doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.002

渔业水下机器人研究综述

周焕银[1]　朱睿鹏[1]　刘金生[2]

(1.东华理工大学电子与电气工程学院,南昌 330013;
2.东华理工大学水资源与环境工程学院,南昌 330013)

摘要:随着水下机器人智能化水平的持续提升,其逐渐在渔业养殖领域中展现潜力,应用主要集中于环境监测、生物识别与捕获、网箱维护三大核心领域。水下机器人在渔业养殖中的作业优势主要体现为提高养殖效率、保障生态安全及降低人工操作风险。本文梳理了水下机器人在渔业养殖领域的应用与发展现状,针对水下机器人在渔业作业续航能力不足的瓶颈问题,分析了不同推进器布局与机械结构对其能耗的影响,并据此阐述了降低能耗的相关技术途径。指出水下机器人在渔业养殖发展中所面临的挑战为:感知信息融合能力有限,环境适应性不足及流体设计能力欠缺等。针对问题指出渔业水下机器人未来发展趋势为:通过跨学科交叉融合技术向仿生化、智能化方向发展;优化感知融合系统、智能算法以及结构设计。助力渔业养殖实现智能化与精准化生产。

关键词:水下机器人;渔业养殖;环境监测;生物识别与捕获;网箱维护;续航能力

中图分类号:TP242.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0020-16　　**OSID**:

Research Review on Underwater Robotics in Fisheries

ZHOU Huanyin[1]　ZHU Ruipeng[1]　LIU Jinsheng[2]

(1. *School of Electronic and Electrical Engineering*, *East China University of Technology*, *Nanchang* 330013, *China*
2. *School of Water Resources and Environmental Engineering*, *East China University of Technology*, *Nanchang* 330013, *China*)

Abstract: With the intelligent technologies development of underwater robots, they demonstrated significant potential capabilities in the field of aquaculture. Their applications primarily focused on three key areas: environmental monitoring, biological identification and harvesting, and cage maintenance. And the significant operational advantages of underwater robots used in aquaculture were mainly reflected in enhanced efficiency, safeguarded ecological security, and reduced operational risks. Moreover, this review summarized the current applications and developmental status of underwater robots in aquaculture. To address the bottleneck of endurance capability of underwater robotic in aquaculture operations, the impact of thruster configuration and mechanical structure on energy consumption was analyzed. Based on this analysis, relevant technological pathways for reducing energy consumption were proposed. It has been noted that underwater robots encountered several challenges in the context of fishery aquaculture development, including limited capability in perception information fusion, insufficient adaptability to environmental conditions, and inadequate fluid dynamic design. To address these issues, current research suggested that future advancements in fishery underwater robots should focus on the integration of interdisciplinary technologies, promoting the development of bionic and intelligent systems. This approach aimed to optimize perception fusion systems, intelligent algorithms, and structural design, thereby supporting the transformation of fishery aquaculture toward intelligent and precision-based production.

Key words: underwater robots; aquaculture; environmental monitoring; biological identification and harvesting; cage maintenance; endurance

收稿日期:2025-05-19　修回日期:2025-07-31

基金项目:江西省科技厅重点基金项目(20224ACB204022)和国家自然科学基金项目(62063001)

作者简介:周焕银(1975—),女,教授,博士,主要从事水下机器人应用及控制研究,E-mail:hyzou@ecut.edu.cn

通信作者:刘金生(1976—),男,副教授,主要从事水环境监测与水质污染监测研究,E-mail:2467509150@qq.com

0　引言

我国作为海洋大国，拥有约 4.73×10^6 km^2 的广阔管辖海域和约 1.8×10^5 km 的大陆海岸线[1]，具备开发海洋生物资源的巨大潜力。高效开发与可持续管理这些资源，亟需先进技术支撑，水下机器人技术正展现其不可替代的作用。同时我国正积极推动机械化、智能化技术向水产养殖全产业链渗透[2]。

根据联合国粮农组织发布的《2024 年世界渔业和水产养殖状况》报告，2022 年全球渔业和水产养殖总产量激增至 2.232×10^8 t，较 2020 年增长 4.4%，水生动物产量为 1.854×10^8 t，其中中国占 36%[3]。中国在全球渔业生产中占据绝对主导地位，其产量规模与贡献度远超其他国家[4]。面对如此庞大的产业规模、持续增长的需求以及亟待提升的自动化智能化水平，发展水下机器人等具备精确感知、自主决策与高效执行能力的智能装备，已成为破解产业瓶颈、驱动高质量发展的核心需求。

然而传统渔业生产模式普遍面临机械化有限、技术效能不足的制约[5]，高度依赖人力的作业方式难以满足现代化发展需求。为此，我国《关于加快水产养殖机械化发展的意见》着重强调推动水产养殖机械化全程全面高质高效发展，并明确设定 2025 年，水产养殖机械化水平总体达到 50% 以上[6]。水下机器人作为集成前沿感知、智能控制与精准作业能力的技术载体，通过革新传统作业范式，提升生产效率与资源维护，是推动渔业现代化转型升级的关键所在。

近年来，水下机器人凭借其快速发展的技术优势，在渔业资源探查、环境监控、养殖管理和精准捕捞等环节展现出了广阔的应用潜力。但是，新型渔业养殖装备对复杂水下环境的适应性、高昂的部署与维护成本等关键瓶颈[7]，仍阻碍着其大规模产业化应用。为突破上述限制并满足渔业多样化场景的特定需求，国内外研究者正聚焦于开发面向不同功能目标的渔业水下机器人系统。依据其核心应用目标，当前渔业水下机器人主要划分为三大类别：渔业环境监测水下机器人，负责水体理化参数、生物参数及生态环境的实时与大范围感知；渔业生物识别与捕获水下机器人，集成目标识别、行为分析、选择性捕捞等功能，可提升作业精准度与资源利用效率；渔业环境维护水下机器人，专注于养殖设施清洁等任务。

本文对渔业水下机器人的研究进展进行总结，梳理现有渔业水下机器人及相关技术优势与不足，展望未来渔业水下机器人的发展趋势，旨在为技术创新与渔业发展提供理论参考。

1　渔业环境监测应用与研究成果

1.1　渔业环境监测应用

渔业生产高度依赖于水环境质量，其核心参数——溶解氧浓度、pH 值、温度等的稳定性直接关系到水生生物的生理活动、生长效率以及养殖成活率[8-9]。因此，实现渔业水域环境关键因子的实时、精准监测，并基于监测数据驱动及时有效地调控干预，是维持水生生物适宜环境、保障渔业养殖稳定高效运行的关键[10]。

