

控藻井对泵站进水流态影响分析

陈洪程¹, 张凡希¹, 周静姝¹, 钱文康¹, 金燕²

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127; 2. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为了消除控藻井工程对泵站进水流态的不利影响, 基于CFX软件, 运用雷诺时均N-S方程和RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 结合多种控藻井布置形式和泵站进水侧整流措施, 研究泵站进水侧三维流动形态及特征断面上水力参数。通过结果可知, 一字型导流墙不适合正向进水条件的泵站整流, 两道底坎方案时水流条件最佳, 前池整体流速控制在0.95 m/s以内, 水流流态较为平顺, 3台机组进口断面流速接近, 湍动能数值较低, 流速均匀度数值较原始方案平均提高了10.7%, 速度加权平均角度平均优化了4.6°。

关键词: 控藻井; 整流; 水力性能; 数值模拟

中图分类号: TV675

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2023)08-0001-0005

Analysis of influence of algae control well on inlet flow regime of pumping station

CHEN Hongcheng¹, ZHANG Fanxi¹, ZHOU Jingshu¹, QIAN Wenkang¹, JIN Yan²

(1. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China;

2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to eliminate the adverse effects of algae control well engineering on inlet flow regime of the pumping station, based on CFX software, the three-dimensional flow regime of the pumping station intake side and hydraulic parameters on the characteristic section are investigated by applying the Lei Loh time-averaged N-S equations and the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model in combination with a variety of algae control wells arrangement forms and pumping station intake-side flow rectification measures. It can be seen from the results that the one-type guide wall is not suitable for the rectification of the pumping station with positive inlet conditions, and the water flow conditions are optimal in the case of the two-bottom-can scheme, with the overall flow velocity of the forebay pool controlled within 0.95 m/s, the water flow regime is smoother, the flow velocity of the three units in the inlet section is close to the same, and the turbulence kinetic energy values are lower, the flow velocity uniformity values are increased by an average of 10.7% compared with that of the original scheme, and the velocity-weighted average angle is optimized by an average of 4.6°.

Key words: algae control well; rectification; hydraulic performance; numerical simulation

夏季为蓝藻爆发期, 水体中蓝藻密度较高, 泵站引水时受蓝藻影响, 水质常为IV类或劣V类, 无法向城区引水, 严重影响城区水环境。蓝藻的沉浮

主要是由藻细胞内的伪空泡通过充气及释气来实现^[1]。通过试验观察发现0.5~0.7 MPa压力下, 细胞内伪空泡将被压瘪, 蓝藻失去浮力沉降, 无法进行

收稿日期: 2023-06-05

作者简介: 陈洪程(1992—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水利规划与设计工作。Email: chenhc_yz@163.com

光合作用,继而丧失繁殖能力^[2-3]。采用挡墙隔断外河,利用推流器将受蓝藻污染的水从控制井内管输送至井底,通过水柱产生的静水压力,将蓝藻群体拆解,并破坏其气囊结构,使其失去活性,再从外管及横管输送至泵站进水池,从而有效改善泵站引水的水源水质^[4]。

由于控藻井工程改变了泵站的进水条件,进水池中需采用必要的整流措施。目前国内外针对泵站进水池整流措施已经比较成熟,罗灿等研究了泵站正向进水池底坎整流机理^[5];奚斌等分析了导流墙、Y型导流墩和导流坎组合式整流措施效果^[6];张娟等通过切滩处理有效改善泵站进水侧流态^[7]。为探讨控藻井布置形式和泵站进水池整流措施结合的最优方案,本文采用三维紊流模拟技术,对泵站进水池流态及水力性能进行数值模拟,确保泵站安全稳定运行。

1 数值计算

1.1 控制方程

考虑控藻井及泵站进水池内的不可压缩湍流流动,并且该流动存在较大曲率和旋转,将RNG方法用于雷诺时均的Navier-Stokes方程并且引入湍能和耗散率^[8-9],得到控制方程如下:

