



# 引江济淮五老堰跌水工程汇流口通航水流条件及改善措施\*

张 辉<sup>1</sup>, 李 涛<sup>2</sup>, 李 铭<sup>2</sup>, 贲 鹏<sup>1</sup>

(1. 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院, 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000;  
2. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230041)

**摘要:** 基于 VOF 法的 RNG  $k-\epsilon$  双方程紊流数学模型, 对引江济淮工程五老堰跌水工程水力特性及下游通航水流流态进行三维数值模拟, 研究汇流口通航区域横向流速及流态特征, 分析原设计方案汇流口通航水流条件不满足规范要求的原因, 并通过跌水工程后退、减小汇流角度和优化翼墙与干渠连接弧度等措施对原设计方案进行调整优化。结果表明, 优化后的工程方案汇流口区域横向流速与回流流速均满足设计要求, 5 和 20 a 一遇通航工况最大回流流速分别为 0.10 和 0.16 m/s, 最大横向流速分别为 0.13 和 0.27 m/s, 可作为推荐方案。

**关键词:** 跌水工程; 通航水流; 数值模拟

中图分类号: TV 147; U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0140-07

## Navigable flow conditions and improvement measures at confluence of Wulaoyan water drop project from the Yangtze River to the Huaihe River

ZHANG Hui<sup>1</sup>, LI Tao<sup>2</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, BEN Peng<sup>1</sup>

(1. Key laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province,

Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Bengbu 233000, China;

2. Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230041, China)

**Abstract:** Based on RNG  $k-\epsilon$  two equations turbulence mathematical model of VOF method, the hydraulic characteristics and downstream navigable flow pattern of the Wulaoyan water drop project of the Yangtze River to the Huaihe River diversion project are numerically simulated 3D, the transverse velocity and flow pattern characteristics of the navigable area at the confluence are studied, and the reasons why the navigable flow conditions at the confluence in the original design scheme do not meet the specification requirements are analyzed. The original design scheme is adjusted and optimized by measures such as retreating through water drop project, reducing the confluence angle and optimizing the connection radian between wing wall and main canal. The results show that the transverse flow velocity and return flow velocity in the confluence area of the optimized engineering scheme meet the design requirements. The maximum reflux velocities under the 5-year and 20-year navigation conditions are 0.10 m/s and 0.16 m/s respectively, and the maximum transverse velocities are 0.13 m/s and 0.27 m/s respectively, which can be used as the recommended scheme.

**Keywords:** water drop project; navigable flow; numerical simulation

引江济淮工程是一项以城乡供水和发展江淮航运为主, 结合灌溉补水和改善巢湖及淮河水生

态环境为主要任务的大型跨流域调水工程。引江济淮工程由引江济巢、江淮沟通、江水北送 3 段

收稿日期: 2021-12-02

\*基金项目: 安徽省引江济淮集团有限公司科技项目(YJJH-JHGT-ZX-20190823178)

作者简介: 张辉(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事水力学及河流动力学研究。

组成, 输水线路总长 1 048.68 km。原有的输水渠道挖宽挖深后, 使得现有的河流水系被破坏, 需要在连接处建设跌水、跌井工程, 使原有的河流水系水流平顺汇入干渠中且不影响干渠正常通航。跌水、跌井工程的布置直接影响汇流口通航水流条件, 关系到工程自身安全、下游河道稳定及汇流口通航安全。根据《运河通航标准》<sup>[1]</sup>, 运河中泄水口水域航道横向流速不应超过 0.3 m/s, 回流流速不应超过 0.4 m/s。水利部、交通部以“水许可决[2017]19号文”对引江济淮工程(安徽段)初步设计报告进行批复, 批复意见中提出支流洪水入渠的通航水流控制条件为: 20 a 一遇通航工况, 横向流速  $v \leq 0.3$  m/s; 5 a 一遇通航工况, 横向流速  $v \leq 0.15$  m/s。为保证引江济淮工程江淮沟通段全部跌水、跌水消能及通航安全, 须对跌水、跌井工程消能防冲效果及通航水流条件进行综合评价。

