



长江上游叉鱼碛滩段水流特性数值模拟

彭毕帅，贺艺伟，张文江，陈希

(长江重庆航运工程勘察设计院，重庆 401147)

摘要：长江上游叉鱼碛滩段为汊道出口处的枯水期过渡段急浅滩，船舶上行困难，且每年进行维护性疏浚才能保持畅通。针对叉鱼碛滩段卡口处急流、过渡段出浅的特性，应用平面二维水流数学模型进行水流特性研究，并提出相应的整治措施。结果表明，拆除已建的叉鱼碛顺坝，同时增强过渡段浅区冲刷历时的整治措施才能有效缓解碍航；整治方案实施后急滩特征消失，且在多年平均流量附近航槽内过渡段平均流速均有增加，有利于减小过渡段浅区的淤积，航道尺度满足规划要求。

关键词：急滩；浅滩；航道整治；数值模拟

中图分类号：U617

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)09-0086-07

Numerical simulation for flow characteristics of Chayuqi shoal section in upper reaches of the Yangtze River

PENG Bishuai, HE Yiwei, ZHANG Wenjiang, CHEN Xi

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

Abstract: The Chayuqi shoal section in the upper reaches of the Yangtze River is the rapids and shallow shoal at the outlet of the branch. It is difficult for ships to drive upstream, and maintenance dredging is required every year to maintain unobstructed. According to the characteristics of the rapids at the entrance of the Chayuqi and the shallowness of the transition section, we study the flow characteristics by the plane 2D flow mathematical model, and propose corresponding regulation measures. The results show that the built longitudinal dike of Chayuqi should be removed and the regulation measures to enhance the scour duration of the shallow area can effectively alleviate the navigation obstruction. The characteristics of the rapids disappear after the implementation of the regulation scheme, and the average velocity in the transition section near the multi-year average flow level increases, which is beneficial to reduce the siltation in the shallow area, and the channel scale meets the planning requirements.

Keywords: rapids; shallow shoal; channel regulation; numerical simulation

川江航道碍航较为严重的卵石滩险的治理尚缺乏完全成熟的经验，有的虽经多次整治但效果仍不理想。国外主要是研究卵石河流的水流形态及卵石运动规律，整治技术的研究成果较少；国内行业规范 JTJ 181—2016《航道工程设计规范》^[1]对于急险滩和浅滩分别描述整治方法，兼具共同特性的复合型滩应适量加大险区的治理力度。张万富等^[2]通过研究具有汊道口的急浅滩水

流特征和阻力损失，认为汇流口的能量交换产生泡漩水，低速带的出现导致此处易落淤；李永贵^[3]总结乌江的整治经验，认为需要在浅滩汇流处修建导流坝延缓汇流夹角；吴家浩^[4]认为须对急流滩卡口段的两岸进行炸礁切除，减小比降与流速。

叉鱼碛滩属于长江上游较为典型的枯水浅急型卵石滩。自 2015 年以来每个枯水期均对叉鱼碛

过渡段浅滩进行维护性疏浚才保持了枯水期航道的畅通; 同时在卡口段船舶上滩较为困难; 因滩段河相关系复杂, 亟待开展相关滩险的研究、整治工作。根据《长江经济带发展规划纲要》^[5]等文件精神, 拟实施长江上游合江门—界石盘河段生态航道建设工程, 叉鱼碛滩位于本河段之内。该河段航道等级规划为内河Ⅰ级, 建设标准为将航道水深提高至3.5 m^[6], 同时改善水流流态, 解决通航安全隐患。

