

文章编号: 1000-0615(2017)10-1599-10

DOI: 10.11964/jfc.20160710497

筏式吊耳养殖系统水力特性及布局影响

桂福坤^{1*}, 孟昂¹, 陈天华¹, 张清靖²

(1. 浙江海洋大学, 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江舟山 316022;

2. 北京市水产科学研究所, 渔业生物技术北京市重点实验室, 北京 100068)

摘要: 深水延绳式筏式吊耳养殖系统属于典型的柔性多自由度海上结构物, 通过数值模拟和模型实验相结合的方法, 探讨了系统负重、浮球形式和布置角度对筏式系统水力特性的影响。结果显示, 系统负重和布置角度均对筏式吊耳养殖系统的受力和运动特性有显著的影响, 绳位移与负重呈负相关关系, 绳位移随着负重的增大而减小; 增大负重将明显增大绳、后锚绳、浮球系绳和吊绳的受力, 而前锚绳受力随负重增大而减小, 但幅度较小。浮球形式对筏式吊耳养殖系统的运动和受力影响很小, 可以忽略; 锚绳受力和绳位移与布置角度在 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 内呈正相关关系, 都随着布置角度的增大而增大, 在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 内锚绳受力和绳位移与布置角度呈负相关关系, 随着布置角度增大而减小。绳、浮球系绳、吊绳受力受布置角度影响较小。以上研究结果可为深水延绳式筏式吊耳养殖系统结构设计和安全性能评估提供参考。

关键词: 筏式养殖; 水动力特性; 负重; 浮球形式; 角度

中图分类号: S 967.7

文献标志码: A

筏式养殖系统作为一种重要的海洋养殖设施, 被广泛应用于紫菜、海带(*Laminaria japonica*)、贝类^[1]、龙须菜(*Asparagus schoberioides*)^[2-3]、鲍鱼、牡蛎、蟹类等经济型海水产品养殖。近年来, 外海化发展成为海洋设施养殖的重要趋势^[4-5]。外海海域往往缺乏岛屿的有效庇护, 风浪尤其是台风引起的风浪对设施安全的影响成为养殖成败的关键因素, 因此针对外海环境下筏式养殖系统的水动力特性研究, 对开展筏式系统安全评估具有重要意义。

筏式养殖系统形式多样, 研究内容与方式方法亦不尽相同。国外学者Grant等^[6]对一种筏式养殖系统进行了数值计算研究, 提出了一种筏式养殖系统有限元分析方法。Stevens等^[7]介绍了一种贝类养殖系统, 并通过海上实测和数值模拟研究了系统与波流间的相互作用。国内学者王经坤^[8]运用商业软件对一种加强的PVC材料的

筏式养殖系统进行了数值分析, 并综合考虑了风浪流荷载、缆索形式、材料参数等影响因素, 对浮筏的抗风浪因素进行了评估。崔勇等^[9-10]运用商业软件ANSYS, 将浮标、吊笼近似为圆柱体单元进行模拟, 并研究了筏式养殖系统在水流和波浪作用下的水动力特性, 重点分析了水流、波浪作用下浮标、吊笼的最大位移与锚绳受力变化规律。邓推等^[11-12]针对延绳式筏式养殖系统, 通过数值模拟研究了波浪作用下筏式养殖系统的运动特性, 主要分析了浮标在波浪作用下的运动响应和波浪入射角对锚绳力的影响, 考察了绳材料对浮标水平位移幅值的影响。刘庄等^[13]研究了一种可升降式的筏式养殖系统在波浪作用下的水动力特性, 主要分析了波高、周期和下潜深度对浮筏运动特性的影响。张光发等^[14-15]基于静力假定对外海延绳式筏式养殖设施的系统受力和失效模式进行了分析和结

收稿日期: 2016-07-28 修回日期: 2016-10-13

资助项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201505025-2); 国家自然科学基金(31602205, 51239002); 北京市农科院科技创新能力建设专项(KJCX20151203, 20161502-3)

通信作者: 桂福坤, E-mail: gui2237@163.com

构优化,研究了结构尺寸、波流方向、锚固方式和波浪周期对系统抗风浪能力的影响。张光发等^[6]基于有限元方法计算了深水延绳式浮筏养殖装置在不同浪级海况下系统位移和最大张力,并通过獐子岛海域实际应用的浮筏设施进行了验证,结果表明主绳为300 m长的筏架系统在1.5 m/s流速的海况下浮漂的抗风浪能力为6级海浪,且流速与波流方向对筏架系统的抗风浪能力影响较大。李冠颖等^[7]对海外浮架式蚵架的水动力特性进行了分析,但台湾地区的养殖设施在大陆并不常见。目前,国内的筏式养殖系统的研究多集中在锚绳受力和系统位移的分析,对于系统各个部分的受力特性综合研究较少。

本研究以实际生产中使用的一种深水筏式吊耳养殖系统为对象,通过数值模拟研究系统在波浪作用下各单元结构的运动及受力特性,并结合水槽模型实验进行结果验证。同时研究了系统负重、浮球形式和布置角度对系统各部件(锚绳、纜绳、浮球系绳、吊绳)水动力特性的影响,分析深水筏式吊耳养殖系统的危险节点,以期对延绳式深水筏式吊耳养殖系统的设计、荷载分析与安全评估提供参考。

1 材料与方 法

1.1 模型实验

模型 本研究以海洋水产养殖实际应用的一种扇贝筏式吊耳养殖系统为对象,结合研究工作的需要和实验条件,对模型进行了一定的简化处理。模型主体主要包括锚绳、纜绳、浮球系绳、吊绳等(图1),其结构尺寸如表1所示。

