



基于离散延迟涡方法的 PET 网片水动力特性

王志¹, 王刚^{2*}, 焦兆齐^{2,3}, 冯德军¹, 曲晓玉⁴, 桂福坤¹

(1. 浙江海洋大学, 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山 316022;

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;

3. 大连海洋大学航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023;

4. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: 为进一步揭示海上养殖设施中常见的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 网衣水动力特性规律, 本实验采用改进的延迟分离涡模拟 (IDDES) 方法研究其流场分布规律和水动力系数, 并进一步分析来流速度、来流攻角和密实度对网片水动力特性的影响。基于经典圆柱绕流算例, 湍流模型和数值解法的精度得以验证。结果显示, 19 个网目的速度场和水动力系数规律和大规格网衣相似; 网片阻力系数随来流速度增大逐渐减小, 目脚翼展两侧的局部加速效应减弱, 后方尾流得到充分发展; 网片阻力系数随密实度的增大缓慢增加, 目脚翼展两侧的局部加速效应和尾流交互作用增强。当密实度为 0.230 时, 目脚尾流在下游汇聚成一个较大的低流速区域; 阻力系数随网片逐渐垂直于来流方向不断增大, 升力系数呈先增大后减小的趋势, 目脚后方尾流衰减的区域和目脚间局部流场的交互作用不断增强。当攻角为 90° 时, 目脚间局部流场的交互作用最强, 目脚翼展两侧的局部加速效果最显著。研究表明, 密实度和攻角对 PET 网衣流场分布规律和水动力系数具有显著影响。本研究阐明了 PET 网衣周围速度场特性和水动力系数, 为进一步分析养殖设施内外的水体交换奠定基础。

关键词: PET 网衣; 改进的延迟分离涡模型 (IDDES); 流场分布; 尾流衰减; 水动力系数

中图分类号: S 969; TB 126

文献标志码: A

近年来, 近海环境污染和生态环境恶化, 导致养殖鱼类品质下降, 病害频发。此外, 中国近岸海水养殖面积约占近海海域养殖总面积的 40%^[1], 近海养殖接近其承载力极限。因此, 中国海水养殖从近岸走向深远海已是大势所趋^[2]。网衣系统是深远海养殖设施的关键结构, 占据整体面积的 70%, 具有维持养殖容积、防止养殖鱼类逃逸和敌害侵袭的作用^[3]。随着渔业材料技术的发展, 超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 纤维网衣、铜合金网衣、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 网衣已

成为深远海养殖装备的主流^[4]。其中 PET 网衣具有强度高、抗疲劳、不易生物附着等特点, 已成为典型的渔用高性能网衣, 目前已在生态海洋牧场平台“耕海 1 号”、深远海大型管桩围栏“蓝钻 1 号”(图 1) 等养殖装备上应用。

基于理论推导和模型实验方法, 众多学者针对各类网衣开展了大量研究。在纤维网衣方面, Løland^[5] 通过实验推导出网衣的水动力系数和衰减系数的经验公式, 但公式的预测精度和适用范围存在局限。Bi 等^[6] 利用粒子图像测速 (PIV) 技

收稿日期: 2024-07-19 修回日期: 2024-09-14

资助项目: 国家自然科学基金 (32303072, 32002441); 青岛市自然科学基金 (3-21-45-zyyd-jch); 中国博士后科学基金 (2022M723503); 第九届青托工程项目 (2023QNRC001); 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-47-22); 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目 (2023C02029)

第一作者: 王志 (照片), 从事养殖装备数值模拟研究, E-mail: wangzhi@zjou.edu.cn

通信作者: 王刚, 从事渔业设施工学研究, E-mail: wanggang@ysfri.ac.cn

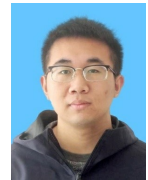




图 1 装配 PET 网衣的深远海养殖装备

(a) 耕海 1 号, (b) 蓝钻 1 号。

Fig. 1 Offshore aquaculture structures with PET nets

(a) Genghai 1, (b) Lanzuan 1.

术测定了聚乙烯 (PE) 和聚酰胺 (PA) 网衣的尾流衰减程度, 分析了攻角、密实度、网目形状、网片间距和数量对流速衰减的影响。唐浩^[7]研究了聚乙烯、尼龙和涤纶 3 种纤维材料的网片的水动力性能, 对比分析了水动力系数与雷诺数、密实度和攻角的关系。俞鸿源等^[8]设计研究了 PA 单丝网片的水动力变化规律, 并与 PA 复丝网片、UHMWPE 网片及 PE 绞捻网片的水动力特性进行对比分析。薄佳男等^[9]研究了 PE 编结网片在不同水流速度和不同倾角下的水动力性能, 阐明了网片的阻力系数与雷诺数和密实度等因素的关系。在金属网衣方面, Tsukrov 等^[10]和 Cha 等^[11]分别通过水槽实验和 PIV 技术研究了不同加工工艺以及不同攻角、流速和网衣结构对水动力系数的影响。在 PET 网衣方面, Casanova 等^[12]以及 Gansel 等^[13]利用数值模拟与物理实验研究了流速对网衣变形和整体抗弯刚度的影响。Wu 等^[14]提出用于预测 PET 网衣阻力系数和升力系数的水动力模型。此外, 徐俊杰^[15]重点研究了 PET 单丝力学性能和 PET 网衣的防生物附着效果。目前, 针对 PET 网衣水动力特性的研究较少, 网衣周围流场分布的关系尚未明晰, 阐明 PET 网衣周围流场分布规律, 进一步解释目脚局部流场交互作用机理, 可为进一步分析养殖设施内外的水体交换奠定基础。

近年来, 随着计算机算力的显著提高, 计算流体力学 (CFD) 方法已成为研究渔具与网箱水动力特性的重要手段。Zhao 等^[16]利用多孔介质方法建立三维数值模型来模拟网衣周围流场, 比较了不同倾角、网面高度、网衣间距下平面网衣的流场特性。Xu 等^[17]基于非稳态雷诺时均方法 (URANS), 阐述了由尾流和湍流特性所引起等效单股网衣和三股捻制网衣之间的阻力系数差异。Wang 等^[18]利用大涡模拟 (LES) 方法对比了光滑和捻制粗糙无结节网片的流场分布特性和湍流分布特性, 并提出一种基于面积平均方法的尾流速

度衰减模型。前人采用水槽试验等手段研究 PET 网片水动力特性主要聚焦网片的水动力系数, 并且大部分水槽实验无法获取 PET 网片中光滑和加捻目脚局部流场分布规律。其次, 受限于 RANS 方法对网片承受水动力系数的精确预测能力有限, 无法反映流体流经目脚后方的流场细节, 而基于 LES 方法的湍流模型则可以改善这一问题, 但会使计算量显著增加。

综上所述, 为进一步完善 PET 网衣水动力特性的相关研究, 本研究基于开源水动力工具 OpenFOAM, 采用改进的延迟分离涡模型 (IDDES)^[19]方法研究 PET 网片周围的流场特性和水动力系数, 利用经典的圆柱绕流算例验证湍流模型和求解方法的模拟精度, 并分析网目数量在水动力特性方面的收敛性。在此基础上阐明来流速度、来流攻角和网衣密实度对网片水动力特性的影响。

1 材料与方方法

1.1 研究对象

本研究以六边形 PET 网衣 (图 2) 为对象, 网目由 4 条单股光滑和 2 条双股捻制目脚构成, 在模型网衣中 l 为目脚的长度 (mm), d 为单股光滑目脚直径 (mm), d_t 为双股捻制目脚直径 (mm), A 为网目内径 (mm) (图 2-b)。本研究聚焦于 PET 网片网目周围流场特性和水动力系数, 忽略网目结构在水流条件下的变形。

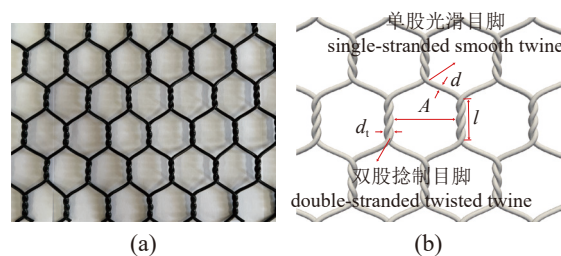


图 2 PET 网衣照片 (a) 与示意图 (b)

