

浮式养殖网箱系统的数值模拟^{*}

詹杰民, 苏 炜

(中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 对一种浮式网箱及其系泊系统建立了有限元模型。为了确保计算模型的准确性, 对网箱系统的主要部件分别进行了模拟并与实验结果验证。进而对该模型在不同来流方向, 以及网面阻力受水流遮蔽效应的影响进行了数值模拟研究。结果表明, 所建立的数值模拟系统是有效和合理的, 能够作为网箱设计和优化辅助系统。

关键词: 外海农业; 柔性结构; 水动力; 渔网

中图分类号: S955.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529 6579 (2006) 06 0001-06

世界人口的增长推动着对海洋鱼类需求的不断增加。随着海洋野生鱼类资源的日益枯竭, 在国内外, 基于可持续发展的战略角度出发, 海洋渔业的发展正在进行结构性的调整, 即从捕捞转向养殖, 尤其是网箱养殖。发展集约化深海网箱养殖业, 符合生态环保要求, 已成为世界各国的共识。因此有关深海网箱的研究得到了越来越多的关注。

在国外, Tsukrov 等^[1]构造了一致性单元来模拟网面在海洋环境载荷作用下的响应, 并用以对开放海域的一种张力腿网箱的动力性能的进行评估。Fredriksson 等^[2]对碟型网箱在水中上下振动的问题作了试验研究和数值模拟, Lader 等^[3]等作者利用四边形超单元模拟柔性网面在波流作用下的水动力特性。

中国网箱养鱼已有 20 多年的历史, 国家农业部水产局自 1986 年起, 就把抗风浪网箱的研究列为重点项目, 重点进行攻关。国内目前在浅海抗风浪网箱研究方面已经取得了一定的成果, 但在外海抗风浪网箱研究方面与日本、挪威等渔业发达国家相比差距还比较大, 特别是对新材料和新结构的研究较少。

桂福坤等^[4]概述了国内外网箱发展以及研究的一些现状。李玉成等^[5-7]对碟形及拟碟形网箱的受力特性进行了系列试验研究, 并获得了两种网箱水动力特性的相关成果。章守宇等^[8]提出了碟形网箱的水动力数值计算方法, 分析了波、流共同作用下的网箱受力情况。詹杰民等^[9]考虑了雷诺数, 网的密度, 以及网型的影响, 对作用在网面以及

圆形网箱上的来流阻力进行了试验研究。宋伟华等^[10]采用了四种网箱系泊方法, 设计了单点系泊网衣构建水槽波浪试验。王鲁民等^[11]对深水网箱模型进行了试验研究。杨新华等^[12], 高晓芳等^[13]分析了深海圆柱形沉浮式养殖网箱所承受的波浪力情况。

1 网箱系统组成及模型合理性验证

浮式网箱通常由框架, 网面, 锚泊绳索, 浮子和沉子等构成。

1.1 框架

如图 1 所示, 网箱框架由框架内圈、框架外圈、扶手栏杆和工字连接架等组成。本文的目的是建立一个网箱的系统, 因此忽略这些结构形状的细节, 把网箱框架等效看成一个圆环, 并用梁单元来模拟框架的受力情况。并与美国 Fredriksson 等人所完成的一项网箱框架材料的试验研究做一个定性的比较。试验中将一个管状圆环形 HDPE 框架, 两处固定, 一处逐步施加载荷到 1557N, 框架直径为 3.66 m, 管外径 8.89 cm, 壁厚 0.574 cm, 杨氏模量为 6.67×10^8 Pa, 泊松比为 0.42。本文的有限元模型中利用了 200 个梁单元来模拟试验框架, 并在模型中采用与试验相同的材料以及几何参数, 网箱框架的有限元模型计算结果见图 2。有限元模型的变形与实验框架变形的情况一致。在试验中 C 点出现局部屈服现象, 本文的梁单元模型并未能模拟出类似结果, 我们会在改进的有限元模型中进一步讨论这个问题。

* 收稿日期: 2006 04 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10272118); 国家十五攻关计划资助项目 (2004BA526B03)

