



# 引江济淮跌水工程汇流口通航条件 三维数值模拟<sup>\*</sup>

张辉，虞邦义，贲鹏，王久晟

(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)

**摘要:** 基于VOF法的RNG  $k-\varepsilon$  双方程紊流数学模型, 对引江济淮工程韩桥跌水工程水流压强特性及下游通航水流流态进行三维数值模拟, 对消能效果进行分析评价, 并根据原布置方案的流速分布情况以及水流特性, 对方案进行调整优化。结果表明: 韩桥跌水工程原布置方案, 在支流 20 a 一遇和 5 a 一遇流量通航工况条件下, 汇流口横向流速值均不符合规划值要求, 最大横向流速 0.46 和 0.35 m/s; 优化后的工程方案消能效果良好, 汇流口区域横向流速与回流流速均满足设计要求, 5 a 一遇不利通航工况和 20 a 一遇设计通航工况最大横向流速分别为 0.13 和 0.25 m/s, 可作为推荐方案。

**关键词:** 跌水工程; 水力特性; 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(2021)08-0111-06

## Three dimensional numerical simulation of navigation condition at confluence of water diversion and fall project from the Yangtze River to the Huaihe River

ZHANG Hui, YU Bang-yi, BEN Peng, WANG Jiu-sheng

(Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Bengbu 233000, China)

**Abstract:** Based on RNG  $k-\varepsilon$  two equations turbulence mathematical model of VOF method, we carry out the three-dimensional numerical simulation of flow pressure characteristic and downstream navigable flow pattern of Hanqiao water fall project of the Yangtze River to the Huaihe River diversion project, analyze and evaluate the energy dissipation effect, and optimize the scheme according to the velocity distribution and flow characteristics of the original layout scheme. The results show that in the original layout of the Hanqiao water fall project, under the navigation conditions of 20-year return flow and 5-year return flow of the tributary, the transverse velocities at the confluence do not meet the requirements of the planning value, and the maximum transverse velocities are 0.46 m/s and 0.35 m/s. The energy dissipation effect of the optimized scheme is good. The transverse velocity and reflux velocity in the confluence area meet the design requirements. The maximum transverse velocities under adverse navigation conditions with a 5-year return period and a 20-year return period are 0.13 m/s and 0.25 m/s respectively. The optimized scheme can be used as the recommended scheme.

**Keywords:** water fall project; hydraulic characteristic; navigable flow; numerical simulation

引江济淮工程由引江济巢、江淮沟通、江水北送3段组成, 输水线路总长1 048.68 km。江淮沟通段引水线路自派河口—江淮分水岭—东淝河

入淮口, 分水岭以南渠线基本沿派河, 江淮分水岭以北基本沿东淝河的上中游河道布置, 并选择在江淮分水岭的鞍部通过江淮分水岭。引江济淮

收稿日期: 2020-11-26

\*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, 助理工程师, 从事水力学及河流动力学研究。

工程江淮沟通段输水渠道挖宽挖深后，现有水系被打断，须建设跌水、跌井工程，使现有水系平顺汇入本工程输水渠道且不影响通航。跌水、跌井工程的布置是否合理直接影响跌水、跌井消能防冲效果及干渠通航水流条件，关系到工程自身安全、下游河道稳定及干渠通航安全。根据运河航道的平面布置条件，支流洪水入渠的通航水流控制条件为：航道最高通航水位遭遇支流 20 a 一遇洪水(下称 20 a 一遇设计通航工况)，横向流速  $v \leq 0.3 \text{ m/s}$ ；航道最低控制水位遭遇支流 5 a 一遇洪水(下称 5 a 一遇不利通航工况)，横向流速  $v \leq 0.15 \text{ m/s}$ 。为保证引江济淮工程江淮沟通段全部跌水、跌井消能及通航安全，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。近年来，由于计算机性能的极大提高，物理模型试验中存在的工作量大、试验周期较长影响工程进度、试验成本较高、在建模的过程中比尺选择仍有未能解决的问题，同时在试验中不可避免地会引入误差，更为关键的是当需要对流场内部流态进行分析时，物理模型试验方法就显得鞭长莫及，难以满足工程需求的缺点，使得对计算机性能依赖性较大的数值模拟方法也得到了快速发展，弥补了物理模型试验的诸多不足。郭馨等<sup>[1-3]</sup>基于 VOF 模型，对台阶溢洪道台阶面水流流态、流场分布和压力特性进行数值模拟，并与水工模型试验结果对比，模型精度较高。刁明军等<sup>[4-5]</sup>采用 VOF 多相模型模拟水舌空中形态、挑距、水舌速度分布及水垫塘内的流态，并用模型试验结果验证，效果较好。张欣玮等、郭超等<sup>[6-8]</sup>采用 LES 大涡模型模拟淹没射流，获得了水垫塘内紊流场时空随机性的流场结构。焦爱萍等<sup>[9-11]</sup>对单股窄薄片状射流与多层水股射流入射水垫塘进行数值模拟，分析水垫塘内射流的水流结构与消能机理，并概括出不同水股间距与水垫塘速度场的关系。

