



赣江尾闾南支枢纽通航水流条件数值模拟研究*

裴子玥¹, 肖 洋^{1,2,3,5,6,7}, 张涛涛³, 王梓璇¹, 顾 娟¹,
许 晨⁴, 袁 康¹, 刘佳明¹, 高 杰¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学, 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210024;
3. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 4. 苏州科技大学 地理科学与测绘工程学院, 江苏 苏州 215009;
5. 河海大学, 水利部重点实验室, 江苏 南京 210024; 6. 河海大学, 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024;
7. 河海大学, 水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210024)

摘要: 拦河枢纽的施工和运营将显著改变河道的水流条件, 对通航产生潜在的影响, 因此有必要对枢纽工程不同时期的通航水流条件进行研究和评价。以赣江南支枢纽工程河段为研究对象, 建立南支河段二维水动力数值模型, 模拟施工期和运营期的河道水动力过程, 分析枢纽工程对航道通航水流条件的影响。结果表明: 各时期航道内流态相对平顺, 不会对通航产生不利影响, 在大部分流量工况下水流条件均满足通航要求; 仅在施工一期 10 a 一遇工况下, 临时航道有部分区域流速超过赣江航道通航流速控制指标(2.00 m/s), 长度约为 2 000 m, 流速最大值为 2.54 m/s; 在施工二期、运营期, 河段航道内水流条件均满足通航要求。研究结果可为赣江南支枢纽通航安全和运行调度提供参考。

关键词: 枢纽工程; 赣江; 通航水流条件; 数值模拟

中图分类号: TV135.4; U64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0143-08

Numerical simulation of navigable water conditions at Nanzhi Hydro-Junction in Ganjiang River

PEI Ziyue¹, XIAO Yang^{1,2,3,5,6,7}, ZHANG Taotao³, WANG Zixuan¹, GU Ran¹, XU Chen⁴, YUAN Kang¹, LIU Jiaming¹, GAO Jie¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210024, China;

3. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

4. School of Geography Science and Geomatics Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

5. Key Laboratory of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China;

6. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China;

7. Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The construction and operation of a riverine hydro-junction significantly alter the hydrodynamic conditions of the waterway, potentially affecting navigation. Therefore, it is essential to study and evaluate the navigational flow conditions during different phases of the project. This study focuses on the river segment of Nanzhi Hydro-Junction in Ganjiang River. A two-dimensional hydrodynamic numerical model of the Nanzhi river segment is established to simulate the hydrodynamic processes during both the construction and operation phases. The objective

收稿日期: 2023-09-15

***基金项目:** 国家自然科学基金长江联合基金项目(U2240209); 江苏省水利科技项目(2021055); 国家自然科学基金面上项目(52379075); 水利部重大科技项目(SKS-2022124)

作者简介: 裴子玥(1999—), 女, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

通讯作者: 肖洋(1974—), 男, 博士, 教授, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: Sediment_lab@hhu.edu.cn

is to analyze the impact of the hydro-junction project on navigational flow conditions in the waterway. The results show that during all phases, the flow patterns within the waterway are relatively smooth and do not pose adverse effects on navigation. Under most flow conditions, the flow conditions meet the navigational requirements. However, during the first phase of construction, under a ten-year return period condition, certain areas in the temporary waterway experience flow velocities exceeding the navigational flow speed control threshold of the Ganjiang River (2.00 m/s). These areas extend for approximately 2,000 meters, with a maximum velocity of 2.54 m/s. In contrast, during the second phase of construction and the operation phase, the flow conditions within the river segment meet navigational requirements. The research findings can provide reference for the safety and operational scheduling of navigation in Nanzhi Hydro-Junction of the Ganjiang River.

