

系泊方式对深水养殖网箱动力特性影响研究

隋留洋^{1,2}, 黄小华¹, 刘海阳¹, 胡昱¹, 袁太平¹, 王绍敏¹, 陶启友¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部外海渔业开发重点实验室, 广东广州 510300;

2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 针对一种三角形高密度聚乙烯深水养殖网箱, 该研究基于有限元法建立了波浪流作用下网箱动力响应计算模型, 并通过开展模型比尺 1:15 的水池试验, 分析比较了网箱在纯波、波流组合条件下动力响应的计算结果与试验数据, 两者相对误差均在 10% 以内。在此基础上, 考虑原型网箱海况数据, 将波浪要素值取为: 波高 (H) 4~6 m、周期 (T) 9 s、流速 (v) 0.5~1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 分析了单点系泊和多点系泊方式浮架变形以及网箱系泊力的情况, 并进一步探讨了系泊方式对网箱运动特性的影响。结果表明, 波流作用下, 多点系泊布置时的系泊力峰值大于单点系泊情况, 且随着流速和波高的增加, 两者相差幅度增大; 在大浪强流条件 ($H=6$ m, $T=9$ s, $v=1.5$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 下, 多点系泊能在一定程度上降低浮架的变形; 2 种系泊方式对浮架的升沉影响极小, 但多点系泊时浮架在 x 轴上的位移大于单点系泊时, 两者峰值相差 25.64%; 单个周期内网衣平面轮廓图显示网衣的变形程度几乎一致。

关键词: 高密度聚乙烯网箱; 系泊方式; 系泊力; 运动特性; 模型试验; 数值模拟

中图分类号: S 953.9

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of mooring pattern on dynamic characteristics of a deep-water aquaculture cage

SUI Liuyang^{1,2}, HUANG Xiaohua¹, LIU Haiyang¹, HU Yu¹, YUAN Taiping¹, WANG Shaomin¹, TAO Qiyu¹

(1. 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; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: We established a numerical model for calculating the dynamic characteristics of a triangular high-density polyethylene (HDPE) deep-water aquaculture cage in waves and current based on the Finite Element Method. To verify the accuracy of the numerical model, we carried out a series of physical model tests on the single-point mooring (SPM) cage under the conditions of pure wave and combined wave-current, in which the model scale was set at 1:15. The relative error between the numerical and experimental results was within 10%. Afterwards, considering the sea state of the prototype cage, the calculated parameters for waves and currents were as follows: wave height 4–6 m, period 9 s, current velocity 0.5–1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. We analyzed the deformation of the floating collar and the mooring force of the cage with single-point mooring (SPM) and multiple-point mooring (MPM). Besides, we discussed the

收稿日期: 2021-01-28; 修回日期: 2021-03-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(31772897, 31902424); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项资金(2019KJ143); 中国水产科学研究院基本科研业务费(2020TD77); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2021SD10)

作者简介: 隋留洋(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋养殖设施水动力学。E-mail: 18842632117@163.com

通信作者: 黄小华(1982—), 男, 硕士, 研究员, 从事渔业设施工程技术研究。E-mail: huangx-hua@163.com

effect of the mooring pattern on the motion characteristics of the cage. The results show that under the conditions of wave and current, the peak value of MPM force was higher than that of SPM force, and the difference became greater with the increase of velocity and wave height. Under the condition of severe waves and strong currents, the MPM system could reduce the deformation of the floating collar. However, the mooring pattern had little influence on the heave of the cage collar. For the MPM system, the x -axis displacement of the collar was greater than that of the SPM system, in which the difference was 25.64%. During a wave period, the xz plane profiles of the net deformation under sea conditions were almost the same for the two different mooring systems.

Key words: High density polyethylene cage; Mooring mode; Mooring force; Motion characteristics; Model test; Numerical simulation

近年来, 由于海洋渔业资源的减少以及人们对海产品需求的增加, 海洋养殖业正快速发展。网箱养殖作为一种主要的养殖方式, 在我国海水鱼类养殖中占有重要地位, 2019年我国海水鱼类养殖产量为 160.6×10^4 t, 其中网箱养殖产量占比 47.1%^[1]。为了深入研究高海况下海洋荷载对网箱性能的影响, 学者们基于数值模拟、物理模型试验和现场实测对网箱系统的水动力特性进行了大量分析, 以往的研究涵盖了网箱的所有构件, 包括浮架、网衣和系泊系统。Lee 等^[2] 通过数值模型为浮架结构设计提供了有价值的信息。Huang 和 Pan^[3] 基于长周期环境荷载评估了单点系泊系统的锚绳失效风险, 给出了使用期内的失效概率。Shainee 等^[4] 研究了一种自潜式单点系泊网箱系统在波浪下的淹没特性。Fredriksson 等^[5] 利用数值模型和现场实测数据, 研究了大型渔场在无波情况下的系泊系统张力。Zhao 等^[6-7] 基于集中质量法和刚体运动学原理对箱型网箱和圆柱形网箱在波浪和水流中的动力行为进行了分析。Decew 等^[8] 提出了一种声学方法, 用于监测在水流中部署的小型网箱的运动和变形。

然而, 上述大部分研究工作是基于浮架为刚体的假设, 且水动力实验中网箱基本表现为刚体结构^[9-13]。在实际深远海海域, 规格大的网箱在强浪流下会发生较大程度变形, 深入了解浮架变形对网箱系统的可靠性设计至关重要。崔勇等^[14] 基于有限元方法, 对一种双层网底鲆鲽网箱位移与倾角进行了数值求解。Su 等^[15] 开发了一种结合数值模型和定位传感器数据的综合方法来实时监测网箱变形。刘海阳等^[16] 采用数值模型分析了网箱部件在长期交变波浪荷载作用下导致的疲劳破坏问题。Chen 等^[17] 利用三维成像系统提出了一种估计网箱变形的办法。Tang 等^[18] 利用鱼群行为模型研究了鱼群对网箱流场和变形的影响。Dong 等^[19] 将浮架简化为圆环, 基于曲梁理论分析了重力式网箱浮架系统的平面内外变形。Fredriksson 等^[20] 使用有限元建

模方法预测了网箱浮架结构的临界载荷。Li 等^[21] 研究了半潜式网箱系统在波浪和水流中的动力响应。Huang 等^[22] 采用数值模型分析了均匀波流对多点系泊网箱系统的系泊索张力和网衣变形的影响。Kristiansen 和 Faltinsen^[23-24] 提出了一种网衣黏性水动力荷载模型, 研究了在水流和波浪作用下网箱的系泊荷载。

