

DOI: 10.12264/JFSC2020-0548

基于 OpenFOAM 的全潜式网箱网衣系缚方式研究

朱传之¹, 杨永春¹, 黄六一², 王刚²

1. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100;

2. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003

摘要: 本研究针对全潜式网箱的四周刚性柱–网衣系缚方式进行研究。通过模型实验测得柱–网结构模型在水流作用下, 不同流速、不同系缚方式下的网衣系缚点受力, 分析了不同系缚方式对网衣系缚点受力分布特性以及系缚点之间受力均匀性的影响。此外, 为进一步研究网衣系缚方式对周围流场的影响, 本研究基于混合体积法建立了网衣的流固耦合模型, 并在开源 CFD 软件 OpenFOAM 中开发得到了网衣流固耦合求解器, 通过数值模拟与模型实验相结合的方式研究了网衣的阻流效应以及网衣网线的张力分布特征和荷载传递方式。研究表明, 四周刚性柱–网结构模型中, 网衣系缚方式对水流作用下网衣的受力特性有着显著的影响, 网衣最大张力一般分布在与系缚点相连的网线上, 而且越靠近中间位置的网线和系缚点的受力也越大, 整体呈现出两端受力小中间受力大的对称现象; 在网衣背流侧, 靠近网衣沿水流方向投影的中心位置处流场受网衣阻流效应的影响会偏大, 流速衰减率也更高, 而且在同种工况下, 随着流速的变大, 网衣对流场流速的衰减效应也越明显。

关键词: 全潜式网箱; 系缚方式; 模型实验; OpenFOAM; 网衣流固耦合

中图分类号: S972

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2021)08–1079–12

随着海水养殖由近海向深远海方向发展, 部分渔业发达国家开始尝试设计和建造可以应对复杂海况的大型钢结构养殖网箱。2017 年挪威投入使用了全球第一个大型半潜式钢结构养殖网箱“Ocean Farm 1”(图 1a), 掀起和推动了大型养殖网箱的使用热潮, 2018 年中国自主研发的大型全潜式养殖网箱“深蓝 1 号”(图 1b)建成交付, 有效推动了中国海水鱼类养殖从近海养殖向深远海养殖的转变。网衣系统是大型钢结构养殖网箱的重要组成部分, 具有维持养殖空间、防止鱼类逃逸和敌害侵袭^[1]等作用。复杂海况条件下网衣系统是否安全可靠直接关系到养殖生产的成败。不同于传统重力式网箱^[2], 大型钢结构网箱的网衣四周固定在钢结构框架上, 在水流作用下, 网衣变形较小, 但网衣与框架的系缚方式会对系缚点和网衣的受力分布产生影响。因此, 探究水流作用下

不同系缚方式对网衣水动力特性的影响具有实际意义。

对于传统重力式网箱水动力特性, 国内外学者已进行了较多相关研究。Moe-Føre 等^[3]利用水槽实验研究了在高均匀流下作用于重力式网箱模型的水力载荷和相应的变形。张福友^[4]通过模型实验和数值仿真研究了水流作用下重力式网箱配重系统对网衣变形规律的影响; 孙磊^[5]研究了浮球、网格尺寸等参数对网箱锚泊系统张力的影响, 并且通过现场测试获得了台风经过时重力式网箱的锚绳张力。对于大型钢结构网箱, Zhao 等^[6]通过物理模型实验, 研究了大型半潜式钢结构养殖网箱“Ocean Farm 1”(图 1a)在波浪中系泊绳张力和运动响应; Huang 等^[7]通过模型实验比较了波浪和水流条件下不同单点系泊方式的大型半潜式网箱的水动力特性。在网衣流固耦合作用方面, 赵云

收稿日期: 2020-11-30; 修订日期: 2021-01-07.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901003).

作者简介: 朱传之(1994–), 男, 硕士研究生, 主要从事网箱水动力研究. E-mail: chuanzhizhu@foxmail.com

通信作者: 杨永春, 教授, 主要从事海洋工程结构动力学研究. E-mail: yycyw@ouc.edu.cn

鹏等^[8]用多孔介质模型模拟网衣周围流场,并且通过模型实验进行了验证;王翔宇^[9]基于光滑粒子方法建立网衣与流场相互作用的流固耦合模型,研究了网衣与水流相互作用下的水动力特性;姚叶明^[10]提出一种新的拖网网衣流固耦合方法,其中网衣模型基于集中质量法建立,流场模型基于有限体积法建立,然后引入混合体积法将网衣离散到流场中,建立了网衣的流固耦合模型;Chen等^[11-12]通过一组动态多孔介质区域来模拟网箱的几何形状,在该网格中,网格单元在每次迭代时会根据网箱模型中节点位置变化进行更新,实现了网箱及其周围流场的动态流固耦合分析;Martin等^[13]推导了模拟网衣流固耦合的拉格朗日方法,与以往的多孔介质法相比,该模型包含更

多的物理推导并简化了数值模拟流程。在网衣系缚方式的研究方面,陈天华^[14]基于集中质量法研究了水流作用下桩柱式围网网衣水动力特性,分析了两边固定的网衣系缚方式对系缚点受力和网线张力的影响。

目前,对于四边固定的大型网箱网衣系缚方式的研究还较少。本研究将大型全潜式网箱简化为结构简单的柱-网结构模型,通过模型实验和数值模拟方法研究水流作用下,流速和系缚方式对柱-网结构模型的网衣受力分布特性以及荷载传递方式的影响;通过建立网衣的流固耦合模型,研究实验时网衣在不同流速下的阻流效应。本研究结果可为深远海大型钢结构养殖网箱网衣的设计、建造和安全性能评估等提供一定的数据参考。



a. 海洋牧场 1 号(挪威) Ocean Farm 1 (Norway)



b. 深蓝 1 号(中国) Shen Lan 1 (China)

图 1 挪威(a)和中国(b)的大型钢结构养殖网箱

Fig. 1 Large-scale steel structure cages of Norway (a) and China (b)

1 数值模拟方法

1.1 网衣数值模型

本研究采用集中质量法^[15-16]建立网衣结构模型。如图 2 所示,集中质量点设于每个网目目脚的两端。将网衣的目脚近似为形状规则的圆柱杆件,在海洋环境中,网衣目脚可视为相对于波长而言直径很小的杆单元,忽略其扭转力矩以及杆件中间的变形^[17],其水动力采用莫里森方程^[14]来计算。

作用在目脚上的水动力 H 可以分为压差阻力 F_p 与黏滞阻力 F_f ^[18-19](图 3)。

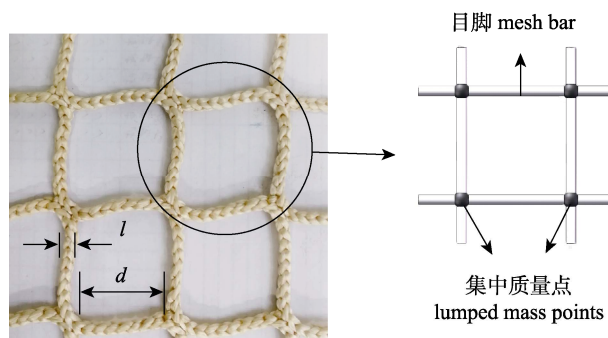


图 2 集中质量法示意图

d 为目脚直径, l 为目脚长度。

Fig. 2 Diagram of lumped mass method
 d is the mesh bar diameter, and l is the length of half mesh bar.

