



岷江张坎航电枢纽船闸引航道 通航水流条件优化*

马超¹, 陈明^{1,2}, 周绪生¹, 薛宏程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: 拟建岷江张坎航电枢纽位于S形弯曲河道上, 船闸下游口门区在弯道和复杂河床地形的影响下, 水流条件难以满足通航标准要求。针对该工程面临的水流条件问题, 采用平面二维水流数值模拟方法, 在充分利用下游口门区原始地形的基础上, 通过改变引航道边墙堤头形式、延长引航道边墙并向左岸偏转、增设导流墩等措施提出3个优化方案。结果表明: 采用 $R=125$ m的弧形引航道堤头, 外加1个导流墩的布置方案, 不仅能有效降低口门区横流、回流流速, 亦能通过导流墩与引航道边墙的间隙引流破坏河道连接段回流的形成条件, 从而改善在大流量下因弧形堤头引起连接段明显的回流现象, 优化后的下游口门区及连接段通航水流条件满足规范要求, 研究成果可为类似工程提供借鉴和参考。

关键词: 船闸; S形弯曲河段; 口门区; 水流条件; 数值模拟

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0124-07

Optimization of navigable flow conditions for approach channel of Zhangkan Navigation-power Junction ship lock on Minjiang River

MA Chao¹, CHEN Ming^{1,2}, ZHOU Xusheng¹, XUE Hongcheng¹, HUANG Haijin¹

(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: The proposed Zhangkan Navigation-power junction in the Minjiang River is located on the S-shaped curved channel. The flow conditions in the downstream entrance area of the ship lock are difficult to meet the navigational standards due to the influence of the curved channel and complex riverbed topography. In view of the flow conditions of the project, a two-dimensional numerical simulation method of water flow is adopted. On the basis of fully utilizing the original topography of the downstream entrance area, three optimization schemes are proposed by changing the shape of the guidance wall of the approach channel, extending the guidance wall of the approach channel and deflecting to the left bank, and adding diversion piers. The results show that the arrangement scheme of adopting $R=125$ m curved guidance wall and one diversion pier can not only effectively reduce the cross-flow and back-flow velocity in the entrance area, but also destroy the formation conditions of back-flow in the connecting area through the gap between the diversion pier and the guidance wall, thus improving the condition of back-flow caused by the curved guidance wall in the connecting area under the high flow rate. The optimized downstream flow conditions in the entrance area and the connecting area meet the navigational standards, and the research results can provide references for similar projects.

Keywords: ship lock; S-shaped curved river; entrance area; flow condition; numerical simulation

收稿日期: 2023-11-07

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3206104)

作者简介: 马超 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

通讯作者: 陈明 (1983—), 男, 博士后, 教授, 从事通航水力学方面的教学和研究。E-mail: chenmingjy@126.com

口门区是保障船舶安全航行的关键水域,建设在天然河道中的船闸的引航道口门区通常受到岛群、急弯段的影响,导致在大坝泄洪及发电下泄水流时形成斜流、回流及涡漩等不利流态,从而影响船舶的通航安全。目前,国内外许多学者采用物理模型、数学模型的方式针对口门区的通航水流条件做了大量优化研究。王彪等^[1]通过建立京南枢纽二线船闸物理模型,对位于弯道下游口门区的通航水流条件进行研究,并提出优化措施;颜志庆等^[2]、程璐等^[3]通过建立整体通航枢纽物理模型,对S形弯曲河段口门区通航水流条件进行优化研究。张羽等^[4]采用整体枢纽物理模型及平面二维数值模拟,结合不同的调度方式,研究南阳郭滩航运枢纽布置在弯曲河段引航道口门区通航水流条件;吴惠国等^[5]为优化曹娥江清风船闸引航道通航水流条件,建立二维数学模型,采用延长导流墙长度、改变引航道边墙形式以及与导流墩组合等措施,改善口门区的通航水流条件;杨忠超等^[6]采用二维数值模拟方法,通过布置隔流堤、增加导流墩和改变导流墩轴向角等措施,对麻石船闸下游口门区进行优化;陈明等^[7]通过建立二维数学模型,采用延长导流堤、布置导流墩、布置透空式隔流堤等措施,对左江山秀船闸布置在急弯河段口门区通航水流条件进行优化。

