

文章编号:1000-0615(2007)01-0084-06

## 波流作用下圆柱形近海抗风浪网箱缆绳的张力特性

郑国富, 黄桂芳, 魏观渊, 丁兰, 朱健康

(福建省水产研究所, 福建 厦门 361012)

**摘要:**HDPE 框架圆柱形网箱是目前我国应用最广泛的抗风浪网箱养殖设施。作者以 40 m × 6 m 该种网箱为原型, 选择  $\lambda = 1/16$  和  $\lambda' = 1/3.625 \sim 1/4.333$  的尺度比制造模型, 于 2003 年 7 月在大连理工大学开展了模型试验, 研究其在纯流 ( $0 \sim 1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、纯波 (0 m, 3 m 和 6 m) 及其联合作用下的运动状态和缆绳张力特性。结果表明, 缆绳张力对台风浪的响应过程复杂, 纯波浪时呈“波群”状态, 波流联合时呈“漂移”状态, 而对季风浪响应则无此现象, 其对网箱在台风浪下的破坏作用需继续研究; 台风浪下, 张力回归方程为  $T = 95423V^2 - 42546V + 63329$  ( $R^2 = 0.8736$ ) (无底框架) 和  $T = 54161V^2 + 8613.7V + 67319$  ( $R^2 = 0.8862$ ) (带底框架); 流速从  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增到  $1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 张力增幅分别达 92.5% (无底框架) 和 61.7% (带底框架), 表明该网箱应布置在流速小于  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的海区; 在波流联合作用下, 左右缆绳张力存在一定差异, 试验中相差约 25%, 实际工况下波流分布更复杂, 张力差异更大, 建议取迎波流面两缆力和的统计最大值作为单锚及锚缆绳的允许受力值。

**关键词:** 圆柱形抗风浪网箱; 锚缆绳; 张力特性

中图分类号: S 971

文献标识码: A

## Study on the characters of tension in mooring lines of anti-stormy-wave cage with cylindrical net under the combined action of waves and currents

ZHENG Guo-fu, HUANG Gui-fang, WEI Guan-yuan, DING Lan, ZHU Jian-kang  
(Fujian Fisheries Research Institute, Xiamen 361012, China)

**Abstract:** The anti-storm-wave cages with HDPE pipe working deck and cylindrical net are the most popular in today's cages aquaculture in open ocean in China. Studying the characters of tension in their mooring lines can not only exhibit the whole hydrodynamics performance of the cage but also provide basic data for mooring design. Physical models of the cages with a perimeter of 40 m and a depth of 6 m were experimented in the State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering in Dalian University of Technology in 2003. The results showed that the response of tension to storm waves, which behaved in “wave groups” under the single action of storm waves and in “drifting” under the combined action of storm waves and currents, is complex and different from its response to seasonal winter waves which varied with the waves regularly. Effect of the response to the breakage of cage during typhoon needs further studying. The relation between statistical maximum tension, which was taken to be the average plus two standard

收稿日期: 2006-08-01

基金项目: 福建省重大科研攻关资助项目(2002N010)

作者简介: 郑国富(1964-), 男, 福建莆田人, 副研究员, 主要从事渔业设施与装备技术研究。Tel: 0592-5678552, E-mail: gfh007@

deviations, and velocities of current under the combined action of storm waves and currents is  $T = 95423V^2 - 42546V + 63329$  ( $R^2 = 0.8736$ ) (without a HDPE pipe bottom ring) and  $T = 54161V^2 + 8613.7V + 67319$  ( $R^2 = 0.8862$ ) (with a HDPE pipe bottom ring) but the ratios of tension increase were 92.5% and 61.7% respectively when speed of current increased from  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  to  $1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  which indicated that this kind of cage is only suitable for the area that current is small than  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  from the loads of mooring line point of view. The tensions in each mooring line are different in quantity and the difference was about 25% in the test because of the uneven distribution of current. It is recommended the summation of tensions of two mooring lines at incidence be taken as the load permission of single anchor and its rope since the distribution of wave and current in real situation is much more complex than that in model test.

