



裕溪河汇入长江河口段航道通航水流条件研究*

孙腾飞¹, 王玉生¹, 李媛媛²

(1. 安徽省合巢水运建设开发有限公司, 安徽 合肥, 230000; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400016)

摘要: 裕溪河汇入长江河口段的通航水流条件受上游船闸枢纽调度与长江干流水沙条件的双重作用影响, 表现出复杂的特性。研究通过构建深度平均的平面二维水动力模型, 对航道整治后裕溪河口的水深、流速、流向等通航水流条件进行了系统分析; 基于Perrson相关性系数分析方法, 研究枢纽运行方式对河段原弯道分流比的影响。结果表明: 基于现状航道尺度要求, 设计航槽内基本能满足4.0 m的维护水深要求, 但存在局部区域航道水深不足的问题; 工程河段的流态整体上直接接受长江干流水位及裕溪闸运行泄流状态的控制。当长江干流的顶托作用较弱且裕溪闸泄流流量较小, 河段整体的水动力条件相对较弱; 原弯段与枢纽下泄总量、节制闸流量存在较强正相关关系, 而与船闸冲灌水量呈负相关。研究成果可为裕溪河口段船舶安全提供参考, 并为后续航道维护提供理论支持。

关键词: 裕溪河口; 通航水流条件; 流速流向; 水深变化; 数值模拟

中图分类号: U61; TU473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0128-10

Navigable flow conditions at the confluence of Yuxi River into the Yangtze River

SUN Tengfei¹, WANG Yusheng¹, LI Yuanyuan²

(1. Anhui Hechao Water Transport Construction and Development Co., Ltd., Hefei 230000, China;

2. Hehai College of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: The navigable flow conditions in the estuary reach where the Yuxi River converges into the Yangtze River are complex due to the dual influence of upstream sluice operation and the water-sediment dynamics of the Yangtze River. A depth-averaged 2D hydrodynamic model is employed to analyze navigable flow parameters conditions such as water depth, flow velocity, and direction in the Yuxi River estuary. The influence of hub operation schemes on flow diversion ratio at the original meander reach is investigated by Pearson correlation coefficient analytical method. The results show that based on the current channel scale requirements, the designed navigation channel can basically meet the maintenance water depth requirement of 4.0 m, but there is a problem of insufficient water depth in local areas of the channel. The overall flow state of the engineering river section is directly controlled by the water level of the main stream of the Yangtze River and the operation and discharge status of the Yuxi Ship Lock. When the uplift effect of the main stream of the Yangtze River is weak and the discharge flow of Yuxi Ship Lock is small, the overall hydrodynamic conditions of the river section are relatively weak. There is a strong positive correlation between the original bend section and the total discharge of the hub, as well as the flow rate of the control gate, while there is a negative correlation with the filling and discharge volume from the ship lock. The research results can provide references for the safety of ships in the Yuxi estuary and offer theoretical support for the subsequent maintenance of the waterway.

Keywords: Yuxi River estuary; navigable flow conditions; flow velocity and direction; changes in water depth; numerical simulation

收稿日期: 2025-03-24 录用日期: 2025-05-07

*基金项目: 内河航道整治技术交通行业重点实验室开放基金项目(KLIWRE2023B01)

作者简介: 孙腾飞(1981—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事水运工程设计、建设及运营管理工作。

合裕线航道作为安徽省连接合肥与长江的主要水运通道,对于合肥经济圈承接东部产业转移、优化产业布局以及开发腹地矿产资源具有至关重要的作用。该航道承担着腹地集装箱、矿建材料等货物的运输任务,是省内最为繁忙的航道之一^[1]。自2016年起,合裕线航道整治工程启动,并于2017年竣工。该工程通过河道疏浚、碍航桥梁改建、巢湖及裕溪船闸扩建等措施,将航道等级提升至Ⅲ级,实现了千吨级船舶的通航。

