

DOI: 10.12131/20250094

文章编号: 2095-0780-(2025)03-0024-12

# 基于模型试验的矩形养殖舱进排水方式优化研究

张琛<sup>1,2</sup>, 刘晃<sup>1</sup>, 张成林<sup>1</sup>, 姚淳婧<sup>1,2</sup>, 张帆<sup>1,2</sup>

1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092

2. 大连海洋大学 航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023

**摘要:** 养殖舱作为养殖工船的核心功能单元, 进排水方式的优劣对其内部流场环境具有重要影响。为优化养殖舱内流场环境并提升适渔性, 以30万吨级养殖工船的矩形养殖舱为原型, 采用1:100的几何缩尺比建立物理模型, 并基于粒子图像测速试验技术(Particle Image Velocimetry, PIV)开展了系统的水动力试验研究。通过控制进水流量和进水口数量等关键参数, 定量分析了不同进水工况下养殖舱模型内流场结构的演变规律; 同时针对不同出水口结构, 重点探究了其对舱内涡流场特性的影响机制。结果表明: 1) 进水流量是养殖舱内流速的主要调节因子, 当进水流量从1800 L·h<sup>-1</sup>降至900 L·h<sup>-1</sup>时, 高流速区面积占比从33.2%减至8.4%, 低流速区扩散至舱体65%以上区域, 舱内平均流速降幅达52.89%, 且进水流量与舱内平均流速呈线性关系; 2) 相较于改变进水流量, 调整进水口数量对养殖舱内流场均匀性的调控效果更显著; 随着进水口数量的减少, 同一工况下不同深度截面的速度分布均匀性系数(DU<sub>50</sub>)最大降幅为33.62%, 而不同工况下同一截面的DU<sub>50</sub>最大降幅为39.68%; 3) 底部出水口数量和位置的改变会显著影响舱内漩涡流场的分布特性, 当底部设置4个出水口时可有效避免涡流对舱内水体的影响。

**关键词:** 矩形养殖舱模型; 进水流量; 进水口数量; 出水口结构; 图像测速试验技术

中图分类号: S 953.2

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Optimization of inlet and outlet configurations for rectangular aquaculture tanks based on model experiments

ZHANG Chen<sup>1,2</sup>, LIU Huang<sup>1</sup>, ZHANG Chenglin<sup>1</sup>, YAO Chunjing<sup>1,2</sup>, ZHANG Fan<sup>1,2</sup>

1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China

2. School of Navigation and Naval Architecture, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

**Abstract:** As the core functional unit of aquaculture platforms, aquaculture tank has advantages and disadvantages of its inlet and outlet configurations which have a significant impact on its internal flow field environment. To optimize the hydrodynamic conditions and enhance production efficiency, we established a 1:100 scale physical model based on a 300,000-ton-class rectangular aquaculture tank, employing Particle Image Velocimetry (PIV) for systematic hydrodynamic experimentation. By controlling key parameters including inflow rate and number of inlets, we quantitatively analyzed the evolution characteristics of flow field structures under different inflow conditions. Besides, we investigated the mechanisms by which various outlet structures affect vortex field characteristics within the tank. The results demonstrate that: 1) Inflow rate was the primary regulating factor for flow velocity. When the inflow decreased from 1800 L·h<sup>-1</sup> to 900 L·h<sup>-1</sup>, the high-velocity zone proportion decreased from 33.2% to 8.4%, the low-velocity zone expanded to over 65% of the tank volume, and the average velocity decreased by 52.89%, showing a linear correlation between inflow rate and average velocity. 2) Adjusting the number of inlets was more effective than flow rate modification in improving flow field uniformity. Reducing the number of water inlet decreased the DU<sub>50</sub> uniformity

收稿日期: 2025-04-24; 修回日期: 2025-05-13

基金项目: 青岛海洋科技中心山东省专项经费(2022QNLM030001-3)

作者简介: 张琛(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为船舶与海洋工程。E-mail: Zhangchen202405@163.com

通信作者: 刘晃(1973—), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为水产养殖工程。E-mail: liuhuang@fmri.ac.cn

coefficient by up to 33.62% across different depths under identical conditions, and up to 39.68% across different conditions at the same cross-section. 3) Variation in the quantity and position of bottom outlets significantly influenced the vortex field characteristics within the aquaculture tank. When four outlets were installed at the bottom, the vortex effects on the water inside the aquaculture tanks could be effectively avoided.

**Keywords:** Rectangular aquaculture tank model; Water inflow rate; Number of water inlets; Outlet structure; PIV (Particle Image Velocimetry)

随着社会的不断进步和健康理念的广泛传播,海产品因富含优质蛋白、不饱和脂肪酸及微量元素等营养优势,在促进人体健康方面扮演着重要角色,日益受到消费者青睐<sup>[1-4]</sup>。为了突破近岸养殖在空间和病害方面的限制,海水养殖业正加快向深远海领域拓展<sup>[5-6]</sup>。在此进程中,经过数十年技术迭代与工程验证,大型养殖工船已成功实现了从概念到产业化的跨越<sup>[7-10]</sup>。相对于传统的陆基固定养殖池,养殖工船凭借其出色的机动避灾能力,显著提升了养殖产量<sup>[11-13]</sup>。养殖舱作为养殖工船的核心功能单元,其内部流场环境的水动力特性直接决定了鱼类的生存条件和养殖生产效率。当养殖工船处于系泊作业状态时,其运动幅度在大部分时间内相对较小,舱内的流场环境与陆基养殖池相似<sup>[14]</sup>,主要受进出水结构、舱体形状等因素的影响<sup>[15-18]</sup>。因此,通过优化养殖舱的进排水设计来改善养殖环境、提升鱼类适养水平,已成为当前的研究热点<sup>[19]</sup>。

在水工领域,研究养殖舱内流场变化规律主要通过数值仿真和物理试验两种方法。Gorle 等<sup>[20-21]</sup>基于计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 技术探究了双排水模式下进水角度对八边形养殖池内水动力特性的影响,发现养殖池结构的微小改变会显著影响其内部流场特性。桂劲松等<sup>[22]</sup>基于 RNG k- $\epsilon$  模型,研究了不同圆弧角尺度的单通道方形养殖池流场特性,发现当圆弧角半径与池宽比为 0.2 或 0.25 时,矩形圆弧角养殖池的流场分布较为均匀。高瑞等<sup>[23]</sup>对横摇运动下养殖舱内适鱼区域展开研究,发现板式隔板能有效抑制水体晃荡现象。秦康等<sup>[24]</sup>利用 FLOW-3D 软件,结合数值仿真和实船试验,对 3 000 吨级养殖工船鱼舱流场进行了研究,结果表明,在总进水流量一定时,增加进水口数量会显著降低鱼舱流速。以上研究均基于数值模拟的方法,在 CFD 技术迭代与高性能计算 (HPC) 硬件技术突破的双重驱动下,基于 Navier-Stokes 方程的流场数值解析能力实现了跨越

