



进径比对矩形圆弧角养殖池水动力特性影响

薛博茹^{1,2}, 于林平², 张倩^{1,2}, 任效忠^{1*}, 毕春伟³

(1. 大连海洋大学, 设施渔业教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;

2. 大连海洋大学, 海洋与土木工程学院, 辽宁 大连 116023;

3. 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为研究单管入流模式下, 进径比 (参数 C/B , C 为射流孔位置到养殖池壁的水平距离, B 为养殖池短边边长) 对单通道矩形圆弧角养殖池系统水动力特性的影响, 实验运用计算流体动力学仿真技术构建单通道矩形圆弧角养殖池三维数值计算模型, 应用平均流速、阻力系数和速度分布均匀系数等流体动力学特征量分析养殖池内 (尤其是池底) 的流场形态, 并修正能量有效利用系数以评估养殖池系统的能量有效利用率。结果显示, 将进径比参数 C/B 从 0.00 增大到 0.05 可有效改善养殖池内流场特性, 进径比参数 C/B 设置在 0.02~0.04 之间有利于单通道矩形圆弧角养殖池系统获得最佳的流场条件。研究表明, 进径比参数的较小优化可显著提高养殖池内平均流速与能量有效利用率, 利于形成均匀稳定的流场。

关键词: 矩形圆弧角养殖池; 进径比; 水动力特性; 能量有效利用系数; 计算流体力学

中图分类号: S 955.1

文献标志码: A

工厂化循环水养殖 (recirculating aquaculture system, 简称 RAS) 是集现代化、自动化、集约化于一体的养殖模式, 符合“生态优先”的国家战略与“提质增效、减量增收、绿色发展”的渔业现代化发展需求, 被认为是 21 世纪水产养殖业发展的主导方向之一^[1-3]。养殖池是水产养殖装备基础设施, 通过改进与工程优化, 可为实现可持续发展环境友好型水产养殖提供装备保障^[4-5]。目前, 因矩形养殖池内流场形态差无法满足养殖生物健康生长的需求, 在工厂化循环水养殖生产实践中应用受限; 圆形养殖池又因空间利用率低严重影响商业化循环水养殖的经济效益。而圆弧角代替直角方式的池型设计可扬长避短,

因此矩形圆弧角养殖池逐渐成为研究与应用的热点池型结构之一。

目前, 关于矩形圆弧角养殖池系统进、出水装置布设位置的研究相对有限且缺乏系统性, 养殖池系统的设计主要依赖相似定律和传统经验。而实际应用中, 由于系统内的流场复杂多变, 其特性无法被准确预测导致推广使用严重受限。数值模拟技术日益成熟, 基于计算流体动力学设计改进养殖池结构已成为水产养殖业设施设备研究的前沿领域。相比于物理模型试验, 数值模拟方法易于调整养殖池模型参数、获取更丰富的系统流场信息来优化池型结构^[6-7], 数值模拟对揭示循环水养殖系统内部流体动力

收稿日期: 2019-11-12 修回日期: 2020-08-12

资助项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0701701); 国家自然科学基金面上项目 (31872609); 自治区 (新疆) 重点研发计划 (2017B01004-2); 广东省重点领域研发计划 (2019B020215001); 辽宁省高等学校海洋产业技术研究院项目 (2018-CY-24); 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目 (LP1818)

第一作者: 薛博茹, 从事工程水动力学特性研究, E-mail: 745040524@qq.com

通信作者: 任效忠, E-mail: renxiaozhong@dlou.edu.cn



学特性进而营造理想流场具有重要意义。

养殖池进、出口结构的有效优化改善了水体交换效果与能源有效利用率, 进而提高了养殖池系统的集排污性能。已有学者通过调整进水管布设位置、进水结构射流方向, 改变射流孔面积和使用喷射嘴等方式改善养殖池内的水动力条件^[8-11]。本实验基于对时间平均处理的雷诺平均 N-S 方程 (RANS), 在验证数值模型满足计算精度的基础上, 研究单管入流模式下进径比对单通道矩形圆弧角养殖池内流场特性的影响, 以相对较小的结构参数优选实现养殖池系统水动力条件的优化, 为改善养殖生物生存福利和改进系统的集排污机制提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 控制方程与湍流模型

连续性方程、动量方程和能量方程等是建立流体动力学数值模型的基础。本实验对所构建的数值模型做如下假设: 不考虑内部养殖生物和外部环境干扰; 假设系统保持恒温 (无温度的影响); 假定流体为黏性不可压缩。

