



三峡—葛洲坝两坝间洪水急流滩整治研究*

高攀¹, 肖玉华¹, 冉晓俊¹, 章日红²

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 三峡—葛洲坝两坝间航道属山区峡谷型河段, 兼具“水库+天然河道”的双重特性, 在汛期水流条件急剧恶化, 尤其是水田角、喜滩、狮子脑、偏脑等洪水急流滩最为突出, 影响船舶航行安全。为解决三峡—葛洲坝两坝间洪水急流滩碍航问题, 通过多年实测地形分析两坝间河床演变特性, 以水田角急流滩为例, 采用水文原型观测、实船适航试验以及理论计算等方法对其碍航特性进行分析, 进而采用定床正态物理模型和遥控自航船模试验对滩险的整治方案进行优化和比选, 确定了“炸礁+清渣+填槽”的整治方案。研究表明, 整治后在 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量级时, 最大比降由 0.75% 减小至 0.2% , 上行航线表面流速由 $3.3\sim 3.7 \text{ m/s}$ 减小至 $2.0\sim 2.9 \text{ m/s}$, 泡漩、回流等碍航流态显著改善, 试验船舶能够自航安全上滩, 达到整治目标。研究成果可为两坝间洪水急流滩航道整治设计提供技术指导与示范, 也可供其他类似滩险整治研究参考。

关键词: 急流滩; 航道整治方案; 物理模型试验; 船模试验; 碍航特性; 整治效果

中图分类号: U617.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0123-09

Research on channel regulation of flood rapids in waterway between two dams of the Three Gorges and Gezhouba

GAO Pan¹, XIAO Yuhua¹, RAN Xiaojun¹, ZHANG Rihong²

(1. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

Abstract: The channel between the Three Gorges and Gezhouba is a mountain gorge river with the dual characteristics of “reservoir+natural river”. The water flow condition deteriorates sharply in flood season, and the most prominent flood rapids such as Shuitianjiao, Xitan, Shizinao, and Piannao are the most prominent, which affects the navigation safety of ships. To solve the problem of obstructing navigation by flood rapids between the Three Gorges and Gezhouba dams, this paper analyzes the evolution characteristics of riverbed between the dams based on the measured topography for many years. Taking Shuitianjiao Rapids Beach as an example, it adopts the methods of hydrologic prototype observation, actual ship seaworthiness test and theoretical calculation to study and analyze its obstructing characteristics. Then the fixed-bed normal physical model and remote-controlled self-propelled ship model test are used to optimize and compare the regulation plans of the beach, and the regulation plan of “reef blasting+slag cleaning+tank filling” is determined. The research results show that the maximum gradient decreases from 0.75% to 0.2% at the flow level of $35,000 \text{ m}^3/\text{s}$ after regulation, and the surface velocity of the upstream route decreases from $3.3\sim 3.7 \text{ m/s}$ to $2.0\sim 2.9 \text{ m/s}$. The navigation obstruction flow patterns such as cyclone and backflow are significantly improved, and the test ships can sail autonomously and reach the beach safely, achieving the regulation goal. The research results can provide technical guidance and demonstration for the regulation design of the flood rapids between the two dams, and can also be used as reference for other similar beach regulation studies.

Keywords: rapids; channel regulation plan; physical model test; ship model test; obstructive characteristics; regulation effect

收稿日期: 2024-12-01

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604700)

作者简介: 高攀 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口、航道工程管理工作。

三峡工程蓄水以来,其上游及葛洲坝工程下游的航道条件得到大幅提升,但两坝间河段通航能力不足已成为长江航运发展的“短板”,直接影响到三峡工程航运效益的发挥和地区经济的发展。该河段碍航主要在汛期,航行条件急剧恶化,尤其是水田角、喜滩、狮子脑、偏脑等洪水急流滩最为突出,影响船舶航行安全,滩险整治迫在眉睫。在整治思路方面,曹民雄^[1]结合典型石质急流滩整治,归纳出扩大卡口断面、拓宽缓流航道、开槽分流或新辟航槽、筑坝壅水以减缓急流、构筑错口型滩便于船舶搭跳上滩等 5 种措施方法及其适用条件。曾涛等^[2]总结长江上游典型急流滩险流态碍航以及河床地形突然变化的碍航特性,提出扩大泄水断面、构成错口滩型、拓宽缓流航道 3 种主要整治思路。袁涛峰等^[3]以三峡—葛洲坝两坝间喜滩为例,提出通过炸礁、填槽和筑坝等措施进行整治。在研究手段方面,主要有河工模型试验^[4-7]、船模试验^[7]和数学模型^[8-9]等方法。针对三峡—葛洲坝两坝间河道受山区峡谷地形河床的影响,采用扩大泄水断面、筑坝壅水、上疏下抬、构成错口型和开挖缓流航道等常规急流滩整治方法存在一定的局限性^[10],存在施工困难、工程量巨大、易引发地质灾害等问题。目前,针对两坝间洪水急流滩整治方案与效果分析成果较少或尚未深入研究,亟需开展两坝间洪水急流滩的整治方案研究。

