



平陆运河牛江河下底河入汇方案研究 *

孙慧颖¹, 周家俞^{1,2}, 刁伟^{1,3}

(1. 重庆交通大学, 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400010;
3. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 400074)

摘要: 支流与干流的交汇区水流流态复杂, 而人工开挖运河存在交角大、汇入流量大的特点, 对航道通航影响显著, 需对支流口实施河道治理工程。针对平陆运河中牛江河、下底河支流汇入运河后入汇河段的干流通航问题, 进行入汇河段水流运动特性的研究。基于 RNG $k - \varepsilon$ 紊流模型, 采用三维数值模拟方法模拟不同设计工况下支流入汇情况, 结果表明原设计方案不满足通航条件。因此, 在设计方案基础上提出调整入汇方向、扩大入汇断面的优化措施, 显著改善了通航水流条件, 达到规范要求。研究成果可为类似工程提供借鉴。

关键词: 平陆运河; 通航水流条件; 支流入汇; 三维数值模拟

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0114-08

Tributary inflow schemes for Niujiang River and Xiadi River of Pinglu Canal

SUN Huiying¹, ZHOU Jiayu^{1,2}, DIAO Wei^{1,3}

(1. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Southwest Water Conservancy and Water Transport Engineering Research Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400010, China;
3. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 400074, China)

Abstract: The flow patterns in the intersection area of tributary and main stream are complicated, and the artificial canal excavation has the characteristics of large intersection angle and large inlet flow, which has a significant impact on channel navigation, so it is necessary to implement the river treatment projects at the tributary mouth. Aiming at the navigation problem of the main stream of Pinglu Canal after the tributaries of Niujiang River and Xiadi River merge into the canal, this paper studies the flow movement characteristics of the incoming reaches. Based on the RNG $k - \varepsilon$ turbulence model, a three-dimensional numerical simulation method is used to simulate the branch inflow conditions under different design conditions. The results show that the original design scheme does not meet the navigation conditions. Therefore, optimization measures such as reorientation of the inflow and expansion of the inflow section are proposed on the basis of the design scheme, which significantly improves the navigable water flow conditions and meets the requirements of the code. The research results can provide reference for similar projects.

Keywords: Pinglu Canal; navigational current condition; tributary inflow; three-dimensional numerical simulation

支流汇入干流后在交汇区常形成流动停滞区、流速偏转区、分离区和流速加速区等^[1]。由于支

流流向与干流流向存在一定夹角, 入汇口易产生回流区和明显的横向速度。特别是汛期泄洪时,

收稿日期: 2023-09-20

*基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX1175)

作者简介: 孙慧颖(1996—), 女, 硕士研究生, 从事通航水力学研究。

通讯作者: 周家俞(1979—), 男, 正高级工程师, 从事通航水力学研究工作。E-mail: 82115891@qq.com

支流洪水汇入干流后会明显增大干流内的横向流速。横向流速的增加严重威胁干流船舶的航行安全。因此需要对不同洪水流量组合下交汇区的通航水流条件进行深入分析, 使干流满足安全通航条件。

国内外许多学者都对交汇区的通航水流条件进行过研究。Biron 等^[2]通过水槽试验研究床面不平整对汇流区水流结构的影响, 发现干支流河床的高差不一致对明渠汇流区流动结构及水流掺混过程有重要影响。Hsu 等^[3]利用入汇口上下游深泓线的变化确定分离区的位置及水流流经分离区时的收缩量, 从而研究了分离区末端的能量和动量变化。Mamedov^[4]利用经验公式将分离区的长和宽与交汇角、动量比、速度比联系起来。除了对水流交汇口分离区的研究, 还有许多关于水流交汇处水流特征的研究。Bradbrook 等^[5]进一步研究了干支流河床高程不一致对河段汇流口水力特性的影响, 提出干支流河床高程不一致会使次生环流加强, 分离区增大。支流入汇形式对通航河道产生的流速影响直接关系到河道通航安全, 毛森浩等^[6]通过模型试验研究水流调整空间与干支流横向流速的关系, 得到水流调整空间影响通航条件的结论。张羽等^[7]研究发现, 当分流比较大时, 主流水流产生偏移, 形成斜流, 导致侧向流速变大, 对通航条件也会产生不利影响。胥宗强等^[8]采用大涡模拟的方法对不同角度的交汇区湍流结构进行模拟, 发现交汇角越大, 各水深层面的分离区宽度越大, 分离区也会越不对称。陈雪妮等^[9]建立了明渠交汇水流三维数值仿真模型, 发现弱混合条件下支流入汇口会形成回流区, 而水流间的相互挤压会促使流速加速区的形成。王协康等^[10]以水槽实验资料为基础, 提出基于主流流速的等值线法定义分离区。茅泽育等^[11]发现随交汇角或主支流流量相对大小不同, 分离区尺寸会发生变化, 且随交汇角或流量增大, 规律愈发明显。

