

文章编号: 1674-5566(2025)01-0176-12

DOI: 10.12024/jsou.20240804617

养殖网箱锚泊系统结构设计与性能分析研究进展

王斌¹, 王昊¹, 刘智健², 曹子良³, 杨丹杰², 王芳¹

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 河南天元装备工程股份有限公司, 河南 开封 475000; 3. 上海天泓元晟科技发展有限公司, 上海 201306)

摘要: 养殖网箱是提升海域利用效率, 促进渔业可持续发展, 提供丰富优质水产品的重要养殖装备, 锚泊系统则是保障养殖网箱安全平稳作业的关键。文章系统性地对网箱锚泊系统的结构设计、理论分析、水动力仿真和样机测试等研究现状进行了综述。归纳了养殖网箱锚泊系统的结构组成和组合形式, 对张紧式、悬链线式、单点、多点和网格式锚泊系统的性能进行了比较分析, 从锚缆张力、定位精度、承载能力、疲劳寿命、网箱运动、锚缆受力、水池实验和海洋实测等角度分别进行阐述, 并形成了养殖网箱锚泊系统的设计思路。研究成果为养殖网箱锚泊系统的设计与优化提供了理论和技术参考, 并指明了未来发展方向。

关键词: 养殖网箱; 锚泊系统; 锚泊设计; 结构优化; 水动力

中图分类号: U 675.92 文献标志码: A

随着渔业资源的衰退, 海洋渔业逐渐由捕捞业向养殖业转型^[1], 近20年来, 我国网箱养殖面积增长率达212%^[2-3]。为促进海洋渔业的可持续发展, 全球范围内积极投入养殖网箱建设, 网箱养殖成为水产养殖主要方式之一^[4]。挪威网箱建设处于国际领先地位, 近年来陆续开发了“HDPE重力式网箱”“Hexacage封闭式网箱”“Marine Donut封闭式网箱”“FjordMAX单元集成式网箱”和“iFarm网箱”等。相比而言, 国内网箱工程技术研究起步较晚, 但已取得了显著进展, 半潜式“澎湖号”和“德海1号”、全潜式“深蓝1号”、坐底式“长鲸1号”等养殖网箱已投入运营。养殖网箱作为现代海洋渔业发展的关键设施之一, 广泛应用于高密度养殖, 具有一定的经济效益, 但网箱作为刚柔复合体, 稳定性差, 在海洋环境中, 网箱不可避免地受到波浪和海流的共同作用, 进而产生复杂的组合载荷, 作用于网箱框架和网衣系统。这种载荷作用使得网箱在极端海况下容易遭受灾难性破坏。锚泊系统依靠锚缆张力限制网箱运动从而提高其定位性能, 是养殖网箱安全运行的重要保障, 合理的设计和分析是确保网箱

抵抗海洋风浪流侵袭, 免遭主体倾覆的关键。国内外在锚泊技术方面的创新研究, 融合了现代科技与环保理念, 主要集中于智能锚泊系统和可持续锚泊材料的开发。在工程实践不断深入的过程中, 涌现出“桩基-锚缆-浮式结构”、“张力腱-锚链-连接体-平台”^[5]和“共享锚泊”^[6]等新型锚泊形式。未来, 随着网箱养殖规模的持续扩大, 锚泊系统将成为提升养殖安全和可持续发展的关键因素。本研究重点关注养殖网箱锚泊系统, 从锚泊系统组成、形式及分析等方面阐述锚泊优化设计思路。同时, 提出若干建议和展望, 以推动养殖网箱锚泊系统研究的深入发展。

1 养殖网箱锚泊系统

养殖网箱锚泊设计需要综合分析网箱特性、养殖区海域环境、行业标准等因素, 同时从结构和形式方面进行设计, 以确保锚泊系统具备足够的强度和使用寿命, 并能够在复杂海洋环境中保持网箱的稳定性, 其中网箱结构对锚泊系统的影响主要体现在受力分布和稳定性上, 网箱的体积和形状影响水流作用力的分布, 进而影响锚泊系统的设计。

收稿日期: 2024-08-17 修回日期: 2024-11-08

基金项目: 国家重点研发计划(2024yfd2400200)

作者简介: 王斌(1975—), 男, 教授, 研究方向为海洋工程装备和流体仿真分析等。E-mail: b_wang@shou.edu.cn

通信作者: 王芳, E-mail: wangfang@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

1.1 锚泊系统组成

养殖网箱锚泊系统通常由锚链、钢丝绳、合成纤维缆、锚、浮筒和配重组合而成。

锚链由锚端链节、中间链节和末端链节组成,分为有横档和无横档两种形式,需能够承受更大的载荷,并延长使用寿命。

钢丝绳由若干钢丝股绕绳芯捻搓而成,常见的绳芯有纤维芯、钢股芯和独立钢丝绳芯^[7]。对于深远海养殖网箱,独立钢丝绳芯使用最多。常用的钢丝绳类型有6股、8股和螺旋股,其中6股和8股钢丝绳多用于临时锚泊,螺旋股多用于永久锚泊,且需进行套胶处理^[5]。相同破断载荷下,钢丝绳比锚链质量轻、弹性高,但生产工艺更复杂,且易缠绕。

合成纤维缆有聚酯缆(Polyester)、高模量聚

乙烯缆(HMPE)以及芳族聚酰胺缆(Aramid)。Polyester缆刚度低,极端海况下受张力较小,具有良好的轴向抗压性能,较好的比强度和抗蠕变性,应用最为广泛。HMPE缆和Aramid缆有更高的比强度和硬度,但HMPE缆存在易蠕变破断的潜在问题,Aramid缆则易发生轴向疲劳破坏^[8]。相较于钢丝绳,合成纤维缆水平恢复力更高,质量更轻;而在合成纤维缆中,Polyester缆性能最优,更适合超深海养殖网箱锚泊系统。

锚用于提供抵抗环境载荷和锚缆作用的水平和垂向抗力,可分为重力锚、桩锚、拖曳嵌入锚、吸力锚和垂向载荷锚,其性能见表1^[9]。张紧式锚泊系统中的锚需要抵抗水平载荷以及垂向载荷,悬链线式锚泊系统中的锚仅需抵抗水平载荷。

