

· 航道及通航建筑物 ·



三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道 整治工程实船适航评价*

高攀¹, 肖玉华¹, 崔健彰¹, 彭伟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院, 天津 300456)

摘要: 三峡—葛洲坝两坝间汛期大流量下“四滩一弯一关”水流湍急、流态紊乱, 通航水流条件差。基于莲沱段航道整治工程“炸礁+清渣+深沱抛填”方案, 通过整治前后水文原型观测与实船适航试验以验证该工程是否达到预期整治目标。通过观测试验河段的水面比降、水深及表面流速等变化分析航道工程整治效果, 进而选取3 000和5 000吨级满载船作为试验船舶开展实船适航试验。试验船舶沿设计航线进行上、下水航行, 实时测量试验船舶航行轨迹、对岸航速、漂角等航行指标及航行状态。同时, 结合整治前后实测资料, 对比分析莲沱段航道水文原型观测和实船适航结果, 并开展适航性能分析。结果表明: 工程实施后河段通航水流条件及船舶航行条件有明显改善, 达到了工程预期整治目标。

关键词: 莲沱段航道; 整治工程; 水文观测; 实船适航试验

中图分类号: U617.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0099-09

Evaluation of actual ship seaworthiness of regulation project at Liantuo section waterway between Three Gorges Dam and Gezhouba Dam

GAO Pan¹, XIAO Yuhua¹, CUI Jianzhang¹, PENG Wei²

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

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

Abstract: In flood season, between Three Gorges Dam and Gezhouba Dam, the “four beaches, one bend and one pass” of which flow is large, fast and disorderly, and the navigable flow condition is poor. On the basis of the plan of “reef blasting+slag cleaning+ dumping and filling in deep bay” of Liantuo section waterway regulation project, it is verified that whether the project has reached the expected regulation target through prototype hydrological observation before and after and actual ship seaworthiness test after regulation. The effect of engineering regulation is analyzed by observing the changes of surface gradient, water depth and surface velocity in the test reach, and then 3,000-ton and 5,000-ton class fully loaded ships are selected as test ships to carry out real ship seaworthiness tests. The test ships sail on and off the designed route, and the test ships' sailing track, shore speed, drift angle and other sailing indicators and sailing state are measured in real time. At the same time, the results of the prototype hydrology observation and the ship trial in Liantuo section are compared and analyzed combined with the measured data before and after the renovation project, and the seaworthiness performance is analyzed. The results show that the navigable flow conditions and ship navigation conditions of the river reach have been significantly improved after the implementation of the project, and the expected regulation target of the project have been achieved.

Keywords: Liantuo section waterway; regulation project; hydrological observation; actual ship seaworthiness test

收稿日期: 2024-11-22

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(TKS20240202, TKS20240504)

作者简介: 高攀(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事工程管理。

三峡—葛洲坝两坝间河段是连接长江黄金水道中上游航运的“咽喉”，也是沟通中西部经济发展的重要水上通道。三峡大坝建成后，两坝间河段兼具“水库”与“天然河道”的双重特性。进入汛期，随着流量的增加，石碑、喜滩、水田角（莲沱）等处的水流流速和局部比降增加很大，流态紊乱，对船舶航行造成一定的困难。

近年来，随着船舶标准化、大型化和技术改造的快速推进，船舶的船型结构和运输组织方式发生较大变化，两坝间汛期通航安全问题变得十分突出。对此，许多学者采用数值模拟、现场实测等多种手段对两坝间河段的水流条件及碍航滩险进行了大量研究。在数值模拟方面，姚仕明等^[1]建立三峡—葛洲坝河段三维水流数值模型，计算三峡不同下泄流量下的三维流场，并分析适航区域；韩继斌等^[2]采用非规则网格有限体积法和显式 MacCormack 预测-校正数值方法求解水深积分方程，建立三峡梯级平面二维水流数学模型，并以莲沱河段为例分析整治前后水流平面流速分布、流态以及水位变化；冯小香等^[3]基于平面正交坐标和立面 σ 坐标拟合河道平面形态、地形和自由水面的不规则分布，建立三维紊流数学模型，并采用物理模型实测的三维流速分布对模型进行验证，将该模型应用于水田角航道整治工程实施前后的三维流场计算；孟鑫^[4]采用平面二维水流数学模型模拟分析恒定流和非恒定流条件下两坝间重点滩段的水位、比降、流速等水流特性。在现场实测方面，陈冬元^[5]在 2013—2015 年间选择代表性船舶开展 19 艘次实船试航和 98 艘次随船测试的大样本实船试验，综合研究汛期大流量试验船舶的上、下水操纵性，统计分析试验船舶单位功率载量与现行控制标准的差异。上述研究为两坝间河段整治方案的形成提供了基础性支撑。部分学者围绕两坝间河段整治方案开展研究。陈素红等^[6]通过模型试验及数值模拟对莲沱、喜滩、狮子脑、石碑、偏脑 5 个滩段的整治工程方案的效果进行比选及可行性分析，推荐有效可行的整治方案；贾华杰等^[7]提出两坝间水田角深水

