



北江清远枢纽三线船闸通航水流条件 及优化措施*

苏莹^{1,2,3}, 付菁⁴, 张春泽^{1,2}, 周勤^{1,2}

(1. 重庆交通大学西南水运工程科学研究所, 重庆 400010;

2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

3. 重庆西科水运工程咨询中心, 重庆 400074; 4. 长江水利水电开发集团(湖北)有限公司, 湖北 武汉 430072)

摘要: 北江水运需求增长、航道扩能升级, 拟在清远枢纽一、二线船闸基础上新建三线船闸并预留四线船闸建设空间。针对三线船闸左岸建设方案建立平面二维水流数学模型, 研究引航道口门区及连接段通航水流条件及存在的问题。结果表明: 1) 在工况 2~4 ($Q \geq 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$), 三线船闸上游口门区横流显著, 大于 0.3 m/s 。2) 船闸下游大燕河水流入汇直冲航道。工况 3 中大燕河流量为 $1\,510\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 汇口处连接段横流超标、通航条件差。3) 进一步对船闸方案进行优化试验后, 采取上游口门区增设导流墩、下游大燕河口布置导流顺坝和导流墩、拓宽浚深大燕河口的措施, 可有效改善横流。

关键词: 引航道; 口门区; 数学模型; 通航水流条件; 优化试验

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0150-08

Navigation flow conditions of third-line ship lock of Qingyuan Hub in the Beijiang River and optimization measures

SU Ying^{1,2,3}, FU Jing⁴, ZHANG Chun-ze^{1,2}, ZHOU Qin^{1,2}

(1. Chongqing Southwestern Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400010, China;

2. Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering of Ministry of Communications, Chongqing 400074, China;

3. Chongqing Xike Consultation Center for Water Transport, Chongqing 400074, China;

4. Changjiang Water Resources and Hydropower Development Group(Hubei) Co., Ltd., Wuhan 430072, China)

Abstract: With the increasing demand for water transport in the Beijiang River and the expansion and upgrading of the waterway, it is planned to build a new third-line ship lock on the basis of the first-line and second-line ship locks of the Qingyuan Hub, and reserve space for the construction of fourth-line ship lock. Based on the construction scheme of the left bank of the third-line ship lock, a plane two-dimensional water flow mathematical model is established to study the navigable flow conditions and existing problems in the entrance area of the approach channel and the connecting section. The results show that: 1) In working conditions 2 to 4 ($Q \geq 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$), the cross flow in the upstream gate area of the third-line ship lock is significant, which is greater than 0.3 m/s . 2) The flow of the Dayan River in the lower reaches of the ship lock flows into the straight channel. In working

收稿日期: 2021-09-24

*基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2020jcyj-msxmX0965); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201800712); 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2021B11); 重庆交通大学河海学院研究生科研创新基金项目(YC2020004, YC2021014)

作者简介: 苏莹(1998—), 女, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

通讯作者: 张春泽(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 从事复杂三维流场数值模拟研究。E-mail: zhangchunze@whu.edu.cn

condition 3, when the flow rate of the Dayan River is $1\,510\text{ m}^3/\text{s}$, the cross flow of the connecting section at the confluence exceeds the standard and the navigation conditions are poor.3) After further optimization test of the ship lock scheme, measures such as adding diversion piers in the upstream mouth area, arranging diversion dams and diversion piers in the downstream Dayan River mouth, and widening the dredged Dayan River mouth can effectively improve the cross flow.

Keywords: approach channel; entrance area; mathematical model; navigable flow condition; optimization test

随着水运业迅猛发展，船舶流量显著增长、船型尺度大幅增加，一些早期建设的船闸的过闸能力不能满足水运需求，导致碍航滞航现象频繁发生。在原有船闸基础上进行改扩建，是提高航电枢纽通过能力的重要手段。然而，船闸改扩建工程往往会受地形、已建枢纽建筑物、河势等多重控制因素制约，设计及建设难度均较新建一线船闸更大。例如：飞来峡水利枢纽受场地限制，在凸岸布置新船闸后，上游口门区横向流速过大^[1]；韩江南溪新建船闸受河势及周边环境限制，船闸闸室轴线与河道交角较大，导致口门区横流超标^[2]。船闸通航水流条件的好坏直接关系船舶的过闸安全，改扩建船闸设计方案的合理性可预先通过研究其通航水流条件来分析论证，水流条件差时，可针对存在的水流问题采取措施优化设计方案。例如：白坭枢纽新建二线船闸时，通过建立二维数学模型计算新船闸引航道内水流流态及对比新旧船闸引航道流场变化后，对新船闸设计合理性及最佳通航水流条件进行了论证^[3]；麻石船闸改扩建工程中，针对 3 个改善口门区复杂通航条件的优化方案建立枢纽下游河道二维水流模型，分析比较各方案口门区通航水流条件后，得出了满足通航安全指标的最优方案^[4]。