表1 不同形式锚的性能比较
Tab. 1 Performance of different anchors

锚形式 Anchor form	材料 Material	承载力 Holding capacity	海床条件 Seabed condition	说明 Description
重力锚 Dead weight anchor	钢、混凝土 Steel, concrete	自重 Self-weight	适于中等硬度和硬质土 Suitable for medium-hard and hard soil	安装简单 Easy to install
桩锚 Pile anchor	钢、木柱 Steel, wooden pile	锚侧与底质的摩擦力、侧向底质阻力 Friction force between anchor side and seabed, lateral resistance against seabed	适于硬质土和沙石 Suitable for hard soil and gravel	适合深海 Suitable for deep sea
拖曳嵌入锚 Drag embedment anchor	钢、铝合金、复合材料 Steel, aluminum alloy, composite material	锚前与底质的摩擦力 Friction force between anchor front and seabed	适于软质土、硬质土和砂土 Suitable for soft soil, hard soil and sand	能抵抗大的水平载荷 Can withstand large horizontal loads
吸力锚 Suction anchor	钢、复合材料 Steel, composite material	锚侧与底质的摩擦力、侧向底质阻力 Friction force between anchor side and seabed, lateral resistance against seabed	不适于疏松的沙土和硬质土 Not suitable for loose sand and hard soil	安装高效,可重复使用 High efficiency for installation, can be reused
垂向载荷锚 Vertical load anchor	钢 Steel	锚前与底质的摩擦力 Friction force between anchor front and seabed	适于软质土、淤泥、沙土 Suitable for soft soil, mud, sand	适合深海 Suitable for deep sea

浮筒可以减小锚缆上的张力^[10],浮筒位置下移导致悬链线提供的顶端水平张力线性下降^[11]。浮筒距离锚泊点越远以及浮筒直径越大越会降低锚泊系统刚度,浮筒直径增大到一定程度会增加锚泊系统阻尼^[12]。串联式浮筒会降低锚泊阻尼的作用,显著提高网箱的低频漂移运动^[13]。

配重的作用为提高锚泊系统恢复力,减少养

殖网箱的偏移量,配重通常安装在锚缆触地点附近的锚链上^[5],浮筒与配重的结合可显著提升网箱锚泊系统的稳定性^[10]。

常见的锚缆组合有“锚链-锚”、“钢丝绳-锚链-锚”和“合成纤维缆-锚”,其中:“合成纤维缆-锚”组合不宜增加配重和浮筒;“锚链-锚”组合不宜增加浮筒。7种不同锚缆组合如图1所示。

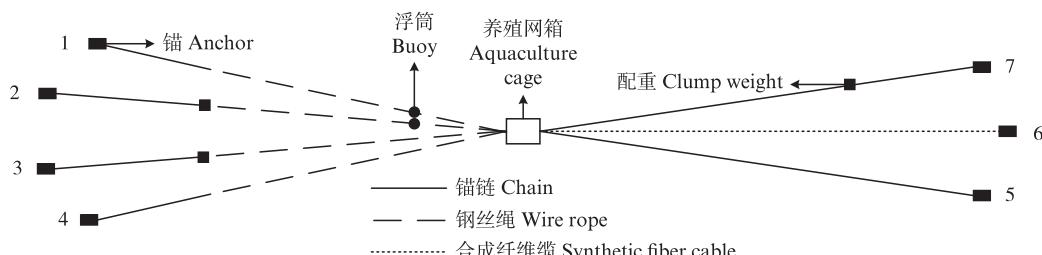


图1 养殖网箱锚泊系统组合
Fig. 1 Combination of aquaculture cage mooring system

1.2 锚泊系统形式

养殖网箱锚泊系统有两种分类方式:(1)根据锚缆张紧程度分为张紧式锚泊系统和悬链线式锚泊系统;(2)根据锚缆与网箱接触点个数不同分为单点锚泊系统和多点锚泊系统。

1.2.1 张紧式和悬链线式锚泊系统

张紧式锚泊系统的锚缆(常为合成纤维缆)保持绷直状态并以一定角度到达海底,锚缆不接触海床,如图2所示。张紧式锚泊可给网箱提供足够的张力,并保持网箱稳定,但是张紧式锚泊系统的锚需承受非常大的垂向载荷。

悬链线式锚泊系统的锚缆形态接近于钟摆,常在海床上铺有一段锚链,如图2所示。在恶劣海况下,可通过加长拖底段锚链以提高网箱的安全性。常采用链绳等混合锚泊方式,减少锚缆顶端张力,维持养殖网箱的稳定性。但随着水深的增加,锚缆重量以及导缆孔处张力倾角 θ 变大,悬链线式锚泊系统的有效性会显著降低。

锚点位置根据 R/D ^[14](R 为锚泊半径, D 为水深,图2)和锚泊系统布链方式确定,悬链线式通常比张紧式锚泊系统需要更大的 R/D 。选择悬链线式和张紧式锚泊系统需要综合考虑环境条件、网箱状况等,各自性能见表2。

锚点位置根据 R/D ^[14](R 为锚泊半径, D 为水深,图2)和锚泊系统布链方式确定,悬链线式通常比张紧式锚泊系统需要更大的 R/D 。选择悬链线式和张紧式锚泊系统需要综合考虑环境条件、网箱状况等,各自性能见表2。

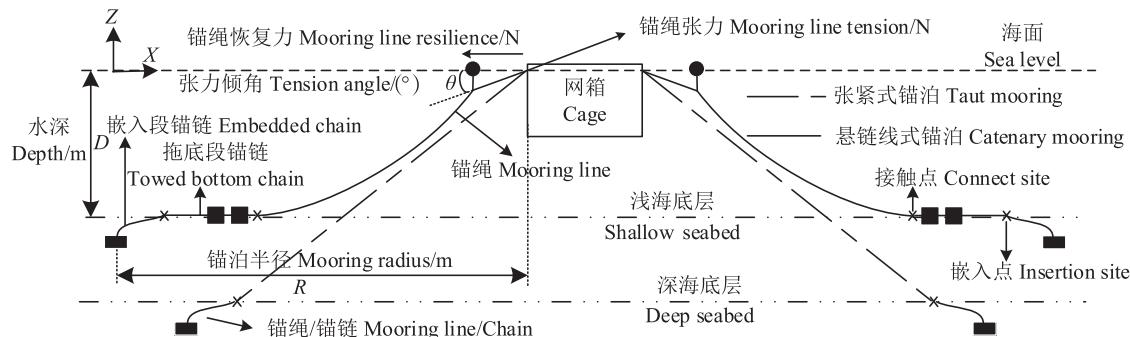


图2 张紧式与悬链线式锚泊系统
Fig. 2 Taut mooring system and catenary mooring system

表2 张紧式和悬链线式锚泊系统性能比较
Tab. 2 Performance of taut and catenary mooring systems

锚泊方式 Mooring pattern	海洋环境 Marine environment	安装成本 Installation cost	恢复力 Resilience	R/D
张紧式锚泊 Taut mooring	深海	低	锚缆弹性伸长	1.3~1.5
悬链线式锚泊 Catenary mooring	浅海	高	锚缆重力	2.0~3.0