本文依托岷江张坎航电枢纽拟建工程,建立

枢纽下游河段二维水流数学模型,通过充分利用河床原始地形,并结合引航道平面优化措施,提出适合S形弯曲复杂河床上的船闸引航道布置方案。

1 工程概况

为满足岷江航运需求,拟在岷江张坎航电枢纽右岸新建船闸1座。岷江张坎航电枢纽工程坝址位于眉山市东坡区活麻林,河中岛群众多,致使水流分叉较多,水流条件复杂。规划张坎梯级坝址,上距汤坝梯级12.0 km,下距虎渡溪梯级17.1 km。张坎航电枢纽工程坝址多年平均流量 $610 \text{ m}^3/\text{s}$ 。为保证与上下2个梯级水位合理衔接,拟定上、下游最高通航水位分别为403.50、397.72 m。电站为河床式开发,正常尾水位391.30 m(3台机组满发),利用落差12.2 m,装机容量8.4万kW,最大引用流量 $891 \text{ m}^3/\text{s}$ 。张坎航电枢纽工程上游渠化里程14 km,船闸可通行1 000吨级船舶,船闸有效尺寸 $180 \text{ m} \times 23 \text{ m} \times 4.2 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 门槛水深)。上、下游引航道底宽50.5 m,导航调顺段长132 m,停泊段长200 m;上游口门区长260 m,下游口门区长200 m。上下游均布置靠船墩,由于修建大坝阻挡了鱼类洄游,故在船闸左侧,电站右侧修建鱼道。下游引航道口门区处于河道右岸凹侧,修建下游护岸,防止水流冲刷右岸。张坎枢纽整体布置平面见图1。

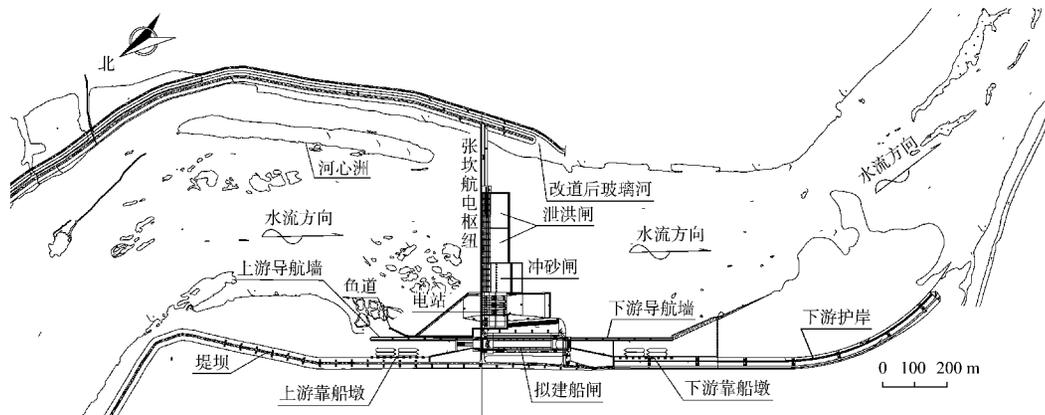


图1 张坎枢纽整体布置平面

2 数学模型建立与验证

2.1 模型控制方程及求解方法

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^[8]，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。对于时间积分使用低阶显式欧拉法和高阶精度龙格库塔法。

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，采用判定露滩点并引入动边界处理方法来解决不间断露滩问题。对于靠船墩、引航道边墙、堤坝、下游护岸等建立岸边界。