式的发展,通过计算机数值计算已能较为直观地描述养殖池内流场分布情况。然而,该方法对网格精度、计算模型选取等条件的设置要求较为严格。此外,由于舱内流体运动具有高度随机性和非线性特点,数值模拟方法在处理某些复杂流场问题时难以保证结果的准确性和有效性,因此物理试验不可或缺。同时,考虑到原型试验存在经济和技术限制,缩尺模型试验成为探究养殖舱内流场特性的重要手段之一。杨志勋等<sup>[25]</sup>基于 Froude 相似准则,采用 2 种不同缩尺比的模型,对八边形液舱晃荡问题进行了研究,证实大比例尺模型能有效减小缩尺效应的影响。朱放等<sup>[26]</sup>通过圆形养殖池缩尺模型试验,结合粒子图像测速技术 (Particle Image Velocimetry, PIV),研究了不同进水管设置对流场的影响,发现 30°~40° 的进水角度能有效提升养殖池的集污排污能力。张学芬<sup>[27]</sup>采用八边形养殖池缩尺模型,探究了进水方式对养殖池内自清洗能力的影响,得出了单、双进水模式下的最优进水口布置方式。冯德军等<sup>[28]</sup>将全等切角的八边形缩尺模型置于六自由度运动平台,模拟工船横摇运动,发现养殖舱的集污时间与横摇周期成正比,与横摇幅值成反比。以上的研究对象多为圆形池和方形切角池,其长宽比通常小于 1.2,且针对排水方式的影响研究较少。

本研究以 30 万吨级养殖工船矩形养殖舱 (长宽比接近 1.43) 为原型,采用 1 : 100 的缩尺比建模,并利用 PIV 系统测量流场特性,分析了不同进水流量和不同进水口数量条件下模型养殖舱内的流场分布特征;同时,进一步探究了不同出水结构对矩形养殖舱内涡流的影响,旨在为构建更适合鱼类生长的养殖舱水体环境提供科学依据,并为超大型养殖平台养殖舱的结构优化设计提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 养殖舱循环系统装置

试验装置的水循环系统由养殖舱模型、水

泵(格威特 GRS25-15, 最大扬程 15 m, 最大流量 105 L·min<sup>-1</sup>)、稳压水箱、流量计(LWGY 智能涡轮流量计, 流量瞬时测量最小精度为 0.001 L·h<sup>-1</sup>, 流速最小测量精度为 0.000 1 m·s<sup>-1</sup>)、不锈钢调节球阀门、一变四水阀开关、PVC 水管等部分组成。本试验采用的养殖舱模型为 30 万吨级养殖工船矩形养殖舱的缩尺模型, 依据 Froude 相似准则选择缩尺比为 1 : 100。如图 1 所示, 试验模型中的切角

角度与原型舱保持一致, 略去了顶部的折角部分。模型整体采用透明亚克力材料制作。原型舱与模型舱的尺寸见表 1。试验开始前, 先用 PVC 水管将稳压养殖舱模型进水口与稳压水箱出水口进行连接, 再将稳压水箱的进水口依次连接流量计、水泵、球阀, 最后连接至养殖舱模型的出水口。连接时需要注意保持气密性良好, 防止水泵出现空化现象。水循环的示意图如图 2 所示。

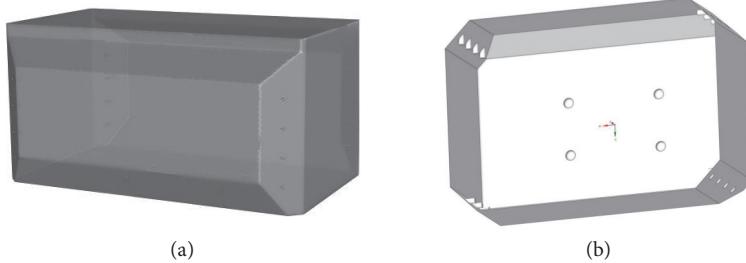


图1 原型舱 (a) 和模型舱 (b) 示意图

Fig. 1 Diagram of prototype chamber (a) and model chamber (b)

表1 原型舱和模型舱尺寸对比

Table 1 Comparison of dimensions between prototype chamber and model chamber

参数 Parameter	原型 Prototype	模型 1 : 100 Scale model 1 : 100
长 Length/m	42	0.42
宽 Width/m	29.2	0.292
高 Height/m	19.5	0.195
进水口半径 Inlet radius/m	0.395	0.003 95
出水口半径 Outlet radius/m	0.777 8	0.007 778
初始水位 Initial water level/m	16	0.16
初始水量 Initial water volume/m <sup>3</sup>	18 562.208	0.018 56

## 1.2 PIV 测量系统

本研究采用的 PIV 测量系统由示踪粒子、激光光源、图像采集设备、同步控制模块及数据处理软件构成。其中示踪粒子选用粒径为 50 μm、密度为 1.03 kg·m<sup>-3</sup> 的聚苯乙烯示踪粒子, 由于其密度与水介质接近, 能确保粒子与流体运动的同步性, 同时具备理想的光学散射性能以满足成像需求。激光光源采用绿光固体激光器(PSU-W-LED, MW-GL-532A/8W), 其输出功率为 8 W, 激光波长为 532 nm, 片光源厚度为 3~4 mm, 具有功率稳定、

方便调节、光束质量高且操作简便等特点。图像采集工作由 NAC MEMRECAM MX-5 ACS-1/3 Q1M 高速相机完成, 其最大拍摄帧率为 1 000 fps, 分辨率为 1 280×1 024。试验数据通过 MLinx 软件完成图像采集后, 利用 HXLink 进行 MCFF 文件的后处理与格式转换, 最终基于 MATLAB 平台实现流场数据的精细化处理与分析。

## 1.3 数据处理

流场分布特性测量试验数据处理方法如下: 通过 MATLAB 软件将 PIV 测量得到的流速数据绘制成为流速云图, 定性分析不同进排水结构对模型舱内的流场变化规律的影响。为进一步定量分析和比较不同工况下养殖舱内的水动力特性, 引入概率密度函数(Probability density function)和累积概率密度函数(Cumulative probability density function)对整个养殖舱内流速进行统计分析<sup>[29-30]</sup>。并通过模型舱不同平面的平均流速  $V_{avg}$ (各测量点流速的平均值, m·s<sup>-1</sup>)和速度分布均匀性系数( $DU_{50}$ )对舱内流体的均匀性水平进行评估<sup>[31]</sup>。

$$DU_{50} = \frac{V_{50}}{V} \times 100 \quad (1)$$

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n v_i r_i}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (2)$$