Keywords: hydro-junction; Ganjiang River; water flow condition; numerical simulation

赣江自南昌以下进入尾闾地区,分四汊注入鄱阳湖,水动力过程复杂。近年来由于气候变化、人为因素等影响,赣江尾闾的水文情势发生了较大的变化^[1-2],严重影响流域的生态环境和水运经济发展^[3-4]。为了提高河道水环境承载能力、改善与提升通航条件,江西省拟建赣江南昌水利枢纽^[5],在四支河道中下游建闸抬水,畅洪调枯、控制尾闾枯水期的水位。南支枢纽位于赣江尾闾东河南支,其所在的南支航道是江西省“两横一纵十支”高等级航道网规划的重要组成部分和发展对象^[6-7]。作为该河段控制性工程,枢纽的施工和运营将会对航道通航水流条件产生一定影响。

研究枢纽建设对通航水流条件的影响主要采用物理模型试验或数值模拟方法。与物理模型试验相比,数值模拟具有经济、灵活、速度快等优点^[8]。目前,水动力数值模拟广泛应用于各枢纽工程的通航评价中^[9-10]。受坝址河段弯道和复杂地形的影响,南支枢纽上下游河道水流条件复杂。针对赣江南支枢纽运营期通航问题,方锦涛等^[11]通过物理模型试验,对不同工程的枢纽布置进行优化,使得枢纽运营期下游航道口门区与连接段水流条件基本满足横向流速在 0.30 m/s 之内的通航要求,为工程设计提供支撑。然而,考虑上下游航道枢纽通航规模的衔接问题,枢纽船闸布置方案在实际施工设计中有一定调整。在当前枢纽布置方案下,施工期、运营期不同的过流方式对

河段水流条件和航道通航均影响较大,对于不同时期工程河段的通航水流条件能否满足通航要求,有必要开展进一步的分析研究。

本文通过建立赣江尾闾南支二维水动力数学模型,模拟计算南支枢纽在施工期、运营期典型工况下工程河段的水动力过程,分析工程对河道流速分布的影响,评估不同时期航道内通航水流条件是否满足通航要求。旨在为南支枢纽通航安全和运行调度提供参考。

1 工程概况

1.1 总平面布置

南支枢纽位于赣江尾闾东河南支,五洲尾附近,枢纽左、右岸分别为蒋巷联圩、红旗联圩。枢纽主体建筑物由鱼道、滩地溢流段、泄水闸、船闸和右岸连接段组成,坝轴线总长 1 190.16 m,从左至右依次为:鱼道(长 113.20 m)、滩地溢流段(长 496.00 m)、泄水闸段(长 382.50 m)、船闸段(长 47.0 m)、右岸连接段(长 151.46 m)。平面布置见图 1。

根据相关规划,南支枢纽航道为地区重要航道,航道等级为Ⅲ级,设计船闸等级为Ⅲ级。船闸主体段由上闸首、闸室、下闸首及输水系统组成。船闸最大允许工作水头 7.1 m,闸室有效尺寸为 230.0 m×23.0 m×4.5 m(长×宽×最小槛上水深)。枢纽船闸设计最高通航水位标准为 20 a 一遇

洪水,设计最低通航水位保证率为95%。南支闸上、下游设计最高通航水位为20 a一遇设计洪水水位,分别为20.75和20.74 m。从安全考虑,南支

闸上设计最低通航水位为12.10 m,南支闸下设计最低通航水位为9.30 m。施工期通过临时航道通航,运营期利用船闸通航。

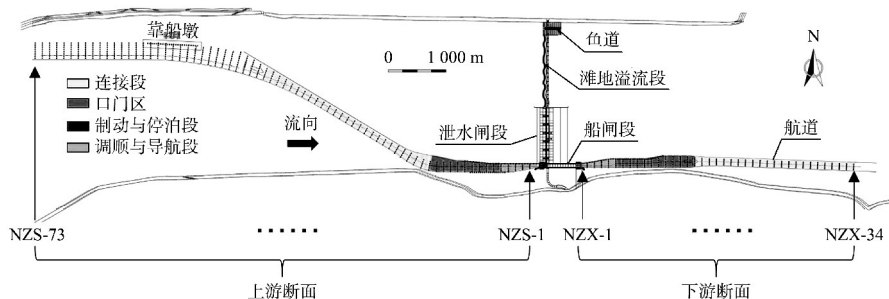


图1 南支枢纽工程平面布置

1.2 施工期导流方案

南支枢纽工程采用一次拦断、左岸滩地明渠导流方案。南支枢纽工程施工方案分两期施工,施工一期围堰围护右岸,进行泄水闸主体工程施工,左侧漫滩开辟临时航道(宽50 m)用于导流、通航;施工二期由明渠、漫滩以及已建成的泄水闸泄流,临时航道通航。赣江尾间一期围堰、二期围堰均为4级临时建筑物,工程采用导流标准为10 a一遇洪水。施工期围堰布置见图2。

