

文章编号: 1674-5566(2023)05-1068-12

DOI: 10.12024/jsou.20230604226

## 颗粒特性对矩形养殖舱中颗粒物去除效果的影响

吉泽坤<sup>1,2</sup>, 刘 晃<sup>2,3</sup>, 崔铭超<sup>2,3</sup>, 张成林<sup>2,3</sup>, 秦 康<sup>1,2</sup>

(1. 大连海洋大学 航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092; 3. 青岛海洋科技中心, 山东 青岛 266100)

**摘 要:** 养殖工船是拓展深远海养殖空间的新途径之一, 在船载舱养过程中, 如果未消化的饲料残渣和排泄物等颗粒物不能及时排出, 则会对鱼类健康及其生长环境产生严重的负面影响。采用 FLOW-3D 软件进行数值仿真计算, 研究了静止状态下 30 万 t 级养殖工船养殖舱出水口数目对舱内流场特征的影响, 并在此基础上探究不同粒径与密度的颗粒物在舱内的去除效果。结果表明: 当总进出水流量与出水口总面积恒定时, 出水口数目从 1 增加到 4,  $V_{99\%}$  从 0.244 m/s 降低至 0.232 m/s,  $V_{95\%}$  从 0.215 m/s 降低至 0.203 m/s, 随着出水口数目的增加, 养殖舱内流速减小; 以占总量 95% 的颗粒物排出养殖舱所需时间为评价标准, 当颗粒物密度为 1 050 kg/m<sup>3</sup> 时, 粒径为 1 mm 的颗粒物排出需要约 24 min, 粒径为 0.5 mm 的颗粒物排出需要约 45 min, 粒径为 0.1 mm 的颗粒物排出需要约 78 min, 当颗粒物密度相同时, 随着粒径增大, 其在养殖舱内的停留时间减少; 颗粒物粒径为 1 mm 时, 密度为 1 100 kg/m<sup>3</sup> 的颗粒物排出需要约 15 min, 密度为 1 150 kg/m<sup>3</sup> 的颗粒物排出需要约 11.6 min, 当颗粒物粒径相同时, 颗粒物密度越大, 其在养殖舱流场内的停留时间越短。该研究形成了 CFD 数值仿真计算与数理统计有机结合的综合分析方法, 为之后具有不同横摇周期和较大横摇幅值的复杂工况提供研究手段及理论依据。

**关键词:** 养殖工船; 养殖舱; 颗粒物; 流速; 数值仿真; 数理统计分析

**中图分类号:** S 953.2      **文献标志码:** A

深远海水域具有水质优良、水温适宜和远离陆源性污染与病害<sup>[1]</sup>等优点, 积极发展深远海养殖工程是中国推动渔业供给侧结构性改革的重要措施, 符合国家的产业导向和需求。其中大型游弋式养殖工船是中国渔业开发海洋生物资源的一个重要发展方向, 是各类名优鱼种人工饲养的大型可移动养殖平台。自 20 世纪 70 年代开始, 养殖工船总体构想<sup>[2]</sup>及大型养殖工船的系统<sup>[3]</sup>、总体设计<sup>[4]</sup>陆续展开。崔铭超等<sup>[5]</sup>系统地提出了养殖工船的构建与总体设计思路, 强调了养殖舱内流场的适渔性问题。养殖舱舱体结构的优化、舱内流场特征等问题成为船舶与海洋工程研究领域中的热点问题之一<sup>[6-8]</sup>。

养殖舱内的流场特征和适渔性与舱体结构息息相关。在陆基工厂化循环水养殖鱼池的基

础上, 综合考虑水力特性和生物学因素, 研究了养殖舱形状对适渔环境的影响, 发现方形养舱更有利于鱼类生长发育<sup>[9]</sup>。并且当方形养舱的长宽比大于 1.91 时, 舱内的水体流动均匀性大幅降低, 增加了舱内低速区的比重; 而当长宽比小于 1.43 时, 水体流动均匀性无明显变化<sup>[10]</sup>。此外, 采用适当间距分布的进水口, 带有径向分量的人射水流都可提高舱内的流动均匀性<sup>[11]</sup>。经过对养殖工船中间试验船<sup>[12]</sup>与“国信 1 号”的横摇角度与周期的实测, 发现工船横摇角度幅值在 0°~7.3°, 且多集中在 0°~2°。国内外学者对于船舶液舱横摇晃荡的现象进行了大量试验与数值仿真, 通过依次增减横摇角度与周期进行观察对比, 但是综合静止状态下的舱内流场与横摇晃荡对舱内流场的影响的研究较少。因此, 探究 30 万 t 级

收稿日期: 2023-06-14      修回日期: 2023-08-20

基金项目: 青岛海洋科技中心山东省专项经费(2022QNLMO30001-3)

作者简介: 吉泽坤(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为船舶与海洋工程。E-mail: jizekun6339@163.com

通信作者: 刘 晃, E-mail: liuhuag@fmiri.ac.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>

工船养殖舱静态条件下舱内流场特征及颗粒物去除影响因素的研究变得格外重要,将为后续开展横摇晃荡对矩形养殖舱舱内流场与颗粒物去除的影响研究奠定基础,将使得对养殖工船养殖舱内的相关研究更加系统化与体系化。

养殖舱内水体环境的流速大小、流动的均匀程度对环境内饲料、残饵与粪便等颗粒物的去除有着至关重要的影响<sup>[13-15]</sup>。具有适当流速的养殖水体不仅可以使溶氧在有限的养殖空间内均匀分布,还有利于养殖舱中由残饵、排泄物和次级代谢物构成的颗粒物<sup>[16-19]</sup>去除排出。LIU等<sup>[20]</sup>对八角形水池的自清洁能力与池内的流速分布进行了实验与CFD水动力学仿真,得出了粒径范围在1~5 mm的颗粒状饲料,其粒径越小,在水池内的停留时间越长、颗粒去除率越低的结论;但并未进一步研究小于1 mm的粒径及颗粒物的密度对停留时间与去除率的影响。国内外学者对水产养殖系统中颗粒物的产生做了大量研究,认为水产养殖的废弃颗粒物主要由未消化的饲料残渣和排泄物<sup>[21]</sup>等组成。随着鱼群在工船养殖舱内的生长发育,养殖系统中颗粒物不断积累,从而产生如水质严重恶化等各类不利的影 响。颗粒物具有比重略小、流动性好、带有一定的黏附性等特征<sup>[22]</sup>,颗粒的分布规律与密度特性、颗粒半径等参数息息相关,其运动分布规律由系统流态、颗粒来源、固形物去除方式、温度、鱼体大小等共同决定。

工船养殖是今后水产养殖业的发展方向之一,是发展大规模高密度养殖业的关键一步。本研究基于FLOW-3D<sup>[23]</sup>软件,对某30万t级养殖工船舱内流场进行数值仿真计算,分析出水口数目对流场的影响;并在此基础上,探究了养殖舱内颗粒物的粒径与密度对其运动与去除的影响,如何及时处理这些固体颗粒物成为工船养殖系统中水处理的重中之重,其去除效率决定了系统的稳定与水质状况,并为后续不同工况下的船载养殖舱的应用提供理论基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 数值仿真模型

