

三峡库尾和尚滩段错口型急滩整治方案

刘 岩,樊书刚,杨祥飞

(长江重庆航运工程勘察设计院,重庆401147)

摘要: 自三峡水库蓄水至175 m 以来,长江上游库区段航道条件得到大幅改善,但库尾段航道在汛期仍存在多处礁石碍 航问题,需通过整治措施改善通航条件。以长江上游涪陵—丰都河段错口型急滩——和尚滩为例,针对其汛期碍航问题, 通过收集实测资料并结合二维水流数学模型,分析其碍航成因和特点,在此基础上,提出相应的整治方案,分析整治效果。 结果表明,通过采取切除右岸和尚滩和左岸郭家嘴礁石的整治措施可有效改善和尚滩汛期流速急、礁石前沿横流强、后方 回流旺盛等不良流态问题。研究成果可为三峡库尾段错口型急滩的整治提供技术支持。

关键词:三峡库区;错口型急滩;碍航特性;数学模型;整治方案
 中图分类号:U617.4
 文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2025)05-0103-08

Regulation plan for staggered-shaped rapid shoal in Heshangtan at tail section of Three Gorges Reservoir

LIU Yan, FAN Shugang, YANG Xiangfei

(Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the YangtzeRiver , Chongqing 401147, China)

Abstract: Since the Three Gorges Reservoir was impounded to 175 meters, the conditions of the navigation channel in the upper reservoir section of the Yangtze River have been greatly improved. However, the navigation channel in the tail section of the reservoir still has many reef obstruction problems during the flood season. Remedial measures need to be taken to improve navigation conditions. Taking Heshangtan, a staggered rapids in the upper reaches of the Yangtze River from Fuling to Fengdu, as an example, aiming at the problem of navigation obstruction during the flood season, the causes and characteristics of navigation obstruction are analyzed by collecting actual measurement data and combining it with a two-dimensional water flow mathematical model. On this basis, corresponding rectification plans are proposed and the rectification effects are analyzed. The results show that by taking remedial measures to remove the reefs at Heshangtan on the right bank and Guojiazui on the left bank, adverse flow pattern problems such as rapid flow speed in the flood season at Heshangtan strong cross currents at the front of the reefs, and strong backflow behind the reefs can be effectively improved. The results can provide technical support for the improvement of the staggered-mouth rapids in the tail section of the Three Gorges Reservoir.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; staggered-shaped rapid shoal; navigation-obstructing characteristics; mathematical model; regulation plan

自三峡工程 175 m 试验性蓄水以来, 涪陵—丰 都河段位于常年回水区末端, 航道条件得到明显改 善, 2011 年航道维护尺寸已提高至 4.5 m×150 m× 1000 m(水深×宽度×弯曲半径)^[1]。为改善通航环 境,保障船舶航行安全,《长江三峡库区船舶定线 制规定(2010)》要求三峡库区船舶航行实行定线

收稿日期: 2024-07-02

作者简介:刘岩 (1993—),男,硕士,工程师,从事港口与航道工程设计与研究。

制,即"遵循各自靠右航行、减少航路交叉及过错 责任的原则"。但库尾段的和尚滩、大渡口、老虎 梁等多个滩段由于礁石的存在,每年汛期(6—9月) 流态紊乱,船舶无法遵循各自靠右航行的定线制 规定,海损事故频发,其中位于乌江河口下游的 和尚滩水道汛期礁石前沿水流急、横流强,后方 回流和泡漩水旺盛,碍航特性最为复杂。

本文以和尚滩为例,对其碍航特性进行分析, 提出针对性的整治方案,并采用工程措施改善现 有航道条件,旨在为三峡库尾错口型急滩整治提 供技术支持,同时也是建设安全、畅通的长江黄 金水道的迫切需求。

1 河段概况

1.1 滩险概况

和尚滩位于长江与乌江汇合口下游 3 km、长 江上游航道里程 532.3~533.0 km,属于和尚滩水 道,是川江著名的汛期急险滩^[2],见图 1。和尚滩 水道较顺直,但岸线不规则,右岸和尚滩石盘突 入江心近半,与左岸下游侧郭家嘴上下交错束阻 水流,上下游河道断面宽浅,中段收缩,非汛期 河宽束窄 60%左右。河床纵向起伏大,汛期主流 循河心而下,至和尚滩石盘受阻改偏左岸,至郭 家嘴受阻复循河心下泄。



