



乌江通天槽滩段航道整治工程方案优化*

张志¹, 袁浩^{1,2,3}, 夏春华¹, 田海峰¹, 陈文兵⁴, 吴宏⁴

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学, 西南水利水电工程科学研究院, 重庆 400010;
3. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 402247; 4. 重庆航运建设发展(集团)有限公司, 重庆 401121)

摘要: 通天槽滩险治理是乌江航道整治的关键性工程。乌江白马枢纽建成后可提高航道的通航能力, 但水位升高会导致现有的部分江心洲、浅滩变成暗礁碍航。针对通天槽滩段航道局部水流急、流态差、扫弯水严重等问题, 采用河工模型试验对设计整治方案的通航水流条件开展研究。结果显示设计整治方案虽改善了通航水流条件, 使得通天槽滩段航道在白马枢纽建成后基本满足尺度要求, 但其挖槽设计未遵循河势, 使得航道走向与中水期水流动力轴线交角较大, 不利于退水冲刷及航槽稳定。针对设计整治方案的不足, 考虑工程投资及施工难易程度, 提出了更适合本次航道整治工程的优化建议措施。研究结果可为类似航道整治工程提供科学依据和技术支撑。

关键词: 乌江; 航道整治; 河工模型; 通航水流条件

中图分类号: U617

文献标志码:

文章编号: 1002-4972(2024)12-0144-08

Optimization of waterway regulation project scheme for Tongtiancao Beach of Wu River

ZHANG Zhi¹, YUAN Hao^{1,2,3}, XIA Chunhua¹, TIAN Haifeng¹, CHEN Wenbing⁴, WU Hong⁴

(1. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Southwest Research Institute For Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400010, China;

3. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing, 402247, China;

4. Chongqing Shipping and Development Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: The Tongtiancao beach regulation is a key project for the regulation of the Wu River waterway. The completion of the Baima Hub on the Wu River will improve the navigability of the waterway, but the rising water level will cause some of the existing river barriers and shoals to become reefs and obstruct navigation. For the channel of Tongtiancao Beach, there are problems such as rapid local water flow, poor flow pattern, and serious water sweeping bends, this paper adopts the river model test to study the navigational current conditions of the designed regulation plan. The results show that although the waterway regulation scheme has improved the navigational flow conditions, which makes the channel of Tongtiancao Beach basically meet the scale requirements after the completion of Baima Hub, but its dredging design does not follow the river situation, which makes the direction of the channel and the intersection of mid-water current power axis larger, which is not conducive to the receding scouring and navigation channel stability. In view of the shortcomings of the designed remediation scheme, and considering the project investment and construction difficulty, the optimisation measures more suitable for this channel remediation project are proposed. The research results can provide scientific basis and technical support for similar waterway regulation projects.

Keywords: Wu River; waterway regulation; river model; navigable flow condition

收稿日期: 2024-02-29

*基金项目: 重庆市交通科技项目(CQJT-ZCXM2023-11); 重庆西科水运工程咨询有限公司揭榜挂帅项目(2024990002)

作者简介: 张志(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事通航水力学研究。

天然河流中干支流交汇现象普遍存在, 交汇区受弯道、支流水动力的双重影响, 流态紊乱。诸多学者通过交汇角^[1-2]、流量比^[3-4]等对交汇区水流特性的影响进行了深入研究, 发现干支流在交汇区互相托顶, 产生壅水、回流、环流等不良流态, 交汇区内流场紊乱, 形成回流现象。此外, 在弯道和支流入汇双重作用下河道内的水流条件更为复杂^[5-7], 更易形成江心洲、浅滩等碍航地形和弯道环流、二次流等不良流态^[8-10], 这些碍航因素将严重威胁船舶通航安全。

