

新型复式抗风浪养殖网箱的设计及其在海洋环境下的受力计算

石 权^{1a}, 龚雅萍^{1b}, 孙 峰², 王帅军^{1b}, 张彦鑫^{1a}, 吴 姝^{1a}, 张 迪^{1b}, 陈 辉^{1b}

1. 浙江海洋大学 a. 海洋工程装备学院, b. 船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022

2. 浙江舟山海王星蓝海开发有限公司, 浙江 舟山 316100

摘要: 深海抗风浪网箱养殖区别于传统近海网箱、围栏等养殖方式, 适合发展高经济价值的鱼类养殖, 现已成为沿海渔民转产转业的重要方向。为缓解近岸养殖压力、拓宽深海海域养殖, 基于中国海域养殖条件, 设计了一种可以应对恶劣海况条件的新型复式抗风浪深海养殖网箱。该网箱放弃了传统的浮架和浮圈结构, 采用双浮筒可调节结构, 以适应不同海域海浪状况, 减少因刚性连接而发生的拱中和下垂现象; 此外, 浮筒与立体浮框连接而成的垂荡体可以提供较大的垂荡以及纵向摇摆阻尼, 控制网箱的运动幅度。同时采用莫里森公式和伯努利方程对网箱承受的风、浪、流等环境载荷进行受力计算, 并与传统高密度聚乙烯 (High density polyethylene, HDPE) 网箱进行对比, 结果显示新型复式抗风浪网箱比传统 HDPE 网箱更能承受海洋中的环境负载。研究结果为后续研究和发展大型抗风浪网箱养殖提供了设计参考。

关键词: 深海网箱; 抗风浪; 结构设计; 载荷计算

中图分类号: S 969

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Design and force calculation of a new type of composite anti-wind and wave aquaculture net cage in marine environment

SHI Quan^{1a}, GONG Yaping^{1b}, SUN Feng², WANG Shuaijun^{1b}, ZHANG Yanxin^{1a}, WU Shu^{1a}, ZHANG Di^{1b}, CHEN Hui^{1b}

1. a. School of Ocean Engineering Equipment, b. School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China

2. Zhejiang Zhoushan Neptune Blue Ocean Development Co., Ltd., Zhoushan 316100, China

Abstract: Different from traditional offshore cages, fences and other farming methods, deep-sea wind and wave resistant cages are suitable for the development of high-economic value fish farming, having become an important way for coastal fisheries to change production. In order to relieve the pressure of offshore aquaculture and expand deep-sea aquaculture, a new type of complex wind wave-resistant deep-sea aquaculture cage was designed based on the conditions of Chinese marine aquaculture. The cage gives up the traditional structure of floating frame and floating ring, and adopts the adjustable structure of double float to adapt to different sea conditions and reduce the phenomenon of middle arch and middle sag caused by rigid connection. In addition, the pendant body connected by the float and the three-dimensional floating frame can provide large pendant and longitudinal swing damping, and control the motion amplitude of the cage. At the same time, Morrison formula and Bernoulli equation were used to calculate the force of the cage under the environmental loads such as wind, wave and current, and the results were compared with the traditional high density polyethylene (HDPE) cage. The results show that the new compound wind-wave cage can withstand the environmental loads in the ocean better than the traditional HDPE cage, which provides a design reference for the subsequent research, and development of large-scale wind-wave cage culture.

收稿日期: 2023-10-30; 修回日期: 2023-12-06

基金项目: 浙江省基础公益计划项目 (LGG21E090001)

作者简介: 石 权 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋平台。E-mail: 934346426@qq.com

通信作者: 龚雅萍 (1969—), 女, 副教授, 研究方向为机械设计与在线故障诊断、机器人运动学。E-mail: ypgong@zjou.edu.cn

Keywords: Deep sea aquaculture cages; Anti wind and wave; Structural design; Load calculation

随着现代海洋牧场建设的快速推进,发展海水养殖业已成为践行大食物观的重要举措^[1-2]。中国是世界第一大水产养殖国,2022 年中国海水养殖产量达 2 275.7 万 t,其中深水网箱养殖产量约 39.3 万 t,相较 2011 年,增长率高达 600%^[3-5]。网箱养殖已逐渐成为我国海水鱼类养殖的主要方式^[6-7]。自 1998 年海南省首次从挪威引进柔性抗风浪网箱开始,到 2002 年我国第一套拥有自主知识产权的高密度聚乙烯 (High density polyethylene, HDPE) 升降式深水网箱成功下水,以及 2018 年“德海 1 号”成功抵御 17 级超强台风“山竹”,再到集水产养殖、智慧渔业、休闲渔业、科技研发、科普教育等功能于一体的新型海洋牧场“耕海 1 号”成功运营,提高网箱装备化、智能化、生产集约化、管理信息化、环境可持续化,推进网箱养殖朝着深远海方向发展是未来海洋渔业转型升级的必然趋势^[8-12]。