锚绳前后各1根,长度均为304.3 cm,直径4 mm,PE材质。每根锚绳的两端同样设计有2段皮筋用于模拟锚绳的弹性。在前后2个锚定点处,分别设置了水下拉力计,用于采集锚定点受力数据。

筏式系统的浮球采用乒乓球模拟,浮球分为上下2层,上浮球(亦称为主浮球)共5个,采用2个乒乓球粘结而成,下浮球(亦称为分布式浮球)为单个乒乓球,共21个。上、下浮球系绳均采用直径2 mm的PE细绳。上浮球系绳长30 cm,共5根;下浮球长10 cm,共16根。为便于描述,将上浮球按波浪方向编号1~5号(图1)。

吊绳用于悬挂吊耳扇贝,共21根,均匀布置于纜绳上。吊绳采用PE绳,每根长30 cm,直

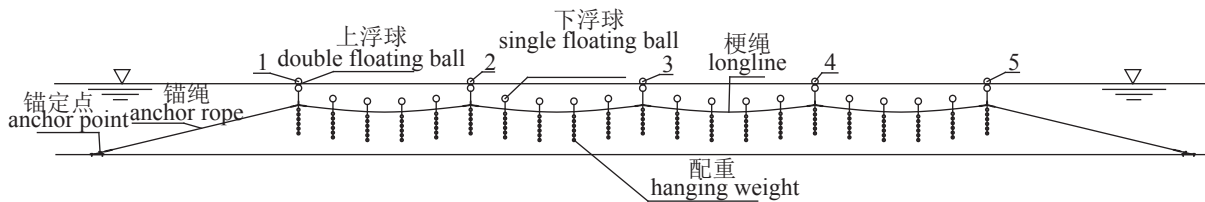


图 1 实验模型结构示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental model's structure

表 1 标准模型结构尺寸

Tab. 1 The size of the standard model's structure

模型结构 model structure	尺寸 size			
	(有效)重量/g (effective) weight	长度/cm length	直径/mm diameter	材质 texture
主筏绳(纜绳) raft rope		250	4	PE
锚绳(含皮筋) anchor line		304.3	4	PE
浮球 floating ball	27		39	乒乓球
浮球系绳 floating ball tether		30(上)/10(下)	2	PE
吊绳 lifting rope		30	2	PE
配重 balance weight	35和30			铅豆
皮筋 rubber band		包含在绳中		橡皮筋

径2 mm。配重采用小铅豆进行模拟, 每根吊绳配置7粒小铅豆, 每粒小铅豆重5 g, 共35 g。

为更好地模拟实际筏式吊耳养殖系统的绳索构件的受力拉伸, 锚绳与每段纜绳包含2端皮筋, 皮筋为2根串联, 用于节点的相互连接。上浮球系绳与纜绳连接处同样设置橡皮筋, 皮筋为单根。皮筋在受力时伸长(图2), 因此产生拉力, 公式:

$$T = K \left(\frac{\Delta l}{l} \right)$$

式中, T 为拉力, l 为绳索原始长度, Δl 为绳索伸长量, K 为皮筋的弹性系数, 根据实测求得 $K=22.1$ (图3)。

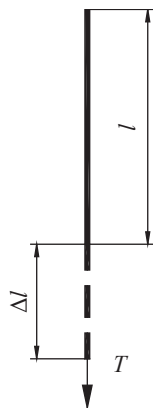


图2 皮筋变形图

Fig. 2 Sketch of elastic deformation

实验设备及模型布置 本模型实验在长沙理工大学波浪水槽中进行, 水槽长60 m、宽1.5 m、深1.8 m, 波周期跨度0.5~5.0 s, 最大可造波高0.5 m。实验主要设备: 浪高仪1个、CCD图像采集系统、电脑1台、发光二极管若干、拉力

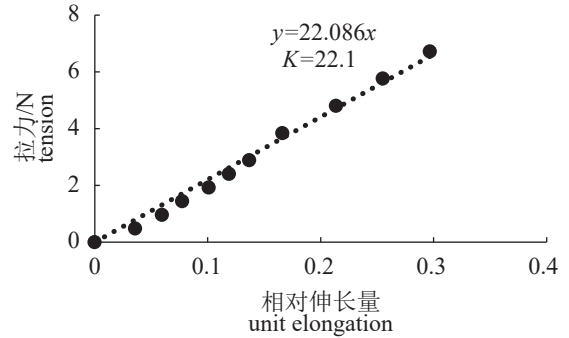


图3 拉力与相对伸长量关系

Fig. 3 Relationship of tension vs. relative elongation

传感器2个、数据采集系统等。实验模型沿水槽纵向布置, 模型最前端距离造波10 m, 通过锚定点固定于水槽底部(表2)。锚定点处设置拉力计, 用于采集系统在波浪状态下的受力。模型上A、B 2点处设置有发光二极管, 通过模型右侧设置的2个CCD图像采集系统, 采集系统在波浪作用下的运动情况(图4)。

表2 模型实验组设计

Tab. 2 Model experimental design

负重/g load	波高/cm wave height	周期/s period	设计波陡 design wave steepness	设计波长/cm design wave length
35	26.4	1.6	0.0701	380
35	20.7	1.6	0.0551	380
35	15	1.6	0.0401	380

数据测量 台筏受力通过布置于锚绳底端的拉力传感器测量获得。系统运动测试通过跟踪布置于系统节点处的二极管获得。二极管通过细漆包线连接干电池供电。运动分析由CCD图像跟踪系统组成。运动能采集点为A、B 2点。