清远枢纽是珠江流域北江下游的重要航运节点。为满足最新形势下北江日渐增长的水运需求、顺应航道扩能升级趋势，拟在清远枢纽原船闸基础上新建三线船闸，同时预留四线船闸建设空间。清远枢纽右岸已布置一、二线船闸且投入运行，枢纽左岸下游因有电站厂房下泄水流及大燕河大角度汇入导致水流条件复杂，在严苛的现场布置环境和水流条件下，亟需探索保障三线船闸通航水流条件的布置方案与优化措施。本文通过建立清远枢纽局部河段二维水流数学模型，模拟新建三线船闸在各典型工况下的引航道口门区及连接段流速分布，分析通航水流条件验证新建船闸布置的合理性，同时针对存在的水流问题提出改善措施进行优化试验，给出满足通航要求的船闸布置方案。

1 工程概况

清远水利枢纽位于北江下游广东省清远市境内，由干流枢纽和大燕河水闸组成，枢纽所在河段现状河势见图 1。现有通航建筑物设置于枢纽右岸，一线船闸有效尺度为 $220\text{ m}\times 34\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ ，布置于河床右岸；二线船闸有效尺度为 $180\text{ m}\times 23\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ ，布置于一线船闸右侧。两闸中心距为 90 m ，均为 $1\,000$ 吨级船闸。

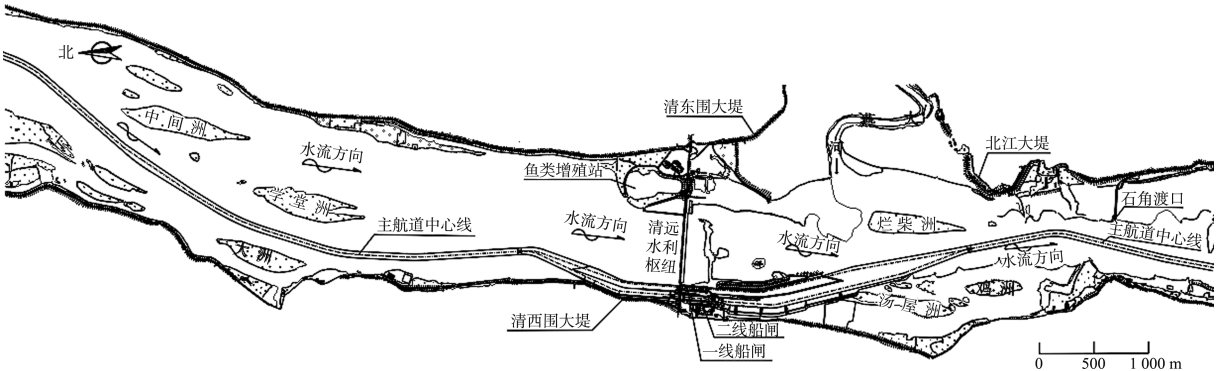


图 1 枢纽河段河势

拟在一、二线船闸基础上新建三线船闸并预留四线船闸建设空间,其单个船闸建设规模为内河 2 000 吨级船闸(兼顾通航 3 000 吨级单船),闸室有效尺度拟采用 280 m×34 m×5.8 m。三线船闸平面布置规划设计时考虑了左岸和右岸两种建设方案,其中右岸方案拟建三、四线船闸自西向东布置在北江右岸,与现一、二线船闸平行,东侧临近二线船闸,该方案新船闸施工期对现有船闸运营有较大干扰,且西侧需对已建清西围大堤退堤改线,改线工程的水利协调难度、施工开挖量、堤后移民和征堤拆迁的难度均十分突出,因此本文主要针对左岸方案通航水流条件展开研究。

左岸方案拟建三、四线船闸布置在北江左岸,

采用闸坝并列式自西向东布置,总平面布置见图 2。三、四线船闸中心距为 57 m,采用双排停靠共用引航道方案,上下游引航道均采用“曲线进闸、直线出闸”的布置方式,引航道底宽 150 m,两侧均布置有导航墙、靠船墩,导航调顺段长 180 m,停泊段长 280 m。上游引航道占用现鱼类增殖站场地,拟补偿建设过鱼通道。为保证船舶通航的水流条件,上引航道向上游直线延伸 3.3 km 与主航道连接。下游引航道向下游直线延伸约 1.4 km,横跨大燕河口,经烂柴洲左汉与主航道连接,右侧停泊段末端续建分水墙、导流墩与烂柴洲相连以应对泄水闸及电站下泄水流影响,同时考虑到北江大堤保护要求,航道左岸底线距离北江大堤脚约 252 m。