连续方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

式中: u 为流速; t 为时间; p 为压强; ρ 为密度; ν 为黏性系数。

$k-\varepsilon$ 模型方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\nu_t S_{ij} S_{ij} - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \nu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - R + 2c_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t S_{ij} S_{ij} - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: k 为湍动能; ε 为湍动耗散; R 为附加项; c 为模型常数, $c_1=1.42$, $c_2=1.68$; α_k 、 α_ε 为有效普朗克数, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$; S 为应变率张量的范数。

1.2 计算区域及边界条件

应用UG NX软件建立包含引河道、控藻井、输水管道及泵站进水池的三维计算域。该泵站设计运行水位1.83 m,水深2.84 m,共安装有3台贯流泵

机组,单机设计流量5 m³/s。本文对设计工况进行全流场三维数值模拟。计算域进口取距离泵站进口210 m的引河道断面,采用质量流进口,流量为15 m³/s。出口取3台机组进水流道断面,采用平均静压。计算域中水位变化幅度较小,不会产生太多气液混合体,故液面采用刚盖假定。近壁处采用scalable壁面函数法^[8]。采用SIMPLE进行压力和速度的耦合计算。

1.3 网格划分及无关性检验

由于计算域结构不规则,在Mesh中采用适应性强的四面体非结构化网格进行网格划分,控藻井部位进行了局部网格加密处理。为保证数值模拟的高效及准确,进行计算域网格无关性分析,以进出口的水力损失为衡量标准^[11-12],计算了5组网格方案的相对误差见图1,由图1结果可知:当网格数超过410.3万时,水力损失误差极小,该网格数量已满足数值计算要求。

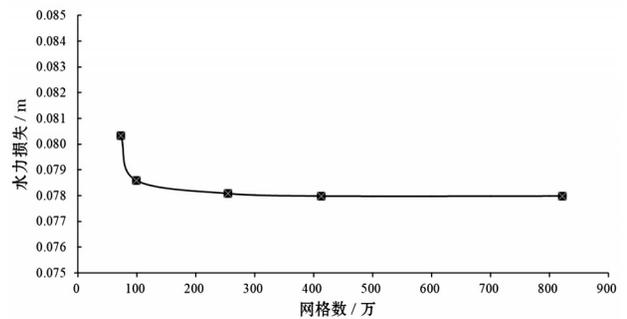


图1 不同网格数下的水力损失

2 方案比选

针对原始方案进水条件恶劣,回流区较大,偏流严重问题,本文采用弧形墙束窄引河道,切滩处理废弃支流,并结合导流墙、底坎等整流措施提出了3种控藻井布置和进水池整流组合方案^[13-15]。各方案措施详见表1,各方案三维模型见图2。方案二~四采用的弧形翼墙,虽然缩进了3座控藻井之间距离,但依旧满足控藻井最小间隔距离要求。