《重庆市人民政府关于进一步加快重庆水运发展的意见》^[11]中明确指出, 乌江彭水以下通过白马枢纽和航道整治后达到Ⅲ级航道标准。白马—彭水 102 km 航道规划航道尺寸为 3.3 m×50 m×480 m(水深×宽度×弯曲半径), 可通航 1 000 吨级货船, 通航率达 98%。通天槽滩段为乌江白马—彭水枢纽河段航道中的复杂险滩之一, 该滩段位于乌江下游, 上距银盘枢纽坝址约 5 km, 下距在建白马枢纽坝址约 42 km, 上下分别有川石滩和猴子堡滩, 滩段河势如图 1 所示。滩段河道呈 U 形急弯放宽, 左岸弯顶上 350 m 处有芙蓉江汇入, 水流条件复杂多变, 枯水期常因航道弯、窄、浅、险、急而碍航。滩段平面的中间宽、上下窄, 低水位时水流走左岸梯子口和中间通天槽流下, 右岸棺材浩不过流, 河宽为 100~300 m, 水深浅, 水流条件复杂; 中水位时下溪口心洲被淹没, 棺材浩过流; 高水位时水深抬高, 水流漫滩, 淹没葫芦碛、溪口心洲等江心洲、边滩, 河宽可达 530 m。

下游白马枢纽建成蓄水后可增加通天槽滩段的水深, 为提高航道的通航能力奠定基础。然而, 水位升高将导致现有的部分江心洲、浅滩变成暗礁碍航。因此, 无论是为了保障通航安全, 还是为了提升通航能力以满足水运需求, 都迫切需要开展通天槽滩段航道的整治工作。目前, 已提出

通天槽滩段的设计整治方案^[12], 本文通过物理模型试验对通天槽滩段整治后的水流特性展开研究, 并对整治效果作出评价。

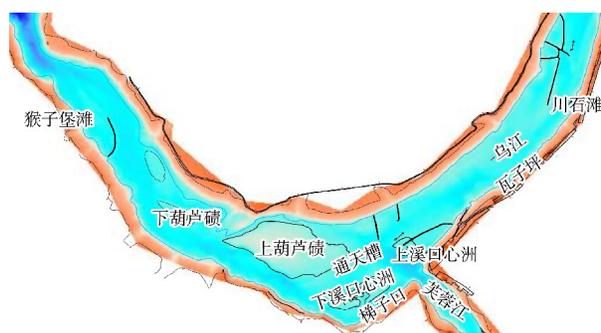


图 1 通天槽滩段河势

1 模型设计与验证

1.1 模型设计

模型范围包含乌江及支流芙蓉江, 总长约 7 km, 上游为川石滩千斤凼以上 0.4 km 起至猴子堡下游峡口以下 1.3 km 峡谷段止, 长约 6 km; 芙蓉江从入汇口至上游 1 km 止。选定正态模型, 比尺 $\lambda_1 = \lambda_h = 80$, 所有边界均按实测地形建立, 以保证模型水流与原型相似。模型进口流量由三角堰、矩形堰控制, 水位由测针测定。流速由 DS-2 型旋桨流速仪和 XKVMS-03 型表面流场测量系统测量, 尾水位由水位测针测定、翻板门控制。制模结束后对模型进行系统检测, 结果表明模型平面误差小于 ± 10 mm, 高程误差小于 ± 1 mm, 满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[13]的要求, 物理模型和测控布置分别如图 2、3 所示。



图 2 河工模型

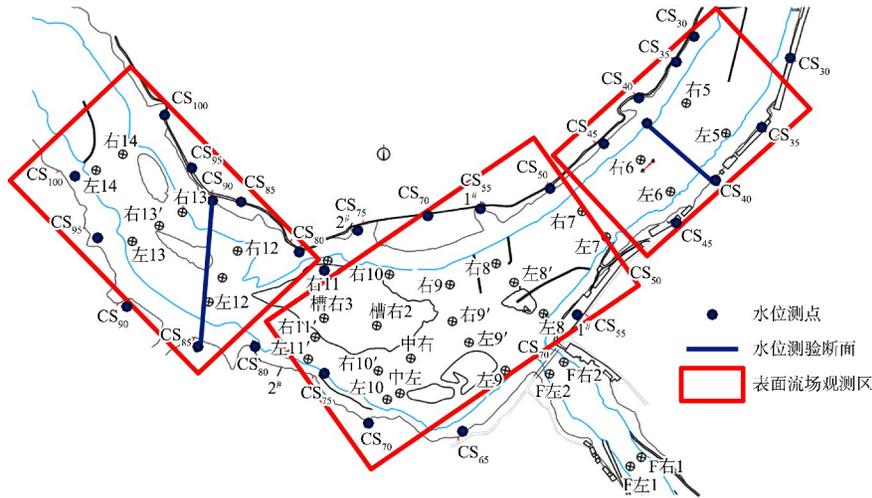


图3 测控布置

1.2 工况拟定

目前,乌江通天槽滩段及支流芙蓉江上游分别建有银盘枢纽和江口枢纽。位于滩段下游的白马枢纽将于2029年建成蓄水,规划正常蓄水位184 m,死水位180 m。本研究根据实际情况选取干流流量

