

混合结构型式船型网箱内外流场特性模拟

张 能¹, 周利兰², 王绍敏³, 胡聪聪¹

(1. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011; 2. 武汉理工大学, a. 高性能船舶技术教育部重点实验室, b. 船海与能源动力工程学院, 武汉 430063; 3. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部外渔业开发重点实验室, 广州 510300)

摘 要: [目的]为了探究来流速度和网衣密度对网箱阻力及网箱内外流场的影响, [方法]通过改变参数的大小来探究。以由板架、桁架及网衣组成的混合结构船型网箱为对象, 采用基于雷诺平均纳维-斯托克斯方程 (RANS) 方程的计算流体力学方法对不同网衣密度下网箱模型绕流场进行数值计算, 计算中网衣采用多孔介质模型模拟。[结果]在同一来流速度下, 随着网衣密度的增加, 网箱模型整体阻力降低, 内部平均流速减小。在较低网衣密度下, 网箱内部流速分布均匀; 在较高网衣密度下, 内部产生漩涡, 导致内部流速分布不均, 从而影响网箱整体阻力。[结论]研究结果为混合结构网箱安全性及其实际工程应用提供一定的理论基础。

关键词: 网衣密度; 多孔介质模型; 流场; 计算流体动力学; 数值计算

中图分类号: U661.32 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.06.06

Simulation on the Characteristics of Internal and External Flow Field of Ship-Shaped Cage with Truss and Plate Frame Hybrid Structure

ZHANG Neng¹, ZHOU Lilan², WANG Shaomin³, HU Congcong¹

(1. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China; 2. Wuhan University of Technology, a. Key Laboratory of High performance ship Technology of Ministry of Education, b. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan 430063, China; 3. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China)

Abstract: [Purpose] Exploring the influence of the incoming flow velocity and the solidity of the netting on the resistance of the cage and the internal and external flow filed of the cage. [Method] By varying the parameter values is carried out. A hybrid structure ship-shaped cage composed of plate frame, truss and nets is focused, a computational fluid dynamics (CFD) method based on the reynolds-averaged navier-stokes (RANS) equations is used to numerically calculate the flow field around the cage at different netting densities, where the netting is simulated using a porous media model. [Result] At the same incoming flow velocity, as the net solidity increases, the overall resistance of the cage decreases, and the average internal flow velocity reduces. At lower net solidity, the internal flow velocity distribution is uniform; at higher net solidity, vortices form inside, leading to uneven flow velocity distribution and consequently affecting the overall resistance of the cage. [Conclusion] The results provide a theoretical basis for the safety of the cage and their practical engineering applications.

Key words: net solidity; porous media model; flow field; computational fluid dynamics (CFD); numerical calculation

收稿日期: 2025-05-22; 修回日期: 2025-08-30

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金 (2024A1515010053); 海南自然科学基金 (No.323MS121); 中国水产科学研究院基本科研 (2023TD58)。

作者简介: 张能 (1997—), 男, 硕士、助理工程师。研究方向: 船舶与海工结构设计及强度分析。

0 引言

海洋养殖是获取优质蛋白的主要途径,也是推进我国“海洋强国”“一带一路”及“大食物观”实施的重要手段。近年来,由于近海养殖密度过高、水体质量差、污染严重以及沿岸环境质量下降等因素,生物病害频发、养殖品质下降;而把养殖业向深海发展,可寻找更优越的养殖环境以及高品质的水产品,深海养殖装备也应运而生。养殖装备内部的水体流动与生物生长密切相关,流速过大或过小都不利于生物存活或生长。网衣系统作为养殖装备的重要组成部分,不仅能够防止生物逃逸,还会影响养殖装备内部及周围的流场。因此,为优化养殖装备结构设计提供理论指导和优化措施,深入研究养殖装备内部及周边流场细节,从而明确网衣的作用机理,显得尤为必要。

