



左江山秀船闸改扩建工程 引航道通航水流条件*

陈 明^{1,2}, 李初民¹, 王多银^{1,2}, 陈明栋¹, 黄海津¹

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 对于通航水流条件而言, 在急弯河段上修建船闸改扩建工程面临诸多难题。依托广西左江山秀船闸改扩建工程, 建立该河段整体二维水流数学模型, 分析对比各方案引航道通航水流条件。结果表明: 采取合理的凸岸开挖、凹岸潜坝和分水隔墙布置等综合措施可有效改善通航水流条件。

关键词: 船闸; 急弯河段; 数值模拟; 引航道; 水流条件

中图分类号: U 641. 1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0066-08

Navigation flow conditions in approach channel of reconstruction and extension project for Shanxiu ship lock located in the Zuojiang River

CHEN Ming^{1,2}, LI Reng-min¹, WANG Duo-yin^{1,2}, CHEN Ming-dong¹, HUANG Hai-jin¹

(1.Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2.National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: For the navigation flow conditions, there are many challenges to be faced in a ship lock reconstruction and expansion project at a sharp-bended river reach. In case of the reconstruction and extension project for Shanxiu lock on the Zuojiang River in Guangxi province, flow conditions in the approach channels of various design schemes are analyzed and compared by using the two-dimensional flow mathematical model. The results show that comprehensive measures such as reasonable excavation for the convex bank, and layout of concave bank submerged dam and guidance wall can effectively improve the navigable water flow conditions.

Keywords: ship lock; sharp-bended river reach; numerical simulation; approach channel; flow condition

在急弯河段上修建船闸工程时, 受离心惯性力的作用, 急弯河段的表层水流会顶冲凹岸侧, 从而产生横向环流, 当纵向水流与横向环流相遇时, 形成三维螺旋流, 同时大坝泄洪和发电厂日常调节还将产生非恒定流。受三维螺旋流和口门区水流特性的叠加作用, 弯曲河段的船闸引航道口门区水流条件极为复杂^[1]。为

了适应河势发展并改善通航水流条件, 宜在河流凹岸侧布置船闸^[2]。而对于在急弯河段上的船闸改扩建工程而言, 扩建二线船闸后, 随着船只大型化以及船队增多, 引航道尺度相应增大, 引航道中线会与河道主流形成较大的交角^[3], 在连接段和口门区形成斜流, 当流量增大时容易造成横向水流速度超标。同时由于引

收稿日期: 2021-01-06

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402001); 重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyj-msxmX0759); 重庆市研究生科研创新项目(CYB19171)

作者简介: 陈明(1983—), 男, 博士后, 副教授, 从事通航水力学方面的教学和研究。

航道尺度增大会占据一定过流面积, 在口门处主河道流速激增, 由于流速梯度作用, 更易出现横流超标等不利水流条件。在船闸改扩建工程建设中, 常常采用延长导流堤、调整航线^[4]、布置导流墩^[5]、布置透空式隔流堤^[6]等措施以优化引航道水流条件。然而, 关于急弯河段上船闸改扩建工程通航水流条件的研究相对较少。本文依托广西左江山秀船闸改扩建工程, 对工程全河段进行数值模拟研究, 分析其通航水流条件, 并提出相应的优化工程措施。

1 工程概况

现有山秀船闸按照 V 级航道建设, 其基本尺度尚未达到 III 级航道的要求, 通过能力已经满足不了航运的发展, 成为左江航道等级提升的瓶颈。为实施左江(龙州—宋村三江口) III 级航道建设规划, 拟在现有山秀船闸右侧修建二线船闸。山秀船闸改扩建工程位于广西左江一急弯河段上, 急弯角度约 110°, 曲率半径 $R=410\text{ m}$, 距离坝轴线约 1 400 m, 见图 1。计划新建的二线船闸位于现有船闸左侧, 并且保留现有的一线船闸。根据 5 a 一遇洪水对应的标准, 上、下游最高通航水位分别为 86.65、86.37 m。上游最低通航水位按电站全闸敞泄(敞泄 $Q=5\,000\text{ m}^3/\text{s}$)时的坝前水位 83.0 m, 下游最低通航水位采用老口枢纽水库死水位 75.0 m。船闸主体段布置于左岸联合坝下游、现有一线船闸的左侧阶地上, 中心线与坝轴线斜交, 与一线船闸轴线夹角为 7.3° , 船闸轴线与坝轴线交点处与一线船闸中心线相距 65 m。两线船闸共用上游引航道, 由长隔墙与主河道分隔而成, 其具体方案为: 上引航道底宽为 80 m、底部高程为 77.9 m, 纵向轴线与坝轴线交角为 82.7° , 其右侧用顶高程为 90.0 m 的分水隔墙与河道主流隔离; 船闸下引航道总长为 485 m、底宽为 62 m、底部高程为 69.9 m, 在下引航道口门区放宽河段的两岸设置锚地, 锚地底部高程 69.9 m。

