

DOI: 10.12264/JFSC2025-0069

## 深远海网箱养殖系统主要安全问题研究综述

黄小华<sup>1\*</sup>, 刘航飞<sup>1</sup>, 庞国良<sup>1</sup>, 李根<sup>1</sup>, 袁太平<sup>1</sup>, 胡昱<sup>1</sup>, 陶启友<sup>2</sup>

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部外海渔业可持续利用重点实验室, 广东省网箱工程技术研究中心, 广东 广州 510300;
2. 三亚热带水产研究院, 海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室, 海南 三亚 572000

**摘要:** 近些年以大型网箱为主导的深远海规模化养殖取得显著成效, 深远海养殖在建设蓝色粮仓、拓展海洋养殖空间以及发展海洋经济新质生产力等方面发挥着重要作用。然而, 深远海养殖生产实践中存在的系统安全问题仍然比较突出, 制约了该产业的高质量发展。本文立足我国深远海网箱养殖产业发展现状, 从养殖生产角度就网箱养殖系统当前面临的网箱结构安全、网衣破损、鱼类监测等主要安全问题进行剖析, 详细介绍国内外关于网箱设施安全设计、养殖运营网衣安全、养殖鱼类安全监测等方面的技术研究及应用情况, 并从科学选址、设施安全、品种选择、智慧管控、养殖保险等方面, 对深远海网箱安全养殖发展提出相关建议。

**关键词:** 深远海网箱; 养殖系统; 结构安全; 网衣破损; 鱼类监测

**中图分类号:** S953

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-8737-(2025)08-1198-13

深远海养殖主要指以重力式网箱、桁架类网箱及养殖平台、养殖工船等大型渔业装备为主体, 以机械化、自动化、智能化装备技术为支撑, 在深远海进行规模化高效水产养殖的方式<sup>[1]</sup>。近些年, 我国大力支持发展深远海养殖取得显著成效, 以大型网箱为主导的深远海养殖设施覆盖全国沿海省份, 养殖规模逐年递增, 养殖海域空间大幅拓展, 产业化程度不断提升。2023 年, 我国深水网箱养殖产量 47.28 万 t(图 1), 是“十二五”末期深水网箱养殖产量的 4.47 倍, 占比海水鱼养殖产量已提升至 23%<sup>[2]</sup>, 深远海已成为实现未来海水鱼养殖递增的新空间。大力发展深远海养殖, 对优化水产养殖空间布局、促进水产养殖绿色发展、保障优质水产品有效供给、实施健康中国战略均具有重要意义。然而, 我国仍面临深远海网箱养殖风险控制能力不足的突出问题, 台风影响下网箱部件损坏及鱼类大量死亡的情况时有发生, 阻

碍了深远海养殖产业的可持续健康发展。本文立足我国深远海网箱养殖产业发展现状, 从养殖生产角度就网箱养殖系统面临的几个主要安全问题进行深入剖析, 详细介绍国内外关于网箱设施和圈养鱼类安全技术的研究及应用情况, 并对深远海网箱安全养殖发展提出相关建议。

### 1 我国深远海网箱养殖产业发展现状

深远海海域水质优良、水体交换快、生态容纳量大、养殖病害发生率低, 是发展现代水产养殖业和海洋经济的新空间, 也是推进国家海洋战略的重要组成部分<sup>[3]</sup>。大型网箱是深远海养殖的主导设施, 根据结构型式不同总体可以分为重力式网箱和桁架式网箱两种, 其中重力式网箱占比 95%以上, 主要为高密度聚乙烯材质, 因其操作便利及性价比高的优势被广大养殖从业者所接受<sup>[4]</sup>。经过 20 余年网箱工程技术的不断创新和

**收稿日期:** 2025-03-17; **修订日期:** 2025-04-28.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(32173024, 32403089); 国家海水鱼产业技术体系项目(CARS-47); 海南省重点研发项目(ZDYF2023XDNY066); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2023TD97, 2024XT0803); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)资助项目(SML2023SP237).

**作者简介:** 黄小华(1982-), 男, 研究员, 从事深远海养殖工程与装备研究. E-mail: huangx-hua@163.com

鱼类养殖技术的进步,重力式网箱养殖规模不断扩大,网箱大型化发展趋势明显,从网箱周长 40 m 逐步发展到最大周长 130 m,在中国南海区、东海区、黄渤海区均被广泛应用,全国保有量约 2 万箱,其中南海三省区占比约 60%,已成为我国深远海养殖主要区域,卵形鲳鲹已成为深水网箱养殖第一大海水鱼类品种<sup>[2]</sup>。我国第一个桁架式网箱是由湖北省海洋工程装备研究院有限公司设计建造的“深蓝 1 号”,养殖水体 5 万 m<sup>3</sup>,于 2018 年 5 月交付在冷水团海域开展三文鱼养殖实验<sup>[5]</sup>,后续有“德海 1 号”“澎湖号”“振渔 1 号”“经海 1 号”投产,发展至今已累计建造各型式桁架网箱约 60 个,主要集中在广东、福建、山东等省份,根据作业状态不同可分为浮式、半潜式、全潜式和坐底式等<sup>[6]</sup>。2024 年下水投产的大型桁架网箱有 10 个,单个网箱养殖水体最大可达 9 万 m<sup>3</sup>。在广东,1 个大型桁架式网箱平台配套 N 个重力式网箱的“1+N”组合式深远海网箱养殖模式得到推广应用,桁架式网箱除了基本养殖功能外,往往建造有生活保障、物资存储的区域,可以作为基地式养殖管理综合平台逐步向外海空间拓展。随着深远海网箱养殖向规模化、大型化、集群化发展,深远海养殖有效带动了国内自动投饵机、网衣清洗机、吸鱼泵、信息化监测平台等养殖配套装备的发展<sup>[5,7-8]</sup>,促进了我国深远海工业化养殖进程的进步,但自动化智能化水平还有待提高。

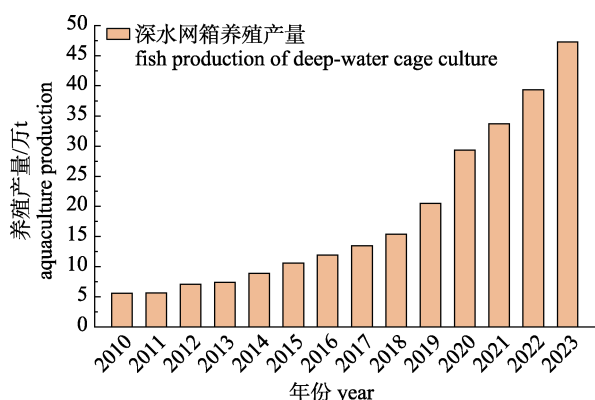


图 1 深水网箱养殖产量变化(2010–2023)

