

水流作用下筏式养殖设施动力响应的数值模拟

崔勇^{1,2} 蒋增杰^{1*} 关长涛¹ 万荣²

(¹农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

(²中国海洋大学水产学院, 青岛 266003)

摘要 利用有限单元法建立了水流作用下筏式养殖设施动力响应的数学计算模型, 通过数值求解对浮标和吊笼结构的最大位移以及锚绳受力进行分析。计算机模拟结果表明, 筏绳在水流作用下产生明显的变形, 其形态变化与实际基本相符。当流向一定时, 浮标和吊笼的最大位移值以及左右两侧的锚绳受力均随流速的增加而增大。其中, 浮标最大位移值 7.6 m, 吊笼最大位移值 9.6 m。当流速一定时, 浮标和吊笼的最大位移值与右侧锚绳受力随着来流角度的增加而增大。左侧锚绳力受来流方向变化影响不明显, 其最大值为 3 780 N。

关键词 筏式养殖 有限元 水流 数值模拟

中图分类号 S969.39 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2012)03-0102-06

Numerical simulation of dynamic response of long-line culture facility to the current

CUI Yong^{1,2} JIANG Zeng-jie^{1*} GUAN Chang-tao¹ WAN Rong²

(¹Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Qingdao 266071)

(²Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003)

ABSTRACT Long-line culture facility in the sea may move and deform under the effect of current. In order to keep the stability and safety of the facility, it is necessary to carry out the dynamic analysis of the whole structure. Herein, a numerical model based on finite element method was developed to reveal the dynamic response of long-line culture facility to the current. The maximum displacement of float and hanging cage and maximum mooring line force were calculated and analyzed. The simulation results showed that the float rope deformed obviously under the effect of current, and the change of shape corresponded with the practical condition. Furthermore, the maximum displacement of float and hanging cage and the both mooring line force increased with the increase of the current velocity under the same flow direction. The maximum value of displacement of float and hanging cage were 7.6 m and 9.6 m, respectively. The maximum displacement of float and hanging cage and the right mooring line force increased

农业部渔业装备与工程重点开放实验室基金(2009001)、国家重点基础研究规划项目(2011CB409805)、贝类产业技术体系(CARS-48)和国家海洋局海洋环保专项共同资助

* 通讯作者。E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn, Tel: (0532)85822957

收稿日期: 2011-07-29; 接受日期: 2011-11-28

作者简介: 崔勇(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事渔业工程数值模拟研究。E-mail: cuiyong@ysfri.ac.cn

with the increase of the current angle under the same current velocity. But the left mooring line force changed slightly under the different current direction, with the maximum value of 3 780N.

KEY WORDS Lone-line culture Finite element method Current Numerical simulation

传统的筏式养殖系统是指在浅海水面上利用浮子和绳索组成浮筏,用缆绳固定于海底,使海藻(如海带、紫菜)和贝类(如扇贝、牡蛎、鲍鱼)的幼苗固着在吊绳上并悬挂于浮筏的养殖方式。我国从20世纪50年代开始大规模海带筏式养殖,随着养殖技术与养殖设施的不断完善和成熟,至今已经形成包括藻类、贝类、海参、海胆、蟹类等多品种的综合筏式养殖系统。

筏式养殖设施主要由浮子、筏绳、锚绳和养殖吊绳组成,其在风浪和水流的作用下会产生明显的运动变形,极易导致各组成构件之间相互缠绕而影响设施正常工作。由于筏式养殖设施主要结构为柔性的绳索单元,而且在作业过程中绳索形状和张力的变化与受到的水动力相互影响,所以对设置于复杂海况条件下设施结构的运动和受力问题进行精确分析是一件非常困难的事情。台湾学者李冠颖等(2009)运用集点质量法对外海浮筏式蚵架的水动力学特性进行了数值模拟,并将数值模拟结果与水槽模型实验进行了对比分析。国内学者王经坤等(2008)基于商业软件AQWA对筏式养殖筏架结构进行虚拟设计,通过仿真计算对浮筏的抗风浪性能进行分析。邓推等(2010)针对新型筏式养殖模型,通过建立浮标与缆绳结构的运动方程,对筏式养殖系统在波浪作用下运动受力情况进行了数值模拟。目前,国内外对于水流作用下筏式养殖设施水动力学特性的研究报道还很少,为此,本研究提出一种基于有限元原理的数值模拟方法,通过建立浮标与绳索整体结构的有限元数学模型,探讨筏式养殖系统在流场中动态响应特性,以期对养殖设施优化设计提供科学依据。