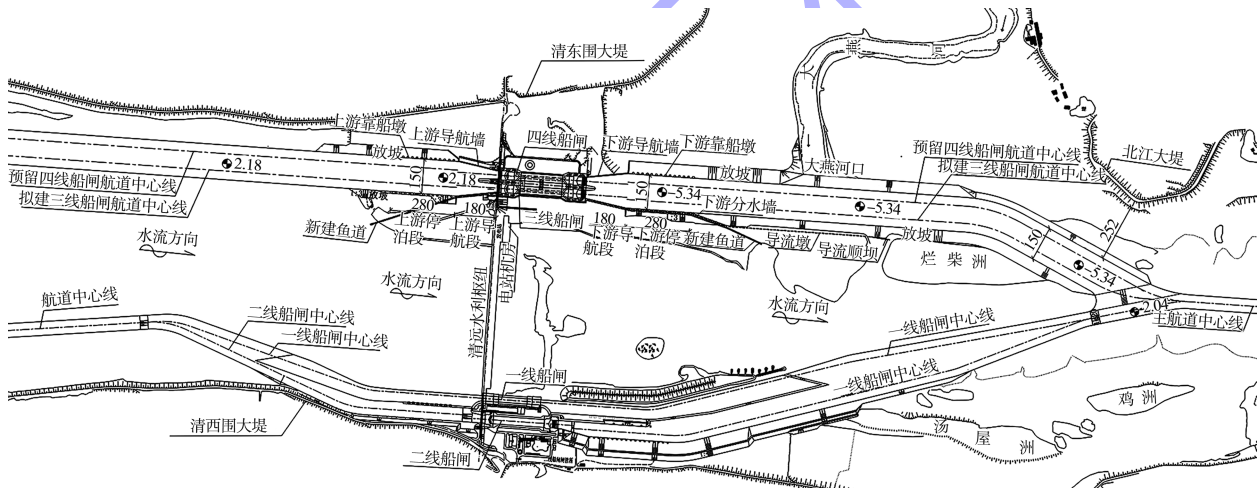


图 2 左岸方案平面布置

2 二维水流数学模型建立与验证

2.1 模型控制方程及数值解法

模型采用水深、流速沿水深垂向平均分布的平面二维浅水方程^[5],包括水流连续方程和动量方程。计算域空间离散使用有限体积法。对于时间积分,浅水方程求解有低阶显式的 Eluer 方法和二阶的 Runge-Kutta 方法。

2.2 边界条件

平面二维水流模型中,进口边界给定流量、出口边界给定水位;岸边界为非滑移边界,给定边界法线方向流速为零,对于顶面高程高于或接

近防洪设计水位的建筑物也建立岸边界,内部不设置网格,如靠船墩、导航墙、分水墙等;动边界(干湿边界)采用冻结法处理,通过定义临界水深 Δh 来确定干、湿单元,当水深 $h > \Delta h$ 时,糙率取正常值,反之糙率取一大值(10^{10} 量级)。

2.3 计算区域及网格划分

建立的模型以清远枢纽为界分为上、下游两段,上游段为枢纽上游 6.3 km 至枢纽坝轴线,下游段为枢纽坝轴线至下游石角水文站所在断面,长约 4.8 km,两岸模型范围为已建大堤之内。计算区域采用非结构化三角形网格进行离散,网格

的大小疏密沿河道河势宽窄变化不等,导流堤堤头、靠船墩、分水墙等特征建筑物均设为固壁边界,并对其周围网格进行加密。上游段布置网格单元4.783 7万个,网格节点2.453 4万个,下游段布置10.816 7万个网格单元,网格节点5.489 0万个,网格平均节点间距约25 m,最小局部网格密度为1.5 m。模型局部计算网格见图3。