345、1 287、1 600 m³/s,以及支流流量0、50、313 m³/s进行组合,以探究工程滩段的整治效果。流量组合及各流量选取依据见表1,模型尾门控制水位则通过白马枢纽库区长河段一维模型数值结果推算得到。

表1 试验工况

工况	干流流量/(m ³ ·s ⁻¹)	支流流量/(m ³ ·s ⁻¹)	尾门水位/m	备注
1	345	0	180.22	银盘枢纽下泄最低通航流量,江口枢纽不下泄
2	345	50	180.27	银盘枢纽下泄最低通航流量,江口枢纽单机最小流量
3	1 600	0	181.43	河段多年平均流量(整治流量),江口枢纽不下泄
4	1 287	313	181.43	河段多年平均流量(整治流量),江口枢纽满发

1.3 模型验证

1.3.1 瞬时水面线验证

采用500 m³/s(银盘枢纽下泄424 m³/s、江口枢纽下泄76 m³/s)和1 155 m³/s(银盘枢纽下泄1 028 m³/s、江口枢纽下泄127 m³/s)流量下,实

测瞬时水面线资料对模型水面线进行验证,原型与模型水面线对比见图4。由图可知,模型水位与原型水位最大差值小于±0.1 m,模型水面线与原型吻合较好,模型精度符合JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》的要求。

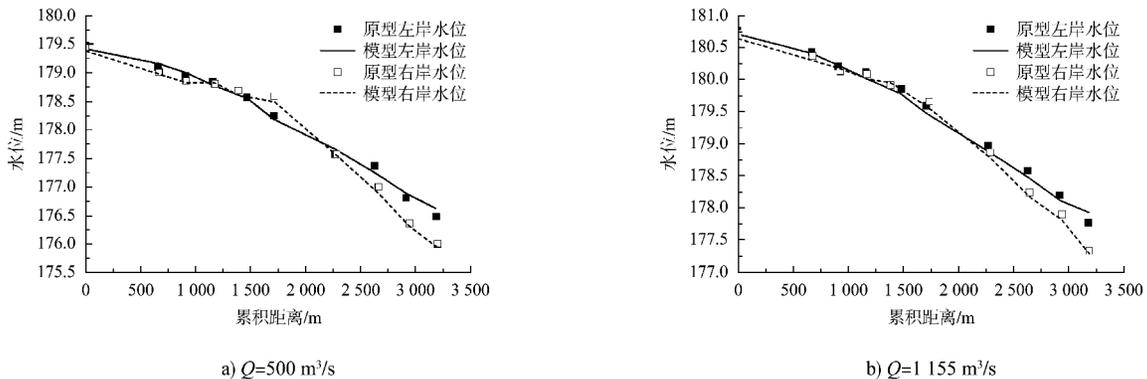


图4 模型水位验证

1.3.2 流速验证

采用 $840 \text{ m}^3/\text{s}$ (银盘枢纽下泄 $840 \text{ m}^3/\text{s}$ 、江口枢纽不下泄) 流量下现场实测流速对模型进行验证, 入汇口上下游两断面上模型与原型流速对比见图 5。由图可知, 模型与原型断面流速大小及分布基本一致, 最大误差为 0.91%, 同样满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》的要求。