裕溪河口汇入长江段通过裁弯取直和航槽疏浚等工程措施,其通航水流条件得到了显著改善。然而,两线船闸分别位于枢纽左右两侧,在枢纽附近,河面宽度骤然增大,船闸取水与节制闸水流下泄相互影响明显,可能造成较大横流,对船舶航行不利。裕溪枢纽下游,两线船闸引航道口门区及连接段均向河道中心微弯汇流,汇合口处正好是下游裁弯取直航道起点,且主航道与汇流口存在较大夹角,同时受既有码头、河流汊道与老铁路桥影响,该区域通航条件十分复杂,同时裕溪枢纽上游面临主航道与船舶进出船闸航路衔接困难的问题。该段航道同时受该段河势条件^[2-3]、上游多线船闸枢纽调度^[4-5]和长江干流水沙条件^[6]的影响,水流条件较为复杂。在多线船闸通航水流问题的研究中,李霞等^[7]采用整体水工模型试验和船模试验相结合的方式研究船闸不同规模和尺度下口门区及连接段的通航水流条件,结果表明枢纽运行方式、船闸规模等是影响通航水流条件的重要因素。王彪等^[8]、刘圣凡等^[9]亦指出船闸下游的通航安全因综合考虑地形、枢纽布置、调度运行方式等约束条件的限制。现有关于裕溪船闸的研究,多针对基坑渗流、输水系统和三角闸门结构设计方面^[10-12],鲜有关于裕溪船闸下游河口段通航水流条件,尤其是合裕线航道整治工程施工后的相关研究。本文研究针对裕溪河汇入长江河口段航道通航水流条件进行数值模拟分析,研究不同典型水位和流量组合条件下,河段水深、比降、流速及流态的变化特征,分析了枢纽调度

运行方式对原弯道分流比的影响,旨在为河段的安全通航提供科学依据。

1 河道概况

裕溪河口段位于裕溪闸下游,其原始航道长约4.0 km。经过2003年的航道整治,汇口上游约0.7~1.7 km处实施了裁弯取直工程,航道长度缩短至3.0 km,从而达到了Ⅲ级航道的通航标准。2016年研究河段进行了进一步的航道整治,河道按Ⅱ级航道标准整治,航道尺度为3.7 m×100 m×550 m(水深×航宽×弯曲半径),航道尺度得到有效保障。

该河段位于裕溪船闸下游,见图1。裕溪船闸是控制巢湖流域防洪、排涝及引水灌溉的综合性水利枢纽,裕溪一线船闸和裕溪复线船闸分别位于裕溪枢纽的左右两侧。裕溪复线船闸2012年底完工,船闸等级为Ⅲ级,设计最大船舶为1 000吨级,船闸尺度为200 m×23 m×4.5 m。裕溪一线船闸改造工程建设规模为290 m×34 m×5.6 m,设计最大船舶为2 000吨级,2023年10月16日,裕溪一线船闸扩容改造工程正式建成并通航,合裕航道裕溪船闸恢复双线运行。裕溪枢纽下游,两线船闸引航道口门区及连接段均向河道中心微弯汇流,汇合口处正好是下游裁弯取直航道起点,且主航道与汇流口存在较大夹角,同时受既有码头、河流汊道与老铁路桥影响,该区域通航条件十分复杂。



a) 长江下游裕溪河口段



b) 裕溪河入汇口段

图1 长江裕溪河口段

Fig. 1 Yuxi estuary section of the Yangtze River

2 二维数学模型的建立与验证

2.1 基本方程

连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

运动方程:

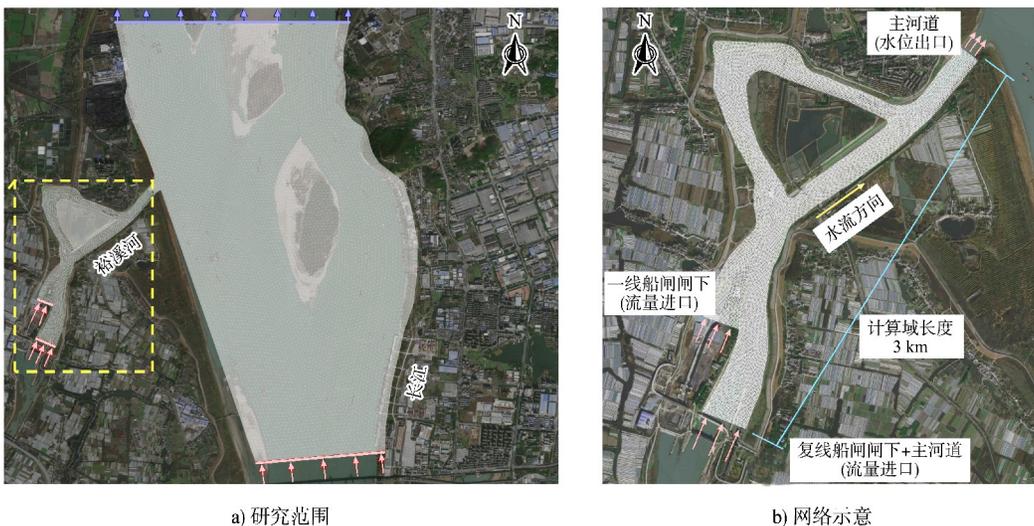
$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h + z_b)}{\partial x} + \frac{h}{\rho} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + f_p \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h + z_b)}{\partial y} + \frac{h}{\rho} \left(\varepsilon_{yx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\tau_{sy} - \tau_{by}) + f_q \quad (3)$$

