doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.015

深远海养殖平台离心水泵式负压吸鱼系统设计与多相流模拟

林礼群[1,2]　刘　平[1,2]　张耀明[1,2]　徐志强[1,2]

(1.中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所,上海 200092;2.农业农村部远洋渔船与装备重点实验室,上海 200092)

摘要:针对深远海大型设施养殖平台单体产量突破百吨级后面临的活鱼高效起捕难题,设计了一种利用离心水泵驱动形成稳定负压的大流量吸鱼系统。基于理想气体状态方程得出:液位变化仅为集鱼箱容积总高度的 10.3% 以内就能形成适于吸鱼的工作压力,在此基础上设计了集鱼箱装置关键尺寸,并利用多孔介质模型构建拦鱼格栅模型,基于 VOF 与 CFD-DEM 耦合方法对吸鱼过程流动进行三维瞬态数值分析。数值结果表明:吸鱼过程液位保持基本恒定,压力波动范围在 -37.5 ~ -26.5 kPa 之间,最大压力变化率为 0.037 kPa/s,远低于鱼类损伤阈值,工作压力相对初始值(负压 -35 kPa)的变化不到 7%;集鱼箱内鱼群分布随着流量增大呈显著差异:流量为 150 m^3/h 时鱼群初期沿进口至出水口密集分布,后期缓慢扩散;流量为 225 m^3/h 时因高流量则强涡流作用使鱼群更快分散至箱体四周,且流速越高扩散越明显;拦鱼格栅处的鱼群聚集行为随流量增加呈非线性变化:流量 150 m^3/h 时数量较稳定,流量 200 m^3/h 时波动加剧,接触数量峰值达 55 条,流量 225 m^3/h 时非稳态波动显著,与拦鱼格栅接触数量为 63 条,占总接触数量的 32%,说明流量升高会增加堵塞风险,需要通过弧形格栅设计、扩大开口尺寸及增设导鱼通道优化拦鱼格栅结构以降低堵塞风险,进一步提升吸捕量。

关键词:深远海养殖平台;吸鱼装置;压力波动;堵塞预测;三相流;离散元模型

中图分类号:S96　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0147-09　　**OSID**:

Design and Multiphase Flow Simulation of Centrifugal Pump Negative-pressure Fish Suction System

LIN Liqun[1,2]　LIU Ping[1,2]　ZHANG Yaoming[1,2]　XU Zhiqiang[1,2]

(1. *Fishery Machinery and Instrument Research Institute*, *Chinese Academy of Fishery Sciences*, *Shanghai* 200092, *China*
2. *Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shanghai* 200092, *China*)

Abstract: Aiming to address the challenge of efficiently harvesting live fish from large-scale aquaculture platforms in deep sea, where the yield per individual platform has exceeded 100 tons, a high-capacity fish suction system utilizing a centrifugal water pump to create a stable negative pressure was designed. Based on the ideal gas state equation, it was found that a pressure suitable for fish suction could be formed when the liquid level change was within 10.3% of the total height of the fish collection tank. The key dimensions of the fish collection tank device were designed accordingly. A fish barrier grid model was constructed by using a porous medium model, and a three-dimensional transient numerical analysis of the fish suction process was performed based on the coupled VOF and CFD-DEM method. The numerical results showed that the liquid level remained basically constant during the fish suction process, with pressure fluctuations ranging from -37.5 kPa to -26.5 kPa, and the maximum pressure change rate was 0.037 kPa/s, which was far below the fish damage threshold. The change in working pressure relative to the initial value of -35 kPa was less than 7%. The distribution of fish schools in the collection tank showed significant differences with increasing flow rate: at 150 m^3/h, the fish initially clustered densely from the inlet to the outlet, then gradually dispersed; at 225 m^3/h, the higher flow rate caused faster dispersion to the tank periphery due to strong vortex effects, with more pronounced diffusion at higher

收稿日期:2025-08-11　修回日期:2025-08-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2401203)

作者简介:林礼群(1986—),女,副研究员,主要从事渔业起捕装备研究,E-mail:llq121643@163.com

通信作者:徐志强(1984—),男,研究员,博士,主要从事渔业工程装备研究,E-mail:xuzhiqiang@fmiri.ac.cn

velocities. The fish aggregation behavior at the fish barrier grid exhibited nonlinear changes with increasing flow rate: when the flow rate was 150 m^3/h, the number of fish in contact with the fish barrier grid remained relatively stable; when the flow rate was 200 m^3/h, the number fluctuated intensely, with a peak of 55; when the flow rate was 225 m^3/h, non-steady-state fluctuations were significant, with 63 fish in contact with the fish barrier grid, accounting for 32% of the total number of contacts, indicating that an increase in flow rate significantly increased the risk of blockage. In order to further increase the suction capacity, it was necessary to optimize the structure of the fish interception grille by designing a curved grille, expanding the opening size, and adding fish guide channels to reduce the risk of blockage.

Key words: aquaculture platforms in deep sea; fish suction device; pressure fluctuation; clogging prediction; three-phase flow; discrete element model

0 引言

近年来,随着我国水产养殖不断向深远海拓展,海上集约化养殖取得良好发展[1],特别是大型深水网箱、深海养殖船等养殖模式的出现,养殖平台单体养殖产能突破百吨级水平,传统的捕捞方式已难以满足深远海养殖大规模活鱼起捕转运需求[2-4]。吸鱼泵作为提高鱼类起捕机械化水平和作业效率所需的关键装备,提升其作业效率和适用性是关键技术突破点[5]。