急滩的整治措施；陈玥如^[8]构建航道整治工程方案评价指标体系，采用模糊综合评价模型对莲沱段航道整治方案进行评价和优选。在航道整治工程实施后，对如何验证两坝间河段航道整治效果的研究还比较少，尤其是实船验证的研究更少。

为验证航道整治后的效果是否达到物理模型预测结果及工程实施预期目标，本文依托三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程，结合工程前后实测资料，采用水文原型观测和实船适航试验相结合的方法，对比分析工程前后莲沱河段通航水流条件变化及通航船舶适航条件变化。研究成果对于莲沱段航道整治与船舶通航安全风险具有重要的现实指导意义，也可为其他航道整治方案研究和工程实施效果验证提供技术支撑。

1 工程概况

莲沱河段平面宽窄相间、顺直与弯道相连，在水田角滩段河宽由 400 m 突扩至 700 m，在展宽处有 1 处最大水深达 100 m 的深沱，进口至深沱过水断面的面积由 1.2 万 m^2 增至 3.3 万 m^2 ，扩大 2.75 倍。该河段流量在 3 万 m^3/s 及以上时，在河段放宽处，强大的泡漩、大范围的回流同时存在，受上游收缩段主流的惯性作用、深沱的吸流作用和深沱两侧副流的挤压，使得深沱段主流带宽度不足河宽的 1/3，水流湍急，流态紊乱。滩段流速普遍在 3.0 m/s 以上，滩段最大比降在 0.75‰。该滩段碍航的主要表现：水田角滩口上水航线适航水域狭窄、水流集中、流速湍急，对船舶安全航行不利；莲沱弯道下水航线主流带集中，航宽狭窄，航线流速大，附近流态恶劣，船舶航行存在隐患。

2016 年 5 月，国家发展改革委、交通运输部联合印发了《交通基础设施重大工程建设三年行动计划》^[9]，提出推动形成国内国际通道连通、区域城乡覆盖广泛、枢纽节点功能完善、一体衔接便捷高效的综合交通网络，更好发挥组合优势和网络效益。三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程是 2016 年交通基础设施重大工程建设重点推进

项目之一,通过该工程实施,以改善通航条件、保障船舶航行安全、提高通过能力。整治原则:疏炸为主,填沱为辅。通过疏炸以扩大急流区过水面积,降低流速,减小比降;通过填沱以调整断面形态,改善泡漩等不良流态。经过可行性论证和方案比选,采用“炸礁+清渣+深沱抛填”方案,具体整治措施为扩大水田角—狮子脑急流段过水面积,降低急流流速,减小水面比降;将弃渣抛填至莲沱弯道深沱,调整莲沱—南沱段断面形态,改善碍航流态和通航水流条件。具体整治方案为疏炸梳子溪—晒经坪段左侧河床,将弃渣抛填至莲沱弯道深沱的沱心左侧。方案平面布置见图 1。

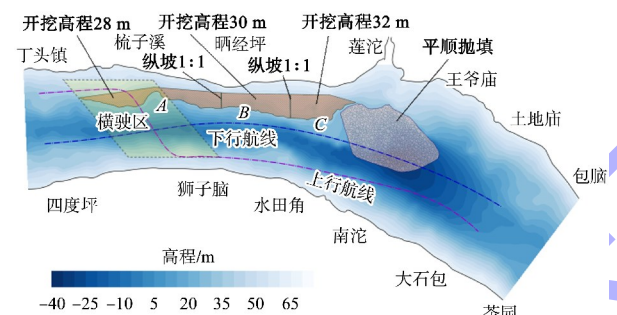


图 1 方案平面布置
Fig.1 Planar layout of scheme

整治目标: 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; 改善莲沱段泡漩、回流等碍航流态,提高通航安全性^[10]。在 3.5 万 m³/s 流量级下水流特性参数目标见表 1。

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

参数	目标
最大纵比降	从 0.75‰降至 0.30‰
航线最大流速	水田角—狮子脑上水航线流速基本不超过 3.0 m/s
沿程最大流速	水田角滩口最大流速减小 0.3~0.4 m/s
不良流态	不良流态明显削弱。弯道的主流带宽度增加 50 m
对岸航速	3 000 吨级代表船型在 3.5 万 m ³ /s 流量级下能自航安全上滩,对岸航速超过 4 km/h

2 试验方案

2.1 试验内容

莲沱段航道整治工程于 2017 年 11 月开工,2021 年 7 月交工。经过 1 个主汛期,莲沱河段总体稳定,航道水流条件明显改善,2021 年 9 月组织开展实船适航试验和水文原型观测。