1 计算模型设计

图1是根据实际海区筏式养殖设施经适当简化后得到的结构示意图。该系统由22个柱形浮标、两个球形浮标、吊笼、锚绳和筏绳组成。其中,左右两端的球形浮标与相邻的柱形浮标之间距离为3.5 m,各柱形浮标间距为1.3 m,所有的浮标通过筏绳互相连接。各柱形浮标直径为0.2 m,长度为0.3 m。为简化计算,将吊笼部分均假设为圆柱体结构,其直径为0.3 m,高度为1.2 m。各吊笼通过养殖吊绳悬挂于柱形浮标下方,吊绳长度为1 m。水深为10 m,锚绳长度15 m。

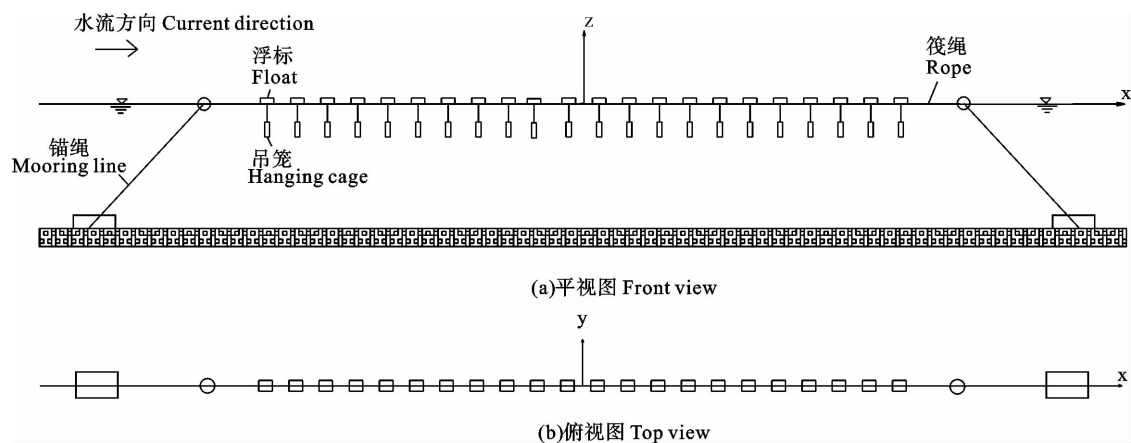


图1 计算模型结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the model

2 数学模型

2.1 有限元动力方程

筏式养殖系统结构在水流作用下总体受力运动方程可由下式来表示:

$$[M]\ddot{a}(t) + [C]\dot{a}(t) + [K]a(t) = F(t) \quad (1)$$

式中, $\ddot{a}(t)$ 、 $\dot{a}(t)$ 和 $a(t)$ 分别是系统的结点加速度向量、结点速度向量和结点位移向量; $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 和 $F(t)$ 分别是系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和结点载荷向量。

2.2 浮标与吊笼单元

为简化计算,本研究将浮标与吊笼结构近似为圆柱体单元,其单元质量矩阵在考虑弯曲效应时采用与三维梁单元相同的形式;其单元刚度矩阵同样采用与空间梁单元类似的形式,可同时计算单元轴向拉压、扭转和弯曲变形。

2.3 绳索单元

对于筏式养殖设施的筏绳、吊绳和锚绳结构均作为绳索单元来计算(图2),其单元刚度矩阵仅考虑轴向拉伸效应;其单元质量矩阵采用与三维杆单元相同的形式。由于所有的筏绳和锚绳单元均为柔性体结构,在水动力作用下具有几何非线性特征,因此在建模时采用集中质量矩阵来提高计算效率。

