



金沙江向家坝库尾拱桥沟—佛滩河段 航道整治效果分析

姚金炳¹, 赵志舟²

(1. 云南省港航投资建设有限公司, 云南 昆明 650000; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 拱桥沟滩为向家坝库尾消落期溪口卵石枯水浅滩及中洪水危险滩, 佛滩为窄槽型中洪水危险滩, 两处滩险距离较近, 通航环境较为复杂。依据长江、金沙江多年来船舶上滩能力的相关研究资料, 拟合得到消滩综合判数 E 的允许值。依据滩险碍航特征, 拱桥沟滩采取清障增加航道尺度并增加泄水面积、佛滩清除进口凸出礁石以平顺水流的整治措施。采取实船适航试验与数学模型相结合的方法对航道工程的整治效果进行分析与评价。数学模型计算结果表明, 整治后消落期 $6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时拱桥沟滩、佛滩 E 值由整治前的 0.60 、 0.71 m 减小为 0.48 、 0.62 m , 挑流有所减缓; 实船适航工况下试验船舶能安全通过工程河段, 说明已实施航道工程达到设计要求的整治效果。综合考虑溪洛渡坝下附近河段的通航条件, 建议该工程河段消落期禁航流量为 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

关键词: 山区河流; 变动回水区; 急流滩; 航道整治; 适航试验

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0110-08

Effect of channel regulation in Gongqiaogou–Fotan reaches of end section of Xiangjiaba Reservoir in Jinsha River

YAO Jinbing¹, ZHAO Zhizhou²

(1. Yunnan Port and Shipping Investment and Construction Co., Ltd., Kunming 650000, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Gongqiaogou reaches is a pebble shoal during dry season and a brook outlet rapids during middle and the flood period on the end section of Xiangjiaba Reservoir during subsidence period, and the Fotan is a narrow channel type rapids in pre-flood falling stage of the reservoir. The two beach are close in distance and the navigation environment is relatively complex. On the basis of the relevant research on the beaches carrying capacity of ships in the Yangtze River and Jinsha River, the allowable value of the comprehensive judgment E for beach clearance is fitted. According to the characteristics of rapids and navigation obstruction, the measures are adopted such as clearing obstacles to increase the channel scale and increase the discharge area of the Gongqiaogou reaches, and removing protruding reefs at the entrance of the Fotan rapids to smooth the water flow. The regulation effect of waterway engineering is analyzed and evaluated by actual ship seaworthiness test and mathematical models calculation. The mathematical model calculation results show that, the E value of hydraulic parameter of rapids abating of the Gongqiaogou reaches decreased from 0.60 to 0.48 m at $6,000\text{ m}^3/\text{s}$ during the subsidence period after regulation, and the Fotan rapids decreased from 0.71 to 0.62 m , and the flow diversion is slowed down. Under the actual ship seaworthiness test conditions, the ships can safely pass through the regulated river section, indicating that the regulation effect of the waterway engineering meets the design requirement. Taking into account the navigation conditions of the river section near the Xiluodu Dam, it is recommended that the restricted discharge during the subsidence period of this river section is $7,000\text{ m}^3/\text{s}$.

Keywords: mountainous river; fluctuating backwater area; rapids; waterway regulation; seaworthiness test

收稿日期: 2025-03-06

作者简介: 姚金炳(1980—), 男, 高级工程师, 从事港航工程管理工作。

金沙江向家坝成库前溪洛渡—新市镇 80.75 km 为Ⅵ级航道, 新市镇—向家坝 75.86 km 为Ⅴ级航道, 河道处于高山深谷, 滩多水急流态紊乱, 航道自然条件差。蓄水后库区航道等级、航道尺度标准应综合考虑设计船舶的适航条件、整治滩险的规模及整治措施^[1-3]; 库尾河段急流险滩的整治仍主要采取扩大泄水面积的整治措施^[4-6], 此方法应用于向家坝库尾河段的航道整治效果还有待于实践检验。此外, 航道整治工程项目完工后建设单位应组织观测整治河段的水流流态和航道尺度等参数, 并根据设计要求组织实船适航试验以检验整治效果^[7-8]。位于金沙江向家坝库尾的佛滩—拱桥沟滩河段, 存在消落期枯水流量下航道尺度不足与中洪水流量下船舶过滩能力不足的碍航问题; 如何选择实船适航试验工况、科学检验各滩险的航道整治效果成为实际工作中面临的难题。本文考虑上游电站下泄流量与下游电站坝前水位的不同典型组合工况, 采取实船适航试验与数学模型试验相结合的方法, 可以较全面地评价航道工程的整治效果。