目前, 针对上述问题的研究方法主要是水工模型试验, 王伟等<sup>[2]</sup>采用定床河工模型试验分析派河口船闸下游引航道与口门区通航水流条件, 并分析不满足规范要求的原因, 给出优化方案; 杨子江等<sup>[3]</sup>采用定床河工模型优化杨大庄跌水工程布置方案, 使得汇流口通航区域横向流速满足规范要求。近年来, 数值模拟方法得到了快速发

展, 弥补了物理模型试验的诸多不足。朱京德等<sup>[4]</sup>、原贺军<sup>[5]</sup>采用二维水动力数学模型模拟航道流场, 分析通航区域内横向、纵向流速和角度。对跌水、跌井工程的水力特性和通航水流条件整体三维数值模拟的相关研究鲜有报道<sup>[6]</sup>, 本文基于 VOF(流体体积)法<sup>[7]</sup>的 RNG  $k-\varepsilon$ (重整化群 紊动能-耗散率)<sup>[8]</sup>双方程紊流数学模型, 采用杨大庄跌水工程水工模型试验对数学模型进行率定与验证, 利用率定后的数学模型对五老堰跌水通航水流条件进行三维数值模拟, 分析原设计方案汇流口通航水流条件不满足规范要求的原因, 并提出满足江淮沟通段临河建筑物支流洪水入渠控制条件的优化方案, 可为类似水利工程的设计及安全运行提供技术支撑。

## 1 模型验证

### 1.1 模型建立

水工模型为 1:50 的正态模型, 为保证杨大庄跌水工程上下游水流与原型相似, 整体模型江淮沟通段干渠取跌水与河渠相交中心线上游 850 m、下游 950 m 总长 1 800 m 河段; 支流取跌水上游王桥小河 400 m 河道作为模型模拟范围。模型范围内包含杨大庄跌水工程各部分主要建筑物, 见图 1。



注: 1#~13#为水位测点; D0 为流速断面。

图 1 水工模型平面布置

### 1.1.1 控制方程

连续性方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

不可压缩紊流时均流动的运动方程(即雷诺方程)为：

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right] \quad (2)$$

$k$  方程和  $\varepsilon$  方程为：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\rho_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\rho_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中： $u_i$  为  $x_i$  方向的速度分量； $t$  为时间； $i, j = 1, 2, 3$ ； $f_i$  为作用于单位质量水头上的体积力； $\rho$  为流体密度； $p$  为压强； $\delta_{ij}$  为 Kronecker 符号，当  $i=j$  时  $\delta_{ij}=1$ ，当  $i \neq j$  时  $\delta_{ij}=0$ ； $\nu$  为流体的运动黏滞系数； $\nu_t$  为由单位质量的紊动能  $k$  和紊动能耗散率  $\varepsilon$

确定的紊流运动黏性系数，其值为  $C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}$ ，其中  $C_\mu$

为经验常数，取 0.0845； $G_k$  为平均速度梯度产生的紊动能的产生项，可由  $G_k = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$  确定；

$C_{1\varepsilon}^*$ 、 $C_{2\varepsilon}$  均为经验系数，分别取 1.44、1.92。

VOF 公式根据两种或多种流体(或相)没有互相穿插的基本事实，对每相流体的体积分数在计算单元内定义，总和为 1。用标量函数  $\alpha_q$  表示第  $q$  相在网格中占的体积分数，分为以下 3 种情况： $\alpha_q=0$  表示单元中没有第  $q$  相流体； $\alpha_q=1$  表示第  $q$  相流体占满了整个单元； $0 < \alpha_q < 1$  表示单元中包含了第  $q$  相流体与其他相流体的界面。

水的体积分数  $\alpha_w$  的控制微分方程为：

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

式中： $t$  为时间； $u_i$  和  $x_i$  分别为速度分量和坐标分量。通过求解该连续方程来完成对水气界面的跟踪。

### 1.1.2 模型边界

三维数值模型边界主要包括：1) 压力进口边界。即上游库区采用相应设计水位，空气进口边界采用大气压力边界。2) 压力出口边界。下游河道为明渠水流，下游边界给出相应设计水位。3) 壁面边界为不可滑移边界条件。4) 自由水面。多相流模型中的 VOF 模型，对溢洪道和下游河道区域波动较大的水气交界面进行追踪。