数值计算模型控制方程的连续性方程和雷诺平均 N-S 方程 (RANS)^[12-13] 表示如下:

$$\nabla(\rho\bar{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{U}) + \nabla(\rho\bar{U}\bar{U} + \rho\overline{u'u'}) = -\nabla\bar{p} + \nabla\bar{\tau} + \rho\bar{g} + \bar{F} \quad (2)$$

矩形圆弧角养殖池内的流动以旋转和沉降为主, RNG k-ε 湍流模型通过修正湍动黏度考虑了系统内旋转流动情况, 能够更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动, 可精准地模拟养殖池内流场形态, 本实验选取 RNG k-ε 湍流模型使控制方程组闭合^[14-16]。

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\partial_k (\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho\epsilon \quad (3)$$

湍流耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_k - C_{2\epsilon} \rho\epsilon) \quad (4)$$

湍流黏度 μ_t 和由平均速度引起的湍动能 k 的产生项 G_k 表示如下:

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

根据经验, 相关参数取值如下^[14]: $C_{1\epsilon}=1.42$, $C_{2\epsilon}=1.68$, $C_\mu=0.0845$

1.2 数值求解方法

应用 Fluent 预处理软件 Gambit 和 Mesh 分别进行三维数值计算模型的构建和非结构化网格划分, 并对进水管、射流口、排水口等位置进行网格加密处理。数值计算模型求解方法采用压力隐式求解, 压力速度耦合方式采用 SIMPLE 算法, 湍流动能基于一阶迎风离散格式; 池底和池壁均为固体壁面边界, 且无剪切和滑移速度; 水面按自由液面处理, 压力值为标准大气压。其他初始边界条件及相关参数设置如下:

水的密度 $\rho=998.2 \text{ kg/m}^3$; 水的黏度 $\mu=1.03 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$; 速度入口 $V=1 \text{ m/s}$; 压力出口; 雷诺数 $Re=3876.51$; 湍流黏度 $I=5.7\%$ ($I=0.16 \text{ Re}^{-0.125}$), 水力直径 $D_H=0.004 \text{ m}$ 。

1.3 水动力学特征量

基于流速 V 、流量 Q ^[17]、养殖池阻力系数 C_t ^[18] 和速度分布均匀系数 DU_{50} ^[19] 等水动力学特征量对循环水养殖池系统流场特性进行定量描述, 相关公式如下:

$$C_t = 2Q_{in} (V_{in} - V_{avg}) / A V_{avg} \quad (7)$$

$$DU_{50} = \frac{V_{50}}{V_1} \times 100 \quad (8)$$

式中, $Q_{in}(\text{m}^3/\text{s})$ 为进水流量; $V_{in}(\text{m/s})$ 为进水速度; $V_{avg}(\text{m/s})$ 为养殖池内平均速度, $A(\text{m}^2)$ 为湿周, $V_{50}(\text{m/s})$ 为养殖池中 50% 的较低速度的平均值; $V_1(\text{m/s})$ 为所监测平面的平均速度, 通过半径加权来获得; DU_{50} 接近 100 说明养殖池内的水流速度分布均匀, 小涡流区域较少。

$$V_1 = \frac{\sum V_i r_i}{\sum r_i} \quad (9)$$

式中, $V_i(\text{m/s})$ 是径向位置为 $r_i(\text{m})$ 时的速度。

输入到养殖池内的流体主要用于维持水体运转和水体之间的混合, 池内水体的平均流速和混合均匀性的耦合可反映养殖池系统的能量

有效利用的情况, 因此提出能量有效利用系数 η_e , 具体表示如下:

$$\eta_e = DU_{50} \times \left(\frac{V_{\text{avg}}}{V_{\text{in}}} \right)^2 \times 100 \quad (10)$$

2 结果

2.1 模型验证

构建三维数值模型并进行相应的数值计算^[20], 将数值模拟结果与其试验结果比较分析, 以验证实验数值模型的准确性。验证模型(图1)参数: 圆形养殖池直径 0.49 m, 水深 0.06 m, 底部排污口直径 0.01 m, 射流口直径 0.007 m, 射流速度 0.47 m/s。

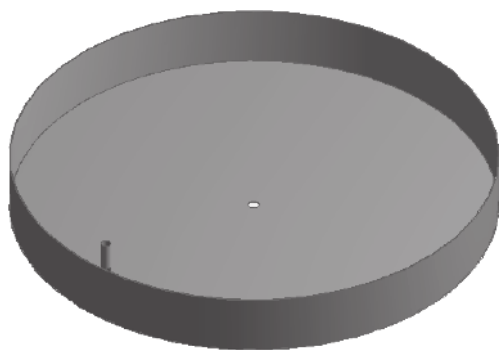


图1 验证模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the verification model