1 工程河段概况

1.1 工程概况

金沙江向家坝坝址—溪洛渡坝址航道长度为 156.61 km, 位于长江金沙江下游段, 是云南省与四川省通往川渝经济区、华中、华东地区以及我国长江经济带最重要的内河水路运输通道。依据向家坝坝前水位为参数的溪洛渡坝下观测处水位-

流量关系, 向家坝正常蓄水位 380 m 回水至坝址下游, 376 m 回水至大河湾码头附近, 370 m 回水末端在大坝下游 14 km 位置^[9]。

云南省实施了溪洛渡—水富段的高等级航道建设工程, 对向家坝水库变动回水区黄毛坝滩、大沙坝滩、陆营沟滩、黄龙滩、佛滩、拱桥沟滩等 6 个滩险进行航道整治, 位置见图 1。工程河段河床组成大多为基岩, 并夹有少量砂卵石, 河床组成较为坚硬, 水流对其侵蚀作用比较缓慢, 对河床的演变起着一定的制约作用, 多年来河床基本稳定。

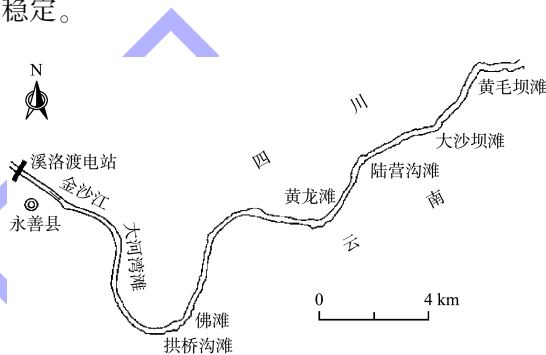


图 1 整治河段地理位置

Fig. 1 Geographical location of regulation river section

金沙江拱桥沟滩、佛滩位于溪洛渡大坝下游 11.24、12.58 km, 是两道距离较近连续碍航滩险, 拱桥沟—佛滩河段平面为微弯曲形态, 见图 2。上段拱桥沟相对宽浅, 主槽位于左岸, 拱桥沟滩右岸有冲沟汇入, 有大漂石和卵石堆积, 导致枯水期航道局部出浅; 此外, 受突嘴挑流影响滩口处的流速较大, 形成中洪水急流滩。工程河段横断面见图 3。