1.2.2 单点和多点锚泊系统

单点锚泊系统(Single-point mooring, SPM)的锚缆与网箱只有一个接触点。SPM系统有如下优势:能较好响应波浪和水流的变化,网箱在随动过程中将调整到最佳位置,有助于减小锚泊系统承受的环境载荷;成本低,较多点锚泊可以减少一半以上开销^[15];SPM网箱活动区域广,可大幅减少鱼饵残料、鱼排泄物等废弃物的集中分布。但SPM系统具有如下固有缺陷:缺乏锚泊冗余度,导致在选择锚和锚缆时须增大安全系数;相对运动大且稳定性差,增加了因摩擦造成损害的可能性;易导致施加到锚上的张力方向发生周

期性变化^[16]。

多点锚泊系统(Multiple-points mooring, MPM)的锚缆与网箱有多个接触点。MPM系统具有以下优势:稳定性和抗风浪能力强,可有效降低网箱倾覆风险;MPM网箱所受的锚绳力比SPM网箱所受锚绳力少1.5倍^[17]。MPM劣势如下:MPM网箱活动范围固定,常年大规模高密度养殖易造成鱼饵残料、鱼排泄物等废弃物集中,形成局部海洋环境污染,不利于优质水产品养殖;MPM网箱需经精确调整以使每个锚所受荷载相当,安装工艺复杂^[18]。表3比较了单点锚泊和多点锚泊系统性能。

表3 单点和多点锚泊系统性能
Tab. 3 Performance of single-point and multi-points mooring systems

锚泊方式 Mooring pattern	浪流载荷 Wave current load	安装 Installation	成本 Cost	安全性 Security	适用网箱 Applicable cage
单点锚泊 Single-point mooring	复杂	简单	低	差	船型网箱
多点锚泊 Multiple-points mooring	简单	复杂	高	优	其他网箱

MPM 养殖网箱的布链方式有八字型、交叉型、人字型和平行型,均为对称布置,如图3所示^[18]。梁家铭等^[19]研究发现:八字型锚泊方式时网箱运动响应均衡,综合性能最好;考虑网箱纵荡或纵摇运动时,使用平行型布链方式,此时锚

链提供的恢复力矩大,网箱更稳定;当以垂荡运动为主要考虑因素时,采用人字型布链方式;当以回转或横荡运动为首要考虑因素时,采用交叉型布链方式。综合考虑回转和横摇运动,采用交叉型布链方式^[20]。

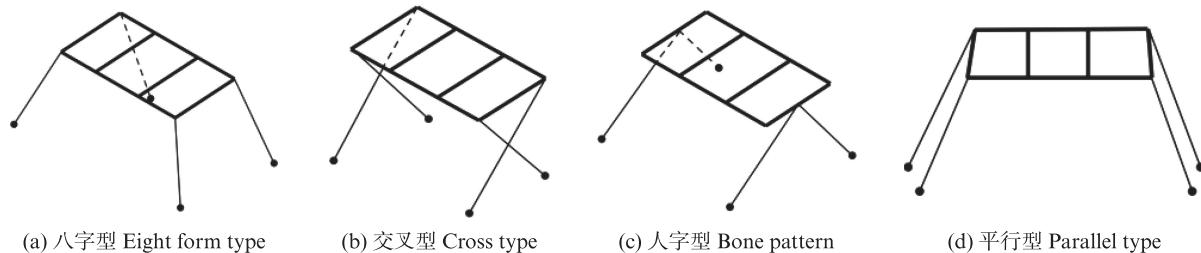


图3 多点锚泊不同布链方式

Fig. 3 Different chain laying methods for multiple-points mooring

1.2.3 网格式锚泊系统

网格式锚泊系统通过网状布置锚缆和锚点来支撑和稳定网箱(图4),对锚泊位置要求苛刻,定位安装时常需潜水人员协助。单点和多点锚

泊仅适用于单个网箱的锚泊,多网箱串联通常采用网格式锚泊系统。网格式锚泊包括水面网格式锚泊和水下网格式锚泊两种形式,其中水下网格式锚泊在我国沿海应用更多^[21]。

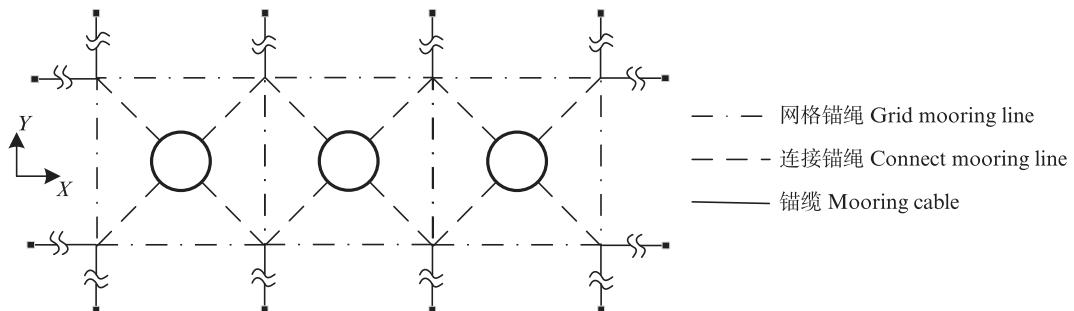


图4 养殖网箱阵列锚系分布

Fig. 4 Mooring system distribution of cage arrays

2 锚泊系统理论分析

2.1 锚泊系统设计准则

2.1.1 张力要求

锚泊缆的张力以最大张力的安全系数作为衡量标准,即锚泊缆所承受的最大张力占其破断强度(Minimum breaking strength, MBS)的百分比。表4详细列出了锚泊缆在完整和破损条件下

锚缆张力及安全系数标准^[22],其中:“完整条件”指锚泊缆完好无损的状态;“破损条件”指生存工况下最大张力锚泊缆破断后,使养殖网箱稳定于平衡位置的状态。

2.1.2 定位要求

养殖网箱的偏移主要考虑两个方面:平均位移和最大位移^[23]。平均位移反映了网箱在特定时间段内的整体移动趋势,而最大位移则表示网

箱在最不利条件下的极端移动情况。为了防止养殖网箱的旋转和倾覆,其位移必须严格限制在一定范围内,以确保其稳定性和安全性。

表4 锚泊缆张力及安全系数标准
Tab. 4 Tension limits and safety factors

状态 State	完整 Intact	破损 Damaged		
分析方法 Analysis method	准静态 Quasi-static	动态 Dynamic	准静态 Quasi-static	动态 Dynamic
极限张力(%MBS) Tension limit(Percent of MBS)	50	60	70	80
安全系数 Factor of safety	2.00	1.67	1.43	1.25

