

来桂航道铜鼓滩—羊栏滩段航道优化设计*

江涛¹, 钱黎辉¹, 于忠涛¹, 毕雪峰¹, 罗业辉¹, 王鑫², 张明²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 黔江大藤峡水利枢纽下游段航道存在复杂的不良流态、海事多发、枯水期具有天然航道属性, 航道尺度需要大幅度提升。针对这些问题, 按照航道尽量顺直、加大弯曲半径等原则布置两条航道线路。采用通航水流条件模型试验, 分析其连续滩群复杂的碍航水流条件, 得出碍航滩险整治应消除挑流点、平顺水流边线、有效增大过水断面面积的优化思路。基于初步设计方案 2 提出增加弯顶段半径及其上下游炸礁范围、清除左侧边滩和右侧高滩的优化方案。经物理模型和船模验证后表明: 优化设计方案能有效改善流态和航行条件。

关键词: 优化设计; 航道整治; 炸礁; 模型试验; 大藤峡水利枢纽

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0139-08

Optimal design of channel from Tonggutun to Yanglantun on Laibin-Guiping channel

JIANG Tao¹, QIAN Li-hui¹, YU Zhong-tao¹, BI Xue-feng¹, LUO Ye-hui¹, WANG Xin², ZHANG Ming²

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: The channel in the downstream section of the Qianjiang Datengxia hydro-junction has complex and unfavorable flow patterns, frequent maritime incidents, and natural channel attributes in dry seasons, and thus the scale of the channel needs to be greatly improved. Considering these problems, two channel lines are arranged according to the principles of straightening the channel as much as possible and increasing the bending radius. Using the model of navigation flow conditions for experiments, we analyze the complex navigation-hampering flow conditions of the continuous beach group and obtain the optimization idea of eliminating the deflecting flow point, smoothing the flow edge, and effectively increasing the cross-sectional area of the flow for regulating navigation-hampering shoals. On the basis of the preliminary design scheme No. 2, an optimization scheme is proposed to increase the radius of the curved top section and its upstream and downstream reef-blasting range and clear the left side beach and the right high beach. The verification by the physical model and ship model indicates that the optimized design scheme can effectively improve the flow patterns and navigation conditions.

Keywords: optimal design; channel regulation; reef-blasting; model experiment; Datengxia hydro-junction

随着黔江大藤峡水利枢纽大江截流及大藤峡船闸建成通航, 枢纽上游已形成优良库区航道, 可常年通航 2 000 t 及以上船舶。而大藤峡坝下段

航道仍按 V 级航道标准通航、维护, 且来桂航道铜鼓滩—羊栏滩航段近年来海事频发, 严重制约着黔江及上游航运发展, 成为航运瓶颈, 迫切需

收稿日期: 2022-07-22

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51809130); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(TKS190104)

作者简介: 江涛(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程、岩土工程设计工作。

要按规划将航道升级为Ⅱ级航道,但航道等级由Ⅴ级大幅提升至Ⅱ级,给航段整治带来了航道尺度维护及通航水流条件改善双重难题。

曹民雄等^[1]分析了国内典型急流滩的情况,提出了整治方法;赵家强等^[2]开展了大藤峡坝下未衔接滩群整治模型研究,开展比选分析;庞雪松等^[3]通过开展黔江和浔江交汇河段羊栏滩物理模型试验,提出了4种整治思路;黎国森等^[4]分析了郁江口汇流段及羊栏滩河床形态和通航水流条件的特殊性,通过物理模型试验和自航船模试验相结合的方法提出并研究了满足船舶对会的工程方案;周家俞等^[5]以嘉陵江南充段凤仪场库尾河段为例,采用河工模型试验方法,制定了整治方案;郑钧予^[6]以闽江沙溪口水电站坝下脱水段航道为例,基于二维水流数学模型,评价了枢纽坝下脱水段航道整治方案。

本文综合分析来桂航道大藤峡枢纽坝下段的滩险特性、碍航因素、流态、地形等,提出了航道整治方案,在模型试验^[7-8]研究基础上,开展航道优化设计,再次经过模型试验验证,显示优化方案能显著改善流态和航行安全,可保障Ⅱ级航道畅通。

