

波浪作用下串联浮筒对船型网箱锚泊系统的受力影响分析

陈炫光¹, 陈俊华^{2*}, 董新龙¹, 郑 堤², 陈俊池³

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学科学技术学院, 浙江 宁波 315300;
3. 江西理工大学, 江西 赣州 341000)

摘要: 船型网箱是一种新型抗风浪深水网箱, 其采用船形结构以及单点系泊方式, 合理的锚泊系统设计是保证船型网箱安全可靠的关键。依据 Stokes 二阶波浪理论和 Morison 方法, 采用数值方法分析了锚泊系统串联浮筒对船型网箱水动力特性的影响以及不同波况作用下浮筒位置、大小对锚绳力的影响, 并进行了物理模型实验验证。结果表明, 船型网箱最大锚绳力随着波高的增大而增大, 随周期变化不明显; 串联浮筒增加了浮架纵向位移, 使得浮架相对水质点速度减小, 从而减小了浮架所受最大波流力以及锚绳力; 最大锚绳力随着浮筒直径增加先减小后增大, 随着浮筒位置远离浮架连接点而减小。

关键词: 船型网箱; 单点系泊; 浮筒; 锚绳力

中图分类号: O353.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 03-0099-06

在海水养殖技术方面, 深水网箱代表了当今世界海水养殖装备的先进水平。深水网箱经济效益高, 但是往往所处海况复杂, 合理的锚泊系统设计是保证深水网箱安全可靠的前提。目前我国 90% 以上的深水网箱为 HDPE 圆形双浮管式深水网箱, 依靠多点系泊方式来抵御风浪, 大部分设置在有一定屏障掩护的半封闭海域。要将深水网箱养殖区域推广到更加开放的海域, 就需要一种抗风浪性能更强的深水网箱^[1-2]。

船型网箱是一种新型深水网箱, 其锚泊系统采用单点系泊方式, 可以围绕锚泊点顺流回转。相比于传统圆形深水网箱, 船型网箱将鱼类养殖过程中的废弃物分散在更广阔的区域, 废弃物更易被海流带走, 减少了废弃物的海底沉积, 而且锚泊系统成本大大降低。但是单点系泊结构在波浪作用下运动响应更加复杂, 过度运动增加了锚泊设备摩擦损坏的可能, 同时单根锚绳在养殖过程中承受着更大载荷, 对系泊系统可靠性是巨大的挑战^[3]。因此研究不同波况下锚绳受力特性具有十分重要的意义。

针对网箱锚泊系统, 国内外学者做了大量研究工作。Fredriksson 等^[4]将网箱锚泊系统视为线性系统, 利用随机概率法分析了锚绳在波浪作用下的张力特性。Hou 等^[5]对网箱锚泊系统疲劳失效概率进行评估, 研究了初始预紧力和安全系数对锚泊系统可靠性的影响。郭根喜等^[6]通过实测试验, 对比了单个网箱和组合网箱的锚绳力, 给出了锚绳安全性能的评价标准。DeCew 等^[7]通过数值模拟研究了单点系泊小型网箱在水流作用下的受力特性以及浸没现象, 并与缩放物理模型拖曳试验进行比较验证。

在锚泊系统参数分析方面, Mavrakos 等^[8-9]通过试验与数值模拟研究了锚泊系统浮筒位置、大小、数量对锚泊系统动力性能的影响, 并分析了浮筒的竖向运动、水平运动和转动。乔东生等^[10]分析了锚泊系统串联浮筒对锚泊绳索轴向张力和阻尼的影响, 对串联浮筒的位置、大小进行了参数敏感性分析。Yuan 等^[11]研究了集重块与浮筒于一体的锚泊系统的顶部张力和半潜式平台的运动响应, 并重点讨论了水深对锚泊系统的影响。韩森等^[12]

收稿日期: 2020-01-02.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0300500); 宁波市重大科技攻关项目(2015C110015); 宁波市科技计划(2015C50061)。