2.2 锚泊系统结构强度校核

2.2.1 承载要求

锚绳极限承载力计算公式如下^[24]:

$$[\sigma_m] = \frac{\sigma_m}{S_m} \quad (1)$$

式中: $[\sigma_m]$ 为锚绳极限承载力, MPa; σ_m 为锚绳破断强力, MPa; S_m 为锚绳破断强力安全系数(完整工况下取2.47, 破损工况下取1.73)。

2.2.2 疲劳寿命要求

锚泊系统长期受到周期载荷作用后会导致损伤和破断, 导致锚泊系统疲劳的原因有:(1)反复加卸载引起的周期疲劳^[25];(2)纤维长度的逐渐变化引起的静态疲劳;(3)较高张力和频繁负载循环产生滞后加热;(4)锚缆因屈曲产生轴向压缩^[26]。

对养殖网箱锚泊系统进行疲劳分析是检测锚泊系统的关键步骤, 锚泊系统有限寿命的估算可以用 Palmgren-Miner 线性疲劳累积损伤理论

计算^[27], 理论认为部分疲劳损伤可以线性相加。根据 Miner 法则^[28], 累计疲劳损伤如式(2)所示:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

式中: D 为累计疲劳损伤, $D = 1$ 时结构发生疲劳破坏; n 为应力范围级数; n_i 为该应力范围内荷载实际循环次数,cycles; N_i 为该应力范围内达到疲劳破坏所需的荷载循环次数,cycles; n_i/N_i 称为循环比。

锚泊系统疲劳寿命设计值为 $1/D$, 应高于安全系数乘现场使用年限。相比于强度设计准则, 疲劳设计准则需选取更大的安全系数, 以应对更多的不确定因素。HUANG 等^[26]建议安全系数至少选取1.5, 并且10年为周期更换锚缆以防止疲劳失效。

3 锚泊系统水动力分析

3.1 网箱运动对锚泊系统作用力

水动力学分析是评估锚泊系统安全性和稳定性的重要方法, 通过锚泊状态下养殖网箱运动和数值模拟可分析网箱锚泊状态下的运动响应以及锚缆张力, 检测网箱在恶劣海洋环境下的稳定性。

养殖网箱的稳定性与养殖存活率有着不可分割的关系。波浪场中的网箱具有6个自由度^[29], 沿3根坐标轴的平动: 横荡、纵荡、升沉; 绕3根坐标轴的转动: 横摇、纵摇、回转, 如图5所示。

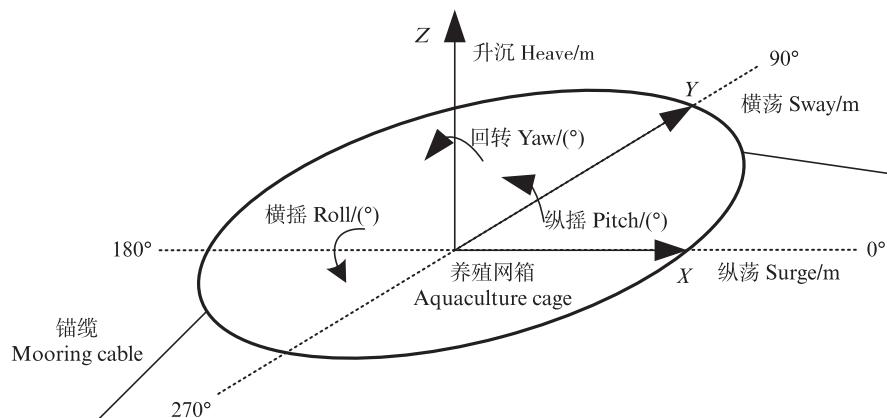


图5 养殖网箱6自由度
Fig. 5 Six degrees of freedom of aquaculture cage

养殖网箱受到黏性阻尼、风阻尼、波浪漂移阻尼、海流拖曳阻尼、兴波阻尼和锚泊阻尼等的

共同作用, 其中锚泊阻尼最大, 可达网箱系统总阻尼的80%^[30]。锚泊阻尼随着锚缆顶端激励幅

值的增大而线性增大^[31],主要影响网箱的低频运动^[32]。因此,锚泊系统是关系到养殖网箱安全的关键之一。

单点锚泊网箱仅表现出纵荡、升沉和纵摇运动,当锚泊系统失效后,网箱将产生额外的横荡、回转和横摇运动,最终达到具有更大、更强振动特性的新平衡状态^[33]。多点锚泊网箱锚系失效对网箱主体稳定性的影响相对复杂:(1)当锚缆锚固端破断时,缆重和水阻力会限制网箱倾覆;(2)当锚缆上端破断时,网箱主体会产生较大倾角甚至倾覆;(3)当仅剩一根锚缆时,网箱可能发生风标效应^[34]。波浪入射角不同主要影响纵荡和横荡运动,对回转运动影响较小^[35]。单点锚泊和多点锚泊对网箱浮架升沉运动影响不大,多点锚泊会减小网箱浮架横摇运动以及增大浮架的纵荡运动^[36]。网箱增加网衣后其锚泊受力会大幅增加^[37],网衣主要影响平台的纵摇运动^[38]。

3.2 锚泊受力数值模拟

数值模拟可用于分析复杂海况下锚绳张力,对评估锚泊系统的合理性进行分析和结构优化,不仅提高了网箱锚泊系统的耐受性和可靠性,而且可避免锚缆强度过大造成的浪费。国内外学者通过数值模拟,发现了锚绳张力的规律如下:锚绳张力与水深成反比^[39-40],锚绳最大张力与波高和波周期成正比^[41],不规则波情况下最大锚绳张力约为规则波条件下的1.5倍^[42],海流流速对锚绳张力影响最大^[43]。刚度较大的锚泊系统会导致锚绳张力增大^[44],锚绳斜率对锚绳极限张力影响较小,主要影响网箱下沉深度^[45]。框架前置会导致网箱系统的锚绳力增加,但是可以显著改善网衣的变形^[46]。