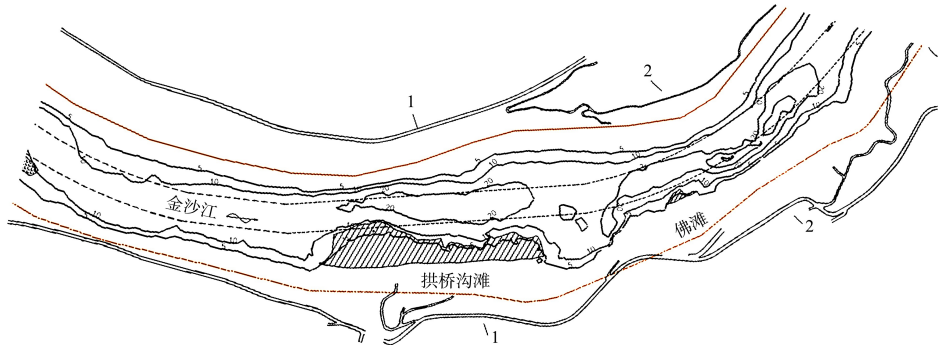


图 2 拱桥沟—佛滩河段河势

Fig. 2 River regime of Gongqiaogou-Fotan reaches of Jinsha River

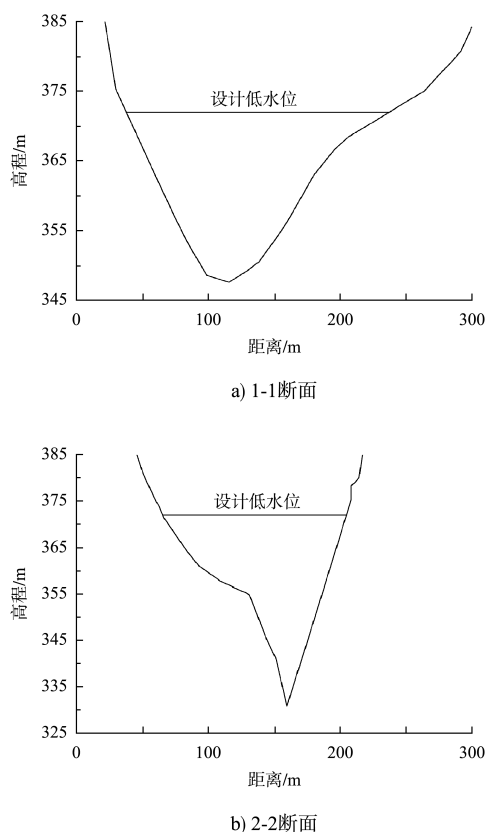


图3 工程河段横断面

Fig. 3 Cross section of engineering river section

1.2 水文

溪洛渡水电站位于距合江门 190 km, 上距白鹤滩梯级 195 km, 是一座以发电为主, 兼具防洪、拦沙和改善下游航运条件等巨大综合效益的工程。溪洛渡电站于 2013 年 5 月下闸蓄水, 2014 年 7 月全部机组投产。2021 年溪洛渡日均出库流量过程见图 4a), 溪洛渡 2013—2018 年多年出库月平均流量见表 1。

表1 溪洛渡多年出库月平均流量

Tab. 1 Multi year monthly average reservoir outflow from Xiluodu Reservoir

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	2 249	1 979	2 204	2 502	2 521	3 447	7 391	7 763	8 286	5 940	3 125	2 188

1.3 河床演变

2012、2021 年蓄水前后工程河段的深泓线平面位置变化见图 5。蓄水前工程河段水位较低, 拱桥沟滩凸嘴处的枯水位 362.2 m、佛滩凸嘴处的枯水位 361.20 m, 蓄水后位于库尾河段的凸嘴长期

2012 年 10 月向家坝大坝下闸蓄水, 2013 年 7 月蓄水至 370 m。向家坝枢纽设计运行正常蓄水位 380 m、死水位与防洪汛限水位均为 370 m。向家坝汛期 6 月中旬—9 月上旬按汛期限水位 370 m 运行, 9 月底蓄至正常蓄水位 380 m; 10—12 月一般维持在正常蓄水位或附近水位运行; 12 月下旬—6 月上旬为枯水期, 一般在 4、5 月份来水较丰时回蓄部分库容, 至 6 月上旬末水库水位降至 370 m。2021 年向家坝日均上游水位过程线见图 4b)。

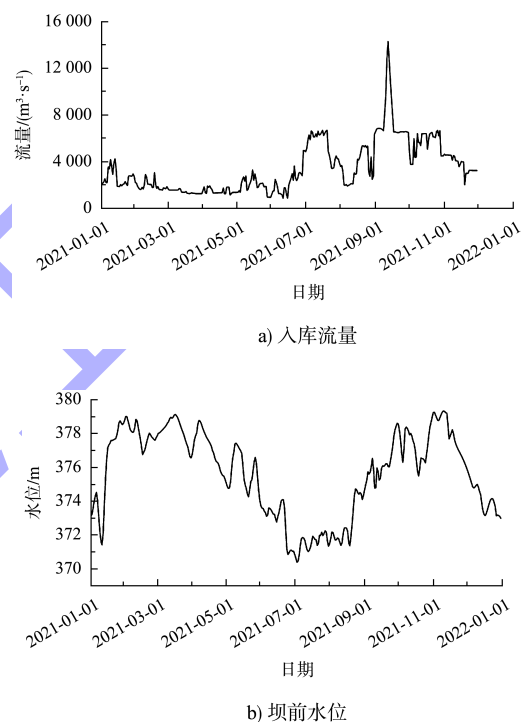


图4 2021 年向家坝入库流量与坝前水位

Fig. 4 Inflow into Xiangjiaba Reservoir and water level in front of dam in 2021

淹没挑流, 导致 2021 年佛滩凸嘴处深泓线向左岸偏移 2~8 m, 深槽刷深 3~4 m, 拱桥沟滩凸嘴处深泓线向左岸偏移 10~20 m, 但总体上工程河段滩段的深泓线变化相对较小, 多年来保持总体稳定。