综上所述，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，本文基于 VOF 法<sup>[12]</sup>的 RNG  $k-\varepsilon$ (湍流动能-湍流动能耗散率)<sup>[13]</sup>双方程紊流数学模型，采用引

江济淮工程江淮沟通段王家沟跌井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韩桥跌水消能防冲效果及通航水流条件进行综合评价，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，为类似的水利工程的设计及安全运行提供技术支撑。

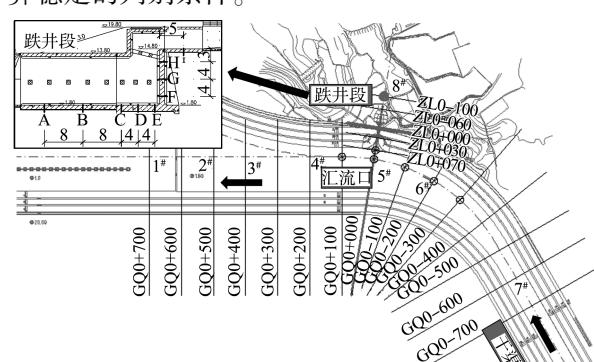
## 1 模型验证

### 1.1 模型的建立

水工模型为 1:50 的正态模型，为保证王家沟跌井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井与河渠相交中心线上游 900 m、下游 1 000 m 总长 1 900 m 河段；支流取跌井上游庙坎支沟 300 m 河道作为模型模拟范围。模型范围内包含王家沟跌井工程各部分主要建筑物，见图 1a)。

三维数值模型，主要包括以下元素：1) 采用有限体积法和压力修正法对 N-S 方程式时间与空间的离散求解；2) 利用 FAVOR 技术表征台阶溢洪道和挑坎的几何形状；3) 采用 VOF 方法追踪自由液面的位置；4) 采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型近似模拟流场的紊流情况；5) 压力-速度耦合采用 GMRES 法。

采用结构化正交网格对跌井工程段进行局部网格加密，网格尺寸为  $0.2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ (长  $\times$  宽  $\times$  高)；汇流口处采用嵌入式网格进行加密，最小网格尺寸为  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ ；其余采用  $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 。网格合计 920 万个，具体网格划分见图 1b)。计算初始时间步长为 1 ms，上游支流和下游干渠设置为相应水深，以加快模型计算速度。采用进出口流量不超过 1% 作为模型计算稳定的判别条件。



注：1#~8#为水位测点；ZL0为流速断面；A~I为压力测点。

a) 水工模型(单位: m)