式中:  $DU_{50}$  为速度分布均匀性系数, 该系数越接近 100, 代表水流越均匀;  $V_{50}$  为各监测点速度前

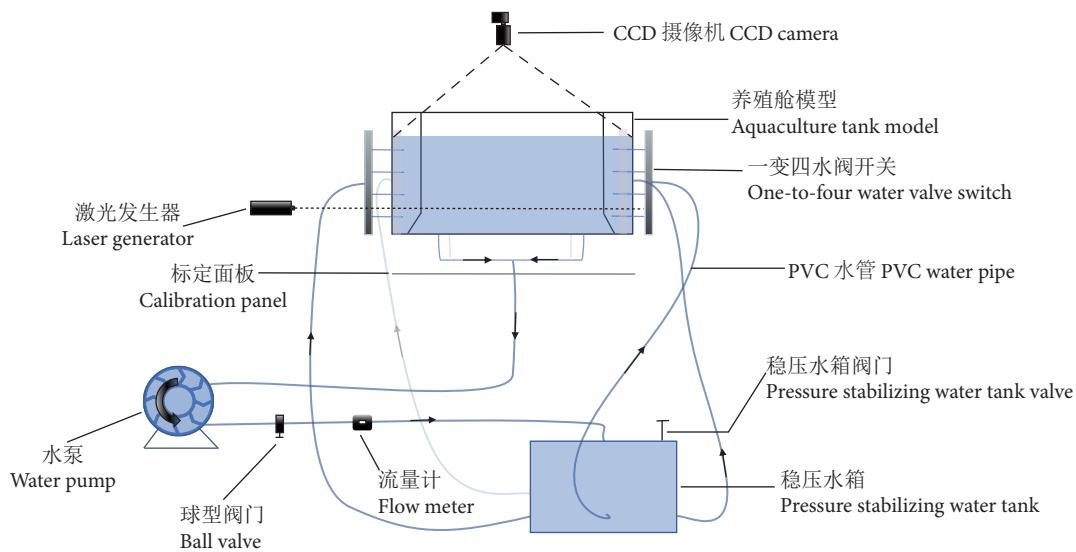


图2 水循环系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water circulation system

50%速度较低的平均值( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )； $v_i$ 为监测点的速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )； $r_i$ 为监测点距池心的距离(m)； $V$ 为平均加权速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

#### 1.4 试验工况设计

本研究基于控制变量法，系统探究了进水方式与出水口结构对养殖舱内流场特性的影响机制，其中核心变量包括进水方式(表2)和出水口结构(表3)。对于F类工况的进水口工作情况如图3-a所示。F1工况下16个进水口同时工作；F2工况下第2、第3、第4层共12个进水口工作；F3工况下第3、第4层共8个进水口工作；F4工况下第3层共4个进水口工作。同时针对出水口结构对舱内漩涡流场的影响研究，需对养殖舱模型进行结构改造，通过在中间位置增设出水口(其底部出水口空间布局如图3-b所示)以实现不同出水结构的对比分析。具体试验流程如下：1) 预试验操作。首先，在整个水循环系统中注满水，利用水泵和稳压水箱上的排气阀进行排气，确保水泵安全运行的情况下避免细小气泡进入养殖舱干扰试验结果；其次，固定激光器和摄像机的位置，避免出现安全问题；然后对摄像机焦距、拍摄间隔、激光厚度进行调节。2) 为方便后续数据处理，需将拍摄照片中的像素距离转变成物理距离，因此需按照不同工况拍摄标定照片。3) 向养殖舱模型中倒入示踪粒子，为避免粒子结块，需要使用滤网进行过滤，在每组工况试验间隙，通过机械搅拌装置对沉积于池底的示踪粒子进行强制性再悬浮处理，使粒子重新

均匀分布于整个水体空间，从而保证后续试验中流场可视化测量的准确性和可靠性。4) 图像拍摄，将相机拍摄时长设定为8 s，在完成射流工况调节、激光位置校准及其他相关参数配置后，通过触发连续采集功能启动图像捕获流程。每组试验工况共计采集4 000幅图像，按照每1张图像构成1组的标准，最终形成2 000组有效数据对。

表2 进水方式试验分组

Table 2 Test grouping by water inflow configurations

组别 Group	进水流量 Inflow rate/(L·h <sup>-1</sup> )	进水口数量 Number of water inlets
D1	1 800	16
D2	1 500	
D3	1 200	
D4	900	
F1		16
F2	1 800	12
F3		8
F4		4

表3 漩涡流场试验分组

Table 3 Vortex flow field test groups

组别 Group	出水口数量 Number of water outlets	工作出水口位置 Position of water outlet for work
H1	4	1—4
H2	1	4
H3	1	5

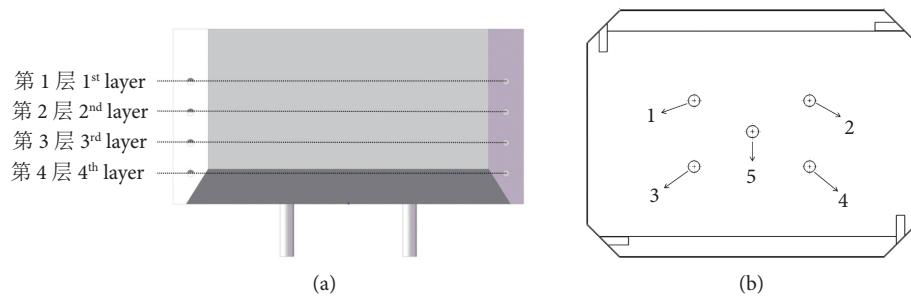


图3 F类工况进水口数量与H类工况出水口位置(1—5)示意图

Fig. 3 Schematic diagram of number of water inlets for Class F operating conditions and location of water outlets (1—5) for Class H operating conditions

## 2 结果

### 2.1 进水方式对模型舱流场分布的影响

本研究采用PIV对缩尺模型养殖舱进行多平面流场测量。为全面解析三维流场结构，沿垂向设置5个特征监测平面( $Z=0.03$ 、 $0.06$ 、 $0.09$ 、 $0.12$ 、 $0.15$  m，其中 $Z=0.03$  m为平面距舱底高度)。图4展示了不同进水流量工况下的水平截面流速分布云图。从中可以看出，在进水射流惯性力的主导下，高流速区( $V\geq 0.2$  m·s<sup>-1</sup>)主要集中在舱壁附近，而舱体中心区域受二次流的影响，流速较低( $V\leq 0.08$  m·s<sup>-1</sup>)。对比D1、D2、D3、D4 4种工况可以发现，舱内流速的空间分布特征对进水流量敏感，随着进水流量从1 800 L·h<sup>-1</sup>降至900 L·h<sup>-1</sup>，高流速区的面积占比从33.2%减至8.4%，而低流速区则扩散至舱体65%以上的区域。图5展示了F1、F2、F3、F4 4种工况下的水平截面流速分布云图。与不同进水流量工况相似，

高流速区域依然集中在靠近舱壁的位置，低流速区域主要分布在舱体中心和切角处。不过，随着进水口数量的减少，这种速度分布规律逐渐变得紊乱。

为定量评估进水流量对舱内流场动力学特性的影响，本研究引入概率密度函数与累积分布函数，对D1、D2、D3、D4 4种工况下模型舱内流速的概率分布进行进一步分析。如图6-a所示，所有工况下流速均呈右偏分布，观测值主要集中在0~0.4 m·s<sup>-1</sup>区间(占样本总量98.7%)。当进水流量由1 800 L·h<sup>-1</sup>降至1 500 L·h<sup>-1</sup>时，低流速( $V<0.08$  m·s<sup>-1</sup>)的概率占比明显升高，而高流速( $V\geq 0.2$  m·s<sup>-1</sup>)的概率占比明显降低，舱内流速整体显著降低。但当进水流量由1 200 L·h<sup>-1</sup>进一步降至900 L·h<sup>-1</sup>时，模型舱内的流速低于0.2 m·s<sup>-1</sup>，虽然舱内流速的概率分布略有变化，但差异并不显著。对F1、F2、F3、F4 4种工况下模型舱内流速的概率分布进行进一步分析。如图6-b所示，舱内流速