BERSTAD等^[47]使用Aqua Sim进行网箱水动力数值模拟,并通过物理模型对数值模型进行试验,对比了规则波和不规则波下网箱和锚绳的动力响应,发现将不规则波浪有效波高的1.9倍作为规则波浪的波高所设计的网箱有较大的安全余量。刘春宏等^[48]对仅网衣作用、仅鱼类作用及网衣和鱼类共同作用3种情况下网箱周围流场进行数值模拟,发现3种情况下最大流速衰减分别为6%、80%和85%。

3.3 水池实验

养殖网箱水池实验前需要保证模型和原型之间正确的相似关系。试验设计应同时满足

Froude相似和Strouhal相似准则,网箱模型和原型的相似条件包含几何相似、运动相似、动力相似^[24]。养殖网箱水池实验需满足:(1)网箱与试验水池壁的间距应不小于3倍网箱直径;(2)设备能产生平稳波形和水流,WANG等^[49]推荐浪流同向作为考核工况;(3)压力传感器、加速度传感器、力传感器等的自振频率大于被测参数最高频率的4倍;(4)数据采集器的采样频率范围为50~100 Hz;(5)传感器布置不破坏波形和流场;(6)测量锚链和锚绳拉力的仪器布置在靠近网箱的一端,且模型上的锚点位置需与原型保持一致^[50]。

陈炫光^[12]依据Froude相似准则,设计缩比尺为1:10的船型网箱物理模型,对船型网箱锚泊系统在波流作用下的锚绳力进行分析。LIU等^[40]使用缩比尺1:20的物理模型,通过水池实验研究了养殖网箱锚泊系统在不同水深下的锚绳张力,发现下潜深度达到水深三分之一后锚绳张力趋于稳定。吴元紧等^[37,51]针对船型桁架结构的单点锚泊网箱,开展了模型比例尺为1:40的波浪流水池试验,得到网箱及锚泊受力情况,并重点围绕该网箱在不同吃水深度受波浪作用的锚泊受力,且对升沉、纵摇和横摇等水动力学特性进行了比较分析。因此,养殖网箱水池实验的设计应充分考虑模型与原型之间的相似关系,缩比尺选择时应综合考虑实验规模、模拟环境的复杂性及实验精度要求。通过合理的实验设计,可以确保实验数据的准确性,为网箱锚泊系统在实际应用中的优化提供科学依据。

3.4 海洋实测

陈炫光^[12]在浙江象山风门口海域对参数优化后的船型网箱进行海试。该海域水深30 m,波型为风浪与涌浪的混合型,极端情况下有效波高4.79 m,年平均周期7.2 s。船型网箱稳定运行一年,验证了优化后船型网箱的安全性与稳定性。郭根喜等^[52]在广东湛江特呈岛深水网箱养殖基地进行试验,试验单个网箱和组合网箱锚绳力,发现锚绳受力与流速具有正比关系,接着给出了锚绳安全性能的评价标准。GANSEL等^[53]在挪威南部的马斯菲尤恩附近海域对直径12 m、高6 m的圆形网箱使用5种不同速度进行了有网衣和无网衣的拖曳试验,研究发现拖曳力与流速成正比。DECEW等^[54]将网箱投放在

美国朴次茅斯港口的新罕布什尔大学码头 30 m 处,采用声学方法对网箱进行了为期 60 d 的变形监测。因此,海洋实测能够为网箱设计、稳定性评估提供更加科学、全面的依据,具有重要的参考价值。

4 养殖网箱锚泊系统设计思路与展望

4.1 设计思路

养殖网箱锚泊系统的设计是一个复杂和需

要反复优化的过程,通过不断改进以提高养殖网箱的稳定性。养殖网箱锚泊系统设计思路如图 6 所示。

4.1.1 锚泊设计约束条件分析

综合考虑网箱特性、海洋环境和设计规范是设计网箱锚泊系统的前提。综合分析网箱质量、转动惯量、重心、水深、风浪流环境是进行网箱锚泊系统设计的必要前提。设计时需要以设计规范为依据,最大程度减少设计失败风险。