主流吸鱼泵包括真空式、离心式和射流式吸鱼泵。其中,离心式吸鱼泵叶轮高速剪切诱发鱼体表损伤高,对大规格活鱼起捕损伤大[6-7];真空式吸鱼泵一般采用水环真空泵或空压泵预抽集鱼罐体内空气形成负压吸鱼,抽气与吸鱼属于间隙式作业模式,单位时间捕捞效率低、能耗高,且鱼水混合物在高速状态下冲入集鱼罐体,易引发罐内水体剧烈湍动与压力波动,增加鱼体损伤风险[8-9];射流式吸鱼泵是通过高压工作流体在喉部形成负压实现鱼水混合物的无机械输送装置,对鱼的机械损伤风险相对较低,但是射流泵喷射形成的剪切流和压力梯度也同样造成鱼不同程度损伤[10-11]。学者们在吸鱼泵的设计和研究过程中,重点围绕降低鱼体损伤与提高吸捕效率等方面展开研究。文献[12]通过数值计算对比了切线出口与中间出口的蜗壳对吸鱼泵效率的影响,研究表明切线出口吸鱼泵扬程、效率都比中间出口吸鱼泵高。文献[13]设计了螺旋内导叶滚筒式收鱼装置,并试验得出设备高效运行和低鱼体损伤率的最佳倾角和转速,但该装置仅适用于小型渔船用,最大输送量不足 1 t/h;文献[14]采用 NSGA-Ⅱ多目标遗传算法对射流泵喉径比、面积比、吸入倾角组合形成的 30 组合参数进行优化,优化后的喷鱼泵内部径向压力梯度、暴露应变率和危险区显著降低,减少了鱼类受伤风险;文献[15]对真空式吸鱼泵水动力性能进行多目标优化,得到具有最优水动力性能的真空鱼泵结构参数,在最优结构参数下,真空鱼泵罐内的入射水流方向接近罐体上端,罐体与进水口管道之间的负压分布梯度一致,可以达到良好的吸鱼和提鱼效果。

以上研究主要是基于传统吸鱼模式及设备,研究有关吸鱼泵对鱼的损伤机理,或通过对主流吸鱼泵进行参数优化,提高能效有限。对吸鱼方法或吸鱼系统设备总体改进技术研究较少,使得现有吸鱼泵在面临深远海养殖活鱼吸捕的使用场景与吸捕规模的双重变化下,其吸捕效率、提升高度及适用性并不理想。本文针对深远海养殖大规模活鱼起捕场景,在负压吸鱼原理的基础上设计一种利用离心水泵形成稳定压力的大容量吸鱼装置。基于理想气体状态方程分析液位变化与吸鱼压力关系,设计吸鱼装置的关键结构参数。利用多孔介质模型建立集鱼箱出水口拦鱼格栅的物理模型,基于气-液-固三相流建立集鱼箱三维瞬态模型,模拟吸鱼过程中流场变化以及鱼体在集鱼箱内的实时分布情况,并进行影响因素分析,据此分析该吸鱼装置的性能,以期为深远海养殖高效吸捕装备升级提供理论支撑与基础数据。

1 系统工作原理

本研究提出一种利用离心水泵形成稳定负压的大流量吸鱼系统,采用负压吸鱼且动力系统不使用水环真空泵或空压泵,仅用一台离心水泵便能实现对集鱼装置抽水形成适于吸鱼的压力,并能保持吸鱼压力几乎不变,单次连续吸鱼量大、吸程高,同时鱼类也不经过任何运转的机械,避免了机械损伤,对深远海大型养殖平台的活鱼吸捕适用性强。系统由集鱼箱、离心水泵、拦鱼格栅、压力传感器、液位传感器、吸排鱼阀、吸排鱼管路、排水阀、通气阀、通氧阀、高低位排水管等功能性管路组成,如图 1 所示。控制主机与离心水泵、传感器、各阀门相连,根据设定的工作流程实现自动化吸排鱼控制。

系统工作流程分为 4 个步骤:S1,引水到集鱼箱;S2,集鱼箱排水形成负压;S3,吸鱼;S4,排鱼或暂

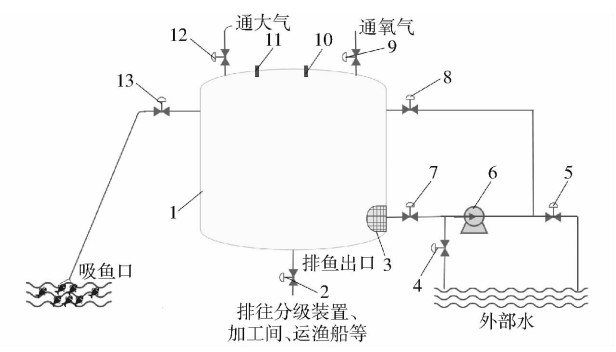

图 1　吸鱼系统原理图

Fig. 1　Schematic of fish suction system

1. 集鱼装置　2. 排鱼阀　3. 拦鱼格栅　4、8. 高位引水阀　5、7. 低位排水阀　6. 离心水泵　9. 通氧阀　10. 液位传感器　11. 压力传感器　12. 通气阀　13. 吸鱼阀

养。其中，S1 操作为：打开高位引水阀 4、高位引水阀 8、通气阀，关闭其余阀门，启动离心水泵抽水到集鱼箱，直至到达设定的液位 H_1，此时集鱼箱上部空气压强 P_1 与当地大气压相同，关闭水泵。S2 操作为：打开低位排水阀 7、低位排水阀 5，关闭其余阀门，启动离心水泵抽出集鱼箱内的水，从而在集鱼箱内形成负压，该过程参数变化示意图如图 2 所示。当集鱼箱内压力到达设定值 P_2，对应的液位高度为工作液位 H_2，此时，执行 S3 操作，打开吸鱼阀开始吸鱼，与此同时低位排水管同步保持排水作业；当集鱼箱内鱼水混合密度较大时，关闭水泵、低位排水阀 7、低位排水阀 5、吸鱼阀。S4 操作为：如需要在集鱼箱内暂养一段时间，保持通气阀门与通氧阀门打开，其他阀门均关闭，将氧气通入集鱼箱，实现鱼的暂养；若需进行排鱼，打开通气阀、通氧阀，再打开排鱼阀，将鱼排到相应的设备，直至全部排尽。

