

DOI: 10.12264/JFSC2024-0246

波流联合作用下升降式养殖网箱水动力特性

李潇冉^{1,3}, 崔勇^{1,2}, 关长涛^{1,2}, 王刚^{1,2}, 吴锦涛¹, 郭一诺^{1,3}

1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;

2. 青岛海洋科技中心, 山东 青岛 266237;

3. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院, 上海 201306

摘要: 为了研究升降式网箱在波流联合条件下漂浮及潜降后的锚绳张力和运动响应, 为优化网箱各组成部分、后期维护等提供指导意见, 本研究基于势流理论和有限元参数化建模技术开展数值模拟。结果显示, 迎流侧锚绳张力始终大于背流侧, 且最大锚绳张力随波流参数的增大而增大, 垂荡、纵荡、纵摇同波高均存在显著正相关关系; 垂荡在漂浮时与周期呈正相关; 纵荡在两种状态下均与周期呈正相关, 纵摇在漂浮时与周期呈负相关, 潜降时与周期呈正相关, 漂浮状态时, 垂荡与流速呈负相关, 纵荡与流速呈正相关。网箱潜降后锚绳张力平均减幅达到 59%, 垂荡、纵荡和纵摇平均减幅分别达到 70%、57%和 49%; 网箱各运动响应峰值均较小, 漂浮状态下垂荡、纵荡和纵摇峰值分别仅为 0.549 m、1.055 m 和 7.116°, 表明网箱具备较好的抗风浪性能。

关键词: 升降式网箱; 波流联合; 锚绳张力; 运动响应; 数值模拟; 深远海养殖

中图分类号: S953

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2025)03–0396–13

自 20 世纪 80 年代起, 我国海水网箱养殖产量逐年递增, 网箱养殖已成为海水养殖的主要方式之一^[1]。近年来, 海产品需求持续提升以及近岸养殖空间受限等问题日益显著, 为了提高生产质量和效率, 网箱养殖逐步由近岸迈向离岸海域^[2–3]。相较于近岸养殖, 离岸养殖产品品质更高, 但因风浪干扰所造成的养殖损失较大, 因此针对深水网箱进行动力响应分析, 对优化网箱结构及提升养殖安全性至关重要^[4–5]。此前, 众多学者针对深水重力式网箱进行了大量水动力实验, 开展了波流载荷下网箱主体结构及锚泊系统的动力响应研究^[5–11], 着重分析了浮架^[12–15]、配重系统及网衣^[16–20]的受力与变形, 为网箱结构设计提供理论参考。然而, 传统重力式网箱在复杂恶劣的海洋环境中容易遭受巨浪强流的冲击, 造成结构整体倾斜、侧翻等

现象, 导致养殖鱼类死亡。升降式网箱作为应对极端海况的新型网箱, 可以在台风来临时沉入海平面以下来规避风浪灾害, 其相较于传统重力式网箱, 极大提高了养殖安全性。

目前国内应用较广泛的升降式网箱有 HDPE 圆形升降式网箱以及可升降式大型桁架类网箱。对于 HDPE 升降式网箱的研究, 许条建等^[21–22]通过数值模拟以及物理模型实验验证了网箱潜降避浪的可行性, 并对比分析组合式网箱和单一网箱的锚绳张力, 发现在潜降状态下组合式网箱的锚绳张力降低率更大。黄六一等^[23]分析了 HDPE 升降式网箱的最大倾角与浮绳框边长、沉降水深和网箱直径的关系, 发现三者与沉降倾角呈现出线性关系。在可升降式大型桁架类网箱^[24–31]的研究中, Jin 等^[32]对“Ocean Farm 1”模型在波浪和水流

收稿日期: 2024-09-03; 修订日期: 2024-10-09.

基金项目: 崂山实验室“十四五”重大项目(2022QNL030001-4); 现代农业产业技术体系(CARS-47-22); 中国科协第九届青年托举工程项目(2023QNRC001).

作者简介: 李潇冉(2000–), 女, 硕士研究生, 研究方向为养殖装备数值模拟. E-mail: jiayou1943066825@163.com

通信作者: 崔勇, 副研究员, 研究方向为渔业装备与工程. E-mail: cuiyong@ysfri.ac.cn

中的运动响应、水平漂移力和系泊载荷进行了数值模拟研究。Wang 等^[33]基于 CFD 对“深蓝 1 号”进行水动力数值模拟, 探究了不同吃水条件下和规则波参数下的网箱运动响应和系泊张力。崔勇等^[34]建立了波浪作用下一种半潜式网箱的数值模型, 通过有限元的方法计算网箱的锚绳受力与运动情况。由于 HDPE 升降式网箱遇风浪易变形且潜降系统难以操控、可升降式大型桁架类网箱普遍造价较高等问题, 研究并应用一款能够提升经济效益且适应极端海况的新型升降式网箱成为近年来的研究热点。

本研究中的新型升降式网箱外侧为镀锌钢结构框架, 由四点锚泊系统、升降系统、能源系统等组成, 在遭遇极端海况时可下沉至适宜深度以躲避危害, 而后通过控制系统回归海面继续生产工作。升降式网箱通常布设于大浪、强流并存的深远海域, 因此, 应对波流联合作用下升降式网箱的水动力特性开展研究。通过数值模拟对其在波流联合海况下的运动响应进行分析, 根据势流理论计算作用于网箱的波浪力、运动方程求解网箱的动力响应, 得到极端海况下网箱潜降后的锚绳张力、垂荡、纵荡和纵摇的运动变化, 研究结果可为优化网箱结构、降低成本和减少能源损耗提供依据。

1 材料与方法

1.1 基本理论

本研究假定流体是无粘、均匀、不可压缩的理想流体, 流动无旋, 基本方程为拉普拉斯方程, 具体形式如下式:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

网箱在静水自由表面上做六自由度摇荡运动时, 其一阶不定常速度势 $\Phi(x, y, z, t)$ 满足以下条件:

自由表面条件:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

湿表面条件:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \overline{U_j} \cdot \overline{n_j} \quad (3)$$

海底边界条件:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} \Big|_{Z=-H} = 0 \quad (4)$$

无穷远处边界条件:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial R} - ik\Phi \right) = 0 \quad (5)$$

式中, $g(\text{m/s}^2)$ 为重力加速度, $t(\text{s})$ 为时间, n 为湿表面某处法线方向, $U(\text{m/s})$ 为湿表面某一点速度, $R(\text{m})$ 为空间一点到分析处的距离, $H(\text{m})$ 为海底距水平面直线距离, k 为波数。

给出初始时刻($t=0$)边界上初始位置和速度, 利用拉普拉斯方程, 场内各点每一时刻的相应的物理量随之确定。研究不定常速度势时, 可以将其分解为多个组成部分, 每个部分都代表了不同的速度分量:

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_I(x, y, z, t) + \Phi_D(x, y, z, t) + \Phi_R(x, y, z, t) \quad (6)$$

式中, Φ_I 为入射速度势, Φ_D 为绕射速度势, Φ_R 为辐射速度势, 单位均为 m^2/s 。

速度势 $\varphi(x, y, z)$ 可分解为入射速度势 φ_I , 绕射速度势 φ_D 和辐射速度势 φ_R , 即

$$\varphi(x, y, z) = \varphi_I(x, y, z) + \varphi_D(x, y, z) + \varphi_R(x, y, z) \quad (7)$$

通过源汇法求得网箱湿表面上每一个网格上的速度势:

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \sigma_j \quad j=1, 2, 3, \dots, N \quad (8)$$

