



# 龙溪口航电枢纽施工明渠临时通航条件

程 艳, 吴礼国, 李泳龙

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

**摘要:** 针对龙溪口航电枢纽工程施工明渠临时通航问题, 基于数学模型及实船试验, 研究施工明渠局部疏浚淤积后船舶临时通航的水流条件及船舶试航情况。数学模型模拟了施工明渠局部清淤形成的临时航道的水深及流速, 均满足船舶安全航行要求。不同吨级船舶装载及空载条件下, 试验的实船可安全上下行通过龙溪口施工明渠临时航道, 为枢纽建设过程临时航道通航范围及尺度的确定提供依据。

**关键词:** 龙溪口航电枢纽; 施工明渠; 临时通航

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0063-05

## Temporary navigation conditions of open channel for construction of Longxikou navigation power junction

CHENG Yan, WU Li-guo, LI Yong-long

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

**Abstract:** This paper probes into the temporary navigation in the open channel for the construction of the Longxikou navigation power junction. Utilizing a mathematical model and a real ship test, it studies the flow conditions for temporary navigation and trial navigation results after the local dredging of the open channel. The mathematical model simulates the water depth and flow velocity of the temporary channel formed by the local dredging of the open channel for construction, both of which meet the requirements of ships for safe navigation. Under the loading and no-load conditions of vessels with different tonnages, the real ships in the test can safely go up and down through the temporary channel of the open channel for the construction of the Longxikou navigation power junction, which provides a basis for determining the navigation scope and scale of the temporary channel during the construction of the junction.

**Keywords:** Longxikou navigation power junction; open channel for construction; temporary navigation

### 1 工程概况

岷江龙溪口航电枢纽工程是一座以航运为主, 航电结合, 兼顾防洪、供水、环保的水资源综合利用工程, 是规划的岷江乐山—宜宾 162 km 河段航电梯级开发的第 4 级。龙溪口航电枢纽所处岷江下游航运任务重, 因此施工期维持航道正常通航尤为重要<sup>[1]</sup>。分期施工方案为国内外大中型航运枢纽工程常用的施工方式之一<sup>[2]</sup>, 施工期束窄

河床及导流明渠在完成泄洪任务的同时, 还要满足河段通航要求。龙溪口航电枢纽工程施工导流方案采用三期施工导流, 其中一期与二期采用施工明渠通航, 三期由已完建的船闸通航。根据施工安排, 2020 年 11 月施工进入二期, 利用施工明渠通航, 物模试验<sup>[3]</sup>表明施工明渠满足船舶安全航行需求。

2020 年 8 月 18 日岷江遭遇 100 a 一遇洪水, 造

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 程艳(1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事港口与航道工程设计。

成龙溪口航电枢纽已清理至设计底高程的临时明渠航道大面积淤积，淤积量约 30 万 m<sup>3</sup>。因主汛期施工受来水流量影响大，有效施工时段短，同时施工作业面受限，不具备大幅增加施工设备的条件，河道疏浚无法按照设计断面按期全部完成。基于上述条件，采用数学模型模拟航道水流条件、实船试验船舶实际操纵情况，分析研究局部疏浚淤积明渠后临时通航的可行性。

2 试验内容及方法

龙溪口航电枢纽工程于 2020 年 11 月进入二期施工导流及通航。该时段主要施工厂房、鱼道、右岸 11 孔泄洪闸、船闸及右岸挡水坝段，左岸厂房由上下游全年围堰和左导墙挡水，右岸由上下游围堰和右导墙挡水，期间由束窄的明渠过流和通航，围堰上下游及施工明渠底高程全部疏挖至 298.00 m 高程，二期枯期施工布置见图 1。

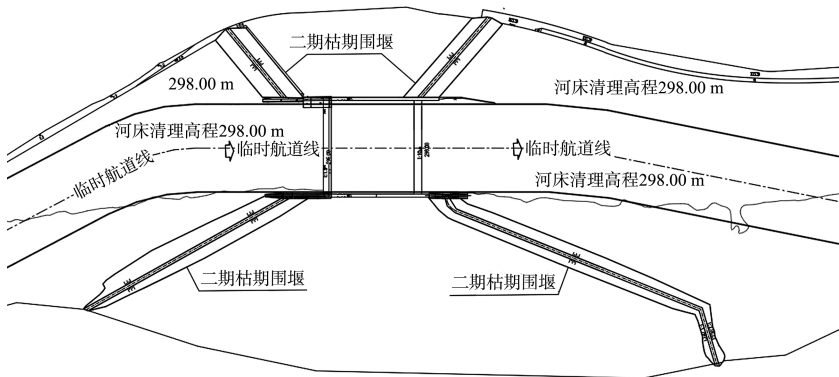


图 1 龙溪口航电枢纽二期枯期围堰平面布置

受洪水影响，龙溪口施工明渠泥沙大量淤积，主要集中在左岸，开挖量和开挖范围比较大，无法在通航前完成开挖。借鉴上游犍为航电枢纽的临时航道通航经验，临时航道通航初期的宽度为 50 m。根据水下开挖强度和开挖工期，龙溪口航