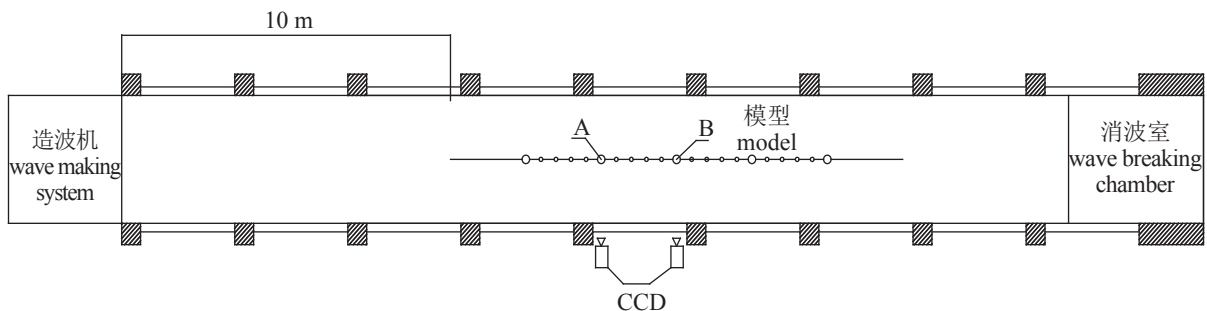


图4 模型平面布置图

Fig. 4 Sketch of the model floor-plan

1.2 数值模拟

根据Morison公式^[18], 首先计算浮球和吊耳所受波浪力以及重力和浮力, 同时将锚绳、缆绳等绳索离散为集中质量构件, 在对缆绳进行受力分析的基础上建立数学模型, 计算出每个构件所受到的力。根据牛顿第二运动定律建立运动方程, 采用四阶Runge-kutta法求解运动方程, 考察系统的运动响应情况。

浮球受力分析及运动方程建立 由于浮球属于小尺度结构物, 因此所受到的波浪力采用Morison公式进行计算。本模型中浮球有上浮球和下浮球2种。上浮球在系统运动时会有部分露出水面, 在使用Morison公式计算波浪力前需要先计算出浮球的浸水体积^[19]。下浮球在系统运动中不会露出水面, 直接采用Morison公式进行计算。另外, 浮球还受到浮球系绳的拉力作用。利用牛顿第二运动定律, 得到各浮球的运动方程(图5)。

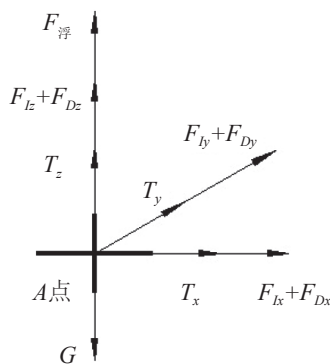


图 5 节点A的受力分析

Fig. 5 Calculation model for node A

绳索构件受力分析及运动方程建立 对锚绳、缆绳、浮球系绳、吊绳等绳索构件受力分析, 首先采用集中质量法, 将构件划分为很多小单元。建立单元张力表达式^[11]

$$T = C_2 \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^{C_1}$$

式中, C_1 为绳索的复合弹性模量系数(综合考虑了绳索的直径和材质因素), 本实测结果为 $C_1=79.8$, $C_2=1.01$ 。计算出单元体所受重力和浮力, 将单元所受外力均分到相邻两节点上, 利用牛顿第二定律可以得到绳索集中质量点的运动方程。

吊耳受力分析及运动方程建立 吊耳的模拟与下浮球模拟类似, 采用Morison公式计算

波浪力, 计算重力、浮力和吊绳拉力, 根据牛顿第二运动定律建立运动方程。

运动方程的求解及波浪理论的选取 入射波采用线性波理论进行计算, 对以上建立的运动方程采用四阶Runge-kutta法进行求解。

以节点A为例, 其运动方程可根据牛顿第二运动定律推导:

$$\begin{cases} F_{Dx} + F_{Ix} + T_x = m a_x \\ F_{Dy} + F_{Iy} + T_y = m a_y \\ F_{Dz} + F_{Iz} + T_z + F_{\text{浮}} - G = m a_z \end{cases}$$

式中, F_{Dx} 、 F_{Dy} 、 F_{Dz} 分别为x、y、z三个方向上拖曳力; F_{Ix} 、 F_{Iy} 、 F_{Iz} 分别为x、y、z三个方向上惯性力; T_x 、 T_y 、 T_z 分别为x、y、z三个方向上拉力; $F_{\text{浮}}$ 为浮力, G 为重力, m 为节点质量。运动方程可通过四阶runge-kutta法求解, 具体以x方向为例, 由上式运动方程可得出加速度计算公式:

$$a_x = f_x(x, y, z, v_x)$$

由初始时刻开始, 采用Runge-kutta法计算系统受力和运动, 并在多个波浪周期内进行数值求解, 直到前后周期的计算结果稳定后结束。数值模拟条件见表3。

2 结果

2.1 模型实验验证

数值模拟可以较好地反映系统受力, 实验

表 3 数值模拟实验组设计

Tab. 3 Numerical simulation experimental design

角度/(°) angle	负重/g load	上浮球形式 floating ball form	波高/cm wave height	波周期/s wave period
0	35	双浮球 twin float	26.4	1.6
0	35	双浮球 twin float	20.7	1.6
0	35	双浮球 twin float	15.0	1.6
0	35	单浮球 single float	26.4	1.6
0	35	单浮球 single float	20.7	1.6
0	35	单浮球 single float	15.0	1.6
0	30	双浮球 twin float	26.4	1.6
0	30	双浮球 twin float	20.7	1.6
0	30	双浮球 twin float	15.0	1.6
30	35	双浮球 twin float	15.0	1.6
60	35	双浮球 twin float	15.0	1.6
90	35	双浮球 twin float	15.0	1.6

