



老木孔航电枢纽工程二期一枯调整方案 通航水流条件研究

王云莉¹, 庄千棉¹, 杨艳², 周世良¹

(1. 重庆交通大学, 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016;
2. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 岷江老木孔航电枢纽工程坝址上游三汉江心洲河段由多汊航道改造为单一航槽, 同时下游水流控制节点江心洲被提前全部开挖, 导致通航水流条件恶化。针对坝址河段存在的水流散乱、水浅流急等通航问题, 通过整体定床物理模型试验对二期一枯调整方案的通航水流条件进行了系统研究。试验表明, 将二期枯期围堰围右侧8孔扩宽至10孔后, 上游与三江村改道中槽下部的水位衔接问题得到显著改善; 同时, 在左侧及坝下过渡段下游修建长530 m的丁顺坝可有效提升航道水深并平顺水流, 使最小通航水深从1.51 m提高至1.94 m。优化方案实施后, 通航水流条件明显改善, 最大航行阻力系数由1.05降低至0.69, 各项通航水力指标均满足相关设计规范限值。研究成果可为类似航电枢纽工程的通航水流条件优化提供参考。

关键词: 施工期通航; 通航水流条件; 定床物理模型试验; 消滩水力指标

中图分类号: U611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0172-11

Study on navigable flow conditions of adjustment scheme of Laomukong navigation-power junction project phase II in the first dry season

WANG Yunli¹, ZHUANG Qianmian¹, YANG Yan², ZHOU Shiliang¹

(1. Chongqing Southwestern Research Institute for Water Transport Engineering,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

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

Abstract: The upper reaches the dam site of Laomukong Navigation-power project on Minjiang River is transformed from multi-branch to single channel. Meanwhile, the downstream flow control node is pre-excavated, causing deteriorated navigation flow conditions. Aiming at navigation issues like scattered flow and rapid shallow current, the navigation flow conditions of phase II adjustment scheme in the first dry season are systematically studied via overall fixed-bed physical model tests. The test shows that after the 8 holes on the right side of the phase II cofferdam in dry season are widened to 10 holes, the water level connection between the upstream and the lower part of the middle channel of the Sanjiang village diversion is significantly improved. At the same time, a spur training dam with a length of 530 m is built on the left side and downstream of the transition section under the dam, which can effectively improve the channel depth and smooth the flow, and increase the minimum navigation depth from 1.51 m to 1.94 m. After the implementation of the optimization scheme, the navigation flow conditions are obviously improved, the maximum navigation resistance coefficient is reduced from 1.05 to 0.69, and all navigation hydraulic indexes meet the limits of relevant design specifications. The research results can provide reference for the optimization of navigable water flow conditions in similar navigation-power junction projects.

Keywords: navigation during construction period; navigable flow conditions; the fixed-bed physical model test; hydraulic index of rapids abating

收稿日期: 2025-05-25 录用日期: 2025-07-01

作者简介: 王云莉(1974—), 女, 博士, 副研究员, 从事水利水运工程科学研究工作。

岷江是四川“一横两纵”水运进出的主通道及大件运输的唯一水上通道。岷江老木孔航电枢纽位于乐山市,是岷江下游近期开发的第一级航电梯级,坝址在大渡河汇口下游约 12.3 km 处,下游衔接东风岩枢纽。该枢纽是以航运为主、结合发电,兼顾防洪等综合利用的大型工程。坝轴线由左至右为 23 孔泄洪闸、厂房(8 台机组)和船闸。坝址下游约 900 m 处为成贵铁路桥,其通航孔位于河道右侧。

坝址河段为典型分汊型河道,河床宽浅、汉道交错、洲滩发育。受采砂、左岸防洪堤(2020 年洪水后加高)及建库封堵三江村左、右汉的影响,其下部通航水流条件受坝区施工导流方案影响大,施工期通航需将左汉航道改道至中槽。施工明渠通航期间,坝址至下游铁路桥之间航道需从左岸过渡至右岸。该过渡段原为癞儿滩,原模型试验推荐在江心洲斜挖航槽,利用其下部较高河床起保护作用。然而,实际水下施工难度大,未严格按设计方案执行,导致癞儿滩下部较方案多挖 2 m,使过渡段航道下游失去保护,水流条件恶化,呈现典型的水浅流急碍航问题。同时,受用地交付滞后、左岸堤防及移民迁改进度延迟、右岸规划未定等制约,原模型试验推荐的左岸优先施工方案难以实施,需调整为右岸优先施工方案。因此,需通过物理模型试验对设计调整方案进行研究,优化通航水流条件,保证船舶航行畅通。

国内学者对施工期通航问题的研究为类似工

程提供了参考,常规措施包括疏浚、挖填及丁坝、潜坝等整治建筑物^[1-3]。相关案例研究表明:通过导流模型试验阐释水流特性^[4],针对枯水浅滩、汛期急流设计临时航道及优化航线^[5],采用岸坡开挖、疏浚、炸礁^[6],或调整围堰布置、扩大过流断面、疏挖地形^[7]等措施,可有效改善施工期通航水流条件。

本文以二期一枯施工阶段工程河段为对象,借鉴既有经验,综合考虑山区河流水文特性与施工环境复杂性,开展通航水流条件优化研究。

1 工程概况

岷江作为四川省重要的内河航运通道,当前航道等级为 IV 级大件运输航道,老木孔航电枢纽工程位于四川省乐山市境内,系岷江干流下游航电开发规划中 4 个梯级电站的首级工程。工程坝址坐落于大渡河与岷江交汇处下游 12.3 km 处,与下游东风岩枢纽工程相衔接。工程采用河床式开发方案,主要建筑物包括拦河闸坝、发电厂房、船闸、防洪堤、涌斯江生态电站以及库区河道疏浚工程等组成部分。具体而言,船闸布置于右岸(预留二线船闸扩建空间),其闸室有效尺寸为 280 m×34 m×4.5 m(长×宽×门槛水深);发电厂房则位于船闸左侧。电站总装机容量达 405.7 MW,其中主电站装机容量 400 MW,生态电站装机容量 5.7 MW,年发电量可达 15.65 亿 kW·h。泄洪冲沙系统由 23 孔闸门组成,布置于主河槽区域,天然状况老木孔航电枢纽坝址河段河势见图 1。