**Key words:** cylindrical anti-storm-wave cage; mooring line; tension characters

HDPE 框架圆柱形网箱是当前我国近海抗风浪网箱养殖中应用最广泛的养殖设施,其网袋形状分为圆柱形和圆台形两种<sup>[1]</sup>,但在网衣的扩张原理上均属重力式网箱<sup>[2-3]</sup>。有关这种网箱的水力学性能,国外及我国台湾省已进行了较多的试验研究<sup>[2,4-8]</sup>,并运用有限元和网格群等数学工具开发了商业化的计算软件<sup>[9]</sup>,其计算结果的适用性关键在于选取恰当的阻力系数  $C_d$ <sup>[10]</sup>。近几年国内也开展了一些模型试验研究<sup>[10-13]</sup>,并开始建立数学模型<sup>[1,2,14]</sup>,但结果的准确性与适用性仍有待实践检验。

研究抗风浪网箱的缆绳张力特性,既能反映网箱的总体水动力性能,又能为锚泊系统设计提供技术基础,测量也简单方便。为此,作者们于 2003 年 7-8 月在大连理工大学近海海岸与工程国家重点实验室开展了 HDPE 框架圆柱形抗风浪网箱模型试验。本文报道其部份试验研究结果,旨在为圆柱形近海抗风浪网箱及其锚泊系统设计提供参考数据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 模型网箱设计与制作

模型试验按《波浪模型试验规程》(JTJ/T 234-200)<sup>[15]</sup>和《狄克逊渔具模型试验准则》<sup>[16]</sup>的有关规定进行。模型试验大尺度比为  $\lambda = 1/16$ ,小尺度比分别为  $\lambda' = 1/3.625 \sim 1/4.333$ 。

模型网箱及其对应实物网箱的主要参数如表 1 所示。

实物网和模型网的沉力配置分别为 600 kg

和 0.15 kg,网衣缩结系数均为 0.65。

模型网箱的锚缆绳使用  $\Phi 3.2 \text{ mm}$  PA 绳,长度 4.375 m(PA 绳 3.7 m,自行车气门芯橡胶管 + 花纹橡皮筋 0.7 m),对应实物网箱  $\Phi 50 \text{ mm}$  PA 绳,长度 70 m。为保证缆绳弹性相似,应用公式  $\Delta S = S \times \lambda \times [T_m / (C_p d_p^2)]^{1/3}$ <sup>[15]</sup>和《Fibre ropes for fishing gear》<sup>[17]</sup>中的有关数据,求得模型网箱缆绳变形与弹性力的关系曲线。通过测量 PA 缆绳与不同橡皮管组合的变形与拉力关系,选取拟合效果最好的组合作为模型网箱缆绳(图 1)。

### 1.2 试验水槽与测量仪器

试验水槽长 68.9 m,宽 2.0 m,高 1.8 m,实际水深 1.0 m。最大造波能力为波高 0.4 m(规则波),波周期为 0.5~5 s。波高不稳定性 <5%。最大顺向流速  $30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大逆向流速  $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。波高仪量程 0~50 cm,误差 <0.5%;流速仪测速范围 0.1、0.3、1.0 或  $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,精度 1% 或  $0.25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;测力计量程分 1 kg 和 5 kg 两种,精度均为 0.5%。

网箱模型及测量仪器在试验水槽内的布置如图 2 所示。

### 1.3 试验水文要素

试验波浪为规则波,共模拟 3 组波浪,即纯流 ( $H=0 \text{ m}$ 、 $T=0 \text{ s}$ 、 $L=0 \text{ m}$ )、冬季季风引起的冬季极限波浪 ( $H=3.5 \text{ m}$ 、 $T=6.69 \text{ s}$ 、 $L=64 \text{ m}$ ) 和目标台风引起的台风波浪 ( $H=6.4 \text{ m}$ 、 $T=9.04 \text{ s}$ 、 $L=98.3 \text{ m}$ );模拟 6 档海流流速,即  $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (纯波)和 0.25、0.5、0.75、1.0、1.25  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (波流联合作用)。

