

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2011.0443

波流作用下深水网箱受力及运动变形的数值模拟

黄小华, 郭根喜, 胡昱, 陶启友, 张小明

中国水产科学研究院 南海水产研究所, 广东 广州 510300

摘要: 基于已建立的浮架和网衣数学模型, 对不同波况和流速共同作用条件下 HDPE 深水网箱所受的锚绳力、波流力、容积损失率以及浮架倾角进行数值计算, 设计的波流要素值为: 波高 $H=4\sim6$ m, 周期 $T=6.0\sim8.6$ s, 流速 $U=0.3\sim0.9$ m/s。结果表明, 网箱锚绳受力、波流力和容积损失率均与波高和流速成正比, 与周期的关系不明显, 且网箱系统所受的波流力约为网箱迎浪侧两根锚绳受力的合力。在波高 $H=4\sim6$ m、流速 $U=0.75$ m/s 时, 网箱容积损失率达到 47%~56%, 网箱变形较为严重, 为此建议网箱养殖区域应选择流速小于 0.75 m/s 的海区较为适宜。周期对网箱容积损失率的影响很小, 对浮架倾角的影响较为明显, 波高和流速不变时, 随着周期的增大, 浮架倾角会有所减小。本研究旨在探讨波浪流对深水网箱受力及运动变形的影响, 为高海况网箱养殖的风险评估提供参考依据。
[中国水产科学, 2011, 18(2): 443–450]

关键词: 深水网箱; 波流; 受力特性; 运动变形; 数值模拟

中图分类号: S95

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2011)02-0443-08

深水区浪高流急的复杂海况使得深水网箱养殖在获取高收益的同时也带来了高风险, 尤其在恶劣的海洋工况下, 深水网箱所受到的波浪和海流作用更大, 有可能导致网箱锚泊系统的移位和养殖容积的大幅度减少, 从而影响到整个深水网箱养殖的正常生产。因此, 开展深水网箱系统在波浪流共同作用下的受力和运动变形研究, 有助于为深水网箱的工程设计及网箱养殖的风险评估提供参考依据。近年来, 国内外有关深水网箱水动力特性方面的研究已有不少, 研究内容涉及到网箱各部件如网衣^[1-7]、浮架^[8-12]及锚泊系统^[13-17]等, 但多数研究是以纯波浪或纯水流工况为主, 对于波浪与水流共同作用下深水网箱的研究还相对较少, 这方面研究在国内尤为缺失, 所见文献报道中, Zhao 等^[18]通过数值模拟方法研究了波浪流作用下重力式网箱的运动响应和锚绳受力情况,

且模拟结果与试验数据较吻合。

在此之前的研究中, 已分别对圆形网衣和浮架系统的运动及受力特性进行了数模研究^[7-9], 并利用 Lader 等^[3]的试验结果对网衣模型的正确性和有效性进行了验证。本研究是在上述研究成果的基础上, 基于建立的浮架和网衣数学模型, 对不同波况和流速共同作用条件下 HDPE 深水网箱所受的锚绳力、波流力、容积损失率以及浮架倾角进行了数值计算, 分析了波浪流对整体深水网箱的受力及运动变形的影响。

1 数值计算模型

1.1 波流场理论

根据线性波浪理论, 波流场中的波面升高和水质点运动速度为:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

收稿日期: 2010-06-17; 修订日期: 2010-08-12.

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA100302, 2010AA100301); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD09A14); 广东省海洋渔业科技推广专项资助项目(A200899G02, A200901G03); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助项目(2010YD09).

作者简介: 黄小华(1982-), 男, 助理研究员, 从事渔业设施工程技术研究. E-mail: huangx-hua@163.com

通讯作者: 郭根喜, 研究员. E-mail: scsggx@21cn.com

$$U_x = U_{cx} + Aw \frac{chk(z+h)}{shkh} \cos(kx - wt) \quad (2a)$$

$$U_z = U_{cz} + Aw \frac{shk(z+h)}{shkh} \sin(kx - wt) \quad (2b)$$

则波流场水质点的加速度可通过对式(2)求导来得出:

$$a_x = \frac{\partial U_x}{\partial t} = \frac{\partial U_{cx}}{\partial t} + Aw^2 \frac{chk(z+h)}{shkh} \sin(kx - wt) \quad (3a)$$

$$a_z = \frac{\partial U_z}{\partial t} = \frac{\partial U_{cz}}{\partial t} - Aw^2 \frac{shk(z+h)}{shkh} \cos(kx - wt) \quad (3b)$$

式中, η 为波面(m), U_x 和 U_z 分别为波流场水质点的水平和竖直方向速度(m/s), U_c 为水流速度(m/s), a_x 和 a_z 分别为水平和竖直方向的加速度(m/s²), A 为波幅(m), w 为波浪频率, k 为波数, h 为水深(m), t 为时间(s), x 、 z 为波流场水质点位置。