1 工程概况

1.1 航道现状

由于长洲枢纽正常蓄水位仅回水至桂平三江口,大藤峡坝下存在约12 km的枯水期脱水段,自上而下分布有飞凤角、鹅蛋滩、铜鼓滩及羊栏滩等4个滩险,目前航道的维护尺度为1.6 m×22 m×270 m(水深×航道底宽×弯曲半径)。江中存在较大孤立礁石且碍航特性复杂,呈现多滩相连的特征(图1),航段近年来海事频发。其中铜鼓滩、羊栏滩滩段的水流特性受黔、郁两江来水组合和复杂地形条件控制,碍航特性最为复杂,整治难度大。前期通过对羊栏滩开挖宽浅型分流中槽、清除汇流口处碍航礁石的整治方法,使得该段航道通航水流条件初步得到改善,然而中洪水期在黔、郁两江汇流及中槽分流口附近仍存在

大流速区。参考物理模型对现状滩险碍航特性试验分析成果,铜鼓滩中前段碍航特性表现为枯、中水险滩碍航;铜鼓滩与羊栏滩衔接段呈中洪水急险滩碍航,最涌流量级均为4 280 m³/s;羊栏滩中后段呈洪水急流碍航,最涌流量级为8 600~11 358 m³/s。



图1 航道现状

1.2 水文泥沙和冲淤变化

根据位于羊栏滩下游约26 km的大湟江口水文站统计资料,年平均径流量为1 696亿m³,多年平均输沙量为5 010万t,随着上游各梯级的建设,输沙量呈现逐年减少的趋势。工程河段硬质河床抗冲性强、岸线稳定、深泓平面形态多年变化不大,2009—2019年间,大藤峡下游近坝段受大藤峡枢纽施工影响,局部河床有较大变形;鹅蛋滩、铜鼓滩河段微冲微淤,河床冲淤幅度一般在0.5 m;羊栏滩中槽受开挖影响,河床下切0.5~1.0 m,中槽两侧高滩有淤积幅度近1.0 m。总体来看,受近年来河流输沙减少影响,飞凤角—羊栏滩河段河床以冲刷为主,平均冲淤幅度为0.07 m,见图2。

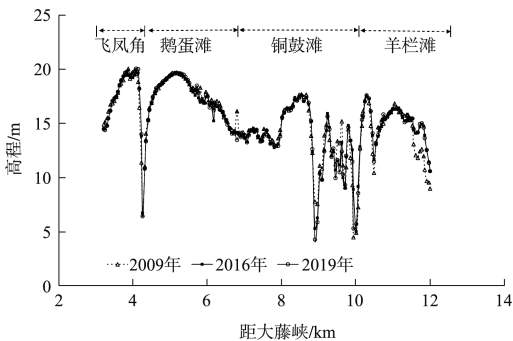


图2 2009—2019年河道深泓线纵向变化

2 航道设计方案比选

2.1 航道初步设计方案

来桂航道坝下段航道按2 000吨级设计,设计

代表船型为 2 000 吨级货船、1 顶 2×2 000 吨级顶推船,设计航道尺度为 4.1 m×80 m×550 m,开挖水深为 4.5 m,整治后流速控制指标采用 3.00 m/s,比降控制指标采用 1.5‰。

航道线路设置原则为:1)充分利用深槽,力求航道稳定,符合习惯航路,尽可能加大弯曲半径,直线段与弯曲段平顺连接,适航性、安全性好。2)在满足航道最小弯曲半径的前提下,开阔的河段航道线路尽量顺直连接;在弯曲河段,尽可能加大弯曲半径,调顺航线,满足船舶安全通航要求。

航道上游衔接大藤峡船闸下游引航道,至黔江大桥通航孔的飞凤角和鹅蛋滩均为唯一线路,仅在黔江大桥下游的铜鼓滩和羊栏滩开展方案比选,其中羊栏滩为与贵梧 3 000 吨级航道工程衔接段,设计时航道沿大沙右侧航槽与其衔接^[9]。

1)初步设计方案 1。黔江大桥采用双孔通航,通航孔净宽 50 m,主航道宽度 80 m,从黔江大桥

桥区双孔直线段汇聚之后至担干石采用直线段,直线段长度 950 m;考虑到右岸为连续险滩,尽量沿用习惯航路,担干石—下罗窑采用弯曲半径 810 m 的弯道段,下罗窑—子沙采用弯曲半径 600 m 的弯道段,航道呈“S”形,两反弯段之间的直线长度取 192 m,为改善航道流态和航行条件,在弯道段右侧均考虑加宽 40 m 以切除石角和礁石;子沙段后采用弯曲半径 550 m 与贵梧 3 000 吨级航道顺接,见图 3a)。

