

模块化自动升降式深海网箱设计与仿真

谭永明¹ 楼上游¹ 袁世鹏² 楚树坡² 王志勇³ 谌志新³

(1. 机械科学研究总院机科发展科技股份有限公司, 北京 100044; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266237; 3. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

摘要: 为了提高深海养殖网箱抵抗强风暴袭击的能力,同时解决在海区缺少大型工程安装设备的情况下,完成大型深海网箱的高效组装及后期部件便捷更换等问题,设计了一种模块化自动升降式智能化深海网箱。以 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 网箱为研究对象,通过理论论证、实体建模和仿真计算,系统研究了深海网箱在风暴海况时的升降状态、主要组件的受力及升降过程中平衡技术的实现。仿真分析表明,在遭遇风暴不升降时,网箱最大应力为 $2.58 \times 10^8 \text{ N/m}^2$,超出了钢材的屈服强度,在网箱降至海面以下 10 m 时,应力仅为在海面时的 13%,大幅降低了网箱的受力变形;通过多层多节智能控制能够实现网箱的平衡升降。该网箱克服了传统网箱普遍存在的抗风浪能力差、制造运输不方便、网箱容积受限、使用稳定性不足以及智能化程度低等问题,在制造成本、运输、组装、维修和使用等方面满足深海规模化养殖的需求,为复杂海况、深海大型网箱的设计提供了设计依据,为实现规模化深海养殖工程提供了合理的设计方案。

关键词: 深海网箱; 养殖设备; 数值模拟; 模块化设计

中图分类号: S967.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)11-0196-08 OSID: 

Design and Simulation of Modular Automatic Lifting Deep-sea Cage

TAN Yongming¹ LOU Shangyou¹ YUAN Shipeng² CHU Shupo² WANG Zhiyong³ CHEN Zhixin³

(1. Machine Development of Science and Technology Co., Ltd.,

China Academy of Machinery Science and Technology (CAM), Beijing 100044, China

2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

3. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

Abstract: A modularized automatic lifting type intelligent deep-sea cage was presented. The objective was to improve the deep-sea cages cultivation volume and its ability to resist strong storm attacks. The cage was facilitated a high-efficiency assembly process and a convenient replacement of old components, in particular in the absence of large-scale installation equipment. A $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ cage was taken as a research example. Based on theoretical prediction, modeling and simulation, the lifting states of cages in sea storm conditions were compared, the force and fluid analysis of the main components were carried out, and the cage's balancing during the lifting process was realized. The simulation result showed that when the cage kept its normal position near the water surface during sea storm, the highest pressure (from the storm) on the cage would be up to $2.58 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, which exceeded the yield strength of the cage's steel, leading to a cage deformation and even damage. On the other hand, when the cage was dropped to 10 m below the sea surface, the pressure would be decreased to 13% of its peak value. The lifting method can greatly reduce the forces on the cages and their deformation. The balanced lifting of the cage can be realized through multi-layer and multi-section intelligent control. This cage overcame several problems of traditional counterparts, including poor resistance to wind and wave, inconvenient production and transportation, limited cage volumes, insufficient stability in use, and low degree of intelligence. Therefore, it can meet the needs of large-scale deep-sea aquaculture in terms of production cost,

收稿日期: 2020-06-27 修回日期: 2020-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0900800)、现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-50)和威海市科技发展计划项目(2018NS05)

作者简介: 谭永明(1976—),男,博士生,主要从事海洋渔业工程及环保非标装备研究,E-mail: ymtan@qnlm.ac

通信作者: 楼上游(1960—),男,研究员,博士生导师,主要从事环保非标装备研究,E-mail: qdsheshuo@126.com

transportation, assembly, maintenance and other aspects. The research result provided a theoretical basis for the design of different demand, high-sea conditions, and large-scale deep-water cages, leading to a reasonable solution for large-scale deep-sea aquaculture projects, and showing certain values in engineering applications.