本文以三峡—葛洲坝两坝间水田角洪水急流滩整治为例,结合水文原型观测、实船适航试验

以及理论计算等方法对其碍航特性与成因开展相关分析研究,并采用定床正态物理模型和遥控自航船模试验的方法进行整治方案的优化和比选,以为水田角洪水急流滩整治设计提供指导,并为两坝间河段及类似滩险整治研究提供参考。

1 河道概况

三峡—葛洲坝两坝间河段位于长江上游,全长约 38 km,兼具“水库+天然河道”的双重特性,即在非汛期,受三峡和葛洲坝工程调节作用,水流平缓,流速和比降较小。进入汛期后,随着三峡下泄流量增加,受河床地形条件限制和葛洲坝坝前水位影响,水流湍急,流态紊乱,航行条件急剧恶化。其中三峡大坝—乐天溪,河谷宽阔,河槽呈复式断面;乐天溪—南津关,河宽较窄,河道蜿蜒曲折、岸壁陡峭、河槽窄深,水田角、喜滩、狮子脑和偏脑 4 处洪水急流滩均在该河段内,是川江航道航行最困难的区段之一;南津关—葛洲坝,为山区向平原过渡段,江面变宽,水势平缓。水田角所处的莲沱河段位于两坝间中上段,平面形态呈上段顺直、收缩而下段弯曲、放宽特征;断面形态为“V”字形,呈峡谷型河道断面形态特征;剖面形态呈深泓线剖面,跌宕起伏,在弯道段深泓陡降 28 m,而后又陡升 47 m。因此,莲沱河段岸线曲折、河床窄深,水流湍急,流态险恶,属于典型的山区峡谷型河段。两坝间河段平面见图 1。

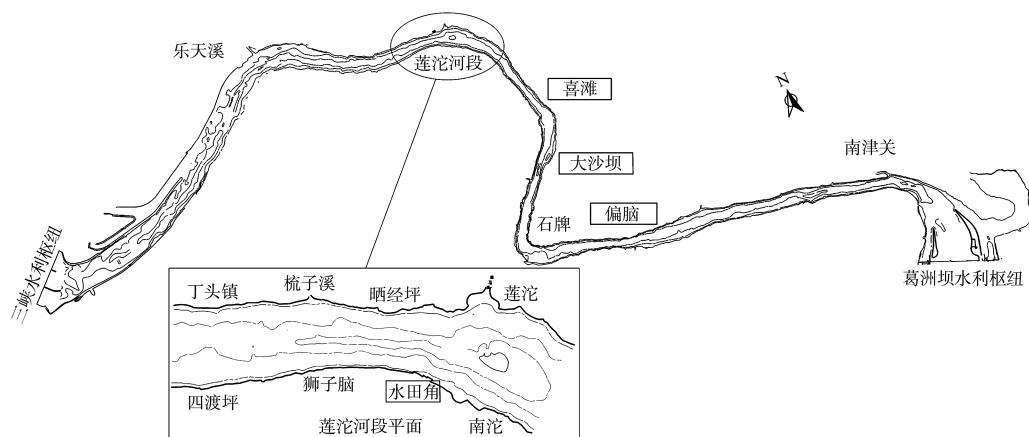


图 1 三峡—葛洲坝河段平面

Fig. 1 Plan of the river section between two Dams of the Three Gorges and Gezhouba

2 河段演变特性

根据2004—2013年共6次三峡—葛洲坝两坝间河段地形图资料可知,三峡工程蓄水以来,该河段深泓线、河道岸线、横断面基本稳定,总体处于积累性冲刷状态,冲刷部位主要以深槽为主,冲刷深度较大的河段出现在乐天溪和南津关。水田角所处的莲沱河段亦处于稳定状态,演变特性如下。

1) 河岸及滩槽稳定。近年来河岸及滩槽变化见图2。由图可知,河段两岸受西陵峡峡谷限制,河床坚硬,控制节点较多,河岸未明显冲刷扩展或淤积缩窄,岸线稳定。岸线和深槽相关的等高线纵横向位置及范围基本一致,变化甚微,河岸及滩槽处于相对稳定状态。

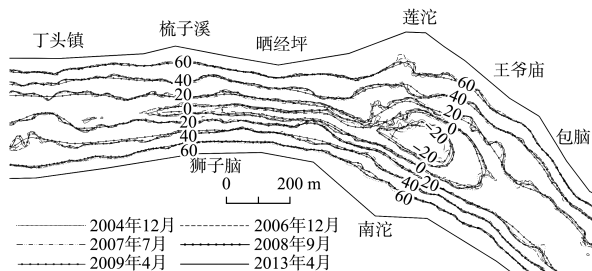
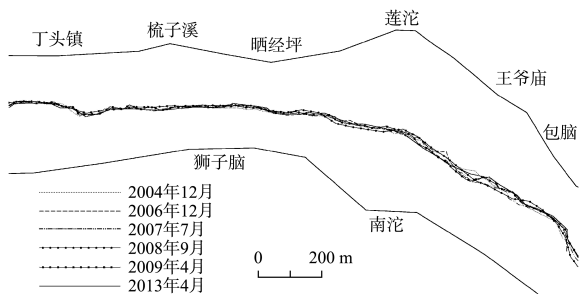
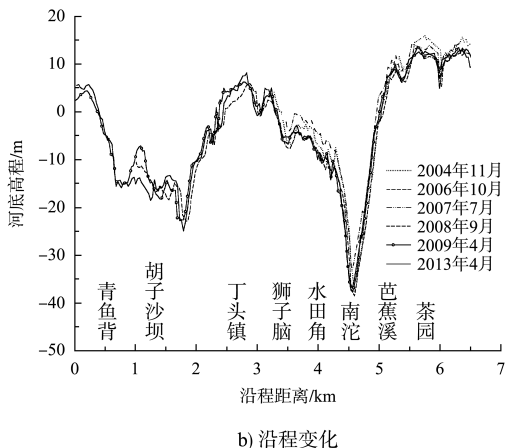


