



山区河流弯曲分汊型河段航道整治方案^{*}

李顺超, 李欢

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 岷江下游沙卵石弯曲分汊河段较多, 不同分汊河段的河势特征与碍航特征迥异, 山区河流弯曲分汊型河段不同的航道整治措施将导致整治点位水文条件、底质组成和河道结构产生明显不同的变化, 对航道整治点位通航功能的影响也有明显差异。采用1:100正态河工物理模型试验和自航船模试验相结合的技术手段, 针对岷江下游霸王滩滩群弯曲分汊型航道整治措施进行研究, 对山区河流弯曲分汊型河段航线选线、整治建筑物尺寸和间距等平面设计参数进行优化设计, 提出岷江下游霸王滩群弯曲分汊型河段III级航道整治方案。结果表明, 通过优化航线布置并结合坝体调整、复式航槽开挖、下游布设潜坝或填槽等工程措施, 可以实现增加水深、改善水流条件的整治目的。

关键词: 岷江; 分汊型河流; 航道整治; 河工物理模型

中图分类号: U 612.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0034-09

Channel regulation scheme of bending braided reaches in mountainous rivers

LI Shun-chao, LI Huan

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: There are many sandy pebble bending braided reaches of Minjiang River, and the river regime characteristics and navigation obstruction characteristics of different braided reaches are very different. Different channel regulation measures for bending braided reaches of mountainous rivers will lead to significantly different changes in hydrological conditions, sediment composition and channel structure at the regulation sites, and also have significant differences in the impact on the navigation function of channel regulation sites. Using the technical means of combining 1:100 normal river physical model test and self-propelled ship model test, this paper studies the regulation measures of Bawangtan group bending braided reaches of Minjiang River, optimizes the plane design parameters such as route selection, regulation building size and spacing in mountainous rivers bending braided reaches, and proposes the regulation scheme for class III channel of Bawangtan group bending braided reaches of Minjiang River. The results show that the regulation purpose of increasing water depth and improving water flow conditions can be achieved by optimizing the route layout and combining engineering measures such as dam body adjustment, excavation of compound navigation channel, and placement of submerged dam or filling channel at the downstream.

Keywords: Minjiang River; braided reach; channel regulation; physical model of river engineering

岷江(乐山—宜宾)是大件装备产品进出四川的唯一通道, 是“两横一纵两网十八线”中主要干支流高等级航道^[1], 是构建国家高等级水运网的重要组成部分。岷江龙溪口枢纽—宜

宾合江门81 km航段, 总落差44.3 m, 平均比降0.55%, 共有滩险28处, 碍航较为严重的有3个滩群, 分别为新开河滩群、霸王滩滩群及铜锣湾滩群。霸王滩滩群位于屏山县真溪渡口上游

10 km 范围内, 滩群全长约 10 km, 距河口(宜宾合江门)约42 km, 碍航特征主要表现为航深不足、水流分散、流态恶劣、弯曲半径不足。该段滩群经历20世纪60—90年代几次整治, 航道已提升为内河IV级^[2], 其维护尺度为 1.5 m×45 m×500 m(水深×直线段宽度×弯曲半径, 下同), 可通行 500 吨级自航驳, 亟需按内河III级航道尺度 2.8 m×60 m×500 m 进行建设^[3], 通行1 000 吨级单机驳。

河工物理模型和水流数学模型研究航道整治效果是目前较为常用的技术手段。赵志舟^[4]采用概化水槽试验、模型试验及理论分析相结合的方法, 对新水沙条件下长江分汊河段的整治水位与整治线宽度、基建性挖槽的横断面尺度、整治线条型等参数的确定方法进行较全面的研究; 刘贤^[5]运用数学模型与物理模型相结合的研究方法, 对沙梨园浅滩段的水沙特性、河床演变规律、滩险成因及碍航特征进行分析, 并在此基础上提出该河段的整治方案; 王建军等^[6]在河道演变分析的基础上运用水流数学模型研究韩江高陂枢纽—东山枢纽段的航道治理效果; 王秀红等^[7]采用二维数学模型对乌江沙陀电站变动回水区航道整治效果进行研究; 田红伟等^[8]采用二维水流数学模型和船舶操纵运动数学模型相结合的方法, 对湘江大花滩航道整治方案优化及效果进行数值研究; 刘万利等^[9]结合三峡水利枢纽的蓄水运用, 对戴家洲河段河床演变趋势进行预估, 为长江中游典型分汊河段航道整治方案的确定提供了技术参考。

为解决岷江下游霸王滩滩群 1 000 吨级整治工程中航线布置、工程布局和航槽开挖规模、丁坝设计参数确定等关键技术问题, 采用 1:100 正态河工物理模型试验和自航船模试验相结合的技术手段, 进行河床演变分析、航道整治设计方案试验以及优化试验, 在优化航道整治方案的基础上, 开展自航船模航行试验, 综合论证后提出科学合理的推荐整治方案, 为山区弯曲分汊型河流变化特征下的航道整治技术研究提供依据。

