



嘉陵江中游龙爪湾滩航道整治工程方案研究

谢玉杰, 周玉洁, 何熙

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 针对嘉陵江中游龙爪湾受沙石开采影响, 采沙坑星罗棋布, 局部跌水明显, 中枯水弯曲半径仅 350 m, 水流困弯严重, 目前航道尺度达不到渠化后航道等级要求的问题, 进行了典型弯道型急流滩险碍航特性、整治参数和整治方案研究, 采用现场调查、水文统计、经验公式和数值模拟等方法, 得出改善龙爪湾滩通航条件并达到渠化后航道等级的较优整治方案。结果表明, 对该类滩险采取筑坝与疏浚相结合的方法, 可以调整河床形态、控制疏浚河底, 起到增加航道水深、改善通航流态、保障通航安全的整治效果。

关键词: 龙爪湾滩; 跌水坎; 急流滩; 航道整治

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0124-05

Scheme of channel regulation engineering at Longzhaowan Beach in middle reaches of the Jialing River

XIE Yu-jie, ZHOU Yu-jie, HE Xi

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: Aiming at the problems that Longzhaowan, in the middle reaches of the Jialing River, is affected by the sand mining, the sand pits are all over the place, the local water drop is obvious, the radius of the middle-low water is only 350 m, the water flow is trapped and bent seriously, and the current channel scale cannot meet the requirements of the channel grade after canalization, we study the navigation characteristics, regulation parameters and regulation scheme of typical bend rapids, use the methods of field investigation, hydrologic statistics, empirical formula and numerical simulation, obtain a better regulation scheme to improve the navigation conditions of Longzhaowan Beach and reach the channel grade after channelization. The results show that the combination of damming and dredging for this kind of shoal hazards can adjust the riverbed shape and control the river bottom dredging, also achieve the regulation effect of increasing the water depth of the channel, improving the navigation flow pattern, and ensuring navigation safety.

Keywords: Longzhaowan Beach; plunge pool; rapids; channel regulation

嘉陵江川境段全长 534 km, 是四川省最长的一条通航河流, 发源于陕西省秦岭南麓, 广元以下至合川为中游。目前嘉陵江川境段已渠化完成, 但由于亭子口电站设计水位变幅高达 20 m, 导致库尾存在长约 28 km 的变动回水区, 龙爪湾滩即为限制该段航道达到设计标准的咽喉, 为使嘉陵江川境段达到设计的航道标准, 研究龙爪湾滩的

整治方案具有重要的现实意义^[1-3]。同时嘉陵江川境段航道自复航以来, 变动回水区船舶安全航行的问题较为突出, 龙爪湾滩航道整治后是否能满足代表船型安全通行, 对于整治效果至关重要^[4]。本文将采取水文统计法对嘉陵江中游龙爪湾整治流量进行推算, 并运用水流二维数学模型对整治效果进行预测。

1 滩险概况

龙爪湾滩位于嘉陵江中游昭化境内, 上距白龙江汇合口 5.3 km。该河段属于典型的山区急弯河段, 河床为卵石质, 呈 V 形, 河谷最窄处仅 40 m。龙爪湾滩在 2010—2016 年期间受沙石开采影响严重, 沙石堆、采沙坑星罗棋布, 局部河床深潭达 10.0 m, 导致出现明显跌水, 至今该滩河床仍处于自然重塑阶段, 中枯水弯曲半径仅 350 m, 滩急水浅。河岸受右岸公路路基约束, 弯道发展受到限制, 弯曲半径基本维持现状, 见图 1。受弯道环流作用, 主流困弯, 深泓位于右侧, 凸岸边滩发育, 为典型弯道型急流滩, 目前枯水最小水深仅 0.4 m, 流速达 3.5 m/s 以上。