图2 莲沱河段河岸及滩槽变化 (单位: m)
Fig. 2 Changes in river bank and beach-channel of Liantuo section (unit: m)

2) 深泓线稳定。近年来深泓线变化见图3。由图可知,深泓平面位置随河道呈缠绕状,基本处于河道中部,多年来横向摆动幅度甚微,未出现较大的深泓移位、主泓改变等剧烈的河床演变。沿程深泓线纵剖面高程呈现高低不平、起伏频繁且剧烈,但是多年来深泓线凸凹位置基本一致,除个别部位略有冲淤变化外(最大冲淤变化10 m),深泓线在高程上变化不大,河床高程变化甚微,处于冲淤平衡的稳定状态。



a) 平面变化



b) 沿程变化

图3 莲沱河段深泓线变化
Fig. 3 Changes in thalwegl of Liantuo section

3) 河床横断面稳定。莲沱河段晒经坪典型河床断面见图4。由图可知,该河段内断面形态一致,基本呈现为“V”字形,高程无明显变化,未出现单向冲淤情况,河床断面处于稳定状态。

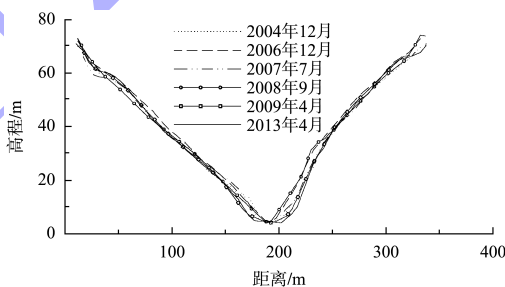


图4 莲沱河段典型河床横断面
Fig. 4 Typical riverbed cross-section of Liantuo section

3 碍航特性及成因

三峡—葛洲坝两坝间洪水急流滩碍航特性:在非汛期该河段水流条件良好,但是进入汛期,尤其是当三峡枢纽下泄流量大于 $3.0 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 时,由于河道窄深,断面流量增率与过水面积增率极不适应,流速与流量基本呈线性增长,流速急,加之附近有凸嘴、暗礁和深沱等影响,流态紊乱,存在泡水、漩水等恶劣流态,形成急流滩,给船舶航行造成影响。为更深入探析莲沱河段碍航特性及成因,通过水文原型观测、实船适航试验以及理论计算等方法进行研究^[11-12],结果如下。

1) 上水航线流速急。水田角—狮子脑水流集中, $3.0 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 流量及以上时,最大流速在 3.5 m/s 以上,流速小于 3 m/s 的水域距岸仅 40 m ,局部

坡降超过 1‰。航行船舶需沿岸边缓流区行驶,适航宽度不足。狮子脑稍下—梳子溪为汛期过河区,3.0 万 m³/s 流量及以上时,河心主流流速均大于 3 m/s,大流速区域宽度较大,在船舶推力不足或载货量较大时,船舶上行困难。碍航成因:

①河道狭窄是形成急流滩的关键。水田角—狮子脑河道狭窄,过水面积小。最窄处晒经坪在 2.5 万~5.5 万 m³/s 流量时过水断面 1.176 万~1.325 万 m²,平均流速 2.13~4.15 m/s,最大流速 2.9~5.5 m/s。

②水田角横向流速左缓右急,船舶上行缓流区范围有限。左岸岸线向河心收缩,水下河床高、水深小、坡度缓,而右岸相对顺直、水深大、坡度陡,主流受上游微弯河势及滩口地形影响偏向右岸,右岸缓流区适航宽度很小。左岸虽然流速稍小,但由于下游流态紊乱,船舶上行航线选择余地很小。

③流量增率与过水面积增率极不适应。流量由 2.5 万 m³/s 至 5.5 万 m³/s,增率 120%,而过水面积由 1.176 万 m² 至 1.325 万 m²,增率 12.7%,两者增率极不适应,差值近 10 倍。

2) 弯道流态险恶。莲沱弯道平面微弯,滩口以下两侧放宽,紧邻深沱,河床陡降陡升。在滩段放宽处,主流偏离河岸,形成大范围回流并压缩主流,形成狭窄主流带,宽度不足 1/4 河宽,水流湍急;深沱在主流和回流交界区产生强烈泡水、漩水。3.0 万 m³/s 流量及以上时,船舶下行舵效低且主流狭窄,船舶航行存在隐患。碍航成因:

①河道平面形态突缩突扩。水田角—莲沱河面宽度从 400 m 突扩至 700 m,增加 1.75 倍,过水面积从 1.2 万 m² 突增至 3.3 万 m²,增加 2.75 倍,水流运动连续性差。