Fig. 2 Photo (a) and schematic diagram (b) of the PET net

作为重要的结构参数, 密实度 (S_n) 对网目周围流场具有显著影响, 而基于目脚直径 d 的雷诺数 (Re) 对其影响次之^[18]。 S_n 和 Re 定义:

$$S_n = \frac{A_{pro}}{A_{out}} \quad (1)$$

$$Re = \frac{U_0 d}{\nu} \quad (2)$$

式 (1) 中, A_{pro} 和 A_{out} 分别代表目脚的投影面积

(m²) 和网片外框面积 (m²)。式 (2) 中, U_0 表示来流速度 (m/s), ν 代表流体运动黏性系数 (m²/s), 15 °C 水流下取定值为 1.14×10^{-6} m²/s。此外, 考虑到 PET 网衣中存在三维捻制结构, 本研究使用 ImageJ 软件像素法分析 S_n , 这里参考 Photoshop 像素法在面积测算中的应用^[20]。本研究使用式 (3) 计算阻力系数的平均值 \bar{C}_d , 进一步分析 PET 网衣承载的阻力载荷。

$$\bar{C}_d = \frac{\bar{F}_d}{0.5\rho A_{\text{pro}} U_0^2} \quad (3)$$

式中, \bar{F}_d 表示时均阻力 (N), ρ 为流体密度 (kg/m³), 15 °C 水流下取定值为 999.1 kg/m³。与阻力载荷相似, 采用时均升力系数 \bar{C}_l 分析作用于结构的升力载荷, 其中 \bar{C}_l 的计算是取所有时间步 N 的瞬时升力的均方根, n 表示时间步 (s), F_{l_n} 表示瞬时升力 (N)。

$$\bar{C}_l = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^N F_{l_n}^2}}{0.5\rho A_{\text{pro}} U_0^2} \quad (4)$$

为研究圆柱结构局部压力场分布规律, 圆柱壁面周向压力系数的计算方法:

$$C_p = \frac{2(\bar{p} - p_\infty)}{\rho U_0^2} \quad (5)$$

式中, \bar{p} 为时均压力 (Pa), p_∞ 为计算域远场处的压力 (Pa)。攻角 θ 定义为网片所在平面与水流方向所成夹角 (°) (图 3)。

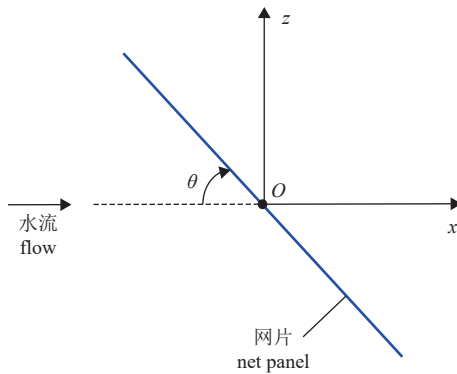


图 3 攻角定义

Fig. 3 Definition of angle of attack

1.2 数值计算方法

控制方程和湍流模型 对于不可压缩流体, 连续性方程和动量方程可以表示:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot \left[\nu (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) \right] + \vec{g} \quad (7)$$

式中, \vec{U} 表示速度矢量 (m/s), ∇p 和 ρ 分别表示黏性流体的压力梯度 (Pa/m) 和密度 (kg/m³), \vec{g} 表示重力矢量 (m/s²)。本研究采用改进的延迟分离涡模型 (IDDES) 进行模拟黏性流体在计算域内的分布^[19], 该方法结合了 RANS 和 LES 的优势, 即在流动分离区域采用 LES 的亚格子计算模型保证湍流的高解析度, 而在壁面附近和远场区域采用 RANS 方法避免了全局采用 LES 方法所引起的计算资源浪费。此外 IDDES 还结合了分离涡 (DDES) 方法和壁面化大涡模拟 (WMLES), 消除了网格引起的“灰度”问题和对数层不匹配问题^[21]。具体而言, IDDES 方法是将湍流动能 (k) 方程的 RANS 长度尺度替换为 IDDES 长度尺度求解, 并保持湍流比耗散 (ω) 方程不变。模型中 k 和 ω 的对流形式控制方程描述:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \rho \sqrt{k^3} / l_{\text{IDDES}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \omega) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega \frac{\nabla k \cdot \nabla \omega}{\omega} + \alpha \frac{\rho}{\mu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (9)$$

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 \cdot k}{\max(a_1 \cdot \omega, F_2 \cdot S)} \quad (10)$$

式 (9) 和 (10) 中, F_1 和 F_2 分别代表 SST 混合函数, 用于不同区域的湍流模型切换。

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (11)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{C_\mu \omega d_w}, \frac{500\nu}{d_w^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_\omega k}{C_{D_{k\omega}} d_w^2} \right] \quad (12)$$

$$C_{D_{k\omega}} = \max \left(2\rho \sigma_\omega \frac{\nabla k \cdot \nabla \omega}{\omega}, 10^{-10} \right) \quad (13)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (14)$$

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{C_\mu \omega d_w}, \frac{500\nu}{d_w^2 \omega} \right) \quad (15)$$

d_w 代表最近壁面的距离。式 (8) 中的湍流生成项 P_k 和 IDDES 长度尺度:

$$P_k = \min(\mu_t S^2, 10C_\mu \rho k \omega) \quad (16)$$

$$l_{\text{IDDES}} = \tilde{f}_d \cdot (1 + f_e) \cdot l_{\text{RANS}} + (1 - \tilde{f}_d) \cdot l_{\text{LES}} \quad (17)$$

式中, σ_k 、 σ_ω 和 $\sigma_{\omega 2}$ 是湍流 Prandtl 数, α 、 β 和 a_1 为模型常数, S 为应变率, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$, arg_1 和 arg_2 为用来定义混合函数的参数, 用于区分不同流动区域, C_μ 和 $CD_{k\omega}$ 为模型常数。这些方程和定义构成了 SST $k-\omega$ 湍流模型和 IDDES 模型的核心部分。上述方法因其在计算精度和计算效率方面的优异表现, 广泛应用于揭示黏性流体流经圆柱^[22]或网衣结构周围的流场分布规律^[23]。

边界条件与网格 在数值模拟中建立了三维笛卡尔右手坐标系, 其中 x 沿水流方向为正向, z 垂直于水平面上的流动方向且正向与重力加速度方向相反, y 垂直于 x 和 z 形成的平面 (图 4)。本研究取网片长度 L 为特征长度, 为消除壁面效应的影响, 计算域的宽度设置为 $3.66L$, 高度为 $2.44L$ ^[10], 考虑到计算域长度对计算量有显著影响, 根据前期预实验结果, 长度设置为 0.500 m , 保证在高流速 (1.00 m/s) 下尾流充分发展且捕捉到复杂的流动特征, 网片位于左侧边界 0.125 m 处。 U_0 方向垂直于左侧速度入口, 同时右侧出口处设置零梯度、零压力条件。域中的侧面边界、顶面为对称边界条件, 使得流体速度的法向分量设置为 0 , 同时所有变量的法向梯度均为 0 , 一方面消除了计算域边界的影响, 另一方面提高计算效率。此外, 本研究将网片的流固交界面设置为无滑移边界条件。

本研究采用 blockMesh 和 SnappyHexMesh 生成非结构化网格, 在网片周围区域和后方区域对网格进行了 3 次加密 (图 5-a), 每个加密区的网格密度为外侧密度的 1 倍, 用以精细捕捉网片后方的湍流变化。为进一步捕捉流体自结构表面分离现象, 近壁面布设六面体贴体网格。为了确保计

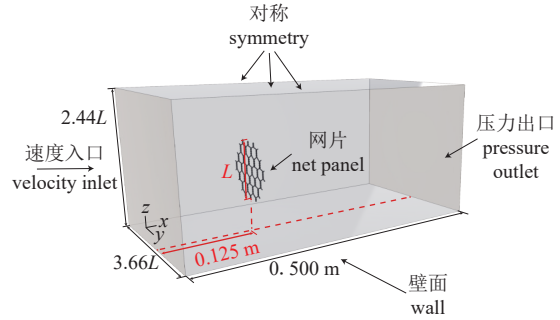


图 4 计算域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the computational domain