在本文研究的数值仿真中,养殖工船船载养殖舱内流体为三维不可压缩流体,控制方程为连续性方程、雷诺平均Navier-Stokes方程(RANS);

湍流模型选择RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型。本研究的数值仿真通过FLOW-3D软件完成,在FLOW-3D中,数值模型基于笛卡尔网格坐标系统,采用面积和体积孔隙函数解析计算区域边界和区域类型,该方法称为FAVOR<sup>TM</sup>方法<sup>[24]</sup>(Fractional area/volume obstacle representation method)。颗粒物Particles的种类选择具有运动特性的质量Mass粒子;质量粒子与流体的相互作用为双向动量耦合(Two-way momentum coupling);颗粒物的生成方式设置为粒子源(Particle source)生成。

### 1.2 控制方程

养殖舱内水体为不可压缩流体,其连续性方程为

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

其动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + F_i \quad (2)$$

式中: $u$ 为速度, m/s; $\rho$ 为密度, kg/m<sup>3</sup>; $\mu$ 为运动黏性系数, kg/(m·s); $F$ 为体力, kg/(m<sup>2</sup>·s<sup>2</sup>); $p$ 为压强, kg/(m·s<sup>2</sup>)。

湍流模型采用RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型,湍动能 $k_T$ 和湍流耗散率 $\varepsilon_T$ 的输运方程为

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + D_{k_T} - \varepsilon_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = c_1 \frac{P_T \varepsilon_T}{k_T} + D_{\varepsilon_T} - c_2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (4)$$

式中: $P_T$ 为湍动能生成项; $D_{k_T}$ 为湍动能扩散项; $D_{\varepsilon_T}$ 为湍流耗散扩散项; $c_1$ 和 $c_2$ 为系数,在经典的 $k-\varepsilon$ 湍流模型中, $c_1=1.44$ , $c_2=1.92$ 。

### 1.3 数值仿真实验

为确保数值仿真结果的有效性与可靠性,首先须对数值仿真模型进行验证。本研究基于LIU等<sup>[25]</sup>的试验结果,开展仿真计算验证。如图1所示,根据LIU等自由液面晃荡试验的设置建立相应的矩形水箱模型,水箱模型长570 mm,宽310 mm,高300 mm,初始液面高度为150 mm,水箱内水体的固有频率 $\omega_0=6.0578 \text{ s}^{-1}$ ;距水箱左壁和右壁20 mm处以及水箱中央位置依次布置3个监测仪器(Probe 1、Probe 2、Probe 3),用来监测自由液面的

高度。水箱尺寸参数与监测仪器的布置如图1所示。建立网格尺寸为 $2.5 \times 10^{-3}$  m的均匀网格,水箱的外部激励为 $S(t) = -S_0 \sin(\omega t)$ 。

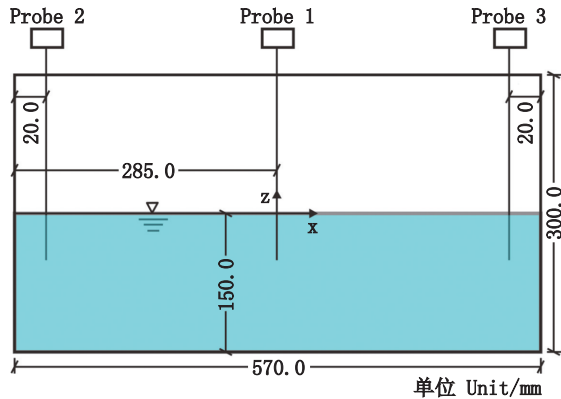


图1 用于数值模型验证的矩形水箱几何模型

Fig. 1 Rectangular tank geometry model for numerical model validation

将数值仿真的计算结果与LIU等的试验数据进行对比,如图2所示,仿真结果与试验数据吻合度较高,数值仿真的结果能够较好地反映实际情况,说明本研究所构建的数值模型是正确的,可以应用于工船船载舱养的数值仿真计算。

#### 1.4 养殖舱模型及其参数设置

本研究所针对的30万t级养殖工船,如图3a所示,船长约342.6 m、型宽约66 m、型深32 m、设计吃水18.5 m;养殖舱舱长42 m、宽29.2 m、高19.5 m;养殖舱的底面距船体基线约3 m,工作液位相对于船体基线高约19 m,舱内最大水深为16 m。为提高流速的均匀性,如图3b采用等间距分布的进出水口,间隔距离为3.5 m;舱体在4个壁面转角位置各设置4个进水口,全舱共16个进水口;养殖舱24 h内换水16次。

在FLOW-3D软件中,养殖舱的固液耦合界面的边界条件设置为无滑移边界(Wall);气液耦合界面的边界条件设置为流体体积分数(Fluid fraction)为0的大气压强。养殖舱的进出水流量通过质量动量源(Mass momentum source)中的入流源项实现。

#### 1.5 网格收敛性

本研究采用横摇周期为7 s、横摇角度为 $5^\circ$ 的工况进行网格收敛性验证。模型采用均匀网格划分,网格尺寸分别为0.2 m、0.3 m、0.4 m,网格数量分别在320万、100万和43万。计算时长为1 800 s。图4给出了坐标(0, 4.25, 11)m处的速

度幅值变化,在650 s以后速度幅值达到稳定的周期性变化状态。以网格尺寸为0.2 m工况计算的速度幅值和平均动能为基准,以0.2 m工况计算结果的95%作为收敛标准,综合考虑计算精度和效率,下面的计算均采用分辨率为0.3 m的网格。

#### 1.6 数值仿真工况的分组设置

本研究基于养殖舱模型出水口的数量设置和颗粒物的粒径与密度,对不同的工况进行数值仿真计算,分析出水口数目对舱内流场特征的影响,并在此基础上探究不同粒径与密度的颗粒物在舱内的去除效果,数值仿真工况的分组详见表1。不同种类的养殖对象和饲料产生的颗粒物属性不同,工厂化养鱼产生的固体废弃物量大且颗粒物分布范围较广,大部分粒径为0.1~1.0 mm,密度为 $1.06 \sim 1.19 \text{ g/cm}^3$ [26]。为使数值仿真模型更好地模拟实际工况中残饵、排泄物组成的颗粒物的分布情况,颗粒物的生成方式设置为粒子源(Particle source)生成,设置4处粒子源,粒子源的截面位置如图5所示,z轴高度高于净水面0.5 m;每个粒子源释放速率(Rate of generation)为每秒钟释放200颗,4个粒子源持续5 s共生成4 000个颗粒物。