表1 整流设计方案

方案编号	挡墙形式	整流措施
一	直墙	无措施
二	弧形墙	底坎
三	弧形墙	导流墙+底坎+切滩
四	弧形墙	双底坎+切滩

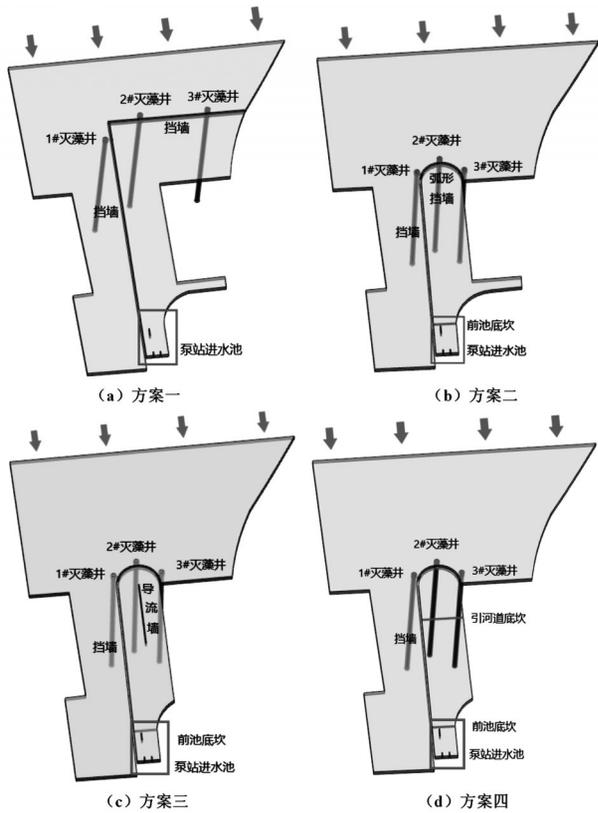


图2 4种方案整流措施布置

3 计算结果

3.1 三维流态分析

由图3可知,原始方案由于控藻井布置比较分散,其中1台是侧向出水,导致河道内流态非常紊乱,尤其在挡墙后空旷水域,产生了大范围的多个旋涡,位于河道束窄段的旋涡流速最大,达到1.3 m/s。进水池内存在严重的偏流情况,两侧的水流流速差别较大,长期运行会导致挡墙侧冲刷严重,而河岸侧淤积恶化。

方案二采用弧形翼墙,充分利用河道空间布置灭藻井,降低了河道中旋涡的能量,避免了对河道及岸坡的冲刷。但由于引河较宽,同时泵站前池相对较窄,河道束窄段产生了较严重的偏流情况,同时在支流处产生了较大的旋涡。虽然经过前池底坎的翻滚消能起到了一定整流作用,流态得到一定改善,但水流未能充分扩散,边机组前池流态依然较差,稳定的涡带进入机组,会引起机组的汽蚀和振动,不利于机组的安全稳定运行。方案三的导流墙结合底坎方案一定程度上降低了进水池内水流的平均流速,并且通过切滩的措施,解决了废弃支

