

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.02.002

开机组对泵站前池水沙流场特性的影响

徐存东^{1,2,3}, 李嘉明¹, 王荣荣¹, 田俊姣^{1,2}, 刘子金¹, 王 燕^{1,3}, 许 续¹

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省水工结构安全工程技术研究中心, 河南 郑州 450046;
3. 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘要:为研究开机组对多沙水源提水泵站前池水沙流场特性的影响,以景电灌区某典型泵站为研究对象,采用逆向工程技术对淤积状态下的泵站前池三维几何模型进行重构,基于 Realizable $k-\varepsilon$ 模型耦合考虑相间滑移的 Mixture 模型,采用 FLUENT 软件对淤积状态下的泵站前池开展水沙两相流数值模拟,同时对不同开机组非淤积状态下的泵站前池水沙流场特性进行数值模拟。研究结果表明:现役淤积状态下的泵站前池内部存在流态紊乱及严重的泥沙淤积问题,流态数值模拟结果与现场测流结果相吻合;现役非淤积状态下的泵站前池存在显著的主流效应且低速回流区范围较大;伴随泵站两端机组开机,前池内主流的扩散效果有所提高,流场分布趋于对称,泥沙淤积情况略有改善。

关键词: 泵站前池; 水沙流场特性; 逆向工程技术; 开机组; Realizable $k-\varepsilon$ 模型; Mixture 模型

中图分类号: TV675 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)02-0011-06

Study on the influence of the start-up combinations on the characteristics of the water-sediment flow field in forebay of pumping station

XU Cundong^{1,2,3}, LI Jiaming¹, WANG Rongrong¹, TIAN Junjiao^{1,2}, LIU Zijin¹, WANG Yan^{1,3}, XU Xu¹

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
2. Henan Provincial Hydraulic Structure Safety Engineering Research Center, Zhengzhou 450046, China;
3. Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to study the effect of start-up combinations on the flow field characteristics of water-sediment in the inflow forebay of multi-sand water source pumping station, taking a typical pumping station in Jingdian irrigation area as a research object, the three-dimensional geometric model of the forebay of pumping station in the siltation condition was reconstructed by using reverse engineering technology based on the Realizable $k-\varepsilon$ model and the Mixture model considering the phase slip. The numerical simulation of water-sediment two-phase flow in the in-situ pumping station forebay is carried out using FLUENT software and the reliability of the numerical model is verified by comparing the simulation and measured results. Based on this, the numerical simulations of the water-sand flow field characteristics of the pumping station forebay under non-siltation conditions with different start-up combinations were carried out. The results show that flow pattern disorder and serious sediment deposition exist in the forebay of in-service in-situ pumping station. The numerical simulation of flow pattern in in-situ forebay agrees well with field measurement results. The significant mainstream effect and a large low speed recirculation zone exist in forebay of in-service prototype pumping station. With the start-up of the units at both ends of the pumping station, the diffusion effect of the mainstream in the forebay is improved, the flow field distribution tends to be symmetrical, and the sediment silt situation is slightly improved.

Key words: pumping station forebay; characteristics of water-sediment flow field; reverse engineering technology; start-up combinations; Realizable $k-\varepsilon$ model; Mixture model

泵站是灌区的重要组成部分,泵站前池内部水流流态对泵站的工作效率、寿命以及各机组的进水条件等有重要影响。尤其在多沙河流中,泵站前池内的不良流态会造成前池内泥沙淤积严重,劣化泵站各机组的进

基金项目: 国家自然科学基金(51579102); 中原科技创新领军人才支持计划(204200510048); 浙江省重点研发计划(2021C03019)

作者简介: 徐存东(1972—),男,教授,博士,主要从事水工结构优化设计及耐久性研究。E-mail:xcundong@126.com

通信作者: 李嘉明(1996—),男,硕士研究生,主要从事水利水电工程研究。E-mail:1016029944@qq.com

引用本文: 徐存东,李嘉明,王荣荣,等. 开机组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.

XU Cundong, LI Jiaming, WANG Rongrong, et al. Study on the influence of the start-up combinations on the characteristics of the water-sediment flow field in forebay of pumping station[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(2): 11-16.