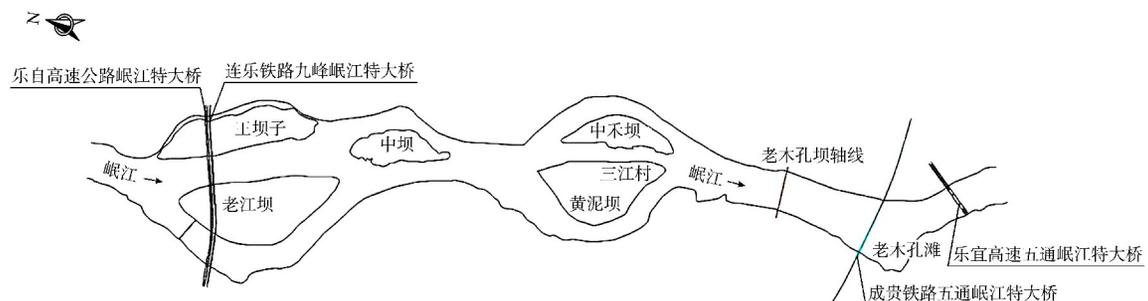


图 1 天然状况老木孔航电枢纽坝址河段河势

Fig. 1 River regime of Laomukong navigation-power junction dam site in natural condition

鉴于工程河段常年通行 300 吨级船舶且需保障重大件运输需求, 施工期间必须维持航道通行能力。基于此, 设计采用现行大件运输船舶作为施工期通航代表船型, 设计代表船型主尺度为 68 m×12.8 m×1.8 m(船长×型宽×吃水)。为保障施工期间的通航安全, 通航渠道与上下游主航道的水流应平缓过渡, 水流最大表面流速不应影响船舶的安全航行。

调整后的施工导流方案分 3 期实施。一期进行左岸 13 孔泄洪闸、纵向导墙、左岸挡水坝、左岸连接坝施工, 由右岸主河床过流和通航; 二期进行右岸船闸、厂房、10 孔冲砂泄洪闸、鱼道、右岸连接坝、全年围堰施工, 由左岸已部分实施的泄洪闸坝段过流和通航; 三期完建左岸 13 孔泄洪闸剩余工程, 由永久船闸临时通航, 10 孔冲砂泄洪闸过流。

2 模型设计与验证

2.1 模型设计与制作

根据相关模型试验规程和规范要求, 结合工程河段的河势及工程布置特点, 模型上游边界位于坝址上游约 10.6 km 处(距老江坝江心洲头上游约 900 m), 模型下游边界位于坝址下游约 3.4 km 处。模型边界的选择旨在确保模型能够充分反映工程河段的水流特性, 同时避免边界效应对试验结果的干扰。按照重力相似准则和几何相似准则, 设计为 1:100 的正态模型。

流量通过标准矩形量水堰进行测量和控制, 测量误差范围≤1%。水位采用水位测针测量, 精度为 0.1 mm(相当于原型水位 1 cm)。表面流速由重庆西南水运工程科学研究所研制的 XKVMS-03 型大范围表面流场测量仪进行观测, 局部流速由 HD-4 型电脑流速仪和小威龙多普勒三维流速仪进行测量。监测结果显示, 最大流速的相对误差可控制在±5%以内, 符合试验精度要求, 表明模型能够准确模拟原型的水流特性, 为工程优化提供

了可靠的数据支持。

2.2 模型试验工况

工程河段模型试验观测工况见表 1。根据模型试验成果, 模型试验工况从最不利通航角度考虑, 选取枯期流量为 1 200、2 500 m³/s, 研究左岸 15 孔泄洪闸闸段布置以及上下游的衔接布置, 以满足施工期间设计船舶的通航水流条件。

表 1 工程河段模型试验观测工况

Tab. 1 Model test observation conditions of engineering river section

工况组号	岷江流量/(m ³ ·s ⁻¹)	尾水水位/m	备注
工况 1	1 200	340.24	枯期最小通航流量
工况 2	2 500	342.64	枯期最大通航流量

2.3 模型验证

本文主要对工程河段天然河道瞬时水面线及典型断面流速分布进行验证。

对于水面线验证, 模型主要采用 2022 年 3 月实测枯水期(流量 $Q=1\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$)的水面线数据作为校核模型与原型河床阻力相似的依据。经分析, 模型水位与原型水位差值基本在±0.1 m 以内, 符合相关规范要求, 模型水位验证见图 2。

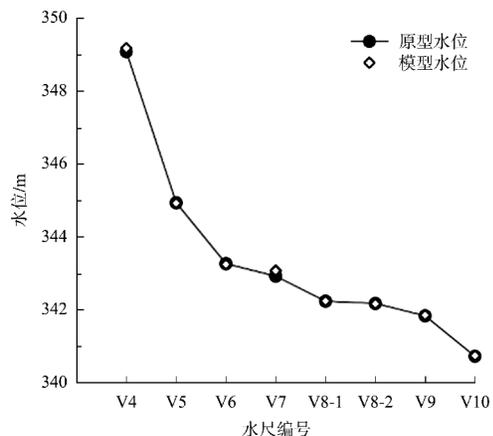


图 2 模型水位验证

Fig. 2 Model water level verification

典型断面平面位置见图 3。对于典型断面流速分布验证, 模型根据 2022-03-01 实测全河段 10 个控制断面流速分布资料进行验证。结果表明, 模型与原型河道典型断面流速分布规律基本一致, 断面流速验证结果见图 4。