表 1 实物网箱和模型网箱参数表

Tab. 1 Parameters of the prototype and model of the cage

项目 items	实物网 prototype of cage			模型网 model of cage		
	网箱规格(m) specs of cage	制造材料 material	材料规格(mm) specs of material	网箱规格(m) specs of cage	制造材料 material	材料规格(mm) specs of material
框架周长 inner perimeter of cage frame	40	HDPE 管 HDPE pipe	$\Phi$ 250 × 22.7	2.5	PVC 管 PVC pipe	$\Phi$ 16 × 1.5
第一张网衣 first net bag	40 × 6	无节结 PA 网片 PA knotless netting	46Rtex/1.45 - 35	2.5 × 0.375	无节结 PA 网片 PA knotless netting	46Rtex/0.4 - 10
第二张网衣 second net bag	40 × 6	无节结 PA 网片 PA knotless netting	46Rtex/1.95 - 65	2.5 × 0.375	无节结 PA 网片 PA knotless netting	46Rtex/0.45 - 15
底框架 bottom frame of cage	40	HDPE 管 HDPE pipe	$\Phi$ 250 × 22.7	2.5	PVC 管 PVC pipe	$\Phi$ 16 × 1.5
沉浮控制浮筒 center buoy for submerging control	$\Phi$ 1.3 × 0.65	A3 钢 A3 steel	$\delta = 7$	$\Phi$ 0.08 × 0.04	玻璃 glass	$\delta = 3$

注:应用小浮球或小螺母调节框架及沉浮控制浮筒等构件的净浮力,保证其符合模型相似要求。

Notes: using small balls or screws to adjust the net floatation to ensure it to accord with the law for model test.

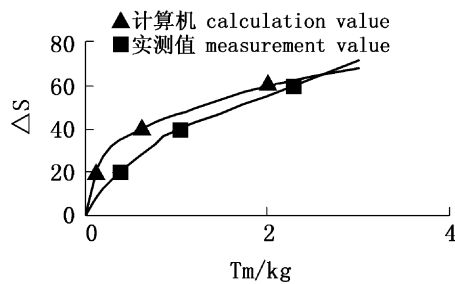


图 1 锚缆绳弹性模拟

Fig. 1 Imitating of elastic mooring line

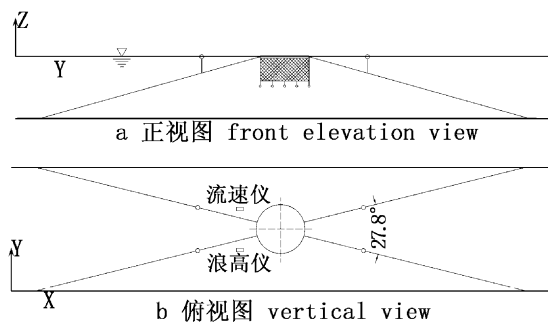


图 2 网箱模型及测量仪器在试验水槽内的布置图

Fig. 2 Disposal of model cage and measuring equipment in the flow tank

#### 1.4 数据处理

除专门研究左右缆绳张力特性外,缆绳张力均为迎流浪面左右缆绳瞬时值叠加的总缆力<sup>[13]</sup>。纯流作用下,缆绳张力用平均值表示;纯波及波流联合作用下,缆绳张力用 10 ~ 18 个波的缆力峰值平均值加 2 倍标准差表示<sup>[4]</sup>,并取最大瞬时值和平均值为参考。

应用 10 种数学模型对每种波浪要素下的缆力与流速试验值求取回归方程,取其中相关系数最大的回归方程作为缆绳张力趋势的预测依据。

## 2 试验结果

### 2.1 纯波浪作用下缆绳张力的动力响应

图 3 ~ 图 6 是缆绳张力对冬季极限波浪和台风波浪的响应过程。

纯波作用下,缆绳张力响应与波浪的波动过程基本同步,但对冬季(季风引起)极限波浪和台风波浪的响应不同。台风波浪下,张力响应出现明显“波群”,即一群波浪期间张力峰值大,另一群波浪期间张力峰值小,如此交替。表明在缆绳张力响应过程中,各波峰间还存在着一个周期更长的响应过程。说明网箱系统是一个非线性系统,除了随波浪运动外,还存在较长周期的前后运动和其他运动。

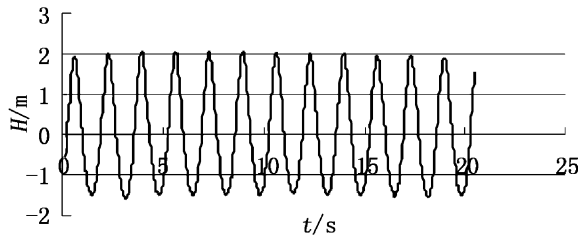


图3 无海流时的波浪( $H=3.5\text{ m}$ )  
Fig. 3 Diagram of wave process without currents( $H=3.5\text{ m}$ )