### 1.1.3 网格划分

采用结构化正交网格对跌水工程段局部网格进行加密，网格边长为 0.2 m；汇流口处采用嵌入式网格进行加密，最小网格尺寸为 0.4 m×0.2 m×0.4 m(长×宽×高)，其余采用 0.4 m×0.4 m×0.4 m，网格合计 820 万个，网格划分见图 2。计算初始时间步长为 1 ms，采用进出口流量不超过 1% 作为模型计算稳定的判别条件。

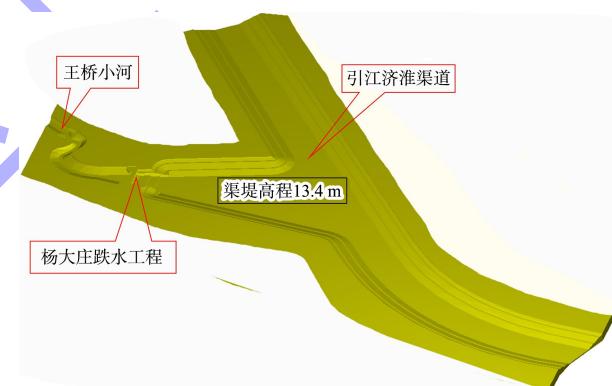


图 2 数学模型平面布置

### 1.2 计算模型的验证

为验证数值计算的准确性，将 20 a 一遇设计泄流通航工况下(支流王桥小河来流流量 576 m<sup>3</sup>/s，控制跌水下游水位为 23.86 m，干渠来流流量为 731 m<sup>3</sup>/s)，跌水工程沿程水位、压力、局部断面流速及跌水段流态进行对比验证，结果见图 3、4 和表 1。由实测值和计算值对比结果可知，跌水工程沿程水位、压力、局部断面流速等吻合程度良好，实测值采用三维流速仪测量，物理模型干渠河道水深较浅，测量过程中水面波动对流速值测量结果影响较大，呈现上下波动，计算值相对较为平缓，相对误差均在 10% 以内，计算精度能满足要求，该模型是可行的。