1 河床演变分析

霸王滩滩群段自上而下由大浩口滩下段、斑竹林滩、霸王滩、喳口石滩和岗子坪滩共 5 个碍航滩险组成。大浩口滩下段河势顺直, 河道单一, 两岸为良好边滩, 岸线稳定, 河床呈 U 形, 黄天坝将斑竹林滩口段分为左汊和右汊, 左汊为通航主汊, 相对顺直, 右汊为支汊, 相对弯曲, 左汊为顺直河段, 河中间为 1 个低矮江心洲, 水流在洲头开始分左、中、右 3 槽, 洲尾汇合, 主槽从右岸向左岸过渡; 滩群中段为霸王滩、喳口石滩, 该河段经历了 2 次转弯, 霸王滩为上弯曲段, 河道弯曲半径约 350 m; 喳口石滩为下弯曲段, 河道弯曲半径约 400 m, 总体上表现为上深槽槽头下伸槽身左摆, 下深槽槽头下伸槽身右摆, 过渡槽浅区变化幅度较大。滩群尾段岗子坪滩左岸边滩发育, 滩上段河中有 1 个低矮江心洲, 滩中段水流过江心洲后合二为一, 滩尾受基岩阻碍, 河道微弯, 弯曲半径约 800 m。

选取 2010 年 4 月、2012 年 3 月、2017 年 4 月、2020 年 8 月及 2021 年 3 月地形图, 分析 2010—2021 年霸王滩滩群河段年际冲淤演变特征。研究河段河床年际冲淤变化见图 1。可以看出: 1) 大浩口滩下段的河势顺直, 河道单一, 两岸为良好边滩, 岸线稳定。2010—2012 年航槽呈淤积趋势, 最大淤积达 1.0 m; 至 2017 年, 航槽略有冲刷, 最大冲刷达 0.5 m; 目前, 总体上冲淤基本达到平衡, 河槽相对稳定。2) 斑竹林滩段的黄天坝将该河段分为左汊和右汊, 左汊为通航主汊, 相对顺直, 右汊为支汊, 相对弯曲; 左汊内的低矮心滩又将其分为左、中、右槽, 右槽为通航汊道, 2010 年右槽 2.8 m 等深浅与上游深槽贯通, 右汊河宽约 120 m, 航道内水深在 4 m 左右, 右汊出口段放宽至 300 m 左右, 中间形成浅洲, 航道内水深约 1.5 m, 斑竹林左槽水深较大, 最大水深超过 9 m, 枯水河宽 35~40 m; 2012 年心滩右缘冲刷后退, 右槽河宽增加至 150 m 左右, 槽内局部出现浅点, 2.8 m 等深线已无法与上游深槽贯通, 右槽出口段浅洲向下游移动约 60 m, 出口段最小水深

仅 1m 左右, 斑竹林滩左槽淤积严重, 槽内最小水深小于 0.5 m; 2017 年斑竹林低矮心滩被人为采砂破坏, 心滩下段形成超过 9 m 深坑, 中洪水流量下, 上游来流漫过心滩后进入深坑, 深坑上游局部流速增大, 心滩滩头后退, 深坑上游心滩滩面冲刷, 中水流量下心滩一分为二, 心滩右缘淤长, 通航汊道河宽变窄, 上口门形成浅区, 通航条件恶化; 整体来看, 2012—2017 年斑竹林滩除心滩右缘淤积外, 其他区域均呈冲刷态势; 至 2020、2021 年, 中槽不断发育, 心滩下游采砂坑淤积, 心滩右缘继续淤长, 右槽上口门浅滩生长, 局部水深不足 1m, 心滩滩尾淤长, 有与下游浅洲相连的态势, 航道条件进一步恶化。3) 霸王滩、喳口石滩段: 霸王滩口水流被左岸低矮江心洲一分为三, 左、中汊为支流, 经该江心洲头部后即汇合形成左支汊, 主河槽位于右汊, 枯水呈反 S 形, 主流从左岸侧过渡到右岸侧, 弯曲半径较小, 过渡段枯水宽度 200~300 m, 2010 年入口段右岸边滩完整, 现状航道内最小水深 2.2 m; 至 2012 年, 霸王滩江心洲洲头后退约 130 m, 左右两汊均表现为冲刷, 右汊冲刷深度在 0.5 m 左右, 左汊冲深超过 2 m; 至 2017 年, 受采砂影响, 入口段右岸边滩破坏严重, 江心洲洲头附近串沟发育逐渐形成汊道, 洲尾附近因采砂形成深度超过 10 m 深坑, 右汊通航汊道内形成出水浅点; 至 2020 年, 左汊发育, 右汊汊内浅点淤长, 形成长度超过 200 m、宽度 50 m 的浅区; 至 2021 年, 左汊略有淤积, 右汊整体冲刷, 冲刷深度小于 0.5 m。4) 岗子坪滩为典型的河道束窄处上游浅滩, 下游右岸侧显著束窄, 束窄处上游形成浅滩及浅洲, 2010 年浅洲入口段 2.8 m 等深线无法贯通, 最小水深 1.8 m, 至 2012 年, 浅洲略有发育, 浅滩(边 4[#])滩面存在不规则深坑, 束窄处深槽下移, 左岸边滩略有后退; 2017 年该河段整体河势呈现向 2010 年恢复的趋势, 浅洲萎缩, 4[#]边滩发育, 深槽上提; 至 2020 年, 束窄处上游整体略有淤积, 束窄处深槽冲刷, 2021 年岗子坪滩段整体冲刷。