在临近养殖池中心出水口位置、中间区域以及接近养殖池壁的较高流速区等代表性位置提取速度值, 两个模型均呈现相同规律且整体吻合良好, 经计算各对应点的误差均在 7% 以内(图2)。模型验证充分说明本实验构建的数值模

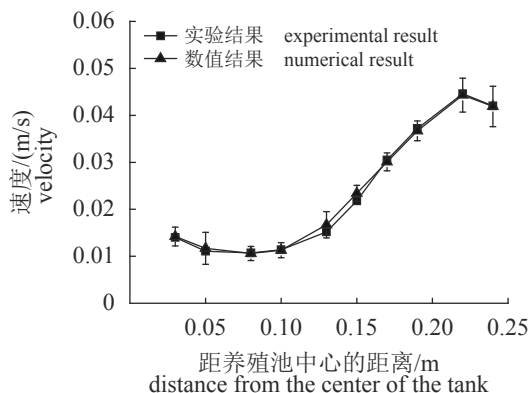


图2 圆形养殖池数值模型与试验结果比较

Fig. 2 Velocity comparison of the numerical results and the experimental data in the circular tank

型合理、精度满足要求, 可用于矩形圆弧角养殖池流场特性的数值计算研究。

2.2 矩形圆弧角养殖池数值模型

数值模拟所构建的单通道矩形圆弧角养殖池模型(图3), 是参照工厂生产实践中养殖池的主体结构进行约为 1:8 的比尺缩放, 并对部分参数优化处理, 数值模型参数: L (长)× B (宽)=1 m×1 m, 圆弧角半径 $R=0.25$ m, 水深 $H=0.2$ m (相对弧宽比 $R/B=0.25$, 径深比 $B/H=5:1$, 长宽比 $L/B=1:1$); 进水管 ($D_{\text{in}}=0.02$ m) 置于养殖池直壁中间位置沿水深方向垂直布设 (依据进径比调整进水管与养殖池壁的水平距离), 自上而下均匀设置 18 个射流孔 (直径 $D=0.004$ m, 流量 0.814 m³/h), 射流方向与池侧壁平行; 出水口 (直径 $D_{\text{out}}=0.02$ m) 置于池底中心位置, 无底坡。数值模型采用四面体网格划分, 网格和节点数分别为 704888 和 160688(图4); 为保障计算精度的提高计算效率, 进行网格无关性验证, 使其与更精细的网格 (网格数和节点数分别为 1680572 和 345495) 进行比较, 图5给出两种尺寸网格的速度分布云图, 可见数值计算结果无明显变化 (h_z 是距离养殖池底部的高度)。

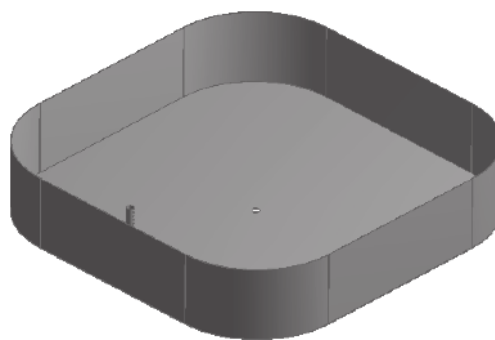


图3 矩形圆弧角养殖池模型图

Fig. 3 Schematic diagram of the rectangular tank with arc angle model



图4 模型网格划分示意图

Fig. 4 Meshing diagram of the model

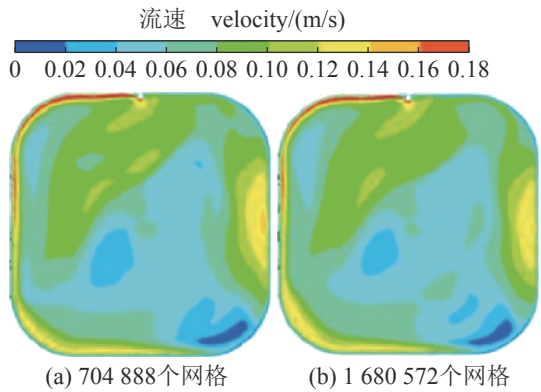


图 5 两种数量网格模拟结果对比
($C/B=0.00$, $h_z=0.10$ m)

Fig. 5 Comparison of graphical resolution and accuracy of two grid sizes($C/B=0.00$, $h_z=0.10$ m)

