

基于CFD的泵站开机组合 对航道通航能力的影响研究

张艺铭,王胜艳,张彩云,钱 堃,郭天辰

(江苏省水文水资源勘测局泰州分局,江苏 泰州 225300)

摘要:基于CFD技术,以某具备通航功能的闸站式泵站为研究对象,模拟分析了不同开机组合对航道通航条件的影响。数值模拟结果表明:当六面体网格数量超过195万后,计算域总水力损失趋于稳定;泵站开机组合主要对航道左岸(靠近长隔墩一侧)的流速分布产生影响,其中横向流速的变化尤为明显。随着开机台数增加,横向流速超过0.3 m/s的区域面积逐渐扩大。在全部机组运行的情况下,航道内横向流速超过0.3 m/s的区域面积约为677.98 m²。该研究结果可为闸站式泵站航道优化设计及船舶通航安全提供理论依据。

关键词:泵站; 开机组合; 通航能力; 数值模拟

中图分类号:TV675 文献标识码:A 文章编号:1007-7839(2026)03-0035-0005

Study on the impact of pump station operation combination on waterway navigability using CFD

ZHANG Yiming, WANG Shengyan, ZHANG Caiyun, QIAN Kun, GUO Tianchen
(Taizhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Taizhou 225300, China)

Abstract: Based on CFD technology, this study simulates and analyzes the impact of different pump operation combinations on navigation conditions in a lock-type pumping station with navigation functionality. Numerical simulation results show that the total hydraulic loss of the computational domain tends to stabilize when the number of hexahedral grids exceeds 1.95 million. Unit operation combinations mainly affect the flow velocity distribution on the left bank of the navigation channel (near the long dividing pier), with particularly significant changes in lateral velocity. As the number of operating units increases, the area in the channel where lateral velocity exceeds 0.3 m/s gradually expands. Under full-unit operation condition, the area in the navigation channel where lateral velocity exceeds 0.3 m/s is approximately 677.98 m². The results can provide a theoretical basis for the optimal design of navigable lock-type pumping stations and navigation safety of ships.

Key words: pumping station; operation combination; navigability; numerical simulation

船闸与泵站合建是一种很好的布置形式^[1],这种建筑物简称闸站式泵站。闸站式泵站可以实现水资源的综合利用,既能保障船舶通行,又能满足调度需求,如灌溉、排涝、防洪等。

目前,学者们对航道的研究做了大量研究工

作。周敬林等^[2]采用水工模型试验的方法,研究了船闸布置形式对河道的影响,并给出了一种船闸平面布置方案;张波^[3]采用物理模型试验的方法,分析了垂直出流河道的合理布置形式,并提出了一系列导流措施;钟林斌等^[4]采用数值模拟的方法,研究了

收稿日期:2025-11-18

作者简介:张艺铭(1990—),男,工程师,主要从事站网管理、地下水监测方面工作。E-mail:2871350086@qq.com

双线船闸分水墙形态对航道通航能力的影响,发现长分水墙可以很好地降低航道内的横向流速,并缩小回流区的范围;李恒昌等^[5]建立了平陆运河青年船闸工程的水工模型,研究了隔墩和导流墙对航道通航条件的影响;张从从等^[6]采用物理模型试验的方法分析了导流墩对闸站式泵站通航能力的影响。

对于闸站式泵站而言,开展泵站开机组对航道通航能力影响的研究具有重要的工程意义。泵站的运行不仅影响航道内水流的速度和流态,还直接关系到船舶的安全通行。不同泵站开机组会对航道内的水力特性产生显著变化,从而影响船舶的操纵性和稳定性。通过研究泵站开机组对航道内流线、速度矢量和横向流速分布的影响,可以为闸站式泵站的航道设计提供科学依据,提升航道通航能力,保障航运安全。

1 数值计算方法

1.1 研究对象

某闸站式泵站位于淮河流域沂沭泗水系,该泵站一侧建有具有通航能力的船闸。其中,泵站装配4台1850ZLQ15-5.5机械全调节立式轴流泵,单机流量为15 m³/s,航道水深为6.0 m。采用UG 9.0软件,对闸站式泵站的进水结构进行了三维水体模型构建,结果如图1所示,从左至右依次为1#、2#、3#和4#进水流道。