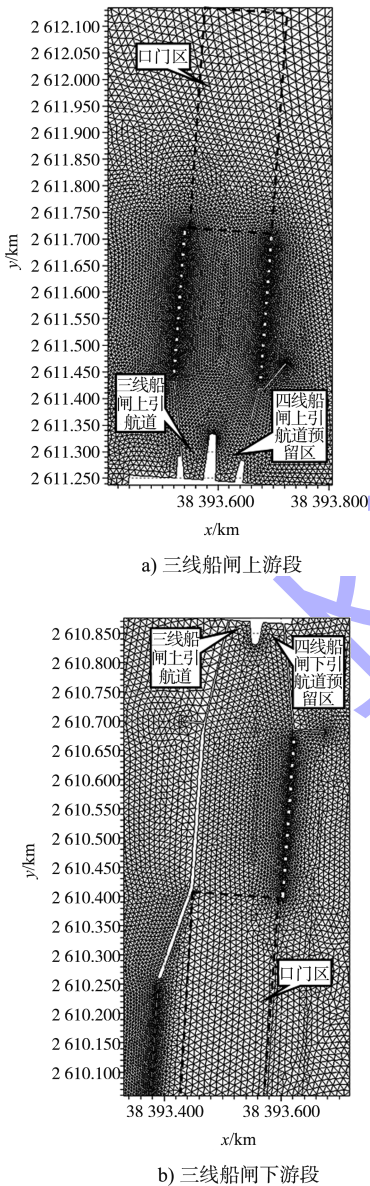


图3 模型局部计算网格

2.4 模型验证

经实测资料率定,该河段主槽糙率范围为0.029~0.032,岸滩糙率范围为0.032~0.037,此

外,由于船闸上游段模型远坝段缺少实测资料,故远坝段糙率参照近坝段进行取值。现选择枢纽下泄流量为5 000 m³/s时的观测沿程水面线对模型进行验证。通过水面线验证(图4)可知,模型计算水面线与观测水面线吻合较好,误差均在(-0.10 m,0.10 m),满足水面线相似要求。

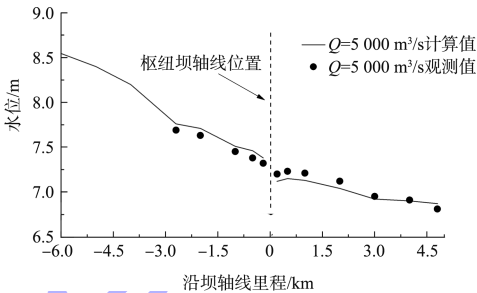


图4 研究河段水面线验证

3 计算成果分析

JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[6]规定:引航道口门区长度取455 m(2倍顶推船队长度);引航道导航段和调顺段内宜为静水区,制动段和停泊段的水面最大流速纵向不应大于0.5 m/s,横向不应大于0.15 m/s;口门区水面最大流速限值为 $v_{纵} \leq 2.0$ m/s、 $v_{横} \leq 0.3$ m/s、 $v_{回流} \leq 0.4$ m/s;参照口门区通航水流条件基本要求判别口门区与主航道之间连接段水流条件的优劣。此外,规范对最大流速的限值均指表面流速,模型计算流速为垂向平均流速,故本文中纵向、横向及回流流速值均已换算为水体表面流速进行分析。

3.1 计算工况

根据清远水利枢纽一、二线船闸设计方案,枢纽上下游设计最高通航水位为10 a一遇洪水位,此时泄洪闸敞泄,电站停止发电,下游大燕河水闸敞泄;上游设计最低通航水位取来流量2 930 m³/s时的坝前水位,此时电站即将由满发转为停机,多余来水由泄洪闸下泄,大燕河泄生态流量。另外,当干流泄洪量大于5 000 m³/s时,大燕河水闸敞泄。现利用最低到最高通航水位之间的4种水位流量组合(表1)作为控制工况对拟建三线船闸方案进行验证、优化。

表 1 模型计算工况

工况	洪水频率/ %	枢纽下泄流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)			大燕河流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	水位/m	
		泄洪闸	电站	合计		上游	下游
1	—	1 827.2	1 102.8	2 930	11	10.00	5.32
2	—	5 000.0	0.0	5 000	11	7.10	6.83
3	50	9 259.0	0.0	9 259	1 510	9.82	9.45
4	10	13 224.0	0.0	13 224	2 480	12.15	11.75

3.2 通航水流条件分析

由于在左岸布置三线船闸对右岸一、二线船闸通航水流条件影响不大,各工况下一、二线船闸通航水流条件均满足规范要求,现主要对三线船闸设计方案进行水流条件分析及方案优化。

3.2.1 三线船闸上游段

表 2 为各计算工况下口门区斜流夹角范围及流速值,图 5 为船闸上游引航道口门区及部分连

接段在流量 Q 为 5 000、9 259、13 224 m^3/s 时的流速分布。据表 2 和图 5 知,船闸口门区及连接段整体流速随上游来流量增大而增大,连接段水流流速及流态良好,但口门区水流顺航道中心线向右侧偏移,在与放坡尾部相连接区域横流逐渐显著。当流量 $Q\geq 5\,000\,\text{m}^3/\text{s}$ 时,口门区右侧横流均超出安全限值 0.3 m/s,通航条件差。

表 2 三线船闸口门区斜流夹角范围及流速值

工况	上游来流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	斜流夹角范围/($^\circ$)	最大纵向流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大横向流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	回流
1	2 930	13~47	0.35	0.18	无回流
2	5 000	13~61	0.68	0.42	无回流
3	9 259	13~57	1.09	0.53	无回流
4	13 224	12~59	1.13	0.58	无回流