算结果的精度, 本研究设置了 3 组不同网格尺寸的工况来验证网格收敛性 (表 1), 随着背景网格的加密, 工况 M2 与 M3 之间的相对误差仅为 1.2%, 表明网片阻力系数趋于收敛, 因此 M2 网格尺寸足以模拟网片水动力特性。工况 M2 整个计算域网格单元数量为 3 499 万个, 网格整体情况和近壁面贴体网格情况如图 5 所示。

求解算法 本研究计算采用了 OpenFOAM v1806 软件中压力-速度解耦算法求解器 pisoFoam 完成。式 (2) 中的时间项采用通过后向隐式方案离散, 而扩散项的离散则通过二阶中心差分完成, 以此保证计算的稳定性。对流项使用二阶 Linear-Upwind Stabilised Transport (LUST) 算法进行离散。计算采用自适应步长策略, 将库朗数设置为 0.1, 以提高计算稳定性、保证流场中涡结构的求解精度。

1.3 工况设置

网目是组成网片的基本单元, 而单个网目或多个网目水动力规律是否和大规格网衣具有相似

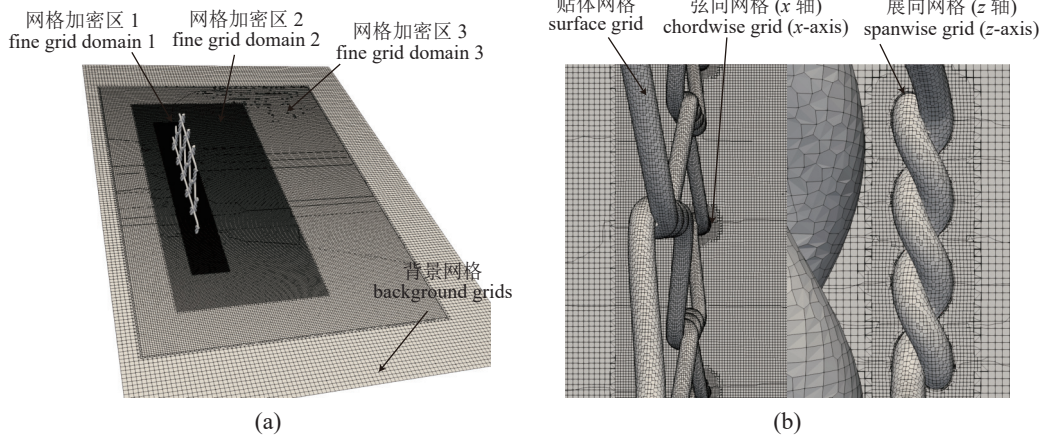


图 5 计算域网格 (a) 和目脚周围的网格 (b)

Fig. 5 The grids of the computational domain (a) and the near-field region around twines (b)

表 1 不同网格尺寸工况的阻力系数对比

Tab. 1 Comparisons of drag coefficients for the cases with varying grid sizes

工况 case	背景网格/个 background grids	网格数量/10 ⁴ 个 grid no.	阻力系数 drag coefficient	阻力系数的组间增长率/% inter-group growth rate of drag coefficient
M1	64×64×97	1 014	0.925	—
M2	97×97×148	3 499	0.961	3.9
M3	112×112×170	5 240	0.973	1.2

注：“—”表示无数据。
Notes: "—" indicates no data.

性, 仍需开展对比和分析。首先, 本研究设置 4 组工况 (工况 A1~A4, 图 6) 开展网目数量在水动力特性方面的收敛性分析, 重点研究 U_0 、 S_n 和 θ 变化对网目周围流场特性的影响, 设置数值模拟工况如表 2 所示。其中工况 B1~B5 用来分析 U_0

对流场分布的影响, 取海水养殖环境中平静至极端海况下的 $U_0=0.100、0.325、0.550、0.775$ 和 1.000 m/s。工况 C1~C4 为保持 d 不变, 控制 l 使 S_n 范围处于 $0.116\sim 0.230$, 作为网衣系统中最重要的结构参数之一, 长周期养殖作业环境下网衣系

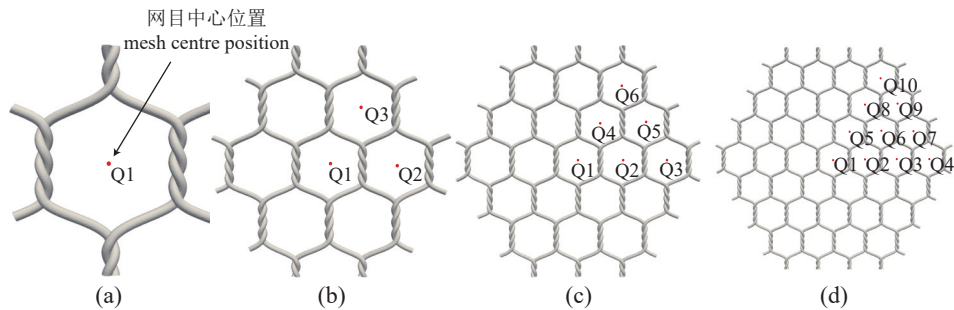


图 6 不同网目数量的网片模型

(a) 1 网目, (b) 7 网目, (c) 19 网目, (d) 37 网目; 图 10 同。

Fig. 6 Net panel models with varying net-mesh numbers

(a) 1 net-mesh, (b) 7 net-mesh, (c) 19 net-mesh, (d) 37 net-mesh; the same as Fig.10.

表 2 数值模拟工况

Tab. 2 Cases of numerical simulation

工况 case	网目数量/个 net-mesh no.	攻角/(°) angle of attack	目脚直径/mm twine diameter	目脚长度/mm twine length	流速/(m/s) velocity	密实度 solidity	雷诺数 Reynolds no.	网格数量/10 ⁴ 个 grid no.
A1	1	90	3	23.09	0.500	0.173	1 485.15	381
A2	7	90	3	23.09	0.500	0.173	1 485.15	1 539
A3	19	90	3	23.09	0.500	0.173	1 485.15	3 499
A4	37	90	3	23.09	0.500	0.173	1 485.15	6 191
B1	19	90	3	23.09	0.100	0.173	297.03	3 499
B2	19	90	3	23.09	0.325	0.173	965.35	3 499
B3	19	90	3	23.09	0.550	0.173	1 633.66	3 499
B4	19	90	3	23.09	0.775	0.173	2 242.57	3 499
B5	19	90	3	23.09	1.000	0.173	2 970.30	3 499
C1	19	90	3	17.32	0.500	0.230	1 485.15	2 013
C2	19	90	3	23.09	0.500	0.173	1 485.15	3 499
C3	19	90	3	28.87	0.500	0.139	1 485.15	5 445
C4	19	90	3	34.64	0.500	0.116	1 485.15	7 786
D1	19	0	3	23.09	0.500	0.173	1 485.15	3 189
D2	19	22.5	3	23.09	0.500	0.173	1 485.15	4 852
D3	19	45	3	23.09	0.500	0.173	1 485.15	5 309
D4	19	67.5	3	23.09	0.500	0.173	1 485.15	5 107
D5	19	90	3	23.09	0.500	0.173	1 485.15	3 499

统生物附着问题将引起 S_n 的显著变化, 因此有必要研究 S_n 对网片水力特性的影响。在深远海养殖设施设计中, 网衣系统需围绕钢桁架张拉成一定形状, 且不断受到波流方向变化的影响, 相比于其他影响因素, θ 对于网片周围流场规律具有显著影响, 并且相比于改变 S_n 所引起的影响更为明显^[24], 因此设置工况 D1~D5 使 θ 范围处于 $0^\circ\sim 90^\circ$, 研究 θ 对其水力特性的影响。

