区布设透空隔流堤均能改善口门区水流条件的结论,并提出最优夹角阈值为 30° ;张羽等^[5]通过数值模拟研究船闸布置于弯曲河段情况下的引航道口门区的通航水流条件,通过调整渠化工程泄洪闸不同开启方式有效降低引航道口门区的不良流态,得出引航道轴线与回流漩渦夹角越大,斜流越大,采取控制节制闸调度方式可以削弱引航道回流和斜流的不良流态;陈明等^[6]对左江山秀船闸改扩建工程引航道通航水流条件进行研究,针对船闸布置于急弯河段凹岸时,通过凹岸筑坝、凸岸开挖和分水隔流的布置方案有效改善通航水流条件。然而,关于在满足引航道口门区通航水流条件下提高最大通航安全流量的研究相对较少。本文依托岷江龙溪口航电枢纽船闸工程,对船闸通航水力学进行物理和数值模拟研究,在满足引航道口门区通航水流条件下,通过优化工程措施,提高最大通航安全流量。

1 工程概况

岷江下游梯级航运开发采取渠化上游、整治下游的工程措施,使其 182 km 航道达到Ⅲ级通航标准。岷江龙溪口航电枢纽工程位于乐山市犍为

县境内新民镇河段,距离龙君坝滩约 3 km。坝址附近河面宽 600 m,河床底高程 302 m,在上游约 600 m 处有一突嘴,下游 1 000 m 处受地形限制,河床微向左弯。结合两岸地形和主河槽位置,船闸布置于右岸,24 孔泄水建筑物布置河床中间,发电厂房布置于左岸。综合考虑船闸轴线与上游突嘴挑流、下游引航道与微弯河道主河槽衔接的转弯半径和二线船闸布置的问题^[7],在坝址距右岸枯期水边界 50 m 处采用船闸轴线与枢纽坝轴线正交布置。船闸闸室有效尺寸为 220.0 m×34.0 m×4.5 m,在引航道的布置中采用“曲进直出”的形式,宽 60 m。平行于船闸轴线布置的上游引航道外导墙为辅墙,总长 345 m,由 35 m 进水口段和 310 m 长的重力式实体结构+透空桩板结构导航墙组成。内导墙为主导墙,在 35 m 进水口段后采用 160 m 二次曲线段($y=x^2/1\,000$)向岸侧偏转,后接 119 m 直线导航墙和 160 m 直线停泊段,其末端以 2 000 m 半径,偏转 6° 以切线延伸 250 m,通过开挖引航道边线的工程措施以衔接上游主航道。下游引航道外导墙为辅墙,平行船闸轴线布置,由 20 m 出水口段和 310 m 隔水实体导墙组成,共 330 m。内导墙为主导墙,在 20 m 进水口段后采用 160 m 二次曲线段($y=x^2/1\,000$)向岸侧偏转,后接 119 m 直线导航墙和 160 m 直线停泊段,其末端以 1 500 m 半径,偏转 27° 以切线延伸与下游主航道衔接。总体布置见图 1。