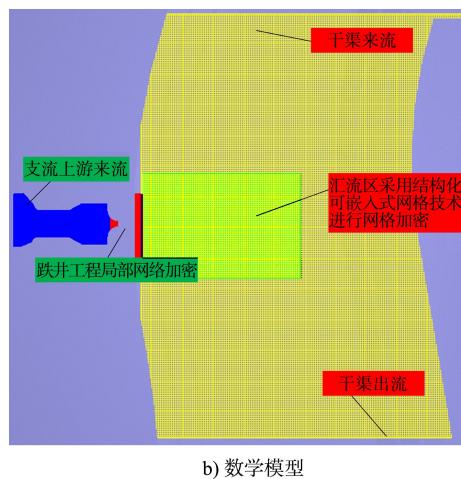


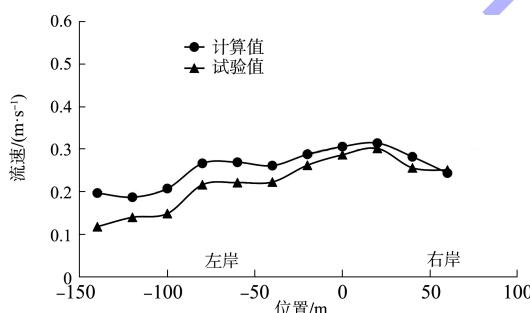
图1 模型平面布置

## 1.2 计算模型的验证

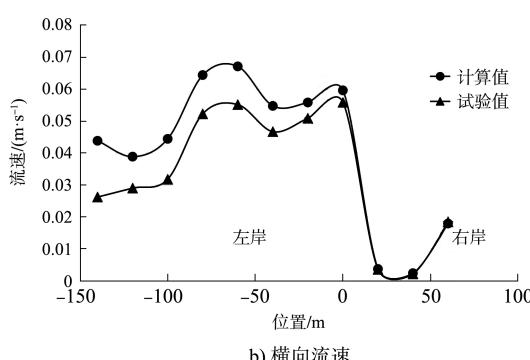
为验证数值计算的准确性, 将 20 a 一遇设计泄流通航工况下(支流来流流量  $24 \text{ m}^3/\text{s}$ , 跌水下游水位规划值为  $12.57 \text{ m}$ , 干渠来流流量为  $377 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 跌井工程沿程水位、压力、局部断面流速及跌井段流态进行对比验证, 结果见表 1 和图 2、3。由实测值和计算值对比结果可知, 跌井工程沿程水位、压力、局部断面流速等吻合程度良好, 相对误差均在 10% 以内, 计算精度能满足要求, 该模型是可行的。

表1 计算值与实测值对比结果

| 水位控制点       | 水位计算值/m | 水位实测值/m | 误差/% | 压力测点 | 压力计算值/kPa | 压力试验值/kPa | 误差/% |
|-------------|---------|---------|------|------|-----------|-----------|------|
| 3#(GQ0+400) | 12.708  | 12.696  | 1.2  | A    | 98.0      | 89.0      | 9.2  |
| 4#(GQ0+200) | 12.713  | 12.699  | 1.4  | B    | 108.1     | 110.0     | 1.8  |
| 5#(GQ0+000) | 12.726  | 12.700  | 2.6  | C    | 108.6     | 110.0     | 1.3  |
| 6#(GQ0-200) | 12.743  | 12.706  | 3.7  | D    | 113.0     | 110.5     | 2.2  |
| 8#(ZL0-100) | 18.201  | 18.105  | 9.6  | E    | 109.1     | 110.0     | 0.8  |
|             |         |         |      | I    | 10.1      | 10.9      | 7.9  |



a) 表层流速

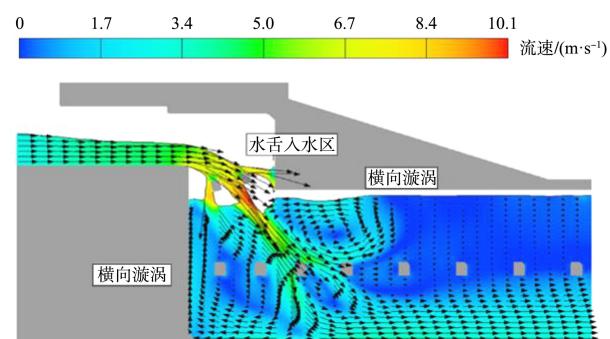


b) 横向流速

图2 断面 GQ0+000 流速试验值与计算值对比



a) 模型试验



b) 数值模拟

图3 跌井段水流流态试验与计算对比

## 2 计算结果分析

### 2.1 原布置方案

韩桥跌水为3孔开敞式2级跌水；跌水下游与干渠堤后至一级坡间不对称直线与圆弧组合锥坡扩散衔接，位于右岸，韩桥跌水工程总平面布

置见图4a)。模型范围取跌水与河渠相交中心线上游500 m、下游500 m(总长1 000 m)，支流取跌水上游长约200 m河段作为本次数值计算模拟范围，包含韩桥跌水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4b)。