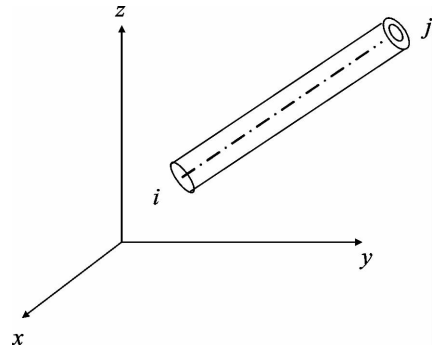


图2 绳索单元模型

Fig.2 The scheme of the ropes

2.4 流体载荷向量

单元载荷向量由流体静载荷效应和水流动载荷效应两部分组成。其中,流体静载荷效应为浮力引起的单位长度分布力 $\{F/L\}_b$ 与轴向节点力单位长度的分布力 $\{F_x\}$ 。流体的静力作用与单元的直径相关,对于完全浸没的单元,沿 z 轴正向作用力为:

$$\{F/L\}_b = C_b \rho_w \frac{\pi}{4} D_e^2 \{g\} \quad (2)$$

式中, $\{F/L\}_b$ 为浮力引起的单位载荷向量; C_b 为浮力系数; $\{g\}$ 为重力加速度。流体动载荷效应由水流运动引起,水流质点的水平速度与方向沿水深方向分布,两点之间位置的流速矢量通过线性插值确定,其中水流质点速度即为流速矢量。考虑计算单元的变形,按结构与流体相对运动速度表示的 Morison 方程为(李茜等 2003):

$$\{F/L\}_d = C_D \rho_w |\{\dot{u}_n\}| \{\dot{u}_n\} + C_M \rho_w \frac{\pi}{4} \{\dot{v}_n\} + C_T \rho_w |\{\dot{u}_t\}| \{\dot{u}_t\} \quad (3)$$

式中, $\{F/L\}_d$ 为流体动力效应引起的单位长度载荷; C_D 为法向曳力系数; C_M 为法向惯性力系数; C_T 为切向曳力系数; $\{\dot{u}_n\}$ 为法向流体质点相对速度矢量; $\{\dot{v}_n\}$ 为法向流体质点加速度矢量; $\{\dot{u}_t\}$ 为切向流体质点相对速度矢量。结构速度可以利用 Newmark 时间积分得到(段艳丽等 2006),通过流体质点速度和结构速度相减,得到相对速度 $\{\dot{u}_n\}$ 和 $\{\dot{u}_t\}$ 。最后,使用 Morison 方程来计算水动力作用在单元上的分布载荷(崔勇等 2011)。

2.5 数值解法

在有限元动力分析中由于引入了质量矩阵,得到的联立方程组为二阶常微分方程组,因此使用 Newmark 方法对其进行降阶求解,其基本假设为(崔勇等 2010):

$$\dot{a}_{t+\Delta t} = \dot{a}_t + [(1-\delta)\ddot{a}_t + \delta\ddot{a}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (4)$$

$$a_{t+\Delta t} = a_t + \dot{a}_t\Delta t + [(\frac{1}{2}-\alpha)\ddot{a}_t + \alpha\ddot{a}_{t+\Delta t}]\Delta t^2 \quad (5)$$

将式(4)和(5)代入(1)可得,

$$\overline{K}a_{t+\Delta t} = \overline{F} \quad (6)$$

式中,
$$\overline{K} = K + \frac{1}{\alpha\Delta t^2}M + \frac{\delta}{\alpha\Delta t}C \quad (7)$$

$$\overline{F} = F_{t+\Delta t} + M[\frac{1}{\alpha\Delta t}\dot{a}_t + (\frac{1}{2\alpha}-1)\ddot{a}_t] + C[\frac{\delta}{\alpha\Delta t}a_t + (\frac{\delta}{2\alpha}-1)\dot{a}_t + (\frac{\delta}{\alpha\Delta t}-1)\Delta t\ddot{a}_t] \quad (8)$$

求解方程(8)即可得到 $t+\Delta t$ 时刻的位移,代入式(4)和(5)即可求得 $t+\Delta t$ 时刻的速度和加速度,在每一个时间步 Δt 内采用 Newton-Raphson 法进行迭代分析以得到数值解。