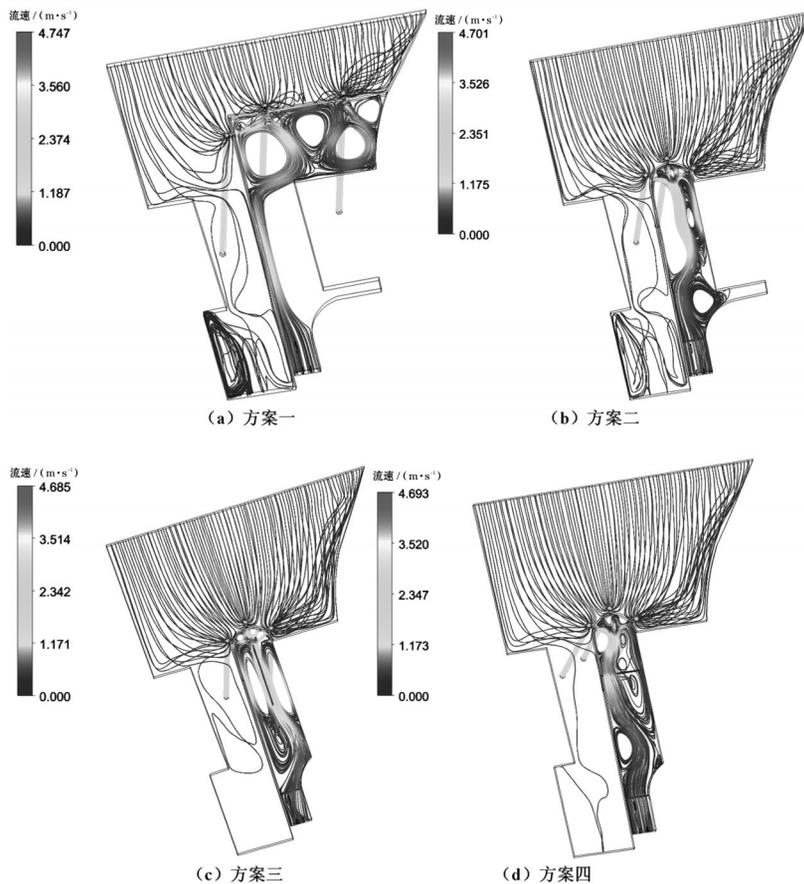


图3 流场

流处回流现象,使得进水池水流偏移情况得到一定改善。但导流墙两侧形成了较大范围的旋涡,旋涡流速较大,接近2 m/s,并且导流墙过后,水流并未恢复顺着状态,再次产生了偏流现象,整流效果不佳。因此正向进水条件下,不太适合采用导流墙整流。

方案四总结了方案二、三的优缺点,保留了弧形翼墙和切滩措施,采用双底坎的整流设施,进一步解决进水池中明显的二次流现象。由结果可知,水流通过两道底坎后,水流通过坎后翻滚运动,使得水流产生紊动能交换,破坏水流原有紊流流动形态,第一道底坎后水流虽有小范围旋涡产生,但明显流速降低,弧形挡墙到进水池底坎位置的水流中最大流速在0.8 m/s,进水池中水流最大流速在0.3 m/s。第二道底坎后流态得到有效调整,流线顺直,流速比较合理,速度矢量有所优化。泵站前池中水流相对稳定顺直,3台机组之间没有明显的抢水情况,预计都能达到理想的设计工况。

3.2 特征断面分析

如图4所示,选取2个断面分析各方案进水侧的流态。中层断面用来研究进水侧内部流态,泵站进口断面用来研究进水流道前的流态。由图5可知,原始方案进水池中层流流速度集中在0.47至1.42 m/s,流速矢量混乱,流速大小不均,控藻井出口处局部流速较大,最大流速达到4.75 m/s,进水池中两侧流速较大,中间流速较小,存在大范围的回流现象,并对两侧结构产生冲刷。方案二进水池内流速分布还是不均,但水流流速得到一定的控制,泵站前池水流流速均在0.47 m/s以下。方案三水流流向得到一定调整,但泵站前池中存在局部流速偏大问题,达到0.95 m/s,说明存在中间机组流量偏大,两侧边机组流量较小问题,机组难以达到高效运行工况。方案四采用双底坎方式,第一道坎后水流流

