

文章编号:1000-0615(2009)05-0878-07

波浪作用下圆形网箱浮架系统的运动特性分析

黄小华, 郭根喜, 胡 昱, 陶启友

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘要:作为深水养殖网箱的重要组成部分,浮架系统在网箱抗风浪性能中扮演着极为重要的角色,研究浮架系统在波浪作用下的运动特性是深入了解网箱抗风浪性能的关键。基于集中质量法将圆形浮架离散成众多微元,并运用线性波浪理论和刚体运动学原理,建立了波浪作用下网箱浮架系统的运动响应数学模型。针对圆形浮架的实际尺寸参数,在不同波高($H=4.2 \sim 7.0$ m)和周期($T=7.2, 8.6$ s)条件下,采用计算机数值模拟方法,对浮架前后点运动轨迹、浮架质心水平和垂直位移、浮架倾角进行了数值计算。通过对计算结果的分析表明:(1)浮架垂直位移幅度大于水平位移幅度,波浪周期对浮架垂直位移的影响要小于对水平位移的影响;(2)浮架水平位移、垂直位移以及倾角都和波高具有显著的正比关系。在波高 $H=4.2 \sim 7.0$ m范围内,周期 $T=7.2$ s时,水平位移、垂直位移和倾角的增量分别为1.84 m、1.0 m和 7.18° ;周期 $T=8.6$ s时,三者的增量分别为1.66 m、1.05 m和 5.43° ;(3)周期增大,浮架垂直位移增加,水平位移和倾角减小。

关键词:深水网箱;波浪;浮架系统;运动特性;数值模拟

中图分类号:Q 353.2

文献标识码:A

深水养殖网箱主要由浮架、网衣、配重和锚碇系统构成,是一种高投入、高产生、高风险的养殖设备。作为深水养殖网箱的重要组成部分,浮架系统在网箱抗风浪性能中扮演着极为重要的角色,它负责提供足够的浮力保持网箱处于漂浮状态,为网箱提供操作平台,抵抗波浪和水流的冲击,支撑网衣系统维持有效的养殖容积,并通过与锚碇系统相连将浮架限制在一定范围内运动,其安全性与可靠性将直接影响到整个养殖生产的成败。因此有必要对海洋动力因素尤其是波浪作用下浮架系统的受力和运动特性进行研究。

近年来,有关深水网箱的研究在国内外得到了较多的关注。在国外,Fredriksson等^[1-3]采用数值模拟结合物理模型试验对网箱在波浪和水流作用下的受力及运动特性进行了分析。Lee等^[4]研究了二维的系有网箱的张力腿平台系统在波浪作用下的动力响应。Goudey^[5]对一种新型可漂

移网箱系统的运动和受力进行了试验研究。Slaattelid^[6]对一种重力式网箱在各种海况条件下的锚绳受力特性和浮架结构的应力特性进行了试验研究。在国内,郑艳娜等^[7-8]考虑直线形和折线形两种锚碇系统,对浮架上特定点的运动轨迹和锚碇系统的受力进行了数值计算与物模试验。詹杰民等^[9]采用有限元模型通过计算机模拟研究了网箱受力和变形。李玉成等^[10-11]对重力式和碟形网箱的水动力性能进行了数值模拟和试验分析。

该文基于集中质量法和刚体运动学原理,建立了波浪作用下高密度聚乙烯(HDPE)圆形重力式网箱浮架系统的运动方程。采用计算机数值模拟方法,对不同条件下浮架前后点运动轨迹、浮架质心水平和垂直位移、浮架倾角进行了数值计算。通过对计算结果的分析,探讨了波浪要素对浮架系统运动特性的影响。

收稿日期:2008-10-15 修回日期:2009-01-09

资助项目:国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA100302, 2006AA100301);“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD09A14);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2007YD04)

通讯作者:郭根喜, E-mail: scsggx@21cn.com

1 数学模型

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漂浮状态,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,将这部分的部件重量折算到主浮管来考虑。本文基于集中质量法将浮架微元构件的质量集中在端点上,并将浮架系统视为刚体处理,且各个微元构件之间不存在张力。在运动分析时,将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,从而简化了计算。