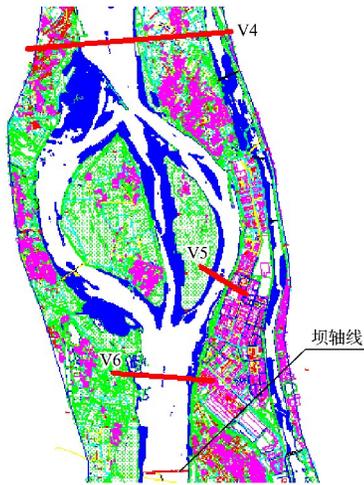


图 3 典型断面平面布置

Fig. 3 Plane layout of typical sections

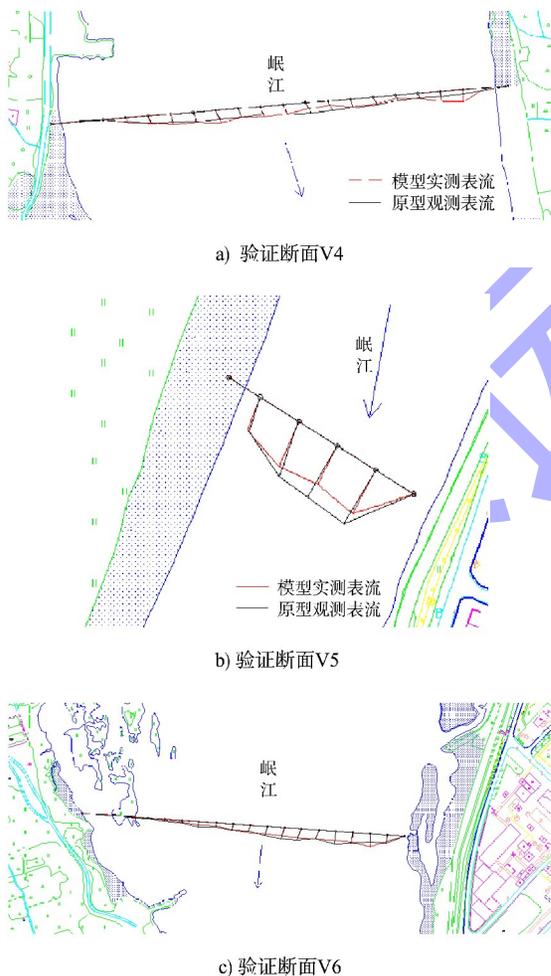


图 4 典型断面垂线平均流速分布验证

Fig. 4 Verification of vertical average velocity distribution of typical sections

3 通航水流标准

3.1 通航水力指标

消滩水力指标是衡量船舶在急滩航道中航行

能力的重要参数, 通常指船舶在额定功率和额定载重工况下能够自航上滩的最大流速和比降组合。它是急滩整治设计的重要依据, 通过对比航道整治后的流速和比降, 可以评估航道工程的整治效果。消滩水力指标的重要性在于它直接反映了船舶的上滩能力, 对保障船舶航行安全、优化航道整治设计以及提升通航效率具有关键作用。合理的消滩水力指标能够有效降低航道的碍航风险, 减少船舶搁浅、碰撞等事故的发生。

根据老木孔航电枢纽坝址河段水流条件特性, 设计航道水力学指标: 流速 $v \leq 3.5 \text{ m/s}$, 比降 $J \leq 3.5\text{‰}$, 断面系数 ≥ 6 。

3.2 船舶航行阻力

船舶航行阻力主要包括水流阻力和坡降阻力, 水流阻力与流速平方成正比, 坡降阻力则是船舶重力沿水流方向的分量。匀速航行时, 阻力与有效推力保持平衡。基于这一力学关系, 许光祥等^[8]推导出流速与比降的关系式, 并提出消滩水力指标计算公式, 其中关键参数 λ 的取值直接影响计算结果的准确性, 见式(1)。

$$E = \lambda L J + v^2 / 2g \quad (1)$$

式中: E 为船舶航行的综合阻力系数; λ 为系数, 可取 $1.5 \sim 2$; L 为代表船舶长度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 。

在消滩水力指标计算中, λ 的取值存在理论计算与工程经验两种方法: 一些学者从理论角度推导了 λ 的计算方法^[9-11], 而《航道工程手册》和《川江航道整治》则基于大量工程实践数据, 建议对滩口段长度超过 500 m 的急滩统一取 $\lambda = 1$ 。以老木孔航电枢纽河段为例, 其滩口段长达 620 m , 水流条件符合“长滩口急滩”的特征, 因此可采用 $\lambda = 1$ 。

根据《航道工程手册》统计, 山区卵石河床航道的允许最大流速为 $3.0 \sim 3.5 \text{ m/s}$, 比降为 $2\text{‰} \sim 3\text{‰}$ 。考虑到工程河段上行船舶 90% 以上为空载或半载状态, 船舶推力显著降低, 为保证计算结果的可靠性, 本文选取允许范围内的上限值即 $v = 3.5 \text{ m/s}$ 和 $J = 3.5\text{‰}$ 作为计算条件。将代表船型参数及上述水力条件代入式(1), 计算得到综合阻力

系数最大限值为 $E=0.86$ 。

4 设计调整方案通航水流条件研究

4.1 设计调整方案布置

由于工程建设用地交地滞后、左岸和邦防洪堤及移民专项迁改未实施、右岸老江坝作业区规划未定等工程实际条件限制，原模型试验推荐方案无法按计划实施。因此，本文研究基于上述工程实际条件约束，对原推荐方案进行了调整，将先左岸下河施工改为先右岸下河施工，即设计调

整方案。模型试验需针对此调整方案，尤其是其二期一枯施工导流与通航方案进行深入研究及优化。

原模型试验推荐设计平面布置：坝区左岸临时明渠通航，枯期围堰围右岸、修建 8 孔泄洪冲沙闸、电站和船闸，该围堰占据右岸河道宽 620 m，左岸导流与通航明渠缩窄至 320 m，枯期及全年围堰顺河方向长 826 m。在枯期围堰转角下游 500 m 处左岸突嘴前沿增设 1 枯水临时梯步丁坝，高丁坝长 80 m，丁坝高程 344.3 m，低矮丁坝长 85 m，丁坝高程 343.3 m，见图 5。