基于现有的技术，水下机器人可搭载多种高精度传感器，高效执行大范围、多参数同步监测任务。更关键的是，水下机器人能突破人类潜水作业的生理与安全极限，稳定抵达深海、强流、低温或污染水域等高危或人类无法到达的区域，并精准定位至预设监测点。这不仅极大拓展了渔业环境检测的覆盖范围与数据获取能力，更从根本上规避了操作人员在危险水下环境中作业的安全风险。

遥控水下机器人（Remotely operated vehicle，ROV）凭借其通过脐带缆实现的实时人机交互能力，可在操作员监控下精细调整动作与作业要求，尤其适合浅海及淡水渔业环境中的定点监测、巡检等任务[11]。然而，其运动惯性较大、强耦合性及较低的自主性是其固有局限。为突破传统分设备操作的局限，陈凌轩等[12]开发了一款具备定点深度保持及巡航功能的 ROV，集成多传感器模块，提出将水质监测与改善功能集成于单一水下机器人平台，显著提升了常规环境参数的同步采集能力。为提升检测效率，浙江海洋大学针对深远海养殖工船水质检测，设计了一款专用水下机器人[13]，实现全水深自动化分层采样与实时检测，突破人工操作的局限性。曹春杰等[14]研制了轻量级 ROV，在保持紧凑结构的同时，集成了在线监测、预警与数据初步分析功能，提高了部署灵活性与响应效率。德国研发的多功能潜水器 ROV[15]，通过光纤电缆进行通信，集水样采集、水质检测与水下观测等多功能于一体，且可快速分析水域的水质和水温等分布情况。

自主水下机器人（Autonomous underwater vehicle，AUV）相较于 ROV 的核心优势在于其摆脱了缆绳束缚，具有自主巡航能力，使其工作范围更广阔、不同海域环境监测更灵活。尽管其流体动力学设计通常导致较大的最小转弯半径和体积[16]，限制了在极狭窄空间的机动性，但其长航程、自主作业能力在广域检测中具有不可替代性。BERGET 等[17]针对尾矿排放检测需求，利用轻型 AUV“Harald”，

装配 CTD、溶解氧和荧光计等多个传感器,创新性地将实时传感器数据同步至海洋扩散模型。该 AUV 可基于模型预测不确定性和尾矿浓度分布,自适应地动态优化巡航路径,优先对高价值信息区域进行采样。这种方法显著提升了监测效率与数据的科学价值,实现了从被动巡航向主动信息搜寻转变。EICHHORN 等[18]为满足挪威峡湾渔场对关键水质参数的实时检测需求,将遥控潜水 ROV“CWolf”改装成 AUV 后投入使用,其达 135 kg,有效载荷达到 15 kg。验证了重型 AUV 在复杂近岸海况下携带多种传感器稳定作业的可行性,拓展了 AUV 在近海高精度监测的应用场景。为降低监测对人力资源和岸基设施的依赖,巴利阿里群岛大学采用轻型 AUV“Turbot”对巴利阿里群岛海洋环境进行实时监测[19]。结合超短基线定位系统与水面的全球定位系统,实现了对采集数据的高精度时空同步与地理配准。为近岸渔业环境的常态化、低成本监测提供了一种高效解决方案。

除了主流型号的水下机器人 ROV 和 AUV,仿生水下机器人(Biomimetic underwater vehicle, BUV)因其独特的小型化设计、高度仿生的运动模式与优异的生态融入性,在渔业环境监测领域展现出独特潜力。BUV 通过精准模拟目标水域生物的外形与游动姿态,显著降低了检测目标的行为干扰,能够更灵活地穿梭于复杂结构中,实现低侵扰、近场、精细化监测。当前研究致力于优化 BUV 设计,以提升其环境适应性与功能集成度。其中李佳萍等[20]以鲈鱼为仿生原型,优化设计了水下机器人外形。改善了其流体力学特征,不仅增加了浮力调节能力和抗压性,使其适用于不同水深环境,集成了水体温度及浑浊度传感器,为特殊环境的参数获取提供了高效平台。RYUH 等[21]则着眼于多机器人系统监测需求,创新性地构建了面向海洋养殖检测的多机器人鱼系统。其模仿海鲤运动,系统采用“机器人鱼群与水面浮标控制枢纽”的异构架构,实现了多节点数据融合与任务协同,提升了监测覆盖范围与信息获取维度。

当前,渔业水下机器人在环境监测领域的广泛应用仍面临挑战。具体表现为:ROV 的运动受制于缆绳连接,在复杂地形中的机动性受到限制,导致数据获取的时效性降低;AUV 与 BUV 的有限续航能力,制约了其执行长时间、大范围监测任务的能力。同时,AUV 和 BUV 的性能高度依赖于先进的传感器技术和复杂的控制系统,整体维护成本较高。此外,BUV 的外观运动可能吸引掠食性鱼类和腐食性鱼类聚集,导致对非掠食性或行为隐秘物种的监测存在盲区。

为应对上述挑战,关键方向在于推动技术融合与智能化升级。发展高能量密度电池技术以显著延长 AUV 的作业时长;优化 ROV 的光学传感器性能,增强其在浑浊水体条件下的有效观测能力;设计并应用小型化、生物干扰程度低的新型监测设备。

1.2 渔业环境监测研究成果

近年来,我国渔业养殖环境监测水下机器人领域的研究呈现快速发展态势,主要围绕仿生结构优化、智能控制算法创新、高效感知集成及系统解决方案展开。CHEN 等[22]研发的仿生草鱼机器人(图 1)通过改进鱼体轮廓方程结合有限元分析,实现了轻量化与高机动性设计,其胸鳍与尾鳍联合推进模式在仿真中表现出最优游动效率,对自然鱼群无干扰,有效增强了水下机器人在复杂水域的运动与监测能力。同时,该平台集成多传感器模块,实现了水温、pH 值等关键水质参数的原位实时采集与可靠传输。KAR 等[23]基于物联网与多传感器融合的水质检测机器人实现了 pH 值、温度与溶解氧浓度等参数的远程监控。