图1 和尚滩水道河势

- Fig. 1 River regime of Heshangtan waterway
- 1.2 航道概况
- 1.2.1 航道整治历史

1996年"7250"工程曾对右岸和尚滩和左岸郭

家嘴礁石实施过部分炸除^[3],该工程主要为了解 决三峡工程施工期变动回水区航道因水沙条件的 改变出现淤浅、不良流态、流速和比降增加而导 致碍航的问题^[4]。工程实施后,和尚滩汛期水流 条件有所改善,三峡蓄水前航道最小维护尺寸为 2.9 m×60 m×750 m。目前,从175 m 试验性蓄水 以来河段实际的水流条件和海损情况来看,当长 江流量较大又逢乌江涨水时,和尚滩汛期流急, 船舶搭跳上滩时操作仍十分困难。

1.2.2 航道现状

和尚滩河段航道技术等级为 I 级,航道最小 维护尺寸为4.5 m×150 m×1000 m。每年汛期按最 小维护尺度维护。汛期和尚滩礁石前沿水流急, 后方观音沱回流旺盛,船舶为了避开流态紊乱区 域,必须采取"过河"行驶的措施:上行船舶从下 游大渡口滩至和尚滩沿左岸上行,在和尚滩下游 观音沱上行过程中,谨慎沿回流边缘上行至和尚 滩前沿,然后顶流慢行,逐渐过河至左岸群猪滩 以上,若操作不慎,便有下行船"吊钩打戗",上 行船"窝凼困边"或"打张"的风险。为保障汛期船 舶通航安全,航道维护部门在和尚滩设置了1 对 过河标。另外,由于和尚滩附近水域碍航礁石的 存在,为了保障船舶安全通航,每年汛期和尚滩 水道为通航条件受限制航段。

2 河演特点

2.1 滩槽变化

本阶段主要对三峡 175 m 蓄水以来的河段资 料进行分析^[5]。从平面变化来看,和尚滩 145 m 等深线(对应设计最低通航水位约0m)、140 m 等 深线(对应水下 5 m)近年来变化不大,仅郭家嘴 下游凹凼附近出现一长约 280 m 浅包淤积,见图 2, 符合三峡库区回流沱局部淤积的特征。从河段典 型断面变化来看,和尚滩上下游河道断面形态呈 U形,中间收缩呈 V 形,多年来河床断面仅局部 存在小幅度冲淤变化,未见明显规律,滩槽格局 相对稳定,见图 3。





532







2.2 冲淤变化

从和尚滩冲淤变化来看,三峡蓄水以来和尚 滩河段总体冲淤变化较小,见图4,仅在郭家嘴礁 石前沿和后方回水沱等局部存在淤积,最大淤积 厚度约4.6m,航槽内变化较小,河势较为稳定。



图 4 2015—2022 年和尚滩冲淤变化 Fig. 4 Variation of erosion and sedimentation of Heshangtan from 2015 to 2022

二维水流模型原理与验证 3

由于工程河段水流条件和边界条件较为复杂, 为较好地分析和尚滩水道的碍航特性,本文采用 控制体积法建立水流数学模型,计算分析和尚滩 礁石附近不良流态的成因及影响范围,并对整治 方案的效果进行评价。

根据不可压雷诺应力平均、Boussinesg 假设和 静水压力分布,建立三维水流数学模型控制方程; 结合水平动量方程和连续性方程、将三维水流控 制方程简化成二维水流控制方程[67]。数学模型计 算范围上起和尚滩(上游航道里程 534.5 km),下至 丝瓜碛(上游航道里程 510.0 km), 全长 24.5 km, 其中和尚滩水道模型范围约 3.5 km, 对计算区域 采用三角形单元进行网格划分,见图5,滩段网格 间距取 10~20 m, 礁石区域采取局部加密处理, 加密区间距平均长2~5 m。