第一作者: 陈炫光(1995-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 海洋机电装备研究。E-mail: 947367328@qq.com

*通信作者: 陈俊华(1962-), 男, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 机械制造、数控技术及海洋机电装备。E-mail: cjh@nit.zju.edu.cn

考虑海流力以及锚泊绳索的弹性伸长, 基于分段外推法建立了多成分悬链线的数学模型, 研究了浮子位置对锚泊线长度与顶端水平张力的影响。

目前针对网箱锚泊系统参数的研究仅限于静力学分析, 通过研究船型网箱锚泊系统参数对系统动力学性能的影响可以进一步为锚泊系统设计提供参考。本文对船型网箱在二阶 Stokes 波作用下的锚泊系统受力进行了数值仿真分析和物理模型实验, 对比了串联浮筒与未串联浮筒时的浮架倾角、纵向位移、浮架所受波流力以及锚绳力, 通过改变锚绳上浮筒位置、大小, 研究了在不同波况作用下锚绳系统参数对锚绳力的影响。

1 船型网箱动力学模型

1.1 锚泊系统动力学模型

船型网箱如图 1 所示, 网箱主体由浮架和网衣组成, 网衣底端设有金属钢圈作为配重, 锚泊系统由锚绳、锚链、浮筒、混凝土锚组成。

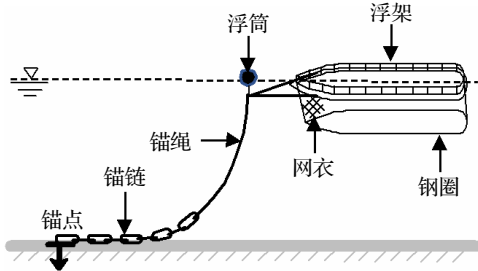


图 1 船型网箱示意图

在模拟锚泊系统时, 直接将锚绳固定在锚点。考虑锚绳的弹性伸长以及波浪力的作用, 采用集中质量方法, 将锚泊系统沿轴线方向离散为构件与质点进行分析。在整体坐标系下将外载荷和单元重量进行累加并将其分配到质点上, 将浮筒视为集中质量点, 则各质点的运动方程为^[13]:

$$\begin{cases} (m + A_{11})a_x + A_{12}a_y + A_{13}a_z = F_x, \\ A_{21}a_x + (m + A_{22})a_y + A_{23}a_z = F_y, \\ A_{31}a_x + A_{32}a_y + (m + A_{33})a_z = F_z, \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 是质点的质量; A_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) 是附加质量; a_x 、 a_y 、 a_z 分别为质点在 3 个方向上的加速度; $F = (F_x, F_y, F_z)$ 是构件所受外力, 包括重力、浮力、拖拽力、惯性力和弹性拉力。

构件所受重力为:

$$W = \rho g V, \quad (2)$$

式中: ρ 为构件材料密度; V 为构件体积; g 为重力加速度。

构件所受浮力为:

$$B = \rho_w g V, \quad (3)$$

式中, ρ_w 为海水密度。

利用 Morison 公式计算构件拖拽力:

$$F_w = \rho_w C_D A \frac{U_R |U_R|}{2}, \quad (4)$$

式中: C_D 为拖拽力系数; A 为构件在水流方向的投影面积; $U_R = U - U_s$, U 为水质点速度, U_s 为构件运动速度。

构件所受惯性力由水体的附加质量力和构件排开水体的惯性力构成:

$$F_I = \rho_w V C_M \frac{\partial U_R}{\partial t} - \rho_w V k_m \frac{\partial U_s}{\partial t}, \quad (5)$$