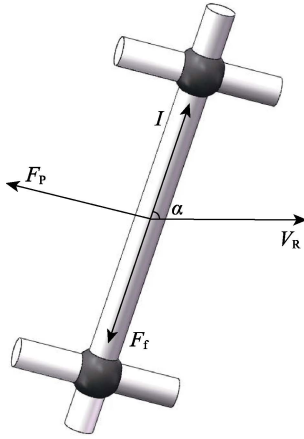


图 3 目脚水动力示意图

F_p 为压差阻力, F_f 为黏滞阻力, V_R 为目脚与水流的相对速度矢量, I 为目脚方向向量, α 为 V_R 与 I 所成的夹角。

Fig. 3 Diagram of hydrodynamic forces on mesh bar
 F_p is the pressure drag, F_f is the viscous drag, V_R is the velocity direction vector between mesh bar and current, I is the mesh bar direction vector, and α is the angle between V_R and I .

$$H = F_p + F_f \quad (1a)$$

$$F_p = C_{N90} \cdot \frac{\rho(V_R \cdot \sin\alpha)^2}{2} \cdot S_N \cdot n_p \quad (1b)$$

$$F_f = C_f \cdot \frac{\rho(V_R \cdot \cos\alpha)^2}{2} \cdot S_f \cdot n_f \quad (1c)$$

式中, ρ 为网衣周围流体密度, C_{N90} 是当目脚与水流垂直时目脚的压差阻力系数, V_R 为目脚与水流的相对速度矢量, I 为目脚方向向量, α 为 V_R 与 I 所成的夹角; C_f 是黏性阻力系数; S_N 与 S_f 分别是目脚的投影面积和湿表面积, $S_N = dl$, $S_f = \pi dl$, 其中 d 为网线直径, l 为目脚长度; n_p 和 n_f 分别为压差阻力 F_p 与黏滞阻力 F_f 的方向矢量; 在此研究中取水动力系数 $C=1.12$ 、 $\pi C=1.12$ [19]。

网衣结构在水流作用下的受力由重力、浮力、网线张力和水动力组成。根据牛顿第二定律, 集中质量点的运动方程可以表示为:

$$(m + \Delta m) \cdot a = T + H + G + B \quad (2a)$$

$$\Delta m = \rho \forall C_m \quad (2b)$$

$$T = d^2 C_1 \varepsilon^2, \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2c)$$

式中, m 和 Δm 分别为集中质量点的质量和附加质量; a 为集中质量点加速度矢量; T 为与集中质量点相连的目脚张力; H 、 G 、 B 分别为目脚所受到的水动力、重力与浮力; $\forall$ 为集中质量点所代

表的目脚及其他构件体积; C_m 是附加质量系数; C_1 、 C_2 为网衣的弹性系数 [14], l_0 为目脚原始长度, l 为目脚变形后的长度。

1.2 流场数值模型

网衣在水流作用下产生变形, 同时也会对流场产生阻流作用。本研究中, 流场模型通过有限体积法建立, 然后引入混合体积法 [10], 将网衣模型离散到流场模型的控制体积中, 网衣目脚 AB 离散到控制体积中部分 AC 与流场的相互作用如图 4 所示, 目脚所受水动力 H_1 与流场所受的反作用力 H_2 大小相等, 方向相反, 其中力 H_2 的计算公式可表示为:

$$H_2 = -\frac{|L_{AC}|}{|L_{AB}|} H_{AB} \quad (3)$$

式中, $|L_{AC}|$ 为网衣目脚离散在控制体积中 AC 段的长度, $|L_{AB}|$ 为目脚 AB 的长度, H_{AB} 即为目脚 AB 所受的水动力。

网衣对流场的阻流作用通过向流场的雷诺平均 Navier-Stokes (RANS) 方程的源项中添加流场所受的反作用力来进行模拟。三维不可压缩牛顿流体的质量守恒方程可以表示为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中, u 、 v 、 w 分别表示的是水流速度 u 在 x 、 y 、 z 3 个方向上的分量。基于动量守恒的流场 RANS 方程可表示为:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{u}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu_{\text{eff}} \text{grad } u) + S_u \quad (5a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu_{\text{eff}} \text{grad } v) + S_v \quad (5b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \bar{u}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu_{\text{eff}} \text{grad } w) + S_w \quad (5c)$$

式中, 等效压力 $P = p + (2/3)\rho k$, p 为压力, ρ 为流体密度, k 表示湍动能, 流体有效黏性系数 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, μ 为流体动力黏度, μ_t 为湍流黏性系数, 计算湍流流动的关键在于如何确定湍动黏度, 本研究中采用标准 k-epsilon 两方程模型进行求解。网衣流固耦合计算时, 流场受到的反作用力在 x 、 y 、 z 3 个方向上的分力分别添加到源项 S_u 、 S_v 、 S_w 中进行流场的求解计算。

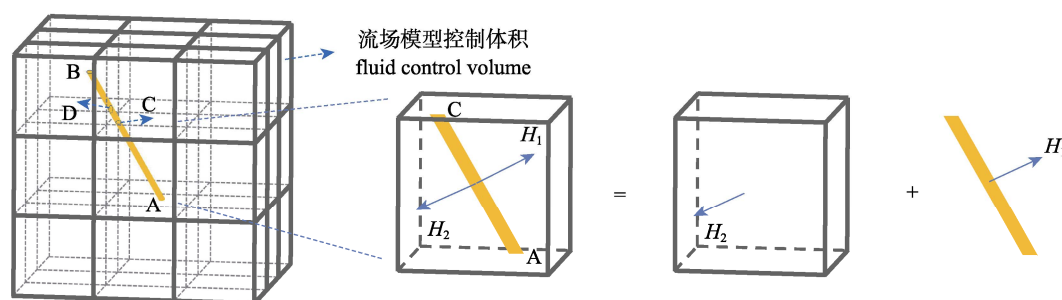


图 4 混合体积法示意图

Fig. 4 Diagram of hybrid volume method

1.3 网衣流固耦合计算

网衣集中质量点的运动方程为典型的二阶偏微分方程, 本研究采用定步长四阶龙格库塔法对微分方程组进行数值积分, 计算步长设置为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。流场求解器是在开源 CFD 软件 OpenFOAM 中, 在不可压瞬态求解器 pisoFoam 的基础上开发得到, 压力-速度耦合方法和代数方程组等求解方法选择默认设置。在进行计算域设置时, 数值水槽左端设置为水流入入口边界, 右端设置为出口边界; 前后和底部设置为固定边界, 顶部设置为移动边界。为方便网衣离散, 划分计算区域的网格时, 采用混合网格进行划分, 即网衣所在区域划分为形状大小一致的结构网格, 流场其他区域划分为非