模型验证采用和尚滩水道 2015 年 6 月汛期实 测地形和水文数据,验证内容包括水位、流速、 流向等。模型计算水位与实测水位基本保持一致, 个别点最大相差 0.13 m, 见图 6; 断面流速分布 计算值与实测值较为一致,误差大多在±0.1 m/s, 个别较大偏差值也不超过±0.2 m/s,总体偏差值 控制在±10%以内,见图7,均满足JTS/T 231-4— 2021《水运工程模拟试验技术规范》^[8]要求。计算 结果与实测资料吻合较好,采用的水流数学模型 能正确模拟实际河道的水流运动,可用于和尚滩 整治方案研究。









图 6 模型水位验证 Fig. 6 Model water level verification



图 7 模型流速验证 Fig. 7 Model flow rate verification

4 碍航特性

4.1 流速、流向

和尚滩水道下游约9km处为清溪场水文站, 基于清溪场水位-流量关系,数模研究共选取8组 水文工况,见表1。

表 1 数模计算工况 Tab. 1 Calculation conditions of mathematical simulation

工况	流量 <i>Q/</i> (万 m ³ ·s ⁻¹)	清溪场 水位/m	备注
1	0.99	144. 70	设计最低通航水位
2	1.46	145.45	6月平均流量
3	1.82	146. 70	设计水位+2 m
4	2.45	148. 70	设计水位+4 m
5	3.04	150.70	设计水位+6 m
6	3.65	152.70	设计水位+8 m
7	4. 30	154.70	设计水位+10 m
8	7.67	167. 81	设计最大通航流量(P=5%)

从和尚滩滩段实测流速流向线和数模计算流 场来看^[9],整个滩段流迹线呈S形,滩上、下游 流线均较为分散,流速均匀,滩段中部在和尚滩、 郭家嘴石盘交错阻水的作用下,流线集中至河心, 流速增大,礁石后方在各级流量下均存在回流区。 如图8所示,当Q=2.45万 m^3/s 时,航槽内的流 速已达3.0m/s;郭家嘴后方和观音沱内有旺盛的 回流区,回流强度达1.2m/s,范围占据了半边 航槽。



图 8 和尚滩数模计算流场 Fig. 8 Mathematical simulation of flow field in Heshangtan

4.2 流态

汛期各级流量下和尚滩、郭家嘴礁石前沿都 存在横流区,分布较为集中,且流量增加,横流 增强, *Q*=2.45万m³/s时和尚滩滩段横流、横比 降分布见图9。*Q*=2.45万m³/s时,和尚滩前沿航 槽横流超过1.5m/s; *Q*=4.30万m³/s时,横流最 为旺盛,最大值达1.9m/s;从横比降来看,当 *Q*>2.00万m³/s时,和尚滩横流区局部横比降超 过2‰,船舶已无法过河上行至左岸群猪滩。





slope in Heshangtan section

4.3 上滩水力指标

和尚滩汛期流速急、局部比降大,通常用上 滩水力指标 E 评价船舶能否自航上滩^[10-11]。E 表 示船舶上滩时船舶推力与需要抵御的航行阻力平 衡时流速 v 与比降 J 的组合^[12],即: E=aJ+v,其 中 a 取 0.832。通过分析计算,以 5 000 吨级单船 为设计代表船型的工况下,和尚滩上滩水力指标 的临界值即消滩指标 $E_0=4.41$ m/s,当 $E \ge E_0$ 时, 上水船舶将存在难以自航上滩的问题。通过数模计 算,流量越大 E 值越大,当汛期流量为 2.45 万 m³/s 时接近临界值;流量为 3.04 万 m³/s 以上时,和尚 滩上水航路的 E 值大范围超出临界指标,船舶上 行非常困难,见图 10。

4.4 碍航特性小结

从河道形态来看,和尚滩水道纵向窄深、横 向局部比降大,两岸礁石交错相对,河道形态为 错口河型;从水流特性来看,和尚滩在汛期流量 2.45万m³/s以上成滩,流量越汹,流速越急、流 态越差,槽内水流迅急,礁石前沿横流旺盛,后 方回流、泡漩丛生,属于错口型急险滩。当流量 在4.30万m³/s时流态最差,流态最汹时上水航路 被完全占据,船舶上行非常困难,易引发船舶海 损事故。