作者简介: 詹杰民 (1963 年生), 男, 教授, 博士生导师; Email: stjzm@mail.sysu.edu.cn

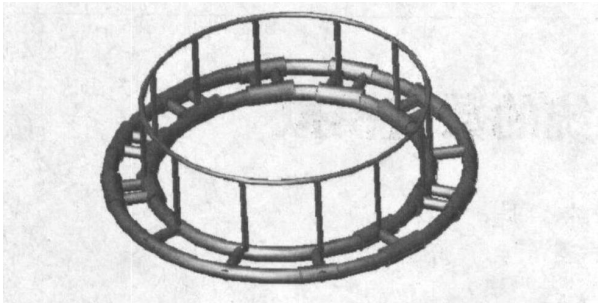


图 1 浮式网箱框架示意图
Fig 1 Frame of floating net cage

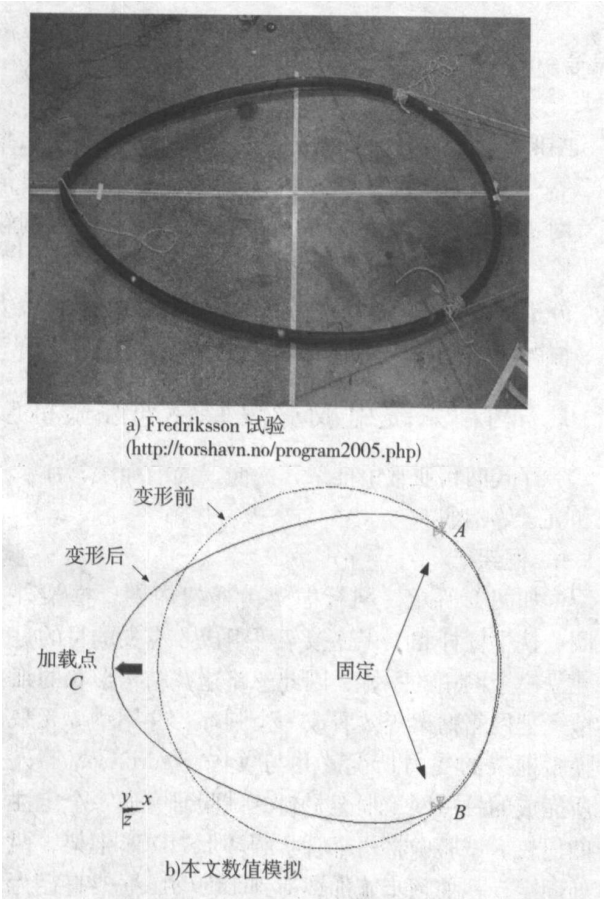


图 2 试验和有限元模拟结果比较

Fig. 2 Comparisons of experimental and FEM results

1.2 网面和缆绳

对于柔性网面结构，本文考虑的是矩形（菱形）的网目。假设每个网目的一边，都由两个杆无摩擦铰接而成，这样就可以模拟网目的松紧。如果想要更好地描述每个网目的实际变形，其实可以增加每边的中间铰接节点的数量。但这样一来，也将会极大地增加模型的未知数的个数。按 Bessonneau^[14]所述，单铰接点已经可以满足描述一般问题的需要，所以本文也是采用了这种简单有效的方式，见图 3。所有的物理节点同样也是和中间节点一样，都定义成能够转动的铰接节点。

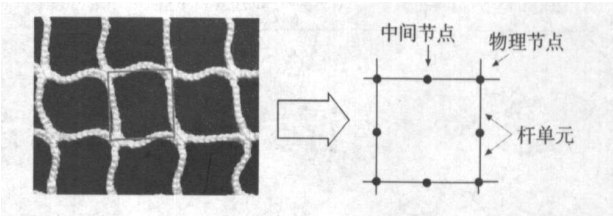


图 3 利用杆单元模拟网面

Fig 3 Modeling for the mesh using jointed truss elements

缆绳和网面的力学性能类似，但是因为缆绳较长，所以会多取一些中间节点，用更多的单元来模拟缆绳的变形和受力。

我们与 Lee^[15]一文中的一个实际模型做一个比较，这是一个 12×8 的正方形网目的矩形网面，四个角都固定，安放在空气中，在网面内 F1 点悬挂 1.5 kg 的沉子，在 F2 点悬挂 0.5 kg 的沉子，在 F3 点悬挂 0.7 kg 的沉子，见图 4。我们在数值模拟过程中采用与试验完全相同的力学、材料以及几何参数，见表 1。