结构网格。

网衣流固耦合计算时, 首先假设流场为均一流场, 即流场中流速处处相等, 通过网衣计算程序计算得到网衣变形后的集中质量点坐标信息和目脚水动力; 然后通过混合体积法将目脚水动力离散到相应的流场控制体积中进行流场求解计算; 此外, 根据网衣集中质量点的坐标信息, 在流场求解器中设置监测点来监测流场中网衣质量点位置处的流速; 流场计算更新后将网衣质量点处的流速信息传递给网衣计算程序, 再进行网衣的形变和目脚水动力计算。其流固耦合计算流程如图 5 所示, 通过循环迭代, 最终达到收敛判据(两次迭代计算出的网衣水动力误差小于 0.1%), 输出计算结果。

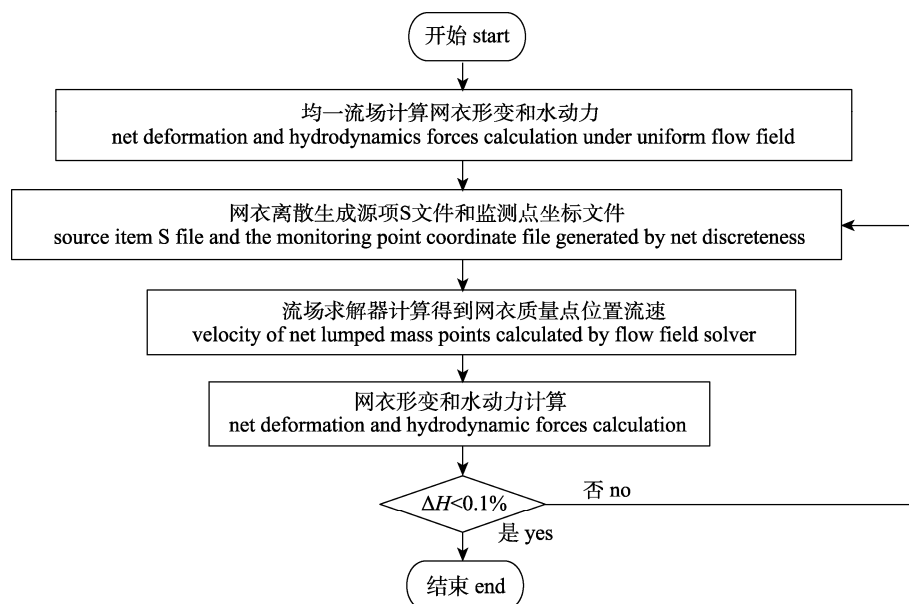


图 5 网衣流固耦合计算流程图

Fig. 5 Flow chart of net fluid-structure coupling calculation

2 网衣周围流场分布实验验证

本研究使用 Bi 等^[20]的实验结果来验证网衣流固耦合方法中流场计算的准确性。实验水槽宽 0.45 m, 水深为 0.4 m。实验网衣四周固定在 0.3 m×0.3 m 的矩形框架上, 其框架由直径为 6 mm 的钢材材料框架组成。实验时网衣与水流方向垂直, 网衣中心垂直截面上的流速分布通过 PIV 技术获得。本研究使用线面积系数为 0.243 的网衣在 0.17 m/s 流速时的实验数据和仿真结果进行对比。计算时, 网衣和流场模型按实际尺寸进行建模, 其中网衣参数如表 1 所示, 网衣在流场中的位置如图 6 所示。

图 7 为入口流速为 0.17 m/s 时, 流场中心垂直截面上网衣背流侧 0.15 m 处 z 方向上的流速分

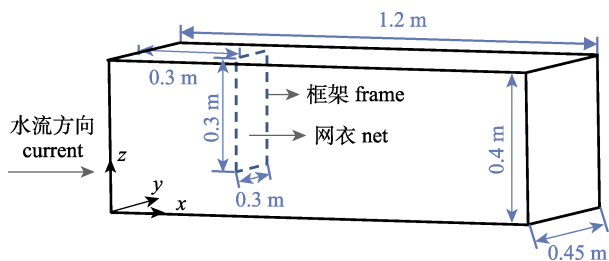


图 6 网衣在流场计算域中的位置
Fig. 6 The position of net in flow fluid computational domain

布曲线。从图中可以看出, 受网衣阻流效应的影响, 网衣背流侧有明显的流速衰减区域, 其尺寸大小与网衣尺寸基本一致。与入口流速相比, 在网衣背流侧 0.15 m 处的流速衰减区域内, 通过仿真计算得到的平均流速衰减率与实验得到的平均流速衰减率吻合较好, 分别为 10.3%、11.6%, 且 z 方向的流速变化规律也基本一致, 说明通过混合体积法建立的网衣流固耦合模型能够很好地模拟网衣附近的流场变化。

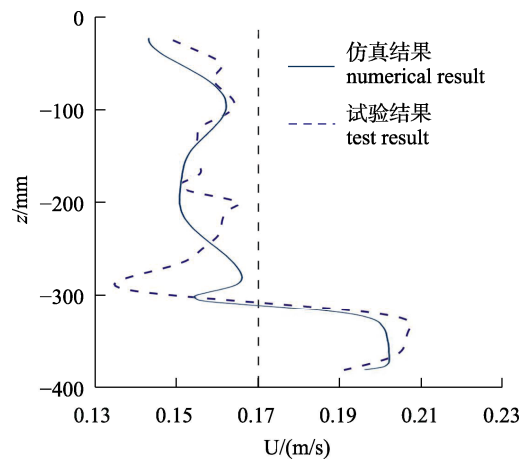


图 7 网衣背流侧 0.15 m 处 z 向速度变化曲线
Fig. 7 Magnitude of current velocity in z direction at 0.15 m on the downstream of net