水条件,降低泵站运行效率及寿命,甚至导致泵站的安全事故,对附近地区的社会 and 经济发展造成严重影响^[1]。因此开展多泥沙河流泵站前池水沙流场特性的研究对提高泵站水力稳定性、降低泵站运行维护投入、保障泵站系统的高效安全运行具有重要意义。

为改善泵站前池的内部流态,国内外学者对泵站前池的水力特性及泥沙沉积规律开展了大量的研究。窦元之等^[2]采用水力模型试验法,研究了清水条件及不同来沙条件下不同扩散角方案的前池流态及泥沙淤积情况,研究表明,前池扩散角取 25° 或 30° 两种方案,对应的水流流态及防淤效果表现较好。徐存东等^[3]在对多沙水源引水的侧向进水泵站进行现场调查的基础上,引入逆向工程技术,建立了淤积状态下的泵站前池(原位泵站前池)与非淤积状态下的泵站前池(原型泵站前池)三维几何模型,分析了不同开机组合对前池流态的影响,研究表明,侧向泵站机组对称开启可改善前池流态。资丹等^[4]为解决泵站前池和进水池内的旋涡问题,构建了组合式导流墩并展开前池流态数值模拟,研究表明,组合式导流墩对前池及进水池内流态改善作用明显。刘超等^[5]针对开敞式泵站进水池,利用紊流模型对进水池及吸水管内部的水流流动状态进行数值模拟,分析了泵站进水池内水流的运动特性,提出了泵站进水池的最优设计控制尺寸。罗灿等^[6]提出了底坎、立柱、底坎+立柱等3种前池流态改进措施,并对不同导控措施下的侧向进水前池内部流态开展了模拟研究,结果表明,设立矩形底坎能显著改善前池流态。Constantinescu 等^[7]通过使用 Standard $k-\varepsilon$ 方程对前池的内部旋涡强度及其分布情况进行了数值模拟,通过对比数值模拟及模型测试得出的前池内部旋涡结构和分布情况,发现数值模拟结果与模型测试结果高度吻合,并表明数值模型的选取和不同边界条件的选择将会对旋涡强度及其分布产生较大的影响。

综上所述可知,目前针对泵站前池流场及泥沙特性所开展的研究大多采用数值模拟方法,受研究方法和手段的限制,且现有研究多是清水工况条件下的原型泵站结构流场特性研究,而针对原位泵站结构流场的研究比较匮乏,研究成果对于水源含沙提水泵站工程不具普适性。本文以景电灌区某典型正向进水泵站前池为研究对象,通过现场测量、逆向工程技术等方法,分析泵站引水含沙量和水流实际流态,同时获取原位泵站前池三维几何模型,为数值模拟探索不同开机组合对泵站前池水沙流场特性的影响提供基础。

1 现场调查

1.1 典型泵站前池概况

选取景电灌区内淤积状态具有代表性的正向进水泵站前池作为研究对象,该泵站设计流量 $6.0\text{ m}^3/\text{s}$,泵站前池设计水位为 1604.45 m ,共装备8台机组,其中1号和8号机组为备用机组,5号机组的设计流量为 $1.6\text{ m}^3/\text{s}$,对应的吸水管管径 $d=1000\text{ mm}$,其余机组的设计流量为 $0.88\text{ m}^3/\text{s}$,吸水管管径均为 $d=800\text{ mm}$ 。

现场调查发现,泵站前池内部流态分布不均,在前池两侧已形成较严重淤积,最大淤积厚度约 1.6 m ,前池过流主要依靠主流中心未发生淤积的狭窄通道,严重影响了吸水管的正常取水。景电灌区从黄河流域取水,灌区引水的年均含沙量约为 $30.0\text{ kg}/\text{m}^3$ 。对典型泵站前池内的携沙水流和已淤积泥沙进行现场采样,并通过筛分实验获取泥沙粒径分布情况,可知灌区水源中沙粒粒径在 0.075 mm 以下的占 92.3% ,中值粒径为 $d=0.025\text{ mm}$,属于极细颗粒沙土^[8]。

1.2 原位前池点云数据采集

为对原位泵站前池三维几何模型的重构提供基础图件,需对该典型泵站进行现场扫描,进而获取淤积状态下泵站前池的点云数据。通过 Leica Scan Station P30 三维激光扫描仪对淤积状态下的泵站前池开展多站点扫描,实现前池点云数据的采集工作,并通过 Cyclone 软件对已获取的点云数据进行去噪及准确度验证后获得准确的原位泵站前池点云数据^[9-10],如图1所示。