②河道地形变化剧烈。深泓陡降近 40 m,滩口至深沱处深泓陡降陡升,深沱吸流,主流带集中,同时主流下潜,由于流速梯

度大,水下地形陡峭,形成强烈的泡水、漩水。

③上游急流是形成强烈回流和泡水、漩水的水流条件。上游来水流速急,急流与回流区缓流强烈碰撞、摩擦,形成强烈回流和泡水等特殊流态。

④下游左岸岸壁陡峻,与收缩河段主流呈一定的斜向交角。莲沱弯道底部深沱右缘顺直,左缘左扩,沱缘犬牙交错,同时深沱左侧地形起伏不平,高速下潜水流、弯道水流与岸壁作用,产生向上动能,在碍航流带及回流内产生成片泡水,流态恶劣。

3) 梯级枢纽联合调度影响。为保障船舶过坝安全、便捷、高效、绿色、有序,充分发挥枢纽通航效益,提升长江黄金水道功能,通航调度部门依据《三峡—葛洲坝水利枢纽通航调度规程》^[13]实施联合调度后,对航行船舶安全没有影响。在特殊时段出现陡涨、跌水,由于库容有限,葛洲坝水库对三峡水库的下泄过程调节作用有限,局部呈现出顺、逆、斜、横流交相更迭的复杂态势,产生回流、驻波、涌浪、翻泡、漩涡以及水面的往复晃荡等不良流态,对航行船舶航态和舵效造成一定的影响。

综上可知,复杂的地形和湍急的水流是莲沱河段碍航的基本成因,叠加联合调度偶然性的不利影响,应采取措施急险并治。

4 整治方案研究

4.1 整治目标

- 1) 航道尺度。4.5 m×150 m×1 000 m(航道水深×航道宽度×弯曲半径),保证率为 98%。
- 2) 改善莲沱河段通航水流条件,将 3 000 吨级单船限制通航流量从 2.5 万 m³/s 提高至 3.5 万 m³/s;改善泡漩、回流等碍航流态,提高通航安全性。3.5 万 m³/s 流量级下整治参数目标见表 1。

表 1 整治参数目标
Tab. 1 Target of regulation parameters

最大纵比降	航线最大流速	沿程最大流速	不良流态	对岸航速
从 0.75‰ 降至 0.3‰	水田角—狮子脑上水航线流速基本不超过 3.0 m/s	水田角滩口最大流速减小 0.3~0.4 m/s	不良流态明显削弱;弯道的 主流带宽度增加 50 m	3 000 吨级代表船型可自航安全上 滩,对岸航速超过 4 km/h

4.2 整治思路

1) 急流滩常规整治措施主要有: ①扩大泄水断面, 分散主流, 减小流速; ②在滩尾下段深槽填槽筑坝, 抬高上段水位, 通过减小急流段比降, 达到减小流速的作用; ③采用上疏下抬法, 该方法是以上 2 种方法的综合。

2) 常规措施在水田角应用的局限性。水田角滩段和莲沱深沱并存, 汛期上急下险, 常规措施存在局限性。①扩大泄水断面的局限。该办法可解决“急”的问题, 但是无法解决微弯地形及深泓线陡升陡降等“险”的问题。同时, 在峡谷型急流滩炸礁存在开挖及弃渣工程量大、施工水深大、易引发地质滑坡或局部坍塌的问题, 施工限制条件复杂。②筑坝壅水的局限。该办法壅水作用有限, 工程量巨大, 无法适应“急”“险”的特点, 且建成后坝体的维护工程量较大。

3) 提出水田角整治思路。第 1 种思路: 扩大泄水断面+深沱抛填, 在解决“急”的问题后, 深沱抛填与开挖相结合, 可有效减少开挖工程量, 施工范围和水深较小, 从而降低对地质滑坡或局部坍塌的影响。且开挖的礁石可就近抛填至深沱, 平顺河床, 减少弃渣工程量, 节省费用。第 2 种思路: 扩大泄水断面+深沱抛填+筑坝壅水, 通过开挖和筑坝解决“急”的问题, 通过抛填深沱达到整治的目的。与第 1 种思路相比, 第 2 种思路开挖工程量更少, 地质滑坡风险和局部坍塌风险更小, 但筑坝工程量和施工难度较大, 维护较为困难。