Key words: deep-sea cage; breeding equipment; numerical simulation; modular design

0 引言

从 20 世纪 80 年代起,海水网箱得到迅速发展。初期多采用结构简单、基于 HDPE 材料的圆形浮式网箱^[1]。这种小型网箱造价低、制作简单、维护方便,但受材料性能和网箱结构限制,周长一般小于 80 m,只能用于近海作业。这种普通型网箱不能实现升降、抗风暴能力差,在遭遇台风时往往受到毁灭性破坏,导致鱼类大量死亡或逃走,给养殖户造成不可弥补的损失。网箱养殖以散户个体养殖模式为主,由于养殖分散程度高、养殖方式粗放、附加值低和污染高等,导致养殖海域海水质量急剧下降,海域的自修复平衡受到破坏,造成近海的一些养殖海域短期内不再适合人工养殖。

随着国家海洋强国、走向深蓝战略的推进,海水养殖不断向经略海洋的大目标迈进,养殖方式也由以前的散户小规模走向大规模集中养殖、由浅海养殖走向深远海养殖、由简单化养殖走向科技含量更高的智能化养殖,网箱也向大型及超大型深水智能化方向发展^[2-3]。为了适应集中化大型养殖业的发展,网箱自动化技术得到快速发展。网箱开始采用计算机远程控制的投料系统,实现了自动投饵及投饵量校正^[4-8]。同时,远程海况、水温、水质监控和预警,以及自动网衣清洗、网箱自动升降起渔等配套新技术都得到研究和应用^[9]。在大型深海网箱养殖方面,挪威一直处于世界领先水平。2018 年采用挪威技术的半潜式超大型“深海智能渔场”建造完成,投入南海试用。该智能渔场由挪威和中船重工武船集团海工装备研究院设计建造,直径 110 m、高 75 m、养殖水体 $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3$,采用无人遥控养殖和鱼饲料存储与投放、活鱼捕捞、死鱼收集、网衣清洗、平台监控等多项自动化控制技术,还配备了自动发电装置,成为国内“深海养殖的航母”,极大地带动了大型和超大型深海升降网箱的发展。

近 10 年来,中国现代养殖中海产品产量占比都低于 2%,海水养殖水平显著落后。全国普通网箱有 100 余万只,其中深水网箱仅有 6 000 余只。由于缺少研发资金投入和规模化的专业研发团队等,我国深海网箱研发仍停留在初级阶段。

按照工作水层,网箱可分为 3 类:浮式网箱、沉

式网箱和升降式网箱^[10]。目前主要使用 HDPE 柔性浮式网箱。这种网箱适用于水深 15 m 左右、流速小于 1 m/s、海浪最高在 5 m 左右的半开放海区,但由于容量有限、强度差和抗风浪能力低等,阻碍其向大型化及深海方向发展。

升降式网箱智能化程度高,且成本高,但适应环境性强,操作灵活,能够最大程度地避免灾害带来的养殖损失,具有很大的市场发展潜力。对于养殖企业来说,网箱运输方便、安装灵活、维护简单快捷、抗风浪能力强、价格适宜、可靠性高、网衣变形小,而且多单元养殖降低了传染病风险,转箱和起渔也相对方便,升降可以避免台风对网箱和鱼群的破坏。但由于智能化升降网箱对使用环境要求更高,技术含量高,需求差别大,且多为非标准设计,目前没有一套合理的理论为设计提供技术路径和理论支撑,本文以模块化自动升降式深海网箱为例,阐述模块化自动升降式深海网箱设计的关键技术,为非标准网箱设计提供设计理论和方法。

1 深海网箱结构设计

模块化自动升降式深海网箱采用钢结构和气浮升降设计,从机械结构上提高网箱承载力。通过使用工程管材进行标准模块化设计,可最大程度地实现运输和拼接组装,降低网箱的材料成本、运输成本、安装费用和加工周期,通过拼接实现不同规模网箱的需求,适合深海规模化养殖^[11]。另外,深海网箱因体积庞大、离岸较远,自身具备远程观测、智能报警及自动供电等智能化功能,并配备相应的自动投喂、自动洗网和起渔分级等辅助设备。