1.3 原位泵站前池现场测流

采用 HXH03-1S 超声波多普勒测速仪对实际工况下的泵站前池开展现场测流工作,测流时,泵站处于设计工况条件运行,测点选取在距后壁 2.0 m 、水深 1.0 m 处,共布置15个测点,泵站结构及

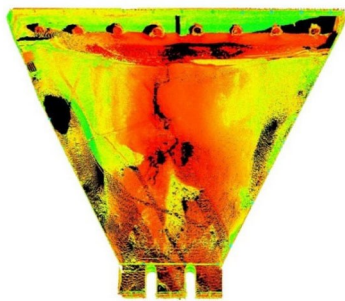


图1 原位前池点云数据

Fig.1 Point cloud data of in-situ forebay

测流点位如图 2 所示。现场测流结果经整理后可用于验证数值模型可靠性。

2 数值模型构建与验证

基于计算流体动力学(CFD)理论,采用 FLUENT 软件中的 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型耦合考虑相间滑移的 Mixture 模型进行泵站前池水沙流场特性数值模拟,其中对流项选用二阶迎风格式进行离散^[11-12],体积分数方程离散格式选择 QUICK 格式,采用基于压力修正法的 SIMPLE 算法进行流场耦合^[13],迭代残差精度不低于 10^{-3} 。

2.1 控制方程

选取 Mixture 模型对前池内部展开固-液两相流模拟,则 Mixture 模型控制方程^[14]为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = & \nabla \cdot \left[\mu_m \cdot (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T) \right] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \\ & \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k} \right) - \nabla P \end{aligned} \tag{2}$$

其中

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad \mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m} \quad \mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad \mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m$$

相对滑移速度为次相(第二项) p 对于主相(第一项) q 的速度,表达式为

$$\mathbf{v}_{pq} = \mathbf{v}_p - \mathbf{v}_q \tag{3}$$

则漂移速度与相对速度的关系为

$$\mathbf{v}_{dr,p} = \mathbf{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \mathbf{v}_{qk} \tag{4}$$

由次相 p 的连续性方程可得次相体积分数方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_m) = - \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \tag{5}$$

式中: P 为静水压力; ρ_m 为水沙两相流密度; g 为重力加速度; μ_m 为混合流黏滞性系数; F 为体积力; v_m 为两相流平均流速; ρ_m 为第 k 相的密度; $v_{dr,k}$ 为第 k 相的漂移速度; α_m 为第 k 相的体积分数; v_k 为第 k 相的流速; m_{pq} 、 m_{qp} 分别为 p 相到 q 相和 q 相到 p 相的质量传递。

2.2 边界条件和初始条件

由于前池尺寸及泵站流量已知,则前池进口边界按速度边界条件设置,进口流速经计算后确定为 0.911 m/s ;出口水流流动视为全发展流动,出口边界选用 outflow 边界条件;对固壁边界,选用无滑移条件作为边界条件,并通过标准壁面函数对近壁边界进行处理;前池自由表面无大范围波动,故将前池自由表面设为 symmetry 边界^[15]。将水沙两项流体设为计算介质,将水设为主相, $\rho_{\text{水}}=998.2 \text{ kg/m}^3$,沙设为次相, $\rho_{\text{沙}}=2740 \text{ kg/m}^3$ 。根据现场调查可知,灌区引水含沙属于极细颗粒沙土,将泥沙相视为单一粒径的均匀沙进行模拟。

2.3 原位泵站前池几何模型逆向重构与网格划分

逆向工程技术是采用相应的软件和技术将某一实物通过精确光学仪器扫描获得的点云数据进行处理,并借助一定的三维几何模型构建方法对该物体的 CAD 模型进行重构的过程^[16]。

通过借助逆向建模软件 Geomagic warp 将处理后的原位泵站前池点云数据进行曲面修补、重建,获得原位泵站前池三维几何模型,通过 ICEM 软件进行结构完善,计算域模型如图 3 所示。网格划分中,吸水管网格类型选用结构化网格,其余部位选用非结构化网格进行划分^[17],以计算域内入口至进水池段的水流头损失进行模拟结果网格无关性检验,在综合考虑模拟精度以及经济性问题后确定网格数,共 2 286 622 个,