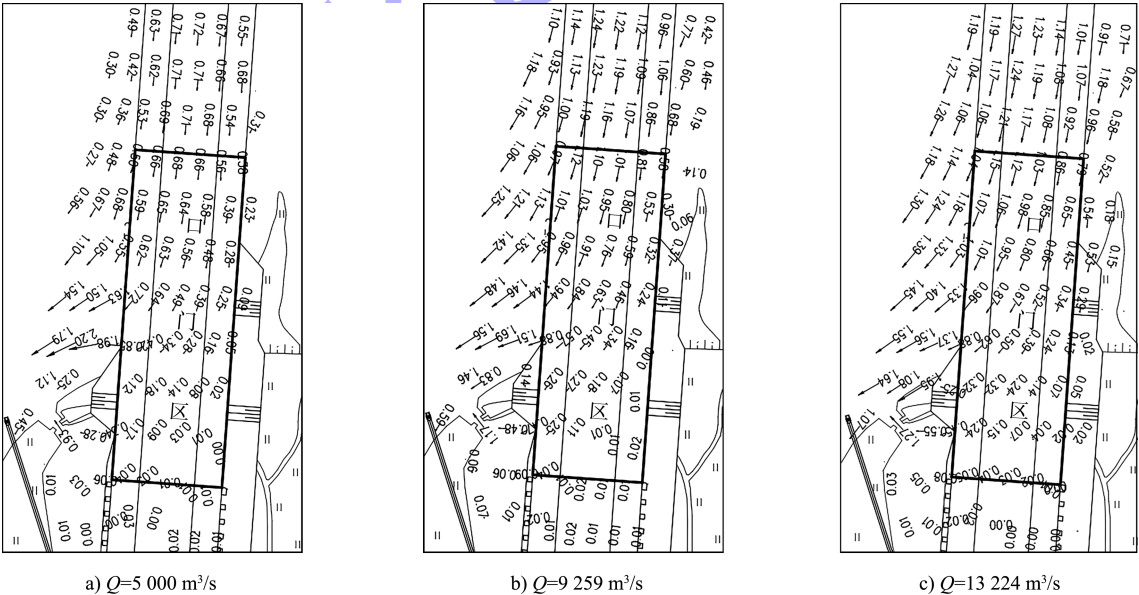


图 5 不同流量下三线船闸上游引航道口门区及部分连接段流速分布 (单位: m/s)

3.2.2 三线船闸下游段

表 3 为在各计算工况下口门区及大燕河口处连接段流速情况,图 6 为大燕河汇口处航道连接

段的流速分布。据表 3 知,在各工况下口门区纵向、横向及回流流速最大值均满足规范的安全限值,通航条件良好。结合表 3 及图 6 知,工况 2 大

燕河以小流量 11 m³/s 汇入时, 汇口流速非常小, 连接段水流条件良好; 工况 3 大燕河流量增加到 1 510 m³/s 时, 汇口水流流速显著增大, 大燕河口水流直冲航道连接段, 产生的横流流速最大值达

0.61 m/s, 通航条件差; 工况 4 大燕河为 2 480 m³/s 时, 大燕河水位上升, 河面变宽, 汇口流速较工况 3 减小, 水流汇入航道连接段后, 连接段内水流流态平稳, 流速值均满足规范要求。

表 3 三线船闸下游口门区及大燕河汇口处航道连接段流速值

工况组号	枢纽下泄流量/ (m·s ⁻³)	大燕河流量/ (m·s ⁻³)	下游口门区			大燕河汇口处航道连接段		
			最大纵向流速/	最大横向流速/	最大回流流速/	最大纵向流速/	最大横向流速/	最大回流流速/
			(m·s ⁻¹)	(m·s ⁻¹)	(m·s ⁻¹)	(m·s ⁻¹)	(m·s ⁻¹)	(m·s ⁻¹)
2	5 000	11	0.20	0.06	0.18	0.17	0.05	0.25
3	9 259	1 510	0.23	0.21	0.05	1.27	0.61	无回流
4	13 224	2 480	0.60	0.18	0.05	1.19	0.24	无回流