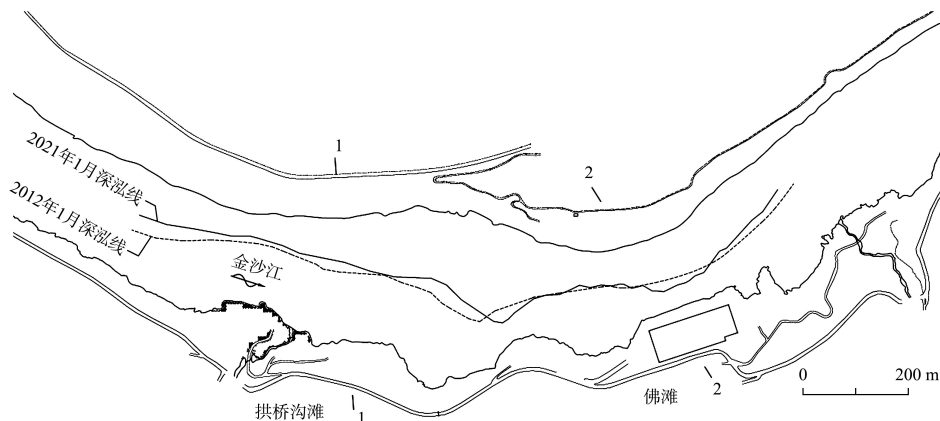


图 5 深泓线平面位置变化

Fig. 5 Changes in horizontal position of talweg

1.4 整治标准

1.4.1 航道等级

金沙江向家坝库尾河段按Ⅲ级航道标准进行建设,设计船舶采用 1 000 吨级标准货船,船舶尺度为 68 m×12.8 m×2.6 m(长×宽×设计吃水);设计航道宽度为 60 m、水深 3 m、最小弯曲半径 480 m,设计最低通航水位保证率 98%。

1.4.2 设计通航流量工况

设计最低通航水位应取规定保证率的入库流量与相应的坝前消落水位多组回水曲线的下包络线作为沿程各点的设计最低通航水位,向家坝库尾设计最低通航水位采用滩段流量 1 200 m³/s、坝前为汛限水位 370 m 的工况时的水位值。

1.4.3 船舶的过滩能力指标

依据金沙江多年来对船舶上滩能力的实测资料,并参照长江过滩能力指标相关研究成果^[10],经式(1)计算得到该工程河段的消滩综合判数 E 的允许值为 0.60 m。

$$E = \frac{v^2}{2g} + 2LJ \quad (1)$$

式中: v 为流速, m/s; L 为设计船长, m, 1 000 吨级标准货船取 68 m; g 为重力加速度, m/s²; J 为滩段水面坡降。

2 碍航特征分析

2.1 数学模型计算

通过验证后的平面二维水流数学模型, 共进

行整治前 4 个工况下工程河段二维水流数学模型计算, 工况见表 2。工况 1 为设计最低通航流量 1 200 m³/s、坝前为汛限水位 370 m 工况, 工况 2~4 则考虑坝前水位为保证率 86% 的中洪水流量情况。

表 2 数学模型计算工况

Tab. 2 Mathematical model calculation conditions

工况	流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	滩段出口 水位/m	工况特征
1	1 200	370.04	流量保证率 98%, 坝前消落水位 370 m
2	3 000	372.00	流量保证率 65%, 坝前水位保证率 86%
3	6 000	372.00	流量保证率 28%, 坝前水位保证率 86%
4	9 000	372.00	流量保证率 7.7%, 坝前水位保证率 86%

2.2 碍航特征

2.2.1 拱桥沟滩

拱桥沟滩右岸突嘴附近受突嘴挑流影响, 水流弯曲, 滩口处流速较大, 3 000 m³/s 流量主流最大流速 1.89 m/s, 水流较缓。中洪水 6 000、9 000 m³/s 流量, 出口为坝前 86% 保证率水位工况下, 工程河段主流最大流速分别为 2.89、3.63 m/s, 见图 6; 消滩指标 E 值分别为 0.60、0.86 m, 为中洪水急流滩。