2)初步设计方案 2。在设计方案 1 基础上将担干石—上罗窑弯顶段航道弯曲半径增加至 910 m,同时为便于船舶操纵、减少发生海事的风险,将上罗窑—子沙的弯曲段航道拉直,担干石—铜鼓滩航线向左侧偏移,铜鼓滩—子沙段航线布置向右侧高滩区域偏移,航道较为顺直,同样为改善航道流态和航行条件,在右侧均考虑加宽 40 m 以切除石角和礁石,见图 3b)。

疏浚和炸礁断面见图 4。

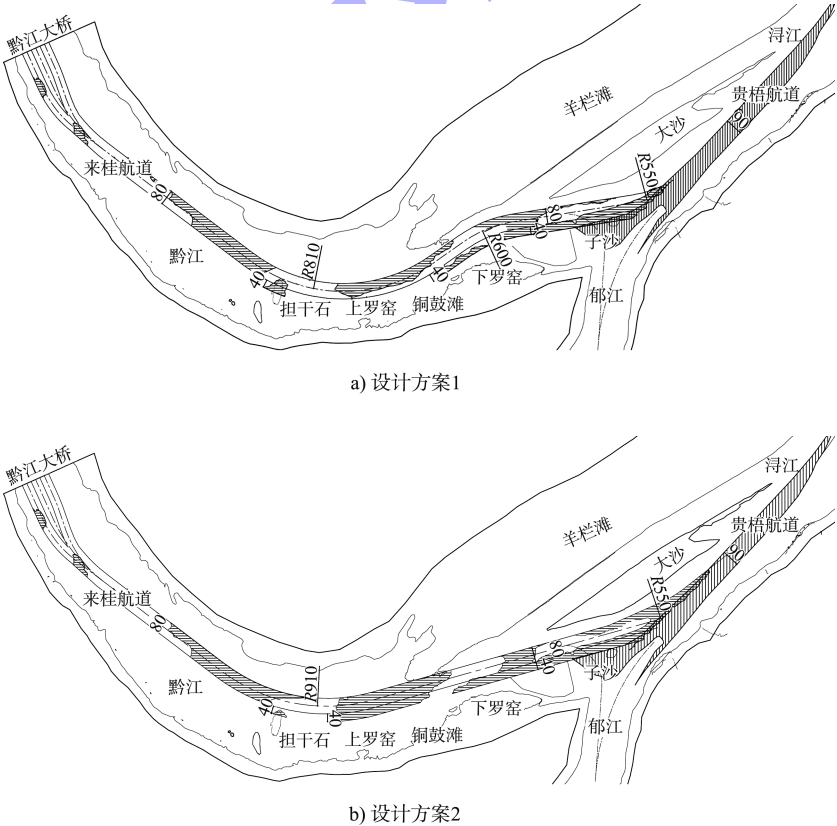


图 3 铜鼓滩、羊栏滩段初步设计方案 (单位: m)

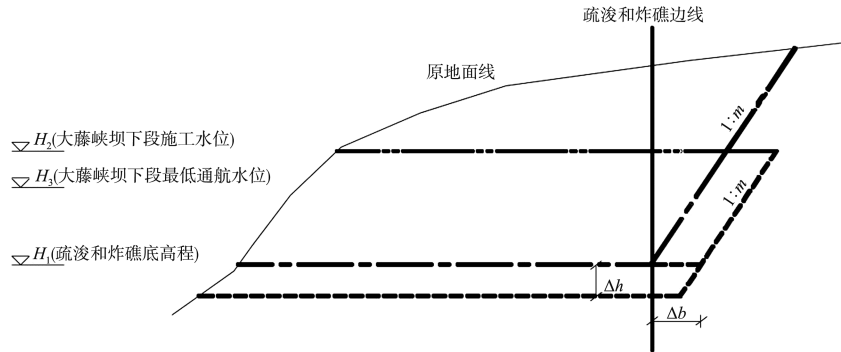


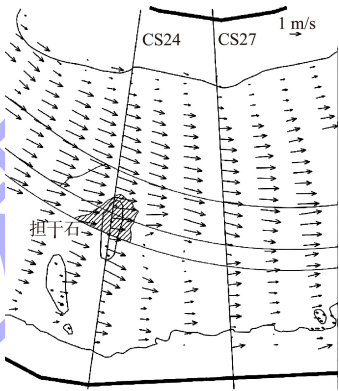
图 4 疏浚和炸礁断面

2.2 物理模型试验

为了验证两组初步设计方案效果，采用物理模型试验分别对其进行通航水流条件及碍航滩险整治效果验证分析。为了便于更明确地分析试验河段内的整治效果，将河段分为铜鼓滩中前段(黔江大桥—上罗窑上部)、衔接段(上罗窑上部—子沙上部)及羊栏滩中后段(子沙上部—大沙下部)。