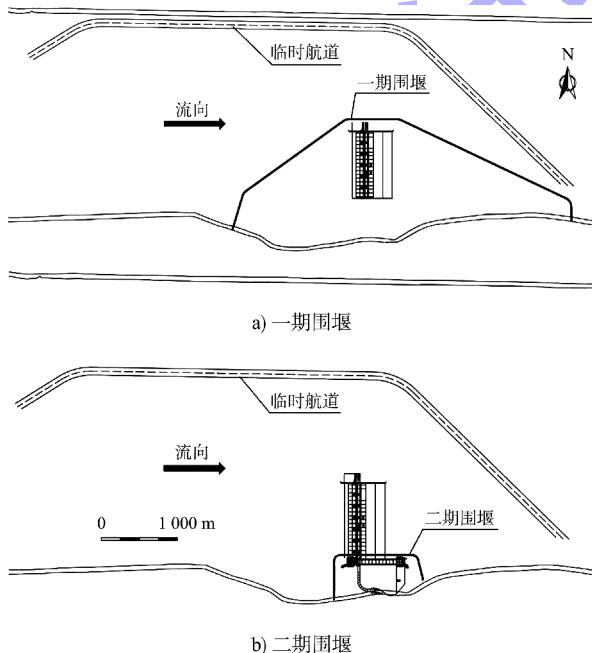


图2 南支枢纽工程施工期围堰布置

1.3 通航标准

南支枢纽施工期采用临时航道通航,目前我国内河航道水流条件尚无标准,赣江属鄱阳湖水系,该流域通常采用“表面流速不超过2.00 m/s”作为控制指标。根据GB 50139—2014《内河通航标准》^[12],运营期采用船闸通航时,通航水流条件标准为引航道口门区水面最大纵向流速 ≤ 2.00 m/s,横向流速 ≤ 0.30 m/s,回流流速 ≤ 0.40 m/s;引航道与主航道的水流应平稳过渡;制动和停泊段水面最大纵向流速 ≤ 0.50 m/s,横向流速 ≤ 0.15 m/s,导航与调顺段宜为静水区。

2 数学模型的建立与验证

2.1 控制方程

在研究区域中,由于水平尺度远大于垂向尺度,水流相关参数沿水平方向的变化幅度也远大于沿垂直方向的变化幅度。因此,可以忽略水流参数在垂直方向上的变化,并假设动水压强在沿水深方向上的分布符合静水压强分布规律,可以得到基于水深方向平均的平面二维水流运动基本方程,即水流连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(h) + h \operatorname{div}(\mathbf{u}) = S_h \quad (1)$$

x 方向动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \nu_t \nabla u) \quad (2)$$

y 方向动量方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \nu_t \nabla v) \quad (3)$$

式中: h 为水深, m; t 为时间, s; u 、 v 为 x 、 y 方向上的速度分量; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; ν_t 为涡黏系数; Z 为自由水面高程, m; S_h 为水深方向上流体的源或汇; S_x 、 S_y 为 x 、 y 方向上动量的源或汇。

2.2 模型的建立

施工期包括一期、二期, 运营期包括敞泄期、控泄期, 不同时期模型边界有所差异, 相应地建立无枢纽模型、施工一期模型、施工二期模型和运营期模型 4 个二维水流数学模型, 其中无枢纽模型用于模型验证和参数率定, 其他模型分别用于研究南支枢纽在施工期、运营期航道通航水流条件。模型上游给定流量边界, 下游给定水位边界。

施工一期模型计算区域面积共 47.5 km^2 , 模型采用三角形网格, 平均网格尺度为 41.05 m , 共 $5.454 8$ 万个网格; 施工二期模型边界与施工一期模型相同, 计算区域面积共 48.2 km^2 , 在枢纽附近对网格进行加密, 平均网格大小为 39.10 m , 最小网格为 2.00 m , 共 $5.839 7$ 万个网格。