数据和数值模拟数据的误差在可接受范围内(图6)。图7(本文纵坐标统一用 z)为 $T=1.6\text{ s}$, $H=15\text{ cm}$ 条件下缆绳上B点的运动轨迹对比, 可见数值模拟与模型实验结果整体吻合较好(图7), 数值模拟可以较准确地模拟筏式吊耳养殖系统的受力和运动情况。

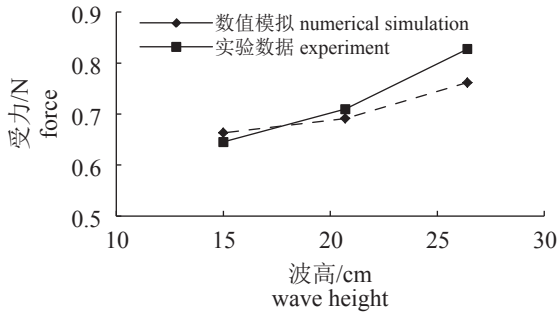


图 6 前锚定点受力最大值对比($T=1.6\text{ s}$)
Fig. 6 Comparison of maximum force in forward anchor

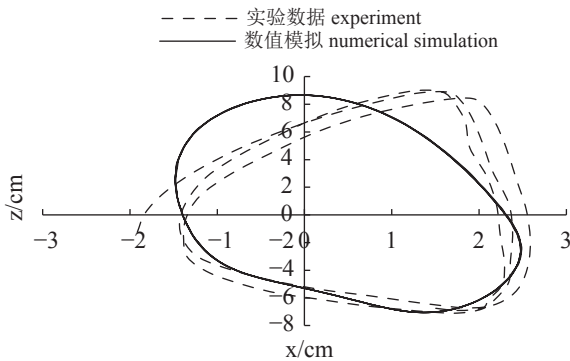


图 7 B点运动轨迹($H=15\text{ cm}$, $T=1.6\text{ s}$)
Fig. 7 Comparison of trajectory in B

2.2 负重对筏式系统运动和受力的影响

筏式系统中部运动幅值大于两端, 1号点受前锚绳的约束, 运动轨迹扁平, 呈现弧形运动, 与实际规律相符(图8)。背波面5号点同样受到锚绳的约束, 运动轨迹也较为扁平, 但轨迹出现双峰现象, 与该点顺波松弛有关。各节点竖向运动最高点随波高变化不明显, 说明各节点向上运动量受到缆绳约束而存在极大值。模型实验时, 观测到当波高通过时上浮球存在入水现象, 与本研究结果一致。

在实际养殖过程中, 由于吊耳养殖生物的生长会造成系统负重的变化, 延绳式筏式养殖系统的锚绳和缆绳是系统的核心结构, 也是系

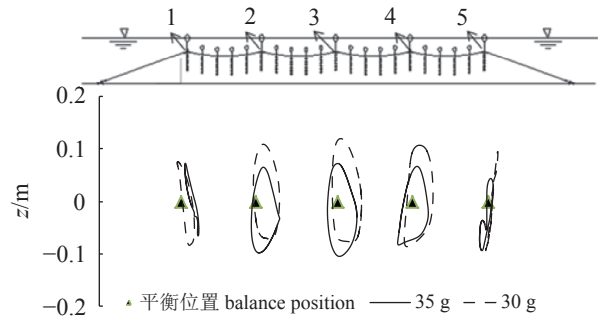


图 8 缆绳运动轨迹与负重关系($T=1.6\text{ s}$, $H=20.7\text{ cm}$)
Fig. 8 Relationship of trajectory of long-line vs. free-weight

统安全的关键所在, 本部分主要研究吊耳负重的变化对锚绳、缆绳的受力与运动的影响。随着负重的增大, 缆绳上点的垂直运动幅值明显减小, 水平运动幅值基本不变(图8)。缆绳上的最大位移随负重的增大而减小, 基本与图5规律相符, 即加大负重可以明显减小缆绳的运动(图9)。负重的增大将明显增大缆绳与后锚绳各单元体的最大受力, 前锚绳随负重增大稍有减小, 这是由于迎波面受力主要与系统的运动幅度有关, 负重增大后, 系统的运动幅度减小, 因此造成前锚绳受力减小(图10)。图11、12分别为上浮球系绳与吊绳受力最大值与负重关系, 系绳与吊绳的受力随负重的增大而增大。

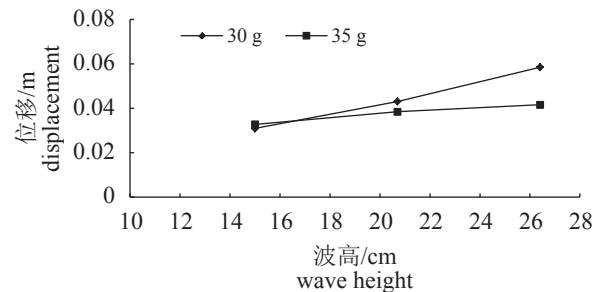


图 9 缆绳位移最大值随负重变化($T=1.6\text{ s}$)
Fig. 9 Relationship of displacement of long-line vs. freeweight