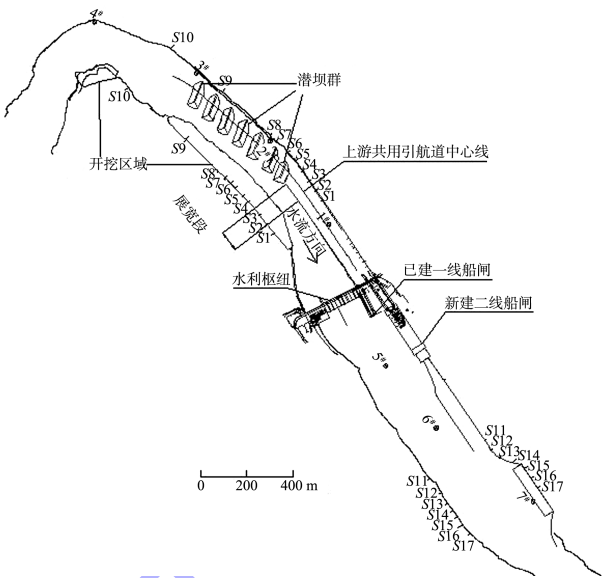


图 1 新建船闸设计方案布置及河段概况

2 数学模型的建立

2.1 控制方程

本文采用的数学模型基于不可压缩的二维平面纳维-埃斯托克斯浅水方程所得的二维深度平均浅水方程, 并将计算所得横、纵向平均流速值乘换算系数 1.15 得出表面流速^[7]。

2.2 边界条件

开边界为水流进口和出口, 在进口处设定流量大小、出口处设定相应的水位。闭边界为不滑动岸边界时, 取 $u=0$ 、 $v=0$; 闭边界为滑动岸边界时, 取法向流速为零^[8]。

2.3 计算区域及网格划分

选取的计算河段全长约 4.3 km, 其中取大坝上游 2.3 km、下游 2.0 km。针对电站过流及泄洪闸泄洪, 为减弱由此产生的非恒定流对口门区水流条件的不利影响, 根据上游来流量, 通过调节电站机组运行和优化泄水闸的开启顺序^[9], 调节闸门开度控制下泄流量以满足上下游水位关系。计算区域使用三角形网格, 网格密度大小沿河道区域变化不等, 网格节点平均间距 10 m 左右, 在引航道停泊段及其口门区附近的网格进行局部加密(图 2), 网格节点最小间距 3 m。

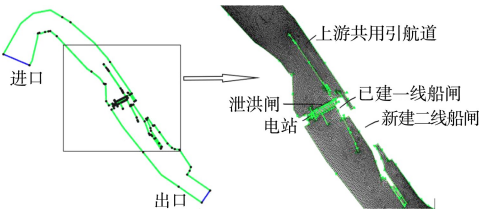
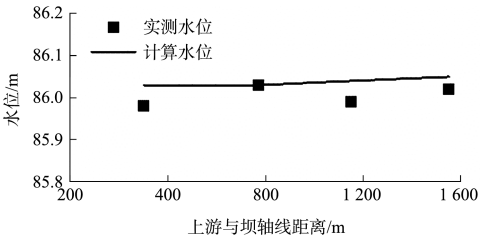


图 2 设计方案局部网格布置

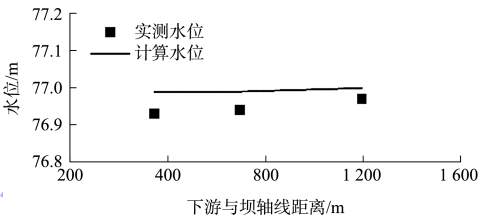
2.4 模型验证

选取现状条件下流量为 1 749 m³/s 时的上游 1[#](距坝轴线 300 m)、2[#](距坝轴线 770 m)、3[#](距坝轴线 1 150 m)、4[#](距坝轴线 1 550 m)水尺测点和下游 5[#](距坝轴线 350 m)、6[#](距坝轴线 700 m)和 7[#](距坝轴线 1 200 m)水尺测点进行水面线验证。同时选取现状条件下流量为 1 749 m³/s 时 4 个距离相等的断面进行断面流速、流向验证,其中实测资料为物理模型实测数据。通过水面线验证(图 3)可知,实测水位与计算水位间的误差在允许范围内,最大差值为 0.06 m;由流