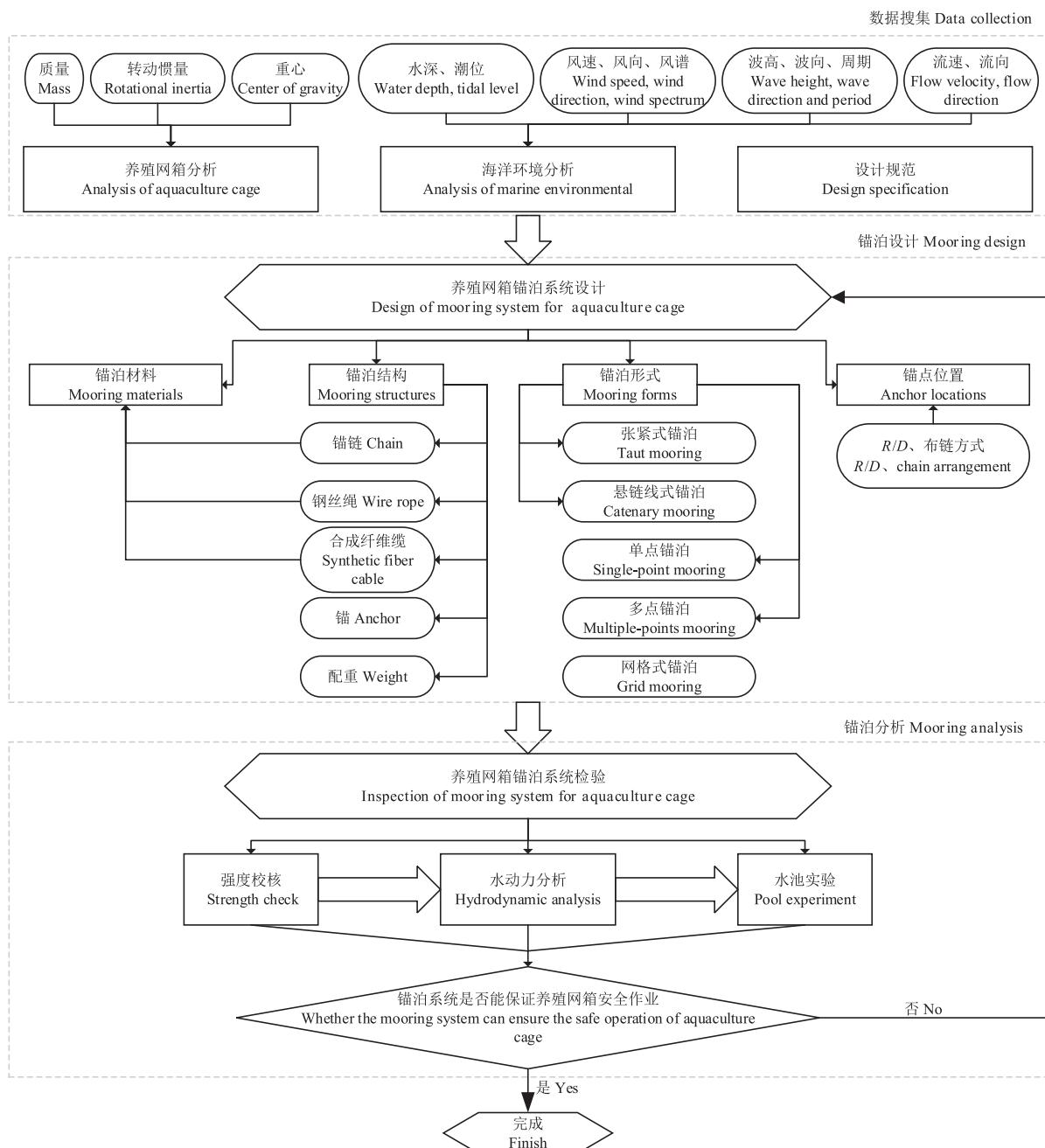


图 6 养殖网箱锚泊系统设计思路

Fig. 6 Design framework of aquaculture cage mooring system

4.1.2 锚泊系统形式与结构设计

首先,根据锚泊设计约束条件确定单点、多点、网格式锚泊系统形式,根据海深、成本等条件选择张紧式和悬链线式锚泊系统;其次,根据工作区域水深采用不同锚缆组合方式;然后,根据锚泊系统不同组合,选择锚链、钢丝绳、合成纤维缆的材料以及浮筒和配重的位置;最后,根据R/D及布链方式计算锚点位置,并完成锚泊系统设计。

4.1.3 锚泊系统力学性能分析与检验

网箱锚泊系统力学性能分析与检验主要包括锚泊系统的强度校核、疲劳分析、水动力学分析和物理模型试验等。首先,通过强度校核计算锚绳极限承载力,确保结构在工作条件下安全可靠;其次,计算锚泊系统疲劳寿命设计值,保证网箱锚泊系统使用年限达标;然后,通过水动力学分析,得到网箱在锚泊状态下的运动以及锚绳张力,检测网箱安全性;最后,进行物理模型试验,验证数值模拟结果,预防锚泊系统断裂、网箱倾覆等问题。

4.2 展望

由于海洋环境的复杂性和养殖网箱的多样性,针对养殖网箱锚泊系统仍存在许多问题需要进一步研究和解决。

养殖网箱锚泊系统的设计缺乏系统性,养殖网箱锚泊系统设计涉及海洋工程、材料学、机械工程等多个学科领域,需要加强不同学科之间的协同与交叉,推动锚泊系统设计标准化和规范化。

在养殖网箱锚泊系统分析过程中,对生物附着和海水腐蚀考虑较少,且现有分析软件无法精准考虑网衣遮蔽效应。因此,可通过改变阻尼、拖曳力系数和安全系数等方法,确保系统的可靠性和长期稳定性。

锚的投放是网箱安装中的重要工序,尽管布锚通常会使用卫星定位,但复杂的海洋环境常导致锚位在投放过程中发生偏移。因此,需要自动化手段安装锚,提高安装精度,减少锚位校核工作。

5 结论

本研究总结了养殖网箱锚泊系统设计与分析研究现状,归纳了养殖网箱锚泊系统设计与分

析方法,主要结论如下。

确定约束条件、设计锚泊形式、验证锚系力学性能是锚泊系统设计的3个主要步骤。单点锚泊系统具有较好的波浪响应性能,风标效应明显,适合细长型网箱。多点锚泊系统稳定性和抗风浪能力强,网箱活动范围固定,鱼饵残料等分布集中,易形成局部海洋环境污染,适合圆形、方形、多边形等网箱。

锚泊阻尼随着锚缆顶端激励幅值的增大而线性增大,可达网箱系统总阻尼的80%。大刚度的锚泊系统会导致锚绳张力增大,锚绳斜率对锚绳极限张力影响较小,主要影响网箱下沉深度。网箱增加网衣后导致锚泊力大幅增加,且影响网箱的纵摇。锚泊系统主要影响网箱的低频运动,采用“八字型”锚泊的网箱运动响应均衡,综合性能最好。

海流流速对锚绳张力影响最大,锚绳张力与水深成反比,与波高和波周期成正比。周期性海浪载荷的长期作用是锚泊系统失效的主因,其失效位置不同对网箱稳定性的影响也不同:(1)锚缆锚固端失效,缆重和水阻力会限制网箱倾覆;(2)锚缆上端破断,网箱主体会产生较大倾角甚至倾覆;(3)仅剩单根锚缆时,网箱会发生风标效应。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 石建高,余雯雯,卢本才,等.中国深远海网箱的发展现状与展望[J].水产学报,2021,45(6):992-1005.
SHI J G, YU W W, LU B C, et al. Development status and prospect of Chinese deep-sea cage [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(6): 992-1005.
- [2] 王丹,吴反修.2022中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2022:2-21.
WANG D, WU F X. China fishery statistical yearbook 2022[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022: 2-21.
- [3] 张合成.2003中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2003:1-15.
ZHANG H C. China fishery statistical yearbook 2003 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 1-15.
- [4] 黄小华,庞国良,袁太平,等.我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述[J].渔业科学进展,2022,43(6):121-131.
HUANG X H, PANG G L, YUAN T P, et al. Review of engineering and equipment technologies for deep-sea cage