图 5 原模型设计平面布置(单位: m)

Fig. 5 Plane layout of the original model design(unit: m)

调整方案试验前左岸坝址下游及过渡段河床已经开挖，但现场施工参数与推荐布置方案存在偏差，主要表现为：1) 老木孔坝址下游左岸扩挖河床段实际疏浚高程降至 340 m，较设计值(341.5 m)降低 1.5 m，且未保留复式边滩结构；2) 航槽过渡段上游高程最大降幅达 2 m；

3) 癞儿滩江心洲下游段最大降幅达 4 m。这些变化导致坝区通航水流条件恶化。同时，由于围堰导流方案进行了局部调整，将左岸临时明渠右侧纵向导向调整为枯期围堰的一部分，导致左岸临时明渠宽度由 320 m 增至 360 m，临时通航明渠扩宽 40 m，见图 6。

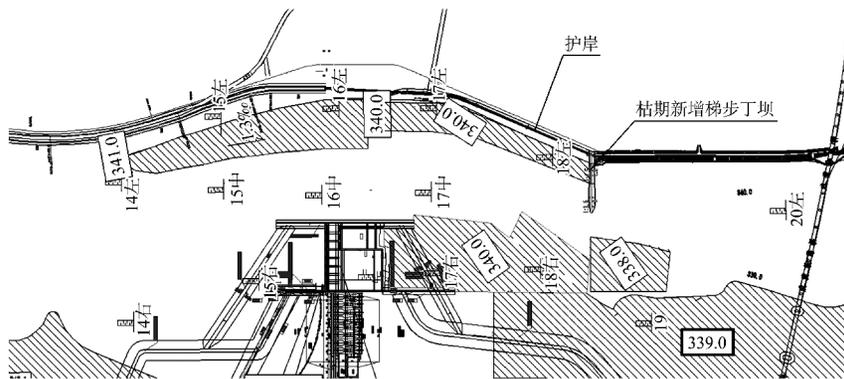


图 6 设计调整方案平面布置(单位: m)

Fig. 6 Plane layout of design adjustment scheme(unit: m)

4.2 设计调整方案通航水流条件

设计调整方案通航水流条件试验结果见图 7、8。当流量 $Q=1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 河段大部分流速在 $2\ \text{m/s}$ 以下, 少数断面流速在 $3.0\ \text{m/s}$ 以下, 坝址下游 $0\sim 1\ \text{km}$ 处最大流速为 $2.28\ \text{m/s}$, 对应水面比降为 2.2‰ , 船舶上行阻力系数为 0.41 , 但最小

航深为 $1.52\ \text{m}$, 无法满足吃水为 $1.8\ \text{m}$ 的大件船舶通行。坝址下游 $1.5\sim 2.5\ \text{km}$ 处最大流速为 $1.83\ \text{m/s}$, 对应水面比降为 0.64‰ , 船舶上行阻力系数为 0.21 , 但最小航深为 $1.51\ \text{m}$, 无法满足吃水为 $1.8\ \text{m}$ 的大件船舶通行。