4.3 整治方案

4.3.1 初步方案

基于上述整治思路和整治目标, 提出“炸礁+清渣+填槽”和“炸礁+清渣+填槽+筑坝”两种综合整治初步方案^[14], 方案平面布置见图 5。

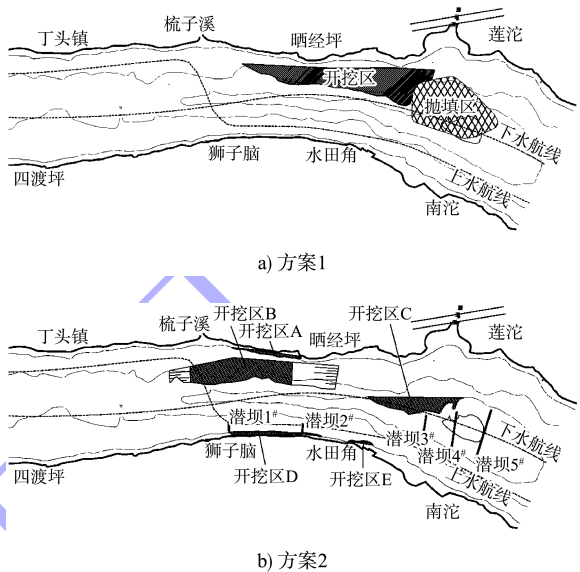


图 5 初步方案平面布置
Fig. 5 Layout of preliminary plans

采取定床正态物理模型和遥控自航船模试验的方法进行研究。定床正态物理模型比尺 1:100, 采用 2013 年 4 月实测地形图, 试验流量级分别为 3.0 万、3.5 万、4.0 万 m³/s, 尾门水位取葛洲坝坝前运行低水位 63 m。遥控自航船模试验选择 3 000 吨级单船, 尺寸为 86.8 m×16.2 m×2.8 m (总长×总宽×吃水), 主机功率 440 kW。初步方案研究成果见表 2。

表 2 初步方案研究成果
Tab. 2 Research results of preliminary plans

方案	工程布置	流态变化	流速变化	结果
1	开挖左侧晒经坪较高河床, 开挖方式为平挖, 开挖底高程为 25 m, 坡比 1:0.2, 深沱左侧以缓坡抛填	左侧莲沱溪口形成缓流区, 碍航流带位置向左压缩, 回流宽度减小 70 m, 回流位置下移 200 m, 主流贴近王爷庙河段岸边, 回流内泡水频率降低, 泡水强度减弱。右侧南沱回流宽度 180 m, 回流最大流速 0.93 m/s, 回流位置变化不大。工程后两岸回流压缩, 主流带展宽增加 60 m	工程后河段 3.0 m/s 流速带范围明显减小。水田角流速降低, 最大流速 3.3 m/s, 流速减少 0.3~0.5 m/s。莲沱弯道深沱段最大流速降低, 不超过 3.0 m/s。主流流速降低, 流速分布更均匀	增大滩口过水面积, 减小局部陡比降, 降低上水航线急流区的流速, 大于 3.0 m/s 的流速带范围显著缩小, 上水航线流速不超过 3.0 m/s。滩口的水流条件变化使得弯道段断面流速分布得到改善, 主流流速降低, 回流范围和强度减小, 恶劣流态大幅度减弱, 达到整治目标

续表2

方案	工程布置	流态变化	流速变化	结果
2	开挖区 A、B、D、E 高程分别为 58、20、58、58 m, 坡比 1:0.5; 修筑 1 [#] 、2 [#] 潜坝; 深沱以缓坡抛填并修筑 3 [#] ~5 [#] 潜坝	左侧莲沱回流宽度减小 50~80 m, 回流强度减小, 最大回流速度减小 0.1~0.4 m/s, 晒经坪下游小回流区基本消失。右侧南沱回流区范围变化不大, 最大回流速度减小 0.2~0.8 m/s。在回流区与主流交界面仍存在泡漩, 但流量小于 3.5 万 m ³ /s 时泡漩较弱	在潜坝控制水域狮子脑—水田角, 流速减小 0.5~1.0 m/s, 基本形成 60~80 m 缓流区, 满足船舶上行缓流区的基本宽度。狮子脑—梳子溪过河区航线流速减缓	采用开挖、筑坝等措施, 调整水田角附近流速分布, 减小右岸上水航线急流流速和陡比降; 采取填槽措施改善莲沱弯道不良流态, 达到整治水田角—狮子脑的急流段, 适当改善莲沱—南沱段的碍航流态, 不恶化下行通航水流条件的工程效果, 达到整治目标

4.3.2 优化方案效果分析

1) 方案 1 优化。对开挖区底部高程进行优

化, 提出 35 m、30 m 和 25 m 方案, 优化结果见表 3。

表 3 方案 1 优化成果
Tab. 3 Optimization results of Plan 1

方案	比降/‰		碍航流态			上行航线最大流速变化/(m·s ⁻¹)				下行航线最大流速变化/(m·s ⁻¹)
	滩口左岸	滩口右岸	回流强度/(m·s ⁻¹)	回流宽度/m	碍航副流强度	主流宽度/m	水田角—狮子脑	过河段	梳子溪以上	
35 m	0.26	0.36	1.35	210	较弱	220	-0.30	-0.20	+0.10	-0.19
30 m	0.14	0.30	1.30	200	弱	220	-0.47	-0.60	+0.10	-0.33
25 m	0.13	0.28	1.14	180	较弱	230	-0.40	-0.50	+0.20	-0.36

注: “-”表示与工程前相比减小, “+”表示与工程前相比增大。

结果表明: ①从比降变化看, 随着开挖工程量增加, 比降随之减少。但是, 滩口右岸的比降减小不明显, 滩口左岸比降减小显著, 且 25 m 方案和 30 m 方案比降改善效果接近。因此, 25 m 方案与 30 m 方案相当, 优于 35 m 方案。②从碍航流态变化看, 随着开挖工程量增加, 回流强度随之减弱, 25 m 方案明显优于其他方案; 主流宽度和回流宽度没有显著差距; 在碍航副流强度方面来看, 30 m 方案较优。因此, 25 m 方案与 30 m 方案相当, 优于 35 m 方案。③从航线流速变化看, 对上行航线最大流速变化而言, 30 m 方案优于 25 m 方案, 25 m 方案优于 35 m 方案; 在下行航线最大流速变化而言, 25 m 方案与 30 m 方案相当, 优于 35 m 方案。综上分析, 选择 30 m 方案为较优方案。方案 1 优化后平面布置与初步方案相同, 开挖底高程为 30 m, 优化后平面布置见图 6a)。

