

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.008

旋流沉砂池除砂特性分析及优化

张睿,江扬阳,谢锋,李广磊,冯建刚,徐辉

(河海大学农业科学与工程学院,江苏南京 211100)

摘要:为研究旋流沉砂池的流动特性,提升其除砂效率,以某污水泵站初步设置的旋流沉砂池为研究对象,基于数值模拟方法,采用 RSM 模型和 DPM 模型分析了旋流沉砂池的流动特性和除砂效率,针对其存在的不足提出了增加导流板的结构优化方案,并对不同长度导流板方案进行了对比分析。结果表明:在壁面阻挡和搅拌桨叶片旋转产生的水平环流和立面环流作用下,水流在旋流沉砂池内呈现螺旋形;水流在沿进水渠道进入池体时,对池体内的旋转水流产生冲击,流速较大的进流在压差作用下向池心偏移,容易将靠近池心的砂粒重新卷走,影响旋流沉砂池的除砂效果;在进水池渠道末端增设导流板能够有效减小进流对沉砂池内旋转水流的冲击,并使撞击到导流板的水流向折回到池底,从而提高除砂效率;3 种导流板方案中导流板长度为 2 000 mm 的方案除砂效果较优,相较于初始方案,对 0.10、0.15、0.20 mm 粒径砂粒的除砂效率分别提升了 7%、11%、2%。

关键词:旋流沉砂池;除砂效率;流动特性;砂粒轨迹;导流板;数值模拟

中图分类号:TU992.25

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2024)06-0053-07

Analysis and optimization of sand removal characteristics of vortex-type grit chamber

ZHANG Rui, JIANG Yangyang, XIE Feng, LI Guanglei, FENG Jiangang, XU Hui

(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To study the flow characteristics of the vortex-type grit chamber and improve the sand removal efficiency, the flow characteristics and sand removal efficiency of the vortex-type grit chamber initially set up in a sewage pumping station were analyzed by RSM model and DPM model based on the numerical simulation method. In view of the shortcomings of the vortex-type grit chamber, the optimization scheme of adding deflector plate were proposed, and the flow characteristics and sand removal efficiency of deflectors in different schemes with different lengths were compared. The results show that the water flow in the vortex-type grit chamber presents a spiral shape due to the horizontal circulation and elevation circulation caused by wall barrier and impeller blade rotation. When the water flow enters the pool along the inlet channel, it has an impact on the rotating water flow in the pool body, and the inlet flow with high velocity shifts to the center of the pool under the action of pressure difference, which easily rolls away the sand particles near the center of the pool, affecting the sand removal effect of the vortex-type grit chamber. Adding a baffle at the end of the inlet channel can effectively reduce the impact of the inlet flow on the rotating water flow in the sand settling basin and make the water flow that hits the baffle turn down to the bottom of the pool, thus improving the sand removal efficiency. Comparing the three baffle schemes, the sand removal effect is better when the length of the baffle is 2000 mm. The sand removal efficiency of 0.10, 0.15, 0.20 mm sand particles increased by 7%, 11% and 2%, respectively.

Key words: vortex-type grit chamber; sand removal efficiency; flow characteristics; sand particle trajectory; deflector plate; numerical simulation

随着我国土地资源开发利用强度增大,地表冲刷、水土流失等问题愈发严重,城市污水中的砂粒含量显著增大。作为水体的主要污染物之一,砂粒在水体的迁移、流动以及汇集过程中不可避免地混入其中^[1]。为避免砂粒对污水泵站正常运行产生危害,必须对污水进行预处理以去除水中砂粒^[2]。沉砂池是一种有效去除水中砂粒以及密度较大的无机、有机颗粒的构筑物,因具有占地面积小、除砂效率高、操作环境好、全封闭利于除臭以及设备运行可靠等优点,逐渐得到了广泛应用^[3-4]。

基金项目:国家自然科学基金项目(51809081);江苏省创新支撑计划国际科技合作项目(BZ2023047)

作者简介:张睿(1984—),男,副教授,博士,主要从事泵站工程水力优化研究。E-mail: gulie1984@163.com

通信作者:冯建刚(1976—),男,教授,博士,主要从事工程水力学研究。E-mail: jgfeng@hhu.edu.cn

引用本文:张睿,江扬阳,谢锋,等.旋流沉砂池除砂特性分析及优化[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):53-59.

ZHANG Rui, JIANG Yangyang, XIE Feng, et al. Analysis and optimization of sand removal characteristics of vortex-type grit chamber [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 53-59.