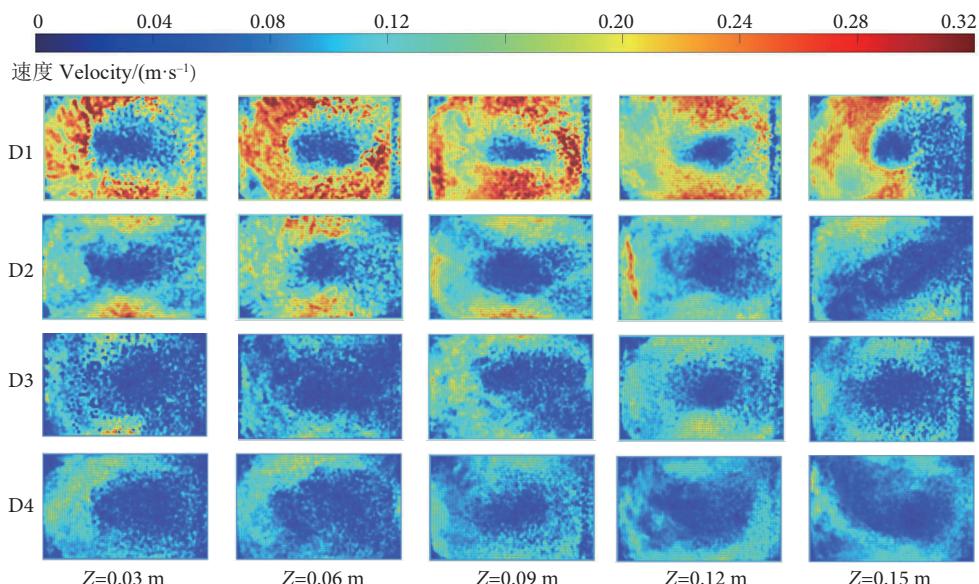


图4 D类工况下不同水平截面流速云图

Fig. 4 Flow velocity contour map at different horizontal cross-sections under condition D

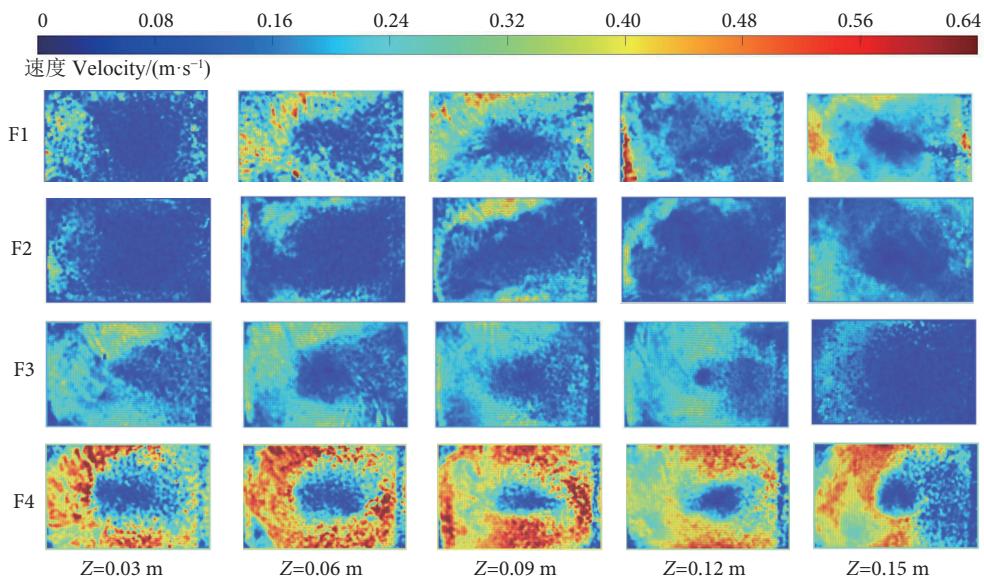


图5 F类工况下不同水平截面流速云图

Fig. 5 Flow velocity contour map at different horizontal cross-sections under condition F

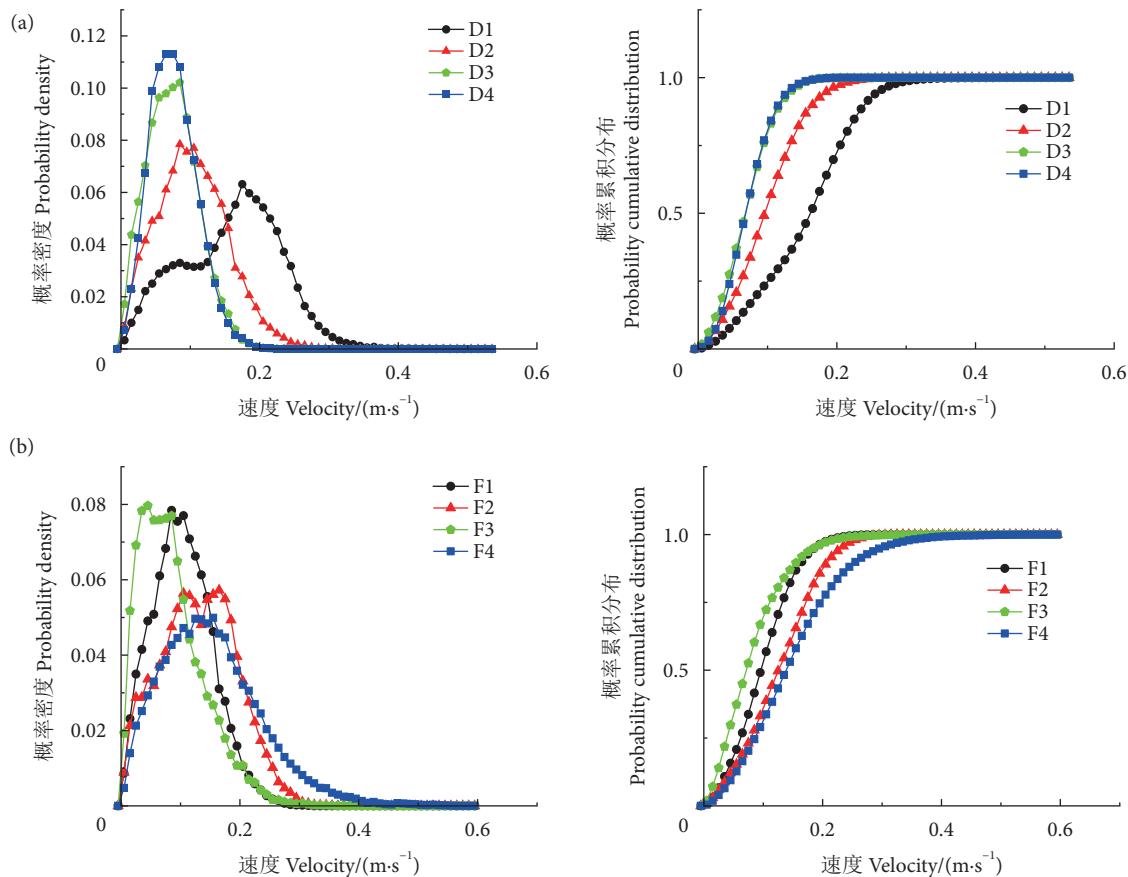


图6 不同进水方式下养殖舱内水体速度的数理统计分布

Fig. 6 Statistical distribution of water velocity in aquaculture tank by different water inlet methods