2.2.1 初步设计方案 1

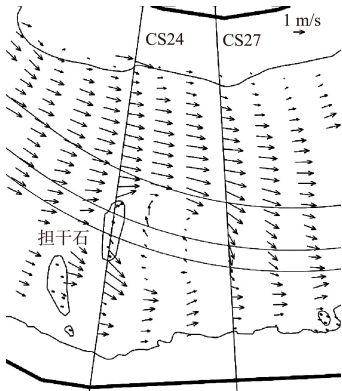
铜鼓滩中前段，担干石—上罗窑上部偏向于航道右侧，部分切除担干石。试验结果显示，设计航线中枯水期铜鼓滩弯顶段受担干石挑流形成的回流范围有所减小；最不利流量 $Q_{\text{黔}}=4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 下，担干石下游 CS27 断面航道内最大表面流速降至 1.72 m/s (现状 2.28 m/s)，相应横向流速分量减至 0.15 m/s (现状 0.85 m/s)，见图 5。从水流条件试验结果看，滩段中枯水险滩碍航问题较现状条件有明显改善。



b) 设计方案1

图 5 $Q_{\text{黔}}=4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 时铜鼓滩担干石局部水流条件

衔接段，上罗窑上部—下罗窑上部偏向于航道右侧，航道较为弯曲，下罗窑偏向于左侧。试验结果显示，最不利流量 $Q_{\text{黔}}=4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 下，对应卡口下游下罗窑 CS36 断面航道内最大表面流速 3.30 m/s (现状 3.60 m/s)，局部比降达 5.13‰ (现状 6.18‰)，坡陡流急碍航特性依然明显；同时中枯水期依然受两岸石质边滩控制而在航槽内形成滑梁水、剪刀水等不良碍航流态，最大流速横向分量达 1.29 m/s (指向航道右边线)，与航中线呈 23° 夹角，见图 6。船模航行试验表明当 $Q_{\text{黔}}>2\,080\text{ m}^3/\text{s}$ 时 2 000 吨级船队无法上行通过衔接段航道。结合水流条件试验及船模航行试验结果，由于衔接段对两侧边滩切除范围小，尤其是左侧边滩挑角，使得衔接段无法有效扩大过水断面面积，中、洪水急险滩碍航的水流特性无法得到有效改善。



a) 现状

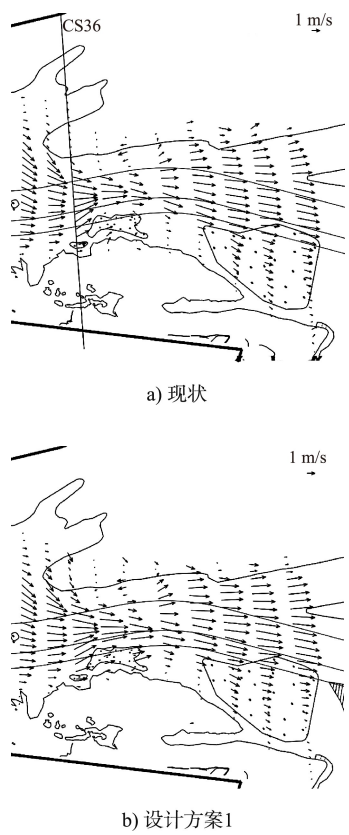


图 6 $Q_{黔}=4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 时衔接段局部水流条件

羊栏滩中后段两江汇流段范围, 航道与贵梧 3 000吨航道顺接, 偏向于航道右侧。试验结果显示, 在不利流量 $Q_{黔}=8\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 下, 由于棋盘石部分及子沙的清除, 航道内最大表面流速为 3.23 m/s (现状 3.30 m/s), 滩段平均比降保持 0.31‰ 不变; 其下游贵梧 3 000 吨级航道范围, 最大流速为 3.32 m/s (现状 3.7 m/s), 滩段平均比降为 0.31‰ 。船模航行试验表明 $Q_{黔}\geq 8\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 时 2 000 吨级船队一方面无法沿羊栏滩段设计航道上行, 另一方面当船舶行至黔、郁两江汇流口处右转向时, 由于船舶上行时对岸航速较小, 而主流流速较大, 船舶易被主流冲向河道中心, 存在较大安全风险。结合水流条件试验及船模航行试验结果, 羊栏滩中后段洪水期流速虽较现状条件下有所减小, 但由于汇流段对边滩清炸范围有限且衔接段水流仍集中于深槽, 进入汇流段水流无法得到有效分散, 流速与比降仍较大, 存在洪水期急流碍航问题。