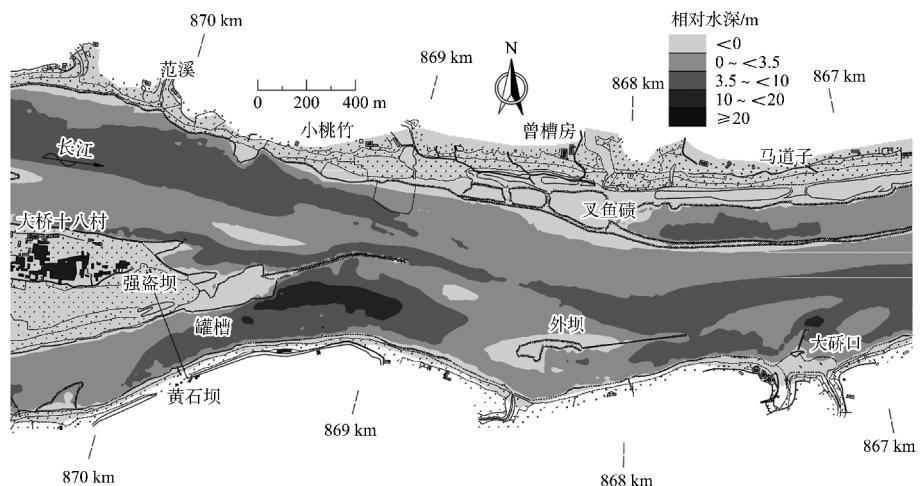


图1 叉鱼碛滩河势

除砂卵石过渡段浅区的碍航问题外, 在强盗坝尾顺坝(叉鱼碛丁顺坝)与左岸之间区域的卡口段, 存在上滩困难的问题。根据航道管理部门反映, 在中水期部分船舶在此处自航上滩时出现一定困难。

根据2016年实测地形及水文资料分析, 在枯水期水流集中于北槽, 至叉鱼碛丁顺坝顺北槽江心而下, 卡口段最大流速在3.67 m/s, 浅区段流速在3.30 m/s; 在中水期强盗坝两槽均开始过流, 北槽过流占主导作用, 由于丁顺坝有效地限制了北槽水流向南槽漫延, 导致流量增加时北槽分流增量明显大于南槽, 卡口处束水作用明显, 此处最大实测流速达4.33 m/s; 在洪水期水位整体抬升, 强盗坝整体过流漫滩, 北、南槽流量差距缩小, 卡口处束水作用相对减小, 最大实测流速降至3.43 m/s。

为解决叉鱼碛滩段存在的过渡段浅区出浅及卡口段流速过急的问题, 需要更加深入地研究本

1 滩段特性

叉鱼碛滩段位于长江上游泸州市大桥镇, 航道里程867~870 km, 属于汊道出口处的枯水浅急型卵石滩^[7]。滩段进口江心有强盗坝将水流分成两槽, 北槽为主航道。北槽航道虽顺直, 但水浅槽窄, 在中水期水陡流急, 对上行船舶的通航影响较大; 南槽(罐槽)枯水期分流甚微, 洪水期分流较大。在两槽交汇处因两汊水流交汇消能, 形成长约600 m的砂卵石淤积区, 滩段河势见图1。

滩段在各代表流量的水流特性, 采用数值模拟手段研究滩段水流特性, 旨在为后续的叉鱼碛滩整治方案提供有效支撑。

2 数学模型

2.1 水流模型

基于不可压雷诺应力平均、Boussinesq假设和静水压力分布, 建立二维水流数学模型控制方程, 其中水流连续方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (1)$$

x 、 y 方向的水平动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = f_v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_i \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g \int_z^\eta \frac{\partial p}{\partial y} dz}{\rho_0 h} - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \nu_s S \quad (3)$$

式中: t 为时间; x 、 y 、 z 为笛卡尔坐标; η 为水面高程; d 为静水深; h 为总水深, 其值为 η 与 d 之和; u 、 v 、 w 为 x 、 y 、 z 方向流速分量; f 为柯氏力参数, $f=2\Omega\sin\phi$ (Ω 为自转角速度, ϕ 为地理经度); ρ 为水的密度; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} 为分散应力张量的分量; ν_t 为垂直方向涡黏系数; p_a 为大气压力; ρ_0 为水的参考密度; S 为源 (汇) 流量; u_s 、 v_s 为源 (汇) 流向外界的 x 、 y 方向流速分量; F_u 、 F_v 为水平应力分量, 采用流速梯度-应力关系, 可简化为:

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (4)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left[A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