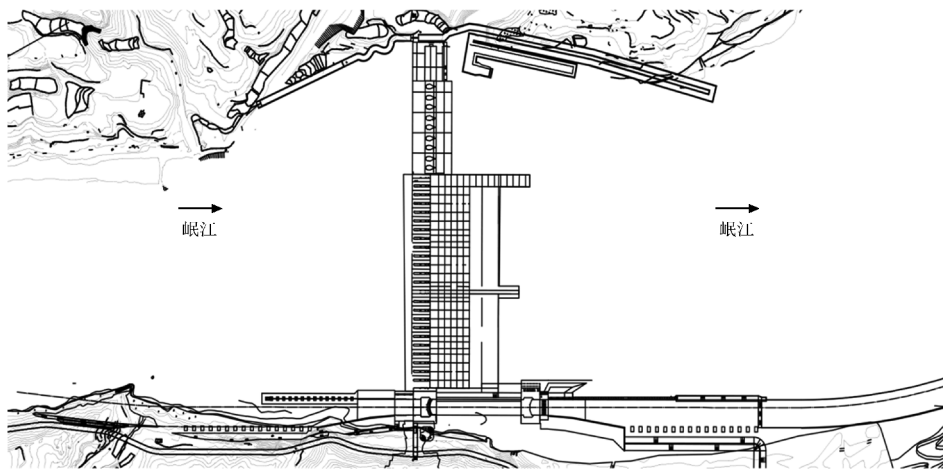


图 1 枢纽总平面布置

2 模型设计

枢纽整体模型按重力相似准则设计^[8]，模型长度比尺为 1:100，模型范围从坝轴线以上 4.0 km 到坝下游 2.0 km。模型地形采用断面法，平面放样采用三角网导线系统，高程用水准仪测定。对于船闸内导航墙侧的复杂地形，局部进行处理。模型设计和制作满足水运行业规范要求。

3 试验工况

结合枢纽调度规则、泄洪闸闸门开启工况和通航标准等多方面因素，龙溪口航电枢纽工程通航水流条件试验工况见表 1。

表 1 试验工况

工况	重现期/a	流量/(万 m ³ ·s ⁻¹)		水位/m		备注
		泄洪闸	电站	上游	下游	
1	10	3.21	0	313.82	312.95	24 孔泄洪闸全部开启
2	5	2.59	0	312.37	311.62	24 孔泄洪闸全部开启
3	2	1.80	0	310.29	309.34	24 孔泄洪闸全部开启

4 试验成果分析

当流量为 3.21 万 m³/s 时，坝址上游距口门 550 m 处最大流速为 5.47 m/s，流速方向平行于航道。坝址上游距口门 265 m 处右侧有明显回流，最大回流流速达到 2.21 m/s。坝址下游口门区 500 m 范围内流向比较均匀，靠近右岸有轻微回流，回流流速和横流流速不大于 0.30 m/s。

当流量为 2.59 万 m³/s 时，坝址上游距口门 550 m 处最大流速为 5.42 m/s，流速方向平行于航道。坝址上游距口门 265 m 处右侧有明显回流，最大回流流速达到 2.16 m/s。坝址下游口门区 500 m 范围内流向比较均匀，靠近右岸有轻微回流，横流流速最大为 0.31 m/s，位于距下游口门 400 m 位置，回流流速均小于 0.30 m/s。

当流量为 1.80 万 m³/s 时，坝址上游距口门 550 m 处最大流速为 4.55 m/s，流速方向平行于航道。坝址上游距口门 265 m 处右侧有明显回流，最大回流流速达到 1.67 m/s。坝址下游口门区 500 m 范围内流向比较均匀，靠近右岸有轻微回流，回流流速最大值为 0.34 m/s，位于口门区下游 130 m 右侧，横流流速均小于 0.30 m/s。

限于篇幅，本文重点分析原设计方案在典型流量 $Q=1.80$ 万 m³/s 时流速分布(图 2)和各流量下上游口门区流态(图 3)，上引航道特征流速值见表 2。

出现上述不良水流现象的原因在于：1) 枢纽上下游河道两岸自然坡度为 38°~51°，岭谷高差 150~330 m，上游河段宽约 540 m，下游河道宽约 760 m。受两岸地形限制，在大于 2 a 一遇不同洪水重现期情况下，上游口门区及河段内最大纵向流速远大于规范 2 m/s 的限值要求。2) 上游右岸突嘴对上引航道口门区横流和回流影响较大。