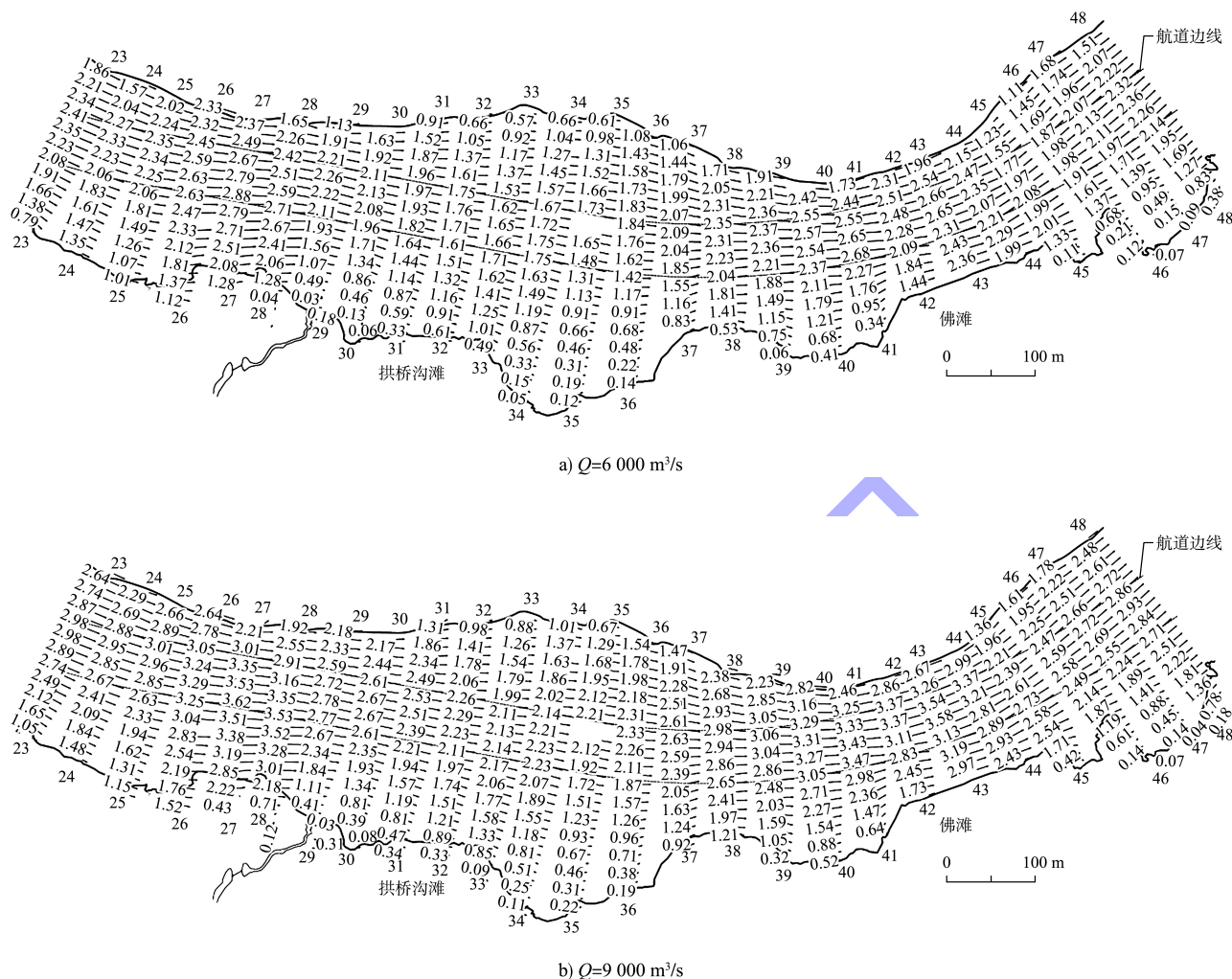


图6 整治前中洪水流量下流速分布

Fig. 6 Velocity distribution before regulation at middle and flood flow

2.2.2 佛滩

佛滩位于弯曲狭窄河段的进口,窄槽进口上游 90 m 右岸有突出岩嘴挑流碍航。在 375 m 消落期水位时,上游 37#断面、下游 48#断面位置水面宽度为 205 m 左右,下游 41#~44#断面水面宽度收缩为 145 m。 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量工况 2 时主流流速 1.55 m/s ,消滩综合判数 E 为 0.35 m ;消落期 $6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量工况 3、 $9\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量工况 4 时主流流速分别为 2.75 、 3.58 m/s ,消滩指标 E 值分别为 0.72 、 1.13 m ,形成窄槽急流滩碍航。

3 整治方案与整治效果分析

3.1 整治方案

1) 拱桥沟滩。滩段按航道弯曲半径 900 m 、

双线航道宽 60 m 布置,疏浚区坡脚线沿航道右边线向外侧偏移 65 m ,将高于设计河底高程以上的卵石夹漂石覆盖层和礁石清除,清障区伸入右侧航道边线的最大距离约 11 m ,用以扩大过水断面面积、减缓流速。拱桥沟滩 2020 年 9 月—2022 年 4 月进行整治,共疏浚 $31\,146\text{ m}^3$ 、清礁 $16\,078\text{ m}^3$ 。

2) 佛滩。按航道弯曲半径 755 m 、航宽 60 m 布置,对航道窄槽进口右岸礁石进行清炸,以平顺水流、减缓流速,2020 年 12 月佛滩整治共清礁 492 m^3 。清礁区坡脚线沿航道右边线向外侧偏移 30 m 布置。