速、流向(图 4)可知,除个别测点外,总体上吻合良好。

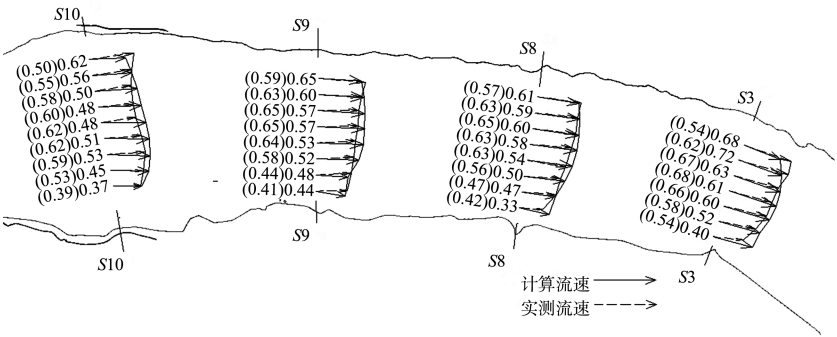


a) 上游



b) 下游

图 3 Q=1 749 m³/s 时水面线验证



注: 括号内数字为计算流速, 括号外数字为实测流速。

图 4 Q=1 749 m³/s 时流速、流向验证

2.5 计算工况

根据不同特征流量下坝前水位、电站运行方

式、闸门开启方式的关系,共拟定 9 种计算工况,见表 1。

表 1 计算工况

工况	流量/(m ³ s ⁻¹)	坝前水位/m	电站开启方式	闸门开启方式	备注
1	837	86.0~86.5	1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 机组发电	关闭	电站满发
2	1 749	86.0~86.5	1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 机组发电	控开 4 [#] ~9 [#] 闸	—
3	2 410	84.0~86.5	1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 机组发电	控开 4 [#] ~9 [#] 闸	坝前水位控制分界流量
4	3 500	84.0~86.5	1 [#] 、2 [#] 、3 [#] 机组发电	控开 4 [#] ~9 [#] 闸	常年洪水流量
5	5 000	84.0~86.5	停止发电	控开 1 [#] ~9 [#] 闸	—
6	5 000	—	停止发电	全闸敞泄	—
7	5 380	—	停止发电	全闸敞泄	2 a 一遇洪水
8	6 390	—	停止发电	全闸敞泄	3 a 一遇洪水
9	7 440	—	停止发电	全闸敞泄	5 a 一遇洪水

3 设计方案通航条件分析

为了达到Ⅲ级航道通航标准, 上引航道分水隔墙在现有船闸分水隔墙的基础上上延 440 m, 总长 550 m; 从分水隔墙 462 m 处口门进行线性展宽, 至 550 m 处宽度由 80 m 最终增至 85 m。由于上游共用引航道位于河段左侧深泓区, 长 550 m、宽 80~85 m, 占据河宽约达 1/3, 该处为天然河道的主要泄洪通道。由现状条件水流条件物理模型观测结果可知, 新建的一、二线船闸上游共用引航道将对河道泄洪产生较明显的不利影响, 从而改变坝前的水流条件和枢纽的泄洪条件。因此, 为满足河段泄洪要求、改善上引航道口门区的通航条件, 采取河段凸岸扩挖的方式以扩展该段河道的过流面积, 同时在上引航道口门以上布置了 7 条斜潜坝(图 1), 以调整河流流向, 每条潜坝长约 120 m、顶高程 75 m。上引航道共取 8 个监测断面(S1~S8), S1 断面距上闸首约 400 m, 各断面间隔 50 m。该新建船闸的下引航道布置于枢纽下游左岸的局部放宽河段, 加之需要在其口门区以左布置锚地, 对该处河道进行了进一步开挖整治, 使该处河道及通航水域更加宽阔。本设计方案下引航道共取 7 个监测断面(S11~S17), S11 断面距下闸首约 450 m, 各断面间距 50 m。

3.1 上游引航道通航水流条件

在流量 $Q \leq 1\,749\text{ m}^3/\text{s}$ 、电站发电、坝前水位保持在 86.0 m 运行情况下, 坝上游河段水流形态平缓, 只有停泊段内侧的水域存在部分回流, 但不影响船只靠泊安全, 水流条件在上游航线范围内满足船只安全运行的要求。在 $Q = 2\,410\text{ m}^3/\text{s}$ 、发电厂房运行、坝前水位为 84.5 m 的工况下, 上引航道口门区的水流速度整体不超过 1.00 m/s, 口门附近水流速度值区间为 0.30~0.80 m/s, 在分隔墙头部存在明显的绕流流态, 影响口门上游长 60 m 的水域, 产生的斜流偏角较大, 相应的横向水流速度达到 0.40 m/s, 横向水流速度超标。在 $Q = 3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 、发电厂房运行、坝前水位为 84.5 m 的工况, 上引航道口门区的流速普遍增大, 纵向水流速度已达到 1.48 m/s, 出现在口门区上游水域; 横向水流速度最大达到 0.59 m/s, 出现在口门周围水域, 该处横向水流速度已全面超标; 停泊段上部