#### 1.7 数据处理

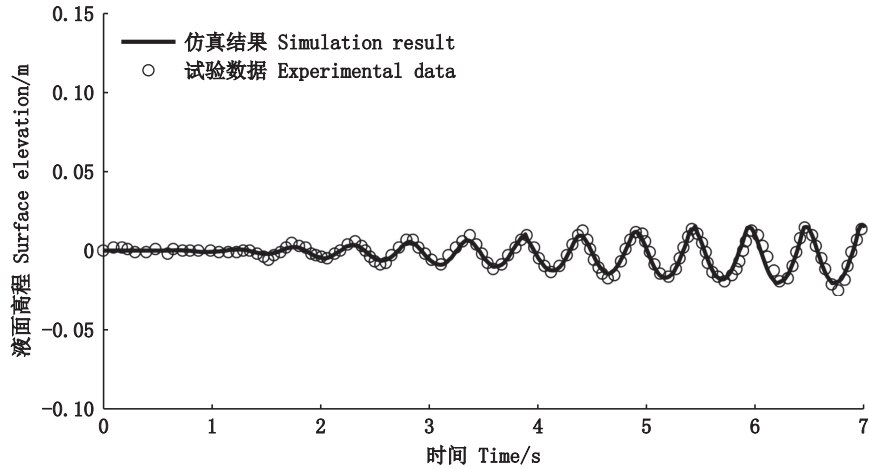
对于工船养殖舱的流场分析,仅通过监测点、线或平面上流速大小的变化不能代表整个舱内流场的特征;因此,本研究通过概率密度(Probability density)与累积概率密度(Cumulative probability density)对整个养殖舱的流速进行统计分析。为避免因进出水口附近出现过大大流速的干扰而无法掌握舱内流场的整体情况,故而取流速数据的99%分位数来代表最大流速,即养殖舱内最大流速为 $V_{99\%}$ ;  $V_{95\%}$ 代表流速数据的95%分位数;  $V_{50\%}$ 代表流速数据的中位数。此外,分析出水口数目对 $V_{99\%}$ 、 $V_{95\%}$ 、 $V_{50\%}$ 的影响,并进行显著性分析。在本研究中,数据的处理通过MATLAB R2021a和Microsoft Excel 2016完成。

## 2 结果分析

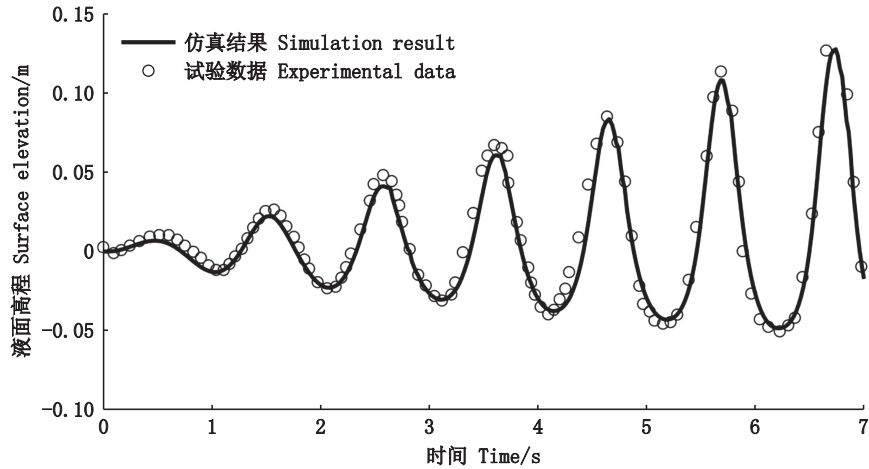
### 2.1 出水口数目对养殖舱流场的影响

养殖舱在无外界激励运动,入流源项的流量与流速保持稳定的情况下,数值仿真计算实体养

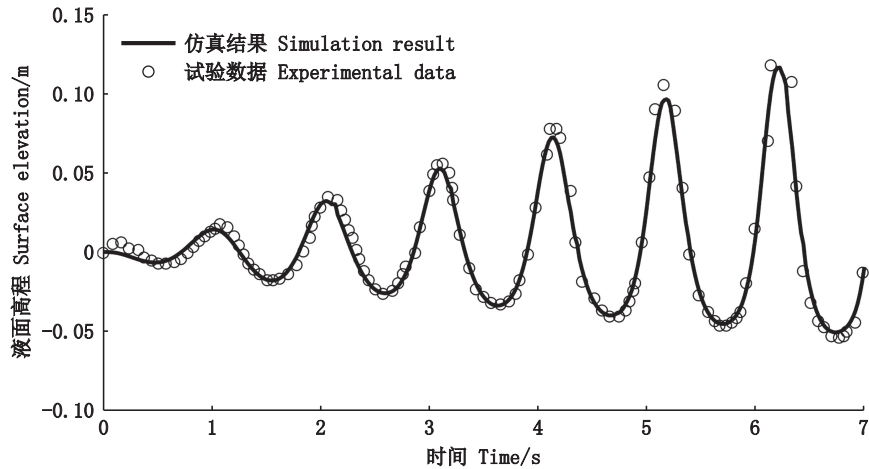
舱内的流场特征。计算时长统一设置为 6 500 s, 能和平均湍动能,发现 5 000 s 后计算趋于稳定  
通过在 FLOW-3D 监测计算网格内流体的平均动 状态。



(a) Probe 1处自由液面高度随时间的变化  
Variation of free surface elevation with time for probe 1



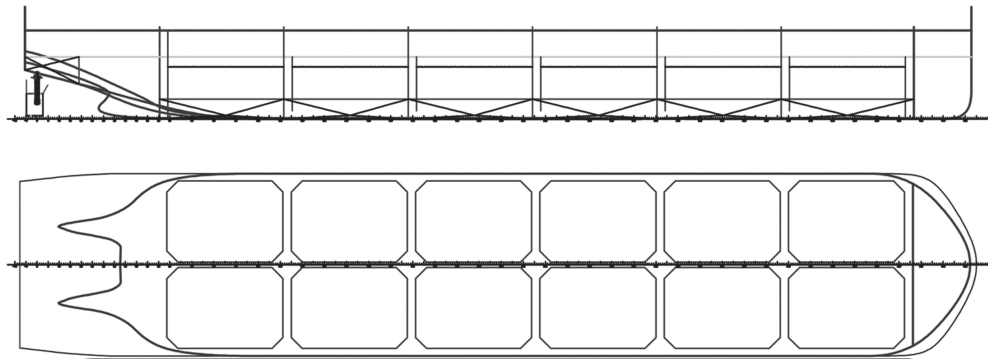
(b) Probe 2处自由液面高度随时间的变化  
Variation of free surface elevation with time for probe 2



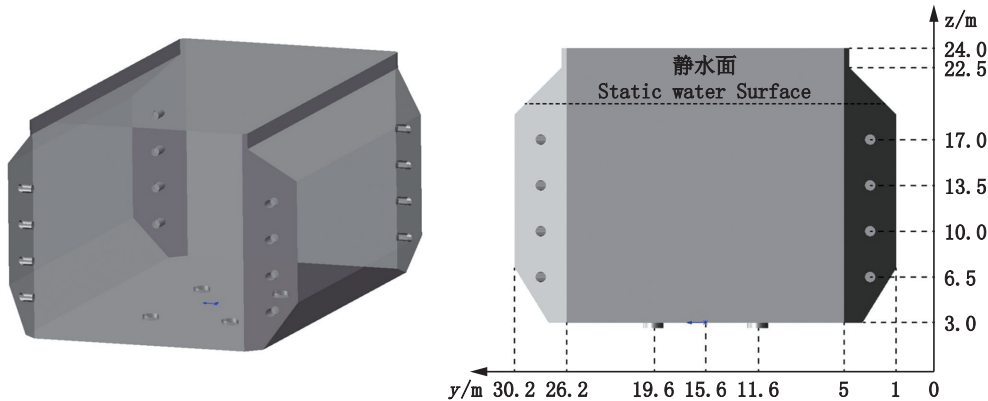
(c) Probe 3处自由液面高度随时间的变化  
Variation of free surface elevation with time for probe 3