目前,养殖装备内外流场的常见研究手段主要有数值计算和模型试验2类。在模型试验的流场监测领域,声学多普勒流速仪(Acoustic Doppler Velocimetry, ADV)和粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)是常用的方法。HARENDZA等^[1]采用PIV技术对圆形网箱周围流场进行试验研究,讨论了网衣倾斜度及透水率对其周围流场的影响。BOUHOUBEINY等^[2]基于PIV测试手段,对比研究刚性拖网和自由运动拖网的绕流场特征。崔勇等^[3]利用PIV和ADV试验技术研究不同流速下各类网箱周围流场分布情况,结果表明2种测试方法的实测数据具有良好一致性。综上,ADV和PIV技术用于测定养殖装备周围流场已经比较成熟,目前应用也比较广泛,但仍存在成本贵、测量范围有限、周期长等缺陷。

在数值计算方面,随着世界各国计算机技术的发展与理论方法深度融合,该方法逐渐变得高效可靠,现已在船舶及海洋工程领域得到广泛应用。BUI等^[4]应用多孔介质模型,对球形网箱内部流场进行了数值模拟,旨在分析单网箱及多种多网箱布置方案下的流场特性,结果表明4个网箱交错布置较方形布局更具优势。刘富祥等^[5]采用多孔介质模型模拟网衣,探讨了网衣对流速的影响及波长变化对网衣波浪力的影响。ZHAO等^[6]基于多孔介质模型对养殖装备内部及周围流场进行了研究,比较了模型在有网和无网2种状态下的内部及周围流场分布特征。BI等^[7]将多孔介质模型与网目群化数值方法相结合,对水流与网箱之间的流固耦合作用进行求解。刘春宏等^[8]基于多孔介质模型建立三维水动力模型,分别对仅网衣作用、仅鱼类作用和二者共同作用3种情况下的鱼类网箱周围流场进行模拟,并分析了网箱周围流场及尾流的特性。周利兰等^[9]采用基于雷诺平均纳维-斯托克斯方程(Reynolds-Averaged

Navier-Stokes equations, RANS)的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法,结合多孔介质模型模拟网衣,对无网、仅带侧网、带侧网及底网3种船型进行了数值模拟。

近年来,随着大型船型网箱的工程化应用,其水动力特性研究取得了显著进展^[10]。目前相关研究大多仅考虑网衣与流体单独作用,但在实际深海养殖过程中,需要靠刚性结构固定网衣从而维持养殖区域内部的容积,而针对此类流体、网衣和刚性壁面相互作用的结构物研究较少。因此,本文以桁架、板架及网衣组成的混合结构船型网箱为研究对象,首先采用多孔介质模型模拟平面网衣验证多孔介质模型的适用性;讨论不同网衣密实度下网箱内外流场分布情况,研究成果为混合结构网箱网衣密实度大小的选择提供参考,并为混合结构网箱安全性及其实际工程应用提供一定的理论基础。

1 数值方法

1.1 控制方程

本文采用RANS方法求解网箱内外流场,控制方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad i=1,2,3 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\bar{u}_i}{x_j} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right) \quad j=1,2,3 \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $\bar{u}_i$ 和 $\bar{u}_j$ 均为速度的分量; ρ 为液体的密度; t 为时间; x_i 和 x_j 为纵向坐标; $\bar{p}$ 为流体压力; μ 为流体动力黏性系数; $\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ 为雷诺应力项。

1.2 湍流模型

在求解上面控制方程组时,由于雷诺应力项的出现导致方程组不封闭,因此需要选取合适的湍流模型来封闭方程进行求解。在对网箱周围绕流场进行计算时,考虑到网衣两侧存在较强的压力梯度^[11],因此采用Realizable k - ε 湍流模型。该模型适用范围较广且对于强逆压力梯度流动问题有较好的应用表现^[11],其方程中的湍动能 k 和耗散率 ε 的运输方程分别为

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

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: u_t 为涡黏系数; G_k 为平均速度变化引起的湍流动能产生项; σ_k 和 σ_ϵ 为普朗特数; ν 为运动黏性系数; C_1 和 C_2 为经验常数。