2) 方案 2 优化。对开挖区布置及潜坝高程、数量、位置和长度进行优化, 优化结果见表 4。

结果表明: 方案 2 优化布置方案在右岸狮子脑附近布置 2 条潜坝, 在狮子脑上游 245 m 处布

置长 56 m 的潜坝 1[#], 在狮子脑附近布置长 42 m 的潜坝 2[#]; 在左岸布置河底高程 25 m 的开挖区 1[#]、河底高程 30 m 的开挖区 2[#]、河底高程 40 m 的开挖区 3[#], 3 级平台逐级向下游抬高, 各开挖区顺坡连接, 开挖礁石抛填至深沱。优化后平面布置见图 6b)。

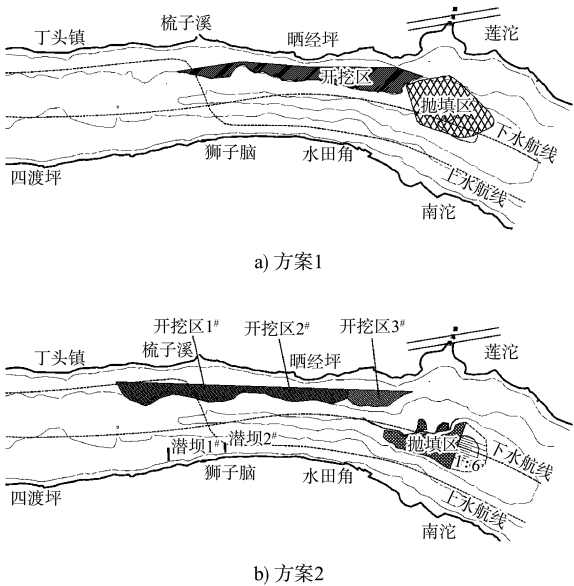


图 6 优化方案平面布置

Fig. 6 Layout of optimization plans

表 4 方案 2 优化结果
Tab. 4 Optimization results of Plan 2

优化内容	工况	方案组成	潜坝数量/座	潜坝高程/m	优化效果
开挖区布置优化	-	采用 25、30、40 m 3 级平台逐级向下游抬高的方式,其间顺坡连接,开挖工程量 60 万 m ³	-	-	扩大过水断面,增率为 4.5%~7.0%,比初步方案效果较优
潜坝高程优化试验	QBG1	开挖区+潜坝 1 [#] 、2 [#]	2	57.0	坝顶高程越高,流速、流态及流速分布越好,考虑临近工程设计河底高程 56.5 m,故选择 56.5 m 作为潜坝高程
	QBG2			55.0	
	QBG3			53.0	
	QBG4			51.0	
潜坝数量优化试验	QBL1	开挖区+潜坝 1 [#] 、2 [#] 、4 [#]	3	56.5	5 种工况在控制区域内均形成一定宽度的缓流区,对比流速流态分布,工况 QBL2 和工况 QBL3 整治效果均较好。取消潜坝 3 [#] 后,潜坝 3 [#] 以上航段流场基本没有变化,潜坝 3 [#] 原坝顶位置流速明显减少,其下游流速稍优增加,但是较工程前有一定幅度减小。同时,工况 QBL3 更节约工程量和投资,故选择工况 QBL3
	QBL2	开挖区+潜坝 1 [#] 、2 [#] 、3 [#]	3		
	QBL3	开挖区+潜坝 1 [#] 、2 [#]	2		
	QBL4	开挖区+潜坝 1 [#] 、4 [#]	2		
	QBL5	开挖区+潜坝 1 [#] 、3 [#]	2		
潜坝位置优化	QBW1	开挖区+潜坝 1A [#] (位于 2 [#] 上游 245 m)、2 [#]	2	56.5	潜坝 1 [#] 起到很好的掩护作用,对比流场分布,潜坝 2 [#] 及其下游差异很小。对于上游过河区的流速,工况 QBW1 整体小于 QBW2,故选择工况 QBW1
	QBW2	开挖区+潜坝 1B [#] (位于 2 [#] 上游 185 m)、2 [#]			
潜坝长度优化	QBC1	开挖区+潜坝 1A [#] (56 m)、2 [#]	2	56.5	潜坝 1A [#] 附近流场分布差异很小,但潜坝 2 [#] 附近工况 QBC1 比 QBC2 流速明显减小,加之长潜坝对潜坝 2 [#] 的遮掩更大,坝顶跌水和流态更好。同时,潜坝 1A [#] 占据的断面面积(826 m ²)小于对岸开挖断面面积(1 024 m ²),不会对河心流速等造成明显影响,故选择工况 QBC1
	QBC2	开挖区+潜坝 1A [#] (46 m)、2 [#]			