Fig. 1 Fish production of deep-water cage culture from 2010 to 2023

作为承上启下的产业链关键环节,深远海网箱养殖协同带动了苗种培育、装备制造、饲料生产、成鱼加工、冷链运输、产品销售等行业的发展,经济社会效益显著。近两年,我国出台一系列有力政策加大对发展深远海养殖的支持力度。如:2023 年 6 月,农业农村部等八部门印发《关于加快推进深远海养殖发展的意见》(农渔发〔2023〕14 号),提出全产业链全环节推动深远海养殖发展,是我国首个关于深远海养殖发展的指导性意见,为当前和今后一段时期规范和支持深远海养殖发展提供了政策依据。2024 年,中央一号文件明确提出“支持深远海养殖,树立大农业观、大食物观,多渠道拓展食物来源”。同年 9 月,国务院办公厅印发《关于践行大食物观构建多元化食物供给体系的意见》(国办发〔2024〕46 号),明确提出“加快发展深远海养殖,科学开发江河湖海食物资源”,加强深远海养殖关键设施装备研发,发展深水抗风浪网箱,稳妥推进大型桁架类网箱和养殖工船建造,建设海上牧场、“蓝色粮仓”。根据联合国粮食及农业组织(FAO)预测<sup>[9]</sup>,到 2032 年全球水生动物产量预计将达到 2.05 亿吨,其中水产养殖产量将由 2022 年的 9400 万吨增至 2032 年的 1.1 亿吨,增量达 1600 万吨。可以预见,未来较长一段时期内我国深远海养殖发展将迎来一个快速发展期,深远海养殖将在建设蓝色粮仓、拓展海洋养殖空间、发展海洋经济新质生产力、支撑农业强国建设等方面发挥重要作用,发展前景广阔。

## 2 深远海网箱养殖系统主要安全问题

深远海网箱养殖系统的核心组成部分主要包括网箱设施及其圈养鱼类,其中网箱设施系统主要涉及主体框架、养殖网衣及系泊系统。随着深远海养殖空间进一步向外海纵深拓展,深远海养殖的安全可靠性被高度关注。深远海养殖生产实践中发现网箱系统的安全问题还比较突出,如:强台风下重力式网箱的损坏及鱼类逃逸、桁架网箱养殖网衣破损等,严重制约了深远海网箱养殖产业的高质量发展,主要问题体现在以下三

个方面:

(1)深远海网箱结构安全性有待提升。重力式网箱目前是深远海养殖的主导设施,近十年网箱工程技术取得较大进步,支撑了网箱规格向大型化发展,然而大型重力式网箱在高海况和大浪强流冲击下面临的安全威胁更大,如 2022 年 16 号台风“暹芭”造成广东阳江上百个浮式网箱损坏和鱼类死亡逃逸<sup>[10]</sup>。桁架式网箱建造成本从千万元起步,从网箱设计、建造、拖航到安装投产的每一环节都至关重要。近几年下水的大型桁架网箱出现损坏的有“海峡 1 号”“宁德 1 号”“振鲍 1 号”“湾区横洲号”等<sup>[11]</sup>,深远海网箱结构安全性有待进一步提升。

(2)大型网衣破损问题尚未得到根本解决。柔性网衣作为网箱包围养殖水体的核心部件,网衣安全对保护养殖生物、防止鱼群逃逸至关重要。深远海大型网箱养殖生产实践表明造成重大养殖经济损失的主要原因便是柔性网衣过载破损导致圈养鱼类的逃逸。网衣过载一是由于大浪强流的冲击致使网衣受力和变形大,二是由于长周期养殖附着的大量污损生物致使网衣整体重量大增。网衣破损容易发生在桁架网箱上,在柔性网衣与钢制桁架结构耦合装配工艺、网衣水下高效清污装备等方面还需开展大量研究,以期从根本上解决网衣破损问题。

(3)养殖鱼类安全监测技术有待突破。设施安全是前提,鱼类安全是根本。一个桁架网箱养殖鱼类年产量少则上百吨,多则上千吨,全方位对养殖鱼类开展监测进行安全预警非常必要。目前国内桁架网箱的监测设备主要用于水环境及水文监测,个别桁架平台采用双目相机监测鱼类个体表型,但无论是监测精准度还是监测元素的广度,如对摄食行为、病害、生长状态等的综合监测,均与挪威深远海智慧养殖水平差距较大。采用声学技术监测鱼类生物量、鱼类群体行为及分布等方面在应用上还基本处于空白。

### 3 网箱设施安全设计

无论是重力式网箱还是桁架式网箱,网箱设施的安全设计均是深远海网箱养殖取得预期效益

的首要前提。两种类型的深远海网箱设施尽管在系统结构、养殖水体、建造成本等方面差别很大,但都包括框架系统、网衣系统及锚泊系统三大部分。较为准确地获取网箱系统各部件的关键力学设计参数,包括水动力及材料性能参数,是进行网箱设施安全设计的基础。此外,还应结合网箱投放海域的实际环境条件,从养殖生产实用性、养殖工艺可靠性等方面,进行网箱设施系统的综合性安全设计。

当前国际上主流的重力式网箱类型为漂浮式网箱(图 2),即网箱漂浮在海面上进行鱼类养殖生产,网箱材料以高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)为主。由于该类型网箱性价比高、装配简单、使用便利、耐腐蚀效果好的显著优势<sup>[12]</sup>,近些年来正越来越多地被中国、挪威、智利、日本、澳大利亚和新西兰等国家应用于养殖生产实践,最大网箱周长达 240 m<sup>[13]</sup>。为了解决网箱设施在高海况下面临的安全问题,国内外不少学者通过采用物理模型实验<sup>[14-16]</sup>、数值模拟<sup>[17-20]</sup>或海上实测手段<sup>[21]</sup>开展了重力式网箱水动力特性研究,为网箱浮架、网衣及系泊等系统部件的设计及安装提供了丰富的理论基础和力学数据支撑。此外,在网箱材料性能分析<sup>[22]</sup>、疲劳破坏评估等<sup>[23-24]</sup>方面形成的研究成果,也为近些年重力式网箱抗风浪能力的提升及网箱规格的大型化发展起到了一定的作用。然而,我国养殖生产实践中有的企业为了追求高养殖效益,片面追求采用更大规格的重力式网箱进行养殖生产,网箱养殖的安全意识不强,更有为了降低网箱设施建造成本,网箱锚泊安装过于简单,规格越大的 HDPE 漂浮式网箱,更容易在开放海域台风海况袭击下因变形过大发生网箱主体结构损坏<sup>[4]</sup>,这就必然导致更大的损失。且我国的重力式网箱的网衣高度一般为 6~10 m,圈养的养殖鱼类面对强台风条件时避免不了大浪强流的冲击,我国因台风灾害造成 HDPE 重力式网箱破坏及鱼类损伤的情况时有发生。

重力式升降网箱因台风来临前可以预先下潜至水面以下一定深度,有助于显著提升恶劣海况条件下网箱主体结构和养殖鱼类的安全性,期望

能够为深远海养殖产业发展提供装备选择新途径, 近些年受到国内外学者的较多关注<sup>[25-28]</sup>。国内升降式网箱研究的工作原理主要是通过向浮管注水和排水来实现网箱的下潜和上浮, 这样容易导致在网箱下潜过程中因 HDPE 浮管注水后发生大幅弯曲而使网箱整体下潜较难, 从而造成网箱倾覆或无法下潜的情况, 且柔性浮管和刚性进气阀门的连接容易在长期使用过程中发生漏水漏气的情况, 升降控制系统的安全可靠性还有待于提升, 这也是长期以来国产化升降网箱并没有在实践中规模化应用, 仅有个别试验性升降网箱的应用的主要原因。国际上典型的重力式升降网箱有美国的 SeaProtean 网箱和智利的 EcoSea 网箱<sup>[29-30]</sup>。