1.2 浮架模型

浮架系统一般主要由主浮管、立柱、三通连接件及扶手组成, 考虑到深水网箱一般处于系泊漂浮状态, 浮架系统中真正影响受力的是与水体接触的主浮管, 而立柱、三通连接件、扶手等水上附属结构物均处于水面以上, 水流或波浪对这些结构没有直接作用或作用较小。因此为了简化计算, 将浮架系统中的立柱、三通连接件及扶手等部件的质量折算到主浮管来考虑(图 1)。在进行浮架结构受力分析时, 采用集中质量法将圆形浮架离散成众多微元, 应用刚体运动学原理, 将浮架各个微元构件所受到的外力合力累加到浮架的质心处, 相当于只对一个质点建立 6 个自由度上的运动方程。浮架在波流作用下所受到的外力有重力、浮力、波流力以及与锚绳相连的微元构件所承受的锚绳张力, 其各数学表达式及浮架运动方程的建立过程具体可参考文献[8], 这里不做重复介绍, 以下仅列出浮架的运动方程组。

浮架刚体在整体坐标系下的 3 个平动运动方程为:

$$\ddot{X}_G = \frac{1}{M_G} \sum_{i=1}^N F_{xi} \quad (4a)$$

$$\ddot{Y}_G = \frac{1}{M_G} \sum_{i=1}^N F_{yi} \quad (4b)$$

$$\ddot{Z}_G = \frac{1}{M_G} \sum_{i=1}^N F_{zi} \quad (4c)$$

式中: M_G 为刚体总质量(kg), N 为浮架微元个数, $\ddot{X}_G$ 、 $\ddot{Y}_G$ 、 $\ddot{Z}_G$ 为浮架刚体质心加速度(m/s²)。

浮架在物体坐标系下的 3 个转动方程表示为:

$$I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_2 \omega_3 = \sum_{i=1}^N M_{1i} \quad (5a)$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_3 \omega_1 = \sum_{i=1}^N M_{2i} \quad (5b)$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_1 \omega_2 = \sum_{i=1}^N M_{3i} \quad (5c)$$

式中: 下标(1、2、3)代表物体坐标系; M_{1i} 、 M_{2i} 、 M_{3i} 分别为对坐标系 1、2、3 主轴的外力矩, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为物体坐标系的角速度, I_1 、 I_2 、 I_3 为浮架对 1、2、3 主轴的惯性矩。

物体坐标系与整体坐标系之间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos \phi_2 \cos \phi_3 & \cos \phi_1 \sin \phi_3 + \sin \phi_1 \sin \phi_2 \cos \phi_3 \\ -\cos \phi_2 \sin \phi_3 & \cos \phi_1 \cos \phi_3 - \sin \phi_1 \sin \phi_2 \sin \phi_3 \\ \sin \phi_2 & -\sin \phi_1 \cos \phi_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

上式中: ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 为布莱恩角^[19]。

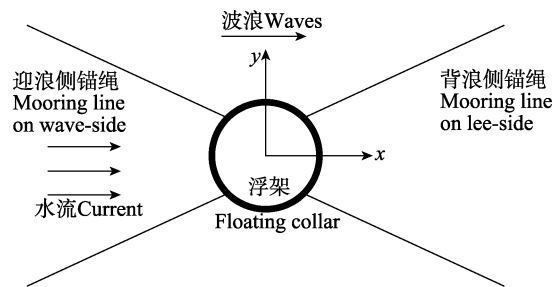


图 1 简化后的网箱浮架模型示意图

Fig.1 Sketch of simplified floating collar model for numerical calculation

1.3 网衣模型

利用集中质量法将柔软的网衣分解成众多质点和构件组成的离散模型, 集中质量点是设于每个网目目脚的两端。在计算作用在目脚上的外力时, 可以将单个目脚看作为一个构件, 其在波流

作用下的受力由重力、浮力、网线张力和波流力组成, 具体数学表达式在文献[7]已做详细介绍。

在整体坐标系下将各质点相关构件的受力进行累加并将其分配到质点上(图 2), 利用牛顿第二定律可建立如下的网衣各集中质量点的运动方程。

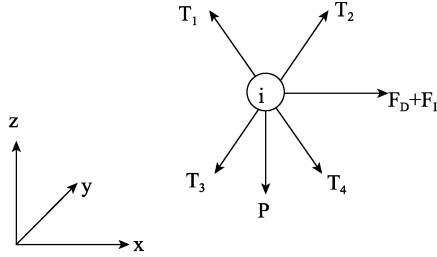


图 2 网衣集中质量点计算示意图

T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 : 网线张力; F_D : 速度力; F_I : 惯性力

Fig.2 Schematic diagram of the lumped mass point for the calculations for mesh model