最大回流速度 0.19 m/s, 纵向水流速度 0.27 m/s, 停泊段流速指标符合要求。在 $Q = 7\,440\text{ m}^3/\text{s}$ 、闸门全开泄洪的工况下, 口门区流速值达到了 2.61 m/s、横向流速值达到了 1.05 m/s。

根据计算结果(图 5)可知, 设计方案在 $Q \leq 1\,749\text{ m}^3/\text{s}$ 工况下, 船闸上游航线范围内水流条件满足船舶安全过闸的要求; 当 $Q > 1\,749\text{ m}^3/\text{s}$ 以后, 隔流堤(右导航墙)头部出现明显的绕流流态, 随着流量 Q 的增加, 上引航道、口门区的通航水流条件逐渐变差, 主要表现在引航道分隔墙头部的绕流增强、口门区纵向水流速度和横向水流速度增大, 停泊段上段的回流速度和影响范围逐步增大。特别是 $Q \geq 3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 以后, 口门区横向水流速度普遍不符合标准, 对船舶安全进出闸室影响较大。

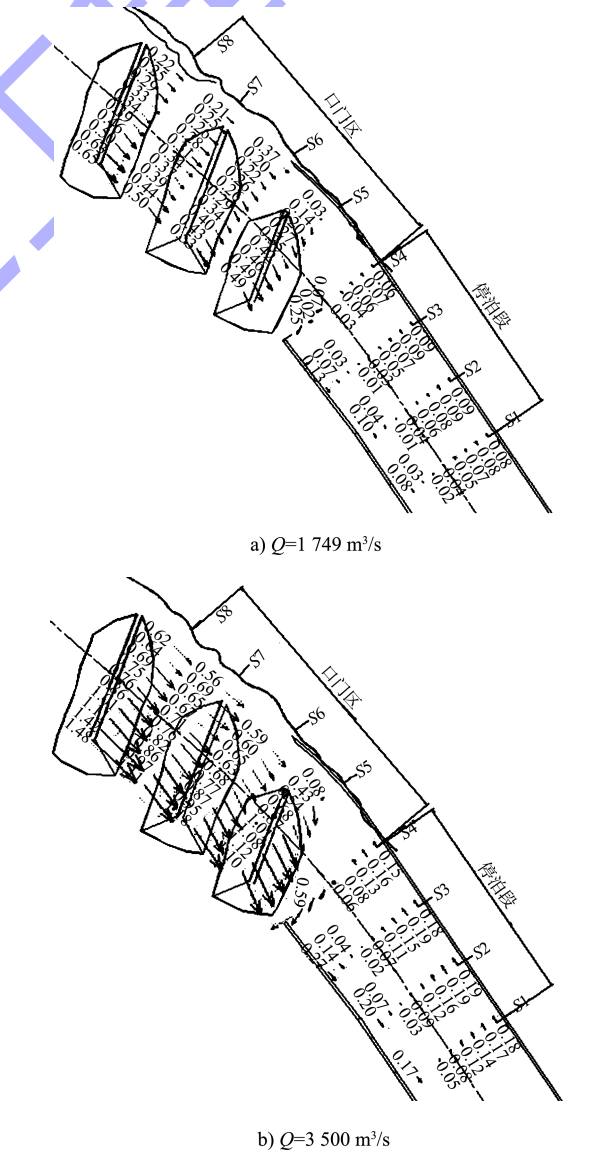


图 5 设计方案上游引航道特征流量下的流场 (单位: m/s)

3.2 下游引航道通航水流条件

在工况 2~5 共 4 种工况下,下游引航道口门区的纵向水流速度值达到 1.90 m/s,除了个别点横向水流速度略微超标外,其它地方横向水流速度都在 0.30 m/s 以内。在全闸敞泄,工况 6、8、9 枢纽敞泄洪水工况下(图 6),下游引航道口门区周围的纵向水流速度值达到了 2.21 m/s,纵向水流速度超标区位于口门区下段右侧边缘,横向水流速度值最大 0.43 m/s,超标范围和超幅均较小。