- aquaculture in China [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(6): 121-131.
- [5] 石子永, 贝耀平, 袁丙青, 等. 水上新能源浮式结构物系泊系统研究现状和发展综述[J]. *船舶力学*, 2024, 28(5): 787-802.
- SHI Z Y, BEI Y P, YUAN B Q, et al. Review on the research status and development of floating structure mooring systems with new energy on water[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2024, 28(5): 787-802.
- [6] 徐航, 沈侃敏, 芮圣洁. 漂浮式海上风电场共享系泊系统研究综述[J]. *船舶工程*, 2024, 46(4): 142-152.
- XU H, SHEN K M, RUI S J. Review of shared mooring systems for offshore floating wind farms [J]. *Ship Engineering*, 2024, 46(4): 142-152.
- [7] MA K T, LUO Y, KWAN T, et al. Mooring system engineering for offshore structures [M]. Cambridge, MA: Gulf Professional Publishing, 2019.
- [8] ABS. TX 77060 USA Guidance notes on the application of fiber rope for offshore mooring [S]. Houston: American Bureau of Shipping, 2011.
- [9] 沈侃敏. 海洋锚泊基础安装与服役性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- SHEN K M. Performance of offshore mooring systems during installation and in service [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [10] YUAN Z M, INCECIK A, JI C Y. Numerical study on a hybrid mooring system with clump weights and buoys [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 88: 1-11.
- [11] 韩森, 贾宝柱, 朱瑞景. 基于分段外推法的锚泊定位悬链线浮子的影响[J]. *大连海事大学学报*, 2018, 44(1): 25-30.
- HAN S, JIA B Z, ZHU R J. Influence of buoy at moored positioning catenary based on piecewise extrapolation[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2018, 44(1): 25-30.
- [12] 陈炫光. 波流作用下船型网箱的单点系泊动力学分析及实验研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2020.
- CHEN X G. Single-point mooring dynamics analysis and experimental study of ship-type cage under wave current [D]. Ningbo: Ningbo University, 2020.
- [13] 乔东生, 闫俊, 欧进萍. 深水锚泊线串联浮筒系统的动力特性分析[J]. *振动与冲击*, 2013, 32(15): 54-58.
- QIAO D S, YAN J, OU J P. Dynamic characteristics of deep water mooring lines with buoys system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(15): 54-58.
- [14] 于芳芳. 深水平台锚泊系统的锚泊性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- YU F F. Research on mooring system performance of the deep-water platform [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [15] GOODEY C A, LOVERICH G, KITE-POWELL H, et al. Mitigating the environmental effects of mariculture through single-point moorings (SPMs) and drifting cages [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2001, 58(2): 497-503.
- [16] DECEW J, TSUKROV I, RISSO A, et al. Modeling of dynamic behavior of a single-point moored submersible fish cage under currents [J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43(2): 38-45.
- [17] 黄小华, 刘海阳, 胡昱, 等. HDPE 圆形网箱单点系泊与多点系泊受力特性模拟分析比较[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 37(2): 140-146.
- HUANG X H, LIU H Y, HU Y, et al. Comparison on the forces between HDPE circular single-point mooring net cage and multiple-points mooring net cage in waves and current [J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2018, 37(2): 140-146.
- [18] CELIKKOL B, BALDWIN K, STEEN R, et al. Open ocean aquaculture engineering: mooring & net pen deployment [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2000, 34(1): 53-58.
- [19] 梁家铭, 庞亮, 董胜. 新型网箱浮架系统水动力分析及系泊方式研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2021, 51(2): 119-126.
- LIANG J M, PANG L, DONG S. Research on hydrodynamic analysis and mooring method of a new net cage floating collar system [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(2): 119-126.
- [20] 陈徐均, 汤雪峰, 沈庆, 等. 系泊浮体布链方式优劣的理论分析[J]. *河海大学学报*, 2001, 29(5): 84-87.
- CHEN X J, TANG X F, SHEN Q, et al. Theoretical analysis of mooring chain disposition for a float-body [J]. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(5): 84-87.
- [21] 陈昌平. 深水网格式锚碇网箱水动力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- CHEN C P. Hydrodynamic behavior of deep-water net cage with the frame anchor system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [22] American Petroleum Institute. API RP 2SK, Design and analysis of stationkeeping systems for floating structures [S]. Washington: API Press, 2015.
- [23] 李辉, 刘春雷, 张伟, 等. 深水半潜式平台张紧式系泊系统优化设计[J]. *船舶工程*, 2018, 40(s1): 287-294.
- LI H, LIU C L, ZHANG W, et al. Optimal design of taut mooring system of deep-water semi-submersible platform [J]. *Ship Engineering*, 2018, 40(s1): 287-294.
- [24] 辽宁省市场监督管理局. DB21/T 3564-2022 海上浮式渔业平台结构设计规范[S]. 2022.
- Liaoning Administration for Market Regulation. DB21/T 3564-2022 Specification for structural design of the offshore floating fishery platform [S]. 2022.
- [25] 王绍敏, 袁太平, 陶启友, 等. 往复流作用下深水网箱