2.3 计算区域及网格划分

以张坎航电枢纽坝轴线为界，下游段距枢纽坝轴线长约 3.5 km。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，靠船墩、引航道边墙、堤坝、下游护岸等均设为固壁边界，并对其周围网格进行加密。下游段布置 13.210 1 万个网格单元，网格节点 6.687 2 万个，网格平均节点间距约 15 m，最小局部网格密度为 5 m。模型局部计算网格见图 2。

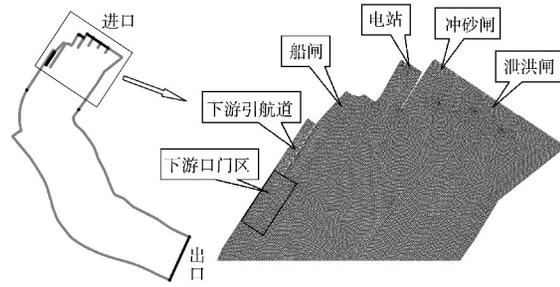


图 2 模型局部网格

2.4 模型验证

采用 2023-06-07 工程河段实测流量(384 m³/s)下的观测资料对计算模型进行验证。本文选取 4 个断面进行水位与流速验证，水面线验证见图 3，流速、流向验证见图 4。由图 3 可知，模型计算水位与实测水位吻合较好，误差为±0.05 m，符合水面线相似要求。由图 4 可知，除个别测点外，水流总体上吻合良好。

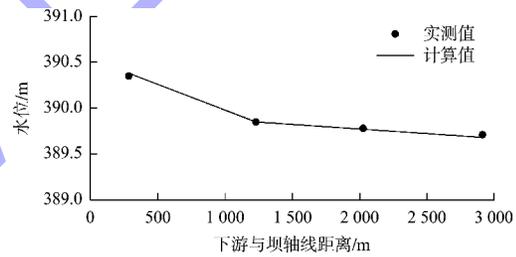
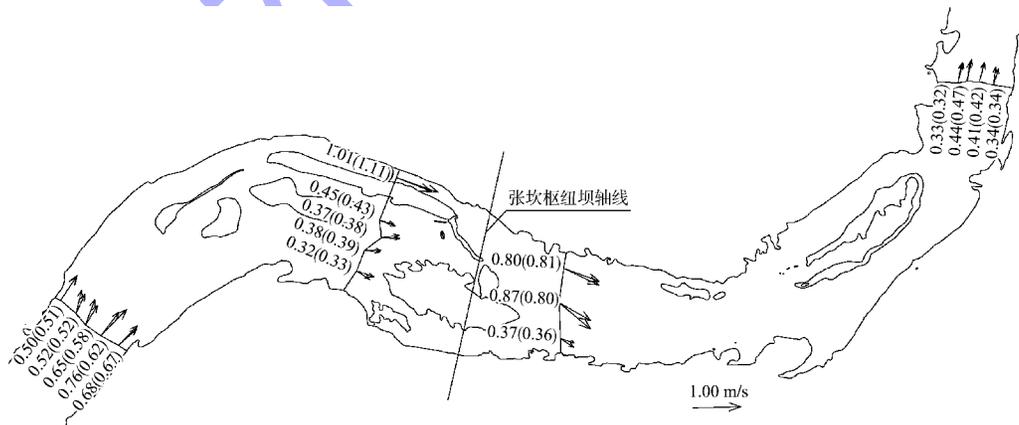


图 3 Q=384 m³/s 水面线验证



注：括号内数字为实测流速，括号外数字为计算流速。

图 4 Q=384 m³/s 天然河道流速、流向验证

3 计算成果与分析

根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[9] 规定：下游引航道口门区长度取 200 m；口门区水面