在海洋网箱养殖中, 系泊方式主要包括单点系泊和多点系泊两种。多点系泊易于管理, 但系泊成本较高^[25]; 而单点系泊具有环境友好性, 且系泊成本较低, 但锚绳发生周期性疲劳破坏的机率相对更大^[26]。王绍敏等^[27] 借鉴单点系泊系统, 设计出一种可应用于往复流情况下的新型单锚腿系泊系统, 并通过计算和实测证明了其有效性。梁家铭等^[28] 设计了一种新型网箱浮架系统, 与传统浮架进行了对比, 并对 4 种常见的多点系泊系统进行了比较分析。我国南海海域已有部分养殖企业尝试应用单点系泊网箱, 锚泊型式参照传统经验设计, 缺乏科学依据。了解不同系泊方式深水网箱的受力变形特性, 是解决网箱安全性能的前提。但国内外对于单多点系泊方式的水动力特性对比等研究相对较少。本研究针对一种实际应用的单点系泊高密度聚乙烯深水网箱, 建立有限元数值计算模型, 对原型网箱(图 1)在波浪流作用下的浮架变形和锚绳受力进行了模拟研究, 分析探讨了不同情况下系泊方式对网箱受力变形的影响, 旨在为网箱浮架和系泊系统的优化设计提供理论依据和数据支撑。

1 数值模型

1.1 有限元模型

网箱系统主要由浮架、网衣和锚绳等主要部件组成, 采用有限元方法将网箱系统离散为一系列线单元和集中质量点。集中质量点根据各部件实际情况分为三自由度质点(图 2)和六自由度质点(图 3)两种, 均设于线单元两端。网箱的浮架系统离散为



图1 三角形深水养殖网箱

Figure 1 Scene of a triangular deep-water aquaculture cage

线单元和六自由度质点，其中六自由度质点起传递弯矩的作用。网衣和锚绳部件则采用线单元和三自由度质点模拟，考虑弯曲刚度很小，可设置为零。线单元所受的力和力矩包括浮力、波浪力、重力、剪力、张力和弯矩等，均集中分配到线单元两端的质点上，根据牛顿第二定律，建立如下质点运动方程：

$$M(p, a) + C(p, v) + K(p) = F(p, v, t) \quad (1)$$

式中 $M(p, a)$ 是惯性荷载， $C(p, v)$ 是阻尼荷载， $K(p)$ 为刚性荷载， $F(p, v, t)$ 为外力荷载 (kN)； p 为位置 (m)； v 为速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)； a 为加速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)。

1.2 线单元模型理论

在波浪和水流共同作用下，网箱会产生运动和变形，因此高密度聚乙烯管制成的浮架所受的结构荷载包括因运动所产生的拉力、弯矩和剪力。根据网箱各部件实际情况，对于浮架的每个线单元，忽略扭转效应，对于网衣及锚绳等柔性部件，设定为只包含张力，抗弯刚度设为零。网箱系统不同部件的有效张力均可以表示为：

$$T_e = T_w + (P_0 A_0 - P_i A_i) \quad (2)$$

$$T_w = EA\varepsilon - 2\mu(P_0 A_0 - P_i A_i) + EA \cdot C(dL/dt)/L_0 \quad (3)$$

$$\varepsilon = (L - \lambda L_0)/\lambda L_0 \quad (4)$$

式中 T_e 表示有效张力 (kN)； T_w 表示管壁张力 (kN)； P_i 和 P_0 分别为线单元内外部压力 (MPa)； A_i 和 A_0 分别为线单元内外横截面积 (m^2)。式 (3) 右边第一项代表轴向刚度的作用，第二项是内外部压力的作用 (通过泊松比效应)，第三项代表轴向阻尼的作用。EA 是轴向刚度 (kN)； ε 为轴向应变， L 为线单元的瞬时长度 (m)； λ 为线单元的膨胀系数； L_0 为线单元初始长度 (m)； μ 为泊松比，对于高密度聚乙烯材料取值 0.42； dL/dt 是线单元长度增长率， C 为阻尼系数，计算方式如下：

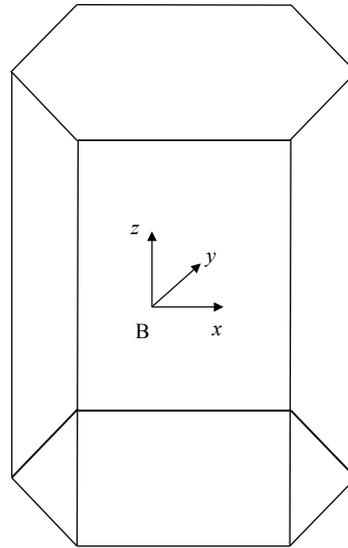


图2 三自由度质点

Figure 2 3-D buoy

质点坐标轴
与全局坐标
轴一致
Buoy axes
always aligned with
global axes

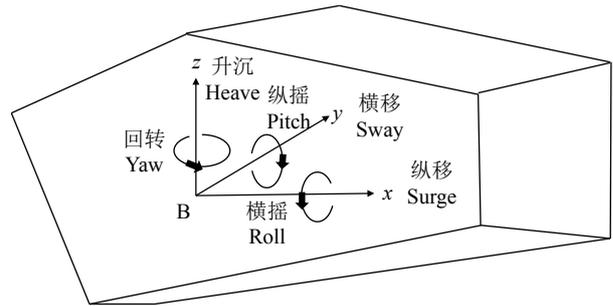


图3 六自由度质点

Figure 3 6-D buoy

$$C = (\lambda_a/100) C_{crit} \quad (5)$$

$$C_{crit} = \sqrt{(2M \cdot L_0/EA)} \quad (6)$$

式中 λ_a 为目标轴向阻尼占比，取值 0.4，选取这个值可以在不影响精度的情况下提供快速的模拟运行时间。 C_{crit} 为线单元的临界阻尼值， M 表示线单元质量 (kg)。

对于网箱浮架结构所受的弯矩^[29-30]表示为：

$$M = EI \cdot k + k \cdot dL_0 (\lambda_b/100) \sqrt{m \cdot EI \cdot L_0/dt} \quad (7)$$

式中 EI 为抗弯刚度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)； λ_b 为目标弯曲阻尼； m 为线单元质量 (kg)。