式中: A 为控制体截面积。

2.2 计算条件

数值模拟试验所需数据来自 2016 年实测地形及水文资料。数值计算的初始条件须给出初始时刻地形、水位、流量等物理量。定解条件为给定进口流量和出口水位, 根据邻近的水文站常年流量-水位关系, 采用一维水流数学模型推算得到。对河岸固壁边界, 法向流速取 0 m/s。

2.3 验证

2.3.1 计算域及网格生成

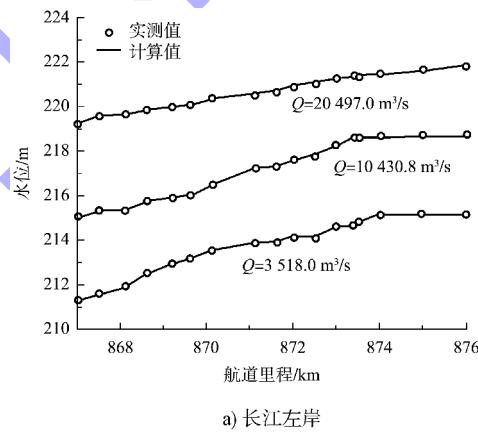
叉鱼碛滩紧邻上游的神背嘴滩, 以保证计算的准确性与稳定性, 本滩段入口边界取在神背嘴滩上游(航道里程 876 km 附近)顺直河道处, 出口边界在航道里程 867 km 附近。计算网格采用三角形非结构网格, 非整治段网格边长约 20 m, 整治区域网格渐变局部加密, 边长为 3~10 m, 共 96 128 个单元, 191 315 个节点。

2.3.2 糙率确定

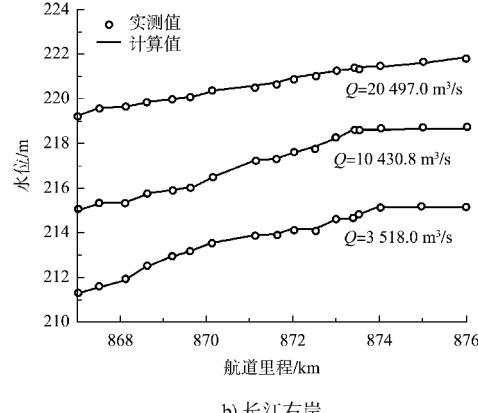
根据本河段枯、中、洪 3 级流量的实测瞬时水面线资料推算糙率, 经反复调试, 枯水期($Q_{\text{朱沱}} < 5000 \text{ m}^3/\text{s}$)河段综合糙率为 0.024~0.037, 中水期($5000 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{\text{朱沱}} \leq 2 \text{ 万 m}^3/\text{s}$)河段综合糙率为 0.030~0.039, 洪水期($Q_{\text{朱沱}} > 2 \text{ 万 m}^3/\text{s}$)河段综合糙率为 0.032~0.037。本文模拟中、洪水范畴, 糙率范围为 0.029~0.035^[8]。

2.3.3 水位验证

经数学模型计算, 将计算水位与实测水位进行比较, 结果见图 2。可以看出, 二者符合程度较高, 水面线走势吻合较好, 水位偏差在 $\pm 0.10 \text{ m}$ 以内, 满足 JTS/T 231-4—2018《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》^[9]要求。



a) 长江左岸



b) 长江右岸

图 2 滩段左、右岸水位验证结果

2.3.4 流速、流向分布验证

进行枯、中、洪期各测流断面的实测流速与数模计算流速的对比, 结果表明流速大小、分布以及

最大值和最小值的位置均与实测资料较为一致, 计算流速与实测流速的差值一般都在 ± 0.10 m/s 以内, 偏差基本控制在 $\pm 5\%$ 以内; 对计算流场与实测浮

