

# 施桥闸站进水流态数值模拟研究

朱宸钰<sup>1,3</sup>, 于 鑫<sup>2,3</sup>, 王睿智<sup>3</sup>

(1. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;  
3. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225007)

**摘要:**采用RANS方法,基于湍流模型开展了施桥闸站进水流态的数值模拟研究,观察了泵站进水流态及各断面流态,分析进水池泵前纵剖面轴向速度分布均匀度、速度加权平均角。计算结果表明:沉螺池内形成2个大尺度低流速回流区,前池进口附近处存在低流速回旋区,出口附近流态较好,进水池中层及底层流态平顺,进水池轴向流速分布基本均匀对称,研究成果可为同类泵站设计提供参考。

**关键词:**泵站; 进水流态; 数值模拟

中图分类号:TV131.65

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)07-0040-0006

## Numerical simulation study on inlet flow pattern of Shiqiao Sluice Pumping Station

ZHU Chenyu<sup>1,3</sup>, YU Xin<sup>2,3</sup>, WANG Ruiji<sup>3</sup>

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;  
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. Yangzhou Survey Design Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225007, China)

**Abstract:** Based on the turbulence model, the RANS method was used to carry out the numerical simulation study of the inflow flow pattern of Shiqiao Gate Station, observe the inflow flow pattern of the pump station and the flow pattern of each section, and analyze the axial velocity distribution uniformity and the velocity weighted average angle of the longitudinal section in front of the pump in the intake pool. The calculation results show that there are two large-scale low-velocity circumfluence zones in the settling basin for oncomelania snail, there is a low-velocity circumfluence zone near the inlet of the forebay, the flow pattern near the outlet is good, the flow pattern in the middle and bottom of the intake tank is smooth, and the axial velocity distribution in the intake tank is basically uniform and symmetrical. The research results can provide reference for the design of similar pumping stations.

**Key words:** pumping station; inlet flow pattern; numerical simulation

泵站进水建筑物一般包括引渠、前池、进水池及进水管,前池的作用是保证水流从引渠流向进水池的过程中能够平顺地扩散,进水池的作用是为进水管提供较好的水力条件<sup>[1-3]</sup>。因此,前池及进水池内流态的好坏严重影响泵站机组的高效稳定运

行。常鹏程等<sup>[4]</sup>采用CFD技术,分析了多机组侧向泵站的进水流态,并采用弧形导流墩对其前池流态进行了改善。罗灿等<sup>[5-6]</sup>基于数值模拟技术,研究了小型闸站式侧向泵站的进水流态。陶东等<sup>[7]</sup>为探究进水池内部水流流态特性,基于Realizable  $k-\varepsilon$ 湍流

收稿日期: 2022-12-27

作者简介: 朱宸钰(1998—),男,助理工程师,主要从事水工结构设计工作。E-mail: 1051950426@qq.com

模型对泵站进水池水流流态进行数值模拟。杨小帆等<sup>[8]</sup>为改善泵站侧向进水前池中的不良流态,采用SST  $k-\omega$ 湍流模型,研究了某侧向进水排涝泵站的进水水力特性。赵浩儒等<sup>[9]</sup>为解决侧向进水泵站前池和进水池内部大范围漩涡问题,基于RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型,对前池和进水池进行数值计算,并提出相应的整流措施。本文采用数值模拟的方法,基于RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型,研究不同水位下施桥泵站的进水流态。

## 1 工程背景

施桥闸站位于扬州经济技术开发区施桥镇,为闸站结合式小型排涝泵站,站身中部设1.5 m×1.5 m钢闸门1扇,两侧对称布置2台28ZLB-70型立式轴流泵,单机设计流量1 m<sup>3</sup>/s。施桥闸站平面布置如图1所示。

