



山区河流港湾式锚泊区停泊条件分析*

程 艳, 郝 岭, 李泳龙, 徐 红, 张昊煜
(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 成都 610017)

摘要: 针对四川省通航河流汛期“跑船”事故, 需合理选址建设船舶锚泊区。基于数学模型, 研究岷江乐山杜家场港湾式锚泊区工程河段的水流条件。结果表明: 同一流量级时, 工程河段主河道流速远大于锚泊区内流速, 遇 50 a 一遇洪水时, 主河道最大流速为 6.50 m/s, 对应锚泊区内的最大流速为 1.22 m/s; 随着来流量的增加, 主河道的流速增长幅度也远大于锚泊区内的流速增长幅度, 研究工况下, 主河道流速最大变幅值为 1.02 m/s, 对应锚泊区内的流速变幅为 0.19 m/s。山区河流港湾式锚泊区能够很好地满足船舶安全停靠要求。

关键词: 数学模型; 山区河流; 港湾式锚泊区

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0149-07

Mooring conditions in harbor-type anchorage area of mountain rivers

CHENG Yan, HAO Ling, LI Yonglong, XU Hong, ZHANG Haoyu

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

Abstract: Regarding the “runaway ship” accidents during the flood season of navigable rivers in Sichuan Province, it is necessary to reasonably select and construct ship anchorage areas. Based on a mathematical model, this article studies the flow conditions of the river section of Dujichang Harbor in Minjiang River. The results show that the flow velocity of the main channel of the project section is much greater than that of the anchorage area when the same flow rate is applied. When encountering a 50 year flood, the maximum flow velocity of the main river channel is 6.50 m/s, corresponding to a maximum flow velocity of 1.22 m/s in the anchorage area. As the inflow increases, the growth rate of the flow velocity of the main channel is much greater than that of the flow velocity inside the anchorage area. Under the research conditions, the maximum variation value of the main channel flow velocity is 1.02 m/s, corresponding to a flow velocity variation of 0.19 m/s in the anchorage area. The harbor-type anchorage area of mountainous rivers can effectively meet the requirements for safe docking of ships.

Keywords: mathematical model; mountain rivers; harbor-type anchorage area

四川省水运资源丰富, 通航河流发达, 全省通航总里程 10 540 km, 全国第四, 通航河流共 176 条, 覆盖全省 18 个市(州), 全省“一横五纵”、“两核四翼”港航体系目前初具雏形, 对全省构建现代综合交通运输体系的完善, 促进经济社会发展起到了巨大的推动作用。相较平原地区,

四川省通航河流均属典型的山区性河流, 中枯水期长、洪水期较短、汛期水位陡涨陡落、峰高时短、水位变幅大。据统计, 全省现有各类船舶 6 010 艘, 设置船舶集中停泊区 387 个, 可供停泊船舶 3 954 艘, 其余 2 056 艘船舶采用分散就近停泊方式, 分散停泊点主要依托现有渡口、客运码头等设施。

收稿日期: 2023-04-25

*基金项目: 交通运输行业重点科技项目 (2022-ZD6-089); 四川省交通运输科技项目 (2022-B-01)

作者简介: 程艳 (1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事港航设计及水文研究。

头、旅游码头、海事工作船码头等停泊点。全省锚泊区建设，尤其是汛期锚泊区建设的数量较少，且建设不够系统规范，汛期安全隐患突出^[1]。近年来，全省河流多次发生超警戒以上洪水，“跑船”事故时有发生，桥梁、大坝等跨临河建筑物和人民群众生命财产的安全面临巨大威胁，急需开展相关研究工作。

锚泊区是供船舶在水上抛锚以便安全停泊、避风防台、等待检验引航、从事水上过驳及其他作业的水域，对航道通航安全具有重要意义^[2]。通过对“跑船”原因进行全面调查分析和研究，全省船舶集中停泊区存在的最大问题是未进行系统规划，锚泊区选址不尽合理。目前全省锚泊区多为天然河湾，水流条件较复杂，未充分考虑超规模洪水工况，难以适应汛期洪水的安全度汛需要。