1.3 多孔介质模型

混合结构船型网箱主要由桁架、板架以及网衣组成。在数值计算中, 由于网衣可以近似看成细小圆柱体, 导致建立网衣模型过程繁杂且在后续计算中会耗费大量成本, 因此本研究引入多孔介质模型, 通过设置适当的多孔参数来模拟网衣。在多孔区域内, 每单位长度理论压降 ΔP 可表示为

$$\Delta P/\lambda = -(P_i |\tau| + P_v) \tau \quad (5)$$

式中: λ 为多孔介质厚度即本文中网衣厚度; P_i 为惯性阻力系数; τ 为表面速度; P_v 为黏性阻力系数。

2 数值计算方法验证

2.1 数值模型

为了验证本文数值方法的可靠性, ZHAO等^[12]中的试验设置, 按照图1中试验布置形式建立数值模型, 设置相对应的测点, 共3层, 每层间距0.1 m。将数值模型分为流体域和多孔域2部分, 在数值计算中, 网衣厚度 $\lambda=50$ mm, 网衣密实度 $S_n=0.249$ 。设置入口为速度入口边界条件; 出口为压力出口边界条件; 侧面、底部及顶部均为无滑移壁面边界条件。

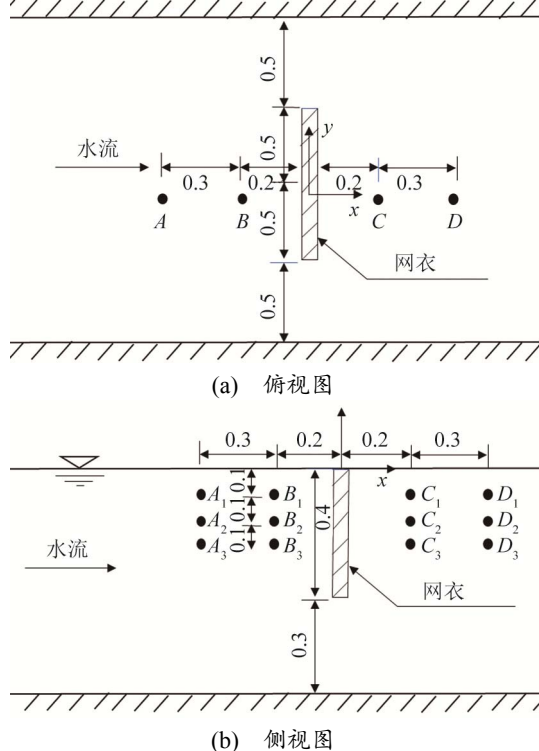


图1 试验布置及测点分布图(单位: m)

Fig. 1 Experimental Layout and Distribution Diagram of Measuring Points (Unit: m)

2.2 数值结果与试验结果对比验证

不同来流速度下平面网衣所受阻力的计算值和试验值对比见图2, 可知随着来流速度的增加, 平面网衣受到的阻力也随之增大, 计算值与试验值最大误差不超过5%。来流速度 $V=0.159$ m/s下的各测点流速的试验值与计算值对比见图3, 两者流速衰减趋势一致, 最大误差不超过6%, 验证数值方法的可行性。

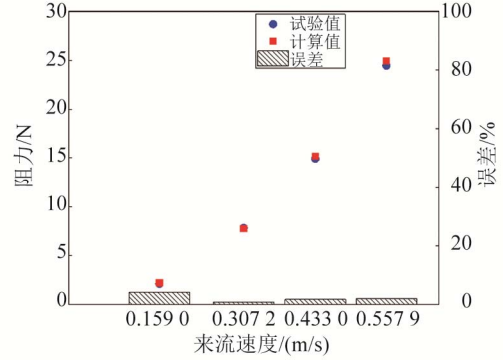


图2 不同来流速度下阻力试验值与计算值对比

Fig. 2 Comparison of Resistance Test Values and Calculated Values Under Different Inflow Velocities

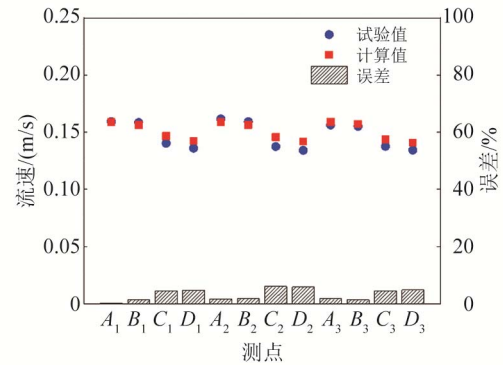


图3 计算值与试验值流速对比

Fig. 3 Comparison of Calculated and Experimental Flow Rates

3 网衣密实度对网箱内外流场影响

网衣密实度是衡量渔网透水性能的重要指标, 参照PATURSSON等^[13]本文选取3种不同密实度的网衣, 分别为 $S_n=0.13$ 、 $S_n=0.243$ 和 $S_n=0.317$ 。通过改变网衣密实度, 探讨其对网箱模型的阻力及其内外流场的影响。

