

◆智慧渔场构建及其关键技术◆

智慧海洋牧场关键技术研究及应用进展*

文莉莉^{1,2}, 邬满^{1,2**}

(1. 广西科学院, 广西海洋科学院, 广西北部湾碳汇与低碳工程研究中心, 广西南宁 530007; 2. 广西科学院, 广西海洋科学院, 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007)

摘要:随着海洋牧场从农牧化向数字化发展, 智慧海洋牧场关键技术及其应用成为海洋经济发展中最热门的研究领域之一。本文从智慧海洋牧场的概念、架构以及常见的技术出发, 对智慧海洋牧场中的物联网、人工智能模型、自动化养殖设备、数字孪生等关键技术进行总结和回顾, 讨论其研究要点和进展, 并介绍国内外智慧海洋牧场的建设案例, 同时对智慧海洋牧场的发展趋势进行展望。

关键词:智慧海洋牧场; 物联网; 人工智能; 机器学习; 自动化装备; 数字孪生

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2024)04-0365-14

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20241226.001

21世纪是海洋经济时代, 海洋经济在各国国民经济中的地位 and 作用均越来越突出, 但随着经济和捕捞手段的不断发展, 全世界渔业资源正在严重衰退。1971年, 日本最早提出“海洋牧场”概念。1973年, 日本又在冲绳国际海洋博览会上提出: 为了人类的生存, 在人类的管理下, 谋求海洋资源的可持续利用与协调发展。1978—1987年, 日本在全国范围内全面推进“栽培渔业”计划, 并建成了世界上第一个海洋牧场——日本黑潮牧场。日本水产厅还制订了“栽培渔业”长远发展规划, 其核心是利用现代生物工程和电子学等先进技术, 在近海建立“海洋牧场”, 通过人工增殖放流(养)和吸引自然鱼群, 使得鱼群在海洋中也

能像草原里的羊群那样, 随时处于可管理状态^[1,2]。

海洋牧场是养护渔业资源、修复生态环境、实现海洋渔业资源与近海生态系统和谐发展的重要途径, 也是世界发达国家发展渔业、保护资源的主攻方向之一。海洋牧场是基于海洋生态系统原理中生物与环境的相互作用, 在特定海域内, 通过建设人工鱼礁、海藻场、海草床等工程, 构建或修复海洋生物繁殖、生长、索饵和避敌所需的场所, 并结合增殖放流、生物驯化控制、休闲渔业开发、资源环境监测和巡查管护等措施, 实现海域生态环境改善、渔业资源自然增殖及持续健康开发利用的复合型渔业模式^[3]。

联合国粮食及农业组织发布的关于全球农业长期展望报告——《农业: 迈向2015/2030年》联合国

收稿日期: 2024-03-04

修回日期: 2024-05-31

* 国家重点研发计划项目(2022YFD2401200)和广西科技重大专项(桂科 AA22068072)资助。

【第一作者简介】

文莉莉(1988—), 女, 高级工程师, 主要从事智慧海洋、海洋遥感研究。

【**通信作者简介】

邬满(1985—), 男, 正高级工程师, 主要从事智慧海洋、智慧电力研究, E-mail: wuman@gxas.cn。

【引用本文】

文莉莉, 邬满. 智慧海洋牧场关键技术研究及应用进展[J]. 广西科学院学报, 2024, 40(4): 365-378.

WEN L L, WU M. Research and Application Progress on Key Technologies of Intelligent Marine Ranching [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2024, 40(4): 365-378.

粮食及农业组织的观点》^[4], 预测了全球食物、营养和农业发展的趋势, 指出鱼类能够提供全球人类约 16% 的动物蛋白质来源。在海洋强国建设背景下, 积极推动海水养殖由近海走向深远海、由传统养殖走向机械化养殖, 打造“海洋农业”, 是新时代保障国民食物供给、优化膳食结构、促进渔业健康发展、改善海洋环境的重要战略选择。从全球范围看, 已经先后有 30 多个国家和地区开展海洋牧场建设, 其中日本最为成功, 目前已经建立了较为成熟的栽培渔业管理与推广模式^[5]。海洋牧场不仅能够提高养殖产量和效率, 建设“海上粮仓”, 其中的藻类还能捕获大气中的二氧化碳进行固碳, 形成蓝碳生态, 而且能够促进现代信息服务业和滨海休闲旅游业转型发展。

进入 21 世纪以来, 我国沿海各省市充分利用海洋资源, 积极进行人工鱼礁和藻场建设, 大力发展海洋牧场。然而, 随着大规模近海养殖的兴起, 越来越多的问题开始凸显, 如看天吃饭、成本高风险大, 养殖密度缺少科学评估, 粗放型盲养造成环境污染, 缺少监测预警手段, 养殖病害频发, 海洋养殖劳动力日益紧缺等, 严重影响了我国现代化海洋牧场建设的进程。因此, 研究现代化海洋牧场建设关键技术, 利用物联网、大数据和人工智能等信息化技术, 建立智慧海洋牧场多维动态立体监管体系, 促进我国海洋牧场从落后的粗放型养殖向现代化精细管理、智慧渔业转变, 成为当务之急^[6]。

1 智慧海洋牧场相关理论

1.1 海洋牧场的概念

我国水产行业标准《海洋牧场分类》(SC/T 9111-2017) 将“海洋牧场”定义为基于海洋生态系统原理, 在特定海域, 通过人工鱼礁、增殖放流等措施, 构建或修复海洋生物繁殖、生长、索饵或避敌所需的场所, 增殖养护渔业资源, 改善海域生态环境, 实现渔业资源可持续利用的渔业模式。中国科学院海洋研究所杨红生^[7]给出的“海洋牧场”定义为基于海洋生态学原理和现代海洋工程技术, 充分利用自然生产力, 在特定海域科学培育和管理渔业资源而形成的人工渔场。杨红生认为, 海洋牧场由 3 个层次构成, 分别是通过科学管理提升海洋渔业资源的目标层, 包含日常管理、海洋牧场目标、所有权归属、使用苗种、空间布局、饵料供应等 6 个关键要素的基本要素层, 对牧场运作的绩效评估、行为管理、苗种繁育与驯化、生境修复、饵料增殖以及整个系统综合管理的实施操作

层, 具体如图 1 所示。

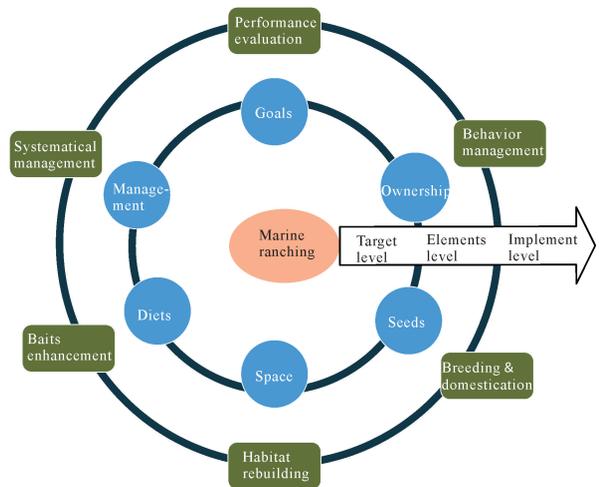


图 1 海洋牧场的六要素^[7]

Fig. 1 Six elements of marine ranching^[7]

海洋牧场建设是一项复杂的系统工程, 涵盖了海洋物理、化学、地质、生物、信息以及建筑工程等多个学科领域^[8]。现代化的海洋牧场建设不仅要提高渔业生产效率, 而且还要提高环境保护意识。为避免建设过程中的盲目性、随意性和片面性, 在着手建设海洋牧场之前, 要对目标海域的独特环境、地形和人文特点有一个全面的认识, 并基于实践经验和试验数据, 制定一套标准化的规范。海洋牧场建成后, 实时监测和评估其养殖状况、水质条件和病害发生情况是确保其健康运行和可持续发展的关键^[9]。因此, 建立智慧海洋牧场监测体系, 实现对养殖情况和生态环境要素的“实时监测+可视化+动态评估”, 是现代化海洋牧场发展的重要方向, 将有助于我们更好地管理和保护海洋资源, 推动海洋牧场的科学发展。