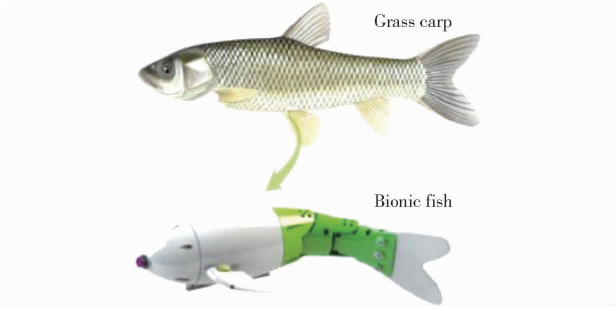

图 1 仿生草鱼机器人[22]

Fig. 1 Bionic grass carp robot[22]

面向大范围、长时续监测需求,国内学者在 UUV 自主对接技术取得进展,通过引入视觉引导控制,结合动力学建模和水下实验验证,显著提升了对接系统的可靠性与鲁棒性[24]。该技术为未来在养殖区规模化部署水下充电站与移动数据中心网络,实现水下机器人集群的长期、自主化作业奠定了关键基础。这些成果标志着国内研究在结构仿生设计、智能运动控制、多源感知融合及系统自主化方面取得显著进展。然而,进一步提升水下机器人在高浑浊度、强流、生物附着等极端复杂养殖环境下的长期稳定作业能力、感知精度与能源效率,仍是亟待突破的核心挑战。

相较于国内研究,国外在渔业养殖环境监测水下机器人领域更侧重于前沿技术探索与系统级创新,尤其在自主导航鲁棒性提升、新型仿生结构应用及群体协同范式突破方面引领发展,但复杂动态水

域下的可靠感知与决策仍是全球性挑战。

为克服传统刚体机器人在复杂、非结构化养殖环境中的移动与交互限制，软体机器人技术展现出独特潜力。MAJIDI[25]在柔性材料与可变刚度结构设计方面的突破，使机器人能够高度仿效章鱼等软体生物的运动模式与环境适应性。这种仿生设计赋予机器人前所未有的灵活性、对脆弱生物的低侵扰性以及在崎岖海底或狭窄空间内执行精细监测任务的能力，为极端环境下的原位观测开辟了新途径。

针对单一机器人功能与覆盖范围的局限，群体机器人系统被视为规模化监测的关键路径。DORIGO 等[26]提出的群体机器人自动设计、异质性整合及分层自组织框架，为构建自适应、可扩展的协同监测网络提供了理论基础。其核心价值在于通过分布式智能优化任务分配、路径规划与数据融合，显著提升对大范围、异构养殖水域的监测效率和系统容错性。

同时 DUARTE 等[27]通过实验实证了分散控制群体机器人系统在水产监测中的可行性(图 2)。研究表明，此类系统不仅能高效覆盖大面积水域，更能通过多节点冗余数据采集与内置容错机制，有效应对单体故障或局部数据失真，大幅提升长期监测数据的整体可靠性与鲁棒性，为未来大型养殖场或海洋牧场的无人化、智能化环境监管奠定了技术基础。



图 2　群体水下机器人[27]

Fig. 2　Swarm underwater robots[27]

总体而言，提升机器人在高浑浊度、强流、生物附着等极端复杂养殖环境下的长期稳定作业能力、感知精度与能源效率，仍是全球范围内亟待突破的核心难题。表 1 对比分析了国内外环境监测水下机器人的研究成果。现有研究在复杂动态水域下的可靠环境感知、自主决策与鲁棒控制方面普遍存在瓶颈，阻碍了技术的规模化应用。

表 1　环境监测水下机器人研究成果

Tab. 1　Environmental monitoring underwater robot

类型	研发单位	功能	环境因子传感器类型	文献序号
ROV	上海海洋大学	渔业养殖水质监测与动态调节	pH 值、温度、溶解氧含量	[12]
ROV	浙江海洋大学	深海养殖工船水质分层采样与定点监测	温度、pH 值、溶解氧含量、盐度	[13]
ROV	海南大学	安全远程水质监测	pH 值、温度、浊度、压力	[14]
ROV	德国 Fraunhofer 协会	水质多参数监测	pH 值、溶解氧含量、电导率、氨氮含量	[15]
AUV	挪威科技大学	污水扩散自适应监测与热点追踪	pH 值、总悬浮物含量、压力	[17]
AUV	德国 Fraunhofer 协会	渔业养殖区水质监测	硝酸盐含量、氧气含量、电导率、温度	[18]
AUV	巴利阿里群岛大学	污水扩散监测以及微生物采样	氧气含量、温度、浊度	[19]
BUV	中国石油大学	渔业养殖水体动态监测	TDS(溶解性固体)含量、浊度、温度	[20]
BUV	韩国产业技术研究院	海水养殖区大范围监测及污染追踪	温度、电导率、pH 值、压力	[21]
AUV	吉林大学	水下勘探与样本采集	雷达	[28]
ROV	宁波大学	水质采集与预测	溶解氧含量、pH 值、电导率、温度、浊度	[29]
ROV	西北工业大学	渔业养殖监测	压力、温度	[30]
ROV	江苏科技大学	水下结构检测与观测	深度、温度、pH 值、压力	[31]
ROV/AUV 混合	西班牙韦尔瓦大学	水质监测	气压、磁力计、浊度	[32]
空中-水下	佛罗里达大西洋大学	溶解氧监测、鱼群行为监测	溶解氧含量、温度、压力	[33]
ROV	辛特夫数字公司	水质污垢监测	深度(搭载激光扫描)	[34]

2　渔业视觉识别及捕获应用与研究进展

传统渔业中，海参、鲍鱼、海胆的可持续采捕长期依赖人工潜水作业。这一模式不仅面临高人力成本与安全风险的双重压力，更需潜水员在水下实时执行生物识别、合规尺寸测量及选择性放生等精细化操作，以维系资源再生能力。然而，复杂水下环境中的视觉干扰、作业效率局限及人为判断误差，严重制约了资源养护与生产效益的协同优化。

水下机器人的发展为突破上述瓶颈提供了可执行路径：通过高分辨率视觉感知系统与机械臂的协同，可实现水生生物的自动识别、精准定位、无损抓取及毫米级尺寸测量，在替代繁重体力劳动的同时，显著提升资源管理的科学性与可追溯性。当前，国内外研究者正着力攻克动态目标识别鲁棒性、自适应抓取规划及生物友好型操作机构等关键技术，推

