

文章编号: 1007-7294(2025)10-1560-12

大型养殖网箱网衣水动力载荷研究

申 辉, 王 雨, 罗 翔, 曹淑刚

(龙源(北京)新能源工程设计研究院有限公司, 北京 100034)

摘要: 网衣是一种复杂的柔性结构体, 在数值模拟中拖曳力系数的选取对于网衣载荷计算和变形模拟十分关键。通过在实际海域的网衣挂片试验获得真实的网衣样本, 在实验室开展网衣载荷研究, 确定不同海生物附着条件下网衣的拖曳力系数, 数值模拟中采用莫里森模型的网衣等效方法, 对 5 万方的大型养殖网箱网衣水动力载荷进行分析。计算结果表明, 大量海生物附着网衣(密实度 0.69)条件下的网箱载荷比少量海生物附着网衣(密实度 0.28)条件的网箱载荷提高了 60% 以上, 通过优化网箱的网衣布置可以降低网箱设计尺寸。

关键词: 网衣; 密实度; 莫里森模型; 水动力载荷; 海生物附着

中图分类号: P751 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.10.006

Hydrodynamic analysis of fishnet on huge offshore aquaculture platforms

SHEN Hui, WANG Yu, LUO Xiang, CAO Shu-gang

(Longyuan (Beijing) New Energy Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100034, China)

Abstract: Fishnet is a complicated flexible structure, and the drag force coefficient is important for the cage netting load calculation and deformation in the numerical simulation. Firstly, the actual netting samples were obtained through the netting patch hanging test in the open sea area, then they were studied in the laboratory to determine the drag coefficient under different marine growth conditions. The equivalent method of the netting in Morrison model was introduced in the numerical simulation to analyze the hydrodynamic load of the fishnet on the 50,000-cubic meter huge aquaculture cage. The results show that the cage netting load under large amounts of marine growth (solidity=0.69) can be 60% higher than that of the netting under small amounts of marine growth (solidity=0.28), and that the design size of the net rope can be reduced by optimizing the layout of the netting in the cage design.

Key words: fishnet; solidity; Morrison model; hydrodynamic load; marine growth

0 引 言

近些年来, 经济社会的发展使得人们对海水产品的需求刚性增长, 在陆域与近海养殖空间趋紧的情况下, 水产养殖逐步走向深远海, 越来越多的网箱养殖平台选择建设在开敞海域^[1]。由于波浪和水流的作用开敞海域条件下, 网箱内部和外部的水流能够持续进行交换, 为鱼类提供了理想的养殖环境。但

收稿日期: 2025-04-19

基金项目: 国家能源集团科技创新项目资助(E669000040)

作者简介: 申 辉(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 通讯作者, E-mail: shenhui5@foxmail.com;

王 雨(1980-), 男, 高级工程师; 罗 翔(1988-), 男, 工程师; 曹淑刚(1988-), 男, 高级工程师。

是同样地, 柔性结构的网衣在高海况, 尤其是高流速的流载荷作用下, 网衣会产生较大的变形, 网箱也会受到较大的环境载荷, 对网衣尺寸和网箱设计提出了较高的要求^[2]。

目前有很多学者对于网箱的网衣水动力进行了广泛的研究。针对纯流载荷作用下的网衣, Cheng 等^[3]总结了目前常用的 11 种水动力模型, 包括 5 种莫里森(Morison)模型和 6 种平面(Screen)模型, 并将有限元求解器模拟的数值结果和试验数据进行了比较; 俞嘉臻等^[4]采用多孔介质模型对网衣结构阻力系数进行了研究, 结果表明网衣密度对网衣结构的升阻力影响较大。桁架类网箱结构坚固, 能够承受更大的风浪条件, 是目前大型养殖网箱的主流选择。吴皓等^[5]提出了一种耦合的莫里森模型和平面模型对桁架式网箱进行水动力载荷分析; 俞俊等^[6]采用莫里森模型对大型框架式渔业平台的主体框架和网衣进行了水动力特性分析, 并设计了一套复合系泊系统。

在前述的诸多研究中, 网箱网衣的拖曳力系数一般根据行业规范选取, 而没有考虑到网箱养殖平台实际区域的特点。范晓旭等^[7]的研究表明, 不同材质网衣的海生物附着有着明显的地理性和时间性。而海生物附着会显著改变网衣的水动力特性, 因而拖曳力系数的选取对于网衣载荷分析计算至关重要。

本文对 5 万方大型桁架式养殖网箱的网衣水动力载荷进行计算和评估。一方面结合现场网衣挂片试验和实验室物模试验获得的网衣载荷数据, 确定不同海生物附着条件下的网衣拖曳力系数; 另一方面采用莫里森模型的方法建立网衣数值模型, 对网箱的水动力载荷进行分析研究, 并设计合适的网纲尺寸。

1 计算理论

平面模型通过将网衣划分为独立个体的“平板”计算得到总的网衣载荷, 这就需要在数值仿真软件中定义一种特殊的单元类型, 目前只有较少的软件可以实现这种模拟方式。而在莫里森模型中, 网衣上的载荷可视为所有网线上的力的载荷的叠加, 这种模型的模拟方式与常用软件的结构模型一致, 因此可以直接将莫里森模型应用到有限元求解器中来计算水动力载荷。