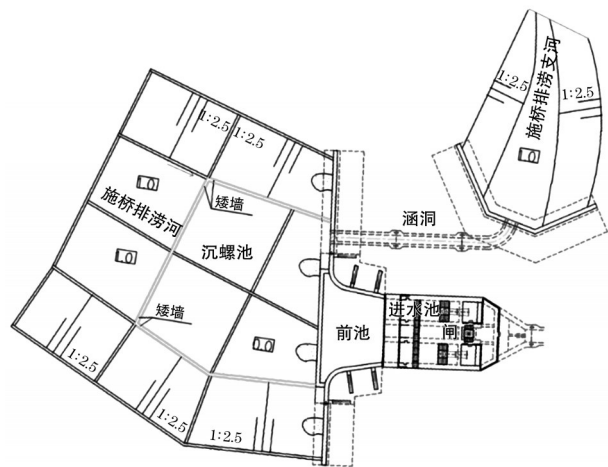


图1 施桥闸站平面布置

施桥排涝河和施桥排涝支河作为该泵站的引渠,通过涵洞相连接,最终水流汇集在沉螺池中,在水泵的抽引作用下,依次流向前池、进水池及水泵。泵站运行水位组合如表1所示。

表1 施桥闸站运行水位组合

工况	高水位/m	底水位/m
施桥排涝支河	3.3	3.0
施桥排涝河	2.8	2.8
前池	2.8	2.8

## 2 计算方法

### 2.1 流动控制方程

泵站流动可用N-S方程来描述,N-S方程包括

能量守恒方程、质量守恒方程和动量守恒方程。对于泵站流场中的不可压缩流动,可以忽略热交换。本文采用CFD软件,基于有限体积法对流体控制方程进行离散。

### 2.2 湍流模型

实际上,泵站流动多处于湍流状态,因此需要借助湍流模型对控制方程进行求解。数值模拟方法大致分为3类:直接数值模拟、雷诺平均模拟和大涡模拟<sup>[10]</sup>。常用的湍流模型如图2所示。

雷诺平均模拟方法(RANS)是指在时间域上对流场物理量进行雷诺平均化处理,然后求解得到时均化控制方程,是一种计算效率高、工程应用早的方法,在水泵与泵站领域使用最为广泛。

RNG  $k-\varepsilon$ 模型<sup>[11]</sup>使用了重正化群的统计技术来修正湍动黏度,该修正考虑了平均流动中的旋转效应,可以更好地处理大曲率、强旋转及高应变率流动,在泵站流动中展现出了优势。本文基于雷诺平均模拟方法(RANS),采用RNG  $k-\varepsilon$ 模型对控制方程进行求解。

### 2.3 计算域

本文仅研究施桥闸站的进水流态,不涉及水泵内的流态,因此忽略水泵叶轮的旋转作用,取进水管作为计算域的一部分,如图3所示。计算域包括施桥排涝支河、涵洞、施桥排涝河、沉螺池、前池、进水池及进水管。

### 2.4 边界条件设置

图4为施桥闸站计算域的边界条件,具体设置如下。

(1)进口边界条件:计算域进口设置在施桥排涝支河和施桥排涝河的进口处,设置质量流量进口,进口设置为2 000 kg/s。

(2)出口边界条件:计算域出口设置在进水管出口处,设置自由出流条件,参考压力为0.1 MPa。

(3)液面边界条件:施桥排涝支河、施桥排涝河、沉螺池、前池及进水池液面均设为对称边界条件。

(4)壁面边界条件:各固体壁面设置为“wall”,采取标准壁面函数处理。

(5)求解格式:采用一阶迎风格式,收敛精度为4~10。

### 2.5 网格无关性

进水管采用结构化网格离散,计算域其他各部分采用非结构化网格离散,如图5所示。考虑到网格数量及质量对数值计算结果的影响很大,以计算域的水力损失作为评价指标,开展网格无关性验证。