动渔业捕捞向智能化、精细化方向演进。

2.1 渔业视觉识别技术的应用

渔业视觉识别技术基于计算机视觉与深度学习,核心功能包括:实现鱼类物种自动识别与分类;监测摄食、游动等行为以评估健康状况[35-36];精准测量体长、质量等生物参数[37];结合图像分析评估水质与环境因子;通过 GIS 平台可视化渔业数据辅助决策;构建自动化流程提升管理效率。该技术为智能渔业提供多维度数据支撑,优化养殖过程控制与资源管理效能。

渔业视觉识别技术的演进历程本质上是环境适应性驱动下的范式跃迁,其发展轨迹呈现从人工经验依赖向智能自主决策的跨越式转变(图 3)。

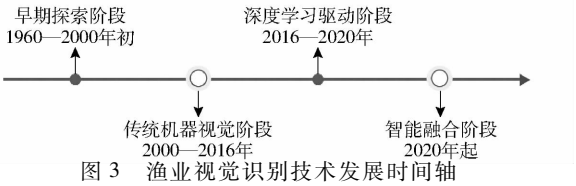

图 3 渔业视觉识别技术发展时间轴

Fig. 3 Development timeline of visual recognition technology in fisheries

20 世纪末的早期研究主要依赖形态测量技术,采用单变量或双变量分析方法比较鱼类生长及形态特征,该方法受限于人工特征提取过程,难以有效处理复杂水下环境的图像噪声与物种相似性问题[38]。伴随计算机视觉发展,传统机器学习方法逐步应用于鱼类识别,典型特征描述子包括 SIFT、HOG 与 LBP 等,通过手动设计纹理、形状及颜色特征进行分类,但其对复杂背景与动态光照变化的适应性存在显著局限。2012 年深度学习技术的突破性进展引发范式转变,AlexNet、VGG 及 ResNet 等卷积神经网络架构实现高级特征的自动提取[39],显著提升了图像分类的准确率,克服了传统方法的固有缺陷[40]。2016 年,针对水下环境的模型优化研究广泛开展,DeepFish、Underwater Fish Object Detection 等改进型 CNN 模型着力解决光照异常、图像模糊及鱼体表型相似性等特异性挑战[41-42]。近年来,渔业视觉识别技术发展聚焦端到端架构与计算效率优化[43],例如,FishViT 等模型通过引入相似性感知的 Transformer 架构,实现了对密集鱼群的快速识别,并在高帧率下保持高精度[44]。当前技术前沿正迈向智能化与自动化阶段,基于人工智能增强的图像处理与数据分析构建全流程自动化系统,典型案例:Ikasavea 应用程序通过智能手机上传图像,并结合 AI 模型进行分类和数据提取,提高了渔业管理的效率和准确性[45]。

渔业视觉识别技术在渔业养殖中面临环境复杂性、目标特征变异、数据局限性与算法适应性不足四维挑战。具体表现为水下光线散射与浑浊水体导致的图像质量退化[46],鱼类自由游动引发的姿态变形与遮挡干扰[47],标注数据稀缺及长尾分布制约模型泛化能力,以及现有算法在实时性与小目标分割中的性能局限。未来发展趋势集中于开发轻量化模型架构、融合多模态传感器数据、构建标准化数据集、优化边缘计算部署,并拓展至野生鱼群监测与个体健康分析等场景。突破环境适应性瓶颈与跨领域算法创新是实现产业化落地的关键路径。

2.2 渔业捕获系统的应用

现代海洋捕捞呈现作业目标驱动的技术分化:规模化鱼类资源开发仍以拖网捕捞技术为主导,依托大型网具实现高效捕获;而水下机器人系统则聚焦高经济价值底栖海珍生物及珍稀科研目标的精准获取,通过末端执行器精准操控替代传统潜水作业,显著降低人力风险并提升资源养护可持续性。

水下机器人末端执行机构依据不同的捕获机理对不同种类的水生动物进行作业,依据作业模式特征及现有技术路径,水下机器人末端执行机构抓取可归纳为两大主导类型:刚性靶向精准抓取与柔性自适应包络式抓取[48]。前者依托高精度定位与刚性夹持机构,实现对目标关键部位的快速、稳固抓取,作业效率高但对感知定位精度及目标刚性有较高要求。后者则通过被动或低刚度驱动机构顺应目标物不规则外形,实现低损伤的包裹性约束,适用于脆弱或形态多变的生物体。

BRIK 等[49]使用水下机械手抓取珊瑚,该机械手具有 6 个自由度,可实现不同的运动轴配置,是一种硬质材料加持类型机械臂系统。LI 等[50]设计了一种具有自主视觉识别和吸附式捕获功能的 ROV,能够在复杂的水下环境中实现对海参、海胆和扇贝等水生物体的高效捕获。LIU 等[51]研发的 MRF(Magnetorheological fluid)灵巧手,其通过被动调整接触点与弹簧锁定机构实现包络式抓取。

为降低对水生生物的捕获损伤,柔性抓手技术近年来成为研究热点,其核心在于通过材料创新与仿生结构设计,赋予执行机构被动或低刚度驱动的自适应包络能力。此类技术显著提升了与珊瑚、海参等脆弱或非结构化目标的接触安全性,有效降低了机械损伤风险。典型代表如气动连续体手指技术[52-53],其利用弹性聚合物构建内部气室,通过充放气驱动实现类生物手指的弯曲与伸展运动,完成快速、低力的包络抓取。该技术的优势在于驱动原理简洁、制造成本低廉,为大规模水下柔性抓取应用提供了可能性。然而,其依赖大量气管驱动多自由

度动作的特性，不仅增加了系统复杂性，更严重限制了水下机器人的操作灵活性与有效工作深度，成为其在深水或复杂流场环境作业的显著瓶颈。

针对深海等更具挑战性的环境，GALLOWAY 等[54]研发的软体水下多指手代表了更前沿的探索（图 4）。该设计采用纤维增强的波纹管结构构成单指，整合为四指协同系统，其独特结构增强了手指在高压环境下的抗塌陷能力与输出力，提升了在暗礁深处等复杂场景下作业的可靠性与环境适应性。尽管如此，此类高度柔性的多指系统仍普遍面临刚柔耦合控制、大负载维持稳定性，以及精确位姿反馈缺失等共性挑战。如何在高顺应性与必要的操作刚性之间取得平衡，并实现深海环境下的精准、鲁棒抓取，仍是柔性自适应抓取技术走向成熟应用的关键研究方向。