2.3 浮球形式对系统运动和受力的影响

在实际生产中, 会出现单个浮球提供浮力不够的情况, 通常情况下会在上浮球处使用2个浮球来提供浮力, 因此本部分将研究在上浮球总体积相等的情况下, 上浮球为单个浮球与2个浮球2种形式是否会对系统受力与运动产生影响。

图13、14、15、16、17显示, 在浮球总体积相同时, 系统缆绳运动轨迹、最大位移以及各

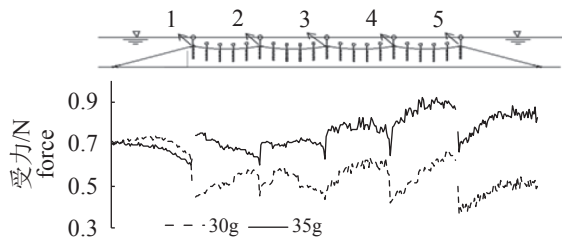


图 10 缆绳与锚绳最大受力随负重变化
($T=1.6\text{ s}$, $H=20.7\text{ cm}$)

Fig. 10 Relationship of maximum force of long-line and anchor vs. free-weight

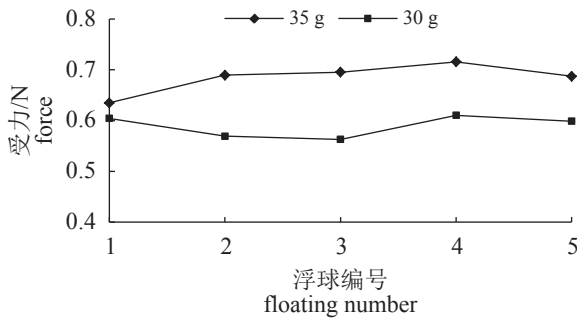


图 11 系绳受力随负重变化($T=1.6\text{ s}$, $H=20.9\text{ cm}$)

Fig. 11 Relationship of maximum force of floating rope vs. free-weight

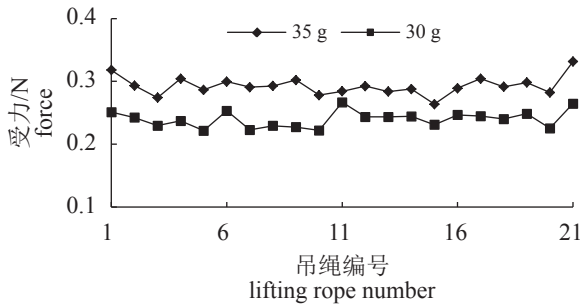


图 12 吊绳受力随负重变化($T=1.6\text{ s}$, $H=20.9\text{ cm}$)

Fig. 12 Relationship of maximum force of lifting rope vs. free-weight

部分受力最大值均不随浮球样式的变化而改变。浮球主要为系统提供浮力，在浮球总体积相等的前提下，改造浮球样式不会影响系统在波浪作用下的运动与受力。

2.4 布置角度对系统运动和受力的影响

实际生产中，筏式吊耳养殖系统的布置方向需要考虑海区波浪方向的影响，尽量规避不利的布置方向。本部分主要研究布置方向与波

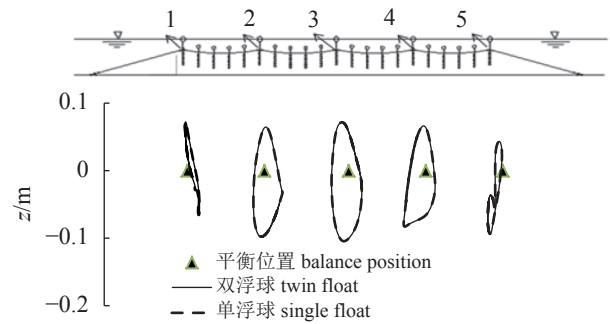


图 13 缆绳运动轨迹与浮球样式的关系
($T=1.6\text{ s}$, $H=20.7\text{ cm}$)

Fig. 13 Relationship of trajectory of long-line vs. float ball pattern

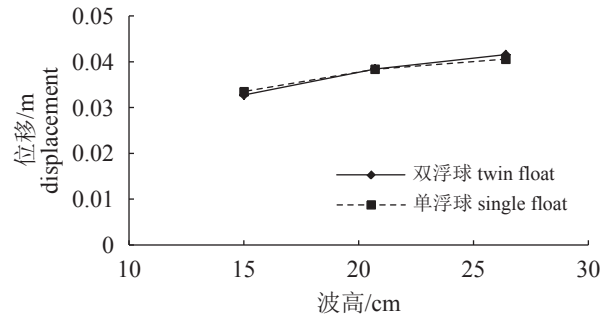


图 14 缆绳位移最大值随浮球样式的变化($T=1.6\text{ s}$)

Fig. 14 Relationship of displacement of long-line vs. float ball pattern

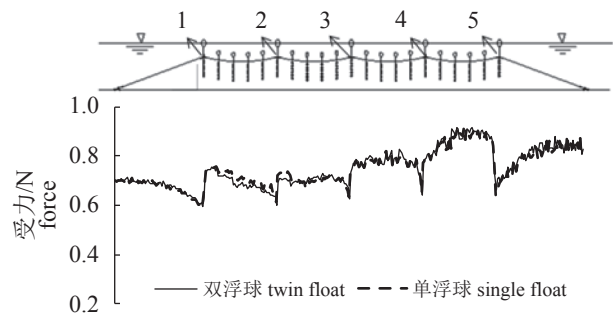


图 15 缆绳与锚绳最大受力随浮球样式的变化
($T=1.6\text{ s}$, $H=20.7\text{ cm}$)