标迹线进行对比, 各级流量数模计算流场的流向与实测浮标迹线走向基本一致, 由于篇幅有限, 仅提供部分流场验证结果, 见图3、4。

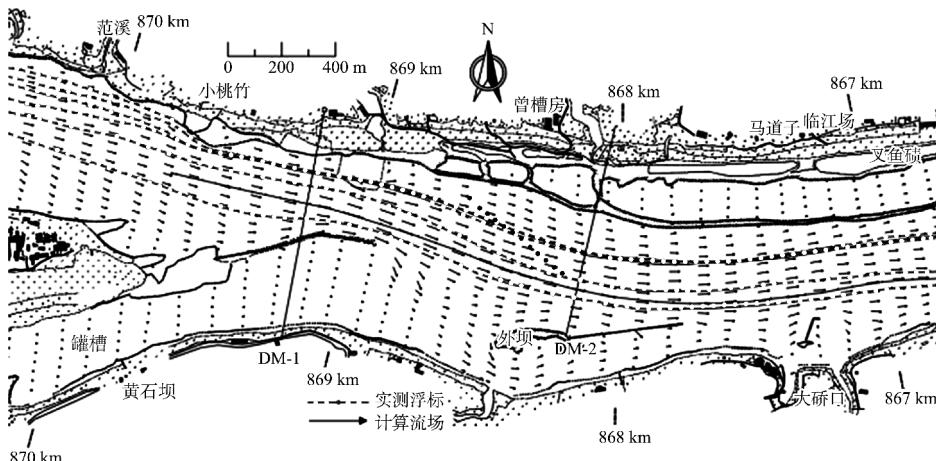


图3 滩段枯水期流向验证结果

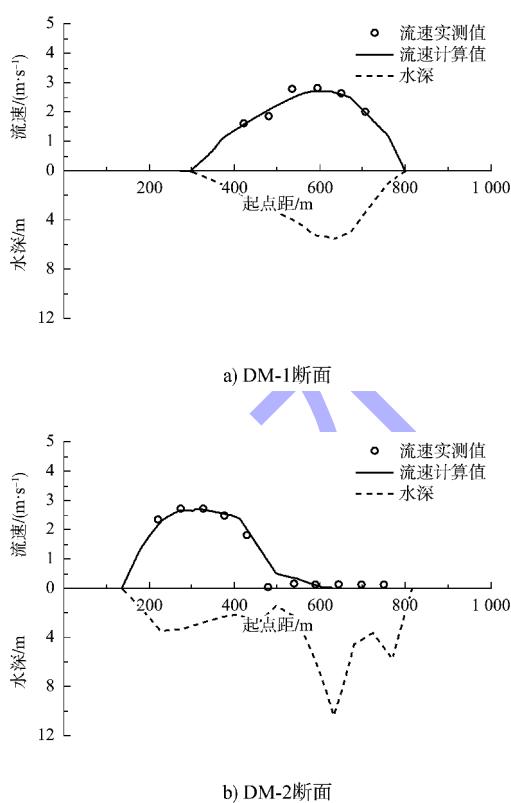


图4 滩段枯水期($Q=3 518 \text{ m}^3/\text{s}$)断面流速验证结果

3 叉鱼碛滩段水流特性数值模拟试验

根据朱沱水文站实测数据与河段一维数模结果, 确定的计算工况见表1。开展密集工况的滩段水流特性模拟试验, 以分析研究各级流量下的叉鱼碛滩段碍航情况, 寻求最不利的工况组合, 并

为开展整治方案效果分析评价提供参考。

表1 水流特性研究模拟工况

工况	朱沱流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	流量类型	朱沱水位/m	数模尾水位/m
1	2 364	设计流量	195.21	208.979
2	5 920	整治流量	197.67	210.877
3	8 350	多年平均流量	199.01	213.311
4	11 500	中水流量	200.57	215.033
5	26 000	常见洪水流量	206.55	220.936
6	54 500	20 a一遇洪水流量	215.36	230.874

3.1 结果统计方法

计算结果的统计方法为: 在滩段整治方案附近布置统计分析断面, 断面与设计航槽正交, 每150 m(约1倍代表船型船长)布置1个断面, 航槽内沿宽度每10 m布置1个流速统计点(共7个), 消滩判数采用两断面间航中线参数计算(将流速乘以1.17转换为表面流速)。浮标从滩段进口沿航槽对称施放, 间距60 m, 共6条, 见图5。