1.2 智慧海洋牧场的基本架构

智慧海洋牧场是一种现代化的海洋牧场, 它利用新一代信息技术, 如物联网、大数据、云计算、人工智能等, 对传统海洋牧场进行升级, 实现海洋牧场的智能化、数字化管理。通过构建海底海上观测监控网络, 实时收集海洋牧场的水质环境数据和视频影像, 再利用智能化系统对这些数据进行处理和分析, 从而实现对海洋牧场的资源管理、环境监测和智能化预警, 达到优化海洋牧场生产流程, 提高生产效率, 减少对环境影响的目的, 实现经济效益、社会效益和环境效益的平衡^[10]。智慧海洋牧场不仅能够提高养殖业的生产水平, 而且还能有效保护和恢复海洋生态环境, 是海洋渔业可持续发展的重要途径; 其在经济效益上也远超传统海洋牧场, 主要表现在以下 6 点: 提

升养殖效率和水质、降低成本、保障养殖安全、促进产业融合、保护生态,以及显著提升经济效益。

从功能上来说,智慧海洋牧场的构建融合了传统海洋牧场的基本构造与先进的信息技术,形成了两个主要的组成部分^[10]:一是传统的海洋牧场模块,它涵盖了人工鱼礁建设、水产养殖、生态维护等基本设施;二是智慧化实现模块,这一模块是智慧海洋牧场的灵魂,它通过信息网的建立,实现环境监测、数据处理、自动控制等智能化功能,使得智慧海洋牧场在运营管理上更加高效、精准。

在物理架构上,智慧海洋牧场进一步细分为软件和硬件两个层面^[11]。软件层面主要包括智慧海洋牧场的建设政策、管理规范、养殖技术指南以及一系列智慧应用软件,这些软件共同支撑起牧场的运营管理体系;硬件层面则由人工鱼礁、传感器网络、信息处理设备等构成,这些硬件设备是收集数据、传输数据、处理数据的基础,对于智慧海洋牧场的运行至关重要。传感器网络作为硬件层面中的关键部分,是智慧海洋牧场区别于传统海洋牧场的核心^[12]。它通过连接各种传感器和设备,实现数据的实时收集、分析和反馈,使得牧场管理者在第一时间内能够做出科学合理的决策。传感器网络的存在,提升了智慧海洋牧场的智能化水平,使得牧场能够自我调节、自我优化,实现牧场资源的可持续利用和生态环境的保护^[13]。因此,传感器网络不仅是智慧海洋牧场的“智慧”体现,而且也是推动海洋牧场向智能化发展的驱动力。

从技术角度来说,智慧海洋牧场的架构主要包括以下4个部分。

(1) 物联感知层。这一层是智慧海洋牧场的物理基础,包括传感设备、网络通信设备、执行设备等。传感设备负责感知海洋牧场中的各种环境数据,包括水质监测传感器、水温监测传感器、氧气浓度监测传感器、pH值监测传感器、光照强度监测传感器等。执行设备用于控制牧场中的设备,比如饲料投放器、水泵等。网络通信设备负责收集、传输传感设备和执行设备的数据。

(2) 数据分析层。这一层是对从物联感知层收集来的数据进行处理和分析的核心层次。数据分析可以使用各种算法和技术来解析收集的数据,生成有价值的信息和数据洞察,例如预测鱼群生长情况、制定饲料投放策略等。

(3) 渲染交互层。这一层结合地理信息系统

(Geographic Information System, GIS)和三维可视化技术,将海洋牧场的相关数据以各种直观的形式呈现给用户;同时,构建海洋牧场数字孪生底座,用户可以对海洋牧场进行模拟实验和预测,从而评估养殖策略的效果并进行优化。通过对渲染交互层进行渲染优化和性能调节,以保证渲染的效果和速度,实现更直观更美观的可视化效果。

(4) 应用服务层。这一层是智慧海洋牧场的最外层,提供各种应用服务和决策支持工具。这些应用服务包括实时监控、远程控制、异常报警等,用于帮助管理者监测牧场的运行状态和远程操作。决策支持工具可以提供基于数据分析和业务模型的智能决策建议,帮助管理者制定科学合理的管理决策。根据数据分析模型的建议,管理者可以制定生产决策,优化生产流程和产品质量,包括饲料投放量、捕捞时间、水质调控等。

这4个层次共同构成了智慧海洋牧场的架构,实现了信息的感知、传输、分析和应用,从而提高了海洋牧场的生产效率、产品质量和可持续性,同时保障了环境和生态的安全^[14-16](图2)。此外,智慧海洋牧场还需要建立数据安全保障机制,确保数据传输和存储的安全性;同时,还需要建立用户管理系统,提供用户登录、权限设置、数据查看等功能,方便用户管理。

2 关键技术分析

智慧海洋牧场是传统海洋牧场与现代信息技术深度融合的产物,其核心特点是智能化、精细化和可视化,是实现海洋牧场资源高效利用、生态环境保护 and 可持续发展的一种现代化海洋牧场管理模式。智慧海洋牧场中常见的技术包括海上物联网技术、人工智能技术、自动化养殖装备、数字孪生技术等^[13,17,18]。

2.1 海上物联网技术

物联网(Internet of Things, IoT)是基于互联网网络,通过射频识别技术(RFID)、传感器、激光扫描、定位系统等传感设备,形成“物—物”“物—网”的相互连接和通信,并实现物体的自动识别、跟踪、定位和监管的一种网络^[19]。海上物联网技术的关键技术包括海上自组网技术、复杂海况下的高可靠通信技术和低功耗的智能传感技术,它赋予传统海洋牧场“智慧”,是海洋牧场实现智慧化的基础,其特点是低功耗、高可靠性、实时性、远程可控、成本可控。通过搭载海上物联网技术,海洋牧场的基础设施与网络互联并进行

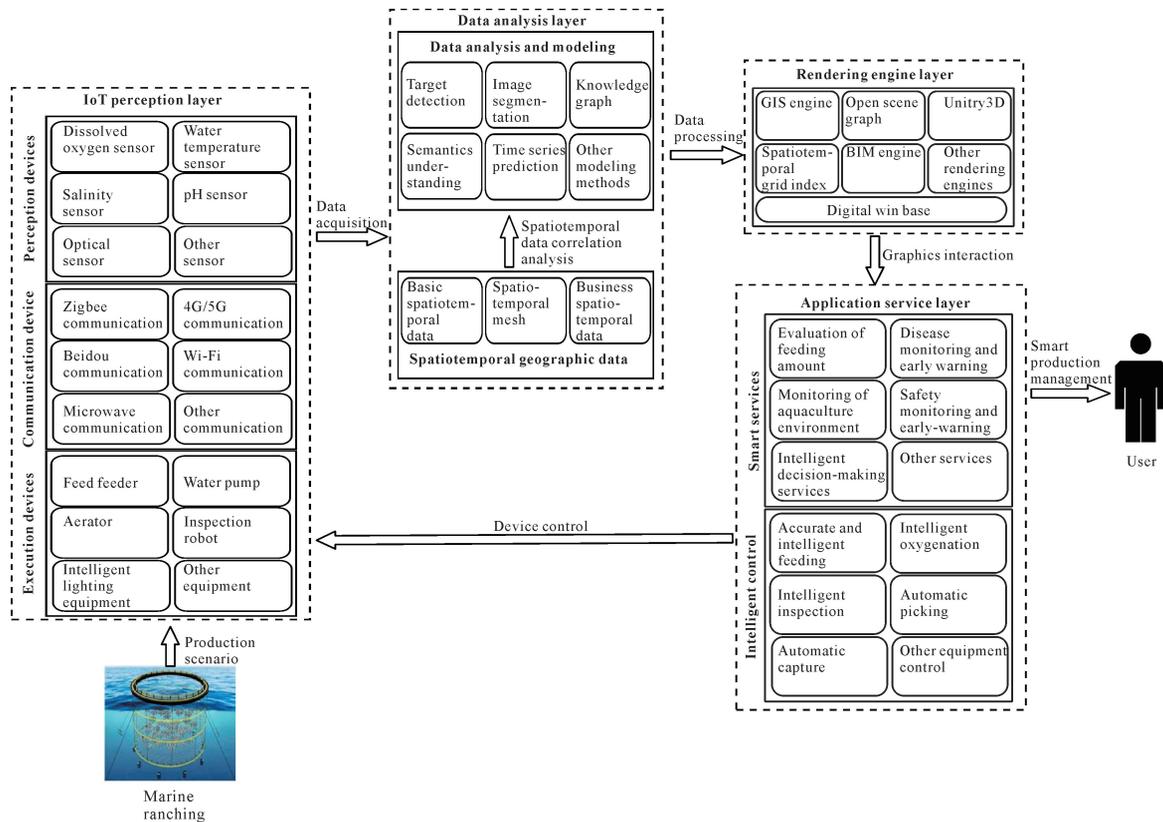


图2 智慧海洋牧场总体架构

Fig. 2 Overall architecture of intelligent marine ranching

信息交换,赋能设备自动化和智能化运行操作。智慧海洋牧场对其相关区域的一切自然元素(气象、水文、水质、生物等)和人为元素(饵料、设备、人工鱼礁、网箱等)进行收集、分析和处理,通过实时感知环境信息和数据交换,实现物与物、物与环境间的信息互动,同时根据感知情况,自主做出科学决策和响应^[20]。