1.1 深海网箱结构组成

为了降低制作成本和方便加工,传统网箱多采用易于热熔的 HDPE 材料,多为环形和四边形,以减少结合部位,但限制了网箱的规模和智能升级。模块化自动升降式深海网箱由浮管框架组件、网衣、浮漂、系锚绳索、渔礁锚、拉紧绳索及配重组成,如图 1 所示。

网箱的主要组成部件(浮管框架组件)采用统一长度的钢制封闭管材拼装而成,纵向立管根据体积选择多节封闭管拼接,横向浮管根据不同投影面积要求,拼接成不同等边多边形形状,如图 2 所示。

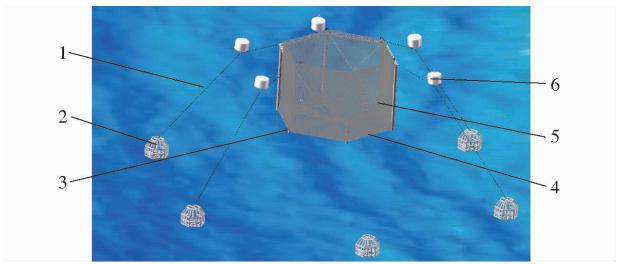


图 1 模块化自动升降式深海网箱布置图

Fig. 1 Layout of modular automatic lifting deep-sea cages

1. 系锚绳索 2. 渔礁锚 3. 浮管框架组件 4. 拉紧绳索及配重
5. 网衣 6. 浮漂

标准设计容积公式为

$$V_v = n_1 h \frac{n_2}{4} a^2 \cot \frac{\pi}{n_2} \quad (1)$$

- 式中 V_v ——网箱容积, m^3
 n_1 ——纵向立管层数, 层
 h ——立管长度, m
 n_2 ——多边形边数, 条
 a ——多边形边长, m

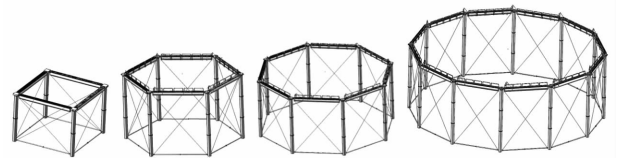


图 2 模块化自动升降式深海网箱不同拼接方案

Fig. 2 Modular automatic lifting deep-sea cage
splicing scheme

主要部件标准化可降低制作成本,也为运输和简化现场安装提供了方便,并利于后期维护。网衣可采用高密度强化塑料材质网衣或铜网衣两种,测试用塑料网衣网目边长取 75 mm,网线直径为 3 mm,拉紧锚采用混凝土渔礁锚,适用于海底为泥沙的海域。

升降深水网箱所有浮管均设有进、出口,通过充气、放气和排水、进水来增减浮力实现网箱升降,升降范围一般为海平面到海面下 10 ~ 15 m,深海网箱通常在水深 40 ~ 60 m 海域使用。不同于普通网箱,升降网箱借助浮漂张紧,并限制网箱的活动范围。网箱常规状态是横向浮筒半浮于海面,只有海况恶劣时处于下沉状态。网箱受力不仅包括风压及海浪流对线状管材框架的作用力,还包括海流对面状网衣的作用力以及渔礁锚对网箱漂动范围的限制力。网箱在海水中漂浮时,根据受力平衡原理,主要受锚绳牵引力、波浪力、风压载荷力(下沉至指定位置时值为 0)、自身重力及浮力^[12-14]。在海面漂浮状态下,网箱整体受力(极限载荷计算需要增加活载荷和地震载荷)为

$$\sum_{i=0}^n T_i + F_w + \sum_{j=0}^m W_j + F_f + W_p = 0 \quad (2)$$

- 式中 T_i ——系锚绳索牵引力, N
 F_w ——波浪力, N
 W_j ——自身重力, N
 n ——系锚绳数量, 个
 m ——重力单元数, 个
 F_f ——浮力, N
 W_p ——风压载荷, N

其中波浪力是网箱在海面上所承受的主要破坏力。刚性管材受力可分为水流冲击力和惯性力^[15],网箱需要考虑网衣单独受力,计算公式为

$$F_w = F_g + F_\omega = F_{xt} + F_{rd} + F_h + F_\omega \quad (3)$$

- 式中 F_g ——网箱框架受到的波浪力, N
 F_ω ——网衣受到的波浪力, N
 F_{rd} ——纵向立管受到的水流冲击力, N
 F_{xt} ——纵向立管受到的惯性力, N
 F_h ——横向浮管受到的水流冲击力, N