在求得各线单元端部的弯矩后，可以进一步计算线单元的剪力，各个线单元被看作是一个笔直的刚性杆，假设两端弯矩分别为 M_1 、 M_2 。由于刚性线单元的弯矩是沿着线单元线性变化的，故剪力为常数，即弯矩沿着线单元的变化率^[29-30]。

$$F = (M_2 - M_1)/L \quad (8)$$

1.3 三自由度质点模型理论

三自由度质点仅具有升沉、纵移、纵摇 3 个自

由度, 由于不能发生旋转, 主要用于模拟网衣连接点以及网衣底部沉子, 可以模拟所受到的重力、浮力、阻力、附加质量的作用。

$$F_{\text{Drag}} = 0.5P_w \cdot \rho \cdot C_{dx} \cdot A_x \cdot V_{rx} \cdot |V_r| \quad (9)$$

$$F_{\text{Fluid}} = (1 + C_a) \cdot \rho \cdot P_w \cdot V \cdot A \quad (10)$$

式中 F_{Drag} 为阻力; P_w 为浸水比例; ρ 为水体密度; C_{dx} 和 A_x 分别为 x 方向的阻力系数和阻力面积, V_r 为流体相对于质点的速度矢量, $|V_r|$ 为其绝对值, V_{rx} 为速度矢量在 x 轴上的分量; F_{Fluid} 是流体加速度力, C_a 为附加质量系数, A 为流体加速度。

1.4 六自由度质点模型理论

六自由度质点具有 3 个方向的平动自由度和 3 个方向的旋转自由度, 六自由度质点又分为集中质量点 (Lump buoy) 和圆柱式浮标 (Spar buoy), 集中质量点用于模拟浮架连接点。圆柱形浮标可以更好地模拟与水面的交互作用, 用于模拟浮筒, 通过计算瞬时位置和方向, 可以确定传递力矩。2 种六自由度质点的水动力荷载均使用莫里森方程计算:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C_d S V_r |V_r| + \rho V_w a_f + \rho V_w C_a a_r \quad (11)$$

式中 ρ 为海水密度, 取 $1\ 025\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; S 为浮管单元投影面积 (m^2); V_r 为水质点与线单元构件的相对速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); V_w 为线单元构件排开水体的体积 (m^3); a_f 为水质点加速度, a_r 为相对加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); C_d 和 C_a 分别为速度力系数和附加质量系数。由于数值模拟采用的波浪理论为 Ariy 波, 根据我国海港水文规范, 经验系数 C_d 取值 1.2, C_a 取值 1。

对于集中质量点, 忽略水动力力矩, 对于圆柱形浮标, 受到的力矩为:

$$M_D = -P_w \text{UDM} \cdot \Omega \quad (12)$$

P_w 为浮标的淹没比例, UDM 表示的是平行或垂直于圆柱轴的单位阻尼力矩, 流体假设无旋, Ω 为浮标的相对角速度。

2 模型验证

为了验证网箱数值模型的有效性及准确性, 制作网箱整体模型比尺为 1 : 15 的大比例尺模型, 在中国水产科学研究院如东试验基地的波浪流水池中进行网箱水动力试验。水池长 50 m、宽 26 m、深 1.2 m, 配备了伺服电机驱动式造波机和造流系统, 可产生试验要求的规则波、不规则波和稳态流, 网箱模型参数见表 1, 网箱模型试验布置见图 4。网箱浮架整体呈三角形形状, 内呈正六边形, 网衣悬挂在正六边形的浮管上, 其中对于锚绳长度

和直径选取大比尺 1 : 15, 使用与原材料相一致的聚乙烯绳。对于浮筒的几何比尺同样选取 1 : 15, 根据 Froude 数相似律可以进一步推算出浮筒的浮力比尺为 1 : 15³, 沉子重量同理。网衣的相似条件一般应遵循相似准则, 但当模型比尺较大 (如 $\lambda=1 : 15$) 时, 不仅使网衣模型难以实现, 而且会对网衣周围流体的流态发生较大改变, 故参考 Fredriksson 等^[20], 在满足网衣主要水动力因素相似的条件下, 对于网目大小和网线直径采用变比尺 $\lambda'=1$, 对整体网衣三维空间尺寸则采用大比尺 $\lambda=1 : 15$ 。试验网衣材质与原型相同, 均为 PE。

网箱系泊锚绳张力测量采用 LA1 型水下拉力传感器, 该测力计设置于锚绳与网箱浮架的连接点 A 处位置, 测力计量程为 50 N, 测试相对误差

表 1 网箱主要参数
Table 1 Parameters of net cage

组件 Component	参数 Parameter	模型值 Model value	原型值 Prototype value	
浮管 Floating pipe	直径 Diameter/mm	26.67	400	
	壁厚 Wall thickness/mm	1.57	23.5	
	形状 Shape	三角形	三角形	
	长度 Length/m	1.33	20	
	网衣 Net	网目 Mesh size/mm	45	45
		目脚直径 Twine diameter/mm	2	2
高度 Height/m		0.4	6	
锚绳 Mooring line	材料 Material	PE	PE	
	长度 Length/m	4	60	
	直径 Diameter/mm	2.67	40	
浮筒 Buoy	材料 Material	PE	PE	
	高度 Height/m	0.13	2	
沉子 Sinkers	直径 Diameter/m	0.1	1.5	
	质量 Mass/g	20×5.93	20×20000	
	材料 Material	混凝土	混凝土	

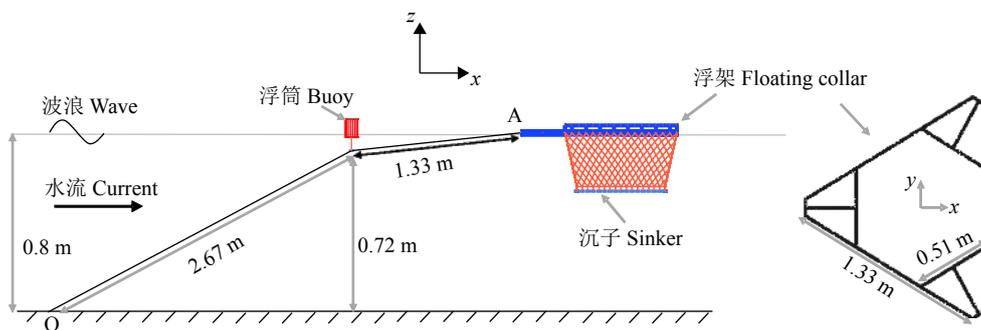


图4 单点系泊网箱模型试验布置图

Figure 4 Physical model configuration of SPM net cage

小于 1%。采用非接触式运动姿态测量系统 (Un-touched 6-D measurement system) 测量浮架中心点位置的运动响应情况。波浪测量采用 LYL-III 型浪高仪, 试验前后均对仪器标定校准, 流速测量采用声学多普勒点式流速仪, 测试相对误差小于 0.5%。