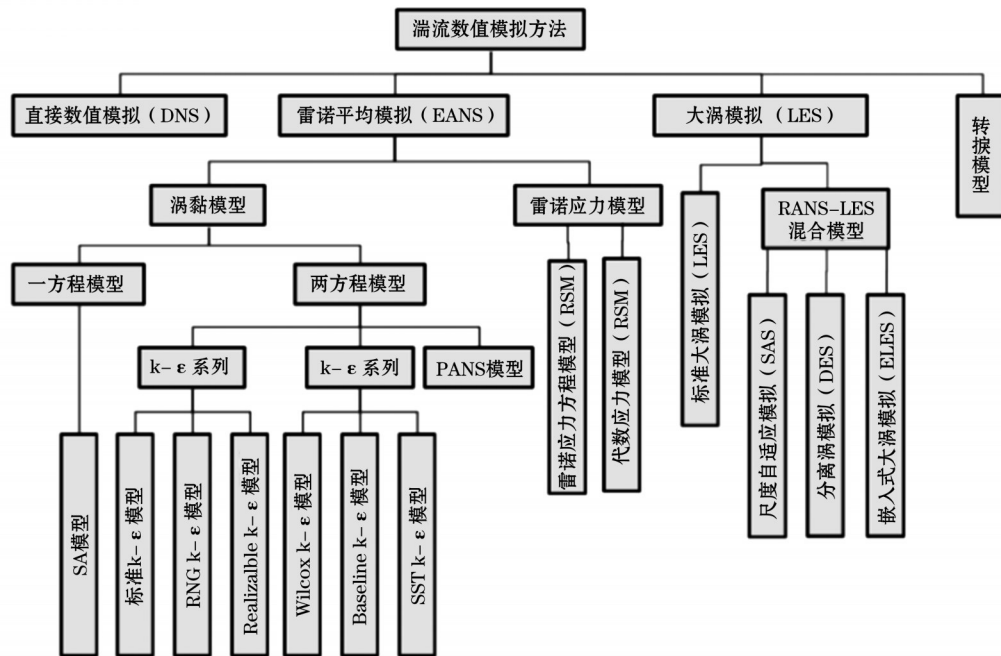


图2 常用的湍流数值模拟方法及湍流模型

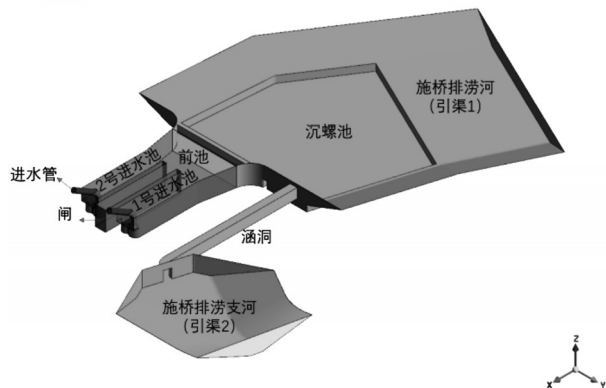


图3 计算域示意

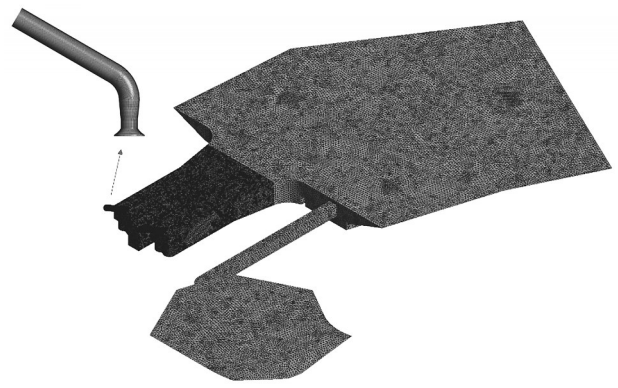


图5 网格划分示意

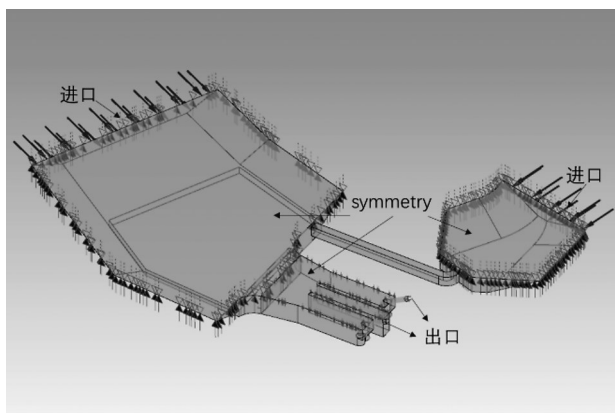


图4 计算域边界条件示意

水力损失计算式为

$$h = \frac{P_{in} - P_{out}}{\rho g} \quad (1)$$

式中: $h$ 为计算域水力损失,m; $P_{in}$ 为计算域进口的总压强,Pa; $P_{out}$ 为计算域出口的总压强,Pa; $\rho$ 为流体密度,取 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ; $g$ 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