2 结果

2.1 数值方法精度验证

本研究采用亚临界雷诺数 Re 下光滑圆柱绕流案例来验证 IDDES 方法和求解算法的精度。随着 Re 的增大, 圆柱结构近壁面流场发生层流向湍流态的转换, 以目脚直径为特征长度的网衣 Re 同样处于此区间, 本研究开展在亚临界 $Re=500$ 、 $1\ 000$ 、 $3\ 900$ 下的光滑圆柱绕流模拟。计算域尺度为 $20D\times 20D\times \pi D$, 圆柱直径 $D=12\text{ mm}$, 圆柱体的中心位于入口 $x/D=5$ 处, 以上工况设置与 Parnaudeau 等^[25] 的实验设置保持一致 (图 7)。改进后的离散延迟涡 (IDDES) 模型的 \bar{C}_d 随 Re 增大呈现出减小趋势, 与实验测定结果^[26-28] 相对误差维持在 10% 以内 (图 8), 预测精度优于采用其他数值方法的计算结果^[29], 进一步验证了 IDDES 方法的预测精度, 体现其在圆柱绕流问题中的准确度和可靠性。

本实验提取了光滑圆柱在 $Re=3\ 900$ 时圆柱后方尾流 $x/D=1.54$ 处无量纲顺向平均速度的模拟结果, 并与前人发表的实验结果进行比较 (图 9)。结果显示, 除 Parnaudeau 等^[25] 的 PIV 实验结果外, 使用其他湍流模型的数值方法^[25, 30-31] 计算的结果随 y/D 的变化规律保持一致, 且相对误差在 10%

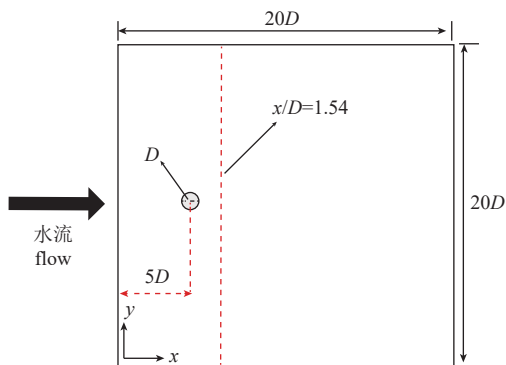


图 7 圆柱绕流示意图

Fig. 7 Schematic diagram of flow around a circular cylinder

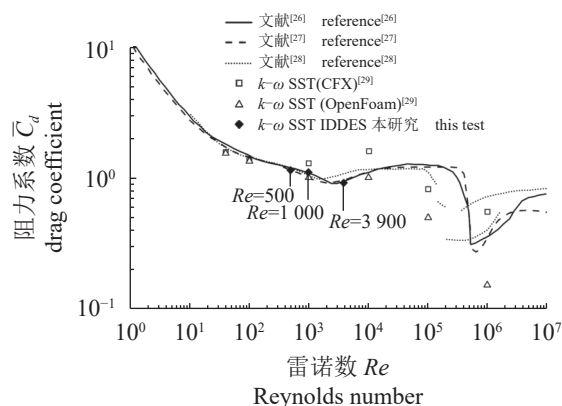


图 8 圆柱绕流中时均阻力系数与雷诺数关系

Fig. 8 Time-averaged drag coefficient versus Reynolds number for flow around a circular cylinder

以内, 验证了 IDDES 模型对速度场的预测精度。图 9-b 为不同湍流模型或方法对比圆柱壁面周向压力系数 C_p 的分布。本研究计算的 C_p 分布曲线与 Smagorinsky 模型^[22] 和 Wang 等^[23] 的模拟结果最大误差维持在 9% 以内, 与 Lourenco 等^[32] 的实验结果相对误差最大仅为 15%, 验证了 IDDES 方法对于圆柱壁面周围压力场的模拟精度。

2.2 网目数量收敛性分析

在考虑计算成本的基础上, 本实验利用 4 种网目数量网片模型 (工况 A1~A4) 来分析网目数量对网片水力特性的影响, 确保有限数量网目的水力规律和大规格网衣相近。工况 A1~A4 保证 Re 和 S_n 一致, 且垂直于来流方向。 \bar{C}_d 随着网目数量的增加逐渐由 0.905 收敛至 0.985 附近, 而 19 网目与 37 网目的相对误差也缩小为 2.5% (表 3)。说明水力系数随着网目数量增加趋于稳定。图 10 为不同网目数量工况中计算域中垂面 ($z=0$) 的流场分布情况。由于网片的阻流作用, 目脚前后均出现了流速衰减现象, 目脚翼展两侧出现局部加速效应, 该现象与 Bi 等^[33] 利用 URANS 方法观测的网目绕流结果基本保持一致。从定性角度分析, 目脚翼展两侧的局部加速效应和尾流衰减程度随着网目数量的增多无明显差异, 但需进一步开展定量分析加以验证。

结合 PET 网目结构特性和流场分布的结果, 本实验选取了目脚交叉位置 P1、双股捻制目脚中心位置 P2 (图 11-b) 和不同位置网目中心 Q1~Q10 (图 6), 以此捕捉流经网目结构前后的流速变化规律。取样线沿流向 (x 正向) 布设, 自计算域左侧入流开始, 且通过的距离均以计算域长度做无量

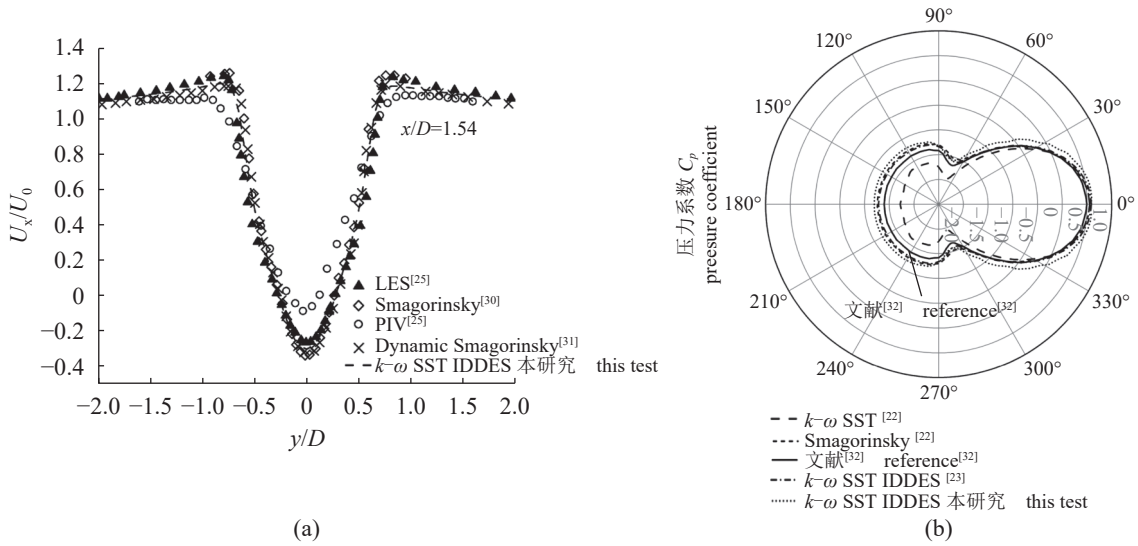


图 9 雷诺数 3 900 时圆柱后方 $x/D=1.54$ 处无量纲顺向平均速度 (a) 和圆柱周向压力系数 (b)
 Fig. 9 The non-dimensional mean streamwise velocity at $x/D=1.54$ behind the circular cylinder (a) and pressure coefficient around the circular cylinder (b) when $Re=3\ 900$

表 3 不同网目数量工况的阻力系数对比

Tab. 3 Comparisons of drag coefficients for the cases with varying net-mesh numbers

工况 case	网目数量/个 mesh no.	雷诺数 Reynolds no.	密实度 solidity	阻力系数 drag coefficient	阻力系数的组间增长率/% inter-group growth rate of drag coefficient	网格数量/ 10^4 个 grid no.
A1	1	1 485.15	0.173	0.905	—	381
A2	7	1 485.15	0.173	0.933	3.1	1 539
A3	19	1 485.15	0.173	0.961	3.0	3 499
A4	37	1 485.15	0.173	0.985	2.5	6 191