表 1 实验网衣模型参数
Tab. 1 The characteristics of the net model

网衣材料 net metarial	网目形状 mesh geometry shape	线面积系数 S_n net solidity	目脚直径/mm mesh bar diameter	目脚长度/mm mesh bar length	网目数量 mesh number	
					宽度方向 in width	长度方向 in length
PE	方形无结节网 Square no-nodular net	0.243	2.6	20	15	15

3 网衣系缚点受力实验

3.1 实验设计

验证性实验在中国海洋大学循环水槽中进行, 通过实验研究不同系缚方式对柱-网结构模型中网衣系缚点受力分布特性以及系缚点受力均匀性的影响。同时, 网衣流固耦合方法中网衣受力计算的准确性将通过对实验过程的数值模拟进行验证。

实验布置如图 8 所示, 水槽长 23 m, 宽 0.8 m, 水深 0.7 m, 流速可控制在 0~0.6 m/s 范围内。实

验过程中, 采用高精度声学多普勒点式流速仪 (ADV) 对流速进行测量。实验流速范围在 0.2~0.5 m/s 内, 以 0.1 m/s 为一个间隔进行测试。

本研究中的实验网衣为 1 : 1 模型, 数值模拟分析时的计算条件与实验保持一致。实验采用实际工程中使用的超高分子量聚乙烯网衣, 网衣参数如表 2、表 3 所示。实验网衣系缚于铝管制作的框架上, 铝管直径 $D=28$ mm, 刚度较大, 实验时可忽略框架自身的变形。框架外侧距水槽壁、水槽底部和水面的距离超过两倍框架直径。框架

内侧对称安装有 9 个由调心球轴承和拉力传感器组成的测力装置,用于采集网衣系缚点拉力,其中调心球轴承的作用为支撑传感器和保证传感器在网衣变形的角度范围内自由旋转,使得传感器测力方向与系缚点受力方向保持一致,传感器编号顺序如图 8 所示。各模拟实验组设计如表 4 所示,其中系缚方式编号用四位数字表示,前两位数字表示左右两侧系缚点数量,后两位表示上下两侧系缚点数量。各系缚方式中系缚点位置以及对应传感器编号如图 9 所示。

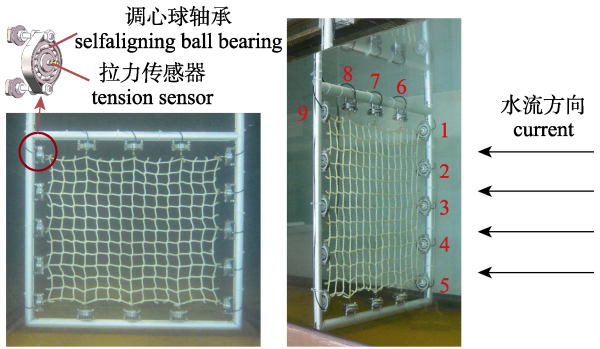


图 8 系缚点受力实验布置图
Fig. 8 Test set-up of tie point force

表 2 实验网衣模型参数
Tab. 2 The characteristics of the net model

网衣材料 net metarial	网目形状 mesh geometry shape	线面积系数 S_n net solidity	目脚直径/mm mesh bar diameter	目脚长度/mm mesh bar length	网目数量 mesh number	
					宽度方向 in width	长度方向 in length
UHMWPE	方形无结节	0.333	3.5	39	12	14

表 3 各系缚点之间间距
Tab. 3 Spacing between each tie point

系缚点 tie point	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
距离/m spacing	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.156	0.156	0.117

表 4 系缚点受力实验工况设计
Tab. 4 Test conditions of tie point force

系缚方式 fixing mode	系缚点数量(单侧) number of tie points (unilateral)	
	左右/点 left and right	上下/点 upper and lower
0200	2	0
0201	2	1
0203	2	3
0300	3	0
0301	3	1
0303	3	3
0500	5	0
0501	5	1
0503	5	3

3.2 实验结果与分析

表 5 为流速 0.5 m/s 时不同系缚方式下系缚点受力的实验结果,其中系缚点最大受力用 $F_{\max}$ 表示,最小受力用 $F_{\min}$ 表示,网衣系缚点之间受力均匀性用最大与最小受力之比 $F_{\max}/F_{\min}$ 表示。从表中实验结果可以看出:

(1) 除 0200 实验工况外,当左右两侧系缚点

数量一定时,网衣上侧中间系缚点的受力最大,整体呈现出左右两端系缚点受力小中间受力大的对称现象;当上下系缚点数量一定时,网衣左侧中间系缚点的受力最大,整体呈现出上下两端系缚点受力小中间受力大的对称现象。造成这种现象的原因为中间系缚点受约束的程度高于两侧系缚点。从图 8 实验布置图中可以看出,受方形网衣几何形状的影响,与中间系缚点相连接的网线张紧程度要高于两侧网线的张紧程度,而与 4 个端点处系缚点相连接的网线张紧程度较低,且有向网衣对角线方向收缩的趋势。实验时,网衣在水流的作用下产生变形,两侧网线往中间位置发生偏移,造成两侧网线的受力向中间网线传递,从而导致从两侧到中间的系缚点受力呈递增趋势。

(2) 当上下两侧无系缚点时, $F_{\max}/F_{\min}$ 在 1.22~1.75 之间;当上下两侧各 1 点系缚时, $F_{\max}/F_{\min}$ 在 1.74~2.46 之间;当上下两侧各 3 点系缚时, $F_{\max}/F_{\min}$ 在 1.60~2.29 之间。从表 3 中各系缚点之间间距可知,左侧测力装置为均匀布置,各系缚点间的间距相等。但上下两侧系缚点数量