国内外诸多学者对旋流沉砂池内部流动特性及除砂效率影响因素进行了广泛研究^[5-9]。Lu 等^[10]结合试验与数值模拟方法,得到了比氏旋流沉砂池内无机悬浮固体沉降效果最佳的水力停留时间和搅拌桨距池底高度。赵德强等^[11]采用响应面方法优化分析得到了影响旋流沉砂池除砂效率因素的主次顺序和最佳水平。周芳龄等^[12]分析发现进水量、搅拌桨转速和搅拌桨距池底高度对旋流沉砂池的除砂效率影响程度依次减小。周芳龄等^[13]基于数值模拟方法,分析优化了旋流沉砂池的运行转速,提高了旋流沉砂池的除砂效率。冷宗^[14]基于数值模拟方法,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 DPM 模型,计算分析了不同进水流量和叶片转速对旋流沉砂池除砂效率的影响,发现当进水流量较大时砂粒的沉降时间较短而导致除砂效率降低;增大搅拌桨转速能有效增强内部的轴向环流,从而提高了除砂效率。目前,关于旋流沉砂池流动特性的分析仍集中在水力停留时间、搅拌桨转速、搅拌桨距池底高度等影响因素的研究,对于通过结构优化提高除砂效率的研究还相对较少。

某污水泵站因受地形、施工条件等因素影响,在泵站集水池前方设置了旋流沉砂池,本文以初步设置的旋流沉砂池为研究对象,基于数值模拟方法研究旋流沉砂池的流动特性及除砂效率,分析旋流沉砂池存在的不足并提出结构优化方案,以期对旋流沉砂池的结构优化设计提供参考。

1 数值模拟方法

1.1 几何建模与网格划分

旋流沉砂池的计算区域主要包括进水渠道、出水渠道、池体以及集砂斗,几何参数如下:池体直径为 5 000 mm,池体高度为 2 130 mm,进水渠宽度为 1 370 mm、坡度为 15°,出水渠宽度为 1 370 mm,搅拌桨叶片数量为 4 片,其直径及其距离池底高度分别为 1 100、140 mm,桨叶转轴直径及轮毂直径分别为 270、330 mm,集砂斗直径和高度分别为 1 520、2 060 mm,几何模型如图 1(a)所示。考虑到该旋流沉砂池的复杂性,对其计算域进行非结构网格划分,为减小网格数量对模拟结果的影响,采用 GCI 方法进行网格无关性分析^[15]。建立 405 万、181 万和 82 万 3 套网格方案,选择旋流沉砂池进水处和出水处之间的水力损失作为评价指标,计算得到外推相对误差(e_{ext})和网格收敛指数值(G)分别为 1.06% 和 1.31%,均小于 5%,表明网格数最大的 405 万网格方案的离散误差较小,计算精度较好,405 万网格数的计算网格如图 1(b)所示。

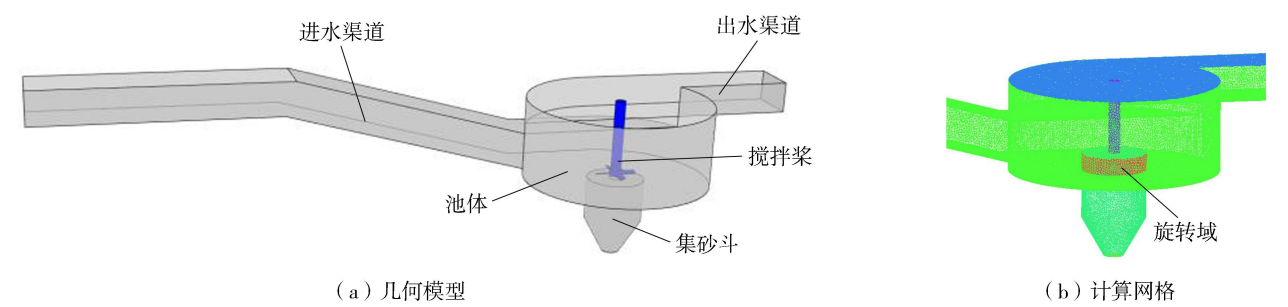


图1 旋流沉砂池几何模型和计算网格

Fig.1 Geometric model and grid diagram of vortex-type grit chamber

1.2 控制方程及计算模型

旋流沉砂池内的流动为固液两相流,并且流动存在显著的旋流、流线弯曲程度较大等特点,因此基于 URANS 方法,采用 RSM 湍流模型^[16-18]与 DPM 模型^[19-21]对旋流沉砂池的固液两相流动进行数值求解。其中,颗粒相的控制方程为