前人对于交汇水流的研究大多基于天然河道, 有关人工运河入汇水流条件的相关研究较少, 且

其对汇入口流态更为敏感。本研究将平陆运河入汇河段作为研究对象, 构建基于 RNG (Renormalization Group) $k\text{-}\varepsilon$ 紊流模型的三维水动力数学模型。基于对入汇区水流特性的分析, 讨论支流口设计治理方案的实施效果, 针对设计方案提出优化措施, 以期为类似航道设计提供借鉴。

1 流域概况

平陆运河主要利用现有河道浚深扩挖而成, 在牛江河和下底河河口处, 运河通过局部截弯取直, 从原钦江“几”字形弯道两端连通。牛江河、下底河洪水首先进入原钦江河道“几”字形弯顶, 沿钦江原河道以 18° 夹角斜交汇入运河。由于牛江河、下底河河口窄、落差大, 汛期下泄急流可能对运河通航水流条件造成不利影响。对下底河河口上游钦江原河道进行回填处理, 即支流口洪水仅能通过下游钦江河道下泄。支流口与钦江原河道、运河交汇关系见图 1。

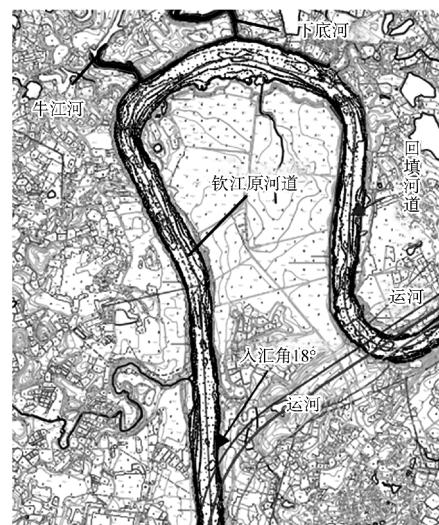


图 1 牛江河、下底河支流与干流交汇关系

2 数值模拟

2.1 控制方程

模型采用的水动力控制方程包括连续性方程和动量方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) + S_w \end{cases} \quad (2)$$

式中: u 为流场中某点的速度, u 、 v 、 w 为 u 在 x 、 y 、 z 3 个方向上的分量, ρ 为流体密度, μ 为流体黏度, p 为作用在流体微元上的压力, $S_u = F_x + s_x$ 、 $S_v = F_y + s_y$ 、 $S_w = F_z + s_z$ 为广义源项, F_x 、 F_y 、 F_z 为作用在流体微元上的体力。一般地, s_x 、 s_y 、 s_z 的值很小, 对于黏性为常数的不可压缩流体, $s_x = s_y = s_z = 0$ 。

k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: G_k 为由于平均速度梯度而产生的湍流动能; G_b 为由于浮力产生的湍流动能; Y_M 为可压缩湍流中波动膨胀对整体耗散率的影响; α_k 和 α_ε 分别为 k 和 ε 的逆有效普朗特数; S_k 和 S_ε 是用户定义的源项; $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_{3\varepsilon} = -0.33$; R_ε 为附加项; $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, μ_t 为紊动涡黏度。

2.2 模型构建

根据运河与支流交汇关系, 考虑原钦江弯道、运河弯道等可能对入汇水流造成影响的河段, 取原钦江河道长度 1.2 km、运河河道长度 2.0 km 的区域作为计算区域。将支流入口、运河干流入口处设置为流量边界条件, 运河干流出口设置为水位边界条件, 河床边界设置为无滑移固壁边界条件, 概化三维模型见图 2。出于对网格敏感性及计算成本的综合考虑, 本研究选取 x 、 y 方向网