根据四川省停泊区河道条件及河岸地形，适合船舶安全停泊的方式主要有顺岸式、港湾式、挖入式等。从近期乐山、遂宁射洪港湾式停泊区的使用情况来看，港湾式锚泊区能够很好地满足汛期船舶安全停泊要求，是防止发生“跑船”事件的有效途径之一。本文采用数学模型分析岷江乐山杜家场港湾式锚泊区的水流条件，通过数值计算、理论分析汛期船舶停靠的安全性，为港湾式锚泊区在全省的推广提供技术支持。

1 研究概况

研究区位于岷江乐山杜家场，大渡河与岷江干流交汇口下游约 0.7 km 处，为港湾式锚泊区。属于全省 41 个规模较大的重点集中停泊区之一，汛期停泊砂石船、旅游客船共 40 余艘，作为全省港湾式停泊区的典范，在确保乐山市汛期“不跑一船”的工作目标上功不可没。研究河段主河道顺直，靠近左岸为乌尤坝滩地，在锚泊区上游约 0.5 km 处将岷江一分为二，其中右汊为主航道，杜家场锚泊区位于主航槽的右岸。锚泊区地理位置见图 1，实拍锚泊区见图 2。

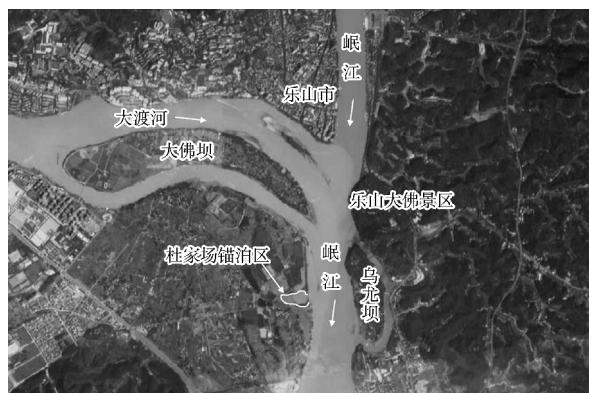


图 1 锚泊区地理位置

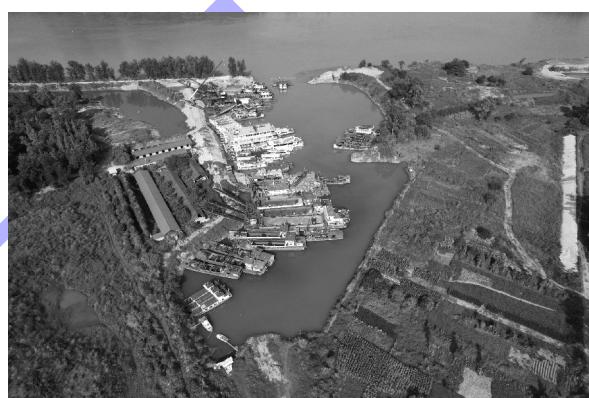


图 2 锚泊区实景

2 试验方法及范围

2.1 试验方法

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^[3]。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^[4]。从 Reynolds 方程出发，考虑工程所在河段水平尺寸远大于垂直尺寸，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^[5]。

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:

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

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

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; $q_2 = VH$, 即 y 方向的单宽流量; q_m 为单位面积的旁侧入流流量(为正)或出流流量(为负), 该式假定水流密度在整个模拟区域内保持不变; β 为各向同性的动量修正系数; g 为重力加速度; ρ 为水流密度; p_a 为水面大气压力; Ω 为科里奥利力参数; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为 x 、 y 方向的河床剪切应力; τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为 x 、 y 方向的表面风剪切应力; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 为由紊流引起的剪切应力^[6]。

2.2 研究区域

采用数学模型进行水流状态模拟时, 需选择

合理的范围, 范围太小无法真实反映计算河道水流情况, 范围太大导致计算时间增多, 造成不必要的浪费^[7]。选用岷江乐山杜家场锚泊区上游约 0.7 km, 下游约 0.8 km 范围内的实测地形, 计算总河长约 1.5 km, 研究河段地形见图 3。采用三角形对计算区域离散, 研究区网格最大长度为 15 m, 对锚泊区局部加密, 网格最小长度约为 5 m。由于较多单元水深过小会成为干单元, 计算时为降低其给计算带来不稳定风险, 适当地调整边界以保证计算域边界单元水深不至太小, 因此计算区域的上下游边界不变, 两侧边界则根据水位情况调整, 研究区网格划分效果见图 4。数学模型采用六级流量模拟锚泊区的水流条件, 试验工况见表 1。