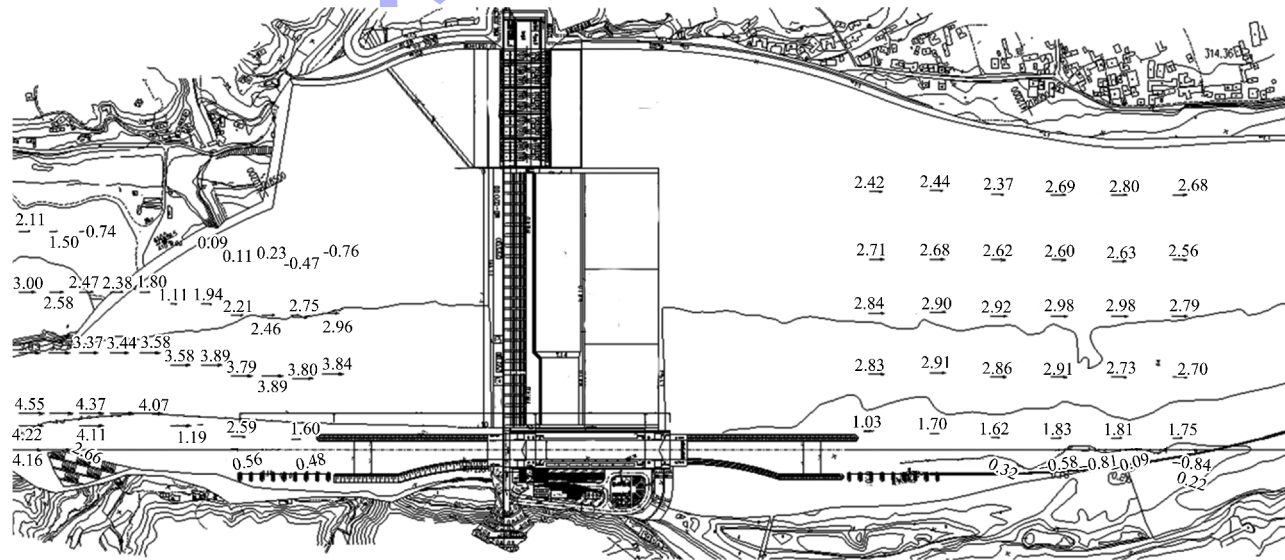


图 2 $Q=1.80$ 万 m³/s 时流速分布

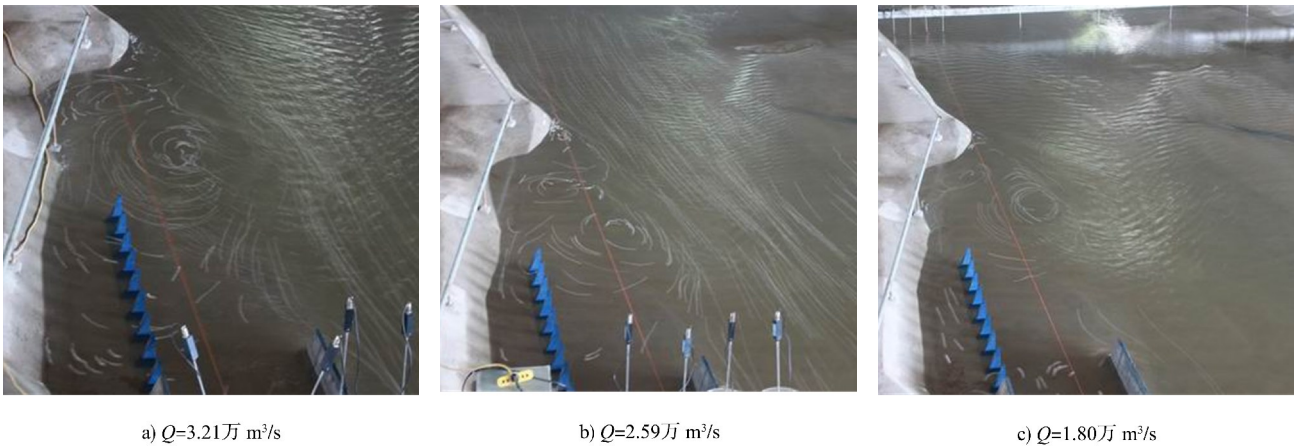


图 3 设计方案各流量下上引航道口门区流态

表 2 设计方案上引航道口门区附近特征流速值

距口门 距离/m	流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)																	
	$Q=3.21$ 万 m^3/s						$Q=2.59$ 万 m^3/s						$Q=1.80$ 万 m^3/s					
	右边线		中心线		左边线		右边线		中心线		左边线		右边线		中心线		左边线	
	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向
500	0	4.70	0	5.43	0	5.47	0	4.88	0	5.47	0	5.41	0	4.16	0	4.22	0	4.47
450	0	4.79	0	5.44	0	5.33	0	5.09	0	5.39	0	5.26	0	3.95	0	4.07	0	4.15
400	0	2.59	0	5.32	0	5.38	0	3.98	0	5.46	0	5.31	0	2.66	0	4.11	0	4.34
350	0	0.51	0	3.08	0	5.29	0.46	0	0.75	2.80	1.35	5.04	0	0.10	0	1.66	0	4.31
300	1.18	0	0.25	0.94	0	1.96	0.86	0	1.40	0	0.77	0	0.09	0.33	0.34	0	0	1.35
250	1.70	0	1.29	0	0	1.56	1.92	0	1.98	0	0.96	0	0	0	0.82	0	0	1.19