式中, β_{ij} 为影响系数, $\sigma_j(\text{kg/m})$ 为分布源密度, N 为网格数。

求得网箱湿表面上的速度势, 运用动量方程得到作用在网箱表面上的动压力值如式(9)。一阶压力在平均湿表面上积分可得到浮体所承受的水平波浪力和艏摇力矩为式(10)。

$$p(x, y, z, t) = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (9)$$

$$\begin{cases} F_x = \iint_S p(x, y, z, t) n_x dS \\ F_y = \iint_S p(x, y, z, t) n_y dS \\ M_z = \iint_S p(x, y, z, t) (x n_y - y n_x) dS \end{cases} \quad (10)$$

式中, S 为任意曲面, ρ 为流体密度(kg/m^3), n_x 为曲面上一点法线方向沿 x 轴的分量, n_y 为曲面上一点

法线方向沿 y 轴的分量。

进行时域系泊计算时,系泊缆绳常受到重力、浮力和水动力的联合作用(图 1),静力分析采用悬链线法,忽略系泊缆绳的惯性力并假定系泊缆绳没有弹性变形。承受波流荷载时,张力时刻发生变化,其响应表现为非线性。升降式网箱系泊缆绳进行动力分析时,需要考虑系泊缆绳的质量、拖曳力、弯矩等,使用集中质量法将系泊线离散成多个线单元,网线的数值模拟与其基本相同,所受外力主要集中在单元质点上。

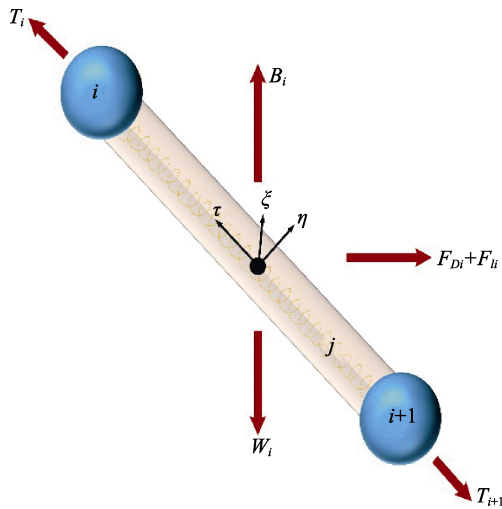


图 1 集中质量点受力分析示意图
Fig. 1 Schematic diagram of force analysis of the lumped mass point

具体过程如下,将线单元视为圆柱体,单元中心建立局部坐标系 (ξ, η, τ) 取其中第 i 个和第 $i+1$ 个集中质量点的受力(图 1), j 单元轴上 ξ 的水动力分量如下:

$$F_{\xi} = F_{D\xi} + F_{L\xi} = -\frac{1}{2}\rho C_{D\xi} D_R l (\dot{\xi} - e_{\xi} \cdot V_R) |\dot{\xi} - e_{\xi} \cdot V_R| + \rho \nabla \ddot{a}_{\xi} + \rho \nabla C_{m\xi} (\ddot{a}_{\xi} - e_{\xi} \cdot V_R) \quad (11)$$

式中, $C_{D\xi}$ 表示沿锚绳单元 ξ 轴的阻力系数, D_R 表示锚绳直径(m), l 表示单元长度(m), e_{ξ} 表示局部坐标系上 ξ 轴的单位向量, V_R 表示水质点的相对速度矢量(m/s), ∇ 表示构件体积(m³), $\ddot{a}_{\xi}$ 表示水质点加速度矢量在 ξ 轴分量(m/s²)。 η 及 τ 轴的水动力分量与上式同理。

在整体坐标系下将单元受力累加,利用牛顿第二定律建立质点运动方程:

$$(m + \rho \nabla C_m) a = T + \frac{1}{2} \rho C_{DA} \frac{V_R |V_R|}{2} + W + B \quad (12)$$

式中, m 为集中质量点的质量(kg), T 表示集中质量点的张力矢量(N), W 表示集中质量点的重力矢量(N), B 表示集中质量点的浮力矢量(N)。

运动方程的时域积分如下:

$$(M + A_{\infty}) \ddot{X}(t) + \int_0^t \dot{X}(\tau) K(t - \tau) d\tau + B \dot{X}(t) + K_{hs} X(t) = F_d(\dot{X}(t)) + F_m(X(t)) + F_s(\dot{X}(t)) + F_w(t) \quad (13)$$

式中, M 为网箱质量矩阵, A_{∞} 为无限频率下附加质量矩阵, $\dot{X}(t)$ 为网箱结构经过时间 t 的位移, $K(t)$ 为脉冲响应函数, B 为总阻尼, K_{hs} 为静水刚度矩阵, F_w 为波浪激励力(kN), F_d 为人为附加阻尼力(kN), F_s 为 Morison 拖曳力(kN), F_m 为系泊载荷(kN)。

基于 Morison 公式的 F_s 可以表示为:

$$F_s = \frac{1}{2} \rho C_c A |u| u \quad (14)$$

上式中, C_c 为水流阻力系数,在求解器中给定, u 为相对速度, A 为垂直于来流方向的投影面积(m²)。

另外,网箱框架结构由许多圆柱组成,其粘性载荷也会影响框架结构的运动响应,求解运动方程时添加附加阻尼。

由于升降式网箱的规模较大,如果在分析中将每个网衣目脚作为单独单元进行模拟实验,计算量将非常庞大,难以实现。因此实际计算中,按照群化倍数将多个网目合并为一个虚拟的大网目来进行计算,以提升计算效率,图 2 中黑色实线表示需要合并的真实网目。

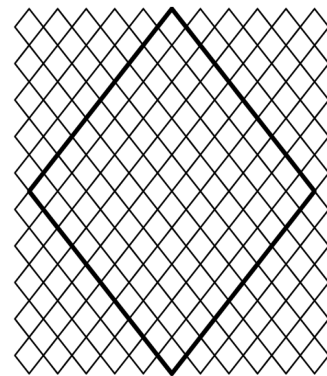


图 2 网目群化示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the mesh grouping

网目群化方法的原则是虚拟网目和群化前拟合并网目的总体几何尺度、重量、受到的总水动力相等^[35], 群化前后单元所受水动力相等:

$$R_1 = R_2 \quad (15)$$

$$d_2 = \frac{NT_1 \times NN_1}{n \times NT_2 \times NN_2} \times d_1 \quad (16)$$

群化前后各计算单元总重量不变:

$$\rho_1 \times V_1 = \rho_2 \times V_2 \quad (17)$$

$$\rho_2 = \frac{n \times NT_2 \times NN_2}{NT_1 \times NN_1} \times \rho_1 \quad (18)$$

式中, R_1 为群化前单元所承受的总水动力, R_2 为群化后虚拟网目所承受的水动力。 NN_1 、 NN_2 分别表示群化前、后网箱箱体网衣纵向网目数, NT_1 、 NT_2 分别表示群化前、后网箱箱体网衣沿浮框周径方向上的网目数。 n 为群化倍数, 即 1 个群化的虚拟网目的目脚所包含的真实网目的目脚数量。 d_1 为群化之前真实网目目脚直径, d_2 为群化之后虚拟网目目脚直径。 ρ_1 为群化前的线密度(kg/m^3), ρ_2 为群化后虚拟网目的线密度(kg/m^3)。 V_1 、 V_2 (m^3) 分别表示群化前、后的网衣体积。

最后通过浮体动力求解器进行联合求解, 从而得到升降式网箱主体在波流环境中的运动响应及锚泊张力。崔勇等^[34]已在波浪条件下进行了物模与数值模拟结果的比较, 验证了本模型的准确性和有效性, 可采用此数值模型对升降式网箱进行水动力特性分析。