2.2.2 初步设计方案 2

铜鼓滩中前段, 担干石—上罗窑上部偏向于航

道左侧, 少量切除担干石。试验结果显示, 初步设计方案 2 使得伸入航道内回流范围有所减小, 航中线流速沿程分布均匀, 典型流量 $Q_{黔}\leq 11\,358\text{ m}^3/\text{s}$ 下, 滩段流速小于 3.0 m/s ; 且当 $Q_{黔}=4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 时担干石下游断面航道内最大流速横向分量减小至 0.13 m/s (现状 0.85 m/s , 初步设计方案 1 为 0.15 m/s), 流速与航中线夹角减小至 3° (现状 22°), 见图 7。铜鼓滩中前段枯、中水险滩碍航特性有所改善。

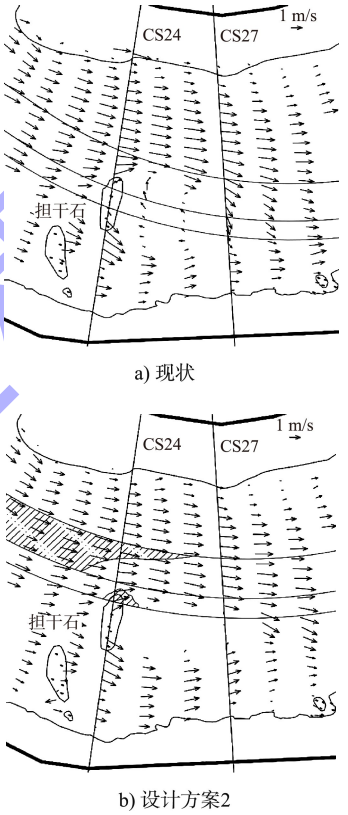


图 7 $Q_{黔}=4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 时铜鼓滩担干石局部水流条件

衔接段上罗窑上部—下罗窑上部偏向于航道左侧, 航道顺直, 下罗窑偏向于航道右侧。试验结果显示, 在现状条件下 ($4\,280\text{ m}^3/\text{s}\leq Q_{黔}\leq 8\,600\text{ m}^3/\text{s}$), 受左右高滩限制, 过水断面较上下游明显减小, 主流下泄不畅, $Q_{黔}=4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 时下罗窑断面最大局部比降达 6.18‰ , 对应流速 3.65 m/s , 坡陡流急并伴随有滑梁水及剪刀水的不良流态, 中、洪水急险滩碍航特性明显; 方案实施后, $Q_{黔}=4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 时航道内局部最大比降减小至 3.17‰ , 对应流速 3.16 m/s (图 8), 虽较现状条件均有所减小, 但仍无法满足设计船型上滩能力指标, 存在坡陡流急并伴有滑梁水及剪刀水等不良流态。

羊栏滩中后段，航道与贵梧 3 000 吨航道顺接，偏向于左侧。试验结果显示，现状条件 $8\,600\text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{\text{黔}} \leq 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 下，大范围滩段进入 3 m/s 以上大流速区，具有洪水急流碍航特性；方案实施后，滩段流速无明显改善，仍具有洪水期流急碍航的特性。

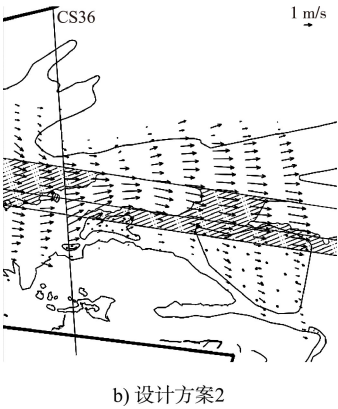
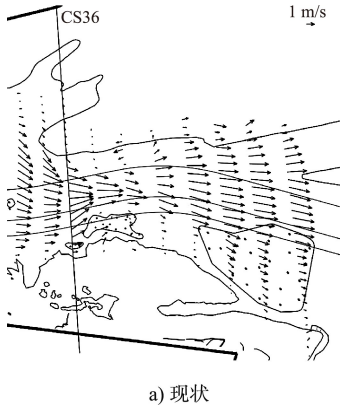