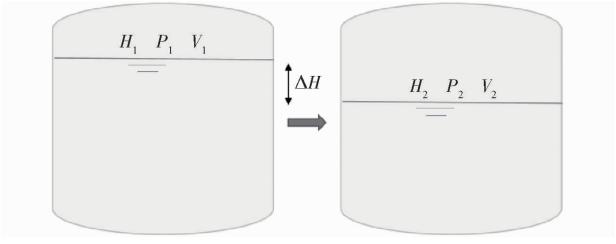

图 2　S2 过程液位与压力变化示意图

Fig. 2　Schematic of liquid level and pressure variations during S2 process

2　关键参数设计

2.1　液位变化

为了实现本吸鱼系统高效运行控制，需要设计合理的液位参数，以满足形成适于吸鱼的负压需求。首先，根据 S2 过程分析集鱼箱液位变化、吸鱼工作压力、集鱼箱几何参数等之间关系。假设集鱼箱横截面积 S 不变，内部容腔为高 H 的柱状体，S1 过程引水到集鱼箱的液体填充系数为 0.85，即液位 $H_1 = 0.85H$。集鱼箱内水为不可压缩流体，集鱼箱刚性无变形、密封良好。气体遵循理想气体定律，整个过程温度视为不变，则

$$P_1V_1 = P_2V_2 \tag{1}$$

式中　V_1——集鱼箱初始气体体积，m^3

V_2——引水后气体体积，m^3

液位变化 ΔH 为

$$\Delta H = (H - H_1)(P_1/P_2 - 1) \tag{2}$$

文献[8,16]研究表明，鱼类推荐生物学标准最小压力为 50 kPa。文献[9－10]研究显示：当压力大于 60 kPa(负压表示为 －40 kPa)时，鱼鳔形状能够抵抗压力的影响。当压力小于 40 kPa(负压表示为 －60 kPa)时，所有鱼鳔均破裂。在 40 kPa 和 60 kPa 之间有一个过渡压力区，在这个过渡压力区，鱼鳔处于不同的状态，鱼鳔有膨胀或破裂风险；当压力大于 85 kPa(负压表示为 －15 kPa)时，压力差不足。据此，选择 60 ~ 80 kPa(负压 －40 ~ －20 kPa)范围比较利于吸鱼且损伤较小，根据式(2)知：液位变化 ΔH 与吸鱼压力 P_2、容积总高度 H 之间关系如图 3 所示，图中显示液位变化与吸鱼压力呈负相关，与吸鱼容积高度呈正相关关系，且最大液位变化只有吸鱼容积高度的 10.3%。由此可知，采用离心水泵抽取集鱼箱内的水，在液位变化仅为集鱼箱容腔总高度的 10.3% 以内，就能形成适于吸鱼的压力。

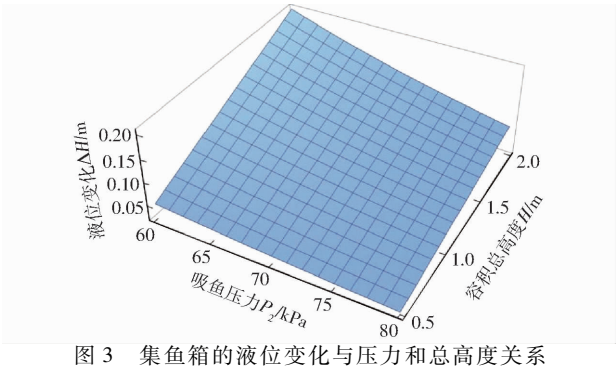

图 3　集鱼箱的液位变化与压力和总高度关系

Fig. 3　Liquid level－pressure－height characteristics of fish collection tank

2.2　集鱼箱主要尺寸

在吸鱼过程中，由于吸鱼管进入鱼水流量与排水流量相等，工作液位 H_2 几乎无变化，集鱼箱内压力稳定，能实现连续吸鱼，集鱼箱容积越大连续吸鱼的时间越长，直至鱼水混合比适宜时停止吸鱼。初步设定集鱼箱单次连续吸捕量(含水) SH_2 为 5 m^3，集鱼箱总容积 $V_0 = SH$，根据式(1)可以得出 V_0 与吸鱼压力 P_2 的关系如图 4 所示，在合理的吸鱼压力范围内，集鱼箱容积设计在 6.4 ~ 6.7 m^3 之间合理，因此，将集鱼箱容积设计为 6.6 m^3。集鱼箱容积高度

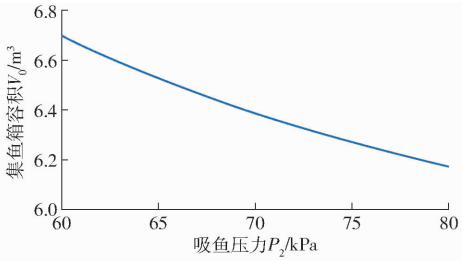

图 4 集鱼箱的容积与吸鱼工作压力关系曲线

Fig. 4 Relationship between fish collection tank volume and suction pressure

应考虑离心泵的吸程、运输与安装高度,据此将集鱼箱容积总高度 H 设计为 1.2 m,则集鱼箱横截面直径 D 为 2.65 m,工作液位 H_2 为 0.9 m。

2.3 吸鱼管径及安装位置

考虑到鱼水混合密度较大时,存在两条及以上鱼同时被吸入管道的情况,为避免吸鱼管道堵塞以及鱼相互蹭伤,吸鱼管径需要考虑鱼体高[17],深远海平台养殖的成鱼大黄鱼体高 0.1 m 左右[18],结合管道标准尺寸,吸鱼管径设计为 DN200,为使大黄鱼从吸鱼管平缓进入集鱼箱液面,且不逆流进入吸鱼管,进鱼口安装位置应略高于集鱼箱工作液位 H_2,将进鱼口安装略高于工作液位 0.05 m,在集鱼箱容积高度 0.95 m 位置。排鱼管径与吸鱼管径相同,安装在集鱼箱最底端。

3 吸鱼过程数值模拟

基于计算流体动力学(Computational fluid dynamics,CFD)的数值方法已在鱼类友好性泵的设计与评估研究中取得了良好成效[19-22],其中,计算流体动力学与离散元耦合方法(Computational fluid dynamics-discrete element method,CFD-DEM)是模拟固体颗粒与流体相互作用的常用计算方法,可以提供固体颗粒的运动轨迹及其与流动和壁面的相互作用,为鱼泵的研究提供了有效手段。本研究将基于 CFD-DEM 方法,考虑负压气体作用,在液固两相基础上增加气体相采用 VOF(Volume of fluid)模型,探究吸鱼过程中流场变化与鱼体运动分布情况及影响因素。

3.1 计算流域建模与网格划分

建立计算流域的三维模型如图 5a 所示,在 ANSYS 的 Meshing 模块进行网格划分,建立了 5.3×10^5、7.5×10^5、1.02×10^6、1.56×10^6 等 4 套网格方案,用于验证计算模型的网格无关性,在集鱼箱 0.5 m 平面中心点设置监测点观察该平面的压力变化,当网格数达到 7.5×10^5 后,模拟结果相对误差在 1% 以内,考虑计算精度与成本,结合 EDEM 软件在模拟过程会因为网格过多导致无法与 Fluent 软件进行耦合计算,采用 7.5×10^5 左右网格用于数值模拟计算合理。