图2 模型试验数据与仿真结果对比

Fig. 2 Comparison of model test data and simulation results



(a) 30万t级养殖工船养殖舱分布图  
Distribution of aquaculture tanks of the 300 000-ton aquaculture vessel



(b) 养殖舱三维模型及模型侧视尺寸图  
Three-dimensional model of aquaculture tank and dimensions of the model in side view

图3 30万t级工船养殖舱的布置与结构

Fig. 3 Arrangement and structure of the aquaculture tank of the 300 000-ton aquaculture vessel

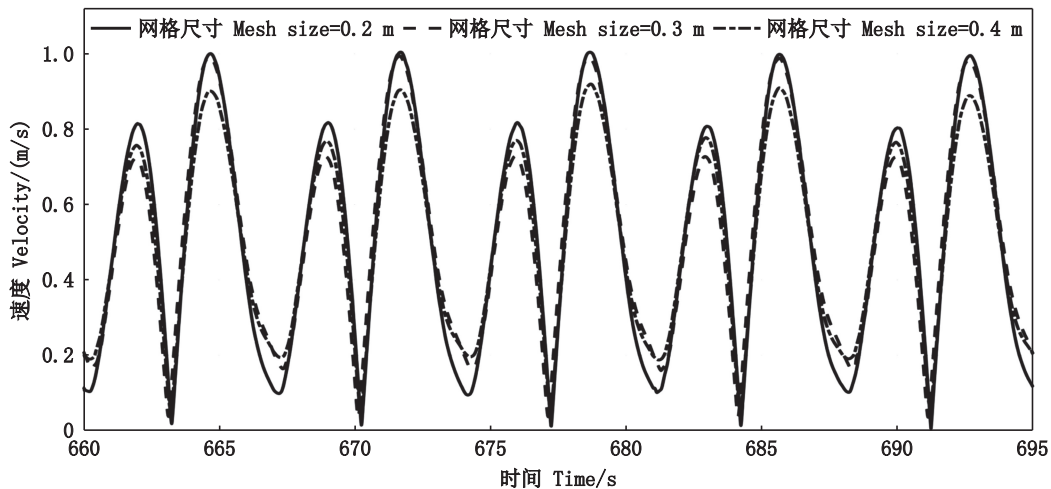


图4 网格收敛性验证

Fig. 4 Mesh convergence validation

为分析出水口数目对舱内流速大小和流场特征的影响,数值仿真计算了养殖舱出水口数目为2以及出水口数目为4的两种工况的舱内流场,并与传统单一出水口的养殖舱流场进行了对比分析。如图6a所示,当总进出水流量与出水口总面积不变时,传统单一出水口的流速

概率密度与其他工况差别较大,两个及两个以上出水口的工况流速概率密度较为相近;随着出水口数目的增加,养殖舱内的流速也整体随之降低;舱内流速的最大幅值随着出水口数目的增加而减小。如表2所示,当总进出水流量不变时,出水口数目从1增加到4,  $V_{99\%}$  从0.244 m/s降低

至 0.232 m/s;  $V_{95\%}$  从 0.215 m/s 降低至 0.203 m/s。如图 6b 所示,通过 3 种出水口数目不同的工况对比发现,出水口数目的不同对流速的累积概率密度影响较小,舱内流速幅值的分布占比较为相似。

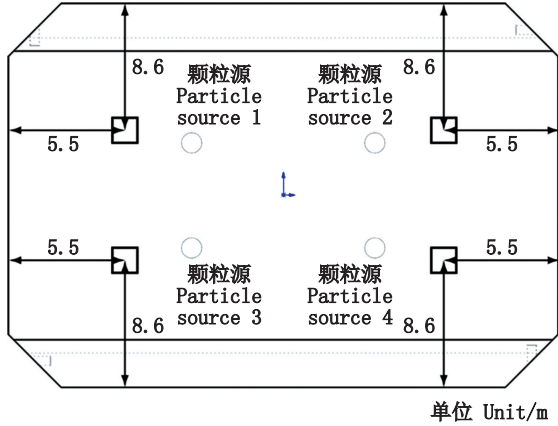
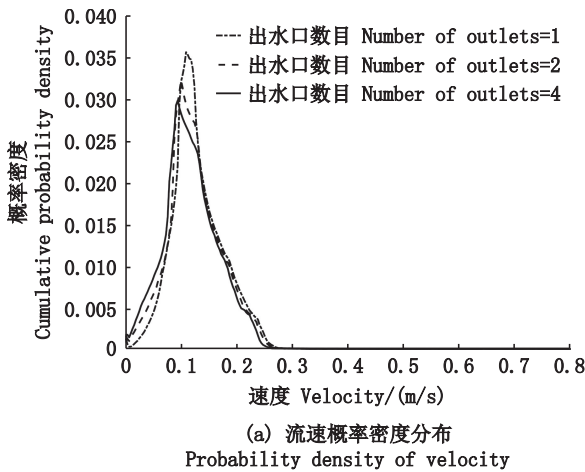
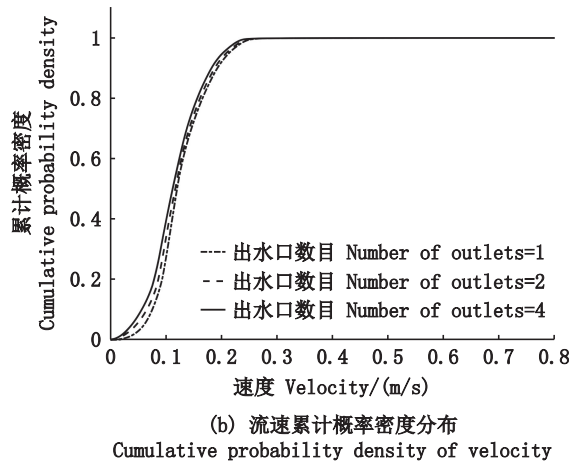


图 5 颗粒物投放源俯视图  
Fig. 5 Top view of particle sources

对出水口数目为 4 的养殖舱流速进行后处理分析,静止状态下舱内水流速度一般在 0.21 m/s 以内。图 7 为俯视剖面( $z=14.1$  m)和侧视剖面图



(a) 流速概率密度分布  
Probability density of velocity



(b) 流速累积概率密度分布  
Cumulative probability density of velocity

图 6 养殖舱内水体速度的数理统计分布

Fig. 6 Mathematical and statistical distribution of water velocity in the aquaculture tank

表 2 流场的特征流速比较

Tab. 2 Comparison of characteristic flow velocities of flow fields

出水口数目 Outlet number	流速数据的 99% 分位数 $V_{99\%}/(m/s)$	流速数据的 95% 分位数 $V_{95\%}/(m/s)$	流速数据的中位数 $V_{50\%}/(m/s)$
1	0.244	0.215	0.121
2	0.239	0.209	0.118
4	0.232	0.203	0.113