低于  $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随着进水口数量的减少，舱内流速范围逐步扩大。当进水口数量由 16 个减至 12 个时，高流速占比的概率明显增加；但当进水口数量为 8 个时，舱内低流速占比的概率有所回升；当进水口数量减至 4 个时，模型舱内流速水平最高，且

最大占比的流速集中在  $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右。

基于模型养殖舱多平面流速数据，本研究定量评估了进水流量对各个水平截面平均速度与水平均匀性的影响机制。如图 7-a 所示，各工况下流速呈典型抛物线分布，最大平均速度  $V_{\max}$  出现在  $Z=$

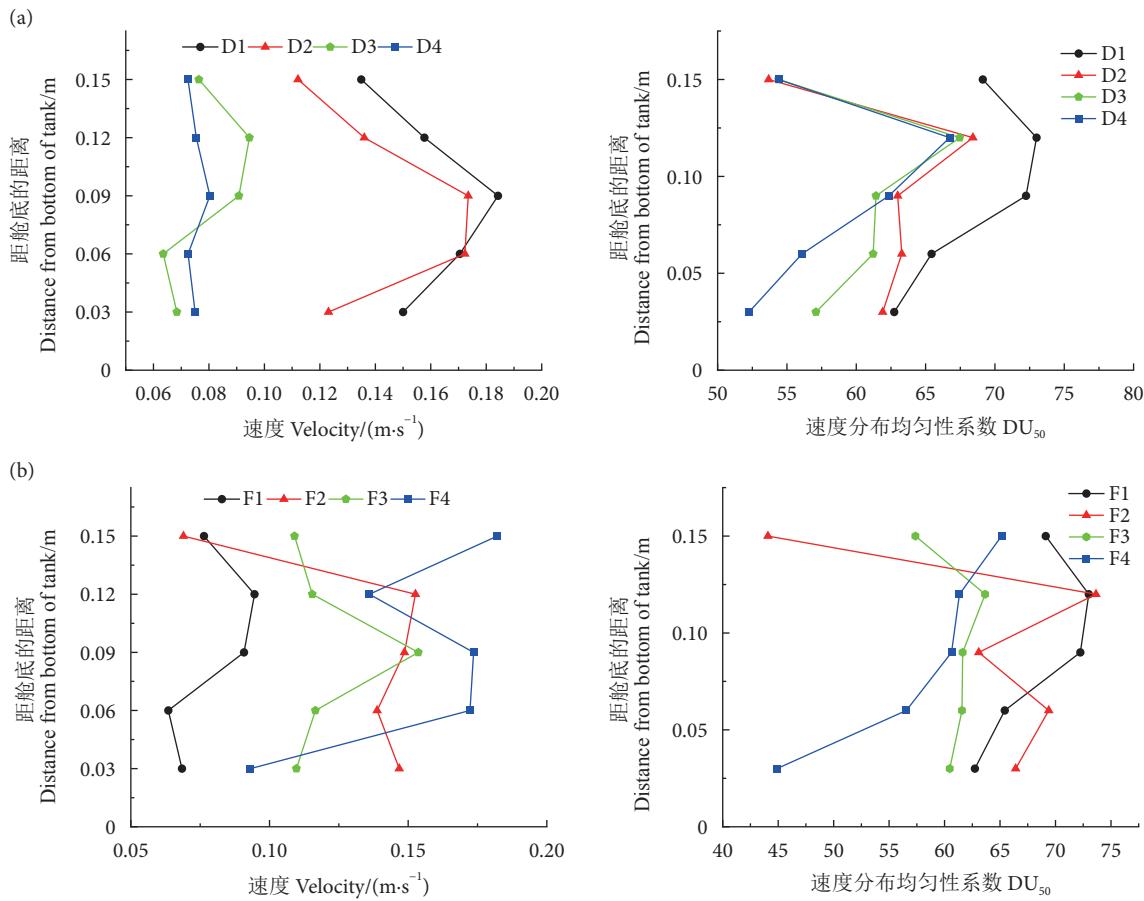


图7 不同水平截面的平均速度与速度分布均匀性系数

Fig. 7 Average flow velocity and velocity distribution uniformity coefficient at different horizontal sections

0.09 m 附近，明显高于舱底 ( $Z=0.03$  m) 和近水面 ( $Z=0.15$  m)。对比分析 D1、D2、D3、D4 4 种工况可知，随着进水流量的降低，模型舱内不同深度的平均流速差减小，同一平面的  $DU_{50}$  也随之降低。当进水流量从  $1800\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  降至  $900\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  时，养殖舱内平均流速降幅为 52.89%；同一工况不同深度截面  $DU_{50}$  最大降幅为 21.5%，不同工况同一截面  $DU_{50}$  最大降幅为 24.77%。这表明随着进水流量的降低，纵向水深的流速差减小，而横向水平面的流速均匀性也在降低。为确定进水流量  $Q$  与舱内平均流速的关系，对二者进行线性回归分析和显著性检验（图 8），其中线性回归方程为：

$$V_{\text{avg}} = 0.000\ 056Q + 0.018\ 73 \quad (3)$$

$$r^2 = 0.96, p < 0.01 \quad (4)$$

式中： $V_{\text{avg}}$  为平均流速 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )； $Q$  为总进水流量 ( $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ )； $r^2$  为回归系数。

如图 7-b 所示，F1、F2、F3 工况下流速呈典型的抛物线分布，最大平均速度  $V_{\text{max}}$  出现在  $Z=0.09$  m 处，明显高于舱底 ( $Z=0.03$  m) 和近水面 ( $Z=0.15$  m)。而在 F4 工况下，水平面平均流速从池底到

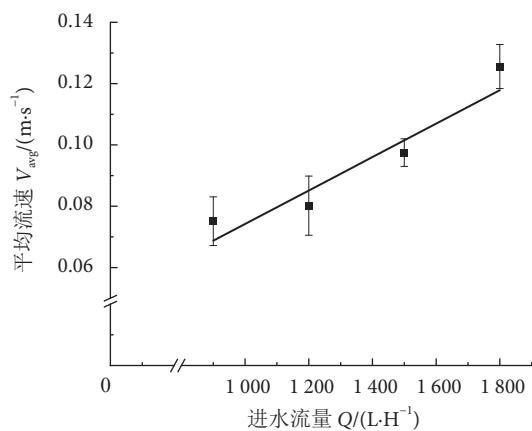


图8 总进水流量与平均流速的线性回归分析

Fig. 8 Linear regression analysis of total inflow discharge and average flow velocity

自由面呈升高趋势。对比分析 F1、F2、F3、F4 4 种工况可知，随着进水口数量的增加，养殖舱内平均流速降幅为 40.01%；同一工况不同深度截面  $DU_{50}$  最大降幅为 33.62%，不同工况同一截面  $DU_{50}$  最大降幅为 39.68%。表明随着进水口数量的减少，舱内平均流速升高，但舱内水体的均匀性水平降低。