式中: h 为水深; u 、 v 分别为 x 、 y 方向流速; g 为重力加速度; z_b 为床面高程; ρ 为水密度; τ_{sx} 、 τ_{sy} 为表面切应力的 x 、 y 方向分量; τ_{bx} 、 τ_{by} 为底部切应力的 x 、 y 方向分量; ε_{ij} 为涡黏系数; f_p 、 f_q 分别为不同方向的科氏力系数。

2.2 模型范围

控制河段数值模拟计算区域采用非结构化三角形网格进行离散, 根据河道地形变化情况调整局部网格疏密程度。模型含裕溪船闸至河口段(含裁弯取直段), 长约 3 km、长江干流上至汇口上游约 4 km、下至汇口下游约 2.5 km。见图 2。本次计算的总网格数量为 18.735 6 万个, 网格节点平均距离为 3 m, 航道内以及裕溪河口处进行局部加密。模型裕溪河(节制闸、一线船闸口门、二线船闸口门)和长江上游进口断面为流量、含沙量入口边界条件, 长江干流下游出口边界为水位和含沙量边界条件, 岸边界为非滑移边界, 给定其速度为 0 m/s。模型初始条件设置为下游河底的高程, 计算精度采用低精度, 涡黏系数为 0.28, CFL 数(收敛条件判断数)为 0.8。



a) 研究范围

b) 网络示意

图2 研究范围及网格划分

Fig. 2 Research scope and grid division

采用 2021 年 10 月 27 日实测裕溪闸下至裕溪河口 6 对水尺测得水面线, 对工程河段水流数学模型进行水面线验证(闸下水位 7.29 m, 裕溪河流量 480 m³/s)和流速验证。模型计算水位与 2021 年 10 月 27 日实测水位之间的差值普遍在 5 cm 以内, 差值正负交错, 计算水位与实测水位成果较为接近, 同时在航道中心线上流速分布具有较高的一致性, 满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[13]数学模型模拟精度要求, 见图 3。

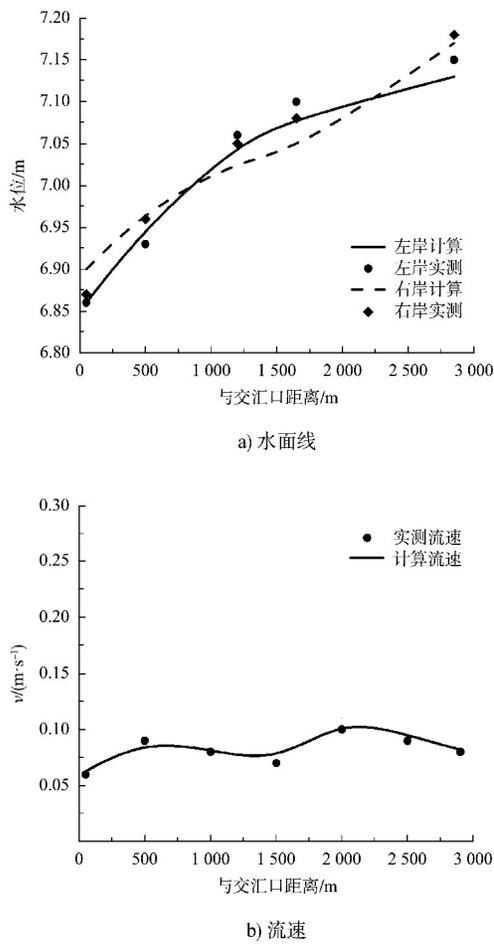


图 3 验证成果
Fig. 3 Verification results

2.3 计算工况

根据长江下游大通水文站和马鞍山水位站 2013—2021 年水位观测数据, 采用线性插值求得裕溪口水位与裕溪河来流的关系。可以看出, 裕溪口水位除受裕溪闸调度影响外, 还受长江

干流顶托的显著影响。裕溪口位置见图 4。当上游来流量一定时, 裕溪口水位变化范围为 3.03~11.48 m(变化范围约 8.45 m), 见图 5。该研究主要针对支流汇口以上裕溪河通航河段水流条件进行分析, 因此参考裕溪闸节制闸、裕溪闸下游航道设计情况, 以及安徽水科院相关物理模型试验成果, 从通航最不利条件出发, 选取节制闸设计流量工况(20 a 一遇)、裕溪闸上游多年平均水位加下游最低通航水位工况、上下游最低通航水位工况、典型恶劣工况等 4 种典型工况, 进行裕溪闸至汇口河段通航水流条件模拟, 计算工况见表 1。