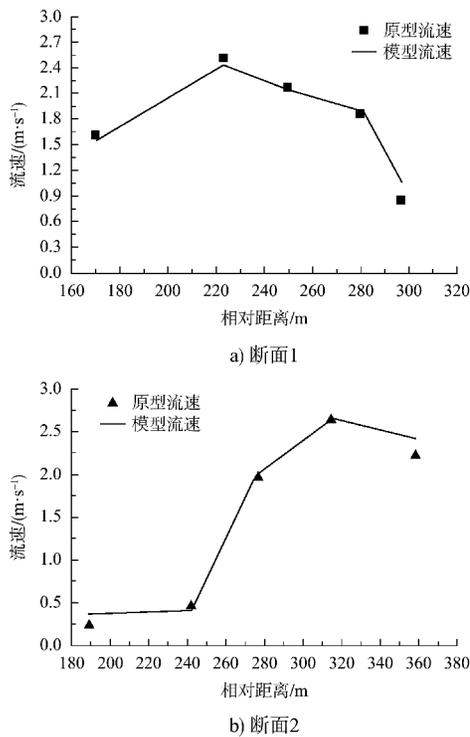


图 5 断面流速分布

结合瞬时水面线与流速验证, 认为模型与原型相似性较好, 满足精度要求, 可在此基础上开展整治后水流条件的试验研究。

2 设计整治方案

2.1 设计整治方案布置

设计整治方案布置见图 6, 在研究河段内以疏浚、整改为主。整治方案如下:

1) 通天槽段: 疏浚通天槽段的上葫芦碛 (CS_{64} — CS_{74}) 和下溪口心洲洲头 (CS_{61} — CS_{64}), 最大长度分别为 530、200 m, 最大宽度分别为 160、80 m, 开挖面积分别为 $49\,700$ 、 $8\,600 \text{ m}^2$, 底高程均为 176.7 m, 坡比均为 1:2; 在下溪口心洲 (CS_{61} — CS_{67}) 上新建顺坝堵汉封弯, 长度为 344 m, 坝顶高 184.5 m、顶宽 3 m, 面水坡比 1:2、背水坡比 1:3; 切除凸嘴 (CS_{45} — CS_{50}), 切除最大长度 175 m、最大宽度 30 m、面积 $3\,400 \text{ m}^2$, 底高程 176.7 m, 设计坡比 1:2; 拆除右侧 2 条丁坝 (CS_{55} — CS_{60}), 左侧顺坝 (CS_{51} — CS_{56}) 加高至 184.5 m、顶宽 3 m, 面水坡比 1:2、背水坡比 1:3。

2) 猴子堡段: 对猴子堡 (CS_{85} — CS_{110}) 顺坝进行拆除至 173~175 m, 与周围河床地形齐平。

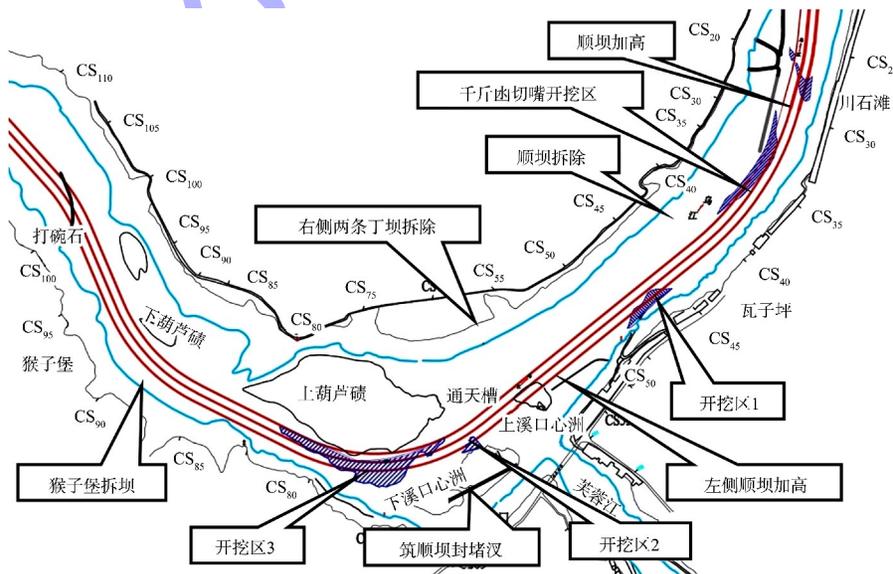


图 6 设计整治方案平面布置

3) 川石滩段: 切除千斤函处 (CS₉—CS₁₆) 突嘴, 切除最大长度 380 m、最大宽度 48 m, 开挖面积 1.17 万 m², 底高程 176.7 m, 设计坡比 1:2; 开挖区 1 开挖最大长度 156 m、最大宽度 38 m, 面积 2 800 m², 底高程 176.7 m, 设计坡比 1:2; 开挖区 2 开挖最大长度 360 m、最大宽度 36 m、面积 8 200 m², 底高程 176.7 m, 设计坡比 1:2; 将已建顺坝上段加高至 184.5 m, 加高段长度为 278 m, 下段拆除。