式中: $C_M = 1 + k_m$ 为惯性力系数; k_m 为附加质量系数。

$$F_t = C_1 S \left(\frac{l - l_0}{l_0} \right)^{C_2}, \quad (6)$$

式中: l_0 为锚绳原始长度; l 为锚绳变形后长度; S 为锚绳构件横截面积; C_1 、 C_2 为锚绳构件弹性系数。

为了简化计算, 可将拖拽力系数、附加质量系数设定为常数。根据 Bessonneau 等^[14]对拖网受力变形的研究, 取切向拖拽力系数为 0.1, 法向拖拽力系数为 1.3; 根据 Sarpkaya^[15]对水流作用下圆柱受力的研究, 附加质量系数对圆形截面物体取 1.0; 锚绳构件弹性系数依据文献[16]中的数据拟合而得。将锚绳离散为 7 段, 利用四阶 Runge-Kutta 法求解质点运动的微分方程, 计算 5 个波浪周期(T), 步长取 $T/1000$ 。

1.2 浮架系统动力学模型

船型网箱浮架系统由双排浮管、立柱、三通连接件和扶手组成。其中双排浮管漂浮于水面, 提供整个网箱大部分的浮力, 同时承受了主要的波浪载荷。立柱、三通连接件、扶手等浮架附属结构位于水面以上, 受波浪作用较小, 为了简化计算, 将这部分重量折算到双排主浮管。同时将浮架系统视为刚体, 各个构件之间不存在张力。系统质量集中在船型网箱质心处, 网衣系统、配重系统在水面以下, 主要受到水流作用, 在波浪作用下只考虑对系统质心的影响, 船型网箱浮架简化如图 2 所示。

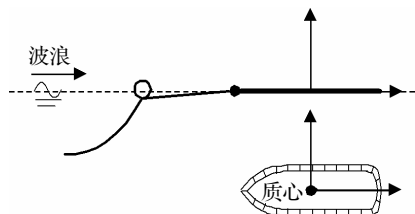


图2 船型网箱简化示意图

将浮架离散为构件与质点, 浮架受到垂直方向的浮力以及重力. 浮管直径相对波长较小, 同样可以采用 Morison 公式计算浮架所受的波浪力.

对于浮架的运动可以用 6 个运动分量来描绘, $\xi = (\xi_x, \xi_y, \xi_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$, ξ_x 、 ξ_y 、 ξ_z 分别为浮架纵荡、横荡、垂荡的水平位移, θ_x 、 θ_y 、 θ_z 分别为浮架的纵摇、横摇、艏摇的角位移. 浮架的运动方程可以表示为:

$$M\ddot{\xi} = F^*, \quad (7)$$

式中: M 为广义质量矩阵; $F^* = (F, M) = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)$, 其中 F_i 、 M_i ($i=x, y, z$) 分别为合外力分量和力矩分量.

求解浮架运动微分方程, 得到任一时刻浮架质心的位移和速度, 进而可求得锚绳与浮架连接点的位移、速度以及加速度.

2 船型网箱数值分析

2.1 船型网箱结构参数以及波浪条件

以宁波象山海试基地船型网箱为研究对象. 网箱浮架长 16 m, 宽 6 m, 浮架单重 $22.392 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$, 钢圈质量 300 kg, 浮筒净浮力 6 kN, 网箱和锚泊系统尺寸见表 1.

表1 船型网箱尺寸

周长/m	浮架		锚绳		锚链	浮筒
	截面直径/mm	壁厚/mm	直径/mm	长度/m	链径/mm	直径/mm
60	250	15	60	90	100	1 000

2.2 船型网箱锚泊系统数值分析结果

为了研究串联浮筒对船型网箱水动力特性的影响, 在海域水深 30 m, 波高 5 m, 周期 8.8 s 和流速 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的给定海况下, 对串联浮筒和未串联浮筒两种结构情况下船型网箱锚泊系统的锚绳力、浮架倾角、浮架纵向位移和浮架所受波流力进行数值仿真分析, 结果如图 3~6 所示.