T_1, T_2, T_3, T_4 : Tension forces of net twines; F_D : Drag force; F_I : Inertial force

$$m_i \ddot{X}_i = \sum_{j=1}^N (F_{DXj} + F_{IXj} + T_{Xj}) \quad (8a)$$

$$m_i \ddot{Y}_i = \sum_{j=1}^N (F_{DYj} + F_{IYj} + T_{Yj}) \quad (8b)$$

$$m_i \ddot{Z}_i = \sum_{j=1}^N (F_{DZj} + F_{IZj} + P_j + T_{Zj}) \quad (8c)$$

式中: N 为质点相关构件的数量, $\ddot{X}_i$ 、 $\ddot{Y}_i$ 、 $\ddot{Z}_i$ 为质点的加速度(m/s^2), P_j 为重力与浮力的合力(N)。

根据 Morison 方程, 波流力计算表达式可写为:

$$F_{wc} = F_D + F_I = \frac{1}{2} \rho_w C_D S \left| (\bar{U} - \bar{U}_s) \cdot \bar{e} \right|^2 \bar{e} + \rho_w \nabla C_M \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} - \rho_w \nabla k_m \frac{\partial \bar{U}_s}{\partial t} \quad (9)$$

式中: $\bar{U}_s$ 为构件自身速度(m/s), C_D 为速度力系数, $C_M = 1 + k_m$ 为惯性力系数, k_m 为附加质量系数, ∇ 为构件体积(m^3), $\bar{e}$ 为构件单位向量。

1.4 数值求解

浮架运动方程(4)和网衣运动方程(8)可以写成下述形式的二阶微分方程, 该类方程可以采用四阶 Runge-Kutta 方法进行数值求解^[20]。

$$\ddot{\xi} = F(t, \xi, \dot{\xi}) \quad (10)$$

质点的位移 ξ 和速度 $\dot{\xi}$ 可以表达为:

$$\xi(t + \Delta t) = \xi(t) + \Delta t \cdot \dot{\xi}(t) + \Delta t^2 \cdot (k_1 + k_2 + k_3) / 6 \quad (11a)$$

$$\dot{\xi}(t + \Delta t) = \dot{\xi}(t) + \Delta t \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) / 6 \quad (11b)$$

式中 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 分别为:

$$k_1 = F(t, \xi(t), \dot{\xi}(t))$$

$$k_2 = F\left(t + \frac{\Delta t}{2}, \xi(t) + \frac{\Delta t}{2} \dot{\xi}(t), \dot{\xi}(t) + \frac{\Delta t}{2} k_1\right)$$

$$k_3 = F\left(t + \frac{\Delta t}{2}, \xi(t) + \frac{\Delta t}{2} \dot{\xi}(t) + \frac{\Delta t^2}{4} k_1, \dot{\xi}(t) + \frac{\Delta t}{2} k_2\right)$$

$$k_4 = F\left(t + \Delta t, \xi(t) + \Delta t \dot{\xi}(t) + \frac{\Delta t^2}{2} k_2, \dot{\xi}(t) + \Delta t k_3\right)$$

计算中首先根据 t 时刻质点的位移和速度, 计算锚绳力、浮架和网衣构件上的波流力以及网线变形所产生的张力, 基于微分方程(4)、(5)和(8)求解出质点的运动加速度, 然后再根据式(11)求出 $t + \Delta t$ 时刻的质点位移和速度。最后重复 t 时刻的计算步骤直到计算结束。

2 计算参数

参照 HDPE 深水网箱各部件的实际参数: 网箱周长 40 m, HDPE 浮管截面半径 125 mm, 浮管壁厚 15 mm, 浮架总质量 1 296 kg; 网衣初始形状如图 3 所示, 网衣高度 9.6 m, 网目大小 $2a = 75$ mm, 网线直径 $d = 3$ mm, 横向缩结系数 0.6, 纵向缩结系数 0.8, 网衣材质为 PE; 网衣底端处设有

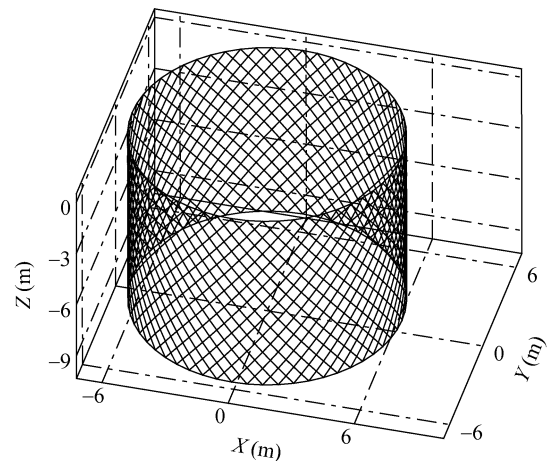


图 3 圆柱形网衣初始形状示意图

Fig.3 Sketch of the cylinder net with diamond mesh

一根长为 40 m 的金属钢圈作为配重, 配重大小为 540 kg; PE 锚绳长度 50 m, 直径 40 mm; 在数值计算中, 波浪与水流入射方向均为 x 方向, 水深 $h=15$ m, 海水的密度 $\rho_w=1\ 030\text{ kg/m}^3$ 。