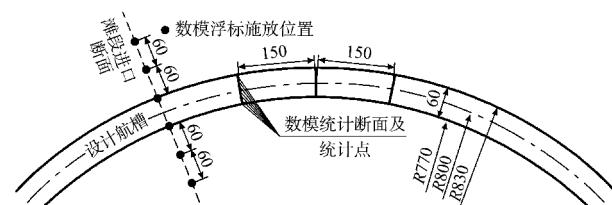


图5 统计点布置及浮标施放位置(单位: m)

根据许光祥等^[10-11]、杨胜发等^[12]的消滩水力指标公式判别滩险的急流特性，综合河段与船舶特性考虑，采用消滩判数 $E = 0.628J + v$ (J 为水面比降， v 为表面流速) 作为判别指标，当 E 大于 3.92 则认为滩险急流特性突出。

3.2 计算结果分析

1) 从主流分布来看，设计流量水流较集中，流线均分布于北槽。主流过丁顺坝后向右岸靠近，

至叉鱼碛顺坝后流线向左挤压回归河心，在叉鱼碛顺坝与大桥口丁坝之间流线略有展宽。在多年平均流量、中水流量下，水流漫过叉鱼碛丁顺坝向下游行进，流线沿程分布较为均匀，主流左侧部分水流漫过叉鱼碛边滩滩缘进入被挖砂采石破坏的深坑。洪水流量下流线分布大致与中水流量相同，流线更加顺直，流速在滩段内的分布更加均匀，叉鱼碛滩体内深坑分流更甚，见图 6。

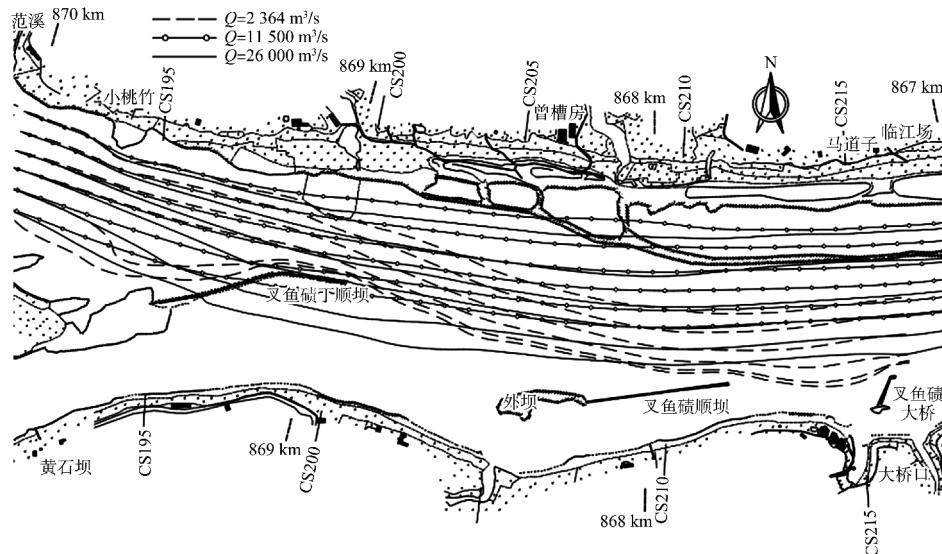


图 6 3 种流量下计算浮标线对比

叉鱼碛浅滩成滩的基本原因是在上游航道里程 873 km 处的罐口进口的高程较高，洪水时可能分水多、分沙少，这样就造成了北槽鱼鳅石以下大量淤积。1960 年神背嘴大罐口堵坝修建以后，洪水期罐口的分流量略有减少，而卵石推移质可能大部分被拦入北槽，同时神背嘴北槽流量又有所增加，北槽出口处的推移质数量也有所增加，加之强盗坝尾左南槽水流交汇，导致水动力减弱从而落淤。这是叉鱼碛过渡段浅区常年需要维护性疏浚才能保持畅通的主要原因^[13]。