1.1 波浪场理论

根据线性波浪理论^[12],波面升高和水质点运动速度为

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

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

$$U_z = Aw \frac{shk(z+h)}{shkh} \sin(kx - wt) \quad (3)$$

波浪水质点的加速度可通过对式(2)、式(3)求导得到:

$$a_x = \frac{\partial U_x}{\partial t} = Aw^2 \frac{chk(z+h)}{shkh} \sin(kx - wt) \quad (4)$$

$$a_z = \frac{\partial U_z}{\partial t} = -Aw^2 \frac{shk(z+h)}{shkh} \cos(kx - wt) \quad (5)$$

式中, U_x 和 U_z 分别为波浪水质点的水平和竖直方向速度, a_x 和 a_z 分别为水平和竖直方向的加速度, A 为波幅, w 为波浪频率, k 为波数, h 为水深, t 为时间, x 、 z 为波浪水质点位置。

1.2 建立运动方程

浮架在波浪作用下所受到的外力有重力 G 、浮力 B 、波浪力 F_w 以及与锚绳相连的微元构件所承受的锚绳张力 T ,其中波浪力 F_w 可根据 Morison 方程^[13]来计算,一般包含速度力项和惯性力项两部分,其表达形式为

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_w C_D S |\vec{U}_R| \cdot \vec{U}_R + \rho_w V_0 \dot{a} + C_m \rho_w V_0 (\dot{a} - \dot{U}_p) \quad (6)$$

式中, $\vec{U}_R = \vec{U} - \vec{U}_p$, \vec{U}_p 为质点运动速度, C_D 和 C_m 为速度力系数和附加质量力系数。

锚绳张力 T 是由锚绳的伸长产生的,并和锚绳固有参数有关,可表示为

$$T = AC_1 \left(\frac{l - l_0}{l_0} \right)^{C_2} \quad (7)$$

式中, l_0 为原始长度, l 为变形后长度, C_1 、 C_2 为锚绳构件弹性系数。对于弹性系数 C_1 、 C_2 的选取,可根据锚绳的材质不同,参照 Gerhard^[14]编著的《纤维绳索》中的数据拟合而得。

对浮架微元构件建立局部坐标系 nrv ,定义 \vec{e}_r 、 \vec{e}_n 、 \vec{e}_v 分别为微元构件切向、法向和垂直于刚体平面的单位向量。则在局部坐标系 nrv 下,将单个微元构件所受到的外力进行累加,即可建立如下各质点的运动方程

$$m_i \dot{U}_{pn} = F_{wn} + T_n + G_n + B_n \quad (8a)$$

$$m_i \dot{U}_{pr} = F_{wr} + T_r + G_r + B_r \quad (8b)$$

$$m_i \dot{U}_{pv} = F_{wv} + T_v + G_v + B_v \quad (8c)$$

在对上式求解过程中,将波浪力 F_w 中含有的质点加速度项移到方程的左侧,这样局部坐标系下各质点的加速度值 \dot{U}_{pn} 、 \dot{U}_{pr} 、 \dot{U}_{pv} 就可以求出,代入到方程(8)中就可以求出各质点的外力合力,通过坐标转换,则相应的整体坐标系质点的外力合力为

$$F_{xi} = m_i (\dot{U}_{pr} \cdot \vec{e}_{rx} + \dot{U}_{pn} \cdot \vec{e}_{nx} + \dot{U}_{pv} \cdot \vec{e}_{vx}) \quad (9a)$$

$$F_{yi} = m_i (\dot{U}_{pr} \cdot \vec{e}_{ry} + \dot{U}_{pn} \cdot \vec{e}_{ny} + \dot{U}_{pv} \cdot \vec{e}_{vy}) \quad (9b)$$

$$F_{zi} = m_i (\dot{U}_{pr} \cdot \vec{e}_{rz} + \dot{U}_{pn} \cdot \vec{e}_{nz} + \dot{U}_{pv} \cdot \vec{e}_{vz}) \quad (9c)$$