海上物联网技术产品包括具备自清洁功能的水下智能传感器、海上北斗通信设备和多参数水质监测仪等。王强等^[21]提出物联网赋能智慧渔业模式,认为其包括A—F的6个物联网区域模型,A—F分别对应目标对象域、感知控制域、服务提供域、用户区域、运维管理区域、资源交换区域,该模式称之为F域物联网智慧渔业模式,实现了纵向与横向的全产业链交互方式。为了更加准确便捷地监测养殖池塘,Huan等^[22]开发了一种基于窄带物联网技术的水质监测系统,该系统可以存储实时数据并向系统发出指令从而实现智能化控制,解决了传统定点水质监测不能实时反映水质特征的问题。Chang等^[23]研发了一种带洗涤功能的自动给料机的定时旋转板,通过光电传感器发射红外辐射给每个给料机,当传感器下没有鳗鱼聚集时,极少的信号被反射,就会逐渐停止饲养,

这样既节省了饲料也避免了水质污染。Marrazza等^[24]研发了基于多传感器信息融合的机器鱼来实现养鱼场的水质监测。Ubina等^[25]给出了基于智能物联网的智慧养鱼技术框架,主要包括以下4个部分。①物联网设备:包括水下RGB摄像机、声呐摄像机、水质传感器等在水产养殖场地安装的物理设备,另外,饲料机配备了执行器作为控制设备,可以根据鱼类的饱食度来调节分配的饲料量。②数据采集:根据养殖场的实时和历史数据,进行基于IoT设备的数据收集。③数据分析:利用大数据分析技术进行处理,包括数据变换、清理、挖掘、可视化等。④数据应用:将处理后的数据应用于各种养殖场需求,包括鱼类摄食监测、鱼类体型评估、环境监测以及鱼类健康监测等应用程序。

2.2 人工智能技术

人工智能技术的不断进步为海洋牧场养殖带来了新的解决方案,包括海洋灾害智能预警、鱼类病害与健康状态智能识别预警、海水养殖无人值守和智能调控、养殖密度和饵料用量智能评估等,通过智能模型的应用可实现海洋牧场智能化、精细化管理,降低养殖成本和风险,减少损失,提高产量、保证质量。

人工智能技术可确定最佳的养殖区域、饲料投放量和投放时间。Zhou 等^[26]应用光流神经网络生成的光流帧捕捉图像中像素点随时间变化的运动轨迹和速度,用于估计相邻帧之间像素的位移,并输入 3D 卷积神经网络(3DCNN)来评估鱼类摄食强度。Zhou 等^[27]利用近红外成像技术捕捉鱼类进食行为的变化,通过图像增强、背景减弱和对象提取等系列操作获得更清晰的二进制鱼图像,用来准确量化分析鱼类进食行为的变化。Hu 等^[28]研发的 You Only Look Once(YOLO)-V4 的未食用饲料颗粒检测模型可以有效检测水下饲料颗粒,在实际水产养殖环境中其平均检测精度提高 27.21%,计算量减少大约 30%。Føre 等^[29]通过视频处理技术提取鱼类的水下深度和运动速度等信息,并将其转换为反映鱼类进食需求的数据范围,然后结合无人智能进料与自动进料机控制实时进给数量,以实现精准投喂。Papandroulakis 等^[30]开发的自动送料系统是通过机器视觉获取鱼类进食行为后,结合投饵机或移动投饵机器人完成自动上料,可减少 30%—40%的饲养劳动力。

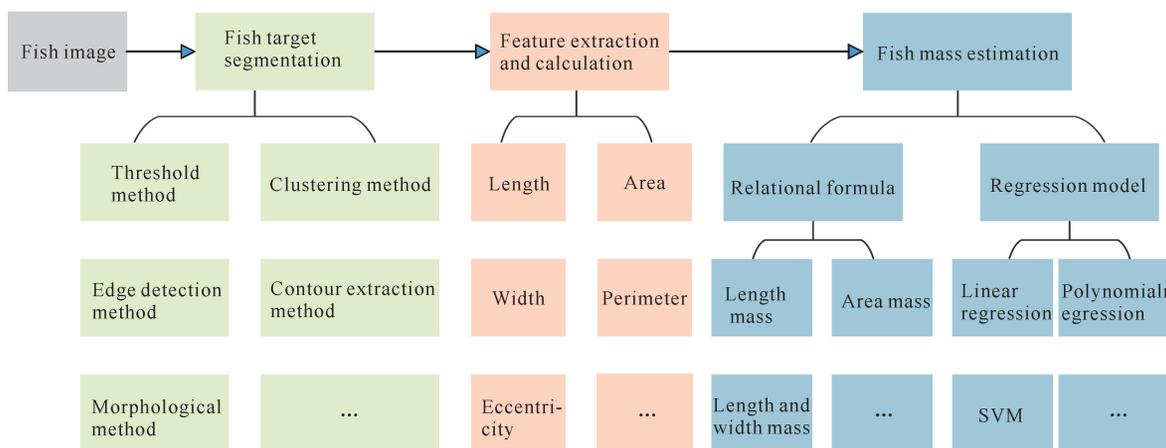


图 3 基于机器视觉的鱼群质量估计方法处理流程^[31]

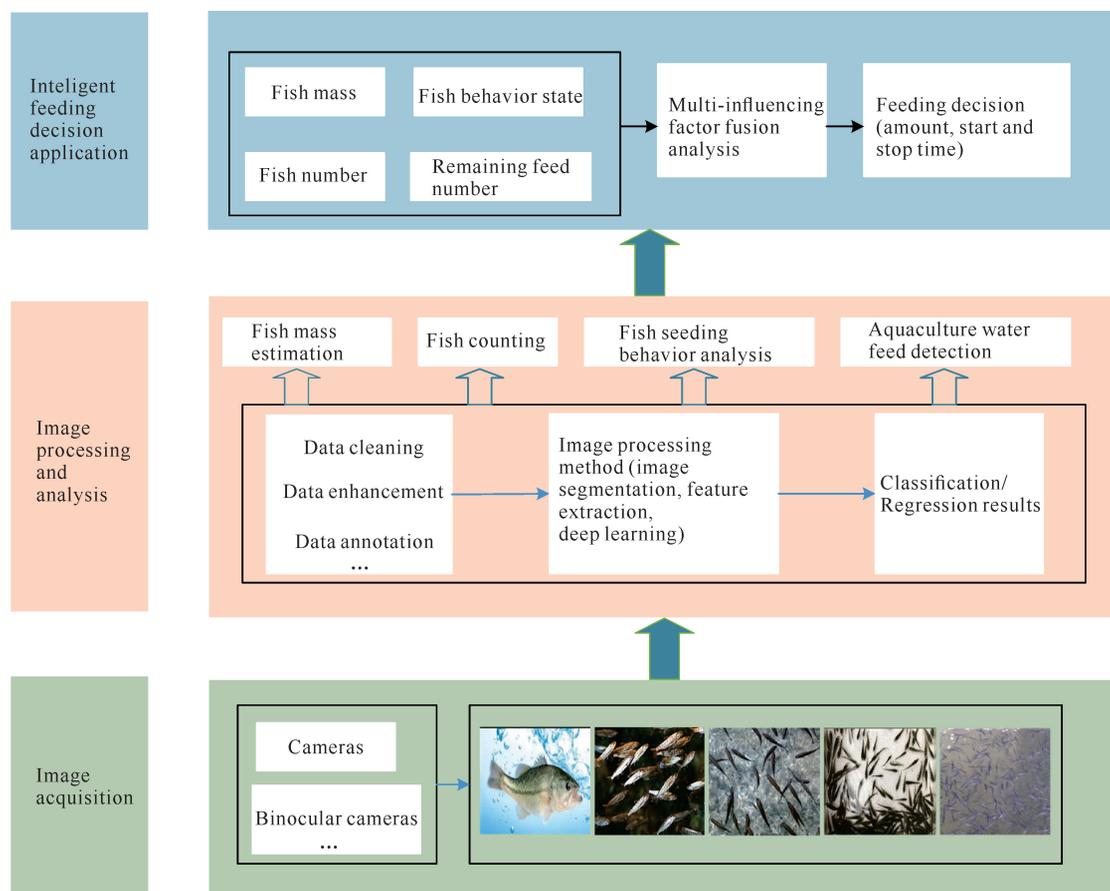
Fig. 3 Process of fish mass estimation method based on machine vision^[31]