图 8 $Q_{\text{黔}}=4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 时衔接段局部水流条件

2 个方案的模型试验验证显示：总体来说初步设计方案 2 航道流态及航行条件改善效果较初步设计方案 1 更明显，两组设计方案工程量、航线布置的对比见表 1。

表 1 设计方案对比

方案	工程量/万 m^3	优点	缺点
方案 1	56.1	1) 航道开挖工程量较少，工程投资较少； 2) 航道沿深槽和习惯航路布置，船民易适应； 3) 铜鼓滩中前段，中枯水期随着伸入设计航道内的局部担干石被清除，使得中枯水期由于担干石挑流而形成的回流范围及强度均有所减小，中枯水险滩碍航问题得到改善	1) 航道线型弯曲，存在连续 S 转弯段，船舶操纵较难； 2) 衔接段及羊栏滩中后段，中洪水期设计航道内流速及比降并无明显变化，衔接段仍存在坡陡流急的情况，流态上依然在两滩衔接段存在滑梁水及剪刀水的不良流态，中洪水急险滩问题未得到有效改善； 3) 羊栏滩中后段，仍存在洪水急流碍航的问题
方案 2	90.6	1) 航道线型顺直，船舶操纵较易； 2) 铜鼓滩中前段，设计航道向河道左岸偏移，并对局部担干石滩头进行清除，使得伸入航道内回流范围有所减小，枯、中水险滩碍航特性有所改善	1) 航道开挖工程量较多，工程投资较大； 2) 调整航道线型，船民需时间适应； 3) 衔接段及羊栏滩中后段在中洪水期，依然存在坡陡流急的情况，滩险碍航特性无明显改善

3 设计方案优化

根据碍航水流形成的条件及航道安全通航要

求，基于初步设计方案 2，并考虑多滩联动特性，提出优化整治思路，见表 2。

表 2 各滩段优化整治思路

滩段	碍航特性	初步设计方案存在的问题	整治思路
中前段	枯中水急险滩	局部清除了担干石,但枯中水期担干石外露,挑流作用为明显消除,形成大片回流区	航道向右侧偏移,彻底清除担干石,增大航道弯曲半径
衔接段	中洪水急险滩	中洪水期担干石淹没易发生通航安全事故,虽局部清除右侧高滩,边滩对过水断面的限制无法彻底消除,仍为中洪水急险滩碍航	消除左岸卡口挑流点,平顺边线,进一步扩大左、右侧高滩清除范围,有效增大过水断面
中后段	洪水急流	对子沙及右岸碍航礁石的清除后,洪水期仍存在大流速,船舶上行安全风险较大	保证中槽分流量,增大黔江、郁江入汇处过水断面

3.1 优化设计方案

为更好地开展优化设计，从平面布置和断面

布置两个方向提出优化^[9]。
1) 优化设计方案 2A。为保证 2 000 吨级顶推

船队在流速较大的情况下能顺利下行, 在初步设计方案 2 基础上将担干石—上罗窑的弯顶段弯曲半径由 910 m 提高到 1 000 m, 同时将黔江大桥桥区双孔直线段汇聚段—担干石段航道中心线向航道右侧偏移; 将担干石上游航道需炸礁的范围向右侧加宽 40 m, 为彻底消除担干石的影响, 在担干石区域航道右侧加宽至 90 m; 为减少布标, 完全清除担干石—上罗窑与原航道深槽的碍航礁石; 为有效

增大中洪水时的过流断面以改善流态和上滩条件, 下罗窑—子沙段航道炸礁范围往右侧加宽 70 m 以进一步清除右侧高滩, 上罗窑—大沙上段航道左侧卡口段往左侧加宽 120~220 m 范围清除至 19.5 m 高程, 并与中槽航道顺接, 提高中槽分流量; 为改善左侧上滩条件, 子沙段后采用弯曲半径 1 200 m 与贵梧 3 000 吨级航道顺接, 见图 9。下罗窑段断面左侧为呈两层阶梯状, 见图 10。