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_D + F_B + F \tag{1}$$

式中: m_p 为颗粒质量; u_p 为颗粒速度; F_D 为曳力; F_B 为重力造成的浮力; F 为颗粒受到的除 F_D 和 F_B 之外的其他力。

1.3 计算方法与边界条件

对于连续相边界条件,进口设置为速度入口且速度为 0.515 m/s,出口为压力出口且压力为标准大气压。由于搅拌桨转速较小,旋流沉砂池顶部自由液面相对平稳,因此基于刚盖假定将自由液面设置为对称面;壁面设置为无滑移壁面且近壁面采用可伸缩壁面函数进行处理。采用滑移网格法模拟搅拌桨的转动,并通过

交界面边界条件对旋转、静止区域间的数据进行交换。以定常计算结果为初始流场进行非定常计算,非定常计算取搅拌桨每旋转 3° 为一步,共计算 30 个搅拌桨旋转周期,数值计算分析的流场各物理量采用最后 10 个旋转周期作时均化处理。对于颗粒相参数,颗粒密度为 2 650 kg/m³,含砂量为 400 mg/L,采用单向耦合方法^[22]和随机轨道模型模拟颗粒运动。

2 计算结果与分析

2.1 数值模拟方法验证

基于 Obermair 等^[23]研究的旋流分离器 Geo. C-500 及运行参数,对本文数值模拟方法的预测精度进行验证。图 2 为数值模拟值与 Obermair 等^[23]的试验值的颗粒分离率对比,其中分离率 η 定义为

$$\eta = m_1 / m_2 \tag{2}$$

式中: m_1 为集砂斗中收集砂粒的质量流量; m_2 为入口处砂粒的质量流量。

由图 2 可知,本文的数值模拟方法能有效预测不同粒径颗粒的分离率且与试验值吻合程度较好。图 3 为数值模拟与 LDA 试验^[24]测量得到的旋流分离器纵剖面切向速度云图,通过对比可以发现,数值模拟预测的切向速度能正确反映 LDA 试验测得的切向速度随着与轴心距离的减小呈现先增大后减小的趋势。因此,本文数值模拟方法对于颗粒分离沉降流动问题模拟结果具有良好的预测精度,可以用于开展旋流沉砂池流动特性的分析。

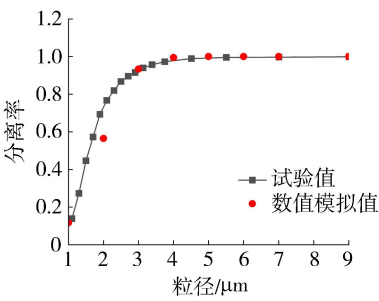


图 2 分离率对比

Fig. 2 Comparison of separation efficiency

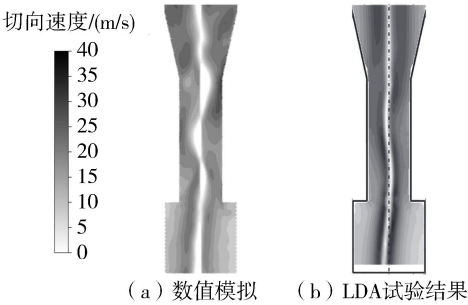


图 3 纵剖面切向速度云图

Fig. 3 Tangential velocity cloud image of longitudinal section

2.2 旋流沉砂池流动特性分析

为了研究旋流沉砂池的除砂效率,通过数值模拟计算得到旋流沉砂池对 0. 10、0. 15、0. 20 mm 这 3 种粒径砂粒的除砂效率分别为 17%、64%、94%,由此可知,该旋流沉砂池对中小粒径(0. 15、0. 10 mm)砂粒的除砂效率相对偏低。

由图 4 可知,进水渠道内的砂粒运动行为表现为砂粒在重力作用下向渠道底面偏移且粒径越大越容易沉降;砂粒顺着进水渠道切入旋流沉砂池池底,粒径大的砂粒主要在池底进行旋转运动并逐渐向池心移动,最终进入集砂斗,此时除砂效率较高;中小粒径砂粒受水流影响较大,部分砂粒会受环流和重力的影响来到

