

文章编号: 1674-5566(2024)06-1418-11

DOI: 10.12024/jsou.20240404489

水力旋流器液固两相流场特征及结构优化

张俊¹, 刘浩伟¹, 程果锋², 姚晶晶¹, 曹守启¹, 刘兴国²

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

摘要: 根据南美白对虾池塘养殖尾水的沉淀性颗粒物特点, 设计了一种水力旋流分离器, 基于CFD数值计算理论, 结合离散相模型(DPM)和雷诺应力湍流模型(RSM), 建立了旋流器的三维两相内流场数值模型。以旋流器的溢流口直径、底流口直径、锥角、溢流管插入深度和柱段长度为设计变量, 构建了 $L_{16}(4^5)$ 参数化正交优化试验模型, 研究了设计变量对流场特征及固体颗粒物分离效率的影响, 并通过极差分析确定了既能减小压降又能提高颗粒物分离效率的最佳组合参数。结果表明: 经过优化的水力旋流器使压力降和径向压力梯度均有所减小, 颗粒物的分离效率提高; 当溢流口直径为120 mm、底流口直径为32 mm、锥角为 18° 、溢流管插入深度为160 mm、柱段长度为390 mm的组合参数下, 其压力降较优化前降低了9 842 Pa, 分离效率提高了12%; 通过加工实物并在现场实际测试, 对比分析旋流器的进水口、底流口和溢流口的水质特征, 颗粒物分离效率的仿真和试验相对误差不超过5%, 验证了三维两相内流场计算方法的有效性。研究结果可为旋流器的优化设计及其在池塘养殖尾水处理中的应用提供理论依据。

关键词: 养殖尾水; 水力旋流器; 正交试验法; 内流场; 分离效率

中图分类号: S 969

文献标志码: A

根据《2023中国渔业统计年鉴》的数据, 2022年我国渔业总产量6 865.91万t, 养殖产量占比超过80%, 其中池塘养殖占比超过50%。然而, 我国池塘工程化设施改造缓慢, 多地依旧延续散养粗放模式, 存在占地面积大、水域生态环境恶化、病害频发、养殖尾水难处理等问题。因此, 研发占地小、高效快速的池塘养殖尾水一体化处理设备, 是水产养殖领域亟待解决的难题^[1-4]。研究人员探索了多种养殖尾水处理技术, 包括泡沫分离技术、臭氧技术和过滤技术等, 并确定了各方法的最佳处理参数, 以提升尾水处理效率^[5-7]。水力旋流器是一种无能耗、占地小、应用广泛的颗粒物分离装置^[8-10], 可作为池塘养殖尾水一体化处理设备的首级单元, 有效去除泥沙等颗粒物并减轻后续处理的负荷。

SWAINY等^[11]在模拟研究固液旋流器的流场中, 对比了RSM和标准 $k-\varepsilon$ 两种湍流模型的计算结果, 发现在预测速度剖面和分离效率时存在

差异, 尤其对大颗粒分离效率有较大影响。CEN等^[12]比较了雷诺应力湍流模型(RSM)和RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的模拟结果, 得出RSM模型对水力旋流器核心区域的湍流黏度预测更接近实际情况; 李建平等^[13]在研究旋流器在池塘养殖尾水的处理中的应用, 发现了流量和浓度对内流场及分离效率影响规律; 张俊等^[14]基于南美白对虾池塘养殖尾水特性, 通过仿真和试验对比研究, 得到了串联式旋流器的进水流量、颗粒物理特性等条件对流场特征及分离效率的影响; LEE等^[15]设计了一种用于去除循环水养殖系统中的粪污残饵的水力旋流分离器, 得到了不同流量、底流率对饲料废弃物和粪便固体的分离效率; DULYAPAT等^[16]利用CFD研究了不同几何参数的各种水力旋流器设计, 以微塑料回收率、水分流率和压降为评价指标, 提出了一种优化的水力旋流器结构; LI等^[17]设计了一种用于提高废水净化设备除杂效率的新型旋流分离器, 得到了两相流场特性和分

收稿日期: 2024-04-10

修回日期: 2024-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2400502); 上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科推字[2021]第3-1号); 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新项目([2021]科技02-12)

作者简介: 张俊(1983—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为渔业工程水动力学、计算流体力学。E-mail: zhangjun@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

离效率;ZHENG等^[18]设计一种分流增强型旋流分离器,结合雷诺应力模型和离散相模型,得到了通过过全分流比增强分离能力的机理;蒋明虎等^[19]以处理水中悬浮物与泥沙的旋流分离装置为分析对象,利用数值模拟和正交试验法对其进行了结构优化,得到了旋流分离装置的最佳组合参数;SENFTE等^[20]为提高水力旋流器底流口出水的浓度,在旋流器的底流口安装了增稠模块,改进的水力旋流器最大增稠系数可达1.31;唐志国等^[21]研究了发动机用两级串联油气旋流分离器的结构参数对分离性能的影响,确定了最佳组合参数和匹配准则;PADHI等^[22]通过仿真和试验对比研究,确定了旋流器处理铁矿泥的操作与设计参数范围。

综上,针对应用于池塘养殖尾水处理旋流器的相关研究较少,特别是关于旋流器的主要参数对流场特征及颗粒物分离效率的影响机制尚不明确。本文根据南美白对虾池塘养殖尾水特点,提出了一种用于池塘养殖尾水处理的水力旋流分离器,基于多相流理论,结合离散相模型(DPM)和雷诺应力湍流模型(RSM),建立了水力旋流器的三维两相内流场数值计算模型,通过现场试验验证了数值计算模型的有效性。运用正交优化试验法,对旋流器的主要结构参数进行了优化设计,得到了旋流器的结构和运行参数对水动力特性及分离效率的影响规律。并采用极差分析法对模拟结果进行统计分析,确定了水力旋流器的最佳组合参数。