试验波浪为规则波, 波高设为 16、20、24 cm, 周期设为 1.64、2.01 s; 流速设为 10.3、12.9 cm·s⁻¹。波浪和水流均沿 x 正方向传播。对于物理模型试验, 试验过程中, 一个工况结束后待水体静止之后再下一个工况, 各工况分别进行 3 次试验测量。图 5 为 3 种纯波条件下网箱最大锚绳张力、最大浮架升沉和最大浮架纵摇的计算结果与试验数据的对比情况, 波浪周期为 1.64 s。可以看出, 3 种不同波况条件下, 网箱动力响应计算结果与模型试验结果较接近, 相对误差均在 10% 以内。图 6 为 4 种波流组合条件下网箱锚绳力的时间历程曲线图。比较得知, 最大锚绳张力的计算结果与试验结果相差较小, 但两者曲线形状稍有不同, 单个波浪周期内试验结果的曲线形状相比模拟结果的曲线稍尖些, 这可能是由试验过程中锚绳力存在一定的脉冲效应造成的, 使得锚绳力试验值在更短时间内达到峰值, 但总体上两者曲线吻合较好, 说明本研究建立的单点系泊网箱有限元模型可以模拟纯波、波流组合条件下的网箱动力响应情况。

3 结果与分析

由于比尺缩放造成浮管刚度无法满足相似, 采用物理模型试验测试波流条件下网箱浮架的变形难以实现, 试验过程中的网箱浮架基本为刚体^[31]。因此, 通过数值模拟方法研究网箱浮架的动力变形是切实可行的手段。深海区经常会有台风等恶劣天

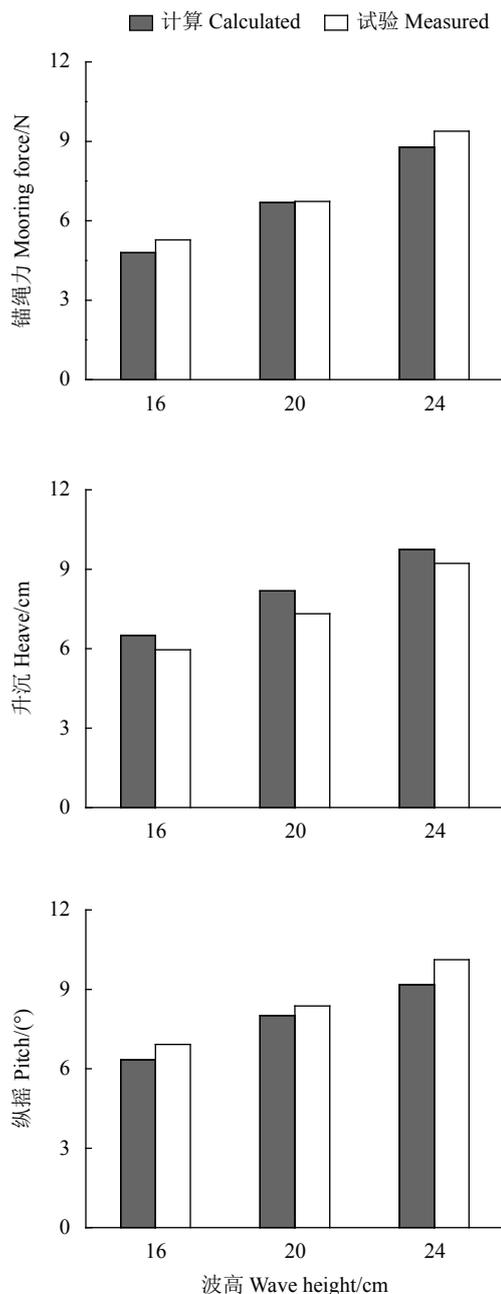


图5 纯波条件下网箱动力响应计算结果与试验值比较
Figure 5 Comparison of dynamic responses between calculated and measured results of net cage under pure waves

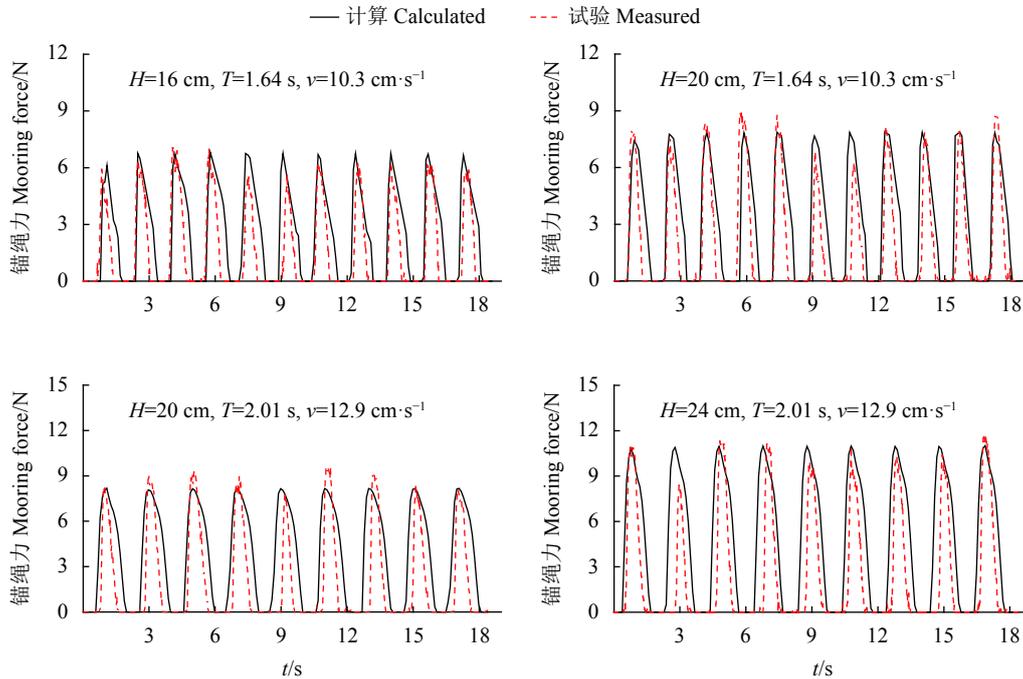


图6 波流条件下网箱锚绳力比较

Figure 6 Comparison of mooring force for net cage under waves and current

气, 这种情况下波浪和洋流会同时出现; 系泊系统将限制网箱的移动, 以保证施工和养鱼的安全。在波浪和水流的共同作用下, 锚缆的张力会在一定程度上反映网箱整体结构的受力。一旦系泊系统发生故障, 不仅会造成鱼体逃逸和死亡, 还会对网箱管理过程造成严重阻碍, 给养殖人员带来巨大的经济损失, 因此对系泊系统的安全性进行研究十分必要。基于本研究建立的有限元数值模型, 在实际海况条件下, 对原型尺寸的深水养殖网箱在不同系泊方式下进行水动力模拟分析, 图7为单点系泊和多点系泊的布置方式, 波流均沿 x 轴正向, 对于多点系泊, 3根锚绳呈 120° 角度分布。网箱各部件原型参数见表1。2种系泊方式的锚绳都是由浮筒按2:1分为两段。设定的原型波浪流海况条件: 波高为4、5、6 m, 周期9 s, 波浪为规则波; 流速取0.5、1.0、1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 水深统一设为20 m。