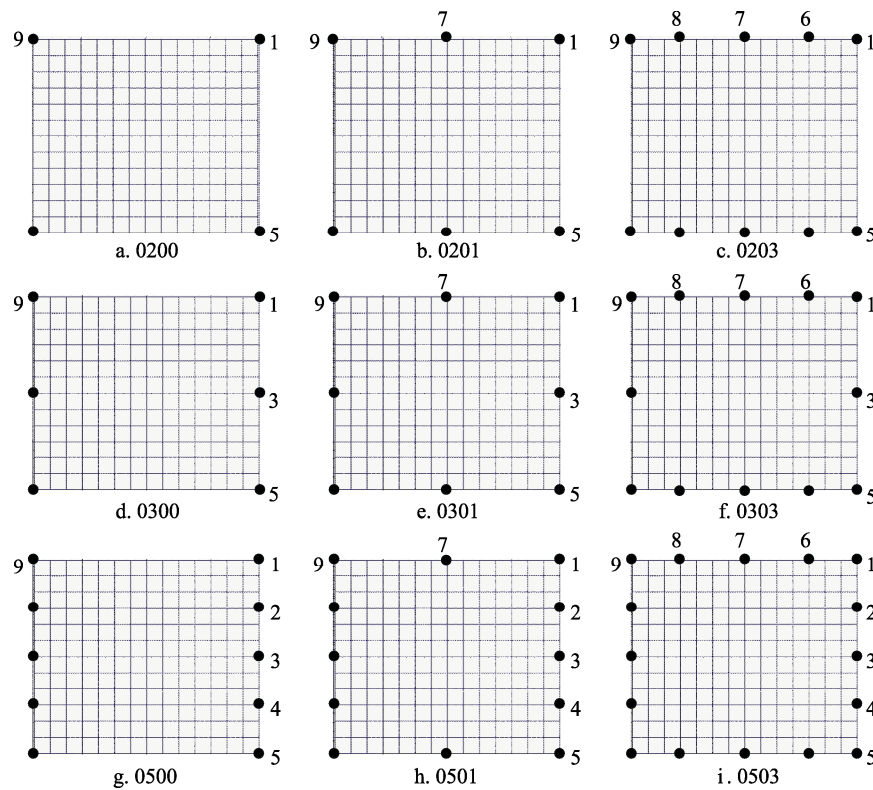


图 9 系缚方式示意图
Fig. 9 Diagram of net fixing modes

一定时,如图 10a 所示,随着左右两侧系缚点增多, $F_{\max}/F_{\min}$ 逐渐变大,即各个系缚点受力的均匀性变差。因此,当系缚点数量增多时,采用等间距的方法布置各个系缚点,则不利于系缚点间受力的均匀性。

(3) 当左右两侧各 2 点系缚时, $F_{\max}/F_{\min}$ 在 1.22~1.74 之间;当左右两侧各 3 点系缚时, $F_{\max}/F_{\min}$ 在 1.66~2.03 之间;当左右两侧各 5 点系

缚时, $F_{\max}/F_{\min}$ 在 1.75~2.46 之间。当左右两侧系缚点数量一定时,如图 10b 所示,上下系缚点数为 1 时, $F_{\max}/F_{\min}$ 要大于上下系缚点数为 0 和 3 时的值。原因是受实验网衣尺寸的影响,上侧中间系缚点距离两端系缚点的间距相对较大,且中间系缚点受约束的程度高于两端系缚点,因此上下侧中间系缚点相对于两端系缚点要分担更多网衣受到的水动力,导致受力偏大。

表 5 流速 0.5 m/s 时不同系缚方式下系缚点的受力
Tab. 5 The forces on the tie points under different modes at a current velocity of 0.5 m/s N

系缚方式 fixing mode	传感器编号 sensor number									$F_{\max}/F_{\min}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0200	4.75				5.77				5.81	1.22
0201	2.84				3.92		4.94		3.84	1.74
0203	2.02				2.34	2.75	3.23	3.22	2.77	1.60
0300	2.96		4.91		3.61				3.98	1.66
0301	1.96		3.70		2.60		3.97		2.96	2.03
0303	2.33		3.37		2.47	2.28	3.08	2.95	1.79	1.88
0500	1.88	2.68	3.29	2.77	2.38				2.48	1.75
0501	1.44	2.01	2.75	2.17	1.79		3.54		1.87	2.46
0503	1.20	1.68	2.75	1.68	1.51	1.77	2.37	2.31	1.47	2.29

通过观察图 10 中不同系缚方式下 $F_{\max}/F_{\min}$ 的变化规律, 进一步研究系缚方式对系缚点受力均匀性的影响。比较 10a 图中的 3 条曲线可以发现, 当左右系缚点数为 2、3、5 时, 上下两侧系缚点数从 0 点增加至 1 点和从 1 点增加至 3 点时, 3 条曲线的变化趋势是相似的。同样, 通过比较 10b 图中 3 条曲线发现, 当上下两侧系缚点数为 0、1、

3 时, 左右两侧系缚点数从 2 点增加至 3 点和从 3 点增加至 5 点时, 3 条曲线的变化趋势也是相似的, 而且由于左右两侧系缚点为均匀布置, 当增加左右两侧的系缚点数量时, 曲线的斜率值变化较小。因此, 当上下或左右两侧系缚点数量不同时, 若对另外两侧系缚点数量和系缚方式的进行相同的变化, 则对网衣系缚点受力均匀性的影响也相似。

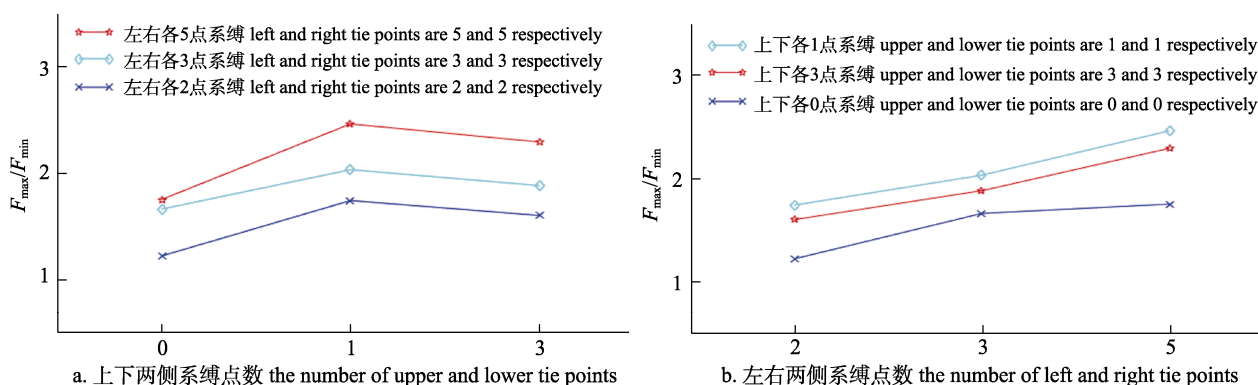


图 10 流速 0.5 m/s 时不同系缚方式下 $F_{\max}/F_{\min}$
Fig. 10 $F_{\max}/F_{\min}$ curves under different fixing modes at a velocity of 0.5 m/s

4 网衣系缚点受力实验数值模拟

流场计算域设置如图 11 所示。通过对网衣系缚点受力实验过程的数值模拟来验证网衣流固耦合方法中网衣受力计算的准确性。同时, 不同系缚方式下网衣对流场的影响以及网衣网线张力分布特征和荷载传递方式也采用数值模拟获得。

4.1 网衣受力计算结果

图 12 为系缚方式为 0503 时不同流速下的实验与仿真计算结果对比, 结果显示, 除 8 号传感器因系缚网衣时张紧程度相对较大, 测得的拉力值偏大外, 其他传感器测得的拉力值与仿真结果