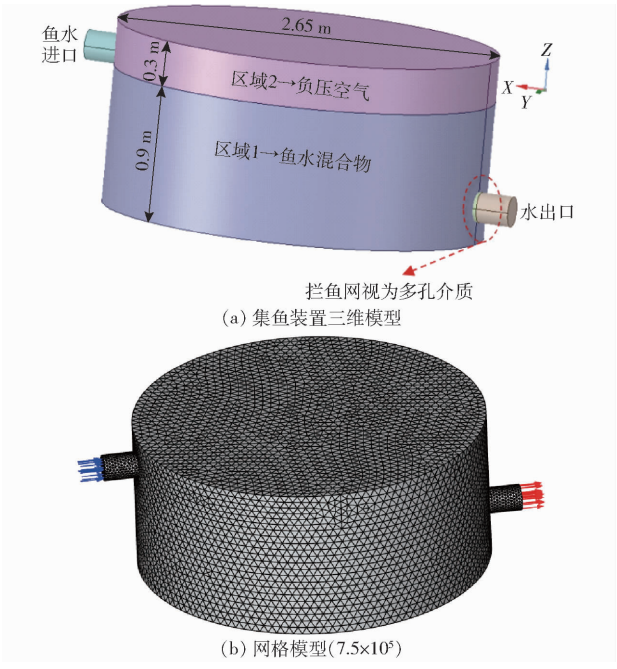

图 5 计算域的三维模型及网格划分示意图

Fig. 5 Schematics of mesh distribution in 3D simulation domain

3.2 数值方法

3.2.1 流体控制方程

在集鱼装置吸鱼过程中,气液相界面演化呈现显著的非稳态流动特征,采用基于瞬态 VOF 模型的计算流体力学方法,可通过求解相分数输运方程实现对自由界面动态变化的高精度捕捉[23]。气液流动体积函数输运方程、连续方程和 Navier-Stokes 方程分别为

$$\frac{\partial \gamma_p}{\partial t}+\nabla(\gamma_p u_f)=0 \tag{3}$$

$$\nabla(\rho u_f)=0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_f)+\nabla(\rho u_f u_f)=-\nabla P+\nabla\left[(\mu_f+\mu_t)\left(\nabla u_f+\nabla\cdot \boldsymbol{u}_f^{\mathrm{T}}\right)\right]+\rho g+F_{p-f} \tag{5}$$

其中

$$F_{p-f}=-\frac{1}{V}F_{f-p} \tag{6}$$

式中 γ_p——第 p 相的体积分数函数,p 取 1、2 分别表示液相和气相,$\gamma=0$ 表示网格内全部是空气,$\gamma=1$ 表示网格内充满液体,$0<\gamma<1$ 表示网格内是气液混合体

t——时间,s

u_f——流体速度,m/s

ρ——混合流体密度,kg/m³

P——流体单元网格所受压力,Pa

μ_f——流体黏度，Pa·s

μ_t——动力黏度，Pa·s

F_{p-f}——体积相互作用力与鱼体积之比，Pa

V——鱼体积，m^3

g——重力加速度，m/s^2

F_{f-p}——流体对单个鱼体施加的合力，N

由于流体在吸鱼管与集鱼箱的流动过程存在一定程度的旋流与低雷诺数流动，Re-normalization group $k-\varepsilon$（RNG $k-\varepsilon$）模型改善了模拟高应变流动的能力，能很好预测中等强度的旋流和低雷诺数流动[24]，因此采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型建立封闭的雷诺应力项方程求解湍流流动，具体方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\nabla(\rho u_f k)=\nabla\left(\frac{\mu_e}{\sigma_k}\nabla k\right)+G_k-\rho\varepsilon \tag{7}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\nabla(\rho u_f\varepsilon)=\nabla\left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}\nabla\varepsilon\right)+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{8}$$

式中　k——湍动能，J

μ_e——有效混合黏度，Pa·s

σ_k——k 方程湍流普朗特数

G_k——平均速度梯度引起的湍流动能产生项

ε——湍动能耗散率

σ_ε——ε 方程湍流普朗特数

$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$——修正常数

采用 ANSYS Fluent 软件对计算域内的流体流动进行数值模拟，具体求解过程如下：首先基于有限体积法将控制方程离散至计算域的网格单元，采用 SIMPLE/PISO 算法迭代求解式(3)～(6)。为准确模拟湍流效应，采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型封闭雷诺应力项，通过求解式(7)和式(8)实现湍流的计算。

3.2.2　离散元模型

离散元模型是求解复杂离散系统中动力学问题的一种数值方法，通过建立固体颗粒系统的参数化模型模拟颗粒行为。鱼在流场中的受力模型满足牛顿第二定律，即

$$m_p\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t}=F_{f-p}+F_g+\sum F_c \tag{9}$$

式中　m_p——鱼形颗粒质量，kg

u_p——鱼速度，m/s

F_g——重力和浮力之和，N，将鱼颗粒密度设为与水的密度相等，则 F_g 为零

F_c——鱼类颗粒群间撞击后产生的接触力，N

流场作用在鱼颗粒上的曳力、鱼类颗粒群间撞击后产生的接触力分别表示为

$$F_d=\frac{1}{2}C_d\rho A_p|u_p|u_p \tag{10}$$

$$\boldsymbol{F}_c=\boldsymbol{F}_{cn}+\boldsymbol{F}_{ct} \tag{11}$$

式中　C_d——阻力系数，由于鱼形颗粒形状不规则，采用 Haider 和 Levenspiel 阻力模型较为适合[25]

A_p——鱼形质心为与非球形粒子体积相同的球体的投影面积，m^2

$\boldsymbol{F}_{cn}$、$\boldsymbol{F}_{ct}$——鱼撞击后产生的法向作用力、切向作用力，N，采用文献[26－27]等提出的方法计算