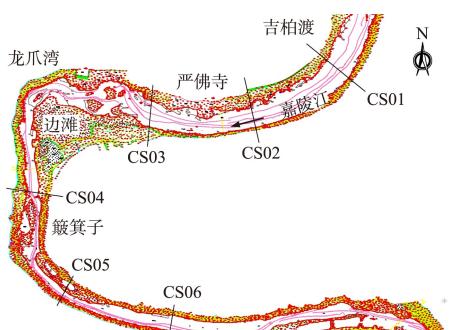


图 1 龙爪湾滩段

2 碍航特性

2.1 水流特性

随着上石盘、亭子口电站的相继建成, 龙爪湾滩河道的水沙过程发生明显变化。当下游亭子口坝前水位较高时, 变动回水区水位受壅水顶托影响, 水面线比降一般小于天然情况下同级流量的水面比降, 导致沿程水流输沙能力降低, 这对浅滩影响较大; 另一方面, 当上游上石盘电站入库流量大于电站发电引用流量 $253 \text{ m}^3/\text{s}$ 且小于水库排沙避峰流量 $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 电站满发并将大于发电引用 $253 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量部分, 通过控制闸门孔数和开度控制下泄, 汛后当入库流量逐渐恢复至 $253 \text{ m}^3/\text{s}$ 或更低时, 闸门全关, 电站恢复正常发电。主要表现为中枯水期流量削减, 造床流量持续时间减少, 枯水期历时增加。

2.2 碍航特征

龙爪湾滩碍航特性复杂, 总体因流急、水浅、弯曲半径小而碍航。该滩位于嘉陵江中游弯道处, 左岸为较大面积沙卵石边滩, 深槽位于右岸凹岸处, 深槽宽度窄且与左岸边滩存在较大高差, 造成枯水期该段横流较大; 另外该滩受采沙影响, 弯道上下河床局部地形差较大, 枯水期水流在此形成严重跌水, 当地称为“吊坎水”, 见图 2。同时该滩主流位于凹岸一侧, 水流困弯明显, 主流最大流速达 3.5 m/s 以上, 中枯水期船舶自航上滩困难。

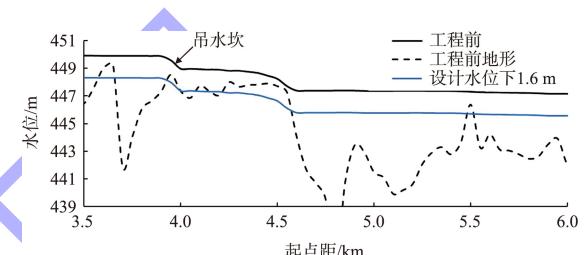


图 2 天然情况设计流量下龙爪湾滩水面线与 1.6 m 水深线

3 航道整治

3.1 整治标准

3.1.1 航道尺度标准

根据嘉陵江川境段航运配套工程通航标准, 龙爪湾滩整治标准为内河 IV-(3) 级航道, 设计船型尺度为 $58.0 \text{ m} \times 10.8 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ (长×宽×设计吃水), 设计航道尺度为 $1.6 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 330 \text{ m}$ (水深×单线航宽×弯曲半径)^[5]。

3.1.2 水流条件

工程推荐设计船型为 500 吨级集散两用船, 船型主尺度为总长 58 m、型宽 10.8 m、设计吃水 $1.6 \sim 1.8 \text{ m}$, 载货量为 616 t (45 TEU), 主机功率 294 kW。通过理论公式对船舶推力和航行阻力进行估算, 并通过推阻比对船舶自行上滩水流流速进行估算。

机动船有效推力估算公式为:

$$T_0 = \frac{5.63e H_p}{v_s} \quad (1)$$

式中: T_0 为机动船有效推力 (N); H_p 为主机总功

率(kW)； v_s 为上行船的船水相对速度(m/s)； e 为有效推力系数，可使用船舶设计书或出厂时实测结果所提供的数据。

船行阻力计算公式为：

$$R = R_j + \sigma(R_{V1} + R_{V2}) = R_j + \sigma\left(R_{V1} + \sum_{i=1}^n R_{Vi}\right) \quad (2)$$

式中： R 为船队的航行阻力(N)； R_j 为比降阻力(N)； R_{V1} 为机动船的航行水流阻力(N)； R_{V2} 为驳船队的总航行阻力(N)； R_{Vi} 为驳船*i*的航行阻力(N)； σ 为船队编队系数。

具体方法为根据载质量和船型确定吃水、水线长、浸水面积、舯剖面积等→给定比降→计算比降阻力→给定上滩流速→计算对水航速→计算水流阻力→确定航行阻力 R →根据功率及相关参数计算船舶推力 T →判断航线阻力 R 是否等于船舶推力 T ，如相等则给定的比降和流速即为该载质量、该功率下的急滩通航水力指标，否则需要新假定流速，直到阻力和推力平衡为止。计算得到设计代表船型上滩指标见表1。

