

# 贯流泵站前池表面涡数值预测与分析

董兆华<sup>1</sup>, 俞 凯<sup>2</sup>, 黄先北<sup>2</sup>, 仇宝云<sup>2</sup>, 孟小敏<sup>1</sup>

(1. 江苏省灌溉总渠管理处, 江苏 淮安 223200; 2. 扬州大学 电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127)

**摘要:** 贯流泵站因其流道水力损失小, 装置效率高的优点在灌溉、调水和排水等领域应用广泛, 受水位、工况等影响, 泵站前池常出现表面漩涡等不良现象, 影响泵站效率及稳定性。以淮安三站灯泡式贯流泵站为研究对象, 通过计算流体动力学数值模拟了泵站进水流道和前池, 采用BM模型捕捉表面涡的旋转特性, 采用S-CLSVOF跟踪自由表面, 研究了设计工况下贯流泵站的内部的流动规律和表面涡的发展, 结果表明: 淹没深度越大, 表面涡越弱, 但水面的波动更强; 表面涡的出现将使进水流道流速均匀性降低。研究结果为大中型贯流泵站吸气涡的数值模拟提供理论参考。

**关键词:** 贯流泵站; 表面涡; 计算流体动力学

中图分类号: TV675

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2024)11-0008-0004

## Numerical prediction and analysis of surface vortex of the forebay in tubular pumping station

DONG Zhaohua<sup>1</sup>, YU Kai<sup>2</sup>, HUANG Xianbei<sup>2</sup>, QIU Baoyun<sup>2</sup>, MENG Xiaomin<sup>1</sup>

(1. General Irrigation Canal Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223200, China;

2. College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** Tubular pumping station is widely used in fields such as irrigation, water regulation and drainage due to its advantages of small hydraulic loss in the flow path and high device efficiency. Affected by water level and working conditions, surface vortex and other undesirable phenomena often appear in the forebay of pumping station, which affects the efficiency and stability of pumping station. The Huai'an three bulb tubular pumping station is taken as the research object, and the inlet channel and forebay of the pump station are simulated by CFD. The BM model is used to capture the rotation characteristics of the surface vortex, and S-CLSVOF is used to track the free surface. The internal flow law of the tubular pumping station under the design condition are studied. The results show that the greater the submergence depth, the weaker the surface vortex, but the fluctuation of the water surface is stronger; The appearance of surface vortices will reduce the uniformity of flow velocity in the inlet water channel. The research results provide theoretical reference for the numerical simulation of suction vortex in large and medium-sized tubular pumping stations.

**Key words:** tubular pumping station; surface vortex; CFD

轴流泵站因为其流量大、扬程低等优点在农业灌溉和跨流域调水等领域应用广泛, 是重要的水利设施。因受水位、工况等影响, 泵站前池容易产生漩涡、回流等不良水力现象, 其中漩涡对泵站影响

最大, 前池中漩涡可以分为两大类: 表面涡和水下涡, 表面涡不仅因强旋转性使入泵水流不均匀, 还因其加强后变为吸气涡吸入空气, 引起严重振动、噪声以及泵效率下降<sup>[1]</sup>, 同时易导致空化和空蚀。

收稿日期: 2024-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(52379093、52179091); 江苏省水利科技项目(2022016)

作者简介: 董兆华(1972—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利工程管理工作。E-mail: 1024625914@qq.com

通信作者: 黄先北(1991—), 男, 副教授, 博士, 主要从事泵站工程、水力机械内流机理研究工作。E-mail: znhuang@163.com

由此可见,改善进水系统内的流态、消除表面涡是保障泵站稳定运行的关键。

随着计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的发展,数值模拟被广泛应用于泵站前池漩涡的研究中<sup>[2-8]</sup>。本文以江苏省淮安三站为研究对象,对泵站前池出现表面涡的情况,采用CFD方法模拟泵站流场,预测表面涡的发生位置并与现场观测结果进行对比,验证数值模拟的可靠性,通过对模型不同水位情况的模拟,分析漩涡形成的过程和特点。

## 1 泵站参数与物理模型

江苏省淮安三站位于淮安市淮安区南郊京杭大运河与总渠交汇处,是江苏省江水北调的第二级抽水站,也是南水北调东线工程第二梯级泵站之一,采用2台灯泡贯流泵,设计单机流量为 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ,其中前池长度为 $27 \text{ m}$ ,为保证数值计算与实际泵站更加符合,计算域包括扩散段和清污机桥段,计算域及相关参数如图1所示。