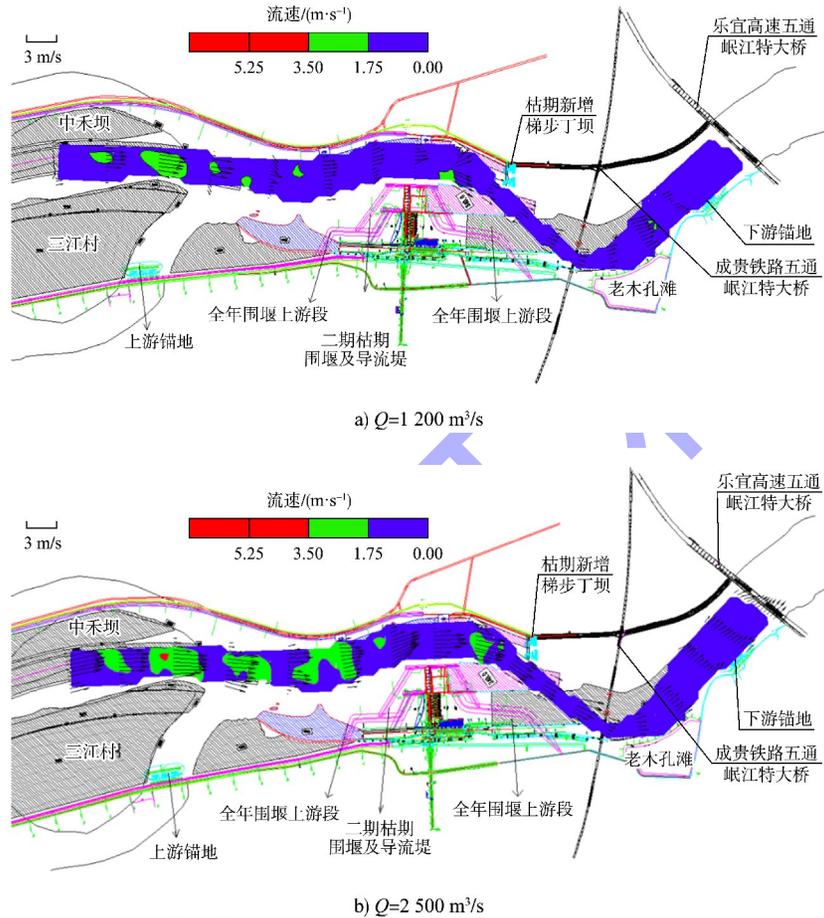


图 7 设计调整方案流场分布

Fig. 7 Flow field distribution of design adjustment scheme

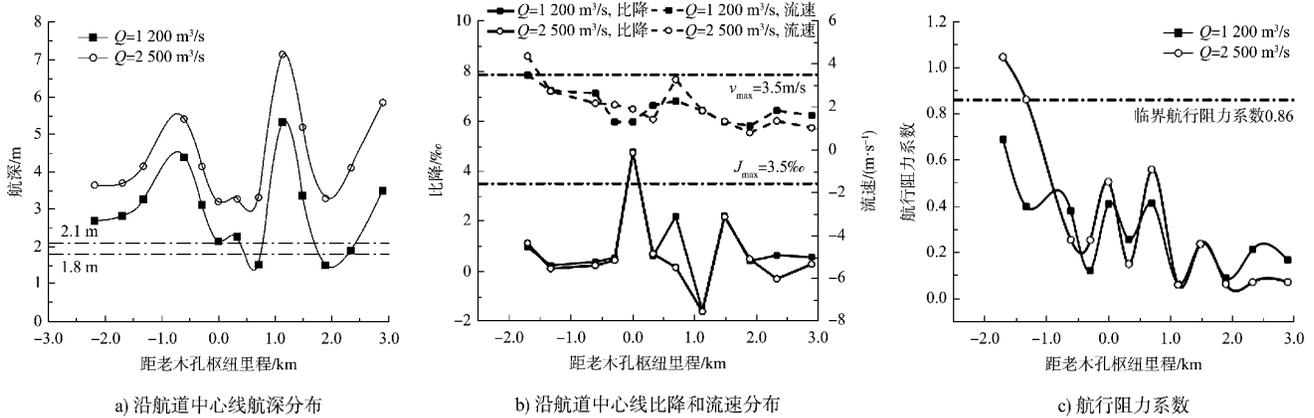


图 8 设计调整方案航道水力参数

Fig. 8 Waterway hydraulic parameters of design adjustment scheme

当枯水流量增加至 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 工程河段最小航深为 3.2 m , 满足设计大件船舶 1.8 m 的吃水要求, 坝址上游 $1\sim 2\text{ km}$ 处最大流速为 4.36 m/s , 对应水面比降为 1.13‰ , 船舶上行最大阻力系数为 1.05 , 不满足设计要求, 此时船舶不能上行通过该河段。

从试验成果可以看出, 设计调整方案存在以下问题: 1) 在试验流量下, 上游三江村中槽尾部至下游成贵铁路桥河段水浅流急; 2) 坝址上游受大流量河道行洪以及河势条件的限制, 采用左岸未开挖河床和左岸修建泄洪闸壅高上游水位作用有限; 3) $Q=1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 坝址上游水面不能与三江村中槽尾部平顺衔接, 仍呈现出水浅、流急的情况, 不能满足设计船舶通航水流条件的要求, 船舶不能上行通航三江村中槽尾部河段。

5 优化方案通航水流条件试验与分析

5.1 优化方案1通航水流条件

5.1.1 优化方案1工程布置

优化方案1将左侧7孔泄洪闸位置宽度 165 m 设置为临时明渠航道(闸底高程施工至 340 m), 利用左侧缓流区通航。临时明渠及下游过渡段修建丁顺坝(长 630 m , 坝顶高程为 342.0 m), 以壅高坝址下游航道水位及调顺水流, 同时在临时明渠右侧纵向导墙下游修建一平行于过渡段航道导流坝, 长 690 m , 坝顶高程为 342.0 m , 束窄航道, 壅高最小通航流量水深。与此同时, 对左岸6孔泄洪闸上游边滩河床实施了疏浚工程, 河床高程达到 $340\sim 341\text{ m}$, 河床底坡设计为 2.0‰ , 使其满足航道条件的同时, 最大程度壅高上游水位衔接上游航道, 优化方案1平面布置见图9。

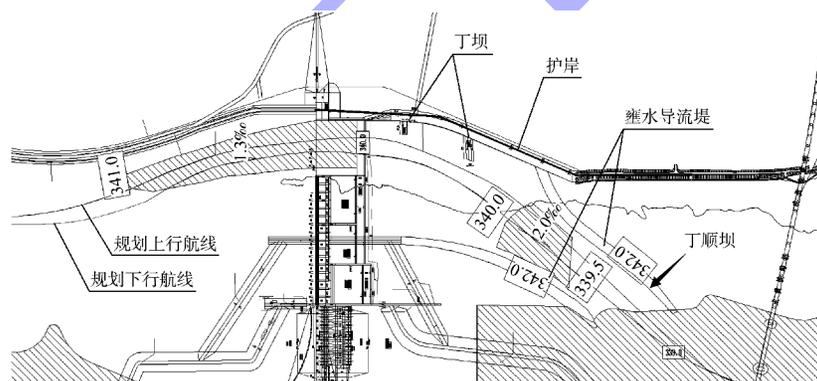


图9 优化方案1工程布置(单位: m)

Fig. 9 Engineering layout of optimization scheme 1 (unit: m)

5.1.2 优化方案1通航水流条件

优化方案1通航水流条件试验结果见图10、11, 当流量 $Q=1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 坝址上游 $1\sim 2\text{ km}$ 处最小航深为 2.69 m , 航深富余, 但最大流速达 4.18 m/s , 对应水面比降为 0.16‰ , 船舶上行阻力系数为 0.90 , 不满足设计要求。坝址下游 $1.5\sim 2.5\text{ km}$ 处最大流速为 0.20 m/s , 对应水面比降为 0.24‰ , 船舶上行阻力系数为 0.02 , 但最小航深

为 1.59 m , 无法满足吃水为 1.8 m 的大件船舶通行。

当枯水流量增加至 $2\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 工程河段最小航深为 3.32 m , 航深富余, 满足设计大件船舶 1.8 m 的吃水要求, 坝址上游 $1\sim 2\text{ km}$ 处最大流速仍高达 4.3 m/s , 对应水面比降为 1.49‰ , 船舶上行最大阻力系数为 1.04 , 不满足设计要求。