采用 EDEM 对式(9)～(11)进行离散元仿真。离散元建模有两种，第 1 种方法利用外部网格软件生成的网格文件作为模板，通过颗粒生成软件自动创建目标颗粒，特别适用于多球面小体积颗粒模型的构建；第 2 种方法则通过调整球形颗粒的球形度，使其变形并组合成接近目标模型的颗粒群。由于鱼体模型具有复杂的几何形态和较大的尺寸特征，本文采用颗粒捏合方法建立鱼体外轮廓三维模型。基于深远海设施养殖大黄鱼尺寸（鱼体长约 40 cm，鱼高约为长度的 1/4），鉴于鱼形结构尺寸较大，若计算域模型网格划分过细，将导致 Fluent 与 EDEM 耦合仿真难以实现，因此同步缩小鱼形尺寸与网格尺度以保持两者的匹配性，鱼形颗粒模型体积约为实际鱼体的 1/2，据此，将半径为 0.01 m 的 57 颗球形颗粒捏合鱼体外轮廓仿真鱼体三维形状，模型为弹性体，如图 6 所示。鱼体颗粒物性参数设置如表 1 所示。

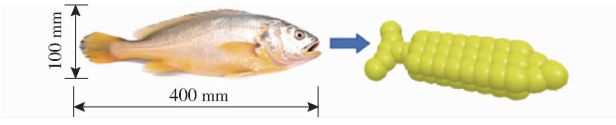

图 6　鱼形颗粒模型

Fig. 6　Discrete element model of fish body

表 1　鱼体颗粒物性参数

Tab. 1　Physical parameters of fish-shaped particles

参数	数值
泊松比	0.5
剪切模量/Pa	1×10^6
密度/(kg·m^{-3})	1×10^3
鱼与壁面的撞击恢复系数	0.6
静摩擦因数	0.5
滚动摩擦因数	0.01
鱼颗粒间的撞击恢复系数	0.52
静摩擦因数	0.65
滚动摩擦因数	0.02

3.2.3　多孔介质模型

多孔介质模型可以应用于通过充满介质的流动，通过滤纸、穿孔圆盘、流量分配器以及管道堆的流动等，其模拟方法是将流动区域中固体结构的作

用看作是附加在流体上的分布阻力[28]。本研究中鱼水混合物进入集鱼箱后,由于出水口拦鱼格栅的作用,鱼被拦在集鱼箱内,水不断引出,使鱼水混合比不断增大。根据拦鱼格栅性能,可将其简化为多孔介质模型,其几何主体初步简化为三维圆盘,盘径与出水管管径一致,为 200 mm,厚 10 mm,格栅上布满尺寸 30 mm×30 mm 的开孔,孔隙率为 0.75,渗透率为 1。

3.2.4 定解条件设置

在数值模拟之前,需要进行边界条件与初始条件参数设置。流体计算中进口为速度进口边界,出水口为速度出口边界,进出口流量一致,根据离心水泵流量 Q 设置,在 150 ~ 225 m^3/h;初始时刻,集鱼箱内高度 0.9 m 以下部分流道均为水相,水的体积分数为 100%,集鱼箱内高度 0.9 m 以上部分流道均为气相,空气的体积分数为 100%。流体收敛计算精度为 10^{-5},时间步长设置为 0.05 s,总计算步数为 6 000 步,鱼形颗粒时间步长设置为 0.000 5 s,每秒进入流场的鱼体模型 10 个,每 1 s 保存一次数据,总计算时长为 300 s。

4 结果与分析

4.1 液位与压力变化

图 7 为在流量为 150 m^3/h 条件下,集鱼装置轴平面上不同时刻的液相体积分数云图与对应时刻的吸鱼模型内鱼形颗粒(灰色)组合图,从 $t=0$ 到 $t=300$ s,随着鱼水不断进入,鱼数量不断增加,但集鱼箱的液位基本保持在同一高度,仅鱼水进口受到鱼水冲击处出现局部凹面液位。压力云图如图 8 所示,各时刻的轴面上压力均未出现明显波动,最低压力为 -37.5 kPa,最高压力为 -26.5 kPa,鱼在水环境中的最大压力变化不足 0.037 kPa/s,远低于常见鱼类损伤风险值 15 kPa/s[29]。在 300 s 内这段吸鱼

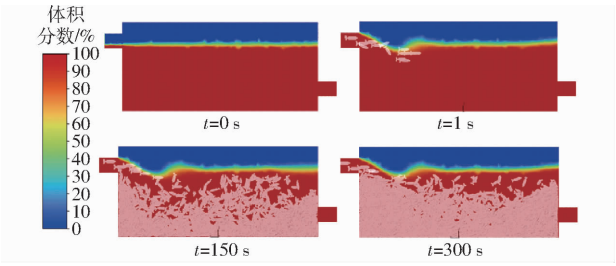

图 7 不同时刻液相体积分数云图(含鱼颗粒相)

Fig. 7 Contour plots of liquid phase volume fraction at different time instants (including fish particles)

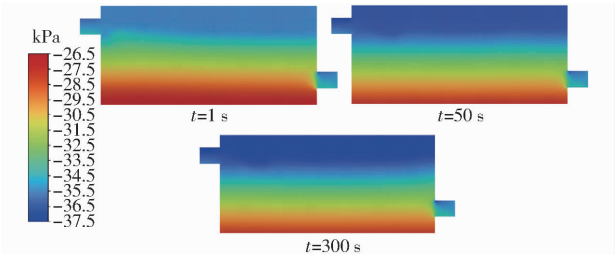

图 8 轴平面上不同时刻的压力云图

Fig. 8 Contour plots of pressure distribution on axial plane at different time instants

过程,空气段的负压与初始负压(-35 kPa)相比仅相差 2.5 kPa,说明工作压力变化不到 7%。数值仿真验证了本吸鱼装置原理的合理性。同时,对比当前深远海养殖用传统大型真空式吸鱼泵[17],其吸鱼压力波动范围在 -49.1 ~ 0 kPa 之间,单次连续吸排周期仅 38 s,本吸鱼装置能大幅减少压力波动,并能实现较长时间连续吸鱼,提高吸捕量的同时减少泵阀启动频率。

4.2 鱼的运动分布影响

图 9 为在离心水泵流量 Q 为 150 m^3/h 条件下,集鱼箱内鱼在不同时刻的数量与分布,随着鱼水不断进入,鱼数量不断增加,$t<150$ s 之前鱼沿进口至出水口形成密集鱼群,之后逐渐向集鱼箱四周分布,在 $t=300$ s 时,鱼水体积比从 0 上升到 0.4,