## 2.2 出水口结构对涡流场的影响

### 2.2.1 当底部4个出水口同时工作

图9为底部4个出水口同步排水作业时不同进水流量的流场侧视图。可以看出:低进水流量时(图9-a),舱内未形成明显的漩涡流场;但随着进

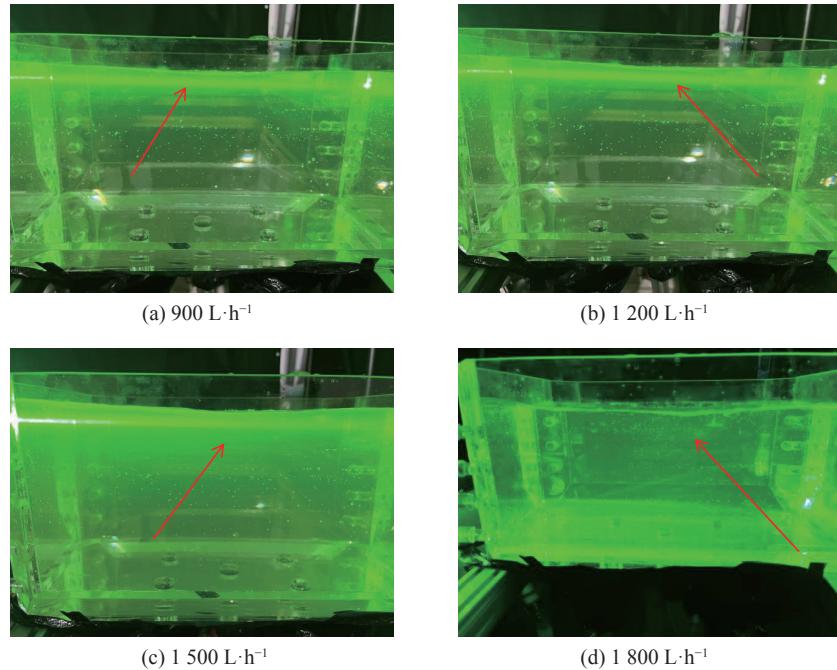


图9 模型养殖舱侧视图

Fig. 9 Side view of scale model aquaculture tank

### 2.2.2 当右下角出水口(4)工作

如图10所示,在进水流量为 $1 500 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 且仅右下角的出水口开始排水时,舱内形成明显的涡流场。涡流长度延伸至舱底(图10-a的A区域),而涡流的初始位置出现在模型舱的左上侧(图10-b

水流量的增大(图9-c、9-d),自由水面凹陷程度逐渐增加,并在舱体中心区域出现短暂的涡流,但该漩涡流场持续时间约为1 s,呈周期性的出现-消失特征,未能形成稳定的流场。

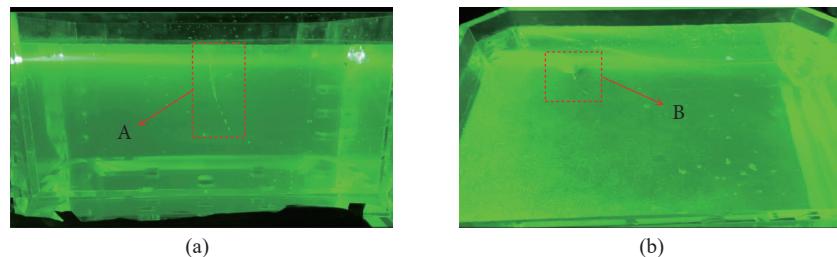


图10 H2工况模型舱涡流图

Fig. 10 H2 operating condition model chamber vortex flow diagram

图11展示了距舱底0.15 m处水平截面在不同时刻下涡流场流速变化云图。漩涡流场呈现出中心流速较低、边缘流速较高的特征,在0秒时,涡流场强度最大,边缘流速超过 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;在第2至第6秒时,涡流逐渐减弱,边缘流速降至 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,且漩涡位置发生偏移;到第8秒,边缘流速重

新回升,涡流又向初始位置移动。

### 2.2.3 当中间出水口(5)工作

如图12-a所示,当进水流量为 $1 500 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 且仅中间出水口开始排水时,模型舱内形成了明显的涡流场,且该涡流场一直持续存在。涡流位于养殖舱中心,其底部锚定在中间出水口,位置固定不

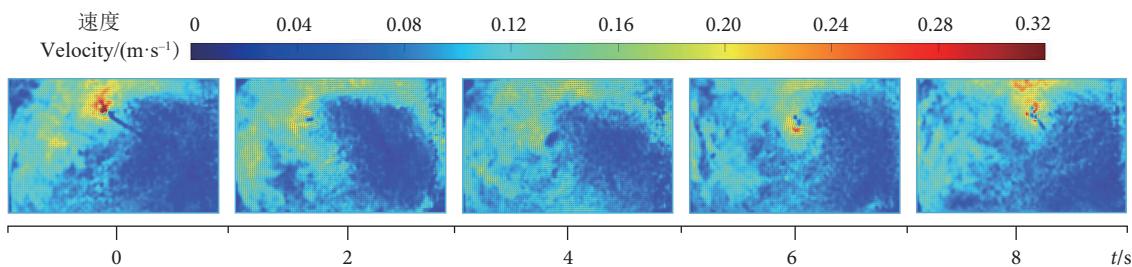


图11 不同时刻漩涡流场分布云图

Fig. 11 Cloud diagram of vortex flow field distribution at different moments

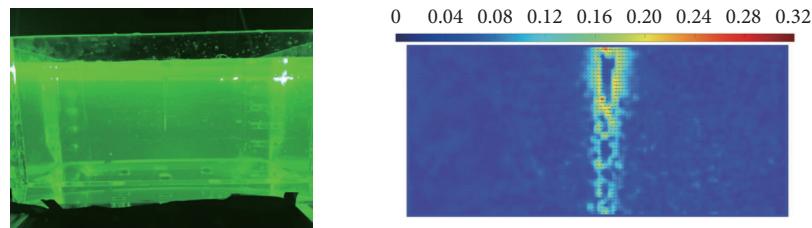
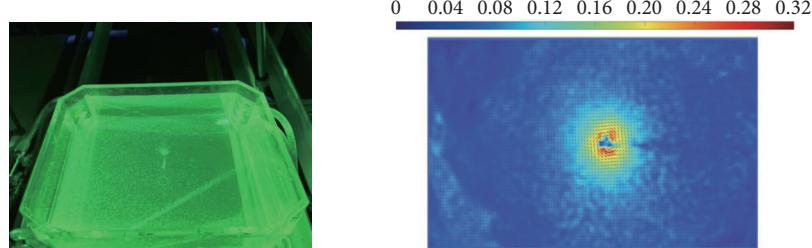
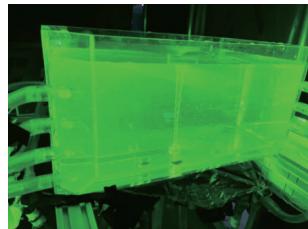
(a) 1 500 L·h<sup>-1</sup> 涡流侧视图 Side view of vortex flow at 1 500 L·h<sup>-1</sup>(b) 1 500 L·h<sup>-1</sup> 涡流俯视图 Top view of vortex flow at 1 500 L·h<sup>-1</sup>(c) 1 800 L·h<sup>-1</sup> 侧视图 Side view at 1 800 L·h<sup>-1</sup>