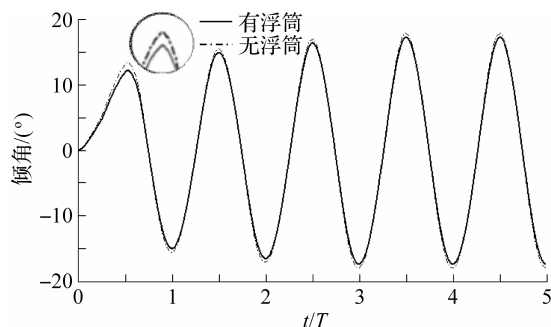


图3 浮架倾角时历曲线

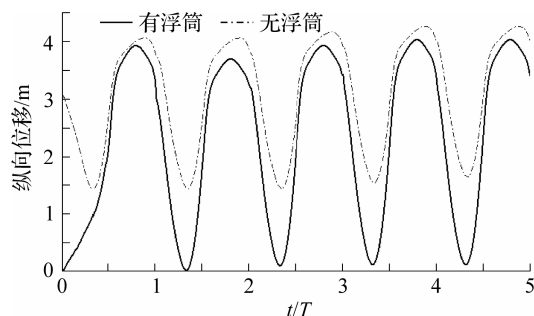


图4 浮架纵向位移时历曲线

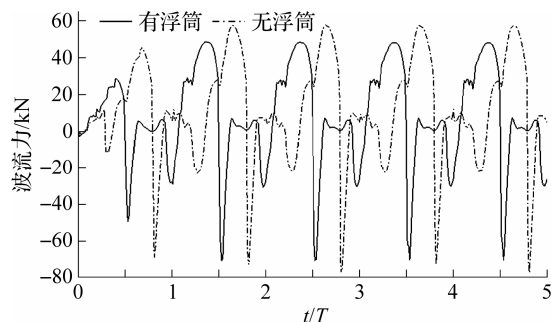


图5 浮架所受波流力时历曲线

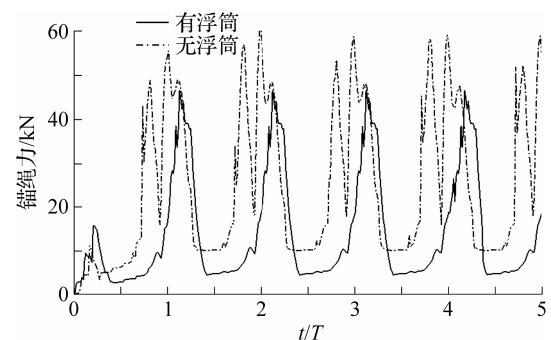


图6 锚绳力时历曲线

由于单点系泊具有风标效应, 因此只考虑波浪沿 x 方向传播, 在计算浮架倾角时只考虑浮架绕 y 轴的旋转角度. 由图 3 可以看出锚泊系统串联浮筒对浮架倾角影响不明显. 在实验中可以观察到浮架垂直方向的相位与波浪水质点运动相近, 受

波陡影响明显,浮筒对浮架垂直方向运动几乎没有影响。

由图 4 可以看出锚泊系统串联浮筒使船型网箱浮架纵向位移量由 2.8 m 增加到 3.9 m。这是由于串联浮筒改变了锚绳姿态,增加了浮架可移动的范围,同时浮筒对浮架前部有纵向拖拽作用,增加了浮架水平方向位移量。

由图 5 可以看出浮架在波浪作用下会受到正向与反向波流力,锚泊系统串联浮筒使浮架所受波流力变化范围由 $-77\sim 58$ kN 减少到 $-70\sim 48$ kN。结合图 4 可知,串联浮筒后,浮架水平方向位移增加,浮架随波逐流,与水质点的相对速度减小,从而减小了最大波流力。

由图 6 可以看出锚泊系统串联浮筒使最大锚绳力由 59 kN 减小到 48 kN,且锚绳力变化频率有所降低,仅在最大锚绳力附近产生振荡。这是由于串联浮筒降低了锚泊系统刚度,增加了浮架的位移范围,减小了船型网箱所受的最大波流力,从而降低了最大锚绳力及其变化频率。