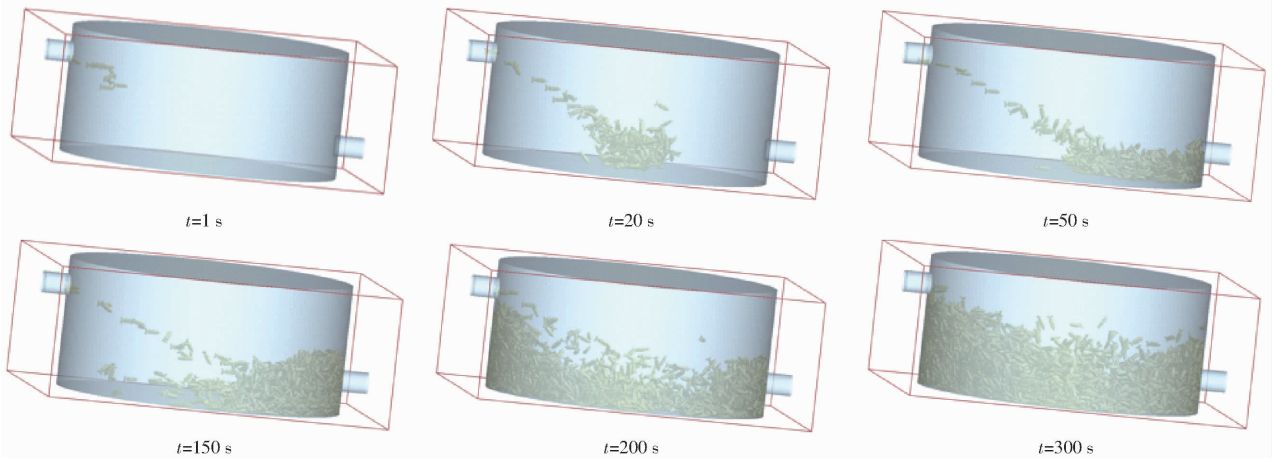

图 9 $Q=150$ m^3/h 条件下鱼的实时分布图

Fig. 9 Real-time distribution maps of fish under $Q=150$ m^3/h conditions

集鱼箱中含鱼体积为 1.43 m^3。为观察不同流量下鱼在集鱼箱的分布特征，在保持恒定进鱼量的前提下，通过调节进出口流速，图 10 为 225 m^3/h 流量条件下集鱼箱内鱼的典型时刻分布情况，与图 9 相比，在初始 $t<50$ s 阶段具有相似分布特征，由于鱼群受进口射流主导的惯性力作用，呈现明显的趋流性响应，鱼沿进口至出水口方向移动，大部分鱼集中于拦鱼格栅附近的 1.2 m 范围内，此时流量对分布特征影响小；随着时间推移，高流量下鱼逐渐向集鱼箱周围扩散更为明显，根据 $t=100$ s 时不同流量下的速度流线图（图 11）分析，随流量增大，流速分布范围显著扩大，流速随之增加，诱发明显的漩涡结构，流量为 225 m^3/h 条件下的集鱼箱内流速最高且流线最为密集复杂。在高流量环境下，鱼可能受到更强涡流影响，需更频繁调整游动方向以适应流场变化，更易于分散于集鱼箱内部不同位置，相比之下，低流量环境对鱼游动影响较小。