3.1 网箱系泊力比较

锚泊系统是网箱的重要组成部分, 为了研究系泊方式对网箱系泊力的影响, 对两种系泊方式在不同波流组合条件下进行了数值模拟。其中多点系泊仅考虑最危险工况, 即单侧锚绳为迎浪流方向, 考虑迎浪流侧系泊力。2种系泊方式下各工况对应的系泊力峰值计算结果见图8。可以看出, 多点系泊方式系泊力峰值大于单点系泊方式, 并且随着流速

增加, 这种差距更加明显。流速 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、波高4 m时, 2种系泊方式系泊力峰值差值最小(5.92%), 但随着流速和波高逐渐增加到更高工况后, 两者差值为9.12%, 差值增幅达到54.1%。这主要是由于背浪侧浮筒受到波流作用后, 会通过锚绳向浮架施加一个向右的拉力, 导致迎浪侧的锚绳力比单点系泊情况下锚绳受力要大, 这一点可从图9得到证明, 观察多点系泊两侧锚绳力差值与单点系泊锚绳力历时曲线, 可以看出除曲线谷值有所差异外, 整体基本重合, 说明增加的锚绳力主要来自于背浪侧锚绳。图9为波高6 m、流速 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的锚绳历时曲线, 由于背浪侧的两根锚绳呈对称布置, 故仅考虑其中一根锚绳, 可以看出当波流沿着 x 轴正向时, 背浪侧系泊力峰值为8.06 kN, 远小于迎浪侧系泊力峰值(71.61 kN), 相差幅度达到788.46%。这是由于波流沿 x 轴正向时, 背浪侧锚绳几乎不受力所致。

3.2 浮架变形比较

由于高密度聚乙烯制成的浮架在大浪强流下会发生变形, 将对网结构安全性能造成威胁, 为了解2种系泊方式下浮架不同位置处的变形情况, 且由于浮架为对称结构, 仅选取沿 y 轴正向部分的多个点位进行分析, 设置A—H点如图10所示, 涉及的应力指标选取冯·米塞斯应力(von Mises Stress)^[32],

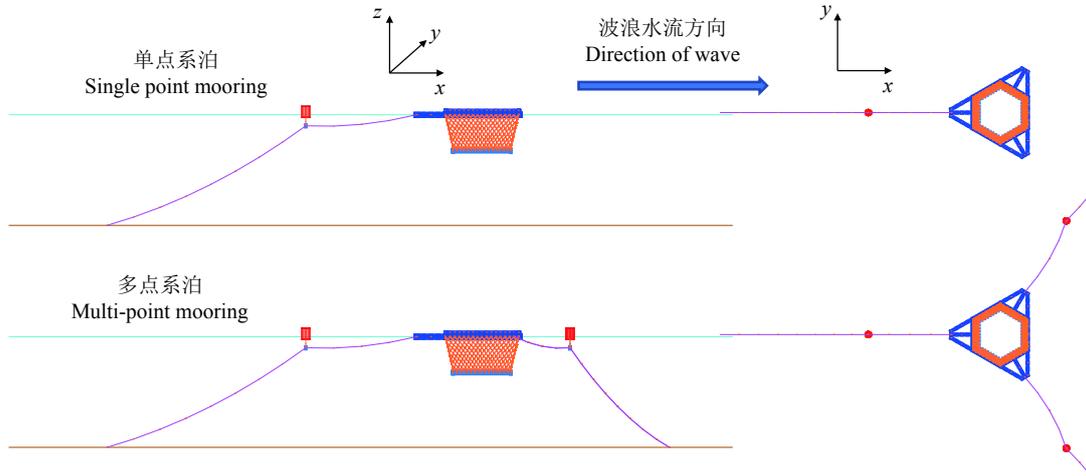


图7 不同系泊方式的网箱布置图

上部水平线为海平面，下部水平线为海底

Figure 7 Layout of cage with different mooring systems

The upper level is sea level and the lower level is the seabed.

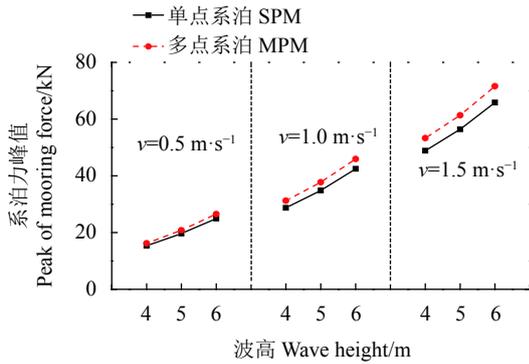


图8 各工况下不同系泊方式的锚绳力峰值

Figure 8 Peak value of mooring force under different sea conditions

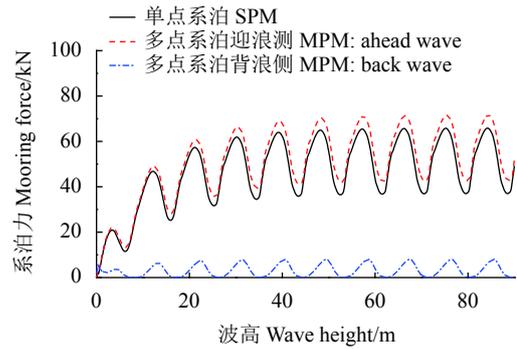


图9 锚绳力历时曲线 ($H=6\text{ m}$, $v=1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Figure 9 Time history of mooring force under wave height of 6 m and current velocity of $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

当浮架单元考虑扭转效应时，会计算出整个横截面上的应力峰值，应力计算表达式为：

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (13)$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 3 个方向的主应力 (MPa)。

表 2 列出了 2 种系泊方式下，大浪强流条件 ($H=6\text{ m}$, $T=9\text{ s}$, $v=1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 浮架上 A—H 点所受的最大应力值。可以看出，2 种系泊方式下的应力分布相对接近，单点系泊条件下浮架所受应力最大处为 D 点截面，达 19.50 MPa，多点系泊时 D 点截面应力峰值为 18.01 MPa，比单点系泊 D 点应力降低 7.64%。其次为 C 点，应力峰值分别达 14.99 和 13.88 MPa，相差 7.4%。说明多点系泊能够一定程度上减少浮架的变形。但观察浮架 D 处达到应力峰值时，2 种系泊方式下浮架受力变形都十分严重 (图 11)，将对网箱的安全性能构成威胁，结合模拟