2.3 自动化养殖装备

杨红生等^[33]指出,生态海洋牧场的发展趋势是在海洋牧场平台上,搭载养殖所需的各种智能化装备,形成标准化、集约化、智能化养殖模式,在显著提高养殖产出效益的同时降低养殖活动所带来的环境污染。von Borstel 等^[34]开发的机器人系统整合了移动机器人、饲料分发器和人机交互界面,能够准确稳定地处理 6 种不同的饲料。为提升效率,von Borstel 等^[34]还研发了一款用于水质监测的机器人,该机器人需要自主地完成 6 个池塘的水质监测任务,主要包

另一方面,人工智能技术还可实现养殖水体环境、养殖对象生长状态、病害情况的实时监测及智能分析预警。例如,Zhang 等^[31]介绍了一种基于机器视觉的鱼类质量估算方法,通过鱼类体长、体积等特征来估算其质量。如图 3 所示,该方法具体分为以下几个步骤:①图像获取——通过摄像机获取鱼类图像;②图像处理与特征提取——对图像进行处理,提取鱼类的形态特征;③基于机器学习算法的鱼类质量估算——应用机器学习算法,如支持向量机(Support Vector Machine, SVM)和决策树,建立形态特征与鱼类质量的关系模型来估算鱼类质量。不同鱼类需采用特定的特征提取和形态分析方法以及建立相应的关系模型。于港悻^[32]提出了一种基于改进 YOLO v4 模型的鱼类体表疾病检测方法,通过电脑分析视频中的鱼体表异常来评估鱼的健康状况,同时结合数据增强和标注技术,实现对患水霉病、出血病、小瓜虫病、纤毛虫病和本尼登虫病等疾病的鱼类进行检测,减少人工鱼病检测所消耗的人力物力,降低养殖企业的经济损失。

括溶解氧、pH 值、水温等,监测结果表明,该机器人的平均移动速度为 0.19 m/s,标准偏差为 0.004 2 m/s,能代替实验车间人员完成水质测量和投喂任务。Zhang 等^[31]、潘澎^[35]介绍了基于机器视觉的智能鱼类投喂方法,该方法大致可以分为以下 3 个步骤:①图像获取——使用摄像机捕获视频或图像,进行预处理生成数字图像;②图像处理与分析——运用计算机视觉技术提取鱼类特征,如数量、尺寸、位置等,并分析其对饲料的反应;③根据鱼类需求和饲料特性,实现精准定时的智能投喂(图 4)。

图4 基于机器视觉的智能鱼类投喂方法处理流程^[31,35]Fig. 4 Process of intelligent fish feeding method based on machine vision^[31,35]

Wang 等^[36]介绍了一种基于多任务网络的鱼类动态喂养方法,该方法可以动态调整喂养间隔和喂养时间点,从而避免饲料浪费、过度喂养或喂养不足的问题。该方法包含4个步骤:①使用摄像机获取和收集鱼类进食的视频;②从收集到的视频中选择数据并标注,以构建鱼类进食数据集;③基于鱼类进食数据集训练多任务网络,实现对鱼类进食活动和未进食饲料颗粒数量的监测;④通过对鱼类进食活动和未进食饲料颗粒数量的连续分析,实现对鱼类喂养的动态调整。

池涛等^[37]提出一种基于零阶图像矩单目深度测距算法的智能投喂系统,详细分析了目标图像矩与目标距离之间的关系。颜承昊^[38]提出一种基于管线跟踪算法和声呐技术的水下机器人自主巡检网箱的方法,该方法以连续动作空间的马尔可夫决策过程为基础框架,结合强化学习进行训练,使水下机器人能够快速定位网箱中的各个区域,并自主完成巡检任务。

2.4 数字孪生技术

海洋牧场数字孪生技术可以实现对智慧海洋牧

场物理状态的实时展示、远程控制和态势推演,并可结合物联网、人工智能技术实现养殖过程的无人值守、全周期监测和智能调控,降低生产成本和风险(尤其是在极端天气下)。Fore 等^[39]根据数字孪生技术的应用潜力,将其划分为6个不同的能力等级:0-独立型、1-描述型、2-诊断型、3-预测型、4-规定型和5-自主型,具体如表1所示。0-独立型数字孪生:仅基于对系统动态的、已有的知识进行建立,因此不与实际对象/流程相联系。1-描述型数字孪生:利用来自仪器的实时或定期数据,提供资产当前状态的数字表示,可以更深入地了解必要粒度的养殖场的内部运作。2-诊断型数字孪生:如果一个描述型数字孪生足够准确,可以扩展为能够提供例如故障检测等功能并提供一定程度的决策支持的诊断型数字孪生。3-预测型数字孪生:预测型数字孪生具有洞见未来的能力,可以根据现有的数据基础预测系统的未来状态或性能,是独立型、描述型和诊断型数字孪生所不具备的。4-规定型数字孪生:通过估计不同的决策路径来评估不同的决策方案,以最小化潜在风险并提供更佳

表 1 数字孪生的能力等级

Table 1 Capability levels of digital twin

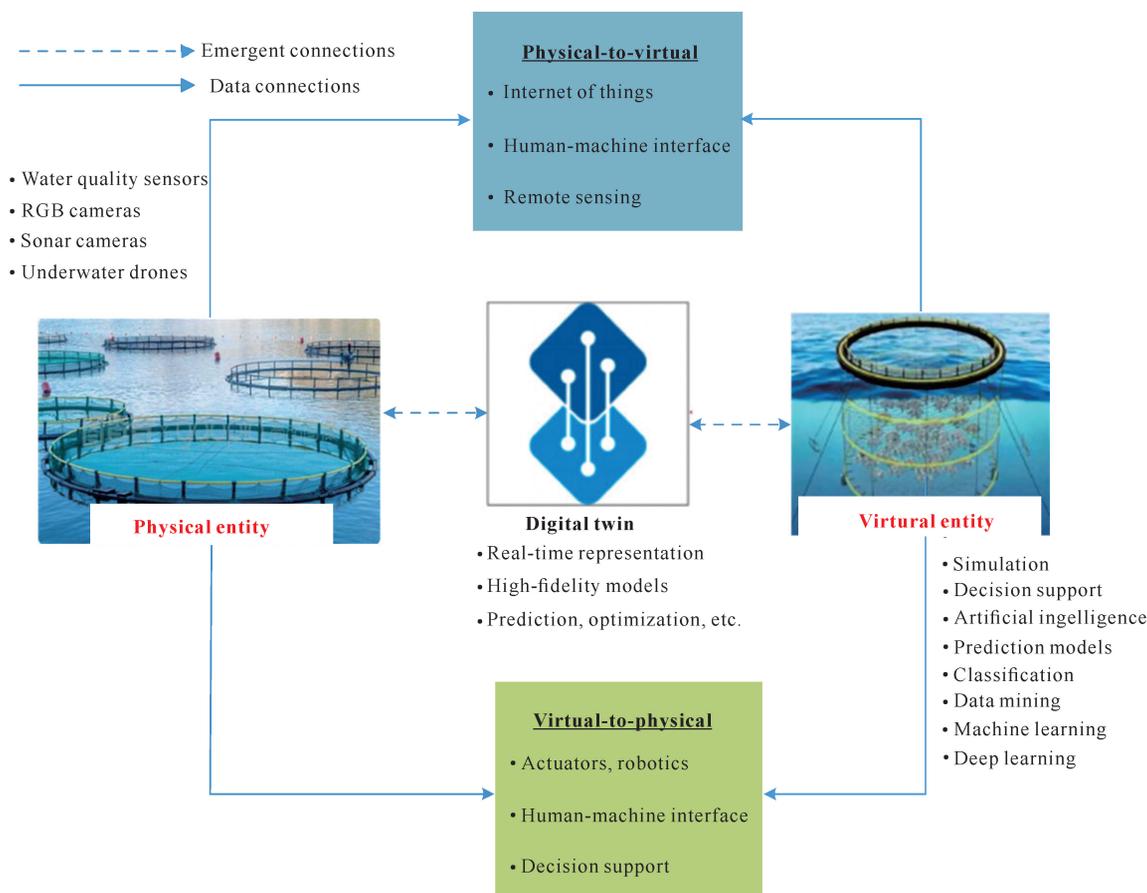
能力等级 Capability levels	等级名称 Level name	特征 Features
0	Standalone	Standalone description of the asset disconnected from the real environment. The physical asset may not yet exist
1	Descriptive	CAD-models and real-time stream of sensor data describe the up to date state of the asset at any point of time
2	Diagnostic	Can present diagnostic information which supports users with condition monitoring and trouble-shooting
3	Predictive	Can predict the system's future states or performance, and can support prognostic capabilities
4	Prescriptive	Can provide prescriptions or recommendations based on what-if analysis and risk assessment/quantification
5	Autonomous	Can replace the user by closing the control loop to make decisions and execute control actions on the system autonomously