200	2.21	0	1.37	0	0.21	0.80	2.16	0	1.66	0	1.04	0	1.67	0	1.51	0	0.43	0
150	1.84	0	1.31	0	0.83	0	2.15	0	1.92	0	1.54	0	0.50	0	0.14	0.54	0	1.08
100	1.03	0	0.13	0.48	0.34	1.27	0	0	0.49	0.28	0.46	1.70	0	0.10	0.19	0.71	0	0.22
50	0.56	0	0.10	0.38	0	1.55	0.10	0.38	0	0.81	0	2.03	0.05	0	0.12	0.46	0.23	0.84
0	0.78	0	0.62	0	0.31	0	0	0.50	0.44	0	0.24	0.42	0.53	0	0	0.48	0.45	0

注：黑体数字为回流流速。

5 优化布置方案

5.1 方案 1

将原设计方案上游左岸阻水的采沙场疏浚至高程 298 m，尽量增加过流断面，降低纵向流速；对上游内导航墙末端的突嘴采取开挖的方式，以改善上引航道口门区水流条件。采用模型测量 1.80 万、1.50 万、1.30 万 m^3/s 共 3 个流量、8 个工况下的上游口门区流速。

研究发现，流量 1.80 万 m^3/s 时，纵向、横向和回流流速均不满足通航水流条件；流量 1.50 万 m^3/s

时，纵向通航水流条件基本满足通航要求(图 4)；流量 1.30 万 m^3/s 时，通航水流条件基本满足通航要求。

相比原设计方案，方案 1 在流量 1.50 万 m^3/s 时的纵向、横向和回流流速的通航水流条件均有所改善，特别是纵向流速的通航水流条件基本接近规范限值，但横流和回流流速通航水流条件不满足要求。导致右侧航道边线纵横流改善不佳的主要原因在于右岸突嘴依然存在挑流的影响。方案 1 上引航道口门区流态见图 5，流速特征值见表 3。