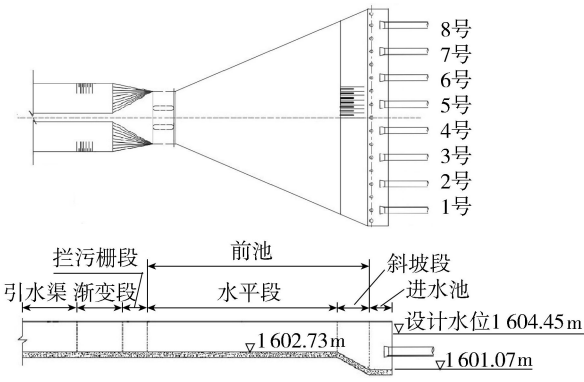
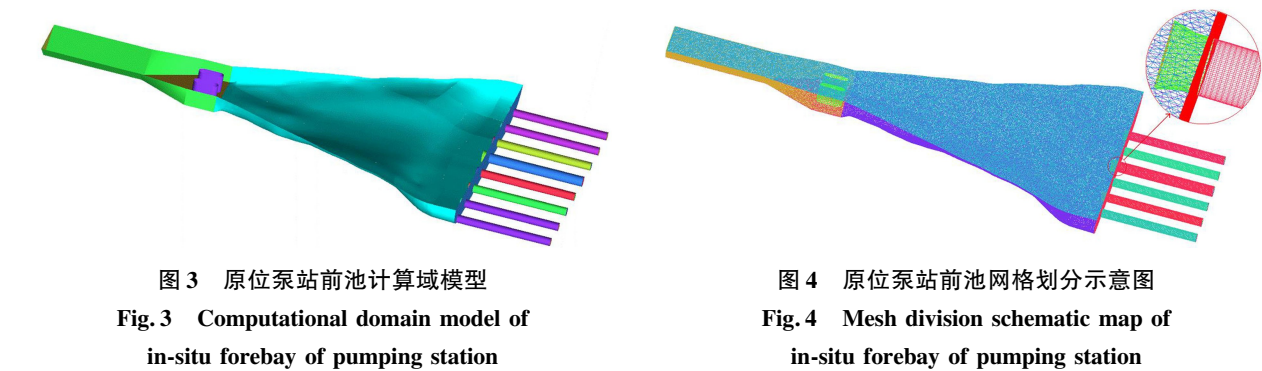


图 2 泵站前池结构及测流点位示意图
Fig. 2 Structure of forebay of pumping station and scheme map of flow measurement point

网格划分示意图如图4所示。



3 模拟结果与分析

3.1 原位泵站前池流场水沙特性模拟分析

通过模拟得出以设计水位高程为基准的原位泵站前池不同水深特征断面流速分布矢量图,如图5所示。

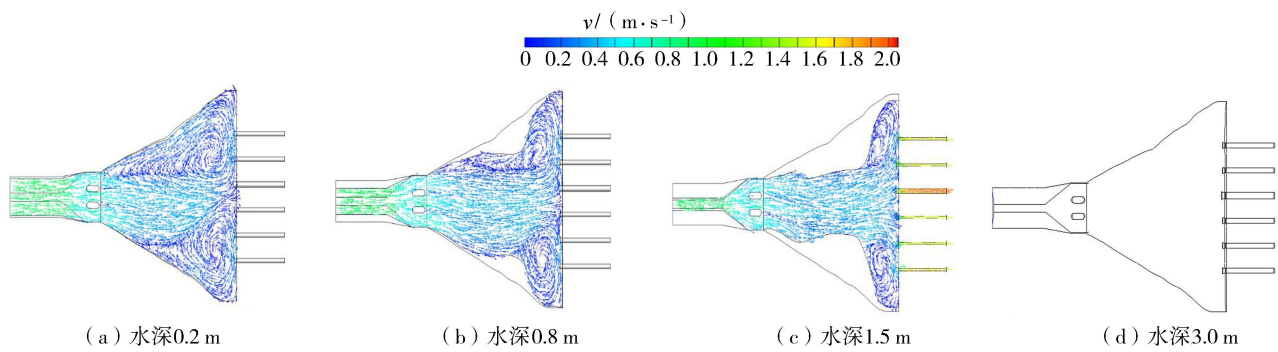


图5 原位泵站前池不同水深流速分布矢量图

Fig.5 Velocity distribution map of in-situ forebay of pumping station with water depth