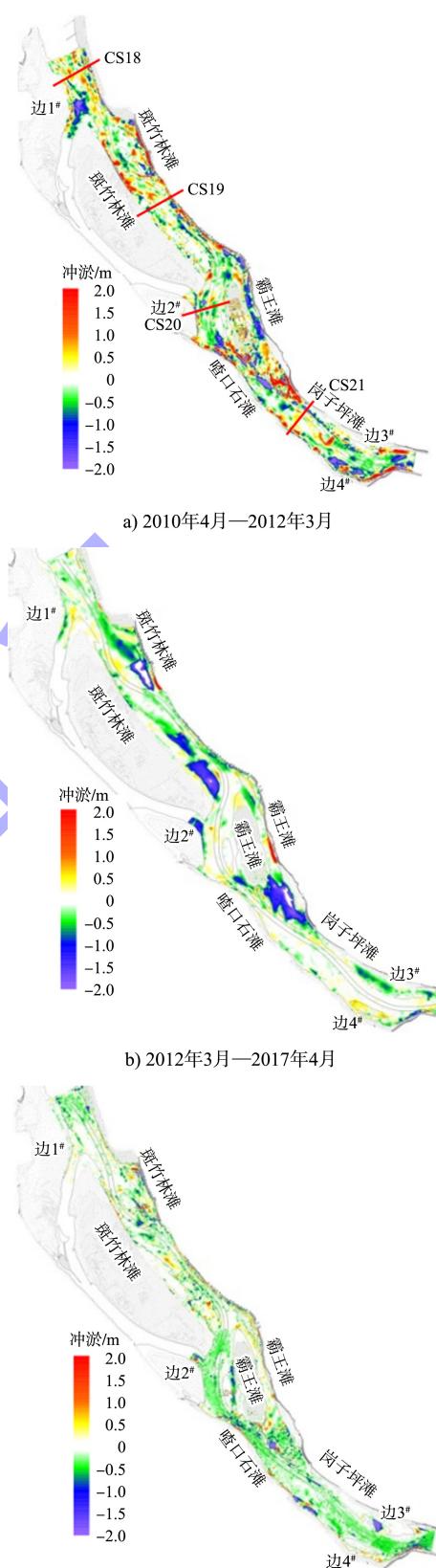


图 1 霸王滩群河段河床年际冲淤变化

注: 冲刷为-, 淤积为+。

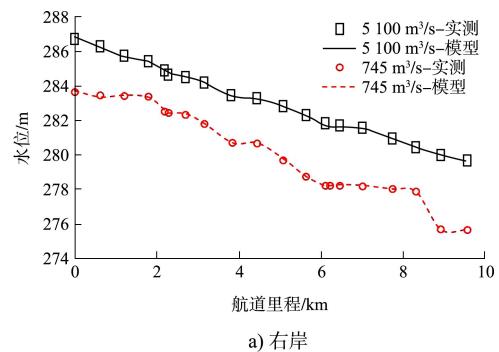
2 物理模型设计与验证

物理模型范围从大浩口滩下段起至真溪水尺, 全长约 11 km, 平均宽度 1.1 km。模型上下边界位于河道顺直段, 进出口水流平顺, 利于物理模型控制上下游边界条件。模型的几何比尺受诸多条件和因素的限制。根据所要解决的问题、河段的糙率与水流特征、试验场地条件的需要, 模型平面比尺确定为 1:100, 根据船模试验的需要, 模型须为正态, 初步确定模型垂直比尺为 1:100。按河工模型水流运动相似性基本准则, 定床模型水流运动相似应满足重力相似、水流连续性相似、阻力相似等条件。综合以上条件, 最后确定定床模型相似比尺为: 几何比尺 $\lambda_L = \lambda_H = 100$, 流速比尺 $\lambda_v = 10$, 流量比尺 $\lambda_Q = 10$ 万, 水流时间比尺 $\lambda_t = 10$, 糙率比尺 $\lambda_n = 2.15$ 。

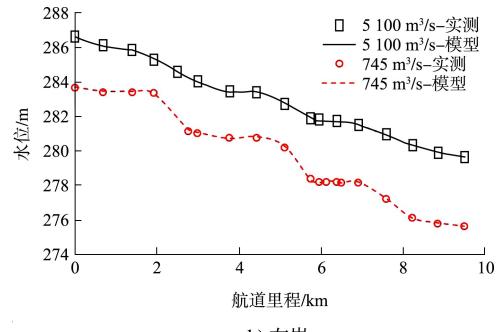
制模地形为 2021 年 3 月实测的 1:2 000 地形图, 并根据 2021 年 3、8 月霸王滩段断面水位、流量实测资料, 对该河段进行不同流量下的糙率率定, 该段的河床糙率在 0.028~0.055, 模型糙率在 0.014~0.025, 符合模型糙率宜控制在 0.012~0.030 的要求, 在制作模型时经过适当加糙可以达到。

对于满足几何相似条件的船模, 其几何尺度、形状、吃水和排水量都应与实船相似; 对于满足重力相似条件的船模, 其运动速度及时间也应与实船相似。船模比尺为: 几何比尺 $\lambda_L = 100$, 吃水比尺 $\lambda_r = 100$, 排水量比尺 $\lambda_V = 100$ 万, 速度比尺 $\lambda_v = 10$, 时间比尺 $\lambda_t = 10$ 。

依据 2021 年 2、8 月水文观测资料, 开展了洪、枯 2 级恒定流的水位、流速平面分布验证, 见图 2、3。其中枯水期流量为 745 m³/s(2021-02-23), 洪水期流量为 5 100 m³/s(2021-08-06)。通过中、枯水两个流量级的沿程水位、流速分布、流量验证表明, 模型具有较好的相似性, 满足相关规程的规定, 可以进行工程方案的试验研究。