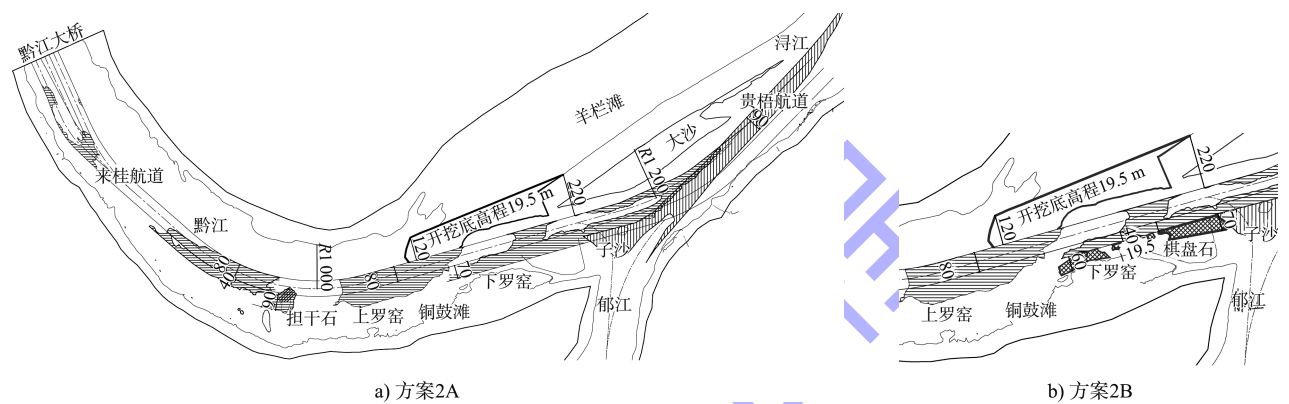


图 9 铜鼓滩至羊栏滩段优化设计方案 (单位: m)

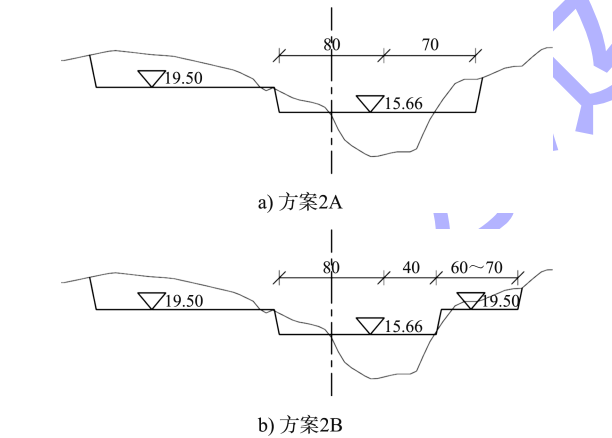


图 10 优化设计方案断面 (单位: m)

2) 优化设计方案 2B。黔江大桥—下罗窑上部同优化设计方案 2A, 为减少工程量, 下罗窑—子沙考虑同航道底高程一致加宽 40 m, 同左侧, 在其右侧清除至 19.5 m 高程, 其加宽值在 60~70 m。下罗窑段断面为左右两侧均呈两层阶梯状。

两个方案均可显著扩大衔接段过水断面, 改善流态, 其优缺点对比见表 3。在增加工程量有限的情况下, 设计以优化设计方案 2A 作为推荐方案, 其可显著减少海事发生的概率。

表 3 优化方案对比

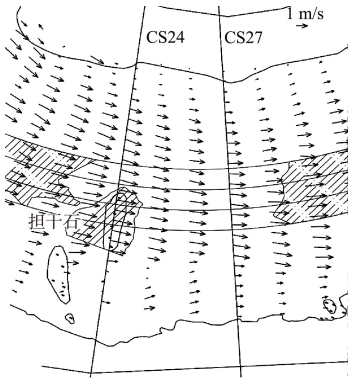
方案	工程量/万 m ³	优点	缺点
方案 2A	120.5	下罗窑至子沙段航道右侧按照航道底高程加宽 70 m, 可航行区域达 150 m, 与担干石至铜鼓滩段可航行区域 160 m 接近, 利于船舶航行, 可显著减少航行触礁事故发生	航道开挖工程量较多, 工程投资较大
方案 2B	114.8	航道开挖工程量较少, 工程投资较少	下罗窑至子沙段航道右侧按照航道底高程加宽 40 m, 可航行区域 110 m, 而上罗窑区域可航行宽度 160 m, 两处衔接存在突变, 且两侧阶梯形 19.5 m 高程断面位于最低通航水位以下, 易发生航行触礁事故