2.2 粒径对养殖舱中颗粒物去除的影响  
为探究颗粒物粒径对养殖舱内颗粒物去除

( $x=0$  m)上的流速分布特征,可以观察到养殖舱内水体在进水推流下形成逆时针旋转的水流,在舱体中心存在大面积低速区,流速幅值由垂向中心区域向舱壁处渐渐增大。在进出水口位置附近流速明显增大,整个养舱内的最大流速出现在进出水口的边缘位置,其中进水口附近的最大流速为 0.328 m/s,底部出水口附近的最大流速为 0.297 m/s。

表 1 颗粒物数值计算工况分组  
Tab. 1 Particle numerical calculation working condition grouping

组别	颗粒物粒径 Particle diameter/mm	颗粒物密度 Particle density/( $kg/m^3$ )	舱体结构 Tank structure
A1	0.1		
A2	0.5	1 050	
A3	1		16 个进水口、4 个出水口
B1		1 050	
B2	1	1 100	
B3		1 150	

注:在上述工况中,均采用 16 个进水口与 4 个出水口的养殖舱模型;养殖舱 24 h 内换水 16 次。In the above mentioned working conditions, all adopt the aquaculture tank with 16 inlets and 4 outlets. Water change 16 times in 24 hours in the aquaculture tank.

效果的影响,控制颗粒物密度为 1 050  $kg/m^3$ ,发现颗粒物粒径越大,在养殖舱内的去除效果越

好。以占总量95%的颗粒物(3 800个)排出养殖舱所需时间为标准,A3工况粒径为1 mm的颗粒物排出需要约1 428 s,约24 min;A2工况粒径为0.5 mm的颗粒物排出需要约2 689 s,约45 min;A1工况粒径为0.1 mm的颗粒物排出需要约4 682 s,约78 min。如图8所示,粒径不同的3种工况在整个计算过程的第5 000 s开始投放颗粒物,颗

颗粒物在养殖舱内随水流逆时针运动。前70 s时3种工况中舱内的颗粒物数量保持不变;在70~250 s时,由于颗粒物的沉降与扩散,颗粒物数量开始逐步下降,且在这一时间段数量的下降速度较快,3种工况的颗粒物排出速度较为相近。

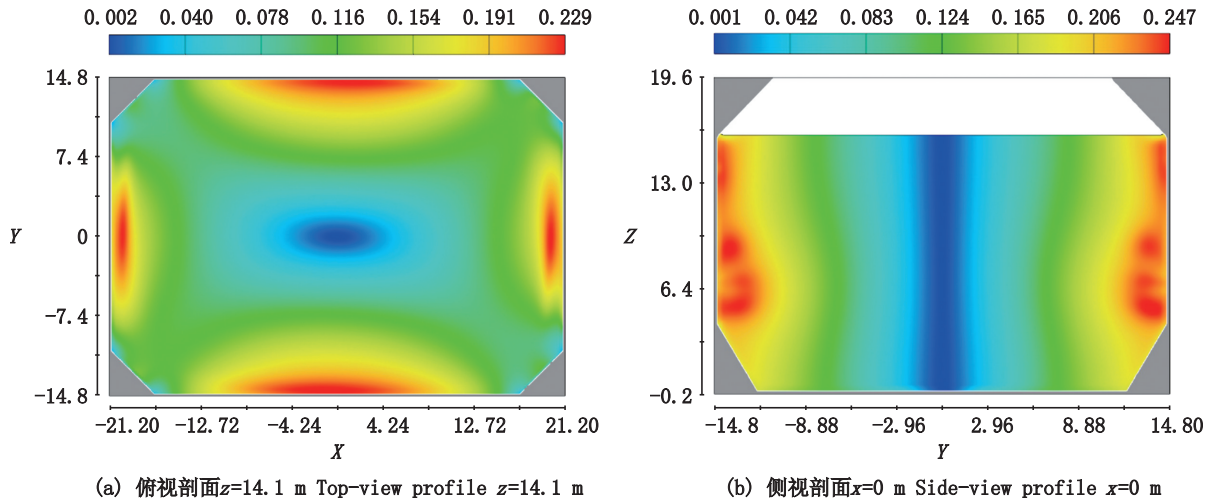


图7 静态条件下水体俯视和侧视速度特征云图

Fig. 7 Contours of top and side velocity characteristics of water under static condition

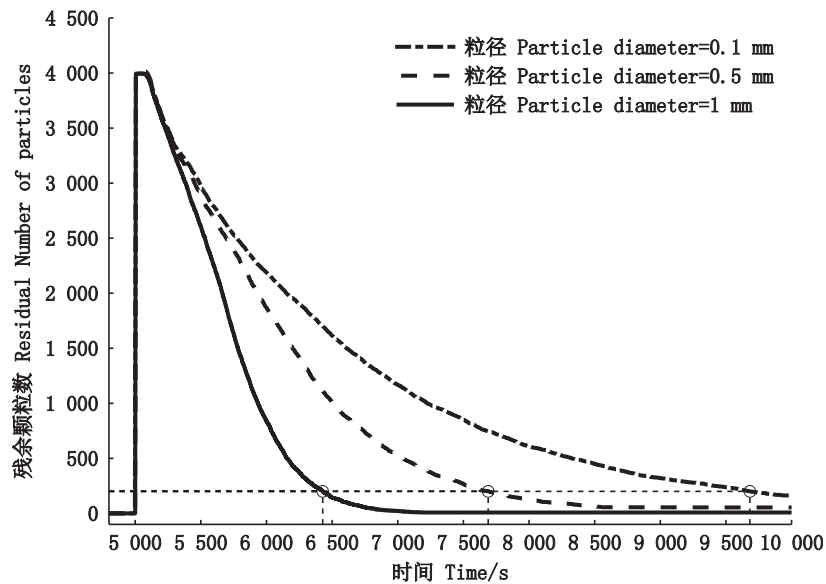


图8 不同粒径下残余颗粒数随时间的变化

Fig. 8 Variation of residual particle number with time at different particle diameters

粒径为1 mm的A3工况在颗粒物投放后的1 200 s内,舱内颗粒物数量的下降保持一个较大且稳定的速率,此时颗粒物去除速率较大且较为稳定;在1 200 s之后颗粒物数量下降的速率减小,数量曲线趋于平稳,颗粒物去除速率缓

慢减小;在约2 187 s时,颗粒物的数量不再减少,颗粒物残余量约占投放总数的0.2%,A3工况的颗粒物去除率为99.8%。粒径为0.5 mm的A2工况在颗粒物投放后的约1 237 s内,颗粒物数量下降的速率始终保持稳定且速率较大,

此时颗粒物的去除速率较大且较为稳定;在 1 237~3 469 s 时,颗粒物数量下降的速率缓缓降低,数量曲线渐渐趋于平缓;从 3 469 s 到算例计算结束,养殖舱内残留颗粒物的数量不再变化,颗粒物残余量约占投放总数量的 1.148%,A2 工况的颗粒物去除率为 98.852%。粒径为 0.1 mm 的 A1 工况中,颗粒物数量下降的速率比 1 mm 与 0.5 mm 粒径两种工况的速率小,250 s 左右之后,残余颗粒物数量的下降速率保持稳定减小,数量曲线趋于平缓;约 4 946 s 后,养殖舱内残留颗粒物的数量不再变化,颗粒物残余量约占投放总数量的 4.075%,A2 工况的颗粒物去除率为 95.925%。