在深水网箱结构受力计算方面,Yao 等^[13]基于纳维-斯托克斯方程,提出了一种用于求解流固耦合的混合体积方法,并分析了刚性和柔性网箱在不同流速下承受海流负载的情况。Li 等^[14-16]基于莫里森方程和浪的衍射和辐射理论,耦合浮架单元梁结构并模拟网衣桁架结构,分析了网箱在海流和波浪下的受力情况。Park 等^[17]通过 3 种不同直径的 HDPE 管材的浸没程度,推导出网箱浮架的阻力系数,计算了网箱浮架在流动载荷作用下的变形和应力分布。杨新华等^[18]基于绕射理论和 Morison 方程,计算了波浪力并建立运动方程,对圆柱

形浮式网箱进行受力分析并提出相应的数值计算方法。郭帅等^[19]基于势流理论和非线性运动控制方程,建立了一种重力式抗风浪网箱的数值模型,对比分析了其不同台风工况下与传统网格格式网箱系泊缆张力、浮架运动和网箱变形的情况。

为缓解近岸养殖压力、拓宽深海水域养殖,基于中国海域养殖条件,本研究设计了一种可以应对恶劣海况条件的新型复式抗风浪深海养殖网箱,与传统 HDPE 重力式网箱抗风浪结构不同,所设计的网箱创新采用了超静定抗风浪结构,以双浮筒结构取代传统的浮圈和浮架结构,并对极端海洋条件下网箱可能承受的风、浪、流等环境载荷进行计算和分析,为发展大型抗风浪养殖网箱提供了设计参考。

1 新型复式抗风浪网箱系统结构设计

1.1 主体结构设计

所设计的新型复式抗风浪养殖网箱,包括浮筒、立体浮框结构、系泊系统、网衣系统 (图 1)。与传统单中心的养殖区网箱不同,网箱养殖区域分布在一体式立体浮框两侧,通过安装在养殖区域上方的浮筒提供浮力。浮筒与立体浮框结构之间通过连接结构形成刚性连接,当网箱受到风浪冲击时,两个浮筒随着海浪波动起伏,刚性立体浮框和浮筒相连保持浮筒在海上只做上下运动,使网箱整体在浮动中平衡稳定,减少风浪对网箱的影响。对称式双网箱的设计可以有效减少因刚性连接而发生的中拱和中垂现象,防止网箱框架受损破裂。

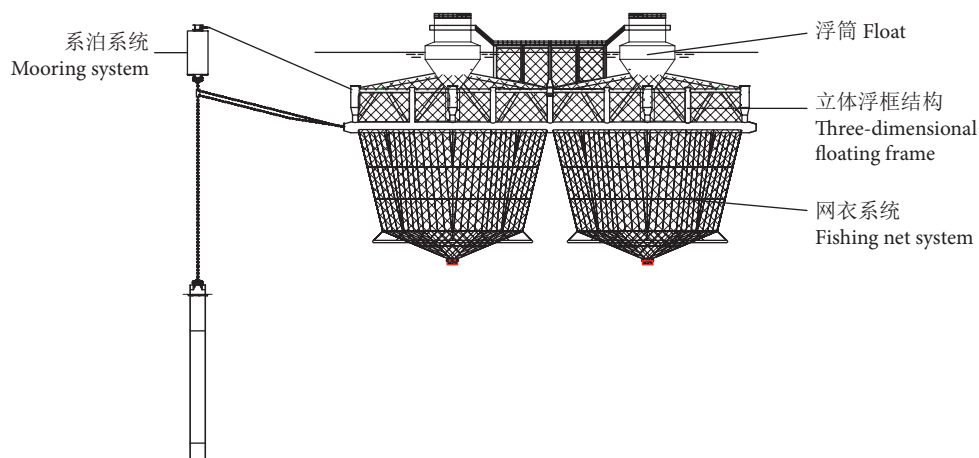


图1 新型复式网箱设计图

Fig. 1 Design drawing of new type of composite aquaculture net cage

1.2 浮筒设计

国内常见的船型、组合式网架型网箱均以浮架提供浮力^[20-22],而对依靠浮筒为网箱整体提供浮力的设计并不多见,特别是双浮筒一体式抗风浪网箱,在国内尚未见类似的报道。图2为筒形结构的浮筒,浮筒不仅为网箱提供漂浮海面的浮力,也是网箱各功能舱室设置的重要地点,从上往下依次为生活层(保证养殖工作人员的饮食起居)、机电设备区和辅助舱室(燃油舱、淡水舱)、饲料储存舱、投喂设备舱和压排载舱。浮筒采用双层壳体结构设计:外层设有金属防腐涂层,以防海水、海风侵蚀,并设有防撞层,以免遭受船舶撞击而发生破损,导致整个网箱出现结构性毁坏。底部压载区用于盛放海水,以达到调节网箱重心位置,使其始终在浮心以下,防止其倾覆。浮筒可根据作业海域的风浪状况调节距离位置,大于一个海域内出现概率多的波长,通过调整间距和压载重量分布,使得纵摇固有周期增加,避开出现概率最高的波浪周期。