在莲沱河段分别进行水文原型观测和实船适航试验,并对工程整治效果进行分析,试验内容见表 2,典型断面和水尺布置见图 2。

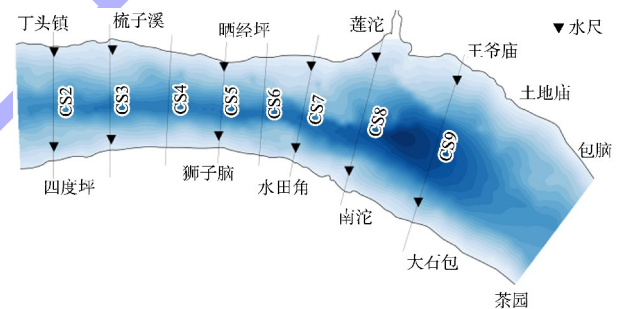


图 2 典型断面和水尺布置
Fig.2 Typical section and layout of water gauge

表 2 试验内容
Tab.2 Experimental contents

试验名称	观测内容	具体内容
水文原型观测	典型断面流速、流向	试验河段布设 8 个典型测流断面。试验期间同步观测各典型断面流速分布与流向
	水面线	试验河段布设临时观测水尺,试验期间逐时观测各水尺水位。同时结合工程河段各自水位站的水位数据,形成试验河段瞬时沿程水面线,计算水面比降。若观测过程中水位变幅较大,应加密观测次数
	表面流速、流向	试验河段布置 5~8 根流向线,观测表面流速、流向
	局部流态	采用在测试船固定高清摄像设备、结合使用无人机高空俯拍等辅助手段,观测整治工程范围内是否存在回流、泡水、漩水、扫弯水等影响船舶航行的不良流态,结合全球定位系统(GPS)数据记录具体位置
实船适航试验	航迹线	通过 GPS,测定试验船舶在测试航段的上、下行实际航行轨迹,为该航段确定船舶航路提供依据
	漂角	试验船舶沿拟定航线上、下行过程中漂角的变化
	舵角	自动记录试验船舶沿拟定航线上、下行过程中舵角的变化
	航速	试验船舶通过整个测试航段的上、下行平均航速,以及重点航段的瞬时航速

2.2 条件选取

2.2.1 试验河段

试验水域上游自乐天溪、下游至平善坝,总长约 19 km,上下游船舶分别在乐天溪锚地和平善坝锚地进行临时停靠和掉头。本文试验区域为整治工程炸礁区及抛填区,具体试验范围为丁头镇—茶园。

2.2.2 试验航线

按照《长江三峡大坝-葛洲坝水域船舶分道航行规则》^[11],莲沱河段分为一般航段和横驶区。非汛期,上行船舶沿左岸一侧的通航分道航行,下行船舶沿右岸一侧的通航分道航行。汛期,上水船舶沿右岸侧南沱—水田角上行,至狮子脑附近横驶过河至左岸梳子溪—丁头镇之间,下水沿河心主流航行。工程实施后,理论上本河段过河区可取消,汛期实行上、下行船舶各自靠右航行。但由于汛期下游大沙坝河段水流条件较差,该处老虎洞—大沙坝过河区暂不能取消,上行船舶在老虎洞—大沙坝过河区后处于航道右岸侧,仍需要在狮子脑—丁头镇过河区过渡至航道左岸侧。本文试验航线仍沿现行规则的上、下水航线航行。

2.2.3 试验流量

根据整治目标,试验流量为 $3.5 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 。由于两坝间河段流量动态调整,根据航道汛期通航流量标准^[12],第五级通航流量为 $3.25 \text{ 万 m}^3/\text{s} < Q \leq 3.5 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 。因此,试验流量选择第五级通航流量。结合当年汛期蓄水情况,当试验流量出现时适时开展实船适航试验。本文试验流量为 $3.27 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 。

2.2.4 试验船舶

根据整治目标,试验船型为 3 000 吨级干散货船。随着近年来船舶大型化发展,三峡过闸船舶统计资料显示,5 000 吨级及以上单船占比较高。结合整治目标和过闸船型现状,试验船型选择 3 000 与 5 000 吨级散货船。由于两坝间河段流量受调度影响,试验流量出现时间不确定,从外埠调船在时间上难以满足试验要求,试验从三峡待闸船舶中选取满足条件的试验船舶。本文试验选择

“南方 816”和“国东 908”分别作为 3 000、5 000 吨级试验船舶。

2.2.5 试验设备

水文原型观测主要设备:8 台天宝 R8 型全球定位系统-实时差分定位(GPS RTK),1 套 HY1600 型测深仪,1 套 FQ600 型声学多普勒流速剖面仪(ADCP)。适航试验主要设备:2 台中海达 GPS 接收机,2 套 SMC-IMU-108 型三维姿态仪,1 台 FC-16025 型风速风向仪,2 台徕卡激光测距仪等。

3 整治效果分析

3.1 水文原型观测分析

3.1.1 水面比降

水面比降对比见表 3。可以看出:1) 整治后与整治目标对比,黄陵庙水文站—茶园落差 $0.45 \sim 0.48 \text{ m}$,平均水面比降 $0.11\text{‰} \sim 0.12\text{‰}$ 。左岸最大水面比降位于黄陵庙水文站—红沙沱,最大比降 0.17‰ 。右岸最大水面比降位于狮子脑—水田角,最大比降 0.2‰ 。各水尺左右岸横比降在 0.12‰ 以内,整治后最大纵比降达到整治目标。2) 整治后与模型预测对比,平均水面比降、最大纵比降和最大横比降均略小于物理模型预测值,达到预期效果。3) 整治前后对比,平均水面比降减小 60%,左、右岸最大纵比降分别减小 77.3%、73.5%,最大横比降减小 76.5%,水面比降显著降低,有效改善了该河段水流条件,有助于提高船舶对岸航速和单位功率拖带量,提升船舶安全上滩的能力。