Fig. 15 Relationship of maximum force of long-line and anchor vs. float ball pattern

向夹角(布置角度)对系统受力与运动的影响。

4种入射角下，针对缆绳发生最大位移时缆绳上与上浮球连接5点的偏移量的研究结果显示， 0° 角时缆绳偏移量最小。随着角度的增大，偏移量逐渐增大， 60° 角时最大，之后随着角度增大而减小(图18)。

锚绳、缆绳上各单元体受力最大值随布置角度的变化结果显示, 前后锚绳变化规律基本一致, 布置角度 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 内, 随着角度的增大而增大。 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时, 随着角度增大而减小(图19)。缆绳部分的变化规律不明显, 但可以看出 60° 时缆绳

绳上最大受力大于其他角度, 并且 60° 时各单元体上最大受力大部分都大于其他角度。

上浮球系绳与吊绳随角度变化幅度较小。缆绳与吊绳受到的约束是垂直方向, 因此波向的改变对它们影响不大, 而缆绳上受力主要是受负重的影响, 因此缆绳上受力随角度变化不大(图20, 21)。

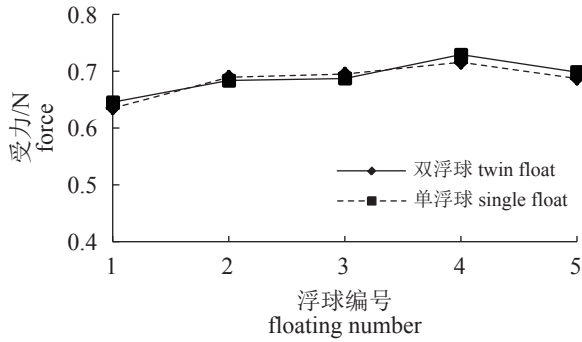


图 16 系绳受力随浮球样式变化(T=1.6 s, H=20.9 cm)
Fig. 16 Relationship of maximum force of floating rope vs. float ball pattern

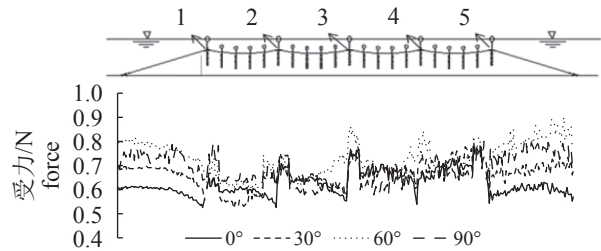


图 19 缆绳与锚绳最大受力随角度变化 (T=1.6 s, H=20.7 cm)
Fig. 19 Relationship of maximum force of long-line and anchor vs. angle

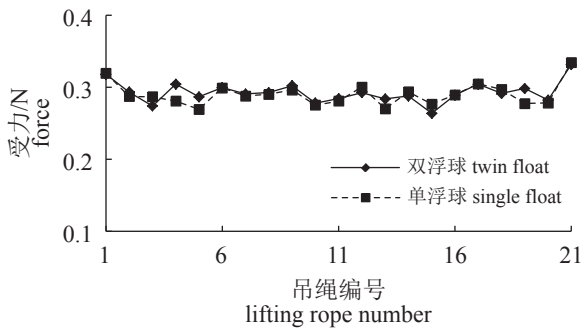


图 17 吊绳受力随浮球样式变化(T=1.6 s, H=20.9 cm)
Fig. 17 Relationship of maximum force of lifting rope vs. float ball pattern

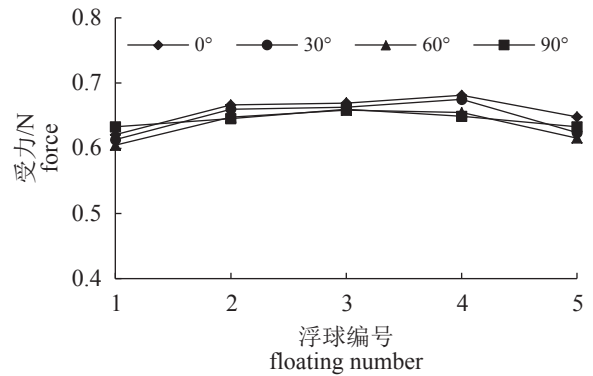


图 20 系绳受力随角度变化(T=1.6 s, H=20.9 cm)
Fig. 20 Relationship of maximum force of floating rope vs. angle

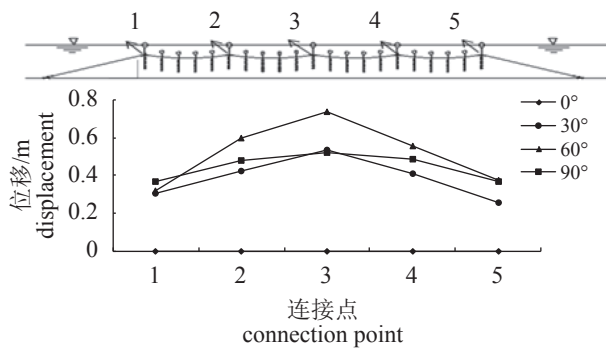


图 18 缆绳位移最大值随角度变化 (T=1.6 s, H=15.0 cm)