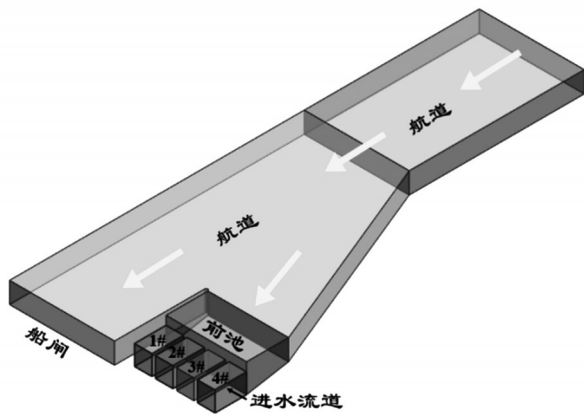


图1 研究对象计算域

1.2 控制方程

航道以及闸站式泵站内的流动属于不可压缩的流动,遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒定律。特别地,对于研究对象内的大尺度流动,可以不考虑能量传递^[7]。于是,相应的控制方程包括连续性方程和N-S方程,具体公式如下:

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

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{mi} \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; u_i 为 x_i 方向的速度分量; p 为压力; τ_{ij} 为应力张量; S_{mi} 为广义源项。

1.3 湍流模型

在工程上,标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型得到了广泛应用。因此,本文采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型用于模拟航道以及闸站式泵站内的流动^[8-9]。在该模型中,湍动能 k 和耗散率 ε 的运输方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: G_k 为由于平均速度梯度引起的 k 的产生项; G_b 为由于浮力引起的 k 的产生项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; σ_k 和 σ_ε 为Prandtl数; S_k 和 S_ε 为用户自定义源项。

1.4 网格生成

基于ANSYS软件中的MESH组件,对航道、前池和进水流道进行六面体网格生成。考虑到网格数量对数值模拟计算结果的影响,对网格进行了无关性分析。网格无关性分析结果如图2所示。从图2可以发现,当网格数量超过195万时,研究对象的水力损失基本没有变化。因此,本文后续的模拟计算采用此网格数量,图3为数量为195万的网格。

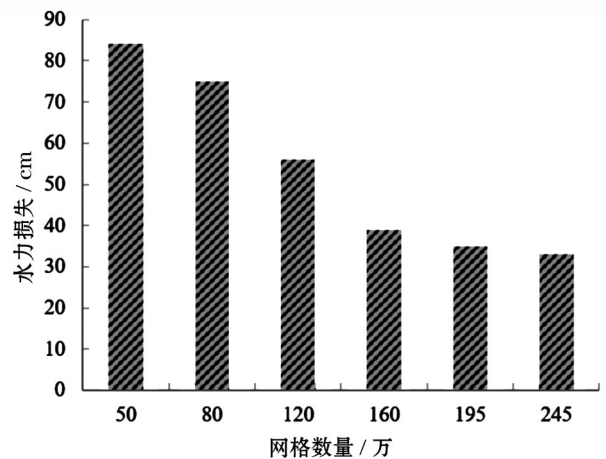


图2 网格无关性

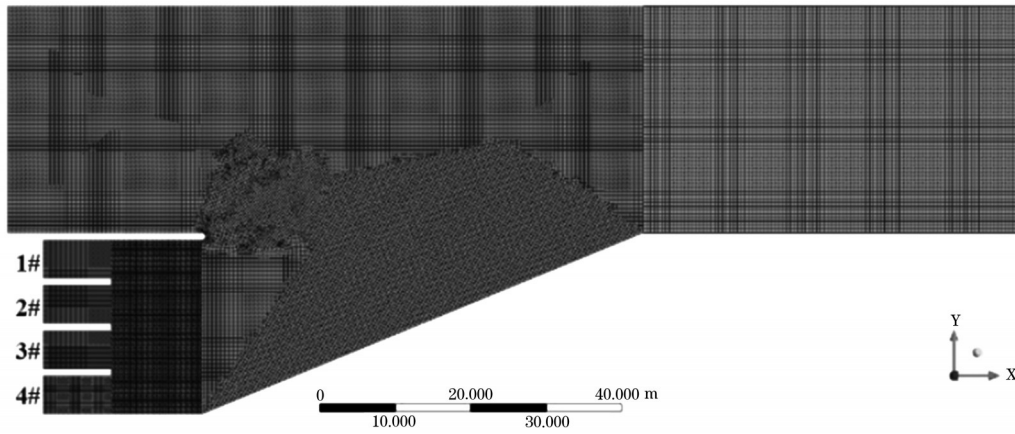


图3 研究对象网格

1.5 边界条件

图4展示了边界条件的设置。在定常计算中,进口采用总压条件,出口采用速度条件。自由液面采用Symmetry对称面,航道、前池及进水流道的固体表面均采用无滑移壁面,交界面采用静静交界