图 4 裕溪口位置
Fig. 4 Location of Yuxi estuary

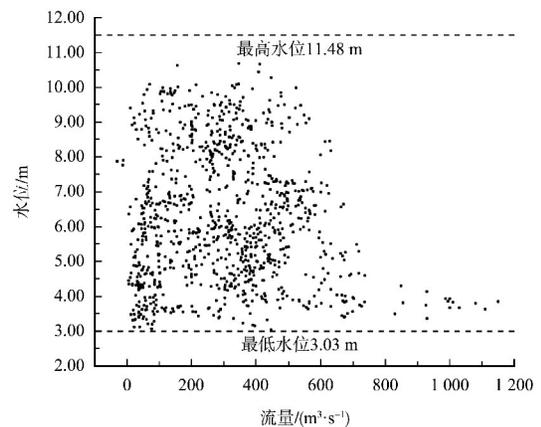


图 5 2013—2021 年裕溪河下泄流量与裕溪口水位
Fig. 5 Discharge of Yuxi River and water level at Yuxi estuary from 2013 to 2021

表 1 通航水流条件分析计算工况
Tab. 1 Calculation conditions for navigable flow conditions

序号	工况	来流总流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	节制闸设计流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	一线船闸充灌水 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	复线船闸充灌水 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	闸上 水位/m	裕溪河汇口 水位/m
1	节制闸设计 20 a 一遇泄流	1 170	1170	0	0	11.89	11.48
2	上游多年平均水位、下游最低通航水位工况	930	600	200	130	8.00	3.37
3	上下游最低通航水位工况	330	0	200	130	6.43	3.37
4	典型恶劣工况	830	600	230	0	8.50	3.50

3 通航水流条件分析

3.1 裕溪闸下整体水动力条件

3.1.1 水位及水面比降

当工程河段来流流量从 $Q=330 \text{ m}^3/\text{s}$ 逐渐加大至 $Q=930 \text{ m}^3/\text{s}$ (20 a 一遇洪水) 时 (裕溪河口水位维持在 3.37~3.50 m), 水位随来流流量增大而逐渐升高, 各流量级水位落差为 0.17~1.90 m, 水位落差呈现逐渐增加的趋势。当工程河段遭遇节制闸设计 20 a 一遇泄流流量 ($1\ 170 \text{ m}^3/\text{s}$) 叠加长江干流 20 a 一遇水位时, 受长江干流顶托影响, 工程河段水位落差仅 0.22 m。

由于研究河段处于裕溪河河口位置处, 河段内水面比降受长江干流水位变化影响显著: 1) 当上游总来流 $Q=1\ 170 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 受长江干流洪水顶托影响, 河段水面平均比降 0.069‰; 2) 当上游总来流 $Q=330 \text{ m}^3/\text{s}$ 时 (上下游最低通航水位工况), 河段水面平均比降 0.053‰; 3) 当上游总来流 $Q=830 \text{ m}^3/\text{s}$ 时 (典型恶劣工况), 河段水面平均比降 0.481‰; 4) 当上游总来流 $Q=930 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 河段水面平均比降 0.593‰。总体而言, 工程河段水面比降较为平缓。