图6为不同网格方案下的水力损失大小,当网

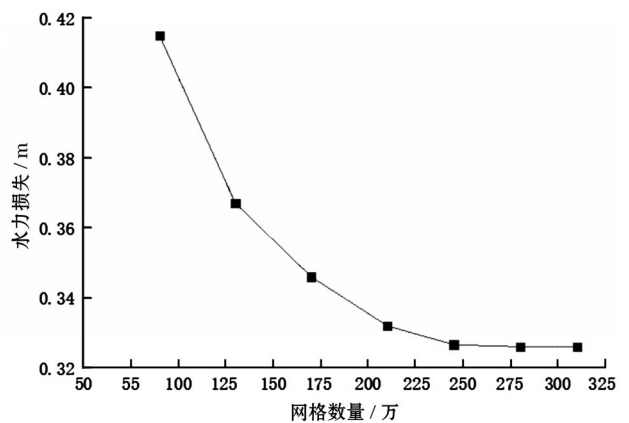


图6 计算域水力损失

格数量超过245万时,水力损失误差在 $\pm 2\%$ 以内,因此采用该网格开展计算。

### 3 特征断面和流态评价指标

#### 3.1 特征断面选取

截取3个横断面,定性分析面层、中层和底层的流态,截取3个纵断面,定量分析进水池流动状况。如图7所示,断面1~3分别距沉螺池底板2.65 m、1.40 m、0.15 m,断面4~6分别距吸水管中心线5.0 m、3.0 m、1.0 m。

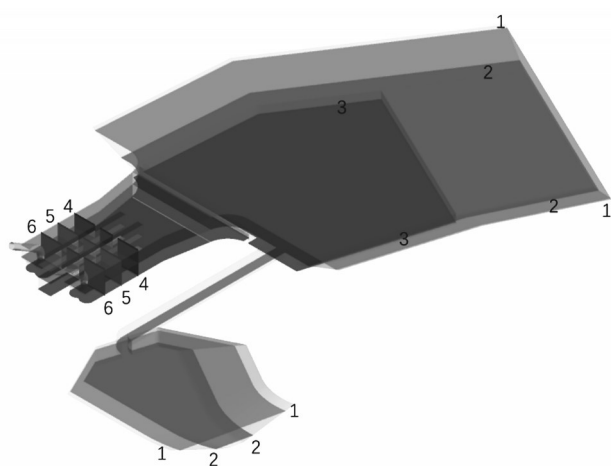


图7 特征断面示意

#### 3.2 流态评价指标

对于断面4~6,采用轴向速度分布均匀度 $V_{au}$ 和速度加权平均角 $\theta$ 对其流态进行定量分析<sup>[1]</sup>。 $V_{au}$ 用于判别特征断面上轴向流速的分布均匀程度,其数值越接近100%,断面流速分布越均匀; $\theta$ 用于表征断面轴向速度与断面的夹角,其数值越接近 $90^\circ$ ,流

动平顺性越好。计算公式为

$$V_{au} = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{v_{ai}}{v_a - 1} \right)^2}{n} \right] \times 100\% \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n v_{ai} \left[ 90^\circ - \arctan \frac{v_{ti}}{v_{ai}} \right]}{\sum_{i=1}^n v_{ai}} \quad (3)$$

式中: $V_{au}$ 为轴向速度分布均匀度; $v_{ai}$ 为断面各结点轴向速度; $v_a$ 为断面平均轴向速度; $n$ 为结点数; $\theta$ 为速度加权平均角; $v_{ti}$ 为断面各结点横向速度。

### 4 计算结果分析

#### 4.1 三维流态

图8为施桥闸站三维流线图,可以看出,2股来流(施桥排涝支河与施桥排涝河)在沉螺池中相撞,形成两个大尺度低流速( $0 \sim 0.05$  m/s)的回流区,前池及进水池内流态较好。