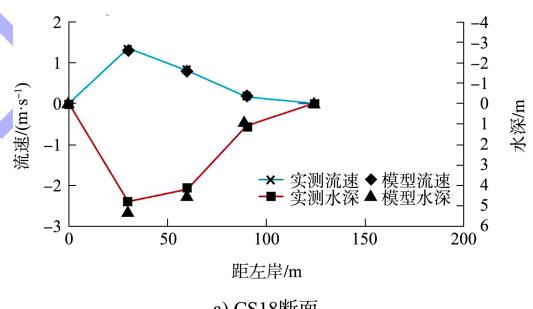


a) 右岸

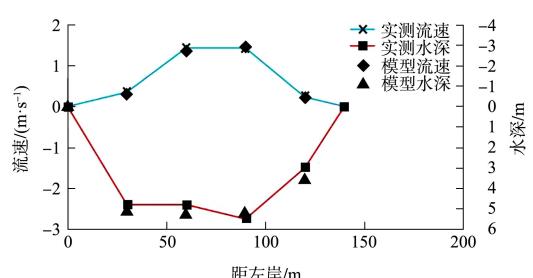


b) 左岸

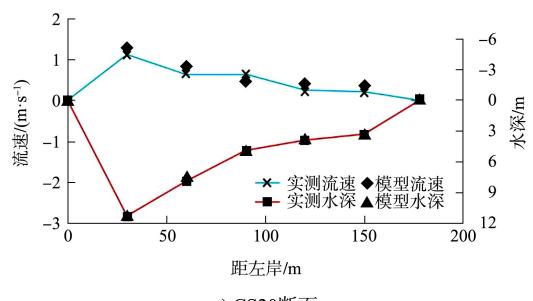
图 2 模型水位验证



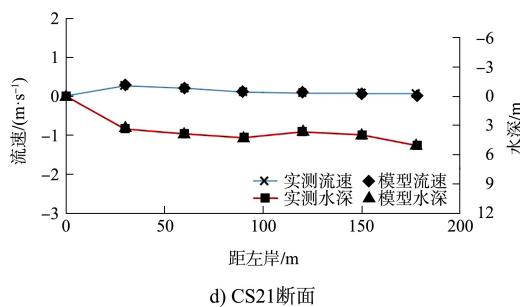
a) CS18断面



b) CS19断面



c) CS20断面

图 3 $Q=745 \text{ m}^3/\text{s}$ 时断面流速验证

3 III 级航道整治方案效果分析

3.1 设计方案整治效果分析

3.1.1 整治措施

根据该河段存在的浅、急、弯、险等碍航特征和河床演变分析,采取疏浚和整治工程相结合的整治原则,按Ⅲ-(3)级航道标准建设,航道尺度为 $2.8 \text{ m} \times 60 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 。航线选择思路为:斑竹林滩航槽选择现有航路,不改变船舶航行习惯,通航适应性较好,霸王滩航槽居中偏左,沿左边滩新开航槽,航线弯曲半径大,枯水期流路顺畅,与喳口石出口深槽衔接较好。各滩设计方案整治措施如下:1)大浩口滩下段,导顺水流,修复滩下段左岸3座丁坝,以维持原有滩槽格局;2)斑竹林滩段,江心洲头部布置1处边滩守护工程,以稳固现有心洲,并在滩尾段左岸江心洲挖砂深凼布置1处疏浚土处置区,以加速恢复江心洲,保护航道,沿设计航槽中心线水深不足的地方布置有2处挖槽,以增加航槽水深;3)霸王滩段,滩头右岸凸嘴挖砂深凼布置了1座锁坝,以封堵漏浩、扩大过流面积、改善流态,此外在霸王滩滩头右岸布置1处边滩守护工程,以稳固现有边滩,在霸王滩中部右岸布置了3座丁顺坝,以改善弯曲半径、调顺水流,在霸王滩左侧边滩新开航槽,设计航槽中心线60 m范围内水深不足处布置1处挖槽,以增加航槽水深,在喳口石左岸边滩挖砂形成的深凼布置了1处疏浚土处置区,以恢复边滩、保护航道;4)岗子坪滩上部右岸布置1座丁顺坝,以维持直线过渡段枯水岸线、集水归

槽,引导水流进入下游主槽;沿设计航槽中心线水深不足的地方布置2处挖槽,在滩出口弯道处,对凸岸浅区布置1处疏浚工程,以改善航道水深条件;5)在黄天坝右汊内布置3处挖槽,以扩大支汊过流量、减小通航支汊过流量。

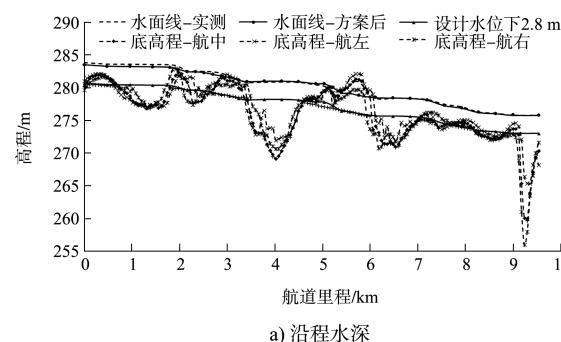
3.1.2 试验结果

选择5级流量: $900 \text{ m}^3/\text{s}$ (设计流量)、整治流量($2250 \text{ m}^3/\text{s}$)、汛期流量($5570 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $8650 \text{ m}^3/\text{s}$)和龙溪口枢纽船闸最大通航流量 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 进行整治方案效果的试验研究,结果见图4~6。可以看出:

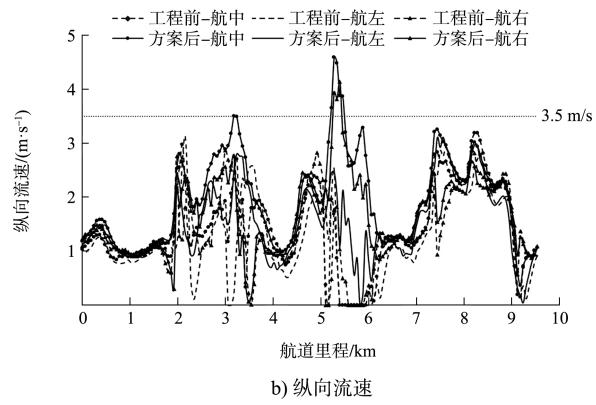
1)大浩口、喳口石及岗子坪滩段设计方案实施后,航道水流条件相比工程前有大幅改善,航槽水深均满足 2.8 m 航深要求,比降和流速均能满足消滩水力指标要求。

2)设计方案实施后,设计流量时斑竹林和霸王滩段仍存在 550 和 480 m 范围内航深不足 2.8 m 的情况。霸王滩由于新开航槽,水流归槽,霸王滩出现大比降,最大比降达 4.36% ,航道流速也超过 3.50 m/s ,最大流速为 4.59 m/s ,航道水流条件较工程前有所恶化,斑竹林滩上段大比降区消失,航道水流条件得到一定的改善,至 $5570 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,斑竹林滩下段仍存在 4.0 m/s 以上流速,最大流速达 4.13 m/s 。

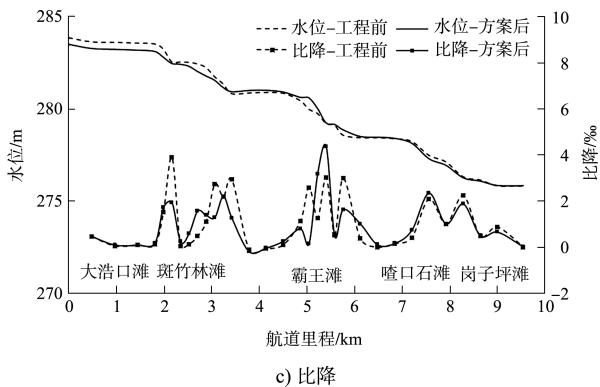
3)整体而言,斑竹林及霸王滩段存在航道内局部航深不足、比降和流速过大等问题,不能满足设计航深和消滩水力指标要求,须进一步开展优化方案试验,而其他滩段满足航深和消滩水力指标要求。



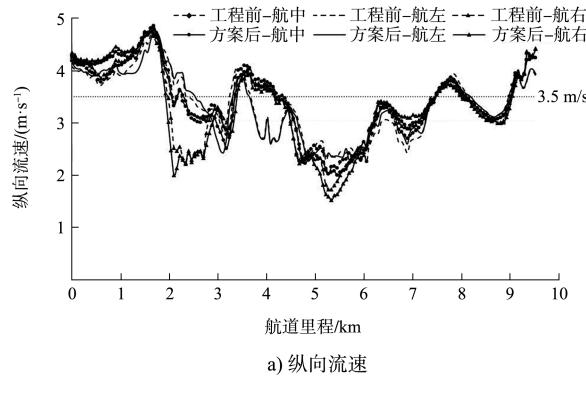
a) 沿程水深



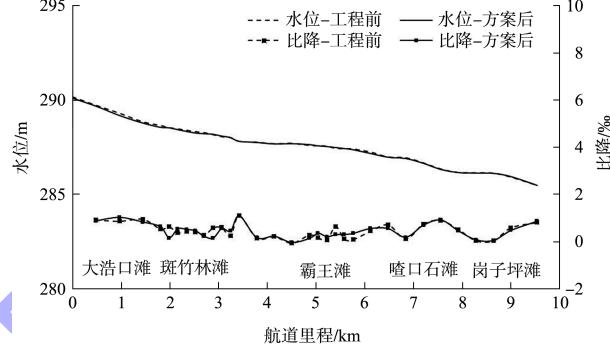
b) 纵向流速



c) 比降

图 4 $Q=900 \text{ m}^3/\text{s}$ 时设计方案航道沿程水深、纵向流速及比降

a) 纵向流速



b) 比降

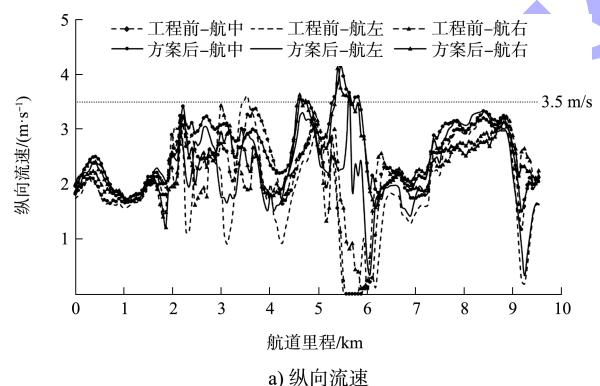
图 6 $Q=15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时设计方案航道内纵向流速及比降