一般地, 网衣单元上的水动力载荷可分为两大部分: 惯性力 F_I 和粘性力 F_V ^[8]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_I + \mathbf{F}_V \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_I = C_m \rho \nabla \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - (C_m - 1) \rho \nabla \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_V = \frac{1}{2} C_d \rho A |\mathbf{u} - \mathbf{v}| (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (3)$$

式中, C_m 为惯性系数 ($C_m = C_a + 1$), ρ 为流体密度, ∇ 为网衣浸水后的体积, A 为参考面积 (网线投影面积或网衣平面面积), \mathbf{u} 为流体速度矢量, \mathbf{v} 为网衣结构速度矢量。

对于网衣结构, 其网线直径远小于波高, 因此与粘性力相比, 其惯性力可以忽略不计。本研究中, 重点关注网衣结构上的粘性力, 而将其惯性系数 C_m 取为固定值 2。

1.1 莫里森模型

在莫里森模型中, 作用在网线单元上的粘性力通常可分解为两部分: 法向拖曳力 F_n 和切向拖曳力 F_t :

$$F_n = \frac{1}{2} C_n \rho L d_w |\mathbf{u}_n^r| \mathbf{u}_n^r \quad (4)$$

$$F_t = \frac{1}{2} C_t \rho L d_w |\mathbf{u}_t^r| \mathbf{u}_t^r \quad (5)$$

式中, d_w 为网线直径; L 为半目长度; ρ 为流体密度; \mathbf{u}_n^r 和 \mathbf{u}_t^r 分别为流体相对于网线的法向速度和切向速度; C_n 和 C_t 分别为法向和切向拖曳力系数, 如图 1 所示, 其中 α 为流速和网线之间的夹角。

一般地, Huse 模型^[9]可以用来考虑网衣上

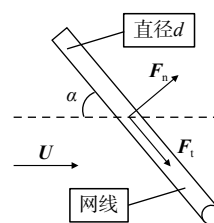


图 1 莫里森单元水动力载荷的二维示意图

Fig.1 Hydrodynamic load on 2-D Morison element

下游之间的尾流干扰响应。Huse 模型仅考虑尾流拖曳力的衰减,而不考虑尾流升力的变化,其数学模型可以表述为

$$v_d(x,y) = v_{d0}(x,y) - k_2 v_{u0} \left(\frac{C_{Du} d_u}{x_s} \right)^{1/2} \exp\left(-k_3 \left(\frac{y}{b}\right)^2\right) \quad (6)$$

$$x_s = x + 4 \frac{d_u}{C_{Du}} \quad (7)$$

$$b = k_1 (C_{Du} d_u x_s)^{1/2} \quad (8)$$

式中,大写的下标D表示拖曳力,小写的d表示拖曳力直径,小写的下标u和v表示上游和下游,下标0表示不考虑尾流效应。例如, $v_{d0}(x,y)$ 表示下游位置 (x,y) 处不考虑尾流效应的流速。通过常数 k_1 、 k_2 和 k_3 来定义 Huse 模型。

1.2 网衣等效法

全尺度的网衣是由成千上万根网线组成的,在数值模型中建立与实际模型一致的网衣是非常困难的,因此通常采用网衣分组等效的方法来减少数值模拟计算量。在等效中为采用如下假设确保数值模型和实际模型的一致性,包括:

- (1) 流体密度(ρ_{fluid})一致;
- (2) 流体速度(\mathbf{u})一致;
- (3) 网线密度(ρ)一致;
- (4) 网线杨氏模量(E)一致。

一般地,在网衣上布置网纲用于加固网衣,提高网衣的承载力。本方法将网衣等效到网纲上,等效前后单位长度网衣的质量分别为 M 和 M_e , 可表示为

$$M = N \times \frac{\pi}{4} \times d^2 \times \rho \times g + \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \rho \times g \quad (9)$$

$$M_e = \frac{\pi}{4} \times D_e^2 \times \rho \times g \quad (10)$$

为保持等效前后网衣的质量矩阵一致,即 $M = M_e$, 需要等效直径 D_e 满足:

$$D_e^2 = N \times d^2 + D^2 \quad (11)$$

根据粘性力公式(4)和(5),等效前后网衣受到的环境载荷分别为 F 和 F_e , 可表示为

$$F = N \times \frac{1}{2} \times C_{dt} \times \rho \times u^2 \times d \times l + \frac{1}{2} \times C_{dg} \times \rho \times u^2 \times D \times l \quad (12)$$

$$F_e = \frac{1}{2} \times C_{de} \times \rho \times u^2 \times D_e \times l \quad (13)$$

为保持等效前后网衣受到的环境载荷一致,即 $F = F_e$, 需要等效拖曳力系数 C_{de} 满足:

$$C_{de} = (N \times C_{dt} \times d + C_{dg} \times D) / D_e \quad (14)$$

那么,最终等效后的网衣水动力直径 D_h 可表示为

$$D_h = C_{de} \times D_e \quad (15)$$

其中, N 为网线数量, d 为网线直径, D 为实际网纲直径, D_e 为等效网纲直径, C_{de} 为等效网纲拖曳力系数, C_{dt} 为网线拖曳力系数, C_{dg} 为实际网纲拖曳力系数。等效示意图如图 2 所示。

一般地, C_{dt} 和 C_{dg} 初始设定为 1.0, 在数值模拟中需要根据试验数据确定等效模型对应的拖曳力系数 C_d , 然后根据公式(4)和(5), 以及公式(15)得到的水动力直径 D_h 来计算等效后的网衣水动力载荷。