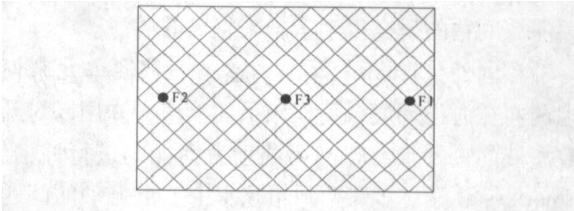


图 4 试验用的矩形网示意图

Fig 4 Schematic diagram of the net used in Lee's experiment

表 1 试验和本文数值模拟采用的参数

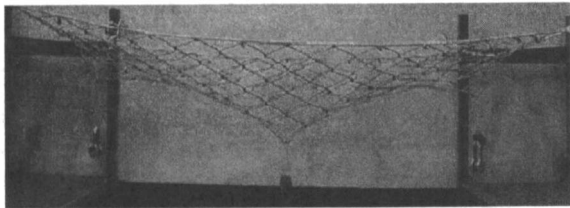
Tab.1 Parameters in this paper and Lee's experiment

杆长 /mm	直径 /mm	刚度 N/m	质量 /kg
100	0.4	15000	0.0015

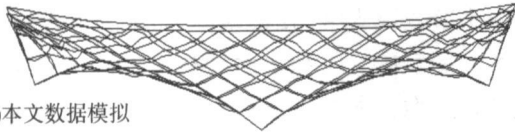
试验与数值模拟的网的变形情况比较见图 5。这个对比试验说明本文采用的模型适合于模拟渔网这样的柔性结构的运动，变形和受力规律。

1.3 锚链

锚链具有重量均匀、柔软及刚性无延长的特征，通常是作为悬链线进行研究。通常悬链线锚泊系统的锚链与海底有一端拖底的接触部分。在海流、风和波浪的作用下，锚链和海底会导致接触段产生提升或者悬垂段着底的现象。锚泊线与海底接触的部分称为着底部分，而悬垂部分成为悬链线部分，两者之交点称为着链点。由于悬链线的几何非线性，海底参数的不确定性会使海底接触问题求解困难。一直以来，对锚链与海底接触机理的试验和



(a)文[15]的试验照片



(b)本文数据模拟

图 5 网变形比较：(a)试验和 (b) 本文数值模拟

Fig 5 Comparisons of net shape

(a) Lee's experimented and (b) our simulation

数值仿真研究是吸引了众多学者的研究热点。如果不考虑悬链线的提升和着底的影响。有两种处理方式：一种是固定着链点的方法。另一种方法是采用等效水平弹簧代替着底部分的方法。

本文采用固定着链点的方法，利用索单元模拟锚链的悬链线结构，假设索单元是理想柔性的，索在弹性范围内工作，只能承受拉力而不能承受任何弯矩和压力，节点是理想无摩擦铰接点。用索单元直接模拟锚链，虽然没有考虑悬链线自重的垂度影响，但是在索单元数目比较多的情况下，计算结果仍然可以比较准确。

本文以一单索结构作为验证算例，结构的弹性模量是 $E=19\times10^9\text{ Pa}$ 截面积是 $A=0.85\text{ m}^2$ ，自重集度为 3.16 kNm^{-1} ，计算在 $P=8\,000\text{ kN}$ 作用下的载荷作用点的位移，见图 6。

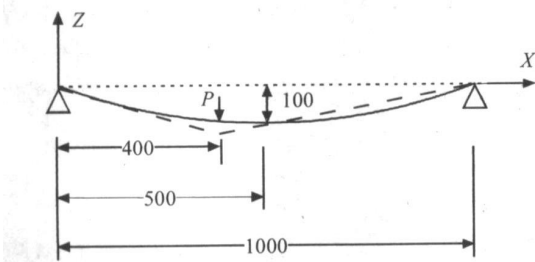


图 6 计算模型示意图

Fig. 6 Calculation model

本文采用 10 个索单元模拟该结构，表 2 给出了本文计算结果同其他研究者的比较。其中杨孟刚等^[16]是采用两个索单元。罗喜恒等^[17]是采用三个索单元计算得到。计算表明本文采用索单元模拟悬链线的方法具有一定的精度。