3.2 数学模型整治效果分析

3.2.1 航道水深

整治后佛滩横断面地形位于设计高程线以下,设计最低通航流量工况下 60 m 航宽内最小航道水

深 14 m, 满足 3 m 航道水深标准; 整治后拱桥沟滩最浅点高程 362.98 m、相应水深 7.20 m, 满足航道水深标准。

3.2.2 整治前后水流条件变化

拱桥沟滩将航道右岸高于设计河底高程以上的卵石夹漂石覆盖层和礁石清除, 整治后 6 000 m³/s

流量工况 3 时主流流速减小 0.03 ~ 0.44 m/s, 9 000 m³/s 流量工况 4 时主流流速减小 0.06 ~ 0.56 m/s。在各级流量下, 凸嘴处的挑流明显减缓, 流量 6 000 m³/s 时 27[#]断面处水流流向右偏约 5°, 见图 7。

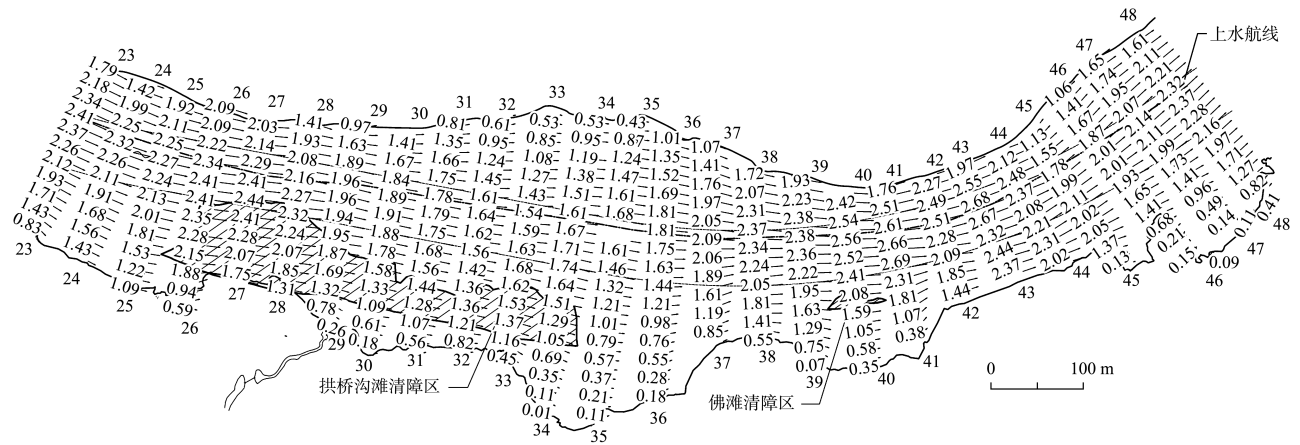


图 7 整治后 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流速分布

Fig. 7 Velocity distribution after regulation at $Q=6,000\text{ m}^3/\text{s}$

由于佛滩清礁工程量较小, 整治后 6 000、9 000 m³/s 流量主流流速减小仅 0.02 m/s, 工程前后主流的流向并没有显著变化, 但在清礁区附近的挑流略有减缓, 中洪水时 42[#]断面清礁区附近处水流与航线方向的夹角减小约 10°。

3.2.3 过滩能力变化

拱桥沟滩整治后上行航线消滩水力指标沿程变化见图 8, 中枯水流量工况下水流平缓、航行阻力也小。中洪水时上行阻力相对较大, 6 000 m³/s 流量时 E 最大值由整治前的 0.60 m 减小为 0.48 m, 9 000 m³/s 流量时 E 最大值由整治前的 0.86 m 减小为 0.71 m, 整治后航道内水流条件基本满足船舶自航上滩要求。

佛滩整治后中洪水时上行阻力仍相对较大, 6 000 m³/s 流量时 E 值由整治前 0.71 m 减小为 0.62 m, 基本满足船舶自航上滩要求。9 000 m³/s 流量时 E 值为 0.75 ~ 1.13 m, 与整治前 0.73 ~ 1.10 m 相近, 船舶难以自航上滩。

3.3 实船适航试验结果分析

3.3.1 试验船舶与测试设备

本文试验船舶选用“金川 888”, 试验船舶主要技术参数见表 3。根据试验承担单位的要求装货 1 200 t, 装货后船舶实际艏吃水 2.39 m、舢与艉吃水 2.6 m, 满足该工程设计船型的吃水要求。

实船适航试验为了确保各测量内容的时间同步, 在试验船上建立了局域网, 将各测量设备整合成一个系统, 实现了数据的同步采集。在舢和舉分别安装了一台实时动态载波相位差分技术定位端, 以测量船舶的航行轨迹、航速和舢方向。舢方向通过电子罗盘测量, 而高分辨率摄像机则用于测量螺旋桨转速和舵角。