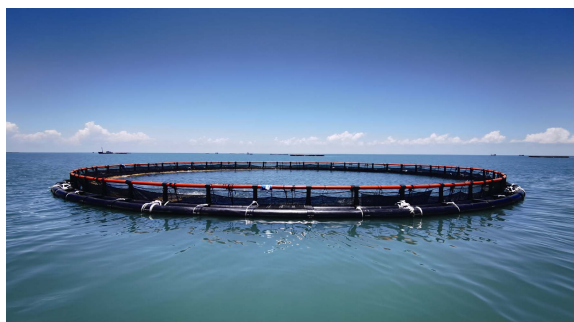


图 2 重力式深水网箱  
Fig. 2 Gravity deep-water net cage

近些年兴起的大型桁架式网箱, 凭借着强度高、空间大、管理方便等优势, 目前已成为发展深远海养殖的关键装备<sup>[13, 31]</sup>。桁架式网箱的养殖容量大、养殖产量高、建造成本高昂的特点使得其安全设计需综合考虑多种因素, 涉及网箱的结构型式、力学特性、功能、连接工艺等方面。已有部分学者在设施水动力方面开展了系统性的研究, 如 Liu 等<sup>[32]</sup>融合了莫里森方程和辐射绕射理论, 考虑了波浪对小尺度网衣和大尺度桁架及浮筒结构的影响, 并采用边界元离散方法求解了具有大尺度桁架类网箱结构的运动响应和系泊力。Wang 等<sup>[33]</sup>采用耦合水弹性方法探究了船型桁架式网箱在波浪作用下的运动响应, 基于速度场传递函数考虑了入射波、辐射波和绕射波对桁架结构运动特性的影响。Yu 等<sup>[34]</sup>人采用数值仿真方法

对养殖辅助船与大型养殖网箱“OCEAN FARM 1”进行碰撞损伤分析, 计算结果表明所提出的耦合计算方法可以很好地模拟网箱与船体的冲击效应。此外, 为了应对深远海更恶劣的海况环境, 国内有的桁架式网箱从结构型式上进行了安全性的创新设计。如“德海一号”船型网箱采用单点系泊(图 3), 可以始终自适应风浪流方向, 极大减小了作用于网箱结构上的波浪和水流载荷, 在保证结构安全的同时也降低了养殖鱼类的应激反应, 且网箱随着涨落潮的变化在以锚泊点为中心的区域范围内运动, 具有较好的养殖生态效益<sup>[35-36]</sup>。“深蓝一号”<sup>[13, 37]</sup>、“湛农一号”<sup>[38]</sup>可以在台风来临前, 网箱主体下潜到水面以下一定深度以躲避台风的侵袭。随着桁架式网箱建造规模的增大及工程技术的研究深入, 对桁架网箱安全设计的要求也越来越高。海上渔业养殖设施指南(2024)<sup>[39]</sup>明确规定, 桁架网箱自存工况根据作业海域条件一般都要采用 100 年重现期的设计工况。现有养殖运营的桁架网箱平台多数都选用超高分子量聚乙烯网衣(UHMWPE)<sup>[40]</sup>以提升养殖网衣的安全可靠性, 但生产实践表明网衣在单个养殖周期里发生破坏的情况时有发生, 今后需重点关注养殖网衣和钢制框架结构连接工艺的优化设计, 且污损生物的附着也是网衣设计需要考虑的因素。



图 3 深远海桁架式网箱“德海一号”  
Fig. 3 Offshore trussed cage “Dehai 1”

综上, 重力式漂浮网箱的设计和应用相对比较成熟, 但大规格的重力式漂浮网箱的动力学研究不足以支撑网箱的安全设计, 且随着深远海养殖进一步向外海拓展, 养殖海域的水深增加会加大对重力式升降网箱的应用需求。大型桁架式网



箱的应用示范日益增多,但也不可避免地面临着台风、极端海况、结构腐蚀和网衣附着等问题的困扰,如何因地制宜地设计网箱结构,有效地适应养殖海域的环境条件,保证网箱结构安全并为养殖鱼类提供适宜的生存环境,仍然制约着网箱设施向更深、更远的海域拓展。

#### 4 养殖运营网衣安全

网箱设施是深远海养殖的装备基础,网衣则为养殖生物生长构建了生存环境。网衣破损造成养殖对象逃逸是长期以来深远海养殖产生经济损失的主要因素之一。主要表现为在长期海洋环境下网衣受海洋生物的附着影响,以及在长期高海况环境下网衣与网箱框架结构接触摩擦作用,引起网衣网线破断形成区域性的网衣受力不均和网衣持续破损现象。

对于桁架式网箱而言,网衣一般系数在框架结构上进行布设,作为网箱系统的核心组成部件,网衣有可能因与框架结构摩擦、极限荷载过大、受力不均等原因而破损。网衣破损已成为大型桁架式网箱养殖安全中尤其需要关注的核心问题(图 4)。目前,波流作用下网衣水动力分析实验及仿真手段已经较为系统、成熟,但是在网衣结构破损方面研究还较为缺乏。其中,关于网衣与框架摩擦受损,目前研究手段还比较有限,当前行业内解决方法主要是从网衣敷设工艺上避免两者间产生摩擦。在网衣力学分析方面,部分学者开展了相关工作,Liu 等<sup>[41]</sup>通过网片老化实验、力学性能测试及结合有限元仿真,发现网衣老化后性能快速下降,经过三年自然老化,网衣仅保留其原始强度的 48%,破断时伸长率从 90%降至 32%;Wang 等<sup>[42-43]</sup>采用疲劳实验结合数值仿真方法对铜合金网衣疲劳特性进行了研究,结果表明铜合金材料级的疲劳实验结果不能简单地应用于实际网衣结构的疲劳寿命评估预测,并且相较于传统金属合金或聚合物网衣,铜合金网衣具有更好的抗老化性能;陈元帅等<sup>[44]</sup>对自升式桁架类网箱结构响应进行了计算,结果表明系缚网衣纲绳数量变化对网箱结构的响应评估基本无影响,但增加系缚纲绳可有效减少纲绳受力。开展网衣破设方

法研究及网衣与框架结构适应性设计对保障养殖运营网衣结构安全至关重要。

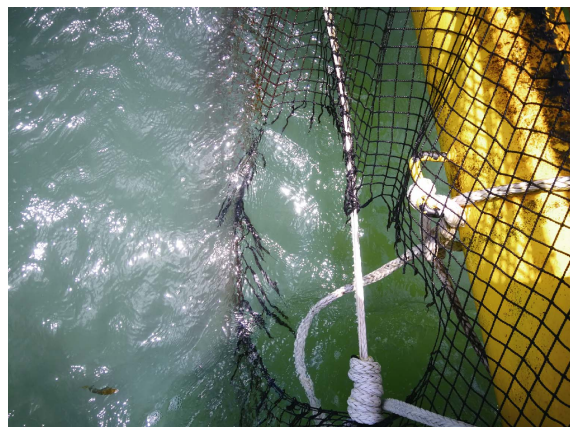


图 4 网衣破损

Fig. 4 Net damage phenomenon

无论是重力式网箱还是桁架式网箱,网衣长期浸泡于海水中,易吸引甲壳类动物、软体动物和藻类等污损生物附着<sup>[45-47]</sup>(图 5)。网衣污损生物附着严重会大幅增加网衣结构应力,同时对网箱内外水流交换和养殖病害预防造成不利影响。网衣污损生物具有不规则性和不确定性,目前污损生物对网衣本身结构安全的研究比较缺乏,主要研究方向在于网衣污损生物对网箱内外水流交换、网箱拖拽力和养殖病害发生的研究。Cornejo 等<sup>[48]</sup>采用高分辨率大涡数值模拟方法,针对无生物污损、污损生物附着程度中等和污损生物附着