2.2 设计整治方案结果

表 1 中工况 1、3 两级流量下沿程水位分布见图 7。

流量最小的工况 1 中, 由于白马枢纽建成后低水位运行, 整治后滩段水位较天然情况下提高约 3 m, 上溪口、下溪口心洲均被淹没, 通天槽分流增加, 棺材浩因为水位抬高过流, 上葫芦碛仅滩顶出露, 通天槽滩段河道水面宽度由天然的 60~90 m 展宽至 240~500 m。此时通天槽滩段航槽内水深约为 3.54 m, 水面比降为 0‰~0.08‰, 航道弯曲半径由 150 m 提升至 480 m, 可满足Ⅲ级航道的水深、转弯半径要求。

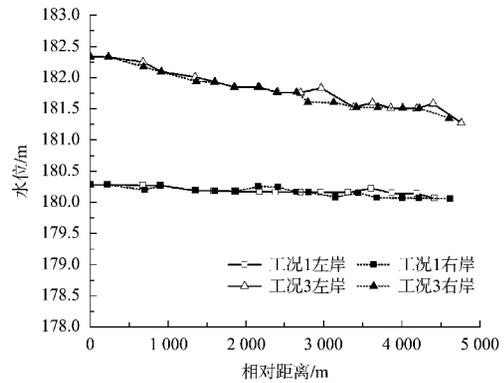


图 7 设计整治方案沿程水位分布

随着流量的增加, 通天槽滩段航道内水深提升至工况 3 中的 5.26 m, 较天然情况下提高约 1.5 m。滩段内水面比降最大为 0.17‰, 主流偏通天槽左侧深槽流下, 不与航槽轴线重合, 工况 3 流速分布见图 8, 由图可见水流动力轴线与航线交角较大, 最大角度达到 25°。由于通天槽段开挖面积较大且上游右岸 2 条丁坝拆除, 疏浚范围内水流较分散, 中枯水期右侧分流较多, 航槽内流速从上至下逐渐减小, CS₇₀—CS₈₀ 断面流速整体偏低。加之航槽下段流速受弯道水流和白马枢纽回水顶托影响, 航槽轴线与主流偏离, 夹角偏大, 不利泥沙输移, 航槽稳定性较差。

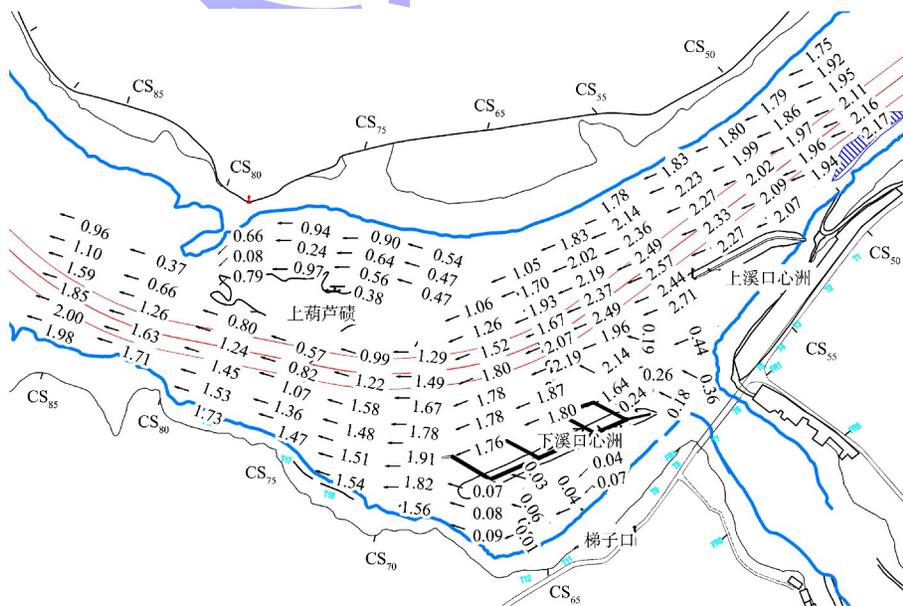


图 8 设计整治方案工况 3 表面流速分布

通过对设计整治方案试验成果分析发现,设计整治方案改善了工程河段内的通航水流条件,使得通天槽滩段航道在白马枢纽建成后基本满足Ⅲ级航道的尺度要求,且通航水流条件基本满足船舶自航上滩的水力指标要求。但挖槽设计时未遵循河势,以及充分利用河槽深泓线,使得航道走向与中水期水流动力轴线交角较大,不利于退水冲刷及航槽稳定,因此布置需进行调整。另外,整治建筑物未有效发挥束水冲槽、调整水流的效果,其布置方案、尺度需进一步优化。