3.2 优化方案整治效果分析

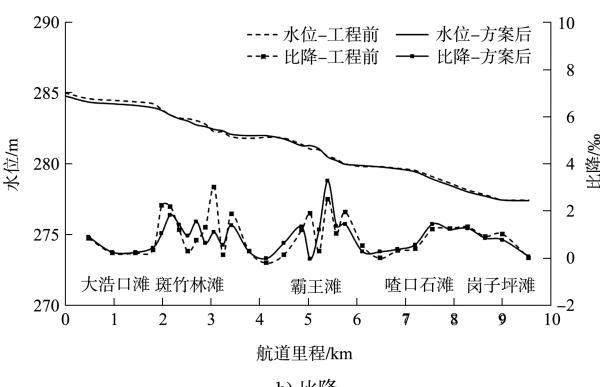
优化方案充分利用设计方案的航槽布置思路, 针对设计方案存在航道内局部航深不足、比降和流速过大等问题, 开展了斑竹林滩段水流条件改善(解决中枯水比降和洪水流量流速较大的问题)和霸王滩水流条件改善(解决霸王滩中枯水水流归槽和流速较大问题)等试验。

3.2.1 霸王滩水流条件优化试验研究

设计方案试验研究表明, 中枯水流量时水流归槽、局部河心比降和航道流速增大明显, 不能满足设计航深和消滩水力指标要求, 针对上述问题开展了坝体调整、复式航槽开挖、下游布设潜坝或填槽等 4 个共 7 组优化方案整治效果试验研究。优化方案实施后整治效果见图 7~9。可以看出: 1) 设计流量 $900 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 滩上段内水位略有升高, 在 0.04 m 范围内, 只有 $1^{\#}$ 丁顺坝坝头水位下降了 0.05 m , 航槽最大流速为 3.20 m/s , 最大比降增至 1.64% , 而对滩中、下段通航水流没有影响, 仍满足船舶自航上滩水力指标; 2) 整治流量 $2250 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 滩段水位变化在 $\pm 0.03 \text{ m}$ 之内,



a) 纵向流速

图 5 $Q=2250 \text{ m}^3/\text{s}$ 时设计方案航道内纵向流速及比降

航槽内最大比降降至 1.79% ，流速基本没有变化；3)汛期流量 $5570 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，滩头水位最大降低了 0.05 m ，滩尾水位最大降低了 0.07 m ，流速略有增加，局部最大比降为 1.31% ，航槽基本不存在 3.5 m/s 以上流速，总体上霸王滩段航道水流条件均得到明显改善，可满足 2.8 m 航深和船舶自航上滩水力指标。

