

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230075

基于多目标的杭州之江新城骨干河道交汇处岸线优化方案

张连刚¹, 李若华², 谢 宇¹

(1. 浙江清源工程技术有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江同济科技职业学院, 浙江 杭州 311231)

摘要: 为降低桥墩群对杭州之江新城骨干河道团结浦、三号浦交汇处的水流影响, 构建了平原河网平面二维数学模型, 研究了3个岸线优化方案对交汇处流态和雍水的改善效果, 并综合阻水比、征地面积、水域面积及桥墩安全等多目标进行比较分析。结果表明, 拓宽一侧河道以免桥墩位于主河槽或改道避开桥墩, 均可有效降低桥墩雍水影响, 3个优化方案对雍水高度的改善效果相当; 方案2、3会影响桥墩安全, 水域面积相对较小且征地面积大, 方案1对桥墩安全影响较小, 工程实施相对容易, 综合优势较高, 推荐方案1为最优方案。

关键词: 河道交汇; 桥墩; 流态; 雍水; 防洪排涝; 平原河网

中图分类号: TV85 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0031-04

1 概况

杭州之江新城位于西湖风景名胜区向“两江一湖”风景名胜区的过渡区^[1], 之江新城内河水系属钱塘江流域上泗水系, 共有大小河道47条, 总长度约141 km。排水河道按照河道汇水特性, 可分为山溪性河道和平原河道。山溪性河道源短流急, 洪水期水位暴涨, 对下游平原的防洪产生很大的威胁。三号浦、团结浦为之江新城的平原河道, 为之江新城的骨干河道^[2], 三号浦南起周浦, 在绕城高速桥下与团结浦汇合后, 向东至四五排灌站, 全长8.6 km, 其中三号浦北段西起团结浦, 东至钱塘江四五排灌站, 长约2.8 km, 规划河宽30~40 m。团结浦位于转塘街道, 西起村口闸, 东至绕城高速, 在绕城高速桥下汇入三号浦, 全长4.2 km, 沿线有村口人家、象山人家等12个小区, 及杭七中、金街美地等学校和商业区。团结浦现状河宽4.3~28.2 m, 根据《之江地区水利综合规划》, 近期将全部拓宽至15 m以上, 规划实施后团结浦水流能否顺畅地汇入三号浦北段将成为团结浦排涝的关键。在团结浦与三号浦交汇处, 绕城高速共有7个桥墩坐落于现状河道内(图1), 导致交汇处流态紊乱, 水流下泄不畅, 下雨时团结浦上游雍水, 两岸小区经常发生积水倒灌现象, 严重影响了两岸居民的生活出行。为改善交汇处的

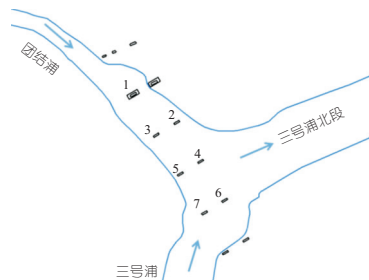


图1 绕城高速桥墩在河道内的分布图

Fig. 1 Distribution of bridge piers in the river channel

水流不畅, 提高团结浦行洪排涝能力, 本文基于研究区域的河道特征, 构建了平面二维数学模型, 研究了岸线优化对流态及雍水的改善效果, 并结合其他目标为河道主管部门推荐了最优的整治方案。

2 平面二维数学模型的构建

2.1 控制方程

工程河段主槽水深2~3 m, 河宽水浅, 故采用平面二维水流数学模型模拟工程区域的流态特征。数学模型的控制方程为基于三向不可压缩和Reynolds值均布的Navier-Stokes方程, 采用Boussineq假定和静压假定, 将水流基本运动简化为沿水深平均的二维浅水方程, 其中水流连续方程为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = HS \quad (1)$$

收稿日期: 2023-01-15, 修回日期: 2023-02-14

作者简介: 张连刚(1979-), 男, 高级工程师, 研究方向为水资源调配、水动力模型等, E-mail: 3765980@qq.com

通讯作者: 李若华(1977-), 男, 博士、正高级工程师, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: liruohua2000@163.com

x, y 方向的动量守恒方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial HU}{\partial t} + \frac{\partial HU^2}{\partial x} + \frac{\partial HUV}{\partial y} = \\ & fHV - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2U \sqrt{U^2 + V^2}}{H^{1/3}} + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x H \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y H \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (2) \\ & \frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial HUV}{\partial x} + \frac{\partial HVV}{\partial y} = \\ & -fHU - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2V \sqrt{U^2 + V^2}}{H^{1/3}} + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x H \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y H \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