#### 4.2 二维流态

图9为施桥闸站面层流线及速度云图。沉螺池表面存在2个大面积回流区,但其流速极低,最大流速仅为0.05 m/s。前池及2号进水池表面流态均较好,尤其是2号进水池流态极好。1号进水池右侧(顺水流方向)有表面旋涡产生,且流速最大仅为0.05 m/s。

图10为施桥闸站中层流线及速度云图。沉螺池中层也存在大面积的回流区,相比面层其尺度有所增大,最大流速仅为0.1 m/s。前池存在由沉螺池旋涡发展来的低速区,其流态较好。进水池内流态平顺,无不良流态产生。

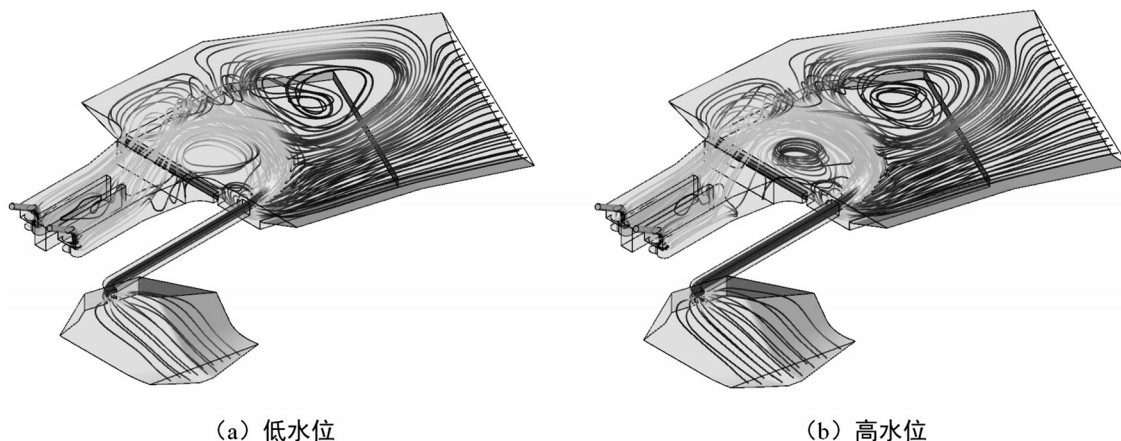


图8 施桥闸站三维流线图



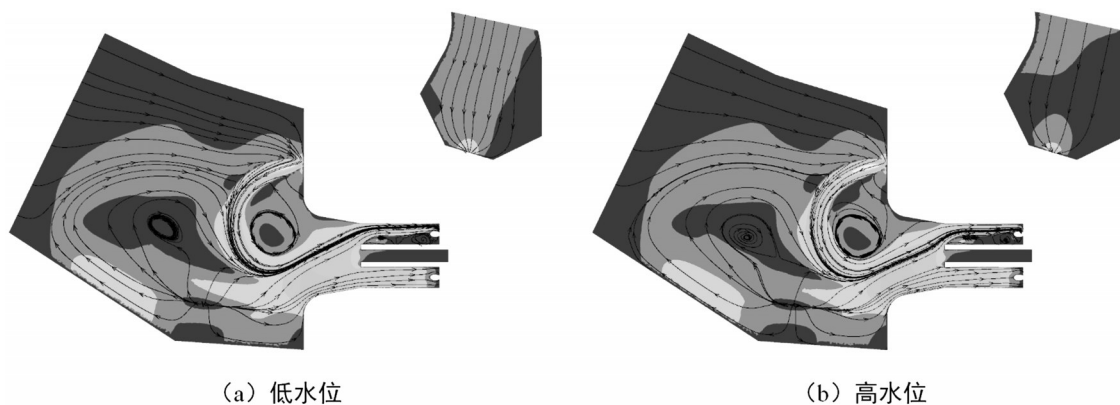


图9 施桥闸站面层流线及速度云图

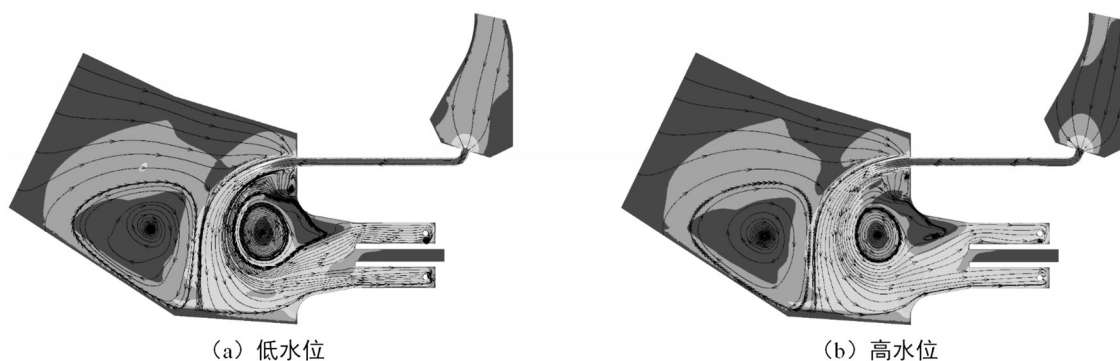


图10 施桥闸站中层层流线及速度云图

图11为施桥闸站底层流线及速度云图。沉螺池底层也存在大面积的回流区,相比面层和中层其尺度有所缩小,最大流速仅为0.05 m/s。由于沉螺池矮墙的存在,起着底坎的作用,因此前池内存在回流区,经过水流的充分发展,前池出口流态明显改善,进水池内底层流态最为平顺。