面。求解格式为二阶迎风,物理时间步长为0.01 s,收敛精度为 10^{-5} 。

2 研究方案

本文采用数值模拟的方法,研究了泵站开机

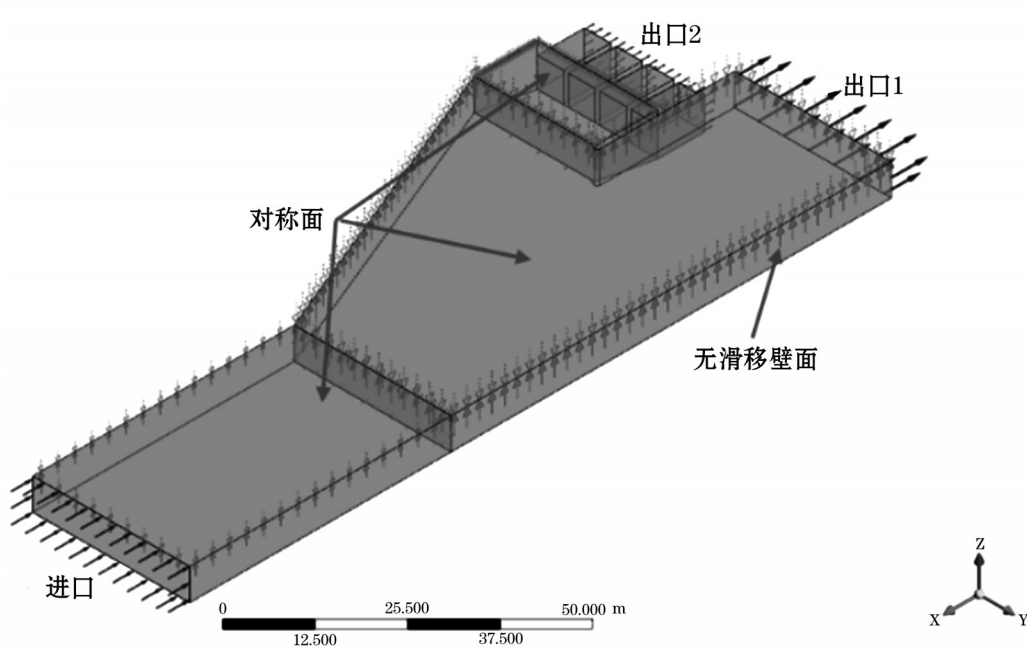


图4 边界条件

组合对航道通航能力的影响。研究方案如表1所示。

泵站开机运行,势必会对航道横流速度产生影响,当航道横流向流速大于0.3 m/s,会对船舶横向航行产生不利影响。因此,本文重点研究了泵站开机组合对航道横流向流速的影响。于是,对研究对象计算域划分了3个水平剖面,分别为表层、中层和底层。

表1 研究方案

方案	开机组合	备注
1	0台机组运行	0
2	2台机组运行	2#、3#
3	3台机组运行	2#、3#、4#
4	4台机组运行	1#、2#、3#、4#

3 结果分析

3.1 三维流态分析

图5显示了不同开机组合方案下航道内的三维流线及速度矢量图。当泵站机组未开机运行时,前池前方航道内存在低速偏流现象,而靠近航道侧隔墩前缘附近则有高速区,主航道内流线较为平顺。当泵站机组开机运行时,前池前方航道内的流线偏流程度有所减弱,且开机台数越多,流线越平顺。此外,航道内的高速区仍集中在隔墩前缘附近。因此,船舶在航行时,应尽量远离隔墩。

3.2 横向流速分析

图6展示了泵站机组不运行工况下航道内的二维速度矢量及横向流速云图。从图6可以看出,在泵

站机组不运行时,航道内大部分区域的横向流速低于 0.3 m/s (图中灰色区域)。横向流速大于 0.3 m/s 的区域主要集中在隔墩和航道左岸扩散段区域。其中,底层、中层和表层横向流速大于 0.3 m/s 的区域面积分别为 645.90 m^2 、 649.94 m^2 和 649.10 m^2 。因此,船舶必须避免在这些区域横向航行。