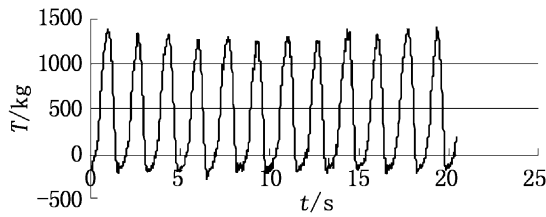


图4 无海流时缆力对波浪的响应过程( $H=3.5\text{ m}$ )  
Fig. 4 The response of tension in mooring line to waves without currents( $H=3.5\text{ m}$ )

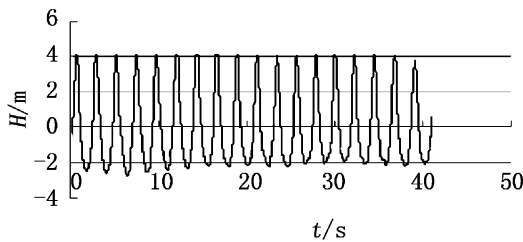


图5 无海流时的波浪( $H=6.4\text{ m}$ )  
Fig. 5 Diagram of wave process without currents( $H=6.4\text{ m}$ )

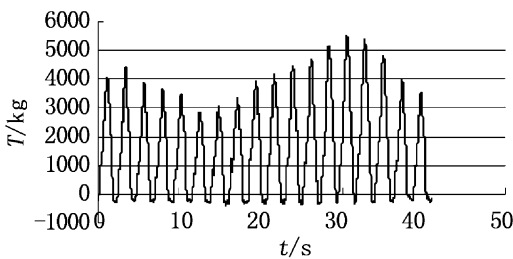


图6 无海流时缆力对波浪的响应过程( $H=6.4\text{ m}$ )  
Fig. 6 The response of tension in mooring line to waves without currents( $H=6.4\text{ m}$ )

## 2.2 波流联合作用下缆绳张力的动力响应

图7和图8是流速 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时缆绳张力对台风波浪的响应过程。

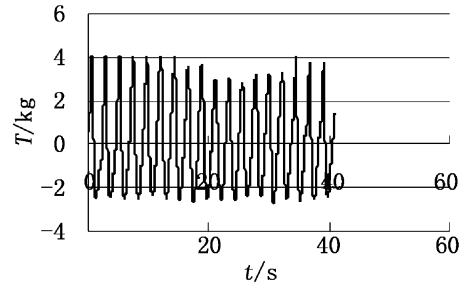


图7 流速为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时波浪过程图( $H=6.4\text{ m}$ )  
Fig. 7 Dragron of waveprocess combined with  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  current( $H=6.4\text{ m}$ )

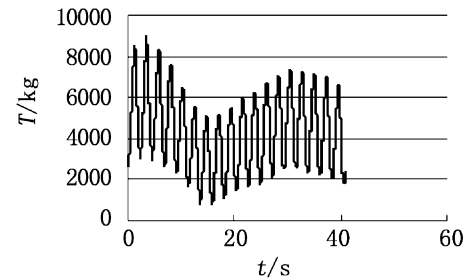


图8 流速为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时缆力对波浪响应过程( $H=6.4\text{ m}$ )  
Fig. 8 The response of tension in mooring line to waves with  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  current( $H=6.4\text{ m}$ )

存在海流时,缆绳张力的波峰和波谷间均存在周期更长的响应过程,张力响应过程呈“漂移”状态。其原因为波流联合时,波浪中水质点的运动轨迹不是闭合的,会产生一个向前的漂流速度,但量值较小,仅当波高较大(台风浪)时,才能推动网箱向前漂移,使其无法随波谷回到原位。同时,网箱锚泊系统是一非线性系统,因此,网箱除了随波前后运动外,还出现随波向前漂移的现象,此时缆力随网箱漂移而增大。当网箱漂移到一定位置(张力增大到一定值)时,锚泊系统又把网箱拉回去,进入下一个长周期运动过程,因此导致缆绳最大张力明显增加。波流同向时这种状况更加明显,也更复杂。