表 2 索在集中力作用下力作用点的位移(单位: m)

Tab. 2 Displacement of point under concentrating load /m

作用点位移	杨孟刚等 ^[16]	罗喜恒等 ^[17]	本文
Z 向位移	- 18.23	- 18.46	- 18.05
X 向位移	- 2.8	- 2.82	- 2.85

2 环境载荷分析

为了预测网箱系统的动力性质，必须准确全面地分析作用在网箱上的环境载荷。不考虑网箱各部分之间通过水为介质的相互作用，那么施加在网箱上的所有的外力可以分成重力、浮力和水动力。

2.1 浮力和重力

为了简化起见，本文所研究的网箱假设完全浸没于水中，因此网箱各部分受到的浮力和重力可以一起考虑。对于横截面是圆形的杆单元：

$$P=(\rho_f-\rho_w)\frac{\pi D^2}{4}lg\tag{1}$$

其中， ρ_f 是杆的密度， ρ_w 是水的密度， D 是杆的直径， l 是杆的长度， g 是重力加速度。

2.2 水动力

本文研究的是网箱在水流作用下的工况，在对组成网面的单元杆分析受力时，也不考虑杆之间通过水为介质的相互作用。因此作用在杆上的水动力按文[18]改进的 Morison 公式，可以写成下面三个分量：阻力 F_D ，摩擦力 F_τ 和惯性力 F_m

$$F_D=\frac{1}{2}\rho_wD C_D V_m V_m\tag{2}$$

$$F_\tau=\frac{1}{2}\rho_wD C_f V_{rc} V_{rc}\tag{3}$$

$$F_m=\rho_w\frac{\pi D^2}{4}C_m a_m+\rho_w\frac{\pi D^2}{4}la_n\tag{4}$$

其中， ρ_w 是水的密度， C_D 是阻力系数， C_f 是切向摩擦力系数， C_m 是附加质量系数， V_m 是流体相对杆的速度在杆法平面内的分量， V_{rc} 是流体相对杆的速度在平行于杆的方向上的分量，参见 Zhan^[9]。 a_m 是流体相对杆的加速度在杆法面内的分量， a_n 是流体加速度在杆的法面内的分量。本文对水力系数 C_D 和 C_f 系数的确定，采用的是一般的做法，即取某个常数。对于组成网面的杆单元，参考 Suzuki 等^[19]的研究结果，我们取为 C_D 为 1.3， C_f 为 0.1， C_m 取值 1。对于缆绳和锚链，具有相对较长的几何尺寸，因此与网面有不同的水力学性质。例如对于缆绳而言，涡引起缆绳振动消耗了水流能量，增大了缆绳的阻力系数。本文根据 Bessonneau

等^[14]的研究结果，对于缆绳和锚链采用 $C_D=1.8$ $C_f=0.02$

3 等效网面法

在实际应用中的网，有成千上万的网目，如果使用直接模拟法，现有的计算机几乎没有办法求解计算。例如 Bessonneau^[14]提到的拖网的物理节点通常超过 300 万个，如果仅在网目的一边插入一个中间节点，这样节点总数是原来的 3 倍，也即 900 万个，即杆单元总数约为 1 200 万个。所以为了能够应用到实际工程中去，我们必须做一些简化。这就是采用网目合并技术。即在满足下面 3 个条件下，原网面可以用合并后的等价网面来替代：合并之后新的网目的边长需要和合并前的网目所覆盖的面积相等；合并后网目的直径的选择要求能够保证受到的水动力与合并之前相等；合并后网的质量需要调整到与合并前网的质量相等。在上面的前提下，根据实际网面的网型是菱形还是矩形，可以采取灵活的网目合并的方案，见图 7。如对于矩形网目的情况，采用第二种合并方法，网目由 9 个减少到 1 个大的网孔，从而减少计算自由度数目。