3 结果与讨论

3.1 水流对筏式养殖设施形态的影响

图3为不同来流方向时筏式养殖设施形态随流速变化的数值模拟结果。如图3所示,水流速度从左向右分别取0.2、0.6、1.0 m/s,来流方向从上向下分别取与x轴正向成 30° 、 60° 、 90° 。从图3可以看出,筏绳结构在水流的冲击作用下产生明显的弯曲变形,其变化趋势与在实际养殖海区所观察到的情形基本相符,说明计算机数值模拟结果能基本正确反映筏式养殖设施在水流作用下的动力响应特性。从模拟结果来看,随着流速的增大,水面之上筏绳的拱度逐渐增大,水面下吊笼出现水平方向的后移和垂直方向的提升。在流速超过0.6m/s的时候,设施结构形态发生巨大的改变,底部的吊笼已经发生明显的倾斜,筏绳部分由于承受较大的张力会加速老化而减少其使用年限,因此建议在流速大于0.6m/s的时候,应采取措施减少其变形程度。

3.2 浮标和吊笼位移分析

图4和图5为不同来流方向和流速下浮标和吊笼结构所产生最大位移的计算机模拟值。由图4、图5可见,当来流方向相同时,浮标和吊笼的最大位移均随着流速的增加而增大;在相同流速下,当来流方向与x轴正向成 90° 时,浮标和吊笼的位移值达到最大,来流方向与x轴正向成 30° 时的位移值最小。当来流方向和流速相同时,吊笼的最大位移值要大于浮标的最大位移值,这是由于在水流的冲击作用下,吊笼会产生垂直方向的提升与水平方向的漂移所致。此外,从模拟结果可以看出,浮标和吊笼最大位移值的变化与流速的增加基本成线性关系。在低流速时,浮标和吊笼的最大位移值随流向的增加而增大较缓;在高流速区,其最大位移值随流向的增加而显著增大。计算机模拟结果显示,当水流方向与筏绳轴向垂直且流速为1.0m/s时,浮标最大位移为7.6m,吊笼最大位移值可达9.6m。

3.3 锚绳受力分析

图6为筏式养殖系统在水流作用下达平衡状态时锚绳受力的计算机模拟值,其中(a)、(b)分别表示左侧和右侧锚绳力最大值随流速和流向改变的变化趋势。从图6可以看出,当来流方向一定时,左右两侧的锚绳受力均随流速的增加而增大。当流速一定时,右侧锚绳受力随着流向的增加而增大;左侧锚绳力受流向影响的变化趋势则不明显。其中,当流向与x轴正向成 60° 时锚绳受力达到最大值,当流向为 30° 时锚绳受力为最小。当流速和流向均相同时,左侧锚绳受力要大于右侧锚绳受力,这主要是由两侧锚绳布置的初始形态所决定。综合分析,左侧锚绳受力随流速改变而变化的幅度要远大于受流向改变的变化幅度,而右侧锚绳力在高流速区受流向变化的影响要大于受流速改变。计算机模拟结果显示,当流速为1.0m/s时,左侧锚绳受力最大值可达3780N,右侧锚绳受力最大值为3430N。