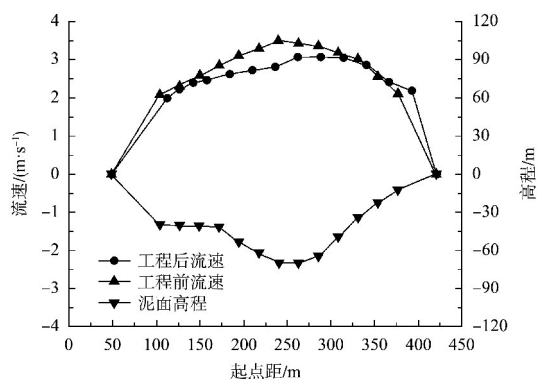
表 3 水面比降对比

Tab. 3 Comparison of water gradient				‰
类型	平均水面比降	左岸最大纵比降	右岸最大纵比降	最大横比降
整治前	0.30	0.75	0.75	0.50
模型预测	0.07~0.20	0.30	0.28	0.40
整治目标	—	0.30	0.30	—
整治后	0.12	0.17	0.20	0.12

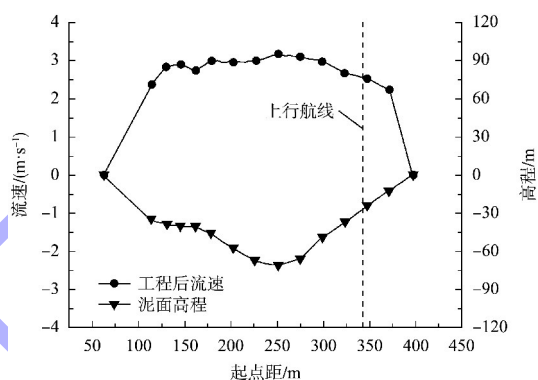
3.1.2 表面流速和水深

各断面的表面流速、水深见图 3。可以看出:1) 整治后,各断面流速分布基本呈抛物线形,主

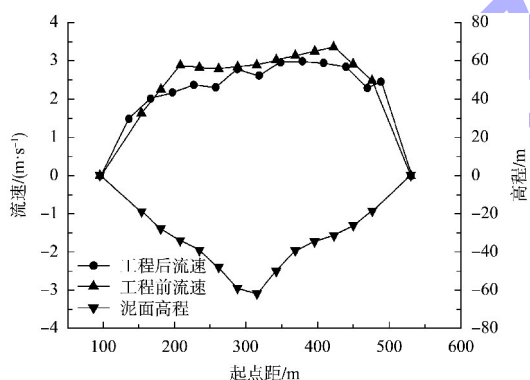
流区位于河道中心偏右。丁头镇—狮子脑(CS2~CS5)断面最大流速 2.99~3.16 m/s, 平均流速 2.52~2.83 m/s; 水田角附近(CS6~CS8)断面最大流速 3.14~3.34 m/s, 平均流速 1.83~2.66 m/s; 抛填区(CS9)水面宽度相对较宽, 主流较为集中, 两岸侧为回流或缓流区, 断面平均流速 1.41 m/s, 断面最大流速 2.87 m/s。2) 整治后与整治目标对比, 上行航线流速 2.0~2.9 m/s。水田角滩口处沿程最大流速由 3.80 m/s 减小至 3.34 m/s, 减小 0.46 m/s, 达到整治目标。3) 整治前后对比, 狮子脑过河区(CS4)主流流速减小, 断面最大流速由 3.49 m/s 减小至 3.08 m/s, 减小 11.7%; 狮子脑—水田角(CS6)断面流速分布发生变化, 主流由河道右侧向河心偏移, 最大流速由 3.45 m/s 减小至 3.16 m/s, 减小 8.4%; 水田角(CS7)断面最大流速由 3.80 m/s 减小至 3.34 m/s, 减小 12.1%; 断面最大流速减小 10%左右, 相应地可显著提高船舶对岸航速和单位功率拖带量, 进一步提高船舶安全上滩的能力。