吻合良好, 说明本研究所建立网衣流固耦合模型能够很好地模拟网衣系缚点受力情况。

图 13 为流速 0.5 m/s, 系缚方式为 0503 时网衣张力分布的模拟结果, 网衣最大张力分布在与系缚点相连的网线上, 且中间网线张力大于两侧网线张力。观察图中网衣的张力分布可以发现, 造成中间系缚点受力大于两侧系缚点受力的原因, 除上述 3.2 实验结果与分析中(1)处分析的原因外, 还可以解释为: 系缚点之间的网线将整个网衣模型分为若干小的网片单元, 如图 13 所示, 系缚点之间的网线将网衣模型均匀分为 16 个长宽相等的矩形网片单元, 网片单元在水流的作用下将

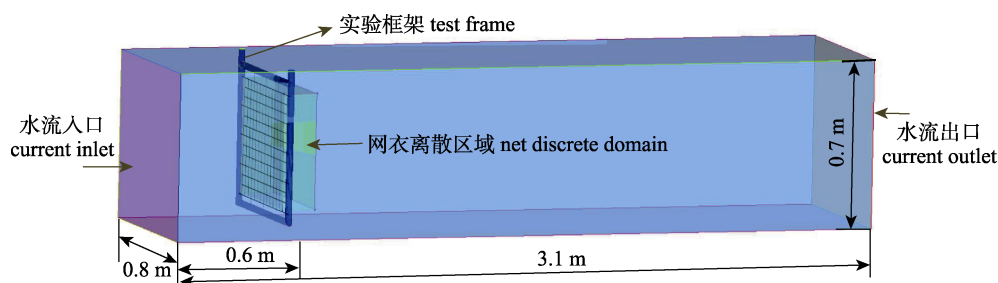


图 11 流场计算域设置
Fig. 11 Computational domain settings of flow field

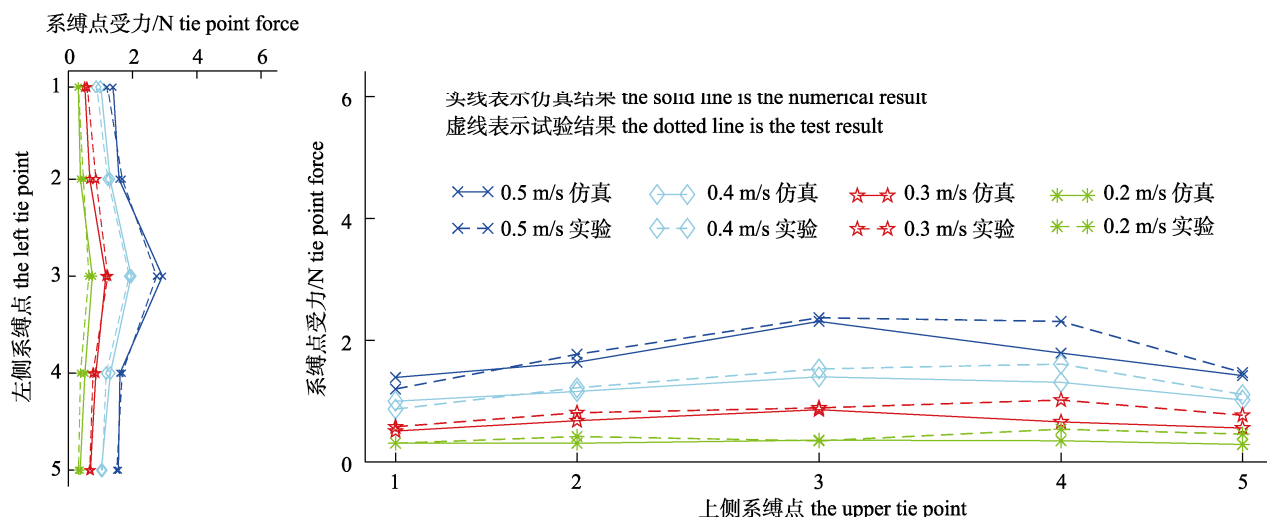
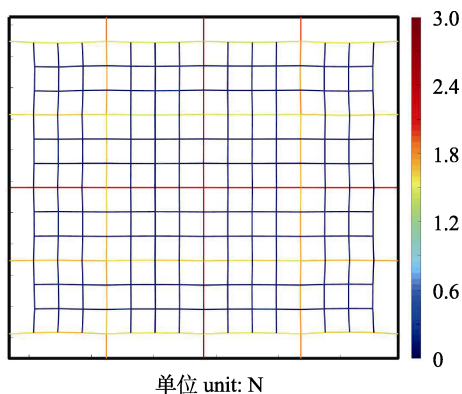


图 12 0503 系缚方式受力实验结果和仿真结果对比

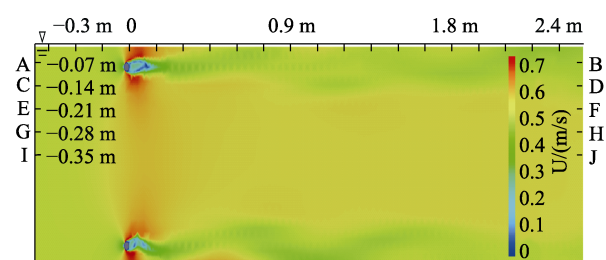
Fig. 12 Comparison of test results and numerical results at different current velocities under fixing mode of 0503

图 13 流速 0.5 m/s 时系缚方式 0503 下网衣张力分布
Fig. 13 Tension distribution of net model under fixing mode of 0503 and current velocity of 0.5 m/s

受到的水动力传递到与系缚点相连的网线上,造成系缚点之间网线的受力积累,而中间位置的网线相比于两侧网线受到更多网片单元影响,从而导致越靠近中间位置的网线和系缚点的受力也越大。

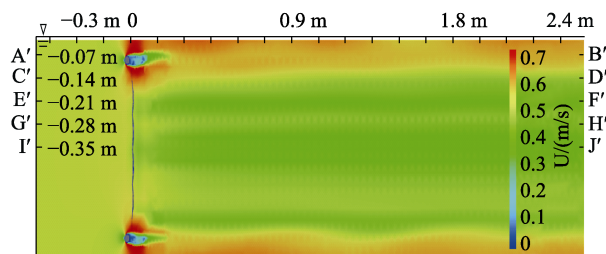
4.2 网衣周围流场计算结果

入口流速为 0.5 m/s 时仿真得到的流场速度分布如图 14 所示,图中截面为水下部分网片中心所在的竖直平面。为研究网衣系缚方式对流场的影响,在设置算例时将算例设置为两组:(1)未进行网衣离散,即流场中没有网衣,计算时只考虑框架对流场的影响;(2)进行网衣离散,即流场中有网衣,计算时同时考虑框架和网衣对流场的影响,其中选取网衣变形最小的系缚方式 0503 与网衣变形最大的系缚方式 0200 的计算结果进行对比。



