



山溪性弯道河段船闸通航水流 条件试验研究

孙爱萍¹, 余春辉¹, 颜志庆², 赵建钧³, 王宇³, 姜晋德³

(1. 衢州市公路港航与运输管理中心, 浙江 衢州 324003;

2. 广东粤海粤西供水有限公司, 广东 湛江 524033; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:招贤枢纽位于山溪性河流转弯段, 上游引航道处于凸岸主槽, 下游引航道口门区处于下弯道凹岸, 口门区及连接段存在较为严重的横向流速、回流、泡漩等不利水力现象, 难以满足通航要求。依托1:80整体物理模型试验, 研究上、下游航道不良水流条件形成的主要原因, 通过调整枢纽运行方式以及疏浚局部下游河道等综合措施, 有效降低口门区纵、横向流速和回流流速, 使各项水力指标均满足规范要求, 极大改善了船闸上下游引航道及其口门区通航水流条件, 确保过闸船舶的安全。研究结果可供相关枢纽工程参考。

关键词:船闸; 通航水流条件; 引航道口门区; 物理模型

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0097-06

Navigable flow conditions of ship lock in bend section of mountainous river

SUN Ai-ping¹, YU Chun-hui¹, YAN Zhi-qing², ZHAO Jian-jun³, WANG Yu³, GU Jin-de³

(1. Quzhou Highway, Port and Fairway Transportation Management Center, Quzhou 324003, China;

2. Guangdong Yuehai Yuexi Water Supply Co., Ltd., Zhanjiang 524033, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Zhaoxian junction is located in the bend section of mountainous rivers. The upstream approach channel is in the main channel of the convex bank, and the entrance area of the downstream approach channel is on the concave bank. The entrance area and the connecting section have serious adverse hydraulic phenomena such as lateral flow velocity, backflow, and water surface boil and flow vortex, which are difficult to satisfy the requirements of navigation. This study employs the overall physical model test on a scale of 1:80 to study the main reasons for the formation of adverse flow conditions in the upstream and downstream channels. We effectively reduce the velocity of cross-flow, lateral flow, and backflow by taking comprehensive measures such as adjusting the operation mode of the junction and dredging local downstream channels and make all hydraulic indicators up to specifications. As a result, flow conditions in both the upstream and downstream approach channels and the entrance area are greatly improved, which can ensure the safety of ships passing through the lock. The research results can provide a reference for related junction projects.

Keywords: ship lock; navigable flow condition; entrance area of approach channel; physical model

船闸是帮助船舶克服河道上水头差的重要通航建筑物。船闸口门区位于船闸进出口与上下游

航道连接段, 处于边界突变、主流扩散、静动水交界的位置, 较易形成斜流、泡漩等不良流态,

进而引起进出船舶横漂，影响通航安全和通航效率^[1]。口门区水流条件复杂是山区河道航电枢纽引航道布置的常见问题。在船闸工程中，常见的改善水流条件的工程措施有：修建隔流墙、调整导流堤长度与转角、布设菱形导流墩、局部地形开挖与平整和调顺岸线等；非工程措施有：调整泄洪闸的运行方式及调整航道中心线等^[2-6]。

在实际枢纽工程中因地制宜，针对山溪性河流，调整岸线需开挖山体，成本代价太大，因此改善通航水流条件应优先考虑非工程措施再考虑工程措施。本文以招贤枢纽为研究背景，通过1:80水工模型试验及自航船模试验，对设计方案进行优化比选，提出满足枢纽通航水流条件要求的工程和非工程改善措施，研究方案为改善招贤枢纽船闸工程通航水流条件提供了技术支持。

1 工程概况

常山江是浙江省第一大河钱塘江的南源干流，航电资源丰富。常山江为山溪性河流，河势总体比较稳定，但河道天然落差大，水面比降大，水浅、滩多，河道弯道多直线段短。招贤枢纽工程为常山江航运开发工程的第4个梯级。工程布置自左向右依次为船闸、泄洪闸、电站。招贤枢纽泄洪闸共布设21个闸孔，每个闸孔净宽12.0 m，泄洪闸右区布置8个闸孔（从右至左编号为1#~8#），左区布置13个闸孔（从右至左编号为9#~21#），泄洪闸段总宽307.6 m。拟定招贤船闸等级为Ⅳ级，闸室布置于枢纽左侧，闸室平面尺寸190 m×23 m（长×净宽）。闸室上、下游引航道均呈直线布置，上、下游引航道总长均为320.0 m，其中靠船段长220.0 m、导航段长100.0 m，上、下游引航道底宽60.0 m。上、下游引航道与主航道之间均采用过渡段连接，过渡段长100.0 m、底宽50.0~60.0 m。船闸平面布置见图1。