其中纵向立管受水流冲击力为

$$F_{xt} + F_{rd} = \frac{\rho_w}{2} C_D D u_x |u_x| + C_M \rho_w \frac{\pi D^2}{4} u'_x \quad (4)$$

- 式中 ρ_w ——海水密度, 取 $1.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
 C_D ——海水阻力系数
 C_M ——惯性力系数
 u_x ——管柱轴线处水质点的水平方向速度, m/s
 D ——管柱直径, m
 u'_x ——垂直于单元中线的合成加速度, m/s^2

横向浮管受水流冲击力为

$$F_h = \frac{\rho_w}{2} C_D S U |U| + C_M \rho_w V \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

- 式中 S ——垂直于横向浮管轴线上单位长度上的投影面积, m^2
 U ——垂直于浮管轴线方向的水流速度, m/s
 V ——圆管单位长度的体积, m^3
 u ——海水流速, m/s

将网衣所受波浪力换算为流体运动形成的面阻力,计算公式^[16-17]为

$$F_\omega = \frac{\rho_a}{2} C_D A_d u^2 \quad (6)$$

- 式中 A_d ——网箱在水流方向的垂直投影面积, m^2
其中风压载荷为在海平面以上的网箱所受空气负载,计算公式为

$$W_p = \frac{\rho_a}{2} v^2 A_u \quad (7)$$

- 式中 ρ_a ——空气密度, 取 1.29 kg/m^3
 v ——风速, m/s
 A_u ——受力面积, m^2

网箱所受浮力为

$$F_f = F_k + F_v = \rho_w g V_e \tag{8}$$

式中 F_k ——网箱框架所受浮力,N

F_v ——网衣所受浮力,N

g ——重力加速度,m/s²

V_e ——网箱入水总体积,m³

网箱组成部件重力和系锚绳索牵引力可以通过实测确定。

1.2 网箱升降过程受力计算

升降过程中网箱升降平衡是评价升降效果的一个重要指标,浮起和下降过程需要网箱各边保持平衡,当平衡失控时,会导致网箱倾斜甚至倾覆,箱内养殖鱼受到积压和碰撞会大量死亡。大型 HDPE 升降网箱因材质柔性大,在风浪中消波能力强,可以跟随波浪起伏^[18-19],但在升降过程中更加难以保持平衡,相对于钢架网箱,HDPE 网箱各浮筒排水不一致时,网箱倾斜现象更加明显,如图 3 所示。模块化自动升降式深海网箱使用自身的框架管替代普通网箱的浮筒,升降过程也会遇到此问题,通过进气阀、排气阀和智能气压控制阀来保持各管进气量和进气速度,实时调整保持网箱平衡升降^[20-21]。



图 3 HDPE 网箱升降倾覆现场图

Fig. 3 Lift overturning scene of HDPE cages

网箱没入海面后的升降平衡方程为

$$\sum_{j=0}^m W_j + F'_f + \sum_{i=0}^n T'_i = 0 \tag{9}$$

其中
$$F'_f = \rho_w g \left(\frac{\sum_{j=0}^m W_j}{\rho_t} + V_0 + V'_t t \right) \tag{10}$$

式中 T'_i ——重力方向的系锚绳索牵引力,N

F'_f ——网箱没入海面后的浮力,N

ρ_t ——部件密度,kg/m³

V_0 ——已有空气体积,m³

V'_t ——充气(或排气)速度,m/s

t ——充气(或排气)所用时间,s

2 深海网箱仿真分析

通过以容积 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 六边拼接框架式升降

深水网箱为例,测算在 12 级台风下不下降和下降至海平面下 10 m 时网箱的受力情况。

2.1 网箱遭遇风暴时升降状态的仿真分析

不升降时,网箱设计承载风速为 35 m/s,最大浪高 14 m,周期为 7.4 s,海面流速 1.92 m/s,网箱底部流速 1.3 m/s,重力加速度为 9.8 m/s²。在 ANSYS 中点线建模,框架选用 pipe59 单元,网线和绳索选用 link180,采用等分线网格划分,上部六角点为浮漂绳索固定点,底部网衣为水平放置,对水流阻力影响有限,且仅提供内部拉应力,可以对模型进行简化、受力加载,以及计算节点变形位移、单元应力、应变、结构弯矩^[22],如图 4~7 所示。