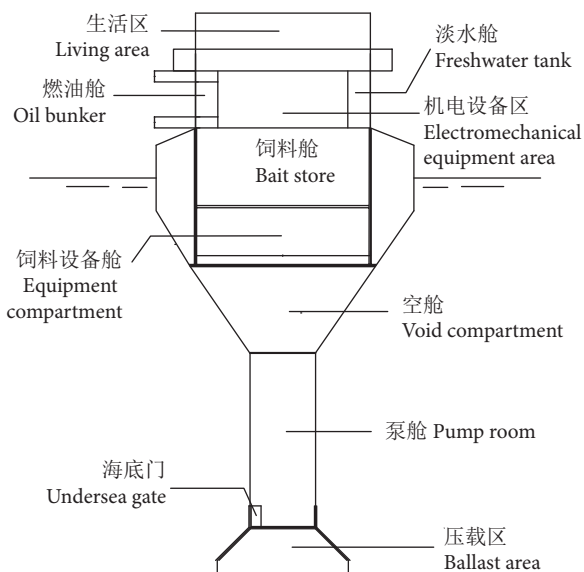


图2 浮筒功能舱设计图

Fig. 2 Design of buoy function tank

1.3 立体浮框结构设计

如图3所示,立体浮框结构由底框、立柱和顶

框组成,顶框与底框之间通过立柱连接后形成一体。底框结构由纵梁、横梁及斜撑组成(图4),3根横梁和2根纵梁一起围合出两片养殖区,双养殖区设计既可实现多元化养殖,亦可避免网衣破损后,单一养殖区鱼群全部逃逸的情况。同时,一体式立体浮框结构区别于需要连接结构的传统组合网箱,后者的连接点受浪、流载荷较大,极易发生断裂和破坏^[23],而一体式立体浮框结构则通过整体结构设计,使每根柱面受力而非点位受力,将受到的浪、流载荷分散开,从而实现抗风浪功能。

底框的材质选用HDPE浮管,HDPE材料不仅可以提供一定的浮力,有一定的抗拉性,且经济适用性好。顶框在结构设计和底框相似,由纵梁I、横梁I组成(图5)。顶框主要用于连接定位,顶框钢管应选择高密度、高强度的合金钢管,特别需要在应力集中部位设置加强结构,整体增加中央钢管的抗剪、抗弯强度^[24]。

立体浮框结构是网箱的主体结构,也是网箱设计的关键,其结构强度关系到网箱的结构安全。所设计的立体浮框结构与浮筒组合共同为网箱提供浮力,基础框架和配重一起产生向下的拉力,保证网箱在海上垂直方向上的受力平衡。

1.4 网衣设计

网衣的主要作用是固定养殖空间,限制养殖鱼群的活动范围,防止鱼群逃逸,同时也可阻挡鲨鱼等捕食。网衣系统由顶网、侧网、底网、基础框架和配重5个部分组成(图6)。网衣系统根据立体浮框形状来设计,由侧网和底网共同围合成养殖区域,侧网和底网利用基础框架相连接,通过自身和配重的重力在水下张开成固定形状。

网衣材料采用超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)材料,其分子量是普通聚乙烯(PE)的30~50倍,断裂强度约为尼龙复丝的4倍^[25]。网衣网目形状为菱形,大小为35 mm×35 mm。由于网衣在自身重力和其他外界施压力的情况下极易变形,造成网衣破损,导致养殖鱼群逃逸,并且在流速较大的情况下,如在深远海,配重系统对网箱网衣变