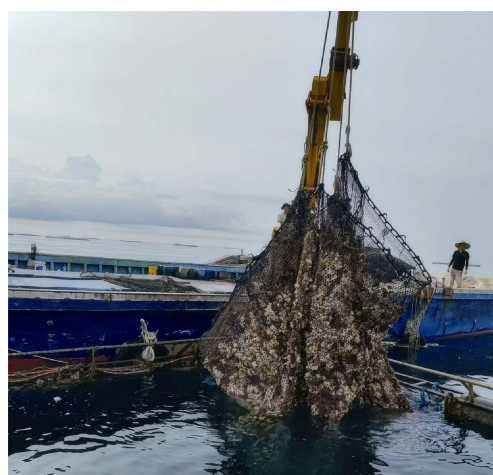


图 5 网箱网衣污损附着生物

Fig. 5 Biofouling organisms attached to the netting of aquaculture cages

严重的网箱水动力学特性研究表明,网箱背流面区域水流流速下降 10%~30%,水流流速的大小直接影响网箱内容氧量及浮游生物当量;Bi 等<sup>[49-50]</sup>使用多孔介质流体模型模拟了污损生物网片挂板周围的流场,实验研究表明作用于网的水阻力随污损生物水平增加而增加,与清洁网相比网箱污损生物的存在可使网箱负载增加 10 倍以上,随着污损生物水平的增加,附着程度最高的挂板流速降低了 21.4%;Jiang 等<sup>[51]</sup>通过对放置在装有病鱼的水箱底部的不同生物量附着的挂板网的研究,确定了刺激隐核虫(*Cryptocaryon irritans*)毛虫可以附着在网箱上,且附着率与污垢生物

量呈正相关,表明网衣污损生物附着区域可成为鱼病的滋生场所。养殖过程中,开展水下网衣清洗是保障养殖对象安全的重要举措。挪威、美国、日本、中国等渔业国家围绕水下网衣清洗问题提供了网衣清洗机器人的解决方案,从姿态控制方式角度可分类为履带式、四轮式和推进器控制方式,从末端执行机构角度可分类为毛刷式、水射流式和清洗刀盘式等,如表 1 所示。网衣清洗机器人在国外的应用范围较广,国内网衣清洗仍主要以岸基、人工为主,机械辅助的方式,这一定程度制约了国内深远海养殖产业的形成和发展。

表 1 国内外典型水下网衣清洗装备  
Tab. 1 Typical domestic and international underwater net cleaning systems

| 型号<br>type            | 国别及厂商<br>country and<br>manufacturer | 主要参数<br>main parameter                                | 姿态控制方法<br>attitude control<br>method | 结构特点<br>structural feature                             |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Mainstay<br>Manta     | 挪威 Mainstay<br>AS 公司                 | 长 1873 mm×宽 2640 mm×高 853 mm, 6~30 MPa, 300~700 L/min | 5 个推进器                               | 独特的外形结构设计能够实现清洗机器人对网面角落的清洗, 高压水射流清洗盘设计                 |
| NCL-SX3               | 日本 YANMAR<br>公司                      | 长 811 mm×宽 1037 mm×高 784 mm, 11.3 MPa, 120 L/min      | 四轮+1 个螺旋桨                            | 倾斜安装的喷嘴射流反冲力带动转盘旋转贴网, 高压水射流清洗盘设计                       |
| Stingray<br>E230      | 美国 LP 公司                             | 长 2700 mm×宽 1400 mm×高 600 mm, 功率 11 kW                | 履带式                                  | 全电动控制低速电动螺旋刀盘, 实现清扫网面污损生物                              |
| AKVA<br>FNC8          | 挪威 AKVA<br>Group                     | 长 2650 mm×宽 1100 mm×高 660 mm, 8~25 MPa, 309~715 L/min | 6 个推进器                               | 多转盘高压水射流清洗方式, 采用标准的 ROV 设计方案, 具备高度自动控制功能和先进 IP 摄像头、传感器 |
| Net<br>Cleaner<br>N4A | 中国 青岛森科<br>特智能仪器有限<br>公司             | 长 2014 mm×宽 1366 mm×高 535 mm, 20~25 MPa, 110 L/min    | 履带+5 个推进器                            | 具备 ROV 完整运动功能, 可实现一键贴网功能                               |

网衣破损检测对预防和及时发现安全隐患并减少经济损失有重要意义,传统的网衣破损检测主要依赖于人工潜水检查,存在成本高、安全性差等问题(图 6)。近年来,国内外研究者提出了声呐探测法、埋线探测法、图像分析法、数字孪生技术等方法。声呐探测法通过回波信号分析网衣的完整性,但其空间分辨率较低,难以检测微小破损<sup>[52]</sup>。埋线探测法通过电路通断判断破损,虽成本低但易受腐蚀影响<sup>[53]</sup>。这类方法受限于单一传感器的物理特性,难以满足大规模养殖场景对快速响应的需求。随着水下机器人和图像处理算法的进步,基于视觉的检测技术成为主流。早期

研究聚焦于传统图像处理技术,如 Betancourt 等<sup>[54]</sup>提出通过网衣结构三维重构实现破损检测;Zacheilas 等<sup>[55]</sup>通过视频帧分析结合边缘检测识别网衣网孔,能适应光照变化和不同大小的网孔。这种方法在小样本场景下表现稳定,但难以适应复杂动态的环境,且传统图像处理方法在处理大规模数据时存在计算复杂度高、适应性差等问题。深度学习技术在图像处理领域的优势逐渐显现,研究者们开始探索基于 AI 的网衣破损检测方法。这些方法通过自动提取图像特征并进行分类或分割,显著提高了检测的准确性和效率,具体包括目标检测模型<sup>[56-59]</sup>、实例分割模型<sup>[60]</sup>、语义分割

模型<sup>[61]</sup>。与传统的图像分析方法相比,深度学习方法在处理复杂背景和大规模数据时表现出更强的鲁棒性和准确性。但是,纯视觉方法对水质和光照条件敏感,难以适应浑浊水域。数字孪生技术在网衣破损检测领域展现出显著潜力。该技术通过构建物理对象的数字化模型,实现实体与虚拟模型间的实时数据交互与动态映射,为网衣状态监测提供了创新解决方案。连栗楷等<sup>[62]</sup>提出利用数字孪生技术来检测网衣破损,通过滑动平均值增强完整状态与破损状态下的拉力差异,但该方法仅能判断破损存在而无法定位具体区域,且计算成本较高。Su 等<sup>[62]</sup>采用无线传感器网络构建网箱数字孪生监测体系,但复杂海洋环境下的数据稳定性和传感器布置成本仍是挑战;尽管数字孪生技术已在网衣破损识别精度和成本控制方面取得显著进展,但依然面临复杂海洋环境下的传感器可靠性、多物理场耦合建模、系统通用性以及长期运行稳定性等关键挑战。

综上,网衣与网箱框架的安全敷设方法、网衣污垢附着生物清洗装备技术、基于数字孪生的水下网衣破损检测技术可实现对养殖过程中网衣的安装工艺、网衣维护和破损检测的高效管理,但相关技术方法研究尚不完备,如对不同铺设方法下网衣的运动受力特性研究不充分,水下网衣清洗效率不足和复杂环境下网衣破损检测识别精度等问题亟待解决。