图12 H3 工况模型舱涡流图

Fig. 12 H3 operating condition model chamber vortex flow diagram

变，整个养殖舱内的流场较为稳定。如图 12-c 所示，当进水流量增至  $1800 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  时，涡流场明显增大，并且大量空气被卷入出水管道，造成水泵出现空腔现象，这不利于试验进行。图 12-b 展示了涡流场的水平截面（距离舱底 0.15 m）和垂直截面（舱体中部）的流速分布云图。漩涡流场呈现出中心流速较低、边缘流速较高的特征，整体流速均在  $0.32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以内。

为定量评估进水流量对舱内流场动力学特性的影响，本研究引入 PDF 与 CDF 对 H1、H2、H3 3 种工况下模型舱内流速的概率分布进行进一步分

析。如图 13 所示，改变排水口的结构使得模型舱流速的概率分布发生了较大变化。随着养殖舱底部出水结构的改变，较高流速 ( $0.1\sim0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 占比逐渐减小，舱内流速显著降低。其中 H1 工况平均流速为  $0.1037 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最大流速为  $0.317 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；H2 工况舱内流速主要集中在  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下，平均流速为  $0.0229 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最大流速为  $0.214 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 进水口参数对养殖舱流场的差异化调控机制

在深远海养殖工船的锚泊作业中，进水射流是

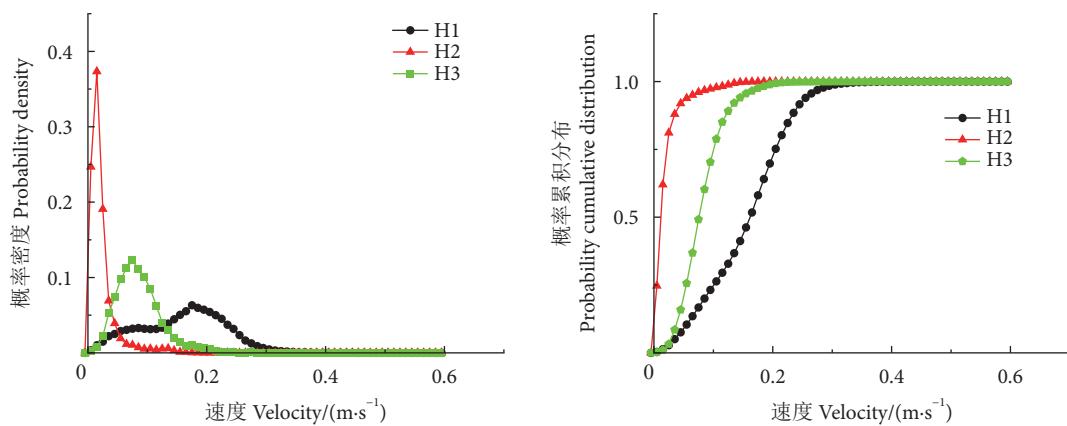


图13 不同排水口位置下养殖舱内水体速度的数理统计分布

Fig. 13 Statistical distribution of water velocity in aquaculture tank under different drainage outlet positions

流场能量的主要输入源,其动力学特性直接影响舱内的水动力环境。同时,进水流量和进水口数量也直接影响舱内水体的平均流速和流体均匀性水平。因此,通常通过调节鱼舱的总进水流量和进水口数量来控制射流,以优化流场并提升养殖舱适渔性。鉴于此,揭示进水流量与进水口数量的差异化调控机制,具有重要的科学意义和工程价值。

本研究采用缩尺比例为1:100的养殖舱模型进行PIV流场测量试验,分析不同进水流量和进水口数量对养殖舱内流场的影响。从流速分布云图可以看出,舱内高流速区域主要集中在靠近舱壁处,舱中心区域流速较低,这一流场特征与Zhang等<sup>[32]</sup>、崔铭超等<sup>[33]</sup>的研究结果基本一致。本研究进一步揭示了进水流量与进水口数量对养殖舱流场特性具有不同的影响机制:随着进水流量由1 800 L·h<sup>-1</sup>降至900 L·h<sup>-1</sup>,高流速区面积占比从33.2%缩减至8.4%,低流速区扩散至舱体65%以上区域,进水流量与舱内平均流速之间呈显著的线性关系,表明进水流量的改变对舱内流速的调控效果更为显著。当监测到流速低于适宜阈值时,可通过增大进水流量实现有效提升。而进水口数量变化则主要影响流场的均匀性特征。分析结果表明,当进水口数量从16个减至4个时,不同工况下同一截面的DU<sub>50</sub>最大降幅为39.68%,流体均匀性水平显著恶化。基于上述结果,建议在工程实践中采用双参数协同优化策略:通过提高进水流量来改善流速水平,同时增加进水口数量以提升流场均匀性,从而实现对养殖舱水动力环境的精准调控。

### 3.2 出水口结构对涡流场稳定性的锚定效应

涡流是流体在鱼舱内因流速差异、结构设计

(如舱壁形状、进出水口布局)或设备运行(如水泵、增氧机)等因素引发的旋转流动现象。随着雷诺数的增大和湍流强度的提升,系统极易形成复杂的涡旋结构。这种漩涡流场的存在会增加鱼类的游动能耗,降低饲料转化率;同时,还会导致舱内流速分布不均,使鱼群在低流速区过度聚集。如果鱼群密度过高,还可能引发局部缺氧或争斗损伤。此外,涡流死角(如舱体角落)容易沉积残饵和粪便,滋生有害菌,危害舱内的养殖环境,因此,揭示涡流的生成规律对于优化养殖舱的设计具有重要意义。涡流作为一种封闭式养殖舱内复杂的旋转流动现象,其生成机制主要源于流体动力学与结构设计的耦合作用。漩涡流机理复杂,研究者基于对旋涡的认识提出了理论模型<sup>[34]</sup>,但这些理论分析大多仅适用于简单的几何情况。也有研究者基于不同的应用背景开展了模型试验,结果表明漩涡形成的临界深度与弗劳德数、雷诺数、韦伯数存在相关性。随着湍流强度的提升,系统内会自发形成具有复杂拓扑结构的涡旋流场<sup>[35]</sup>。

本研究通过改变底部出水口结构探究了涡流场产生规律。研究发现,在进水推流作用下,养殖舱内的水体产生旋转运动,外围流速高于中心流速形成速度梯度,这种速度梯度促使舱内产生漩涡流场。当底部4个出水口同时工作时,多股垂向出流之间的相互干扰,显著破坏了涡流结构的稳定性,导致舱内难以形成明显的涡流场,此时增大进水流量仅会加剧自由液面中部的凹陷程度。在单一右下侧出水口工况下,出流干扰减弱,舱内可形成垂向延伸至出水口的漩涡结构。但由于旋转中心与出水口位置存在偏差,该涡流场呈周期性移动和衰减的