2.3 平均流速与阻力系数

生产中主要在近池壁位置布置进水结构, 本实验设置 11 种进径比参数工况, 分别对养殖池系统内流场进行三维数值模, 定量分析进径比对池内流场特性的影响。随进径比增大, 养殖池内平均流速先增大后减小, 阻力系数与平均流速呈现一定的负相关性, 其中进径比参数在 0.02~0.04 区间内, 养殖池系统内平均流速和阻力系数较理想; 进径比参数 C/B 在 0.00~0.01 与 0.06~0.10 两区间内, $h_z=0.03$ m 相对于 $h_z=0.10$ m

截面的速度变化率 (大于 12.14%) 较明显; 而参数 C/B 在 0.01~0.06 区间内, 速度变化率 (3.11%~8.12%) 相对较小; 尤其以 C/B 在 0.02~0.04 区间内, 平均速度变化率约为 4.54%, 为最小变化区间 (表 1)。不同横截面间的平均速度变化率小于 10%, 说明养殖池系统用于维持各层水体交互混合的能量损失相对较小^[21]。

综上可知, 进径比参数 C/B 在 0.02~0.04 区间内养殖池系统平均流速较高, 阻力系数较小, 且 $h_z=0.01$ m 和 $h_z=0.03$ m 两截面水体的平均速度较接近, 即各层水体之间的速度变化率较小, 是理想的进水结构设置选择区间。

2.4 速度分布均匀性与能量有效利用率

在距离池底高度 $h_z=0.01$ m 所在截面设置 68 个监测点 (取横、竖和对角线 4 条监测线, 横竖两条线各设 18 个监测点, 两条对角线各设 16 个监测点, 出水口处不设监测点), 以分析养殖池底部流场速度的分布均匀性 (图 6)。其中, 计算能量有效利用系数时应用到的 DU_{50} 由距离池底高度 $h_z=0.1$ m 所在截面设置同位置监测点计算得出。

依据公式 (7), 统计 11 种不同进径比工况下养殖池底部流场的速度分布均匀系数 DU_{50} (图 7)。进径比参数 C/B 从 0.00 增加 0.04, 养殖池底部速

表 1 养殖池系统 (不同进径比参数 C/B) 的特征统计表

Tab. 1 Characteristic statistics table of tank with the relative inflow distance

进径比参数 C/B effects of the relative inflow distance	池内平均流速/(m/s) average velocity in the tank	阻力系数 C_f resistance coefficient of the tank	距离底部高度 h_z 截面的速度 velocity from the height h_z at the bottom			速率变化/% rate change
			$v_{0.01}$	$v_{0.03}$	$v_{0.10}$	
0.00	0.067	0.065	0.092	0.088	0.078	12.14
0.01	0.074	0.053	0.093	0.087	0.080	9.12
0.02	0.082	0.043	0.097	0.094	0.089	5.71
0.03	0.085	0.039	0.102	0.097	0.100	3.11
0.04	0.081	0.044	0.102	0.096	0.092	4.81
0.05	0.074	0.053	0.089	0.084	0.079	6.83
0.06	0.063	0.073	0.085	0.074	0.065	14.62
0.07	0.060	0.082	0.083	0.073	0.063	15.08
0.08	0.058	0.089	0.079	0.068	0.060	13.10
0.09	0.056	0.094	0.076	0.066	0.059	12.31
0.10	0.055	0.098	0.074	0.066	0.055	19.38

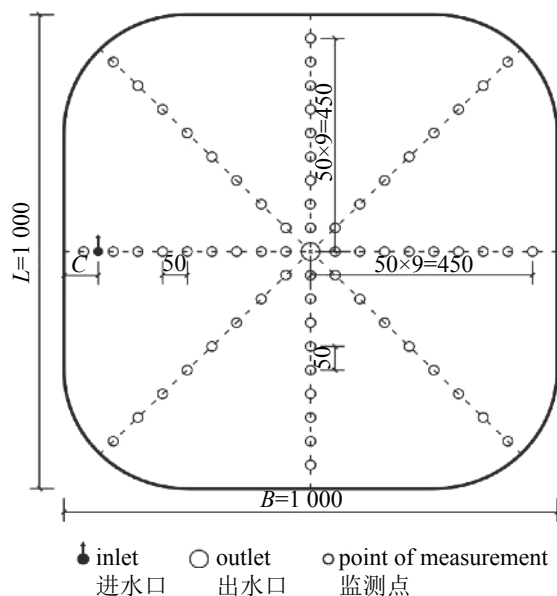


图6 数值模拟流场监测点分布图(单位: mm)