纵向、横向、回流流速分别不应大于 2.00、0.30、0.40 m/s。规范中的最大流速均指表面流速，平面二维模型计算流速为垂向断面平均流速，因此本文纵

向、横向及回流流速值均换算为表面流速进行分析。

3.1 计算工况

根据岷江张坎航电枢纽船闸设计方案及泄洪、发电的水库调度方式, 综合考虑采用闸门局开泄洪且机组发电(满发)形式。即上游来流 10 600、

9 000、7 720 m³/s 时, 电站满发引用 891 m³/s, 其余流量以冲砂闸、泄洪闸共 17 孔均匀局开泄洪、排沙; 上游来流 2 500 m³/s 时, 电站满发引用 891 m³/s, 其余流量以冲砂闸 5 孔均匀局开泄洪、排沙, 计算工况见表 1。

表 1 计算工况

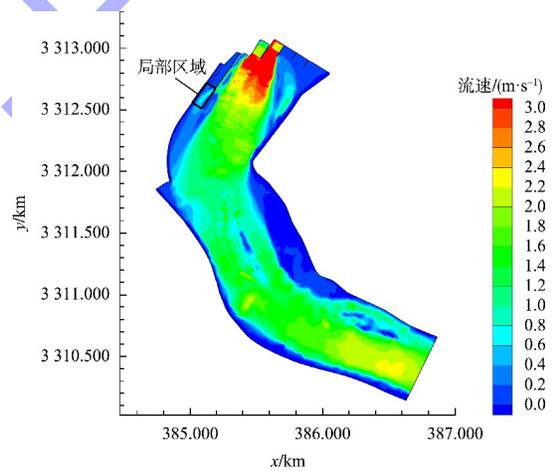
工况	洪水频率/%	上游来流流量/(m ³ ·s ⁻¹)	水位/m		枢纽下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)			合计
			上游	下游	电站	冲砂闸	泄洪闸	
1	10	10 600	403.00	396.07	891	2 855.59	6 853.41	10 600
2	20	9 000	403.00	395.30	891	2 385.00	5 724.00	9 000
3	-	7 720	403.00	394.51	891	2 008.53	4 820.47	7 720
4	-	2 500	403.50	391.69	891	1 609.00	0	2 500

3.2 通航水流条件分析

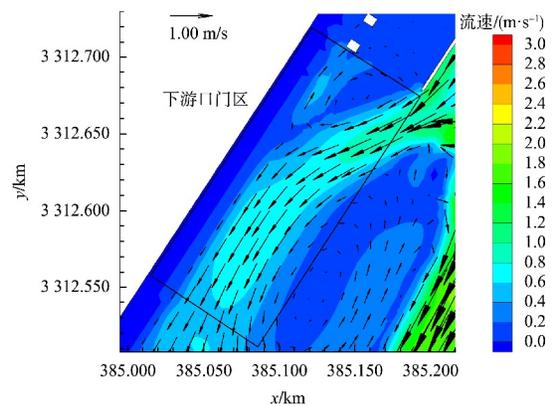
表 2 为各工况下游口门区最大纵流、横流、回流计算值。由表 2 可知, 当上游来流分别为 10 600、9 000 m³/s 时, 下游口门区最大纵向流速分别为 0.03、0.18 m/s, 最大横向流速均为 0.04 m/s, 最大回流流速分别为 0.18、0.16 m/s。因为下游运行水位较高, 使得上游来流速度扩散均匀, 纵流、横流、回流数值小, 通航水流条件良好。当上游来流量为 7 720 m³/s 时, 运行水位下降, 下游口门区最大纵向、横向、回流流速分别为 0.41、0.08、0.38 m/s, 虽然通航水流条件满足规范要求, 但回流数值较大。图 5 为设计工况下 $Q=2 500$ m³/s 下游口门区流场云图。由表 2 与图 5 可知, 当上游来流量为 2 500 m³/s 时, 由于运行水位进一步降低, 下泄水体被河道岛群分成 2 束下泄水流, 一束紧贴引航道边墙, 另外一束汇入河道。随后, 受口门区左侧凸起地形影响, 河道部分水流与紧贴引航道边墙的下泄水流汇合, 形成较强斜流, 该斜流冲击下游口门区, 造成大范围横流超标(0.47 m/s), 部分区域回流亦超标(0.43 m/s)。在原始地形的影响及下泄水流的剪切作用下, 靠近引航道右岸区域形成漩涡, 水流条件极为复杂。综上所述, 为保证张坎航电枢纽正常通航, 需采取相应的优化措施以解决通航条件差的问题。