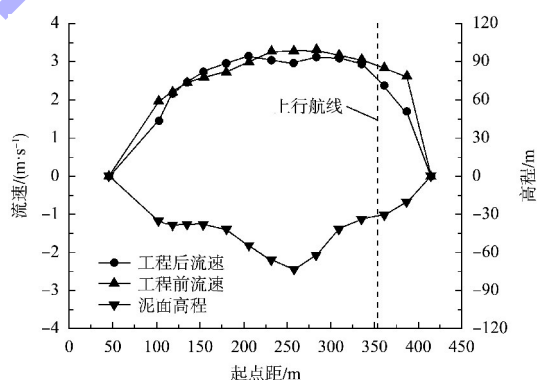
c) CS4断面



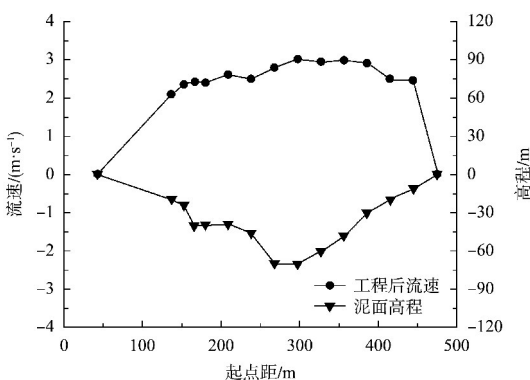
d) CS5断面



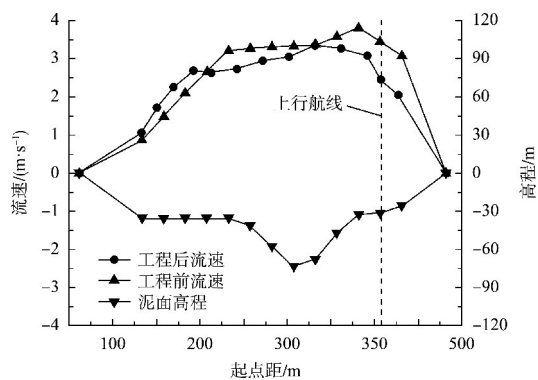
a) CS2断面



e) CS6断面



b) CS3断面



f) CS7断面

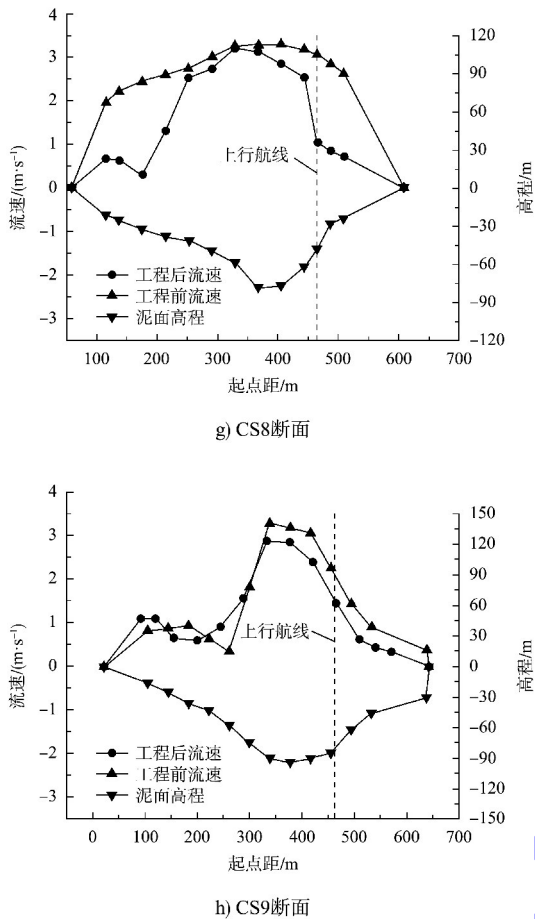


图 3 各断面流速、高程对比
Fig. 3 Comparison of flow velocity and elevation for every section

3.1.3 表面流迹线和流态参数

整治前后表面流迹线见图 4，流态参数对比见表 4。可以看出：1) 整治后，丁头镇—狮子脑水流较为平顺，主流区位于河段中心偏右侧，左、右两侧各有宽约 100 m 的缓流区，右岸侧流速略大。狮子脑—水田角主流区贴近右岸，距水边约 110 m。莲沱弯道段两侧为回流区，主流区较为狭窄，宽度约 250 m，左岸为大范围回流区，回流区宽度约 170 m，回流强度 0.72 m/s，长度约 400 m，伴有局部零星微弱泡水；右岸南沱回流范围及回流强度较左岸稍小，回流区宽度 130 m，回流强度 0.45 m/s。2) 整治后与整治目标对比，工程对河床型态的调整改变了断面流速分布趋势，水田角主流位置向河心移动，主流宽度增加 80 m，工程河段原有泡漩水基本消除，回流范围及回流强度减弱，达到整治目标。3) 整治后与模型预测对

比，莲沱弯道段主流宽度增加 30 m，即船舶的适航宽度 30 m；左、右岸回流强度略微降低，整治后实际效果略优于模型预测结果。4) 整治前后对比，莲沱弯道主流宽度由 170 m 增加至 250 m，增加 47.1%，为船舶提供了更宽的航路选择；左、右岸回流宽度各缩窄 40 m，回流强度平均减小 53.9%，回流强度显著降低。随着适航宽度的增加和流态的显著改善，可进一步改善水流条件，有利于保障船舶航行安全。