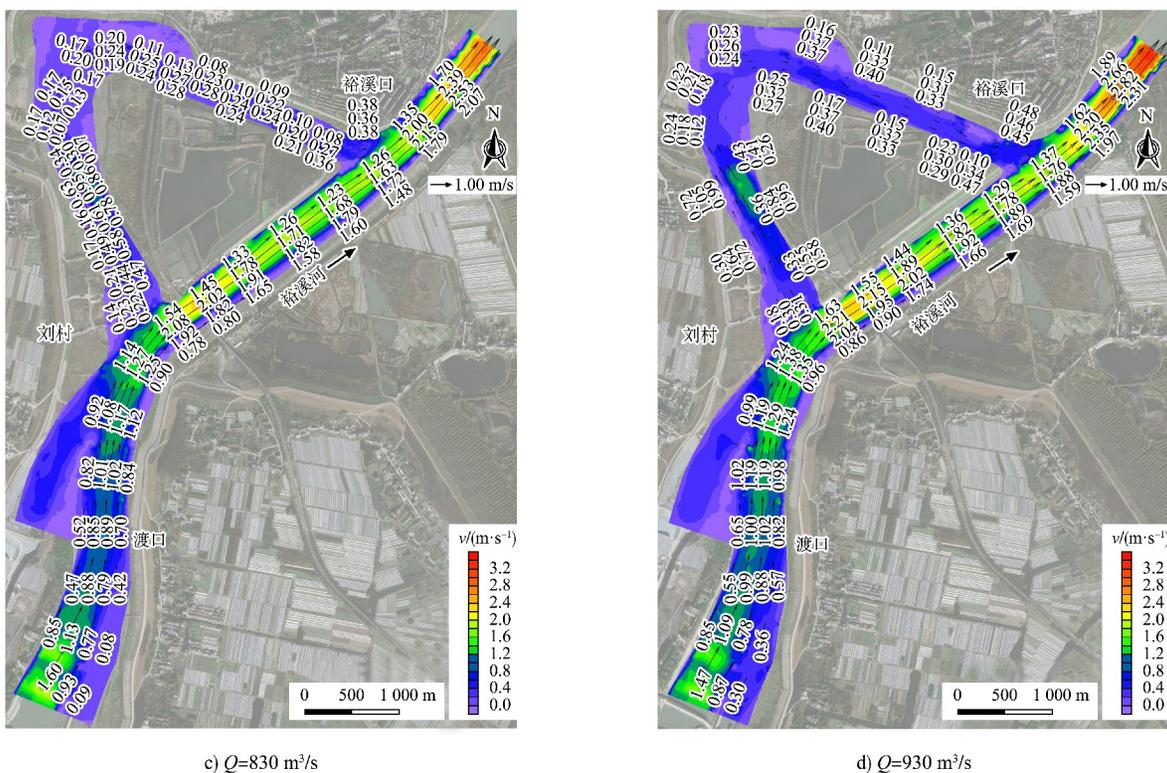
3.1.2 航深

研究河段目前航道等级达限制性航道 II 级标准、通航保证率 98%, 航道尺度 4.0 m×60 m×550 m。从二维水流数学模型统计数据来看, 计算研究河段设计航槽内航道中心线处水深基本能够达到 4.0 m 维护水深尺度, 但在弯道取直段仍存在航道水深

不足的情况, 沿程水深分布见表 2 和图 6。

表 2 航道内沿程最小水深分布
Tab. 2 Distribution of minimum water depth in the navigation channel

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	与交汇口 距离/m	航道内最小 水深/m	航道 中心线/m	航道内最小 水深/m
330	100	4.57	1 600	4.83
	200	4.82	1 700	4.26
	300	4.68	1 800	4.94
	400	4.77	1 900	4.89
	500	4.72	2 000	5.10
	600	4.82	2 100	5.02
	700	4.75	2 200	5.37
	800	4.91	2 300	5.45
	900	4.79	2 400	5.50
	1 000	4.87	2 500	5.79
	1 100	4.91	2 600	4.54
	1 200	4.86	2 700	4.17
	1 300	4.96	2 800	4.93
	1 400	4.88	2 900	6.74
	1 500	4.88	3 000	6.79
830	100	4.44	1 600	4.05
	200	4.66	1 700	3.44
	300	4.48	1 800	4.07
	400	4.52	1 900	3.98
	500	4.43	2 000	4.14
	600	4.49	2 100	4.02
	700	4.38	2 200	4.32
	800	4.50	2 300	4.36
	900	4.33	2 400	4.36
	1 000	4.37	2 500	4.61
	1 100	4.36	2 600	3.31
	1 200	4.27	2 700	2.90
	1 300	4.32	2 800	3.61
	1 400	4.19	2 900	5.37
	1 500	4.15	3 000	5.38



c) $Q=830 \text{ m}^3/\text{s}$

d) $Q=930 \text{ m}^3/\text{s}$

图 7 各工况流场分布

Fig. 7 Flow field distribution under different simulation conditions

由图 7 可知, 当上游总来流流量为 $Q=1172 \text{ m}^3/\text{s}$ (节制闸设计 20 a 一遇泄流) 和 $Q=330 \text{ m}^3/\text{s}$ (上下游最低通航水位) 时, 受长江干流水位顶托, 工程河段整体水面比降平缓, 流速缓慢, 水动力条件较弱。下游河道分岔处最大流速分别为 0.62 和 1.16 m/s, 裕溪河口处最大流速分别为 0.68 和 1.17 m/s。当工程河段上游总来流流量为 $Q=830 \text{ m}^3/\text{s}$ (典型恶劣工况) 时, 节制闸出口最大流速达到 1.84 m/s, 一线船闸口门外最大流速达到 0.42 m/s, 下游河道分岔处最大流速达到 2.11 m/s, 裕溪河口处最大流速达到 2.68 m/s, 分汊河道内水流平缓, 最大流速仅能达到 1.02 m/s。当工程河段上游总来流流量为 $Q=930 \text{ m}^3/\text{s}$ (上游多年平均水位、下游最低通航水位工况) 时, 节制闸出口最大流速达到 1.56 m/s, 一线船闸口门外最大流速达到 0.36 m/s, 复线船闸口门外最大流速达到 0.39 m/s, 下游河道分岔处最大流速达到 2.30 m/s, 裕溪河口处最大流速达到 2.98 m/s, 分汊河道内水流平缓, 最大流速仅达到 1.16 m/s。