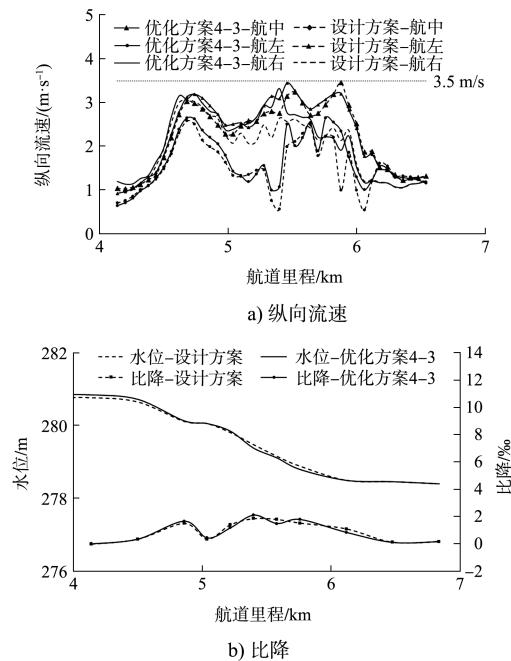


图 7 $Q=900 \text{ m}^3/\text{s}$ 时优化方案航道内纵向流速及比降

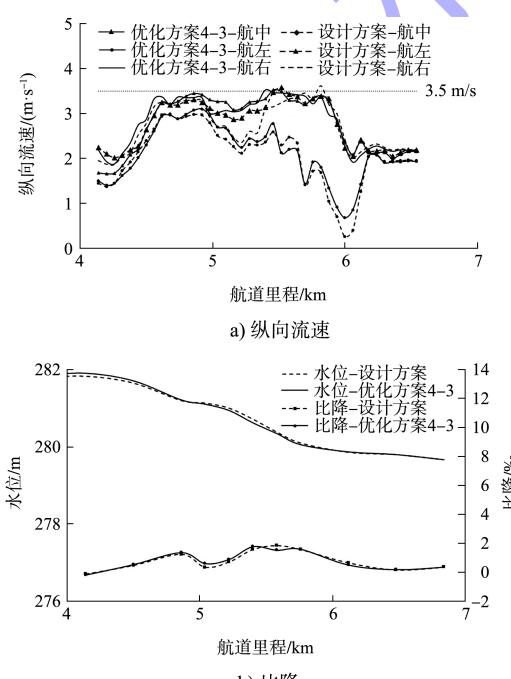


图 8 $Q=2250 \text{ m}^3/\text{s}$ 时优化方案航道内纵向流速及比降

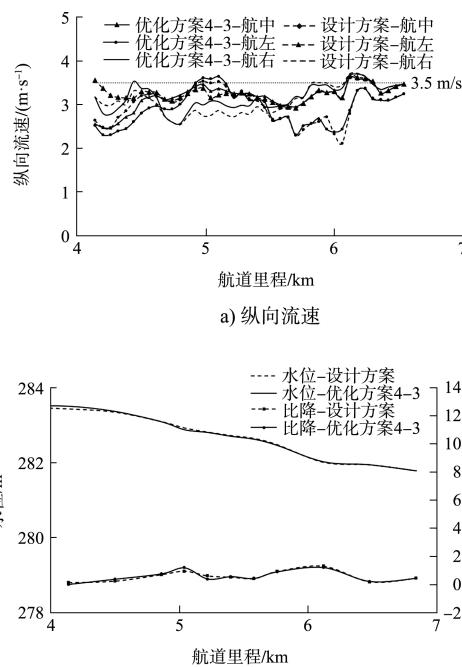
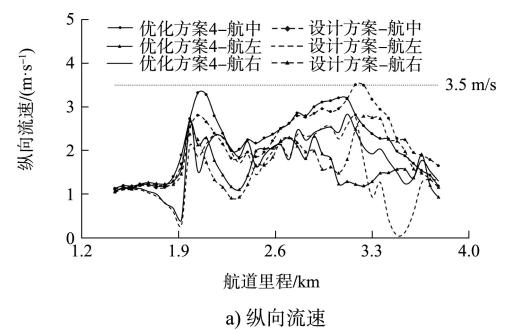


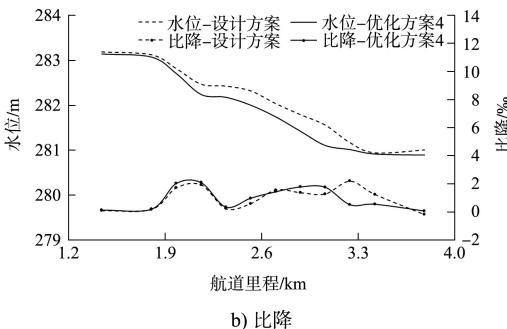
图 9 $Q=5570 \text{ m}^3/\text{s}$ 时优化方案航道内纵向流速及比降

3.2.2 斑竹林滩水流条件优化试验研究

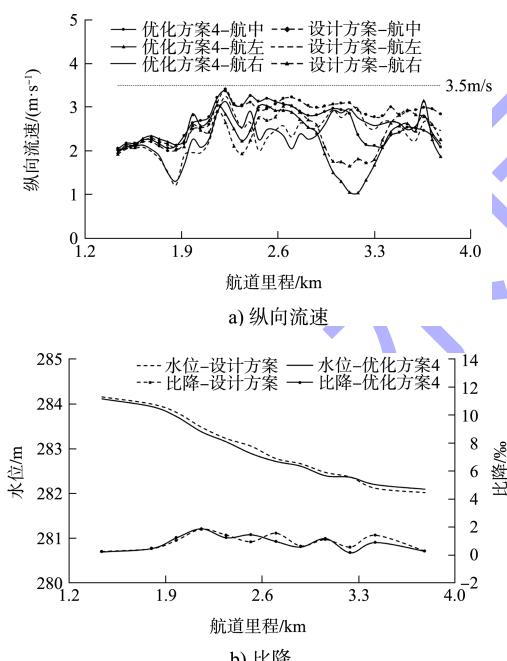
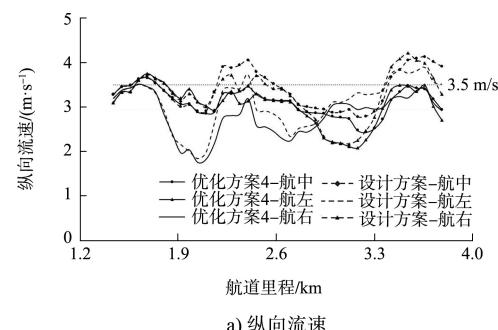
设计方案试验研究表明，斑竹林滩仍存在滩上段、中段、下段局部大比降和航槽内流速较大问题，不能满足设计航深和船舶自航上滩水力指标，为解决此问题开展斑竹林滩复式航槽开挖、下游布设潜坝等 4 个优化方案整治效果试验研究。优化方案实施后整治效果见图 10~12。可以看出：1) 设计流量 $900 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，由于滩下段航槽进一步浚深影响，滩段水位继续下降，航槽水深满足 2.8 m 航深要求，滩上段局部最大比降为 2.09% ，相应航槽最大流速增至 3.31 m/s ，滩中、下段航槽流速不超过 3.5 m/s ，比降也在 2.0% 之内；2) 整治流量 $2250 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，滩段局部最大比降为 1.92% ，对应航槽最大流速为 3.47 m/s ；3) 汛期流量 $5570 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，斑竹林滩上段航槽流速虽仍较大，达到 3.74 m/s ，但是对应比降不足 1.0% ，滩中、下段局部大比降和航槽内流速消失，局部最大比降为 2.03% ，对应航槽最大流速为 3.47 m/s 。总体上斑竹林滩段航道水流条件均得到明显改善，可满足 2.8 m 航深和船舶自航上滩水力指标。