1 养殖尾水特征及旋流器结构模型

1.1 虾塘养殖尾水特征

根据上海市水产研究所对南美白对虾养殖尾水的采样和检测数据^[14],排水前尾水中的颗粒物含量约为60 mg/L,在排水过程中,颗粒物含量随排水深度增加而逐渐上升,排水后期塘底沉积物被剧烈搅动再悬浮,水体呈浑浊泥浆状态,泥浆水的颗粒物含量为2 849 mg/L。池塘中总氮含量范围为3.98~6.92 mg/L,颗粒态氮平均占比53.38%。总磷含量范围为0.29~1.67 mg/L,其中,颗粒态磷的平均占比为68.21%~92.18%。虾塘尾水中有有机物 COD_{Cr} 含量随排水深度增加而增加,浓度范围为40.64~357.49 mg/L。第一次排水到0.9 m时,粒径为30~100 μm 的颗粒物占82%;第

二次排水到1.6 m时,粒径为30~100 μm 的颗粒物占53%。总体而言,虾塘尾水中颗粒物的粒径主要分布在0~100 μm 。与大西洋鲑循环水养殖系统的尾水相比,南美白对虾池塘养殖尾水中的颗粒物粒径大、分布范围宽^[23]。

1.2 结构模型

根据池塘养殖尾水取样数据,设计并加工水力旋流器。设计依据为:柱段直径 D 为350 mm;柱段长度 l_c 为0.7~2.0 D ,取290 mm;溢流管插入深度 h 为0.33~0.50 D ,取170 mm;溢流口直径 d_o 为0.2~0.3 D ,取100 mm;底流口直径 d_u 为0.07~0.10 D ,取32 mm;进水口直径 d_i 范围在0.15~0.25 D ,取100 mm;锥角 β 取 22° ^[24-25]。水力旋流器柱段和锥段交界面为 $z=0$ mm,坐标原点位于其中心。水力旋流器的几何模型和监测线的位置如图1所示。在 oxz 平面设置监测面,平行于 x 轴且经过水力旋流器轴线,在 oxy 平面上设置监测线I和II,距离为100 mm。

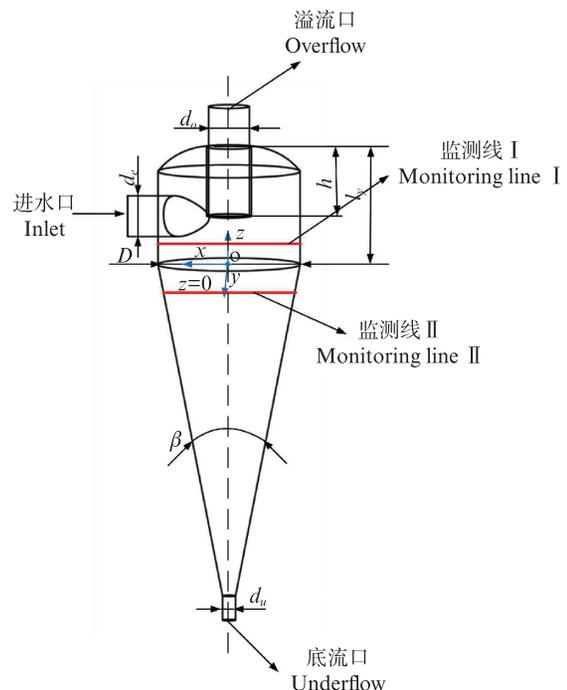


图1 水力旋流器的几何模型

Fig. 1 Geometric model of hydrocyclone

2 数值计算模型

2.1 计算模型

旋流器内部的混合流体流动过程用三维非定常N-S方程描述^[26-27]。湍流模型采用雷诺应力模型(Reynolds Stress Model, RSM),该模型适用

于描述旋流器的内流场特征^[28]。采用离散型模型(Discrete phase model, DPM)计算旋流器的液固两相流动特性,该模型适用于描述固相体积分数小于10%的两相流问题^[28-30]。

根据尾水数据,假定颗粒物为球形粒子,近似认为颗粒物与壁面发生弹性碰撞,不考虑颗粒之间的相互作用力以及颗粒破碎和能量吸收。将颗粒物分成 $5\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 3种粒径,其密度为 $1\ 160\ \text{kg}/\text{m}^3$,动力黏度为 $0.004\ 5\ \text{Pa}\cdot\text{s}$,粗糙度为 $0.001\ \mu\text{m}$;流体密度为 $1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$,动力黏度为 $0.001\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ 。采取SIMPLEC算法,使速度场与压力场的迭代同步进行,在压强插值方法上选用PRESTO方法^[29]。旋流器进水口设置为速度入口边界,入口速度为 $2.048\ \text{m}/\text{s}$,速度方向垂直于进水口,溢流口和底流口均设置为自由流出边界,壁面定义为无滑移固壁边界。在两相流计算过程中,颗粒物注入速度为 $2.048\ \text{m}/\text{s}$ 。将底流口定义为颗粒捕捉边界,溢流口定义为颗粒逃逸边界,其余位置均设置为反射边界。

2.2 网格独立性验证

采取混合网格划分流场网格,对溢流口、进水口、底流口等流速梯度大的部位添加边界层并进行局部网格加密。为了获得可靠的数值计算结果并优化计算资源配置,建立了不同网格数量的流场仿真模型,比较了网格数量对计算结果的影响。网格划分数量分别为 7.9×10^5 、 9.4×10^5 、 11.5×10^5 、 14.1×10^5 ,经分析,当流场网格数量为 7.9×10^5 时,流场监测线I上的切向速度与 14.1×10^5 网格下的计算结果吻合较好,旋流器的整体及局部网格如图2,网格无关性验证结果如图3。