3.2 航槽内水动力条件

3.2.1 航槽内流速

各计算流量级下, 工程河段航槽内最大流速统计见图 8。整体而言工程河段航槽内流速范围为 0.02~3.37 m/s, 仅在当工程河段上游总来流流量为 $Q=830 \text{ m}^3/\text{s}$ (典型恶劣工况)、 $Q=930 \text{ m}^3/\text{s}$ (上游多年平均水位、下游最低通航水位工况) 2 种工况下, 裕溪河口段受多处流量汇流影响航槽内流速超过 2.00 m/s。

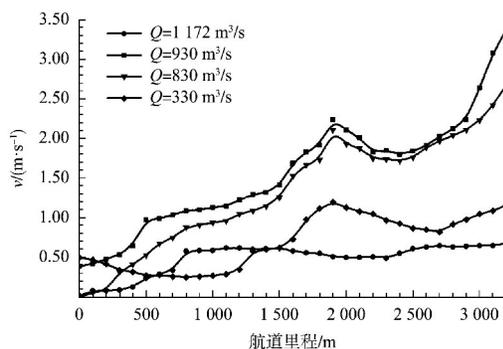


图 8 研究河段航槽内最大流速

Fig. 8 Maximum flow velocity in navigation channel of the river section

3.2.2 航槽内横向流速

各计算流量级下, 工程河段航槽内最大横向流速统计见图 9。研究河段横向流速较大的区域位于裕溪闸下和距离闸下约 2.5 km 段。对比各计算工况, 当研究河段上游总来流流量为 $Q=930 \text{ m}^3/\text{s}$ (上游多年平均水位、下游最低通航水位工况) 时横向流速相对较大。该计算情境下, 节制闸泄流

$600 \text{ m}^3/\text{s}$, 一线船闸及复线船闸均进行灌泄水, 裕溪河口长江干流水位为 3.37 m。航槽内横向流速范围为 $0.00 \sim 0.27 \text{ m/s}$, 闸下 800~900 m 位置处航槽受节制闸下泄流量影响横向流速达 0.17 m/s , 河口位置处航槽内最大横向流速达 0.27 m/s , 横向流速尚未超标。总体而言, 工程河段航槽内最大横向流速范围为 $0.00 \sim 0.27 \text{ m/s}$ 。

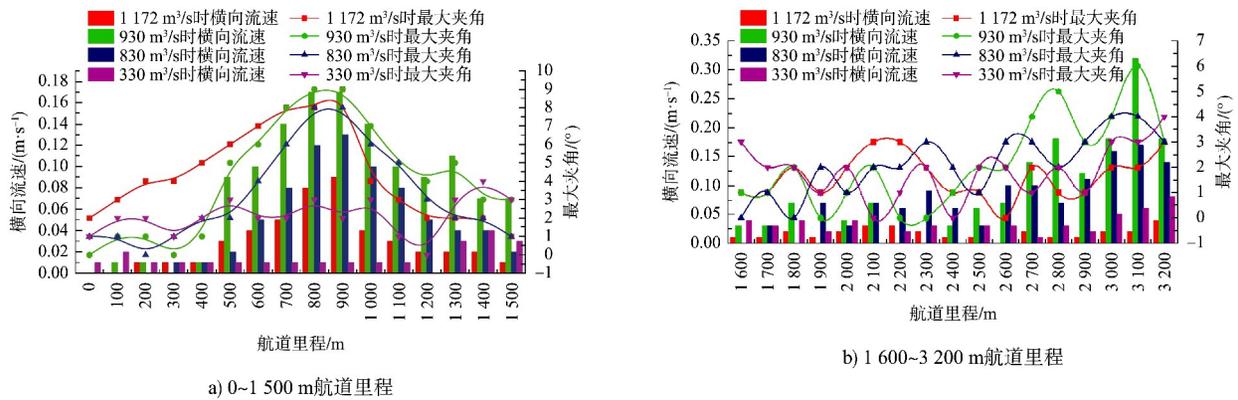


图 9 研究河段航槽内最大横向流速分布情况

Fig. 9 Distribution of maximum transverse velocity in navigation channel of the river section

3.3 裁弯段分流比

2003 年裕溪河河口段航道整治对汇口上游约 0.7~1.7 km 处实施了裁弯取直工程, 航道长度缩短至 3.0 km, 从而达到了 III 级航道的通航标准。根据前述水深及流速分析结果, 原弯道对人工裁直段具有一定的影响, 因此, 本文对原弯道分流比进行分析。各工况下原弯道与人工裁直段的分流统计结果见表 3, 基于 Perrson 相关性系数, 对原弯道分流比与枢纽调度运行参数的相关性进行