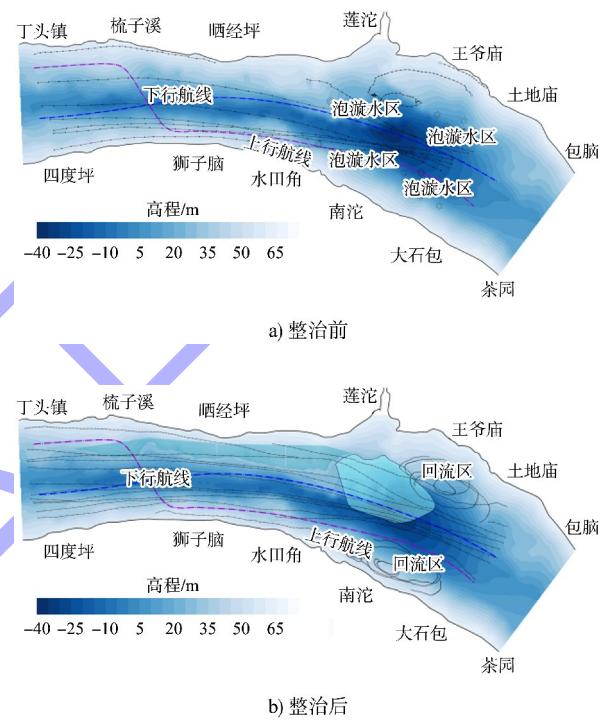


图 4 流迹线对比
Fig. 4 Comparison of path line

表 4 流态参数对比					
Tab. 4 Comparison of flow regime parameter					
类型	弯道主 流宽度/ m	左岸回 流宽度/ m	左岸回流 强度/ (m·s ⁻¹)	右岸回流 宽度/ m	右岸回流 强度/ (m·s ⁻¹)
整治前	170	210	1.47	170	1.04
模型预测	220	160	0.75	170	0.50
整治后	250	170	0.72	130	0.45

综合以上结果可知，整治后与整治目标对比，各项参数均达到整治目标。整治前后对比，水流条件和局部流态改善明显。整治后与物理模型预测^[13]对比，在沿程水位比降和局部流态方面，与模型预测效果比较接近。

3.2 实船试验分析

3.2.1 航迹线和舵角

由于 3 000 与 5 000 吨级试验船舶结果基本一致, 本文仅以 3 000 吨级试验船舶的航行参数结果进行对比分析。

根据试验结果可知: 1) 整治前后船舶航迹线与设计航线基本吻合。2) 整治前, 上行时舵角变幅一般在 $-9^{\circ}\sim 6^{\circ}$, 下行时舵角变幅一般在 $-8^{\circ}\sim 18^{\circ}$; 整治后, 上行时舵角变幅一般在 $-12^{\circ}\sim 16^{\circ}$, 下行时舵角变幅一般在 $-13^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。由于舵角变化与船长的操作习惯密切相关, 整治前后舵角总体变幅不大, 船舶操纵性能良好。

3.2.2 漂角

船舶的纵轴线与航迹线之间形成一定的夹角, 即为船舶的航行漂角。影响漂角变化的主要因素包括: 船舶尺度、航速、水流条件及航道弯曲半径等。船舶直线段航行时漂角较小, 弯曲段及过河段漂角较大。试验船舶的漂角变化见图 5, 漂角参数对比见表 5。可以看出: 1) 整治前, 船舶上行时, 大石包—丁头镇前基本上船尾偏左, 在狮子脑过河区最大漂角为 -72.8° (讨论时已剔除负号对数值的影响)。船舶下行时丁头镇—芭蕉溪船尾偏左, 最大漂角为 -17.9° 。2) 整治后, 船舶上行大石包最大漂角 9.16° , 水田角处最大漂角 5.59° , 船舶行驶至狮子脑过河段区开始过河时, 船尾持续左漂, 最大漂角 -36.6° , 船舶顺利过渡至左岸后行至红沙沱河段, 航行漂角一般在 $\pm 5^{\circ}$ 以内, 过红沙沱后因调整航向, 最大漂角增至 20.35° , 而后漂角变化在 $\pm 10^{\circ}$ 内。船舶下行过铺盖石, 船尾稍向左漂, 最大漂角 -7.23° , 过黄陵庙水文站后, 船尾稍向右偏, 红沙沱处航行漂角达到最大为 18.17° , 丁头镇最大漂角 11.45° , 狮子脑—茶园段漂角相对较小, 最大漂角一般在 $\pm 6^{\circ}$ 以内。3) 整治前后相同位置漂角对比, 船舶上行最大漂角从 -72.8° 减小至 -36.6° , 减小 49.72% ; 平均漂角从 -15.7° 减小至 -10.2° , 减小 35.03% , 船舶上行航行漂角得到改善, 尤其是在过河区改善更显著, 有利于船舶航行安全。船舶下行最大漂角从 -5.8° 增大至 -7.4° , 平均漂角从 -4° 减小至