分析图5(a)可知,泵站原位前池表层水流由于受机组流量布置不均匀及前池内泥沙淤积的影响,整体流速较低,主流有严重偏右趋势且扩散效果较差,前池两侧形成大范围不对称旋涡回流区,且旋涡中心接近前池中部区域,使主流无法流至进水池段;分析图5(b)(c)可知,中层断面上,前池两侧所淤积的泥沙已占据部分过水通道,前池内过水通道明显变窄,水流流速较表层有所提升,但依旧有严重的右偏情况存在,旋涡回流区面积有所减小并向前池末端转移,主流可扩散至进水池段;分析图5(d)可知,泵站进水池深层区域无流速分布情况显示,其原因为进水池深层空间已被泥沙完全占据,水流无法通过,故课题组对原位泵站前池内部近底泥沙淤积特性展开了进一步模拟,模拟结果如图6所示。

分析图6可知,原位泵站前池的底层空间和前池两侧的中下层空间已被泥沙淤积体占据,同时,通过对图5的分析可知,原位泵站前池内的低速旋涡回流区范围随着水深的增加而逐渐减小,由于低流速水流的挟沙能力远低于高流速水流挟沙能力,故原位泵站前池内深层的泥沙淤积情况较表层相对严重。数值模拟结果与现场调查结果基本吻合,初步验证了数值模型的可靠性。

3.2 数值模型分析验证

将模拟结果与现场测流相同点位的流速值进行

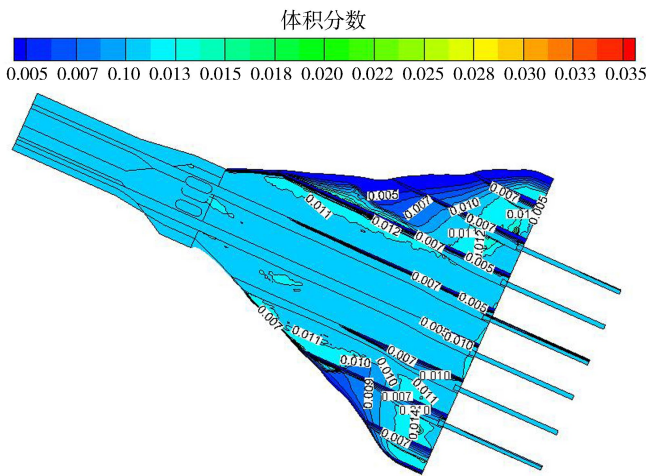


图6 原位前池近底泥沙体积分数分布

Fig.6 Volumetric fraction distribution near the bottom of sediment of in-situ forebay of pumping station

对比,结果表明,数值模拟结果各点位流速值与现场实测值吻合度较高。利用平均绝对误差分析法^[18]和均方根误差分析法^[19]对数值模型模拟结果开展误差分析,计算结果分别为 0.183 和 0.029,综合以上分析,本文选用的数值模型满足精度要求,可用于进一步的模拟研究。

3.3 不同开机组合的原型泵站前池水沙流场特性模拟分析

为研究不同开机组合对原型泵站前池水沙流场特性的影响,共设计 4 种不同的开机组合方案,其中方案 1 为设计工况,方案 2~4 的备用机组分别为 2 号和 7 号机组、3 号和 6 号机组以及 4 号和 6 号机组。针对原型泵站前池,采用与原位泵站前池相同的网格划分方案,经网格优化和无关性验证后,单元格总数为 2810459 个。选取水深 1.5 m 为研究断面,通过数值模拟获取不同开机组合下的流速分布矢量图及近底泥沙体积分数分布图,如图 7、图 8 所示。