的决策方案,也可以用于实时操作和常规维护,在需要大量决策分析的任务中非常有用。5-自主型数字孪生是最高能力等级,可以进行自主决策并实现自适应,以适应不断变化的环境。

海洋牧场数字孪生技术包括面向渔场复杂对象的多粒度数字孪生技术、基于数字孪生的海水养殖无人值守和智能调控技术以及智慧渔场陆海接力全周期数字孪生管理技术等,根据数字孪生技术,可建立智慧海洋牧场数字孪生管理平台、智慧海洋牧场线上交易平台、智慧海洋牧场文旅综合展示平台等。Ubina等^[25]提出一种基于数字孪生技术和物联网的智能养鱼系统,通过数字孪生服务与多个人工智能服务结合,使得决策更为智能,以优化养殖渔场的生产和利润。如图5所示,该系统的硬件设备由物理环境中的传感器和执行器组成,这些设备可以通过与数字孪生模型的交互来收集和處理数据。数字孪生技术由4个主要元素构成:数字孪生服务、数字建模和仿真、高性能计算、人工智能服务。数字孪生服务用于获取实际环境中传感器和执行器中的数据,并提供数据处理和分析,以生成数字孪生数据。数字建模和仿真通过将数据整合到数字孪生模型中来验证和更新模型。高性能计算的目的是使计算机能够处理大量的数据,并为人工智能服务提供资源支持。人工智能服务中包括智能预测、自适应控制、行为分析和推荐等功能,以提高智能养鱼系统的生产效率和经济效益。该系统采用人工智能技术和数字孪生技术来充分利用养殖环境中的各种数据,并为鱼类生产提供更高效和更智能的解决方案。

Su等^[40]提出一种面向水产养殖网箱系统实时监控的整体数字孪生解决方案,通过实时地将传感器数据同化到数值模拟模型中,对真实的网箱系统进行建模,使人们可以更好地预测水体环境的变化,预防鱼类疾病并优化水产品的生产。该方案的建立过程主要分为以下4个步骤:①基于已有的数值和实验研究开发一个全局模型,使其能够模拟海浪、流速、温度和水质溶解氧等多种环境下的因素,以实现网箱系统复杂特性的模拟;②利用一个界面,将传感器数据整合到全局模型中,该界面内嵌在高级通用程序中,并且可以通过消息队列遥测传输协议(Message Queuing Telemetry Transport, MQTT)连接到传感器网络,并基于传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)客户端-服务器实现数据传输;③将无线传感器网络和MQTT相结合,收集现场传感器数据,并将其传输到数值模拟环境中进行处理,实现数字孪生模型对水产养殖网箱系统的实时监控和控制;④利用实时的传感器数据,数字孪生模型可以在数值模拟环境中对系统进行调整和优化,以更好地预测水体环境的变化,预防鱼类疾病并优化水产品的生产。

连栗楷等^[41]提出一种基于数字孪生的网衣破损检测方法,利用传感器代替人工监测,结合数值模拟以及人工神经网络技术来开发渔网的数字孪生体,数字孪生体根据网衣的拉力传感数据进行平面渔网的破损检测,解决了传统的水下网衣破损检测方法劳动强度大且效率低的缺陷问题,其平均识别准确率为94.32%。该方法包括以下2个步骤:首先建立网衣

图5 水产养殖数字孪生技术框架^[25]Fig. 5 Digital twin technology framework for aquaculture^[25]

数值模型,根据各种波浪条件以及网衣的破损情况获得力学仿真数据集;然后建立神经网络算法进行网衣破损识别训练,从而构建网衣的数字孪生体。在实时监测阶段,根据网衣物理实体的实时传感数据,数字孪生体可以快速识别网衣是否发生破损。

3 智慧海洋牧场建设案例

3.1 国外智慧海洋牧场建设案例

(1) 挪威

挪威海弗鲁湾海域的“海洋渔场1号”是世界首座、规模最大、自动化程度最高的深海养殖平台,由原中国船舶重工集团有限公司旗下武昌船舶重工集团有限公司总承包并建造。这个现代化平台装备了2万多个传感器和100多个监控设备,实现了从鱼苗投放、喂食到渔网清洗等操作的智能化与自动化^[42,43]。该项目是挪威萨尔玛集团战略发展的一项重要举措,得到了挪威政府的支持,目的是将三文鱼养殖从近海转移到远海,以减少对近海环境的影响并提高养殖效率。这个项目由多家公司合作,其中主体结构 and 重要系统的制造组装是在中国完成的,这标志着中国制造

在高端海洋工程领域的突破。具体来看,“海洋渔场1号”的特点如下。

①结构设计方面。与传统网箱式结构相比,半潜式设计提供了更高的稳定性和耐久性。渔场直径达到110 m,总高69 m,容量为250 000 m³,这使得它能够在开放海域中养殖大量三文鱼。

②技术创新方面。渔场采用了智能化信息技术,可以实现规范化和智能化的建设与管理。利用大数据挖掘技术,形成了一套专家知识库和方法体系,以“智慧”和“自进化”的方式参与解决海洋牧场建设和管理中的问题。搭载尖端科技的“海洋渔场1号”拥有全球领先的三文鱼智能养殖系统,包含高度自动化的支持设施和深海运营管理体系。这一整套系统简化并精准化了养殖流程,包括自动鱼苗投放、智能喂食、持续监控与网具自动清洗等关键环节。创新技术使该平台能够突破挪威传统的近海养殖限制,在深度为100—300 m的开放海域中进行养殖作业,且保持了低于2%的死亡率。

③生态效益方面。通过将养殖活动转移到远海,可以减少对近海生态环境的影响,同时提高养殖鱼类

的生存率和生长速度。

④经济效益方面。“海洋渔场1号”设计容量允许9名工作人员在深海环境中进行长期作业和生活。每个养殖季节,它有能力培育多至150万条三文鱼,产量大约8000 t,从而创造出超过1亿美元的高产值。

综上所述,挪威的智能化海洋牧场建设在技术、生态和社会经济方面都取得了显著成就,为全球海洋经济的发展提供了宝贵的经验和范例。

(2) 日本

日本在多个海洋牧场相关技术领域处于全球领先地位,涵盖了人工鱼礁的构建、海藻场和海中林的创建、海洋生物增殖与释放、鱼类行为控制技术、选择性捕捞工具的开发以及渔业海域环境的监测与评估等方面。在20世纪90年代初,日本开展了一项音响驯化型海洋牧场的创新性研究,该研究利用鱼类对声音的敏感性,通过在水下播放特定的声音信号,并结合定时投喂,成功训练了鱼类遵循声音指令进行集群或散开。基于这一研究成果,日本在新潟佐渡、宫城气仙沼、广岛竹原和三重五所湾等地建设了音响海洋牧场。在这些牧场中,研究人员对黑鲷 *Acanthopagrus schlegelii*、黑鲷 *Gymnocorymbus ternetzi*、牙鲆 *Paralichthys olivaceus* 等种类的鱼进行了专门的训练,在利用声音信号驯化鱼类方面取得了显著的成效^[44,45]。