计算结果接近 HDPE 材料的屈服强度 (24 MPa)，若将网箱设置在更危险的海况下，需要采取合理措施

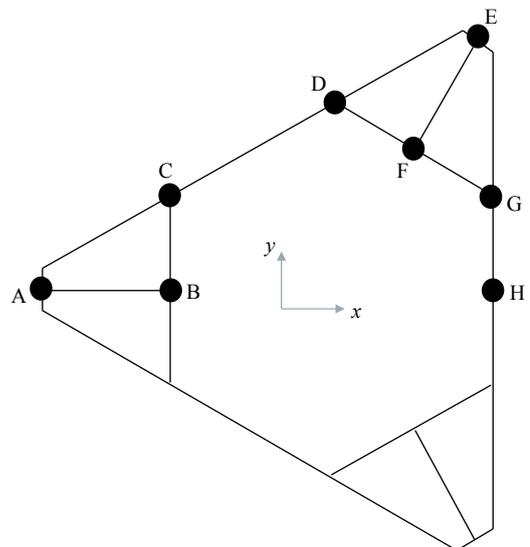


图10 浮架选定点位示意图

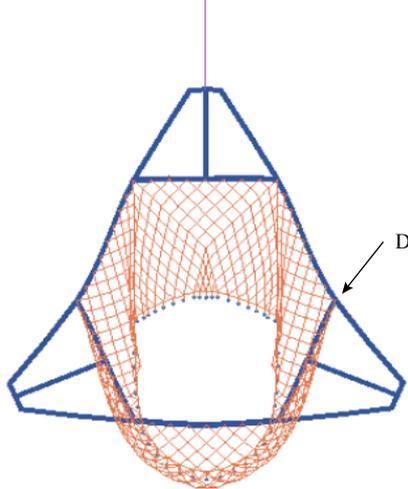
Figure 10 Different points of floating collar

表2 浮架各点处变形

Table 2 Deformation at different points of floating collar

浮架点编号 Point No.	应力 Stress/MPa	
	单点系泊 SPM	多点系泊 MPM
A	11.07	11.77
B	3.44	2.93
C	14.99	13.88
D	19.50	18.01
E	2.34	2.68
F	2.11	3.03
G	3.16	2.25
H	7.37	3.71

单点系泊 Single-point mooring cage



多点系泊 Multi-point mooring cage

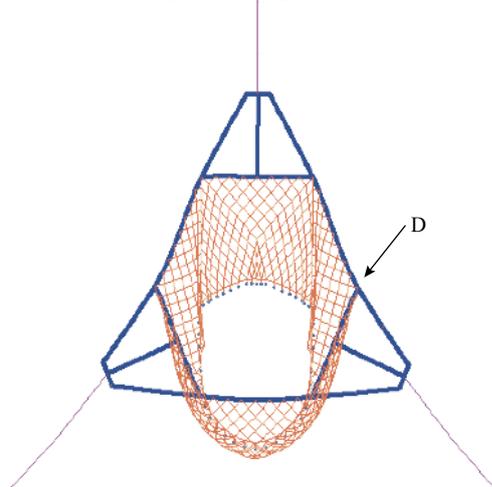


图11 D处达到应力峰值时浮架的变形情况

Figure 11 Deformation of floating frame when stress peak reached at point D

对浮架 D 处进行加固处理。

3.3 网箱运动特性比较

3.3.1 浮架运动位置变化 为了进一步比较 2 种

系泊方式下网箱在波流联合作用下的运动特性, 首先进行了浮架的运动分析。取浮架上对称的 A、D、E 3 点进行运动分析, 模拟工况为: 波高 6 m、周期 9 s、流速 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 12—图 14 分别为 A、D、E 点的 x 、 y 、 z 坐标历时曲线, 由图可知, 在波流作用下, 系泊方式对浮架上 A、B、C 3 点的 z 坐标几乎无影响, 说明改变系泊方式对浮架升沉影响不大; 观察 y 坐标历时曲线, 整体上看, 主要差异在曲线峰谷值上, 观察历时曲线稳定后, 单点系泊条件下浮架 D 点的 y 坐标峰值为 7.443 m, 谷值为 6.799 m, 多点系泊条件下, y 坐标峰值为 7.416 m, 谷值为 6.876 m, 峰谷差值降低了 17.7%。说明多点系泊对浮架横摇有一定限制作用; 对比 A 点 x 坐标, 多点系泊时 x 坐标峰值为 7.07 m, 单点系泊时为 5.627 m, 相差 25.64%。这是由于多点系泊条件下, 背浪侧浮标在波流作用下产生向右的