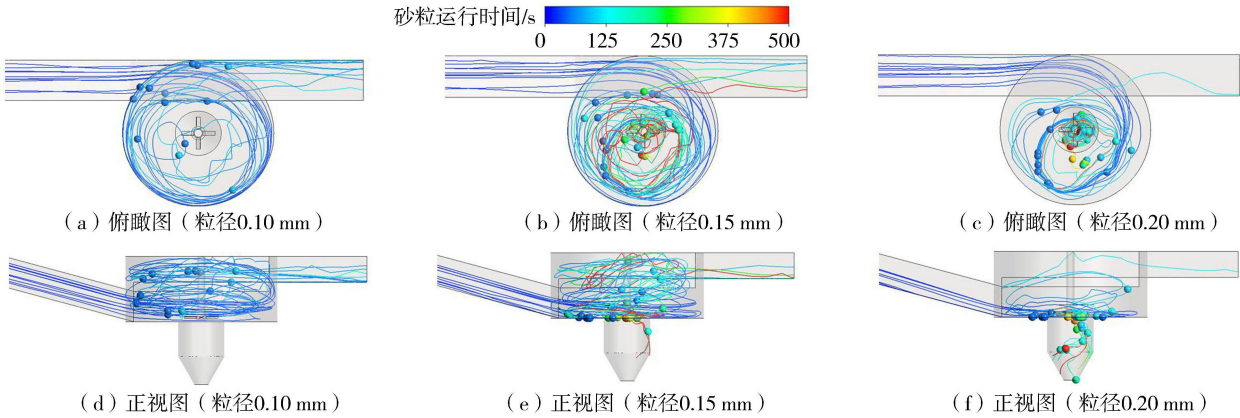


图 4 旋流沉砂池砂粒运动轨迹

Fig. 4 Motion path of sand particle in vortex-type grit chamber

池底,另一部分则会被水流携带离开池体,因此旋流沉砂池对中小粒径砂粒的除砂效率相对较低。

由图5可知,水流沿切向流入沉砂池,在壁面阻挡和搅拌桨叶片旋转产生的水平环流、立面环流作用下,形成了自下而上的螺旋流。流速较大的水流在沿进水渠道进入池体时,会对池体内的旋转水流产生冲击(图5中黑色椭圆框)而影响池体底部水流的运动。

为了进一步探究池体底部的水流流态,以沉砂池底部中心为原点,选取如图6(a)所示近底部断面及截面线段进行分析,其中3条截面线段分别位于 $x=-1.25,0,1.25$ m断面处。图6(b)(c)为旋流沉砂池断面1压力系数 C_p 云图和流速矢量图,其中 C_p 的表达式为

$$C_p = 2(p - p_{out}) / \rho v_{in}^2$$

(3)

式中: p 为沉砂池内部任意一点压力; p_{out} 为出口压力; ρ 为水的密度; v_{in} 为进口流速。

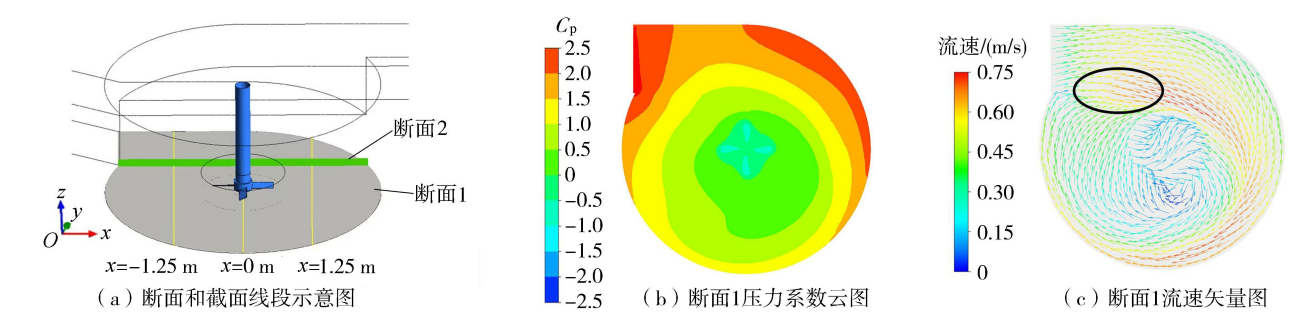


图6 旋流沉砂池断面及其压力系数云图、流速矢量图

Fig. 6 Vortex-type grit chamber section, and its pressure coefficient cloud image and velocity vector image

由图6(b)可知,近池底的压力分布整体呈现由池壁向池心逐渐减小的趋势,能够促使砂粒向旋流沉砂池中心汇集。然而在压差作用下进流产生向池体中心靠近的径向速度,由于进水渠道末端没有阻挡,水体在池内扩散(图6(c)中黑色椭圆框),影响池内水流的旋转运动。由于中小粒径砂粒的除砂效率受水流流态的影响较大,因此,该不良流态更容易影响中小粒径砂粒的去除效果。

2.3 旋流沉砂池结构优化分析

为了减小旋流沉砂池进流对池体内旋转水流产生不良冲击的影响,设计如图7所示的结构优化方案,即在进水渠道末端设置导流板,其中导流板厚度为50 mm、高度为150 mm,长度设置了1 000 mm(方案1)、2 000 mm(方案2)、3 000 mm(方案3)3种方案。