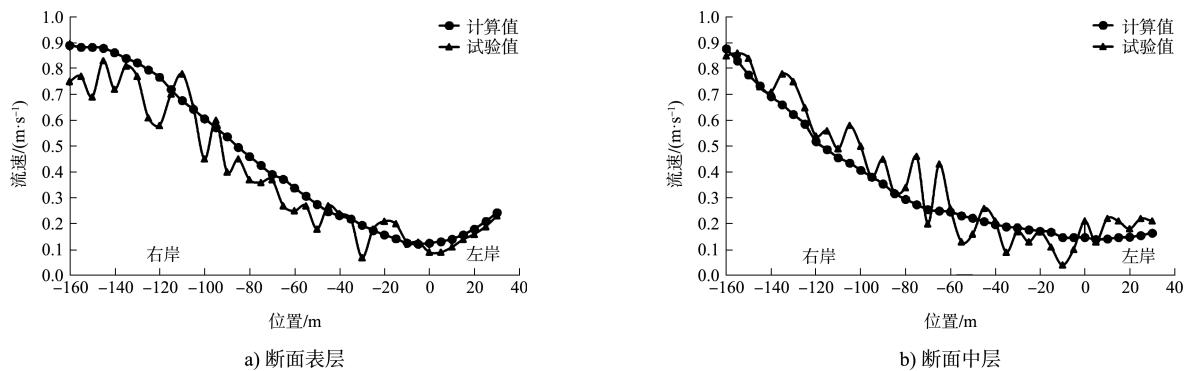


图3 JH0+000断面流速试验值与计算值对比

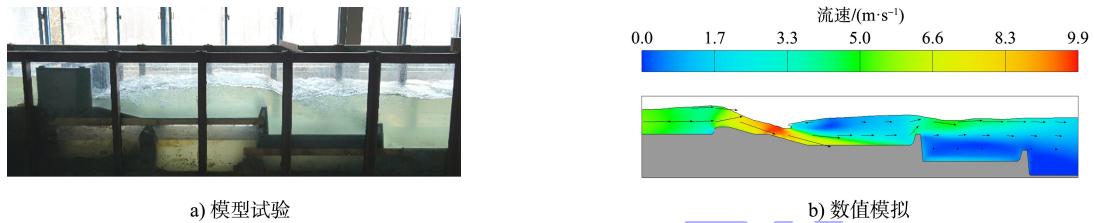


图4 跌水段水流流态试验与计算对比

表1 计算值与实测值对比结果

水位控制点	计算值/m	实测值/m	误差/m	压力测点	计算值/mH <sub>2</sub> O	试验值/mH <sub>2</sub> O	误差/%
2#(D0-100)	25.62	25.84	0.22	A	0.45	0.49	8.16
3#(D0+100)	24.00	23.90	0.10	B	4.45	4.32	3.01
5#(D0+300)	23.92	23.88	0.04	C	5.23	5.36	2.43
10#(JH0+000)	23.87	23.86	0.01	D	7.08	7.01	1.01
11#(JH0+200)	23.81	23.84	0.03				

## 2 计算工况

### 2.1 原布置方案

五老堰河跌水为3孔开敞式2级跌水, 跌水下游与干渠堤后至一级坡间左右不对称圆弧锥坡扩散衔接, 位于左岸, 跌水中心线与干渠中心线交角为145°; 斑鸠堰河跌水为3孔开敞式2级跌水; 跌水下游与干渠堤后至一级坡间左右不对称圆弧锥坡扩散衔接, 位于右岸, 跌水中心线与干渠中心线交角为36°, 两跌水相距600 m, 跌水工程总平面布置见图5a)。模型范围取五老堰河跌水上游500 m, 斑鸠堰河跌水下游500 m(总长约1 600 m), 支流取涵上游长约200 m河段作为本次数值计算模拟范围, 包含工程全部主要建筑物, 计算模型按照比尺1:1建立, 整体三维模型见图5b)。

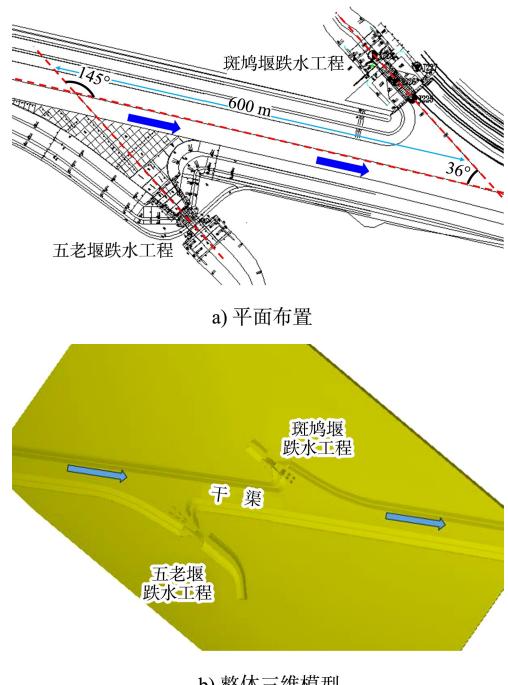


图5 跌水工程

## 2.2 计算工况及通航水流控制条件

根据规划设计要求, 数值模拟工况见表 2。

表 2 数值模拟计算工况

工况	斑鸠堰流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	五老堰流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	干渠流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	干渠控制 水位/m
5 a 一遇通航	45.6	58	47.10	6.10
20 a 一遇通航	148.0	187	448.99	12.25

## 3 计算结果分析

### 3.1 原布置方案

#### 3.1.1 汇流口流场计算

5 a 一遇通航工况五老堰跌水工程和斑鸠堰跌水工程水面下 0.25 和 2.25 m 水深的横向流速分布见图 6。可以看出, 水面下 0.25 和 2.25 m 流态及流速基本一致。斑鸠堰跌水工程中心线和干渠来流中心线交角成  $36^\circ$ , 且支流来流较小, 汇流口通航区域流态较好, 无明显回流, 横向流速最大值为  $0.1 \text{ m/s}$ , 满足通航安全要求。五老堰跌水工程中心线和干渠来流中心线交角成  $145^\circ$ , 与干流来流方向相反, 跌水控制工程与干渠距离较近, 支流来流较大, 支流出流在汇流口处来不及转弯, 以近垂直的角度汇入干渠, 水流流态较差, 回流范围明显, 最大回流流速  $0.31 \text{ m/s}$ , 横向流速超  $0.15 \text{ m/s}$  范围较大, 横向流速最大值为  $0.38 \text{ m/s}$ 。两跌水工程之间干渠河道, 未出现明显大范围不良流态, 横向流速满足通航要求。