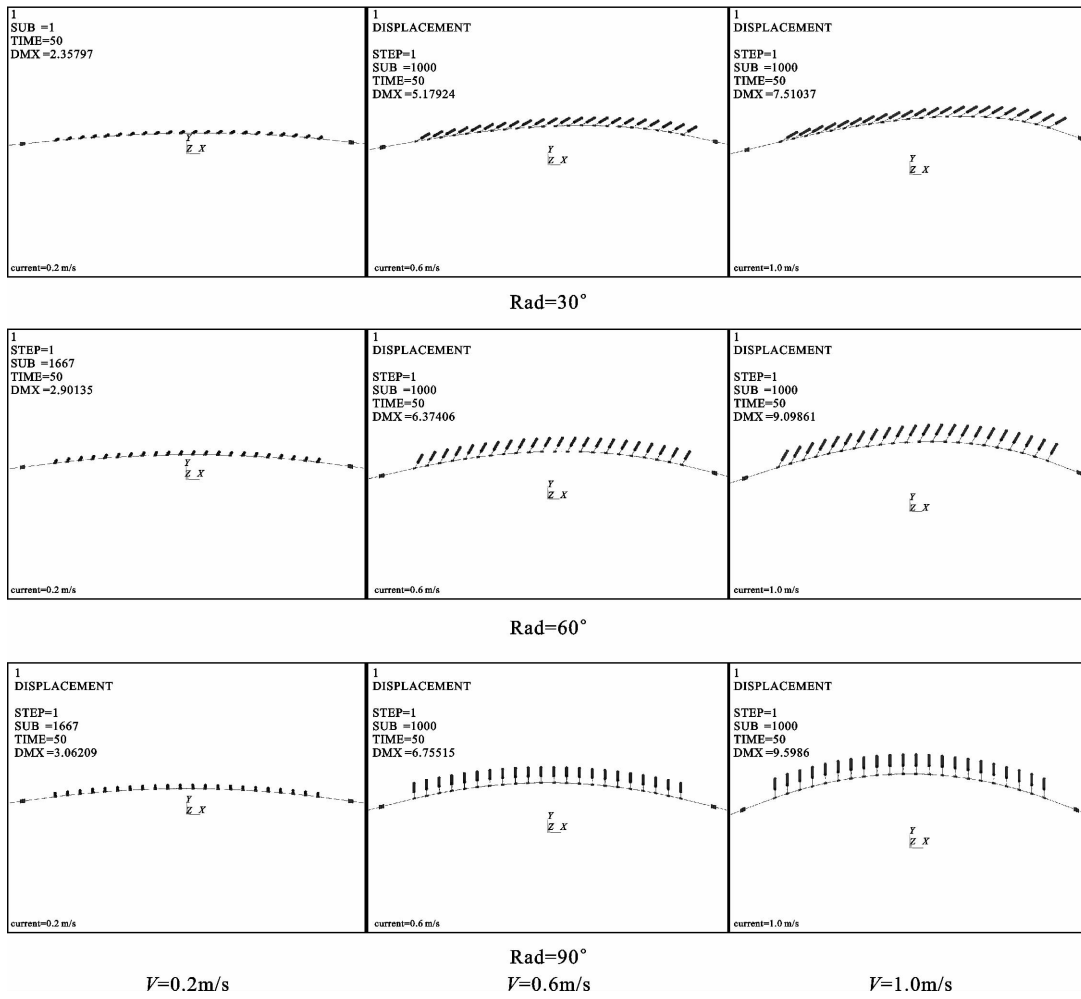


图3 水流作用下筏式养殖设施形态变化
Fig. 3 Effect of current on the shape of the culture raft

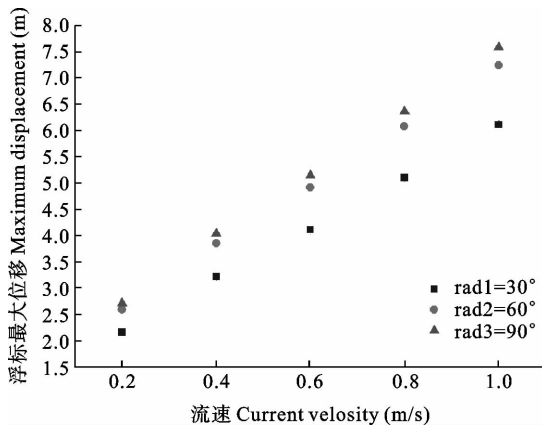


图4 水流作用下浮标最大位移
Fig. 4 Effect of current on the displacement of float

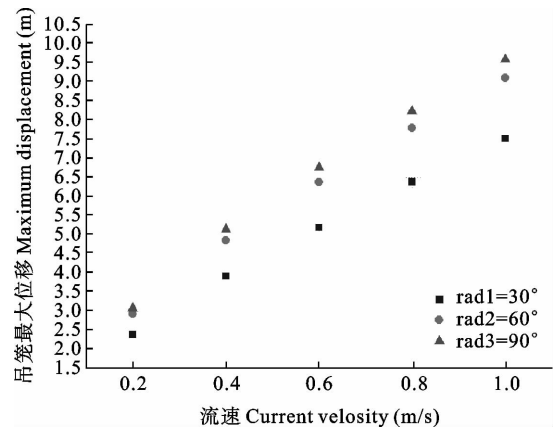


图5 水流作用下吊笼最大位移
Fig. 5 Effect of current on the displacement of hanging cage

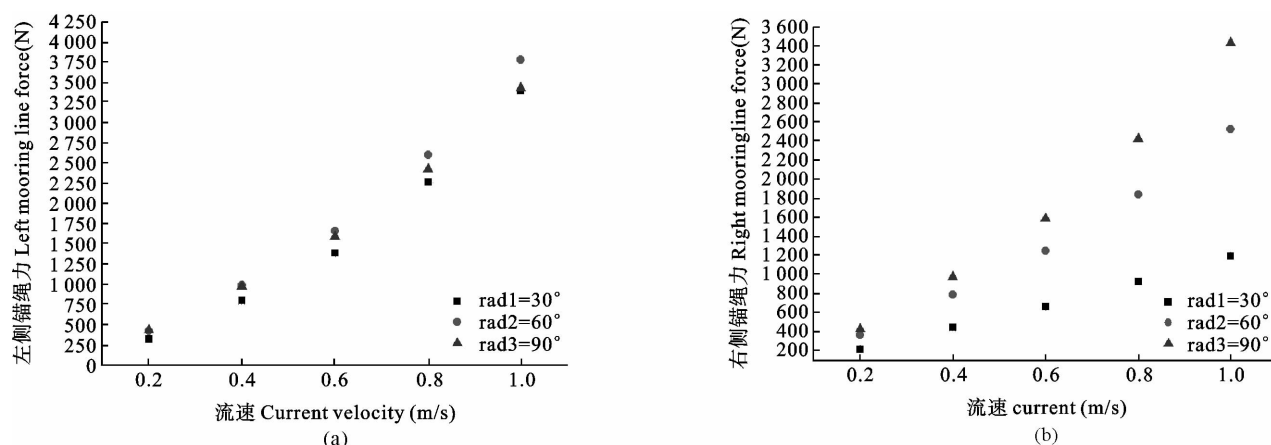


图6 水流作用下最大锚绳力

Fig. 6 Effect of current on the mooring line force

4 小结

本研究通过有限元方法建立了筏式养殖结构在流场中受力变形的数值模型,其形状变化的模拟结果与海上观察的变形情况基本相符,说明本数值模型具有解的稳定性和收敛性。模拟结果显示,筏式养殖设施在水流作用下的受力变形与流速和流向密切相关。本方法通过进一步的实验验证,可为实际工程设计提供理论参考。由于在实际海域中还有波浪的存在,今后将加入波浪对筏式养殖设施的作用来进一步完善数值模型,使数值模拟的结果更加趋向于实际。