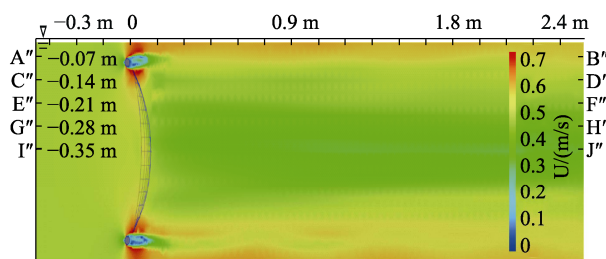
a. 未进行网衣离散时流速分布

a. Current velocity distribution without net separation



b. 进行网衣离散时流速分布(系缚方式0503)

b. Current velocity distribution when net is separated (fixing mode 0503)



c. 进行网衣离散时流速分布(系缚方式0200)

c. Current velocity distribution when net is separated (fixing mode 0200)

图 14 入口流速为 0.5 m/s 时流场流速分布

Fig. 14 Velocity distribution of flow field when inlet current velocity is 0.5 m/s

从图中可以看出,进行网衣离散的流场中,网衣背流侧有明显的流速衰减区域,而且受网衣变形的影响,仿真工况 0200 的流速衰减区域随着距离变长有收缩趋势。在此算例中,当入口流速为 0.5 m/s 时,网衣所在位置的平均流速为 0.58 m/s,流速增加 16%。由于实际工程中,大型深远海养殖网箱的钢制框架一般尺寸较大,对流场的影响也较大,因此在计算网箱的网衣受力时,需要充分考虑网箱框架结构对流场的影响。

为方便对比不同深度位置网衣的阻流效应,取图 14 中距离水面分别为 0.07 m、0.14 m、0.21 m、0.28 m、0.35 m 时,不同计算工况在 z 轴方向的流速变化曲线进行对比观察,其中不同深度位置处标记如表 6 所示。图 15 中,网衣所在平面为 $z=0$ m 处,在网衣迎流侧,距离网衣 0.45 m 处流场开始受到影响;而且由于网衣的阻流作用,在 $z>0$ m 的尾流区域内,进行网衣离散与未进行网衣离散的流场相比,网衣沿 z 向投影区域的流场的流速小于未进行网衣离散时流场的流速,而靠近水面位置的流速则大于未进行网衣离散时流场的流速。在图中 $z=1$ m 处,与未进行网衣离散时的流场相比,工况 0503 的流场流速衰减率分别为 -10.19%、9.29%、30.09%、23.14%、31.27%;工况 0200 的流场流速衰减率分别为 -8.17%、9.75%、17.26%、28.08%、36.54%,即靠近网衣沿水流方向投影的中心位置处流速衰减更明显。

图 16 为系缚方式为 0503 时不同流速下 $z=1$ m 处网衣沿水流方向投影的中心位置的流速衰减率变化曲线,从图中可以看出随着流速变大,流速衰减率也变大,即随着流速的变大网衣对流场流速的衰减效应越明显。

表 6 距离水面不同深度位置处标记
Tab. 6 Markers at different depths from the water surface

深度/m depth	图 14a Fig. 14a	图 14b Fig. 14b	图 14c Fig. 14c
0.07	A - B	A' - B'	A'' - B''
0.14	C - D	C' - D'	C'' - D''
0.21	E - F	E' - F'	E'' - F''
0.28	G - H	G' - H'	G'' - H''
0.35	I - J	I' - J'	I'' - J''

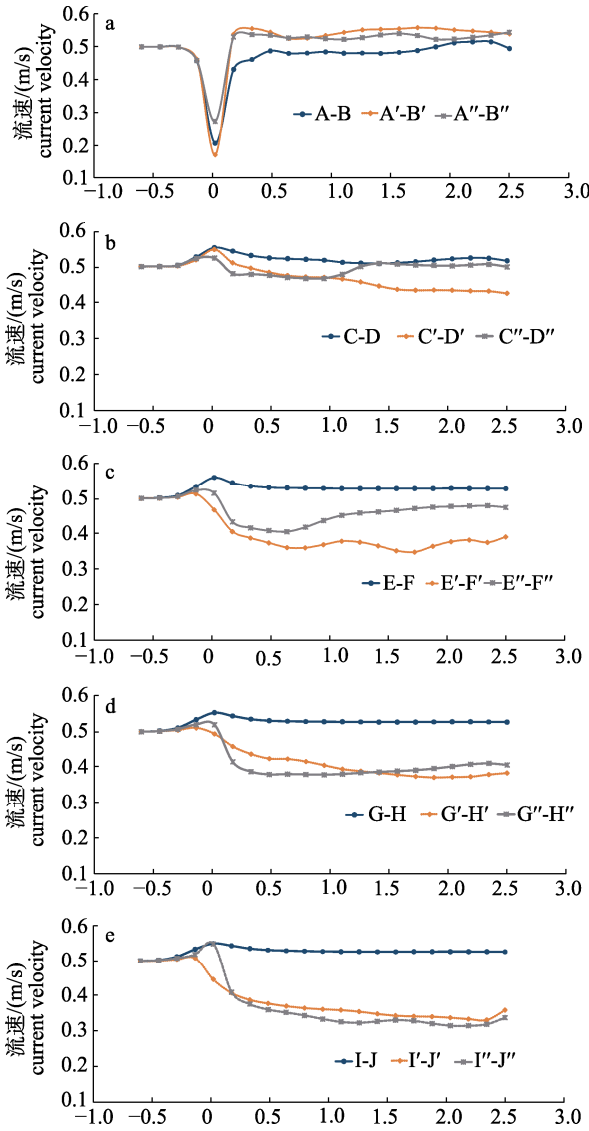


图 15 距离水面 0.07 m (a)、0.14 m (b)、0.21 m (c)、0.28 m (d)、0.35 m (e) 处 z 向流速变化曲线
Fig. 15 The current velocity curves of z -direction at 0.07 m (a), 0.14 m (b), 0.21 m (c), 0.28 m (d) and 0.35 m (e) from the surface of water