### 2.3 密度对养殖舱中颗粒物去除的影响

为探究颗粒物密度对养殖舱内颗粒物的去除效果的影响,控制颗粒物粒径为 1 mm,发现

颗粒物自身密度越大,在养殖舱内的去除效果越好。以占总量 95% 的颗粒物(3 800 个)排出养殖舱所需时间为标准,密度为 1 050 kg/m<sup>3</sup> 的颗粒物排出需要约 1 428 s,约 24 min;密度为 1 100 kg/m<sup>3</sup> 的颗粒物排出需要约 908 s,约 15 min;密度为 1 150 kg/m<sup>3</sup> 的颗粒物排出需要约 695 s,约 11.6 min。如图 9 所示,自身密度不同的 3 种工况在整个计算过程的第 5 000 秒开始投放颗粒物,颗粒物在养殖舱内随水流逆时针运动。前 70 s 内 3 种工况中舱内的颗粒物数量保持不变;在 70~160 s 时,由于颗粒物的沉降与扩散,颗粒物数量开始逐步下降,且在这一时间段下降速度较快,3 种工况的颗粒物排出速度较为相近。表 3 为粒径 1 mm、密度 1 050 kg/m<sup>3</sup> 的对照工况中关键时间点的颗粒物的扩散运动与去除情况。

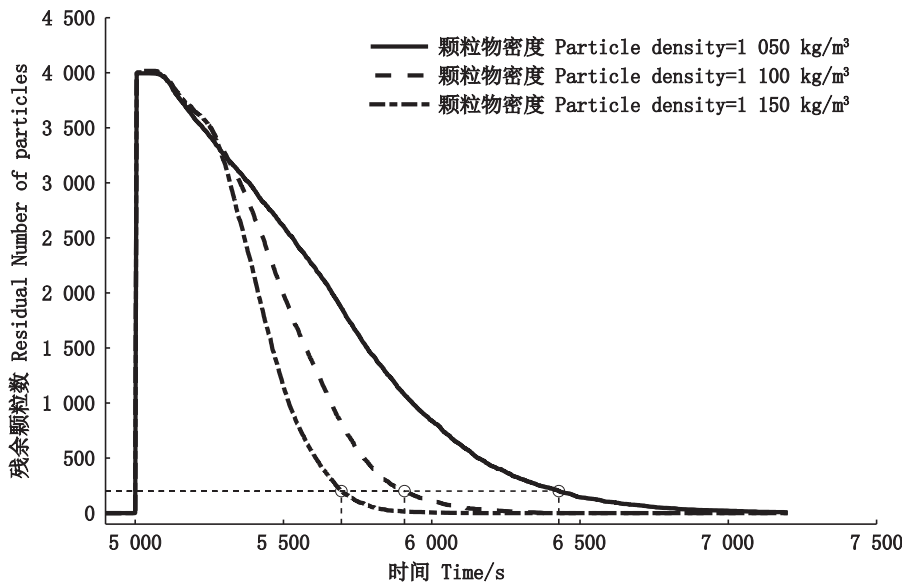


图 9 不同密度下残余颗粒数随时间的变化

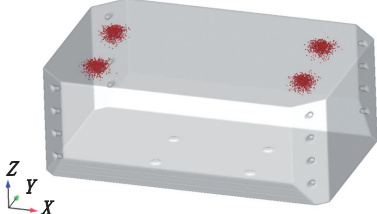
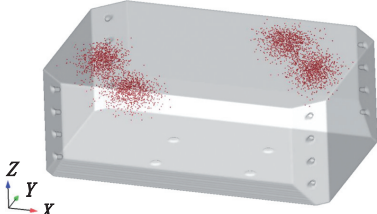
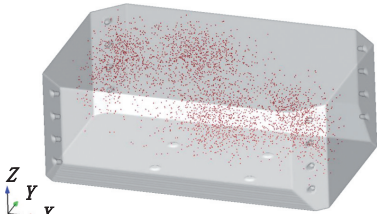
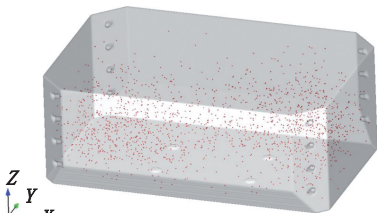
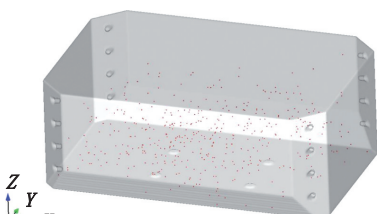
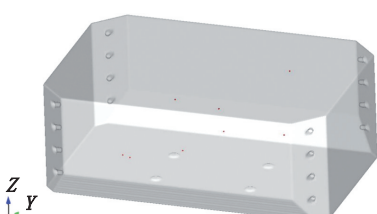
Fig. 9 Variation of residual particle number with time at different particle densities

颗粒物密度为 1 050 kg/m<sup>3</sup> 的 B1 工况与颗粒物粒径为 1 mm 的 A3 工况颗粒物参数相同,计算结果一致。密度为 1 100 kg/m<sup>3</sup> 的 B2 与 1 150 kg/m<sup>3</sup> 的 B3 工况在颗粒物投放后的 200 s 内,舱内颗粒物数量保持着与对照工况 B1 相近的下降速率,此时段内 3 种密度不同颗粒物的排出速率近似;在 200~1 170 s 时,密度为 1 100 kg/m<sup>3</sup> 的 B2 工况中颗粒物数量下降速率依然较大却有缓慢降低的趋势,此时段内的养殖舱去除颗粒物的速率逐渐变缓;当约 1 170 s 后,此时数量曲线趋于

平稳,残余颗粒物的数量基本不再变化。当 B2 工况计算结束时,舱内无颗粒物残余,去除率为 100%。相较于自身密度更小的颗粒物工况,密度最大的 1 150 kg/m<sup>3</sup> 的 B3 工况中,颗粒物在 200~840 s 时段中,曲线下降幅度最大、颗粒物数量下降速度最为迅猛;于 840 s 后,数量曲线趋于平稳,养殖舱内残余颗粒物的数量不再变化。当 B3 工况计算结束时,舱内无颗粒物残余,去除率为 100%。



表3 粒径1 mm、密度1 050 kg/m<sup>3</sup>的对照工况中不同时间点的颗粒物残留情况  
 Tab. 3 Particle residues at different time points in the control condition with particle diameter 1 mm and density 1 050 kg/m<sup>3</sup>

序号 Serial number	时间 Time/s	数值仿真图 Numerical simulation diagrams	特征描述 Feature description
1	15		颗粒物投放完毕
2	70		颗粒物进入流场后小幅扩散
3	250		颗粒物扩散至全舱,并随水流做逆时针运动
4	750		颗粒物去除速率逐步增大
5	1 200		颗粒物去除速率逐渐放缓
6	2 200		舱内颗粒物只剩下少量残留