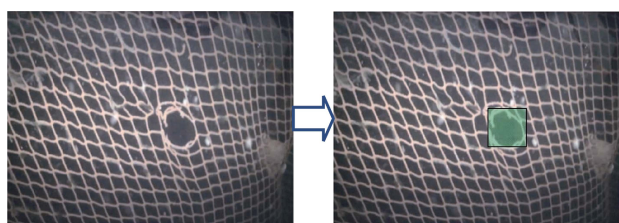


图 6 网衣破损检测<sup>[64]</sup>  
Fig. 6 Net damage detection<sup>[64]</sup>

## 5 养殖鱼类安全监测

网箱养殖鱼类实时智能的安全监测技术,有助于为渔民提供实时的鱼类数量、表型、异常行为等重要信息,辅助渔民及时决策和精细化管理,

保障养殖鱼类安全,是深远海网箱养殖的重要方向。该项技术得益于视觉、声学传感器技术和深度学习技术的突破,进展迅速。视觉传感器采集的图像信息丰富,分辨率高,有助于小范围的计数、行为异常检测和表型测量,其缺点在于视野范围小,无法对网箱开展全面监测。声学传感器监测范围大,适用于整个网箱尺度的鱼群的计数、行为分析,但分辨率低,计数精度低,无法获取精细特征。下面从目标及关键点检测、鱼群计数、表型测量、行为检测几个方面具体描述。

### 5.1 目标及关键点检测

目标及关键点检测是智能监测的基础技术,有助于全面提升数量、行为等所有监测对象的精度。其中,常用的鱼类关键点包括鱼眼、鱼尾、鱼鳍部位的角点特征或圆形特征。从 20 世纪 90 年代开始,研究者就尝试将传统的机器视觉技术应用到鱼类目标识别上<sup>[65-67]</sup>,然而,由于水下背景、光照复杂、鱼群密集,检测结果并不理想。2014 年之后,深度学习用于解决鱼类目标识别问题,性能提升显著。常用于鱼类目标检测的神经网络包括基于二阶策略的 Faster RCNN<sup>[68-69]</sup>系列和一阶段策略的 YOLO 系列网络<sup>[70-71]</sup>。在目标检测网络的基础上,添加关键点回归头或单独设计关键点回归网络,即可实现鱼类的关键点检测,相关研究包括 Wu<sup>[70]</sup>等和 Dong 等<sup>[72]</sup>。

### 5.2 鱼群计数

小范围的精确鱼群计数主要依靠视觉传感器。其中,Liu 等<sup>[73]</sup>利用了背景建模技术,在视频流中过滤掉背景,分割出运动的鱼群,进而采用方向性卷积核识别出鱼类个体实现网箱中的鱼群计数。该方法主要依靠经典的前景背景分割算法,难以处理复杂干扰和高密度的情况。Zhang 等<sup>[74]</sup>和 Liu<sup>[75]</sup>利用了先进的特征提取神经网络,将鱼群计数建模为密度估计问题,解决了高密度鱼群的计数问题,抗干扰能力也更强。大尺度计数主要依靠声学传感器,Jing 等<sup>[76]</sup>则采用双频识别声呐(dual-frequency identification sonar, DIDSON)获取声学影像,并基于索贝尔(Sobel)算子进行边缘提取,其检测结果与人工计数相比误差小于 5%。



此外, Hamano 等<sup>[77]</sup>开发了一种由 15 个传感器组成的多传感器声呐系统, 专用于特定鱼群的计数。实验结果表明, 该方法在笼养蓝鳍金枪鱼(*Thunnus*)的计数中表现出较高的可靠性和准确性。

### 5.3 表型测量

表型测量一般在关键点检测的基础上, 基于视觉三维测量技术, 获得鱼类关键点之间的距离。Muñoz-Benavent 等<sup>[78]</sup>基于特征点构建了蓝鳍金枪鱼几何模型, 在视觉测量过程中, 可以利用该模型补偿由金枪鱼弯曲等姿态变化导致体长体宽测量不精确的情况, 测量实验显示误差小于 3%。Tseng 等<sup>[79]</sup>通过卷积神经网络分割图像中的鱼嘴和尾叉, 进而利用从图像中已知长度的人工标记板中获取的像素-距离比, 实现鱼的体长估计, 平均误差为 4.26%。Huang 等<sup>[80]</sup>利用了立体相机对图像区域的三维重建能力, 融合 Mask-RCNN 给出的鱼类分割区域, 解决运动鱼类的测量问题。

### 5.4 行为检测

鱼类行为主要包括摄食行为、群体行为和异常行为等<sup>[81]</sup>。通过检测和分析行为有助于发现鱼类及环境状态的异常以及为精细投喂提供支撑。Måløy 等<sup>[82]</sup>提出了一种双流循环网络, 用于水下视频中鲑(*Salmo*)摄食行为的自动识别。该方法结合卷积神经网络与长短时记忆网络, 通过融合空间与运动信息, 其预测精度达 80%。Han 等<sup>[83]</sup>设计了一种神经网络和时空信息融合的群体行为判别方法, 通过实验室模拟鱼群在缺氧、饥饿和刺激等不同状态下的行为变化, 采集图像数据并训练分类模型, 最终实现精度达 82.5%。赵海翔等<sup>[84]</sup>采用 Bytetrack 多目标跟踪算法, 研究斑马鱼(*Danio rerio*)在暴露于四种污染物(Zn、Pb、Cr 和苯酚) 2 h 后的行为变化, 并分析其异常行为。结果显示, 该算法的追踪精度为 90.26%, 漏检率为 16.33%。

综上, 现阶段鱼类安全监测技术取得了较多的研究成果, 然而, 围绕深远海网箱养殖场景, 鱼类监测的系统问题并未得到较好的解决, 包括腐蚀和污损生物附着导致传感器和结构件难以长期工作; 网络、供电及数据存储等基础设施不全、

检测系统长期运行维护技术缺乏等。后续建议将重点放在全生命周期的鱼类安全监测系统研发上。

## 6 深远海网箱安全养殖发展建议

为促进深远海网箱养殖产业健康可持续发展, 养殖企业应牢固树立安全养殖意识, 最大程度降低深远海网箱养殖风险。为此针对面临最大风险的养殖生产阶段提出以下五点建议:

(1)科学选址, 确保养殖发展。海域选址是否合理决定着养殖的成败, 应对拟设置网箱海域进行充分的海洋环境调查, 掌握该海域的海浪、潮流、水深、水质及底质情况。其中, 海域流速不宜过大, 要满足养殖鱼类的正常生长条件。优先选择具有岛礁遮蔽效应的海域, 有利于日常养殖管理的便利。产业基础及配套条件也是选址时考虑的重要因素。

(2)保障设施安全, 降低养殖风险。无论是重力式网箱还是桁架式网箱, 均应根据拟投放的实际海域工况条件, 参考相关标准规范进行网箱安全的系统设计, 包括网箱主体框架、网衣装配及系泊工艺。应加强新型潜浮式网箱的研发及工程应用, 在台风来临前实现网箱下潜至水面一定深度, 保障台风灾害环境下网箱设施及养殖鱼类的安全。

(3)选择适宜品种, 保障预期效益。应根据海域环境和当地渔业基础考虑适宜深远海养殖的鱼类品种, 优先选择高海况环境适应能力强、游动力强、经济价值高的鱼类品种。针对适养鱼类品种加强养殖全过程精准营养颗粒饲料的研发及应用, 有利于丰富深远海规模化养殖鱼类品种的选择。处于开放海域的网箱设施, 应适当降低放养密度以减少因台风引起鱼类擦伤而导致的养殖损失。