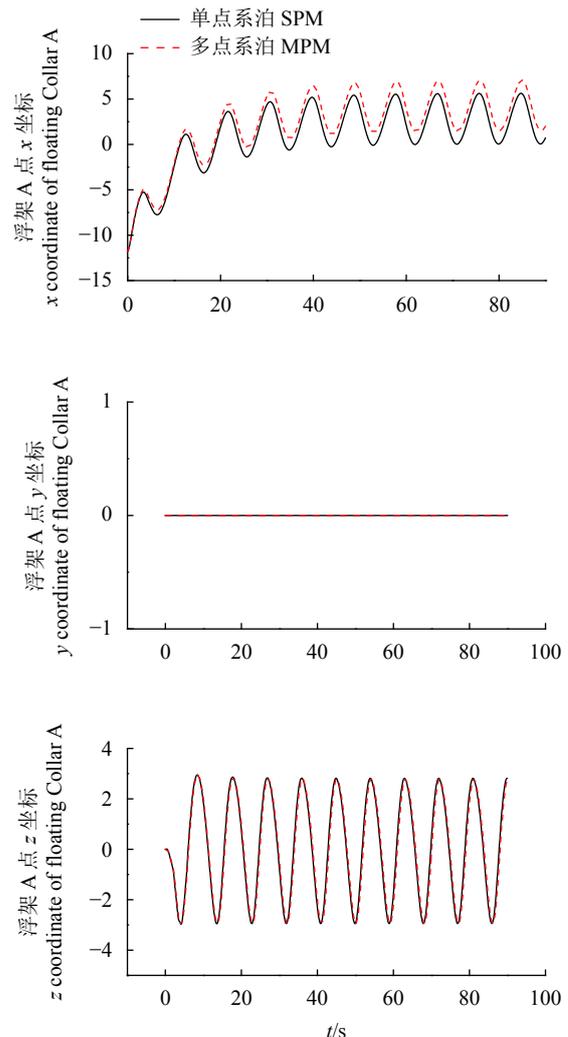


图12 A点坐标 x 、 y 、 z 历时曲线

Figure 12 x , y and z duration curves of Point A

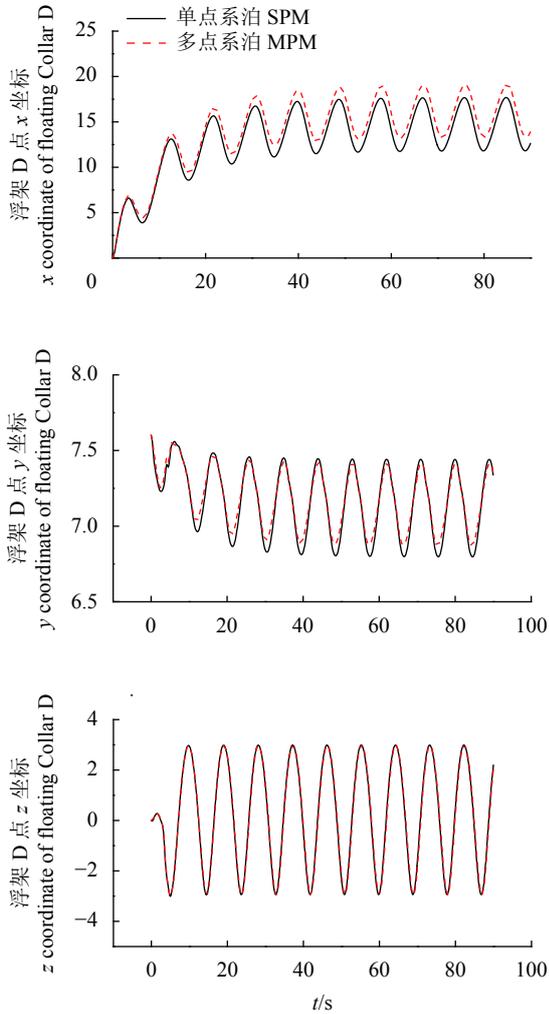


图13 D点坐标x、y、z历时曲线

Figure 13 x, y and z duration curves of Point D

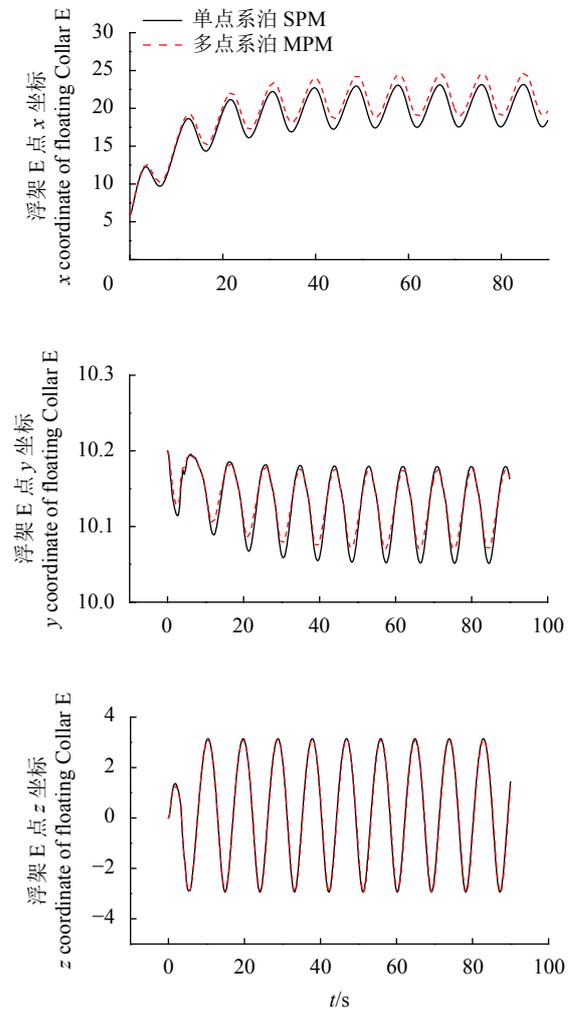


图14 E点坐标x、y、z历时曲线

Figure 14 x, y and z duration curves of Point E

运动, 从而对浮架产生向右的拉力, 使得浮架在 x 轴上的位移增加, 即多点系泊时浮架的纵移会更加明显。

3.3.2 网衣运动位置比较 图15为网箱系统在流速 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、波高 6 m 、周期 9 s 条件下, 一个完整的波周期内不同时刻网衣的运动状态, 对比4个时刻网衣运动状态, 变形情况几乎一致, 说明改变系泊方式对此网箱的网衣体积几乎无影响。

4 结论

1) 本文利用物理模型试验证明了网箱数值模型的有效性, 分析了单点系泊与多点系泊系统网箱在系泊力、浮架变形以及网箱运动特性方面的区别。可以发现, 对于不同的系泊方式网箱系统在波浪作用下, 不考虑背浪侧锚绳, 多点系泊所受的系泊力峰值高于单点系泊, 且随着流速增加, 两者差

异更为显著。

2) 对于浮架的受力变形, 两者浮架的应力峰值发生在相同位置, 并且不同位置应力变化趋势一致, 变形大致相同, 但多点系泊浮架危险点处的应力变形低于单点系泊, 两者应力峰值相差 7.64% 。

3) 当模拟波高 6 m 、周期 9 s 、流速 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 对浮架上选定的3个点进行了 x 、 y 、 z 坐标的历时曲线分析, 通过观察各点可以看出, 对于此网箱系统, 改变系泊方式对整个浮架的升沉运动几乎没有影响, 但当波流沿 x 轴正向时, 由于背浪侧浮筒在波浪作用下产生向右的运动, 进而导致多点系泊情况下浮架在 x 轴上的位移大于单点系泊, 两者相差 25.64% 。进一步对比了网衣的运动状态, 通过观察 xz 面在一个波周期内不同时刻网衣轮廓曲线, 发现网衣的变化基本一致。说明改变系泊方式对于网衣系统的变形没有影响。

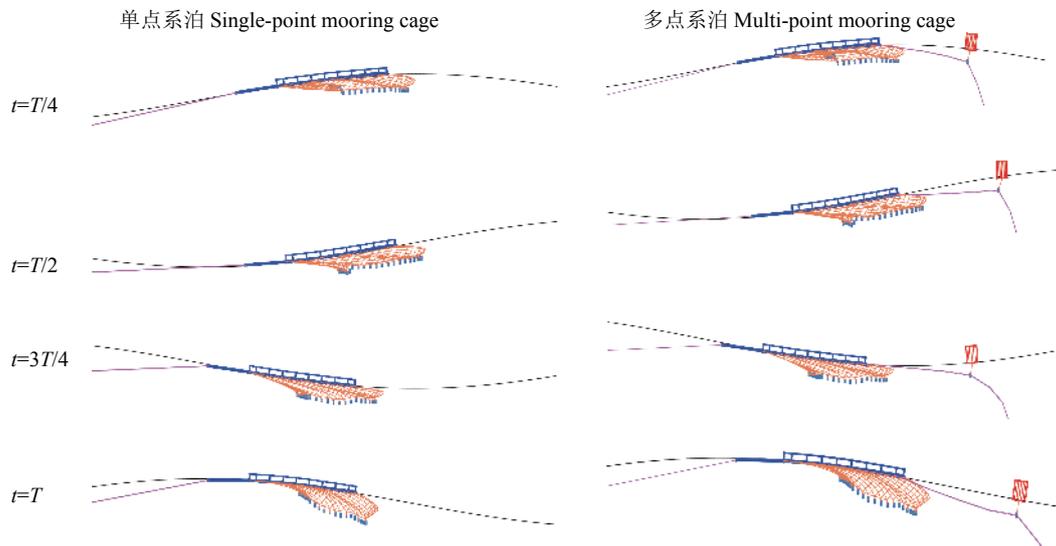


图15 一个波周期内网衣的xz面轮廓图

$$v=1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}, H=6 \text{ m}, T=9 \text{ s}$$