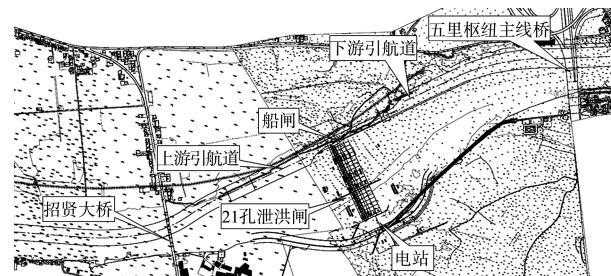


图1 船闸平面布置

招贤枢纽为常山江干流航运梯级开发工程，处于“S”形弯曲河道上，受天然地势、气候条件、上游招贤大桥以及下游五里枢纽主线桥的限制，上、下游通航水流条件较为复杂，且上游引航道处于凸岸主槽，下游引航道口门区处于下弯道凹岸，均存在较为严重的横向流速、回流、泡漩等不利的水力现象，导致船舶扭转或横漂，增加船舶操作难度，直接影响船舶顺利过坝和安全航行，因此需采取整体水力学模型与船模试验相结合的方式，研究改善枢纽运行通航水流条件的具体方法和措施。

2 研究方法

2.1 模型制作与量测

模型主要采用弗劳德相似准则进行设计，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，将模型设计为几何比尺1:80的正态模型，模拟范围考虑枢纽整体布置形式、枢纽上下游河道形态影响、模型进出水水流调整段以及自航船模起动段长度。最终模拟范围确定为招贤大桥以上0.9 km河段至下游五里枢纽主线桥往下0.6 km河段。

根据工程现场实测资料，河道地形采用断面法制作。平面放样采用三角网导线系统，三角形闭合误差的绝对值不超过1°。模型高程采用水准仪测定，并在制作过程中校核，安装高程误差绝对值控制在1 mm以内。为提高模型制作精度，在复杂地形区局部加密断面。枢纽主要建筑物如泄洪闸、

船闸、电站等均采用有机玻璃制作, 河道表面采用水泥砂浆制作, 并加糙表面以满足模型糙率相似。

模型试验的流速采用挪威 Nortek 公司生产的声学多普勒点式流速仪测量, 量程 0.1~400 cm/s; 流量采用超声波流量计及标准矩形薄壁堰测定, 误差 $\leq 1\%$; 水位采用自动跟踪式水位仪测量, 精度为 0.02 mm。

2.2 通航标准

依据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[7], IV 级航道船闸上下游引航道口门区最大流速限值满足: 1) 口门区平行航线的纵向流速小于 2 m/s, 垂直航线的横向流速小于 0.3 m/s, 回流流速小于 0.4 m/s; 2) 引航道导航和调顺段内宜为静水区; 3) 制动段和停泊段水面纵向流速小于 0.5 m/s, 横向流速小于 0.15 m/s。

3 上游引航道方案通航水流条件

3.1 原运行方案上游引航道口门区水流条件

试验结果表明: 当 $Q \geq 800 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 开启右区泄洪闸或左区远离船闸侧泄洪闸闸孔, 口门区外 160~320 m 范围内横向流速普遍超标, 其最大横向流速分别为 0.45 和 0.40 m/s, 通航水流条件难以满足要求。由于招贤船闸布置于左岸, 无论开启右区泄洪闸或是左区右侧闸孔, 因受泄洪闸的牵引, 主流与上游航道交角较大, 水流向泄洪闸扩散形成斜向水流和大范围回流。在口门区与连接段内横向流速均超过规范要求, 不利于船舶进出闸航行安全和航态控制。因此需要对上游通航水流条件进行优化调整。

3.2 上游引航道通航水流条件运行优化

针对山溪性河流枢纽的船闸, 其引航道口门区及连接段中不利水流流态应优先利用非工程措施进行优化。综合考虑上下游引航道口门区和连接段的横纵向流速控制、出闸水流流态及枢纽发电效益, 调整枢纽运行方式为左区靠船闸侧的 6 个孔泄洪闸局部开敞泄洪, 且电站满发。