(4)实施智慧管控, 强化运营管理。网箱设施的大型化发展使得智慧化管控方式的重要性凸显, 应加强人工智能和大数据技术在深远海鱼类养殖中的应用, 尤其要尽快实现桁架式网箱网衣破损和鱼类表型智能化监测技术的应用。针对深远海网箱养殖存在的污损生物大量附着的突出问题, 应加强水下洗网装备的研制及应用, 以从根本上



综合解决养殖网衣安全问题。

(5)养殖保险,解决后顾之忧。应加大金融、保险支持深远海养殖发展的力度,深远海养殖规模较大的地市建议出台职责明确、可操作性强的网箱养殖保险方案,由政府补贴大部分保费,养殖户缴纳少部分保费进行 100%的保障,以从根本上打消企业发展深远海养殖的顾虑。针对桁架式网箱平台投入成本大的问题,要强化装备所有权登记,以利于养殖企业办理金融贷款解决资金短缺的问题。

### 参考文献:

- [1] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Ministry of Industry and Information Technology, National Development and Reform Commission, Ministry of Science and Technology, Ministry of Natural Resources, Ministry of Ecology and Environment, Ministry of Transport, and China Coast Guard on accelerating the development of deep sea aquaculture [CP/OL]. [http://www.moa.gov.cn/nybgb/2023/202307/202308/t20230828\\_6435168.htm](http://www.moa.gov.cn/nybgb/2023/202307/202308/t20230828_6435168.htm) [农业农村部. 农业农村部 工业和信息化部 国家发展改革委 科技部 自然资源部 生态环境部 交通运输部 中国海警局关于加快推进深远海养殖发展的意见 [CP/OL]. [http://www.moa.gov.cn/nybgb/2023/202307/202308/t20230828\\_6435168.htm](http://www.moa.gov.cn/nybgb/2023/202307/202308/t20230828_6435168.htm)]
- [2] Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024. [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. 中国渔业统计年鉴-2024[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.]
- [3] Xu H, Chen Z X, Cai J Q, et al. Research on the development of deep sea aquaculture engineering equipment in China[J]. Fishery Modernization, 2016, 43(3): 1-6. [徐皓, 谌志新, 蔡计强, 等. 我国深远海养殖工程装备发展研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(3): 1-6.]
- [4] 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. [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.]
- [5] Zhang Q, Liu S J, Liu L Q, et al. Facilities and equipment status and development trend of deep sea aquaculture in China[J]. Chinese Fisheries Economics, 2023, 41(3): 71-77. [张千, 刘世佳, 刘亮清, 等. 我国深远海养殖设施装备发展现状与趋势[J]. 中国渔业经济, 2023, 41(3): 71-77.]
- [6] Xu H, Liu H, Huang W C. Advances and outlook of offshore aquaculture equipment technology[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(5): 893-902. [徐皓, 刘晃, 黄文超. 深远海设施养殖装备技术进展与展望[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(5): 893-902.]
- [7] Chu S P, Xu Z Q, Tang T L, et al. Vacuum fish pump for deep sea aquaculture platform[J]. Ship Engineering, 2020, 42(S2): 68-71. [楚树坡, 徐志强, 汤涛林, 等. 深远海养殖平台真空式吸鱼泵[J]. 船舶工程, 2020, 42(S2): 68-71.]
- [8] Song L Q. Net cleaning robots drive the construction of blue granary[J]. Robot Industry, 2024(5): 50-52. [松利群. 网衣清洗机器人推动建设蓝色粮仓[J]. 机器人产业, 2024(5): 50-52.]
- [9] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2024, blue transformation in action. [CP/OL]. <https://www.fao.org/publications/fao-flagship-publications/the-state-of-world-fisheries-and-aquaculture/en>.
- [10] Southern Rural News. More than 600 fish cages were damaged in Yangjiang. Typhoon "Siam" severely damaged Yangjiang's fishery, causing losses of nearly 700 million yuan [CP/OL]. [https://dara.gd.gov.cn/ywtdt/snxslb/content/post\\_4605330.html](https://dara.gd.gov.cn/ywtdt/snxslb/content/post_4605330.html). [南方农村报. 阳江 600 多个网箱损毁 台风“暹芭”重创阳江渔业, 损失近 7 亿元 [CP/OL]. [https://dara.gd.gov.cn/ywtdt/snxslb/content/post\\_4605330.html](https://dara.gd.gov.cn/ywtdt/snxslb/content/post_4605330.html).]
- [11] Lin J M. Development status and suggestions for equipped deep-sea aquaculture in Fujian Province[J]. Fishery Modernization, 2024, 51(1): 11-18. [林洁梅. 福建省装备型深远海养殖发展现状及建议[J]. 渔业现代化, 2024, 51(1): 11-18.]
- [12] Cardia F, Lovatelli A. Aquaculture operations in floating-HDPE cages: a field handbook. [CP/OL]. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9137802b-e883-4da6-a04f-918647bd4199/content>.
- [13] Chu Y I, Wang C M, Park J C, et al. Review of cage and containment tank designs for offshore fish farming[J]. Aquaculture, 2020, 519: 734928.
- [14] Kristiansen T, Faltinsen O M. Experimental and numerical study of an aquaculture net cage with floater in waves and current[J]. Journal of Fluids and Structures, 2015, 54: 1-26.
- [15] Lader P F, Enerhaug B. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(1): 79-84.
- [16] Strand I M, Sørensen A J, Volent Z, et al. Experimental