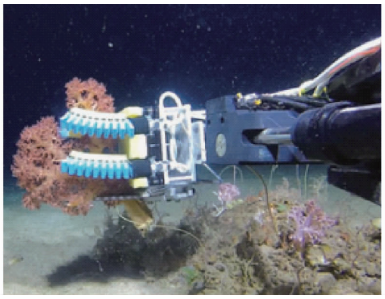

图 4　水下四指软体手[54]

Fig. 4　Underwater four-fingered soft robotic hand[54]

为克服单一柔性或刚性驱动在复杂水下作业中的局限，刚柔混合驱动策略通过融合刚性机构的高精度控制能力与柔性单元的被动自适应特性，成为提升水下抓取系统综合性能的有效路径。该策略可动态适配目标物的形态与力学特征，显著降低对脆弱生物的损伤风险。电缆-磁流变复合抓手[55]则结合了两种驱动模式的协同优势，进一步融合智能感知技术[56]，可构建自适应欠驱动仿生抓取系统：柔性触觉传感器实时监测抓取状态并动态调节夹持力，形成“感知-决策-执行”闭环控制，显著提升深海生物采样的成功率与安全性。未来研究需聚焦于仿生结构拓扑优化、多模态感知信息融合及自修复材料的工程化应用，以增强系统在复杂水下环境中的作业鲁棒性。

2.3　渔业视觉识别与捕获研究成果

针对渔业养殖智能化发展的迫切需求，国内研究团队在水下视觉感知与智能决策领域取得了显著进展，重点集中于鱼类关键生物特征识别、摄食行为精确解析以及水下图像质量增强等核心技术瓶颈。大力推动技术从实验室向实际养殖场景的落地应用。

其中文献[57]清晰梳理了智能识别技术在渔业养殖中的四大应用方向——物种识别、年龄识别、性别识别与行为识别，并强调了机器视觉与深度学习的融合是实现集约化、精准化养殖的关键。这一论断在以下研究中得到印证：徐立鸿团队[58]针对开放式养殖环境水质多变、干扰复杂的难题，创新性地融合了卷积注意力模块（Convolutional block attention module）与双向长短时记忆网络（Bidirectional long short-term memory）于 MobileViT 架构，显著提升了模型对鱼群摄食行为的特征聚焦与序列建模能力，鱼群摄食行为分类的准确率得到显著提升，有效解决了室内模型在真实复杂场景下的泛化能力不足问题。张镇府[59]聚焦精准投喂决策自动化，基于改进的 MobileNet V3 - Small 模型实现鲈鱼食欲等级的高精度识别，并结合物联网技术构建闭环控制系统，使饵料利用率得到提升，算法优化提高了渔业资源管理的可持续性。此外，面对水下机器人视觉感知的固有挑战，张微微等[60]提出的低光照水下图像增强算法，结合灰度世界校正与多尺度融合技术，有效提升了水下机器人视觉感知的清晰度与对比度，为后续识别任务提供了更可靠的输入基础。

国内研究在静态或准静态场景下的识别精度以及特定系统的工程化集成方面已达到较高水平，充分展现了技术落地的潜力。然而，复杂动态水下环境对算法实时性、鲁棒性提出的严峻挑战仍是亟待突破的核心瓶颈。未来需进一步强化算法在极端条件下的适应性，并深化感知-决策-执行全链条的协同优化，以支撑全天候、全场景的渔业智能化作业。

相较于国内研究在特定算法精度与工程集成上的突破，国际学术界在渔业养殖视觉识别与捕获领域更侧重于构建融合多模态感知数据的系统性解决方案，并致力于开发高度集成化、可扩展的智能平台，以应对复杂、大规模养殖场景的挑战。这一研究导向在以下研究中得到充分体现。

VO 等[61]的综述明确指出，机器学习技术尤其是卷积神经网络已成为鱼类尺寸测量、疾病诊断、物种分类及行为解析的核心技术支撑，其强大的特征提取能力在鱼群计数与复杂行为建模中展现出显著的优势。这一技术趋势转化为更高效的渔业生产管理方案，其中 ZHANG 等[62]针对高密度养殖场景的实时监测需求，创新性地融合了多列卷积与扩张卷积，构建混合神经网络模型。该模型不仅对大西洋鲑鱼实现高达 95.06% 的实时计数准确率，更通过严格的统计验证确保了模型预测的可靠性与鲁棒性，为精准养殖管理提供了量化依据。

为进一步拓展感知维度与作业范围，UBINA 团

队[63]开发了云基自主无人机系统,该系统深度融合深度学习、计算机视觉与无人机平台,突破固定摄像头的空间限制,实现了对养殖水域的广域覆盖监控、鱼类数量动态统计、非接触式估计体长以及喂食强度智能评估(图 5)。其展现出显著的成本效益优势,凸显了系统性解决方案在推动渔业养殖智能化升级中的巨大潜力。

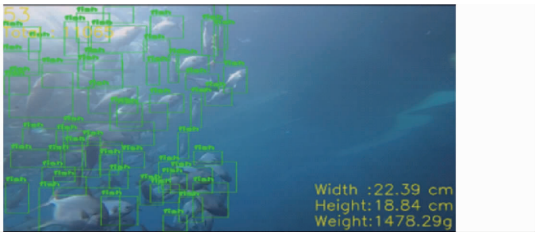

图 5 鱼体长度和密度估计[63]

Fig. 5 Fish body length and density estimation[63]

通过上述研究可知,国际研究更强调整合创新与系统思维,重视模型可靠性验证与应用场景适配,着力解决固定观测点的局限性,提升对大范围、动态变化的养殖环境的感知与管理能力。然而,国际前沿研究同样面临关键挑战:如何进一步提升多模态数据在复杂水下环境中的有效融合效率,增强系统在极端天气或浑浊水质下的感知鲁棒性与决策自主性,以及实现超大规模鱼群实时、高精度、无损的监测与捕获操作,仍是推动技术迈向普适化、产业化应用亟待攻克的难题。

3 渔业生态环境维护应用与研究进展

海洋网箱养殖凭借其高效集约化特性,已成为中国海水养殖产业的重要支柱。行业规模持续扩张,截至 2020 年底,我国深水网箱养殖体积已达 3.82×10^7 m^3,普通网箱养殖面积达 1.98×10^7 m^2[64]。据国金证券研究所报道,2023 年深水网箱养殖面积达 1.05×10^8 m^2,普通网箱养殖面积达 3.78×10^7 m^2。