为计算运营期通航水流条件, 运营期模型分为整体模型和上下游局部模型, 运营期模型在枢纽区域进行局部加密, 网格尺寸为 $0.50 \sim 20.00 \text{ m}$ 。整体模型用于模拟运营期敞泄工况, 面积为 48.2 km^2 , 共 $9.226 3$ 万个网格, 平均网格尺寸为 27.08 m 。局部模型用于模拟枢纽运营控泄时期上下游水位不一致的工况, 上游模型 $4.758 3$ 万个网格, 下游模型 $3.959 1$ 万个网格。南支枢纽模型范围及网格划分见图 3。

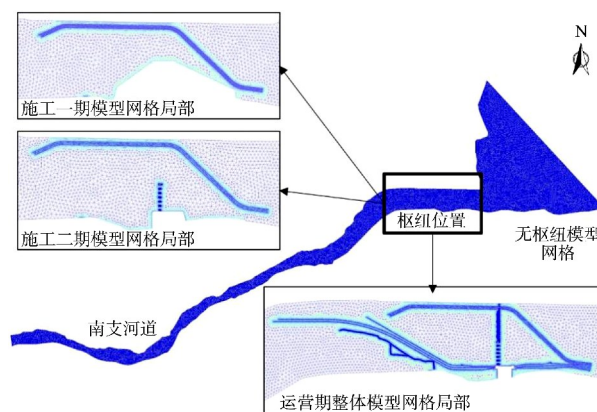


图 3 南支枢纽模型网格

2.3 模型的验证

在赣江南支布设 3 个测验断面, 于 2019 年 7 月、2020 年 9 月、2020 年 10 月测量了水位流速, 分别对应高水、中水和低水情况, 模型地形采用 2018 和 2020 年的赣江南支河道地形数据。给定 3 次水文测验对应上下游边界条件, 将模拟计算水位与水文测验结果进行对比, 结果见表 1。可知计算水位值与实测值较为接近, 误差不大于 7 cm 。经率定, 模型采用的曼宁系数为 0.024 , 涡黏系数为 0.5 。

表 1 各水位测站拟合情况

水位	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	断面 名称	实测 水位/m	计算 水位/m	水位 差值/m
低	470	NZ-1	14.54	14.47	0.07
		NZ-2	14.55	14.48	0.07
		NZ-3	14.58	14.60	0.02
中	2 800	NZ-1	16.40	16.41	0.02
		NZ-2	16.41	16.45	0.04
		NZ-3	16.39	16.37	0.02
高	3 780	NZ-1	16.99	17.00	0.01
		NZ-2	16.63	16.60	0.03
		NZ-3	16.98	16.99	0.01

2.4 工况设置

计算工况的选取主要考虑枢纽设计通航水位、设计水文条件及枢纽调度情况等因素, 不同时期针对各模型共选取 5 种计算工况, 见表 2。其中, 工况 4 和 5 是运营期枢纽控泄情况下的工况, 工况 4 为枢纽调控下最大下泄流量工况, 工况 5 为南支枢纽最小通航流量工况。

表 2 水动力模型计算工况

工况 编号	工况	上游流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	边界水位/m		工况应用模型
			上游	下游	
1	平滩流量	1 570	16.65	16.02	施工一期、施工二期、运营期(敞泄)
2	10 a 一遇洪水	4 320	19.84	17.27	施工一期、施工二期、运营期(敞泄)
3	20 a 一遇洪水	5 050	20.20	17.21	运营期(敞泄)
4	最大调控流量	795	14.78	14.48	运营期(控泄)
5	最小通航流量	215	15.47	12.57	运营期(控泄)

注: 黄海高程。

3 结果分析

3.1 施工期模拟结果及分析

对施工期 4 个工况分别进行计算, 结果表明上游来流量增加导致河道流速普遍增大, 施工期最不利工况为 10 a 一遇洪水工况, 即工程采用的导流标准。施工一期和二期在 10 a 一遇工况下流场分布见图 4, 可知工程上下游河段流态相对平顺, 主流流速普遍为 0.80~1.40 m/s, 在工程区域, 由于施工期围堰的修建, 水流从束窄的河道中流出, 束窄段河道流速明显较大。施工一期围堰拦截河道宽度约一半, 且拦截区域主要为深槽,