将各质点所受外力合力进行累加,依据牛顿第二定律,在整体坐标系下即可建立浮架刚体质心的三个平动运动方程

$$\ddot{X}_C = \frac{1}{M_C} \sum_{i=1}^N F_{xi} \quad (10a)$$

$$\ddot{Y}_C = \frac{1}{M_C} \sum_{i=1}^N F_{yi} \quad (10b)$$

$$\ddot{Z}_C = \frac{1}{M_C} \sum_{i=1}^N F_{zi} \quad (10c)$$

式中, M_C 为刚体总质量, N 为浮架微元个数, \ddot{X}_C 、 \ddot{Y}_C 、 \ddot{Z}_C 为浮架刚体质心加速度。

对浮架刚体建立物体坐标系 123 ,如图1所示,则运用刚体运动欧拉方程^[15],可将物体坐标系下的三个转动方程表示为

$$I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_2 \omega_3 = \sum_{i=1}^N M_{1i} \quad (11a)$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_3 \omega_1 = \sum_{i=1}^N M_{2i} \quad (11b)$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_1 \omega_2 = \sum_{i=1}^N M_{3i} \quad (11c)$$

式中, M_{1i} 、 M_{2i} 、 M_{3i} 分别为对坐标系 123 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 123 主轴的惯性矩, 其表达式可由下式

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos\phi_2 \cos\phi_3 & \cos\phi_1 \sin\phi_3 + \sin\phi_1 \sin\phi_2 \cos\phi_3 & \sin\phi_1 \sin\phi_3 - \cos\phi_1 \sin\phi_2 \cos\phi_3 \\ -\cos\phi_2 \sin\phi_3 & \cos\phi_1 \cos\phi_3 - \sin\phi_1 \sin\phi_2 \sin\phi_3 & \sin\phi_1 \cos\phi_3 + \cos\phi_1 \sin\phi_2 \sin\phi_3 \\ \sin\phi_2 & -\sin\phi_1 \cos\phi_2 & \cos\phi_1 \cos\phi_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 为布莱恩角^[16]。

在求解出刚体质心加速度 a_c 以及角速度 ω 之后, 根据图 1 所示, 整体坐标系下浮架上各质点的位移和速度即可求出

$$\vec{r}_p = \vec{r}_c + \vec{r} \quad (15)$$

$$\vec{v}_p = \vec{v}_c + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (16)$$

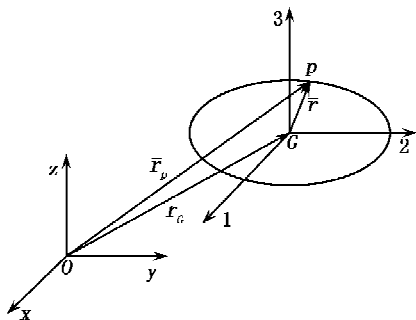


图 1 浮架刚体坐标系

Fig.1 Schematic diagram of coordinates system for the rigid floating collar

2 计算结果及分析

图 2 为浮架跟踪点示意图。参照圆形浮架的实际参数: 浮架周长 $l = 40$ m, 浮管截面半径 $r = 125$ mm, 浮管壁厚 $t = 15$ mm, 材料密度 $\rho = 953$ kg/m³, 浮架总重量 $G = 12.7$ kN。在数值计算中, 波浪沿 x 方向传播, 水深 $h = 15$ m, 水的密度 $\rho_w = 1\,000$ kg/m³, 重力加速度 $g = 9.81$ m/s², 附加质量系数 $C_m = 1.0$ 。波高取 $H = 4.2$ 、 4.6 、 5.0 、 5.4 、 5.8 、 6.2 、 6.6 、 7.0 m, 周期取为 $T = 7.2$ s、 8.6 s。

图 3 给出了波高 $H = 5.8$ m、周期 $T = 7.2$ s 时, 浮架在一个波浪周期内不同时刻的运动情况示意图。图中波浪沿 x 轴正方向传播, $z = 0$ 处为静水面位置。可以看出, 浮架在前半个周期内随波浪一起向下运动, 而在后半周期内浮架在波