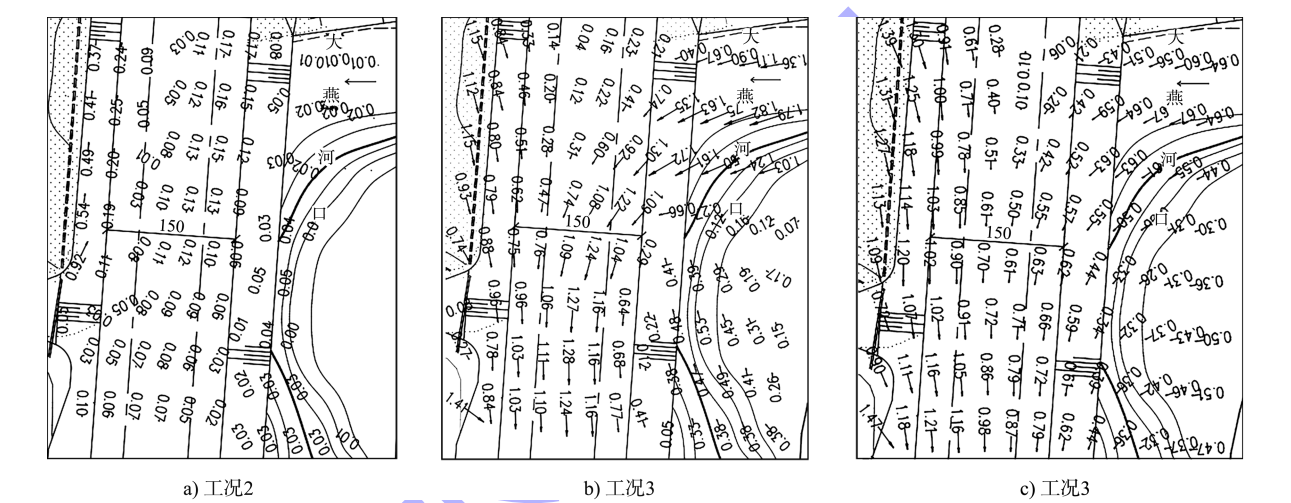


图 6 各计算工况下大燕河汇口处航道连接段流速分布 (单位: m/s)

4 船闸方案优化试验

4.1 三线船闸上游段引航道口门区

受导航分水建筑物、枢纽泄水闸及放坡区域的影响, 于左岸方案三线船闸上口门区而言, 河道断面变窄导致河道水流收缩产生斜向水流, 根据上述分析结果, 上游口门区右侧与放坡区尾部的连接段水流横向流速在流量 $Q \geq 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时大于 0.3 m/s, 需采取措施进行改善。

目前国内外工程经大量试验研究后已提出多种改善口门区横流的工程措施^[7-12], 如调整导航堤长度、优化导流堤堤头形式、堤身开孔引流、口门区设置导流墩等, 其中设置导流墩实用方便、改善效果好, 近年来已成功应用于国内多个枢纽

工程实践^[13-14], 本文拟采用在上游右侧导流堤头前布置导流墩来改善口门区横流。

导流墩通过对水流的均化和阻流作用减小斜流强度, 对横流的改善效果主要取决于导流墩的布置形式和尺寸。上游布置的单个导流墩长度设置为 10 m, 导流墩平行于航道中心线布置, 为确定适宜的导流墩形状、间距和数量, 采用控制变量法拟定了 4 种优化方案(图 7)在最不利工况即上游来流量为 $Q = 13\,224\text{ m}^3/\text{s}$ 时进行试验研究, 具体试验的各优化方案在口门区的斜流夹角范围及最大纵向、横向流速值见表 4, 船闸原始方案与各优化方案在图 7 中口门区设置的 16 个断面对应的最大纵向、横向流速值对比情况见图 8。

表 4 $Q=13\,224\text{ m}^3/\text{s}$ 时各优化方案口门区斜流夹角范围及流速值

优化方案	导流墩截面形状	导流墩间距/m	导流墩数量/个	斜流夹角范围/(°)	最大横向流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大纵向流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
I	矩形	5	20	12~47	0.41	1.09
II	平行四边形	5	20	13~44	0.46	1.05
III	平行四边形	10	20	16~50	0.37	1.07
IV	平行四边形	5	24	14~46	0.31	1.08