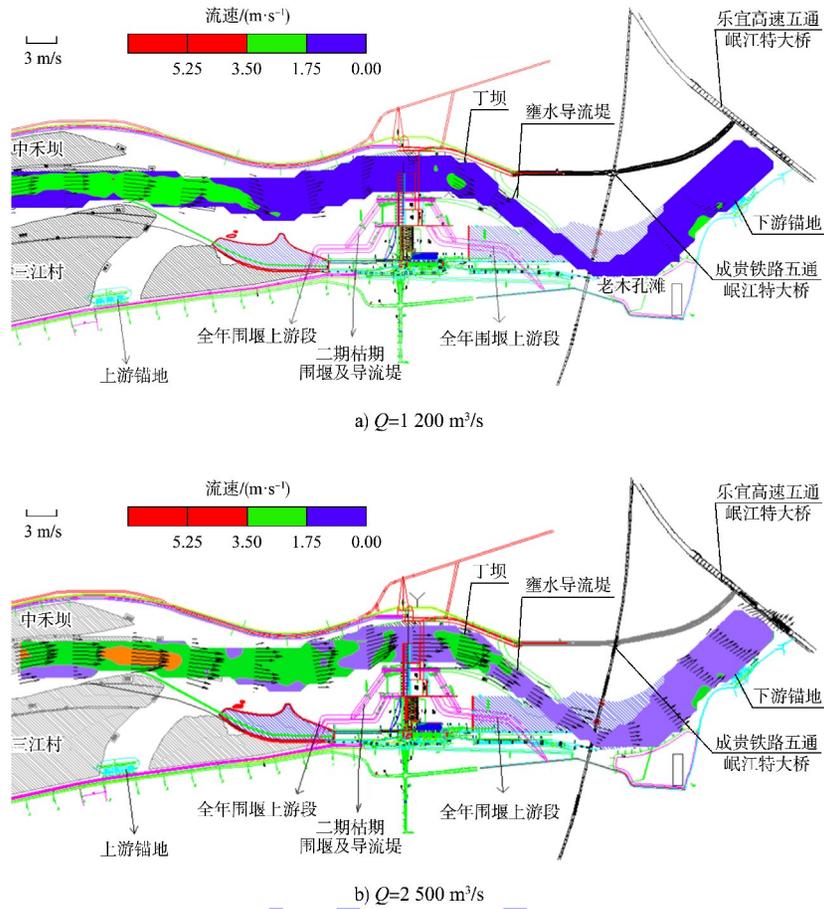


图 10 优化方案 1 流场分布

Fig. 10 Flow field distribution of optimization scheme 1

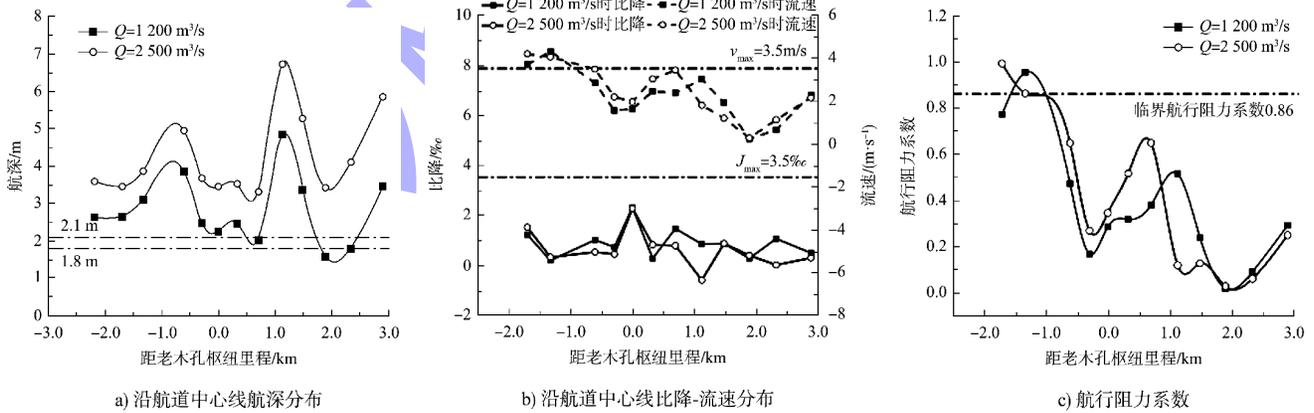


图 11 优化方案 1 航道水力参数

Fig. 11 Waterway hydraulic parameters of optimization scheme 1

5.2 优化方案 2 通航水流条件

5.2.1 优化方案 2 工程布置

为避免将过坝临时航道设置在河道最左侧时, 船舶下行与下游右侧成贵铁路桥出现通航衔接的风险, 将坝址左侧临时明渠通航段设置在右到左

11~19 孔河段, 以减小大流量时船舶下行失控的风险, 同时枯期围堰由围右侧 8 孔扩宽至 10 孔, 扩宽围堰壅水段宽度 50 m, 将左岸明渠的过流河宽从设计值 363 m 缩减至 314 m, 以壅高上游水位, 与三江村改道中槽下部水位衔接。

在坝址上游，将枯期围堰改为弧形，一方面可以壅高上游水位，另一方面可以调顺下游过坝下泄水流。在坝址下游，取消临时明渠右侧纵向导墙下游新增的导流坝，缩短优化方案 1 下游侧丁顺坝至 530 m(坝顶高程为 342.5 m)，以壅高水位和调顺左岸下游及下游过渡段航道流态，优化方案 2 布置见图 12。

枯期围堰下游出口左岸至右岸过渡段航道(原癞儿滩位置)现状已疏浚地形高程达 2 m 左右，与右岸天然地形高程未衔接。为了使左、右岸航道水流平行衔接，减少局部水面比降和消除局部急流流态，在原癞儿滩附近航道上开挖一长 255 m、宽 80 m 的航槽。