4.3.3 工程方案比选

根据整治目标和优化方案,从工程前后通航水流条件改善程度、莲沱弯道内不良流态改变程度、遥控自航船模试验结果、工程量以及施工难易程度进行综合比较。整治方案对比见表 5。

表 5 整治方案对比
Tab. 5 Comparison of channel regulation plans

对比内容	位置	名称	方案 1	方案 2	方案比较
通航水流条件改善	水田角—狮子脑	水位降落	0.08 m	0.08 m	相当
		最大比降	减小 2.2‰	减小 1.29‰	方案 1 稍优
		水田角附近流速	减小 0.4~0.5 m/s	减小 0.1~0.2 m/s	方案 1 稍优
		水田角以上上水航线流速	减小 0.3~0.85 m/s	减小 0.4~1.0 m/s	方案 2 稍优
		上水航线航宽	增加 40~50 m	增加 20~40 m	方案 1 稍优
		下水航线航速	减小 0.2~0.5 m/s	增加 0.1~0.4 m/s	方案 1 稍优
	过河段	上水航线流速	右侧减小 0.3~0.5 m/s 左侧增加 0.1 m/s	右侧减小 0.2~1 m/s 左侧增加 0.2~0.4 m/s	方案 1 稍优
		下水航线流速	减小 0.2~0.3 m/s	增加 0.2~0.3 m/s	方案 1 稍优
		比降变化	不超过 1‰	0	相当
	梳子溪以上	上水航线流速	不超过 0.1 m/s	不超过 0.1 m/s	相当
		下水航线流速	减小 0.1~0.3 m/s	增加 0.1~0.3 m/s	方案 1 稍优
	莲沱弯道内主流区	下水航线流速	减小 0.1~0.4 m/s	增加 0.1 m/s	方案 1 稍优
		适航宽度	增加 50 m	基本不变	方案 1 稍优

续表5

对比内容	位置	名称	方案 1	方案 2	方案比较
弯道内不良 流态改变	主流两侧回流	回流分布情况	次生回流消失	次生回流消失	相当
		回流强度	右侧无变化 左侧减小 0.15 m/s	右侧增加 0.2 m/s 左侧减小 0.2 m/s	方案 1 稍优
		回流范围	减小 50~70 m	减小 50~80 m	相当
		不良流态	明显减弱	明显减弱	相当
船模试验结果	-	效果	达到整治目标	达到整治目标	相当
工程量	-	炸礁及抛填量	炸礁 76.38 万 m ³ 抛填 72 万 m ³	炸礁 72.76 万 m ³ 抛填 68.21 万 m ³	方案 2 稍优
		整治建筑物	无	2 座潜坝	方案 1 稍优
施工难度	-	炸礁水深	10~30 m	10~36.5 m	方案 1 稍优
		抛填	填深沱左侧,平顺河床	平抛+缓坡+局部抛填	方案 1 稍优
		筑坝	无	坝体高,坡度陡,水深大	方案 1 稍优

注：“减小”表示与工程前相比减小，“增加”表示与工程前相比增大。

结果表明,优化后的两方案均能达到整治效果。1) 从通航水流条件改善来看,水田角—狮子脑上水航线流速方案 2 优于方案 1,且流速下降均较明显,但试验河段在比降、流速、航宽等方面,方案 1 均优于方案 2。2) 从弯道内不良流态改善来看,在回流强度方面,方案 1 稍优;在回流分布、回流范围和不良流态改善等方面,两方案相当。3) 从船模试验结果角度来看,两方案相当。4) 从工程量和施工难度来看,在工程量方面两方

案相当;在施工难度方面,方案 1 优于方案 2。因此,推荐优化后的方案 1 为较优方案。

4.3.4 整治效果分析

工程于 2017 年 11 月开工,2021 年 7 月完工。完工后历经一个汛期,工程河段河势总体稳定,航道水流条件明显改善。2021 年 9 月在 3.5 万 m³/s 流量级下进行水文原型观测和 3 000 吨级实船适航试验。整治前后主要参数对比见表 6。

表 6 整治前后参数对比
Tab. 6 Comparison of parameters before and after regulation

阶段	最大纵比降	航线最大流速	沿程最大流速	不良流态	对岸航速
整治前	左侧 0.75‰ 右侧 0.75‰	上行 3.3~3.7 m/s 下行 3.36~3.76 m/s	水田角滩口 处 3.8 m/s	主流宽度 170 m,左岸回流宽度 210 m,左岸回流强度 1.47 m/s; 右岸回流宽度 170 m,右岸回流强度 1.04 m/s	2.4 km/h
整治后	左侧 0.17‰ 右侧 0.2‰	上行 2.0~2.9 m/s 下行 2.94~3.08 m/s	水田角滩口 处 3.34 m/s	主流宽度 250 m,左岸回流宽度 170 m,左岸回流强度 0.72 m/s; 右岸回流宽度 130 m,右岸回流强度 0.45 m/s	除过河区处 3.79 km/h, 其余均大于 4.0 km/h

结果表明:1) 比降。左岸最大纵比降出现在晒经坪,由工程前 0.75‰降低至 0.17‰;右岸最大纵比降出现在狮子脑—水田角,由工程前 0.75‰降低至 0.2‰。2) 流速。整治后上行航线表面流速降低至 2.0~2.9 m/s。3) 不良流态。整治后主流宽度增加 80 m,回流范围和强度明显降低,不良流态显著削弱。4) 对岸航速。试验船舶可顺利通过工程河段,上行平均对岸航速