式中, H 为总水深; t 为时间; U, V 分别为 x, y 方向垂线平均流速; S 为源汇项; f 为科氏系数; g 为重力加速度; η 为以参考基面为准的水面位置; n 为曼宁系数; ϵ_x, ϵ_y 分别为 x, y 方向紊动粘性系数。

采用三角形网格下的有限体积法对方程进行离散, 该方法具有边界拟合性好, 网格布设灵活, 局部加密方便, 适应性强等特点^[3]。

2.2 模型概化及网格划分

为避免模型的边界数值效应影响研究区域的计算精度, 模型上边界为团结浦与三号浦交汇处上游约 600 m, 下边界为三号浦北段与新淀山浦交汇处, 河床地形采用 2021 年测绘的地形资料。模型网格尺寸为 0.5~3.0 m, 桥墩附近局部加密, 并与周边网格渐变衔接, 网格范围见图 2, 桥墩附近局部加密网格见图 3。

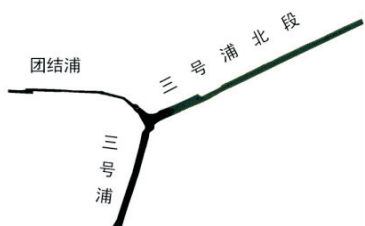


图 2 数学模型网格范围示意图

Fig. 2 Sketch of computational domain

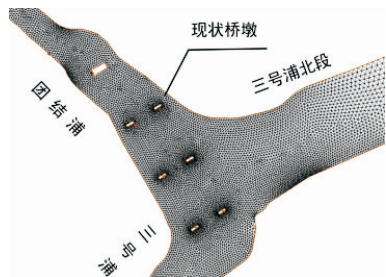


图 3 桥墩周边网格加密图

Fig. 3 Grid densification map around pier

2.3 边界条件设置

研究区域位于之江平原河网, 来水受到上游

山溪性河道及平原河网调度的控制, 其边界条件由之江平原河网一维数学模型提供。二维模型上边界为流量, 下边界为水位, 本文以 20 年一遇水文条件进行分析, 团结浦、三号浦上边界流量分别为 14、22 m³/s, 下边界水位为 6.51 m。

3 各工况下河道交汇处的流态分析

3.1 现状工况下流态分析

20 年一遇水文条件下, 现状工况工程河段流态分布及流速等值线见图 4。由于 1 号桥墩位于河道中央, 承台露出河床, 断面阻水比达 26%, 水流流过桥墩时被分流至桥墩两侧, 桥墩上游断面流速 0.3 m/s, 而 1 号桥墩两侧的流速增大至 0.6 m/s 以上, 流过 1 号桥墩后, 水流又被束窄至 2、3 号桥墩中间通过, 之后又在 4 号桥墩的挑流作用下左转汇入三号浦北段。在各个桥墩后方出现大面积的掩护区, 掩护区内存在明显的回流打转现象, 回流流速可达 0.1~0.3 m/s。由图 4 可知, 现状工况下虽然交汇处的河宽在 30 m 以上, 但真正过水宽度不足 10 m。一般情况下, 平原河网水面坡降是非常小的, 但团结浦 1 号桥墩上游与交汇后三号浦北段 200 多米的距离内水位差竟达 8 cm, 可见桥墩雍水作用显著。

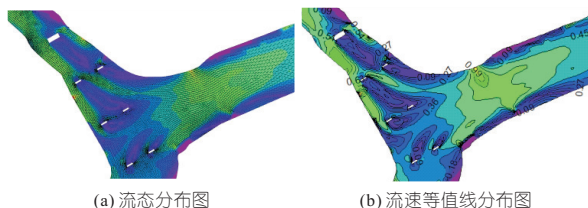


图 4 现状工况流态分布图及流速等值线分布图
Fig. 4 Flow pattern diagram and velocity contour diagram under current condition