在此运行方式及各通航流量下, 闸前分区导墙右侧、船闸上游引航道停泊段及口门区内形成较大范围的回流, 但总体而言主流较为顺直, 回流强度不大, 因此枢纽上游水流流态良好。当 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$,

枢纽上游水流流态见图 2。调整运行方式后, 各通航流量下的上游口门区流速见表 1。

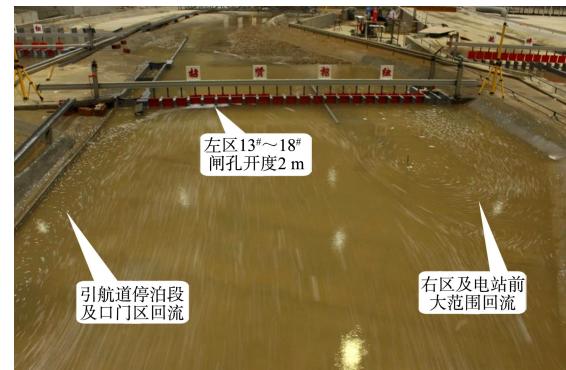


图 2 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 枢纽上游水流流态

表 1 上游引航道通航水流流速

通航流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	范围	最大横向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大纵向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大回流流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
200	停泊段	0.14	0.07	0.25
	口门区	0.14	0.34	0.25
400	停泊段	0.05	0.22	0.05
	口门区	0.14	0.61	0.13
600	停泊段	0.08	0.40	0.16
	口门区	0.21	0.80	0.19
800	停泊段	0.06	0.43	0.09
	口门区	0.28	1.02	0.18
1 000	停泊段	0.10	0.25	0.11
	口门区	0.28	1.24	0.14

试验结果表明: 当 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上游引航道左侧处于回流区内, 停泊段最大回流流速 0.11 m/s; 口门上游 240 m 范围内横向流速最大值 0.28 m/s, 最大纵向流速 1.02 m/s, 最大回流流速 0.14 m/s; 口门上游 280~320 m 范围内虽局部横向流速超标, 但最大值仅 0.35 m/s, 基本不影响船舶航行; 招贤大桥处航道最大横向流速 0.30 m/s, 最大纵向流速 1.13 m/s, 无回流, 上述流速均在设计规范内, 满足通航水流条件要求。

综上可得, 调整非工程优化措施后, 上游引航道口门区及连接段的通航水流条件明显改善, 通航流量由原设计方案的 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ 提高至 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4 下游引航道方案通航水流条件

4.1 运行优化方案后下游引航道口门区水流条件

调整枢纽运行方式后, 在各通航流量下, 河

道下游水位均低于 70.3 m，但河道右岸河漫滩(高程大于 71 m)未完全淹没，出闸水流集中于船闸与漫滩之间的河槽下泄，并顶冲下游引航道口门区和连接段。由于主流流向与引航道夹角较大，下游引航道口门附近形成斜向水流和大范围回流，对通航水流条件造成不利影响，见图 3。加之河道右侧地形较高，五里枢纽主线桥区域附近主流集中于航道，导致局部纵向流速偏大。因此船舶上行时流速阻力较大；下行时对水航速较小，舵效较差，操控难度增加。

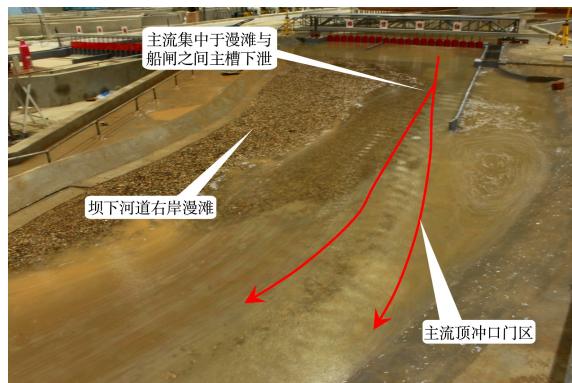


图 3 $Q=1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 枢纽下游水流流态

试验结果表明：当 $Q \leq 1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，船闸下游引航道口门距 160 m 范围内航道纵横向流速基本满足规范要求，但是回流流速偏大。 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时回流流速最大值 0.61 m/s， $Q=1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时回流流速最大值 0.84 m/s。口门距 200~360 m 范围内部分断面横向流速和回流流速较大，个别断面全面超标， $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时最大横向流速 0.77 m/s、最大回流流速 0.56 m/s， $Q=1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时最大横向流速 0.80 m/s、最大回流流速 0.78 m/s。下游引航道口门区及连接段水流流速均远超出通航要求。