非稳态特征，并伴随显著的流速下降现象。当底部中间位置的出水口工作时，旋转中心与出水口位置的空间重合使涡流场获得稳定的锚定效应，最终形成具有明确中心低速区和边缘高速区特征的持久性涡旋结构。这 3 种工况清晰展示了出水口结构通过空间匹配度调控涡流稳定性的锚定机制。

## 4 结论

本研究利用 PIV 对养殖舱缩尺模型进行物理试验，分析了进水流量和进水口数量对养殖舱内流场的影响，揭示了出水口结构变化对涡流场的影响规律。综合分析结果如下：

1) 随着进水流量的降低，养殖舱内流速下降。当进水流量从  $1800 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  降至  $900 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ，高流速区面积占比从 33.2% 减至 8.4%，低流速区扩散至舱体 65% 以上区域，养殖舱内平均流速降幅为 52.89%，且进水流量与舱内平均流速呈线性关系；随着进水口数量的增加，养殖舱内平均流速降幅为 40.01%。以上结果表明，进水流量是调控舱内流速的关键因素。

2) 随着进水流量的降低，同一工况下不同深度截面的  $DU_{50}$  最大降幅为 21.5%，不同工况下同一截面的  $DU_{50}$  最大降幅为 24.77%；而减少进水口数量时，相应工况的  $DU_{50}$  最大降幅分别为 33.62% 和 39.68%。这证实了通过调节进水口数量对流场均匀性的改善效果要优于进水流量。

3) 当底部 4 个出水口同时工作时，舱内未形成明显涡流场。减少出水口数量，降低垂向流速的干扰，当出水口的位置在舱底右下侧时，由于水体旋转中心的位置与排水口的位置并不重合，因此产生了周期性、持续时间短的涡流场。当启用底部中间位置的排水口时，旋转中心与排水口位置重合，舱体中间部分出现显著的涡流场。因此，当底部设置 4 个出水口时，可有效避免涡流对舱内水体的不利影响。

## 参考文献：

- [1] 陈志, 李水根, 许丽双, 等. 深远海养殖大黄鱼肌肉品质分析与比较[J]. 福建农业科技, 2024, 55(11): 25-31.
- [2] COLEMAN J E. Structure and mechanism of alkaline phosphatase[J]. Annu Rev Biophys Biomol Struct, 1992, 21: 41-83.
- [3] YAMAZOE M, MIZUNO A, NISHI Y, et al. Serum alkaline phosphatase as a predictor of worsening renal function in patients with acute decompensated heart failure[J]. J Cardiol, 2016, 67(5): 412-417.
- [4] 孙欣, 张璐, 董韶光, 等. 液氮速冻在海产品保鲜中的应用研究[J]. 食品安全导刊, 2025(1): 113-116.
- [5] 张琳桓, 张青亮, 孟广玮. 基于可移动式养殖工船的新型深远海养殖产业链分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(S02): 40-44.
- [6] 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.
- [7] 张千, 刘世佳, 刘亮清, 等. 我国深远海养殖设施装备发展现状与趋势[J]. 中国渔业经济, 2023, 41(3): 71-77.
- [8] 程世明, 韩越, 金杨, 等. 养殖工船海上旁靠补给系统设计及水动力性能[J]. 船舶工程, 2024, 46(5): 1-5, 32.
- [9] 同国琦, 倪小辉, 莫嘉嗣. 深远海养殖装备技术研究现状与发展趋势[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(1): 123-129.
- [10] 房熊, 徐志强. 深远海养殖工船的优势及创新技术[J]. 广东造船, 2023, 42(5): 49-52.
- [11] 顾海涛, 李明爽, 刘兴国. 水产养殖机械发展现状、问题与挑战及发展建议[J]. 中国水产, 2022(8): 42-46.
- [12] 崔铭超, 鲍旭腾, 王庆伟. 我国深远海养殖设施装备发展研究[J]. 船舶工程, 2021, 43(4): 31-38.
- [13] 崔铭超, 金娇辉, 黄温簪. 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.
- [14] 赵玲菲, 薛博茹, 赵云鹏. 折角比对养殖工船舱内流场特性的影响[J]. 渔业现代化, 2024, 51(2): 22-31.
- [15] DAVIDSON J, SUMMERFELT S. Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m<sup>3</sup>) circular 'Cornell-type' dual-drain tanks[J]. Aquac Engin, 2004, 32(1): 245-271.
- [16] 李猛. 矩形圆弧角养殖池长宽比对池内流场及排污的影响[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023: 2-8.
- [17] LIU Y, LIU B, LEI J, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics within octagonal tanks in recirculating aquaculture systems[J]. Chin J Oceanol Limnol, 2017, 35(4): 912-920.
- [18] 吴彦飞. 工厂化循环水养殖池流态特征与聚污研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022: 4-8.
- [19] FARGHALLY M H, ATIA M D, EL-MADANY T H, et al. Control methodologies based on geothermal recirculating aquaculture system[J]. Energy, 2014, 78: 826-833.
- [20] GORLE J, TERJESEN B F, SUMMERFELT S T. Hydrodynamics of Atlantic salmon culture tank: effect of inlet nozzle angle on the velocity field[J]. Comp Electron Agric, 2019, 158: 79-91.
- [21] GORLE J, TERJESEN B F, SUMMERFELT S T, et al. Hydrodynamics of octagonal culture tanks with cornell-type dual-drain system[J]. Comp Electron Agric, 2018, 151: 354-364.
- [22] 桂劲松, 张倩, 任效忠, 等. 圆弧角优化对单通道方形养殖池流场特性的影响研究[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(2): 308-316.
- [23] 高瑞, 崔铭超, 王庆伟, 等. 养殖水舱横摇适鱼性数值分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(12): 35-42, 47.
- [24] 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.

- [25] 杨志勋, 徐潜岳, 董玉山, 等. 基于实验的二维八边形液舱晃荡比尺效应研究[J]. *船舶力学*, 2019, 23(5): 505-511.
- [26] 朱放, 胡佳俊, 孔剑桥, 等. 基于 PIV 技术的圆形循环水养殖池流场[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 296-300.
- [27] 张学芬. 进水方式对八边形养殖池自清洗能力的影响[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021: 31-35.
- [28] 冯德军, 李德振, 黄亨达, 等. 横摇激励下养殖工船养殖舱自清洗能力分析[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(2): 251-260.
- [29] 张琛, 刘晃, 张成林, 等. 进水方式对矩形养殖舱内流场及适渔性的影响[J]. *南方水产科学*, 2024, 20(6): 121-131.
- [30] 吉泽坤, 刘晃, 崔铭超, 等. 颗粒特性对矩形养殖舱中颗粒物去除效果的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(5): 1068-1079.
- [31] 于林平, 薛博茹, 任效忠, 等. 单进水管结构对单通道矩形圆弧角养殖池水动力特性的影响研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(1): 134-140.
- [32] 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]. *Aquac Engin*, 2023, 101: 23-24.
- [33] 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.
- [34] ODCAARD A J. Free-surface air core vortex[J]. *J Hydraulic Engin*, 1986, 112(7): 610-620.
- [35] CRISTOFANO L, NOBILI M, CARUSO C. Experimental study on unstable free surface vortices and gas entrainment onset conditions[J]. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2014, 52: 221-229.