1.2 网箱模型及其参数设置

升降式网箱由主框架、潜降系统、钢管、网衣等部分组成。首先进行三维模型建模(图 3), 为简化模型方便运算, 忽略了原模型中的光能设备、传感器等智能设备, 将智能设备的重量折算入主框架中。利用几何模型获取其节点坐标、回转半径、质心坐标等数据后进行分析前处理。创建网衣节点并连接各杆单元, 网衣的建模选用铜与 PE 两种材料的网衣, 将防污性能好的铜网衣安装在网箱顶部和底部, 占主要表面积的中间部分安装 PE 网衣, 对于铜网衣将 10×10 个实际网目看成 1 个虚拟计算网目, 而 PE 网衣网目群化比例为 20。网箱使用具有预紧力的绳索将网衣固定在刚性框架上, 忽略网衣变形。锚泊系统建模中, 连

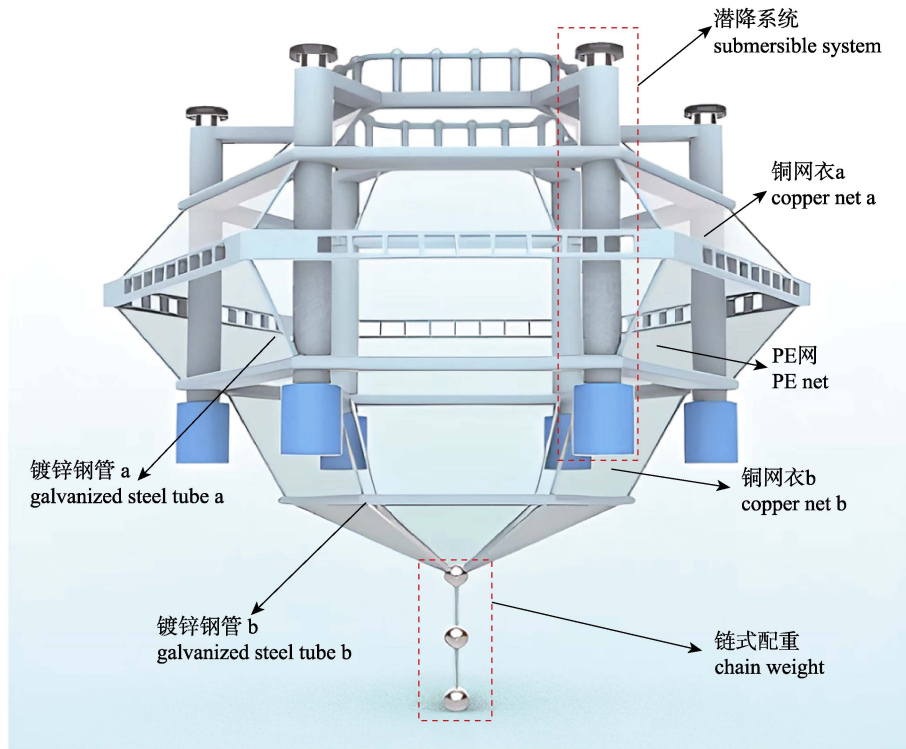


图3 升降式网箱框架三维模型图

Fig. 3 3D model diagram of a submersible cage

接网格缆绳与锚泊缆绳, 根据实际锚泊尺寸将锚点坐标设置为固定点, 给定各缆绳长度、刚度等参数并设定浮漂的初始坐标。

升降式网箱的具体参数如表 1 所示。网箱框架高度约为 9 m, 正六边形主体框架单边最大长度为 11 m。网箱采用水下四点网格格式锚泊方案, 方形系泊框架的单边长度为 42 m。漂浮状态时, 系泊缆绳 $L_1=19.28$ m, $L_2=23.26$ m; 潜降 10 m 状态时, 系泊缆绳长度 $L_1=21.72$ m, $L_2=25.32$ m(图 4)。实验选定海域深度为 25 m, 网箱锚泊系统的主缆绳的长度与海域深度按照 5 : 1 的比例, 计算出网箱锚泊系统的主缆绳的长度为 125 m。

表 1 升降式网箱参数
Tab. 1 Parameters of the submersible cage

组件 component	参数 parameter	值 value
镀锌钢管 a galvanized steel tube a	直径 diameter	76 mm
	壁厚 wall thickness	4 mm
	米重 weight per meter	7.1 kg/m
镀锌钢管 b galvanized steel tube b	直径 diameter	56 mm
	壁厚 wall thickness	3 mm
	米重 weight per meter	4.0 kg/m
铜网衣 copper net	直径 diameter	4 mm
	密度 density	8330 kg/m ³
PE 网衣 PE net	直径 diameter	2.4 mm
	密度 density	962 kg/m ³
潜降系统 submersible system	直径 diameter	630 mm
	壁厚 wall thickness	57.2 mm
	米重 weight per meter	108.1 kg/m
	长度 length	7100 mm
浮漂 buoy	直径 diameter	800 mm
	壁厚 wall thickness	10 mm
	长度 length	1200 mm
	质量 weight	30 kg
锚绳 mooring line	材料 material	PE
	直径 diameter	40 mm
	长度 length	125m
系框绳 bridle line	材料 material	PP
	直径 diameter	42 mm
浮框绳 grid line	材料 material	PP
	直径 diameter	56 mm
链式配重 chain weight	链条材料 chain material	钢 steel
	沉球材料 sink material	铅 lead

1.3 数值模拟方案

开放海域中, 波浪和海流同时存在, 因此研

究网箱在波流联合作用下的水动力特性是十分必要的。目前对于灾害性海浪的定义尚缺乏统一的规范^[36], 张薇等^[37]提出大于 3 m 的海浪为灾害性海浪, 邢闯等^[38]提出有效波高大于或等于 4 m 即为灾害性海浪, 黄小华等^[39]提出将深水网箱放置在流速超过 1.0 m/s 的海区会对其结构造成较大影响。本研究波浪周期工况采用 5.37 s、6.26 s、7.16 s、8.05 s、10.4 s、12.3 s 6 种, 波高设置 2.4 m、3.6 m、6.0 m 3 种, 流速设置 1.00 m/s 和 1.77 m/s 两种(表 2), 共 18 组工况, 分别对网箱漂浮和潜降(图 5)两种状态进行数值模拟实验。

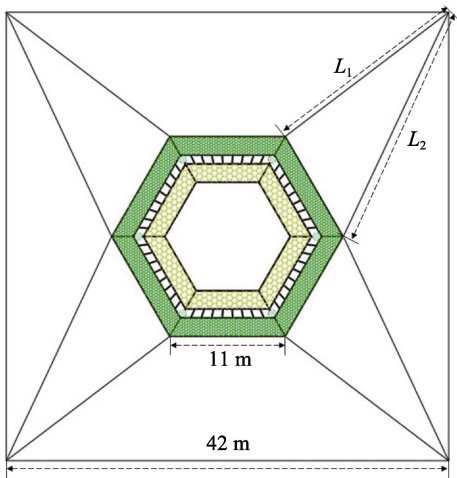


图 4 方形锚泊系统具体参数示意图
 L_1 、 L_2 代表网箱在漂浮或潜降状态时系框绳长度。
Fig. 4 Schematic diagram of specific parameters of square mooring system
 L_1 and L_2 represent the length of the bridle lines when the cage is floating or submerged.