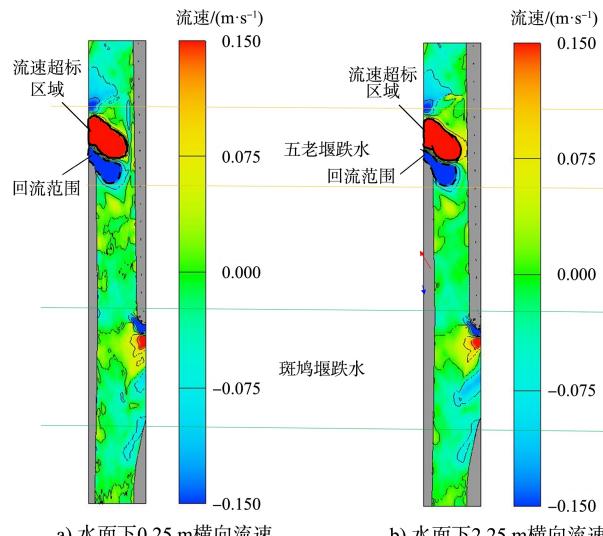


图 6 5 a 一遇通航工况流态及流速

跌水工程水面下 0.25 和下 2.25 m 水深的横向流速分布见图 7。可以看出, 水面下 0.25 和 2.25 m 流态及流速基本一致。斑鸠堰跌水工程汇流口通航区域流态较好, 无明显回流, 横向流速最大值为  $0.20 \text{ m/s}$ , 满足通航安全要求。五老堰跌水工程, 支流出流在汇流口处来不及转弯, 以近垂直的角度汇入干渠, 水流流态较差, 横向流速超规范值  $0.30 \text{ m/s}$ , 横向流速最大值为  $0.70 \text{ m/s}$ 。两跌水工程之间干渠河道未出现明显大范围不良流态, 横向流速满足通航要求。

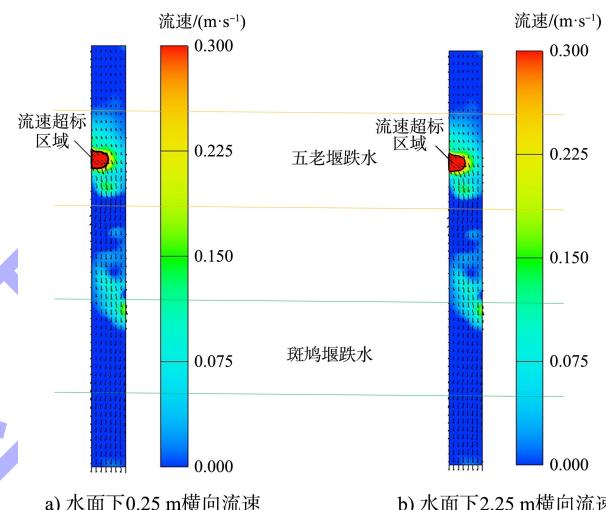


图 7 20 a 一遇通航工况流态及流速

#### 3.1.2 导流墙效果分析

原布置方案中在汇流口区域布设了 4 个导流墙, 给工程施工和后期跌水运行管理带来诸多问题, 利用数值模拟计算汇流口有无导流墙时的水流流态。计算结果表明, 导流墙区域流态和流速分布基本一致, 导流墙使水流略显集中, 改善效果不明显, 建议去除, 有无导流墙汇流口流速见图 8。