格大小为 2 m, z 方向网格大小为 1 m, 加密区网格尺寸为 1 m, 非加密区尺寸为 2 m, 将计算区域分为 4 个区域, 如图 3 所示, 最终计算网格总计约 600 万个。

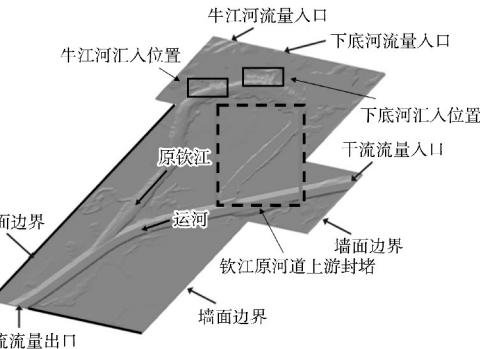


图 2 支流概化模型及边界条件设置

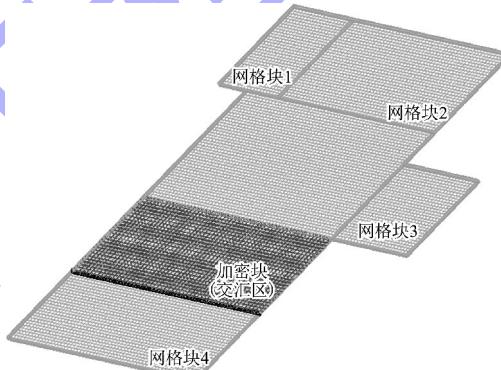


图 3 支流概化模型计算网格分布

2.3 模型验证

采用经原型观测资料对比验证的二维数学模型结果对三维数学模型结果进行可靠性验证。验证时从通航条件最不利的角度出发, 牛江河、下底河支流选取 20 a 一遇洪水, 干流选取 5 a 一遇洪水组合进行模拟。

2.3.1 测点布置

为对天然入汇条件下的流速成果进行定量分析, 统计分析入汇河段垂向平均横纵向流速, 选取汇入口局部运河进行流速监测。流速测点均匀分布在 $P_1 \sim P_{11}$ 共 11 个断面, 每个断面均匀布置 6 个测点。其中 P_1 断面位于交汇区上游, 11 个流速测点断面覆盖整个交汇区。流速测点平面布置见图 4。

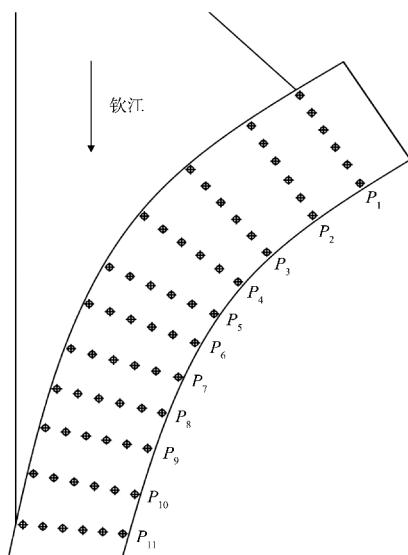


图4 流速测点平面布置

2.3.2 水位验证

选取6个测点断面的平均水位进行验证,结果见表1。由表可知,各断面中平均水位差最大的为 P_5 断面,与模拟结果相差0.08 m,相对误差为0.9%,二维与三维数学模型的水位验证结果较好。

表1 测点平均水位验证结果

| 断面 编号 | 水位/m | | 水位差/ m | 相对 误差/% |
|----------|--------|--------|-----------|------------|
| | 三维数学模型 | 二维数学模型 | | |
| P_1 | 7.75 | 7.73 | 0.02 | 0.3 |
| P_3 | 7.82 | 7.77 | 0.05 | 0.6 |
| P_5 | 8.46 | 8.39 | 0.07 | 0.9 |
| P_7 | 7.56 | 7.49 | 0.07 | 0.9 |
| P_9 | 7.81 | 7.77 | 0.04 | 0.5 |
| P_{11} | 7.22 | 7.19 | 0.03 | 0.4 |