图8为初始方案与结构优化方案除砂效率对比,可见对于3种粒径,3种结构优化方案的除砂效率相较于初始方案均有所提升,表明增设导流板能有效提高旋流沉砂池的除砂能力。其中,旋流沉砂池内设置导流板对中小粒径砂粒的除砂效率提升更为显著。对比3种结构优化方案可以发现,方案2对旋流沉砂池除砂

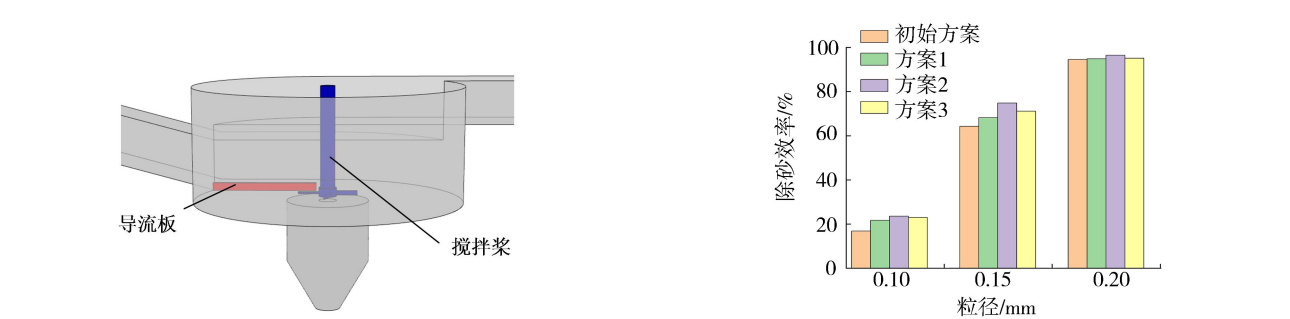


图7 结构优化模型

图8 除砂效率对比

Fig. 7 Structure optimization model

Fig. 8 Comparison of sand removal efficiency

效率的提升效果较优,对 0.10、0.15、0.20 mm 粒径砂粒的除砂效率分别为 24%、75%、96%,比初始方案分别提升了 7%、11%、2%。

由图 9 可知,优化方案的压力分布与初始方案均表现为从壁面到中心逐渐减小,但方案 3 在导流板末端出现了明显的压差,水流在进入池体过程中更容易撞击导流板;优化方案的导流板对进水水流起到了一定的阻挡作用,使得进水水流沿导流板向前运动,减少了对池内水流的冲击,改善了池体近底部水流的流态。图 10 为断面 1 截面线段流速分布,由图 10(c)可知导流板方案 2 和方案 3 在断面右侧靠近池体中心的水流流速较初始方案减小(图中红框),有利于防止水流流速过大而将靠近集砂斗的砂粒卷走。

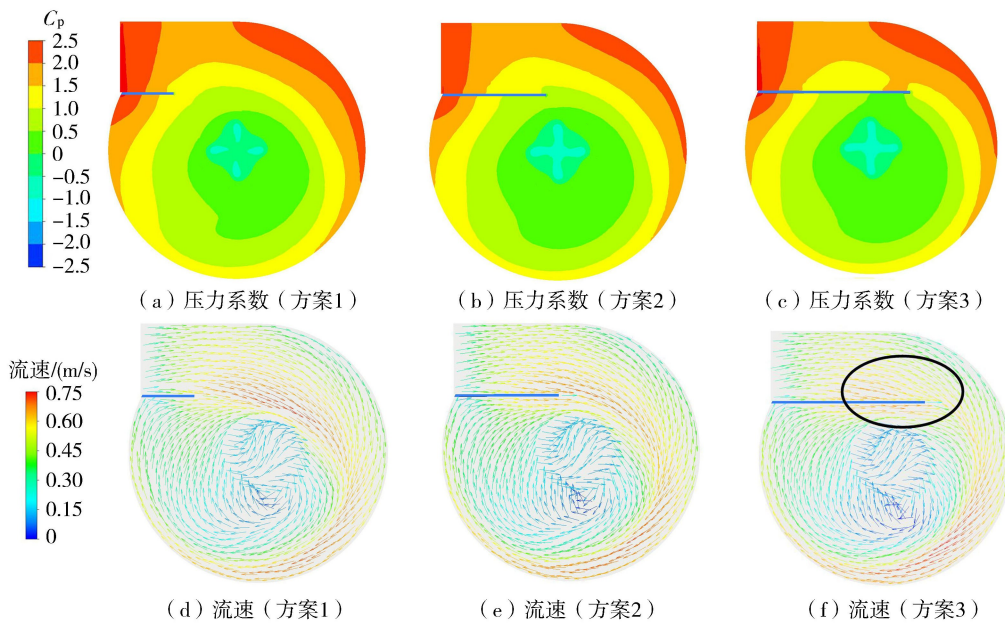


图 9 优化方案断面 1 压力系数云图和流速矢量图

Fig.9 Pressure coefficient cloud and velocity vector of Section 1 in optimized scheme