2) 各工况下航槽沿程流速见图 7。可以看出，枯水期流速沿程增加，在丁顺坝束窄处出现最大值 2.72 m/s，随后河道展宽流速下降；在整治流量($Q=5 920 \text{ m}^3/\text{s}$)下坝顶未过流，与其余各代表流量相比槽内流速最大，卡口束窄处最大流速 3.68 m/s，叉鱼碛丁顺坝的束流作用在此流量下最强，急滩特性在此流量下最为突出；过顺坝后流

速沿程减小。其余代表流量因坝顶过水，过水断面面积增加幅度较大，沿程流速变化变缓。

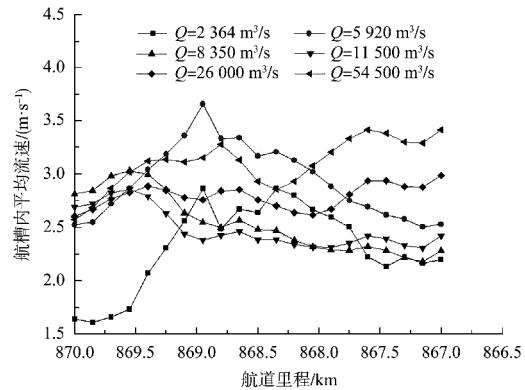


图 7 各计算工况下叉鱼碛段航槽内平均流速

3) 航道中线沿程比降变化见图 8。可以看出，在设计流量($Q=2 364 \text{ m}^3/\text{s}$)、整治流量($Q=5 920 \text{ m}^3/\text{s}$)下，航道中线沿程比降变化波动与其余流量相比波动最为明显。设计流量下在外坝(航道里程 868.5 km)附近出现最大比降 2‰，整治流量下在

丁顺坝前方出现最大比降 2.2‰。随流量增加沿程比降波动减弱, 均在 0.3‰附近波动。

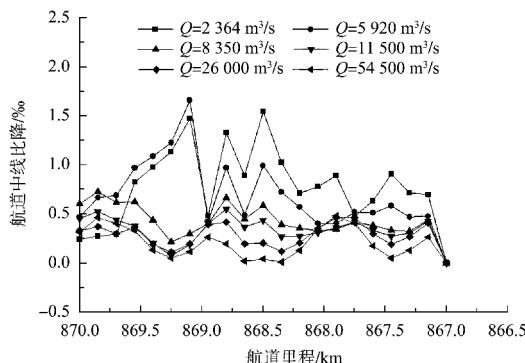


图 8 各计算工况下叉鱼碛滩段航道中线比降

4) 航槽消滩判数见图 9。可以看出, 设计流量下, 叉鱼碛丁顺坝、外坝附近指标略微超标, 而整治流量下两坝体之前全线超标, 叉鱼碛过渡段范围出现急滩特征, 船舶在此处上滩略显困难。

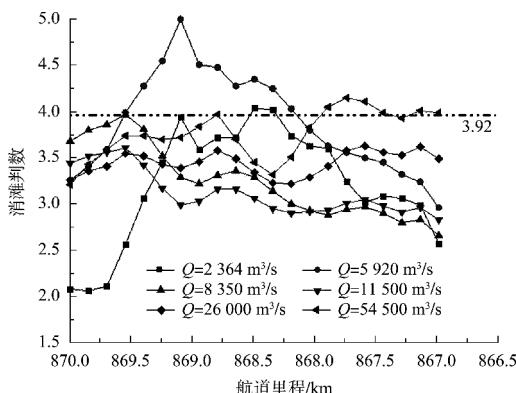


图 9 各计算工况下叉鱼碛滩段航道中线消滩判数

目前叉鱼碛丁顺坝坝顶高程为设计水位上 2 m。为进一步研究卡口段范围的消滩判数问题, 在设计水位(设计流量 $Q=2364 \text{ m}^3/\text{s}$)与设计水位+2.5 m

(整治流量 $Q=5920 \text{ m}^3/\text{s}$)之间增加设计水位+1 m 的流量($Q=3460 \text{ m}^3/\text{s}$)进行计算。计算结果表明, 流量在 $2364 < 3460 \text{ m}^3/\text{s}$, 丁顺坝卡口段消滩判数增幅明显; 流量在 $3460 < 5920 \text{ m}^3/\text{s}$, 卡口段增幅相对减小, 但是超限范围沿程扩大, 如图 10 所示。