2.3.3 流速分布验证

2种数学模型下 $P_1 \sim P_{11}$ 断面测点的垂向平均纵向、横向流速验证结果见图5。结果表明,纵向流速相差最大在 P_6 断面,两模型相差2.4%;横向流速相差最大在 P_7 断面,两模型相差8.5%,故三维数学模型的准确性和有效性能够满足数值模拟的精度要求。

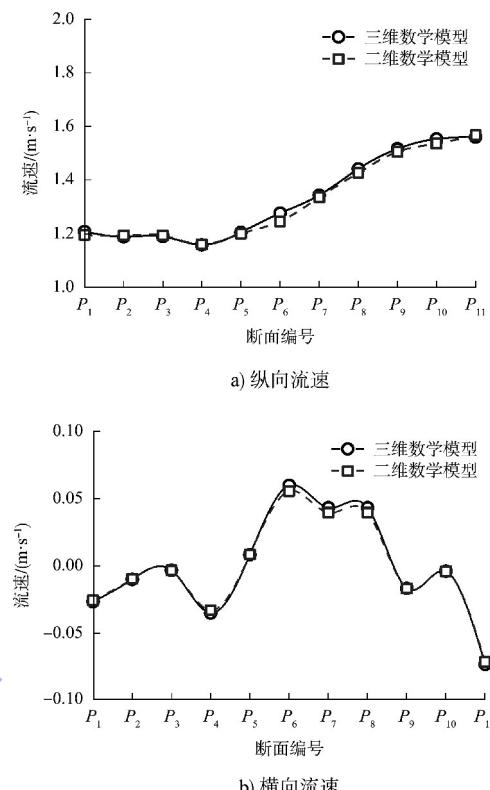


图5 垂向平均流速验证

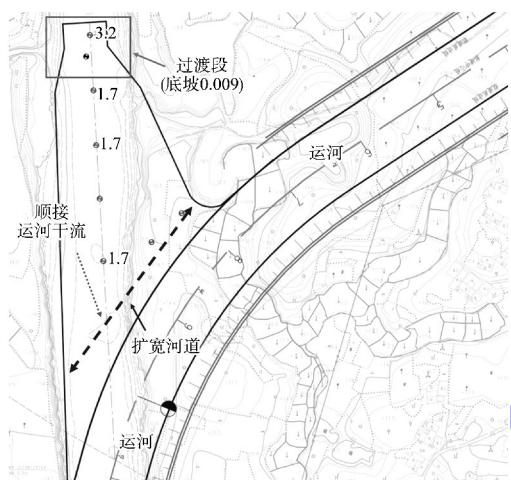
2.4 数值模型工况

牛江河和下底河流域均无水文站实测洪水量数据,根据《广西暴雨径流查算图表》^[12]推求牛江河、下底河的设计洪水量。牛江河5 a一遇洪水流量为90.4 m³/s,20 a一遇洪水流量为155.0 m³/s;下底河5 a一遇洪水流量为154.0 m³/s,20 a一遇洪水流量为265.0 m³/s。干流按照5 a一遇洪水流量1 740.0 m³/s、自然径流流量16.0 m³/s考虑。从最不利角度出发,设置数值模型工况见表2,流量组合1为支流20 a一遇洪水、干流5 a一遇洪水流量;流量组合2为支流5 a一遇洪水、干流自然径流流量。

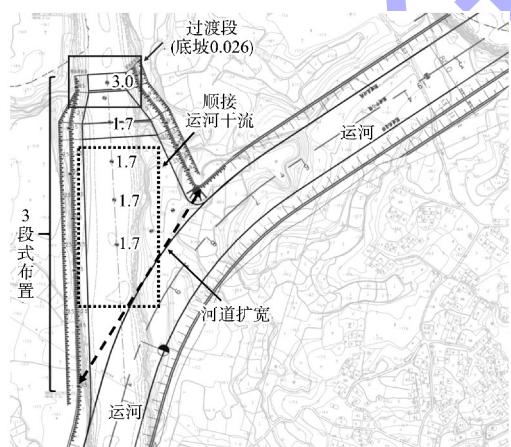
表2 数值模型工况

| 工况 | 支流流量/(m ³ ·s ⁻¹) | | 干流流量/(m ³ ·s ⁻¹) |
|----|---|-------|---|
| | 牛江河 | 下底河 | |
| 1 | 155.0 | 265.0 | 1 740.0 |
| 2 | 90.4 | 154.0 | 16.0 |