3.1 混合结构网箱数值模型

混合结构网箱模型见图4, 由桁架、板架及网衣组成, 缩尺比为1.00:36.52, 网箱模型总长 $L_{oa}=2.5$ m, 型宽 $B=0.756$ m, 型深 $H=0.285$ m, 设计吃水 $T=0.178$ m。网衣包括侧网及底网, 网衣参数见表1。

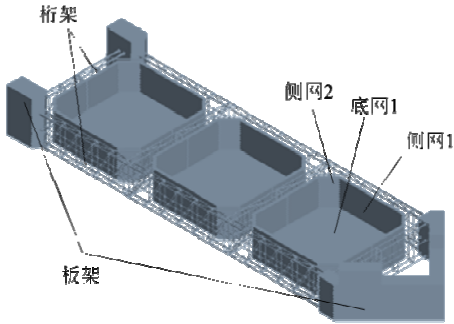


图 4 混合结构网箱模型

Fig. 4 Cage with Truss and Plate Frame Hybrid Structure Model

表 1 网衣参数

Tab. 1 Netting Parameters

组成	参数	数值
侧网1	长度 L_1/mm	425
	高度 H_1/mm	185
侧网2	长度 L_2/mm	92
	高度 H_2/mm	185
底网	长度 L_3/mm	425
	宽度 B_4/mm	425

3.2 网格收敛性分析

为讨论网衣密度对网箱绕流的影响，以不带网衣的混合结构网箱模型为研究对象进行网格收敛性分析，为后续网格方案的确定提供支撑。

3.2.1 计算域及边界条件

网箱计算域的大小及边界条件设置见图5。坐标原点位于网箱尾部浮箱吃水处，设置入口为速度入口边界条件、出口为压力出口边界条件。由于网箱为对称结构，因此将中纵剖面设置为对称平面来减少计算成本从而提高计算效率，船体距离顶部 $1.0L_{oa}$ ，距离底部 $2.0L_{oa}$ ，距离侧面 $1.5L_{oa}$ ，船艏浮箱距离出口和入口 $2.0L_{oa}$ 。

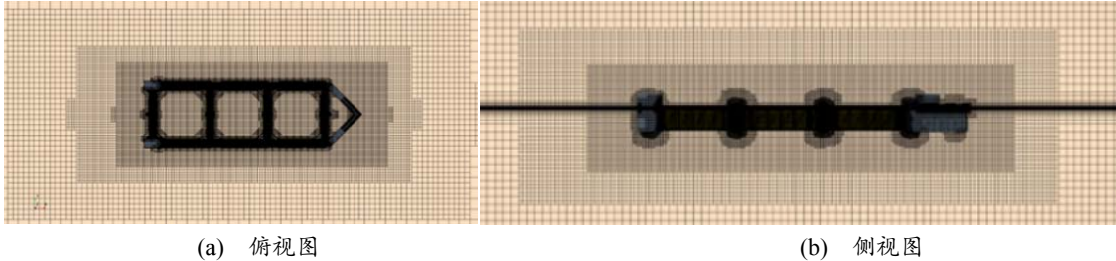


图 6 网箱网格划分

Fig. 6 Cage Mesh Division

3.3 密度对网箱总阻力影响与分析

为研究网衣密度对网箱的阻力及网箱绕流的影响，选取了5种不同的来流速度，具体工况见表

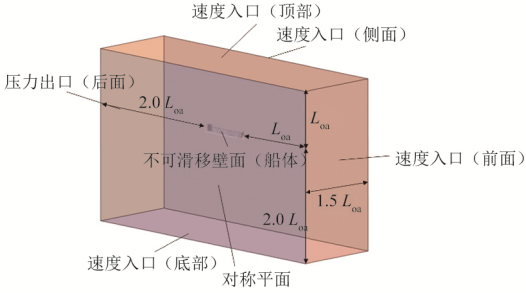


图 5 网箱计算域大小及边界条件设置

Fig. 5 Calculation Domain and Boundary Conditions for Cage

3.2.2 网格划分及分析

合理的网格划分能够在保证计算准确性的同时提高计算效率，由于本文的研究对象网箱与常规船舶结构上存在差异，桁架尺寸相对较小，因此在划分网格时基础尺寸选取 $L_{oa}/250$ ，参照杨茜等^[14]最终细化率取 $r_G=\sqrt[3]{2}$ 。网衣表面采用3层棱柱层网格过渡，从而捕捉边界层流动，得到3套网格方案，网格数量见表2，其给出了不同网格的基础尺寸及网格数量。