3.2 物理模型试验

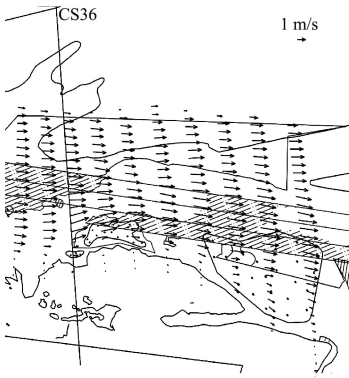
采用物模和船模试验对推荐的优化方案 2A 进

行整治效果验证, 对应初步设计方案中各个滩段最汹流量级 $Q_{黔} = 4\,280\text{ m}^3/\text{s}$, 铜鼓滩担干石及衔

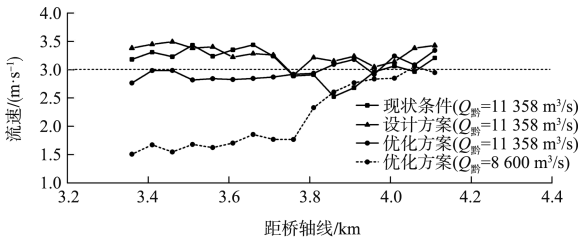
接段局部水流条件见图 11a)、b), 羊栏滩中后段对棋盘石局部及子沙进行清炸后, 使得来桂Ⅱ级航道范围内流速减小明显, $Q_{\text{黔}}=8\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 及 $Q_{\text{黔}}=11\,358\text{ m}^3/\text{s}$ 时来桂Ⅱ级航道范围内航道中心线流速沿程分布见图 11c)。



a) 担干石局部水流条件



b) 衔接段局部水流条件



c) 中后段航中线流速沿程对比关系

图 11 优化方案物理模型试验验证

物模验证结果表明: 随着黔江流量增加, 滩段平均比降呈先增大后减小的趋势, 流速呈递增的趋势, 中洪水期航道流速大、局部滩段水流紊乱的碍航问题得到解决, 见表 4; 最小通航流量下, 航道水深达到 4.6 m, 可满足 2 000~3 000 吨级船舶通航。

同时在物理模型试验中采用 2 000 吨级单船和船队开展船模试验, 试验表明: 1) 当 $Q_{\text{黔}} \leq 20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 单船在设计航道范围内均可正常上行通过, 对岸航速满足自航上滩要求; 当 $20\,000\text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{\text{黔}} \leq 27\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 船队除大沙和子沙段约 0.2 km 范围内需由左侧缓流区上行, 其余设计航道范围均可正常上行通过; 2) 单船可顺利下行通过该航段, 船队只需船首沿航道中线下行便可顺利通过; 3) $11\,358\text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{\text{黔}} \leq 27\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 由于羊栏滩中槽分流, 航道存在小范围的较大横流, 只要谨慎操控便可顺利通过。

表 4 物理模型结论

滩段	整治效果
中前段	$Q_{\text{黔}} \leq 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 流速沿程均小于 3.0 m/s; 最大通航流量 $Q_{\text{黔}} = 27\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 滩头流速增至 3.39 m/s, 进入弯顶段后河道展宽、主流偏向凹岸, 流速减小至 3.00 m/s 以下; 滩段平均比降 $\leq 0.22\text{‰}$, 最大通航流量 $Q_{\text{黔}} = 27\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时滩段平均比降至 0.11‰。 $Q_{\text{黔}} = 4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 代表断面 CS27 处, 横向流速分量降至 0.3 m/s, 与航中线夹角 9°, 消除了碍航回流流态
衔接段	当 $700 \leq Q_{\text{黔}} \leq 27\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时沿程流速基本小于 3.0 m/s, 滩段平均比降 $\leq 0.44\text{‰}$; $Q_{\text{黔}} = 4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ 时航道内局部最大比降为 1.5‰、流速 2.75 m/s, 消除了剪刀水、滑梁水等碍航流态
中后段	$Q_{\text{黔}} = 11\,358\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 子沙上游右侧出现 3.00 m/s 以上大流速区, 最大流速 3.34 m/s, 对应的局部比降 0.58‰; 最大通航流量 $Q_{\text{黔}} = 27\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 沿程流速均小于 3.00 m/s, 且滩段平均比降为 0.19‰

4 结语

1) 对于有较大孤立碍航礁石、中洪水急流滩、且位于弯道段的枯水期脱水段航道, 航道线形应尽量顺直、孤立礁石应尽量清除, 通过切滩等尽量增加过水断面。

2) 对于滩险连续的航道, 设计时应充分考虑

多滩联动特性, 以衔接段为起点向上下游推进整治方案。

3) 物理模型和船模试验验证证明优化方案能显著改善水流紊乱、中洪水流速大等碍航问题, 其平面布置、整治断面设计可供类似山区航道整治参考。

(下转第 190 页)