图7展示了泵站2台机组运行工况下航道内的二维速度矢量及横向流速云图。从图7可以看出,在2#和3#机组运行时,底层、中层和表层上横向流速大于 0.3 m/s 的区域面积分别为 652.13 m^2 、 650.69 m^2 和 649.63 m^2 。与机组不运行相比,3个特征面积分别提高了 6.23 m^2 、 0.75 m^2 和 0.53 m^2 。

图8展示了泵站3台机组运行工况下航道内的二维速度矢量及横向流速云图。从图8可以看出,

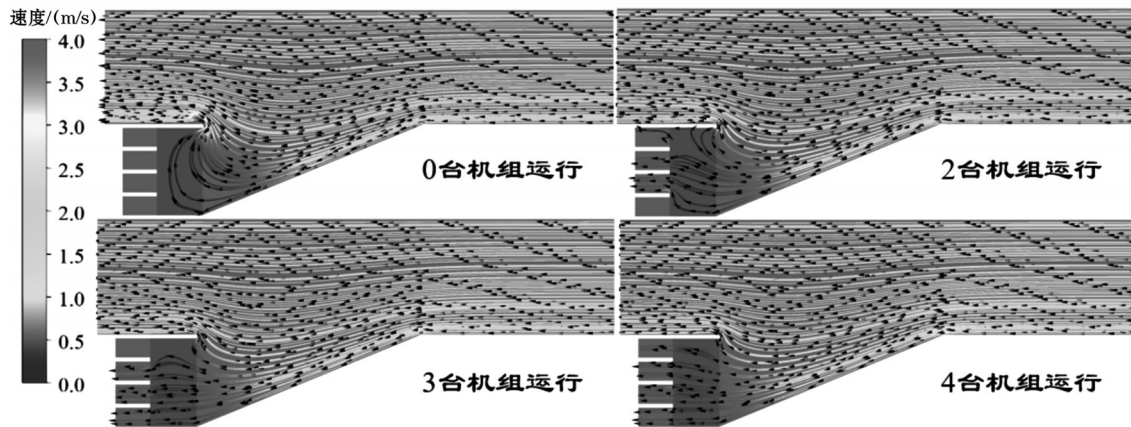


图5 不同开机组合方案下航道内的三维流线

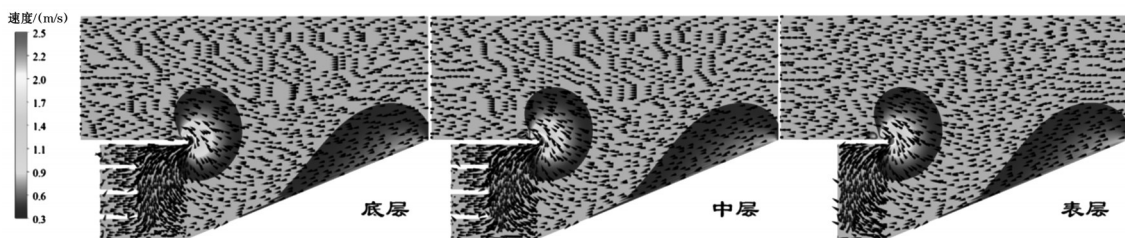


图6 0台机组运行

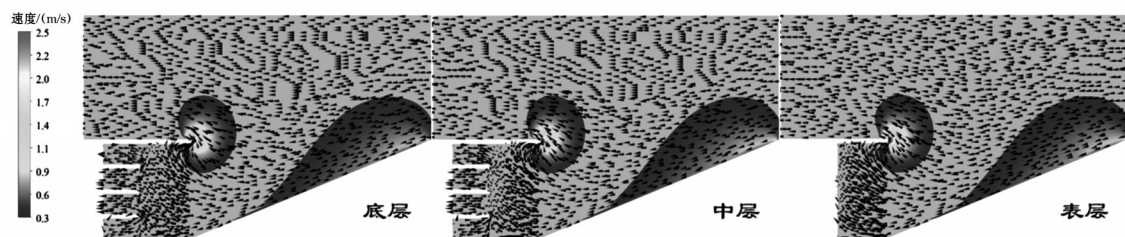


图7 2台机组运行

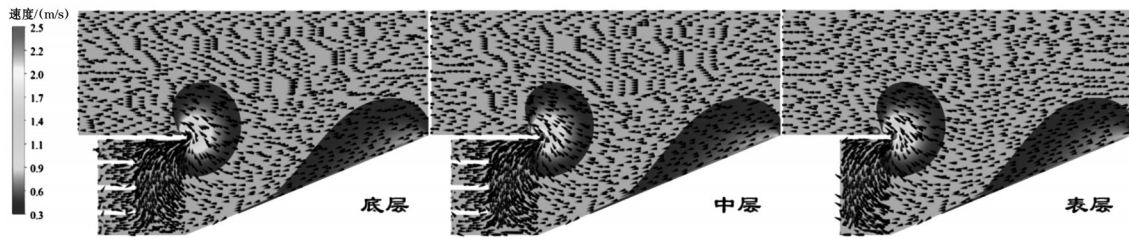


图8 3台机组运行

在2#、3#和4#机组运行时,底层、中层和表层上横向流速大于0.3 m/s的区域面积分别为661.86 m²、660.71 m²和659.39 m²。与机组不运行相比,3个特征面积分别提高了15.96 m²、10.78 m²和10.29 m²。

图9展示了泵站3台机组运行工况下航道内的

二维速度矢量及横向流速云图。从图9可以看出,在1#、2#、3#和4#机组运行时,底层、中层和表层上横向流速大于0.3 m/s的区域面积分别为678.62 m²、678.01 m²和677.30 m²。与机组不运行相比,3个特征面积分别提高了32.71 m²、28.08 m²和28.20 m²。

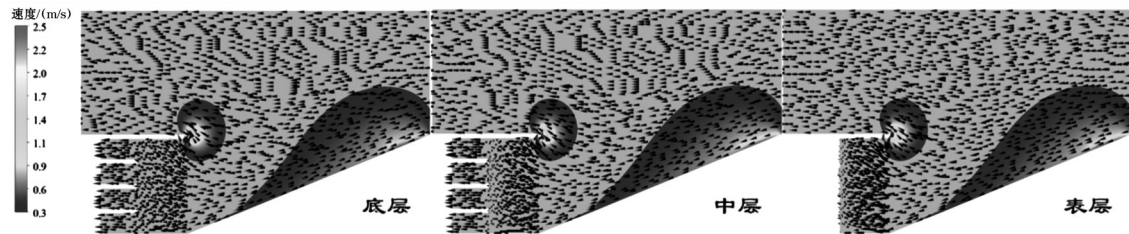


图9 4台机组运行

因此,结合图5~9,可以发现,泵站机组运行基本不影响主航道内的流态。但是,泵站开机运行会影响隔墩和航道扩散段附近的横向流速,这对船舶的安全运行具有一定的隐患。

4 结论