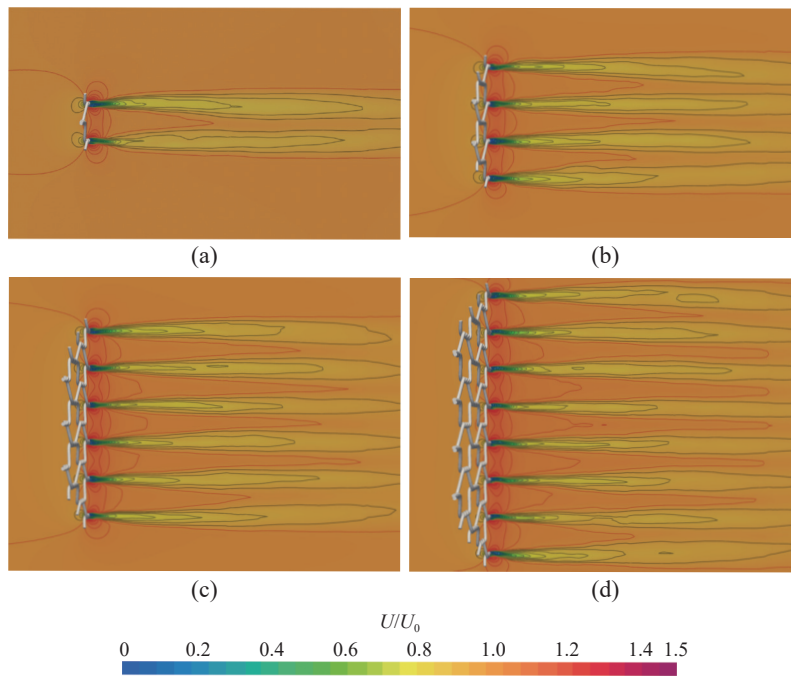


图 10 不同网目数量下的时均流场分布

Fig. 10 Mean flow fields with varying net-mesh numbers

纲化处理。图 11 为沿 P1 和 P2 的无量纲平均速度随网目数量的变化规律, 由图可知流速在流经 P1 和 P2 时迅速下降, 而后随着无量纲距离增加迅速增大。在水流流经网片后, P1 和 P2 处的流速分别在无量纲距离 0.6 和 1.0 处趋于稳定, 且均稳定

在 0.95 附近。尽管 7 网目工况 P1 和 P2 处的整体流速变化趋势与 19 网目和 37 网目结果相近, 但网片后方局部区域 (无量纲距离 0.3~0.4 处) 的速度幅值差异显著, 相对差异最大可达 10%。

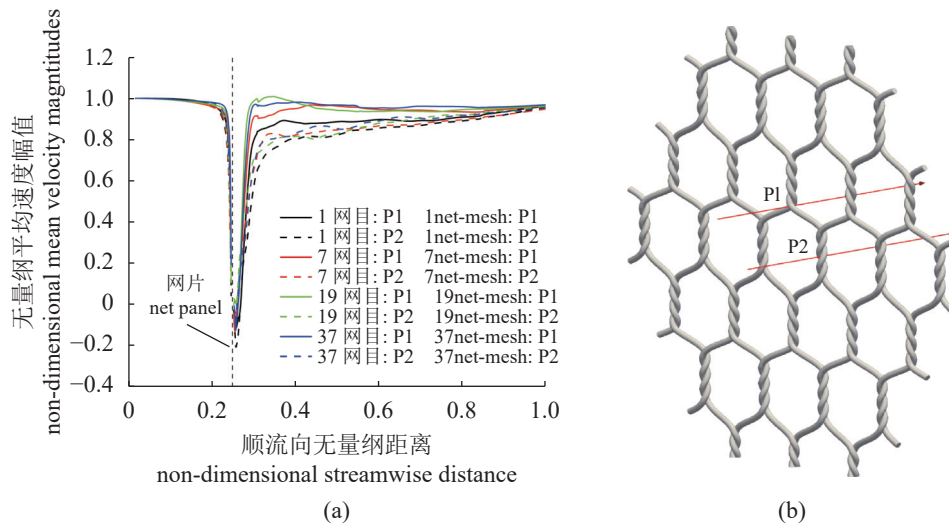


图 11 在不同网目数量下, 沿着 P1 和 P2 的无量纲平均速度幅值

Fig. 11 Non-dimensional mean velocity magnitude along the P1 and P2 with varying net-mesh numbers

沿 Q1~Q10 的无量纲平均速度随网目数量的变化规律显示, 水流流速在流经网片前呈现出小幅度衰减, 在流经网片时迅速增大, 而后出现 2 次不同程度的衰减, 且无法恢复至初始速度 (图 12)。工况 A1~A4 下 Q1 无量纲平均速度幅值的最大值分别为 U_0 的 1.08、1.12、1.14 和 1.15 倍, 再次印证 19 网目和 37 网目速度场规律相似性。综上所述, 基于 \bar{C}_d 和图 11、图 12 的流速分布规

律, 在保证计算精度的前提下, 19 网目相比于 37 网目整体网格单元数量减少了 80%。因此, 后面将采用 19 网目进一步开展网片水动力特性研究。

3 讨论

3.1 来流流速对网片水动力特性的影响

本实验以垂直于来流方向的网片为研究对象,

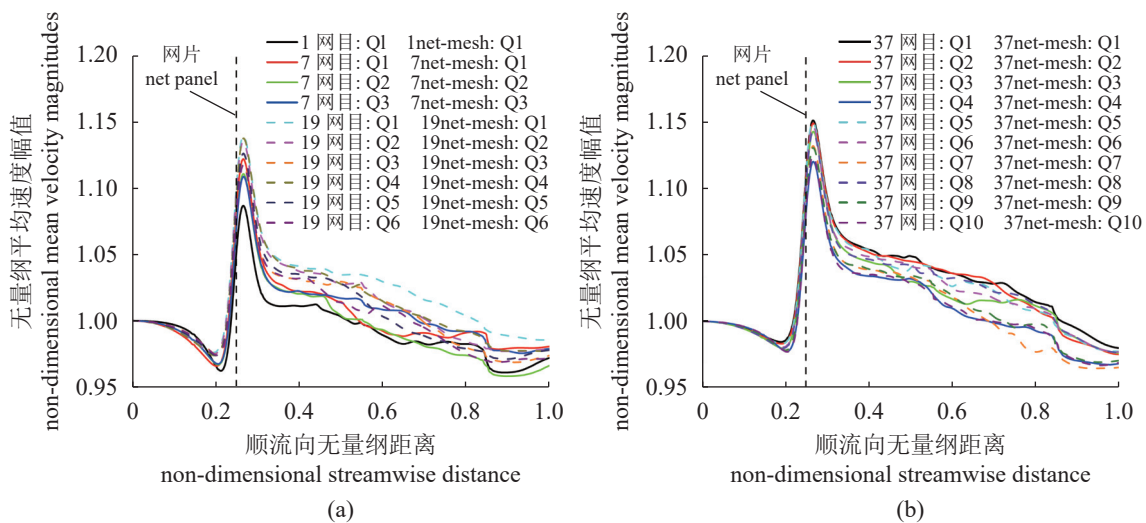


图 12 在不同网目数量下, 沿着 Q1~Q10 的无量纲平均速度幅值

Fig. 12 Non-dimensional mean velocity magnitude along the Q1-Q10 with varying net-mesh numbers

研究 U_0 对网片水动力特性的影响, 实验工况为 B1~B5。网片 \bar{C}_d 随流速增大逐渐减小, B5 工况比 B1 工况减小 18.2%, 这一趋势符合类圆柱结构的 \bar{C}_d 与 Re 的变化规律 (图 13)。图 14 为 5 组流速下计算域中垂面 ($z=0$) 流场分布情况, U_0 对网片网目周围流场的分布影响十分显著。在 $U_0=0.100$ m/s ($Re=297.03$) 时目脚翼展两侧的局部加速效应十分显著, 而目脚后方的尾流发展并不稳定。但随 Re 增大, 目脚翼展两侧的局部加速效应减弱, 目脚后方的尾流具有进一步向下游方向延伸的趋势, 说明后方尾流发展更加充分。