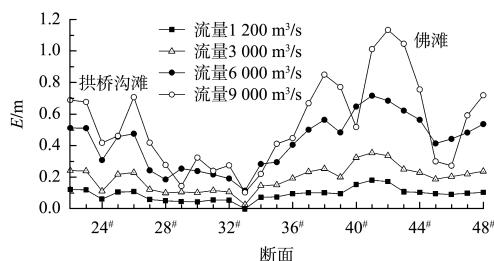


图 8 整治后上行航线消滩水力指标变化

Fig. 8 Variation of hydraulic parameter of rapids abating after regulation

表 3 试验船舶主要技术参数
Tab. 3 Performance table of test ships

总长/m	船宽/m	型深/m	总质量/t	满载排水量/t	空载排水量/t	满载吃水/m	空载吃水/m	最大船高/m	参考载货量(BC级、J1)/t
77.8	10.8	3.78	1 055	2 036.38	503.45	2.98	0.97	9.9	1 504

3.3.2 航道弯曲半径与航宽校核

拱桥沟滩设计航道弯曲半径 900 m, 双线航道宽 60 m; 佛滩设计航道弯曲半径 755 m, 双线航道宽 60 m, 弯曲段航道加宽值 ΔB 可按式估算:

$$\Delta B = \frac{L^2}{2R+B} \quad (2)$$

式中: L 为顶推船队长度, m; R 为航道弯曲半径, m; B 为直线段航道标准宽度, m。设计阶段计算得佛滩弯曲段右侧航道加宽值为 14 m, 拱桥沟滩弯曲段右侧航道加宽值为 17 m。

顺直航段航迹线宽计算时采取的漂角为 6° , 实测适航试验中“金川 888”通过拱桥沟滩河段时最大漂角为 8.82° , 通过佛滩河段时最大漂角为 6.10° , 说明弯道段航道加宽是必要的。

3.3.3 适航船舶操纵特性

2023 年 6 月实船适航试验当日滩段流量为 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、向家坝水位 374.40 m, 航段最大流速 $1.36\sim 1.85\text{ m/s}$, 最小流速 $0.54\sim 1.13\text{ m/s}$ 。试验船舶上行时沿航道左岸的缓流前进, 下行则沿河心主流航行, 均在设计航道的范围内, 符合船舶航行的规则规定。

上行适航船舶操纵特性结果见表 4。拱桥沟滩河段最小航速为 2.10 m/s , 主机功率仅使用了 66%; 佛滩河段最小航速为 1.93 m/s , 主机功率仅使用了 63%。试验中船舶无需使用满舵、大舵或急舵控制艏方向, 舵效表现良好, 航道条件满足设计船型的安全航行要求。

表 4 适航船舶操纵参数

Tab. 4 Maneuvering parameters of seaworthiness ship

航段	航向	主机最大转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	航速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	舵角/ ($^\circ$)	最大漂角/ ($^\circ$)
拱桥沟滩	上行	870	2.10	右 11° ~左 15°	3.99
	下行	742	4.21	右 6° ~左 12°	8.82
佛滩	上行	872	1.93	右 14° ~左 24°	6.10
	下行	791	4.20	右 6° ~左 12°	4.16

3.4 禁航流量工况

在向家坝低水位运行、上游溪洛渡电站下泄流量大于 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时大河湾滩(溪洛渡坝下约 5.5 km)和伍家沱滩(溪洛渡坝下约 7.5 km)滩段流速将达到近 5 m/s , 船舶无法上滩。

前述分析表明, 佛滩河段距离溪洛渡 12.3 km, 此滩段在流量 $9\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、库水位 372.00 m 工况下时滩段 E 值较大, 船舶不能自航上滩。

工程河段距离溪洛渡大坝较近, 应考虑电站下泄非恒定流对通航水流条件的影响^[11]。在向家坝在接近正常蓄水位运行、溪洛渡下泄流量 $5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 且最大小时流量变幅 $2\,450\text{ m}^3/\text{s}$, 佛滩小时最大水位差 0.59 m , 最大流速 2 m/s , 满足通航条件要求^[12]。

综上所述, 与上游相近的大河湾滩和伍家沱滩一致, 在向家坝低水位运行时本文工程河段禁航流量采用 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 应采取停航等通航安全管理措施。

4 结论

1) 适航试验不能反映不同典型工况下库尾河段的通航环境, 本文工程河段采取实船适航试验与整治后工程河段数学模型相结合的方法, 可以较全面地评价项目的整治效果。

2) 整治工程实施后在消落期 $6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时拱桥沟滩、佛滩 E 值由整治前 0.60、0.71 m 减小为 0.48、0.62 m, 且挑流有所减缓, 实船适航工况下试验船舶能安全通过工程河段, 说明已实施航道工程达到设计要求的整治效果。