- study of current forces and deformations on a half ellipsoidal closed flexible fish cage[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2016, 65: 108-120.
- [17] Lee C W, Lee J, Park S. Dynamic behavior and deformation analysis of the fish cage system using mass-spring model[J]. *China Ocean Engineering*, 2015, 29(3): 311-324.
- [18] Martin T, Kamath A, Bihs H. A Lagrangian approach for the coupled simulation of fixed net structures in a Eulerian fluid model[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 94: 102962.
- [19] Xie W D, Liang Z L, Jiang Z Y, et al. Hydrodynamic behaviors of a spring-mounted fishing net in wave-current combined flows[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115901.
- [20] Zhao Y P, Li Y C, Dong G H, et al. A numerical study on dynamic properties of the gravity cage in combined wave-current flow[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(17-18): 2350-2363.
- [21] 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.
- [22] Liu H Y, Huang X H, Wang S M, et al. Evaluation of the structural strength and failure for floating collar of a single-point mooring fish cage based on finite element method[J]. *Aquacultural Engineering*, 2019, 85: 32-48.
- [23] Bai X D, Xu T J, Zhao Y P, et al. Fatigue assessment for the floating collar of a fish cage using the deterministic method in waves[J]. *Aquacultural Engineering*, 2016, 74: 131-142.
- [24] Zhang Y, Guo H S, Liu S, et al. Fatigue vulnerability of sea cage to storm wave loads[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2023, 28(1): 153-164.
- [25] Kitazawa D, Mizukami Y, Isobe M, et al. Tank model testing of a fish-cage flotation/submersion system using flexible hoses [A]. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*[C]. Rotterdam: ASME, 2011: 211-218.
- [26] Guo G X, Tao Q Y. Size design of submersible control platform for submersible deep-sea cage[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2005, 25(3): 52-55. [郭根喜, 陶启友. 升降式深水网箱控制平台的尺寸设计[J]. 湛江海洋大学学报, 2005, 25(3): 52-55.]
- [27] Tan Y M, Lou S Y, Yuan S P, et al. Design and simulation of modular automatic lifting deep-sea cage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(11): 196-203. [谭永明, 楼上游, 袁世鹏, 等. 模块化自动升降式深海网箱设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 196-203.]
- [28] Wang F, Bi C W, Zhao Y P. Lifting movement characteristics of submersible net cages under still water and steady currents[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(1): 141-146. [王非, 毕春伟, 赵云鹏. 静水和纯流下可沉浮式网箱升降运动特性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(1): 141-146.]
- [29] Innovasea. Innovasea introduces easy-to-operate submersible fish pen with smooth, simplified buoyancy system. [CP/OL]. <https://www.innovasea.com/wp-content/uploads/2022/08/Innovasea-PR-SeaProtean-Pen-8-31.pdf>.
- [30] National Fisheries Technology Extension Center. Technical models of deep and distant sea facility aquaculture [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2021. [全国水产技术推广总站. 深远海设施养殖技术模式 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.]
- [31] Xu Z J, Qin H D. Fluid-structure interactions of cage based aquaculture: From structures to organisms[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107961.
- [32] Liu H F, Bi C W, Zhao Y P. Experimental and numerical study of the hydrodynamic characteristics of a semisubmersible aquaculture facility in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 214: 1-13.
- [33] Wang Y H, Fu S X, Moan T, et al. Hydroelasticity analysis of a vessel-shaped fish cage under incident, diffraction and radiation wave fields[J]. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2023, 8(4): 418-434.
- [34] Yu Z L, Amdahl J, Kristiansen D, et al. Numerical analysis of local and global responses of an offshore fish farm subjected to ship impacts[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 194: 106653.
- [35] Huang X H, Liu H Y, Hu Y, et al. Hydrodynamic performance of a semi-submersible offshore fish farm with a single point mooring system in pure waves and current[J]. *Aquacultural Engineering*, 2020, 90: 102075.
- [36] Wang F F. Experimental study on dynamic characteristics of deep-sea aquaculture fishery with ship-type truss structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. [王芳芳. 船型桁架结构深海养殖渔场动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.]
- [37] 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. [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.]
- [38] Zhanjiang Daily. China's first self-elevating marine ranching platform, "Zhannong No. 1," has been launched [CP/OL]. [https://www.zhanjiang.gov.cn/zdlyxxgk/xczx/gzdt/content/post\\_1940871.html](https://www.zhanjiang.gov.cn/zdlyxxgk/xczx/gzdt/content/post_1940871.html). [湛江日报. 国内首个自主升降海洋牧场平台“湛农 1 号”下水 [CP/OL]. [https://www.zhanjiang.gov.cn/zdlyxxgk/xczx/gzdt/content/post\\_1940871.html](https://www.zhanjiang.gov.cn/zdlyxxgk/xczx/gzdt/content/post_1940871.html).]

- [39] China Classification Society Guidelines for offshore fish farming facilities [CP/OL]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/specialDetail?id=202401090430124743>. [中国船级社. 海上渔业养殖设施指南 [CP/OL]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/specialDetail?id=202401090430124743>.]
- [40] Sun B, Yu W W, Shi J G, et al. Research progress of high performance netting materials for fishing[J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(6): 1-7. [孙斌, 余雯雯, 石建高, 等. 渔用高性能网衣材料的研究进展[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(6): 1-7.]
- [41] Liu H Y, Pang G L, Xiong Y L, et al. Material mechanics properties and critical analyses of fish farm netting and trusses[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 292: 1-16.
- [42] Wang S M, Shen W, Guo J J, et al. Engineering prediction of fatigue strength for copper alloy netting structure by experimental method[J]. *Aquacultural Engineering*, 2020, 90: 102087.
- [43] Wang S M, Guo J J, Yuan T P, et al. Fatigue test and results analysis of copper alloy netting structure[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(6): 808-818. [王绍敏, 郭杰进, 袁太平, 等. 铜合金网状结构疲劳试验及结果分析[J]. *船舶力学*, 2020, 24(6): 808-818.]
- [44] Chen Y S, Pang G L, Huang X H, et al. Influence of net on structural response of jack-up truss net cage[J]. *South China Fisheries Science*, 2024, 20(1): 43-53. [陈元帅, 庞国良, 黄小华, 等. 网衣对自升式桁架网箱结构响应的影响[J]. *南方水产科学*, 2024, 20(1): 43-53.]
- [45] Liu Y L, Liu W, Wang L, et al. Effects of biological adhesion on the hydrodynamic characteristics of different panel net materials: A BP neural network approach[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(11): 2064.
- [46] Shi J G, Yu W W, Zhao K, et al. Progress in research of antifouling technology of offshore cage netting[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(3): 472-485. [石建高, 余雯雯, 赵奎, 等. 海水网箱网衣防污技术的研究进展[J]. *水产学报*, 2021, 45(3): 472-485.]
- [47] Zhou J L, Liu L, Wang X F, et al. The research progress of fouling organisms in coastal waters of China is reviewed[J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2021, 52(10): 27-32. [周家丽, 刘丽, 王学锋, 等. 中国沿海污损生物研究进展综述[J]. *南方农机*, 2021, 52(10): 27-32.]
- [48] Cornejo P, Guerrero N M, Montes R M, et al. Hydrodynamic effect of biofouling in fish cage aquaculture netting[J]. *Aquaculture*, 2020, 526: 735367.
- [49] Bi C W, Chen Q P, Zhao Y P, et al. Experimental investigation on the hydrodynamic performance of plane nets fouled by hydroids in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 213: 107839.
- [50] Bi C W, Zhao Y P, Dong G H, et al. Drag on and flow through the hydroid-fouled nets in currents[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 161: 195-204.
- [51] Jiang B, Guo Q K, Li Z C, et al. Biofouling of nets is a primary source of cryptocaryoniasis outbreaks in cage cultures[J]. *Aquaculture*, 2022, 550: 737892.
- [52] Wang R T, Chen J J, Gong J B. Acoustic monitoring for ocean aquaculture in sea cage[J]. *Fishery Modernization*, 2012, 39(3): 19-22. [王润田, 陈晶晶, 龚剑彬. 深水网箱养殖中的声学监测问题探讨[J]. *渔业现代化*, 2012, 39(3): 19-22.]
- [53] Ye S, Wang J. Design on cage net crack detecting system of sea cage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(4): 94-96, 118. [叶盛, 王俊. 深水网箱网衣破损监测系统设计[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(4): 94-96, 118.]
- [54] Betancourt J, Coral W, Colorado J. An integrated ROV solution for underwater net-cage inspection in fish farms using computer vision[J]. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(12): 1946.
- [55] Zacheilas T, Moirogiorgou K, Papandroulakis N, et al. An FPGA-based system for video processing to detect holes in aquaculture nets [Z]. 2021 IEEE 21st International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE). 2021: 1-6.10.1109/bibe52308.2021.9635351
- [56] Liao W X, Zhang S B, Wu Y H, et al. Research on intelligent damage detection of far-sea cage based on machine vision and deep learning[J]. *Aquacultural Engineering*, 2022, 96: 102219.
- [57] López-Barajas S, Sanz P J, Marín-Prades R, et al. Inspection operations and hole detection in fish net cages through a hybrid underwater intervention system using deep learning techniques[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(1): 80.
- [58] Tao Q Y, Huang K, Qin C, et al. Omnidirectional surface vehicle for fish cage inspection[A]. proceedings of the OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston [C]. Charleston: IEEE, 2018: 2003-2683.
- [59] Yu G Y, Su J P, Chen Z J, et al. A method for identifying the damage of cage netting based on improved YOLOv7[J]. *Fishery Modernization*, 2023, 50(4): 126-136. [俞国燕, 苏锦萍, 陈泽佳, 等. 基于改进 YOLOv7 的网箱网衣破损识别方法[J]. *渔业现代化*, 2023, 50(4): 126-136.]
- [60] Zhang Z L, Gui F K, Qu X Y, et al. Netting damage detection for marine aquaculture facilities based on improved mask R-CNN[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(7): 996.