表 2 网格方案

Tab. 2 Grid Scheme

编号	网格密度	基础尺寸/m	网格数量
M1	低密度	0.008	$1\ 610\times 10^4$
M2	中密度	0.010	910×10^4
M3	高密度	0.013	524×10^4

时间步长 $\Delta t=0.03\text{ s}$ ，采用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭RANS方程，计算在实船来流速度 $V=1.5\text{ m/s}$ （模型速度 $V_m=0.248\ 2\text{ m/s}$ ）下3套网格方案的网箱总阻力。 S_{M1} 、 S_{M2} 、 S_{M3} 分别对应3套网格方案M1、M2和M3下的数值计算结果， $S_{M1}=3.77\text{ N}$ ， $S_{M2}=3.82\text{ N}$ ， $S_{M3}=3.72\text{ N}$ ，计算得到收敛因子 $R_M=-0.5$ ，呈现振荡收敛。考虑到计算精度和成本问题，在后续采用第2套网格方案进行数值计算，网箱网格划分见图6。

表3 计算工况

Tab. 3 Calculate Operating Conditions

编号	$V_s/(m/s)$	$V_m/(m/s)$
1	1.00	0.165
2	1.25	0.207
3	1.50	0.248
4	1.75	0.290
5	2.00	0.331

不同网衣密度下网箱模型阻力随来流速度的变化曲线见图7。表4为密度 $S_n=0.243$ 、 $S_n=0.317$ 相较于基准密度 $S_n=0.13$ 的网箱的增阻百分比, 增阻百分比为 $(0.243/0.317-0.13)/0.13 \times 100\%$ 。由图7和表4可知, 在来流速度较低时, 3个密度下网箱的总阻力比较接近; 随着来流速度的逐渐增加, 不同密度下网箱模型总阻力都呈现逐渐增加的趋势; 同时, 可以发现3种密度下网箱模型总阻力随着来流速度的增加三者差值更加明显, 在同一来流速度下, 网衣密度越大, 对应的网箱模型的阻力越小。

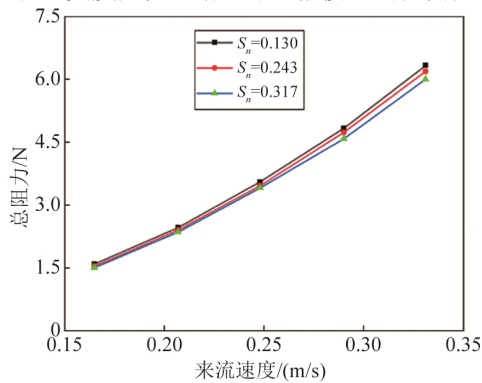


图7 不同网衣密度下混合结构网箱模型总阻力随来流速度的变化曲线

Fig. 7 Curve of Total Resistance of Cage with Truss and Plate Frame Hybrid Structure Model with Varying Inflow Velocity Under Different Netting Densities

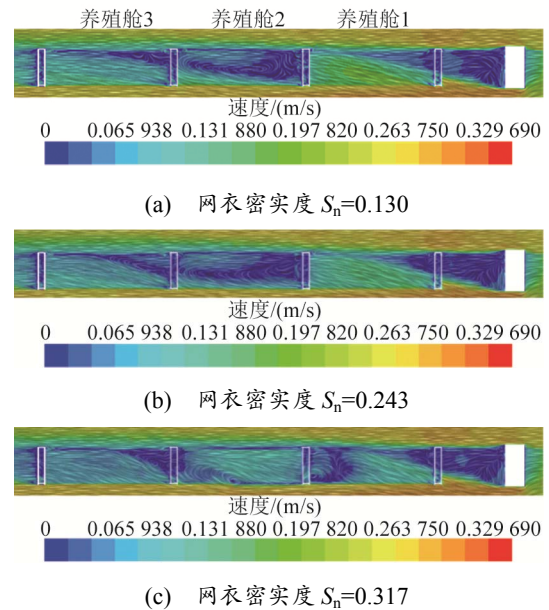
表4 不同网衣密度下网箱模型的增阻百分比

Tab. 4 Percentage Increase in Drag of Cage with Truss and Plate Frame Hybrid Structure Model Under Different Netting Densities