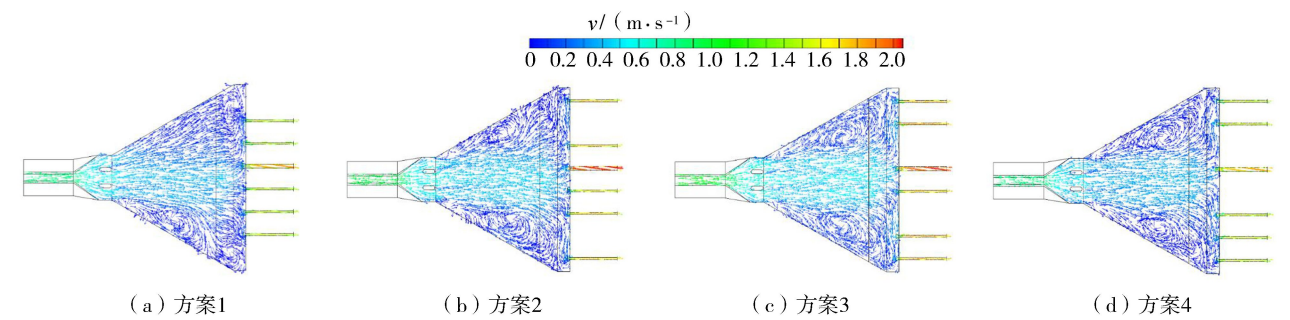


图 7 不同开机组合下原型泵站前池水流流速分布矢量图

Fig.7 Flow velocity distribution map of in-suit forebay of pumping station under different start-up combinations

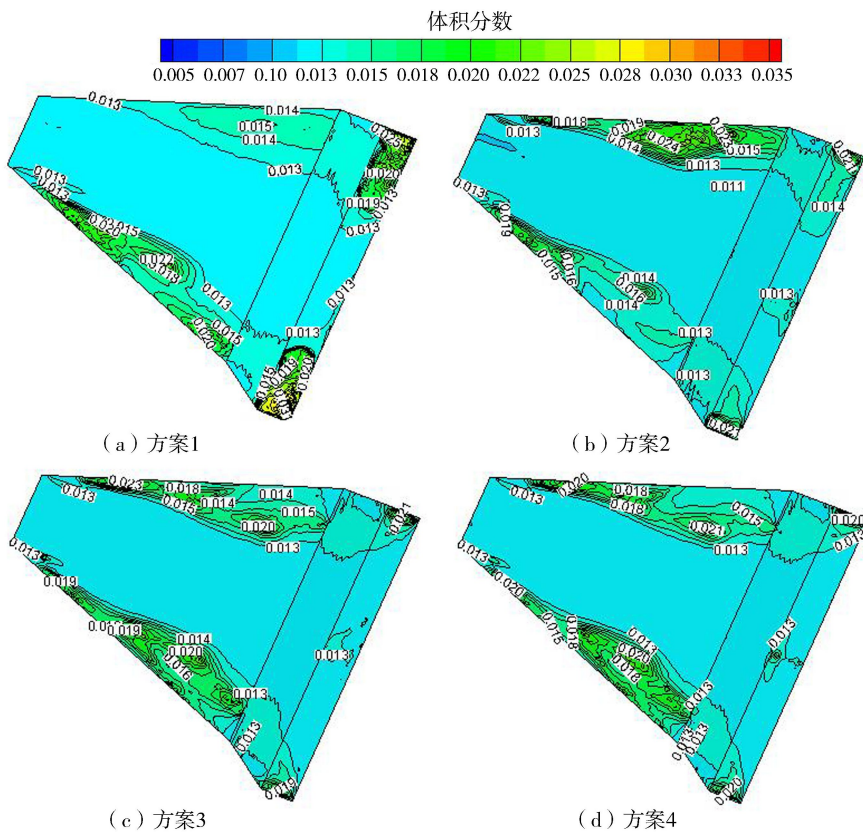


图 8 不同开机组合下原型泵站前池近底泥沙体积分数分布

Fig.8 Volumetric fraction distribution of sediment near the bottom of in-suit forebay of pumping station under different start-up combinations

由方案 1 的模拟结果分析可知,泵站前池内流态较紊乱,流场分布不对称,主流略微向右偏移,水流流速较低,前池内泥沙大量淤积于前池右侧大范围低速回流区,由于两端机组未开启,在进水池两端泥沙淤积明显并向进水池中部延伸,且其余机组前的水流方向与吸水管方向均存在一定夹角,严重恶化了机组进水条件。

分析方案2、3模拟结果可知,随着泵站机组逐渐向两端开启,流量分布逐渐趋于均衡,前池内主流右偏趋势有所好转,流场分布趋于对称,水流流速有所提升,泥沙淤积明显区域依旧在前池内低速旋涡回流区。与方案1相比,前池及进水池内泥沙淤积强度和范围以及低速回流区面积有所减小,主流的扩散效果略有提升,但各机组前的水流与吸水管之间的夹角仍较大,进水条件依旧较差。