考虑到计算时间和精度要求,选择图2所示网格,网格单元数为536.48万。

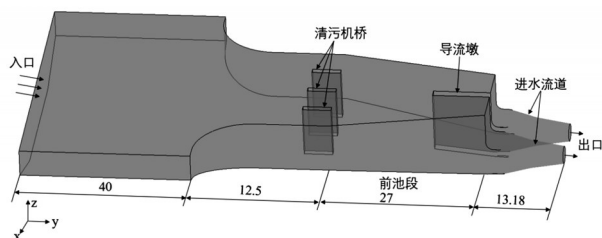


图1 泵站模型计算域图(单位:m)



图2 模型网格

## 2 泵站流动数值计算

### 2.1 控制方程与边界条件

本文采用开源CFD软件OpenFOAM,基于雷诺时均N-S方法求解湍流场,选择BM(Bifurcation Model)湍流模型;考虑到表面涡流动为水气两相流,采用S-CLSVOF(Simplified Coupled Level Set

and Volume of Fluid Method)捕捉自由水面<sup>[9-10]</sup>。取3个淹没深度 $H$ (自由水面到进水流动最低处距离) $6 \text{ m}$ (最低设计水位)、 $6.8 \text{ m}$ (设计水位)和 $7.6 \text{ m}$ 进行计算。

计算域采用的边界条件如图3所示,采用初始化边界条件如下:①进口为流速进口条件,分为水域和空气域,水域流速为固定流速,空气域流速为 $0 \text{ m/s}$ 。压力为零法向梯度条件;②水域出口,流量出口条件;③空气域上表面,压力为总压条件,设置为0,且水的体积分数为0,空气体积分数为1;④未标注的边界均使用无滑移固壁条件。

采用有限体积法离散控制方程,插值格式为二

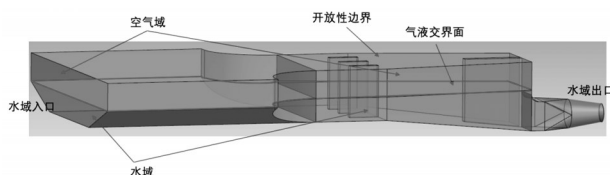
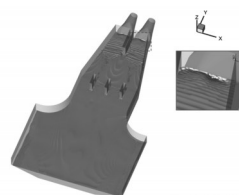


图3 模型边界条件设置

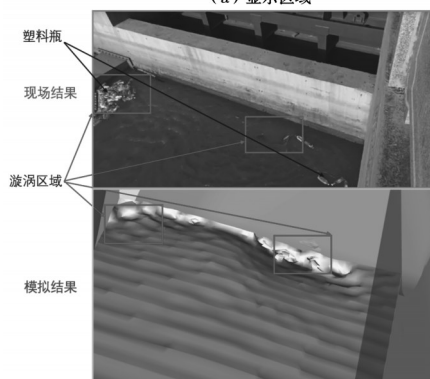
阶中心差分格式,时间步长取为 $0.001 \text{ s}$ ,库朗数控制在1以下,总计算时长为 $60 \text{ s}$ 。

### 2.2 CFD计算结果验证

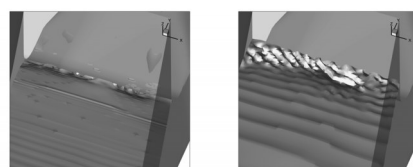
如图4所示,因为模型为对称体,故取右半部分



(a) 显示区域



(b)  $H=6.8 \text{ m}$



(c)  $H=6.0 \text{ m}$

(d)  $H=7.6 \text{ m}$

图4 模型计算结果与泵站实际现场对比( $t=10 \text{ s}$ )

前池进行显示,取空气体积分数为0.95的等值面为自由表面,可以看到10 s的时候前池左侧靠近导流墩的地方和中间靠右侧的区域有自由表面凹陷的情况,并伴随少量的气泡吸入到出水流动。这与实际现场观测到的情况大致吻合,塑料瓶聚集的地方即出现表面漩涡。在淹没深度为5 m时,自由表面凹陷的区域进一步增加,将更多的空气夹带进入出水管,此时大致处于表面涡的间断气泡涡阶段。而淹没深度增加到6.6 m,在相同的时间仅能观察到自由水面出现一定程度的波动,并无气体进入出水管,由此可见,随着淹没深度的增加,表面涡的强度逐渐减小直至消失,但水面的波动加剧。