大分县作为日本第二大养殖渔业中心,于2018年启动了一项IoT发展计划。在水产养殖领域,该县采纳了创新企业Umitron提供的UmiGarden系统服务,旨在通过技术手段透明化通常不可见的水下养殖环境,提升喂食效率,并通过互联网将数据上传至太空,实现科技在海、陆、空3个层面的综合应用。UmiGarden系统的核心是一个内置摄像头的自动喂食装置,安装在现有的养殖结构上。该装置通过网络连接,利用人工智能进行监控,确保鱼饵不会被海流带走。养殖户可以通过智能手机接收所有的数据和实时视频,同时还可以将自己的经验输入系统,供人工智能学习。这使得养殖渔户能够根据这些数据调整饲料的投放量,并选择合适的捕捞时机,以避免因天气原因导致的损失,如冻死等^[46]。

目前,日本利用先进技术优势不断推进海洋牧场的发展,依托人工智能领域技术优势,建设海洋牧场水下机器人、水下监控设备,及时反馈鱼礁信息、水质变化、设备运行情况等。日本还开展了立体化养殖的

探索,向深水区域拓展。

(3) 美国

卡特琳娜海洋牧场自2012年成立以来,位于距离其圣佩德罗总部大约9.66 km的联邦水域内,是美国首个离岸牧场。初创企业Aquatech募集了380万美元资金,从2018年开始,在其约404700 m²的牧场区域内成功养殖了数百万只贻贝。该企业计划进一步扩张,使养殖面积达到4047000 m²,以养殖更多种类的双壳贝类和海带。卡特琳娜海洋牧场还与美国国家海洋和大气管理局(NOAA)以及其他科研机构合作,推出了一个名为海洋物联网的项目。该项目以一个海军海洋气象自动装置(NOMAD)浮标为核心,收集并传输关键海洋数据,这些数据不仅用于评估环境影响,而且还用于农业作业的优化^[47]。此外,该项目还配备了一种称为“图像流细胞机器人”的潜水装置,它通过机载显微镜和机器视觉技术分析水中的颗粒,并作为一种早期预警系统,监测有害藻类的繁殖情况。

2018年,美国农业食品巨头嘉吉公司推出一款渔业物联网监测平台,该平台通过移动设备和传感器来监测海洋牧场的环境数据、鱼虾的体型和喂食模式,并通过卫星将数据传输回总部^[48]。另外,美国伍兹霍尔海洋生物学实验室运用最新的生物干扰技术,成功地培育出一种可被放牧的鱼类。这种鱼能够根据声音或其他信号,在规定的时间内自主游向指定区域,按预定的时间和路线进食定量食物,之后再返回固定区域,使得饲养者能够自如地管理和放牧鱼群。

3.2 国内智慧海洋牧场建设案例

(1) 乐东龙栖湾国家级现代智慧海洋牧场

乐东龙栖湾国家级现代智慧海洋牧场是一个综合性的现代海洋产业基地,项目总投资50亿元,该基地融合了绿色智能装备、生态养殖渔场和观光旅游等模板。2022年,海南首个半潜式抗风浪绿色智能养殖休闲旅游平台——“普盛海洋牧场1号”在该基地下水投产,这一平台不仅是华南地区首个获得中国船级社(CCS)入级证书的海洋牧场养殖装备,而且它的问世也是该研究领域的一个重要里程碑。2023年,乐东龙栖湾国家级现代智慧海洋牧场继续扩展其规模与能力,第二座半潜式深远海智能养殖旅游平台“普盛海洋牧场3号”开始投入生产与运营。在养殖作业上,普盛海洋牧场利用其先进的智能化设备,精准监测水温、水质、潮汐等关键参数,通过科学方法规划饲料投放和氧气供应等关键环节,显著提高了渔获

量^[49]。这些智能化设备的应用和科学技术的采纳,不仅提升了养殖效率,而且也显著改善了养殖产品的质量。

(2)“耕海1号”

“耕海1号”在烟台市莱山区渔人码头以东20 km的海域,是全国首个智能化大型生态海洋牧场综合体平台^[50]。该平台作业水深约10 m,水平面40 000 m²,共400 000 m³水体,是世界上最大的单体养殖水体。该平台集成了一系列先进技术与装备,实现了智能化管理、生态可持续发展以及产业多样化。在智能化方面,平台装备了自动投饵、5G通信和安全管理等系统,借助科技革新提高了渔业养殖的效率,并推动了海洋渔业的转型与升级。在生态化建设方面,平台运用了清洁能源、排污处理和海水淡化等环保技术,贯彻了绿色生态保护的理念,加强了海洋生态环境保护并促进可持续发展。产业多元化则体现在平台采用了第一、第三产业融合发展的策略,将渔业养殖、智慧渔业、休闲旅游、科技研究与科普教育等功能有效整合,打造了一种新型的装备型海洋牧场模式。其中,基于5G技术的自动投饵系统能够实时分析风浪和水流数据,精确调整喂食位置、距离和速度,从而减少80%以上的饲料浪费、降低60%以上的劳动力成本。此外,项目还建立了5G鱼病专家远程会诊系统^[51],通过高清显微视频传输,让专家能够远程诊断,这一创新将平台整体的养殖成活率提升至98%,为高效率养殖提供了强有力的数据支持。

(3)“长鲸1号”

“长鲸1号”是全球首个深水坐底式养殖网箱及首个实现自动提网功能的大网箱,由中集来福士海洋工程有限公司设计建造,在山东烟台交付使用^[52]。该网箱采用了稳固的四边形钢结构,最大工作深度可达30.5 m,提供了60 000 m³的巨大养殖空间,预计其年产量能够达到1 000 t鱼类。此外,该网箱设计长达10年的使用寿命,效能相当于100个常规的高密度聚乙烯网箱。该网箱集成了多项自动化技术,包括网衣的自动提升、精准的自动投饵系统以及水下监测设备,使得日常运营仅需4名工作人员即可轻松管理。利用大数据技术,该网箱能够实时提供海洋水文信息,成为全国首个能与保险公司共享实时监测数据的海洋养殖网箱,可实现自动投饵、水下自动清洗渔网和网衣自动提升,推动了海洋牧场从近海向深海的转型。

(4)“澎湖号”

“澎湖号”是由中国科学院广州能源研究所研建,中华人民共和国自然资源部海洋可再生能源资金、广东省级促进经济发展专项资金(现代渔业发展用途)支持,在珠海桂山渔场进行了实际海况下的养殖示范,是全球首个半潜式波浪能发电的养殖网箱。平台长66 m、宽28 m、高16 m,具有12 m的工作吃水深度,能够提供15 000 m³的养殖容量。它适用于15—100 m水深的海域,并设计有长达20年的使用寿命。平台上装备有自动投饵机、鱼群监控系统、水体监测设备、活鱼传输设施以及制冰机等现代化渔业生产工具——自动投饵机提升了饲料投放效率,对鱼群的实时监测保障了养殖环境的稳定与健康,而制冰冷藏设备则实现了从养殖到市场的直接供应链^[53,54],使得该平台实现了智能化养殖,极大减少人力需求,仅一人即可管理整个平台。

(5)“振鲍1号”

“振鲍1号”是由上海振华重工(集团)股份有限公司和福建中新永丰实业有限公司联合研发、上海振华重工启东海洋工程股份有限公司建造的、我国首创的深远海机械化养殖平台^[8]。平台总投资约1 000万元,其核心组成包括浮体结构、养殖网箱、上部框架、水下框架以及机械提升装置等五大关键部分。该平台设计有极高的耐久性,能够抵御12—15级台风的冲击,并能够容纳近5 000个鲍鱼养殖箱,预计单台年产量能达到约12 t。平台配备了远程监控系统、水质监测系统和赤潮防护系统等一系列智能化设施,并充分利用海上风力资源,采用风力发电系统为鲍鱼养殖提供绿色能源,以达到节能环保的目的。平台克服了传统养殖方式在抗风浪能力上的不足,使得现有的近海养殖区域得以扩展至深远海域^[51]。它响应了国家沿海环境保护政策的要求,通过机械化手段,不仅有效减轻了工人的劳动强度,而且还大幅度提升了养殖效率。