为了定量分析不同运行水位下泵站进水流态,计算进水池纵剖面的轴向流速分布均匀度和速度加权平均角,计算结果见表2。从表2可以看出,进水池流速分布均匀性及平顺性均较好,尤其是

2号进水池流速分布最为均匀;高水位工况下,进水池流态相比低水位较好。

图12为施桥闸站纵断面轴向速度云图。由图12可以看出,1号进水池左侧顶端均存在不同程度的低速回流区,整体轴向流速分布较为均匀;2号进水池流态均较好,流速对称均匀分布。

## 5 结 语

采用数值模拟的方法,对施桥闸站进水流态进行了数值模拟研究。

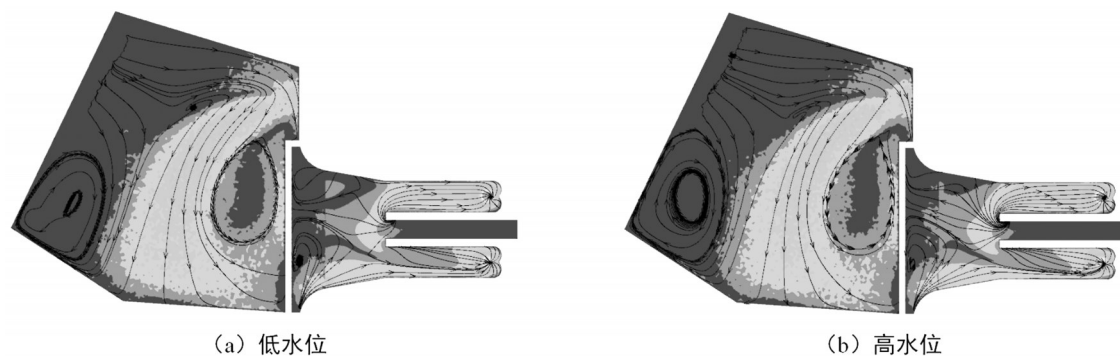


图11 施桥闸站底层流线及速度云图

表2 施桥闸站纵剖面流速均匀特性

指标		轴向流速分布 均匀度/%	速度加权 平均角/(°)
低水位	断面4	1号	75.31
		2号	85.23
	断面5	1号	77.39
		2号	86.89
	断面6	1号	85.84
		2号	87.97
高水位	断面4	1号	75.54
		2号	85.85
	断面5	1号	77.65
		2号	86.98
	断面6	1号	85.96
		2号	87.98

(1)由于施桥排涝河与施桥排涝支河涵洞来流的对冲,2种运行水位工况下,均在沉螺池内形成2个大尺度的回流区,但该回流区流速均极低,最大流速仅为0.05 m/s,对泵站进水流态影响较小。