3 优化方案

3.1 优化方案布置

针对设计方案存在的问题,根据“因势利导,顺应河势、稳定洲滩、优选航槽、中枯水整治、统筹兼顾”的整治原则,优化方案在以下方面作出改善:将航槽轴线向左移动,充分利用现有深槽;

优化鱼骨坝的布置并调整上溪口心洲对岸下挑丁坝的尺寸,以调顺水流,解决航槽轴线与主流夹角偏大等问题;减少下葫芦碛的疏浚量并调整其疏浚高程,解决开挖面积过大造成的水流分散问题。优化方案布置如图9所示。具体优化内容为:1) 航槽轴线向左移动约35 m; 2) 在设计方案的基础上沿下溪口布置鱼骨坝(顺坝和3根下挑勾头丁坝组成),形成通天槽段航道的主导河岸,丁坝1、2、3分别长60.0、57.5和74.0 m,与鱼骨顺坝夹角 47.1° 、 51.0° 和 54.0° ; 3) 上溪口心洲对岸下挑丁坝缩短20.3 m,坝顶高程加高至182 m; 4) 将航道进口右边坡根据1:2~1:22进行削坡,以改善通天槽进口流态; 5) 下葫芦碛疏浚挖至175 m,开挖面积 $6\,630\text{ m}^2$; 将瓦子坪段疏浚高程由176.7 m挖深至176.5 m,疏浚面积 $6\,200\text{ m}^2$; 6) 川石滩顺坝、上溪口心洲对岸下挑丁坝保持现状。

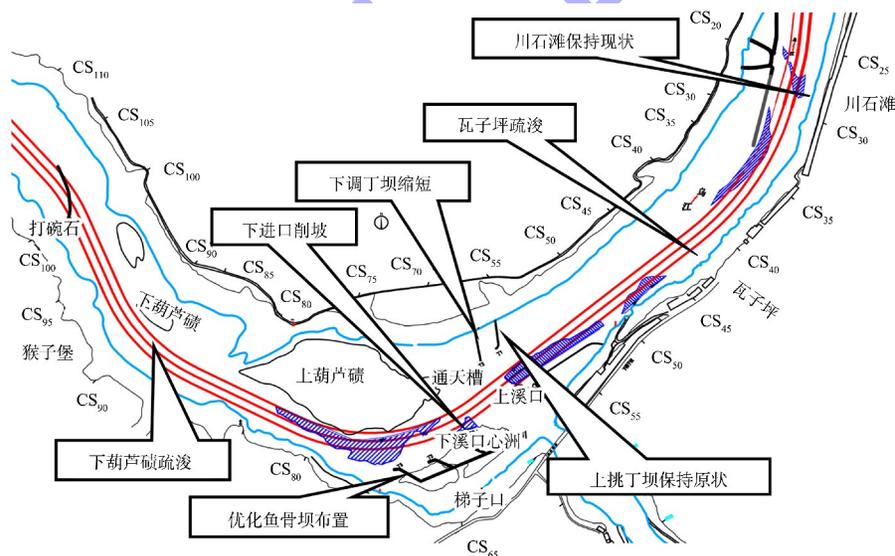


图9 优化方案平面布置

3.2 优化方案结果分析

表1中4个工况按优化方案整治后河段沿程水位分布见图10。由于优化方案中采取的航槽疏浚、设置坝群束流等工程措施基本调顺了水流流向,工况1中通天槽段最大流速 0.78 m/s ,最大比降 0.05% ,水深不低于 3.3 m ,满足通航尺度要

求且航行水流条件较设计方案有所改善。工况2中,受干流水位顶托,芙蓉江出流流速小于 0.13 m/s ,交汇区回流较弱,对规划航道内水流流态影响较小,此时通天槽段最大流速 0.72 m/s ,比降 0.05% ,水深不低于 3.3 m ,通航水流条件良好。