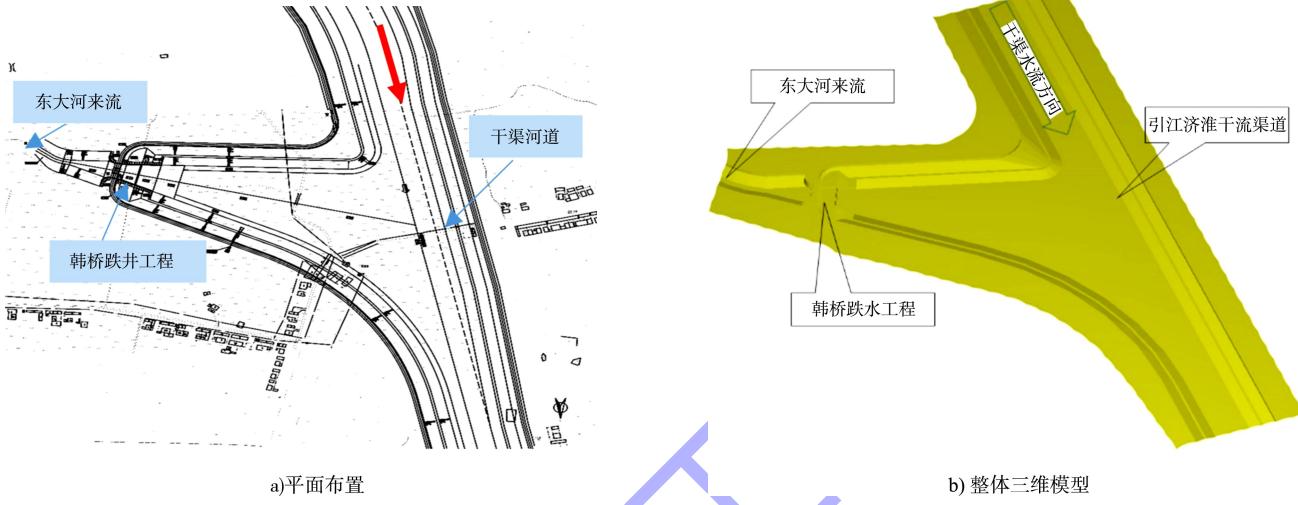


图4 韩桥跌水工程

### 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 | 类别   | 工况           | 干渠水位/m | 支流流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 干渠流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|----|------|--------------|--------|---|---|
| 1  | 消能防冲 | 5 a一遇消能防冲工况  | 23.86  | 511                                     | 0                                       |
| 2  |      | 20 a一遇消能防冲工况 | 17.90  | 179                                     | 0                                       |
| 3  | 泄流通航 | 5 a一遇不利通航工况  | 23.86  | 511                                     | 1 270                                   |
| 4  |      | 20 a一遇设计通航工况 | 17.90  | 179                                     | 61.1                                    |

## 3 计算结果分析

### 3.1 原布置方案

#### 3.1.1 消能防冲计算

5 a一遇消能防冲工况，一、二级跌水均产生水跃，二级跌水跌落水流为贴壁流，见图5。闸室与消力池连接的斜坡段速度最大，约为8.7 m/s。下泄水流在消力池内由于淹没水流的卷吸作用，与消力池内水流发生混掺，使下泄水流流速迅速减小。经过消力池调整后，下泄水流主流流速降至2.0~4.5 m/s，水流流态基本均匀。经过二级跌水及跌水下游纵向长约37 m护底进一步扩算消能后，护底末端断面最大临底流速为0.32 m/s，不会发生明显冲刷，满足消能要求。

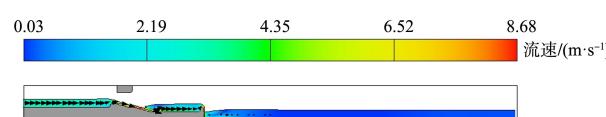


图5 5 a一遇消能防冲工况的流态及流速分布

20 a一遇消能防冲工况一级跌水消力池斜坡段形成淹没水跃，尾坎后二级跌水水流为面流消能形式，见图6。闸室与消力池连接的斜坡段速度最大约为6.5 m/s。下泄水流经过一级跌水底流消能后，下泄水流流速迅速减小，消力池尾坎断面后下泄水流主流流速降至1.5~5.0 m/s，水流流态基本均匀。经过二级跌水及跌水下游纵向长约37 m护底进一步扩算消能后，护底末端断面最大临底流速约为0.32 m/s，不会发生明显冲刷，满足消能要求。