$V_m/(m/s)$	增阻百分比/%	
	$S_n=0.243$	$S_n=0.317$
0.165	-3.27	-5.53
0.207	-2.32	-4.43
0.248	-2.51	-4.08
0.290	-2.11	-5.75
0.331	-2.17	-3.97

3.4 网衣密度对网箱内外流场影响与分析

对应来流速度 $V_m=0.248 m/s$, $y=0 m$ 截面处3种不同网衣密度下中纵剖面速度矢量图见图8。从网箱船部到艏部3个养殖舱室分别命名为养殖舱1、养殖舱2和养殖舱3。当网衣密度从 $S_n=0.13$ 增加到 $S_n=0.243$ 时, 养殖舱3内部以及养殖舱1前面的三角区域低速区增大, 在其他区域内部流速无明显差别; 而网衣密度增加到 $S_n=0.317$ 时, 养殖舱1和养殖舱2内部的流速分布与另外2种密度下的流速分布相差较大, 在养殖舱1末端出现了低速区, 在此网衣密度下, 水流流经网箱内部发生流动分离并产生回流, 在养殖舱2和养殖舱3内部形成了旋涡。

图8 不同网衣密度下混合结构网箱中纵剖面处的速度矢量图 ($y=0$)Fig. 8 Velocity Vector Diagram at Longitudinal Section of Cage with Truss and Plate Frame Hybrid Structure Model Under Different Netting Solidities ($y=0$)

3种网衣密度下 $z=-0.1 m$ 截面处网箱模型的速度矢量图见图9。当网衣密度从 $S_n=0.13$ 增加到 $S_n=0.243$ 时, 养殖舱2内部低速区域增大, 产生局部堵塞, 可能会导致内部溶氧量不足, 影响鱼类的生活品质; 网衣密度增加到 $S_n=0.317$ 时, 在养殖舱2处低速区域消失, 网箱内部低速区域前移, 在养殖舱1处出现低速区, 且在养殖舱2内形成旋涡, 旋涡的出现会导致涡流损失; 在此网衣密度下养殖舱3整体流速相对较低, 在养殖舱1内的旋涡大小也随着密度的增大而逐渐减小。