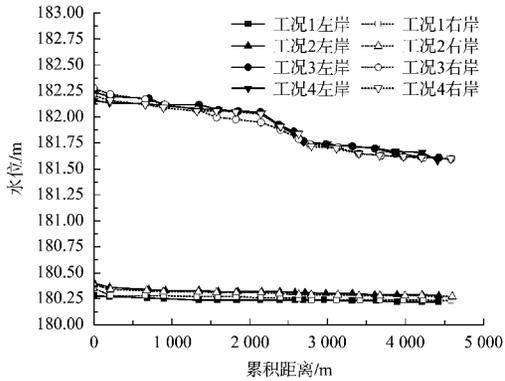


图 10 优化方案沿程水位分布

工况 3 中，通天槽段水流归槽，流速与航道轴线基本一致，槽内最大流速 2.42 m/s，比降 0.53‰，水深富余，满足通航水流指标。图 11 为优化方案工况 3 表面流场分布。由图可见，水流受下溪口心洲和鱼骨坝影响向右岸偏转，在入汇口形成最大回流流速为 0.31 m/s 的回流区，回流区在规划航道外，对规划航道内水流流态影响较小。

工况 4 中，通天槽段最大流速 2.18 m/s，比降 0.63‰，通航水流条件较设计有所改善。图 12 为优化方案工况 4 表面流场分布，由图可知，

受河口水位顶托以及出口深槽影响，梯子口分芙蓉江出流，汉道内流速增加至 1.02 m/s，可降低芙蓉江出流对航槽内水流的影响。入汇口处航道外侧的回流区内回流流速为 0.25 m/s，回流范围较小，对航道影响较小。航道内水流流向与航道轴线仍基本一致。

优化方案实施后汇流区域工况 1~4 的最大横向流速分别为 0.10、0.20、0.14、0.27 m/s。优化方案实施后，由于鱼骨坝分流作用，支流来水沿鱼骨坝沿河道下流，支流对主流流速、流场分布影响降小，交汇区域最大横向流速降至 0.3 m/s 以下。在鱼骨坝的作用下，航道内水流流向得到调顺，不良流态减弱，通航水流条件得到改善，航道尺度和水流条件均能达到Ⅲ级航道通航标准，满足规划要求。

优化方案调顺了通天槽滩段的水流流向，使主流分布在航道轴心线附近，水流流向与航道走向一致，航道内横向流速满足 GB 50139—2014《内河通航标准》^[14] 的要求。考虑整治效果及工程投资，优化方案更适合本航道整治工程。