分析方案4模拟结果可知,与前3种方案相比,由于只将开启5号机组作为中间机组,流量分布更加均衡,前池内流态进一步改善,流场分布对称性良好,主流无偏移且扩散效果有所提高,泥沙淤积强度和范围与2、3方案相比略有减小,同时,进水池内水流方向与吸水管道进水方向之间的夹角有所减小,各机组进水条件略有改善。

综合以上分析,对于原型泵站前池,在设计工况下,前池内部流态紊乱,存在较严重的不良流场,泥沙淤积情况也较严重,随着泵站两端机组的对称开启,前池内流场和流态均有所改善,泥沙淤积强度和范围有所减小,但由于低速旋涡回流区的存在,泥沙淤积问题无法彻底解决。相对于以上4种不同的开机组合方案,方案4从前池流态以及泥沙分布情况上均表现出一定优势,这一结果对多机组泵站的机组布置设计具有一定的指导意义。

4 结 论

a. 利用现场实测及逆向工程技术等方法获得了原位泵站前池三维几何模型,并对其进行水沙流场特性数值模拟,模拟结果与现场调查结果吻合。通过对原位泵站前池模拟结果与现场测流结果进行分析比较,定量验证了数值模型在本次研究中的可靠性,表明本文所采用的数值模型模拟结果可较为准确地模拟泵站前池内的流场。

b. 分析不同开机组合方案下进行的原型泵站前池水沙流场特性模拟结果可知,随着开机运行机组逐渐向两端布置,整体的流场结构趋于对称,流态有微弱改善,主流扩散效果有所提升,泥沙淤积范围有所减小,结果表明应尽量保持机组对称开启且保证开启两端机组。

c. 对于该典型泵站正向前池,通过改变开机组合的方式虽对原型泵站前池的水沙流场特性具有一定的改善作用,但效果不明显,可进一步考虑开展前池长度、扩散角、底部纵坡等其他结构因素以及相关工程措施对原型泵站前池水沙流场特性影响的研究。

参考文献:

- [1] 王福军,唐学林,陈鑫,等. 泵站内部流动分析方法研究进展[J]. 水利学报,2018,49(1):47-61. (WANG Fujun, TANG Xuelin, CHEN Xin, et al. A review on flow analysis method for pumping stations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1):47-61. (in Chinese))
- [2] 窦元之,顾靖超,陆立国. 高含沙水泵站前池扩散角试验与分析[J]. 中国农村水利电,2020(5):114-119. (DOU Yuanzhi, GU Jingchao, LU Ligu. Test and analysis of diffusion angle of front pool of high sand water pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(5):114-119. (in Chinese))
- [3] 徐存东,王荣荣,刘辉,等. 多泥沙河流侧向进水泵站开机组合对前池流态的影响研究[J]. 水利学报,2020,51(1):92-101. (XU Cundong, WANG Rongrong, LIU Hui, et al. Research on the influence of start-up combinations on the flow pattern in forebay of side-inlet pumping station on sandy river[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(1):92-101. (in Chinese))
- [4] 资丹,王福军,姚志峰,等. 大型泵站进水流场组合式导流墩整流效果分析[J]. 农业工程学报,2015,31(16):71-77. (ZI Dan, WANG Fujun, YAO Zhifeng, et al. Analysis of rectification effect of combined inflow pier in large pumping station inlet water field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16):71-77. (in Chinese))
- [5] 刘超,成立,汤方平,等. 水泵站开敞进水池三维紊流数值模拟[J]. 农业机械学报,2002(6):53-55. (LIU Chao, CHENG Li, TANG Fangping, et al. Numerical simulation of three-dimensional turbulent flow for opening pump sump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002(6):53-55. (in Chinese))
- [6] 罗灿,刘浩,施伟,等. 双侧向进水泵站前池流态数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2020(11):121-128. (LUO Can, LIU Hao, SHI Wei, et al. Numerical simulation of flow pattern in forebay of double lateral pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(11):121-128. (in Chinese))
- [7] CONSTANTINESCU G S, PATE V C. Role of turbulence model in prediction of pump-bay vortices[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(5):387-391.