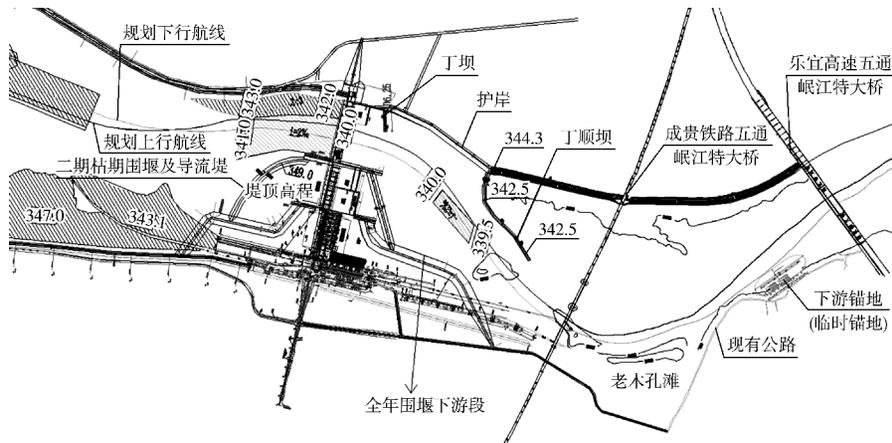


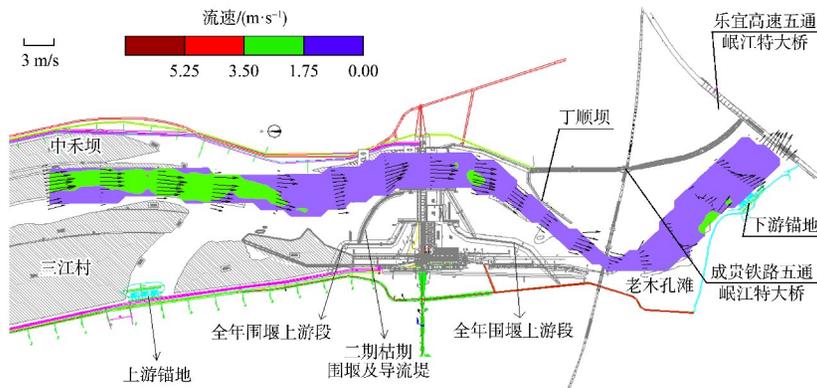
图 12 优化方案 2 工程布置(单位: m)

Fig. 12 Engineering layout of optimization scheme 2(unit: m)

5.2.2 优化方案 2 通航水流条件

优化方案 2 通航水流条件试验结果见图 13、14。当流量 $Q=1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，工程河段最小航深达到 1.94 m，满足航道设计要求。此时，坝址上游 1~2 km 范围内最大流速为 3.48 m/s，对应水面比降为 1‰，船舶上行阻力系数为 0.69，流速与比降

指标均符合设计标准。当枯水流量增至 $2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，工程河段最小水深显著增加至 3.63 m，航深富余。该工况下，坝址上游 1~2 km 范围内的最大流速为 3.50 m/s，对应水面比降为 0.03‰，船舶上行最大阻力系数为 0.63。工程河段两种工况下的各项水力学参数均满足设计指标要求。