### 3 漩涡演化过程及流场分析

由于高淹没深度下表面涡不显著,且发展过程类似,本文取 $H=6$  m工况分析表面涡的发展情况,如图5所示。表面涡经过0~5 s的初生阶段,5~20 s过程中表面涡不断发展,夹带更多的空气进入进水流道,20~35 s,表面涡不断衰减,逐渐消失。35~50 s阶段,表面涡又逐渐发展。所以模拟的表面涡发展要经过“初生—发展—衰弱”的周期性过程。

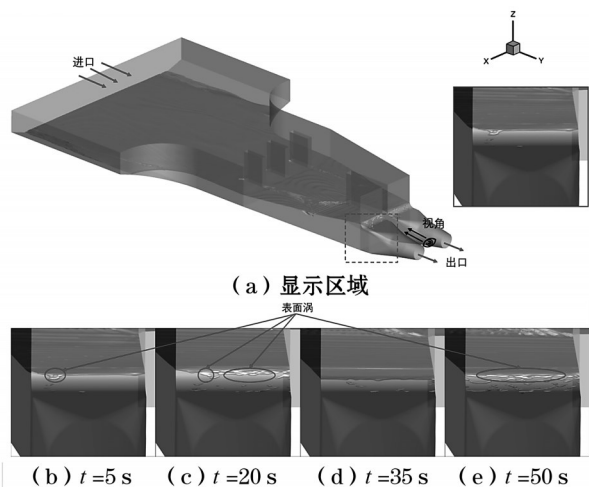


图5 表面发展过程

因为表面涡从垂直水面方向吸入空气,所以涡量在 $z$ 方向上的分涡量 $\omega_z$ 在涡的形成过程中占据主导地位。图6取了3个流量在 $z$ 方向上的切面,切面位于初始自由表面下方0.3 m处,如图6(a)所示。取 $t=10$  s时,切面进行涡量云图及流线的显示,其中红、蓝色分别代表旋转方向的正、反。如黑色方框所示,靠近壁面的左侧和中右侧有 $\omega_z$ 不为0的区域,代表有垂直涡量的存在,且垂直涡量的集中区域正好与图4(b)中模型自由表面凹陷区域和实际泵站产生表面涡的位置基本对应。由此可以验证,垂直涡量 $\omega_z$ 在淮安三站表面涡的形成中发挥主要作用。

图6中流线显示水被导流墩一分为二流入左右两边流道,两边的流动情况基本相同,且在导流墩的前缘形成一片回流区,如椭圆框中显示,且回流区垂直涡量不为0。从图6(b)到图6(d)可以看到,随着淹没深度的增加,壁面上的涡量区域面积逐渐减小,且流场愈加紊乱,此时自由表面波动较大,与图4规律相一致,即淹没深度的增加导致自由表面扰动增强。

图7为竖直方向截面(进水流道入口)的 $y$ 方向速度云图,截面位置如图7(a)所示,在3个不同的淹没深度下,速度分布规律基本相同,在左上角有速度最大值区域,是因为表面涡吸入空气,截面的上部和底部流速减小,中部和两侧壁面附近的流速最低,但是随着淹没深度的增加,整体的流速随之降低,而中间低速区的面积不断减小,整体截面的速度均匀度上升。由此可见,表面涡将导致进水流道入口的流速均匀度下降。

### 4 结 论

本文针对泵站前池出现表面涡的问题,采用CFD方法模拟泵站流场,通过与实际泵站运行情况相比较。得到如下主要结论:

(1)数值模拟与实际情况相符合,且随着淹没

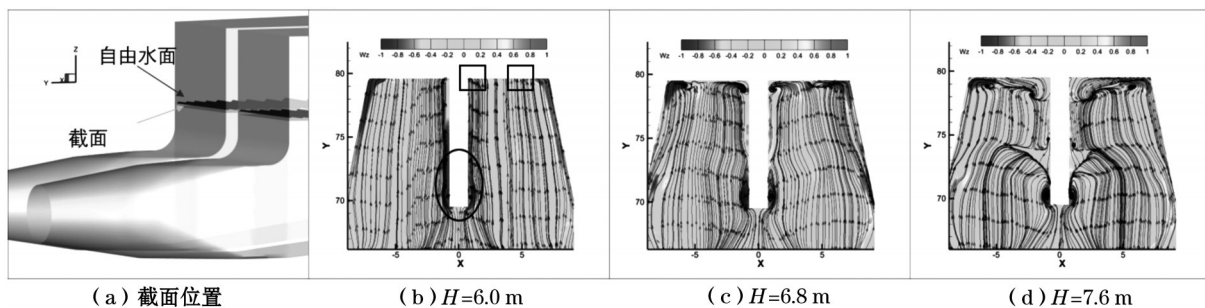


图6 涡量及流线图

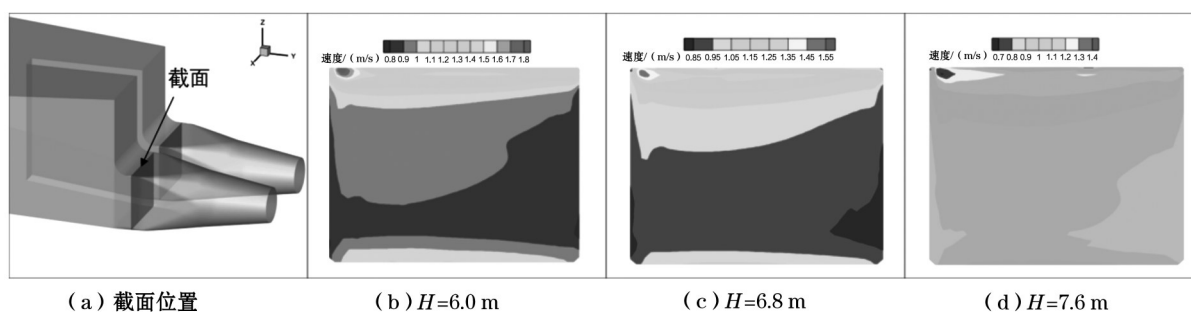


图7 竖直平面速度云图

深度的增加,表面涡的强度逐渐减小直至消失;

(2)垂直涡量 $\omega_z$ 在泵站表面涡的形成中占主要地位,减少垂直涡量的形成可以抑制表面涡的形成;

(3)淹没深度越大则自由水面的扰动增强,相同流量下流速减小,但进水流道入口的流速均匀度增加。

#### 参考文献:

- [1] 肖若富,李宇宁.进水池形状对吸入涡影响试验研究[J].排灌机械工程学报,2016,34(11):953-958.
- [2] 吴鹏飞.进水池表面吸气涡动态过程及机理研究[D].武汉:武汉大学,2018.
- [3] 张德胜,李普熙,赵睿杰,等.泵站进水池吸入口涡旋结构及湍流特性的大涡模拟[J].农业机械学报,2019,50(10):134-141.
- [4] GUO Q, HUANG X B, et al. The formation of the steady and unsteady air-entrained vortices in pump sump [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 129: 103312.
- [5] HUANG X B, GUO Q, et al. Air-entrainment in hydraulic intakes with a vertical pipe: the mechanism and influence of pipe offset [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2022, 146: 103866.
- [6] 资丹.泵站进水池吸气涡水力特性研究[D].北京:中国农业大学,2019.
- [7] 潘强,施卫东,赵瑞杰,等.基于LES的泵站前池表面涡及液下涡流瞬态特性分析[J].农业机械学报,2018,49(5):186-194.
- [8] PARK Y K, DEY M K, CHOI Y H, et al. Numerical visualization of air intake induced by free surface vortex [J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(6): 540-544.
- [9] PETTERSSON REIF, B A, DURBIN P A, OOI A. Modeling rotational effects in eddy-viscosity closures [J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 1999, 20(6): 563-573.
- [10] YAMAMOTO T, OKANO Y, DOST S. Validation of the S-CLSVOF method with the density-scaled balanced continuum surface force model in multiphase systems coupled with thermocapillary flows [J]. International Journal of Numerical Methods in Fluids, 2017, 83: 223-244.

(上接第7页)

- [2] YU L, CHENG L, XU W, et al. Study on the influence of tip clearance on cavitation performance and entropy production of an axial flow pump [J]. J. Mar. Sci. Eng, 2024, 12: 101.
- [3] 胡全友,刘小兵,赵琴,等.蜗壳式混流泵压力脉动特性研究[J].人民长江,2016,47(10):76-80,95.
- [4] 高海司,裴吉,袁寿其,等.蜗壳式混流泵叶轮部件湿模态流固耦合分析[J].流体机械,2018,46(1):46-51,5.
- [5] 鲁阳平,马灿,谭磊,等.混流泵启动过程瞬态性能理论模型[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(12):1938-1944.
- [6] 黎义斌,毕祯,李仁年,等.不同叶顶间隙下斜流泵轮缘压力脉动特性的数值分析[J].水利学报,2015,46(4):497-504.