4 智慧海洋牧场建设存在的问题

4.1 缺乏拥有自主知识产权的装备体系

目前,伴随着海洋科技的突飞猛进,智慧海洋牧场建设长期积累的问题逐渐浮出水面,最明显的“瓶颈”是海洋装备。我国海洋科技领域的装备严重依赖进口,进口比例超过70%,尤其在观测精度、探测深度和研究尺度上明显落后于日本和欧美国家。总之,目前我国海洋探测和监控能力较弱,缺乏自主知识产

权的高端技术, 尚未形成综合性、系统性、国产化的海洋科研装备研发和产业化体系。因此, 需要加大对智慧海洋牧场领域的科研投入, 提升自主研发能力, 培养具备国际竞争力的装备供应商。同时, 政府可以出台相关政策, 鼓励企业进行研发创新, 加强产学研合作, 推动高端装备自主化发展。

4.2 防污防生物附着技术有待突破

海洋环境中存在大量浮游生物和海洋生物, 它们容易附着在设备表面, 导致水流阻塞、设备损坏、数据采集不准确等问题。针对这些问题, 可以通过研发新型防污防生物附着材料, 如特殊涂层、纳米材料等, 提高设施的抗污染和抗生物附着性能。同时, 可以引入先进的清洁技术, 如超声波清洗、激光清洗等, 定期对设施进行清洁和维护, 减少生物附着的影响。

4.3 投资回报周期与设备使用寿命之间的冲突

智慧海洋牧场建设需要大量的资金投入用于技术升级、设备改造等, 投资回报周期较长, 可能面临资金压力和投资风险; 而且由于海洋牧场中的高湿高盐环境, 导致养殖平台、养殖装备、监测设备的使用寿命会大幅度缩短。因此, 需要通过合理规划提高管理效率、通过防腐技术延长设备使用寿命、通过批量化/标准化生产降低生产成本等方式, 优化和平衡投资回报周期与设备使用寿命之间的关系, 尽可能地提升养殖产出量和利润空间。

5 智慧海洋牧场发展前景

综上所述, 智慧海洋牧场相比传统海洋牧场在经济效益上会有大幅度提高, 主要体现在以下6个方面。①提高养殖效率和水产品质量: 智慧海洋牧场通过水质传感器实时收集数据, 并结合人工智能算法模型智能调节水质, 确保养殖环境最优, 从而提升养殖效率和水产品质量。②降低经营成本: 智慧海洋牧场利用智能化投喂、清洁等自动化设备, 减少人工成本, 同时通过精确控制饲料投放和水质管理, 降低饲料成本和能耗, 从而提高整体经济效益。③保障养殖安全: 通过智能监控系统, 智慧海洋牧场能够实时监测养殖环境和生物状态, 及时发现并处理问题, 减少鱼病发生并降低损失, 保障养殖安全。④促进产业融合发展: 智慧海洋牧场的建设有助于推动一二三产业融合发展, 延伸和优化海洋渔业产业链、价值链, 提升海洋渔业增值空间。⑤保护海洋生态环境: 智慧海洋牧场通过养殖尾水处理系统和清洁能源的使用, 减少对海洋环境的污染, 实现可持续发展。⑥经济效益显

著: 据统计, 在拥有大量国家级海洋牧场的省份, 海洋牧场建设资金的投入和综合经济收入均表现出显著增长。因此, 智慧海洋牧场通过技术创新和管理优化, 实现了养殖效率、经营成本、产品质量、安全保障、产业融合和生态保护等多方面经济效益的提升。

2023年中央一号文件指出, 建设现代海洋牧场, 发展深水网箱、养殖工船等深远海养殖。全国各地迅速响应, 山东、福建、浙江、海南、广东等省区勇当排头兵, 坚持创新驱动、强化科技支撑, 做大做强深远海养殖产业。2023年4月习近平总书记在湛江市考察时强调, 中国是一个有着14亿多人口的大国, 解决好吃饭问题、保障粮食安全, 要树立大食物观, 既向陆地要食物, 也向海洋要食物, 耕海牧渔, 建设海上牧场、“蓝色粮仓”; 要大力发展深海养殖装备和智慧渔业, 推动海洋渔业向信息化、智能化、现代化转型升级。2023年6月9日, 农业农村部、国家发展改革委、财政部、自然资源部印发我国首部设施农业规划——《全国现代设施农业建设规划(2023—2030年)》, 规划指出, 到2025年建设完成40个深远海大型智能化养殖渔场。2024年中央一号文件指出, 支持深远海养殖。深远海养殖是一个综合体系, 建设深远海海洋牧场, 离不开安全可靠的海洋装备和智能化管理技术手段。另外, 随着大型养殖平台、养殖工船等技术装备的发展, “海洋牧场+”融合发展也是未来海洋牧场的一个重要发展模式^[55], “海洋牧场+风电”“海洋牧场+光电”“海洋牧场+文旅”以及“鱼虾混养”“多品种轮养”“立体分层养殖”等新模式, 必将给海洋牧场的发展注入新的活力。

因此, 智慧海洋牧场具有广阔的发展前景, 主要体现在: ①世界各沿海国家对海洋经济的发展都非常重视, 海洋牧场作为海洋经济的重要组成部分, 得到了政策的重点支持。随着政策的逐步落地, 智慧海洋牧场的市场空间将会进一步扩大。②随着生活水平的提高, 人们对海产品的需求越来越大, 对品质的要求也越来越高。智慧海洋牧场由于其高效率、高品质、可持续等优势, 能够满足市场的需求, 具有广阔的市场前景。③智慧海洋牧场能够实现资源的可持续利用, 减少过度捕捞对海洋生态系统的破坏, 符合可持续发展的理念, 因此受到了广泛的关注。④智慧海洋牧场的建设和发展, 有望带来更多的国际合作机会。我国在这方面的技术和经验已经得到了国际的认可, 有望吸引更多的国际投资和合作项目。⑤智慧海洋牧场的发展, 有望带动相关产业链的发展, 包括