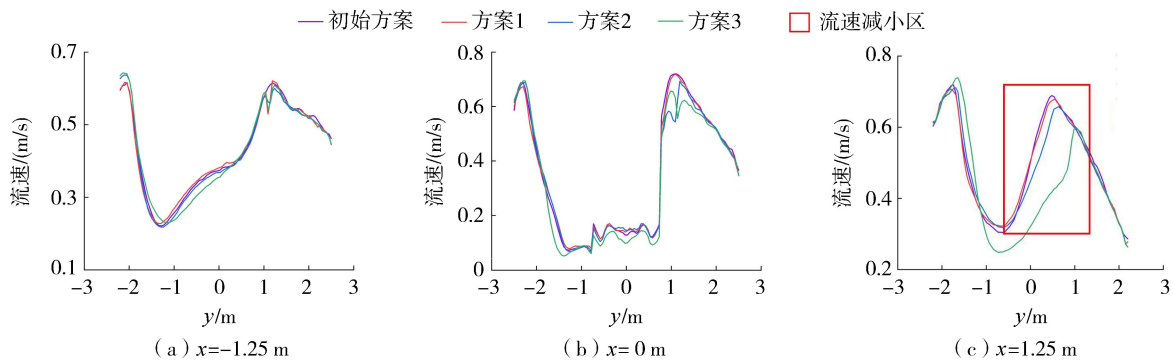


图 10 断面 1 截面线段流速分布

Fig.10 Velocity distribution of section lines of Section 1

为进一步探究导流板对池内流态的影响,选取导流板前方断面(断面 2,图 6(a))进行分析。图 11 为断面 2 轴向速度云图和截面轴向速度分布图,其中截面线段 z_1 (图 11(a))位于 $z=0.05$ m 断面处。由图 11 可知,撞击导流板的水流会产生向下的轴向速度分量,使其向下运动到池底,相较于初始方案更有利于促进砂粒沉积。对于方案 1,导流板对水流的阻挡作用较小,水流流速、运动轨迹与初始方案相比变化较小,因此除砂效率的提升效果较弱。对于方案 2,导流板能有效地发挥其对水流的阻挡作用,既能减小进水水流对池体水流的影响,又可使撞击导流板的池内水流下折到池底,有利于砂粒沉降在池底。随着导流板长度增加至 3 000 mm,即方案 3 阻碍了进水水体的旋转运动,部分水体在压差作用下会撞击在导流板上(图 9(f)黑色椭圆框),沿导流板运动一段距离后进入池体;同时池内水流沿导流板运动到末端时轴向速度逐渐增大($x=0.5 \sim 0.77$ m),说明池内水流没有撞击在导流板末端,而是沿导流板末端向前移动并向上方偏移,对池内水流流态

的改善作用不及方案2。

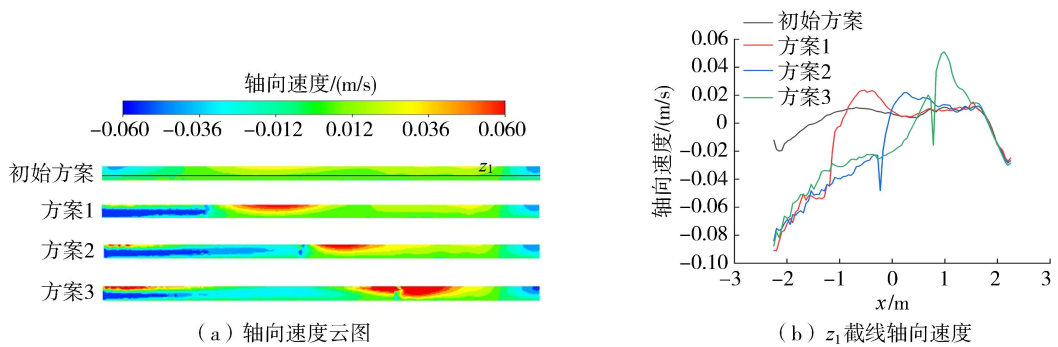


图 11 断面 2 轴向速度云图和截面线段轴向速度分布

Fig.11 Axial velocity cloud image and axial velocity distribution of section line segment at Section 2