表 2 下游口门区流速计算值

工况	上游来流量/(m ³ ·s ⁻¹)	最大纵向流速/(m·s ⁻¹)	最大横向流速/(m·s ⁻¹)	最大回流流速/(m·s ⁻¹)
1	10 600	0.03	0.04	0.18
2	9 000	0.18	0.04	0.16
3	7 720	0.41	0.08	0.38
4	2 500	0.80	0.47	0.43



a) 完整



b) 局部

图 5 $Q=2 500$ m³/s, 原方案下游口门区流场云图

3.3 优化方案通航水流条件分析

结合国内外类似工程常采取的优化措施^[10-14]，本文在利用现有河床地形的基础上，拟采用改变引航道边墙堤头形式、延长下游引航道边墙并向左岸偏转、增设导流墩等3个措施对船闸下游引航道进行优化，见图6。为便于进行水流条件分析，在口门区每隔20m选取1个测试断面，共11个断面，并按航线方向对各断面进行流速分解，见图6a)。

优化方案I在保证下游引航道边墙总长不变的情况下，将下游引航道边墙堤头40m处改为圆弧段($R=125\text{ m}$)并向左侧外挑 10° ，见图6a)。当上游来流量为 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时，靠近引航道边墙附近水流受到圆弧堤头的引导，偏转后斜冲主河道来流，经过掺混后缩小了水流流速及水流与航线夹角。在下游口门区 $80\sim 200\text{ m}$ 范围内，纵向流速减小约80%，纵向流速不超过 0.9 m/s ，横向流速减小约60%。虽然优化方案I中纵、横流速明显减小，但在口门区 $80\sim 200\text{ m}$ 范围内出现大面积的漩涡，回流强度相比原始方案增大，见图7。

优化方案II在优化方案I的基础上，将下游

引航道边墙堤头70m处改为圆弧段，并将圆弧段增加40m，调整为110m，保持圆弧半径不变，圆弧与边墙平顺外切，见图6b)。当上游来流量为 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ ，经过110m的圆弧堤头对靠近引航道边墙水流进一步引导偏转，将引航道边墙旁的下泄水流挑流回主河道，并阻挡河道斜冲口门区的下泄水流，对下游引航道、口门区的水体充分起到掩护作用。相比优化方案I，优化方案II口门区中纵流、横流、回流强度减弱，整体通航水流条件较好，见图7。

优化方案III在优化方案I的基础上，利用口门区左侧突起地形，将下游引航道边墙堤头圆弧段调整为70m，保持圆弧半径不变，并在口门区布置1个长10m，斜 45° 的四边形导流墩，导流墩距引航道边墙末尾16m，如图6c)。经过圆弧堤头对靠近引航道边墙水流引导偏转，斜冲主河道来流，加上导流墩对主河道斜向来流的阻挡、调顺、引流后，在下游口门区 $0\sim 80\text{ m}$ 范围内，纵向流速约为优化方案I的70%，横向流速、回流流速在下游口门区得到较大改善，整体通航水流条件良好，见图8。