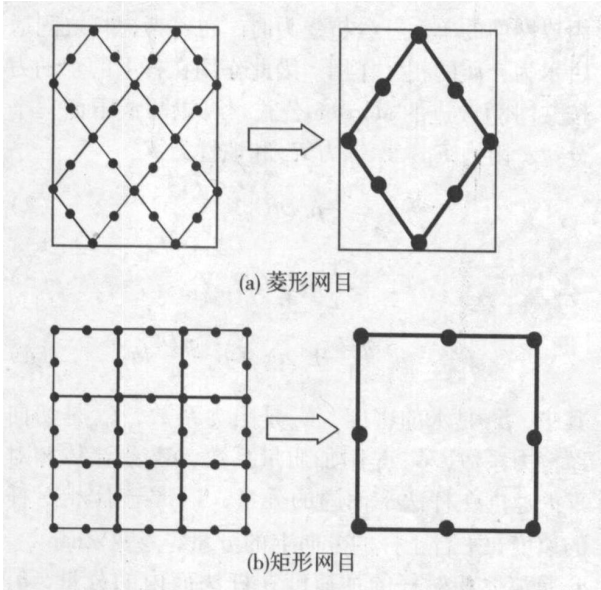


图 7 网孔合并方式
Fig. 7 Group example formeshes

4 算例描述

从工业的角度来说，网箱需要设计的能够在恶劣的环境条件下，保证网箱各部分有足够的结构强度，特别是网箱锚泊系统的稳定性和锚绳的强度。本文研究的主要内容是通过数值方法模拟了网箱在不同方向水流下的系泊系统最大拉力发生位置，并

就网面对水流的遮蔽效应问题进行了初步研究。常见的网箱锚泊形式有 3 种：一是传统的多点式锚泊，二是水面网格式锚泊，三是水下网格式锚泊。传统的多点式锚泊形式简单，但系统占地面积较大。水面网格式锚泊系统通过将多个网箱链接在一起从而使整个系统所占面积显著下降。水下网格式锚泊系统则是将网格安装在水面以下的一定深度。本文研究的是一种水面网格锚泊系统的浮式网箱的简化模型，如图 8 所示。

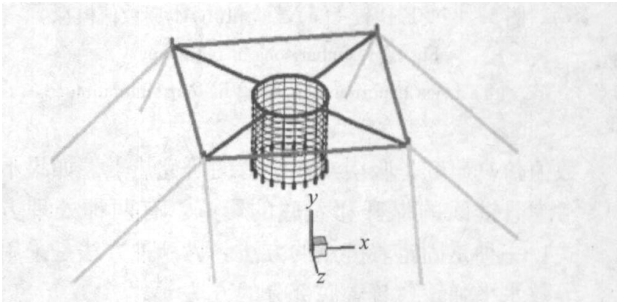


图 8 重力网箱和系泊系统的有限元模型
Fig. 8 Finite element model of floating net cage and mooring system

该模型由网面、框架、沉子、系箱绳、主绳和锚链组成。因为框架浮于水面，所以我们在有限元模型中限制了框架竖直方向的位移，亦即框架只能沿水平方向运动，本文研究的是网箱在水流中的动力行为，这个假设还是可以接受的。框架通过系箱绳绑在主绳上。主绳每个顶点各有两条锚链连接。锚链的另一头则固定在海底。主绳和锚链的着链点同样限制了竖直方向的位移。网箱的材料参数见表 3 所示。其中圆柱体网面的直径为 1.435 m，高为 1.44 m，是由两块 125 孔长 81 孔宽的矩形网面对接拼成。在有限元模型中对网面采用了 14×9 网孔合并成一个网孔的等效方法。

表 3 有限元模型使用的材料和几何参数
Tab. 3 Material and geometric properties used in the model simulation

网箱部件	网箱材料	密度 / (kg m ³)	直径 /mm	长度 /m	杨氏模量 /Pa
框架	HDPE	950	外: 8 89 内: 8 316	外径 1 435	6 67E+08
网面	nylon	1130	1. 8		2 00E+09
系箱绳	nylon	1130	12	1 819	2 00E+09
主绳	nylon	1130	14	3 588	2 00E+09
锚链	steel	7800	10	3 588	2 00E+11