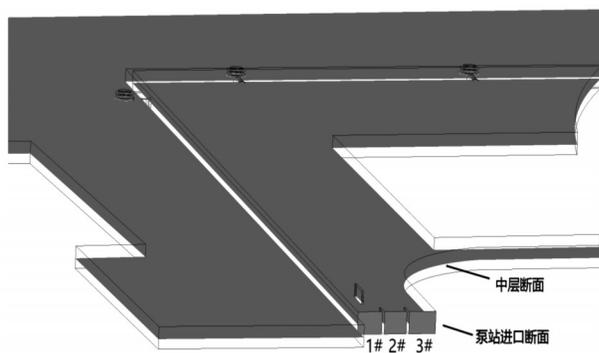


图4 特征断面选取

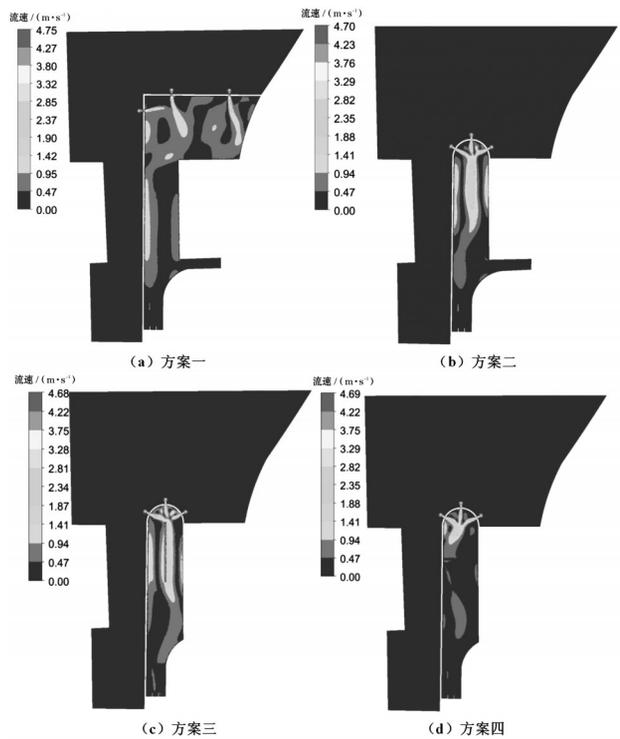


图5 流速分布云图(中层断面)

速就已经明显降低,流向基本垂直于过水断面,经过第二道底坎后断面上水流流速基本平均,整流方案对流速控制比较合理。

由图6断面流速分布可知,进口断面流速整体呈现断面上部流速大,下部流速小的情况,断面最大流速达到0.54 m/s,流速范围比较满足泵站进水条件。但前3种方案都存在3台机组流量分布严重不均的情况,中间机组流量大,两侧边机组流量小,不利于泵站高效稳定运行。方案四流速分布最均匀,抢水情况得到明显改善。由图7湍动能分布情况可知,方案一的3#机组高能量区域较大,反应了3#机组进水断面处湍流运动比较剧烈,空泡较多。方案二及方案三则在2#机组处出现该现象,但整体的湍动能数值相较方案一有所降低。方案四并未出现湍动能数值局部较大情况,3台机组之间湍动能差异不大,说明整体进水条件较好。

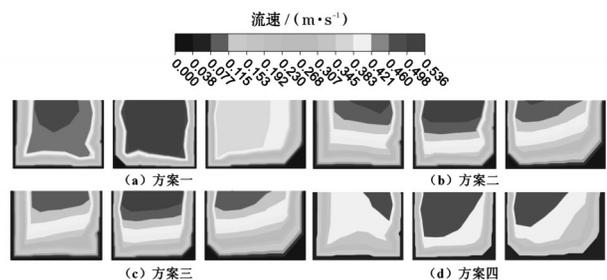


图6 流速分布云图(进口断面)

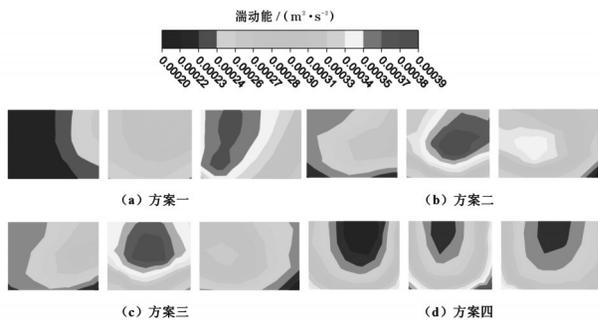


图7 湍动能分布云图(进口断面)

3.3 特征流动参数分析

泵站进水侧流态的分析除了流线的定性分析以外,还应采用特征流动参数进行定量分析。即采用“法向流速均匀度”和“速度加权平均角”作为优化整流措施的目标函数。 $\bar{V}_u = 100\%$ 和 $\bar{\theta} = 90^\circ$ 为理想数值。在无法达到理想值的情况下,优化计算的目标是取得满足工程实际需要的最优数值^[16]。

流速分布均匀度:

$$\bar{V}_u = \left[1 - \frac{1}{u_a} \sqrt{\frac{\sum (u_{ai} - \bar{u}_a)^2}{m}} \right] \times 100\% \quad (5)$$