5 整治方案及效果

5.1 整治思路

和尚滩属错口型急流滩,针对和尚滩的碍航特

点,采取同时清除滩险右岸和尚滩礁石和左岸郭家 嘴石梁的整治思路。方案布置优先考虑与上、下游 河岸构建平顺微弯河型,以改善滩段的水流条件; 次要考虑增大水流过流面积,以减缓水流流速,见 图 11。和尚滩清礁基线距离设计航槽约 100 m,下 段呈扩口型布置,基线长度为 365 m,清礁区最大 宽度为 126 m;郭家嘴清礁基线距离设计航槽约 125 m,长度为 213 m,清礁区最大宽度为 60 m。





5.2 清礁底高程优化

5.2.1 计算工况

为了研究和尚滩不同的清礁底高程对改善水 流条件的效果,拟借助数学模型对多种清礁深度 (简称"清深")进行计算,以确定最佳的清礁方 案。由于和尚滩在流量大于 2.45 万 m³/s 时消滩指 标接近临界值,因此以最汹流量 2.45 万 m³/s 来分 析各清礁方案,见表 2。

表 2 和尚滩清礁底高程计算工况 Tab. 2 Calculation conditions for bottom elevation of reef clearing in Heshangtan

	8	8
计算工况	清深/m	清礁底高程/m
1	5.0	140. 2
2	5.5	139.7
3	6.0	139.2
4	6.5	138.7
5	7.0	138.2
6	7.5	137.7
7	8.0	137.2
8	8.5	136. 7
9	9.0	136. 2
10	9.5	135.7
11	10.0	135. 2

5.2.2 方案比选

数模计算结果表明,不同的清礁底高程对改 善和尚滩不良流态均有一定效果。方案实施后, 从滩段流速分布来看,上水航路各测点的流速值 均有减小,和尚滩后沿至郭家嘴前沿一带降幅最 为明显,最大流速从 2.4 m/s 降低至 2.0 m/s 内; 从横流流速来看,和尚滩前沿附近流速有所降低,郭 家嘴后沿流速略有增大,最大约 0.3 m/s,且随着清 礁深度增加,流态改善的幅度逐渐减弱,见图 12。





5.2.3 方案确定

根据数模计算结果,通过清除和尚滩和郭家 嘴礁石能显著改善滩段上水航路的航道条件,不 同清深改善效果不同,当清深大于8m时,不同 清深条件下的流速、流态指标虽然有所变化,但 变化幅度不大。因此,从清深效比来看,推荐采 用8m清深方案,见图13。







5.3 效果分析

5.3.1 流速、流向

从左航槽中心各测点流速来看,方案实施后,流 速变化均匀,没有出现明显突变,航槽内的流线相对 平顺,当*Q*=3.04万m³/s时,上水航路流速降低至 3.0 m/s内,和尚滩礁石附近的滑梁水消失,后方回流 范围缩小,强度降低,回流区基本退出航槽,见图14。



图 14 和尚滩清礁前后回流区分布 Fig. 14 Distribution of backflow areas before and after reef clearing in Heshangtan 5.3.2 流态

从横流分布来看,方案实施后滩段横流区范 围明显缩小,清礁前横流区贯穿整个左航槽,清礁 后横流仅存在于航槽边缘局部小区域;从横流流速 来看,清礁后航槽内横流最大流速约0.6 m/s,较 清礁前有明显减小,不良流态得到改善,见图15。



Fig. 15 Distribution of transverse currents before and after reef clearing in Heshangtan

5.3.3 上滩水力指标

方案实施后,当流量 3.04 万 m³/s 及以下时,航 槽内横流流速小于 0.6 m/s,上滩指标全部降至目标 限值以下,见图 16,可实现"各自靠右,分道航行"; 当流量超过 3.35 万 m³/s 时,船舶上行可利用水域宽 度仍然不足,加之和尚滩主槽内横流流速较大,船舶 无法安全自航上滩,仍需过河上行,存在碰撞风险。