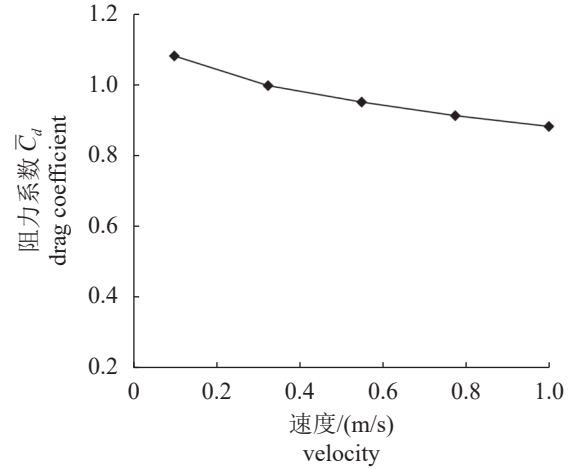


图 13 不同来流流速下的阻力系数

Fig. 13 Drag coefficient with varying incoming flow velocities

3.2 密度对网片水动力特性的影响

通过保持 $d=3.00$ mm 和 $U_0=0.5$ m/s 不变, 调

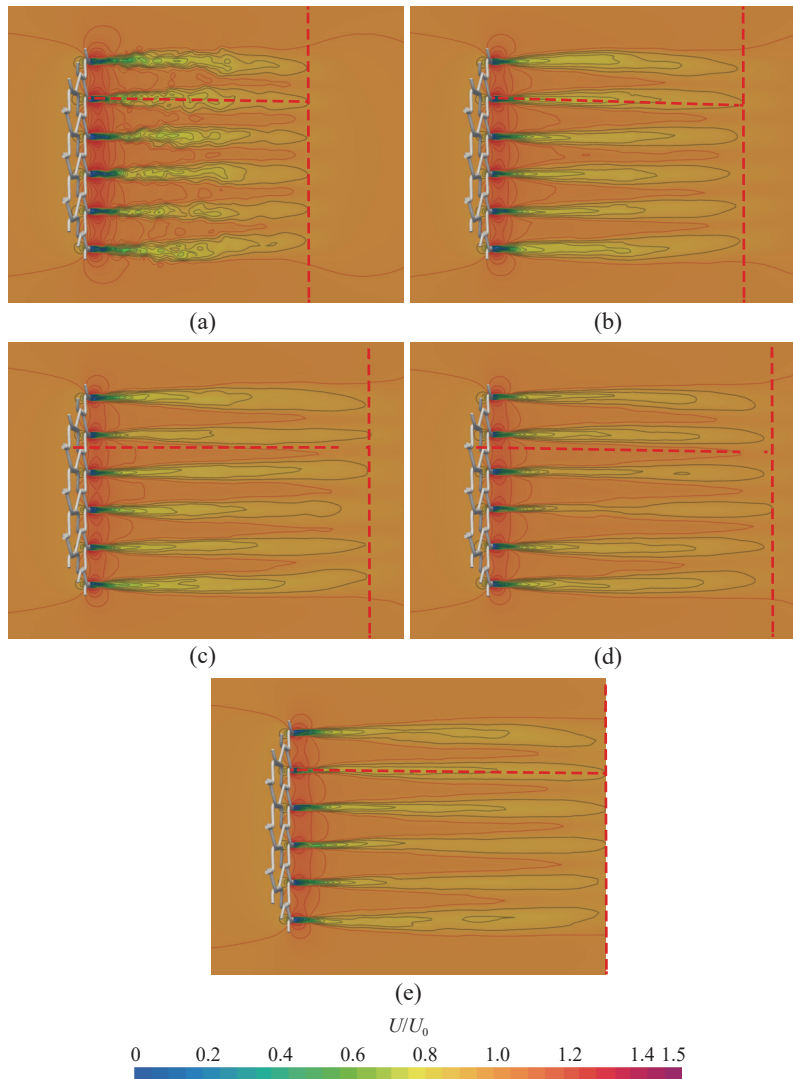


图 14 不同来流流速下的时均流场分布

Fig. 14 Mean flow fields with varying incoming flow velocities

(a) $U=0.100$ m/s, $Re=297.03$, (b) $U=0.325$ m/s, $Re=965.35$, (c) $U=0.55$ m/s, $Re=1\ 633.66$, (d) $U=0.775$ m/s, $Re=2\ 242.57$, (e) $U=1.000$ m/s, $Re=2\ 970.30$.

整 l (17.32~34.64 mm) 控制 S_n 在 0.116~0.230 范围变化, 实验工况为 C1~C4。网片 \bar{C}_d 随 S_n 缓慢增大, 其中 C4 工况比 C1 工况增大 7.6% (图 15), 符合类圆柱结构随阻流率变化的一般规律。图 16 为 4 组不同 S_n 工况下计算域中垂面 ($z=0$) 流场分布情况。结果显示, 随 S_n 的增大, 目脚翼展两侧的局部加速效应和尾流交互作用更加显著, 特别是在 $l=17.32$ mm ($S_n=0.230$), 目脚尾流在下游汇聚, 形成了一个较大的低流速区域。

3.3 攻角对网片水动力特性的影响

本节研究工况为 D1~D5, 分析网片在 $\theta=0^\circ$ 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° 时水动力系数与速度场分布规律。图 17 展示了不同 θ 下水动力系数的变化趋势, \bar{C}_d 随网片逐渐垂直于来流方向而不断增大, 当完全垂直于来流方向时峰值可达 0.961。 \bar{C}_l 呈现先增加后减小的趋势, 在 $\theta=45^\circ$ 时 \bar{C}_l 达到峰值 0.233, 当网片垂直或平行于来流方向时, \bar{C}_l 几乎维持为 0。如图 18 所示, 通过法向 (TP 截面) 和切向 (PP 截面) 的两个切面分析 θ 对网目局部流场的影响。图 19 展示了不同 θ 下 TP 和 PP 截面流场的分布情况。随着 θ 增大, 目脚后方尾流衰减面

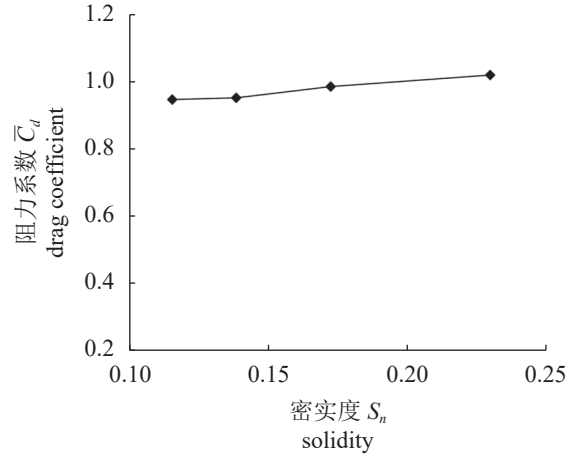


图 15 不同密度下的阻力系数

Fig. 15 Drag coefficient with varying solidities

积逐渐增大, 目脚间局部流场的交互作用同时不断增强。当网片与来流方向垂直时, 双股捻制结构目脚近壁面尾流空间分布模式与 Lam 等^[34] 在波浪形圆柱尾流所观察的实验现象高度一致, 捻制结构导致流线三维空间分布规律复杂。当网片与水流平行时 ($\theta=0^\circ$), 目脚间几乎观察不到局部流场交互作用, 下游目脚完全位于上游目脚的尾流范围内。随 θ 增大, 网目中心位置的高流速区范

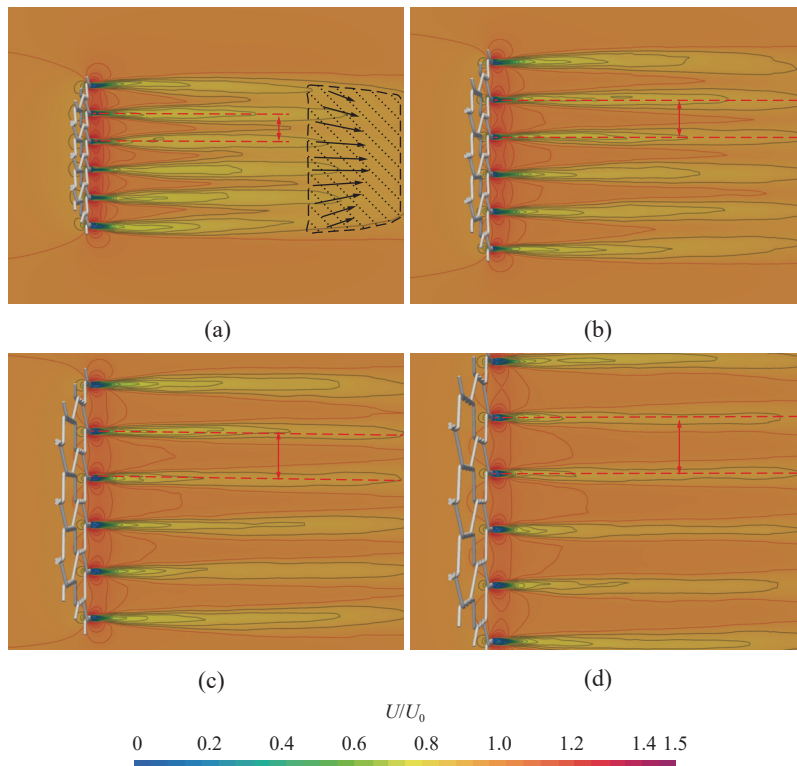


图 16 不同密度下的时均流场分布

Fig. 16 Mean flow fields with varying solidities

(a) $S_n=0.230$, $l=17.32$ mm, (b) $S_n=0.173$, $l=23.09$ mm, (c) $S_n=0.139$, $l=28.87$ mm, (d) $S_n=0.116$, $l=34.64$ mm.