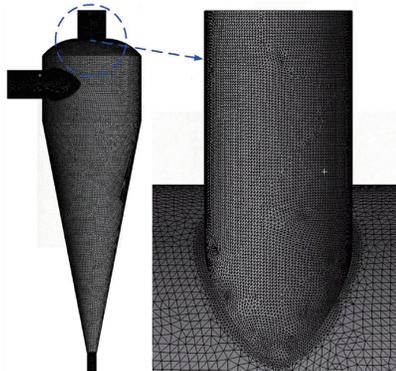


图2 流场网格划分

Fig. 2 Grid division in the flow field

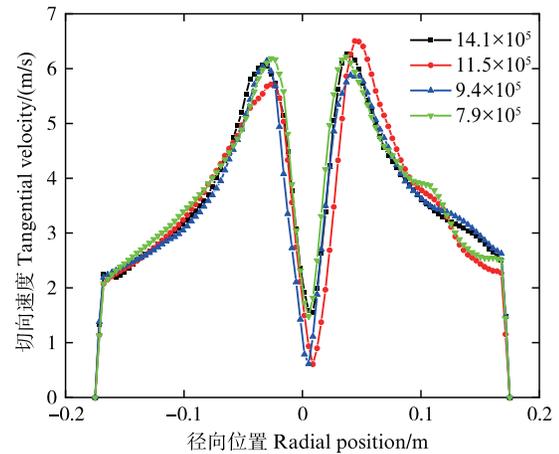


图3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid-independent verification

3 正交试验与结果分析

3.1 试验设计

根据文献调研,综合考虑各结构参数对分离性能的影响程度和调节范围,选取了 β 、 l_y 、 d_o 、 h 、 d_u 为设计变量,每个结构参数选择4组参数,如表1所示,表2为 $L_{16}(4^5)$ 正交试验表^[19, 21]。

表1 正交试验因素水平表
Tab. 1 Factor level of orthogonal test

水平 Level	因素 Factors				
	d_o/mm	d_u/mm	$\beta/(\text{^\circ})$	h/mm	l_y/mm
1	90	26	18	160	210
2	100	28	22	170	290
3	110	30	26	180	390
4	120	32	30	190	490

3.2 结果分析

表3为16组模型下的流场压力降和分离效率,表4为正交试验极差分析结果。结果表明:对于降低压力降和提高颗粒物的分离效率,有两个最佳参数组合。对分离效率而言,其主要影响因素为: $d_o > \beta > l_y > h > d_u$,最佳参数为: d_o-4 、 $\beta-1$ 、 l_y-4 、 $h-4$ 、 d_u-2 。对压力降而言,影响次序为: $h > \beta > l_y > d_o > d_u$,最佳参数为: $h-1$ 、 $\beta-1$ 、 l_y-3 、 d_o-2 、 d_u-4 。 h 对颗粒物分离效率影响较大而对压力降的影响较小; l_y 增加有助于降低压力降,但 l_y 过大将会导致切向速度减小而降低分离效率; d_o 对压力降影响较大而对颗粒物的分离效率影响较小。对比得到最优组合参数为: $h-1$ 、 $\beta-1$ 、 l_y-3 、 d_o-4 、 d_u-4 。优化前水力旋流器流场压力降为 $32\ 098\ \text{Pa}$,对颗粒物的

分离效率为 36.3%;优化后水力旋流器的压力降为 22 256 Pa,对颗粒物的分离效率达到 48.3%。

表 2 正交试验表 $L_{16}(4^5)$
Tab. 3 Orthogonal test of $L_{16}(4^5)$

编号 Number	因素 Factors				
	d_o/mm	d_u/mm	$\beta/(^\circ)$	h/mm	l_y/mm
1	90	26	18	160	210
2	90	28	22	170	290
3	90	30	26	180	390
4	90	32	30	190	490
5	100	26	22	180	490
6	100	28	18	190	390
7	100	30	30	160	290
8	100	32	26	170	210
9	110	26	26	190	290
10	110	28	30	180	210
11	110	30	18	170	490
12	110	32	22	160	390
13	120	26	30	170	390
14	120	28	26	160	490
15	120	30	22	190	210
16	120	32	18	180	290

表 3 正交试验结果
Tab. 3 Orthogonal test results

编号 Number	评价指标 Evaluation indicators	
	压力降 Pressure drop /Pa	分离效率 Separation efficiency
1	40 358	56.5%
2	39 342	38.7%
3	40 722	36.6%
4	37 467	43.5 %
5	30 060	40.1%
6	26 995	53.0%
7	38 287	40.6%
8	42 901	42.9%
9	34 241	39.1%
10	39 005	26.5%
11	21 957	40.2%
12	28 753	51.2%
13	35 196	39.6%
14	26 364	41.8%
15	31 573	43.5%
16	22 645	38.4%

图 4 和图 5 分别为压力分布和切向速度分布云图。结果表明:旋流器中的两相流在压力作用下形成漩涡流动,切向速度变化引起的离心力是实现固液分离的主要因素。另外,旋流器内部存在径向压力梯度,使得颗粒物受到离心力和流体

阻力的综合作用,最终达到分离效果。这种压力场和速度场的联合作用是旋流器固液分离的关键所在^[31]。对比可知,第 j 组模型下的分离效率最低,这是由于其径向压力梯度较大,向心浮力增大,而旋流器的内部空间缩小将导致颗粒停留