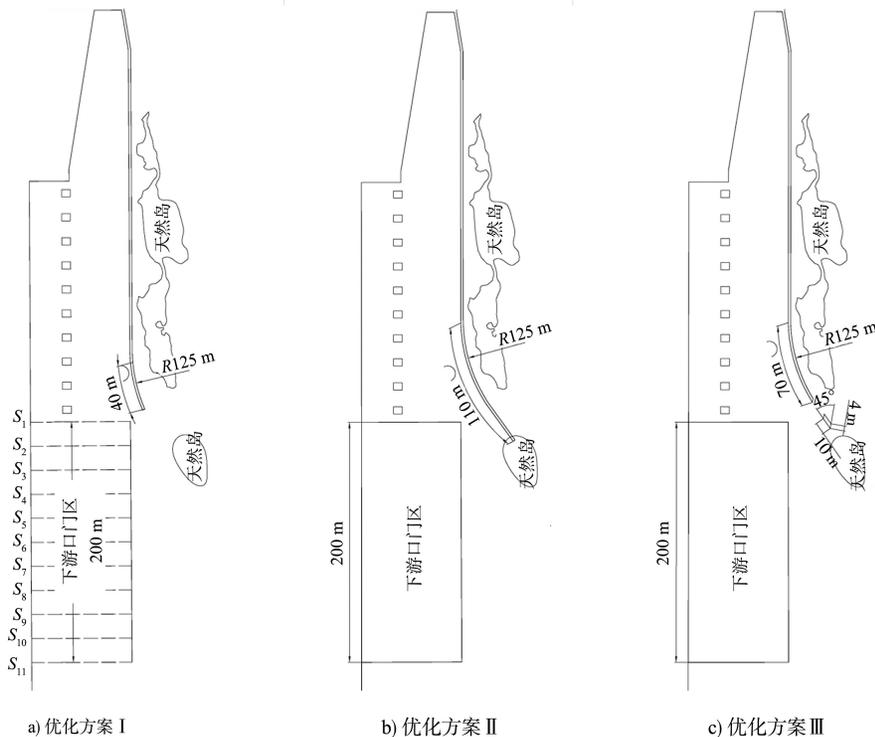
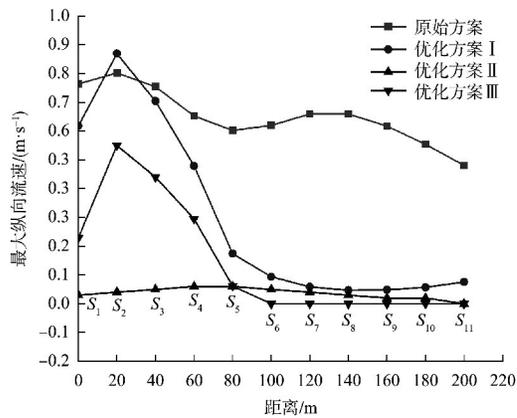
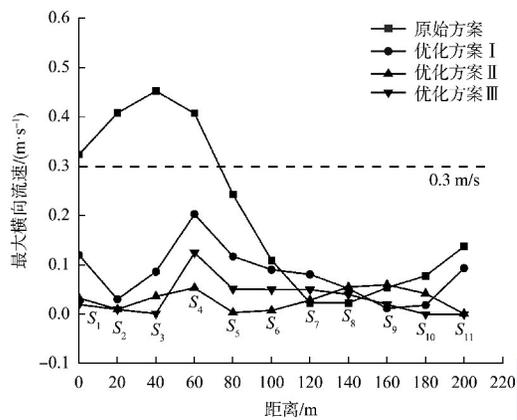