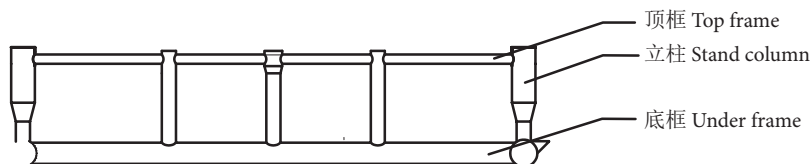


图3 立体浮框结构侧视图

Fig. 3 Side view of three-dimensional floating frame structure

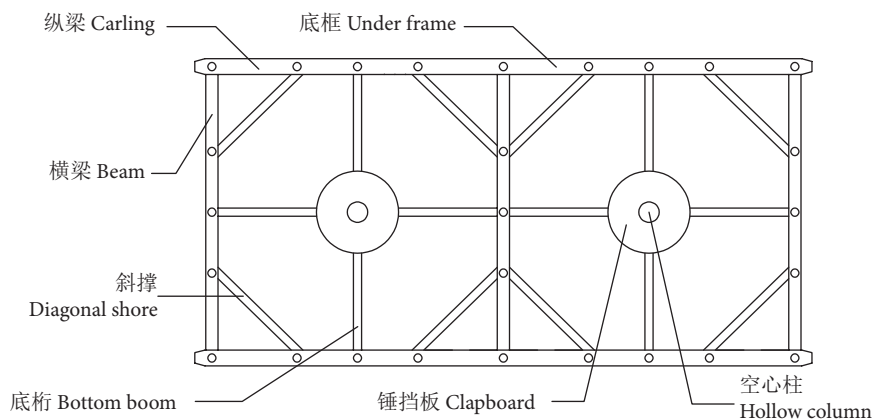


图4 立体浮框结构的仰视图

Fig. 4 Upward view of three-dimensional floating frame structure

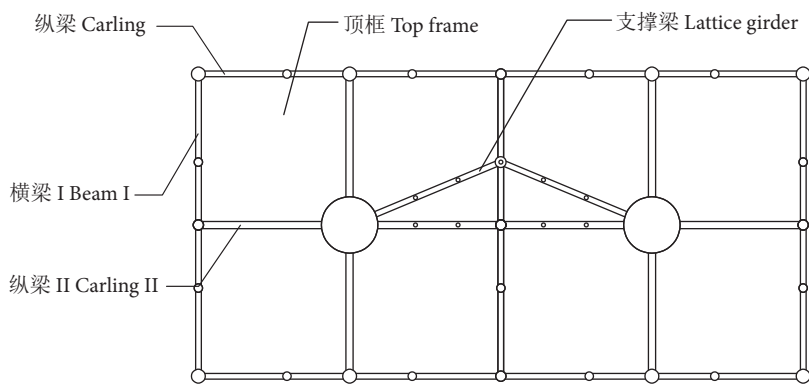


图5 立体浮框结构的俯视图

Fig. 5 Top view of three-dimensional floating frame structure

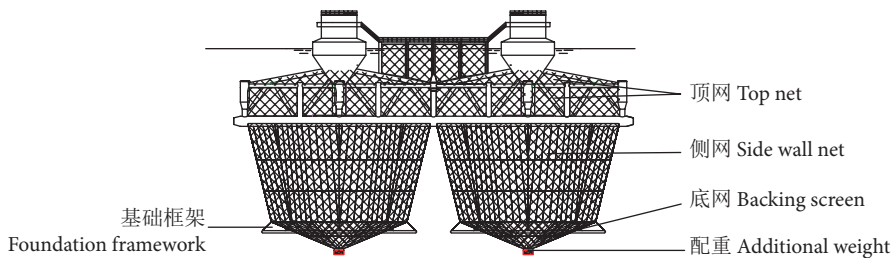


图6 网衣及配重设计图

Fig. 6 Design drawing of net and additional weight

形程度的影响较大^[26], 故需要增加配重系统, 本网箱设计配重为 2 342 kg。

1.5 网箱抗风浪结构设计

本网箱抗风浪功能实现的关键在于垂荡体和立体浮框结构连接形成的超静定结构。超静定结构是指通过浮筒下部锤挡板和空心柱组合形成的垂荡体(图 7)和立体浮框结构组成“十字形”稳定刚性连接, 为网箱垂荡及纵向摇摆运动提供较大阻尼, 实现网箱运动幅度与波浪运动形成相对“静止”和稳定。

垂荡体由浮筒、空心柱和锤挡板组成, 上半部分柱状浮筒和空心柱相连部分设计了锥形波浪缓冲

区, 上半部分空心柱与缓冲、减摇作用的锤挡板直接连接, 得益于锤挡板提供的较大垂荡以及纵向摇摆阻尼, 因此在海浪较大的情况下, 网箱运动幅度也能有效降低。

本网箱纵梁 II 结构过渡区主要有两种作用: 连接浮筒, 给浮筒提供一个斜向支撑力, 使其在风浪条件下做上下运动; 做波浪缓冲带, 能够使波浪作用在锥面上缓慢爬升释放波浪能量。与直壁结构不同的是, 波浪在直壁结构上爬升得较高(图 8), 这样会增加网箱承受的波浪载荷, 而斜向处理可以引导波浪沿斜面破碎, 从而显著降低网箱承受的波浪载荷。