(2)2种运行水位工况下,前池进口处流态较差,在池内形成大范围的回流区。由于沉螺池出口矮墙的存在,起着和底坎一样的作用,可利用水流坎后翻滚的作用,对沉螺池的不良流态进行整流,使得前池出口处流态较好。

(3)进水池内水流流态均较好,无大尺度旋涡产生,流速均匀度均在80%以上,速度加权平均角均在75°以上。其中1号进水池表面存在小范围的低速回流区,但是对进水管进口流态影响不大。

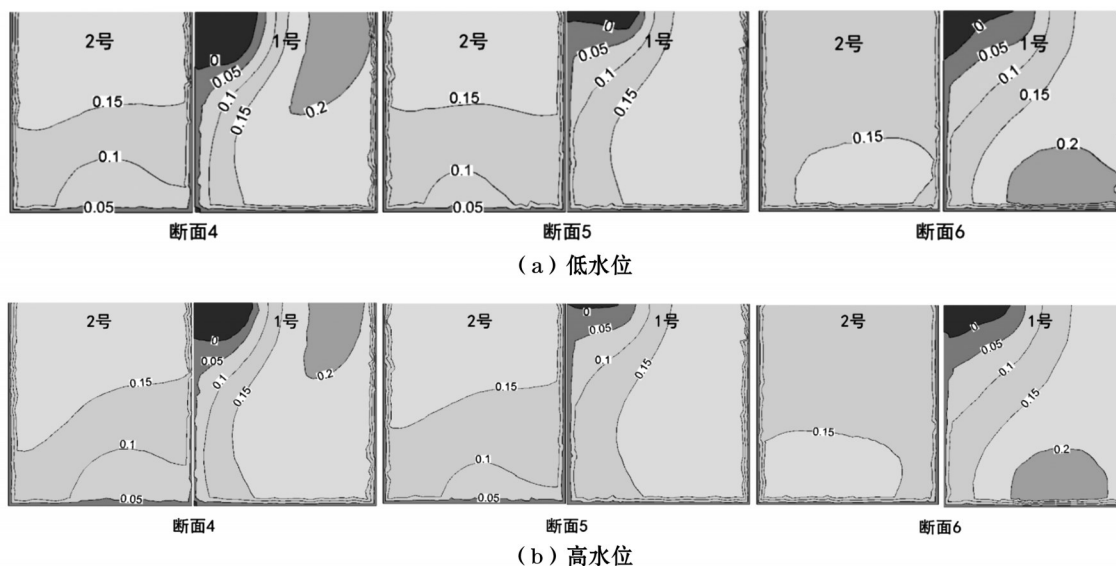


图12 施桥闸站纵断面轴向速度云图

## 参考文献:

- [1] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 王福军. 水泵与水泵站[M]. 北京:中国农业出版社, 2021.
- [3] 徐存东,李嘉明,王荣荣,等. 开机组合对泵站前池水沙流场特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(2):11-16.
- [4] 常鹏程,杨帆,孙丹丹,等. 多机组泵站侧向进水前池流态及整流措施分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(12): 229-234.
- [5] 罗灿,雷帅浩,袁尧,等. 小型闸站式侧向泵站进水流态数值模拟研究[J]. 排灌机械工程学报, 2021,39(8): 797-803.
- [6] 罗灿,雷帅浩,陈锋,等. 泵站进水池翼型导流板整流特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021,41(4):53-59.
- [7] 陶东,周冬蒙,刘子金. 基于Realizable  $k-\varepsilon$ 湍流模型的泵站进水池水流流态研究[J]. 人民黄河, 2020,42(11): 27-30.
- [8] 杨小帆,于永海,刘东,等. 基于SST  $k-\omega$ 湍流模型的泵站侧向进水流态改善研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018,40(3):1-4.
- [9] 赵浩儒,杨帆,刘超,等. 侧向进水泵站流态模拟及改善研究[J]. 水利水电技术, 2017,48(7):79-84.
- [10] 王福军. 水泵与泵站流动分析方法[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2020.
- [11] YAKHOT V, ORZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986,1(1):3-11.