表 1 锚泊区河段计算边界条件

流量/(万 $m^3 \cdot s^{-1}$)	出口控制水位/m	备注
1.20	358.70	禁航流量
1.67	359.34	2 a一遇洪水
2.41	359.74	5 a一遇洪水
2.98	360.85	10 a一遇洪水
3.56	361.64	20 a一遇洪水
4.32	362.05	50 a一遇洪水

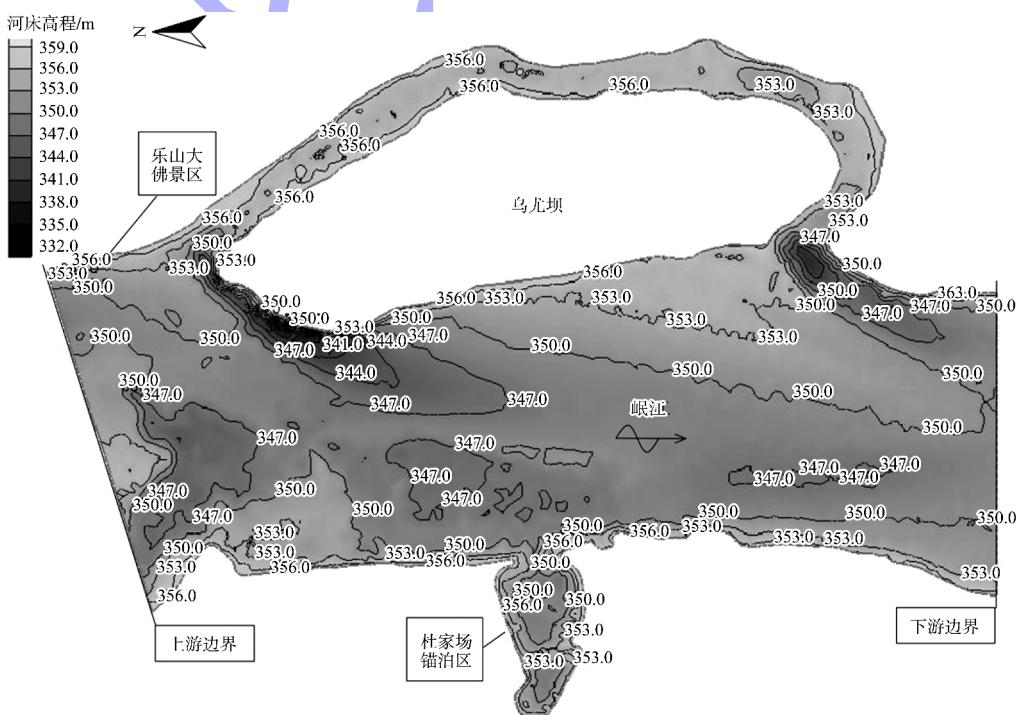


图 3 研究河段地形

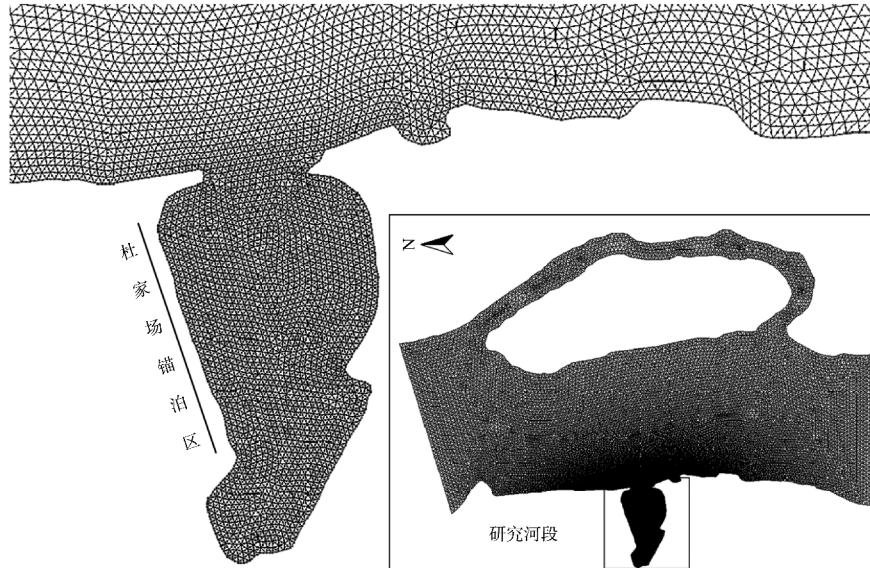


图 4 研究区数学模型网格划分效果

3 试验结果及分析

3.1 测点布置

为对比主河道及锚泊区内的水流条件, 验证港湾式锚泊区满足船舶安全停泊要求, 分别在锚泊区和主河道上布置测点, 测点布置见图 5。在主

河道内布置 13 个断面, 断面间距为 40 m, 每个断面布置 12 个测点, 共计 156 个测点; 在锚泊区内布置 11 个断面, 断面间距为 20 m, 每个断面布置 8 个测点, 共计 88 个测点。