-0.5° , 下行船舶最大漂角和平均漂角值较小, 且整治前后基本一致。因此, 在舵角、航迹线基本不变的条件下, 船舶的操纵性得到了提升, 有利于船舶航行安全。

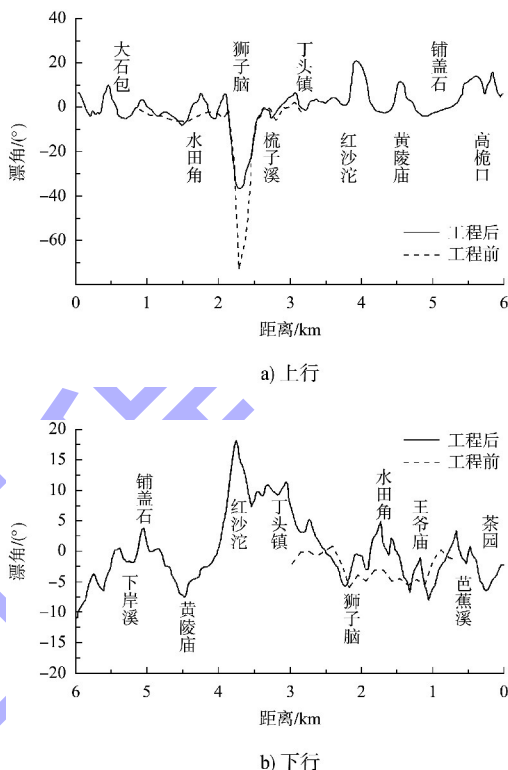


图 5 试验船舶漂角

Fig. 5 Drift angle of experimental ship

表 5 漂角对比
Tab. 5 Comparison of drift angle

类型	最大漂角/(°)		平均漂角/(°)	
	上行	下行	上行	下行
整治前	-72.8	-5.7	-15.7	-4.0
整治后	-36.6	-7.4	-10.2	-0.5

3.2.3 对岸航速

水田角急流滩主要体现在该滩段船舶上滩困难, 船舶下行时对岸航速参数的分析意义不大, 因此本文仅分析船舶上行对岸航速。试验船舶的上行对岸航速见图 6, 对岸航速参数对比见表 6。可以看出: 1) 整治前, 对岸航速平均值 6.58 km/h , 最大对岸航速 12.6 km/h , 最小对岸航速 2.4 km/h , 不满足船舶安全航行不小于 4 km/h 的要求。2) 整治后, 高桅口附近对岸航速平均值 7.44 km/h 。大石包—水田角下河段, 最大对岸航速达 12.61 km/h , 至狮子脑航段准备过河时, 最小对岸航速为

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: 在过河区船舶漂角为 36.6°, 实际航速约 5.2 km/h。因此, 整治后船舶能自航上滩, 对岸航速基本超过 4 km/h。3) 整治前后相同位置对岸航速对比, 由于水流条件的改善, 水面最大比降减小约 75%、断面最大流速减小约 10%, 使得对岸航速平均值提升 13.07%; 最小对岸航速从 2.40 km/h 提升至 3.79 km/h, 提升 57.92%。整治后, 船舶安全上滩能力显著提高。

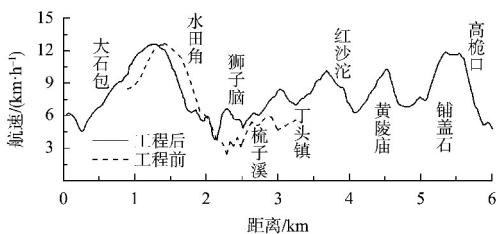


图 6 试验船舶上行对岸航速
Fig. 6 Upbound crossing speed of experimental ships

表 6 对岸航速对比
Tab. 6 Comparison of crossing speed

类型	平均对岸航速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	最大对岸航速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	最小对岸航速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
整治前	6.58	12.60	2.40
整治后	7.44	12.61	3.79

3.2.4 单位功率拖带量

整治前后实船适航试验参数对比见表 7。整治后 3 000 吨级试验船舶在相同主机负载率条件下, 由于比降、流速的减小以及不良流态削弱等水流条件的改善, 单位功率拖带量在增加 15.09%的同时, 上行最小对岸航速较整治前增大 57.92%。随着航行条件较工程前明显改善, 进一步提升了航道通过能力。

表 7 实船适航试验参数对比
Tab. 7 Comparison of actual ship seaworthiness
test parameters

类型	装载量/ t	额定 功率/ kW	实际 功率/ kW	主机 负载率/ %	单位功率 拖带量/ ($\text{t}\cdot\text{kW}^{-1}$)	最小 航速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
整治前	2 630	620	255.4	41.19	4.24	2.40
整治后	3 221	660	279.2	42.30	4.88	3.79

综合以上结果可知, 试验船舶可按照设计航线安全上滩, 对岸航速基本超过 4 km/h, 船舶主机运行正常, 车、舵控制效果良好, 适航条件达到整治目标。对比整治前 2013 年船舶航行参数^[14], 均能按照设计航线安全上滩, 整治后漂角整体变小, 舵角相当, 水田角处上行时的对岸航速、单位功率拖带量明显提升。