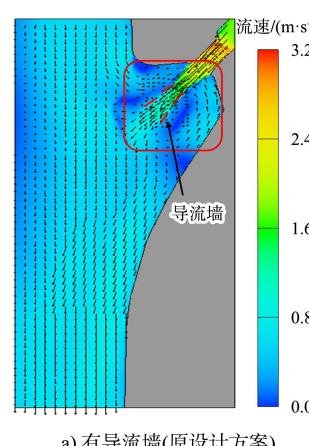


图 8 有无导流墙汇流口流速

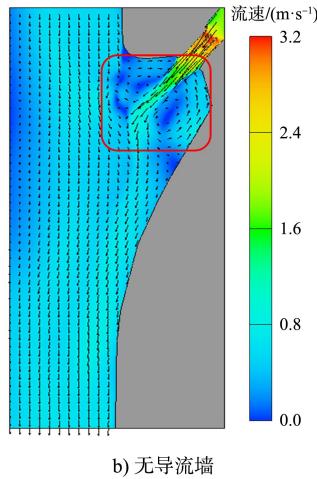


图 8 斑鸠堰跌水工程汇流口通航区域有无导流墙流态及流速

### 3.2 优化方案

#### 3.2.1 优化方案 1

五老堰跌水工程下游通航不能满足要求, 根据原布置方案流速分布情况以及水流特性, 分析通航区域横向流速超标的原因。跌水控制工程与干渠距离较近, 且与干流来流方向相反, 水流来不及转弯, 以近垂直的角度汇入干渠, 水流流态较差; 支流流量大, 出跌水位置后, 水面流速仍然较大, 尤其是 20 a 一遇通航工况出现了面流。针对上述原因和对导流墙效果分析, 对原设计方案局部布置进行第 1 次优化调整, 主要内容包括: 1) 跌水的平面位置向后退约 60 m; 2) 原布置方案的跌水工程中心线与干渠中心线夹角约  $145^\circ$ , 调整方案约  $127^\circ$ ; 3) 跌水工程上、下游翼墙与干渠连接弧度调整; 4) 导流墙调整, 见图 9。

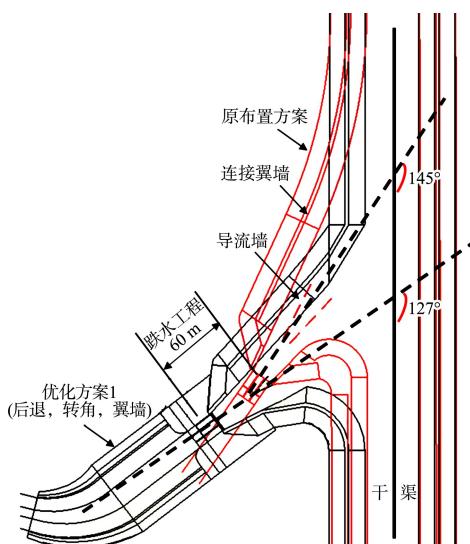
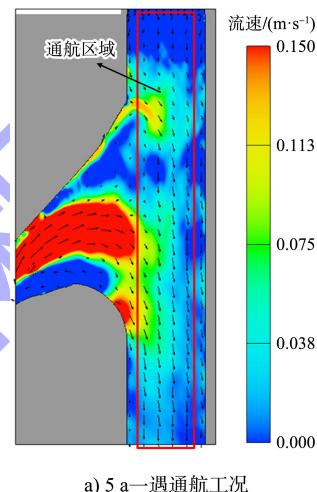
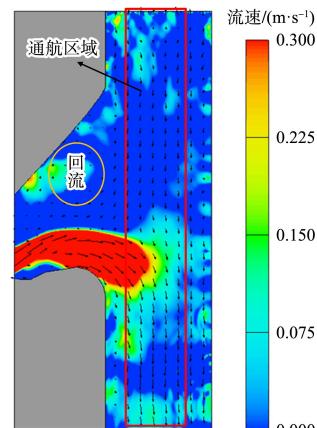


图 9 优化方案 1

根据数值模拟计算结果, 优化方案 1 的流态和流速均优于原布置方案。5 a 一遇通航工况, 支流来水偏右汇入干渠, 汇流口回流不明显, 汇流口通航区域最大横向流速约  $0.13 \text{ m/s}$ , 满足通航安全要求; 20 a 一遇通航工况汇流口左岸有明显回流, 回流区域面积约  $120 \text{ m}^2$ , 最大回流流速  $0.21 \text{ m/s}$ , 通航区域最大横向流速  $0.43 \text{ m/s}$ , 不满足通航要求。优化方案 1 的两工况横向流速分布见图 10。



a) 5 a—遇通航工况



b) 20 a—遇通航工况

图 10 优化方案 1 汇流口通航区域横向流速分布

#### 3.2.2 优化方案 2

针对通航 20 a 一遇工况, 横向流速不满足要求, 对体形做进一步优化。在优化方案 1 的基础上右侧边墙向后、下游调整, 连接圆弧更加平顺, 见图 11。优化方案 2 的 20 a 一遇通航工况, 通航区域最大横向流速  $0.27 \text{ m/s}$ , 满足  $0.3 \text{ m/s}$  的通航要求, 横向流速见图 12。