Figure 15 xz surface contour of net during a wave period

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 2019 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 21-22.
- [2] LEE C, KIM Y, LEE G, et al. Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves[J]. Ocean Engin, 2008, 35(14): 1521-1532.
- [3] HUANG C C, PAN J. Mooring line fatigue: a risk analysis for an SPM cage system[J]. Aquacult Engin, 2010, 42(1): 8-16.
- [4] SHAINEE M, DECEW J, LEIRA B J, et al. Numerical simulation of a self-submersible SPM cage system in regular waves with following currents[J]. Aquacult Engin, 2013, 54: 29-37.
- [5] FREDRIKSSON D W, DECEW J, TSUKROV I, et al. Development of large fish farm numerical modeling techniques with *in situ* mooring tension comparisons[J]. Aquacult Engin, 2007, 36(2): 137-148.
- [6] ZHAO Y P, LI Y C, DONG G H, et al. Numerical simulation of hydrodynamic behaviors of gravity cage in current and waves[J]. Int J Offshore Polar Engin, 2009, 19(2): 97-107.
- [7] ZHAO Y P, GUI F K, XU T J, et al. Numerical analysis of dynamic behavior of a box-shaped net cage in pure waves and current[J]. Appl Ocean Res, 2013, 39: 158-167.
- [8] DECEW J, FREDRIKSSON D W, LADER P F, et al. Field measurements of cage deformation using acoustic sensors[J]. Aquacult Engin, 2013, 57: 114-125.
- [9] DING D L, LIU W H, OU C H. Use of non-linear regression to evaluate drag force and volume coefficient of structure of square cage[J]. Fish Sci, 2007, 73(6): 1249-1256.
- [10] XU T J, ZHAO Y P, DONG G H. Analysis of hydrodynamic behavior of a submersible net cage and mooring system in waves and current[J]. Appl Ocean Res, 2013, 42: 155-167.
- [11] MOE H, FREDHEIM A, HOPPERSTAD O S. Structural analysis of aquaculture net cages in current[J]. J Fluid Struct, 2010, 26(3): 503-516.
- [12] LADER P F, ENERHAUG B. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow[J]. IEEE J Oceanic Engin, 2005, 30(1): 79-84.
- [13] STRAND I M, SØRENSEN A J, VOLENT Z, et al. Experimental study of current forces and deformations on a half ellipsoidal closed flexible fish cage[J]. J Fluid Struct, 2016, 65: 108-120.
- [14] 崔勇, 关长涛, 黄滨, 等. 波浪作用下双层网底鲆鲽网箱水动力特性的数值模拟 [J]. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 18-24.
- [15] SU B, KELASIDI E, FRANK K, et al. An integrated approach for monitoring structural deformation of aquaculture net cages[J]. Ocean Engin, 2021, 219: 108424.
- [16] 刘海阳, 胡昱, 黄小华, 等. 深水网箱浮架结构的失效及疲劳性能分析 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 46-54.
- [17] CHEN Y Y, YANG B D, CHEN Y T. Applying a 3-D image measurement technique exploring the deformation of net cage under wave-current interaction[J]. Ocean Engin, 2019, 173: 823-834.
- [18] TANG M F, XU T J, DONG G H, et al. Numerical simulation of the effects of fish behavior on flow dynamics around net cage[J]. Appl Ocean Res, 2017, 64: 258-280.
- [19] DONG G H, HAO S H, ZHAO Y P, et al. Elastic responses of a flotation ring in water waves[J]. J Fluid Struct, 2009, 26(1): 176-192.
- [20] FREDRIKSSON D W, DECEW J, TSUKROV I. Development of structural modeling techniques for evaluating HDPE plastic net pens used in marine aquaculture[J]. Ocean Engin, 2007, 34(16): 2124-2137.
- [21] LI L, FU S X, XU Y W, et al. Dynamic responses of floating fish cage in waves and current[J]. Ocean Engin, 2013, 72: 297-303.

- [22] HUANG C C, TANG H J, LIU J Y. Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea[J]. *Aquacult Engin*, 2008, 38(2): 105-116.
- [23] KRISTIANSEN T, FALTINSEN O M. Modelling of current loads on aquaculture net cages[J]. *J Fluid Struct*, 2012, 34: 218-235.
- [24] KRISTIANSEN T, FALTINSEN O M. Experimental and numerical study of an aquaculture net cage with floater in waves and current[J]. *J Fluid Struct*, 2015, 54: 1-26.
- [25] GOUDEY C A, LOVERICH G, KITE-POWELL H, et al. Mitigating the environmental effects of mariculture through single-point moorings (SPMs) and drifting cages[J]. *ICES J Mar Sci*, 2001, 58(2): 497-503.
- [26] DECEW J, TSUKROV I, RISSO A, et al. Modeling of dynamic behavior of a single-point moored submersible fish cage under currents[J]. *Aquacult Engin*, 2010, 43(2): 38-45.
- [27] 王绍敏, 袁太平, 陶启友, 等. 往复流作用下深水网箱的单锚腿系泊系统设计及效用评估 [J]. *海洋渔业*, 2019, 41(6): 725-735.
- [28] 梁家铭, 庞亮, 董胜. 新型网箱浮架系统水动力分析及系泊方式研究 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2021, 51(2): 119-126.
- [29] Orcina Ltd. OrcaFlex manual Version 10.0a[M]. Cumbria: Ulverston, 2015: 187-189.
- [30] 杨然哲, 朱克强, 荆彪, 等. 沉降式网箱群动力学分析 [J]. *水动力学研究与进 A 辑*, 2015, 30(1): 83-91.
- [31] HUANG X H, GUO G X, TAO Q Y, et al. Dynamic deformation of the floating collar of a net cage under the combined effect of waves and current[J]. *Aquacult Engin*, 2018, 83: 47-56.
- [32] 薛守义. 弹塑性力学 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005: 201-206.