Fig. 6 Setup of numerical simulation flow field measuring points

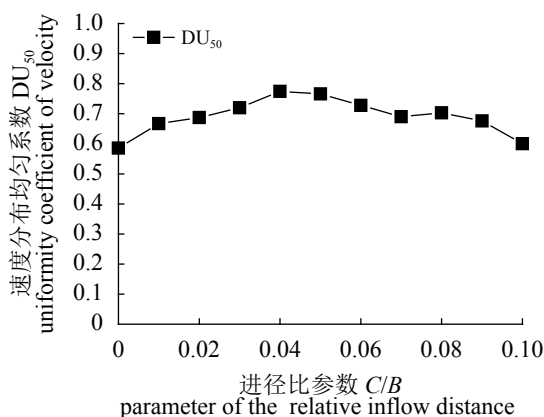


图7 养殖池底部速度分布均匀系数

Fig. 7 Uniformity coefficient of velocities with the relative inflow distance parameter C/B at the bottom of tank

度分布均匀系数稳定增大; 参数 C/B 在 0.04~0.05 区间内速度分布均匀系数基本恒定; 而当参数 C/B 继续增加, 养殖池底部速度分布均匀系数缓慢下降到接近初始值。图 8 给出养殖池系统的能量有效利用系数随进径比的变化趋势, 参数 C/B 在 0.00~0.04 区间内能量有效利用率 η_e 逐步上升, 参数 C/B 为 0.04 时达到最大值, 当参数 C/B 大于 0.04 后其迅速下降到 0.2 左右保持稳定。

上述分析表明, 进径比参数 C/B 在 0.02~0.04 区间内, 养殖池底部速度分布较均匀且能量有

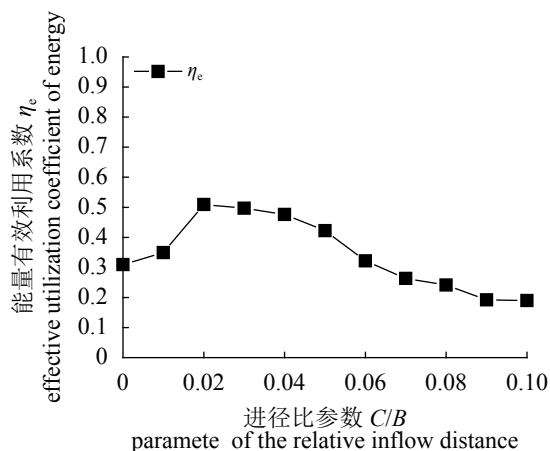


图8 不同进径比参数 C/B 的能量有效利用系数

Fig. 8 Effective utilization coefficient of energy of the tank with the different relative inflow distance parameters C/B

效利用率较高, 大大提高了养殖池空间尤其是底部空间的流场均匀性, 同时有利于降低能耗、提高养殖效率。

2.5 养殖池系统流场分布特征统计

图 9 给出不同进径比工况下, 距离池底高度 $h_z=0.01$ m 和 0.03 m 两个截面的养殖池内流场分布特征, 结果显示, 适当增大进径比, 截面流场形态逐步改善, 其中参数 C/B 在 0.02~0.04 区间内各个截面速度分布最为均匀, 流体质点的运动轨迹分布规律且没有明显的低流速区和小涡流区域。当参数大于 0.05 后, 池内流速整体降低, 尤其于右下侧圆弧角处出现较为明显的低流速区域; 整体流场质点轨迹呈现不同程度的不规则状态, 局部区域运动轨迹紊乱, 左上侧圆弧角处出现小涡流区域。此外, 进径比对距离池底高度 $h_z=0.01$ m 截面的池内流场分布影响更显著, 即对池底部流场影响更大。

湛含辉等^[22-23]提到二次流现象存在于一切黏性流体做曲线运动过程中, 且对底部流场影响较大, 在固液两相流体中对底部细微颗粒物的沉降及“搬移”到中心的作用比重力或离心力更有效。二次流场的流动参数是固体颗粒物高效沉降的关键因素, 选择合适的进径比使流体质点在养殖池底部形成较高流速的规律运动, 促进二次流形成明显效应, 利于残饵粪便等固体颗粒物沉降并向池底中心汇聚。