### 3 讨论

#### 3.1 出水口数目对流场的影响与养殖舱内的流场特征

在养殖工船的日常作业中,常通过增大总进

出水流量来增加养殖舱24 h内的换水次数、缩短单次排水所需的时间(舱内水体体积/总进水量),加快养殖舱水体的更新和流场中颗粒物的排出。但养殖舱进出水流量的大幅增加而导致的水体流速过大,对鱼类的生长发育造成不利影响的

问题也随之而来。本研究基于秦康等<sup>[27]</sup>对总进水量与进水口数目的研究基础上,探究了养殖舱底部的出水口保持总面积一定的情况下,出水口数目的变化对舱内流场特征与流速大小的影响。结果表明,多出水口养殖舱如出水口数目为2与出水口数目为4的工况相较于传统单一出水口的工况,舱内的最大流速、 $V_{99\%}$ 与 $V_{95\%}$ 等大幅降低,证明多出水口结构对舱内流场流速有显著影响;而出水口数目为2与出水口数目为4的多出水口工况中养殖舱内的不同流速占比、最大流速、 $V_{99\%}$ 与 $V_{95\%}$ 等较为接近,此时出水口数目对舱内流场流速影响较小。因此,当进水口的数目与出水口总面积一定时,因增加总进出水流量(换水次数)而导致养殖舱内流速大于鱼类适养流速上限时,可以通过增加出水口数目来降低舱内流速。

经计算发现,数值仿真计算5 000 s后舱内流场趋于稳定,静态条件下养殖舱内的流场特征具有水体在进水推动下形成逆时针旋转的水流,在舱体中心存在大面积低速区,流速幅值由中心区域向舱壁处渐渐增大,在进出水口位置附近流速明显增大,整个养殖舱内的最大流速出现在进出水口的边缘位置等明显特征,与崔铭超等<sup>[28]</sup>对10万t级养殖工船实体养殖舱在无外界激励运动下达到稳态后,舱内流场特征的分析一致。

### 3.2 颗粒物粒径与密度对其去除效果的影响

对于由残饵与排泄物等组成的废弃颗粒物,其在流场中的运动与去除由养殖空间内的流场与自身的粒径与密度共同作用。因此在研究养殖舱内的流场特征与流速时,颗粒物自身的粒径与密度等特性对其运动和去除效果的影响不容忽视。研究表明,颗粒物自身的粒径与密度对养殖舱内颗粒物的去除效果有显著影响,随着粒径的增大,颗粒物在舱内的停留时间大幅缩短,其去除效果显著增强、颗粒物的残余率大幅降低,印证了LIU等<sup>[20]</sup>在八角池中实验与CFD仿真中所得出的结论。

随着颗粒物密度的减小,颗粒物在舱内的停留时间大幅增加,其排出效果减弱较为明显并且颗粒物的残余率显著增高。当养殖舱内的颗粒物粒径与密度都较小时,不能只依靠养殖舱结构的自我清洁能力和颗粒物的沉降,应及时对废弃颗粒物进行人为处理干预。避免颗粒物长时间浸泡,合理使用物理、化学或膜处理方式,常用的

处理手段有如微滤机<sup>[29]</sup>、化学絮凝剂等来避免颗粒物由于在流场中长时间浸泡导致的粒径与密度进一步地减小。

## 4 结论

对于工船的养殖舱,当总进出水流量一定(24 h内换水次数一定)、进水口数目相同,控制出水口总面积一定时,舱内的最大流速与出水口数目呈负相关关系。因增加总进出水流量而导致舱内流速大于鱼类适养流速上限时,可以通过增加出水口数目来降低鱼舱流速,这也是后续优化工船养殖舱结构的重要途径之一。

及时高效的排污对鱼类的健康尤为重要,可大幅减小水中有害物质对养殖对象的胁迫作用。不恰当的投喂策略会导致残饵过多,若未及时去除排出,其分解产生氨氮、亚硝酸盐等有害物质会造成水质污染,将严重危害鱼类的健康<sup>[30]</sup>。因此对于由未消化的饲料残渣和排泄物组成的废弃颗粒物,应及时对其进行物理或化学手段的人为处理干预。

## 参考文献:

- [1] 胡方珍,盛伟群,王体涛. 深远海养殖装备技术现状及标准化工作建议[J]. 船舶标准化工程师, 2021, 54(5): 6-12.  
HU F Z, SHENG W Q, WANG T T. Technical status and standardized suggestions of far-reaching marine aquaculture [J]. Ship Standardization Engineer, 2021, 54(5): 6-12.
- [2] 徐皓,江涛. 我国离岸养殖工程发展策略[J]. 渔业现代化, 2012, 39(4): 1-7.  
XU H, JIANG T. Development strategy of offshore aquaculture engineering in China [J]. Fishery Modernization, 2012, 39(4): 1-7.
- [3] 徐皓, 谌志新, 蔡计强, 等. 我国深远海养殖工程装备发展研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(3): 1-6.  
XU H, CHEN Z X, CAI J Q, et al. Research on the development of deep sea aquaculture engineering equipment in China [J]. Fishery Modernization, 2016(3): 1-6.
- [4] 蔡计强, 张宇雷, 李建宇, 等. 10万吨级深远海养殖平台总体技术研究[J]. 船舶工程, 2017, 39(s1): 198-203.  
CAI J Q, ZHANG Y L, LI J Y, et al. General technology research of 100 thousand ton deep sea aquaculture platform [J]. Ship Engineering, 2017, 39(s1): 198-203.
- [5] 崔铭超, 金娇辉, 黄温赟. 养殖工船系统构建与总体技术探讨[J]. 渔业现代化, 2019, 46(2): 61-66.