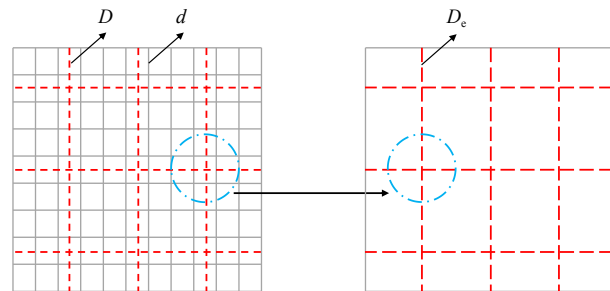


图2 网衣等效法

Fig.2 Equivalent method of fishnet

上述网衣等效方法中,保证了网衣等效前后的总质量和所有网衣受到的总波浪载荷相等。在网衣刚度模拟上,根据网线杨氏模量和网衣等效直径计算得到网衣等效后的刚度。

2 对比验证

2.1 模型试验

在实际海洋环境条件下,网衣上经常会有大量的海生物附着,会对网衣受到的环境载荷产生极大的影响。通过在实际海域进行网衣挂片试验以获取真实的海生物附着样本,然后在实验室进行网衣载荷试验,分析结果并选取合理的数值模型参数。

试验中采用的网衣挂片的尺寸为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,其材质由帝斯曼迪尼玛(DSM Dyneema[®])制成的超高分子量聚乙烯材料(UHWMPE),网衣结构为四边形网目,网衣目长 $2a$ 为 75 mm ,网线裸线直径 d 为 3 mm ,密度 ρ 为 970 kg/m^3 ,具体形状如图 3 所示。

一般地,用密度 S_n 来表示网衣网线的投影面积(Projected)与网衣整体轮廓面积(Outline)的比值。当海生物附着在网衣上时,会增大网衣的投影面积,因此可以用密度来反映海生物附着的程度。

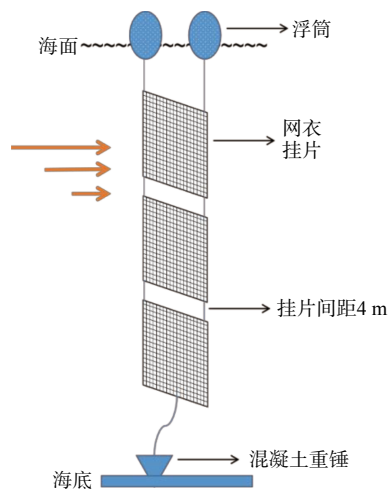
$$S_n = A_{\text{投影面积}} / A_{\text{轮廓面积}} \quad (16)$$

在目标海域秋季进行了一个月的现场挂网试验,挂网材料垂直方向上分为表、中、底 3 层,每层间隔约 4 m ,挂网材料与海面垂直布放,其上部通过缆绳与浮筒连接固定,底部通过悬挂混凝土重锤于底泥中,使得挂网材料能够随潮水涨落。如图 4 所示,左图展示了网衣挂片的竖直布放方式原理,右图中为海面上连着网衣挂片的浮筒。取样时使用船舶起锚机将缆绳拉出海面取样网衣,并分解为单个网衣材料,然后平铺包装在聚乙烯密封袋中,分类编号带回实验室待分析。



图 3 网衣示意图

Fig.3 Part of fishnet



(a) 网片竖直布置原理图



(b) 现场布放效果图

图 4 网衣布置和海试试验

Fig.4 Netting arrangement and field test

图 5 中展示了现场挂网试验后取回的网衣样本。从图中可以明显看到秋季第 2 周时网片上仅有较少海生物附着,与初始时洁净的网片差别不大,但是第 4 周时网片上已经有大量的海生物附着。

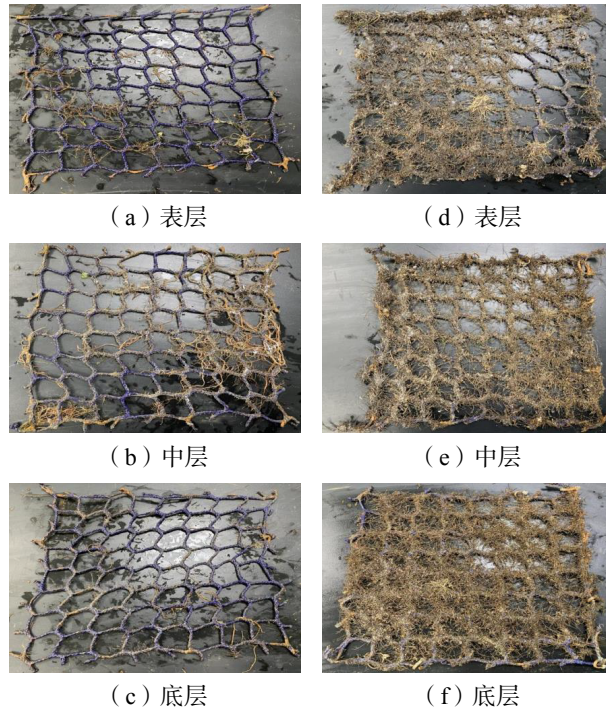


图5 超高分子量聚乙烯网衣海生物附着情况
Fig.5 UHMWPE netting with marine growth

本文基于计算机识别的技术来计算海生物附着后网衣的密实度: 首先, 将网衣图像导入程序中, 并计算网衣区域的面积(D_1)。接着, 利用大津算法(Otsu's method)对图像进行处理, 将图像中的物体与背景进行分割, 从而计算得到海生物附着及网衣的总面积(D_2)。图像 OTSU 自动阈值分割效果图如图 6 所示。