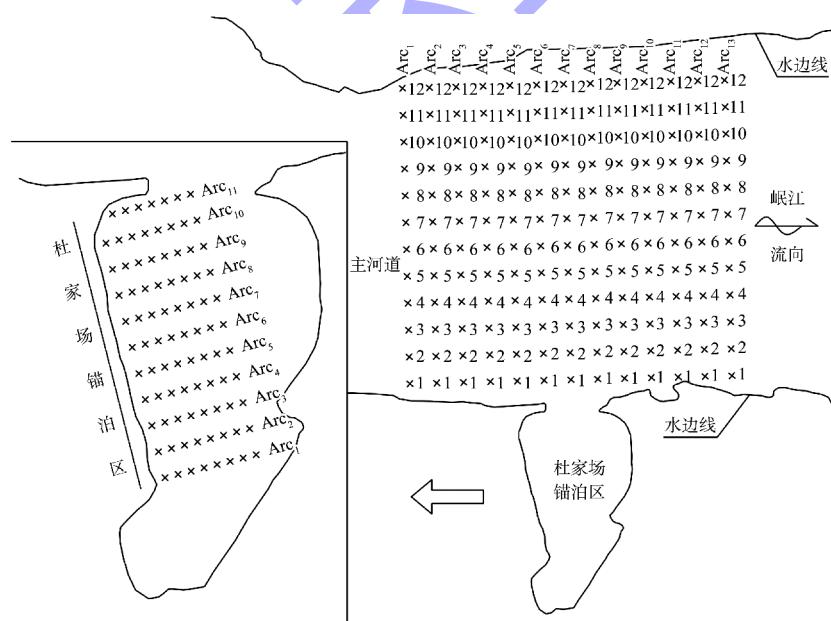


图 5 模型测点布置

3.2 结果分析

三级流量下锚泊区内测点断面水面线及平均水深见图 6。可知各级流量下测点断面的水位基本一致, 水面线波动不大, 利于船舶停靠。当流量 $Q=1.20 \text{ 万 } \text{m}^3/\text{s}$ 时, 锚泊区内测点平均水深为 5.14~

7.64 m; 当流量 $Q=2.41 \text{ 万 } \text{m}^3/\text{s}$ 时, 锚泊区内测点平均水深为 6.31~8.99 m; 当流量 $Q=4.32 \text{ 万 } \text{m}^3/\text{s}$ 时, 锚泊区内测点平均水深为 8.36~11.30 m。在试验工况的汛期各级流量下, 锚泊区内水深均满足现状航道尺度下船舶安全锚泊的水深要求。