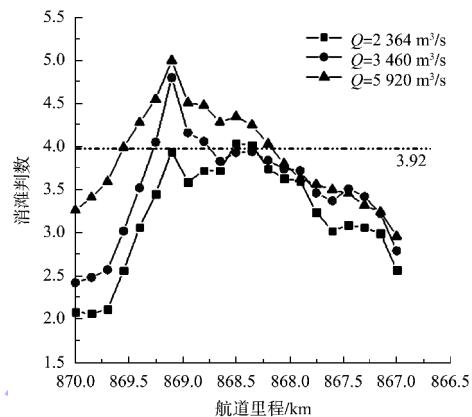


图 10 叉鱼碛滩段航槽水力特征参数变化规律

4 整治效果分析

4.1 整治思路及方案

针对上文的研究结果, 整治思路为通过拆除部分坝体打开卡口段过水断面, 重新抛筑顺坝段, 并加高已有整治建筑物, 增强北槽过渡段疏浚浅区多年平均流量下的冲刷力度; 将北南槽水流交汇处向下游移动, 在解决挖槽稳定性的同时, 缓解叉鱼碛急滩的特性。

叉鱼碛滩整治方案平面布置见图 11, 方案为改扩建叉鱼碛丁顺坝, 改建段坝顶高程为整治水位高度(设计水位上 2.5 m), 叉鱼碛原丁顺坝、顺坝、大砾口勾头丁坝统一加高至整治水位高度(即现有坝高加高 0.5 m)。

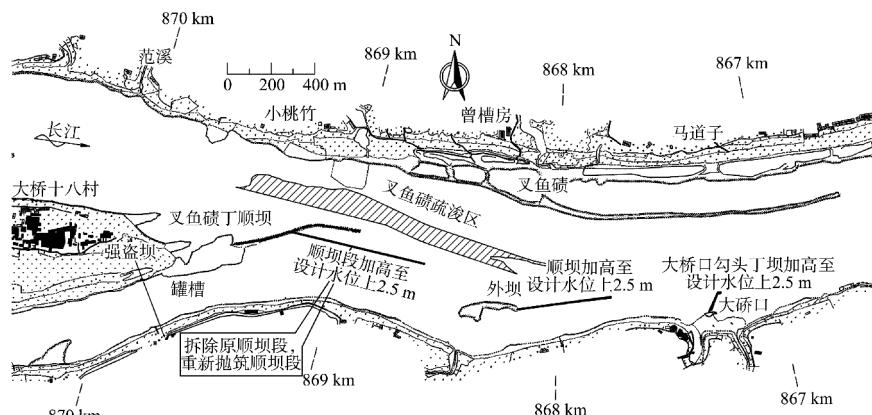


图 11 叉鱼碛滩整治方案平面布置

4.2 计算结果

1) 在设计流量下整治后航槽范围内 3.5 m 线贯通, 满足目标通航尺度。与工程前相比(图 12), 设计流量、整治流量下流速变化幅度最为明显, 在整治区域内呈“上挫下提”趋势, 最大流速变幅 ± 0.4 m/s; 整治区域上半部分流速变化骤然减小的主要原因是拆坝导致过水断面骤然放宽, 同一测点位置流速骤然下降。设计流量下, 在航道里程 868.5 km 附近航槽流速骤然增加, 随后新建顺坝段附近因疏浚挖槽影响, 航槽流速沿程下降; 整治流量下 868.5 km 以下航槽流速整体增幅约在 0.1 m/s, 主要原因是新建顺坝段约束水流向右岸扩散; 在多年平均流量下, 航槽内沿程流速整体增加, 平均增幅在 0.23 m/s 左右; 在中水流量下, 改扩建段航槽内流速沿程平均增幅在 0.13 m/s 左右, 说明工程措施有利于挖槽的稳定; 随着流量的增加水位抬高, 洪水流量下的航槽内流速变幅不明显。