锚绳的受力值与网箱的运动响应是分析升降式网箱水动力特性的重点。考虑工程安全要求, 选取迎流侧和背流侧共 4 根锚绳上(图 6)的最大受力值作为锚绳张力值。网箱在水中的运动响应可分解为 6 个自由度的运动, 分别为纵荡、横荡、垂荡、纵摇、横摇、艏摇。升降式网箱为六边形中心对称结构, 因此可将网箱运动简化为二维平面运动, 只需采集纵荡、垂荡和纵摇三个自由度的运动幅值即可。本文选取海流与波浪传播方向一致^[40-41]的情况进行研究, 且波浪为规则波。

表 2 数值模拟波流参数

Tab. 2 Wave and current parameters in numerical simulation

序号 no.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
波高/m wave height	2.4	2.4	2.4	3.6	3.6	3.6	6.0	6.0	6.0	2.4	2.4	2.4	3.6	3.6	3.6	6.0	6.0	6.0
周期/s period	5.37	6.26	7.16	6.26	7.16	8.05	8.05	10.4	12.3	5.37	6.26	7.16	6.26	7.16	8.05	8.05	10.4	12.3
流速/(m/s) current velocity	1.00												1.77					

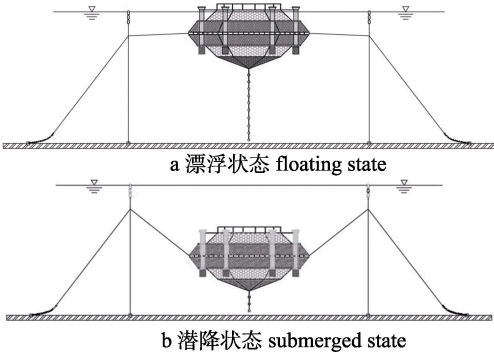


图 5 网箱漂浮(a)与潜降(b)状态示意图

Fig. 5 Schematic diagram of floating (a) and submerged (b) states of the submersible cage

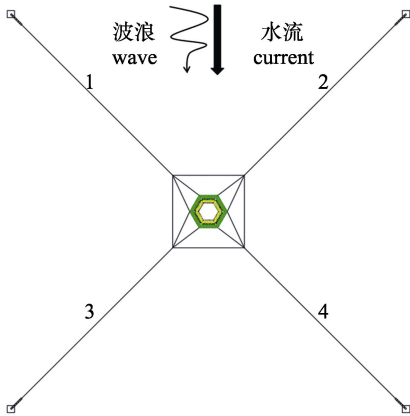


图 6 网箱锚泊方式

1、2 代表迎流侧锚绳, 3、4 代表背流侧锚绳。

Fig. 6 Mooring mode of the submersible cage

1 and 2 represent the mooring lines on the upstream side; 3 and 4 represent the mooring lines on the downstream side.

表 3 锚绳张力

Tab. 3 Anchor rope tension

工况 condition	漂浮状态 floating state			潜降状态 submerged state		
	迎流侧张力/kN tension on the upstream side	背流侧张力/kN tension on the downstream side	衰减幅度/% attenuation amplitude	迎流侧张力/kN tension on the upstream side	背流侧张力/kN tension on the downstream side	衰减幅度/% attenuation amplitude
C2	79.79	49.42	38.07	34.54	33.60	2.75
C5	123.74	54.36	56.07	43.58	42.60	2.24
C8	332.81	94.49	71.61	131.42	64.52	50.91
C11	113.56	42.14	62.89	44.24	34.80	21.22
C14	169.01	36.50	78.40	66.93	48.38	27.72
C17	397.96	49.96	87.45	189.4	62.01	67.26

2 结果与分析

2.1 波流方向上锚绳张力比较

选取部分海况下网箱在漂浮和潜降后迎流侧和背流侧的最大锚绳张力如表 3 所示。通过对比分析数据发现, 无论网箱处于漂浮还是潜降状态, 迎流侧锚绳张力始终大于背流侧。

所测工况中, 网箱在漂浮状态时, 迎流侧到背流侧锚绳张力衰减幅度达 38.07%~87.45%, 该现象与波浪、海流作用以及锚绳的非线性受力属性有关。锚绳受力主要来源于网箱主体框架与网衣, 由于迎流侧锚绳直面海流冲击, 流速增大使得迎流侧锚绳始终处于张紧状态, 而处于网箱后侧的锚绳始终处于松弛状态, 因此背流侧锚绳基本不受水流作用的影响。实际工程中, 应增大锚绳直径或选择高强度材料作为迎流侧锚绳的材质, 使其能够承受更大的张力; 潜降状态时, 迎流侧到背流侧锚绳张力减幅可达 2.24%~67.26%, 相较于漂浮状态, 其迎流侧及背流侧张力较小, 故从工程安全角度考虑, 网箱的锚绳选择应重点关注其在漂浮状态下的受力情况。值得一提的是, 潜降状态的迎流侧与背流侧锚绳张力在部分工况下衰减较小, 这是因为波浪参数较小时, 网箱在潜降状态受波浪扰动较小, 锚绳受力较为稳定。

2.2 波流参数与网箱动力响应的关系

网箱在漂浮与潜降状态时的动力响应变化情况如图 7 所示。当流速一定, 锚绳张力在两种状

态时均随波高、周期的增大而增大, 在 C18 工况时, 漂浮状态的锚绳张力达到最大值 478.03 kN; 在分析波高与网箱运动响应的关系时, 发现垂

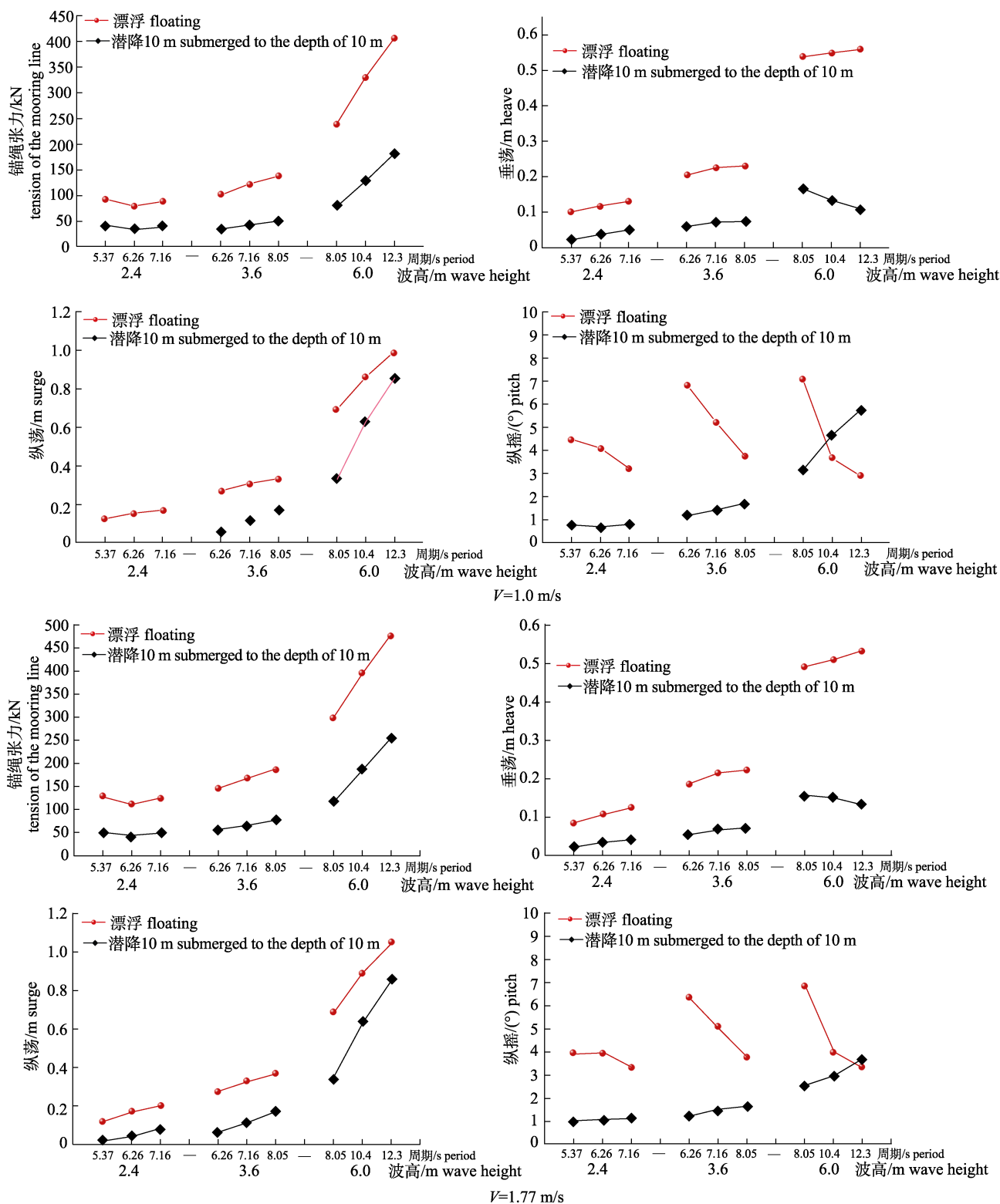


图 7 波流联合状态下网箱动力响应变化

Fig. 7 Variations in the dynamic behaviors of the submersible cage under combined wave-current conditions