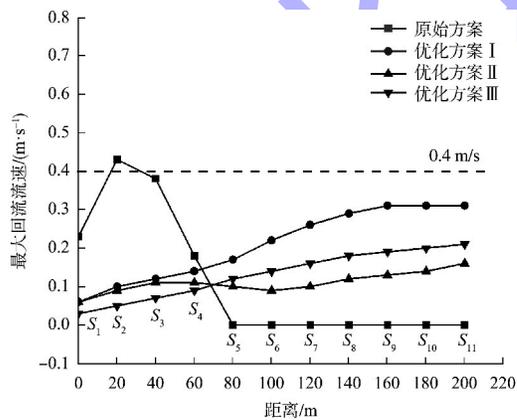
图6 各优化方案布置及口门区断面设置



a) 最大纵向流速

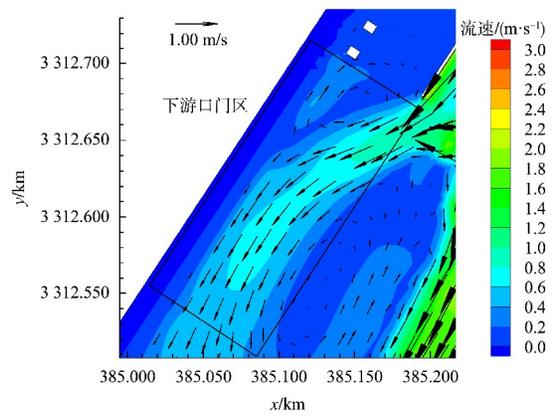


b) 最大横向流速

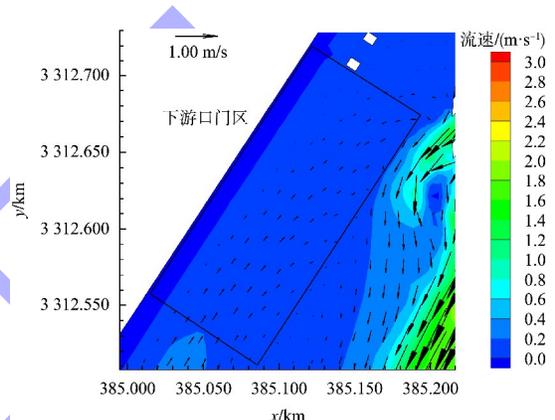


c) 最大回流流速

图7 $Q=2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$, 原始方案及优化方案口门区各断面流速值



a) 原始方案



b) 优化方案 III

图8 $Q=2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$, 原始方案及优化方案 III 口门区流速云图

然而, 当上游来流量为 $7\ 720\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 由于优化方案 II 引航道边墙的调整, 河道过流断面进一步收缩, 大范围回流区下移, 在连接段附近形成明显回流, 最大回流流速为 $0.66\ \text{m/s}$, 见图 9a)、b)。优化方案 III 与优化方案 II 相比, 由于导流墩与引航道边墙的间隙具有引流功能, 破坏了连接段附近回流的形成条件, 削弱回流强度, 缩小回流区范围, 最大回流约为优化方案 II 的 60%, 见图 9c)、d)。综上所述, 与优化方案 II 相比, 优化方案 III 不仅改善了下游口门区在 $2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 出现斜流的情况, 同时缩小口门区、连接段的回流范围及强度。因此, 优化方案 III 相对较优。