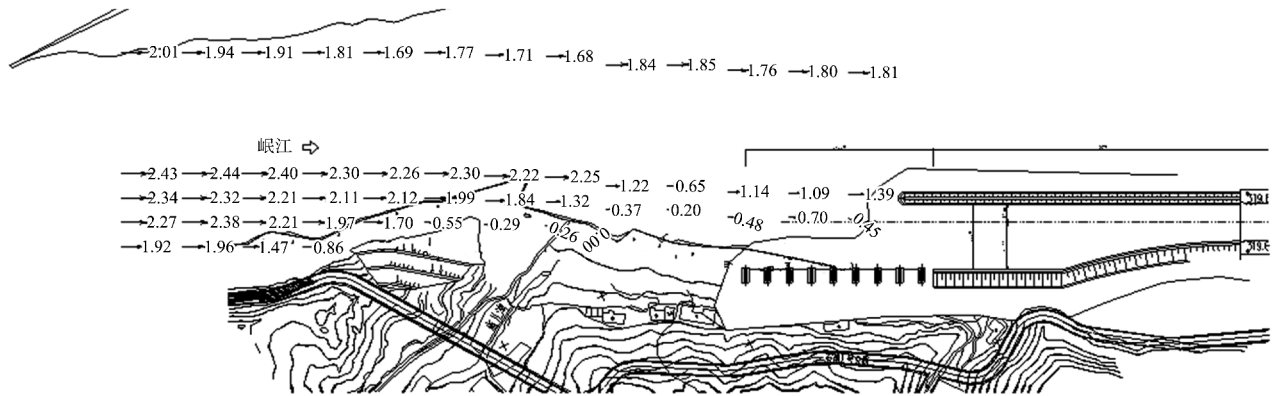
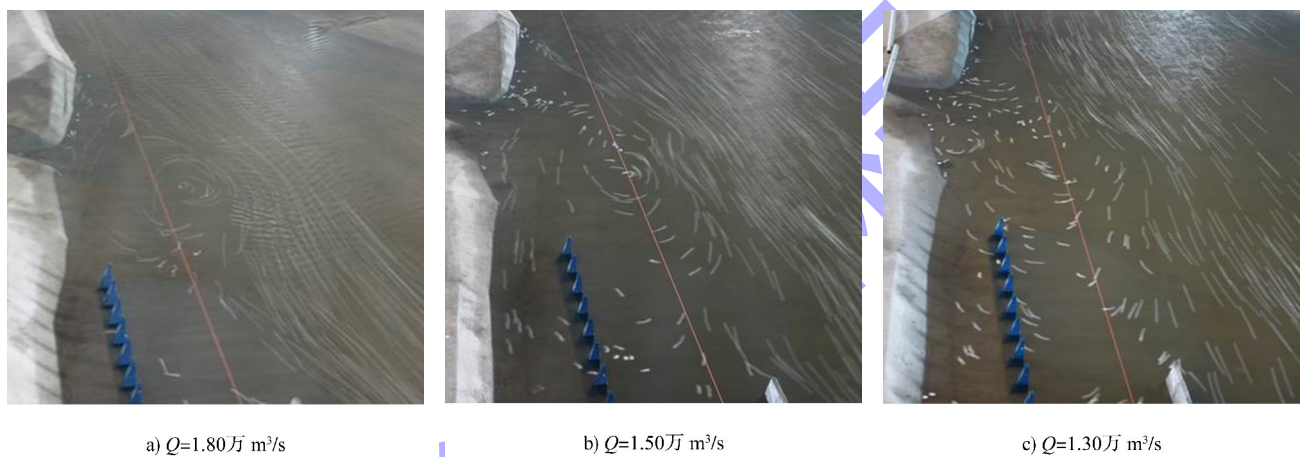
图 4 $Q=1.50$ 万 m^3/s 时方案 1 口门区流速分布 (单位: m/s)

图 5 不同流量下方案 1 上引航道口门区流态

表 3 方案 1 上引航道口门区附近特征流速值

距口门 距离/m	流速/(m·s ⁻¹)																	
	Q=3.21 万 m ³ /s						Q=2.59 万 m ³ /s						Q=1.80 万 m ³ /s					
	右边线		中心线		左边线		右边线		中心线		左边线		右边线		中心线		左边线	
	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向
605	0	4.55	0	4.40	0	4.43	0	2.44	0	2.38	0	1.96	0	2.23	0	1.96	0	1.49
550	0	4.41	0	4.28	0	3.99	0	2.40	0	2.21	0	1.47	0	2.21	0	1.91	0	1.38
495	0	4.02	0	3.69	0	0	0	2.30	0	1.97	0	0.86	0	2.10	0	1.58	0	0.23
440	0	4.23	0	1.09	0.17	0	0	2.26	0	1.70	0	0.57	0	2.13	0	1.27	0	0.23
385	0	4.21	0	0.79	0.16	0	0	2.30	0	0.55	0.06	0.10	0	1.97	0	0.25	0.26	0.45
330	0	4.18	0	1.11	0	0.16	0	2.22	0	0.29	0	0.12	0	1.97	0	0.25	0	0.52
275	0	3.02	0	1.30	0	0.08	0	2.25	0.07	0.25	0.30	0	0	1.54	0	0.07	0	0.27
220	0	2.36	0	0.88	0	0.26	0	1.22	0	0.40	0	0.48	0	1.05	0	0.33	0	0.40
165	0	2.27	0.31	0.54	0	0.06	0	0.65	0.23	0.41	0	0.91	0	0.84	0	0.05	0	0.51
110	0	2.53	0.26	0.45	0	0.17	0	1.14	0.26	0	0	0.50	0	1.22	0.13	0.23	0	0.34
55	0	2.01	0.31	0	0.41	0	0	1.09	0.26	0	0	0.53	0	0.87	0.19	0	0	0.43
0	0	0.81	0.75	0	0.25	0	0	1.39	0.22	0	0	0.38	0	1.21	0.16	0	0	0.24