然而,网箱设施长期浸没于海水中,其多孔性网衣结构为藻类、藤壶等污损生物提供了理想的附着基,极容易导致严重的生物淤积问题[65]。致使网箱的滤水性能不佳、网箱内外水流交换受阻等一系列问题,从而溶氧量降低,严重影响了养殖鱼类的存活率、生长速度、产量以及品质[66]。

因此,对网箱养殖水环境进行高效、定期维护,特别是及时清除网衣污损生物以保障水流畅通与水质稳定,已成为提升水产品产量、品质及养殖经济效益不可或缺的关键环节。在此背景下,具备精准、高效、低扰动作业能力的水下机器人技术,为解决这一问题提供了有效的途径。

3.1 渔业生态环境维护应用

面对网衣生物淤积引发的系统性危害,开发高效、低损伤的自动化清洗技术已呈现紧迫性,亟待深入探究与解决。然而,当前国内外针对网箱清洗的水下机器人研究仍相对匮乏,其技术路径主要围绕接触式机械清除、非接触式流体冲击及智能化精准作业展开。

首先接触式机械清除方向中,广东海洋大学林广等[67]研发的水下机器人采用旋转毛刷与硬质钉刺组合,辅以多传感器融合与智能及人工模式切换功能,旨在通过物理接触剥离附着物。该方案结构相对直接,但对网衣材质强度及操作精度要求高,存在潜在的网衣物理损伤风险。

为了避免接触损伤,非接触式流体冲击成为研究的主流方向,房熊[68]设计了模块化清洗机器人,核心采用高压水流与旋转清理盘协同作用,利用流体剪切力清除污损,显著降低了对网衣的直接接触压力。庄集超等[69]则进一步优化了作业姿态控制与能效,其设计的机器人利用压缩空气浮筒调节姿态,结合皮管式喷盘与高压旋转水射流,在实现有效清洗的同时,大幅降低了功耗与作业噪声,提升了环境友好性。

为应对成本控制需求,王志勇[70]开发了结构简化的高压水射流清洗装置,以柴油驱动降低能源成本。该方案虽提升了清洗效率且成本低廉,但高度依赖人工介入操作与定位,自动化程度受限。为实现智能化精准作业,赖泓杰等[71]探索了基于深度学习的解决方案。其研制的机器人集成机械臂作业单元,结合目标检测算法识别污垢区域,实现智能化、有选择地精准清除,代表了向更高阶自主决策迈进的方向,然而,此类系统的实时感知-决策-执行闭环在动态水下的鲁棒性仍需验证。为确保复杂海况下的作业稳定性,刘冠灵等[72]研发了履带式深海网箱清洗机器人。其采用履带轮底盘增强抗流与吸附能力,结合高压旋转射流与反冲装置进行清洗,显著提升了平台在强扰动环境下的运动平稳性与作业可靠性。

水下机器人在渔业生态环境维护中的应用价值,不仅体现在高效清除网衣污损生物,国外更将其延伸至对网箱结构完整性的智能巡检与预警。挪威 SINTEF 实验室的现场测试[73]验证了此类协同效益:搭载先进视觉识别系统的水下清洗机器人,在执行清洁任务的同时,能实时辨识网箱破损区域并自主规避,将误触率有效控制在 0.7% 以下。这一能力显著降低了因机器人作业本身导致网衣二次损伤的风险,同时为养殖管理者提供了结构安全状态的实时反馈,实现了维护作业与设施监测的一体化。

清洗机器人虽在避障、单一清洗模式上取得进

展，其环境适应性、决策自主性及资源利用效率仍有显著提升空间。而物联网、大数据与人工智能的深度融合，正为突破这些瓶颈并重塑下一代系统提供强大引擎。未来的智能清洗机器人将突破当前功能边界，依托多源环境感知数据与养殖对象生长模型，构建动态知识库，从而实现自适应决策、精准资源投放以及预测性维护等功能。

3.2　渔业生态环境维护研究成果

在渔业生态环境维护方面，我国水下机器人领域的研究近年来呈现快速发展态势，虽在网箱清洗流体动力学与智能控制算法领域取得显著进展，仍面临技术转化率低的核心矛盾。林礼群等[74]通过数值模拟优化喷嘴设计，发现入口压力提升可增强射流速度与空化效应，但水深增加会抑制清洗效果，凸显深水作业的物理限制，为水下清洗装备的流体动力学设计提供了理论依据。为了水下机器人能够稳定作业，则需要更加稳定的运动控制，其中张磊[75]基于改进六自由度运动学模型，引入模糊 PID 算法优化控制性能，并通过水下机器人外场试验验证了系统运动轨迹的稳定性，标志着国内水下机器人在清洁网箱方面从运动控制到理论仿真向工程化应用迈进。在巡检领域，颜承昊等[76]提出了一种新型 PPO 算法以优化声呐导航系统，通过多约束奖励函数设计，使 AUV 在仿真环境中完成稳定绕行巡检，平均轨迹误差低于 5%，展现了强化学习在复杂路径规划中的潜力。

然而，尽管水下机器人清洁网箱技术研究活跃，但国内深水网箱清洗仍以潜水员作业为主。有关机器人辅助清洗网箱的应用报道较少，主要是因为核心部件的耐压密封可靠性与能源续航短板严重制约产业化进程。

当前，水下机器人维护渔业环境的应用已成为国际研究热点。在网箱清洗与巡检领域，挪威、美国等发达国家已开发出多种专用机器人系统。其中典型机具为基于 Kalypso 无人潜航器的多功能机械臂 MURA[77]（图 6）。该设备通过模块化末端执行器实现鱼尸清理、垃圾清除及网孔修补的多功能集成，其流体力学优化设计和低成本特性显著提升了作业效率，同时能够针对不同作业需求智能切换工具，降低设备重复配置成本。

在自主巡检领域，AKRAM 等[78]研发的视觉伺服系统通过双缆识别算法与实时位姿反馈 PID 控制器，实现 ROV 沿网衣曲面的自主贴网巡航，经实地验证可精确追踪网箱结构完整性，降低人工潜水风险。清洗机器人目前还存在着诸多问题，其中高频机械清洗极易产生病原体扩散，但这也同样推动机器人作业流程的生态优化研究[79]。对国内外环境维护水下机器人的研究成果进行了总结，如表 2 所示。