3) 综合考虑溪洛渡坝下附近河段的通航条件, 建议本文工程河段消落期禁航流量为 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

参考文献:

- [1] 谢玉杰, 余祥, 李家世. 嘉陵江亭子口枢纽变动回水区通航流量及保证率分析[J]. 水运工程, 2021(1): 174-177, 201.
- XIE Y J, YU X, LI J S. Analysis of navigable discharge and guarantee rate in fluctuating backwater area of the Jialing River Tingzikou project [J]. Port & waterway engineering, 2021(1): 174-177, 201.
- [2] 陈婷婷, 周玉洁, 赵江, 等. 高坝库区和变动回水区设计最低通航水位的确定[J]. 水运工程, 2023(S1): 80-84.
- CHEN T T, ZHOU Y J, ZHAO J, et al. Determination of lowest navigable water level design in high dam reservoir areas and fluctuating backwater areas[J]. Port & waterway engineering, 2023(S1): 80-84.
- [3] 吴林. 金沙江向家坝库区航道定级研究[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(4): 14-15.
- WU L. Research on grading of navigation channels in the Xiangjiaba Reservoir area of Jinsha River [J]. China water transport (the second half of the month), 2021, 21(4): 14-15.
- [4] 苏丽. 三峡变动回水区广阳坝河段河床演变及整治方案[J]. 水运工程, 2023(4): 149-154.
- SU L. Riverbed evolution and waterway regulation scheme of Guangyangba reach in fluctuating backwater area of the Three Gorges Reservoir[J]. Port & waterway engineering, 2023(4): 149-154.
- [5] 周家俞, 徐奎, 黄成林. 山区河流枢纽库尾河段航道整治模型试验研究[J]. 水运工程, 2018(10): 143-147.
- ZHOU J Y, XU K, HUANG C L. Model experimental study on waterway regulation in the tail reach of the mountainous river hub [J]. Port & waterway engineering, 2018(10): 143-147.
- [6] 曹民雄, 蔡国正, 王秀红. 长江上游和尚岩滩群航道整治研究[J]. 水利水运工程学报, 2010(3): 1-9.
- CAO M X, CAI G Z, WANG X H. Waterway regulation of Monk Rock rapids group in the upper reaches of the Yangtze River [J]. Hydro-science and engineering, 2010(3): 1-9.
- [7] 肖宝文. 浅谈西江(界首至肇庆)航道扩能升级工程实船适航试验[J]. 珠江水运, 2021(3): 89-90.
- XIAO B W. Ship navigation test of the Xijiang River (Jieshou to Zhaoqing River section) channel expansion and upgrading project [J]. Pearl River water transport, 2021(3): 89-90.
- [8] 汪再荣, 杨忠超. 三峡库尾乌江河口—涪陵白涛段航道大型船舶适航条件分析[J]. 水运工程, 2022(8): 148-154.
- WANG Z R, YANG Z C. Navigation condition of large ships in channel from Wujiang estuary to Fuling Baitao at tail of the Three Gorges Reservoir [J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 148-154.
- [9] 四川省交通勘察设计研究院有限公司. 金沙江溪洛渡—水富航道建设工程工程可行性研究报告[R]. 成都: 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 2019.
- Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd. Feasibility study report on the construction project of Jinsha River Xiluodu to Shuifu Channel [R]. Chengdu: Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., 2019.
- [10] 许光祥, 蒋孜伟, 王松宁, 等. 山区航道机动船消滩水力指标的无因次表达及计算[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(5): 72-81.
- XU G X, JIANG Z W, WANG S N, et al. Dimensionless expression and calculation of rapids abating hydraulic index for motor ship in mountainous waterway [J]. Advanced engineering sciences, 2022, 54(5): 72-81.
- [11] 杜泽东, 董先勇, 秦蕾蕾, 等. 溪洛渡水电站坝下游河道非恒定流特性研究[J]. 人民长江, 2023, 54(1): 200-205.
- DU Z D, DONG X Y, QIN L L, et al. Study on unsteady flow characteristics in downstream channel of Xiluodu Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2023, 54(1): 200-205.
- [12] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 云南省金沙江溪洛渡—水富高等级航道建设工程施工图设计[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院, 2020.
- CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd. Construction drawing design for the high grade waterway construction project from Xiluodu to Shuifu on Jinsha River in Yunnan Province [R]. Wuhan: CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., 2020.

(本文编辑 王璁)