时间缩短,且锥角过大增加了流体阻力。尽管切向速度较高,但其他不利因素的叠加作用会导致其分离效率最低。相比而言,第 a 组模型下的锥

角较小,内部流体阻力较小,切向速度更高,虽然压力降和径向压力梯度增大了向心浮力,但对颗粒物的分离效率最高。

表 4 极差分析结果
Tab. 4 Extreme variance analysis results

参数 Parameters	d_1/mm	d_2/mm	$\beta/(^\circ)$	h/mm	l_1/mm	
压力降 Pressure drop /Pa	\bar{K}_1	39 484.750	34 963.750	27 998.750	33 440.500	38 459.250
	\bar{K}_2	34 560.750	32 926.500	32 432.000	34 849.000	33 628.750
	\bar{K}_3	30 989.000	33 147.250	36 069.500	33 120.500	32 929.000
	\bar{K}_4	28 944.500	32 941.500	37 488.750	32 569.000	28 962.000
	R	10 540.250	2 037.250	9 500.000	2280.000	9 497.250
分离效率 Separation efficiency	\bar{K}_1	0.438	0.438	0.470	0.475	0.423
	\bar{K}_2	0.442	0.400	0.434	0.403	0.392
	\bar{K}_3	0.393	0.402	0.401	0.354	0.451
	\bar{K}_4	0.408	0.440	0.373	0.448	0.414
	R	0.049	0.040	0.095	0.121	0.059

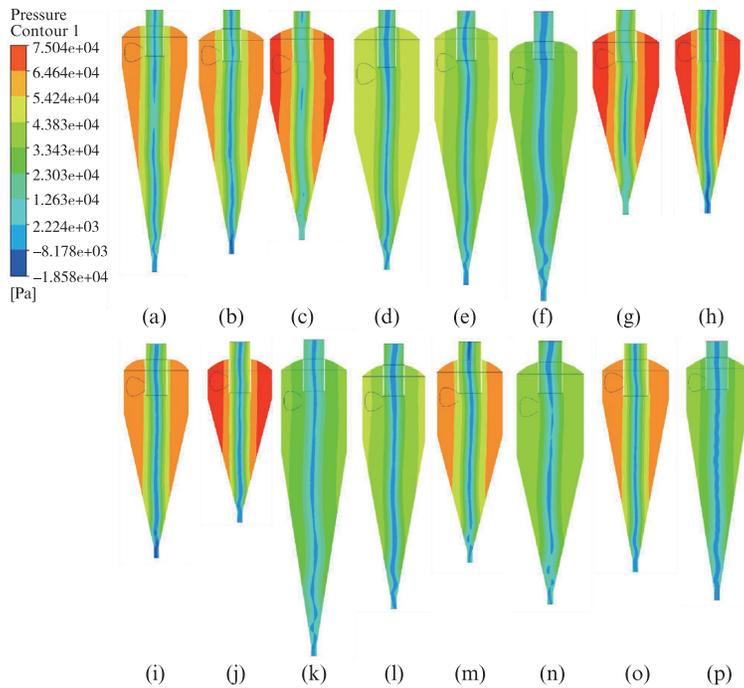


图 4 压力分布云图
Fig. 4 Pressure distribution contours

图 6 为分离效率随压力降的变化曲线,结果表明,在一定范围内,旋流器的分离效率随着压力降的减小而提高,但如果压力降继续减小或过度增加,分离效率和压力降的关系则不再