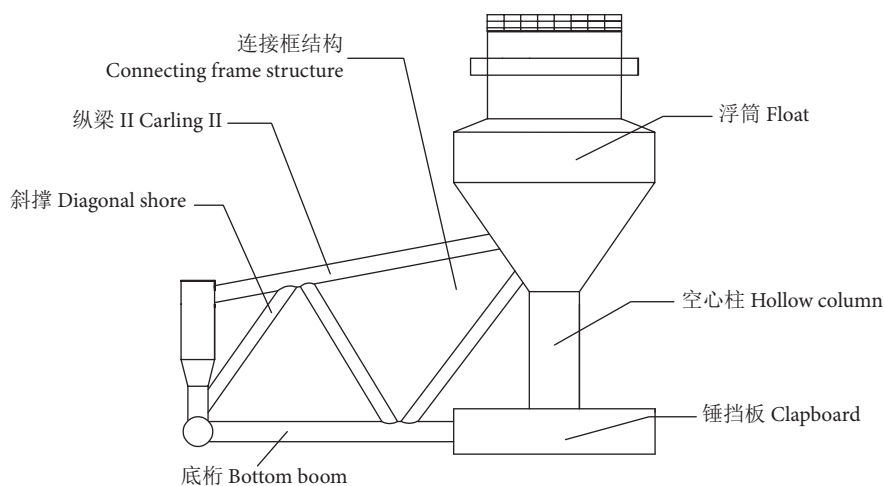


图7 垂荡体和立体浮框的连接结构

Fig. 7 Connection structure of dangling body and three-dimensional floating frame

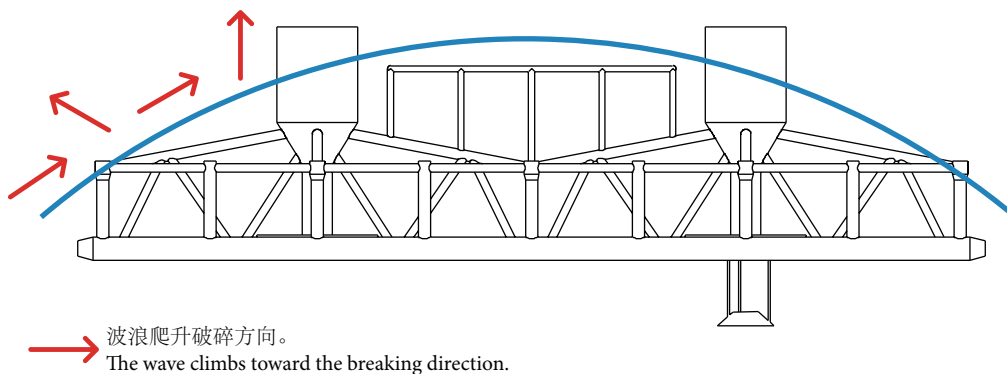


图8 直壁结构波浪爬升情况图

Fig. 8 Wave run-up of straight wall structure

2 抗风浪网箱受海洋载荷的受力计算

计算网箱环境载荷，首先要考虑网箱放置海域的自然条件状况，如海风、海浪、海流等，特别是风暴潮、台风等极端天气，易破坏网箱结构，造成养殖鱼群逃逸、网箱框架损坏等严重后果。因此，设计抗风浪网箱时，对网箱结构所承受的环境载荷进行计算十分必要。

2.1 海流环境载荷

重力式抗风浪网箱的网架结构并不会因海流作用而产生惯性力，而其网衣受水下海流阻力的影响，因此分析海流载荷时，主要是对网衣形变进行计算。鉴于网衣表面结构不规律，故不考虑水通过网目时的绕流作用，而对网线进行分割计算，进而对水阻力进行评估分析。首先明确养殖海域的水流条件：海水密度 ρ 取 $1.025 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，水流速度 v 取 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，网衣的受流面积 A 为 287 m^2 。

根据莫里森公式、流体动力的一般公式，网衣在水流中的阻力为：

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad (1)$$

式中： F_D 为阻力 (N)； C_D 为水阻力系数。

网衣受阻计算的关键在于网衣水阻力系数的选取，本文参考李玉成和桂福坤^[27] 针对网衣垂直态下水阻力系数与雷诺数关系的实验结果，在网衣形变程度一定的情况下，总体水动力估算采用正常状态下水阻力系数，网衣水阻系数与雷诺系数的关系可简化成：

$$C_D = 1.19 (R_e^\lambda)^{-u0.3\sigma} \quad (2)$$

式中： $R_e^\lambda = \frac{R_e^{d_1}}{2\alpha}$ ， R_e 为雷诺数， d_1 为网线直径， α 为网箱投影面积系数， λ 为网衣特征长度 ($500 < R_e^\lambda < 4000$)；雷诺数计算：

$$R_e = \frac{\rho v d_1}{\mu} \quad (3)$$

式中：黏性系数 $\mu = 1.01 \times 10^{-3}$ ，网线直径 $d_1 = 0.0018 \text{ m}$ ，则 $R_e = 1826.73$ ，可得水阻力系数 $C_D = 0.9088$ 。网箱受到的水阻力： $F_D = 131108 \text{ (N)} = 131.108 \text{ (kN)}$ 。