- 的单锚腿系泊系统设计及效用评估[J]. 海洋渔业, 2019, 41(6): 725-735.
- WANG S M, YUAN T P, TAO Q Y, et al. Design and utility evaluation of single anchor leg mooring system (SALMS) for deep water cages under reciprocating water flow[J]. Marine Fisheries, 2019, 41(6): 725-735.
- [26] 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.
- [27] 乔东生, 欧进萍. 半潜式平台两种锚泊系统的疲劳损伤比较计算[J]. 振动与冲击, 2014, 33(13): 1-5, 25.
- QIAO D S, OU J P. Comparative calculation on fatigue damage of two types of mooring systems for semi-submersible platform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(13): 1-5, 25.
- [28] 稚应凤, 姚卫星, 夏天翔. 线性疲劳累积损伤准则适用性评估[J]. 力学与实践, 2015, 37(6): 674-682.
- JI Y F, YAO W X, XIA T X. An applicability assessment of linear cumulative fatigue damage rules [J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(6): 674-682.
- [29] 张轲. 浮式风机半潜式平台水动力及其运动响应分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- ZHANG K. Analysis of hydrodynamics and motion response of floating wind turbine semi-submersible platform [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [30] 苏志勇, 陈刚, 杨建民, 等. 深海浮式结构物锚泊阻尼参数研究[J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 21-28.
- SU Z Y, CHEN G, YANG J M, et al. Study on deepwater floating structure mooring line damping parameters [J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(2): 21-28.
- [31] 乔东生, 欧进萍. 深水悬链锚泊线黏性阻尼计算[J]. 海洋工程, 2009, 27(4): 16-22.
- QIAO D S, OU J P. Calculation on viscous damping of deepwater catenary mooring line [J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(4): 16-22.
- [32] FALTINSEN O M. Sea loads on ships and offshore structures[M]. New York: Cambridge University Press, 1990.
- [33] TANG H J, YEH P H, HUANG C C, et al. Numerical study of the mooring system failure of aquaculture net cages under irregular waves and current [J]. Ocean Engineering, 2020, 216: 108110.
- [34] 张大朋, 严谨, 朱克强. 不同系泊缆失效模式下深海碟形网箱的水动力特性[J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(3): 107-116.
- ZHANG D P, YAN J, ZHU K Q. Hydrodynamic characteristics of deep sea station cage under different failure modes of mooring cables [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2022, 42(3): 107-116.
- [35] 张新昊, 窦培林. 单点系泊深海养殖工船水动力性能[J]. 中国海洋平台, 2021, 36(3): 40-45.
- ZHANG X H, DOU P L. Hydrodynamics of deep-sea aquaculture vessel with single mooring system [J]. China Offshore Platform, 2021, 36(3): 40-45.
- [36] 隋留洋, 黄小华, 刘海阳, 等. 系泊方式对深水养殖网箱动力特性影响研究[J]. 南方水产科学, 2021, 17(4): 98-108.
- SUI L Y, HUANG X H, LIU H Y, et al. Effects of mooring pattern on dynamic characteristics of a deep-water aquaculture cage [J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(4): 98-108.
- [37] 吴元紧, 黄小华, 刘海阳, 等. 船型桁架结构网箱单点系泊受力试验研究[J]. 南方水产科学, 2021, 17(4): 118-125.
- WU Y J, HUANG X H, LIU H Y, et al. Experimental study on mooring force of a single-point mooring fish cage with ship-type truss structure [J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(4): 118-125.
- [38] 苗玉基, 田超, 丁军, 等. 半潜式渔业养殖平台运动响应研究[J]. 中国造船, 2021, 62(3): 174-183.
- MIAO Y J, TIAN C, DING J, et al. Research on motion response of semi-submersible offshore fish farm [J]. Shipbuilding of China, 2021, 62(3): 174-183.
- [39] HUANG C C, TANG H J, LIU J Y. Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea [J]. Aquacultural Engineering, 2008, 38(2): 105-116.
- [40] LIU S C, BI C W, YANG H, et al. Experimental study on the hydrodynamic characteristics of a submersible fish cage at various depths in waves [J]. Journal of Ocean University of China, 2019, 18(3): 701-709.
- [41] 崔勇, 关长涛, 黄滨, 等. 波浪作用下双层网底鲆鲽网箱水动力特性的数值模拟[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 18-24.
- CUI Y, GUAN C T, HUANG B, et al. Numerical simulation of the hydrodynamic characteristics of double-bottom cage for flounder fish under waves [J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(6): 18-24.
- [42] HUANG C C, TANG H J, WANG B S. Numerical modeling for an in situ single-point-mooring cage system [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35(3): 565-573.
- [43] 徐为兵, 朱克强, 张大朋, 等. 网格锚定单体碟形网箱的水动力特性研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(10): 68-72.
- XU W B, ZHU K Q, ZHANG D P, et al. Hydrodynamic characteristics of single grid mooring ocean spar sea station [J]. Marine Sciences, 2015, 39(10): 68-72.
- [44] HUANG X H, LIU H Y, TAO Q Y, et al. Numerical analysis of the dynamic response of a single-point mooring fish cage in waves and currents [J]. Aquaculture

- Studies, 2019, 19(1): 25-35.
- [45] XU T J, DONG G H, LI Y C, et al. Numerical study of a self-submersible single-point mooring gravity cage in combined wave-current flow [J]. Applied Ocean Research, 2014, 48: 66-79.
- [46] HUANG C C, TANG H J, PAN J Y. Numerical modeling of a single-point mooring cage with a frontal rigid frame [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2009, 34 (2): 113-122.
- [47] BERSTAD A J, TRONSTAD H, SIVERTSEN S A, et al. Enhancement of design criteria for fish farm facilities including operations [C]//24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Halkidiki: ASME, 2005.
- [48] 刘春宏, 刘长根, 董娇娇, 等. 基于多孔介质模型的养殖网箱周围流场特性研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39 (1): 176-185.
- LIU C H, LIU C G, DONG J J, et al. Characteristics of flow field around fish cages based on the porous media model[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(1): 176-185.
- [49] WANG L Q, JU M, XING X D, et al. Dynamic behavior of the deepwater flexible pipeline during pipe laying process[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(4): 286.
- [50] 中华人民共和国自然资源部. HY/T 0299-2020 海洋观测仪器设备室内动力环境模型试验方法 总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. HY/T 0299-2020 The method of dynamic environmental model test for oceanographic observation instruments in laboratory—General [S]. Beijing: China Standard Press, 2020.
- [51] 吴元紧, 黄小华, 庞国良, 等. 潜浮式船型桁架结构深海养殖网箱避浪性能研究[J]. 渔业科学进展, 2022, 43 (6): 18-28.
- WU Y J, HUANG X H, PANG G L, et al. Study on wave resistance performance of a submersible deep-sea aquaculture cage with vessel-shaped truss structure [J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 18-28.
- [52] 郭根喜, 黄小华, 胡昱, 等. 高密度聚乙烯圆形网箱锚绳受力实测研究[J]. 中国水产科学, 2010, 17(4): 847-852.
- GUO G X, HUANG X H, H Y, et al. In-situ measurement on the forces of mooring lines of circular net cages with high density polyethylene [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(4): 847-852.
- [53] GANSEL L C, OPPEDAL F, BIRKEVOLD J, et al. Drag forces and deformation of aquaculture cages—full-scale towing tests in the field [J]. Aquacultural Engineering, 2018, 81: 46-56.
- [54] DECEW J, FREDRIKSSON D W, LADER P F, et al. Field measurements of cage deformation using acoustic sensors[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 57: 114-125.

Research progress on mooring system structure design and performance analysis for aquaculture cages

WANG Bin¹, WANG Hao¹, LIU Zhijian², CAO Ziliang³, YANG Danjie², WANG Fang¹

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Henan Tianyuan Assembly Engineering Co, Kaifeng 475000, Henan, China; 3. Shanghai Tianhong Yuansheng Technology Development Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: The aquaculture net cage is an important farming equipment that enhances the efficiency of marine area utilization, promotes the sustainable development of fisheries, and provides abundant and high-quality aquatic products. Mooring system is the key to ensure the safe and stable operation of aquaculture cages. This paper systematically summarizes the research status of structural design, theoretical analysis, hydrodynamic simulation and prototype test of cage mooring system. The structure and combination of mooring system for aquaculture cages are summarized. The performance of taut mooring system, catenary mooring system, single-point mooring system, multiple-points mooring system and grid mooring system are compared and analysed from perspectives of anchor cable tension requirements, positioning accuracy, load capacity, fatigue life, cage movement, anchor cable stress, pool experiments, and marine measurements. The design framework of aquaculture cage mooring system is formed. The research results provide theoretical and technical reference for the design and optimization of aquaculture cage mooring system, and point out the future development direction.

Key words: aquaculture cage; mooring system; mooring design; structure optimization; hydrodynamic