3.2 规划工况下流态分析

根据《之江地区水利综合规划》, 团结浦河宽将全部拓宽至 15 m 以上, 并对河床进行清淤, 交汇处两侧岸线也进行了微调, 但 7 个桥墩仍坐落在河道内。根据规划岸线和清淤后的河床地形, 采用构建的数学模型进行计算, 工程河段流态分布及流速等值线见图 5。由图 5 可知, 由于规划工况拓宽了部分河道, 并进行了清淤, 1 号桥墩右侧流速由现状工况的 0.6 m/s 以上降为 0.5 m/s 左右, 但交汇处的流态并未发生明显变化, 各桥墩后方仍存在较大的掩护区, 且在三排桥墩的连续阻水效应下, 团结浦的水流仍主要通过 2、3 号桥墩中间的狭窄通道汇入三号浦, 团结浦 1 号桥墩上游与交汇后三号浦北段的水位差仍达 6 cm, 雍

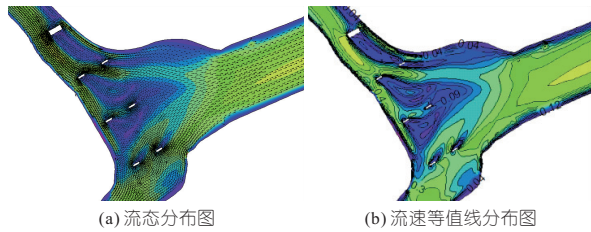


图 5 规划工况流态分布图及流速等值线分布图

Fig. 5 Flow pattern diagram and velocity contour diagram under planning condition

水现象改善有限。

3.3 优化方案 1 工况下流态分析

因 1 号桥墩阻水面积较大,尽量降低 1 号桥墩的阻水影响是重中之重,若团结浦北侧岸线继续向北拓宽,则会有更多的桥墩落在河中,故将南侧岸线南拓是较好的选择。南侧虽靠近山体但仍有一定的拓展空间,故将南侧岸线向南拓宽约 10 m。基于该优化岸线采用构建的数学模型进行计算,工程河段流态分布及流速等值线见图 6。由图 6 可知,团结浦右岸南拓,1 号桥墩右侧过水面积大幅增加,流速由规划工况的 0.5 m/s 降至 0.3 m/s 左右。水流绕过 1 号桥墩后,主要从 3 号桥墩右侧过流,然后在 4、5 号桥墩的挑流及三号浦来流的顶托下,跨过 4 号桥墩汇入三号浦北段。团结浦 1 号、2 号、3 号桥墩后侧仍存在一定范围的掩护区,但因过水面积增大,交汇处的流速明显降低。经统计,团结浦 1 号桥墩上游与交汇后三号浦北段的水位差仅有 2 cm,与规划工况相比降低了 4 cm,雍水现象明显改善。

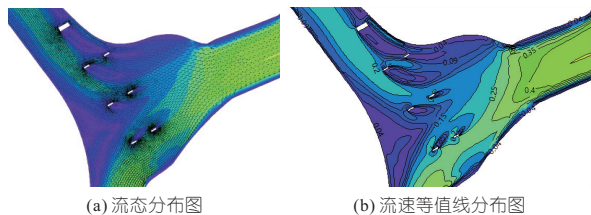


图 6 优化方案 1 工况流态分布图及流速等值线分布图

Fig. 6 Flow pattern diagram and velocity contour diagram under scheme 1

3.4 优化方案 2 工况下流态分析

为进一步降低 1 号桥墩的影响,在岸线优化 1 工况基础上将团结浦左侧岸线向内缩窄,避开 1 号桥墩,缩窄后 1 号桥墩处河宽约 18 m,这样仅有 6 个桥墩位于河道内。基于该优化岸线采用构建的数学模型进行计算,工程河段流态分布及流速等值线见图 7。由图 7 可知,团结浦左侧岸线向内缩窄后,避开了阻水最大的 1 号桥墩,虽然河道宽度有所缩窄,2、3 号桥墩后侧仍存在一定范围的掩护区,但流态较之前明显平顺了很多,水流经 2、3 号桥墩分流后,在 4、5 号桥墩前方转弯汇