分析, 见图 10。

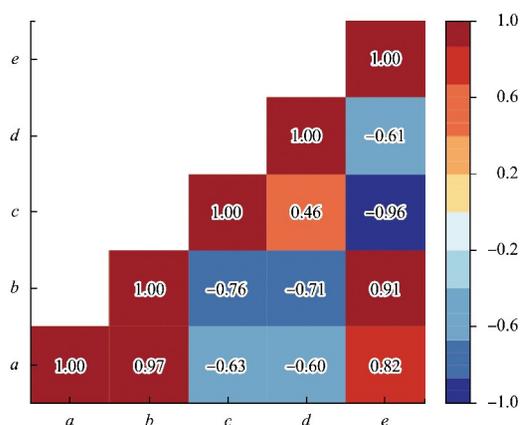
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: x_i 、 y_i 分别为各变量之间的第 i 个特征值; \bar{x} 、 \bar{y} 为各样本变量之间的均值; n 为此次模型分析所用的样本个数; 皮尔逊相关性系数 r 的计算值在 $[-1, 1]$ 。

表 3 原弯道与人工裁直段的分流比

Tab. 3 Diversion ratios between natural and regulated channel section

序号	工况	来流总流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	节制闸设计 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	一线船闸充灌水 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	复线船闸充灌水 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	原弯道 分流比/%	人工裁直段 分流比/%
1	节制闸设计 20 a 一遇泄流	1 170	1 170	0	0	67.93	24.01
2	上游多年平均水位、下游最低通航水位工况	930	600	200	130	93.25	5.62
3	上下游最低通航水位工况	330	0	200	130	99.99	0.00
4	典型恶劣工况	830	600	230	0	94.91	4.11



注: e 为分流比; a 为来流总流量; b 为节制闸设计流量;
 c 为一线船闸充灌水流量; d 为复线船闸充灌水流量。

图 10 弯道分流比的皮尔逊相关性热谱图

Fig. 10 Spatiotemporal correlation analysis of bend flow partition dynamics via pearson heatmap

结果表明, e 与 a 和 b 的相关性分别为 0.82 和 0.91, 存在强烈的正相关关系; e 与 c 和 d 相关性分别为 -0.96 和 -0.61, 存在较强的负相关关系。由此可见, 当上游来流量一定的情况下, 节制闸流量的增加会导致弯道分流的显著增加。

4 结论

1) 研究河段处于裕溪河口位置处, 河段内水面比降受长江干流水位变化影响显著, 但河段水面比降较为平缓。从航道现状来看, 研究河段设计航槽内航道中心线处水深基本能够达到 4.0 m 维护水深尺度, 但在典型恶劣条件下存在部分航段水深不足的情况。

2) 工程河段整体流态受长江干流水位及裕溪闸运行泄流状态直接影响。长江干流顶托作用小、裕溪闸泄流流量小时, 河段整体水动力条件较弱, 长江干流顶托作用强、裕溪闸泄流流量大时, 河段整体水动力条件相对较强。

3) 各计算情景下工程河段航槽内流速范围为 0.02~3.37 m/s, 仅当工程河段上游总来流流量在 $Q=830 \text{ m}^3/\text{s}$ (典型恶劣工况) 和 $Q=930 \text{ m}^3/\text{s}$ (上游多年平均水位、下游最低通航水位工况) 2 种工况下, 汇口附近受多处流量汇流影响, 航槽内流速超过 2.00 m/s。

4) 原弯道分流比与一线船闸充灌水流量和复

线船闸充灌水流量呈负相关, 而与来流总流量和节制闸设计流量呈正相关。

参考文献:

- [1] 吴学中, 王久晟, 黄祚继. 合裕航道主要船闸扩建工程枢纽布置优化研究[J]. 治淮, 2013(10): 18-20.
WU X Z, WANG J S, HUANG Z J. Optimization of hub layout for the expansion project of main ship locks in Heyu Waterway [J]. Harnessing the Huaihe River, 2013(10): 18-20.
- [2] CAMPOREALE C, PERUCCA E, RIDOLFI L. Significance of cutoff in meandering river dynamics [J]. Journal of geophysical research: earth surface, 2008, 113(F1): 2006JF000694.
- [3] LI Z W, WU X Y, GAO P. Experimental study on the process of neck cutoff and channel adjustment in a highly sinuous meander under constant discharges [J]. Geomorphology, 2019, 327: 215-229.
- [4] 蒋春钢, 颜志庆, 赵建钧, 等. 多线船闸下游极低通航水位通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2021(11): 134-141.
JIANG C G, YAN Z Q, ZHAO J J, et al. Experimental study on navigable flow conditions of extremely low navigable water level downstream of multi-line ship locks [J]. Port & waterway engineering, 2021(11): 134-141.
- [5] 东培华, 马洪亮, 尤薇, 等. 多线船闸下游引航道通航水流条件及改善方案研究[J]. 水道港口, 2013, 34(5): 420-424.
DONG P H, MA H L, YOU W, et al. Study on navigation flow condition and improvement measures of downstream approach channel in multi-line ship lock [J]. Journal of waterway and harbor, 2013, 34(5): 420-424.
- [6] 曾明, 穆青青, 童冰星, 等. 长江来水对汉江中下游水位影响的量化分析[J]. 人民长江, 2023, 54(S1): 45-49, 67.
ZENG M, MU Q Q, TONG B X, et al. Quantitative analysis of the influence of water from the Yangtze River on the water level in the middle and lower reaches of the Han River [J]. Yangtze River, 2023, 54(S1): 45-49, 67.
- [7] 李霞, 左宁, 彭永勤. 多线船闸口门区及连接段通航水流条件试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(9): 68-73.
LI X, ZUO N, PENG Y Q. Model test and analysis of the