0.44 m/s, 不会发生明显冲刷, 满足消能要求。

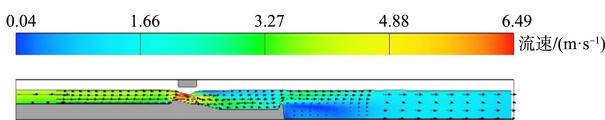
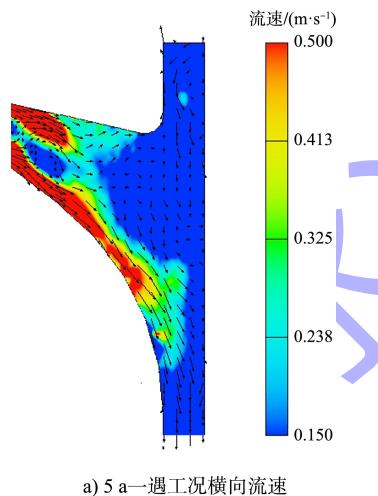


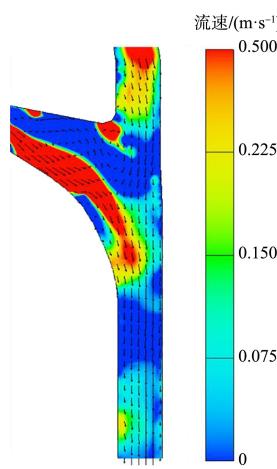
图 6 20 a一遇消能防冲工况的流态及流速分布

### 3.1.2 通航水流场计算

韩桥跌水原布置方案在支流 20 a 一遇流量通航工况条件下, 汇流口横向流速值局部不符合规划值要求, 最大横向流速 0.46 m/s, 超标区域长约 85 m (主要集中在桩号 J66+608.3—J66+694.0 之间), 宽约 42 m(偏右岸)的范围内。5 a 一遇流量通航工况条件下, 断面横向流速值不符合规划值要求的区域较大, 最大横向流速 0.35 m/s。超标区域长约 166 m (主要集中在 J66+608.3 ~ J66+779.2 之间), 宽约 35 m(偏右岸)的范围内, 两工况流速分布见图 7。



a) 5 a一遇工况横向流速



b) 20 a一遇工况横向流速

图 7 原布置方案汇流口通航区域流态及流速分布

### 3.2 优化方案

根据原布置方案流速分布情况以及水流特性, 对原设计方案局部布置进行调整, 主要内容包括:

- 1) 在控制段下游消力池内增设两排消力墩, 高度 2.0 m, 顶宽 0.6 m;
- 2) 将跌水尾水渠右侧干渠连接段边坡由原布置“R500 m 圆弧”改为“R350 m 圆弧+直线段+R600 m 圆弧”, 修改方法将原坡脚线圆弧中点切线向堤岸方向后退 35 m, 并顺时针旋转 8°, 然后将切线分别采用 R350 m 和 R600 m 圆弧与尾水渠及干渠岸坡相切连接。优化方案见图 8。

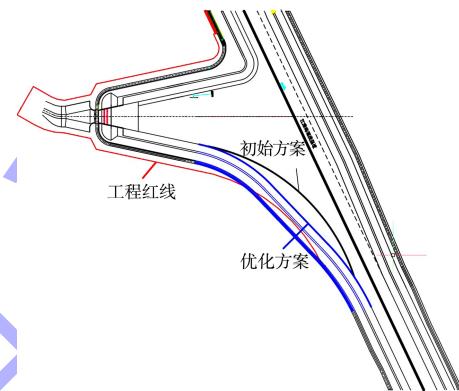
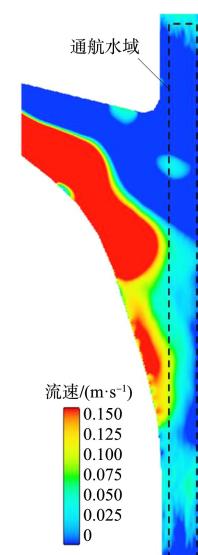