表 2 运行优化方案后下游引航道通航水流流速

通航 流量 $Q/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	范围	最大横 向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大纵 向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大回 流流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
600	下口门距 0~160 m	<0.32	<1.45	0.40~0.61
	下口门距 200~360 m	0.31~0.77	<1.92	0.40~0.56
1 000	下口门距 0~160 m	<0.30	<1.54	0.43~0.84
	下口门距 200~360 m	0.38~0.80	>2.00	0.58~0.78

4.2 下游引航道通航水流条件工程优化

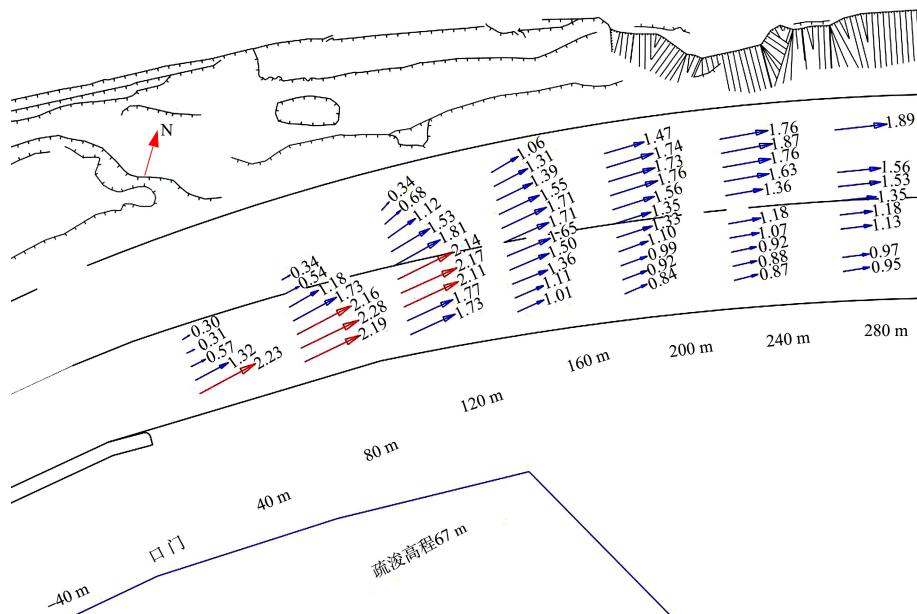
由于下游引航道口门区及连接段布置在下弯道的凹岸，受到河道右侧河漫滩对出闸水流的阻碍作用，导致主流集中于船闸与漫滩之间的河槽下泄，口门区及连接段水流集中并与航线产生较大夹角。针对原方案通航水流条件中口门区与连接段回流流速和横向流速严重超标的问题，提出如下工程措施进行优化。

4.2.1 优化方案 1

疏浚开挖下游滩地，扩大河道过流断面，使下游水流分散。本方案中右岸河漫滩疏浚至 67 m，疏浚区纵向范围为桩号闸下 0+286.5 m 至 0+720.0 m，左侧与河道衔接，右侧距堤防 12 m，并以 1:4 坡度与堤防左侧漫滩顶过渡，上边界与枢纽下游疏浚区相接，下边界与下游地形顺接，坡度为 1:30。

河道疏浚后，引航道口门区回流依然存在，但闸下水流不再受漫滩地形约束。口门区附近河道过水断面变宽，右侧过流量明显增加。在回流区末端主流向右岸扩散，且随着下泄流量增大，回流范围有所减小，主流扩散作用增强。但是五里枢纽主线桥上游右岸的局部地形仍然较高，在大通航流量下该区域仍存在较为明显的回流。

当 $Q=1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，下游引航道口门区及连接段横向流速分布见图 4。试验结果表明：下游引航道口门区及连接段通航水流条件改善作用明显，各通航流量下，下游引航道停泊段水流条件满足要求。当 $Q \leq 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，引航道口门区及连接段横、纵向和回流流速均满足规范要求；当 $Q > 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，口门下游 80~200 m 范围内均有部分区域横、纵向流速超标，口门区通航水流条件不满足要求。因此，需采取措施进一步改善口门区流态，尤其是降低横向流速。

图 4 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 优化方案 1 下游引航道横向流速分布 (单位: m/s)