上游来流在围堰作用下主流偏折至左岸并漫滩下泄, 过水面积显著减小, 流速相应增大, 特别是在坝轴线位置, 流速普遍大于 1.40 m/s, 部分区域超过 2.00 m/s。施工二期通过明渠、漫滩及已完建的泄水闸泄流, 水流条件整体良好, 围堰拦截河道宽度相对较小, 河道整体流速比施工一期有所降低, 特别是围堰束窄区域, 河道主流主要集中在深槽, 与天然情况一致, 流速普遍为 0.80~1.60 m/s, 相对来说, 左岸导流明渠过流较小, 流速显著低于施工一期情况。各工况流线整体上较为平顺, 未发现局部回流等不良流态。

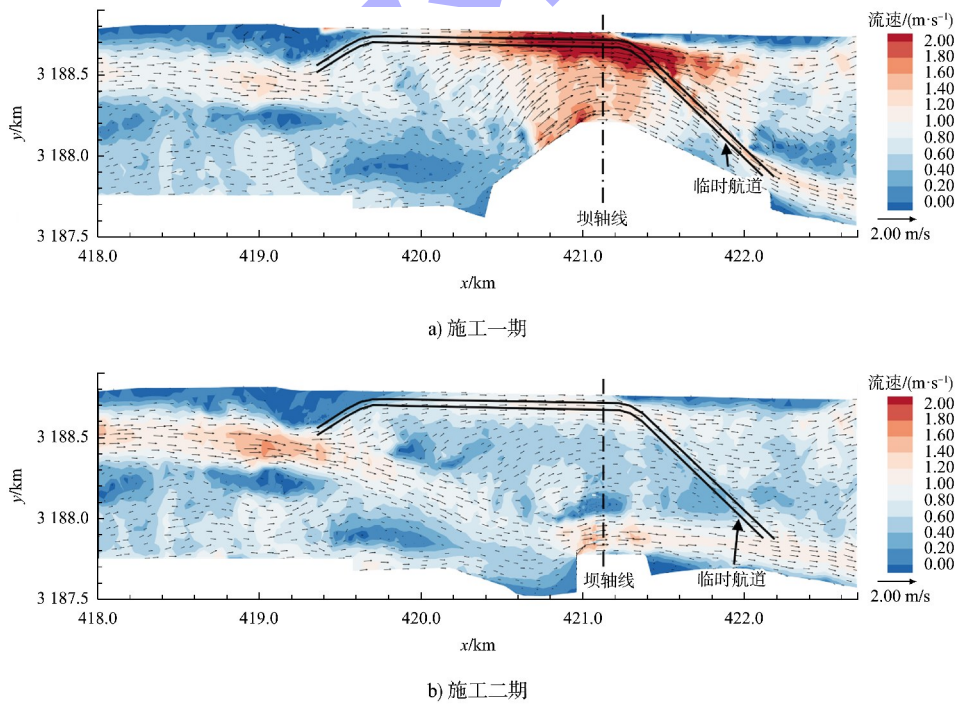


图 4 施工期 10 a 一遇工况流场

在施工期临时航道区域布置 34 个监测断面 NZ-1~NZ-34, 断面间距为 250 m, 每个断面均匀布置 5 个测点, 共 170 个流速测点, 提取测点流

速, 分析航道通航水流条件, 航道流速测点布置见图 5。提取各工况下监测点流速, 不同工况下流速最大值见表 3。施工一期时, 在平滩流量工况

下,流速最大值为 1.12 m/s,通航水流条件良好。在 10 a 一遇工况下,围堰束窄区域流速较大,相应临时航道断面最大流速为 2.54 m/s,超过了 2.00 m/s 的通航流速控制指标。10 a 一遇工况下施工一期临时航道不同监测断面、测点的流速分布见图 6,可知最大流速出现在临时航道 NZ-22、NZ-23 监测断面处。流速超过 2.00 m/s 区域出现在临时航道内坝轴线上游约 1 000 m 至下游约 1 000 m 的范围内,涉及到的断面范围为 NZ-16~NZ-26。参照相关工程经验,施工期临时航道的流速大小为 2.00~3.00 m/s 时,视船舶需要配备拖轮助航,建议加强通航安全管理。考虑到南支航