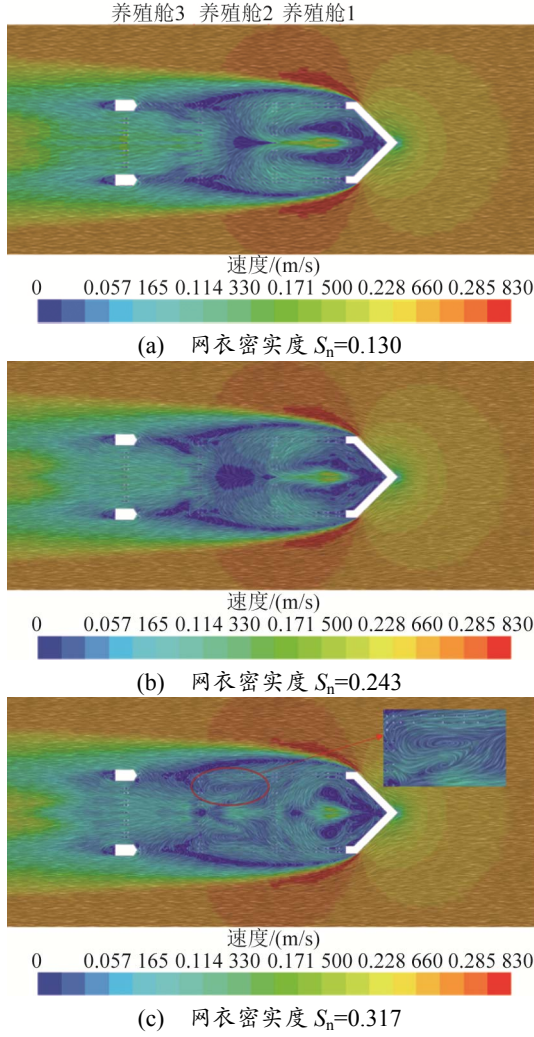


图9 $z=-0.1\text{ m}$ 截面处不同网衣密度下混合结构网箱的速度矢量图

Fig. 9 Velocity Vector Diagram at Longitudinal Section of Cage with Truss and Plate Frame Hybrid Structure model under Different Netting Solidities at the Cross-Section($z=-0.1\text{ m}$)

来流速度 $V_m=0.248\text{ m/s}$ 、 $z=-0.1\text{ m}$ 处3种网衣密度下网箱内外流速图见图10。密实度的增大导致网衣的孔隙面积减少，从而促进了养殖舱1和养殖舱3内的流速衰减，表现为网衣密度越大，内部流速越小；而在养殖舱2内出现不同的规律，表现为网衣密度 $S_n=0.317$ 内部流速最大，而网衣密度 $S_n=0.243$ 内部流速最小。主要原因在于网衣密度增加到 $S_n=0.317$ 时，阻塞效应明显，在养殖舱内形成旋涡，改变了舱内整体的流速分布，导致在此情况下养殖舱2内部流速较高。此外，可以看到随着流速与网箱距离的增加，下游流速逐渐恢复，恢复趋势表现为网衣密度 $S_n=0.13$ 流速最大，网衣密度 $S_n=0.317$ 流速最小。

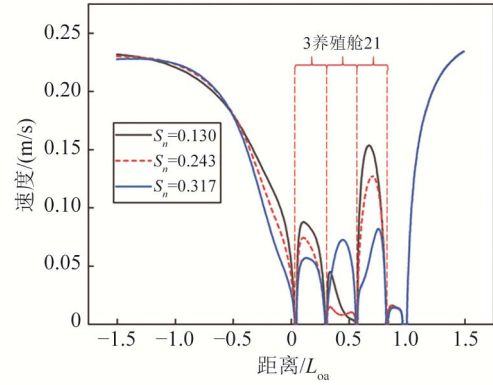


图10 $y=0\text{ m}$ 、 $z=-0.1\text{ m}$ 处3种网衣密度下混合结构网箱流速分布图

Fig. 10 Flow Velocity Distribution Map of Cage with Truss and Plate Frame Hybrid Structure Model Under Three Different Netting Solidities ($y=0\text{ m}$, $z=-0.1\text{ m}$)

为了进一步讨论网衣密度对网箱内部流场的影响，选取了2个截面位置，截面1和截面2与来流方向垂直，分别位于养殖舱2和养殖舱3网衣的末端，对比其对应截面下的质量流量。不同网衣密度下截面的质量流量见图11，在同一截面下，网衣密度越小，其质量流量越大；网衣密度越大，屏蔽效应越显著。

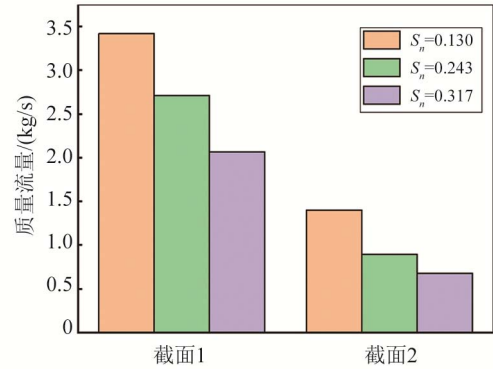


图11 不同网衣密度下载面的质量流量

Fig. 11 Mass Flow Rate of Cross-Sections Under Different Netting Solidities

4 结论

本文首先用多孔介质模型对网衣开展数值模拟，其次通过改变网衣密度，探讨其对混合结构船型网箱内外流场的影响，得出以下3点结论：

1) 平面网衣周围测点流速的计算值与试验值最大误差不超过6%，表明采用多孔介质模型模拟网衣具有较好的表现。

2) 网衣密度的大小会影响混合结构网箱模型的总阻力，在同一来流速度下，网箱整体阻力随网

衣密实度增大而减小。

3) 在相同的来流速度下, 网衣密实度越小, 网箱内部平均流速越大; 提高网衣密实度会在网箱内部形成更大范围的低速区域且产生旋涡, 影响网箱内部流速分布与整体阻力, 从而影响养殖鱼类的品质和养殖装备的安全。