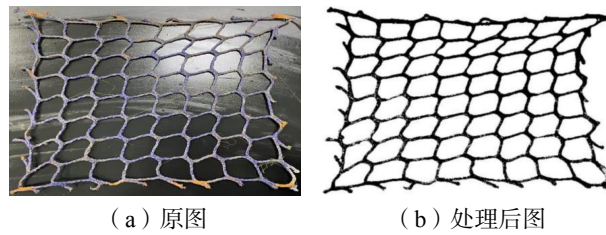


图6 图像处理计算密实度示意图
Fig.6 Schematic diagram of solidity calculation

利用图像法进行密实度计算的公式为

$$S_n = D_2/D_1 \tag{17}$$

网衣洁净状态下计算得到的密实度为 0.23。对现场挂网试验的网衣样本进行密实度计算, 结果如表 1 所示。

表 1 网衣样本密实度

密实度	第2周	第4周
表层	0.25	0.42
中层	0.27	0.49
底层	0.28	0.69

可以看到, 挂网时间节点为第 2 周和第 4 周时海生物附着量最大的网衣均发生在底层挂片上, 相比于洁净网衣, 密实度分别增加了 22% 和 200%。分别选择对应的底层网衣在实验室循环动水槽试验

设备中对网衣挂片进行室内水阻力模型试验,相关试验装置如图 7(a)所示,图 7(b)中箭头为水流方向,冲角 α 表示水流和网衣挂片的夹角,冲角 90° 条件下水流方向和网衣挂片成垂直关系。

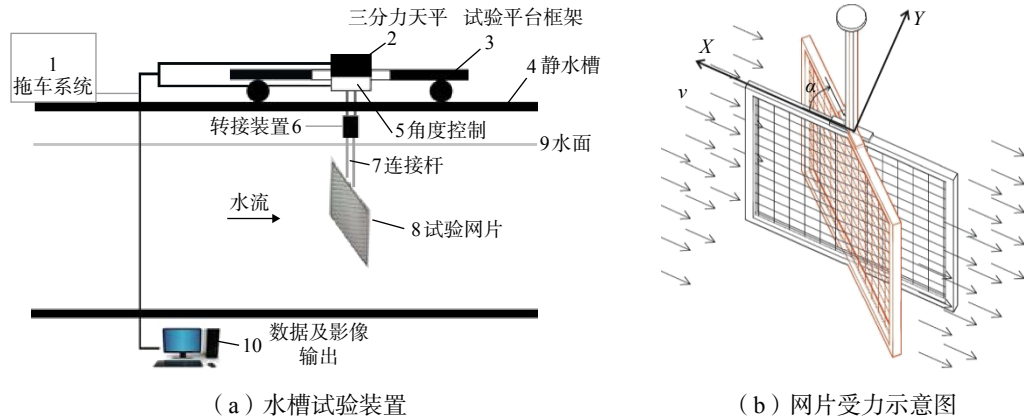


图 7 网片水动力试验示意图

Fig.7 Laboratory load test on netting patch

在实验室中,选择了 4 种试验流速分别为 0.6 m/s、0.8 m/s、1.0 m/s 和 1.2 m/s 以研究不同流速下网衣对应的水动力数据,同时选择了 4 种冲角分别为 45° 、 60° 、 75° 和 90° 以获得网衣平面在不同流向作用下的网衣受力,为整体网衣在不同方向迎流状态下的受力提供依据。

网衣挂片试验的结果分别见表 2 少量微生物附着(密实度 0.28)情况下的网衣受力和表 3 大量微生物附着(密实度 0.69)情况下的网衣受力。

表 2 第 2 周超高分子量聚乙烯网衣受力数据表 (单位: N)
Tab.2 Load on UHMWPE netting of 2nd week (Unit: N)

冲角/ ($^\circ$)	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			
	0.6	0.8	1.0	1.2
90	5.70	10.19	15.86	22.07
75	5.27	9.77	14.56	20.86
60	4.65	8.39	12.80	18.11
45	3.83	7.00	10.74	14.62

表 3 第 4 周超高分子量聚乙烯网衣受力数据表 (单位: N)
Tab.3 Load on UHMWPE netting of 4th week (Unit: N)

冲角/ ($^\circ$)	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			
	0.6	0.8	1.0	1.2
90	10.45	18.62	28.64	38.99
75	9.67	16.69	26.01	35.76
60	8.00	14.39	22.05	30.33
45	6.31	10.88	17.11	22.92

2.2 数值模型

本文采用莫里森模型在商业软件 OrcaFlex 中进行网衣的数值模拟分析。首先通过和模型试验结果对比分析来获取不同海生物附着条件下网衣的实际拖曳力系数。分别建立和网衣挂片网线单元长度 3.75 cm 相同的等尺度模型,以及采用等效网衣法建立的等效网线单元长度为 10 cm 的验证模型,如图 8 所示。网衣挂片尺寸为 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}$,对于网线单元长度 3.75 cm 模型,其竖向和横向均有 8 个单元;对于网线单元长度 10 cm 模型,其横向和竖向均有 3 个单元。