Fig. 18 Relationship of displacement of long-line vs. angle

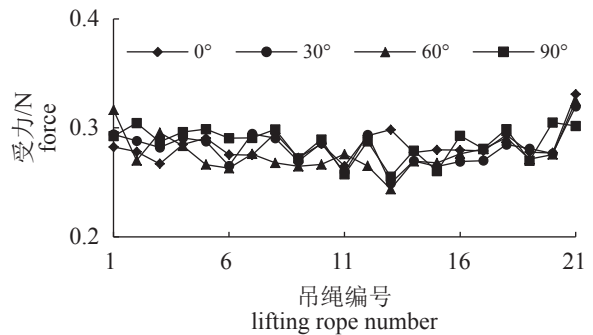


图 21 吊绳受力随角度变化 (T=1.6 s, H=20.9 cm)
Fig. 21 Relationship of maximum force of lifting rope vs. angle

3 讨论

通过数值模拟和模型实验的方法研究了筏式养殖系统在波浪作用下的运动及受力特性,模型实验和数值模拟结果吻合较好。在此基础上,进一步分析了系统负重、浮球形式、布置角度3个因素对系统的运动和受力的影响。

缆绳位移与负重呈负相关关系,缆绳位移随负重增大而减小;缆绳、后锚绳、浮球系绳和吊绳受力与负重呈正相关关系,均随着负重增大而增大,前锚绳受力随负重增大而减小。

浮球形式对系统的运动和受力的影响很小,可以忽略。

锚绳受力和缆绳位移与布置角度在 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 内呈正相关关系,都随着布置角度的增大而增大,在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 内锚绳受力和缆绳位移与布置角度呈负相关关系,随着布置角度增大而减小。缆绳、浮球系绳、吊绳受力受布置角度影响可以忽略。

综上所述,系统负重与系统布置角度对深水延绳式筏式吊耳养殖系统的受力和运动有影响,系统负重主要影响着浮球系绳、吊绳、缆绳、后锚绳受力和缆绳运动,而前锚绳由于负重增大后系统位移减小呈现出与后锚绳不同的规律。系统布置角度主要影响着锚绳的受力和缆绳的位移,对于垂直受力的浮球系绳和吊绳影响较小。张光发等^[14-16]研究认为系统在波流作用下,布置角度为 0° 时,系统所有张力由前端桩绳承受,桩绳的张力最大,随着布置角度增大,2端桩绳都参与承担系统水动力,单根桩绳的最大张力减小,在 90° 达到最小,并考虑浮漂和网笼的位移之后,建议布设角度为 45° 。邓推等^[11-12]也认为锚绳受力随角度增大而增大,并且角度小时前后锚绳受力相差较大。本研究表明,锚绳受力并不随布置角度增大而一直增大,而是在 60° 时达到最大值,之后随着角度增大而减小,并且前后锚绳受力相差不大,缆绳位移有着同样的规律,同时在 0° 角度情况下出现了前锚绳受力小于后锚绳受力的情况。这种结果可能由多种因素导致,首先可能是由于选取的模型不同;其次可能是由于锚绳受力情况更多地受波浪因素的影响;还有可能是由于本研究只是分析了纯波浪作用下的系统受力与运动,张光发等^[15]研究是在波流共同作用下的结果。

深水延绳式筏式吊耳养殖系统属于典型的柔性多自由度海上结构物,系统水动力特性受结构自身和环境要素的影响较大,因此在进行筏式系统设计和安全性能评估时,需要针对特定条件,进行具体分析论证,本研究所得相关结论仅可在相似结构和相似条件下作为参考。

参考文献:

- [1] Qian P Y, Wu C Y, Wu M, *et al.* Integrated cultivation of the red alga *Kappaphycus alvarezii* and the pearl oyster *Pinctada martensi*[J]. *Aquaculture*, 1996, 147(1-2): 21-35.
- [2] Li R Z, Chong R Y, Meng Z C. A preliminary study of raft cultivation of *Gracilaria verrucosa* and *Gracilaria sjoestedtii*[J]. *Hydrobiologia*, 1984, 116-117: 252-254.
- [3] Fei X G, Zhang X C, Sun G Y, *et al.* Southward transplant research of *Gracilaria lemaneiformis*[C]//. *Abstracts of 4th International Phycological Congress. Journal of Phycology*, 1991, 27(3): 21.
- [4] Boyd A J, Heasman K G. Shellfish mariculture in the Benguela system: water flow pattern within a mussel farm in Saldanha Bay, South Africa[J]. *Journal of Shellfish Research*, 1998, 17(1): 25-32.
- [5] Gibbs M M, James M R, Pickmere S E, *et al.* Hydrodynamic and water column properties at six stations associated with mussel farming in Pelorus Sound, 1984-85[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1991, 25(2): 239-254.
- [6] Grant J, Bacher C. A numerical model of flow modification induced by suspended aquaculture in a Chinese bay[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(5): 1003-1011.
- [7] Stevens C, Plew D, Hartstein N, *et al.* The physics of open-water shellfish aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2008, 38(3): 145-160.
- [8] 王经坤, 刘镇昌, 杨红生. 筏式养殖筏架虚拟设计及仿真研究[J]. *渔业现代化*, 2008, 35(1): 32-35.
Wang J K, Liu Z C, Yang H S. Virtual design and simulation research for the float raft of deep-sea farming[J]. *Fishery Modernization*, 2008, 35(1): 32-35(in Chinese).
- [9] 崔勇, 关长涛, 黄滨, 等. 波浪作用下筏式养殖结构的动力分析[J]. *渔业科学进展*, 2014, 35(4): 125-131.
Cui Y, Guan C T, Huang B, *et al.* Dynamic analysis of