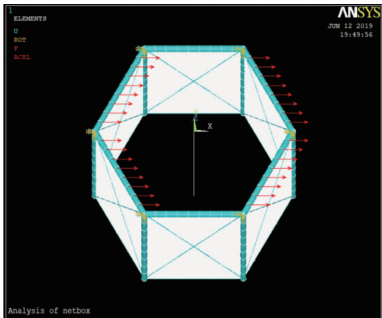


图 4 网箱建模及受力加载

Fig. 4 Cage modeling and force

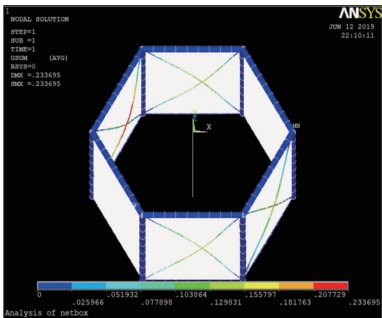


图 5 网箱节点位移等值线云图

Fig. 5 Contour diagram of displacement of nodes

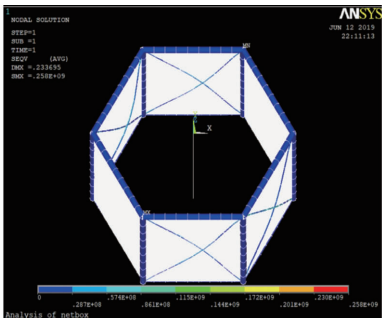


图 6 单元应变等值线云图

Fig. 6 Contour diagram of element displacement

遭遇风暴时网箱上表面下降到海面以下 10 m 处躲避风载荷和海浪冲击,只承载水流阻力。网箱上部海水流速 1.62 m/s,网箱底部海水流速 0.96 m/s,网箱节点变形位移和单元应力如图 8、9

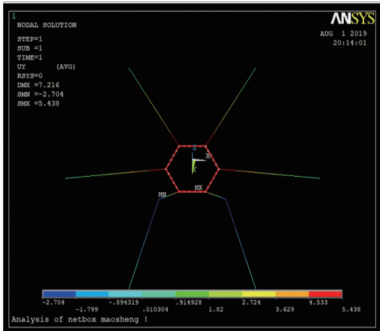


图 11 系锚绳索变形分析

Fig. 11 Anchor rope deformation analysis

自身重力^[25-26],泥沙阻力根据实际海底沉积情况测定,经测定养殖区的海底层水流流速均值为 0.52 m/s,局部水流静压力及流经渔礁的水流速度如图 12、13 所示。水流在渔礁锚内部和经过渔礁锚后的周边区域的水流静压力和流速(常值为 0.257 m/s)减少一半左右,渔礁锚起到很好的阻流作用,有利于野生鱼的生存和繁衍。