Fig. 16 Distribution of navigable hydraulic parameters of Heshangtan after renovation

5.3.4 小结

和尚滩整治方案实施后,航槽内的流线相对 平顺,主槽流速下降,和尚滩礁石附近的横流范 围缩小,后方回流强度降低,不良流态得到一定 改善。同时,礁石清除后,和尚滩、郭家嘴礁石 顶部高程均在航道维护水深以下,上下行船舶能 在原礁石面上行驶,基本消除了船舶搁浅的可能。

6 结语

 自三峡水库175m蓄水以来,和尚滩水道 航道条件得到改善,滩槽格局较为稳定。每年汛 期,受右岸和尚滩与左岸郭家嘴礁石交错对峙束 阻水流的影响,和尚滩航槽内水流迅急,礁石前 沿横流汹、横比降大,下游观音沱和郭家嘴后方 回流旺盛,滩段流态差,属汛期错口型急滩。

2)通过收集实测资料并借助二维水流数学模型,对和尚滩的碍航特性及整治方案进行研究,结果表明:通过采取切除右岸和尚滩和左岸郭家 嘴礁石的整治措施,可有效改善滩段不良流态等问题。当流量在3.04万m³/s以下时,航槽内最大流速降低至3.0 m/s内,横流区已退至航槽边缘,最大流速不超过0.6 m/s,礁石后方回流区基本退出航槽,船舶可实现"各自靠右,分道航行",航道条件得到大幅改善。

3) 以和尚滩为例,分析研究其碍航成因和碍 航特性,提出针对性的整治方案,不仅解决了库 尾航道汛期碍航的问题,更丰富了库区航道整治 理论,具有实际意义和推广价值。

参考文献:

- 伍文俊,余新明. 三峡水库运行后库区航道条件变化及 趋势[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(3): 344-347.
 WU W J, YU X M. Changes and trends of waterway in reservoir area after operation of Three Gorges Reservoir[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2010, 43(3): 344-347.
- [2] 长江重庆航运工程勘察设计院.长江上游涪陵至丰都 河段航道整治工程初步设计[R].重庆:长江重庆航运 工程勘察设计院,2022.

Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the Yangtze River. Preliminary design of the waterway regulation project in the upper reaches of the Yangtze River from Fuling to Fengdu [R]. Chongqing: Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the Yangtze River, 2022.

- [3] 刘勇, 王涛, 解中柱. 三峡水库常年回水区和尚滩汛期 航道条件变化分析[J]. 水运工程, 2013(6): 81-84. LIU Y, WANG T, XIE Z Z. Channel condition variation in flood season of Heshang rapids in perennial backwater area of the Three Gorges Reservoir [J]. Port & waterway engineering, 2013(6): 81-84.
- [4] 刘怀汉, 胡小庆, 解中柱. 长江上游宜宾至重庆河段航 道整治关键技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限 公司, 2015.

LIU H H, HU X Q, XIE Z Z. Key techniques of the waterway regulation from Yibin to Chongqing reach in the upper Yangtze River[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.

[5] 刘辛愉, 邵伟峰, 苏丽, 等. 三峡水库 175 m 试验性蓄水
 以来库区河床冲淤特性分析[J]. 水运工程, 2022(1):
 95-99, 156.

LIU X Y, SHAO W F, SU L, et al. Analysis on sediment scouring and silting characteristic of Three Gorges Reservoir area since 175m tiral impoundment[J]. Port & waterway engineering, 2022(1): 95-99, 156.

- [6] 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.
- [7] 李晓松, 孔宪卫, 蔡翼枫, 等. 长江上游典型碍航滩段航 道整治数学模型及船舶仿真模拟研究[J]. 水道港口, 2024, 45(1): 35-42.

LI X S, KONG X W, CAI Y F, et al. Mathematical model and ship simulation study on channel regulation of typical navigation obstructions in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Journal of waterway and harbor, 2024, 45(1): 35-42.

 [8] 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S].北 京:人民交通出版社股份有限公司, 2021.
 Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

(下转第162页)