荡、纵荡、纵摇均与波高呈正相关; 而运动响应与周期的关系较为复杂, 垂荡在漂浮时与周期呈正相关, 在 C9 工况时达到峰值, 为 0.56 m, 网箱潜降后垂荡值先是随周期增大而增大, 而波高较大时, 其随周期增大而逐渐减小; 纵荡在两种状态时均与周期均呈正相关, 当波高 6 m、周期 12.3 s、流速 1.77 m/s 时, 纵荡在漂浮状态达到峰值, 为 1.055 m; 纵摇在漂浮时与周期呈负相关, 潜降时与周期呈正相关, 当 C7 工况时, 纵摇在漂浮状态达到峰值, 为 7.116°。

上述研究结果表明, 网箱漂浮时波高和周期对于纵摇值的影响趋势相反, 进一步分析波陡(波高/波长)对纵摇的影响(图 8), 发现网箱在漂浮状态时纵摇与波陡呈显著正相关关系。

为直观分析流速与网箱动力响应的关系, 图 9 展示出波浪参数一定时, 流速由 1.00 m/s 增大至 1.77 m/s 后网箱的动力响应变幅。锚绳张力在两种状态时均随流速的增大而增大, 计算可得漂浮状态时平均增幅为 33%, 潜降状态时平均增幅为

42%。由于网箱在潜降状态时运动响应较小, 分析其因流速增大的幅值变化意义不大, 故本节只针对漂浮状态做进一步分析。网箱纵荡变化为增幅, 即纵荡与流速呈正相关, 垂荡变化为减幅, 即垂荡与流速呈负相关, 纵摇与流速的变化无明显关联。垂荡、纵荡、纵摇的总体变幅在-13%~20%之间, 平均变化幅值均不超过 7%。

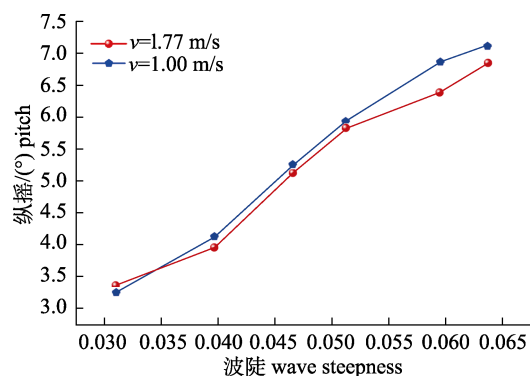


图 8 网箱在漂浮状态时波陡与纵摇关系变化图
Fig. 8 The relationship between wave steepness and pitch of submersible cage under floating state

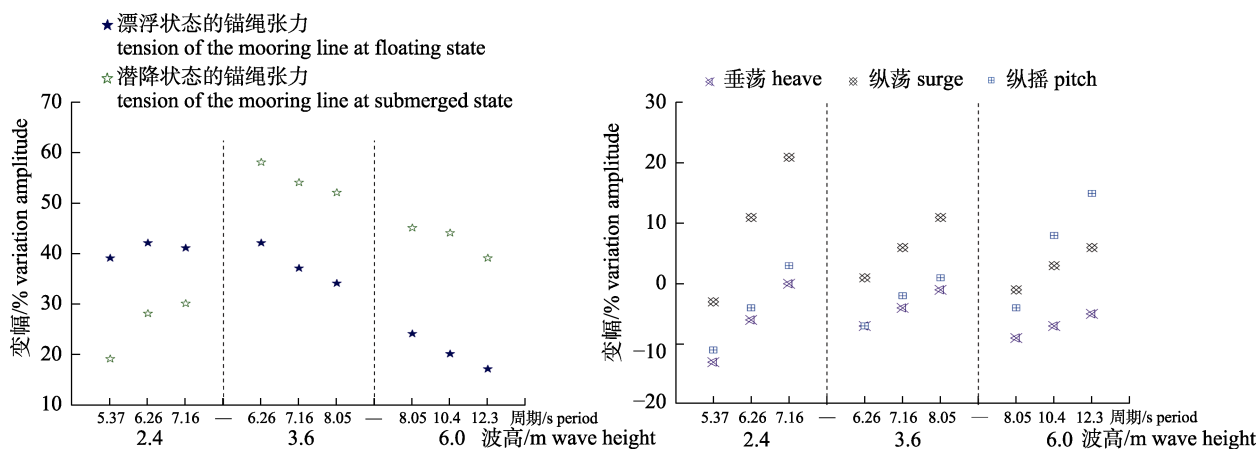


图 9 流速由 1.0 m/s 增大至 1.77 m/s 后网箱动力响应变幅
数值大于 0 为增幅, 小于 0 为减幅。

Fig. 9 Variation in the dynamic behaviors of the submersible cage after the flow velocity increased from 1.00 m/s to 1.77 m/s
Positive number indicates increment, and negative number indicates decrement.

2.3 漂浮至潜降动力响应变化

网箱由漂浮至潜降后的动力响应变幅如图 10 所示。当网箱下潜, 锚绳张力、垂荡和纵荡均呈现减小趋势。其中, 锚绳张力平均减幅为 59%, 在 C7 工况时减幅最大, 达到 67%; 网箱垂荡减幅平

均值为 70%, 在 C9 工况时减幅达到峰值 81%; 纵荡减幅平均值为 57%, 在波高 2.4 m、周期 5.37 s、流速 1.0 m/s 时减幅达到峰值 90%; 而纵摇值在 C8、C9、C18 工况时为增幅, 分别增大 26%、97% 和 10%。