表 1 设计代表船型自航上滩水力指标

水面比降/%	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
航槽流速/(m·s ⁻¹)	3.9	3.8	3.5	3.2	3.0

3.2 设计思路

龙爪湾滩碍航因素之一是弯曲半径小，船舶下行时调整航向困难，由于自然条件所限，增加弯曲半径较困难，因此改善船舶调整航向条件的措施可拓宽中枯水期的航槽宽度，通过新建整治建筑物，改善弯道水流条件，并提高水流的冲刷能力，防止航槽回淤^[6]。

针对龙爪湾滩航道碍航情况及河床演变趋势，该段航道整治线须重点考虑变动回水区航道特点，特别是整治高度的设计要考虑适当增加高度，延长整治建筑物作用时间，增加中水冲刷历时，保证水流对航槽的冲刷力^[7]。

鉴于龙爪湾滩河床地形受采砂影响严重，局部河床形成跌水的情况，疏浚工程布置时在满足航槽水深标准的基础上，着重考虑调整河床地形起伏，消除跌水。

对于滩险整治，龙爪湾滩设计思路为：航路

规划充分利用现有河道主流，顺应河道演变规律，整治线布置尽可能与现有中枯水航槽走向一致；整治工程以加深现有航槽，扩宽凸岸边滩，控制凹岸水流，改善弯道流态，同时考虑一定的整治高度保证航槽稳定。

3.3 整治参数

本工程设计标准为内河Ⅳ-(3)级航道，设计最高通航水位采取5 a一遇洪水，设计最低通航水位采取250 m³/s流量对应水位。

龙爪湾滩受上游电站下泄流量与下游坝前水位双重影响，整治参数的确定十分复杂^[8]。特别是造床流量对于河道的河型塑造和河床演变起到关键作用。造床流量分为第一造床流量和第二造床流量，其中枯水河槽横断面形态是第二造床流量，一般将其作为航道整治流量^[9]。本文根据亭子口长系列20 a入库流量资料统计分析得到第二造床流量为499 m³/s，见图3。

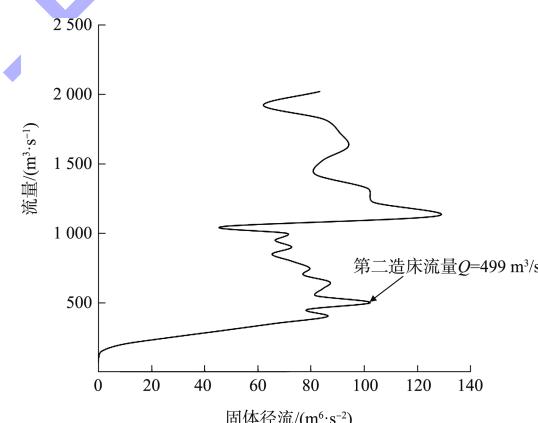


图 3 河道流量与河床特性关系

根据《航道工程设计规范》^[10]，计算得龙爪湾滩整治线宽度取90~120 m，整治流量为499 m³/s，整治水位较设计水位高1.0 m。

4 方案及整治效果分析

4.1 方案设计

根据设计思路，龙爪湾滩整治线规划以右岸作为主导河岸，上游侧以现有河滩为节点，下游侧以右岸公路路基外侧为节点，规划整治线为弯曲线，航槽选择现有深槽，沿设计航槽中心线布置挖槽工程，沿右侧整治线布置1座弯道顺坝，

顺坝坝根以丁坝接岸, 见图4。

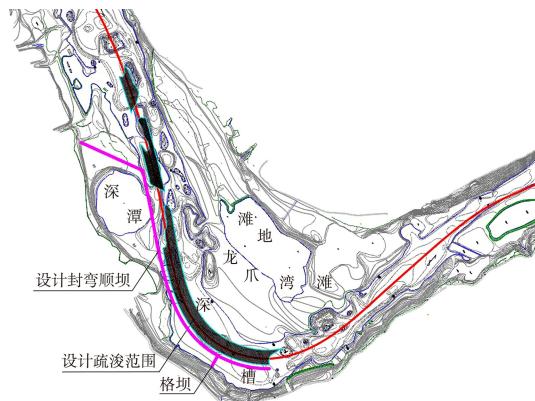


图4 龙爪湾滩设计方案布置

对设计方案采取数值模型试验研究, 模型上边界为龙爪湾滩上游4 km处的白龙江汇合口, 下边界为滩下游4 km处亭子口汛限水位回水末端。分别采用 $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (设计流量)、 $499 \text{ m}^3/\text{s}$ (整治流量)和 $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ (中水流量)3级流量, 并考虑亭子口电站汛限水位顶托, 进行工程前后的对比试验, 分析水流条件变化情况, 并对设计方案进行优化。