电枢纽淤积明渠可在二期枯期通航前上游侧疏挖 60 m 宽、下游侧疏挖 100 m 宽的航道范围，航槽范围内疏挖至原设计高程 298.00 m。明渠疏浚临时通航范围见图 2。

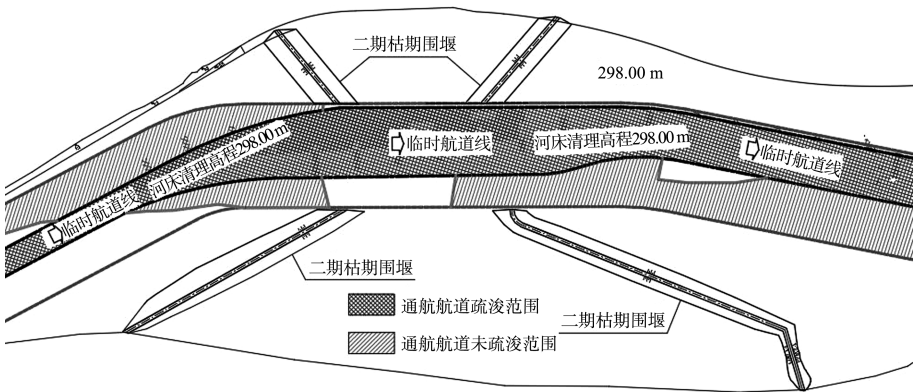


图 2 龙溪口航电枢纽明渠疏浚临时通航范围

3 试验方法

3.1 数学模型

与物理模型试验相比，数值模拟具有便捷、灵活的特点，能够快速对多种工况效果进行计算<sup>[4]</sup>。

在二维数学模型中，河道水流一般可视为不可压缩牛顿流体，其水流运动规律可用 Navier-Stokes 方程组描述，对该方程进行时均化得其 Reynolds 形式，包括质量守恒方程和动量守恒方程<sup>[5]</sup>。从 Reynolds

方程出发, 考虑工程所在河段水平尺度远大于垂直尺度、水力参数在垂直方向的变化明显小于水平方向的变化, 可忽略垂向加速度, 设定压强服从静水分布; 不计垂直方向的流动时间和空间的微分, 将方程沿水深积分; 得到平面二维的河道水流运动控制方程<sup>[6]</sup>。

水流连续方程:

$$\frac{\partial Z_w}{\partial t} + \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} = q_m \quad (1)$$

水流动量方程:

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{q_1^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + g H \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \Omega q_2 + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{bx} - \tau_{sx} - \frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{q_1 q_2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \beta \frac{q_2^2}{H} + \frac{1}{2} g H^2 \right) + g H \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \Omega q_1 + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_{by} - \tau_{sy} - \frac{\partial (H \tau_{yx})}{\partial x} - \frac{\partial (H \tau_{yy})}{\partial y} \right] = 0 \quad (3)$$

式中:  $Z_w$  为水面高度;  $Z_b$  为床面高度;  $H$  为水深;  $q_1 = UH$ , 即  $x$  方向的单宽流量,  $U$  为  $x$  方向的流速;  $q_2 = VH$ , 即  $y$  方向的单宽流量,  $V$  为  $y$  方向的流速;  $q_m$  为单位面积的旁侧入流流量(为正)或出流流量(为负);  $\beta$  为各向同性的动量修正系数;  $g$  为重力加速度;  $\rho$  为水流密度, 假定水流密度在整个模拟区域内保持不变;  $p_a$  为水面大气压力;  $\Omega$  为科里奥利力参数;  $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的河床剪切应力;  $\tau_{sx}$ 、 $\tau_{sy}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的表面风剪切应力;  $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yx}$ 、 $\tau_{yy}$  为由紊流引起的剪切应力<sup>[7]</sup>。