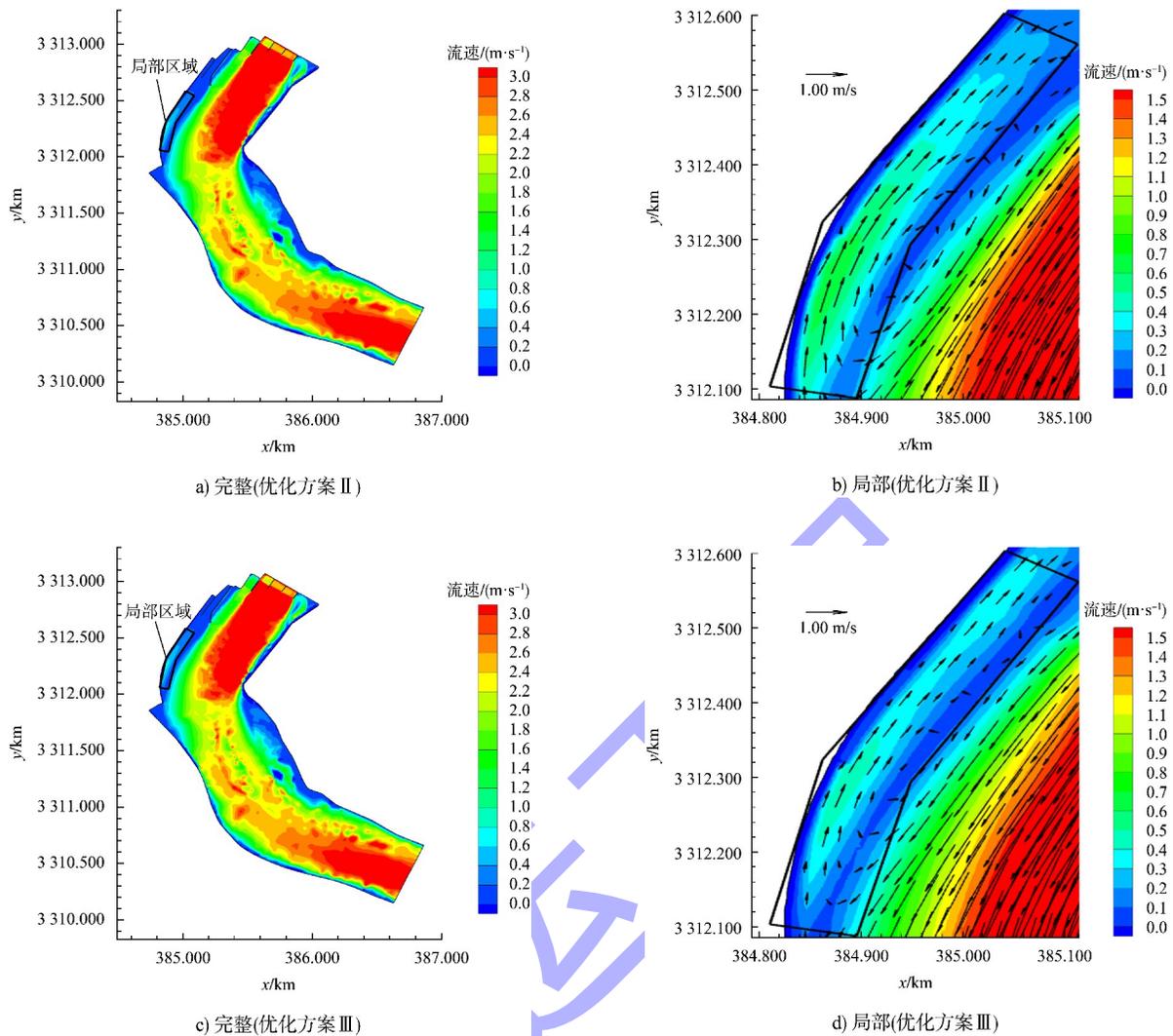


图9 $Q=7720\text{ m}^3/\text{s}$, 优化方案II、III船闸下游连接段流速云图

4 结论

1) 本文拟建张坎航电枢纽船闸下游引航道设计方案二维水流数学模型, 研究发现: 当上游来流流量分别为 $10\ 600$ 、 $9\ 000$ 及 $7\ 720\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 口门区水流条件均满足船舶通航要求; 而当流量为 $2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 通航水位降低, 受河道岛群影响, 口门区形成较强斜流, 造成显著的横流及回流, 通航条件难以满足规范要求。

2) 针对流量为 $2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时下游口门区横流、回流超标问题, 提出3种优化方案。通过方案比选, 提出将下游引航道边墙堤头 $70\ \text{m}$ 处改为

半径 $R=125\ \text{m}$ 圆弧段, 并充分利用下游口门区原始地形, 在口门区距引航道边墙末尾 $16\ \text{m}$ 处布置1个长 $10\ \text{m}$, 斜 45° 的四边形导流墩。优化后口门区通航水流条件得到明显改善, 满足通航水流条件要求。

3) 在大流量 ($7\ 720\ \text{m}^3/\text{s}$) 时, 圆弧段的挑流作用将导致回流区下移至连接段。而在圆弧段末端增设导流墩不仅可以阻挡斜流, 其与引航道边墙形成的间隙还可引流, 从而破坏连接段附近回流的形成条件, 削弱回流强度, 缩小回流范围, 为船舶进出船闸创造良好的水流条件。

(下转第171页)