具有相关性,说明压力降不是影响颗粒物分离效率的唯一因素。切向速度分布、颗粒停留时间和流场稳定性也是颗粒物分离效率的重要影响因素^[14]。

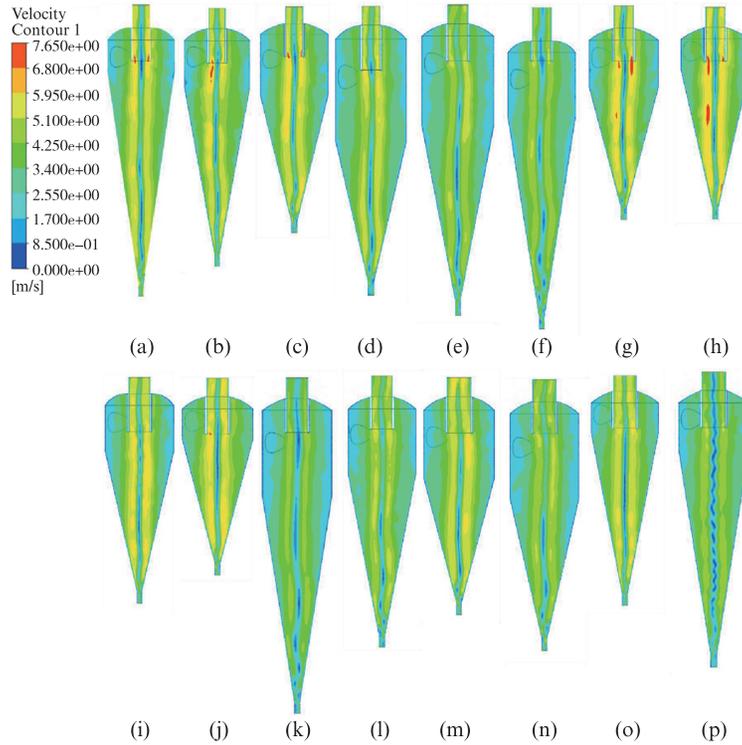


图5 切向速度分布云图

Fig. 5 Tangential velocity contours

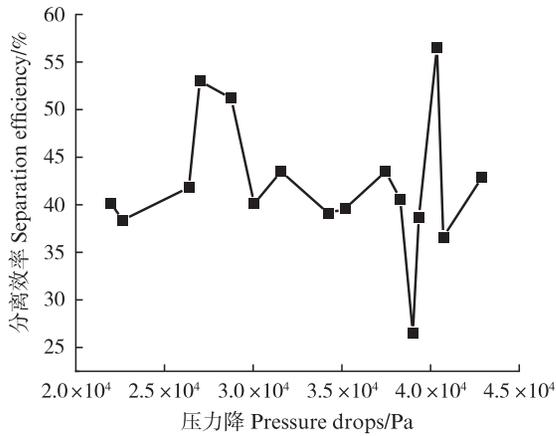


图6 分离效率随压力降的变化

Fig. 6 Change in separation efficiency with pressure drop

图7为监测面上的切向速度和压力云图,结果表明:优化前后旋流器的切向速度峰值分别为7.1 m/s、5.4 m/s。对比图8可知,监测线 I、II切向速度峰值分别为6.5 m/s、5.2 m/s。优化前后旋流器压力峰值分别为 5.5×10^4 Pa、 3.9×10^4 Pa,最大压力差分别为 6.1×10^4 Pa、 4.2×10^4 Pa,对比图9可知,监测线 I、II上压力峰值均为 5.2×10^4 Pa,最大压力差均为 5.1×10^4 Pa。优化前和优化后的不

同粒径颗粒物分离效率相比,经优化3种粒径颗粒物的分离效率均得到了提高。

对比分析可知:由于柱段长度增大会使旋流器的内部空间增大,其内部压力减少,切向速度降低,径向压力梯度也随之减小,有助于提高分离效率。随着锥角增大,压力降和径向压力梯度减小,进而使颗粒物受到的向心浮力减小,分离效率降低。随着溢流口和底流口的直径增大,加速了流体从溢流口和底流口排出,从而降低了其内部压力,使半自由涡较早转换为强制涡,切向速度随之降低,压力降、径向压力梯度、向心浮力均随之减小,颗粒物分离效率降低。溢流管的适当插入深度可以提高流场稳定性,但溢流管插入过长,会导致流场紊乱,湍流动能增大,分离效率降低。因此,经过正交试验优化后的水力旋流器内部切向速度、离心力、流体阻力及向心浮力均减小,颗粒物的停留时间增加使流场稳定性提高^[32-33]。因此,通过优化旋流器的关键结构参数,可有效地控制和改变其内部的流场分布,从而显著提升旋流器对颗粒物的分离效率。