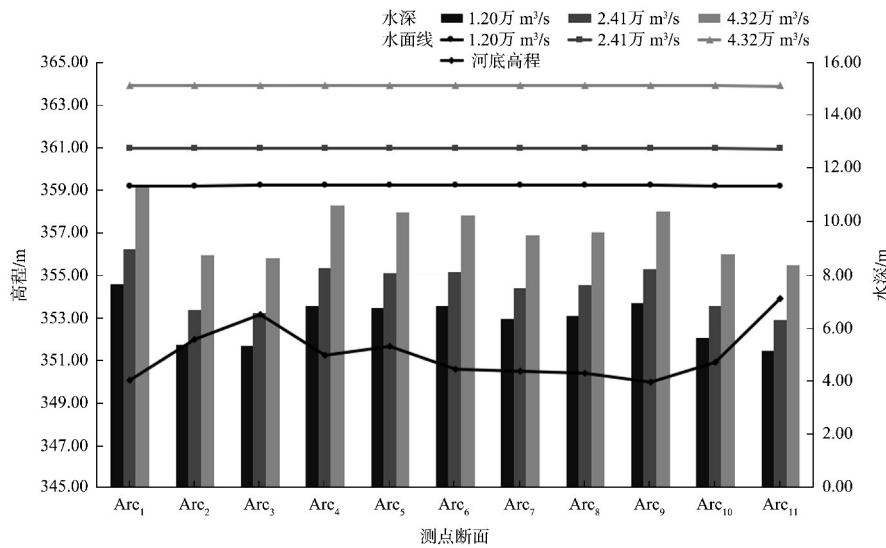
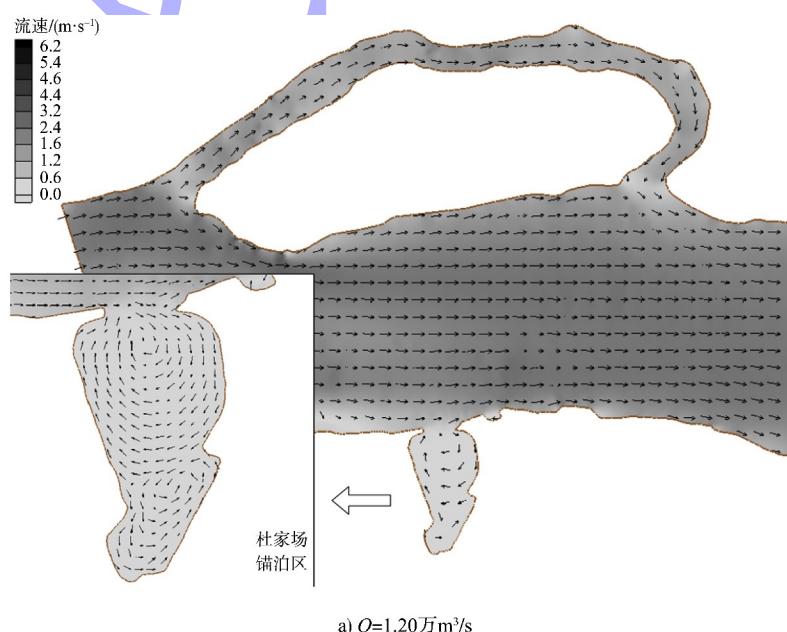


图 6 锚泊区内测点断面水面线及平均水深

三级流量下研究河段的流场见图 7。由图 7a) 可知, 当流量 $Q=1.20 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 时, 来流量相对较小, 主河道内水流速度较小, 水流呈现平稳流态。锚泊区内有 2 个回流区, 分别位于靠近主河道入口处和远离主河道端部, 同时锚泊区内水流条件受主河道影响较小, 水流为低流速阶段, 水流条件良好, 船舶在锚泊区域内停靠较为安全。由图 7b) 可知, 当流量 $Q=1.67 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 时, 来流量逐渐增大,

主河道内水流速度逐渐增大, 锚泊区内水流条件受主河道影响, 水流速度增大, 整个锚泊区内的水流也逐渐紊乱, 回流区靠向上游主河道方向移动, 呈现与主河道回流区相衔接的趋势。由图 7c) 可知, 当流量 $Q=2.98 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 时, 天然河道内水流速度急剧增大, 锚泊区内水流条件受主河道影响, 整个锚泊区内的水流也逐渐湍急, 回流区与上游主河道相接, 在锚泊区靠上游侧形成 2 个漩涡。