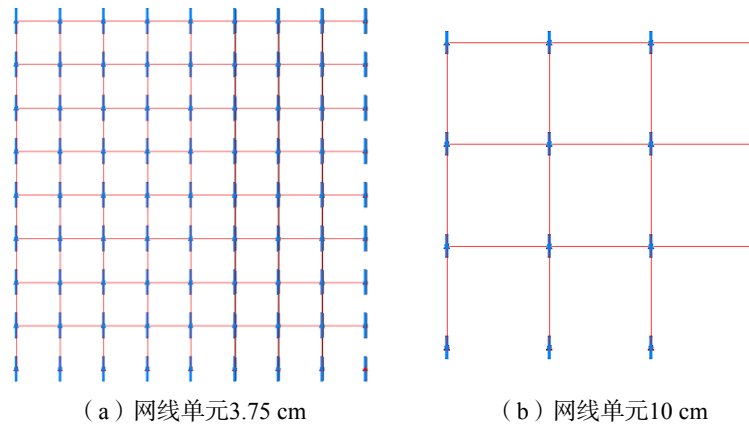


图 8 等效网线单元数值模型

Fig.8 Equivalent model of netting segment

网线采用 Line 单元进行模拟, 见图 8 中细线浅色部分, 其相关属性通过本文的网衣等效法进行计算得到, 如表 4 所示。网线结点采用 3D Buoy 单元进行模拟, 见图 8 中粗线深色部分, 该单元设置为 0 质量节点, 仅用于连接相邻的网线, 其各项水动力参数均为 0。

表 4 等效水动力参数

Tab.4 Equivalent hydrodynamic parameters

	等效直径 D_e / mm	等效拖曳力系数 C_{de}	水力直径 D_h / mm
网线单元 3.75 cm	3.00	1.00	3.00
网线单元 10 cm	4.90	1.63	8.00

2.2.1 少量海生物附着 (密实度 0.28)

秋季第 2 周为少量海生物附着(密实度 0.28)时的情况, 经过分析试算, 采用拖曳力系数 C_d 为 2.2 时的静态载荷分析结果如表 5 所示。

表 5 第 2 周网线单元 3.75 cm 时数值模型结果 (单位: N)

Tab.5 Load on 2nd week netting segment length 3.75 cm (Unit: N)

冲角 / (°)	流速 / (m · s ⁻¹)			
	0.6	0.8	1.0	1.2
90	5.84	10.37	16.20	23.31
75	5.60	9.94	15.53	22.35
60	4.94	8.78	13.72	19.75
45	4.10	7.28	11.38	16.38

与表 2 结果对比, 表 6 给出了网线单元 3.75 cm 时数值模型结果与试验结果误差分析结果, 可以看出, 数值模型分析结果与试验结果吻合度较高; 随着冲角变小, 误差有增大的趋势。表中误差百分比的计算方法为

$$\text{误差百分比} = (\text{数值结果} - \text{试验结果}) / \text{试验结果} \times 100\% \tag{18}$$

作为对比, 网线单元 10 cm 的数值模型分析结果如表 7 所示。

表 6 第 2 周网线单元 3.75 cm 时数值模型结果与试验结果误差

Tab.6 Error of the numerical results and test results on 2nd week netting segment length 3.75 cm

冲角 / (°)	流速 / (m · s ⁻¹)			
	0.6	0.8	1.0	1.2
90	3%	2%	2%	6%
75	6%	2%	7%	7%
60	6%	5%	7%	9%
45	7%	4%	6%	12%

表 7 第 2 周网线单元 10 cm 时数值模型结果 (单位: N)
Tab.7 Load on 2nd week netting segment length 10 cm (Unit: N)

冲角/ (°)	流速/ (m·s ⁻¹)			
	0.6	0.8	1.0	1.2
90	5.84	10.38	16.21	23.33
75	5.60	9.95	15.53	22.36
60	4.94	8.79	13.72	19.76
45	4.10	7.28	11.38	16.38

由表 5 和表 7 的结果对比分析可以看出, 网线单元 3.75 cm 数值模型和 10 cm 数值模型分析得到的载荷均基本一致, 表明上述网衣等效方法合理, 可适用于任意网线单元长度的模型。

2.2.2 大量海生物附着 (密实度 0.69)

秋季第 4 周为大量海生物附着(密实度 0.69)时的情况, 经过分析试算, 采用拖曳力系数 C_d 为 4.0 时的静态载荷分析结果如表 8 所示。

表 8 第 4 周网线单元 10 cm 时数值模型结果 (单位: N)
Tab.8 Load on 4th week netting segment length 10 cm (Unit: N)

冲角/ (°)	流速/ (m·s ⁻¹)			
	0.6	0.8	1.0	1.2
90	10.63	18.89	29.52	42.51
75	10.18	18.10	28.29	40.74
60	8.99	15.98	24.98	35.96
45	7.44	13.23	20.67	29.77

表 9 给出了网线单元 10 cm 时数值模型结果与试验结果误差分析结果。综合表 8 和表 9 的结果, 可以看出该数值模型分析结果与试验结果在大冲角情况下吻合度较高, 随着冲角的减小和流速的增大, 误差也随之增大。分析可能原因在于大量海生物附着时, 由于网衣的阻塞效应, 随着冲角的减小, 更多的水流绕过网衣, 因此实际作用在网衣上的载荷较小, 而软件的算法不能考虑这种绕流效应, 因此数值模拟结果普遍较大。