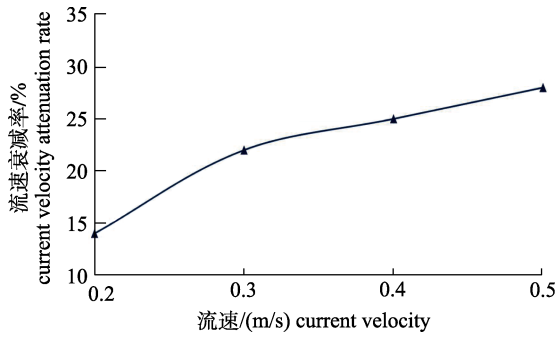


图 16 系缚方式为 0503 时流速衰减率曲线
Fig. 16 Current velocity attenuation rate curve under fixing mode of 0503

5 小结

本研究以大型全潜式钢结构网箱网衣系统的系缚方式为主要研究对象, 通过仿真与实验相结合的方式研究了水流作用下, 四周刚性固定的柱-网结构模型中网衣系缚方式对网衣受力特性以及流场流速衰减的影响。

实验发现, 当左右或上下两侧系缚点数量一定时, 网衣中间位置系缚点的受力最大, 整体呈现出两端系缚点受力小中间受力大的对称现象; 当系缚点数量增多时, 若采用等间距的方法布置各个系缚点, 则不利于系缚点间受力的均匀性; 当上下或左右两侧系缚点数量不同时, 若对另外两侧系缚点数量和系缚方式进行相同的变化, 则对网衣系缚点受力均匀性的影响也相似。

根据仿真结果可知, 网衣最大张力一般分布在与系缚点相连的网线上, 而且越靠近中间位置的网线其受力越大; 在网衣背流侧靠近网衣沿水流方向投影的中心位置处, 流场受网衣阻流效应的影响会更大, 流速衰减率也更高, 而且在同种工况下, 随着流速的变大, 网衣对流场流速的衰减效应越明显, 流速衰减率也越大。

参考文献:

- [1] 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. [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.]
- [2] Huang L Y, Liang Z L, Wan R, et al. Tension of anchor lines of single gravity grid mooring cage under combining effects of wave and current[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(3): 636-645. [黄六一, 梁振林, 万荣, 等. 波浪作用下网格锚泊的单个重力式网箱缆绳张力[J]. 中国水产科学, 2011, 18(3): 636-645.]
- [3] Moe-Føre H, Lader P F, Lien E, et al. Structural response of high solidity net cage models in uniform flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 65: 180-195.
- [4] Zhang F Y. Experimental study about the influence of weight system on net deformation of deep-water gravity cage[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. [张福友. 深水重力式网箱配重形式对网衣变形影响的实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.]
- [5] Sun L. Tension characteristics of gravity net cage with the mooring system[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. [孙磊. 重力式网箱锚碇系统锚绳张力特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.]
- [6] Zhao Y P, Guan C T, Bi C W, et al. Experimental investigations on hydrodynamic responses of a semi-submersible offshore fish farm in waves[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(7): 238.
- [7] Huang X H, Liu H Y, Hu Y, et al. Hydrodynamic performance of a semi-submersible offshore fish farm with a single point mooring system in pure waves and current[J]. Aquacultural Engineering, 2020, 90: 102075.
- [8] Zhao Y P, Bi C W, Dong G H, et al. Three dimensional numerical simulation of the flow field around fishing net panel[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(5): 606-613. [赵云鹏, 毕春伟, 董国海, 等. 平面网衣周围流场的三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2011, 26(5): 606-613.]
- [9] Wang X Y. Numerical simulation research about the interaction between plane mesh and water flow based on SPH method[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2015. [王翔宇. 基于 SPH 方法的平面网衣与水流相互作用数值模拟研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2015.]
- [10] Yao Y M. Research on numerical modeling of hydroelastic characteristics of pelagic trawl gear system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. [姚叶明. 拖网网具系统水弹性力学特性的数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.]
- [11] Chen H, Christensen E D. Investigations on the porous resistance coefficients for fishing net structures[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 65: 76-107.
- [12] Chen H, Christensen E D. Development of a numerical model for fluid-structure interaction analysis of flow through and around an aquaculture net cage[J]. Ocean Engineering, 2017, 142: 597-615.
- [13] Martin T, Kamath A, Bihs H. A Lagrangian approach for the coupled simulation of fixed net structures in a Eulerian fluid model[J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 94: 102962.
- [14] Chen T H. Study on hydrodynamic characteristics of pile-column type net enclosure aquaculture facility[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2017. [陈天华. 桩柱式围网养殖系统水动力特性研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.]
- [15] Suzuki K, Takagi T, Shimizu T, et al. Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets[J]. Fisheries Science, 2003, 69(4): 695-705.
- [16] Takagi T, Suzuki K, Hiraishi T. Development of the numerical simulation method of dynamic fishing net shape[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 2002, 68(3): 320-326.
- [17] Wan R, Hu F X, Tokai T. A static analysis of the tension and

- configuration of submerged plane nets[J]. Fisheries Science, 2002, 68(4): 815-823.
- [18] Yao Y M, Chen Y L, Zhou H, et al. Numerical modeling of current loads on a net cage considering fluid-structure interaction[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 62: 350-366.
- [19] Chen Y L, Yao Y M. Numerical modelling of trawl net considering fluid-structure interaction based on hybrid volume method[J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2020, 20(1): 39-50.
- [20] 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.

Study on fixing modes of netting for the fully submerged cage based on OpenFOAM

ZHU Chuanzhi¹, YANG Yongchun¹, HUANG Liuyi², WANG Gang²

1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: This paper studies the fixing modes of netting for the fully submerged cage. The forces on the tie points of column-net structure model under different current velocities and fixing modes were measured using physical model tests. The effects of different fixing modes on the force distribution characteristics on net tie points and the uniformity of forces among the tie points were analyzed. In addition, for further study of the interaction between the net fixing mode and surrounding water, this paper builds a fluid-structure coupling model of the net based on a hybrid volume method, and develops the fluid-structure coupling solver in the open source CFD software OpenFOAM. The influence of the net on the current velocity reduction, the tension distribution characteristics of the net and the transmission of load were studied through the combination of numerical simulation and model tests. The results showed that the fixing mode of the net has a significant influence on the force characteristics of the net in the column-net structure model. The maximum net tension is generally distributed on the net twines connected to the tie points. Additionally, the closer to the middle position the net twines are, the greater the force, showing a symmetry phenomenon in that force of the tie points at the two ends was small while that in the middle was large. The current velocity in the downstream near the normal line at the center of net was affected by reducing the net flow, and the velocity attenuation rate was also increased. These results can provide references for the design, construction, and safety performance evaluation of deep-sea cages.

Key words: fully submerged cage; fixing mode; model test; OpenFOAM; net fluid-structure coupling

Corresponding author: YANG Yongchun. E-mail: yycyw@ouc.edu.cn