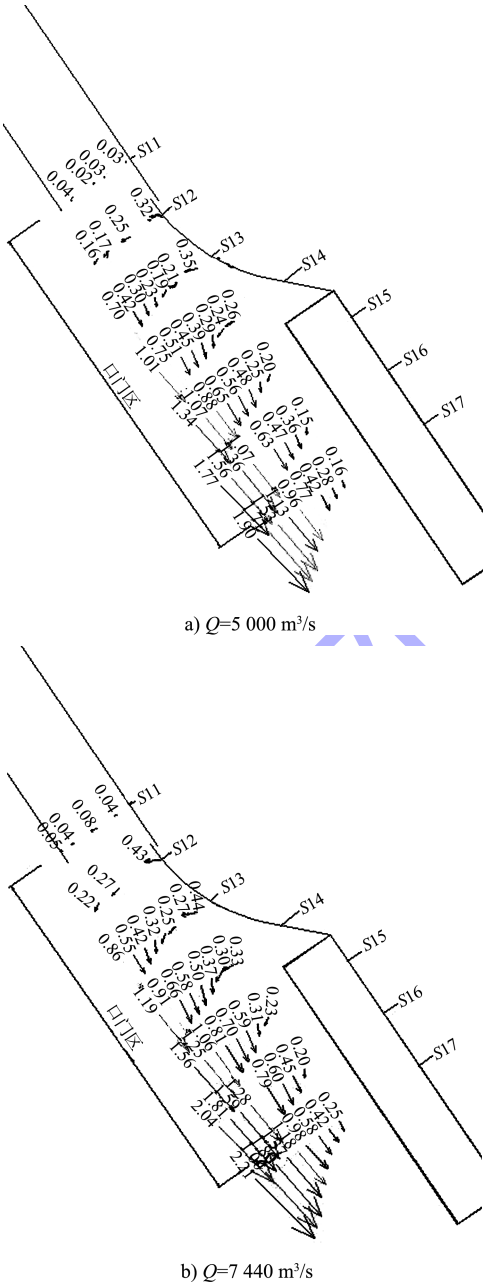


图 6 设计方案下游引航道特征流量下的流场 (单位: m/s)

综上,下游引航道口门区范围内的流态较平缓、通航水流条件良好,在设计流量 $7\,440\text{ m}^3/\text{s}$

($P=20\%$)及以下,基本满足船闸设计规范要求。因此,对于本工程而言,急弯河道条件对上游引航道通航影响较大,本文将重点对上游引航道布置方案进行优化研究。

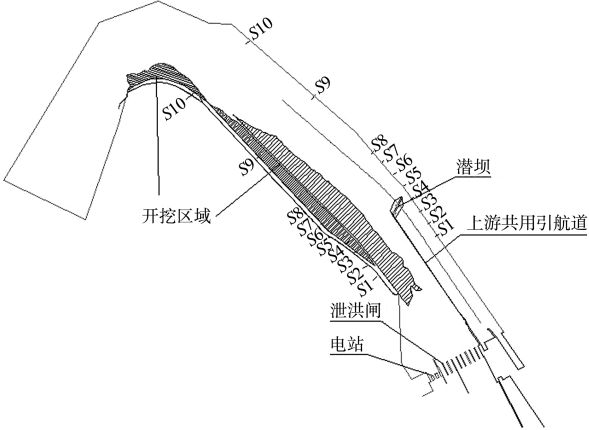
4 上游引航道布置方案优化研究

针对上游引航道,设计方案提出了凸岸开挖、凹岸布置潜坝群、延长分水隔墙并拓宽口门宽度的方式。然而,对通航水流条件的优化效果并不十分理想,主要表现在:1)引航道口门以上水位明显壅高;2)潜坝群占据了一定的过流面积,坝顶面流速增大,且产生斜流等不利流态;3)分隔墙延长拓宽后,一定程度上占据了左侧泄洪主通道,较大地改变了该河段的泄流条件。因此,应对上游河段设计方案开展优化研究。

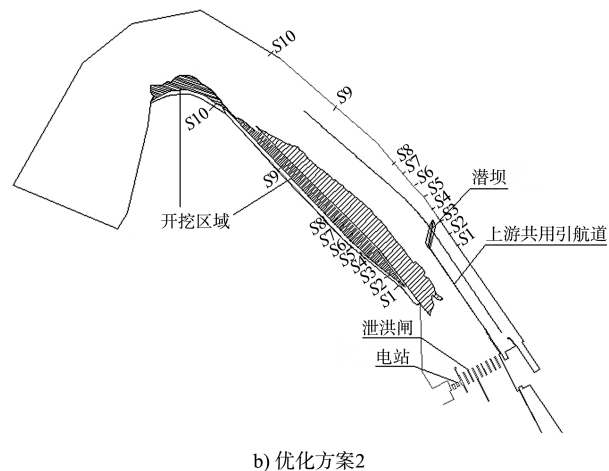
4.1 方案布置

如图 7a)所示,优化方案 1 的具体布置为:右岸开挖(进一步浚深和拓宽右岸河床并延长开挖段范围,开挖断面分上下两级平台,两级平台高程分别为 72.0、78.0 m)、潜坝群减少至 1 道并布置于口门处(与分隔墙夹角 120° ,坝顶高程 75.0 m)、调直分水隔墙 88 m 长的展宽段(即上引航道分水隔墙总长 550 m、宽均为 80 m)。