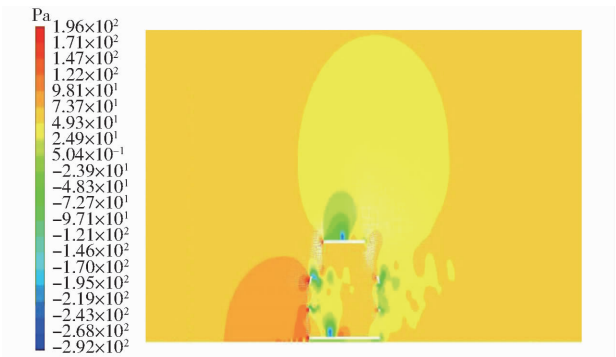


图 12 渔礁锚水流静压力

Fig. 12 Hydrostatic pressure of anchor

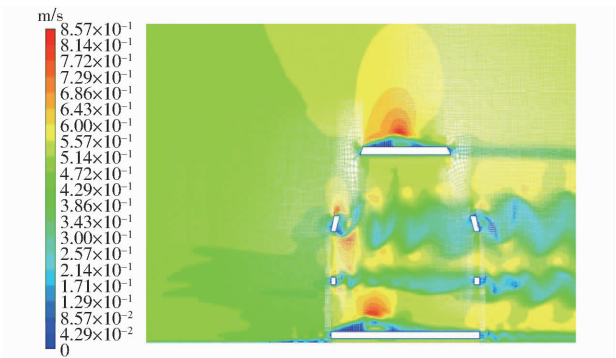


图 13 渔礁锚附近水流速度

Fig. 13 Water velocity near anchor

2.4 网箱平衡升降系统设计

网箱升降采用从动放水进水(自然进水)方式,反应速度慢,也不利于升降平衡的控制,所以标准化升降网箱采用主动进水将空气顶出的方式。通过横向浮管和纵向立管组成的浮管框架气水交换来完成网箱的升降。控制设备如果放在海水中,很容易受到海水长期腐蚀,也经常伴随海生物的附着破坏,导

致网箱需要经常在水下检查及维修,操作困难。升降网箱时将升降需要的通气装置、通水装置及平衡升降系统尽量多地设置在横向浮管上部,离开水面便于密封及维护。每层纵向立管底部设有水管,上端安装气管,水管和气管管道与水面附近的阀门连接,按照纵向立管层数和所处分网箱角度部位集中放置,并同分级控制装置组成管路系统,如图 14 所示。

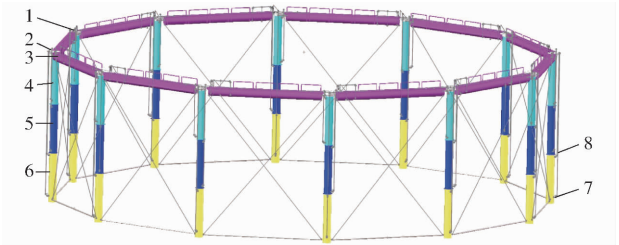


图 14 网箱分层控制布置图

Fig. 14 Cage hierarchical control layout

1. 管路接口 2. 倾角感应器 3. 横向浮管 4. 第 3 层纵向立管
5. 第 2 层纵向立管 6. 第 1 层纵向立管 7. 第 1 层水管 8. 第 1 层气管

网箱的平衡升降系统由气泵、水泵、倾角传感器、PLC 控制器、执行控制装置和管路系统组成。升降网箱采用多层多节控制,下降时依次从第 1 层开始注水放气,完成后再进行更高层注水放气,浮力减少,重心逐渐下移,更能保证网箱的平稳下降;网箱上升时次序相反,第 1 层最后进行排水充气。网箱的平衡升降系统通过不同方向的多个倾角传感器对网箱的平衡状态实时监控,将采集数据提供给 PLC 控制器,控制器将数据和预设值进行比对,对网箱升降调整提供信息,再由执行控制装置对气泵、水泵和各区域及不同管层的控制阀门发出指令,实现水气的有序交换。平衡升降控制流程如图 15 所示。



图 15 平衡升降控制流程

Fig. 15 Control process for balanced lifting

根据设计方案与仿真结果,制作自动升降式深海网箱样机,样机安装现场如图 16 所示。



图 16 模块化自动升降式深海网箱运输和安装现场图

Fig. 16 Modular automatic lifting deep-sea cage transportation and installation scene

3 结论

(1) 深海网箱趋向于大型化,其运输、安装及维护是决定网箱市场化程度的关键因素。本文设计了一种智能化、模块化、自动升降式深海网箱,通过对网箱浮管框架组件的标准化设计和采用多边形组合式实现了网箱的标准化和模块化,使网箱的设计、加工、组装及后期维护更加简单实用。

(2) 复杂海况和超强风暴是深海网箱使用所面临的重大难题。由于条件限制无法通过仪器进行实际测试验证,本文通过理论计算和仿真分析,得出升降式网箱对深海恶劣环境的适应性远高于普通固定式网箱。在 12 级台风下,不升降的网箱受力超出材