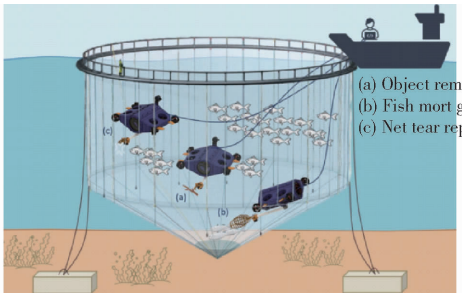

图 6　MURA 不同机械臂时的工作方式[77]

Fig. 6　Operating modes of MURA with different robotic arms[77]

4　渔业水下机器人能耗研究

近年来，渔业水下机器人通过水动力分析与仿生学设计的结合，在降低能耗方面取得了显著进展。但复杂水动力环境下的运动失稳与作业失效仍是渔业水下机器人应用中的核心挑战。渔业水下机器人作业时承受的复合载荷包括：随深度呈梯度分布的静水压力、受控的推进器推力，以及由机器人形体运动诱发的流体动力载荷。其中流体动力载荷的强度直接关联机器人外形曲率、表面粗糙度、运动速度及水流湍流强度。湍流剪切层、涡旋脱落与非定常来流会诱发机器人运动轨迹偏移，导致作业定位精度下降；引发姿态失稳，致使视觉系统成像模糊[83]；造成推进器负载突变，能源效率降低。强剪切流还会破坏吸附机构的负压边界层，导致吸附式机器人的作业失效[84]。这些现象本质都是水动力-结构-控制多物理场耦合作用的结果，根据此现象，总结水动力的影响与优化研究成果。

4.1　水动力对机器人能耗的影响

ROV 因大尺寸本体与强运动耦合特性，在高流速水域面临显著的流体动力学挑战，湍流分离引发的压差阻力激增导致推进能耗同比增加。

上海海洋大学设计的 ROV 因螺旋桨布局未优化叶梢涡与导管干涉效应，实际能耗较理论值高约 15%，凸显传统推进系统在非定常流场中的设计缺陷[12]。为突破此瓶颈，仿生学设计成为重要技术路径——浙江大学开发的蝠鲼仿生机器人通过软质胸鳍波动推进（图 7），利用柔性变形抑制流动分离，在相同航速下能耗降低 25%，且可通过调整拍打频率和角度进一步优化效率[85]。中国石油大学研究的仿生 BUV 鲈鱼形机器人通过流线型设计降低阻力系数，续航时间得到延长[20]。TAKADA 等[86]设计了一种基于磁致动器的小型仿生鱼，能够自主追踪

表 2 环境维护水下机器人研究成果

Tab. 2 Environmental maintenance underwater robot

装置名称	研发单位	主要功能	清洁方式	工作特点	文献序号
多传感器融合水下机器人	广东海洋大学	网箱清洗	旋转毛刷 + 硬质钉子	四螺旋桨驱动,支持智能与人工模式切换	[67]
模块化水下网箱清洗机器人	中国水产科学研究院	网箱清洁	高压水流 + 旋转清理盘	四轮驱动,岸上控制模块	[68]
压缩空气浮筒姿态控制清洗机器人	广东海洋大学	网衣清洗	高压旋转水射流(非接触式)	压缩空气变体积沉浮方案	[69]
高压水射流网箱清洗装置	中国水产科学研究院	网衣清洗	高压水射流(20 MPa)	柴油机组驱动,40°倾斜喷嘴	[70]
类人鱼形 ROV	广东海洋大学	网箱清洁	机械臂作业	FOC 电机驱动,GPS/IMU 组合定位	[71]
履带式深海网箱清洗机器人	广东海洋大学	网箱清洗	高压旋转射流 + 反冲装置	三角履带轮与胶齿橡胶履带,分布式控制系统	[72]
水下鱼池清刷机器人	上海海洋大学	鱼池壁面清洁	旋转清理盘	双履带移动 + 螺旋桨推力吸附;刷盘转速 600 r/min,驱动速度 0.4 m/s;正交试验优化清刷参数	[80]
MURA 水下机械臂	爱琴大学	鱼尸清除、垃圾清理、网箱修复	机械臂作业	ROV 搭载模块化机械臂,可更换末端执行器	[77]
HEKTOR 系统	萨格勒布大学	网箱监测、鱼群建模		多机器人协同,采用 ROS 通信架构	[81]
OpenROV	哈维里亚纳大学	网箱检查、水质监测		采用 RGB 相机实时视频,具备传感器集成	[82]

目标生物,其柔性身体结构有效减少了水流阻力。上述案例共同验证了柔性运动仿生、低阻形态仿生与无轴驱动仿生 3 类技术范式可系统性提升水下机器人的能源利用效率及流场适应能力。该技术体系在渔业水下机器人领域具有直接应用价值,通过降低能耗,可延长连续作业时长。

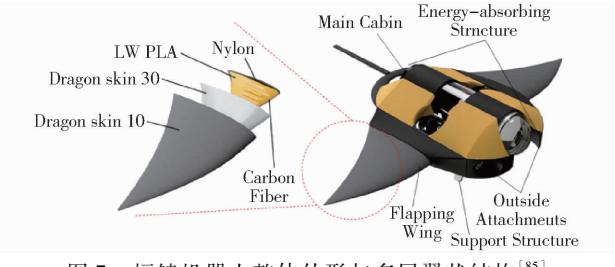

图 7 蝠鲼机器人整体外形与多层翼状结构[85]

Fig. 7 Overall shape of manta ray robot and different layers of wing structure[85]

水动力扰动对水下机器人稳定性与操控性的影响呈现多尺度耦合特征。其中瑞士 Sepios 机器人模仿乌贼四鳍分散式推进,通过协调鳍片运动抵消侧向涡流,在强流环境中阻力系数降低,同时使其保持姿态稳定[87]。挪威科技大学设计的 Harald 用于尾矿监测,因海流扰动导致位姿波动,需通过实时调整推进器输出以维持稳定,实验显示动态流场下 AUV 的路径跟踪误差可达 1.2 m,需结合惯性导航与多普勒测速仪进行补偿[17]。而在操控方面,推进机制的选择直接影响转向响应速度和精度,日本的 UEC 马鲛机器人模仿金枪鱼尾鳍摆动,通过形状记忆合金线驱动多连杆结构,提升了巡航速度并实现了急停机动[88]。