图 9 和图 10 给出了在两种不同来流角度工况

下，不考虑网面对水流的遮蔽效应时，锚绳最大力发生的位置以及大小。

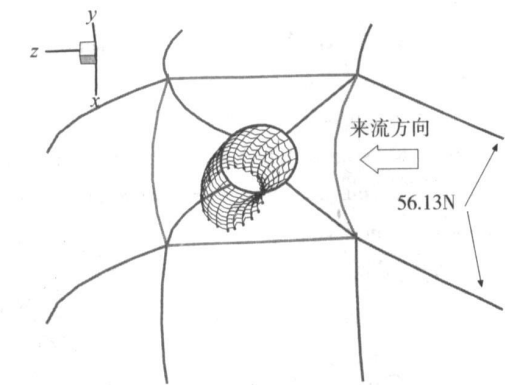


图 9 工况一下网箱系统在 0.4 m /s 水流左右下的变形及锚链最大拉力发生位置

Fig. 9 Cage system deformed shape and highest tension values in 0.4 m /s current of case 1

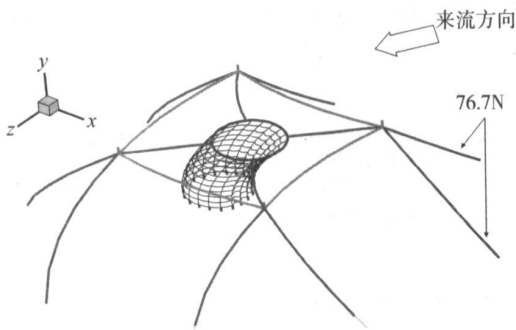


图 10 工况二下网箱系统在 0.4 m /s 水流左右下的变形及锚链最大拉力发生位置。

Fig. 10 Cage system deformed shape and highest tension values in 0.4 m /s current of case 2

根据 Lader 的试验研究，由于网面的遮蔽效应，对于密度为 0.225 的网，网箱内的水流速度减少到来流速度的 80% 左右。本文利用 Lader 的这个试验结论，考虑网对水流的遮蔽效应。

图 11 给出了工况一在没有考虑遮蔽效应和考虑了遮蔽效应的两种情况下，网箱的阻力随流速变化曲线。由图可知，随着水流速度的增大，遮蔽效应对网面阻力的影响越来越重要。因此遮蔽效应不能忽略。

5 结 语

目前我国在网箱动力分析的研究主要集中在对国外成熟的网箱研究成果的引进消化吸收上，远不能满足我国抗风浪网箱发展的需要。本文对浮式网箱以及其系泊系统建立完整的有限元模型。对于网

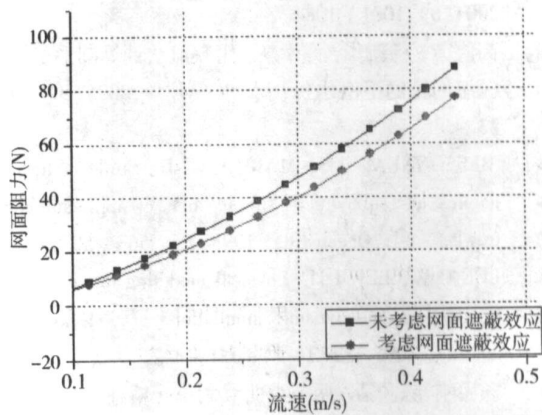


图 11 网面阻力随水流速度的变化曲线

Fig. 11 Relationship between drag force of the net pen and water velocity

箱的优化设计具有指导意义。

参考文献:

[1] TSUKROV J EROSHK N Q FREDR KSSON D W, et al Finite elem tm odeling of net panels using a consist ent net elem t[J]. Ocean Eng 2003 3Q 251 – 270

[2] FREDR KSSON D W, RISH J D. The heave response of a central spar fish cage[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2003 125(4): 242 – 248

[3] LADER P F FREDHEM A. Dynamic Behaviour of 3D Nets Exposed to Waves and Current[C] // Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE. 2001

[4] 桂福坤, 王伟霞, 张怀慧. 网箱工程发展现状及展望 [J]. 大连水产学院学报, 2002(01): 70 – 78

[5] 李玉成, 宋芳. 碟形网箱水动力特性 [C] // 2003 年度海洋工程学术会议论文集, 2003

[6] 李玉成, 宋芳, 张怀慧, 等. 拟碟形网箱水动力特性的研究[J]. 中国海洋平台, 2004 19(1): 1 – 7

[7] 李玉成, 桂福坤, 宋 芳, 等. 漂浮状态下重力式及碟型网箱锚绳受力特性的比较 [J]. 水产学报, 2005 29 (4): 570 – 573.