2.2 波浪环境载荷

网箱结构受波浪载荷分为网衣和浮架结构两部

分, 本文主要针对网箱主体浮架结构, 利用莫里森公式分别计算网箱横、纵向框架柱的受力。选取蒲福氏风级表中 8 级大风下的波浪参数: 波高 $H=8$ m, 水深 $D=50$ m, 周期 $T=8$ s, 波长 $L=99.5$ m。故波数 $k=2\pi\cdot L^{-1}$, 波频 $\omega=2\pi\cdot T^{-1}$, 阻力系数 $C_D=1.2$, 惯性力系数 $C_m=2$, 水流速度 $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2.1 纵向框架柱的受力计算

考虑到单个纵向框架柱所受波浪载荷包括速度力和惯性力, 先进行计算单位长度下的速度力极值:

$$f_{rd,\max}=C_D \frac{\gamma d_2 k H^2}{4} \frac{\cosh 2k(z+h)}{\sinh 2kD} \quad (4)$$

积分得:

$$F_{rd,\max}=\frac{1}{16}\gamma C_D d_2 H^2 \left(1+\frac{2kD}{\sinh 2kD}\right) \quad (5)$$

根据现有标准和设计尺寸: 附加质量系数 $\gamma=1.2$, 管直径 $d_2=0.6$ m, 则单个垂直框架圆柱上受到的速度力极值为:

$$F_{rd,\max}=\frac{1}{16}\gamma C_D d_2 H^2 \left(1+\frac{2kD}{\sinh 2kD}\right)=888.31\text{ (N)}$$

单位长度下的惯性力极值:

$$f_{xt,\max}=C_m \frac{\gamma \pi d_2^2 k H}{8} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kD} \quad (6)$$

积分得:

$$F_{xt,\max}=\frac{1}{8}\gamma d_2^2 H C_m \frac{\sinh kD}{\cosh kD} \quad (7)$$

则单个垂直框架圆柱上受到惯性力极值为:

$$F_{xt,\max}=\frac{1}{8}\gamma \pi D^2 H C_m \frac{\sinh kD}{\cosh kD}=2\,828.67\text{ (N)}$$

则单个垂直框架圆柱所受的波浪力:

$$F=F_{rd,\max}+F_{xt,\max}=888.31+2\,828.67=3\,716.98\text{ (N)}$$

所有垂直框架圆柱所受波浪力:

$$F_{\text{垂直总}}=30\times 3\,716.98=111\,509.4\text{ (kN)}$$

2.2.2 横向框架柱的受力计算

采用修改后的莫里森公式计算水平圆管上的波浪力, 即作用在单位长度上的水平圆管上的力:

$$F_h=C_M \rho v \frac{\partial U_h}{\partial t} + \frac{1}{2} C_D \rho A |W| U_h \quad (8)$$

引用线性波浪理论, 时间 t 处位置 (x,z) 的波浪方程:

$$\eta(t)=\frac{H}{2}\sin\frac{2\pi}{T}t \quad (9)$$

速度势:

$$\phi=-\frac{Ag}{\omega} \frac{\cosh k(z+D)}{\cosh kD} \sin(kx-\omega t) \quad (10)$$

水平速度:

$$u_x=\frac{Agk}{\omega} \frac{\cosh k(z+D)}{\cosh kD} \cos(kx+\omega t) \quad (11)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t}=Agk \frac{\cosh k(z+D)}{\cosh kD} \cos(kx-\omega t) \quad (12)$$

$$w=\frac{Agk}{\omega} \frac{\cosh k(z+D)}{\cosh kD} \sin(kx-\omega t) \quad (13)$$

所有水平框架圆柱所受波浪力:

$$F_{\text{水平总}}=233.314\text{ (kN)}$$

则浮架总受力为:

$$F_{\text{总}}=F_{\text{垂直总}}+F_{\text{水平总}}=344.818\,9\text{ (kN)}$$

2.3 海风环境载荷

因所设计的抗风浪网箱主体结构均在水下, 仅浮筒和穿梭走廊受到的海上风载荷, 考虑到我国频发台风海域的台风风级以及目前材料、制造水平, 极限风速取 12 级台风最大值 $37\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