3 船型网箱模型实验

3.1 模型参数及实验条件

利用浙江大学宁波理工学院新型海洋装备与研发中心海况模拟实验水池进行物理模型实验,实验水槽长 80 m,宽 4 m,深 3 m,利用推板造波。船型网箱锚链部分通过拉线以及滑轮与水面拉力传感器连接,滑轮架固定在拖拽小车上,小车以 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 向前运动,模拟水流,实验装置如图 7 所示。设定模型缩尺比为 10,波浪水槽试验如图 8 所示。浮筒与浮架连接点距离为 L ,改变浮筒位置、大小,检验船型网箱锚泊系统受力情况。实验波况见表 2,网箱和锚泊系统模型参数见表 3,浮筒模型参数见表 4。

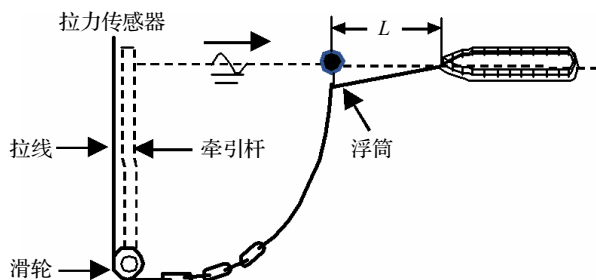


图 7 实验装置示意图



图 8 船型网箱水槽实验

表 2 实验波况

水深/m	波高(H)/m	周期(T)/s		
2	0.20	0.8	1.0	1.2
	0.25	0.8	1.0	1.2
	0.30	0.8	1.0	1.2

表 3 船型网箱模型参数

网箱	浮架周长/m	浮架截面直径/mm	浮架壁厚/mm	浮架单重/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)
原型	60	250	15	22.392
模型	6	32	2.2	0.44
网箱	钢圈质量/kg	锚绳直径/mm	锚绳长度/m	锚链链径/mm
原型	300	60	90	100
模型	30	10	9	16

表 4 浮筒模型参数

浮筒类型	直径(D)/mm	净浮力/kN
浮筒I	160	0.027
浮筒II	170	0.031
浮筒III	180	0.036
浮筒IV	190	0.041
浮筒V	200	0.046

3.2 模型试验与仿真结果分析

为了验证对网箱原型仿真分析方法及结果的有效性,在实验室条件下对船型网箱物理模型进行了水槽实验,分析了不同波况条件下串联浮筒对船型网箱最大锚绳力的影响,同时对相应的船型网箱模型进行了数值仿真分析。分析和实验测试结果如图 9 所示,其中虚线、点划线和实线是仿真分析结果,三角点、圆点和方点代表实测数据。

由图 9(a)和(b)可知,周期相同,在波高 0.2~0.3 m 的变化范围内,最大锚绳力相差约 15 N,最大锚绳力随着波高的增大而增大。由图 9(c)和(d)可知,波高相同,最大锚绳力随周期变化不明显。