式中: \bar{u}_a 为平均法向速度; u_{ai} 为各单元的法向速度; m 为该断面所划分的单元个数。

速度加权平均角度:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum u_{ai} \left[90^\circ - \arctan \frac{u_{xi}}{u_{ai}} \right]}{\sum u_{ai}} \quad (6)$$

式中, u_{xi} 为各单元的横向速度。

仍选取泵站进口断面进行流动参数研究。由图8可知,四个方案下3台机组的平均断面法向流速均匀度的依次为78.3%、84.6%、83.2%和89.0%。原始方案的3台机组流速均匀度极差最大为14%,方案二极差为2%,方案三极差为8.8%,方案四极差最小为1.5%。由此可知,方案四的断面流速均匀度最好,比较接近100%,满足工程水力优化需求。其数值最小的2#机组流速均匀度也达到了88.1%,并且3台机组的差异较小,表明该方案下特征断面的水流流速分布最为均匀,3台机组的进水条件均得到了较好的优化,能够满足各机组在设计工况下的高效稳定运行。

由图9对比4个方案下3台机组的速度加权平均角可知,4个方案的速度加权平均角的平均值分别为74.4°、75.3°、73.4°和79°。方案三时3台机组的进水断面速度加权平均角度最小,其中3#机组最优

为76°,2#机组最差仅有71°,其2#机组进水流道中很可能会产生旋涡,流向比较复杂,易导致装置进水条件差,机组效率低下,甚至引发机组振动等安全问题。方案一和方案二情况下,3台机组的加权平均角度有所增大,水流流向相对较好,但整体方案较理想状态差距依旧较大,偏离法向方向较大。方案四情况下,3台机组均为断面水流加权平均角度的最优情况,速度加权平均角的平均值接近80°,与前3个方案相比,水流流向调整最佳,符合进水流道水力设计目标函数要求。

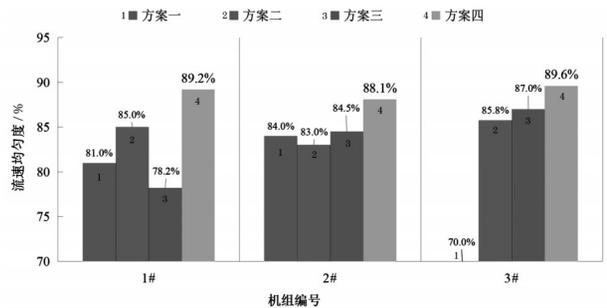


图8 法向流速均匀度

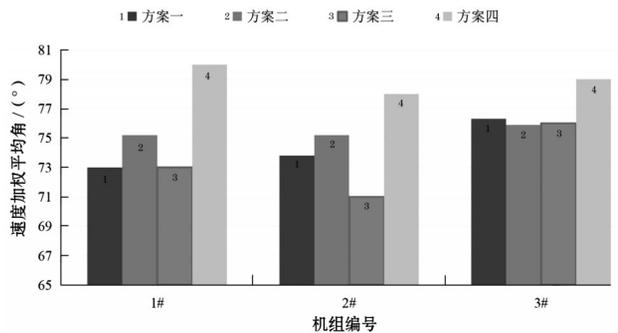


图9 速度加权平均角

4 结 语

(1)原方案中,泵站进水池存在大范围回流区,水流紊乱,通过将直墙改善为弧形墙,既优化了控藻井布置形式,也避免了河道突然束窄产生的水流流态不利影响。

(2)正向进水条件下,不太适合采用“一”字型导流墙形式来解决水流偏流问题,处理效果不佳,导流墙后侧水流恢复较差,底坎处理效果更优。

(3)方案四中采用的两道底坎为最佳整流方案,3台机组进水流态均有较大提升,进口法向速度分布均匀度较原方案平均提高10.7%,速度加权平均角平均抬高4.6°。

(下转第16页)

参考文献:

- [1] 张仁田. 低扬程双向排灌站的泵型与布置型式[J]. 水利水电技术, 1994(3): 33-38.
- [2] 戴立明. 双向流道泵站的特点分析[J]. 江苏水利, 1999(7): 33-34.
- [3] 王林锁, 陈松山, 葛强, 等. 望虞河双向流道泵站泵装置特性试验研究[J]. 水泵技术, 2000(6): 32-36.
- [4] 汤方平, 刘超, 成立, 等. 低扬程水泵选型新方法[J]. 水利水电科技进展, 2001(4): 41-43, 70.
- [5] 胡秋瑾, 汤方平, 石丽建, 等. 大型立式轴流泵装置水力模型比选分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 138-144.
- [6] 刘子系, 边晓阳, 徐嘉, 等. 建设双向泵站形成新型调水引流格局[J]. 江苏水利, 2017(6): 54-57, 62.
- [7] 张建华. 浅谈双向泵站的泵型选择及其应用[J]. 水利建设与管理, 2005(5): 44-45.
- [8] 张仁田. 双向轴流泵模型装置对比试验研究[J]. 流体机械, 2003, 31(10): 1-5.
- [9] 戴立明. 双向流道泵站的特点分析[J]. 江苏水利, 1999(7): 33-34.

(上接第5页)

(4)底坎利用水流翻滚、产生紊动能交换,改变了水流原有的紊流流动结构,消掉水流大部分剩余能量,有效改善流态,降低进水断面湍动能。为后续泵站工程与控藻井工程结合布置形式提供了参考。

参考文献:

- [1] 代然, 储昭升, 于秀娟, 等. 压力下伪空泡破裂对3种水华蓝藻生长及光合作用的影响[J]. 环境科学研究, 2012, 25(1): 30-35.
- [2] 潘阳, 陈旭清, 张铮惠, 等. 压力作用后的蓝藻在太湖中的生长控制机理[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(7): 8-13.
- [3] 徐亚军, 丛海兵, 朱宸, 等. 压力作用后蓝藻混凝沉淀性能研究[J]. 给水排水, 2015(7): 123-127.
- [4] 陈洪程, 杨天立, 周静姝, 等. 新型高压灭藻井系统中潜水贯流泵装置的应用研究[J]. 水利规划与设计, 2022(4): 108-115.
- [5] 罗灿, 成立, 刘超. 泵站正向进水前池底坎整流机理数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2014(5): 393-398.
- [6] 奚斌, 郑雅珍, 段元锋, 等. 闸站结合泵站前池流态优化[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(12): 91-97, 110.
- [7] 张娟, 陈洪程, 卜舸, 等. 分汊河道多泵站进水侧整流数值模拟分析[J]. 水利水电快报, 2021, 42(8): 60-66, 72.
- [8] 王远成, 吴文权. 基于RNG $k-\epsilon$ 湍流模型钝体绕流的数值模拟[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(6): 519-523.
- [9] 张明亮, 沈永明. RNG $k-\epsilon$ 湍流模型在三维弯曲河流中的应用[J]. 水力发电学报, 2007, 26(5): 86-91.
- [10] 刘志泉, 成立, 卜舸, 等. 泵站正向进水前池“V”形导流墩整流数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 183-188.
- [11] 王琪, 朱文辰, 周济人, 等. 侧向泵站进水前池流态数值计算与优化[J]. 中国农村水利水电, 2023(1): 152-157.
- [12] 刘新阳, 高传昌, 石礼文, 等. 泵站前池与进水池整流数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(3): 242-246.
- [13] 谢传流, 汤方平, 刘超, 等. 大型立式轴流泵装置叶轮选型模型试验分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 94-99, 131.
- [14] 张贤明, 吉庆丰. 泵站前池流态的数值模拟[J]. 灌溉排水, 2001, 20(1): 35-38, 42.
- [15] 苏正洋, 陆嘉伟, 张志韬, 等. 泵站前池整流技术研究综述[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 69-75.
- [16] 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.