图 8 优化方案

根据数值模拟计算结果优化布置方案, 5 a 一遇不利通航工况, 支流来水偏左汇入干渠, 汇流口回流不明显, 汇流口通航区域最大横向流速约 0.13 m/s, 20 a 一遇设计通航工况汇流口回流不明显, 通航区域最大横向流速约 0.25 m/s, 均满足通航安全要求。优化布置方案两工况横向流速分布见图 9。



a) 5 a一遇工况横向流速

通航水域

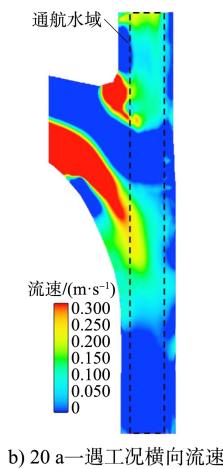


图9 优化布置方案汇流口通航区域流态及流速分布

#### 4 结论

1)选用 FLOW-3D 软件中的 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王家沟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技术上基本可行。

2)原布置方案 5 a 和 20 a 一遇消能防冲工况,经过消能后,下游水流相对平顺稳定,消能效果满足要求。5 a 和 20 a 一遇通航工况,汇流口横向流速均不满足要求。20 a 一遇设计通航工况(工况 4)条件下,最大横向流速 0.46 m/s。5 a 一遇不利通航工况(工况 3)条件下,最大横向流速 0.37 m/s。

3)根据原布置方案流速分布情况以及水流特性,对原设计方案进行调整优化,优化后的工程方案消能效果良好,汇流口区域横向流速与回流流速均满足设计要求,5 a 和 20 a 一遇不利通航工况(工况 3 和 4)最大横向流速分别为 0.13 和 0.25 m/s,满足通航安全要求。

#### 致谢

感谢安徽省引江济淮集团有限公司李铭工程师和安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司李涛高级工程师对本论文的悉心指导!

#### 参考文献:

- [1] 郭馨,解宏伟,赵相航.基于 VOF 模型的台阶式溢洪道的数值模拟[J].青海大学学报,2016,34(6):62-66.
- [2] 郭馨,解宏伟,赵相航.三维模型在台阶式溢洪道台阶段优化中的应用[J].人民黄河,2017,39(3):101-103,107.
- [3] 赵相航,解宏伟,郭馨,等.基于 VOF 模型的台阶式溢洪道数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):143-148.
- [4] 刁明军,杨永全,王玉蓉,等.挑流消能水气二相流数值模拟[J].水利学报,2003,34(9):77-82.
- [5] 闫谨,刁明军,王磊.泄洪洞出口扭曲斜切挑坎挑流数值模拟[J].西南民族大学学报(自然科学版),2015,41(6):773-777.
- [6] 张欣玮,汤积仁,卢义玉,等.淹没条件下水射流涡旋特性大涡模拟及实验研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):98-104.
- [7] 张欣玮,卢义玉,周哲,等.淹没磨料射流涡旋特性大涡模拟及研究[J].振动与冲击,2016,35(19):1-6.
- [8] 郭文思,李乃稳,刘超,等.LES 和  $k-\varepsilon$  湍流模型对斜向淹没射流的数值模拟研究[J].水力发电学报,2017,36(1):7-15.
- [9] 焦爱萍,刘沛清.单股窄薄片状射流入射水垫塘流场数值模拟研究[J].水利水电技术,2007,38(9):28-31.
- [10] 焦爱萍,张春满,刘沛清.多层水股射流在水垫塘内流场特性的数值模拟[J].灌溉排水学报,2007(3):60-64.
- [11] 杨忠超,邓军,杨永全,等.多股多层水平淹没射流数值模拟研究[J].水利学报,2004,35(5):31-38.
- [12] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundary [J]. Journal of computational physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [13] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence.I.basic theory[J]. Journal of scientific computing, 1986, 1(1): 3-51.

(本文编辑 王璁)