## 2.3 纯流作用下的缆绳张力

图9是纯流作用下网箱缆绳张力随流速变化的最优回归曲线图,其回归方程分别为:

$$\text{无底框架网箱 } T = 94.741V^{1.78} (R^2 = 0.9889)$$

$$\text{带底框架网箱 } T = 104.5V^{1.73} (R^2 = 0.9936)$$

纯流作用下,带底框架网箱网衣漂移减少缆绳张力明显高于无底框架网箱,平均增幅达34.3%。

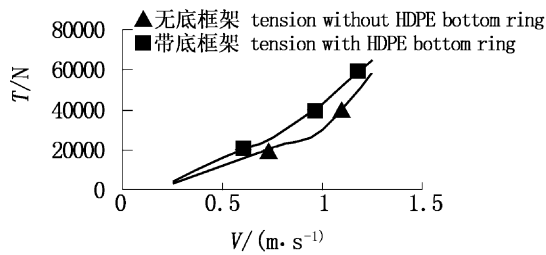


图9 纯流时缆力随流速变化曲线  
Fig.9 Relation between tension of mooring time and speeds of current without waves

2.4 波流联合作用下的缆绳张力

表2 是台风浪与不同海流组合时的缆绳张力值,其统计最大值随流速变化的回归方程分别为:

无底框架  $T = 95423V^2 - 42546V + 63329$   
( $R^2 = 0.8736$ )

带底框架  $T = 54161V^2 + 8613.7V + 67319$   
( $R^2 = 0.8862$ )

可见,带底框架网箱的缆绳张力大于无底框架网箱,平均增幅为 32.5%。在目标台风浪和  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  海流作用下,无底框架网箱的最大作用力为 90027 N,平均作用力 68042.9 N;有底框架网箱的最大作用力为 123189.6 N,平均作用力 95511.1 N。

2.5 波流联合作用下左右缆绳的受力特性比较

尽管左右缆绳张力的响应过程均与波浪同步,但由于流速不均匀及网箱横向震动等,左右缆绳张力大小存在明显差异。表3 是台风浪与  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  流速组合作用时网箱迎流浪面左右缆绳张力值及其总缆力。

表2 台风浪与不同流速组合作用时网箱缆绳张力值

Tab.2 Tension of mooring line under the combined action of typhoon waves and currents

流速 current speed ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	统计最大值(N) statistic max tension			瞬时最大值(N) peak tension in test			平均值(N) average tension in test		
	无底框网箱 cage without bottom ring	带底框网箱 cage with bottom ring	增幅(%) increasing ratio	无底框网箱 cage without bottom ring	带底框网箱 cage with bottom ring	增幅(%) increasing ratio	无底框网箱 cage without bottom ring	带底框网箱 cage with bottom ring	增幅(%) increasing ratio
0	56 382.4	64 376.8	14.2	55 032.4	61 119.3	11.1	41 485.2	42 277.2	1.9
0.25	63 559.3	69 993.1	10.1	58 397.7	63 233.5	8.3	49 176.8	50 398.3	2.5
0.5	78 841.3	100 041.5	26.9	73 351.9	99 156.1	35.2	56 726.4	78 448.2	38.3
0.75	86 349.9	106 215	23	76 235.2	92 906.9	21.9	57 947.6	91 988.5	58.7
1.0	90 027.3	107 686.1	19.6	89 984.1	103 504.3	15.0	68 042.9	95 511.1	40.4
1.25	173 283.5	174 077.2	0.5	185 556	182 478.6	-1.7	114 795.8	115 466.3	0.6

表3 台风浪与  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  流速组合作用时左右缆绳张力比较

Tab.3 Comparison of tension between left and right mooring line under the combined action of typhoon waves and  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  current

缆绳名称 name of anchor line	统计最大值(N) statistic max tension		瞬时最大值(N) peak tension in test		平均值(N) average tension in test	
	无底框网箱 cage without bottom ring	带底框网箱 cage with bottom ring	无底框网箱 cage without bottom ring	带底框网箱 cage with bottom ring	无底框网箱 cage without bottom ring	带底框网箱 cage with bottom ring
总缆力 total tension	90 027.3	106 246.5	89 984.8	103 504.4	68 042.9	78 536.4
左缆力 tension of left mooring	49 922.4	58 990.6	49 584.3	58 424.6	38 261.5	43 950.4
右缆力 tension of right mooring	40 104.9	47 445.8	40 407.1	46 952.8	30 311.4	34 690
左右缆力比 ratio of tension of left mooring to right mooring	1.25	1.24	1.23	1.24	1.26	1.27

### 3 讨论

HDPE 框架圆柱形抗风浪网箱缆绳张力对台风浪的动力响应过程与对季风浪的不同。台风浪作用下,纯波浪的动力响应过程呈“波群”现象,波流联合作用下呈“漂移”状态,表明网箱在台风浪作用下,除随波浪做同步波动外,还存在周期更大、波长更长的前后运动或“漂移”运动,其动力学过程复杂。网箱在台风浪流作用下发生的破坏是否与该动力响应特性有关,在已发表的文献中还未见报导,值得继续深入研究。