4.2.2 优化方案 2

虽然方案 1 在一定程度上增大了闸下过水断面面积, 河道右侧过流量有所增大, 但由于疏浚高程不够, 主流仍偏向于河道左侧, 且流速偏大, 其在口门区扩散时将导致局部横向或纵向流速超标。另外, 由于河漫滩疏浚范围不足, 五里桥桥位上游右岸侧仍存在明显阻水作用, 局部回流将导致口门区下游过流断面束窄, 从而使口门区附

近河道主流偏向左岸。

综上所述, 考虑对漫滩区进一步开挖, 以改善下游引航道通航水流条件, 在方案 1 基础上, 对疏浚区中部进一步开挖至 65 m 高程。同时对疏浚区上游向左侧拓宽, 下游延伸至桥上游 50 m, 上下均采用 1:30 坡度实现地形过渡。疏浚区左、右两侧按 1:4 坡度与原地形衔接, 以增强导流作用, 见图 5。

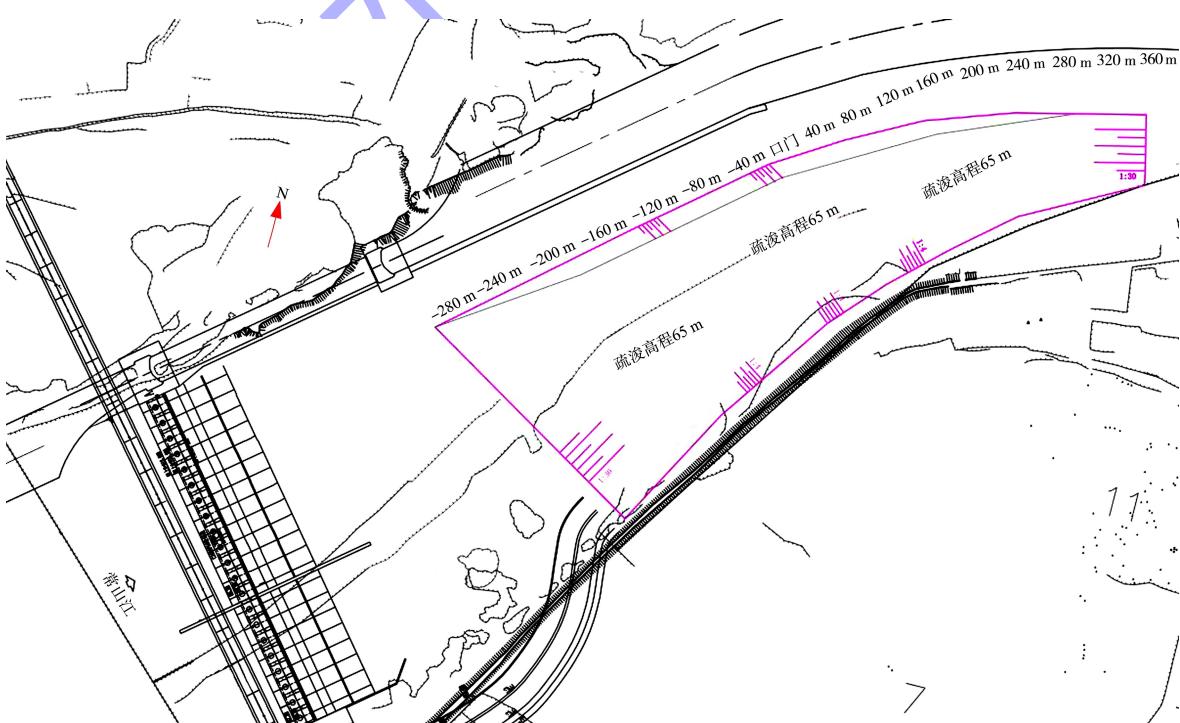


图 5 疏浚区高程 65 m 方案

从流态来看主流扩散位置提前，扩散更为充分，船闸下游导墙附近河道水流更加均匀，五里枢纽主线桥上游局部地形引起的回流已基本消除，口门与桥位之间的河道主流已右偏至河道中部，斜向水流对口门区和连接段的顶冲作用已明显减弱。

当 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，下游引航道口门区及连接段横向流速分布见图 6，试验结果表明：口门下