3.3 适航性能分析

整治后, 从通航水流条件看, 河段水面比降较缓, 平均水面比降为 0.12‰, 局部最大水面比降为 0.2‰; 水流平顺, 上水航线最大流速不超过 3.0 m/s; 莲沱河段大范围、高强度泡漩水基本消除, 仅凹岸回流区内有局部零星小泡, 对船舶航行基本没有影响, 水流流态较好。从适航条件看, 试验流量 3.5 万 m^3/s 流量级下, 船舶均可通过试验河段, 按长期经验和驾驶习惯操作, 船舶上下行航迹线与设计航线基本吻合; 3 000 吨级试验船舶上行平均航速 7.44 km/h, 对岸航速基本超过 4 km/h。除过河区船舶航行漂角较大外, 其余航段漂角较小。航行过程中, 试验船舶主机运行正常, 车、舵控制效果良好。

4 结论

1) 水文原型观测结果表明, 工程实施后莲沱河段水面比降更加平缓, 水流更加平顺, 泡漩水基本消除, 通航水流条件较好, 航行条件明显改善。

2) 实船适航试验结果表明, 试验船舶按汛期规定航路均可顺利上、下行通过工程河段, 船舶上、下行航迹线与设计航线基本吻合。试验船舶航行过程中, 船舶漂角、舵角等参数在正常范围内, 对岸航速正常; 主机运行正常, 车、舵控制效果良好。适航条件满足设计要求。

3) 工程实施后, 通过水文原型观测和实船适航试验, 结合前期资料和整治目标, 分析验证航道整治工程是否达到预期整治目标和物理模型预测效果的方法是可行的。研究成果可为今后两坝间河段其他 4 个滩段的整治方案研究、物理模型研究和实施效果验证提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 姚仕明,王兴奎,张超,等. 两坝间河段通航水流条件的三维数值模拟[J]. 水科学进展, 2007(3): 374-378.
YAO S M, WANG X K, ZHANG C, et al. 3-D numerical simulation of navigable flow conditions between Three Gorges Dam and Gezhouba Dam[J]. Advances in water science, 2007(3): 374-378.
- [2] 韩继斌,姜治兵,李建兵,等. 数学模型在三峡葛洲坝间河道整治中的应用[J]. 人民长江, 2007(11): 154-156.
HAN J B, JIANG Z B, LI J B, et al. Application of mathematical models in river regulation between Three Gorges and Gezhouba Dam[J]. Yangtze River, 2007(11): 154-156.
- [3] 冯小香,李建兵,樊建超,等. 三峡两坝间水田角河段航道整治三维水流数学模型应用研究[J]. 水道港口, 2010(6): 577-582.
FENG X X, LI J B, FAN J C, et al. Three-dimensional flow mathematical model for channel regulation of the Shuitianjiao reach between the Three Gorges Dam and Gezhou Dam [J]. Journal of waterway and harbor, 2010(6): 577-582.
- [4] 孟鑫. 三峡—葛洲坝间河段汛期通航水流条件研究[J]. 中国水运, 2019(9): 12-15.
MENG X. Study on navigation flow conditions during flood season between the Three Gorges Dam and Gezhou Dam[J]. China water transport, 2019(9): 12-15.
- [5] 陈冬元. 三峡—葛洲坝两坝间汛期大样本实船试验分析研究[J]. 水道港口, 2018(1): 67-72.
CHEN D Y. Analytical study on full-scale ship experiment under the large discharge between the Three Gorges and the Gezhouba project[J]. Journal of waterway and harbor, 2018(1): 67-72.
- [6] 陈素红,李学海. 三峡—葛洲坝两坝间航道整治工程方案试验研究[J]. 水运工程, 2010(1): 94-101.
CHEN S H, LI X H. Experimental study on regulation project schemes for waterway between two dams of Three-Gorges and Gezhouba [J]. Port & waterway engineering, 2010(1): 94-101.
- [7] 贾华杰,许光祥,楼金仙. 三峡—葛洲坝两坝间水田角深水急滩整治措施研究[J]. 浙江水利水电学院学报, 2015, 27(2): 53-58.
JIA H J, XU G X, LOU J X. On regulation measures of deepwater rapids of Shuitianjiao between Three Gorges to Gezhouba[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 2015, 27(2): 53-58.
- [8] 陈玥如. 基于综合指标体系的长江莲沱段航道整治工程方案优选[J]. 水运工程, 2021(4): 136-140.
CHEN Y R. Scheme optimization of waterway regulation project of Liantuo section of the Yangtze River based on comprehensive evaluation index system [J]. Port & waterway engineering, 2021(4): 136-140.
- [9] 国家发展改革委,交通运输部. 交通基础设施重大工程建设三年行动计划[A]. 北京: 国家发展改革委, 2016.
National Development and Reform Commission, Ministry of Transport. Three-year action plan for major construction projects of transportation infrastructure [A]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2016.
- [10] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程可行性研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2015.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport. Feasibility study report of the waterway regulation project at Liantuo section between two dams of Three-Gorges and Gezhouba [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, 2015.
- [11] 长江海事局. 长江三峡大坝—葛洲坝水域船舶分道航行规则[A]. 武汉: 长江海事局, 2009.
Changjiang Maritime Safety Administration. The rules for separate navigation of vessels in the waters between the Three Gorges Dam and the Gezhouba Dam on the Yangtze River [A]. Wuhan: Changjiang Maritime Safety Administration, 2009.

(下转第 137 页)