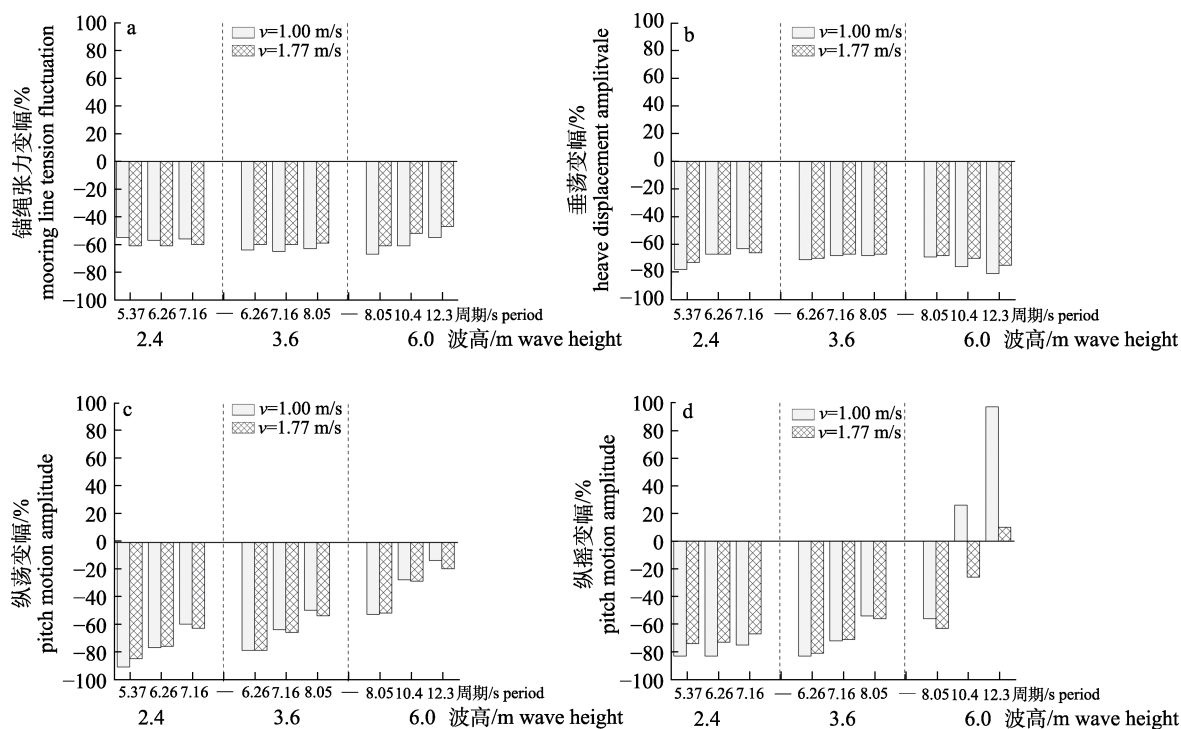


图 10 网箱由漂浮至潜降的动力响应变幅

数值大于 0 为增幅, 小于 0 为减幅。

Fig. 10 Variation amplitude of dynamic behaviors of the submersible cage after diving under different flow velocities
The positive number is the increment, the negative number is the decrement.

图 11 为升降式网箱在 C18 工况中一个完整波周期内的运动状态变化过程。对比漂浮(a)与潜降(b)状态时两组网箱运动情况, 可以发现当网箱处于潜降状态时, 其运动变化幅度明显小于漂浮状态。结果表明, 当网箱完全潜入海中, 其受到的波浪干扰有所减少, 网箱能够保持更长时间的稳定状态。

3 讨论

3.1 波流参数对网箱动力响应的影响

当波高增大, 两种状态的网箱动力响应均呈现上升趋势, 且波高越大上升趋势越显著, 以周期 8.05 s 为例, 当波高从 3.6 m 增大至 6.0 m 后, 漂浮状态时锚绳张力增大了 66%, 垂荡、纵荡、纵摇分别增大了 154%、100%、84%, 这是因为波高与波浪能量呈正相关, 波高越大使得到达网箱的波浪能量越大, 锚绳张力和运动响应随之增大。部分学者采用不同结构网箱为研究对象、设置不同潜降深度进行实验^[29-34], 均得出波高与动力响应呈正相关, 佐证了本实验结果, 这表明网箱的结构与状态不会改变波高的总体影响趋势。

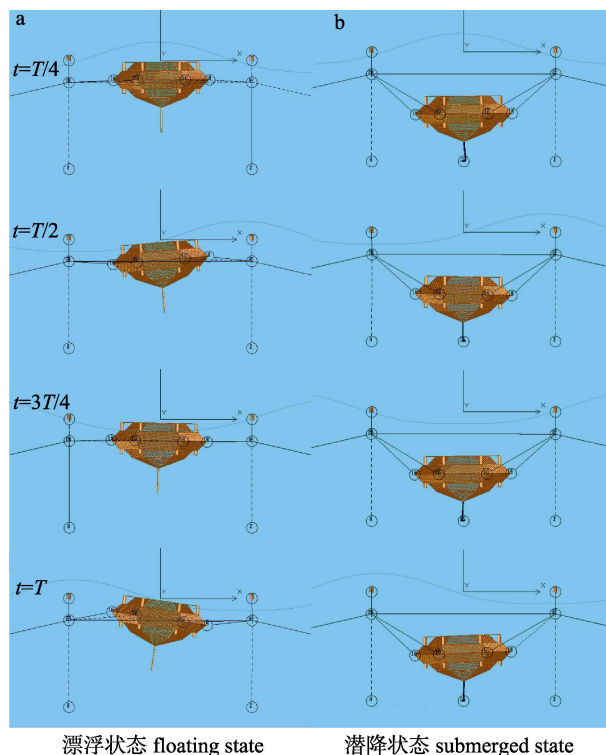


图 11 一个波周期内网箱位置变化图

Fig. 11 Diagram of changes in the position of the submersible cage during a wave period

网箱在漂浮状态时,垂荡、纵荡均与周期呈正相关,而纵摇随周期的增大呈现减小趋势,这是因为波高一定时,波的形状和能量分布随周期变化而改变,波浪在较长周期下的作用力传播相对更平滑,减少了对网箱的冲击,同时纵摇与波陡密切相关,当波高不变,周期增大时,波陡随之减小,网箱在一个周期内的力矩变化减小,导致纵摇的响应减弱。部分学者研究表明,漂浮状态时网箱动力响应与波浪周期之间不存在明显关系^[26],而本研究中纵荡、垂荡、纵摇与周期均有相关性,这是由于网箱底部结构的差异性造成的,与其他支撑式的底部结构不同,本研究对象的底部结构采用了链式配重及具有锥度的几何形状,此种配置使得网箱漂浮状态时重心与浮心重合度高,故网箱虽受波浪扰动,仍然能保证结构的自稳。

当波高、周期一定时,流速增大,锚绳张力平均增大了 33%,流速对于锚绳张力的影响效果显著,因为流速的增大加剧了迎流侧锚绳沿波流方向的变形;而网箱垂荡、纵荡和纵摇平均变化幅值不超过 7%,这表明网箱在海流冲击下仍能维持较好的稳性。网箱运动响应变幅表现不一,其中纵荡表现为增幅,垂荡为减幅,而纵摇值受流速影响不大。纵荡表现为增幅的原因是网箱对水流的阻尼作用使其沿水流方向做水平漂移运动;垂荡表现为减幅是由于实验中锚绳刚度较高,而本身锚绳的松弛与拉紧会使网箱产生很强的非线性响应,网箱受力在波浪激励下产生脉冲作用,而流速的增加削弱了脉冲。

网箱在潜降状态时,网箱锚绳张力、纵荡随波流参数的增大呈现上升趋势,且锚绳张力与纵荡的变化趋势基本一致。因为网箱被水流推移导致纵荡运动增大,而网箱运动受网格锚泊系统的约束,因而锚绳张力增大,进而形成纵荡与锚绳张力动态平衡。此外,垂荡在波高 6.0 m 时,随周期增大开始有下降的趋势,而纵荡、纵摇并未出现此现象,这可能是由于锚泊系统限制了网箱的垂荡运动。

3.2 网箱抗风浪性能分析

网箱下潜后,锚绳张力、垂荡、纵荡值均明显减小,这是因为网箱漂浮时,海面波浪与网箱

结构相互作用产生了较强的波浪力,而网箱潜降后,虽然流体与网箱作用的面积增加,但水的黏性会使波浪的能量分布迅速衰减,波浪力随之减小,因此对锚绳的作用力和网箱的运动响应影响减小。Liu 等^[34]的研究也证实了网箱潜降避浪的可行性,其发现网箱潜降后的锚绳张力、纵荡、垂荡和纵摇值均有所减小。本研究中,波高 6 m、周期 12.3 s 时,网箱下潜后纵摇幅值有所增大,这可能与网箱的结构形状有关,六边形结构中角度和边的数量可有效分担负载而被广泛应用于工程中,网箱沉入水中后,六边形的形状和网衣的组合可能在水流流经时产生涡流或局部流动分离,增加了其受到的水动力矩,从而导致纵摇的增大,关于此类网箱的流场分析有待研究。