4.2 设计方案整治效果

4.2.1 整治前水流条件

整治工程实施前, 设计流量工况下, 龙爪湾滩不满足最小航深1.6 m的航道长达1 km, 占模型河段的12.5%; 靠近左岸边滩处流速在0.04~2.38 m/s, 平均流速为0.82 m/s, 右岸深槽主流区最大流速达3.74 m/s, 在规划航线上水位比降在0.02‰~12.04‰, 平均比降为1.24‰; 滩内存在明显的跌水现象, 见图5。

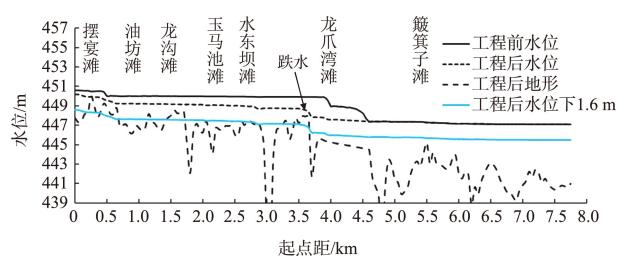


图5 整治前后设计流量下水位变化对比

整治流量下, 工程实施前的龙爪湾滩航道内流速在0.02~2.96 m/s, 平均流速为1.25 m/s, 水位比降在0.02‰~13.22‰, 平均比降为1.18‰, 滩内流速、比降随流量增加而增大; 滩内跌水现

象仍然存在。龙爪湾滩设计流量下实施前流场见图6。

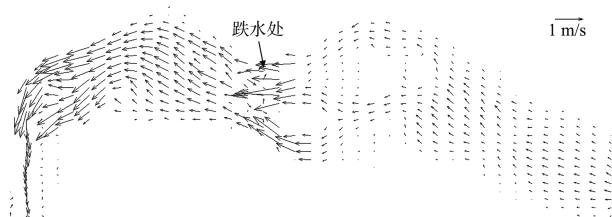


图6 龙爪湾滩设计流量下工程实施前流场

4.2.2 工程实施后水流条件

在龙爪湾滩右岸布置一条丁顺坝, 沿规划航槽中心线布置一个长挖槽。为消除滩内跌水, 挖槽上下游设计底高程等于所在处河床高程, 上游侧为445.50 m(设计水位448.76 m), 下游侧为444.50 m(设计水位447.45 m)。

设计方案实施后, 龙爪湾滩水面比降得到缓解, 跌水现象消失(图7), 但在滩头区域航深仍存在不足1.6 m的区域。设计流量下, 航道内流速在0.15~2.09 m/s, 平均流速为1.27 m/s, 水位比降在0‰~2.81‰, 平均比降为0.82‰, 航槽内局部大流速较工程前减小0.29 m/s, 这是由于疏浚消除了局部河床“吊坎水”所致。另外航槽内平均流速较工程前增加0.45 m/s, 这是由于右岸丁顺坝缩窄了河道, 减少了过流面积所致, 航槽平均水面比降较工程前降低0.42‰。表明疏浚方案对缓解急流滩水面比降和降低局部大流速起到了很好的作用, 右岸顺坝将增加航槽冲刷能力, 对减小疏浚区回淤有利。

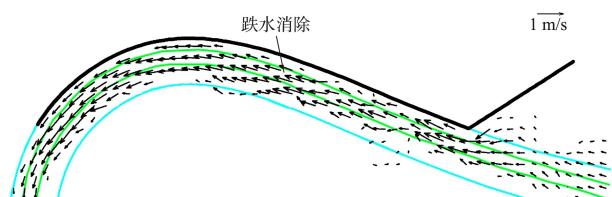


图7 工程实施后流场

整治前跌水上下地势高差大, 其靠岸侧为深槽, 枯水期水流在该区域分为两汊, 并在下游处汇入主航道造成主航槽内横流较大。丁顺坝修筑后, 水位不漫顶时, 丁坝段堵塞该处汊道, 水流经主航槽宣泄。方案实施后, 龙爪湾滩得到明显