流场分布特征统计表明, 进径比参数 C/B

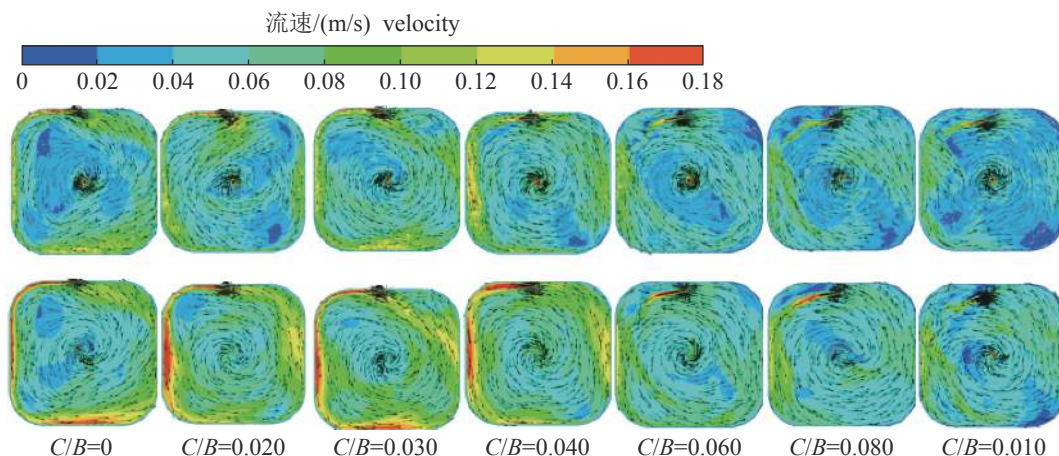


图9 养殖池内流场分布特征图 [$h_z=0.01$ m(上), $h_z=0.03$ m(下)]

Fig. 9 The characteristic map of flow field in tank [$h_z=0.01$ m (up), $h_z=0.03$ m (down)]

在 0.02~0.04 区间内养殖池系统流体质点运动轨迹呈现规律状态, 有利于养殖池底部二次流场的有效形成, 能对养殖池系统的集排污产生积极的影响。

3 讨论

考虑养殖池内流场特征的单相流模型, 输入养殖池系统的总能量完全由切向射流口提供, 主要用于抵消养殖池系统阻力消耗和克服水体质点间相对运动的能量损耗而维持养殖池系统水体运动, 其中抵消养殖池系统阻力消耗包括与池壁(侧壁和底壁)的摩擦消耗和撞击消耗两部分。适当增大进水结构与池侧壁之间的距离(C/B 由 0.00 提升至 0.04), 减少射流口射出的高流速水体与池侧壁之间的直接摩擦阻力消耗, 养殖池系统克服水体质点间相对运动的可利用能量增加, 因而养殖池内水体的整体流速较高且阻力系数较低。

如过度增大进径比, 即进水结构与池侧壁之间的距离较大(C/B 大于 0.04), 此时圆弧引导水体转向的作用减弱, 导致进水系统射出的高速水体与池侧壁发生直接碰撞逐渐剧烈, 出现类似于矩形养殖池内的反射、折射现象, 圆弧池壁无法发挥出使流体顺畅行进及转向等导向特性, 此时水流一分为二, 大部分继续沿主流前进, 小部分水流则折回到射流管附近。水体的剧烈碰撞、反射、折射等过程均伴随较高的能量消耗, 使得养殖池系统内水体的能量供给

降低、平均流速降低, 且折回水体导致进水结构与池侧壁之间的水体出现不同程度的低流速区和小漩涡区。

养殖池内尤其是池底流速分布规律的研究与解析, 是研究固体废弃物运动机制的基础, 与养殖池系统集排污性能密切相关^[24]。选择适合进径比利于均匀稳定流场环境的形成, 有助于养殖池上部空间溶解氧等营养物质及硝酸盐、亚硝酸盐等有害物质的均匀分布, 更为池底二次流对颗粒物的沉降及“搬移”作用提供有利条件。此外, 进水装置布设在进径比 C/B 为 0.02~0.04 区间, 利于养殖池系统构建、满足养殖生物对流场条件的综合需求, 是养殖池进水系统合理的布置空间。

4 结论

本实验构建了矩形圆弧角养殖池系统三维数值计算模型, 在验证其满足计算精度的基础上, 开展了进径比对单通道矩形圆弧角养殖池系统流场影响的数值分析, 并修正能量有效利用系数公式。实验结果发现, 进径比对养殖池系统流场特性影响显著, 其中参数 C/B 在 0.02~0.04 区间池内流场均匀稳定, 且平均流速和能量有效利用率均较高, 有利于单通道矩形圆弧角养殖池系统获得较优水动力条件。养殖池系统内部分参数的细微变化直接导致循环水养殖池系统内流场性能的较大改变, 进径比的提出与研究证明其是系统流场构建中不可忽视的参数,

对优化养殖池系统流场特性有一定意义。

参考文献 (References):