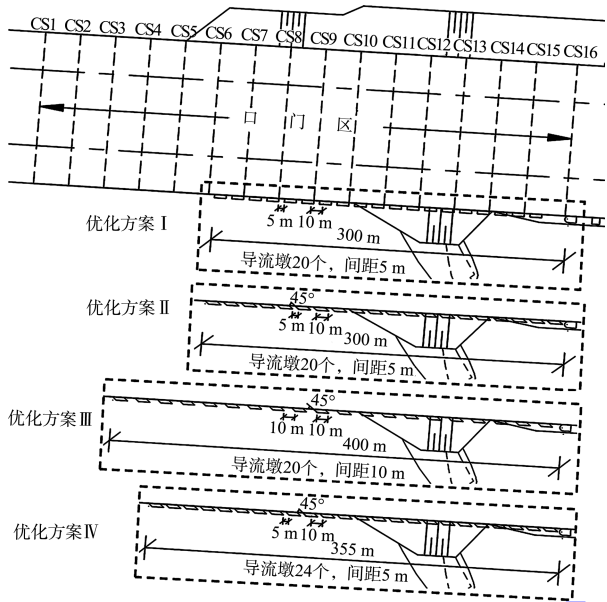


图 7 各优化方案布置及口门区断面设置

试验分析发现, 优化方案 I 和 II 仅导流墩截面形状不同, 在导流墩范围内, 方案 II 对原始设计方案中 CS7~CS11 的横流改善效果显著优于方案 I, 均降至 0.3 m/s 之下, 由此可知采用平行四边形截面导流墩对横流的改善效果优于矩形截面, 至于方案 II 存在于导流墩末端区域 (CS4~CS6) 大于 0.3 m/s 的横流, 可通过继续延长导流墩范围进行改善。

此外, 对于不同导流墩间距的优化方案 II 和 III, 方案 III 间距较大, 相邻导流墩之间局部透水量增加, 与方案 II 相比反而加剧了横流影响, 致使方案 III 中 CS6~CS10 的横流改善效果均未达标。

随后, 在方案 II 基础上延长导流墩范围得到方案 IV, 结果显示除断面 4 最大横流略有超标外 (0.31 m/s), 其他断面均低于 0.3 m/s , 且 CS1~CS10 的纵向流速较原始方案普遍减小, 可使口门区的水流条件基本满足船舶安全通航的要求。

4.2 三线船闸下游段航道连接段

根据 3.2.2 节计算结果, 大燕河汇流直冲航道加剧横流强度, 使三线船闸下游连接段横流超标, 故应采取措施调顺汇口流向并降低流速。根据大燕河来流趋势, 拟在大燕河口设置长约 400 m 的 L 形导流顺坝和导流墩以调顺大燕河水流 (顺坝和导流墩顶部高程均设为 9 m); 另外拟通过扩大河口宽度、浚深河口降低入汇段流速, 具体优化措施设置见图 9。

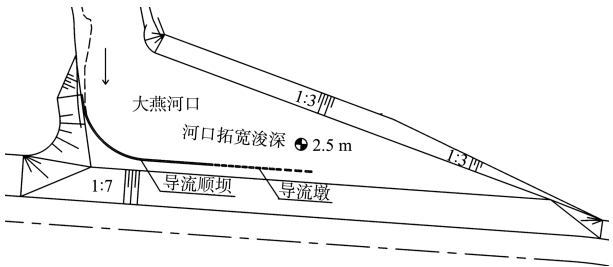
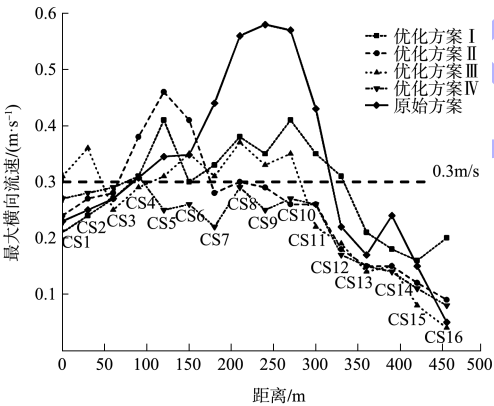
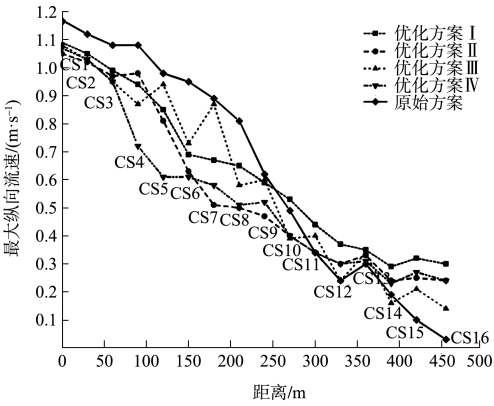


图 9 大燕河口处设置导流顺坝、导流墩及河口拓宽浚深



a) 最大横向流速



b) 最大纵向流速

图 8 $Q=13\,224\text{ m}^3/\text{s}$ 时原始方案及各优化方案口门区各断面流速值

采取上述工程措施后, 航道连接段在各工况下流速大小及分布见表 5、图 10。在大燕河流量 $Q \geq 1\,510\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水流漫过导流顺坝及导流墩, 大燕河水流在导流顺坝和导流墩作用下流向改变, 工况 3 中水流在导流作用下不再直冲航道连接段, 河口拓宽浚深后流速降低, 连接段纵、横向流速显著减小, 最大横向流速降至 0.24 m/s , 工况 2 和 4 中, 纵、横流较原始情况无明显变化,