得到

$$I_1 = \frac{1}{2} mR^2, I_2 = \frac{1}{2} mR^2, I_3 = mR^2 \quad (12)$$

物体坐标系与整体坐标系之间的关系:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (13)$$

浪作用下开始逐渐上升, 并在 $t = T$ 时位于最高处, 更接近于波峰位置。

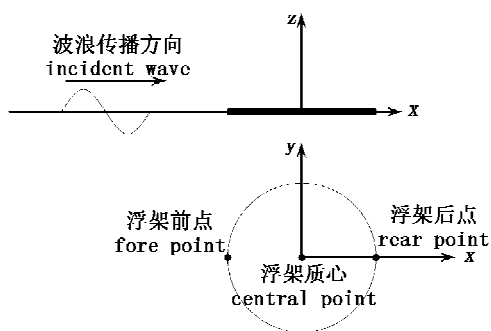


图 2 浮架跟踪点示意图

Fig.2 Sketch of the tracing points on the floating collar

图 4 为波浪作用下浮架前后点的运动轨迹。图中实线和虚线分别对应两种不同周期 ($T = 7.2$ s 和 $T = 8.6$ s) 的计算结果, x 、 z 为水平和垂向位置, 浮架静止时前后点位置坐标为 $(-6.37, 0)$ 和 $(6.37, 0)$ 。从图中可以看出, 浮架前、后点的垂直位移幅度要明显大于水平位移幅度, 这主要是因为锚碇系统对浮架水平位移的约束更为明显, 波高和浮力对浮架垂直位移的影响更为显著。从轨迹图可看出, 在同一波高条件下, 波浪周期对水平位移的影响较强, 而对垂直位移影响较弱。随着波高的增大, 浮架前、后点水平和垂直位移幅度都有所增大, 但两者运动轨迹所形成的几何形状差别就越明显。

图 5 为两种周期条件下浮架质心位移随波高的变化曲线图, 可以直观的看出, 随着波高增大, 水平位移和垂直位移都有所增大, 两者与波高都具有显著的正比关系。周期 $T = 7.2$ s 时, 水平位移从 0.84 m 递增至 2.68 m, 增加值为 1.84 m, 垂直位移从 1.84 m 递增至 2.84 m, 增加值为 1.0

m;周期 $T=8.6$ s 时,水平位移从 0.48 m 递增至 2.14 m,增加值为 1.66 m,垂直位移从 1.96 m 递增至 3.01 m,增加值为 1.05 m。对于不同波高情况,周期增大会导致垂直位移增大而水平位移减小。将图 5(a)与图 5(b)进行对比可以发现,浮

架质心的垂直位移要大于水平位移,但在波高较大时表现不明显,如在波高 $H=7.0$ m、周期 $T=7.2$ s 情况下,水平位移为 2.68 m,而垂直位移为 2.84 m,两者相差较小。

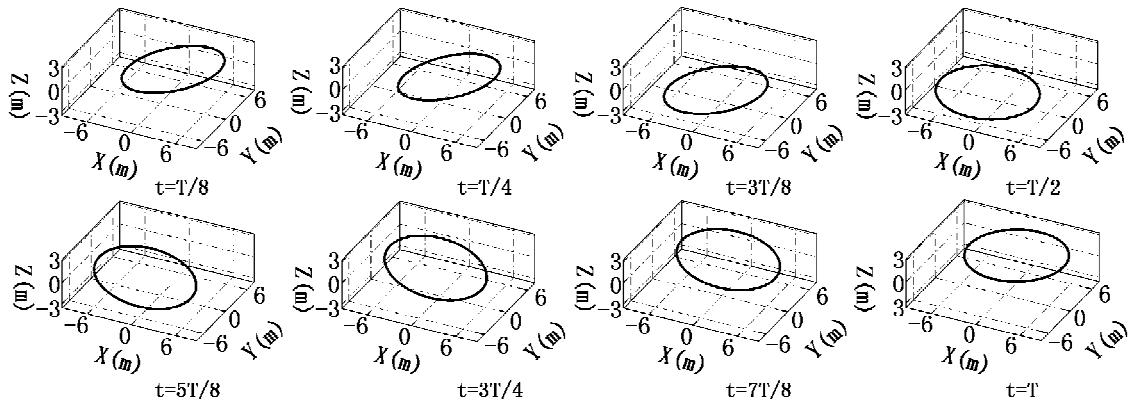


图3 浮架在一个波浪周期内的运动情况示意图

Fig. 3 The dynamic motion of the floating collar at different time in one wave period

浮架倾角随波高的变化关系见图 6 所示,可以看出,浮架倾角随波高的增大而增大,周期 $T=7.2$ s 时,浮架倾角从 10.29° 递增至 17.47° ,增加值为 7.18° ;周期 $T=8.6$ s 时,浮架倾角从 8.17° 递增至 13.60° ,增加值为 5.43° 。同时也可看出当波浪周期增大时,倾角有所减小,尤其以波高较大时表现得尤为明显。产生这一结果的原因是:浮架倾角与波陡 H/L (L 为波长)密切相关,当周期增大时,波长 L 增大,使得波陡 H/L 减小,从而导致浮架倾角减小。