采用数学模型进行河道模拟计算时, 计算范围、上下游边界的位置都会影响计算的精度。范围太小, 无法真实反映计算河道水流情况; 范围太大, 计算时间增多, 造成不必要的浪费。选用龙溪口航运枢纽工程坝轴线上游约 1.0 km、下游约 1.8 km 范围内的实测地形, 采用三角形对计算区域离散, 研究区网格最大长度 10 m, 对局部边界区域加密, 网格最小长度约 2 m, 研究区网格划分效果见图 3。数学模型模拟工况采用枯期 3 级流量,  $Q$  为 1 000、2 000、2 500  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

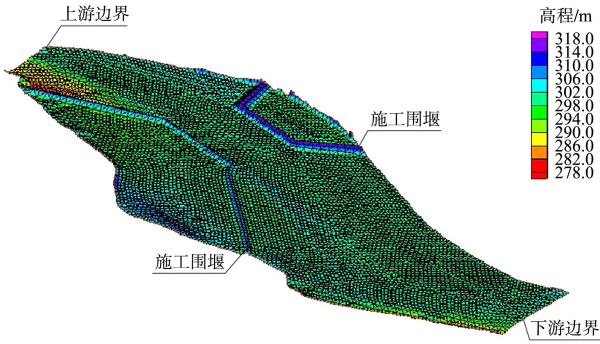


图 3 研究区数学模型网格划分效果

3.2 实船试验

实船试验可在模型提出方案的基础上, 进一步检验施工期临时航道的设计合理性及适航性能。实测的通航水力指标(流速、比降等)以及船舶航行参数(舵角、漂角、航速等)反映船舶的通航能力及航道的通航条件, 为制定通过该段航道船舶的驾驶操作方法提供依据。

岷江目前营运的船舶基本上是乐山籍船舶, 综合考虑岷江下游河段航行船舶的技术参数及性能等, 试验船舶选用工程河段 300 吨级和 1 000 吨级通航船舶。为充分保障施工期通航安全, 结合物理模型试验和实际管理经验, 工程河段施工枯期采用  $Q = 650 \text{ m}^3/\text{s}$  作为最小通航流量、 $Q = 2\,500 \text{ m}^3/\text{s}$  作为最大通航流量, 实船试航实测上游来流量为  $2\,276 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

船舶的用车、用舵、航速、漂角、航迹线分布以及流速、流向等是反映航行条件的关键因素<sup>[8]</sup>。船舶航行过程中用舵的变化过程通过船上测量人员记录完成; 航速、漂角、航迹线采用 GPS 全球定位系统进行测量, 试航 GPS 测量采用型号为 S86-T 的南方 GPS 接收机, 在船头和船尾正中固定 GPS, 在船舶航行时 GPS 自动测量, 时间间隔为 5 s<sup>[9]</sup>。实船试验范围为施工期 3.5 km 管控河段, 工况如下: 1) 1 000 t 船舶 70% 载重在龙溪口枢纽上、下游临时航道管制点之间共计 3.5 km 的航道进行往返航行试航。2) 1 000 t 船舶空载在龙溪口枢纽上、下游临时航道管制点之间共计 3.5 km 的航道进行往返航行试航。3) 300 t 船舶满载在龙溪口枢纽上、下游临时航道管制点之间共计 3.5 km 的航道进行往返航行试航。