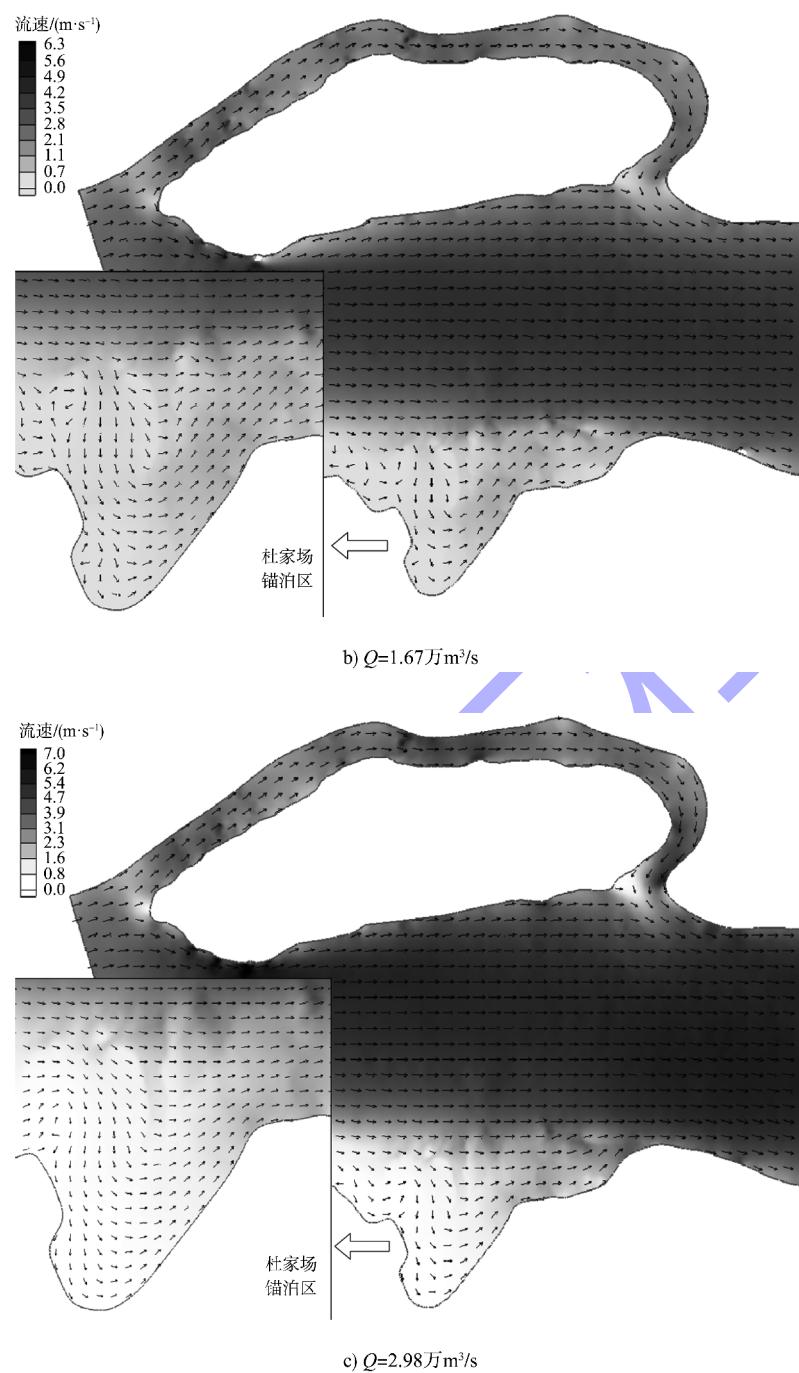


图 7 航道范围内各测点断面流速

模型试验 6 级流量下主河道与锚泊区的水流流速对比分析见表 2。由表 2 可知, 6 级试验流量下主河道最大流速由 2.82 m/s 增大到 6.50 m/s , 平均流速由 2.26 m/s 增大到 5.25 m/s ; 锚泊区内最大流速由 0.23 m/s 增大到 1.22 m/s , 平均流速由 0.03 m/s 增大到 0.40 m/s , 试验流量下主河道的流速远大于锚泊区的流速。同时锚泊区内的平