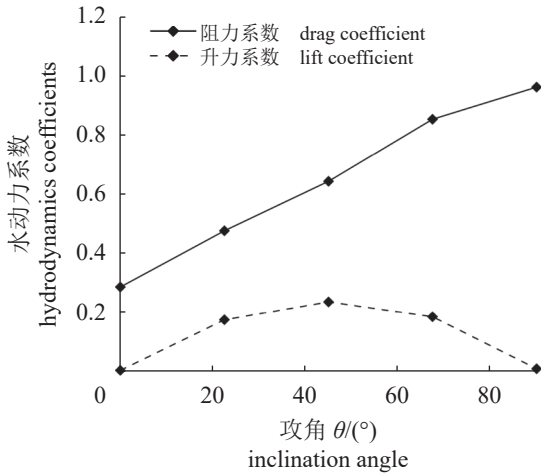


图 17 不同攻角下的水动力系数

Fig. 17 Hydrodynamics coefficients with varying inclination angles

围逐渐扩大, 且目脚翼展两侧局部加速区域呈扩大趋势, 高流速区逐渐占据主导地位。当网片完

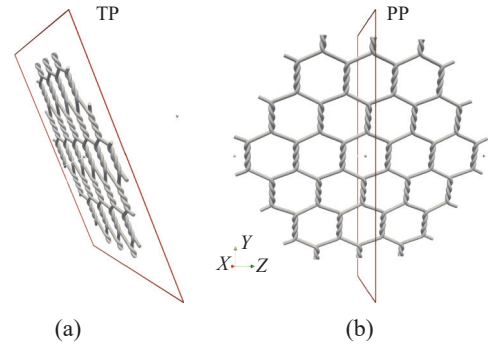


图 18 定义穿过网片的切面

Fig. 18 Definition of the sampling plane slicing through the net panel

全垂直于来流时, 目脚间局部流场的交互作用和目脚翼展两侧的局部加速效果最为显著^[24]。

4 结论

基于改进的延迟分离涡数值模拟方法, 本研

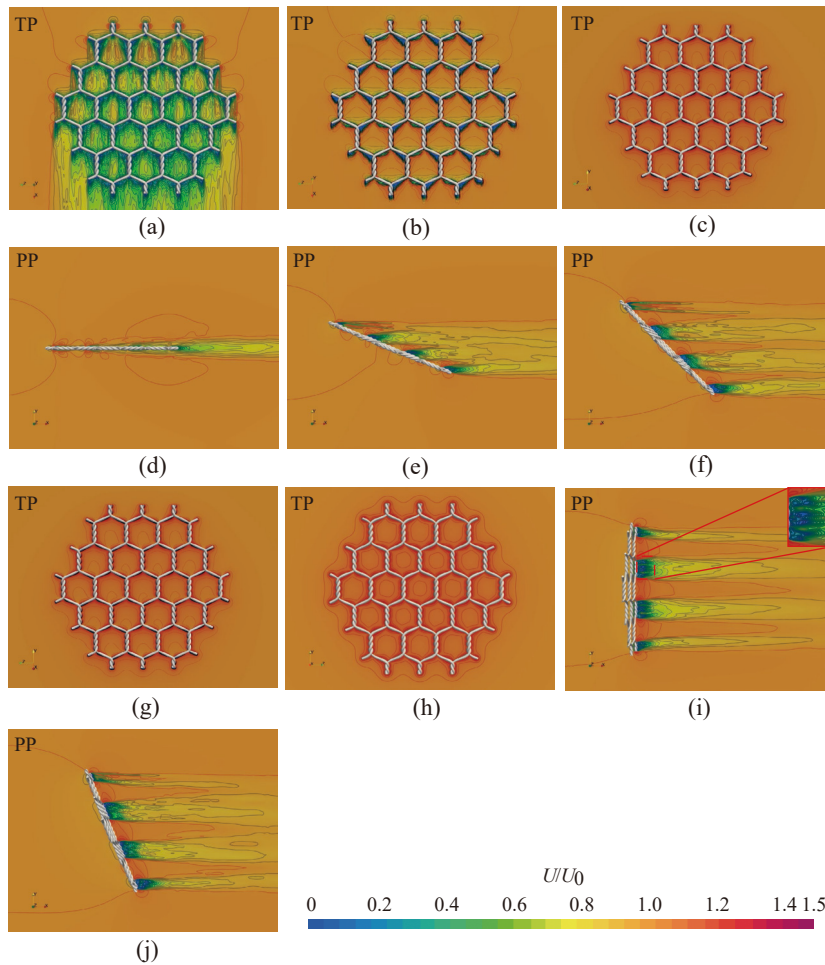


图 19 不同攻角下的时均流场分布

Fig. 19 Mean flow fields with varying inclination angles

(a) (d) $\theta=0^{\circ}$, (b) (e) $\theta=22.5^{\circ}$, (c) (f) $\theta=45^{\circ}$, (g) (j) $\theta=67.5^{\circ}$, (h) (i) $\theta=90^{\circ}$.

究深入剖析了 PET 网片的水动力特性, 阐明来流速度、来流攻角和密度对 PET 网片水动力特性的影响, 结论如下。

①来流流速会对目脚后方尾流发展和目脚翼展两侧的局部加速效应产生影响, 网片阻力系数随流速增大减小了 18.2%。在低速来流 (0.100 m/s) 条件下, 目脚翼展两侧的局部加速效应十分显著, 目脚后方尾流并不稳定。随雷诺数增大, 目脚翼展两侧的局部加速效应减弱, 目脚尾流得到充分发展。

②网片阻力系数随着密实度的增大增加了 7.6%, 目脚翼展两侧的局部加速效应和尾流交互作用增强。当密实度为 0.230 时, 目脚尾流在下游汇聚成一个较大的低流速区域。