表 9 网线单元 10 cm 时数值模型结果与试验结果误差

Tab.9 Error of the numerical results and test results on netting segment length of 10 cm

冲角/ (°)	流速/ (m·s ⁻¹)			
	0.6	0.8	1.0	1.2
90	2%	1%	3%	9%
75	5%	8%	9%	14%
60	12%	11%	13%	19%
45	18%	22%	21%	30%

因此, 在网衣大量海生物附着的情况下, 对于高流速小冲角的工况, 采用固定数值拖曳力系数的模型得到的结果偏于保守。

3 网箱网衣载荷

在验证了等效方法的合理性和获取了不同海生物附着条件下网衣的拖曳力系数后, 针对目标海域

开展5万方水体养殖网箱的网衣水力载荷评估。

3.1 环境条件

网箱所在位置处平均水深约为-18.5 m,采用50年一遇的设计环境条件如表10所示。

表10 设计环境条件

Tab.10 Design environmental conditions

有义波高 H_s/m	最大波高 H_{max}/m	谱峰周期 T_p/s	表层流速/ $(m \cdot s^{-1})$	底层流速/ $(m \cdot s^{-1})$
5.45	10.53	8.72	3.05	1.98

3.2 数值模型

养殖网箱为正方体构型,养殖水域体积为 $60 m \times 60 m \times 14 m = 50\,400 m^3$ 。选取的等效网线单元长度为5 m,网线的顶边、底边和角边均固定,其它的网线均可自由活动,模型中等效网线单元总计576个。建立的模型示意图如图9所示。

总体坐标轴 $OXYZ$ 位于网箱的中心,网箱顶边位于海平面处。环境条件方向沿 X 轴正向传播为正,采用右手坐标系原则,逆时针角度为正。在数值模拟中为保守考虑,假定环境条件波浪和流方向一致。波浪采用非线性规则波(Dean Stream)进行模拟,模拟时长为5个波浪周期。流速采用剖面流(7阶Power Law)进行模拟。同时,在数值模型中采用Huse尾流模型来考虑上游对下游产生的尾流影响,以网箱中心线将数值模型平均分为上下游两大区域。以环境方向的上游设置为尾流产生区域,该区域的所有网线会产生尾流;下游设置为尾流作用区域,该区域的所有网线会受到上游尾流的影响。网箱中心线的选取依赖于环境方向的角度,图10中展示了90度环境条件下的尾流模型。

由于OrcaFlex软件中仅能考虑两两Line单元之间的尾流影响,因此在设置的下游区域,软件自动选择最大的尾流响应(最大的速度衰减)来进行分析。在本文中通过设置常数 $k_1 = 0.25$, $k_2 = 1.0$, $k_3 = 0.693$ 来定义Huse尾流模型。

3.3 分析结果

假定环境条件方向为90度,即沿 Y 轴正向,分别对海生物附着程度为少量和大量这两种工况条件下的网箱整体水平载荷进行分析,得到的结果如表11所示。

表11 网箱整体水平载荷

Tab.11 Horizontal load on cage

海生物附着程度	网箱水平载荷/t		等效网线张力/t	实际网线张力/t
	平均值	最大值	最大值	最大值
少量(密实度0.28)	832	1201	31	0.23
大量(密实度0.69)	1384	1969	51	0.38

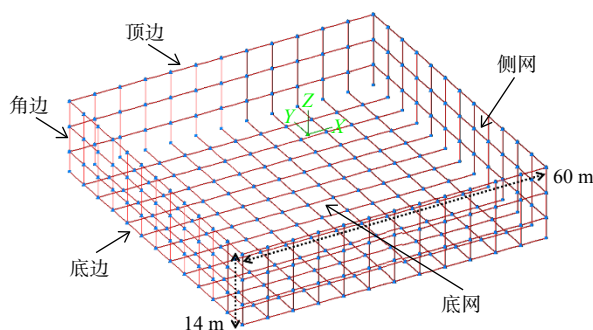


图9 5万方网箱数值模型

Fig.9 Numerical model of 50,000-cubic-meter cage

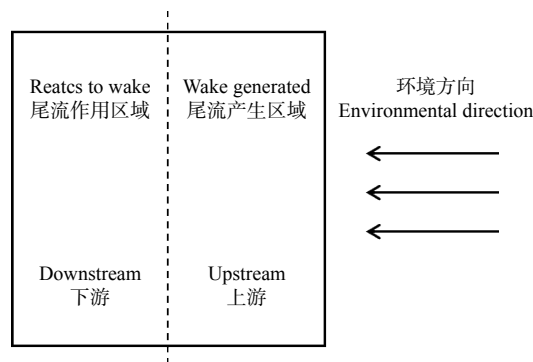


图10 网箱尾流模型

Fig.10 Wake model of cage

可以看到,大量海生物附着条件下的网箱载荷比少量海生物附着网衣条件的网箱载荷提高了 60% 以上。海生物附着显著影响了网箱的整体受力情况,因此在实际项目中,有必要选择网衣在大量海生物附着条件下的工况作为典型设计工况。