- the long-line culture facility under waves[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(4): 125-131(in Chinese).
- [10] 崔勇, 蒋增杰, 关长涛, 等. 水流作用下筏式养殖设施动力响应的数值模拟[J]. *渔业科学进展*, 2012, 33(3): 102-107.
- Cui Y, Jiang Z J, Guan C T, *et al.* Numerical simulation of dynamic response of long-line culture facility to the current[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2012, 33(3): 102-107(in Chinese).
- [11] 邓推. 筏式养殖系统在波浪作用下的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- Deng T. Numerical simulation of raft-cultivation model under wave action[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010 (in Chinese).
- [12] 邓推, 董国海, 赵云鹏, 等. 波浪作用下筏式养殖设施的数值模拟[J]. *渔业现代化*, 2010, 37(2): 26-30.
- Deng T, Dong G H, Zhao Y P, *et al.* Numerical simulation of raft-cultivation model under wave action[J]. *Fishery Modernization*, 2010, 37(2): 26-30(in Chinese).
- [13] 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.
- 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(in Chinese).
- [14] 张光发, 黄亚南, 梁峻, 等. 外海延绳式浮筏养殖设施抗风浪能力估算方法研究[J]. *渔业现代化*, 2014, 41(5): 22-27.
- Zhang G F, Huang Y N, Liang J, *et al.* Research on method of evaluating anti-wave ability of deepwater long-line rope aquaculture facility[J]. *Fishery Modernization*, 2014, 41(5): 22-27(in Chinese).
- [15] 张光发, 张斌, 魏文, 等. 基于静力分析的深水台筏养殖设施结构优化设计[J]. *大连海洋大学学报*, 2013, 30(1): 96-101.
- Zhang G F, Zhang B, Wei W, *et al.* Optimal structure design for deepwater long-line rope rafts in aquaculture based on statics analysis[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2013, 30(1): 96-101(in Chinese).
- [16] 张光发, 栾剑, 张斌, 等. 基于有限元的深水延绳式浮筏养殖装置抗风浪能力分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 197-203.
- Zhang G F, Luan J, Zhang B, *et al.* Analysis on wind resistance ability of deepwater long-line rope aquaculture facility by finite element method[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 197-203(in Chinese).
- [17] 李冠颖, 黄材成. 外海浮筏式蚵架动力分析[C]//第31届海洋工程研讨会论文集. 台湾: 中山大学, 2009: 553-560.
- Li G Y, Huang C C. Analysis on dynamic of raft type oyster offshore[C]//The 31st Marine Engineering Conference Proceedings. Taiwan: Sun Yat-sen University, 2009: 553-560 (in Chinese).
- [18] 王树青, 梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013.
- Wang S Q, Liang B C. *Ocean Engineering Wave Mechanics*[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2013 (in Chinese).
- [19] 郑艳娜. 波浪与浮式结构物相互作用的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- Zheng Y N. The study of the wave interaction with floating structure[M]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006 (in Chinese).

Hydrodynamic characteristics of raft-style lug aquaculture system and the influence of arrangement

GUI Fukun^{1*}, MENG Ang¹, CHEN Tianhua¹, ZHANG Qingjing²

(1. National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Beijing Key Laboratory of Fishery Biotechnology, Beijing Fisheries Research Institute, Beijing 100068, China)

Abstract: Raft aquaculture is one of the popular farm modes for growing aquatic product in the ocean. However, tough conditions in the open ocean often impose severe damages on the raft systems. Therefore, comprehensive studies on the mechanics of the raft systems exposed to waves will greatly give help to optimizing raft system design and construction. This paper focuses on the mechanics of a typical long-line raft lug aquaculture system under wave conditions. In this paper, the numerical simulation was used for this study. The raft system was assumed as a flexible structure which was composed of nodes connected with springs. Wave forces on the rope and floating balls were calculated using Morison equations. Second order differential equations were established based on Newton's second law. The equations were resolved using fourth-order Runge-kutta method to find out the inner tension force and displacement of each element. It was found that free-weight and system angle have an effect on long-line rope aquaculture facility. Long-line displacement is negatively related with free-weight. The displacement of long-line decreased as free-weight increased. The force of long-line, back anchor rope, float ball rope and lifting rope increased as free-weight increased. But the force of front anchor rope decreased as free-weight increased. Float ball pattern had little impact on the system's movement and force. Anchor rope force and the displacement of long-line had positively correlated relationship with system angle at 0° to 60°. They increased as the angle increased. Anchor rope force and the displacement of long-line had negative correlated relationship with angle at 60° to 90°. They decreased as the system angle increased. The force of long-line, float ball rope, the lifting rope affected by the system angle is small. The results have important significance on evaluating the safety of the raft culture system. Deep-water long-line rope aquaculture facility belongs to the typical flexible multi degree of freedom offshore structures, and this research results can provide the reference for designing deep-water long-line rope aquaculture facility and safety evaluation. But the hydrodynamic characteristics of the deep-water long-line rope aquaculture facility are related to its structure and environmental factors, therefore we need specific conditions and specific analysis in the raft system designing and safety assessment.

Key words: raft culture; hydrodynamic characteristics; hanging weight; float ball pattern; angle

Corresponding author: GUI Fukun. E-mail: gui2237@163.com

Funding projects: National Marine Special Public Welfare Industry Research (201505025-2); National Natural Science Foundation of China (31602205, 51239002); Beijing Academy of Agricultural Science and Technology Innovation Ability Construction Project (KJCX20151203, 20161502-3)