如图 7b)所示,优化方案 2 的具体布置为:右岸开挖(进一步浚深和拓宽右岸河床并延长开挖段范围,开挖断面分上下两级平台,两级平台高程分别为 72.0、78.0 m)、潜坝群减少至 1 道并布置于口门处(与分隔墙夹角 135° ,坝顶高程 74.5 m)、取消分水隔墙头部展宽段(即分隔墙总长度减小 88 m)。



a) 优化方案 1



b) 优化方案2

图 7 优化方案总体布置

4.2 通航水流条件分析

表 2 列举了两种优化方案分别在工况 2~6、9 共 6 种典型工况下的引航道口门区横向流速最大值 $v_{横max}$ 、纵向流速最大值 $v_{纵max}$ 和回流速度最大值 $v_{回max}$ 以及停泊段纵向流速最大值 $v_{纵tmax}$ 。

由表 2 可知, 两种优化方案在流量 $Q \leq 1\,749\text{ m}^3/\text{s}$ 下, 上游航线及引航道范围内水流皆平缓, 通航条件较好。在 $Q=2\,410\text{ m}^3/\text{s}$ 、闸前水位为 84.5 m 时, 优化方案 1 各项流速大小均基本达到规范要求、方案 2 在堤头以上外侧边沿水域横向流速超标范围相对较大。 $Q=3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 、闸前水位为 84.5 m 时, 两种优化方案上引航道口门区范围内的纵向水流速度均符合要求, 最大值分别为 1.08、1.13 m/s; 横向水流速度均超标, 最大值分别为 0.48、0.49 m/s, 横流超标段分别位于堤头以上 50、75 m 的外侧边沿水域, 其原因是受外隔墙堤头绕流

影响; 最大回流速度分别为 0.16、0.26 m/s, 均符合要求。在 $Q=5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、闸前水位为 84.0 m 下 (图 8), 两种优化方案上引航道口门区纵向水流速度均符合要求, 最大值分别为 1.51、1.59 m/s; 横向水流速度均存在超标, 优化方案 1 横流超标段主要位于距引航道口门约 50 m 长度内的外侧边沿; 优化方案 2 超标段为堤头以上 75 m 水域, 影响航道宽度 30~40 m, 最大值分别为 0.61、0.73 m/s; 回流速度最大值分别为 0.36、0.35 m/s, 均符合要求。当枢纽全闸敞泄后, 在 $Q=5\,000\sim7\,440\text{ m}^3/\text{s}$ 情况下 (图 9), 两种优化方案口门区的纵向水流速度分别在 1.63~1.91 m/s 和 1.71~2.01 m/s, 基本符合要求; 横向水流速度分别在 0.75~0.86 m/s 和 0.82~0.95 m/s, 横向水流速度超幅较大, 其影响区域主要在口门上游约 100 m、航道中心线以外的范围; 回流速度分别在 0.4~0.45 m/s 和 0.41~0.47 m/s, 在口门区前沿靠岸区域有少量超标。在各工况下, 优化方案 1 引航道口门区横、纵向流速和回流流速均小于方案 2, 停泊段最大纵向流速值分别为 0.48 m/s 和 0.41 m/s, 优化方案 1 较方案 2 略差, 但均符合要求。两种优化方案比较而言, 优化方案 1 引航道通航水流条件总体上优于方案 2。主要原因在于优化方案 2 引航道分隔墙较优化方案 1 缩短了 88 m, 而墙头部距河段最窄处较近, 此处河道主流过流面积较优化方案 1 更小, 受堤头绕流影响, 致使口门前沿水域的横向水流速度值存在一定幅度的增加。

表 2 优化方案特征流速对比

工况	口门区				停泊段			
	$v_{横max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		$v_{纵max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		$v_{回max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		$v_{纵tmax}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
	优化方案 1	优化方案 2	优化方案 1	优化方案 2	优化方案 1	优化方案 2	优化方案 1	优化方案 2
2	0.21	0.21	0.45	0.47	0.07	0.11	0.10	0.14
3	0.33	0.34	0.68	0.71	0.10	0.19	0.16	0.21
4	0.48	0.49	1.08	1.13	0.16	0.26	0.25	0.27
5	0.61	0.73	1.51	1.59	0.23	0.36	0.35	0.31
6	0.75	0.82	1.63	1.71	0.4	0.41	0.33	0.31
9	0.86	0.95	1.91	2.01	0.45	0.47	0.48	0.41