3 讨论

本研究采用线性波浪理论和刚体运动学原理,建立了波浪作用下网箱浮架系统的运动响应数学模型。通过采用计算机数值模拟方法,成功地模拟出浮架在一个波浪周期内的运动情况,并就波浪要素对浮架运动特性的影响进行了探讨,给出了浮架特定点的运动轨迹、浮架运动位移和倾角等有关浮架运动特性的计算结果。

通过计算结果的比较及分析表明,对于各种不同波况,浮架垂直位移幅度要明显大于水平位移幅度,波浪周期对水平位移的影响要强于对垂直位移的影响情况,且周期增大会导致垂直位移

增大,而水平位移和倾角减小。随着波高的增大,浮架的水平位移、垂直位移和倾角都会增大,且三者与波高都具有显著的正比关系。在波高 $H=4.2\sim 7.0$ m 范围内,周期 $T=7.2$ s 时,水平位移、垂直位移和倾角的增量分别为 1.84 m、1.0 m 和 7.18° ;周期 $T=8.6$ s 时,三者的增量分别为 1.66 m、1.05 m 和 5.43° 。但浮架前、后点的运动轨迹所形成的几何形状差别会随波高的增大而越明显。

在对网箱运动进行数值模拟过程中,本研究将浮架视为刚体处理,假定了网箱在波浪作用下不会发生变形,且由于浮管的直径和波长相比十分微小,从而忽略了浮架系统对波浪场的影响,这与实际情况有所差异,因此这种处理方法是近似的。但为了简化计算,该处理方法不失为一种对网箱水动力特性进行数值模拟研究的有效方法^[17]。

在已有的关于浮架运动特性的文献报道中,郑艳娜等^[7]研究发现在波浪作用下浮架的运动位移受波长影响较小,而与波高关系密切,在锚碇系统的约束下水平位移显著小于垂向位移,这与本研究的结论相吻合,进一步说明了本文数学模型及数值模拟方法的正确性和有效性。