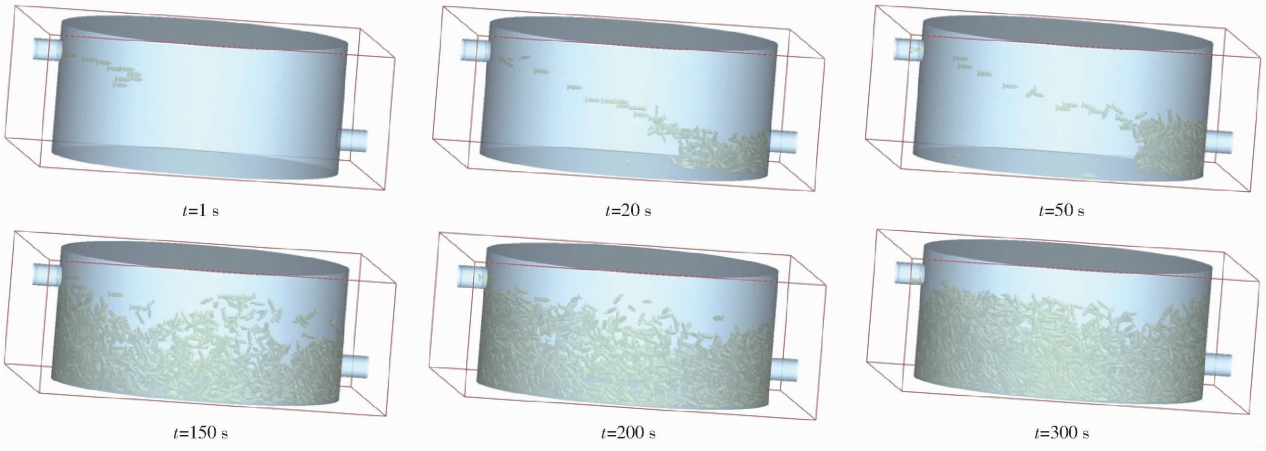

图 10　$Q=225$ m^3/h 条件下鱼的实时分布图

Fig. 10　Real-time distribution maps of fish under $Q=225$ m^3/h conditions

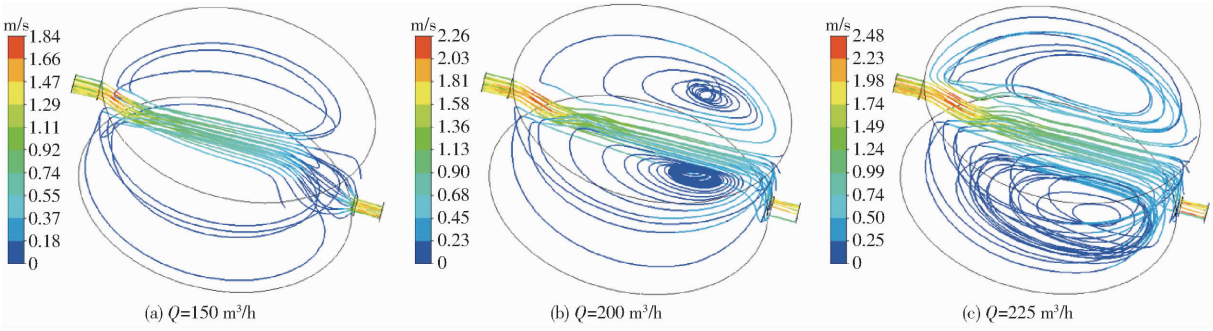

图 11　$t=100$ s 时不同流量下速度流线图

Fig. 11　Velocity streamlines at $t=100$ s at different flow rates

4.3　鱼在拦鱼格栅处堵塞预测

格栅通过物理拦截防止鱼逃逸到出水管，模拟数据如图 12 所示，在不同流量条件下，鱼群在拦鱼格栅处的聚集行为呈现显著差异，具体表现为：在流量为 150 m^3/h 条件下，$t<175$ s 时，拦鱼格栅处鱼颗粒数量相对稳定，大部分时间维持在 23 条左右，波动幅度较小，之后数量上升到 2 倍区间波动；在流量为 200 m^3/h 工况下，鱼的聚集数量波动显著增强，出现明显的峰值达 55 条；在流量为 225 m^3/h 时，鱼在拦鱼格栅处聚集数量呈非稳态波动，峰值高达 63 条，结合图 13 中显示的与拦鱼格栅接触数量占总接触数量比曲线分析，$t<50$ s，不同流量条件下与拦鱼格栅接触数量占比均出现峰值，225 m^3/h 流量下对应的最大占比达 32%，之后均逐渐趋于稳定，并保持在 5% 以内。据此可知，随着流量的进一步增加，拦鱼格栅处流速加大，会带来堵塞隐患或增加堵塞风险。在实际工程设计中需通过弧形格栅设计、扩

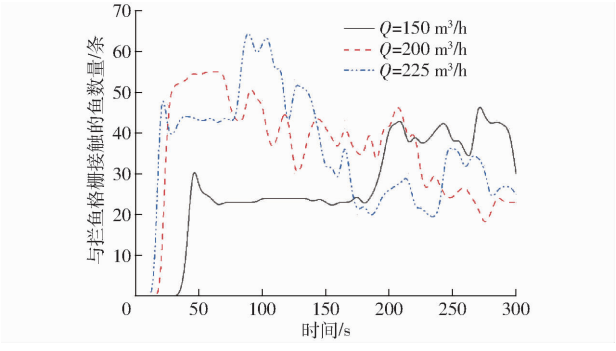

图 12　与拦鱼格栅接触的鱼数量变化曲线

Fig. 12　Variation in number of fish contacting fish barrier grid

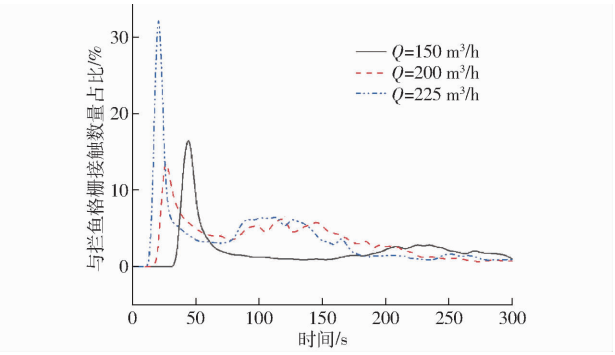

图 13 与拦鱼格栅接触数量占总接触数量比变化曲线

Fig. 13 Variation curves in proportion of fish contacting fish barrier grid relative to total contacts

大开口尺寸及增设导鱼通道优化拦鱼格栅结构以降低堵塞风险,减小出水口阻力。

5 结论

(1)设计了一种利用离心水泵形成稳定负压的大流量吸鱼系统,基于理想气体状态方程得出液位变化在集鱼箱容积总高度的 10.3% 以内就能形成适于吸鱼的压力。

(2)基于气-液-固三相流建立吸鱼过程三维瞬态模型,数值模拟显示:吸鱼过程液位保持基本恒定,压力波动范围控制在 -37.5 ~ -26.5 kPa 之间,最大压力变化速率 0.037 kPa/s,远低于鱼类损伤阈值,工作压力相对初始值(负压 -35 kPa)的变化不到 7%;集鱼箱内鱼群分布随着流量增大呈现显著差异:流量为 150 m^3/h 时鱼群初期沿进口至出水口密集分布,后期缓慢扩散;流量为 225 m^3/h 时高流量则因强涡流作用使鱼群更快分散至箱体四周,且流速越高扩散越明显;拦鱼格栅处的鱼群聚集行为随流量增加呈非线性变化:流量 150 m^3/h 时数量较稳定,流量 200 m^3/h 时波动加剧,接触数量峰值达 55 条,流量 225 m^3/h 时非稳态波动显著,与拦鱼格栅接触数量为 63 条,占总接触数量的 32%,说明流量升高会增加堵塞风险。

(3)相较于传统真空式吸鱼泵,开发的吸鱼装置实现了压力波动幅度降低至 2.5 kPa,大幅降低了鱼的损伤风险,连续吸鱼作业时间的加长降低了泵阀启动频率和能耗,表明本研究吸鱼装置在压力稳定、鱼类低损方面具有显著优势。

参 考 文 献

[1] 张文兵, 解绶启, 徐皓, 等. 我国水产业高质量发展战略研究[J]. 中国工程科学,2023,25(4):137 - 148.
ZHANG Wenbing, XIE Shouqi, XU Hao, et al. Research on the high-quality development strategy of China's aquatic industry [J]. Engineering Sciences, 2023,25(4):137 - 148. (in Chinese)

[2] 徐皓, 刘晃, 黄文超. 深远海设施养殖装备技术进展与展望[J]. 上海海洋大学学报,2023,32(5):893 - 902.
XU Hao, LIU Huang, HUANG Wenchao. Advances and outlook of offshore aquaculture equipment technology[J]. Journal of Shanghai Ocean University,2023,32(5): 893 - 902. (in Chinese)

[3] 徐皓, 崔铭超, 刘晃. 中国深远海养殖的技术经济分析[J]. 船舶工程,2024,46(5):I0035.
XU Hao, CUI Mingchao, LIU Huang. Aquaculture technical and economic analysis of China's deep-sea[J]. Ship Engineering, 2024,46(5):I0035. (in Chinese)

[4] LIU A D, ZHANG C L, ZHANG Y L, et al. Analysis of hydraulic characteristics of fluid multiplier fish pump based on CFD simulation[J]. Ocean Engineering,2023,272:113854.