5.2 方案 2

为了进一步减小口门区的回流和横流流速，方案 2 将右岸突嘴进一步开挖，使上游来水不再受其阻流影响。

研究发现，在流量 1.50 万 m³/s 时，由于上引

航道内导航墙末端局部开挖，阻流作用明显降低，除局部测点水流流速超标外，引航道口门区范围内的纵向和横向通航水流条件基本满足要求。因此将右岸突嘴进一步开挖后，上游引航道口门区可满足流量 1.50 万 m³/s 以下的通航要求(图 6)。

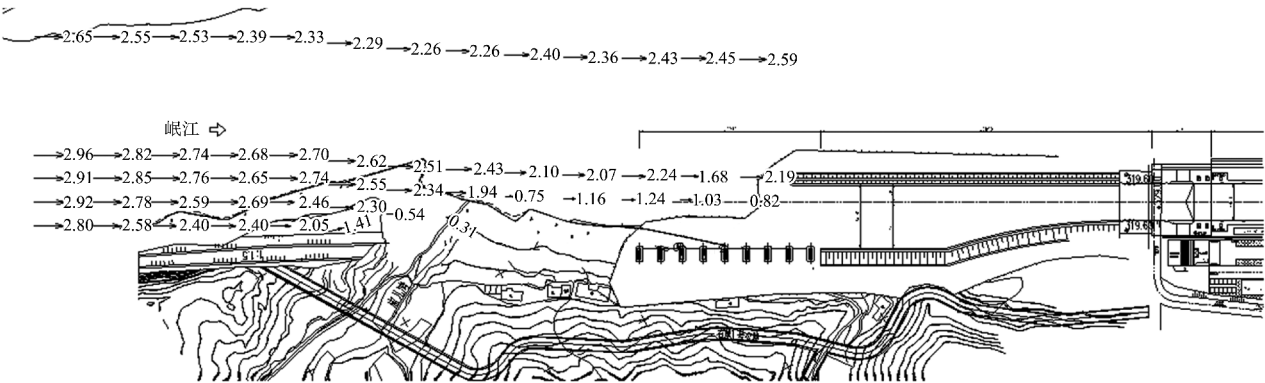


图 6 $Q=1.50$ 万 m^3/s 时方案 2 口门区流速分布 (单位: m/s)

与方案 1 相比，方案 2 在不降低通航流量情况下，通过工程措施改善通航水流条件，提高了通航流量。 $Q=1.50$ 万 m^3/s 时方案 2 上引航道口门区流态见图 7，流速特征值见表 4。

表 4 $Q=1.50$ 万 m^3/s 时方案 2 上引航道口门区附近特征流速值

距口门 距离/m	流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)					
	航道右边线		航道中心线		航道左边线	
	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向
605	0	2.45	0	2.47	0	2.21
550	0	2.42	0	2.42	0	2.17
495	0	2.30	0	2.36	0	2.21
440	0	2.28	0	2.15	0.47	1.76
385	0	2.16	0	1.91	0.26	0.97
330	0	2.12	0.32	1.20	0.29	0
275	0	2.22	0.04	0.15	0	0.35
220	0	1.68	0.05	0.08	0.23	0.40
165	0	1.84	0.07	0.12	0	0.44
110	0	1.85	0.09	0.16	0	0.26
55	0	1.67	0.10	0.16	0	0.32
0	0	1.10	0.22	0	0	0.23



图 7 $Q=1.50$ 万 m^3/s 时方案 2 上引航道口门区流态

6 结语

- 1) 龙溪口航电枢纽工程上游过流断面受两岸地形约束较为明显，采取疏浚的方式扩大过流断面，通过纵向流速规范限值，基本确定最大通航流量。
- 2) 岸线对口门区通航水流条件影响较大，工程设计过程中应引起足够重视，对不规整岸线应进行工程措施处理，该优化思路可为类似工程提供参考经验。