改善, 但该处整治后上游水位下降明显, 水位平均下降了 0.60 m。方案实施后导致龙爪湾滩上游滩险出浅范围增加, 上游河道疏浚工程量大幅增加, 同时该方案龙爪湾滩挖槽工程量较大。

4.3 优化方案

鉴于龙爪湾滩河床局部地形高差较大, 枯水期水流在此形成严重跌水, 本次疏浚工程通过调整滩内河床纵比降, 消除滩中部跌水。设计方案虽然能够改善通航条件, 但是该方案滩上游水位下降较大, 达 0.60 m, 考虑该类滩险在枯水期随着疏浚水深的增加, 水位降落值逐渐增大, 过多增加疏浚深度后, 航道水深反不增加, 设计方案可能存在过量疏浚的问题。为减小滩上游新增疏浚工程量, 同时为进一步减少龙爪湾滩设计疏浚工程量, 优化方案将挖槽设计底高程增加 1.0 m, 上游段修改为 446.50 m, 下游段修改为 445.50 m, 同时对滩上游航深不足 1.6 m 的区域增加 1 处疏浚工程, 该疏浚设计河底高程与周边河床齐平, 取 447.00 m。

优化方案实施后, 龙爪湾滩水深仍能满足最小航深 1.6 m 的要求, 同时该滩挖槽工程大幅减少, 龙爪湾滩及其上游水位降落相比设计方案有所减小。优化方案实施后, 滩上游水位较设计方案上升 0.09~0.12 m, 滩内水位平均上升 0.10 m。

4.4 优化方案整治效果

4.4.1 设计流量

龙爪湾滩为典型的弯道性碍航滩险, 流速大、比降陡、流态乱, 左岸为沙卵石浅滩, 右岸为深槽, 枯水期水流集中右深槽, 造成航道完全半径不足, 同时右岸深槽与左岸边滩的地形高差导致弯曲段横向流速较大, 优化方案在右岸修建 1 处丁顺坝将水流导入规划航槽内, 起到减小航道弯曲半径的作用, 同时对规划航槽浚深, 丁顺坝的修建缩窄了航道过水断面面积, 设计流量下航道内水深在 1.75~5.53 m, 满足设计最小航深 1.6 m 的要求, 航道内流速 0.54~2.09 m/s, 航槽内比降

在 0‰~2.51‰, 平均比降为 0.68‰, 整治方案起到较好效果。

4.4.2 整治流量

整治流量下航道内水深在 2.58~6.41 m, 满足设计最小航深 1.6 m 的要求, 航道内流速在 0.77~2.82 m/s, 航槽内比降在 0.02‰~2.43‰, 平均比降为 0.77‰, 整治方案起到较好效果。

龙爪湾滩挖槽区水深按照整治流量下平均水深 2.85 m, 计算得到该处泥沙临界起动流速 1.67 m/s, 整治实施后, 整治流量下挖槽区为微冲, 整治效果较好。

4.4.3 中水流量

优化方案实施后, 在设计流量以及整治流量下均取得较好整治效果。为了探求在中水时的航道条件, 对优化方案水流条件选取了 5 000 m³/s (中水流量)进行整治效果分析。

中水工况下, 随着水位升高, 河面进一步拓宽, 航槽内流速有所增加, 流速为 0.82~4.28 m/s, 流速变幅在 0.05~1.13 m/s, 该滩段比降在 0.01‰~3.44‰, 平均比降为 0.51‰。整治方案对中水影响较小, 从流速以及流态来看, 工程前后几乎没有影响, 航道断面流态分布较为均匀。

5 结语

1) 龙爪湾滩位于嘉陵江中游昭化境内, 属于典型弯道卵石急流浅滩, 其主要问题是受亭子口电站回水顶托和上石盘电站发电引流影响, 中枯水期流量削减, 造床流量持续时间减少, 枯水期历时增加, 造成航道出浅及急弯河段弯曲半径小, 船舶安全过弯和自航上滩困难。

2) 本滩的设计思路为航路规划充分利用现有河道主流, 顺应河道演变规律, 整治线布置尽可能与现有中枯水航槽走向一致; 整治工程以加深现有航槽、扩宽凸岸边滩控制凹岸水流、改善弯道流态, 同时考虑一定的整治高度保证航槽稳定。