- navigation flow conditions at the entrance and connection areas of multi-lane shiplocks [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2019, 38 (9): 68-73.
- [8] 王彪, 何飞飞, 王效远, 等. 弯曲窄槽型河段多线船闸通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2021(4): 108-115.
WANG B, HE F F, WANG X Y, et al. Study on navigable flow conditions of multi-lane lock in curved narrow channel section [J]. Port & waterway engineering, 2021(4): 108-115.
- [9] 刘圣凡, 童中山. 宽浅河道低水头水电枢纽口门区通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2018(9): 124-127, 160.
LIU S F, TONG Z S. Navigable flow conditions in gate area of low water head hydropower project in wide shallow riverway [J]. Port & waterway engineering, 2018(9): 124-127, 160.
- [10] 张跃东, 赵忠伟, 付长生. 裕溪一线船闸扩容工程一期基坑三维渗流场对比分析[J]. 中国水运(下半月), 2021(4): 85-87, 158.
ZHANG Y D, ZHAO Z W, FU C S. Comparative analysis of three-dimensional seepage field in foundation pit of Yuxi first-line shiplock expansion project [J]. China water transport (the second half of the month), 2021(4): 85-87, 158.
- [11] 曹士政, 曹晓军, 王新, 等. 裕溪一线船闸扩容改造工程关键技术研究[J]. 中国水运, 2021(9): 144-146.
CAO S Z, CAO X J, WANG X, et al. Study on key technologies of expansion and reconstruction project of Yuxi first-line shiplock [J]. China water transport, 2021(9): 144-146.
- [12] 陶成成, 陈松, 刘海祥, 等. 裕溪一线船闸扩容改造工程基坑监测分析[J]. 水上安全, 2023(14): 58-60.
TAO C C, CHEN S, LIU H X, et al. Monitoring and analysis of foundation pit of Yuxi first-line shiplock expansion and reconstruction project [J]. Maritime safety, 2023(14): 58-60.
- [13] 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- (本文编辑 赵娟)
-
- (上接第 127 页)
- [13] 周睿. 基于 DERU 法的岩溶区公路隧道土建结构检测评估方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
ZHOU R. Detection and evaluation method of highway tunnel structure in karst area based on DERU method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [14] 李福新. 运营多年的港口护岸防护技术探讨[J]. 水道港口, 2022, 43(6): 781-785.
LI F X. Discussion on protection technology of port revetment operated for many years [J]. Journal of waterway and harbor, 2022, 43(6): 781-785.
- [15] 杨琪, 曹子行, 王飞. 基于无人机+BIM 的实景融合技术在航道工程中的应用[J]. 水运工程, 2024(5): 193-199.
YANG Q, CAO Z X, WANG F. Application of synthesizing three-dimensional model with real image in waterway engineering based on BIM and unmanned aerial vehicle [J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 193-199.
- [16] 梅蕊, 王法鑫, 张薇, 等. 航道骨架护岸结构的稳定性影响规律及其优化[J]. 水运工程, 2024(5): 200-206, 214.
MEI R, WANG F X, ZHANG W, et al. Stability influence laws and optimization of channel skeleton shore protection structures [J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 200-206, 214.
- [17] 王炜正, 牛作鹏. 基于 BIM 的内河限制性航道护岸工程数智化设计技术及应用[J]. 水运工程, 2024(3): 140-146.
WANG W Z, NIU Z P. Digital and intelligent design technology for restricted waterway revetment engineering in inland rivers based on BIM [J]. Port & waterway engineering, 2024(3): 140-146.
- [18] 李冬, 王晓燕. 长江中游蕲春水道航道整治工程方案[J]. 水运工程, 2023(4): 155-160, 173.
LI D, WANG X Y. Channel regulation project scheme of Qichun waterway in middle reaches of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2023(4): 155-160, 173.
- (本文编辑 王璁)