规格为 40 m × 6 m 且无底框架的 HDPE 框架圆柱形抗风浪网箱,布置在 16 m 水深海区承受波高 6.4 m (波长 98.3 m) 和  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  海流联合作用时,缆绳张力的统计最大值 90027.3 N。但当海流增大到  $1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,其统计最大值迅速增加到 173 283.5 N,增幅达 92.5%,带底框架的增幅为 61.7%,缆绳张力急剧增加。试验过程也发现,模拟缆绳弹性的橡皮筋当流速达  $1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时突然大幅伸长。因此,如果仅从网箱缆绳受力角度分析,该种网箱适宜布置在流速小于  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的海区进行养殖。

由于无法保证横断面上各点的流速均匀,加上网箱横向震动等,导致左右缆绳的张力大小不同。但应指出,实际生产中,网箱布置海区的海流分布情况远比模型试验复杂,既存在网箱断面上的流速分布不均匀,有时还存在斜向流(流向与缆绳主方向成某一角度),因此,实际生产中,各缆绳间的作用力差异将比模型试验的更大。为此,建议在设计网箱系统固泊设施时,取迎波流面的左右缆力和的统计最大值作为各单锚及锚缆绳的允许受力值。

参加本试验工作的还有大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室的俞聿修教授、李光维高工和张振平研究生等,特此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 郭根喜,贾晓平,陶启友. 作业工况与深水网箱外型主尺度设计参数的研究[C]. 深水抗风浪网箱技术研究. 北京:海洋出版社,2005:95-99.
- [2] Gary F L, Langley G. The effect of currents and waves on several classes of offshore sea cages[C]. Proceedings of an international conference. University of Hawaii Sea Grant College Program. Maui, Hawaii, 1997:131-144.
- [3] 王明彦,王鲁民,徐宝生. 离岸抗风浪网箱设施的现状与发展设想[C]. 深水抗风浪网箱技术研究. 北京:海洋出版社,2005:66-81.
- [4] Colbourne D B, Allen J H. Observations on motions and loads in aquaculture cages from full scale and model scale measurements [J]. Aquacultural Engineering, 2001, 24:129-148.
- [5] Fredriksson D W, Swift M R, Irish M R, et al. Sea cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 27:117-146.
- [6] Kim J O, Kim T H, Kook H O, et al. Study on the hydrodynamic resistance and the net shapes of submersible model sea cage by the velocity of flow [J]. Bull Nat Fish Res Dev Inst, 1998, 54:141-189.
- [7] 俞克俭. 海域箱网设计之研究[D]. 台北:国立海洋大学渔业科学所,1999.
- [8] 黄材成. 箱网锚锭系统分析[C]. 栽培渔业技术研讨会-箱网养殖与海洋牧场. 高雄:国立中山大学出版社,1998:2-29.
- [9] Gignoux H, Thompson L D, Messier R H. Computational model of aquaculture fin-fish netpens [C]. Proceedings of an international conference. University of Hawaii Sea Grant College Program. Maui, Hawaii, 1997:107-129.
- [10] 詹杰民,胡由展,赵陶,等. 渔网片水动力学性能研究[J]. 海洋工程, 2002, 20(2):49-53, 59.
- [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, 2004, 34(4):555-559.
- [12] 李玉成,桂福坤,宋芳等. 漂浮状态下重力式及碟形网箱运动及锚绳受力特性的比较[C]. 深水抗风浪网箱技术研究. 北京:海洋出版社,2005:129-136.
- [13] 林德芳,关长涛,黄滨,等. 海水养殖网箱抗风浪措施的探讨[C]. 深水抗风浪网箱技术研究. 北京:海洋出版社,2005:165-171.
- [14] 高晓芳. 圆形升降式深海养殖网箱的力学分析、建模及仿真[D]. 青岛:中国海洋大学学位论文, 2005.
- [15] 南京水利科学研究所. 波浪模型试验规程[M]. 北京:人民交通出版社,2002:28-29.
- [16] 黄锡昌. 捕捞学[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2001:111-113.
- [17] Klust G. Fibre ropes for fishing gear[M]. London: Fishing News Book Ltd., 1983.