a) $Q=1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$

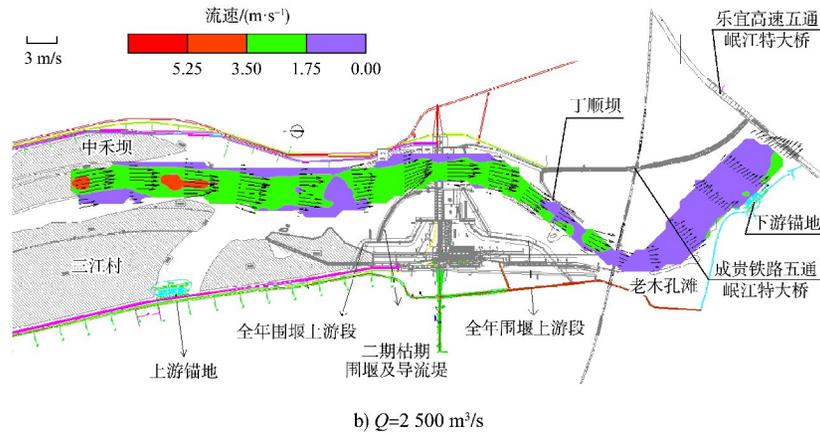


图 13 优化方案 2 流场分布

Fig. 13 Flow field distribution of optimization scheme 2

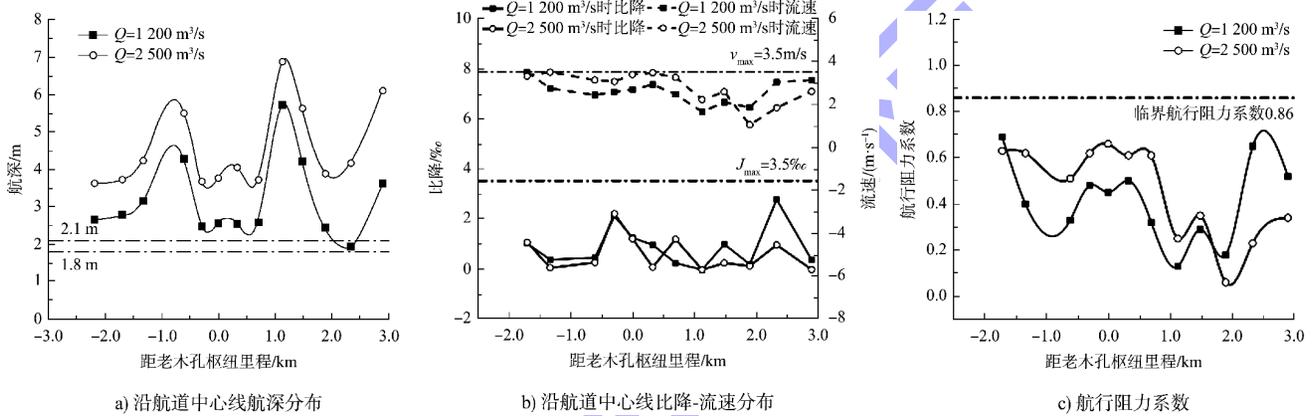


图 14 优化方案 2 航道水力参数

Fig. 14 Waterway hydraulic parameters of optimization scheme 2

5.3 优化方案通航水流条件对比

试验结果表明, 优化方案 1 在两种工况下均显著改善了水面比降, 最大比降值由 4.78‰、4.74‰分别降至 2.29‰、2.25‰。然而, 该方案的通航水流条件仍存在不足: 三江村中槽段数在两种工况下最大流速分别达 4.18 和 4.30 m/s, 船舶上行阻力系数分别达到 0.90 和 1.04, 超出规范限值; 同时在流量 $Q=1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 工况下, 最小水深仅 1.59 m, 无法满足设计船舶的通航要求。相比之下, 优化方案 2 水流条件更利于通航, 其最小水深提升至 1.94 m, 满足设计船舶的基本通航要求; 船舶上行阻力系数则降至 0.69、0.66, 显著优于规范限值。

6 结论

1) 由于下游水流条件控制节点江心洲被破坏,

导致坝址河段通航水流条件恶化。表现为最小通航流量 $Q=1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 下, 最小航深为 1.51 m, 无法满足最小通航水深要求; 在最大通航流量 $Q=2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 下, 最大流速高达 4.30 m/s, 并且船舶上行最大阻力系数为 1.05, 不利于船舶航行。

2) 为束窄河宽, 提升壅水能力, 将枯期围堰围右 8 孔扩展至 10 孔, 临时通航明渠宽度保持在 314 m, 与原设计方案基本一致, 能有效解决上游与三江村改道中槽下部的水位衔接问题。

3) 在左侧及过渡段下游修建长 530 m 丁顺坝能有效提高左侧明渠及下游过渡段的水深和平顺水流, 优化后航道水深基本达到 1.8 m 水深要求, 最大流速、最大比降及船舶上行综合阻力系数均满足设计要求。

参考文献:

- [1] 吴英卓, 江耀祖, 王智娟, 等. 兴隆船闸关键水力学问题研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 6-12.
WU Y Z, JIANG Y Z, WANG Z J, et al. Research of key hydraulic problems of Xinglong shiplock [J]. Hydro-science and engineering, 2012(4): 6-12.
- [2] 胡亚安, 李君, 宗慕伟. 红水河乐滩船闸输水系统水力特性原型调试研究[J]. 水利水运工程学报, 2008(1): 6-13.
HU Y A, LI J, ZONG M W. Study by prototype debug on hydraulic characteristics of the filling and emptying system of Letan ship lock on Hongshui River[J]. Hydro-science and engineering, 2008(1): 6-13.
- [3] 宣国祥, 李君, 黄岳, 等. 中水头巨型船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统水动力学研究[J]. 水运工程, 2016(12): 36-41.
XUAN G X, LI J, HUANG Y, et al. Hydrodynamic study of wall-culvert side-port filling and emptying system in medium-head huge lock [J]. Port & waterway engineering, 2016(12): 36-41.
- [4] 尹崇清, 刘峰钻, 张湛, 等. 岷江龙溪口航电枢纽施工期通航问题试验研究[J]. 水运工程, 2013(1): 114-120.
YIN C Q, LIU F Z, ZHANG Z, et al. Test study on navigation in construction period of Longxikou navigation-power junction on Min river [J]. Port & waterway engineering, 2013(1): 114-120.
- [5] 黄伦超, 江诗群, 刘诚. 湘江株洲枢纽工程施工期通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2001(11): 31-34.
HUANG L C, JIANG S Q, LIU C. Test and study of navigation flow condition during construction period for Zhuzhou junction project of Xiangjiang River[J]. Port & waterway engineering, 2001(11): 31-34.
- [6] 黄伦超. 湘江大源渡枢纽施工期通航水流条件分析[J]. 长沙交通学院学报, 1998, 14(1): 67-71.
HUANG L C. A study on flow condition in construction period of Xiangjiang Dayuandu pivot [J]. Journal of Changsha Communications University, 1998, 14 (1): 67-71.
- [7] 袁机灵, 叶雅思, 彭永琴. 东江下碓角枢纽施工期通航问题研究[J]. 湖南交通科技, 2023, 49(1): 159-163.
YUAN JL, YE Y S, PENG Y Q, et al. Study on navigation problems of xiajijiao junction on Dongjiang River during construction period [J]. Hunan communication science and technology, 2023, 49 (1): 159-163.
- [8] 许光祥, 曾锋. 急滩消滩水力指标的合理表达式[J]. 水运工程, 2010(11): 103-106.
XU G X, ZENG F. Reasonable expression of hydraulic parameters of rapids abating [J]. Port & waterway engineering, 2010(11): 103-106.
- [9] 陈永奎. 三峡工程导流明渠施工通航船队航行阻力计算分析[J]. 长江科学院院报, 1993, 10(4): 1-9.
CHEN Y K. Ship-team sailing resistance computation and analysis on the open channel navigation of Three Gorges Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1993, 10(4): 1-9.
- [10] 杨胜发, 赵晓马, 王涵. 长江上游卵石急滩消滩水力指标研究[J]. 水运工程, 2007(8): 78-81, 92.
YANG S F, ZHAO X M, WANG H. On hydraulic parameter of rapids abating of pebble rapids on the upper reaches of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2007(8): 78-81, 92.
- [11] 童思陈, 许光祥, 邓明文. 澜沧江船舶航行阻力及通航水力指标研究[J]. 人民长江, 2010, 41(2): 67-72.
TONG S C, XU G X, DENG M W. Study on sailing resistance and navigable hydraulic parameters to rapids shoal of Lancang River [J]. Yangtze River, 2010, 41(2): 67-72.

(本文编辑 王传瑜)