流速值均在规范要求内, 连接段整体通航水流条件良好。

表 5 采取工程措施后大燕河汇口处航道连接段流速值					
工况	枢纽下泄流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	大燕河流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	大燕河汇入处航道连接段流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		
			最大纵向	最大横向	最大回流
2	5 000	11	0.22	0.05	0.29
3	9 259	1 510	0.72	0.25	无回流
4	13 224	2 480	1.16	0.24	无回流

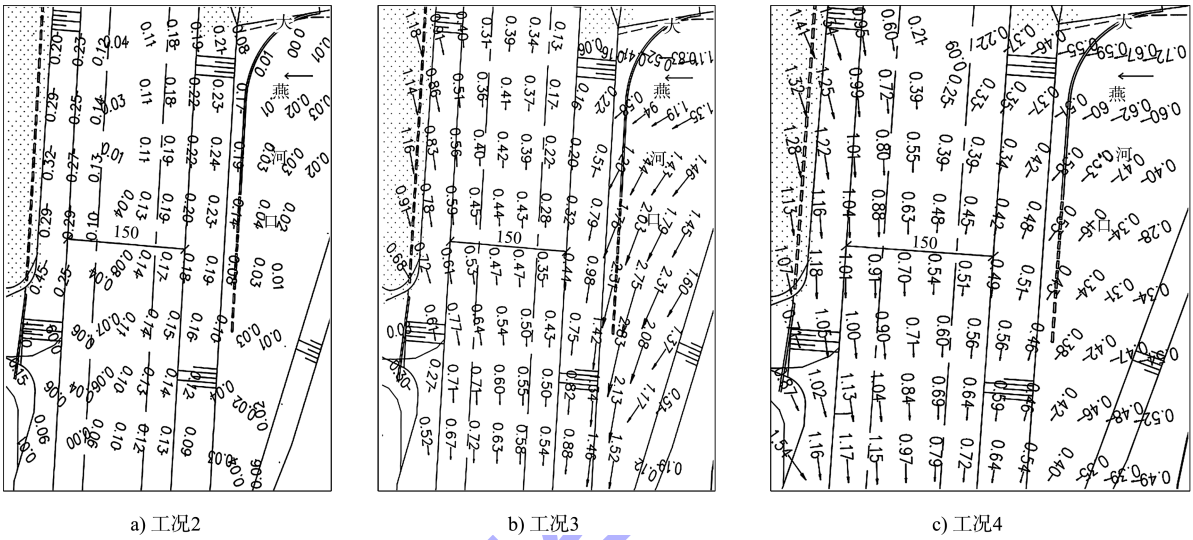


图 10 采取工程措施后各计算工况下大燕河汇口处航道连接段流速分布 (单位: m/s)

5 结论

- 1) 对清远枢纽上、下游局部河段及设计方案建立二维水流数学模型, 发现三线船闸上引航道口门区斜流显著, Q 为 $5\,000$ 、 $9\,259$ 、 $13\,224\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 横流均超出安全限值, 通航条件差; 三线船闸下游段口门区通航水流条件良好, 连接段中大燕河汇口处在枢纽下泄流量为 $9\,259\text{ m}^3/\text{s}$ 、大燕河流量为 $1\,510\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 横流显著, 通航条件差。
- 2) 针对三线船闸上游口门区横流较大的问题, 采取在口门区右侧导流堤头增设导流墩来改善横流, 通过比选导流墩优化方案的改善效果, 布置 24 个截面形状为平行四边形、间距为 5 m 的导流墩, 可作为适宜的导流墩布置形式。
- 3) 通过在大燕河口布置导流顺坝、导流墩及拓宽浚深河口的措施, 可调顺河口水流、降低流速、改善横流, 使水流入汇后下游船闸连接段水流条件符合规范要求。

参考文献:

[1] 刘达, 黄本胜, 邱静, 等. 飞来峡水利枢纽新建二、三线船闸通航水流条件的试验研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(12): 58-60.

[2] 李艳, 张绪进, 刘洋, 等. 韩江南溪新建船闸通航水流条件试验研究[J]. 水道港口, 2020, 41(5): 585-589, 618.

[3] 洪坤辉, 吴腾, 刘磊. 白坭枢纽新建二线船闸通航条件研究[C]//第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集. 北京: 中国力学学会流体力学专业委员会水动力学专业组, 2019: 543-550.

[4] 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, 144.

[5] 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.

[6] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[7] 陈辉, 刘志雄, 江耀祖. 引航道通航水流条件数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 13-18.