③攻角是影响网片阻力系数和升力系数以及周围流场分布的关键因素。阻力系数随网片逐渐垂直于来流方向而不断增大, 当 $\theta=90^\circ$ 时峰值可达 0.961, 升力系数呈现先增大后减小的趋势, 在 $\theta=45^\circ$ 时达到峰值 0.233, 目脚后方尾流衰减的区域和目脚间局部流场的交互作用也在不断增强。当网片垂直于来流方向时, 目脚间局部流场的交互作用达到最强。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 李大海, 韩立民. 陆海统筹构建粮食安全保障新体系研究 [J]. 社会科学辑刊, 2019(6): 109-117.
Li D H, Han L M. Study on building a new safeguard system of food security by ordinating land and sea[J]. Social Science Journal, 2019(6): 109-117 (in Chinese).
- [2] 董双林, 董云伟, 黄六一, 等. 迈向远海的中国水产养殖: 机遇、挑战和发展策略 [J]. 水产学报, 2023, 47(3): 039601.
Dong S L, Dong Y W, Huang L Y, *et al.* Toward offshore aquaculture in China: opportunities, challenges and development strategies[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(3): 039601 (in Chinese).
- [3] 黄小华, 郭根喜, 胡昱, 等. 圆形网衣在水流作用下的运动变形特性 [J]. 中国水产科学, 2010, 17(2): 312-319.
Huang X H, Guo G X, Hu Y, *et al.* Movement and deformation characteristics of cylinder nets in current[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(2): 312-319 (in Chinese).
- [4] 孙斌, 余雯雯, 石建高, 等. 渔用高性能网衣材料的研究进展 [J]. 渔业现代化, 2020, 47(6): 1-7.
Sun B, Yu W W, Shi J G, *et al.* Research progress of high performance netting materials for fishing[J]. Fishery Modernization, 2020, 47(6): 1-7 (in Chinese).
- [5] Løland G. Current forces on and flow through fish farms[D]. Trondheim: University of Trondheim, 1991.
- [6] Bi C W, Zhao Y P, Dong G H, *et al.* Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 57: 71-81.
- [7] 唐浩. 金枪鱼围网网具水动力特性及沉降性能研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
Tang H. Study on hydrodynamic characteristic and sinking performance of tuna purse seine[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017 (in Chinese).
- [8] 俞鸿源, 尤鑫星, 曲晓玉, 等. PA 单丝网片水动力特性水槽试验研究 [J]. 渔业现代化, 2020, 47(4): 67-73.
Yu H Y, You X X, Qu X Y, *et al.* Flume experimental research on hydrodynamic properties of PA monofilament netting[J]. Fishery Modernization, 2020, 47(4): 67-73 (in Chinese).
- [9] 薄佳男, 林可, 马家志, 等. 高分子编结网片水动力特性水槽试验研究 [J]. 渔业现代化, 2020, 47(1): 72-79.
Bo J N, Lin K, Ma J Z, *et al.* Experimental study on hydrodynamic characteristics of polymer knitted netting[J]. Fishery Modernization, 2020, 47(1): 72-79 (in Chinese).
- [10] Tsukrov I, Drach A, DeCew J, *et al.* Characterization of geometry and normal drag coefficients of copper nets[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(17-18): 1979-1988.
- [11] Cha B J, Kim H Y, Bae J H, *et al.* Analysis of the hydrodynamic characteristics of chain-link woven copper alloy nets for fish cages[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 56: 79-85.
- [12] Casanova C, Dwikartika W. Modeling of aquaculture PET Net with the use of finite element method[R]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- [13] Gansel L, Jensen Ø, Endresen P C, *et al.* Deformation of nets with bending stiffness normal to uniform currents[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136(4): 041102.

- [14] Wu Q L, You X X, Huang L Y, *et al.* Hydrodynamic characteristics of rigid net panels for mariculture facilities as determined in flume-tank experiment[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 147: 103969.
- [15] 徐俊杰. PET 网衣综合性能分析及其在可升降式网箱上的应用研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
Xu J J. Comprehensive performance analysis of PET netting and its application in liftable cages[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023 (in Chinese).
- [16] 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.
- [17] Xu L Y, Li P, Qin H D, *et al.* Numerical studies on wake and turbulence characteristics of aquaculture nets[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1055873.
- [18] Wang G, Martin T, Huang L Y, *et al.* Modelling the flow around and wake behind net panels using large eddy simulations[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109846.
- [19] Gritskevich M S, Garbaruk A V, Schütze J, *et al.* Development of DDES and IDDES formulations for the $k-\omega$ shear stress transport model[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2012, 88(3): 431-449.
- [20] 谭翊, 谭逊, 李榜江. 应用 Photoshop 软件进行小班面积测算方法研究 [J]. *测绘科学*, 2008, 33(1): 224-225.
Tan Y, Tan X, Li B J. A study of calculating subcompartment by using Photoshop software[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(1): 224-225 (in Chinese).
- [21] Shur M L, Spalart P R, Strelets M K, *et al.* A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(6): 1638-1649.
- [22] 何佳伟, 翟峻仪, 高伟鹏, 等. 基于不同湍流模型的水下航行体圆柱结构流动特性数值模拟 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(S2): 53-63.
He J W, Zhai J Y, Gao W P, *et al.* Numerical simulation of flow characteristics of the underwater vehicle with a cylindrical structure based on different turbulence models[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(S2): 53-63 (in Chinese).
- [23] Wang G, Martin T, Huang L Y, *et al.* An improved screen force model based on CFD simulations of the hydrodynamic loads on knotless net panels[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 118: 102965.
- [24] Wang G, Cui Y, Guan C T, *et al.* Effects of inclination angles on the hydrodynamics of knotless net panels in currents[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(6): 1148.
- [25] Parnaudeau P, Carlier J, Heitz D, *et al.* Experimental and numerical studies of the flow over a circular cylinder at Reynolds number 3900[J]. *Physics of Fluids*, 2008, 20(8): 085101.
- [26] Massey B S. *Mechanics of fluids*[M]. 3rd ed. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1975.
- [27] Anon. Mean forces, pressures and flow field velocities for circular cylindrical structures: single cylinder with two-dimensional flow[R]. London: Engineering Sciences Data Unit, Data Items, 1980.
- [28] Zdravkovich M M. Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 33(1-2): 53-62.
- [29] Stringer R M, Zang J, Hillis A J. Unsteady RANS computations of flow around a circular cylinder for a wide range of Reynolds numbers[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 87: 1-9.
- [30] Ma X, Karamanos G S, Karniadakis G E. Dynamics and low-dimensionality of a turbulent near wake[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 410: 29-65.
- [31] Kravchenko A G, Moin P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re_D = 3900$ [J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(2): 403-417.
- [32] Lourenco L M, Shih C. Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder[R]. Washington, D.C.: Technical report TF-62, CTR Annual Research Briefs, NASA Ames/Stanford University, 1994: 1-8.
- [33] Bi C W, Balash C, Matsubara S, *et al.* Effects of cylindrical cruciform patterns on fluid flow and drag as determined by CFD models[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 135: 28-38.
- [34] Lam K, Wang F H, So R M C. Three-dimensional nature of vortices in the near wake of a wavy cylinder[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19(6): 815-833.

Hydrodynamics of PET net panels using the Improved Delayed Detached Eddy Simulation

WANG Zhi¹, WANG Gang^{2*}, JIAO Zhaoqi^{2,3}, FENG Dejun¹, QU Xiaoyu⁴, GUI Fukun¹

(1. National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

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

4. School of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: This study employs the Improved Delayed Detached Eddy Simulation (IDDES) method to explore the flow field distributions and hydrodynamic coefficients to further enhance the understanding of the hydrodynamic characteristics of polyethylene terephthalate (PET) nets commonly used in offshore aquaculture facilities. The study examined the effects of inflow velocity, angle of attack, and net solidity on the hydrodynamic behavior of the net panels. Capitalized on a typical case of flowing past a circular cylinder, the accuracies of the turbulence model and the solver were successfully substantiated. The results presented that the velocity fields and hydrodynamic coefficients of the 19 net-mesh panels were close to the full-scale nets. The drag coefficients gradually declined as the increase of inflow velocities. The local flow acceleration effected on both spanwise directions of twines diminish, while the downstream wake gets fully developed. Furthermore, the drag coefficients of nets present a gradual increasing tendency with net solidities, the local flow acceleration effected on both spanwise directions of twines, and the wake interactions were enhanced. The downstream streamlines converged to form a considerable region with low velocities for the case of the solidity 0.230. The drag coefficients continuously increased as the panels became more perpendicular to the flow direction, while the lift coefficients were inclined to rise initially and then decreased. The more considerable velocity reductions in addition to low flow interactions among twines were also observed. The effects of local interactions of flow fields among twines, along with the flow acceleration on both spanwise directions of twines, were the most dominant especially in the case of angle of attack 90°. This study demonstrated that both solidity and angle of attack significantly influenced the flow field distribution and hydrodynamic coefficients of PET nets. This numerical study has clarified the velocity fields and hydrodynamic coefficients around PET nets, providing the solid foundation for further analysis of the flow exchange across aquaculture structures.

Key words: PET nets; Improved Delayed Detached Eddy Simulation (IDDES); flow fields; wake effects; hydrodynamic coefficients

Corresponding author: WANG Gang. E-mail: wanggang@ysfri.ac.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (32303072, 32002441); Qingdao Natural Science Foundation (3-21-45-zyyd-jch); China Postdoctoral Science Foundation (2022M723503); Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2023QNRC001); China Agriculture Research System (CARS-47-22); “Pioneer” and “Leading Goose” R & D Program of Zhejiang (2023C02029)