道在赣江整体航运中通航占比较小,且施工一期工程周期仅为半年,10 a 一遇洪水工况下流速超限对赣江通航影响相对较小。施工二期水流条件良好,10 a 一遇洪水工况下航道监测断面最大流速为 1.21 m/s,满足相关通航要求。

表 3 施工期临时航道内监测断面最大流速

时期	工况	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最大流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
施工一期	平摊流量	1 570	1.02
	10 a 一遇洪水	4 320	2.54
施工二期	平摊流量	1 570	0.38
	10 a 一遇洪水	4 320	1.21

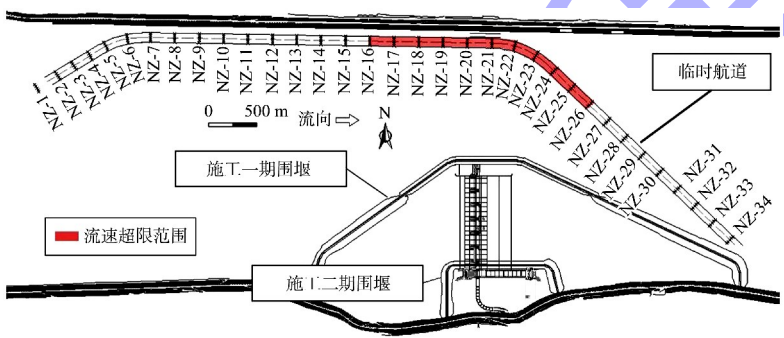


图 5 施工期临时航道监测断面布置

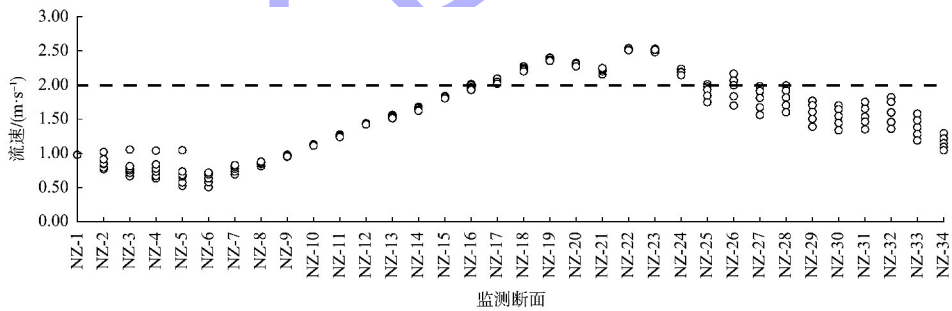


图 6 10 a 一遇工况下施工一期临时航道断面流速分布

3.2 运营期模拟结果及分析

运营期主要计算敞泄期 3 个流量工况和控泄期 2 个流量工况下的水动力过程,计算结果表明:河道及船闸航道流速随上游来流量增加而普遍增大,敞泄期最不利工况为 20 a 一遇洪水工况,即枢纽设计最高通航水位对应工况,控泄期最不利工况为最大调控流量情况下的工况。敞泄期 20 a 一遇洪水工况和控泄期最大调控流量工况下的流场分布见图 7,可见河道内流线整体较为平顺,流

速过渡较为平缓。在敞泄期 20 a 一遇洪水工况下,泄水闸全部打开,河道恢复天然情况下的连通状态,枢纽工程建筑物对河道过水断面形态和面积影响较小,河道流态与流场与天然情况相差较小,河道主流主要集中在深槽,流速普遍为 0.80~1.80 m/s。在控泄期最大调控流量工况下,水流主要通过泄水闸下泄来流,上下游水流主要集中在泄水闸所在河道深槽,流速为 0.20~1.00 m/s。虽然控泄期仅通过部分泄水闸下泄来流,但控泄期