游 680 m 范围内最大纵向流速 1.93 m/s，最大回流流速 0.32 m/s；口门下游 80 m 处航道右边界小范围区域横向流速在 0.34~0.39 m/s；口门下游 120 m 处航道中心线右侧横向流速在 0.32~0.36 m/s；口门下游 200 m 处航道中心线左侧 5~25 m 范围内横向流速在 0.32~0.37 m/s，略有超标，但口门下游 680 m 范围其他区域内横向流速均小于 0.30 m/s。

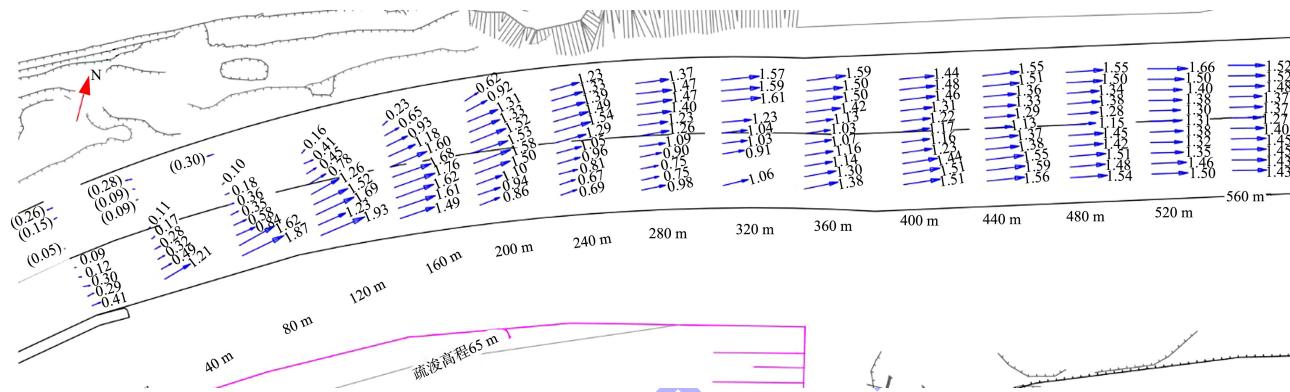


图 6 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 优化方案 2 下游引航道横向流速分布 (单位: m/s)

由表 3 可知， $Q \leq 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，引航道口门区及连接段流速指标完全满足控制要求。 $Q=800 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，引航道口门区及连接段纵向流速和回流流速满足控制标准，口门下游 80~200 m 范围内仅个别区域横向流速略有超标，最大横向流速小于 0.39 m/s，超标幅度不大，且影响范围较小。因此，此条件下口门区及连接段通航水流条件基本满足要求。五里枢纽主线桥处航道最大横向流速 0.18 m/s，最大纵向流速 1.51 m/s，无回流，桥区水流条件满足船舶安全航行要求。

表 3 优化方案 2 下游引航道通航水流条件

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最大横向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大纵向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大回流流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
200	0.22	0.70	0.28
400	总体 0.26，局部 0.31	1.17	0.28
600	总体 0.30，局部 0.33	1.45	0.31
800	总体 0.30，局部 0.36	1.80	0.39
1 000	总体 0.30，局部 0.39	1.93	0.32

综上所述，通过合理疏浚整治河道下游滩地，调整疏浚高程和范围，下游引航道的口门区及连接段通航水流条件得到明显改善，在各通航流量下 $200 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 均满足通航要求。

5 结论

1) 招贤枢纽上游引航道处于凸岸主槽，下游引航道口门区处于下弯道凹岸，且出闸水流受到河道右侧河漫滩的阻碍作用，导致口门区及连接段水流集中并与航线产生较大夹角，因此引航道口门区纵、横向流速偏大，需要采取工程措施改善口门区通航水流条件才能保障船舶进出船闸的安全。

2) 通过非工程措施和对下游合理疏浚整治的工程措施，可以显著减小上下游引航道口门区纵横向流速和回流流速，有效改善通航水流条件。试验结果表明，原设计方案下最大通航流量仅能达到 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ ，在调整枢纽运行方式后，上游引航道通航水流条件得到改善，再通过合理疏浚整治河道下游滩地和调整疏浚高程和范围，下游引航道通航水流条件也得到改善。在 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量下，上、下游引航道口门区及连接段水力指标均满足规范要求，通航流量由原设计方案的 $Q=600 \text{ m}^3/\text{s}$ 提高至 $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。非工程措施与工程措施并用可为山溪性河流通航水流条件的类似设计和研究提供参考。

(下转第 142 页)