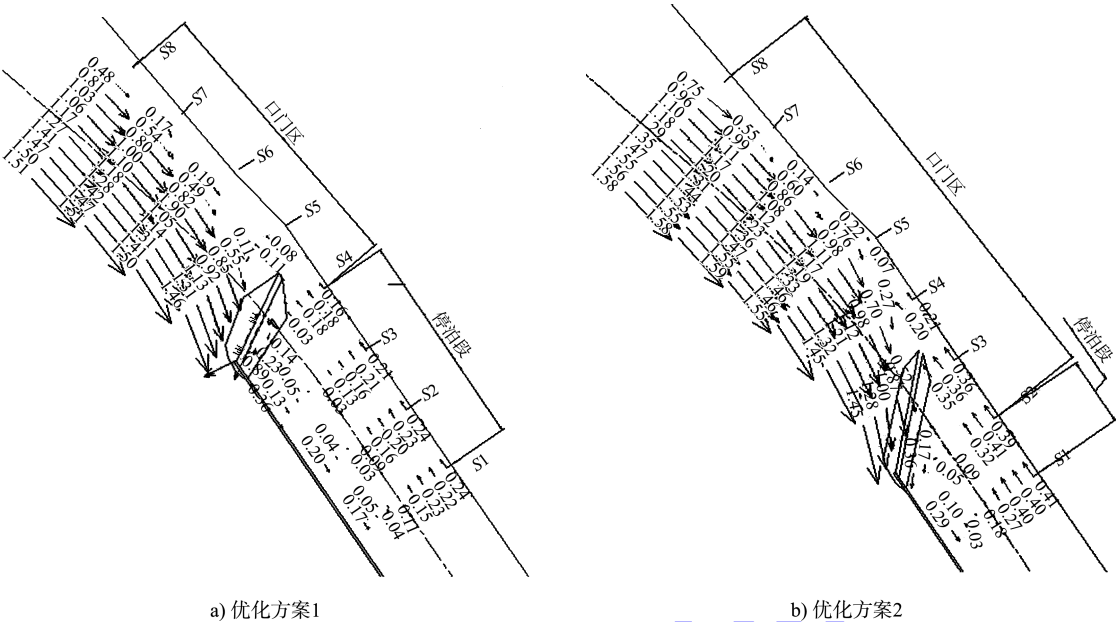


图 8 $Q=5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、闸前水位 84 m 上引航道流场 (单位: m/s)

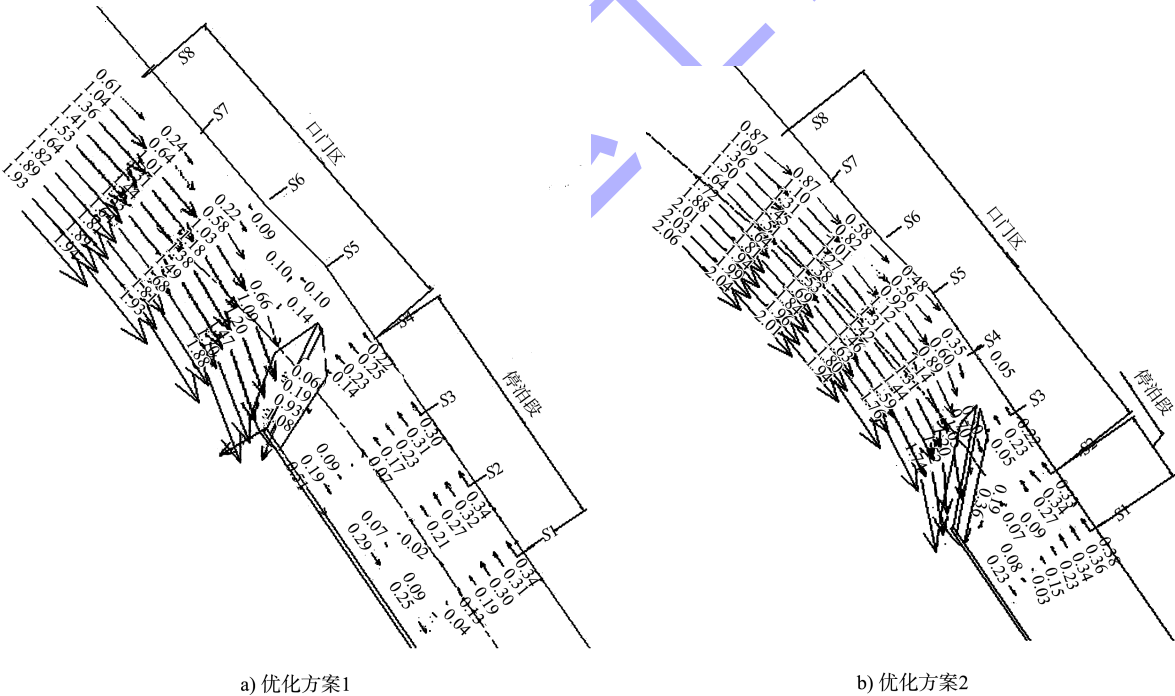


图 9 $Q=7\,440\text{ m}^3/\text{s}$ 、全闸敞泄上引航道流场 (单位: m/s)