[5] 陈晓龙, 田昌凤, 刘兴国, 等. 吸鱼泵的研究进展与发展建议[J]. 渔业现代化,2020,47(4):7 - 11.
CHEN Xiaolong, TIAN Changfeng, LIU Xingguo, et al. Research progress and development suggestions of fish pump[J]. Fishery Modernization,2020,47(4):7 - 11. (in Chinese)

[6] ESCH V B B. Fish injury and mortality during passage through pumping stations[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7):4006808.

[7] VAN ESCH B P, SPIERTS I L Y, TIERNEY K. Validation of a model to predict fish passage mortality in pumping stations[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2014,71(12):1910 - 1923.

[8] 邵奇, 李萌, 吴玉林, 等. 水力机械内鲤鱼草鱼的压力损伤模拟试验[J]. 工程热物理学报,2003, 24(6):954 - 957.
SHAO Qi, LI Meng, WU Yulin, et al. Simulating experiment on the damage of carp and grass carp caused by the pressure changing courses in hydraulic machinery[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2003, 24(6):954 - 957. (in Chinese)

[9] 林礼群, 董晓妮, 王志勇, 等. 基于 VOF 模型的真空吸鱼泵抽吸过程参数影响分析[J]. 中国农机化学报,2022, 43(12):39 - 43.
LIN Liqun, DONG Xiaoni, WANG Zhiyong, et al. Analysis on the influence of the pumping process parameters of the vacuum fish pump based on VOF model[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2022,43(12):39 - 43. (in Chinese)

[10] LONG X P, XU M S, WANG J, et al. An experimental study of cavitation damage on tissue of *Carassius auratus* in a jet fish pump[J]. Ocean Engineering,2019,174:43 - 50.

[11] XU M S, MOU J G, WU D H, et al. Probability evaluation of hydrodynamic shear damage for fish passing through jet fish pumps[J]. Fluid Mach. Syst.,2020,13(2):536 - 542.

[12] 刘平，焦尔，林礼群. 基于流体分析的不同蜗壳形式下吸鱼泵性能分析[J]. 船舶工程,2020，42(增刊 2):72 - 76.
LIU Ping，JIAO Er，LIN Liqun. Fluid analysis based for performance analysis of fish pump with different volute forms[J]. Ship Engineering,2020，42(Supp. 2):72 - 76. (in Chinese)

[13] 闫国琦，刘婷婷，莫嘉嗣，等. 内导叶滚筒式收鱼机设计与实验[J]. 农业机械学报,2019,50(11):129 - 135.
YAN Guoqi，LIU Tingting，MO Jiasi，et al. Design and experiment of internal guide drum machine fishing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(11):129 - 135. (in Chinese)

[14] XU M S,VANE ZENG G R，WU D Z，et al. Structural optimization of jet fish pump design based on a multi-objective genetic algorithm[J]. Energies，2022,15(11):1 - 16.

[15] HONG Yang，ZHU Ye，ZHANG Chenglin，et al. Hydrodynamic characteristic analysis and NSGA - Ⅱ optimization of a vacuum fish pump[J]. Journal of Marine Scienceand Engineering,2013,11(7):1361.

[16] PAN Q，ZHANG D S，SHI W D，et al. Fish damage assessment during the passage through traditional and fish-friendly axial-flow pumps with Lagrangian tracking approach[J]. Ocean Engineering,2022，253:1 - 11.

[17] 楚树坡，徐志强，张耀明，等. 工船养殖大黄鱼机械化起捕实船试验[J]. 中国渔业质量与标准,2022,12(6):15 - 20.
CHU Shupo，XU Zhiqiang，ZHANG Yaoming，et al. Mechanized catching experiment of *Larimichthys crocea* bred in the aquaculture vessel[J]. Chinese Fishery Quality and Standards,2022,12(6):15 - 20. (in Chinese)

[18] 刘瑞义. 筏式网箱养殖大黄鱼的围网瘦身提质试验[J]. 养殖与饲料,2021,20(10):27 - 30.

[19] ZHONG W Q，YU A B，LIU X J，et al. DEM/CFD - DEM Modelling of non-spherical particulate systems：theoretical developments and applications[J]. Powder Technology，2016,302:108 - 152.

[20] ZHOU M M，WANG S，KUANG S B，et al. CFD - DEM modelling of hydraulic conveying of solid particles in a vertical pipe [J]. Powder Technology,2019,354:893 - 905.

[21] SINGH R，ROMERO-GOMEZ P，COLOTELO A H，et al. Computational studies of hydraulic stressors for biological performance assessment in a hydropower plant with Kaplan turbine[J]. Renewable Energy,2022,199(Supp.):768 - 781.

[22] POWALLA D，HOERNER S，CLEYNEN O，et al. A numerical approach for active fish behaviour modelling with a view toward hydropower plant assessment[J]. Renewable Energy,2022,188(Supp.):957 - 966.

[23] DING Z Y，XU L F，GAO M，et al. Design and simulation analysis of vacuum fish suction pump[J]. Journal of Physics：Conference Series,2021，2113(1):012009.

[24] 胡坤，顾中浩，马海峰. CAE 分析大系 ANSYSCFD 疑难问题实例[M]. 北京：人民邮电出版社,2020:184.

[25] HAIDE A，LEVENSPIEL O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles[J]. Powder Technology,1989,58(1):63 - 70.

[26] PAN Q，ZOU W H，ZHANG D S，et al. Locomotion and strike damage of fish passing through a fish friendly tubular pump using computational fluid dynamics and discrete element coupling method[J]. Physics of Fluids,2024,36(8):087129.

[27] LIU Y L，YU X P. General formulation of drag force on assemblage of spherical particles in fluids：a critical review and a new empirical formula[J]. Physics of Fluids,2022,34(6):1 - 15.

[28] 由江帆，徐勇程，黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 2 版. 北京：清华大学出版社，2018:382 - 388.

[29] 李海锋，邵奇，吴玉林，等. 负压状态下压力变化导致鲫鱼身体组织的损伤[J]. 动物学报,2003,49(1):67 - 72.
LI Haifeng，SHAO Qi，WU Yulin，et al. Crucian (*Carassius auratus*) damage caused by pressure changes under subatmospheric conditions[J]. Acta Zoologica Sinica,2003,49(1):67 - 72. (in Chinese)