网箱动力响应减幅在流速为 1.77 m/s 的表现不亚于流速为 1.0 m/s 时,这说明即使有海流的影响,该网箱也可以通过整体下潜的方式实现有效避浪,减小网箱运动幅度,保障网箱的安全性。此结论与 Huang 等^[31]的实验结论有所不同,其研究表明网箱下潜后,运动响应除垂荡值有所减小,网箱的锚绳力、纵摇与横摇均呈现增大趋势,产生差异的原因可能与实验所设置的波流参数、网箱尺度、潜降深度有关,其研究的网箱在实验中并未完全下潜,而本研究采用的网箱下潜 10 m 是完全潜降状态。

网箱潜降后的运动响应,除垂荡外,纵荡、纵摇与漂浮状态的差值随波高、周期的增大而减小,C8、C9、C18 工况中,潜降后的纵摇值甚至大于漂浮状态,这说明即使在潜降状态,当波长相较于网箱尺度较大时,波浪对网箱的扰动依然很大,而流速的增加会显著降低这一影响。本研究中最大波高设置为 6.0 m,最大流速达到 1.77 m/s,在巨浪、强流的联合作用下,网箱最大垂荡、纵荡和纵摇值分别为 0.549 m、1.055 m 和 7.116°,研究表明此种设计形式的潜降式网箱在极端海况条件下具有较高的安全性。

4 结论

网箱在漂浮与潜降状态时的动力响应与波浪参数有着明显的关联。迎流侧锚绳张力大于背流

侧,且锚绳张力在两种状态时均与波高、周期呈正相关;垂荡、纵荡、纵摇在两种状态时均与波高呈正相关;垂荡在漂浮时与周期呈正相关;纵荡在两种状态时均与周期呈正相关;纵摇在漂浮时与周期呈负相关,潜降时与周期呈正相关。

网箱在漂浮与潜降状态时的动力响应与流速有着明显的关联。锚绳张力在两种状态时均随流速的增大而增大;网箱在漂浮状态时纵荡与流速呈正相关,垂荡与流速呈负相关,纵摇与流速无明显关联,垂荡、纵荡、纵摇的总体变幅在-13%~20%之间,平均变化幅值不超过 7%。

网箱在漂浮状态时最大垂荡、纵荡和纵摇值分别为 0.549 m、1.055 m 和 7.116°;网箱整体下潜后,锚绳张力、垂荡、纵荡和纵摇平均减幅分别为 59%、70%、57%、49%,表明网箱在极端海况下具有良好的潜降避浪性能。

参考文献:

- [1] Xu Y F, Xu H, Liu H, et al. Research on the development way of deep-sea mariculture in China[J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(1): 9-15. [徐琰斐, 徐皓, 刘晃, 等. 中国深远海养殖发展方式研究[J]. *渔业现代化*, 2021, 48(1): 9-15.]
- [2] Shi J G, Yu W W, Lu B C, et al. Development status and prospect of Chinese deep-sea cage[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(6): 992-1005. [石建高, 余雯雯, 卢本才, 等. 中国深远海网箱的发展现状与展望[J]. *水产学报*, 2021, 45(6): 992-1005.]
- [3] Xu H, Liu H, Xu Y F. Current situation and prospect of China's far-reaching marine aquaculture[J]. *China Fisheries*, 2021(6): 36-39. [徐皓, 刘晃, 徐琰斐. 我国深远海养殖发展现状与展望[J]. *中国水产*, 2021(6): 36-39.]
- [4] Bao X T, Chen Z X, Cui M C, et al. Discussion and consideration on the development of deep sea aquaculture equipment in China[J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49(5): 8-14. [鲍旭腾, 湛志新, 崔铭超, 等. 中国深远海养殖装备发展探讨及思考[J]. *渔业现代化*, 2022, 49(5): 8-14.]
- [5] Huang X H, Pang G L, Yuan T P, 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. [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.]
- [6] Zhao Y P. Numerical investigation on hydrodynamic behavior of deep-water gravity cage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. [赵云鹏. 深水重力式网箱水动力特性数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.]
- [7] Gui F K. Hydrodynamic behaviors of deep-water gravity cage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. [桂福坤. 深水重力式网箱水动力学特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.]
- [8] Huang X H, Guo G X, Hu Y, et al. Numerical simulation of forces and motion deformation of deep-water net cages in waves and currents[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(2): 443-450. [黄小华, 郭根喜, 胡昱, 等. 波流作用下深水网箱受力及运动变形的数值模拟[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(2): 443-450.]
- [9] Cui Y, Guan C T, Huang B, et al. Numerical simulation of the hydrodynamic characteristics of double-bottom cage for flounder fish under waves[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(6): 18-24. [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.]
- [10] Cheng H, Huang L Y, Ni Y, et al. Numerical study on hydrodynamics of single-point mooring different structural net of "diamond shape" gravity fish cage in current[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(3): 161-170. [程晖, 黄六一, 倪益, 等. 水流条件下单点系泊不同结构“钻石型”重力式网箱的水动力特性数值模拟[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(3): 161-170.]
- [11] Cao Y, Wang N, Ye Q, et al. Study on tension distribution and deformation of gravity aquaculture cage[J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49(5): 106-114. [曹宇, 王宁, 叶谦, 等. 重力式海洋养殖网箱系统受力分布及变形研究[J]. *渔业现代化*, 2022, 49(5): 106-114.]
- [12] Li K P, Xu T J, Dong G H, et al. Study on the dynamic response of float collar of gravity cages subject to water currents[J]. *Fishery Modernization*, 2016, 43(1): 30-35. [李坤鹏, 许条建, 董国海, 等. 水流作用下重力式网箱浮架结构的动力响应研究[J]. *渔业现代化*, 2016, 43(1): 30-35.]
- [13] Huang X H, Guo G X, Hu Y, et al. Forces on floating circular collar of net cages subjected to waves[J]. *South China Fisheries Science*, 2009, 5(4): 36-40. [黄小华, 郭根喜, 胡昱, 等. 圆形网箱浮架系统的受力特性研究[J]. *南方水产*, 2009, 5(4): 36-40.]
- [14] Zheng Y N, Dong G H, Gui F K, et al. Movement response of floating circle collars of gravity cages subjected to waves[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(S1): 222-228. [郑艳娜, 董国海, 桂福坤, 等. 圆形重力式网箱浮架结构在波浪作用下的运动响应[J]. *工程力学*, 2006, 23(S1): 222-228.]
- [15] Shan H N, Dong G H, Xu T J. Structural analysis of floating collar for gravity cage system in the open sea[J]. *Fishery Modernization*, 2015, 42(2): 55-59, 66. [单恒年, 董国海, 许条建. 重力式网箱浮架结构的动力响应特性研究[J]. *渔业现代化*, 2015, 42(2): 55-59, 66.]
- [16] Li Y C, Mao Y C, Gui F K. The influence of sinker forms and weight on mooring line force of gravity sea-cage[J]. *China Offshore Platform*, 2006, 21(1): 6-15. [李玉成, 毛雨婵, 桂福坤. 不同配重方式和配重大小对重力式网箱受力