4 结果分析

4.1 数学模型结果分析

在临时航道范围内布置 22 个断面，共 214 个

测点，用以观测各工况条件下测点范围内的纵向流速、横向流速及水深，探讨在明渠清淤范围内临时通航的水流条件，测点布置见图 4。

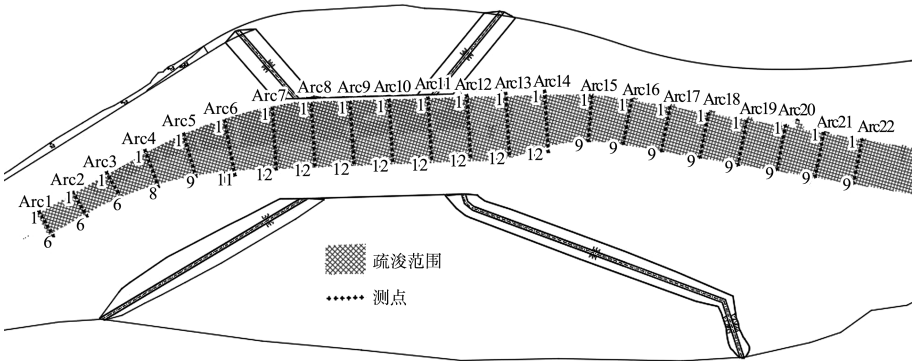


图 4 模型测点布置

图 5 为各级流量下各测点断面沿程水深。由图 5 可知，当流量  $Q=1\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时，沿程测点水深为  $3.571\sim3.918\text{ m}$ ；当流量  $Q=2\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时，沿程测点水深为  $4.441\sim4.916\text{ m}$ ；当流量  $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{s}$  时，沿程测点水深为  $4.806\sim5.381\text{ m}$ 。以上各级流量下的水深都满足现状航道尺度下船舶安全航行的水深要求。

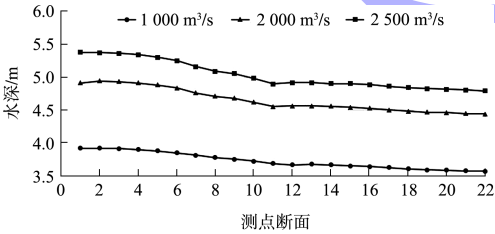
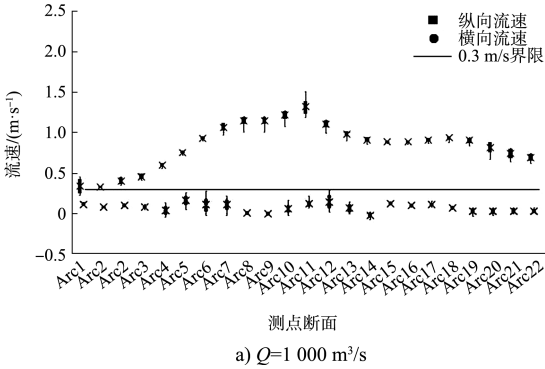


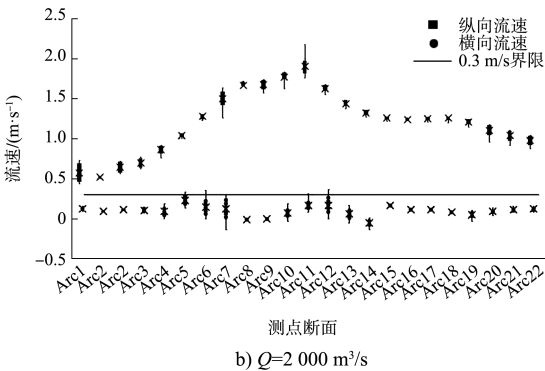
图 5 航道范围内测点断面沿程水深

图 6 为 3 级流量下各测点断面的纵向流速及横向流速。当流量  $Q=1\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时，纵向流速  $0.225\sim1.514\text{ m/s}$ ，最大纵向流速在 Arc11 断面，横向流速为  $0.000\sim0.293\text{ m/s}$ ，最大横向流速在 Arc12 断面；流量  $Q=2\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时，纵向流速  $0.436\sim2.174\text{ m/s}$ ，Arc5、Arc6、Arc11、Arc12 断面的个别测点横向流速超过  $0.300\text{ m/s}$ ，最大横向流速为  $0.362\text{ m/s}$ ，船舶航行时可避开相应区域不受影响；当流量  $Q=2\,500\text{ m}^3/\text{s}$  时，纵向流速  $0.526\sim2.482\text{ m/s}$ ，同样在 Arc5、Arc6、Arc7、Arc11、

Arc12 断面的个别测点横向流速超过  $0.300\text{ m/s}$ ，最大横向流速为  $0.394\text{ m/s}$ ，船舶航行时可避开相应区域不受影响。上述 3 级流量下施工明渠临时航道内流速、流向、水深基本满足船舶安全航行的要求，流量较大时船舶可避开横向流速较大的区域安全航行。因此，施工明渠局部疏浚后临时通航的方案是可行的。