参 考 文 献

- 王经坤,刘镇昌,杨红生. 2008. 筏式养殖设施虚拟设计及仿真研究. 渔业现代化,35(1):32~35
- 邓 推. 2010. 筏式养殖系统在波浪作用下的数值模拟. 见:大连理工大学硕士研究生学位论文
- 邓 推,董国海,赵云鹏,李玉成. 2010. 波浪作用下筏式养殖设施的数值模拟. 渔业现代化,37(2):26~30
- 李 茜,杨树耕. 2003. 采用 ANSYS 程序的自升式平台结构有限元动力分析. 中国海洋平台,18(4):41~46
- 李冠颖,黄材成. 2009. 外海浮筏式蚶架动力分析. 见:第31届海洋工程研讨会论文集. 台湾,中山大学,553~560
- 段艳丽,张金平,刘学虎,窦宏江. 2006. 半潜式平台的波浪载荷计算. 石油矿场机械,35(2):41~44
- 崔 勇,关长涛,万 荣,桂福坤,黄 滨,李 娇. 2010. 基于有限元方法对波流场中养殖网箱的系统动力分析. 工程力学,27(5):250~256
- 崔 勇,关长涛,万 荣,黄 滨,李 娇. 2011. 基于有限元方法对鲆网箱耐流特性的数值模拟. 中国海洋大学学报(自然科学版),41(6):51~