- [61] Akram W, Hassan T, Toubar H, et al. Aquaculture defects recognition via multi-scale semantic segmentation[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 237: 121197.
- [62] Lian L K, Zhao Y P, Bi C W, et al. Research on the damage detection method of the plane fishing net based on the digital twin technology[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(6): 40-46. [连栗楷, 赵云鹏, 毕春伟, 等. 基于数字孪生技术的平面渔网破损检测方法研究[J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(6): 40-46.]
- [63] Su B, Bjørnson F O, Tsarau A, et al. Towards a holistic digital twin solution for real-time monitoring of aquaculture net cage systems [J]. *Marine Structures*, 2023, 91.
- [64] Labra J, Zuniga M D, Rebolledo J, et al. Robust automatic net damage detection and tracking on real aquaculture environment using computer vision[J]. *Aquacultural Engineering*, 2023, 101: 102323.
- [65] Spampinato C, Chen-Burger Y-H, Nadarajan G, et al. Detecting, tracking and counting fish in low quality unconstrained underwater videos[A]. *proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications* [C]. Portugal: SciTePress, 2008.
- [66] Ruff B P, Marchant J A, Frost A R. Fish sizing and monitoring using a stereo image analysis system applied to fish farming[J]. *Aquacultural Engineering*, 1995, 14(2): 155-173.
- [67] Zion B, Alchanatis V, Ostrovsky V, et al. Real-time underwater sorting of edible fish species[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 56(1): 34-45.
- [68] Li G, Yao Z D, Hu Y, et al. Deep learning-based fish detection using above-water infrared camera for deep-sea aquaculture: A comparison study[J]. *Sensors*, 2024, 24(8): 2430.
- [69] Sung M, Yu S C, Girdhar Y. Vision based real-time fish detection using convolutional neural network[A]. *proceedings of the OCEANS*[C]. Aberdeen: IEEE, 2017: 1-6.
- [70] Wu R H, Deussen O, Li L. DeepShapeKit: Accurate 4D shape reconstruction of swimming fish[A]. *proceedings of the 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* [C]. Kyoto:IEEE, 2022.
- [71] Wageeh Y, Mohamed H E, Fadl A, et al. YOLO fish detection with Euclidean tracking in fish farms[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2021, 12(1): 5-12.
- [72] Dong J Y, Shangguan X Y, Zhou K M, et al. A detection-regression based framework for fish keypoints detection[J]. *Intelligent Marine Technology and Systems*, 2023, 1(1): 9.
- [73] Liu H Y, Liu T, Gu Y Z, et al. A high-density fish school segmentation framework for biomass statistics in a deep-sea cage[J]. *Ecological Informatics*, 2021, 64: 101367.
- [74] Zhang S, Yang X T, Wang Y Z, et al. Automatic fish population counting by machine vision and a hybrid deep neural network model[J]. *Animals*, 2020, 10(2): 364.[LinkOut]
- [75] Liu H C, Yu Y N, Wang L, et al. Automatic fish counting in aquaculture with dense multi-scale feature aggregation network[A]. *Proceedings of the 2023 42nd Chinese Control Conference (CCC)* [C]. Piscataway: IEEE, 2023: 8246-8251.
- [76] Jing D X, Han J, Wang X D, et al. A method to estimate the abundance of fish based on dual-frequency identification sonar (DIDSON) imaging[J]. *Fisheries Science*, 2017, 83(5): 685-697
- [77] Hamano A, Sasakura T, Namari S, et al. Development of a new monitoring methodology for counting bluefin tuna in net pens[A]. *Proceedings of the 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)* [C]. Piscataway: IEEE, 2018: 1-5.
- [78] Muñoz-Benavent P, Andreu-García G, Valiente-González J M, et al. Enhanced fish bending model for automatic tuna sizing using computer vision[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 150: 52-61.
- [79] Tseng C H, Hsieh C L, Kuo Y F. Automatic measurement of the body length of harvested fish using convolutional neural networks[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 189: 36-47.
- [80] Huang K, Li Y, Suo F, et al. Stereo vision and mask-RCNN segmentation based 3D points cloud matching for fish dimension measurement; *proceedings of the 2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*, F, 2020 [C]. IEEE.
- [81] Zhao S L, Zhang S, Liu J C, et al. Application of machine learning in intelligent fish aquaculture: A review[J]. *Aquaculture*, 2021, 540: 736724.
- [82] Måløy H, Aamodt A, Misimi E. A spatio-temporal recurrent network for salmon feeding action recognition from underwater videos in aquaculture[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 167: 105087.
- [83] Han F F, Zhu J C, Liu B, et al. Fish shoals behavior detection based on convolutional neural network and spatiotemporal information [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 126907-126926.
- [84] Zhao H X, Cui H W, Huang Z M, et al. Application of a bytetrack-based, multi-target tracking algorithm for zebrafish toxicity-response behavior recognition[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, 45(2): 136-149. [赵海翔, 崔鸿武, 黄桢铭, 等. 基于 Bytetrack 的多目标跟踪算法在斑马鱼毒性行为识别中的应用[J]. *渔业科学进展*, 2024, 45(2): 136-149.]



## Review of the major safety issues in offshore net cage aquaculture systems

HUANG Xiaohua<sup>1\*</sup>, LIU Hangfei<sup>1</sup>, PANG Guoliang<sup>1</sup>, LI Gen<sup>1</sup>, YUAN Taiping<sup>1</sup>, HU Yu<sup>1</sup>, TAO Qiyu<sup>2</sup>

1. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Open-Sea Fishery, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Guangdong Province Cage Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510300, China;
2. Key Laboratory of Efficient Utilization and Processing of Marine Fishery Resources of Hainan Province; Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572000, China

**Abstract:** In recent years, large-scale offshore aquaculture dominated by large net cages has achieved remarkable success, thus playing an important role in building a blue granary, expanding the marine aquaculture space, and developing improved productive forces in the marine economy. However, system safety issues in offshore aquaculture practices remain relatively prominent, thereby restricting the high-quality development of the offshore cage aquaculture industry. The present study focuses on the current development status of China's offshore cage aquaculture industry and analyzes the major safety issues faced by cage aquaculture systems from a production perspective, such as structural safety, net damage, and fish monitoring. It provides a detailed overview of both domestic and international technical research and applications regarding the safety design of cage facilities, operational safety of nets, and safety monitoring of cultured fish, and offers relevant recommendations for the safe development of offshore cage aquaculture in terms of scientific site selection, facility safety, species selection, intelligent management, and aquaculture insurance.

**Key words:** offshore net cage; aquaculture system; structural safety; net damage; fish monitoring

**Corresponding author:** HUANG Xiaohua. E-mail: huangx-hua@163.com