以大量海生物附着网衣工况为例,对模型中所有等效网线单元的载荷进行统计分析,得到的结果如下:

- 载荷为 0~9 t 的网线数量为: 246, 占比为 42%;
- 载荷为 10~19 t 的网线数量为: 171, 占比为 29%;
- 载荷为 20~29 t 的网线数量为: 87, 占比为 15%;
- 载荷为 30~39 t 的网线数量为: 52, 占比为 9%;
- 载荷为 40~49 t 的网线数量为: 17, 占比为 2%;
- 载荷为 50~59 t 的网线数量为: 3, 占比为 0%。

部分网线受到的载荷较大,从图 11 也可以看出,下游区域网线变形较大,但是载荷较低,而最大网线载荷发生在上游迎流区域的底网的网线上,且集中在极少数目的网线上。主要原因在于底网面积较大,因环境方向前端处网线受到后部网线的拖拉作用,使得承受的载荷更大,有必要进行优化设计以降低集中载荷。

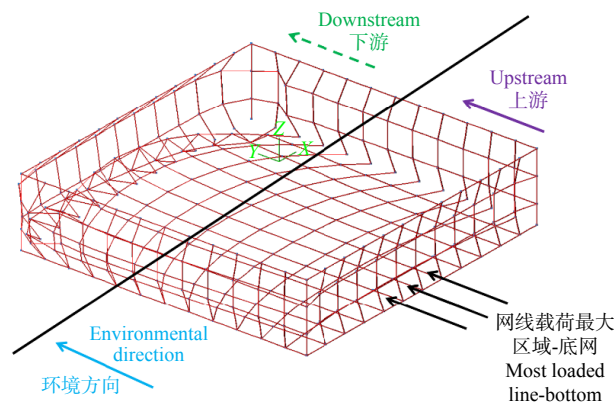


图 11 大量海生物附着工况网箱变形结果

Fig.11 Deformation of cage under large amounts of marine growth

根据 DNV-OTG-24 技术指南^[10],网衣的安全系数要求如表 12 所示。

表 12 网衣安全系数

Tab.12 Safety factors of fishnet

极限状态	成分	载荷系数	材料系数	安全系数
ULS作业工况	网线	1.25	1.54	1.91
	纲绳	1.30	3.00	3.90

那么对于网衣的设计需要满足以下公式:

$$\text{等效网线张力} \leq \text{设计网线张力} / \text{网线安全系数} + \text{设计网纲张力} / \text{纲绳安全系数} \quad (19)$$

首先根据所选的网衣材料确定能够承受的设计网线张力,对于等效网衣模型,设计网线张力为实际网衣破断强度和该区域等效网线的数量之积,然后通过数值模型计算分析设计环境条件下的等效网线张力,根据表 12 的安全系数和公式(19)计算得到设计网纲张力,最后从厂商提供的网纲产品目录选取合适的设计网纲尺寸。根据上述公式,初步设计得到的网纲尺寸如表 13 所示。

表 13 网纲尺寸设计

Tab.13 Size design of net rope

实际网衣破断强度/t	设计网线张力/t	网线安全系数	设计网纲张力/t	网纲安全系数	设计网纲尺寸/mm
0.25	33	1.91	132	3.9	40

3.4 优化设计

考虑到初步设计的网纲尺寸 40 mm 较大,而最大网线载荷仅发生在上游迎流区域的底网的少数网线上,由于底网目前设计为一块整体网衣,因此考虑将底网分块布置以降低网线集中载荷。将底网分为四个区域,中部网线固定布置,主要目的是减小网衣变形,使得网衣各区域间降低相互的拖拉影响,如图 12 所示。

方案优化后,重新对网箱整体进行分析,得到的结果如表 14 所示。

表中结果表明,与原方案相比,优化后的网箱水平载荷最大值提高了 20%,但是等效网线张力最大值却降低了 30%。这表明,将一块大整体的网衣分成小块的网衣可以明显降低网线上的最大张力,但是副作用是会提高网箱的整体水平载荷。

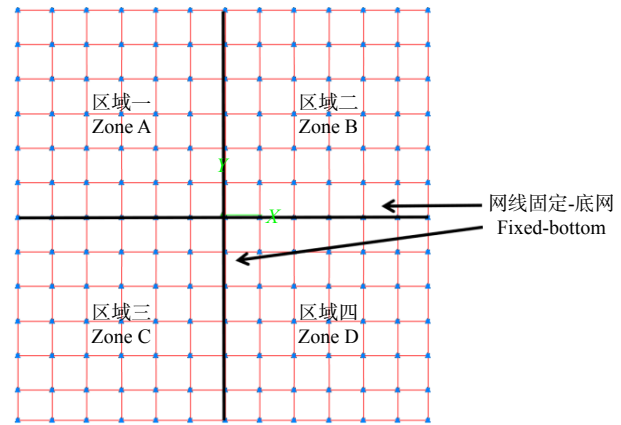


图 12 底网分区优化

Fig.12 Optimization layout of bottom net

表 14 网箱整体水平载荷

Tab.14 Horizontal load on cage

方案	海生物附着程度	网箱水平载荷/t		等效网线张力/t	实际网线张力/t
		平均值	最大值	最大值	最大值
原设计	大量(密实度0.69)	1384	1969	51	0.4
优化后	大量(密实度0.69)	1493	2372	35	0.3