a)  $Q=1\,000\text{ m}^3/\text{s}$



b)  $Q=2\,000\text{ m}^3/\text{s}$



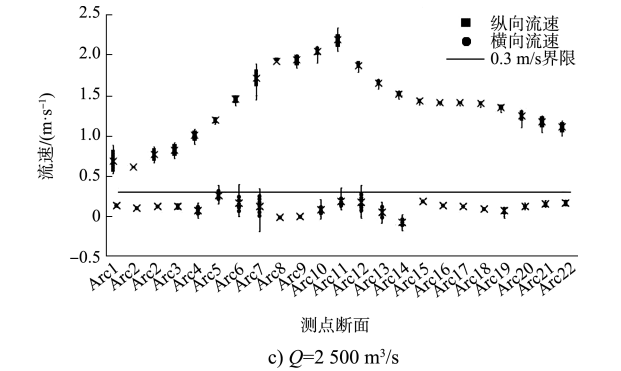


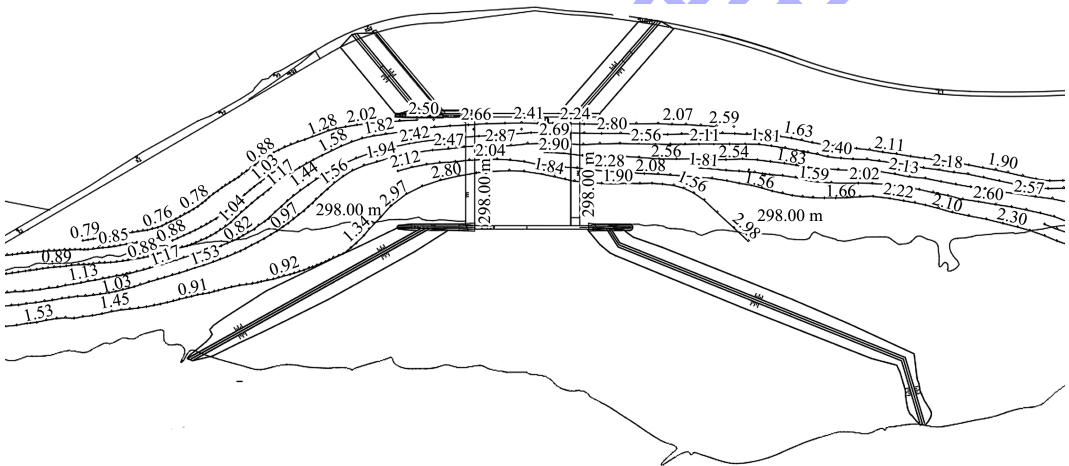
图 6 航道范围内各测点断面流速

4.2 实船试验结果分析

实船试验时间为 2020 年 11 月, 为岷江枯水期。实船试航范围为施工期 3.5 km 管控河段, 试验船舶从大中坝坝尾下游水域起航, 沿人工开挖

航槽中心线下行, 下行至新民客渡码头附近水域折返上行再次通过龙溪口枢纽临时航道返回大中坝坝尾下游水域。实船试验实测上游来流量为 2 276 m<sup>3</sup>/s, 接近枯期最大通航流量 2 500 m<sup>3</sup>/s。

由图 7 可知, 临时航道上游天然河道水面实测流速 0.72~1.95 m/s, 平均流速 1.26 m/s; 进入施工区后因河道向左侧拓宽和河床疏浚影响, 流速变缓, 实测流速 0.39~1.53 m/s, 平均流速 0.98 m/s; 进入临时航道前水面缩窄, 流速逐渐增大, 实测流速 1.95~3.04 m/s, 平均流速 2.39 m/s; 流出临时航道后水面变宽, 流速变缓, 实测流速 0.69~2.72 m/s, 平均流速 1.55 m/s。沿程流速总体相对较小, 满足船舶航行要求。



注: 测流断面水位 303.22 m, 断面流量 2 276 m<sup>3</sup>/s。

图 7 航道范围实测流速 (单位: m/s)

实船试验各工况船舶航行参数见表 1, 3 种工况船舶上下行过程中最大舵角均未超过船舶航行安全舵角限值(25°), 最小航速和平均航速均优于最小航速限值(0.4 m/s)和平均航速限值(1.00 m/s)。

实船试验船舶的用舵、航速、漂角、航迹线分布以及流速、流向等均满足要求, 船舶可安全通过施工明渠局部疏浚的临时航道。

表 1 实船试验各工况船舶航行参数

工况	航行方向	最大舵角/(°)	最大漂角/(°)	最小航速/(m·s <sup>-1</sup> )	平均航速/(m·s <sup>-1</sup> )
工况 1, 1 000 t 船舶, 70%载重	下行	25	30.30	2.44	3.78
	上行	20	31.88	0.81	1.88
工况 2, 1 000 t 船舶, 空载	下行	20	34.77	2.34	5.17
	上行	18	35.30	1.93	2.47
工况 3, 300 t 船舶, 满载	下行	10	30.56	1.46	3.25
	上行	10	35.46	0.50	1.40