均流速远小于最大流速, 最大流速出现在与主河道的汇合口测点位置, 越靠近锚泊区内侧端部流速越小, 越有利于船舶停泊。

由表 2 可知, 当流量增大 1 级时, 主河道的最大流速和平均流速变幅远大于锚泊区内的流速变幅; 当流量由 $Q=1.20 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 增大到 $Q=1.67 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 时, 主河道内最大流速变幅为 1.02 m/s , 平均流速变

幅为 0.68 m/s, 对应的锚泊区内最大流速和平均流速变幅分别为 0.19 和 0.09 m/s; 随着流量的增大, 主河道内流速急剧增大, 流速增长速度过快对于船舶锚泊设施及安全停靠均会造成不利影响。相反, 锚泊区内的流速随着主河道流速的增大虽有所增加, 但整体较小, 且流速的变幅也很小, 更有利于船舶的安全锚泊。

综上, 山区河流水流条件复杂, 汛期水位陡涨陡落、变幅较大。试验河段随着流量增大, 主河道内流速急剧增加, 相反杜家场锚泊区内的流速变幅相对较小, 且各级流量下的平均流速也较小, 更有利于船舶锚泊, 因此港湾式锚泊区能够很好地满足山区河流汛期船舶安全停泊的要求。

表 2 测点流速

流量/万 ($m^3 \cdot s^{-1}$)	主河道流速/($m \cdot s^{-1}$)		锚泊区流速/($m \cdot s^{-1}$)		主河道流速变幅/($m \cdot s^{-1}$)		锚泊区流速变幅/($m \cdot s^{-1}$)	
	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
1.20	2.82	2.26	0.23	0.03	1.02	0.68	0.19	0.09
1.67	3.84	2.94	0.42	0.12	0.78	0.82	0.52	0.10
2.41	4.62	3.76	0.94	0.22	0.53	0.42	0.12	0.07
2.98	5.15	4.18	1.06	0.29	0.83	0.43	0.07	0.06
3.56	5.98	4.61	1.13	0.35	0.52	0.64	0.09	0.05
4.32	6.50	5.25	1.22	0.40				

注: 变幅为 $Q_{(i+1)} - Q_i$ 。

4 结论

1) 通过数学模型分析, 杜家场港湾式锚泊区内的水流条件良好, 各级流量下水面线波动不大, 有利于船舶停靠, 锚泊区内水深满足现状航道尺度下船舶安全锚泊的水深要求。

2) 在同一流量级下, 锚泊区内的流速远小于主河道流速, 遇 50 a 一遇洪水时, 主河道最大流速为 6.50 m/s, 对应锚泊区内的最大流速为 1.22 m/s; 随来流量逐渐增大, 主河道的最大流速和平均流速变幅远大于锚泊区内的流速变幅, 研究工况下, 主河道流速最大变幅值为 1.02 m/s, 对应锚泊区内的流速变幅为 0.19 m/s。锚泊区流速整体较小, 且流速的变幅也很小, 更有利船舶的安全锚泊。

3) 山区河流水流条件复杂, 汛期水位陡涨陡落、变幅较大。主河道内随着流量增大流速急剧增加, 相反港湾式锚泊区内的流速较为平稳, 且变幅相对较小。港湾式锚泊区能够很好地满足山区

河流汛期船舶安全停泊要求, 是防止发生“跑船”事件的有效途径之一。

参考文献:

- [1] 四川省船务海事管理事务中心. 山区河流船舶锚泊区汛期安全性能提升与防护技术研究[R]. 四川: 四川省航务海事管理事务中心, 2021.
- [2] 兰锦豹. 贵港某港口作业区锚地工程锚泊方式对比分析[J]. 西部交通科技, 2022(7): 204-206.
- [3] 张信伟, 孙保虎, 胡峰军, 等. 汉江雅口航运枢纽工程施工期通航研究[J]. 水运工程, 2020(12): 155-160, 171.
- [4] 孟雪峰. 云南省水富港二期扩建工程通航研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [5] 宋禹辰. 温中坝河段卵石输移规律与航道治理对策研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [6] 周舟. 黄河中卫段航道整治参数的确定及数值模拟[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [7] 刘文骞. 岷江龙溪口枢纽明渠布置及通航条件模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.

(本文编辑 赵娟)