可以看到,方案优化后,网线载荷较为均衡,约 20% 的网线承担较大的载荷。重新对网纲尺寸进行设计,结果如表 15 所示。对比原方案,优化方案可以明显降低网纲尺寸,并使得网线承担的载荷更加均匀。

对优化方案后所有等效网线单元的载荷统计分析,结果如下:

载荷为 0~9 t 的网线数量为: 344, 占比为 59%;

载荷为 10~19 t 的网线数量为: 105, 占比为 18%;

载荷为 20~29 t 的网线数量为: 71, 占比为 12%;

载荷为 30~39 t 的网线数量为: 56, 占比为 9%。

表 15 网纲尺寸优化

Tab.15 Size optimization of net rope

实际网衣破断强度/t	设计网线张力/t	网线安全系数	设计网纲张力/t	网纲安全系数	设计网纲尺寸/mm
0.25	33	1.91	71	3.9	28

最后,将网衣和优化设计的网纲综合考虑,采用网衣等效法建模对网箱整体载荷进行分析,并对所选网纲尺寸的载荷重新进行规范校核,计算结果和规范校核表明选用的 28 mm 网纲尺寸满足设计要求。在此过程中,如果不满足则需重新设计网纲尺寸,进行多次迭代设计。

4 结 论

本文基于一种质量和载荷等效的网衣等效法,针对超高分子量聚乙烯材质的网衣(网目尺寸 $2a=75$ mm, 线径 3.0 mm)进行了模型试验和数值模拟对比研究,根据实测数据确定了水动力模型采用

的拖曳力系数,然后评估了 5 万方养殖网箱的水动力载荷。通过研究分析,得出以下主要结论:

(1)网衣数值模拟与网片挂网试验结果对比吻合较好,表明基于质量和载荷等效的网衣等效法合理;

(2)网衣与水流方向为冲角 90° 条件下,对于网衣少量海生物附着的情形(密实度为 0.28),建议网衣拖曳力系数取为 2.2;对于网衣大量海生物附着的情形(密实度为 0.69),建议网衣拖曳力系数取为 4.0。不同海生物附着程度对于网衣的水动力载荷影响较大,有必要根据网箱安装地区的实测数据对拖曳力系数进行修正,实际项目设计中必须考虑网衣大量海生物附着的情形。

(3)针对 5 万方养殖网箱布置,研究发现最大网箱载荷发生在整体面积最大的底网上,将底网分块布置,有利于降低网线的最大载荷,但是会提高网箱的整体水平载荷,因此需要综合考虑网箱整体水平载荷和网纲尺寸以对整体方案进行优化设计。

参 考 文 献:

- [1] 黄小华, 庞国良, 袁太平, 等. 我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 121–131.
Huang Xiaohua, Pang Guoliang, Yuan Taiping, et al. Review of engineering and equipment technologies for deep-sea cage aquaculture in China[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 121–131. (in Chinese)
- [2] Cifuentes C, Kim M H. Numerical simulation of fish nets in currents using a Morison force model[J]. Ocean Systems Engineering, 2017, 7(2): 143–155.
- [3] Cheng Hui, Li Lin, Aarsaether, et al. Typical hydrodynamic models for aquaculture nets: A comparative study under pure current conditions[J]. Aquacultural Engineering, 2020, 90: 102070.
- [4] 俞嘉臻, 张显涛, 李 欣. 聚焦波作用下平面网衣结构的水动力特性研究[J]. 海洋工程, 2022, 40(5): 98–110.
Yu Jiazhen, Zhang Xiantao, Li Xin. Numerical study on the hydrodynamic characteristics of a net structure under focused wave groups[J]. The Ocean Engineering, 2022, 40(5): 98–110. (in Chinese)
- [5] 吴 皓, 刘 强, 范 为. 养殖网箱网纲和网衣水动力载荷研究[J]. 渔业现代化, 2023, 50(5): 43–51.
Wu Hao, Liu Qiang, Fan Wei. Study on hydrodynamic load of ropes and nets of fish cages[J]. Fishery Modernization, 2023, 50(5): 43–51. (in Chinese)
- [6] 俞 俊, 程小明, 张 凯, 等. 大型框架式渔业平台水动力分析及其系泊系统设计[J]. 船舶力学, 2023, 27(10): 1475–1486.
Yu Jun, Cheng Xiaoming, Zhang Kai, et al. Hydrodynamic analysis of huge-framed offshore aquaculture platforms and design of their mooring systems[J]. Journal of Ship Mechanics 2023, 27(10): 1475–1486. (in Chinese)
- [7] 范晓旭, 林 燊, 刘 旦, 等. 超高分子量聚乙烯和铜合金网衣的污损生物附着特征研究[J]. 南方水产科学, 2023, 19(6): 30–37.
Fan Xiaoxu, Lin Shen, Liu Dan, et al. Study on adhesion characteristics of fouling organisms of ultra-high molecular weight polyethylene and copper alloys mesh[J]. South China Fisheries Science 2023, 19(6): 30–37. (in Chinese)
- [8] 莫 兰. 海洋工程水动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
Bernard M. Hydrodynamique des structures offshore[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [9] Huse E. Interaction in deep-sea riser arrays[C]//OTC 7237, 1993, Houston.
- [10] DNV. Offshore technical guidance DNV -OTG-24. Fish escape prevention from marine fish farms[S]. Norway: DNV, 2020.