- [1] 唐茹霞, 史策, 刘鹰. 循环水养殖系统管理运行存在主要问题调查分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2018, 38(1): 100-106.
Tang R X, Shi C, Liu Y. Analysis on the major problems in the management and operation of recirculating aquaculture system[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2018, 38(1): 100-106(in Chinese).
- [2] 陈丕茂, 舒黎明, 袁华荣, 等. 国内外海洋牧场发展历程与定义分类概述[J]. *水产学报*, 2019, 43(9): 1851-1869.
Chen P M, Shu L M, Yuan H R, *et al.* Review on development, definition and classification of marine ranching in domestic and overseas[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1851-1869(in Chinese).
- [3] 潘荣华, 胡一丞, 陆宁基, 等. 循环水养殖技术研究进展[J]. *科学养鱼*, 2018(11): 1-2.
Pan R H, Hu Y C, Lu N J, *et al.* Research progress of recirculating aquaculture technology[J]. *Scientific Fish Farming*, 2018(11): 1-2(in Chinese).
- [4] 徐皓. 水产养殖设施与深水养殖平台工程发展战略[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 37-42.
Xu H. Development strategy for aquaculture facility and deepwater aquaculture platform[J]. *Engineering Science*, 2016, 18(3): 37-42(in Chinese).
- [5] 李忠义, 林群, 李娇, 等. 中国海洋牧场研究现状与发展[J]. *水产学报*, 2019, 43(9): 1870-1880.
Li ZY, Lin Q, Li J, *et al.* Present situation and future development of marine ranching construction in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(9): 1870-1880(in Chinese).
- [6] Labatut R A, Ebeling J M, Bhaskaran R, *et al.* Exploring flow discharge strategies of a mixed-cell raceway (MCR) using 2-D computational fluid dynamics (CFD)[J]. *Aquacultural Engineering*, 2015, 66: 68-77.
- [7] Rasmussen M R, McLean E. Comparison of two different methods for evaluating the hydrodynamic performance of an industrial-scale fish-rearing unit[J]. *Aquaculture*, 2004, 242(1-4): 397-416.
- [8] Davidson J, Summerfelt S. Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m³) circular ‘Cornell-type’ dual-drain tank[J]. *Aquacultural Engineering*, 2004, 32(1): 245-271.
- [9] Summerfelt S T, Davidson J W, Waldrop T B, *et al.* A partial-reuse system for coldwater aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2004, 31(3-4): 157-181.
- [10] Summerfelt S T, Davidson J, Wilson G, *et al.* Advances in fish harvest technologies for circular tanks[J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 40(2): 62-71.
- [11] Labatut R A, Ebeling J M, Bhaskaran R, *et al.* Effects of inlet and outlet flow characteristics on mixed-cell raceway (MCR) hydrodynamics[J]. *Aquacultural Engineering*, 2007, 37(2): 158-170.
- [12] Labatut R A, Ebeling J M, Bhaskaran R, *et al.* Modeling hydrodynamics and path/residence time of aquaculture-like particles in a mixed-cell raceway (MCR) using 3D computational fluid dynamics (CFD)[J]. *Aquacultural Engineering*, 2015, 67: 39-52.
- [13] Xue B R, Ren X Z, Shi X Y, *et al.* A study on the influence of bottom structure in recirculating aquaculture tank on velocity field[J]//Proceedings of the Twenty-Ninth International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu, Hawaii, USA: ISOPE, 2018: 1325-1330.
- [14] 于林平, 薛博茹, 任效忠, 等. 单进水管结构对单通道方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.
Yu L P, Xue B R, Ren X Z, *et al.* Influence of single inlet pipe structure on hydrodynamic characteristics in single-drain rectangular aquaculture tank with arc angles[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(1): 134-140(in Chinese).
- [15] 薛博茹, 姜恒志, 任效忠, 等. 进径比对方形圆弧角养殖池内流场特性的影响研究[J]. *渔业现代化*, 2020(4): 20-27.
Xue B R, Jiang H Z, Ren X Z, *et al.* Study on the influence of the relative inflow distance on the flow field characteristics in square arc angle aquaculture tank[J]. *Fishery Modernization*, 2020(4): 20-27(in Chinese).
- [16] 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.
- [17] 杨宇, 严忠民, 乔晔. 河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(2): 1-6.
Yang Y, Yan Z M, Qiao Y. Characterization and evaluation of hydrodynamic conditions in river fish habitat[J]. *Journal of Hohai University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(2): 1-6(in Chinese).