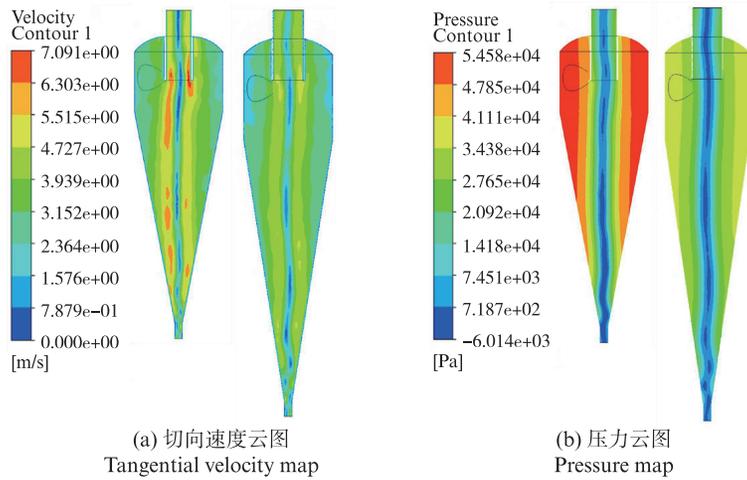


图 7 不同监测面上切向速度和压力云图

Fig. 7 Tangential velocity and pressure contours on the monitoring planes

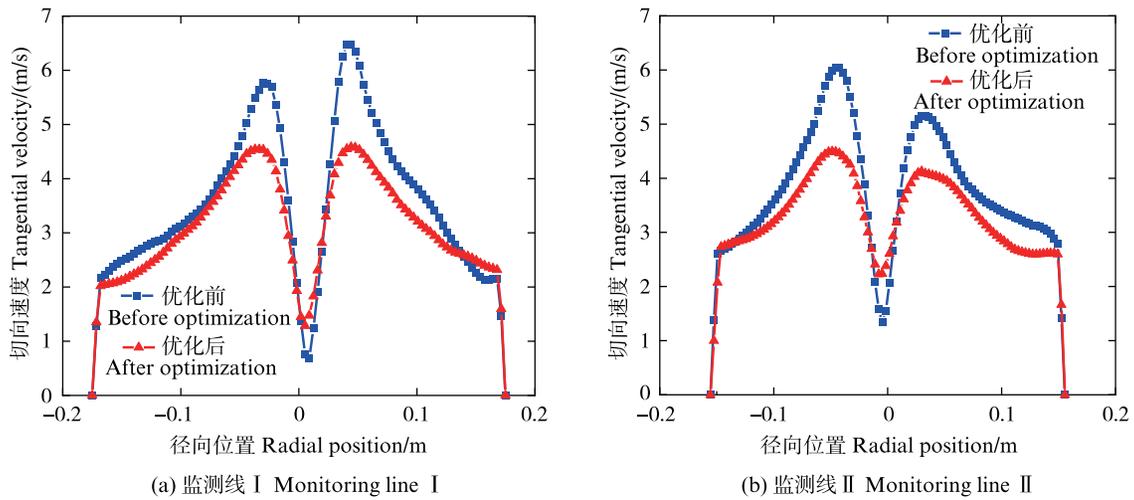


图 8 优化前后的切向速度分布

Fig. 8 Tangential velocity distribution before and after optimization

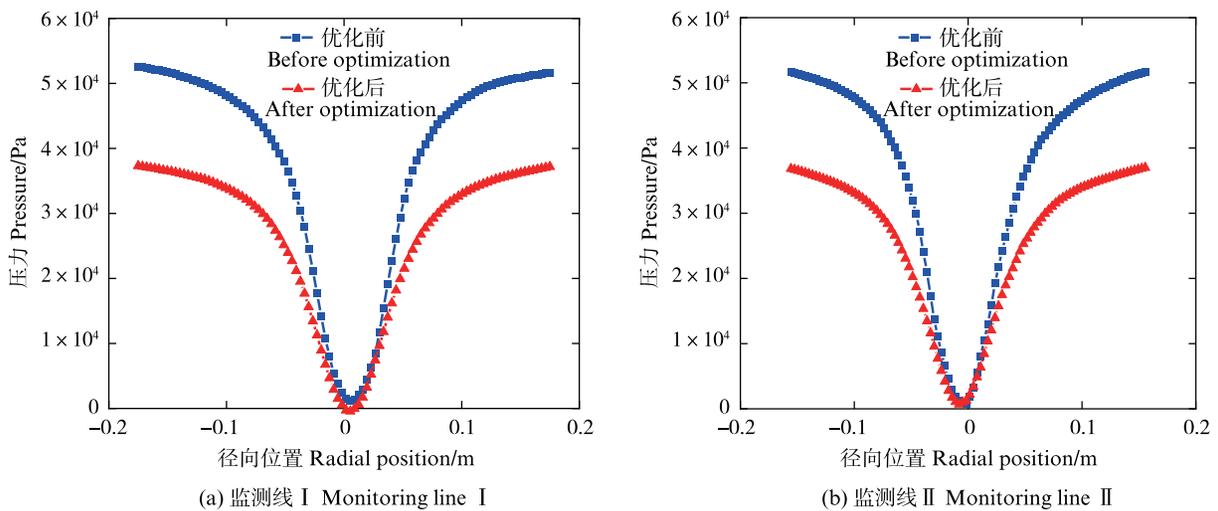


图 9 优化前后的压力分布

Fig. 9 Pressure distribution before and after optimization

4 试验与讨论

为验证数值模型和计算方法的有效性,根据图1的结构设计模型,加工制造了水力旋流器实物并进行现场测试。图10为实物图和试验流程图。本试验将池塘养殖尾水引入储水箱,并将底层泥

沙与清水充分混合形成均匀溶液。根据试验流程图,控制进水流量为60 m³/h。为确保数据准确性和可重复性,待试验装置达到稳定运行后,分别在旋流器的进水口、底流口和溢流口取样,结果发现底流口的固体颗粒物明显多于溢流口的颗粒物,尤其对于泥沙等沉淀性颗粒物的分离效果明显。

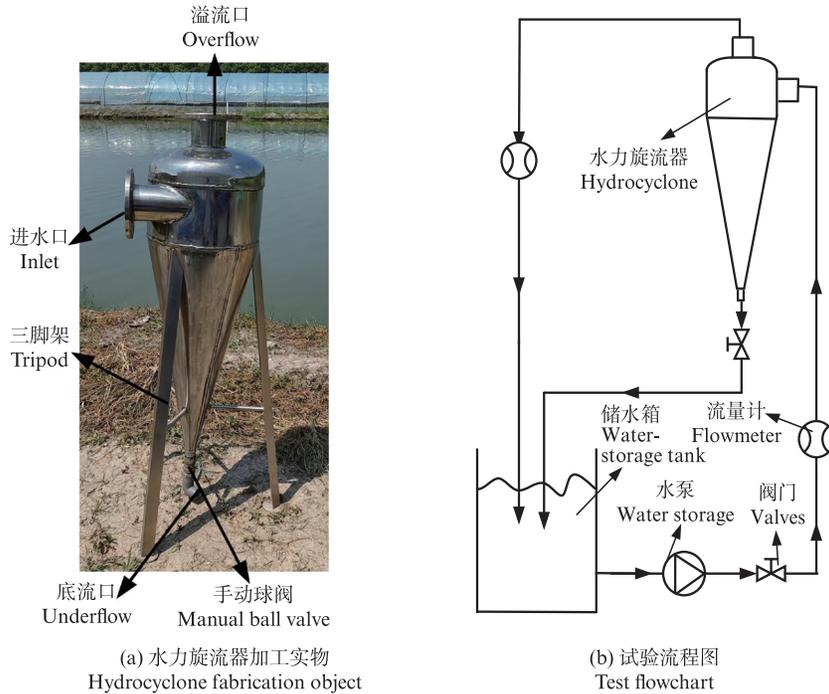


图10 水力旋流器加工实物和试验流程图
Fig. 10 Physical and test process diagrams of a hydrocyclone

图11为模拟结果和试验数据,比较分析可知,数值计算结果与试验结果的一致性较好,3种粒径颗粒物分离效率的模拟值与试验测量值误差分别为1.5%、1.7%和2.5%,验证了数值计算方法的有效性。

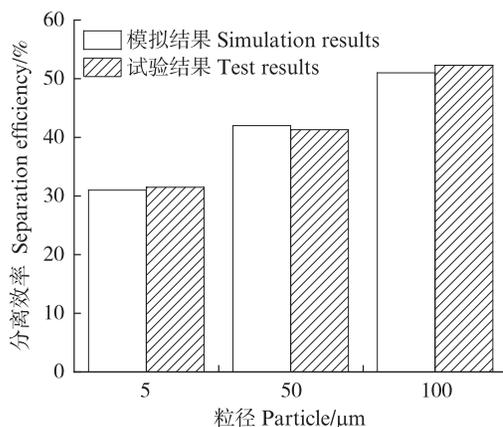


图11 数值计算结果与测试结果
Fig. 11 Numerical simulation and test results

5 结论

本文建立了水力旋流器的三维两相内流场模型,分析了旋流器的主要结构参数对流场特性及颗粒物分离效率的影响,通过试验验证了计算模型的有效性,并通过参数化正交试验法进行了结构优化设计,主要得到以下结论:

(1)本文针对南美白对虾养殖尾水,设计并优化了一种水力旋流分离器,通过数值模拟和试验验证,揭示了其结构参数对流场特征和分离效率的影响规律,并确定了最佳组合参数。该旋流器适用于池塘养殖尾水一体化处理设备的首级单元,能有效去除泥沙等沉淀性颗粒物。

(2)水力旋流器的结构参数对流场压力降的影响关系为:溢流口直径>锥角>柱段长度>溢流管插入深度>底流口直径;水力旋流器结构参数对颗粒物分离效率的影响关系为:溢流管插入深

度>锥角>柱段长度>溢流口直径>底流口直径。

(3)过优化的水力旋流器使压力降和径向压力梯度均有所减小,颗粒物的分离效率提高。当旋流器的溢流口直径为120 mm、底流口直径为32 mm、锥角为18°、溢流管插入深度为160 mm、柱段长度为390 mm的结构参数下,流场压力降降低了9 842 Pa,对养殖尾水沉淀性固体颗粒物的分离效率提高了12%。

(4)为推动旋流器在生产实践中的应用,未来研究需探索更高效的优化算法和更合理的优化模型,并结合物理模型测试,深入分析结构参数和运行参数的影响规律及机制,以实现更高效、更经济的尾水处理效果。

参考文献:

- [1] LIU W C, XU B, TAN H X, et al. Investigating the conversion from nitrifying to denitrifying water-treatment efficiencies of the biofloc biofilter in a recirculating aquaculture system [J]. *Aquaculture*, 2022, 550: 737817.
- [2] LI P J, WANG C, LIU G H, et al. A hydroponic plants and biofilm combined treatment system efficiently purified wastewater from cold flowing water aquaculture [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153534.
- [3] 徐嘉波,刘永士,施永海,等.淡水集中连片池塘与养殖尾水处理系统的综合水质评价[J].*上海海洋大学学报*, 2022, 31(1): 170-180.
- XU J B, LIU Y S, SHI Y H, et al. Comprehensive water quality evaluation of freshwater concentrated continuous ponds and aquaculture tail water treatment system [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(1): 170-180.
- [4] 王雪峰,刘文畅,樊利鹏,等.条子泥垦区养殖尾水净化河道的细菌群落结构及其与环境因子的关系[J].*上海海洋大学学报*, 2023, 32(1): 150-162.
- WANG X F, LIU W C, FAN L P, et al. Bacterial community structure and its relationship with environmental factors in the purification channel of aquaculture tailwater in Tiaozini reclamation area [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(1): 150-162.
- [5] RANJAN R, MEGARAJAN S, XAVIER B, et al. Design and performance of recirculating aquaculture system for marine finfish broodstock development [J]. *Aquacultural Engineering*, 2019, 85: 90-97.
- [6] 柯瑞林,徐慧敏,陈曦,等.臭氧对水产养殖尾水嗜水气单胞菌的杀灭效果[J].*大连海洋大学学报*, 2023, 38(6): 1013-1019.
- KE R L, XU H M, CHEN X, et al. Killing effect of ozone on *Aeromonas hydrophila* in aquaculture tailwater [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2023, 38(6): 1013-1019.
- [7] 梁则优,谭鹤群,郑祺,等.3种滤料对池塘圈养尾水处理效果的影响[J].*华中农业大学学报*, 2024, 43(2): 56-63.
- LIANG Z Y, TAN H Q, ZHENG Q, et al. Experimental study of filter media filtration for pond captive tailwater treatment [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43(2): 56-63.
- [8] LI S H, LIU Z M, CHANG Y L, et al. Removal of coke powders in coking wastewater using a hydrocyclone optimized by n-value [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141887.
- [9] ALVES D G, DA SILVA J T T, QUINTINO D B, et al. Desander mini-hydrocyclones applied to the separation of microspheres and sand in non-Newtonian fluid: Efficiencies and drag analysis [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 234: 116131.
- [10] BICALHO I C, MOGNON J L, SHIMOYAMA J, et al. Separation of yeast from alcoholic fermentation in small hydrocyclones [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 87: 62-70.
- [11] SWAIN S, MOHANTY S. A 3-dimensional Eulerian-Eulerian CFD simulation of a hydrocyclone [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(5): 2921-2932.
- [12] CEN Z L, ZHAO J G, SHEN B X. A comparative study of omega RSM and RNG k-ε model for the numerical simulation of a hydrocyclone [J]. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2014, 33(3): 53-61.
- [13] 李建平,吴康,何相逸,等.基于CFD的养殖水体固液旋流分离装置数值模拟与验证[J].*农业工程学报*, 2019, 35(11): 182-187.
- LI J P, WU K, HE X Y, et al. Numerical simulation and validation of solid-liquid cyclone separation device for aquaculture water based on CFD [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(11): 182-187.
- [14] 张俊,刘奥胜,李乐,等.用于池塘养殖尾水处理的串联式旋流器水动力特性及分离效率[J].*农业工程学报*, 2022, 38(20): 49-58.
- ZHANG J, LIU A S, LI L, et al. Hydrodynamic characteristics and separation efficiency of the series cyclone separator for pond aquaculture tail water treatment [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(20): 49-58.
- [15] LEE J. Practical applications of low-pressure hydrocyclone (LPH) for feed waste and fecal solid removal in a recirculating aquaculture system [J]. *Aquacultural*