设计的波流要素值为: 波高 $H=4\text{ m}$ 、 5 m 、 6 m , 周期 $T=6.0\text{ s}$ 、 7.2 s 、 8.6 s , 流速 $U=0.3\text{ m/s}$ 、 0.45 m/s 、 0.6 m/s 、 0.75 m/s 、 0.9 m/s 。

3 结果与分析

3.1 锚绳受力

图 4 为网箱在不同波流条件下的迎浪侧单根锚绳的受力结果。可以明显看出, 锚绳受力随着流速、波高的增大而增大。相同波况下, 在流速 $U=0.3\sim 0.9\text{ m/s}$ 的变化范围内, 锚绳力差值约为 20 kN; 相同流速和周期下(图 4-d,e,f), 在波高 $H=4\sim 6\text{ m}$ 的变化范围内, 锚绳力差值约为 15 kN, 表明了流速和波高对锚绳受力都具有较为显著的影响, 且流速对锚绳受力的影响要大于波高的影响情况。另外, 从图 4-a,b,c 中可以看出, 相同波高和流速下, 对应不同周期的锚绳力峰值未发生明显变化, 说明了周期对锚绳受力的影响较小。

3.2 波流力

波流联合作用下网箱系统所受波流力随波高、周期和流速的变化关系见图 5 所示。从图中可以看出, 网箱系统所受波流力与波高和流速成正比, 与周期的关系不明显。相同波况下, 在流速 $U=0.3\sim 0.9\text{ m/s}$ 的变化范围内, 波流力差值为 35~50 kN; 相同流速和周期下, 在波高 $H=4\sim 6\text{ m}$ 的变化范围内, 波流力差值为 25~40 kN, 表明了流速和波高对网箱所受波流力同样具有显著影响。将图 5 与图 4 进行对比可以发现, 在波浪与水流组合的各种条件下, 网箱系统所受的最大波流力约为迎浪侧单根锚绳受力的 2 倍, 但考虑到实际网箱养殖生产中网箱同侧两根锚绳受力差异往往较大, 因此, 可简单采用网箱迎浪侧两根锚绳的合力近似作为网箱系统所受的波流力。

3.3 网箱变形

图 6 给出了不同波高、周期和流速条件下的网箱容积损失情况。从图 6-a、b、c 可以看出, 3 种周期下容积损失率随流速的变化曲线基本一致, 周期对网箱容积损失率的影响很小。这里容积损失率定义为 $1-V_p/V_{p0}$, 其中 V_p 为网箱变形后的容积,