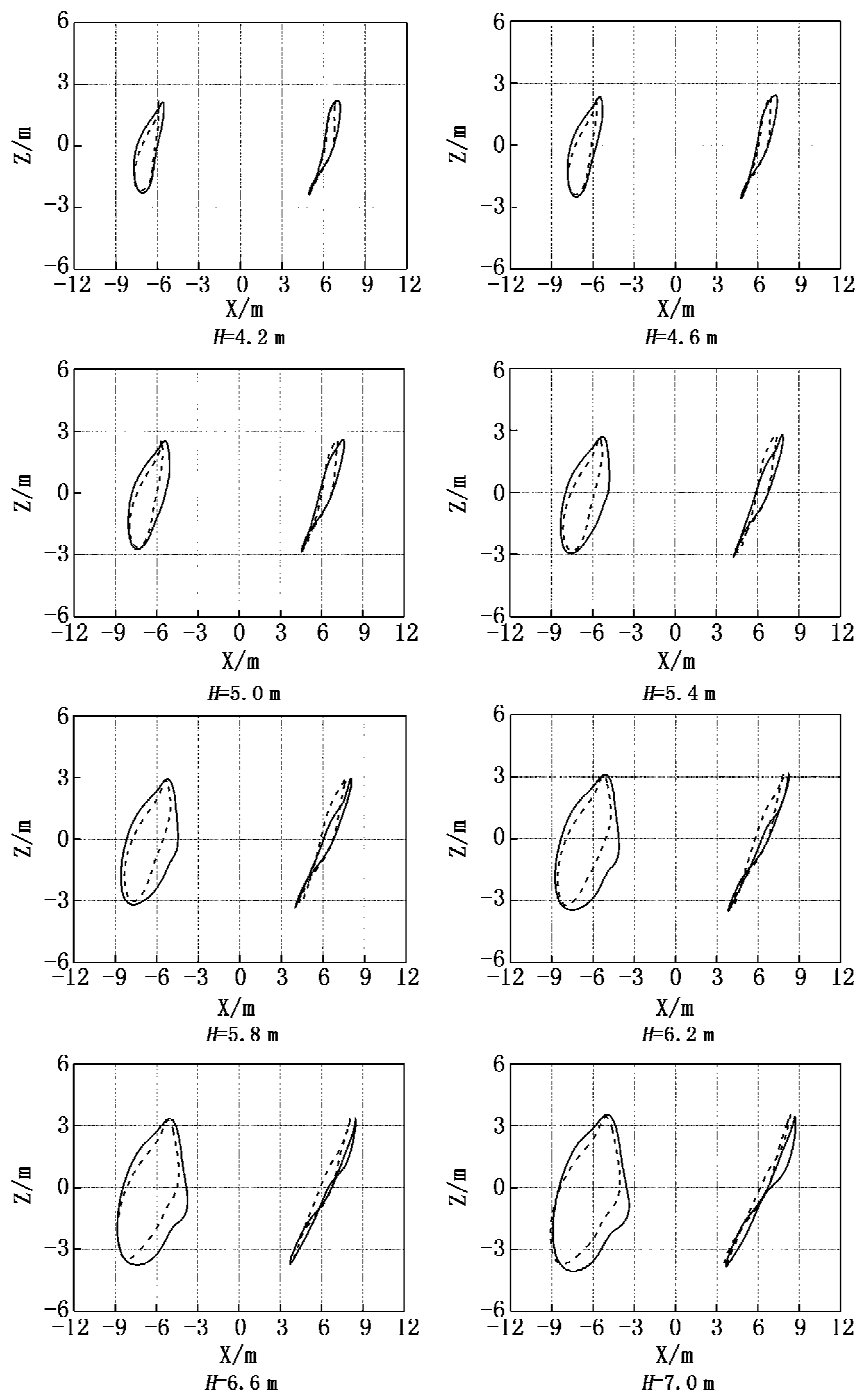


图4 浮架前、后点的运动轨迹

Fig. 4 Motion trajectories of the fore and the rear points of the floating collar

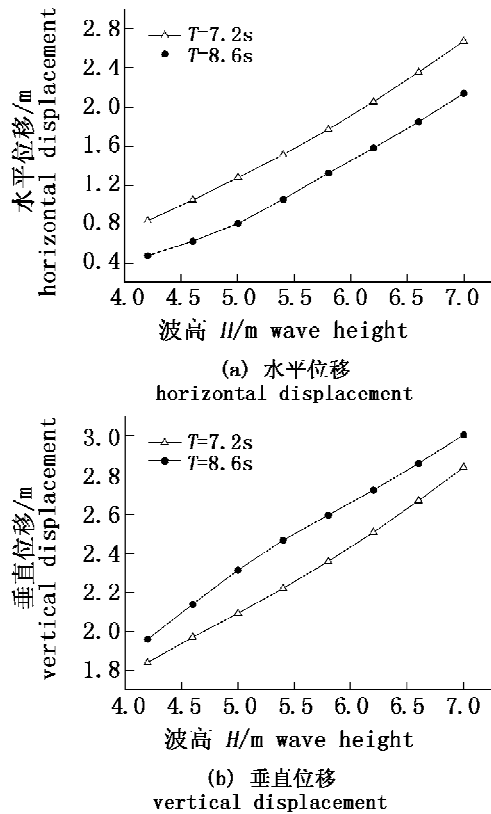


图5 浮架质心位移随波高的变化
Fig.5 The relationship between the displacement of the central point of the floating collar and wave height

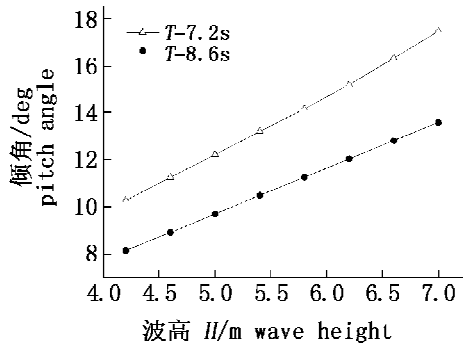


图6 浮架倾角随波高的变化
Fig.6 The relationship between the pitch angle of the floating collar and wave height