由图 9(a)和(c)可知,在浮筒直径 $D=160\sim 200$ mm 范围内,最大锚绳力先减小后增大,锚绳力差

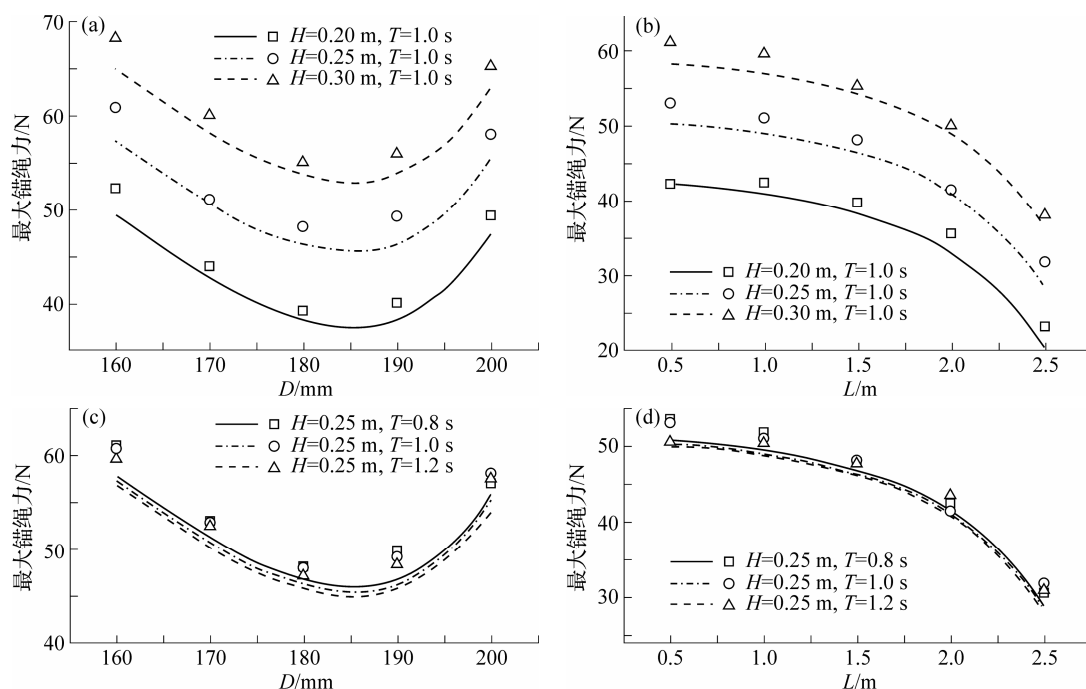


图9 船型网箱锚绳受力峰值

值最大约 12 N。数值计算结果表明, 浮筒直径为 186 mm 时锚绳力达到最小值。实验中可以观察到当浮筒直径为 180 mm 时, 浮筒会随着浮架向后漂移而被牵扯进水中, 而当浮筒直径为 190 mm 时, 浮筒因为自身浮力过大而无法被牵扯到水面以下。结合图 3~6 可知, 串联浮筒导致浮架水平方向位移量增加, 减小了浮架所受波流力, 从而减小了最大锚绳力。但随着浮筒直径进一步增加, 浮筒无法被牵扯到水面以下, 浮架水平方向位移量反而会减小, 而且浮筒位于水面以上受到的波浪载荷更大, 还会增加对锚绳的牵扯, 进一步增加最大锚绳力。

由图 9(b)和(d)可知, 锚泊系统选用浮筒Ⅲ, 在浮筒与浮架连接点距离 $L=0.5\sim 2.5$ m 的范围内, 最大锚绳力随着浮筒与浮架连接点距离增加而减小, 锚绳力最大差值可达 22 N。在 $L=2\sim 2.5$ m 内锚绳力变化最为剧烈, 这是由于在此范围内串联浮筒对浮架水平方向位移量影响明显。但是随着浮筒远离浮架连接点, 会对锚泊点处锚绳姿态影响较大, 一定程度上增加拔锚力, 增加了网箱走锚的风险。

如图 9 所示, 对比数值分析结果与实测数据可以发现, 实验结果较数值分析结果偏大, 这是因为对数值模型简化所致。数值分析结果可以较好地反映锚绳力的变化趋势, 实验结果与数值计算结果较为符合, 验证了数值计算结果的有效性。

4 结论

对在二阶 Stokes 波作用下的船型网箱锚泊系统受力进行数值分析和物理模型实验, 得到结论:

(1) 采用数值方法分析了串联浮筒对船型网箱水动力特性的影响。结果表明串联浮筒对浮架倾角影响不明显, 但增加了浮架水平方向位移量, 使得浮架相对水质点速度减小, 从而减小了最大波流力与最大锚绳力。

(2) 采用数值方法分析了不同波况作用下浮筒位置、大小对锚绳力的影响, 并进行了物理模型实验验证。结果表明最大锚绳力随着波高增加而增大, 随周期增加变化不明显。同时, 最大锚绳力随浮筒直径的增加先减小后增大, 随着浮筒位置远离浮架连接点而减小。浮筒位置不宜离浮架系泊点过远, 会因增加拔锚力而增加网箱走锚的风险。

(3) 物理模型实验测试结果与数值仿真分析结果基本吻合, 表明所建立的船型网箱系统动力学模型的正确性, 可用于对不同海况下船型网箱的锚泊系统和浮架系统进行动力学研究。

参考文献:

- [1] 郭根喜, 黄小华, 胡昱. 深水网箱理论与实践[M]. 北京: 海洋出版社, 2013:70-74.