但不限于装备制造、信息技术、海洋生物医药、食品加工等产业。因此,随着技术的不断进步和社会对海洋资源可持续利用意识的提高,具有养殖效率高、养殖成本低、抗风险能力强等诸多优势的智慧海洋牧场,将成为未来海洋产业发展的重要方向,具有显著的优势和广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 陈丕茂,舒黎明,袁华荣,等. 国内外海洋牧场发展历程与定义分类概述[J]. 水产学报,2019,43(9):1851-1869.
- [2] LAIKRE L, SCHWARTZ M K, WAPLES R S, et al. Compromising genetic diversity in the wild: unmonitored large-scale release of plants and animals [J]. Trends in Ecology & Evolution,2010,25(9):520-529.
- [3] KIRKBRIDE-SMITH A E, WHEELER P M, JOHN-SON M L. Artificial reefs and marine protected areas: a study in willingness to pay to access Folkestone Marine Reserve, Barbados, West Indies [J]. PeerJ, 2016, 4: e2175.
- [4] BRUINSMA J. World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective [M]. London: Earthscan Publications Ltd., 2003.
- [5] 沈家迪. 互联网+背景下舟山海洋牧场海水养殖产品营销策略研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2017.
- [6] 杨红生,霍达,许强. 现代海洋牧场建设之我见[J]. 海洋与湖沼,2016,47(6):1069-1074.
- [7] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016,40(7):1133-1140.
- [8] 徐晓荣. 智慧型海洋牧场发展研究[J]. 南方农机,2023, 54(5):167-169,192.
- [9] 杜元伟,曹文梦. 中国海洋牧场生态安全监管理论框架体系[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(1):182-191.
- [10] 王恩辰,韩立民. 浅析智慧海洋牧场的概念、特征及体系架构[J]. 中国渔业经济,2015,33(2):11-15.
- [11] 王佳,欧春尧,宁凌. “互联网+海洋渔业”:智慧海洋渔业模式创新路径研究[J]. 农村经济与科技,2017, 28(13):75-77.
- [12] 侯雪燕,洪阳,张建民,等. 海洋大数据:内涵、应用及平台建设[J]. 海洋通报,2017,36(4):361-369.
- [13] 程骏超,何中文. 我国海洋信息化发展现状分析及展望[J]. 海洋开发与管理,2017,34(2):46-51.
- [14] 赵建华,李洪进. 渔业信息化与渔业现代化[J]. 北京水产,2007(2):1-3.
- [15] 杨军,苏延明,田涛,等. 海洋牧场标准化体系构建的初步研究[C]//第二届现代化海洋牧场国际学术研讨会、中国水产学会渔业资源与环境专业委员会2018年学术年会论文集.[出版地不详:出版者不详],2017:2.
- [16] 于喆,吉光,刘修泽. 基于水下物联网技术的智慧海洋牧场建设[J]. 无线互联科技,2022,19(19):156-160.
- [17] 孙书贤. 建设海洋牧场 发展新型生态渔业[J]. 海洋开发与管理,2005,22(6):81-83.
- [18] 杨红生,赵鹏. 中国特色海洋牧场亟待构建[J]. 中国农村科技,2013(11):15.
- [19] 陈笑冰,潘秀莲,丁金强. 物联网技术在山东现代渔业发展中的应用研究[J]. 中国水产,2022(12):68-71.
- [20] 颜慧慧,王凤霞. 中国海洋牧场研究文献综述[J]. 科技广场,2016(6):162-167.
- [21] 王强,高东燕,翁士增. 物联网技术赋能智慧渔业的模式探究[J]. 物联网技术,2023,13(4):67-70.
- [22] HUAN J, LI H, WU F, et al. Design of water quality monitoring system for aquaculture ponds based on NB-IoT [J]. Aquacultural Engineering, 2020, 90: 102088.
- [23] CHANG C M, FANG W, JAO R C, et al. Development of an intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel [J]. Aquacultural Engineering, 2005, 32(2):343-353.
- [24] MARRAZZA G, RAVALLI A, ROSSI C. Fish robot based on chemical sensors for water monitoring [C]// LEONE A, FORLEO A, FRANCIOSO L, et al. Sensors and microsystems. AISEM 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 457. Cham: Springer International Publishing, 2018:59-64.
- [25] UBINA N A, LAN H Y, CHENG S C, et al. Digital twin-based intelligent fish farming with Artificial Intelligence Internet of Things (AIoT) [J]. Smart Agricultural Technology, 2023, 5: 100285.
- [26] ZHOU C, XU D, CHEN L, et al. Evaluation of fish feeding intensity in aquaculture using a convolutional neural network and machine vision [J]. Aquaculture, 2019, 507:457-465.
- [27] ZHOU C, ZHANG B, LIN K, et al. Near-infrared imaging to quantify the feeding behavior of fish in aquaculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 135:233-241.
- [28] HU X, LIU Y, ZHAO Z, et al. Real-time detection of uneaten feed pellets in underwater images for aquaculture using an improved YOLO-V4 network [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185(8): 106135.
- [29] FØRE M, ALFREDSEN J A, GRONNINGSATER A. Development of two telemetry-based systems for monitoring the feeding behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in aquaculture sea-cages [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(2):240-251.

- [30] PAPANROULAKIS N, DIMITRIS P, PASCAL D. An automated feeding system for intensive hatcheries [J]. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26(1): 13-26.
- [31] ZHANG L, LI B, SUN X, et al. Intelligent fish feeding based on machine vision: a review [J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 231: 133-164.
- [32] 于港悻. 基于深度学习的网箱养殖鱼类体表疾病自动监测研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- [33] 杨红生, 江春嬉, 张立斌, 等. 试论数字赋能助力水域生态牧场建设[J]. *水产学报*, 2023, 47(4): 89-97.
- [34] VON BORSTEL L F D, DE LA ROSA A E, SUAREZ N J, et al. Robotic system for automation of water quality monitoring and feeding in aquaculture shadehouse [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2016, 47(7): 1575-1589.
- [35] 潘澎. 海洋牧场: 承载中国渔业转型新希望[J]. *中国水产*, 2016(1): 47-49.
- [36] WANG Y, YU X, LIU J, et al. Dynamic feeding method for aquaculture fish using multi-task neural network [J]. *Aquaculture*, 2022, 551: 737913.
- [37] 池涛, 庞云剑, 沈晓晶. 水产养殖智能投喂系统中单目视觉测量的研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(6): 980-985.
- [38] 颜承昊. 基于强化学习的海洋牧场自主网箱巡检研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023.
- [39] FØRE M, ALVER M O, ALFREDSEN J A, et al. Digital twins in intensive aquaculture: challenges, opportunities and future prospects [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 218: 108676.
- [40] 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: 103469.
- [41] 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.
- [42] 唐启升. 渔业资源增殖、海洋牧场、增殖渔业及其发展定位[J]. *中国水产*, 2019(5): 28-29.
- [43] BELL J D, LEBER K M, BLANKENSHIP H L, et al. A new era for restocking, stock enhancement and sea ranching of coastal fisheries resources [J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2008, 16(1/2/3): 1-9.
- [44] 梁君, 毕远新, 周珊珊, 等. 刍议海洋牧场的概念和英文表达[J]. *中国渔业经济*, 2017, 35(2): 12-17.
- [45] FAO. *Marine ranching: global perspectives with emphasis on the Japanese experience* [M]. Rome: Food and Agriculture of the United Nations, 1999.
- [46] 刘卓, 杨纪明. 日本海洋牧场(Marine Ranching)研究现状及其进展[J]. *现代渔业信息*, 1995, 10(5): 14-18.
- [47] BORN A F, IMMINK A J, BARTLEY D M. Marine and coastal stocking: global status and information needs [M]//BARTLEY D M, LEBER K L. *Marine ranching*. Rome: FAO, 2004: 1-18.
- [48] LAIKRE L, SCHWARTZ M K, WAPLES R S, et al. Compromising genetic diversity in the wild: unmonitored large-scale release of plants and animals [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(9): 520-529.
- [49] 龙巍, 张植凡. “海上粮仓”海南首座智能养殖旅游平台在广州南沙交付[J]. *珠江水运*, 2022(6): 51.
- [50] 王伟. 山东海洋与中集来福士签署“耕海1号”建造协议我国首座海洋牧场综合平台蓝图谱就[J]. *山东国资*, 2018(8): 44.
- [51] 马文韬, 闫文, 刘林琳. 我国海洋牧场建设研究综述[J]. *山西农经*, 2022(21): 142-144.
- [52] 张久安, 李大炜, 杨海滨, 等. 国内首座深远海智能化座底式网箱海上拖航及精就位技术应用实例[J]. *航海技术*, 2020(3): 57-61.
- [53] 廖静. 珠海“澎湖号”网箱平台: 让养殖走向深远海[J]. *海洋与渔业*, 2019(11): 62-63.
- [54] 高晓霞, 王振鹏. 走向深海! 半潜式波浪能养殖平台助力海洋牧场建设: 访中科院广州能源所王振鹏博士[J]. *海洋与渔业*, 2023(1): 68-70.
- [55] 茹小尚, 邓贝妮, 冯其明, 等. 中外海洋牧场建设之比较[J]. *水产学报*, 2023, 47(11): 97-106.

Research and Application Progress on Key Technologies of Intelligent Marine Ranching

WEN Lili^{1,2}, WU Man^{1,2* *}

(1. Research Center for Carbon Sink and Low-Carbon Engineering in the Beibu Gulf of Guangxi, Guangxi Academy of Marine Sciences, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Marine Sciences, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

Abstract: With the development of marine ranching from farming and animal husbandry to digitization, the key technologies and applications of intelligent marine ranching have become one of the most popular research fields in the development of marine economy. Starting from the concept, architecture, and common technologies of intelligent marine ranching, this article summarizes and reviews key technologies such as the Internet of Things, artificial intelligence models, automated breeding equipment, and digital twins in intelligent marine ranching. It discusses their research focus and progress, and introduces the construction cases of smart marine ranching at home and abroad. At the same time, the development trend of intelligent marine ranching is prospected.

Key words: intelligent marine ranching; internet of things; artificial intelligence; machine learning; automated equipment; digital twin

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxkx.ijournal.cn/gxkxyxb/ch>