流量普遍较小,且在调控前后均通过泄水闸所在河道深槽过流,因此总体来说泄水闸调控对流速

影响并不显著。各工况流线整体较为平顺,未发现局部回流等不良流态。

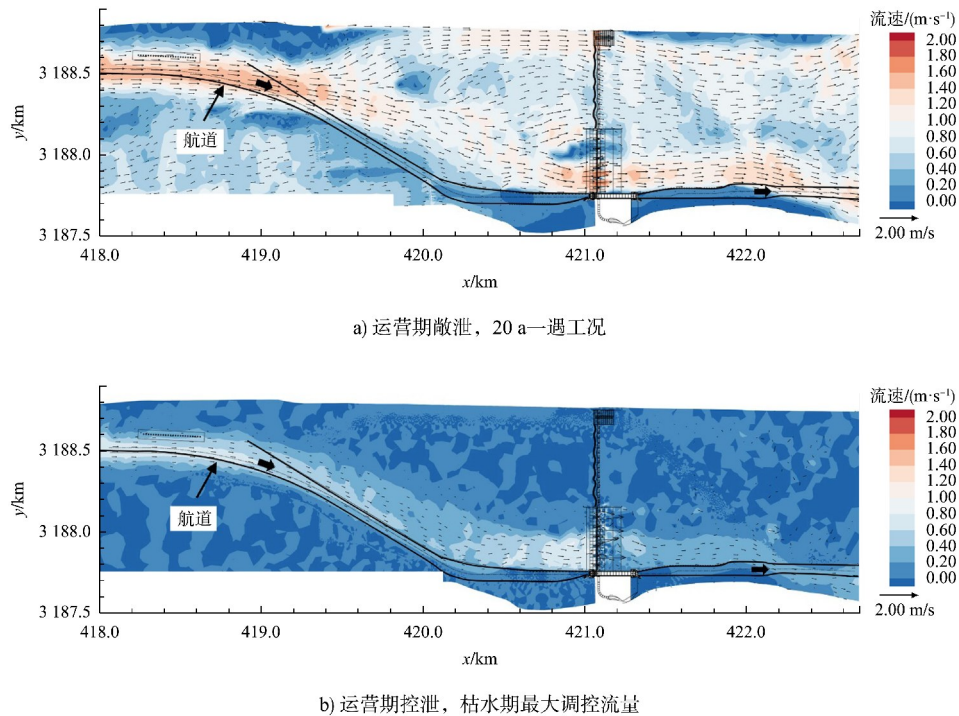


图7 运营期典型工况流场

为分析运营期船闸航道内通航水流条件,在船闸上下游连接段、口门区、制动与停泊段、导航与调顺段内分别布置 NZZ-1~NZZ-73、NZX-1~NZX-38 共 111 个监测断面,每个监测断面上布置若干个流速监测点,提取监测点流速特征值,运营期航道监测断面位置见图 1。统计提取的各工况下监测点的流速值,船闸口门区、制动与停泊段、导航与调顺段内测点流速最大特征值见表 4。可知在隔流堤作用下,船闸上下游航道流速普遍低于河道深槽主流流速,20 a 一遇工况下,各航道区段流速特征值最大,即为运营期通航最不利工况。

在 20 a 一遇工况下,导航与调顺段流速为 0.08 m/s,制动与停泊段各监测点的横向、纵向流速均小于相应限值。下游口门区纵向流速最大,为 1.62 m/s,满足通航要求。局部断面测点横向流速达到通航允许最大临界值 0.30 m/s,发生在下游口门区与连接段交界处,位于航道左侧隔流堤堤头局部区域,由于水闸下泄流速较大引起的卷吸作用,导致该区域水流横向流速较大,航行时应注意安全,设置一定安全距离。综上可知,运营期船闸航道水流条件满足通航要求。

表4 运营期上下游连接段和口门区监测断面的最大特征值

工况	口门区		制动与停泊段		导航与调顺段
	最大纵向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大横向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大纵向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大横向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大合流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
平摊流量	0.56	0.15	0.05	0.08	0.01
敞泄	10 a 一遇洪水	1.52	0.29	0.15	0.02
	20 a 一遇洪水	1.62	0.30	0.20	0.16
控泄	枯水期	0.76	0.17	0.01	0.01
	枯水期	0.78	0.15	0.01	0.02