图 12 为方案 2 的旋流沉砂池内部砂粒运动轨迹,通过对比初始方案(图 4)可知,导流板对旋流沉砂池进水流态的调整作用使得更多的砂粒尤其是中小粒径砂粒沉降到池体底部,并在环流作用下呈螺旋状向池体中心聚集,最终进入集砂斗。

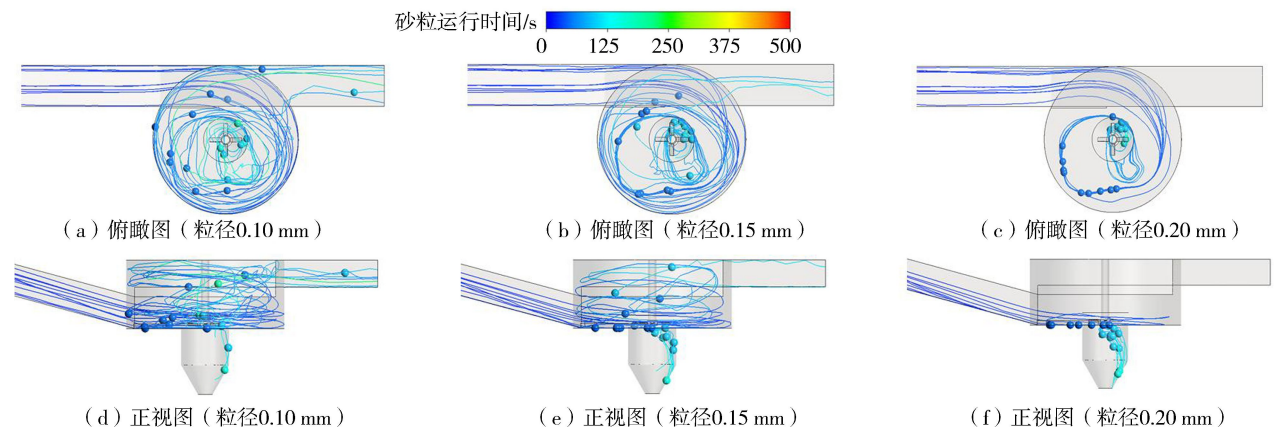


图 12 方案 2 的砂粒运动轨迹

Fig.12 Motion path of sand particle in Scheme 2

3 结 论

- a. 受到壁面阻挡和搅拌桨叶片旋转产生的水平环流和立面环流影响,砂粒呈螺旋状绕池心运动并向中心聚集;水流沿进水渠道进入池体时向池心偏移,易将池心处的砂粒卷走而影响旋流沉砂池的除砂效率。
- b. 在进水渠道末端设置导流板能够改善旋流沉砂池底部的水流流态,减小进水水流对池内旋转水流的冲击,并使撞击到导流板的水流向下折回到池底,有利于提高旋流沉砂池的除砂效率。通过对比分析 3 种不同长度的导流板方案,发现当导流板长度为 2 000 mm 时,对旋流沉砂池除砂效率的提升效果较优,相较于初始方案,对 0.10 、0.15 、0.20 mm 粒径砂粒的除砂效率分别提升了 7% 、11% 、2% 。

参考文献:

[1] 曹志斌,张俊,王伟,等. 典型生活污水颗粒物粒径分布及沉降性能研究[J]. 能源环境保护,2022,36(1):72-76. (CAO Zhibin, ZHANG Jun, WANG Wei, et al. Study on particle size distribution and sedimentation performance of particulate matter in typical domestic sewage[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(1): 72-76. (in Chinese))

[2] 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. (in Chinese))

[3] 李涛. 沉砂池的设计及不同池型的选择[J]. 中国给水排水,2001,17(9):37-42. (LI Tao. Design of grit chamber and

selection of different tank types[J]. China Water & Wastewater,2001,17(9):37-42. (in Chinese))

[4] 邱峰,汪家权,王淦. 新型旋流沉砂池除砂和有机物分离效率的研究[J]. 工业用水与废水,2008,39(3):84-87. (QIU Feng, WANG Jiaquan, WANG Gan. Grit removing and organic matter separation efficiency of a novel rotational flow grit chamber [J]. Industrial Water & Wastewater,2008,39(3):84-87. (in Chinese))

[5] 叶勇. 新型旋流沉砂池固液两相流数值模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.

[6] 柳菁翠. 基于不同粒径的旋流沉砂池除砂效能研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.

[7] 于兰. 基于不同粒径的 Pista 沉砂池 ISS 去除效果数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2017.

[8] 李亚平. 比氏旋流沉砂池性能改进研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.