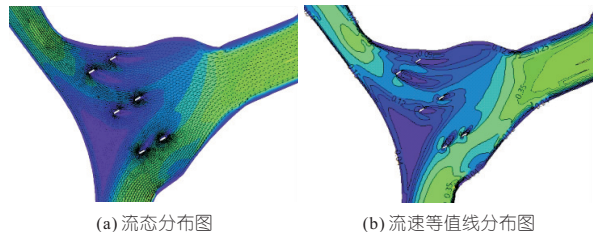


图 7 优化方案 2 工况流态分布图及流速等值线分布图

Fig. 7 Flow pattern diagram and velocity contour diagram under scheme 2

入三号浦。经统计,1 号桥墩断面虽然缩窄了近 10 m,但断面流速并未增大,仍为 0.3 m/s 左右,团结浦 1 号桥墩上游与交汇后三号浦北段的水位差仍为 2 cm,与岸线优化方案 1 工况相比,雍水现象未加重。

3.5 优化方案 3 工况下流态分析

岸线优化 2 工况虽然避开了 1 号桥墩,但仍有 6 个桥墩位于河道内。绕城高速相邻的两排桥墩间距约 15 m,为完全避开桥墩的影响,设置了岸线优化方案 3,即对团结浦进行改道,穿过绕城高速相邻的两排桥墩汇入三号浦北段。基于该优化岸线采用构建的数学模型进行计算,工程河段流态分布及流速等值线见图 8。由图 8 可知,团结浦改道后,高速桥墩不落于河道中,水流较为平顺,由于河道缩窄,团结浦内流速有所增加,为 0.3~0.4 m。因三号浦流量大于团结浦,团结浦汇入三号浦时受到三号浦的顶托,在交汇处有小范围的回流区。经统计,团结浦 1 号桥墩上游与交汇后三号浦北段的水位差为 2 cm,与岸线优化方案 1、2 工况相当。

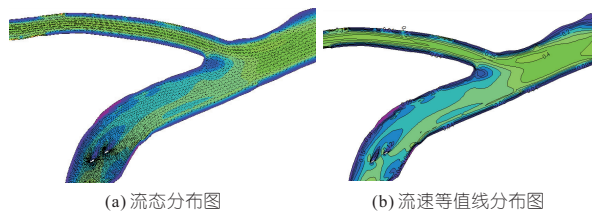


图 8 优化方案 3 工况流态分布图及流速等值线分布图

Fig. 8 Flow pattern diagram and velocity contour diagram under scheme 3

3.6 各工况优劣综合比较

为进一步比较各方案的优劣,采用 1 号桥墩断面阻水比、流态特征、桥墩雍水高度、征地面积、水域面积变化、桥墩安全影响等指标进行综合比较分析,见表 1。由表 1 可看出:①规划工况下河道内坐落 7 个桥墩,1 号桥墩断面阻水比达 28%,在 1 号桥墩及之后多个桥墩连续阻水效应下,上下游水位差达 6 cm。优化方案 1 将团结浦右侧岸线南拓,河道内仍有 7 个桥墩,但河宽增加,1 号桥墩断面阻水比降至 24%,水流从 1 号桥墩右

表 1 各优化方案优劣比较

Tab. 1 Comparison of advantages and disadvantages of various schemes

方案	1号桥墩断面阻水比/%	流态特征	桥墩壅水高度/cm	征地面积/m ²	水域面积变化/m ²	桥墩安全影响
规划工况	28	紊乱,回流打转现象明显	6	/	/	较小
优化方案 1	24	较紊乱,回流打转现象有所改善	2	2 137	+2 137	较小
优化方案 2	/	较紊乱,回流打转现象有所改善	2	2 137	+703	中等
优化方案 3	/	较平顺	2	2 916	-525	较大