料屈服极限,而下降到海平面 10 m 以下的网箱受到的最大应力为 $3.39 \times 10^7 \text{ N/m}^2$,安全系数控制在 6.9,远大于工程设计要求的安全系数 1.4,最大变形仅为 0.036 m,网箱移动范围可控制在 5.4 m。升降网箱可以大幅度提高抵抗风暴的能力,解决了大型浮式柔性网箱承载能力差、受力变形导致容积变小、容易被台风刮走等问题。渔礁锚作为固定网箱的部件具有很好的阻流作用,同时可为生物提供宜居场所。

(3) 设计的主动水气交换的多层多节智能控制平衡升降系统为网箱稳定、可靠、快速、平衡升降提供了支撑,以多个倾角传感器检测实现网箱升降过程中的平衡控制,采用逐层改变网箱重心的方式确保网箱重心维持在低点,实现网箱平稳升降。

参 考 文 献

- [1] 黄小华,郭根喜,胡昱,等. HDPE 圆柱形网箱与圆台形网箱受力变形特性的比较[J]. 水产学报,2011,35(1):124-130. HUANG Xiaohua, GUO Genxi, HU Yu, et al. Comparison on the forces and deformation between HDPE cylinder net-cage and truncated-cone net-cage in current[J]. Journal of Fisheries of China, 2011,35(1):124-130. (in Chinese)
- [2] 闫国琦,倪小辉,莫嘉嗣,等. 深远海养殖装备技术研究现状与发展趋势[J]. 大连海洋大学学报, 2018,33(1):123-129. YAN Guoqi, NI Xiaohui, MO Jiasi, et al. Research status and development tendency of deep sea aquaculture equipments: a review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2018,33(1):123-129. (in Chinese)
- [3] 陈俊池,刘祚时,陈俊华,等. 基于 CFD 模拟的单点系泊船型网箱浮架结构分析与设计[J]. 海洋科学, 2020,44(4):116-123. CHEN Junchi, LIU Zuoshi, CHEN Junhua, et al. Structural analysis and design of single point mooring cage floating frame based on CFD simulation[J]. Marine Sciences, 2020,44(4):116-123. (in Chinese)
- [4] 胡昱,郭根喜,黄小华,等. 深水网箱养殖自动投饵计量装置设计[J]. 南方水产科学,2014,10(2):80-85. HU Yu, GUO Genxi, HUANG Xiaohua, et al. Design of metering device for deep-sea cage auto feeding system[J]. South China Fisheries Science,2014,10(2):80-85. (in Chinese)
- [5] 葛一健. 我国投饵机产品的发展与现状分析[J]. 渔业现代化,2010,37(4):63-65. GE Yijian. Analysis of development and present situation of feeding machine in China[J]. Fishery Modernization, 2010,37(4):63-65. (in Chinese)
- [6] AAS T S, OEHME M, SORENSEN M, et al. Analysis of pellet degradation of extruded high energy fish feeds with different physical qualities in a pneumatic feeding system[J]. Aquacultural Engineering, 2010,44(1):25-34.
- [7] SKOJEN K R, AAS T S, ALVER M O, et al. Intrinsic settling rate and spatial diffusion properties of extruded fish feed pellets[J]. Aquacultural Engineering, 2016,74:30-37.
- [8] 赵思琪,丁为民,赵三琴,等. 基于 EDEM-Fluent 的气动式鱼塘投饵机性能优化[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):130-139. ZHAO Siqi, DING Weimin, ZHAO Sanqin, et al. Performance analysis and optimization of pneumatic fishpond feeder based on EDEM-Fluent coupling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(9):130-139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190915&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.015. (in Chinese)
- [9] 刘晋,郭根喜. 国内外深水网箱养殖的现状[J]. 渔业现代化,2006,33(7):30-34. LIU Jin, GUO Genxi. Present situation of deep-sea cage culture at home and abroad[J]. Fishery Modernization, 2006,33(7):30-34. (in Chinese)
- [10] 袁军亭,周应祺. 深水网箱的分类和性能[J]. 上海水产大学学报, 2006,15(3):350-358. YUAN Junting, ZHOU Yingqi. Classification of offshore fish cages and their performances[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2006,15(3):350-358. (in Chinese)
- [11] FREDRIKSSON D W, SWIFT M R, BALDWIN K, et al. Open ocean aquaculture engineering: system design and physical modeling[J]. Marine Technology Society Journal, 2000,34(1):41-52.
- [12] SHAINNEE M, LEIRA B J, ELLINGSEN H, et al. Investigation of a self-submersible SPM cage system in random waves[J]. Aquacultural Engineering, 2014,58:35-44.
- [13] HUANG C C, PAN J Y. Mooring line fatigue: a risk analysis for an SPM cage system[J]. Aquacultural Engineering, 2010,42(1):8-16.
- [14] 黄小华,郭根喜,胡昱,等. 圆形网箱浮架系统的受力特性研究[J]. 南方水产,2009,5(4):36-40.