[9] SUN R R, WANG X L, TU J M, et al. Optimization simulation on blade number of grit chambers with rotational flow[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,368-370:1894-1897.

[10] LU Z, YU L, XU X, et al. Comparative study on turbulence models simulating inorganic particle removal in a Pista grit chamber [J]. Environmental Technology,2018,39(24):3181-3192.

[11] 赵德强,张齐艳,纪家林,等. 基于进水水质的比氏旋流沉砂池除砂效果优化[J]. 中国给水排水,2017,33(13):40-45. (ZHAO Deqiang, ZHANG Qian, JI Jialin, et al. Optimization of grit removal efficiency in pista vortex grit chamber based on influent water quality[J]. China Water & Wastewater,2017,33(13):40-45. (in Chinese))

[12] 张辉,王淦,叶勇,等. 旋流除砂系统除砂效率的影响因素分析[J]. 中国给水排水,2016,32(3):70-74. (ZHANG Hui, WANG Gan, YE Yong, et al. Analysis on factors affecting sand removal efficiency of rotational flow grit chamber[J]. China Water & Wastewater,2016,32(3):70-74. (in Chinese))

[13] 周芳龄,唐勇,周晓泉. 基于 DPM 模型的旋流式沉砂池悬沙数值模拟[J]. 水电能源科学,2020,38(10):91-94. (ZHOU Fangling, TANG Yong, ZHOU Xiaoquan. Numerical simulation of suspended sediment in vortex-type sedimentation basin based on DPM model[J]. Water Resources and Power,2020,38(10):91-94. (in Chinese))

[14] 冷宗. 生产建设项目中旋流沉砂池除砂率数值模拟[J]. 黑龙江水利科技,2022,50(9):10-12. (LENG Zong. Numerical simulation of sand removal rate of cyclone sedimentation tank in production and construction projects[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology,2022,50(9):10-12. (in Chinese))

[15] CELIK I B, CHIA U, ROACHE P J, et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering,2008,130(7):078001.

[16] 刘波,孙国刚. 离心式气流分级机不同湍流模型流场模拟结果分析与对比研究[J]. 化肥设计,2023,61(1):8-11. (LIU Bo, SUN Guogang. Analysis and comparison study of flow field simulation results of different turbulence models for centrifugal air classifier[J]. Chemical Fertilizer Design,2023,61(1):8-11. (in Chinese))

[17] 黄志强,李万松,叶闯,等. 筒体顶板对旋风分离器性能的影响[J]. 安全与环境学报,2022,22(6):3424-3433. (HUANG Zhiqiang, LI Wansong, YE Chuang, et al. Effect of the top plate of a cylinder on the performance of a cyclone separator[J]. Journal of Safety and Environment,2022,22(6):3424-3433. (in Chinese))

[18] 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.

[19] 张进杰,张慧斌,陈平伟,等. 基于 DPM 固液两相流仿真的单向阀冲蚀特性研究[J]. 化工机械,2024,51(2):229-236. (ZHANG Jinjie, ZHANG Huibin, CHEN Pingwei, et al. Study on erosion characteristics of one-way valve based on DPM solid-liquid flow simulation[J]. Chemical Engineering & Machinery,2024,51(2):229-236. (in Chinese))

[20] 曹卫东,张洋杰,茅佳雨,等. 高速多级深井泵固液两相流及磨损特性[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(5):433-439. (CAO Weidong, ZHANG Yangjie, MAO Jiayu, et al. Solid-liquid two-phase flow and wear characteristics of high-speed multi-stage deep-well pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2023,41(5):433-439. (in Chinese))

[21] 陈正甦,衡亚光,熊平,等. 基于 CFD-DPM 的离心泵内颗粒性质对泵性能与磨损的影响[J]. 西华大学学报(自然科学版),2024,43(1):87-96. (CHEN Zhengsu, HENG Yaguang, XIONG Ping, et al. Influence of particle properties on the performance and wear of centrifugal pumps based on CFD-DPM[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition),2024,43(1):87-96. (in Chinese))

[22] 王旭博. 旋流-平流沉砂池去除污水中细微砂粒及有机物分离的数值模拟[D]. 太原:太原理工大学,2019.

[23] OBERMAIR S, STAUDINGER G. The dust outlet of a gas cyclone and its effects on separation efficiency[J]. Chemical Engineering & Technology,2001,24(12):1259-1263.

[24] OBERMAIR S, WOISETSCHLÄGER J, STAUDINGER G. Investigation of the flow pattern in different dust outlet geometries of a gas cyclone by laser Doppler anemometry[J]. Powder Technology,2003,138(2/3):239-251.