注:征地面积指超出规划岸线的征地范围。水域面积指与规划工况相比水域增加或减小的面积。优化方案 2、3 中避开了 1 号桥墩,故不存在 1 号桥墩阻水比。

侧较为平顺的通过,桥墩上下游水位差降至 2 cm,壅水现象明显改善。优化方案 2 在优化方案 1 基础上左侧河岸缩窄,避开了 1 号桥墩,流态明显改善,桥墩上下游水位差为 2 cm。优化方案 3 为新开河道,从两排桥墩中间穿过,因避开了所有桥墩流态较为平顺,原桥墩上下游水位差也为 2 cm。可见 3 个优化方案壅水改善效果相当。② 三号浦河宽大于团结浦,行洪流量也大于团结浦,从小范围来讲,三号浦是干流,团结浦作为支流汇入三号浦。由规划工况及优化方案 1、2 的河道形态可见,这 3 种工况下团结浦均是基本垂直汇入三号浦河道,水流必定受到三号浦的顶托,从河道自然交汇形态来讲并非理想的交汇形态,因此对团结浦进行改道,使其水流平顺汇入三号浦是较为理想的选择。优化方案 3 不仅避开了桥墩,且通过小范围的改道能够使团结浦水流平顺汇入三号浦,故是较为理想的干支流河道交汇形态。③ 杭州绕城高速公路从 1994 年 4 月开始动工,于 2003 年建成通车,是杭州重要的交通高速^[4],因此维护其桥墩安全性的重要性不言而喻。优化方案 2 避开了 1 号桥墩,但施工时河岸驳坎建设可能会对 1 号桥墩安全造成一定影响。优化方案 3 需从两排桥墩中间穿过,因两排桥墩间距不足 20 m,施工时需在桥墩周边大开挖,可能对桥墩安全造成较大影响,且该方案征地范围较大,故实施难

度更大。

综上所述,从雍水改善效果看,3 个优化方案的效果基本相当,从干支流河道交汇形态讲优化方案 3 是较为理想的选择,但优化方案 2、3 的施工可能会对桥墩的稳定安全造成一定影响,且优化方案 3 征地面积较大,水域面积会明显减小。故综合考虑河道过流流态、壅水高度、征地面积、水域面积变化等因素,尤其是对绕城高速桥墩的影响程度及施工难度,推荐优化方案 1 作为团结浦岸线优化方案。

4 结论

a. 基于研究河段的河道特征,构建了平面二维水流数学模型,研究了 3 个岸线优化方案对河道交汇处流态和桥墩群雍水高度的改善效果。结果表明各优化方案均可显著降低雍水高度,流态紊乱现象也有所改善。

b. 采用流态、壅水高度、征地面积、水域面积、桥墩安全等指标比较了各优化方案的优劣,认为方案 1 对桥墩安全影响较小,工程实施相对容易,综合优势较高,推荐作为最优方案。

参考文献:

[1] 林蔚. 建设城市新区应从水环境规划入手:以之江国家旅游度假区为例[J]. 水利发展研究, 2015, 15 (4): 7-10.

[2] 胡仕源, 李红仙, 郑芙蓉, 等. 未来城市实践区建设背景下之江地区防洪排涝格局优化研究[J]. 水利规划与设计, 2022(6): 25-27.

[3] 俞欣, 周艳文, 闵兴华. 石白湖流域水环境联合数学模型与污染物削减研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39 (2): 31-34.

[4] 王慧, 王小德, 张志颖. 杭州绕城高速公路中央分隔带植物景观及功能分析[J]. 浙江农业学报, 2014, 26 (6): 1524-1529.

A Multi-objective Optimization Plan for the Shoreline at the Intersection of the Main Rivers in Hangzhou Zhijiang New City

ZHANG Lian-gang¹, LI Ruo-hua², XIE Yu¹

(1. Zhejiang Qingyuan Engineering Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;
2. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China)

Abstract: In order to reduce the impact of bridge pier groups on the water flow at the intersection of the main rivers of Hangzhou Zhijiang New City, three shoreline optimization schemes were studied to improve the flow pattern based on a two-dimensional mathematical model. The optimal remediation plan was recommended based on multiple objectives such as water resistance ratio, land area, water area, bridge pier safety, and so on. The results show that the widening one side of the river channel to prevent bridge piers from being located in the main channel or changing the route to avoid bridge piers can effectively reduce the impact of bridge piers on the water level. The three optimization schemes have the same improvement effect on the backwater of the bridge piers. Scheme 2 and scheme 3 will affect the safety of bridge piers, with relatively small water area and large land acquisition area. Scheme 1 has little impact on the safety of bridge piers and is relatively easy to implement. Scheme 1 has high comprehensive advantages, and is recommended as the optimal option.

Key words: confluence of river courses; pier; flow pattern; backwater; flood control & drainage; plain river network