设计方案未处理牛江河及下底河河口，而是通过扩宽支流左岸增大出口过流断面及调整入流方向。治理河段由宽 90 m 扩展至 180 m、河底高程由 3.2 m 降低至 1.7 m 的过渡段(底坡 0.009)，出口直接顺接运河干流，同时对原钦江上游进行回填封堵。设计方案平面布置见图 6a)。根据 JTS 180-2—2011《运河通航标准》^[13]6.2.3 节规定，支流汇入口对应的运河航道内横向流速的控制指标为 0.3 m/s。



a) 设计方案



b) 优化方案

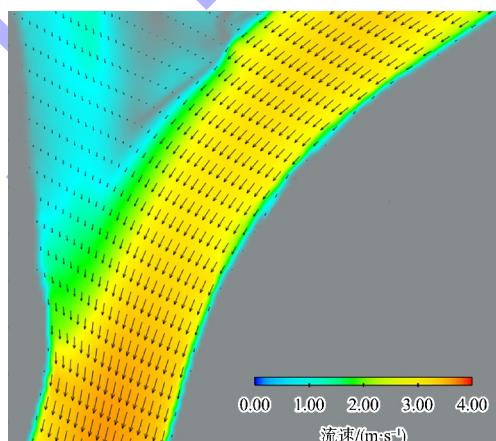
图 6 支流入汇治理方案平面布置

优化方案对治理河段采用 3 段式布置，衔接段由宽度 60 m 扩展至 110 m、河底高程由 3.0 m 降低至 1.7 m 的过渡段(底坡 0.026)，末端为宽 160 m、长 200 m、底面高程 1.7 m 的出口段；同时在支流入口处平顺与原钦江自然岸坡的衔接，

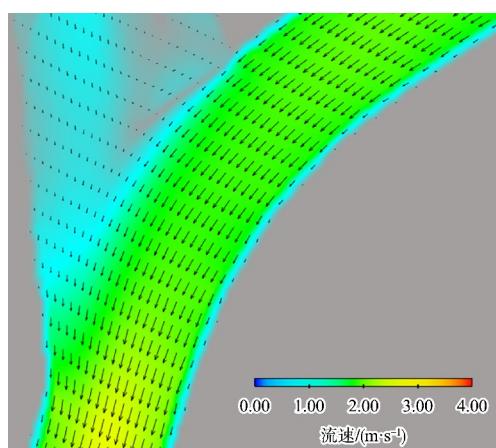
设置高 1 m 横向拦沙坎(坎顶高程 1.0 m)、出口段设置高 0.5 m 横向拦沙坎(坎顶高程 2.2 m)。目的是调顺局部入汇方向，并进一步扩大流域面积以降低流速，使支流相对平缓地汇入运河。优化方案平面布置见图 6b)。

3 设计方案通航水流条件分析

设计方案下牛江河、下底河汇入口附近的流场分布见图 7。在工况 1 下，运河内水流整体流态较为平顺，运河内平均流速约 1.4 m/s；在工况 2 下，河水处于停滞状态，支流入汇后运河平均流速约 0.4 m/s。牛江河、下底河来流流经钦江河段迅速扩散，支流口经治理后，河口过流面积增加，支流口流速减小至 0.6 m/s，加之入汇夹角收缩，支流入汇对运河横向流速的影响相对天然河道亦进一步减小。