7.44 km/h,在过河区出现最小对岸航速 3.79 km/h,历时不足 1 min,其余航段上行对岸航速均在 4 km/h 以上。在过河区对岸航速小于 4 km/h 的原因为,过河区船舶漂角为 36.6°,实际航速约 5.2 km/h。因此,整治后,能够将 3 000 吨级单船限制通航流量从 2.5 万 m³/s 提高到 3.5 万 m³/s,泡漩、回流等碍航副流流态和通航水流条件得到显著改善,进一步提高了通航安全。

5 结论

1) 根据历史资料可知,三峡—葛洲坝两坝间河段深泓线、河道岸线、横断面基本稳定。莲沱河段多年来河岸及滩槽位置及范围、深泓线平面位置及凸凹位置、断面形态基本一致,河段基本处于稳定状态。

2) 通过分析,莲沱河段碍航特性为上水航流速急、弯道流态险恶和梯级枢纽联合调度偶然影响,其复杂的地形和湍急的水流是形成滩险的主要因素,叠加梯级枢纽联合调度偶然性的不利影响,形成水田角滩险,给两坝间船舶通航造成一定的影响。

3) 采用定床正态物理模型和遥控自航船模试验对三峡—葛洲坝两坝间河段急流滩整治方案进行确定和优化。工程实施后,在 $3.5\text{万 m}^3/\text{s}$ 流量级下最大比降、上行航线表面流速、流态等达到预期目标,实船适航试验船舶能够自航安全上滩,达到工程整治目标。

4) 对于梯级枢纽峡谷型洪水急流滩的整治较为复杂,需要综合考虑梯级枢纽联合调度、河段水流条件及特殊河床地形等因素,采用炸礁、清渣和填槽相结合的手段,以扩大泄水断面,平顺深沱处水流,消除泡漩水等不良流态的方法是有可行的。建议对三峡—葛洲坝两坝间其他洪水急流滩的整治进行研究,经过工程建设,改善两坝间水流条件,补齐长江航运发展“短板”,更好地发挥三峡工程航运效益。

参考文献:

- [1] 曹民雄,费德明,李花白,等.石质急流滩航道整治的原则与方法[J].水运工程,2004(11):75-79.
CAO M X, FEI D M, LI H B, et al. Principle and method of waterway regulation in rock rapids[J]. Port & waterway engineering, 2004(11): 75-79.
- [2] 曾涛,张文,张晓琴.长江上游急流滩整治思路分析[J].水运工程,2014(1):128-133.
ZENG T, ZHANG W, ZHANG X Q. Regulation idea of rapids reach in upper Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2014(1): 128-133.
- [3] 袁涛峰,曾涛,马宪浩.长江三峡两坝间河段航道整治方案[J].中国港湾建设,2012(1):15-18.
YUAN T F, ZENG T, MA X H. Channel regulation in river reach between the Three Gorges Dam and the Gezhouba Dam[J]. China harbour engineering, 2012(1): 15-18.
- [4] 李冬,王晓燕.长江中游蕲春水道航道整治工程方案[J].水运工程,2023(4):155-160,173.
LI D, WANG X Y. Channel regulation project scheme of Qichun waterway in middle reaches of the Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2023(4): 155-160, 173.
- [5] 方佳敏,田栋.长江下游贵池水道航道治理工程方案[J].水运工程,2022(1):144-149.
FANG J M, TIAN D. Waterway regulation scheme for Guichi waterway in the lower reach of the Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2022(1): 144-149.
- [6] 李顺超,邓涯,何熙,等.岷江下游中枯水碍航浅急滩段航道整治方案[J].水运工程,2022(12):158-163.
LI S C, DENG Y, HE X, et al. Channel regulation scheme for navigation-obstructing shallow and rapid beaches during normal water level and dry seasons in downstream of Minjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 158-163.
- [7] 刘长波,朱玉君,吴双,等.长江上游老虎梁险滩航道整治模型试验研究[J].水运工程,2023(9):126-132,157.
LIU C B, ZHU Y J, WU S, et al. Model tests of channel regulation of Laohuliang Beach in upper Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 126-132, 157.
- [8] 赵鹏飞,王玮.长直窄深型急滩治理方法研究[J].水利规划与设计,2016(1):89-92.
ZHAO P F, WANG W. Study on treatment method of long, straight, narrow and deep rapids[J]. Water resources planning and design, 2016(1): 89-92.
- [9] 郭琦,虞蓓蓓,彭毕帅.长江上游火焰碛滩航道整治工程方案[J].水运工程,2024(11):108-114,122.
GUO Q, TUO Y J, PENG B S. Channel regulation project plan for Huoyanqi Beach in upper reach of Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2024 (11): 108-114, 122.
- [10] 王玮,许光祥.常规急滩整治方法在库区急滩治理中的局限性[J].水运工程,2016(3):120-123.
WANG W, XU G X. Limitations of conventional rapids regulation methods in reservoir rapids' renovation[J]. Port & waterway engineering, 2016(3): 120-123.

(下转第143页)