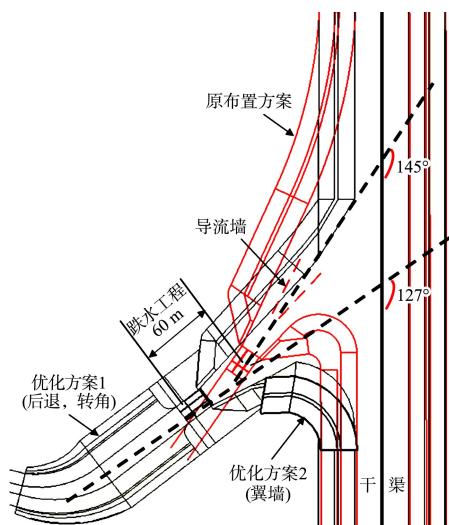


图 11 优化方案 2

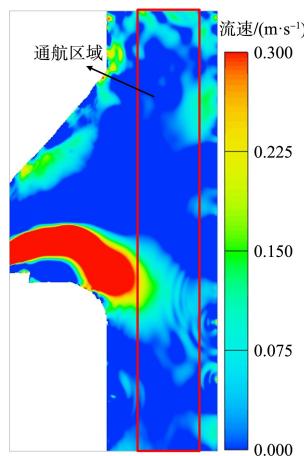


图 12 优化方案 2 的流速分布

#### 4 结论

1) 基于 RNG  $k-\varepsilon$  双方程紊流数学模型, 采用引江济淮工程江淮沟通段杨大庄跌水工程水工模型试验对数学模型进行率定与验证, 计算值与试验值基本吻合, 表明采用率定与验证后的数学模型计算跌水工程消能效果及汇流口通航水流条件在技术上基本可行。

2) 原布置方案的五老堰和斑鸠堰跌水工程之间, 无明显不良流态, 横向流速满足要求, 无显著相互影响。斑鸠堰跌水工程原布置方案 5 和 20 a

一遇通航工况, 通航均能满足要求。五老堰跌水工程 5 a 一遇通航工况的最大横向流速 0.38 m/s, 20 a 一遇通航工况的最大横向流速 0.70 m/s, 两通航工况均不满足通航安全要求。

3) 根据五老堰跌水工程原布置方案流速分布情况以及水流特性, 分析通航区域横向流速超标的原因, 对原设计方案进行调整优化。优化后的工程方案, 汇流口区域横向流速与回流流速均满足设计要求, 5 和 20 a 一遇不利通航工况的最大横向流速分别为 0.13 和 0.27 m/s, 满足通航安全要求。

#### 参考文献:

- [1] 交通运输部天津水运工程科学研究所.运河通航标准: JTS180-2—2011[S].北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 王伟, 王建中, 杨志, 等.引江济淮工程派河口船闸通航水流条件及改善措施[J].水运工程, 2021(3): 138-144.
- [3] 杨子江, 冯帅, 李天华.引江济淮工程杨大庄跌水入渠横向流速控制优化研究[J].治淮, 2021(3): 15-18.
- [4] 朱京德, 孙传文, 李成功, 等.二维水动力模型在通航条件影响分析的应用[J].中国水运(下半月), 2021, 21(8): 86-87, 101.
- [5] 原贺军.二维水动力分析在桥梁工程航道通航条件影响评价中的应用[J].工程与建设, 2021, 35(4): 660-661.
- [6] 张辉, 虞邦义, 贲鹏, 等.引江济淮跌水工程汇流口通航条件三维数值模拟[J].水运工程, 2021(8): 111-116.
- [7] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [8] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. basic theory [J]. Journal of scientific computing, 1986, 1(1): 3-51.