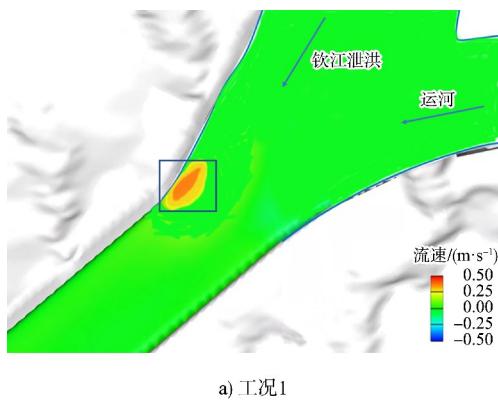
a) 工况1



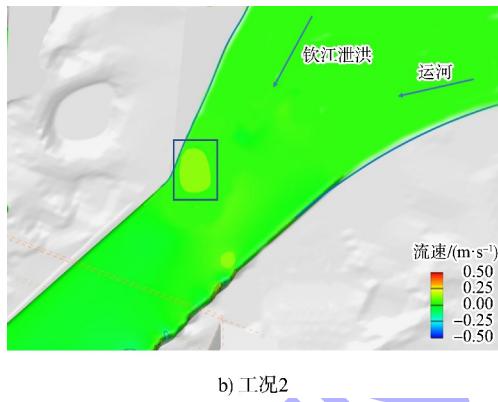
b) 工况2

图 7 设计方案支流入汇口流场云图

由图8所示的横流流速分布云图可见, 运河内横流虽一定程度受支流入汇的影响, 但范围仅局限于汇入口下游端, 约在汇入口河段右侧长20 m、宽15 m区域内。而工况2下支流入汇流量相对较小, 运河受其影响而产生的横向流速更微弱。



a) 工况1



b) 工况2

图8 设计方案支流汇入口横流流速分布云图

设计方案下各断面垂向平均横向流速见图9。工况1下统计河段的纵向流速在1.17~1.92 m/s, 横向流速在-0.05~0.32 m/s。 P_6 和 P_7 断面受支流汇入影响较大, 横向流速分别为0.32、0.33 m/s。根据JTS 180-2—2011《运河通航标准》规定, 运河航道内支流口的横向流速不大于0.3 m/s, 纵向流速不大于2 m/s。工况1下, 运河右岸衔接段有长50 m、宽20 m水域的横向流速超标(图9), 为确保通航船舶的航行安全, 需对设计方案进行优化。工况2下流速较为平缓, 运河各项指标均满足标准要求。

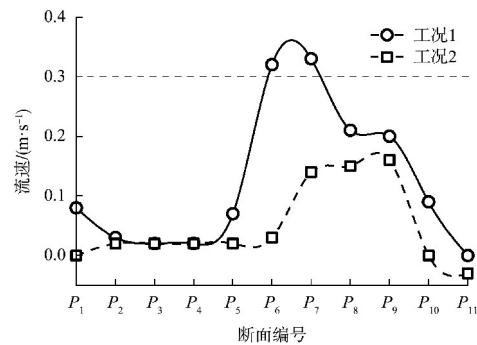
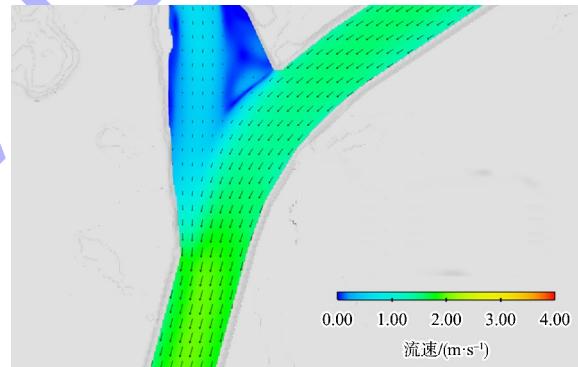


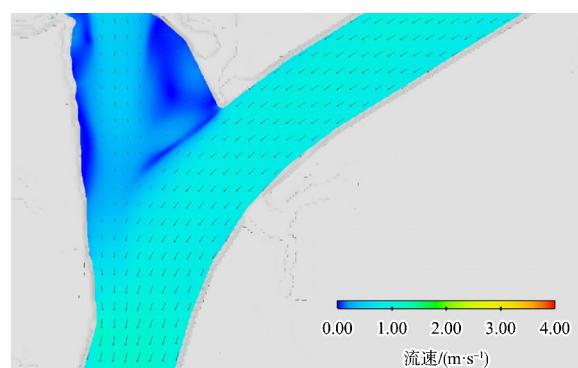
图9 设计方案各断面垂向平均横向流速

4 优化方案通航水流条件分析

优化方案下, 汇入口附近流场分布见图10, 横向流速分布见图11。由图可见优化设计方案后, 随着入汇口过流面积的增大, 水流再次放缓。入汇口区域横向流速和横流区域在原整治方案的基础上进一步减小。数值模拟结果表明, 优化方案进一步改善了支流入汇对运河通航水流条件的影响。