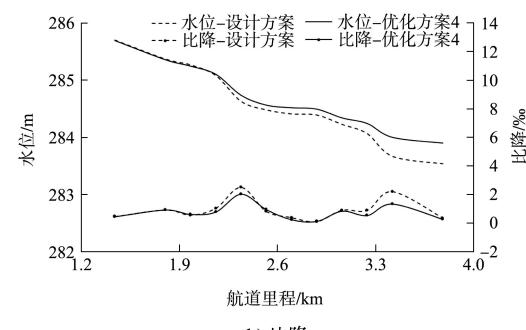
a) 纵向流速



b) 比降

图 10 $Q=900 \text{ m}^3/\text{s}$ 时优化方案航道内纵向流速及比降a) 纵向流速
b) 比降图 11 $Q=2 250 \text{ m}^3/\text{s}$ 时优化方案航道内纵向流速及比降

a) 纵向流速



b) 比降

图 12 $Q=5 570 \text{ m}^3/\text{s}$ 时优化方案航道内纵向流速及比降

3.3 推荐方案自航船模航行试验分析

在斑竹林滩和霸王滩通航水流条件改善优化方案的基础上, 结合大浩口滩段不满足航深2.8 m 要求的局部疏浚及碴口石及岗子坪滩的设计方案, 形成了霸王滩内Ⅲ-(3)级航道整治推荐方案。在推荐方案的基础上, 展开了方案实施后的自航船模试验研究, 船模以右侧通航的原则进行航行试验, 船模航行试验结果表明: 1) 推荐方案时, 当 $Q \leq 5 570 \text{ m}^3/\text{s}$ 时船舶均可顺利通过研究河段。2) 当 $Q=2 250 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 受水流归槽影响, 斑竹林滩及岗子坪滩段航道内流速较大, 船舶上滩时即使用 6.00 m/s 航速上行, 对岸航速仍较小, 最小为 0.36 m/s, 略小于船舶自航上滩要求的 0.50 m/s, 但长度较短。当流量增大时, 航道内比降有所降低, 船舶对岸航速均能满足上滩要求。3) 由于研究河段弯道较多, 当 $Q=5 570 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 斑竹林滩与霸王滩头段航道由于航线与主流夹角较大, 使得弯道段航道内横流较大。船舶下行通过时漂角较大, 最大时分别为 -24.07° 和 -25.94° , 航行时调整航态所需舵角均大于 30° , 航行时须谨慎操控。4) 霸王滩滩尾段受碴口石滩凸嘴挑流及霸王滩左汊汇流影响, 流态较复杂。船舶通过该段航道时, 漂角最大时为 26.35° , 调整航态所需舵角最大时为 30.94° , 航行时须谨慎操控。

4 结语

1) 对水深不足、水流条件复杂的弯曲分汊型河段, 通过优化航线布置并结合坝体调整、复式

航槽开挖、下游布设潜坝或填槽等工程措施,可以实现增加水深、改善水流条件的整治目的,从而满足航道通航标准的要求。

2)采用正态河工物理模型试验和自航船模试验相结合的技术手段,研究分析山区弯曲分汊型河段河床地形变化特征和水深不足、水流条件复杂的连续弯道船舶航行方法,提出山区河流弯曲分汊型河段航道整治技术,丰富了山区河流航道整治理论。

参考文献:

- [1] 交通运输部.全国内河航道与港口布局规划[R].北京:交通运输部,2007.
- [2] 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.
- [3] 交通运输部天津水运工程科学研究所.岷江(龙溪口枢纽—宜宾合江门)航道整治一期工程施工图设计阶段

(上接第 29 页)

2)通过对确定闸门顶高程相关因素的分析,对于山区河流中低水头渠化枢纽中的非溢洪船闸上闸门顶高程确定中所依据的基础水位,宜结合枢纽的开发任务、船闸的通航及自身防洪要求等因素进行综合分析后确定,而不宜直接采用上游校核洪水位。结合工程实例分析,采取工程附近城市的防洪标准中相应的水位是较为适宜的。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司.渠化工程枢纽总体设计规范: JTS 182-1—2009[S].北京:人民交通出版社,2009.
- [2] 中交水运规划设计院.船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 郝岭.中低水头渠化枢纽上游设计最低通航水位的研究[J].水运工程,2019(4):136-140.
- [4] 四川省交通勘察设计研究院有限公司.渠江风洞子航

霸王滩滩群物理模型试验研究报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2022.

- [4] 赵志舟.新水沙条件下长江上游分汊河段的航道整治参数研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
- [5] 刘贤.弯曲河道沙质河床航道整治模拟研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.
- [6] 王建军,杨云平,李晓星,等.韩江高陂枢纽至东山枢纽段河床演变及治理效果研究[J].人民珠江,2019,40(9):48-55.
- [7] 王秀红,曹民雄,马爱兴,等.乌江沙沱电站变动回水区航道整治二维水流数学模型研究[J].水运工程,2012(11):156-160.
- [8] 田红伟,官志鑫,易振宇,等.湘江大花滩航道整治方案优化及效果数值研究[J].水运工程,2021(11):127-133.
- [9] 刘万利,伍文俊,余新明.长江中游典型分汊河段河床演变[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(5):613-617.

(本文编辑 王璁)

运枢纽工程初步设计[R].成都:四川省交通勘察设计研究院有限公司,2019.

- [5] 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院.岷江犍为航电枢纽船闸工程初步设计[R].成都:四川省交通运输厅交通勘察设计研究院,2015.
- [6] 四川省运输厅内河勘察规划设计院.嘉陵江航运梯级开发关键技术研究[R].成都:四川省运输厅内河勘察规划设计院,2003.
- [7] 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院.富流滩船闸改扩建工程初步设计[R].成都:四川省交通运输厅交通勘察设计研究院,2010.
- [8] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司.河港总体设计规范: JTS 166—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [9] 水利部水利水电规划设计总院.水利水电工程建设征地移民安置规划设计规范: SL 290-1—2009[S].北京:中国水利水电出版社,2009.

(本文编辑 王传瑜)