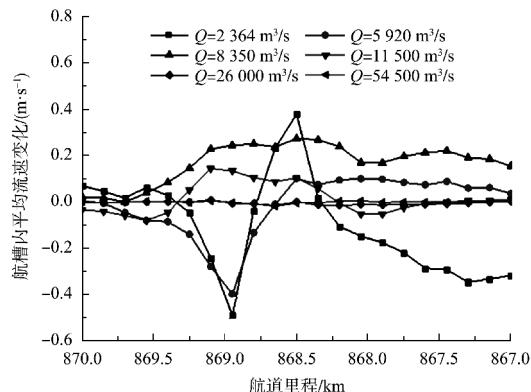


图 12 整治方案各计算工况下叉鱼碛滩段航槽内平均流速变化

2) 整治方案各计算工况消滩判数如图 13 所示。可以看出, 在工程前沿程消滩判数超限范围, 除特大洪水流量外, 设计流量、整治流量下消滩判数峰值分别为 3.72、3.88, 拆坝区域航中线消滩判数未超出 3.92 的标准。

3) 为进一步提高过渡段浅区的稳定性, 此处增加在多年平均流量下的冲刷, 将未拆除部分、改扩建部分坝体加高至设计水位上 3.0 m。航槽内平均流速变化方案对比见图 14。可以看出, 在多年平均流量下, 加高至设计水位上 3.0 m 方案在挖槽处流速增幅更为明显, 随流量增大而增幅减弱。

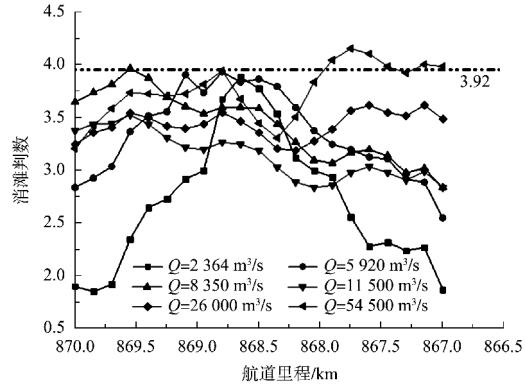


图 13 整治方案各计算工况下叉鱼碛滩段消滩判数

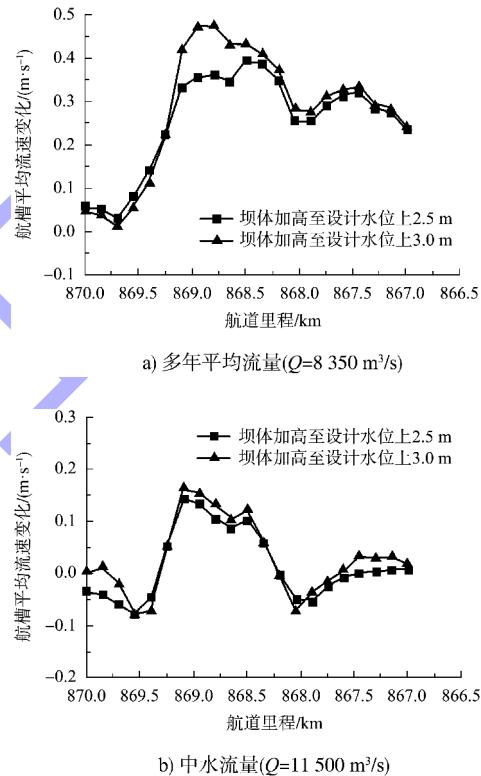


图 14 叉鱼碛滩段航槽内平均流速变化方案对比

叉鱼碛滩整治方案最后确定为: 改建段坝顶高程为设计水位上 3.0 m, 叉鱼碛原丁顺坝、顺坝、大砾口勾头丁坝高程为设计水位上 2.5 m。

5 结语

1) 通过采取不同代表流量下的滩段水流特性模拟试验, 得出本滩段过渡段浅区常年落淤与中水期水流过急的主要原因。计算结果表明, 强盗坝尾北南槽水流交汇, 导致水动力减弱从而落淤为出浅; 在中水期附近强盗坝及尾部丁顺坝未过流,

(下转第 100 页)