- [2] Journée J M J, Massie W W. Offshore Hydromechanics [M]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2001:35-51.
- [3] 郝春玲, 张亦飞, 滕斌, 等. 流速分布及锚链自身刚度对弹性单锚链系统变形和受力的影响[J]. 海洋学研究, 2006, 24(3):90-95.
- [4] 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(2):117-146.
- [5] Hou H M, Dong G H, Xu T J, et al. Fatigue reliability analysis of mooring system for fish cage[J]. Applied Ocean Research, 2018, 71:77-89.
- [6] 郭根喜, 黄小华, 胡昱, 等. 高密度聚乙烯圆形网箱锚绳受力实测研究[J]. 中国水产科学, 2010, 17(4):847-852.
- [7] DeCew J, Tsukrov I, Risso A, et al. Modeling of dynamic behavior of a single-point moored submersible fish cage under currents[J]. Aquacultural Engineering, 2010, 43(2): 38-45.
- [8] Mavrakos S A, Papazoglou V J, Triantafyllou M S, et al. Deep water mooring dynamics[J]. Marine Structures, 1996, 9(2):181-209.
- [9] Mavrakos S A, Chatjigeorgiou J. Dynamic behaviour of deep water mooring lines with submerged buoys[J]. Computers & Structures, 1997, 64(1/2/3/4):819-835.
- [10] 乔东生, 闫俊, 欧进萍. 深水锚泊线串联浮筒系统的动力特性分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(15):54-58.
- [11] Yuan Z M, Incecik A, Ji C Y. Numerical study on a hybrid mooring system with clump weights and buoys[J]. Ocean Engineering, 2014, 88:1-11.
- [12] 韩森, 贾宝柱, 朱瑞景. 基于分段外推法的锚泊定位悬链线浮子的影响[J]. 大连海事大学学报, 2018, 44(1): 25-30.
- [13] 刘应中, 缪国平, 李谊乐, 等. 系泊系统动力分析的时域方法[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(11):7-12.
- [14] Bessonneau J S, Marichal D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls)[J]. Ocean Engineering, 1998, 25(7):563-583.
- [15] Sarpkaya T. Force on a circular cylinder in viscous oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 165:61-71.
- [16] Klust G. Fibre Ropes for Fishing Gear[M]. Farnham, UK: [s.n.], 1983:81-124.

Analysis of the influence of increasing buoys on the anchoring system of ship-type cage under wave

CHEN Xuanguang¹, CHEN Junhua^{2*}, DONG Xinlong¹, ZHENG Di², CHEN Junchi³

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.College of Science and Technology of Ningbo University, Ningbo 315300, China;

3.Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The ship-type cage is a new type of wind-resistant offshore cage. This cage uses a boat-shaped structure and a single-point mooring method that can be rotated downstream around the anchor point. Reasonable mooring system design is the key to ensure the safety and reliability of ship-type cages. According to Stokes second-order wave theory and Morison method, the effects of increasing the buoy on the hydrodynamic characteristics of the ship-type cage, as well as the effects of buoy position and size on anchor rope forces under different wave conditions are analyzed by numerical method. Physical model experiments were performed to verify the results. The results show that the maximum anchor rope force of the ship-type cage increases with the increase of the wave height, and has no obvious change with the period. Connecting the buoy increases the longitudinal displacement of the floating frame, thereby reducing the maximum wave current force on the floating frame and the force on the anchor rope. The maximum anchor rope force decreases first and then increases as the diameter of the buoy increases, and decreases as the buoy moves away from the connection point of the buoy.

Key words: ship-type cage; single point mooring; buoy; rope force

(责任编辑 韩 超)