参考文献:

- [1] HARENDZA A, VISSCHER J, GANSEL L, et al. PIV on Inclined Cylinder Shaped Fish Cages in a Current and the Resulting Flow Field[C]//Offshore Renewable Energy. 2008.
- [2] BOUHOUBEINY E, GERMAIN G, DRUAULT P. Time-Resolved PIV Investigations of the Flow Field Around Cod-End Net Structures[J]. Fisheries Research, 2011, 108(2-3): 344-355.
- [3] 崔勇, 关长涛, 赵侠, 等. 基于 PIV 技术的方形网箱二维流场分析[J]. 渔业科学进展, 2015, 36(5): 138-144.
CUI Y, GUAN C T, ZHAO X, et al. Analysis of Two-Dimension Flow Field of the Square Cage Based on Particle Image Velocimetry (PIV)[J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(5): 138-144.
- [4] BUI C M, HO T X, KHIEU L H. Numerical Study of a Flow Over and Through Offshore Fish Cages[J]. Ocean Engineering, 2020, 201: 107140.
- [5] 刘富祥, 孙国庆, 孙树政. 基于多孔介质模型的网衣对波流场影响的数值模拟研究[J]. 中国造船, 2022, 63(2): 172-180.
LIU F X, SUN G Q, SUN S Z. Numerical Simulation and Wave Flow Field Analysis of Nets Based on Porous Media Model[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(2): 172-180.
- [6] ZHAO Y P, LIU H F, BI C W, et al. Numerical Study on the Flow Field Inside and Around a Semi-Submersible Aquaculture Platform[J]. Applied Ocean Research, 2021, 115: 102824.
- [7] BI C W, ZHAO Y P, DONG G H, et al. A Numerical Analysis on the Hydrodynamic Characteristics of Net Cages Using Coupled Fluid-Structure Interaction Model[J]. Aquacultural Engineering, 2014, 59: 1-12.
- [8] 刘春宏, 刘长根, 董娇娇, 等. 基于多孔介质模型的养殖网箱周围流场特性研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(1): 176-185.
LIU C H, LIU C G, DONG J J, et al. Characteristics of Flow Field Around Fish Cages Based on the Porous Media Model[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(1): 176-185.
- [9] 周利兰, 张能, 王绍敏, 等. 网衣对混合结构养殖船内外流场影响的数值研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 49-55.
ZHOU L L, ZHANG N, WANG S M, et al. Numerical Study on the Flow Field Influence of Netting on the Inside and Around of Mariculture Ship with Hybrid Structure[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(4): 49-55.
- [10] 王飞芃, 张俊, 祝煜恒, 等. 船型养殖网箱水动力学研究与进展[J]. 船舶, 2025, 36(4): 27-36.
WANG F P, ZHANG J, ZHU Y H, et al. Research and Progress of Hydrodynamics of Ship-Shaped Aquaculture Cages[J]. Ship & Boat, 2025, 36(4): 27-36.
- [11] 周利兰, 张乐乐. 两栖车航行阻力特性的数值研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 133-142.
ZHOU L L, ZHANG L L. Numerical Study on Sailing Resistance Characteristics of Amphibious Vehicle[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(12): 133-142.
- [12] ZHAO Y P, BI C W, DONG G H, et al. Numerical Simulation of the Flow Around Fishing Plane Nets Using the Porous Media Model[J]. Ocean Engineering, 2013, 62: 25-37.
- [13] PATURSSON Ø, SWIFT M R, TSUKROV I, et al. Development of a Porous Media Model with Application to Flow Through and Around a Net Panel[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(2-3): 314-324.
- [14] 杨茜, 冯榆坤, 陈作钢, 等. 水深对喷水推进器内部流场的影响[J]. 船舶工程, 2025, 47(2): 63-72.
YANG Q, FENG Y K, CHEN Z G, et al. Effect of Water Depth on the Internal Flow Field of Waterjet Propulsion[J]. Ship Engineering, 2025, 47(2): 63-72.