- Engineering, 2015, 69: 37-42.
- [16] THIEMSAKUL D, PIEMJAISWANG R, SEMA T, et al. Effect of hydrocyclone design in microplastics-water separation by using computational fluid dynamics simulations [J]. Results in Engineering, 2024, 22: 102034.
- [17] LI F, LIU P K, YANG X H, et al. Purification of granular sediments from wastewater using a novel hydrocyclone [J]. Powder Technology, 2021, 393: 751-763.
- [18] ZHENG Y B, SONG T, NI L. Numerical simulation investigating the impact of regulated underflow rate on the performance of a cyclone with split flow [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 345: 127312.
- [19] 蒋明虎, 张蓓蓓, 邢雷, 等. 基于正交试验法的三相分离器结构优选与性能分析 [J]. 化工机械, 2018, 45 (5): 622-625.
- JIANG M H, ZHANG B B, XING L, et al. Structure parameter optimization and separation efficiency analysis of the three-phase hydrocyclone based on the orthogonal method [J]. Chemical Machinery, 2018, 45 (5): 622-625.
- [20] SENFETER T, FRITSCH L, BERGER M, et al. Sludge thickening in a wastewater treatment plant using a modified hydrocyclone [J]. Carbon Resources Conversion, 2021, 4: 132-141.
- [21] 唐志国, 宋安琪, 李杰, 等. 基于正交试验的两级串联油气旋流分离器结构优化 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(5): 577-583.
- TANG Z G, SONG A Q, LI J, et al. Structure optimization of a two-stage series oil-gas cyclone separator based on orthogonal experiment [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(5): 577-583.
- [22] PADHI M, VAKAMALLA T R, MANGADODDY N. Iron ore slimes beneficiation using optimised hydrocyclone operation [J]. Chemosphere, 2022, 301: 134513.
- [23] 段姗杉, 杨晨, 宋协法, 等. 循环水养殖系统微细悬浮颗粒的分布规律研究 [J]. 渔业现代化, 2021, 48(2): 22-28.
- DUAN S S, YANG C, SONG X F, et al. Distribution of suspended fine particles in recirculating aquaculture systems [J]. Fishery Modernization, 2021, 48(2): 22-28.
- [24] YANG Q, WANG H L, LIU Y, et al. Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations [J]. Separation and Purification Technology, 2010, 74(3): 271-279.
- [25] 喻黎明, 邹小艳, 谭弘, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的水力旋流器水沙运动三维数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 126-132.
- YU L M, ZOU X Y, TAN H, et al. 3D numerical simulation of water and sediment flow in hydrocyclone based on coupled CFD-DEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 126-132.
- [26] ZHANG J, ZHANG N, WANG M H, et al. Hydrodynamics of waste collection in a recirculating aquaculture tank with different flow-guide discs [J]. Aquacultural Engineering, 2024, 106: 102395.
- [27] ZHANG J, ZHANG Z H, CHE X, et al. Hydrodynamics of waste collection in a recirculating aquaculture tank with different numbers of inlet pipes [J]. Aquacultural Engineering, 2023, 101: 102324.
- [28] MOUSAVIAN S M, NAJAFI A F. Influence of geometry on separation efficiency in a hydrocyclone [J]. Archive of Applied Mechanics, 2009, 79(11): 1033-1050.
- [29] ZHANG J, GAO Y, CHEN C C, et al. Effect of combined water-jet inlets on the hydrodynamic performances in square arc-corner aquaculture tanks [J]. Ocean Engineering, 2023, 289: 116234.
- [30] 张俊, 贾广臣, 王庆诚, 等. 不同底面坡度的循环水养殖池塘净化效能 [J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30 (4): 702-709.
- ZHANG J, JIA G C, WANG Q C, et al. Purification efficiency of a recirculating aquaculture pond with different bottom slopes [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(4): 702-709.
- [31] TIAN J Y, WANG H L, LV W J, et al. Enhancement of pollutants hydrocyclone separation by adjusting back pressure ratio and pressure drop ratio [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 240: 116604.
- [32] 崔宝玉. 水力旋流器流场及分离过程的数值试验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- CUI B Y. Numerical study on flow field and separating process of hydrocyclone [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [33] 许妍霞. 水力旋流分离过程数值模拟与分析 [D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- XU Y X. Numerical simulation and analysis of the separation process in the hydrocyclone [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.

Characteristics of liquid–solid two–phase flow field and structural optimization of hydrocyclones

ZHANG Jun¹, LIU Haowei¹, CHENG Guofeng², YAO Jingjing¹, CAO Shouqi¹, LIU Xingguo²

(1. College of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the distinct characteristics of sediment particles in South American white shrimp pond tailwater, a hydraulic cyclone separator was devised. Employing Computational Fluid Dynamics (CFD) alongside the Discrete Phase Model (DPM) and the Reynolds Stress Turbulence Model (RSM), a numerical model for the cyclone separator's three-dimensional two-phase internal flow field was established. Design variables, including overflow port diameter, underflow port diameter, cone angle, overflow pipe insertion depth, and column length, were optimized using an $L_{16}(4^5)$ parameterized orthogonal optimization experimental model. This model assessed their impact on flow field characteristics and solid particle separation efficiency. Through range analysis, optimal parameter combinations were identified, achieving a balance between reducing pressure drop and enhancing particle separation efficiency. For example, parameters such as an overflow port diameter of 120 mm, an underflow port diameter of 32 mm, a cone angle of 18° , an overflow pipe insertion depth of 160 mm, and a column length of 390 mm resulted in a significant reduction in pressure drop by 9 842 Pa and a 12% increase in separation efficiency. Physical prototypes were fabricated and field-tested, confirming the effectiveness of the proposed methodology. Comparison of water quality characteristics at the cyclone separator's inlet, underflow, and overflow ports revealed negligible relative errors between simulated and experimental particle separation efficiencies, not exceeding 5%. These findings provide a solid basis for optimizing cyclone separators and their application in tailwater treatment in pond aquaculture.

Key words: aquaculture tailwater; hydrocyclone; orthogonal test method; internal flow field; separation efficiency