a) 工况1



b) 工况2

图10 优化方案支流汇入口流场



a) 工况1



b) 工况2

图 11 优化方案支流汇入口横向流速分布云图

在工况 1 下, 水深-流速在运河内变化较大, 最大流速在 1.6 m/s , 受支流入汇影响各测点表面横向流速在 $-0.10 \sim 0.25 \text{ m/s}$ (图 12), 其中正对汇入口的 $P_6 \sim P_8$ 断面的表面横向流速较其他测点更大, 但整体的表面横向流速控制在 $0.15 \sim 0.25 \text{ m/s}$, 未超过 JTS 180-2—2011《运河通航标准》要求。在工况 2 下, 水深-流速在汇入口变化较大, 最大流速在 0.6 m/s , 受支流入汇影响的各测点表面横向流速在 $-0.03 \sim 0.12 \text{ m/s}$, 整体表面横向流速控制在 0.15 m/s 以下。可见在优化方案各计算工况下, 汇入口的各项指标均满足 JTS 180-2—2011《运河通航标准》要求。

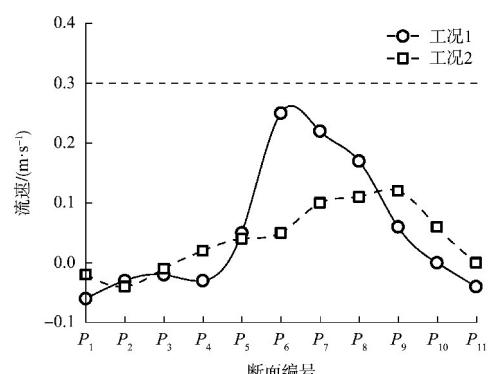
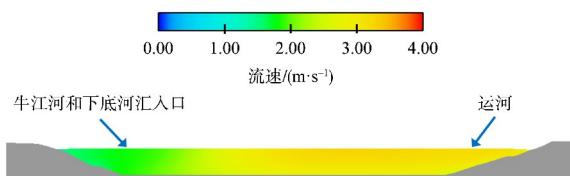
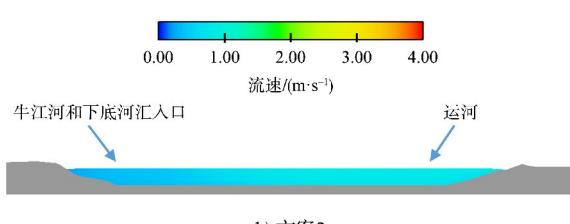


图 12 优化方案各断面表面横向流速

图 13 为牛江河、下底河汇入口横断面的水深-流速分布, 可见流速数值在水深方向上变化不大, 设计代表船型 5.2 m 吃水深度范围内水流流速与垂向平均流速基本一致。



a) 方案1



b) 方案2

图 13 优化方案支流汇入口水深-流速分布

在最不利工况 1 下, 优化方案汇入口三维水流结构见图 14, 支流左岸明显观察到一个均匀分布的环流, 由于支流与干流存在顶托, 环流与分离面间产生了流速偏转区, 分离面存在偏转。但该环流被控制在治理河口内, 运河内流场受到的影响较小^[14-15]。

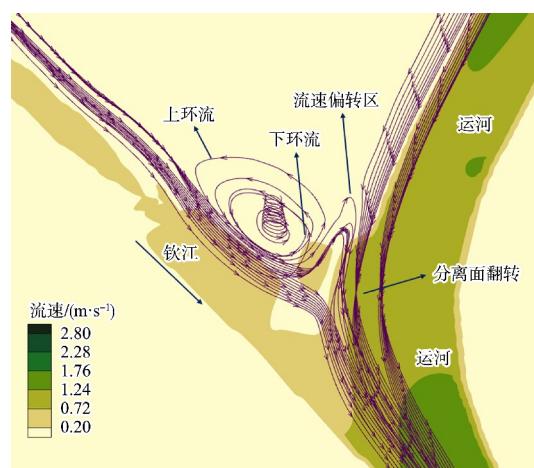


图 14 汇入口三维水流结构

5 结论

- 1) 运河入汇区内水流流态复杂, 拓宽河道虽然可以降低入汇区的横向流速, 但仍超过规范允许值。本文提出多段式布置的优化方案, 进一步

降低交汇区内的横纵向流速, 使汇入区横向流速标准满足运河安全通航要求。

2) 本文的研究成果可为人工运河支流汇入区的水流运动特性研究及河道治理方案提供借鉴。

3) 后续还将进一步研究不同支流口治理方案下治理效果与投入工程量之间的关系, 总结出技术经济最优的支流口治理措施。

参考文献:

- [1] 杨泽一. 干支流交汇口水力特性三维数值模拟研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [2] BIRON P, BEST J L, ROY AG. Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences [J]. Journal of hydraulic engineering, 1996, 122(12): 676-682.
- [3] HSU C C, WU F S, LEE W J. Flow at 90° equal-width open-channel junction [J]. Journal of hydraulic engineering, 1998, 124(2): 186-191.
- [4] MAMEDOV A S. Hydraulic calculation of a confluence [J]. Hydrotechnical construction, 1989, 23(9): 553-556.
- [5] BRADBROOK K F, LANE S N, RICHARDS K S, et al. Role of bed discordance at asymmetrical river confluences [J]. Journal of hydraulic engineering, 2001, 127(5): 351-368.
- [6] 毛森浩, 王威, 张铭, 等. 干支流垂直交汇下跌水工程下游通航水流条件优化[J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 29-37.
- [7] 张羽, 杨朝辉, 赵集云, 等. 弯曲河段船闸引航道通航水流条件模拟[J]. 水运工程, 2022(6): 132-138.
- [8] 胥宗强, 魏炳乾, 薛博升, 等. 明渠交汇口分离区三维几何特性的大涡模拟研究 [J]. 应用力学学报, 2021, 38(1): 409-417.
- [9] 陈雪妮, 杨中华, 尹炜, 等. 弱混合条件下支流入汇口水力特性数值模拟 [J]. 中国农村水利水电, 2023(8): 120-127, 134.
- [10] 王协康, 杨青远, 卢伟真, 等. 交汇水流分离区特征研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(6): 1-6.
- [11] 茅泽育, 赵升伟, 罗昇, 等. 明渠交汇口水流分离区研究 [J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 7-12.
- [12] 广西自治区水文总站. 广西壮族自治区暴雨径流查算图表[Z]. 南宁: 广西自治区水文总站, 1984.
- [13] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 运河通航标准: JTS 180-2—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [14] 周建银. 弯曲河道水流结构及河道演变模拟方法的改进和应用[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [15] 郭维东, 刘健, 韩冬. 分流对弯道水流水力特性的影响 [J]. 人民黄河, 2009, 31(6): 93-94.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 90 页)

- [8] JIANG Z, CHU X, YU Z, et al. Technical status evaluation of river training works based on the improved DS evidence theory [M]// Lecture notes in civil engineering. Berlin: Springer, 2023: 1565-1576.
- [9] ZHANG F, WANG P Y, MU P, et al. A comprehensive evaluation method for the service status of groins in waterways based on an AHP-improved CRITIC combination weighting optimization model [J]. Sustainability, 2022, 14(17): 10709.
- [10] WEN L F, YANG Y, LI Y L, et al. Comprehensive evaluation method for the concrete-face rockfill dams behavior based on the fuzzy recognition model [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2022, 36(3): 21-30.
- [11] 李文杰, 张浩游, 张文, 等. 基于模糊贝叶斯网络的长江上游航道整治建筑物技术状况评价研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(9): 112-118.

- [12] 王平义, 张帆, 牟萍, 等. 基于改进 CRITIC 法的整治建筑物服役状态综合评价 [J]. 水道港口, 2022, 43(1): 59-67.
- [13] 陈一梅, 张梦成. 基于 SVM 的丁坝群束水攻沙功能预测 [J]. 水利水运工程学报, 2019(3): 25-31.
- [14] 长江航道局, 南京水利科学研究院. 内河航道维护技术规范: JTJ 287—2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [15] 赵志舟. 新水沙条件下长江上游分汊河段的航道整治参数研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [16] 高玉琴, 周桐, 马真臻, 等. 考虑天然水文情势的水库调度图优化 [J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 60-67.
- [17] 郭文献, 金耀广, 李越, 等. 近 60 年来气候变化和人类活动对长江中下游水文情势影响定量评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(10): 2464-2470.
- [18] IVERSEN G R, GERGEN M. Statistics: the conceptual approach [M]. Berlin: Springer, 1997.

(本文编辑 王璁)