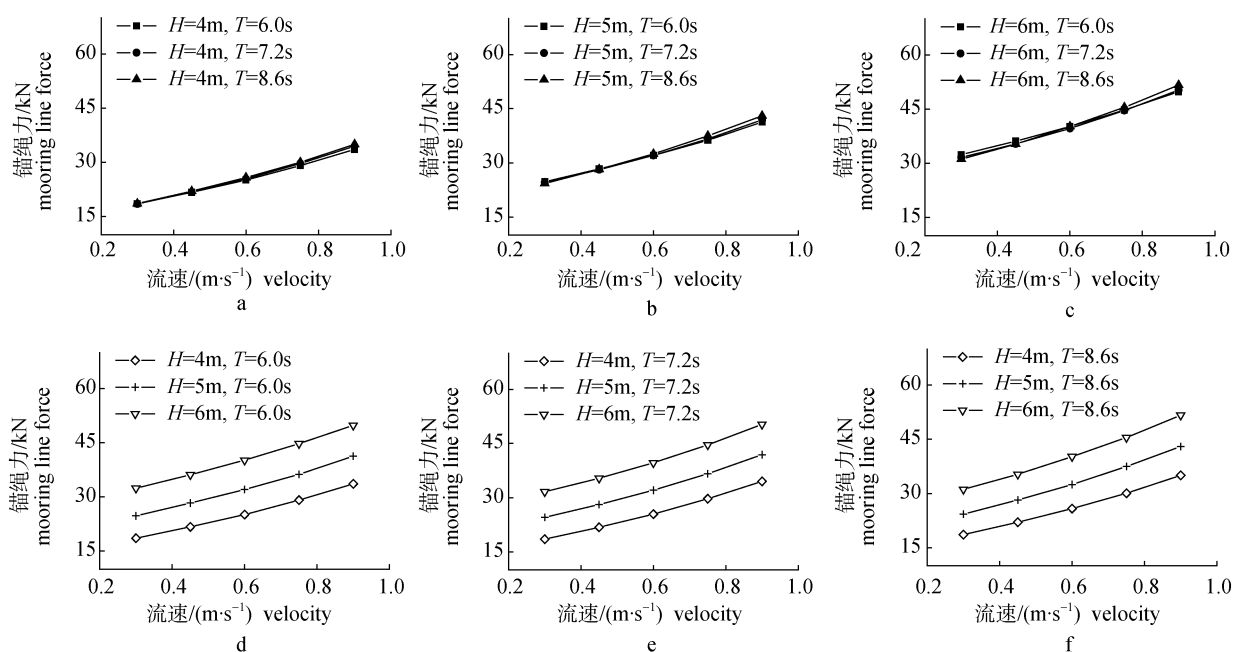


图 4 网箱锚绳受力峰值

Fig.4 Maximum mooring line forces for the net-cage caused by various wave-current conditions

V_{p0} 为无水流作用时的初始容积。从图 6-d、e、f 可以明显看出, 波高和流速的增大都会加剧网箱的运动变形, 网箱容积损失率加大, 表明了波高和流速对网箱变形具有显著影响。在流速 $U=0.75$ m/s 时, 网箱容积损失率则达到 47%~56%, 网衣

变形较为严重; 在波高 $H=4\sim6$ m 的变化范围内, 网箱容积损失率的差值随着流速的增大而减小。以周期 $T=8.6$ s 为例, 网箱容积损失率差值从流速 $U=0.3$ m/s 时的 13.1%减小为 $U=0.9$ m/s 时的 6.9%, 后者约为前者的 0.53 倍。

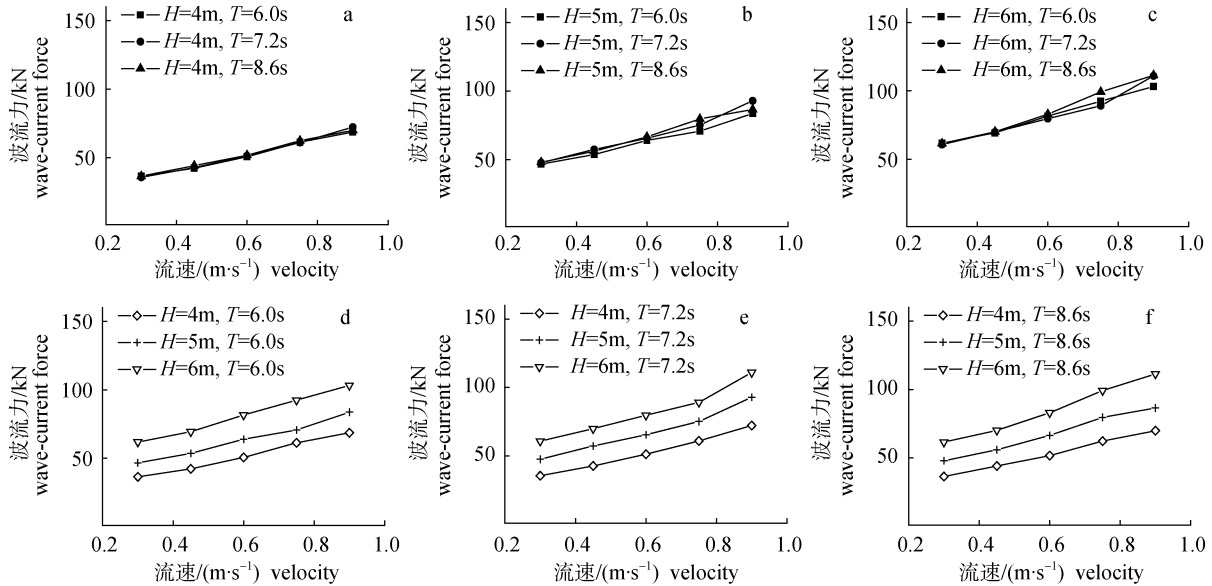


图 5 网箱所受最大波流力

Fig.5 Maximum wave-current forces for the net-cage caused by various wave-current conditions