相对于研究网箱水动力特性的水槽模型试验和海上实际测量,采用数学模型研究波浪作用下网箱浮架系统的运动特性具有计算方案多、时间短、费用少的优势,并且可利用计算机图形技术,对网箱浮架在三维空间的运动情况进行虚拟呈现。本研究建立的波浪作用下浮架系统的计算模

型,具有较好的稳定性和解的收敛性,可为整体网箱的模拟奠定一个良好的理论基础和方法。

参考文献:

- [1] 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]. *Aquacultural Engineering*, 2003(27):117-146.
- [2] Fredriksson D W, Irish J D, Swift M R, *et al.* The heave response of a central spar fish cage [J]. *Transactions of the ASME*, 2003, 125:242-248.
- [3] Fredriksson D W, Decewa J, Swift M R, *et al.* The design and analysis of a four-cage grid mooring for open ocean aquaculture [J]. *Aquacultural Engineering*, 2004(32):77-94.
- [4] Lee H H, Wang P W. Dynamic behavior of tension-leg platform with net-cage system subjected to wave forces [J]. *Ocean Engineering*, 2000, 28(2):179-200.
- [5] Goudey C A. Design and analysis of a self-propelled open-ocean fish farm [C]// *Proceedings of the 3th international conference on open ocean aquaculture*. Texas: Texas Sea Grant College Program, 1998: 7-30.
- [6] Slaattelid O H. Model tests with flexible, circular floats for fish farming [C]// *Engineering for Offshore Fish Farming*. London: Thomas Telford, 1990:93-106.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 詹杰民,苏 炜. 浮式养殖网箱系统的数值模拟[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2006, 45(6): 1-6.
- [10] 李玉成,赵云鹏,董国海,等. 波浪与水流对重力式网箱作用的数值模拟[C]// *第二十届全国水动力研讨会会议文集*. 北京:海洋出版社, 2007:687-694.
- [11] 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.
- [12] 邹志利. *水波理论及其应用*[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [13] Brebbia C A, Walker S. *Dynamic analysis of*

- offshore structure [M]. London: Newnes-Butterworths, 1979.
- [14] Gerhard K. Fibre ropes for fishing gear [M]. London: Fishing News Book, Ltd. , 1983: 81 - 124.
- [15] 张建树, 孙秀泉, 张正军. 理论力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 227 - 230.
- [16] Wittenbug J. Dynamics of system of rigid bodies [M]. Stuttgart: Teubner, 1977: 19 - 31.
- [17] 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.

Movement characteristics of floating circular collar of net cages subjected to waves

HUANG Xiao-hua, GUO Gen-xi, HU Yu, TAO Qi-you

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

Abstract: Floating collar, an important component of deep-water net cage, plays a great important role in the performance of withstanding strong winds and waves for net cage, and studying the movement characteristics of floating collar exposed to waves is a key to deeply understand the properties of withstanding strong winds and waves about net cage. In this paper, based on the lumped mass method, floating circular collar is discreted with lots of micro-elements, and by using the linear wave theory and the rigid body kinematics principle, a numerical model for movement response of floating collar exposed to waves is set up. Reference to practical floating collar parameters: 40 m in circumference, 12.7 kN in total weight, 15 m in water depth, $r = 125$ mm, $t = 15$ mm, $\rho = 953$ kg/m³. Under the conditions of different wave heights ($H = 4.2 - 7.0$ m) and wave periods ($T = 7.2$ s, 8.6 s), the motion trajectories of the fore and rear points of the floating collar, the horizontal and vertical displacement of the central point of floating collar, pitch angles of floating collar are calculated in the way of computer numerical simulation method. By comparing and analyzing, the calculated results show that: (1) The vertical motion amplitude of the collar is greater than the horizontal one, and the influence of wave period on the vertical displacement of the collar is less than that of the horizontal one; (2) The horizontal displacement, the vertical displacement and the pitch angle of the collar all have direct proportional relation with wave height. Under the condition of wave height of 4.2 - 7.0 m, the increase of the horizontal displacement, the vertical displacement and the pitch angle of the collar are 1.84 m, 1.0 m and 7.18° when $T = 7.2$ s, while they are 1.66 m, 1.05 m and 5.43° when $T = 8.6$ s; (3) When wave period increases, the vertical displacement of the collar increases accordingly, while the horizontal displacement and the pitch angle of the collar decrease.

Key words: deep-water net cage; wave; floating collar; movement characteristics; numerical simulation