4 结论

1) 施工一期工程河道束窄段内流速增大, 工程河段流线相对平顺。平滩流量工况下临时航道内流速最大值为 1.02 m/s, 满足通航要求。10 a 一遇工况下, 河道束窄段临时航道内断面流速最大值为 2.54 m/s, 流速超过 2.00 m/s 的航道长度约为 2 000 m, 船舶航行时建议采取一定安全措施。

2) 施工二期通过临时航道通航, 在 10 a 一遇工况和平滩流量工况下临时航道内无不良流态出现, 各断面监测点流速最大值为 1.21 m/s, 满足通航要求。

3) 运营期内各工况下船闸上下游航道口门区、制动段与停泊段各监测点的纵向流速、横向流速均未超过相关规范规定的限值, 上下游航道口门区未出现明显的回流, 航道连接段流速与主航道过渡平缓, 航道各航段符合相应通航要求。

参考文献:

[1] 罗蔚, 张翔, 邓志民, 等. 1956—2008 年鄱阳湖流域水沙输移趋势及成因分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 658-667.

[2] 欧阳千林, 刘卫林. 近 50 年鄱阳湖水位变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1545-1550.

[3] 史明涓, 史小平. 赣江下游枯水期水位持续降低影响与分析[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(4): 55-58, 96.

[4] 刘卫林, 王永文. 赣江中下游枯水期水量调度研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(9): 11-16.

[5] WANG Z C, XU X F, HUANG Z W, et al. Siltation characteristics of the tail reach of Ganjiang River under the regulation of estuary gates [J]. Water supply, 2020, 20(8): 3707-3714.

[6] 江西省人民政府. 江西省内河航道与港口布局规划 (2021-2050 年)[R]. 2022: 12.

[7] 罗春, 秦柯. 赣江东河设计最低通航水位研究[J]. 水运工程, 2007(8): 130-134.

[8] 张明进, 伍文俊. 浅谈数值模拟技术在长江中下游航道整治中的应用[J]. 水道港口, 2010, 31(2): 102-107.

[9] 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.

[10] 江斌, 张楠. 赣江新干枢纽—龙头山枢纽河段 II 级航道整治方案[J]. 水运工程, 2023(1): 127-131.

[11] 方锦涛, 赵建钧, 辜晋德, 等. 赣江南支吉里枢纽通航水流条件试验研究及其优化措施[J]. 水运工程, 2022(6): 139-144.

[12] 交通运输部天津水运工程科学研究院. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 109 页)

参考文献:

[1] 张星星, 许光祥, 陈明栋, 等. 船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统水力学研究综述[J]. 水运工程, 2018(12): 110-118.

[2] 刘本芹, 杨锦, 黄岳, 等. 山区省水船闸输水系统水力学研究[J]. 水运工程, 2023(6): 114-119.

[3] HITE J E, STOCKSTILL R L. Hydraulic design of a longitudinal culvert for lock filling and emptying systems[J]. Journal of hydraulic engineering, 2004, 130(5): 381-388.

[4] HITE J E. In-chamber longitudinal culvert design for lock filling and emptying system [R]. Vicksburg: U. S. Army Engineer Waterways Engineer Station, 2003.

[5] 孙倩, 陈亮, 王召兵, 等. 船闸单侧闸墙廊道输水系统布置及试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 182-186, 191.

[6] 张志崇. 高水头船闸单侧闸墙主廊道输水系统岔管水力学研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院. 2010.

[7] 陈青生, 马追, 董壮, 等. 抽水蓄能电站同发同抽等流量运行岔管水力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 413-418.

[8] 李玲, 陆豪, 陈嘉范. 抽水蓄能电站尾水岔管水流运动及阻力特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(3): 101-104, 109.

[9] 代元, 方建银, 吴阳, 等. 抽水蓄能电站岔管导流板体型研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(4): 43-49.

[10] 胡亚安, 严秀俊, 张志崇. 草街二线船闸单侧闸墙主廊道输水系统阀门水动力学研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院水工水力学研究所. 2009.

(本文编辑 赵娟)