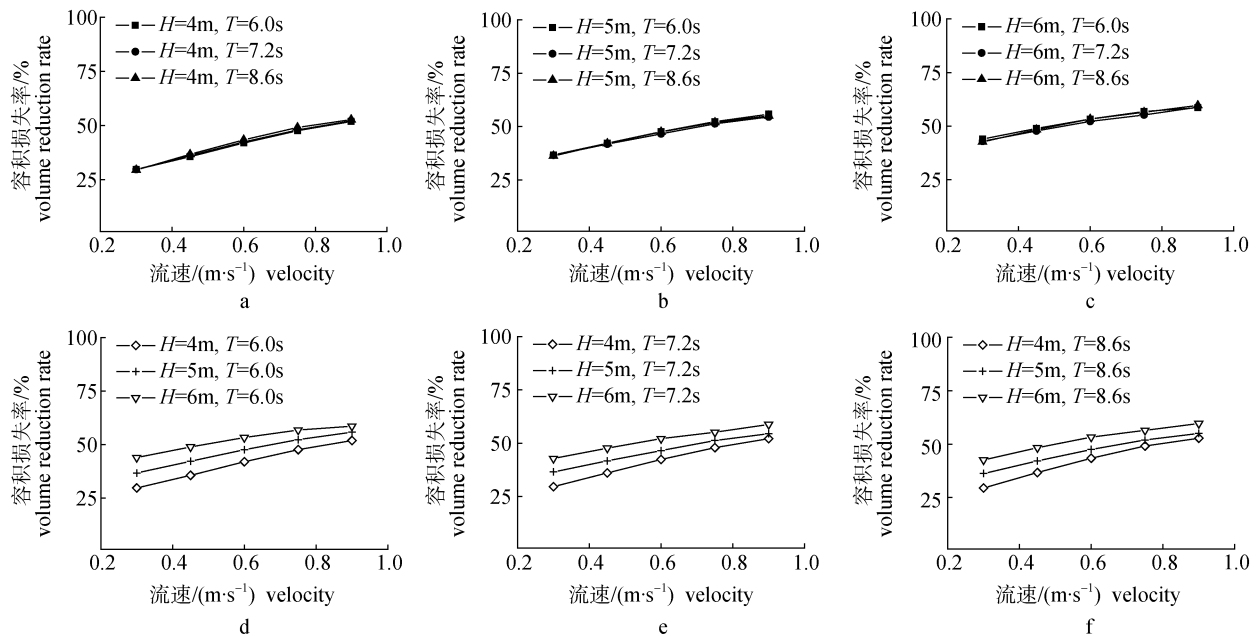


图 6 网箱容积损失率最大值

Fig.6 Maximum values of volume reduction rate for the net-cage caused by various wave-current conditions

3.4 浮架倾角

由于波浪流沿 x 方向传播, 浮架关于 x 轴和 z 轴对称, 使得建立在物体坐标系 1、2、3 下的转动方程(5)中的 ϕ_1 和 ϕ_3 就必等于 0。因此, 在计算浮架倾角时, 这里只需对方程(6)中的 f_2 进行计算即可。波流联合作用下网箱浮架倾角随波高、周期和流速的变化关系见图 7 所示。可以看出, 浮架倾角随波高和流速成正比, 随周期的增大而有所减小。波高 $H=6$ m 时的浮架倾角为 $H=4$ m 时的 1.25~1.45 倍(图 7-a,b,c), 周期 $T=8.6$ s 时的浮架倾角约为 $T=6.0$ s 时的 0.8 倍(图 7-d,e,f), 与网箱受力和变形不同的是, 可以看出周期对浮架倾角的影响较为明显。这主要是因为浮架倾角与波陡 H/L (L 为波长)密切相关, 当波高不变周期增大时, 波长 L 增大, 使得波陡 H/L 减小, 从而导致浮架倾角减小。

4 讨论

本研究给出了波浪流作用下深水网箱的计算模型, 通过数值模拟方法研究了不同波浪要素和流速组合条件下的深水网箱受力及运动变形情况,

研究表明, 网箱锚绳受力、波流、容积损失率及浮架倾角均与波高和流速成正比, 与周期的关系(浮架倾角除外)不明显, 且网箱系统所受的波流约为网箱迎浪侧两根锚绳受力的合力。在已有关于网箱受力特性的文献中, 桂福坤^[21]研究发现, 在顺流与波浪组合时, 网箱锚绳受力与波高和流速成正比, 与周期无必然联系, 这与本研究的结论相吻合, 进一步说明了本研究构建的数学模型及数值模拟方法的正确性及有效性。

波流共同作用下网箱锚绳的最大受力是网箱规划设计者所最为关心的指标, 它是保证恶劣海况下深水网箱养殖安全的首要条件; 网箱最大容积损失率是网箱养殖者所最为关心的指标, 与网箱养殖成活率密切相关, 直接影响到网箱养殖的操作管理和经济收益。因此, 网箱锚绳受力和容积损失率这 2 个指标在网箱养殖风险评估中都具有十分重要的作用。但通常情况下, 相比较于网箱养殖容积损失, 网箱锚绳的安全性可以相对较容易得到解决。例如需要进一步保证锚泊系统的安全性和可靠性时, 可以通过增大锚绳规格来提高锚绳的允许受力值或通过增加锚的重量提高锚