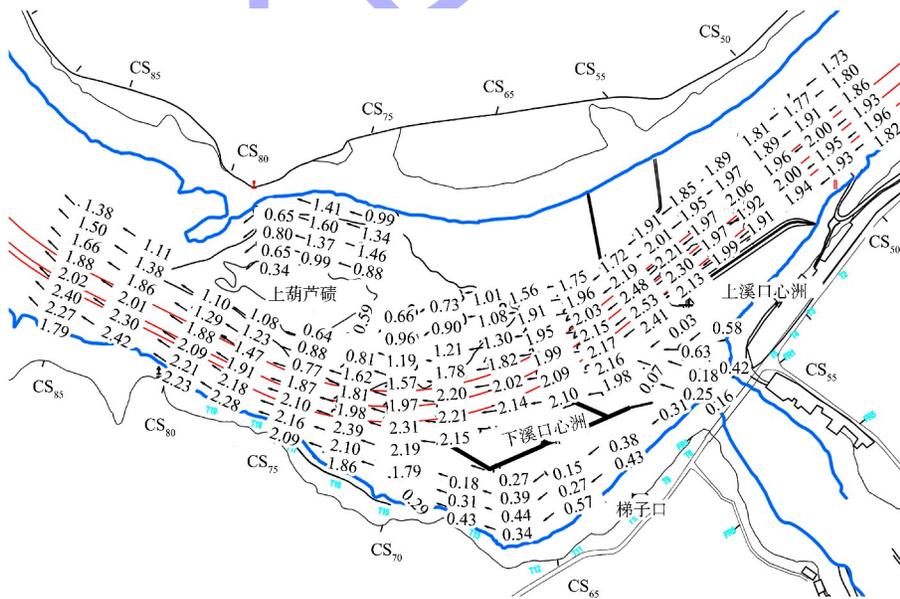


图 11 优化方案工况 3 流速分布

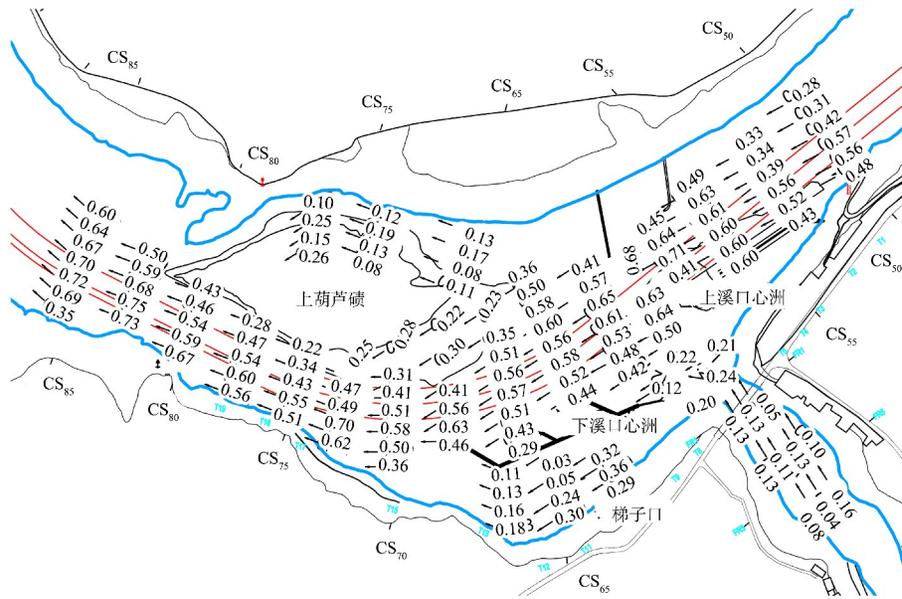


图 12 优化方案工况 4 流速分布

4 结论

1) 白马枢纽建成后通天槽滩段通航水流条件得到有效改善, 通过疏浚开挖使得航道尺度满足Ⅲ级航道要求。

2) 按设计方案整治后, 通天槽滩段基本满足规划要求, 但水流轴线与航道交角较大, 不利于退水冲刷及航槽稳定, 整治建筑物未有效发挥束水冲槽、调整水流的效果。

3) 研究提出的优化方案调整了水流流向, 使通天槽内的主流分布在航道轴线附近, 流向与航道走向一致。由于丁坝分流影响, 支流来水汇入主流后流速减小, 不良流态得到有效改善。考虑工程投资及施工难易程度, 优化方案更适合本次航道整治工程。

参考文献:

[1] SHEN X, LI R, CAI H J, et al. Characteristics of secondary flow and separation zone with different junction angle and flow ratio at river confluences [J]. Journal of hydrology, 2022, 614: 128537.

[2] 马森, 李国栋, 宁健. 径宽比对 90° 弯道明渠水流结构的影响[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2017, 32(5): 635-644.

[3] TAYLOR E H. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions [J]. Transactions of the American society of civil Engineers, 1944, 109(1): 0005772.

[4] 孙远敬, 徐建新. 基于 CFD 的河流弯道二次流的三维数值模拟[J]. 应用力学学报, 2015, 32(3): 502-507, 13.

[5] 顾莉, 赵欣欣, 戴波, 等. 汇流比对 U 形弯曲交汇河道中污染物离散系数的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 189-195.

[6] 高艳, 黄社华, 李琼. 弯道干流与支流交汇口垂线流速分布的试验研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 90-93, 220.

[7] 付中敏. 山区河流弯曲干流型汇合口水沙运动试验及数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.

[8] 张强, 王平义, 刘倩颖. 山区河流干支流交汇形式的重新划分[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 458-460.

[9] 杜宗伟, 舒荣龙. 三峡明渠施工通航水流条件分析[J]. 水运工程, 1996(1): 40-44.

[10] 罗保平. 汇流河段干支流分界线的实验研究[J]. 水运工程, 1994(11): 13-16.

[11] 重庆市人民政府关于进一步加快重庆水运发展的意见[N]. 重庆市人民政府公报, 2011(18): 1-3, 6.

[12] 乌江白马至彭水航道整治工程工程可行性研究报告[R]. 重庆: 中铁长江交通设计集团有限公司, 2022.

[13] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T231—2021. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.

[14] 长江航道局. 内河通航标准 GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.