- 的影响[J]. 中国海洋平台, 2006, 21(1): 6-15.]
- [17] Zhao Y P, Li Y C. Numerical analysis of effect of sinker weight on hydrodynamics behaviour of gravity cage net[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006(S1): 198-205.
- [18] Wang X, Huang L Y, Wu Q L, et al. Study on the influence of different weight systems on hydrodynamic characteristics of HDPE circular gravity fish cage[J]. Fishery Modernization, 2024, 51(1): 29-38. [王笑, 黄六一, 邬骞力, 等. 配重系统对 HDPE 圆形重力式网箱水动力特性影响研究[J]. 渔业现代化, 2024, 51(1): 29-38.]
- [19] Zheng Y N, Dong G H, Gui F K, et al. Wave force on mooring system of gravity cage[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(2): 180-185. [郑艳娜, 董国海, 桂福坤, 等. 圆形重力式网箱锚碇系统的受力研究[J]. 应用力学学报, 2007, 24(2): 180-185.]
- [20] Zhao Y P, Li Y C, Dong G H, et al. Tension distribution of gravity cage net in steady current[J]. Fishery Modernization, 2008, 35(6): 5-8, 63. [赵云鹏, 李玉成, 董国海, 等. 水流作用下重力式网箱网衣张力分布[J]. 渔业现代化, 2008, 35(6): 5-8, 63.]
- [21] Xu T J, Dong G H, Zhao Y P, et al. Hydrodynamic behavior of a gravity cage with frame anchor system in irregular waves[C]// Proceedings of the 20th International Ocean and Polar Engineering Conference. Cupertino: ISOPE, 2010: 600-607.
- [22] Xu T J, Zhao Y P, Dong G H, et al. Analysis of hydrodynamic behavior of a submersible net cage and mooring system in waves and current[J]. Applied Ocean Research, 2013, 42(3): 155-167.
- [23] Huang L Y, Liang Z L, Wan R, et al. Study on the maximum inclined angle of a HDPE circle submersible net cage[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(6): 953-958. [黄六一, 梁振林, 万荣, 等. HDPE 圆形升降式网箱下沉时最大倾角的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(6): 953-958.]
- [24] Liu Z, Zhao Y P, Wang X X, et al. Numerical investigation of hydrodynamic behavior of submersible raft in waves[J]. Fishery Modernization, 2015, 42(3): 56-60, 72. [刘庄, 赵云鹏, 王欣欣, 等. 波浪作用下可升降式筏式养殖设施水动力特性数值模拟研究[J]. 渔业现代化, 2015, 42(3): 56-60, 72.]
- [25] Huang B, Guan C T, Cui Y, et al. Study on anti-overturn device and technology of square submersible cages sinking process[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 313-320, 326. [黄滨, 关长涛, 崔勇, 等. 方形升降式网箱下沉过程防倾覆装置与技术的研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 313-320, 326.]
- [26] Wang F, Bi C W, Zhao Y P. Lifting movement characteristics of submersible net cages under still water and steady currents[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(1): 141-146. [王非, 毕春伟, 赵云鹏. 静水和纯流下可沉浮式网箱升降运动特性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(1): 141-146.]
- [27] Wang F. Flotation/Submersion system and dynamic responses characteristics of submersible net cage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. [王非. 可沉浮式网箱升降系统及动力响应特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.]
- [28] Tan Y M, Lou S Y, Yuan S P, et al. Design and simulation of modular automatic lifting deep-sea cage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 196-203. [谭永明, 楼上游, 袁世鹏, 等. 模块化自动升降式深海网箱设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 196-203.]
- [29] Zhao Z Y. Design of double-system lifting flexible cage and its load calculation in marine environment[J]. China Water Transport, 2024, 24(8): 45-47. [赵志遥. 双系统升降式柔性网箱的设计及其在海洋环境的荷载计算[J]. 中国水运, 2024, 24(8): 45-47.]
- [30] Huang L Y, Yang Z, Li Y Y, et al. Experimental study on the hydrodynamic characteristics of self-lift tension leg cage in current[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(2): 9-15. [黄六一, 杨正, 李玉岩, 等. 水流作用下自升降式张力腿网箱水动力学特性试验研究[J]. 渔业现代化, 2021, 48(2): 9-15.]
- [31] 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.
- [32] Jin J Z, Su B, Dou R, et al. Numerical modelling of hydrodynamic responses of Ocean Farm 1 in waves and current and validation against model test measurements[J]. Marine Structures, 2021, 78: 103017.
- [33] Wang G, Martin T, Huang L Y, et al. Numerical investigation of the hydrodynamics of a submersible steel-frame offshore fish farm in regular waves using CFD[J]. Ocean Engineering, 2022, 256: 111528.
- [34] Cui Y, Guan C T, Qin S J, et al. Hydrodynamic characteristics of a semisubmersible aquaculture cage under waves[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 11-17. [崔勇, 关长涛, 秦升杰, 等. 波浪作用下半潜式养殖网箱水动力特性[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 11-17.]
- [35] Xu T J, Zhao Y P, Dong G H, et al. Analysis of hydrodynamic behavior of a submersible net cage and mooring system in waves and current[J]. Applied Ocean Research, 2013, 42: 155-167.
- [36] 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.
- [37] Wu Y J, Huang X H, Pang G L, et al. Study on wave resistance performance of a submersible deep-sea aquaculture cage with vessel-shaped truss structure[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 18-28. [吴元紧, 黄小华, 庞国良, 等. 潜浮式船型桁架结构深海养殖网箱避浪性能研

- 究[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 18-28.]
- [38] Liu S C, Bi C W, Yang H, et al. Experimental study on the hydrodynamic characteristics of a submersible fish cage at various depths in waves[J]. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(3): 701-709.
- [39] Liu H F, Bi C W, Zhao Y P. Experimental and numerical study of the hydrodynamic characteristics of a semisubmersible aquaculture facility in waves[J]. Ocean Engineering, 2020, 214: 107714.
- [40] Wan R, He X, Wang X X, et al. A method of mesh group for fish cage anti-current characteristics by means of finite element analysis[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(6): 885-888. [万荣, 何鑫, 王欣欣, 等. 一种适用于网箱耐流特性有限元分析的网目群化方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(6): 885-888.]
- [41] 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.]

Hydrodynamic characteristics of a submersible cage in waves and currents

LI Xiaoran^{1,3}, CUI Yong^{1,2}, GUAN Changtao^{1,2}, WANG Gang^{1,2}, WU Jintao¹, GUO Yinuo^{1,3}

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

2. Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China;

3. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: In this study, a composite cage that integrates many modules, such as a steel frame structure, dive system, energy, and monitoring system, is proposed. It is necessary to conduct hydrodynamic numerical simulation tests to understand the capability to resist waves and currents and ensure the long-term safe and coordinated operation of each system. First, the wave force acting on the cage is calculated based on the potential flow theory. Then, using the motion equation to solve the dynamic response of the cage, a numerical model is constructed to study the potential of the cage under extreme sea conditions. The results indicate that: The dynamic response of the cage in the floating and submerged states is significantly correlated with the wave parameters. The tension of the anchor rope on the upstream side is always greater than that on the downstream side, and the anchor rope tension is positively correlated with the wave height and period in both states. The heave, surge, and pitch are all positively correlated with wave height in both states; it is positively correlated with the period when floating, but has no obvious correlation with the period when sinking. Surge is positively correlated with the period in both states, whereas the pitch is negatively correlated with the period when floating and positively correlated with it period when sinking. The dynamic responses of the cage in the floating and submerged states were significantly correlated with the current velocity. The tension of the anchor rope increases with the increase in flow speed in both states. When the cage is in the floating state, the pitch is positively correlated with the flow speed, the heave is negatively correlated with the flow speed, and there is no obvious correlation between the pitch and the flow speed. The overall variation amplitude of the surge and pitch is between -13% and 20%, and the average variation amplitude does not exceed 7%. When the cage is in the floating state, the maximum heave, surge, and pitch values were 0.549 m, 1.055 m, and 7.116°, respectively. After the cage was submerged, the anchor rope tension, heave, surge, and pitch decreased. The amplitudes were 59%, 70%, 57%, and 49%, respectively, indicating that the cage has a good capability to resist waves and currents. These results have practical significance for improving the safety and efficiency of submersible cage work.

Key words: submersible cage; wave-current combination; anchor rope tension; motion response; numerical simulation; deep sea aquaculture

Corresponding author: CUI Yong. E-mail: cuiyong@ysfri.ac.cn