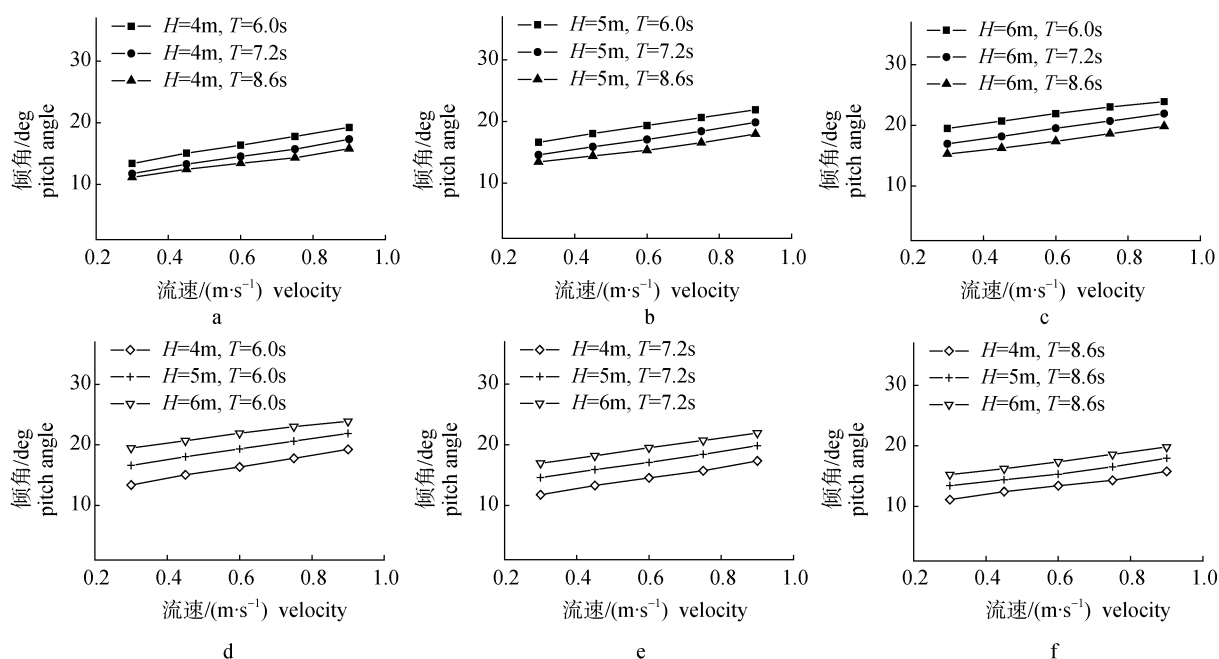


图 7 网箱浮架系统倾角最大值

Fig.7 Maximum pitch angles for the floating collar of the net-cage caused by various wave-current conditions

抓力来避免锚泊系统的移位。本研究结果表明, 在流速 $U=0.75$ m/s 时, 网箱容积损失率就达到了 47%~56%, 网衣变形较为严重, 必然影响到养殖鱼类的正常生长与存活。而一般情况下, 海区海流流速大于 1.0 m/s 时, 基本就不适宜安置深水网箱, 原因之一就是海流对网衣的作用力过大, 致网衣飘移, 网箱有效养殖容积大为减小。若以相应的重力平衡海流对网衣的作用力, 却又大大地增加了网箱日常管理操作的难度和养殖工人的劳动强度。因此, 在现阶段缺少网箱养殖机械装备的实际养殖生产中, 为减少养殖容积的损失, 根据本研究的计算结果, 网箱养殖区域应选择流速小于 0.75 m/s 的海区较为适宜。

在网箱系统水动力特性的数值模拟研究中, 如不考虑浮架系统的弹性变形时, 可将浮架视为刚体, 应用刚体运动学原理求出浮架各微元构件的运动, 从而简化计算。该处理方法已广泛应用于波浪或水流工况下浮架的受力及运动^[8-10,18]、网衣的受力及运动变形^[4,6-7]以及锚泊系统的受力^[13,17-18]等网箱相关数模研究方面, 均取得了较好效果。浮架的处理方法还可根据特定的研究对象而做特殊处理。如仅仅研究水流作用下网衣的受力及运动变形时, 因浮架在水流作用下产生的运动位移和倾角都很小^[21], 可进一步采用浮架系统固定的方式。如: Zhao 等^[4]和黄小华等^[7]考虑将浮架系统设定为固定的方式研究了水流作用下圆形网衣的运动变形特性。但在进行网箱浮架结构的安全性能评价时, 则必须计算分析浮架结构在极限载荷下的应力分布和变形情况, 这种情况下应将浮架系统作为实际弹性变形体来考虑用于评估浮架的承载能力。本研究通过数值模拟得到的不同工况条件下的锚绳力结果, 可为下一步浮架结构变形的模拟研究提供载荷选择的参考依据。