- HUANG Xiaohua, GUO Genxi, HU Yu, et al. Forces on floating circular collar of net cages subjected to waves[J]. South China Fisheries Science, 2009, 5(4): 36 – 40. (in Chinese)
- [15] 陈维杰. 超强台风下固定式平台极限承载能力分析[D]. 东营: 中国石油大学, 2010.
CHEN Weijie. Analysis on ultimate bearing capacity of fixed platforms under super typhoon[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2010. (in Chinese)
- [16] 宋伟华. 网衣波浪水动力学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
SONG Weihua. Study on the mechanics of wave forces on the netting panel[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. (in Chinese)
- [17] 刘超, 关长涛, 崔勇, 等. 圆形重力式网箱流场效应的试验研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(9): 69 – 77.
LIU Chao, GUAN Changtao, CUI Yong, et al. Experimental study on flow field effect of circular gravity net cage[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(9): 69 – 77. (in Chinese)
- [18] 郭根喜, 陶启友. 实用新型的聚乙烯塑料管网箱养鱼平台制作要点与配套设施[J]. 南方水产, 2005, 1(5): 50 – 55.
GUO Genxi, TAO Qiyu. The facture points and equipped facilities of cultivation flat roof for the new-style-applied polyethylene (PE) tube net cage[J]. South China Fisheries Science, 2005, 1(5): 50 – 55. (in Chinese)
- [19] 关长涛, 陆光炯, 林德芳, 等. 圆形网箱框架用 PE 管材的弯曲疲劳试验[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(2): 236 – 240.
GUAN Changtao, LU Guangjiong, LIN Defang, et al. Bending fatigue test on PE pipes used for circular cage floating collars[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(2): 236 – 240. (in Chinese)
- [20] 苏布拉塔·查克拉巴蒂. 海洋工程手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [21] 周晖. 海洋工程结构设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- [22] 杨进, 刘书杰, 谢仁军, 等. ANSYS 在海洋石油工程中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [23] 陈炫光, 陈俊华, 董新龙, 等. 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[J]. 宁波大学学报(理工版), 2020, 33(3): 99 – 104.
CHEN Xuanguang, CHEN Junhua, DONG Xinlong, et al. Analysis of the influence of increasing buoys on the anchoring system of ship-type cage under wave[J]. Journal of Ningbo University(NSEE), 2020, 33(3): 99 – 104. (in Chinese)
- [24] DRACH A, TSUKROV I, DECEW J, et al. Engineering procedures for design and analysis of submersible fish cages with copper netting for exposed marine environment[J]. Aquacultural Engineering, 2016, 70: 1 – 14.
- [25] 杨庆璐, 李子涵, 李洪文, 等. 基于 CFD – DEM 的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 81 – 89.
YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD – DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 81 – 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190809&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)
- [26] 高筱钧, 徐杨, 杨丽, 等. 基于 DEM – CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 92 – 100.
GAO Xiaojun, XU Yang, YANG Li, et al. Simulation and experiment of uniformity of Venturi feeding tube based on DEM – CFD coupling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 92 – 100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s013&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.013. (in Chinese)