对作用在网箱表面的风载荷采用伯努利方程, 计算海风作用在浮筒上的动压:

$$W_p=0.5\cdot r_u\cdot V^2 \quad (14)$$

式中: W_p 为风压 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$); r_u 为空气密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。

将空气密度 (r_u) 替换成重度 (r), 其表达式为: $r=r_u\cdot g$, 代入式 (14), 得:

$$W_p=0.5\cdot r\cdot \frac{V^2}{g} \quad (15)$$

设在海面标准大气压 $101\,325\text{ Pa}$ 、温度 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 的标准状态下, 空气重度 $r=\frac{0.012\,25}{\text{m}^3}$, 重力加速度 g 取 $9.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 代入式 (15) 得:

$$W_p=\frac{V^2}{1\,600} \quad (16)$$

由此可得网箱所受风载荷为:

$$F=V^2\cdot \frac{A}{1\,600} \quad (17)$$

式中: A 表示垂直风速方向作用下网箱的受风面积 (m^2), 而网箱阻力风向主要来源于水平风向, 故得出网箱结构的受风面积 $A=309.3\text{ (m}^2\text{)}$ 。

将深水网箱作业环境极值风速与网箱受风面积代入式 (17), 得到风荷载 $F=264.645\text{ (kN)}$ 。

2.4 环境载荷计算对比分析

根据计算结果并对比传统 HDPE 重力式网箱, 以黄小华等^[28] 针对沿海地区常用的 40~80 m 周长的深水网箱计算结果作为参考标准, 在波高 5 m、周期 8 s、流速 $0.75\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下, 周长 80 m 网箱所受的波浪力最大为 85 kN, 远小于新型复式抗风浪网箱设计承受的波浪载荷。海流载荷计算选

取聂雪军等^[29]和黄小华等^[30]对重力式网箱在水流作用下受力计算的结果作为参考标准,二者在计算时均只考虑水流对网衣的作用,在流速 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、网衣受流向面积 210 m^2 的条件下,网箱受流阻力均值为 109.4 kN ,与新型复式抗风浪网箱设计承受载荷相近。风载荷的计算则以吴常文等^[31]在舟山海区进行的 HDPE 深水网箱抗风浪试验结果作为参考标准,当风速大于 $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,周长 48 m 网箱所受风载荷最大为 21.923 kN ,远小于新型复式抗风浪网箱设计承受的风载荷。基于以上对比,可见本研究所设计的网箱相较于传统 HDPE 网箱能承受更大的风浪载荷。

3 小结

针对传统网箱结构简单,无法承受海洋中风、浪、流等环境载荷造成的压力冲击情况^[32-33],本研究基于海上实际作业工况,设计了一款面向深海养殖的复式抗风浪网箱,分别采用莫里森公式和伯努利方程对网箱承受风、浪、流等环境载荷进行受力计算并与传统 HDPE 网箱进行对比,总结如下:

1) 新型复式抗风浪网箱创新采用双浮筒的设计,能为网箱提供更大的浮力,并与立体浮框结构连接组成超静定抗风浪结构。该设计区别于传统 HDPE 网箱抗风浪结构,网箱上部承受波浪载荷的变化不明显,当网箱上部载荷变化时,整体不会出现较大倾斜而影响功能性的使用,故网箱上部位置可以储备大量物资,增大了甲板使用面积。

2) 新型复式抗风浪网箱可通过调节两浮筒的间距来改变浮筒下方垂荡体的距离,使其大于工作海域极限波长,通过垂荡体的垂荡和减摇作用,给网箱提供较大的阻尼,从而实现控制网箱运动幅度,保证网箱的结构安全。

3) 立体浮框结构是承受波浪载荷的主要载体,其特征尺度简化为横杆和纵杆,受到速度力和惯性力的叠加,在海上 8 级大风条件下所承受的极值负载约为 344.82 kN 。网箱因采用双浮筒结构,受风面积大,且选取 12 级大风极值风速,其极值负载约为 264.65 kN 。网箱承受海流载荷的计算是通过网衣水下受流阻力计算而得,其极值负载约为 131.11 kN 。在近似计算条件下,所设计的网箱承受海洋环境载荷均高于传统 HDPE 网箱,为后续研究开发与生产提供了参考。

参考文献:

- [1] 刘艳杰. 看,蓝色国土上长出一座座“粮仓”[N]. 光明日报, 2023-07-04 (5).
- [2] 王毅超,宋金龙,王书,等. 践行大食物观:以科技创新引领渔业高质量发展[J]. 中国水产, 2023(8): 32-33.
- [3] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 2023 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2023: 21.
- [4] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2012: 24.
- [5] 张文兵,解绶启,徐皓,等. 我国水产业高质量发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(4): 137-148.
- [6] SHI J C. Intelligent equipment technology for offshore cage culture [M]. Beijing: Ocean Press, 2018: 15-16.
- [7] 程世琪,石建高,袁瑞,等. 中国海水网箱的产业发展现状与未来发展方向[J]. 水产科技情报, 2022, 49(6): 369-376, 380.
- [8] 李钊宁. 海南省深水网箱养殖业发展对策研究[J]. 农村. 农业. 农民 (B 版), 2023(2): 22-24.
- [9] 闫国琦,倪小辉,莫嘉嗣. 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.
- [10] 中国政府网. 走进海洋牧场“耕海 1 号”[EB/OL]. (2021-10-18)[2023-09-15]. http://www.gov.cn/xiwen/2021-10/18/content_5643460.htm#allcontent.
- [11] 赵振营,丁金强,纪云龙,等. 现代信息技术与工程装备在海洋牧场建设中的探索实践[J]. 中国水产, 2020(4): 33-37.
- [12] 邓晓霞. 科学“牧渔”向海要粮[N]. 人民日报, 2023-11-03 (5).
- [13] YAO Y M, CHEN Y L, ZHOU H, et al. Numerical modeling of current loads on a net cage considering fluid-structure interaction[J]. J Fluids Struct, 2016, 62: 350-366.
- [14] LI L, FU S X, XU Y W, et al. Dynamic responses of floating fish cage in waves and current[J]. Ocean Engin, 2013, 72: 297-303.
- [15] LI L, FU S X, XU Y W. Nonlinear hydroelastic analysis of an aquaculture fish cage in irregular waves[J]. Mar Struc, 2013, 34: 56-73.
- [16] LI L, FU S X, LI R P. Dynamic responses of the floating cage system in current and waves[C]//Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 1: Offshore Technology. Rio de Janeiro, Brazil. July 1-6, 2012: 239-248.
- [17] PARK S, LEE J, LEE C W. Accuracy improvement of numerical simulation with the determination of drag coefficients of floating collars[J]. Aquacult Engin, 2020, 90: 102-105.
- [18] 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.
- [19] 郭帅,郭建廷,卞向前. 重力式深水网箱的抗台设计与水动力性能分析[J]. 船海工程, 2021, 50(1): 86-90.
- [20] 张松. 沉浮式船型桁架结构网箱运动响应及系泊特性数值模拟研究[D]. 大连:大连海洋大学, 2023: 22.
- [21] 袁建强. 深海网箱的结构设计及其仿真分析[D]. 烟台:烟台大学, 2021: 8-9.

- [22] KRISTIANSEN D, LADER P, JENSEN Ø, et al. Experimental study of an aquaculture net cage in waves and current[J]. *China Ocean Engin*, 2015, 29(3): 325-340.
- [23] 张婧, 孙立文, 周游, 等. 组合钢架式网箱水动力性能分析[J]. *渔业现代化*, 2022, 49(6): 27-34.
- [24] 孙树政, 李辉, MUK C O, 等. 网架式网箱浮架结构设计载荷与屈服强度分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(3): 340-347.
- [25] 钱忠敏. 我国深远海养殖网箱网衣材料现状及发展趋势浅析[J]. *中国水产*, 2023(8): 43-45.
- [26] 曹学睿, 马辉, 徐明林, 等. 柔性网衣结构变形影响因素数值模拟研究[J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2023, 53(2): 69-76.
- [27] 李玉成, 桂福坤. 平面无结节网衣水阻力系数的试验研究[J]. *海洋学报 (中文版)*, 2006, 28(5): 145-151.
- [28] 黄小华, 郭根喜, 陶启友, 等. HDPE 圆形重力式网箱受力变形特性的数值模拟[J]. *南方水产科学*, 2013, 9(5): 126-131.
- [29] 聂雪军, 张恒, 刘强, 等. 基于 SIMA 的重力式网箱阻力性能计算[J]. *水产科技情报*, 2022, 49(3): 158-163.
- [30] 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.
- [31] 吴常文, 朱爱意, 沈建林. HDPE 深水网箱抗风浪流性能的海区验证试验[J]. *海洋工程*, 2007(2): 84-90, 97.
- [32] 张平平, 李喆睿, 宋怀颖, 等. 基于 AHP 的深水网箱养殖选址指标体系研究[J]. *南方水产科学*, 2023, 19(4): 1-9.
- [33] 柴佳瑜, 顾赛文, 张兆德. 浪、流作用下大型网箱结构强度的数值模拟[J]. *船舶工程*, 2021, 43(4): 24-31, 127.