通过分析两种优化方案的引航道通航水流条件发现,进一步浚深和拓宽右岸河床并延长开挖段范围,可以适当增大上引航道口门区及上游连接段的过流面积,减小该段的流速以及隔流堤的头部绕流;采用潜坝封堵口门处的深槽,减少进

入引航道的水流,同时潜坝的阻水作用也可减缓上游来流,优化口门区周围流速分布,缩小主流流向与船舶航线之间交角;将口门展宽段宽度由 85 m 调整为 80 m,可减小引航道口门处所占用的河宽及过流面积,减弱分隔墙头部绕流。

5 结语

1) 山秀船闸改扩建工程急弯过渡段容易产生折向右岸的斜流、横向流速偏大等不利水流条件。该工程上游引航道分隔墙头部存在较强绕流、横流较大, 停泊段上段存在不同程度的回流, 影响范围较长, 通航水流条件复杂; 在每一级流量下下游引航道口门区均处于缓水区或弱回流区, 通航条件较好, 可基本满足过往船舶在 $7\ 440\ \text{m}^3/\text{s}$ 以下流量的通航要求。

2) 在设计方案的基础上, 通过对凸岸扩挖、凹岸潜坝群减少至 1 道和分水隔墙口门宽度较小至 80 m 后, 显著优化了上引航道及上游航线范围的水流条件。两个优化方案相比, 优化方案 2 的上引航道及上游航线范围内的水流条件略有变差, 主要原因是引航道分隔墙减短 88 m 后, 墙头部距束窄河段最窄处较近, 受束窄河段水流流速增大的影响, 堤头绕流流态加强, 致使口门前沿水域的横向水流速度值存在一定幅度的增加。因此推荐采用优化方案 1 的布置。

3) 通过扩挖凸岸河道、合理布置凹岸潜坝和分水隔墙, 可有效改善急弯河段上船闸改扩建工程的通航水流条件和枢纽泄流条件, 该工程举措

可为此类近似工程提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 王建平, 邢方亮, 陈奕芬. 弯曲河道船闸口门区通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2019(11): 86-91.

[2] 郑宝友, 陈波. 船闸上游口门区连接段为弯道的通航水流条件[J]. 水道港口, 2005(2): 99-102.

[3] 胡浩, 王崇宇, 舒适. 复杂条件下扩建船闸口门区布置及改善措施[J]. 水运工程, 2019(3): 103-109.

[4] 张爱平, 普晓刚, 王能, 等. 山区河势受限段改建船闸上游通航条件试验研究[J]. 水道港口, 2019, 40(4): 421-425.

[5] 周灿, 段元振, 彭哲, 等. 大源渡二线船闸总体布置方案[J]. 水运工程, 2019(3): 39-42.

[6] 陈明, 段黎明, 王多银, 等. 融江麻石船闸改扩建工程下引航道通航水流条件模型试验[J]. 水运工程, 2020(7): 175-180.

[7] 齐庆辉, 曲红玲, 东培华, 等. 韩庄双线船闸下游引航道水力特性模拟研究[J]. 水运工程, 2015(9): 117-122.

[8] 杨忠超, 魏涛涛, 黄秋杰. 麻石船闸改扩建工程下引航道优化布置数值模拟[J]. 水运工程, 2018(5): 127-131.

[9] 王云莉, 孙国栋, 向美焘. 船闸口门区不良流态改善措施[J]. 水运工程, 2016(3): 83-88.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 43 页)

[4] 季磊.“新丝绸之路经济带”背景下港口与经济腹地协同发展研究: 以长三角港口群为例[J]. 商业经济研究, 2019(7): 153-156.

[5] 杨鑫, 彭飞, 张琦琦, 等. 2000 年来中国边境城市对外贸易位序-规模分布及其影响因素[J]. 世界地理研究, 2020, 29(6): 1102-1112.

[6] 吕敏娟, 曹小曙. 1980—2016 年黄土高原地区人口和可达性异速标度分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(11):

1884-1897.

[7] 刘力钢, 陈金.“一带一路”沿线重点省份入境旅游规模差异及其影响因素[J]. 经济地理, 2020, 40(10): 191-201.

[8] 郭建科, 吴陆陆, 李博, 等. 多功能视角的沿海港口城市体系位序规模结构及耦合类型[J]. 地理科学, 2020, 40(7): 1050-1061.

(本文编辑 王璁)