- 125-130.
- Yang Y, Yan Z M, Qiao Y. Description and review of hydraulic conditions of fish habitats[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(2): 125-130(in Chinese).
- [18] Oca J, Masaló I. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features[J]. [Aquacultural Engineering](#), 2013, 52: 65-72.
- [19] Masaló I, Oca J. Influence of fish swimming on the flow pattern of circular tanks[J]. [Aquacultural Engineering](#), 2016, 74: 84-95.
- [20] Oca J, Masaló I. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks[J]. [Aquacultural Engineering](#), 2007, 36(1): 36-44.
- [21] Burley R, Klapsis A. Flow distribution studies in fish rearing tanks. Part 2 —Analysis of hydraulic performance of 1 m square tanks[J]. [Aquacultural Engineering](#), 1985, 4(2): 113-134.
- [22] 湛含辉. 二次流现象及其初步研究[J]. 株洲工学院学报, 2001, 15(3): 27-29.
- Zhan H H. Research and phenomenon of secondary flow[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2001, 15(3): 27-29(in Chinese).
- [23] 湛含辉, 戴财胜, 张晓琪. 二次流原理在水处理沉降设备中的应用研究[J]. 煤矿环境保护, 2002, 16(3): 36-37, 41.
- Zhan H H, Dai C S, Zhang X Q. Research of secondary flow mechanism in the water treatment[J]. Coal Mine Environmental Protection, 2002, 16(3): 36-37, 41(in Chinese).
- [24] 刘威. 矩形流水对虾养殖池集污特性及对虾耐流性研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.
- Liu W. Study on fouling characteristics and prawn tolerance in shrimp pond[J]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2018 (in Chinese).

A numerical study of the effect of relative inflow distance on hydrodynamic characteristics in the single-drain rectangular aquaculture tank with arc angles

XUE Boru^{1,2}, YU Linping², ZHANG Qian^{1,2}, REN Xiaozhong^{1*}, BI Chunwei³

(1. Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture, Ministry of Education, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. College of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to explore the influence of the position of the water inlet device on the hydrodynamic characteristics of the single-drain rectangular arc angle aquaculture tank, a new parameter, the relative inflow distance C/B (C is the horizon distance from inlet to sidewall, B is the width of the rectangular tank) was proposed in this paper, and the complex flow field of near the sewage outlet were analyzed by fluid dynamics characteristics variables, and to measure the effective utilization rate of water in aquaculture tank, the effective utilization coefficient of energy η_e is put forward. Meanwhile based on the Reynolds averaged Navier Stokes (RANS) equation and RNG $k-\epsilon$ turbulence model, a three-dimensional numerical model of rectangular arc angle aquaculture tank was constructed. Computational fluid dynamics simulation technology was used to calculate and analyze the flow field environment in the constructed aquaculture tank. By adjusting the layout position of the inlet system, the flow field in the tank (especially at the bottom) was optimized, and the influence of the optimization of hydrodynamic conditions on the collection and discharge performance of the aquaculture tank system was analyzed. This base case is validated against the experimental velocity measurements using Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) at predefined locations across the central vertical plane of the tank. On this basis, the hydrodynamic conditions of the aquaculture tank system were systematically analyzed by hydrodynamic characteristics, such as the average velocity, energy efficiency, velocity distribution uniformity at the bottom of the tank and so on. The numerical simulation results show that the average velocity and energy efficiency can be significantly improved by optimizing the relative inflow distance, which is conducive to the formation of uniform and stable flow field. And increasing the relative inflow distance parameter C/B from 0.00 to 0.05 can effectively improve the flow field characteristics in the aquaculture tank, and setting the relative inflow distance parameter C/B between 0.02 and 0.04 is beneficial to obtain the best flow field conditions for the single channel rectangular arc angle aquaculture tank system. The results show that the ratio parameter C/B in the range of 0.02~0.04 could effectively improve flow field characteristics of the system so as to get better hydrodynamic conditions for circulating aquaculture, and relatively minor construction changes could improve the hydrodynamic conditions of the aquaculture system and open up new ideas for obtaining the hydrodynamic environment conducive to fish welfare and production operation.

Key words: rectangular aquaculture tank with arc angle; the relative inflow distance; hydrodynamic characteristics; effective utilization coefficient; computational fluid dynamics(CFD)

Corresponding author: REN Xiaozhong. E-mail: renxiaozhong@dlou.edu.cn

Funding projects: National Key R & D Plan Project (2017YFD0701); General Program of NSFC (31872609); Key R & D Plan Project of Xinjiang Autonomous Region (2017B01004-2); R & D Plan of Key Areas of Guangdong Province (2019B020215001); Project of Institute of Marine industry Technology of Liaoning University (2018-CY-24); Open Fund Project of National Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering of Dalian University of Technology (LP1818)