本文以淮河流域沂沭泗水系上的某闸站式泵站为研究对象,采用数值模拟的方法研究了泵站开机组合方式对航道通航能力的影响,得到如下结论:

(1)采用六面体网格对研究对象的水体模型进行了网格划分,并通过网格无关性检查,发现当计算域总网格超过195万时,研究对象的总水力损失基本没有变化。

(2)不同开机组合方案下,航道内的流线平顺,流速分布基本均匀,高速区集中分布在隔墩前缘附近,低速区分布在泵站前池附近。

(3)泵站开机组合主要影响航道内水体的横向流速分布。随着开机组合台数的增加,航道内横向流速大于0.3 m/s的区域面积逐渐增加。因此,建议船舶远离隔墩和扩散段航行。

参考文献:

- [1] 王福军. 水泵与水泵站[M]. 北京:中国农业出版社,2021.
- [2] 周敬林,李维,郭玉. 渠江风洞子枢纽船闸水工整体物理模型试验研究[J]. 中国水运,2024(6):137-139.
- [3] 张波. 垂直入汇流量控制及航道水流条件综合研究[J]. 水运工程,2024(5):110-115.
- [4] 钟林斌,陈玉梅,黄毓斌,等. 双线船闸分水墙体型对下游引航道水流条件的影响研究[J]. 西部交通科技,2023(12):28-30,66.
- [5] 李恒昌,段君邦,冯仲林,等. 平陆运河青年船闸通航水流条件优化方案研究[J]. 西部交通科技,2023(12):25-27.
- [6] 张从从,韦爱群,李金宝,等. 基于模型试验的导流墩对闸站合建工程通航水流条件的影响研究[J]. 江苏水利,2019(4):13-17.
- [7] 杨朝辉. 弯曲河段引航道口门区水沙特性模拟研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2022.
- [8] 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.
- [9] 刘建龙,李志爽,陈书宁,等. 秦淮新河泵站前池流态改善措施研究[J]. 江苏水利,2024(12):24-29.