参考文献:

- [1] Tsukrov I, Eroshkin O, Fredriksson D, et al. Finite element modeling of net panels using a consistent net element[J]. Ocean Eng, 2003, 30(2): 251-270.
- [2] Suzuki K, Takagi T, Shimizu T, et al. Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets[J]. Fish Sci, 2003, 69(4): 695-705.
- [3] Lader P F, Enerhaug B. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow[J]. IEEE J Ocean Eng, 2005, 30(1): 79-84.
- [4] Zhao Y P, Li Y C, Dong G H, et al. Numerical simulation of the effects of structure size ratio and mesh type on three-dimensional deformation of the fishing-net gravity cage in current[J]. Aqua Eng, 2007, 36(3): 285-301.
- [5] Wan R, Hu F X, Tokai T. A static analysis of the tension and configuration of submerged plane nets[J]. Fish Sci, 2002, 68(4): 815-823.
- [6] 苏 炜, 詹杰民. 等效网面法在模拟网的水动力特性中的应用[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2007, 22(3): 267-272.
- [7] 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.
- [8] 黄小华, 郭根喜, 胡昱, 等. 波浪作用下圆形网箱浮架系统的运动特性分析[J]. 水产学报, 2009, 33(5): 878-884.
- [9] 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.
- [10] 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(增刊 I): 222-228.
- [11] Wu C W, Gui F K, Li Y C, et al. Hydrodynamic coefficients of a simplified floating system of gravity cage in waves[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2008, 9(5): 654-663.
- [12] Dong G H, Hao S H, Zong Z, et al. A theoretical analysis of dynamic elastic response of a circular ring to water waves[J]. J Offshore Mech Arcti Engin, 2007, 129(3): 211-218.
- [13] Huang C C, Tang H J, Liu J Y. Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea[J]. Aqua Eng, 2008, 38(2): 105-116.
- [14] 李玉成, 桂福坤, 宋芳, 等. 漂浮状态下重力式与碟形网箱的锚绳受力特性比较[J]. 水产学报, 2005, 29(4): 570-573.
- [15] 郑国富, 黄桂芳, 魏观渊, 等. 波流作用下圆柱形近海抗风浪网箱缆绳的张力特性[J]. 水产学报, 2007, 31(1): 84-89.
- [16] Colbourne D B, Allen J H. Observations on motions and loads in aquaculture cages from full scale and model scale measurements[J]. Aqua Eng, 2001, 24(2): 129-148.
- [17] Fredriksson D W, Swift M R, Irish J D, et al. Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements[J]. Aqua Eng, 2003, 27(2): 117-146.
- [18] Zhao Y P, Li Y C, Dong G H, et al. A numerical study on dy-

- namic properties of the gravity cage in combined wave-current flow[J]. *Ocean Eng*, 2007, 34(17-18): 2350–2363.
- [19] Wittenbug J. Dynamics of system of rigid bodies[M]. Stuttgart: Teubner, 1977: 19–31.
- [20] 郑咸义. 计算方法[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2003: 213–232.
- [21] 桂福坤. 深水重力式网箱水动力学特征研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

Numerical simulation of forces and motion deformation of deep-water net cages in waves and currents

HUANG Xiaohua, GUO Genxi, HU Yu, TAO Qiyu, ZHANG Xiaoming

South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China

Abstract: This study is aimed to discuss the effects of waves combined with currents on forces and motion deformation of deep-water net cages, and provides a strong reference to risk assessment for net-cage aquaculture with severe marine conditions. The set value of wave and current elements were as follows: wave heights $H=4\text{--}6\text{ m}$, wave periods $T=6.0\text{--}8.6\text{ s}$, current velocities $U=0.3\text{--}0.9\text{ m/s}$. With a numerical model previously validated by physical model tests, the mooring line forces, the wave-current forces, the volume reduction rate and the floating-collar pitches of the deep-water net cage were calculated. The simulated results indicated that the mooring line force, the wave-current force and the volume reduction rate were all in direct proportion to wave height as well as current velocity, but less related to wave period. Furthermore, the wave-current force on the cage was approximately equal to the sum of force on each mooring line on wave-side. The volume reduction rate reached 47%–56% for the cage caused by the conditions of wave height of 4–6 m and current velocity of 0.75 m/s, which showed serious cage deformation. Therefore, we concluded that farming sites should not be placed in sea areas where current speed exceeded 0.75 m/s. The calculated results also showed that the influence of wave period on volume reduction rate was slight, while significant on the floating-collar pitch. The floating-collar pitch would decrease as wave period increasing at constant wave height and current velocity. [*Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(2): 443–450]

Key words: deep-water net cage; wave-current; force characteristics; motion deformation; numerical simulation

Corresponding author: GUO Genxi. E-mail: scsggx@21cn.com