[8] 章守宇, 刘洪生. 飞碟型网箱的水动力学数值算法 [J]. 水产学报, 2002(06): 519 – 527.

[9] ZHAN Jiem in JIA X B LI Y S et al Analytical and experim ental investigation of drag on nets of fish cages [J]. Aquacultural Engineering 2006(35): 91 – 101.

[10] 宋伟华, 梁振林, 关长涛, 等. 方形网箱水平波浪力的迭加计算和实验验证 [J]. 海洋与湖沼, 2004 35 (3): 202 – 208

[11] 王鲁民, 黄洪亮, 王明彦. 圆形重力式网箱阻力性能研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2004 34 (4): 555 – 559.

[12] 杨新华, 高晓芳, 陈雷. 圆柱形沉浮式深海养殖网箱的受力分析 [J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版,

- 2004(6): 1081 – 1084.
- [13] 高晓芳, 杨新华, 许幸新. 用数值法计算圆形沉浮式深海网箱的下潜水深 [J]. 水产科学, 2005(9): 20 – 23.
- [14] BESSONNEAU J S, MARICHAL D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls) [J]. Ocean Eng. 1998, 25: 563 – 583.
- [15] LEE C W, LEE J H. Physical modeling for underwater flexible systems dynamic simulation [J]. Ocean Engineering, 2005, 32(3 – 4): 331 – 347.
- [16] 杨孟刚, 陈政清. 两节点曲线索单元精细分析的非线性有限元法 [J]. 工程力学, 2003, 20(1): 42 – 46.
- [17] 罗喜恒, 肖汝诚, 项海帆. 基于精确解析解的索单元 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 445 – 450.
- [18] HARITOS N D, HET. Modelling the response of cable elements in an ocean environment [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1992, 11(1): 19 – 32.
- [19] SUZUKI K, SHIMIZU T. Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets [J]. Fisheries Science, 2003, 69(4): 695 – 705.

Numerical Analysis of a Floating Net Cages System

ZHAN Jiem in, SU Wei

(Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract The dynamic behavior of the net cages in flows and current is needed to improve design and performance and reliability of such structures. A finite element model is established to analyze a simplified floating net cage and mooring system. To obtain high accuracy, the main components of the net cage system are analyzed using FEM by comparing with experimental data. Maximum tensions of the mooring system are investigated in two different current directions. In addition, shielding effects are taken into account to predict the drag force of the net cage. Numerical results show that the established numerical model is efficient and reasonable. It can be used as a CAE system for net cage design.

Key words open ocean aquaculture; flexible structure; hydrodynamics; fishing net

· 简 讯 ·

本刊荣获首届中国高校精品科技期刊奖

由教育科学技术司组织的“首届中国高校精品·优秀·特色科技期刊”及2006年高校科技期刊优秀编辑工作者、优秀编辑学论著”评比活动近日揭晓,评出精品科技期刊52种,优秀科技期刊98种,特色科技期刊100种。中山大学学报(自然科学版)被评为中国高校精品科技期刊。中国高校自然科学学报研究会、中国高校社会科学学报研究会、中国高校人文社会科学学报研究会分别在南昌市隆重召开颁奖大会,教育部、新闻出版总署有关主管部门的负责人出席了大会并向获奖单位和个人颁奖。

近年来,中山大学学报自然版更新办刊理念,深化学报改革,走跨越式发展之路。坚持办刊宗旨,狠抓论文的学术质量和编辑质量,各项办刊指标稳步提升。据中国科学技术信息研究所2006年10月公布的中国科技期刊引证报告,中山大学学报(自然科学版)总被引频次为758(扩刊版为1105),位于中国科技期刊综合类的第五位、综合类大学学报的第一位;其他指标:影响因子为0.628,他引率为0.93,基金论文比为0.98,均位于高校学报的前列。为此,中国科技信息所再次把中山大学学报自然版列入“百种中国杰出学术期刊”。

在本次评比活动中,本刊编辑部的张冰被评为高校科技期刊优秀编辑工作者;黄怡胜的论文获高校科技期刊优秀编辑学论著一等奖。

(本刊通讯员)