- CUI M C, JIN J H, HUANG W Y. Discussion about system construction and general technology of aquaculture platform [J]. *Fishery Modernization*, 2019, 46 (2) : 61-66.
- [6] 李裕龙, 朱仁传, 缪国平, 等. 基于OpenFOAM的船舶与液舱流体晃动在波浪中时域耦合运动的数值模拟[J]. *船舶力学*, 2012, 16(7): 750-758.
- LI Y L, ZHU R C, MIAO G P, et al. Simulation of ship motions coupled with tank sloshing in time domain based on OpenFOAM [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, 16 (7): 750-758.
- [7] 朱仁庆, 侯玲. LNG船液舱晃动数值模拟[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 24(1): 1-6.
- ZHU R Q, HOU L. Numerical simulation of liquid sloshing in the tanks of LNG carrier [J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 24(1): 1-6.
- [8] 肖凯隆, 陈作钢. 多液舱晃动与养殖工船时域耦合运动的数值模拟[J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(1): 136-144.
- XIAO K L, CHEN Z G. Numerical simulation of aquaculture ship motions coupled with tanks sloshing in time domain [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(1): 136-144.
- [9] BURROWS R E, CHENOWETH H H. The rectangular circulating rearing pond [J]. *The Progressive Fish-Culturist*, 1970, 32(2): 67-80.
- [10] OCA J, MASALÓ I. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks [J]. *Aquacultural Engineering*, 2007, 36(1): 36-44.
- [11] GORLE J M R, TERJESEN B F, SUMMERFELT S T. Hydrodynamics of Atlantic salmon culture tank: Effect of inlet nozzle angle on the velocity field [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 158: 79-91.
- [12] 秦康, 崔铭超, 刘晃, 等. 养殖工船鱼舱流速特性的实船试验研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2023, 38(3): 524-532.
- QIN K, CUI M C, LIU H, et al. Field test on the flow velocity characteristics of tank aboard an aquaculture vessel [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2023, 38(3): 524-532.
- [13] GUO X Y, LI Z S, CUI M C, et al. Numerical investigation on flow characteristics of water in the fish tank on a force-rolling aquaculture platform [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107936.
- [14] ZHANG J, JIA G C, WANG M H, et al. Hydrodynamics of recirculating aquaculture tanks with different spatial utilization [J]. *Aquacultural Engineering*, 2022, 96: 102217.
- [15] CUI M C, LI Z S, ZHANG C L, et al. Statistical investigation into the flow field of closed aquaculture tanks aboard a platform under periodic oscillation [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 248: 110677.
- [16] ACKEFORS H, ENELL M. Discharge of nutrients from Swedish fish farming to adjacent sea areas [J]. *Ambio*, 1990, 19(1): 28-35.
- [17] ACKEFORS H, ENELL M. The release of nutrients and organic matter from aquaculture systems in Nordic countries [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 1994, 10 (4) : 225-241.
- [18] BEVERIDGE M, PHILLIPS M, CLARKE R. A quantitative and qualitative assessment of wastes from aquatic animal production [M]//BRUNE D E, TOMASSO J R. *Advances in World Aquaculture Volume 3*. Baton: World Aquaculture Society, 1991: 506-533.
- [19] BRAATEN B. Impact of pollution from aquaculture in six Nordic countries: release of nutrients, effects, and waste water treatment [C]//*Aquaculture and the Environment: reviews of the International Conference Aquaculture Europe '91*. Special Publication European Aquaculture Society, 1992: 79-101.
- [20] LIU Y, LIU B L, LEI J L, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics within octagonal tanks in recirculating aquaculture systems [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, 35(4): 912-920.
- [21] PILLAY T V R. *Aquaculture and the environment* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [22] 韩世成, 曹广斌, 蒋树义, 等. 工厂化水产养殖中的水处理技术[J]. *水产学杂志*, 2009, 22(3): 54-59.
- HAN S C, CAO G B, JIANG S Y, et al. Water treatment technology in recirculating aquaculture system [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2009, 22(3): 54-59.
- [23] FLOW-3D. Improved Generalized Minimal Residual (GMRES) Solver in FLOW-3D—How it works and when to use it [R]. Santa Fe, NM: Flow Science Inc., 2009.
- [24] HIRTC W, SICILIANI M. A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes [C]//4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics. Washington, DC, 1985.
- [25] LIU D M, LIN P Z. A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks [J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(8): 3921-3939.
- [26] 马德林, 曲克明, 姜辉, 等. 国外工厂化循环水养殖池底排污及排水系统综述[J]. *渔业现代化*, 2007, 34 (4): 19-21.
- MA D L, QU K M, JIANG H, et al. Flow clarification technology applied to recirculating aquaculture systems [J]. *Fishery Modernization*, 2007, 34(4): 19-21.
- [27] 秦康, 崔铭超, 刘晃, 等. 基于FLOW-3D的船载舱养流场特性分析[J]. *渔业现代化*, 2022, 49(5): 35-44.
- QIN K, CUI M C, LIU H, et al. Analysis of flow field characteristics of the tank aboard an aquaculture vessel based on FLOW-3D [J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49 (5): 35-44.

- [28] 崔铭超,王靖,郭晓宇. 横摇运动下养殖工船水环境流场特性数值分析[J]. 中国造船, 2020, 61(3): 204-215.  
CUI M C, WANG J, GUO X Y. Numerical analysis of flow field characteristics in a tank of aquaculture vessel under rolling motion[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(3): 204-215.
- [29] 吴小军,吕军,吴杰. 工厂化循环水养殖系统的构建及应用[J]. 河南水产, 2020(5): 36-39.  
WU X J, LÜ J, WU J. Construction and application of industrial recirculating aquaculture system [J]. Henan Fisheries, 2020(5): 36-39.
- [30] 车宗龙,任效忠,张倩. 循环水养殖系统中水动力特性及其与鱼类相互影响研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(5): 886-898.  
CHE Z L, REN X Z, ZHANG Q. Research progress on hydrodynamics in a recirculating aquaculture tank system: a review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(5): 886-898.

## Influence of particle characteristics on the removal of particles in the rectangular aquaculture tank

JI Zekun<sup>1,2</sup>, LIU Huang<sup>2,3</sup>, CUI Mingchao<sup>2,3</sup>, ZHANG Chenglin<sup>2,3</sup>, QIN Kang<sup>1,2</sup>

(1. School of Navigation and Naval Architecture, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning, China; 2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China; 3. Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266100, Shandong, China)

**Abstract:** Aquaculture vessels are one of the new ways to expand the space for offshore farming, and if particles such as undigested feed residues and excreta cannot be discharged in a timely manner during the shipboard tank farming process, it will have a serious negative impact on the health of fish and their growing environment. The article uses FLOW-3D software to carry out numerical simulation calculations to study the effect of the number of outlets in the aquaculture tank of the 300 000 t-class aquaculture vessel on the flow field characteristics under the stationary condition, and on this basis to explore the removal effect of particles with different particle sizes and densities in the tanks. The results showed that: when the total inlet and outlet flow rate and the total area of the outlet are constant, as the number of outlets increased from 1 to 4,  $V_{99\%}$  decreased from 0.244 m/s to 0.232 m/s and  $V_{95\%}$  decreased from 0.215 m/s to 0.203 m/s. As the number of outlets increases, the flow velocity in the aquaculture tank decreases. Measured by the time it takes for 95% of the total amount of particles to be discharged from the aquaculture tank, when the particle density was 1 050 kg/m<sup>3</sup>, discharge of particles with a particle size of 1 mm took about 24 minutes, discharge of particles with a particle size of 0.5 mm took about 45 minutes, and discharge of particles with a particle size of 0.1 mm took about 78 minutes. So at the same density of particles, as the particle size of particles increases, their retention time in the aquaculture tanks decreased and their removal efficiency increased significantly. When the particle size was 1 mm, discharge of particles with a density of 1 100 kg/m<sup>3</sup> took about 15 minutes, and discharge of particles with a density of 1 150 kg/m<sup>3</sup> took about 11.6 minutes. When the particle size of the particles was the same, the higher the density of the particles, the shorter their retention time in the flow field of the aquaculture tank, and the greater their removal efficiency. In this study, an integral analysis method combining CFD numerical simulation and mathematical statistics was formed to provide research means and theoretical basis for the complex working conditions with different transverse rolling periods and larger transverse rolling amplitudes.

**Key words:** aquaculture vessel; aquaculture tank; particle; flow rate; numerical simulation; mathematical statistical analysis