4.2 机械结构优化降低能耗

水下机器人机械结构的优化是降低能耗的重要途径,其中,推进系统作为核心组成部分,设计的合理性直接影响整体能耗。当前,仿生推进器作为推进系统设计的研究热点,能够显著降低能耗,并兼具运动平滑性与稳定性优势,从而延长作业时长[89]。推进器空间布局同样作为关键设计变量,通过优化水动力性能可进一步提升能效。此外,浮力的精确调控亦是影响能耗的重要因素。三者共同构成水下机器人能源优化的系统解决方案。

当前,仿生推进器设计的相关研究,大多聚焦水生生物多样化运动模式展开探索,其中鳐形目鱼类展现出一种独特且高效的胸鳍波动推进机制,以及其流线型的身体,使其通过利用较少的能量实现较大的推进力[90]。LUO 等[91]发现在研究的参数范围内,由于鳐鱼运动产生独特的后缘涡旋,当两个鳍的拍动频率差异越大,产生的最大转向扭矩就越大。哈尔滨工程大学发现鳍状推进器(图 8)的刚度特性和运动参数存在显著耦合效应[92]:当相位差 30°与摆动频率 0.5 Hz 时,推进系统可产生最优推力输出,该配置使整体阻力降低的同时提升了机动性能。德国研究团队则基于 2 自由度射线结构设计仿生波

动鳍，计算流体力学分析表明，非正弦运动模式可有效抑制推力脉动，推进效率较传统螺旋桨得到提升，验证了仿生波形优化的潜力[93]。

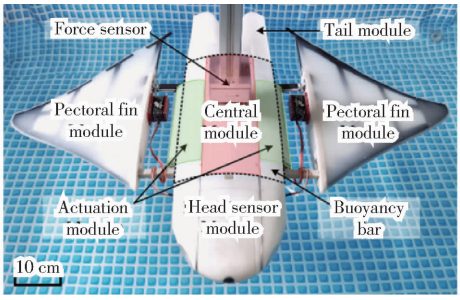

图 8　仿生鳍状 ROV[92]

Fig. 8　Bio-inspired fin-shaped ROV[92]

鳍部推进器优化创新方面，麻省理工学院开发的 SOFI 搭载硅胶仿生胸鳍（图 9）[94]，能够在珊瑚礁环境中实现无扰动探测，其柔性结构可使尾鳍振幅保持稳定，相较于传统刚性鳍，受到的水动力干扰更少。HUANG 等[95]通过 CFD 结果发现，螺旋桨推进器与胸鳍波动系统展现出良好的互补性。螺旋桨可有效调节机器人姿态，并通过抵消胸鳍拍动引起的扰动显著提升整体运动稳定性。研究结果为适用于精细化渔业监测等对稳定性、机动性和续航性要求苛刻的场景提供了关键理论支撑。

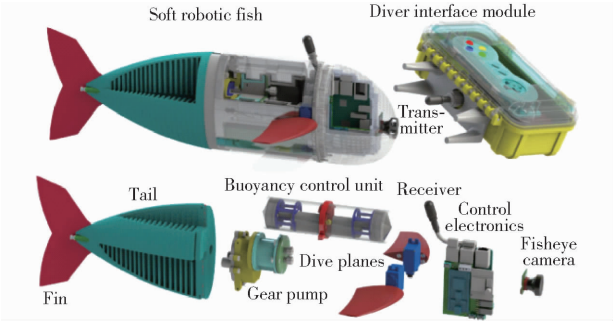

图 9　SOFI 系统[94]

Fig. 9　SOFI system appearance[94]

鳍部仿生为仿生模式的一种，研究发现不同仿生模式的水动力性能存在显著差异，哥伦比亚大学的 LAMAS 团队[96-97]通过 CFD 对比分析揭示，侧尾鱼推进模式的 Froude 效率可达 0.78，明显优于鳗鱼和海龟模式，但该优势伴随头部区域较大的能量损耗。这些研究成果共同表明，当前水下机器人优化设计面临的主要挑战在于如何平衡推进效率与能量损耗之间的矛盾，以及如何建立更高效的参数协同优化机制。未来研究需进一步探索多物理场耦合作用机理，发展智能优化算法以解决高维非线性优化问题。

推进器布局作为推进系统设计的核心环节，对整体水动力性能具有决定性影响[98]。优化的布局方案可在不增加能耗的基础上，显著降低航行阻力、提升推进效率，进而显著延长作业时间与范围，提升任务执行效能。墨西哥 GARCIA 等[99]设计的六自由度水下机器人采用碳纤维-尼龙复合推进器支架与丙烯酸管材主舱体，通过 8 个推进器的对称布局实现几何中心与重心重合（图 10），降低了运动控制的复杂度。法国蒙彼利埃大学的 DANG 等[100]进一步提出动态可重构推进系统（图 11），利用顺序二次规划优化控制分配策略，显著降低了多推进器协同作业时的能耗。但此类系统仍存在动态响应滞后与实时优化计算量大的问题。

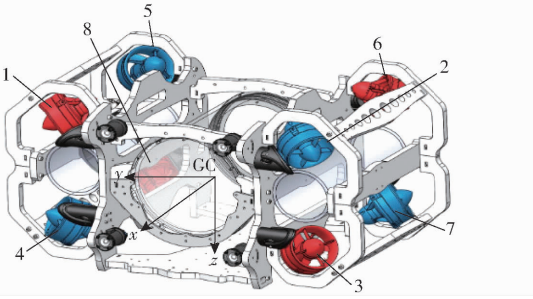

图 10　水下机器人结构设计及推进器布局[99]

Fig. 10　Structural design and thruster layout[99]



图 11　具有 3 种不同配置的可动态重构机器人 3D 模型[100]

Fig. 11　3D model of a dynamically reconfigurable robot with three distinct configurations[100]

除推进系统优化外，浮力的精确调控同样对降低渔业水下机器人能耗具有重要作用。麻省理工学院开发的 AMOUR V 机器人（图 12）采用了一种创新的浮力控制策略[101]，通过动态调整电池组位置来改变重心分布，同时结合中性浮力补偿与低通滤波推进控制算法，在负载 1 kg 条件下实现悬停能耗降低 40%。该方法的优势在于无需增加推进器系统负担即可自适应重量变化，但其控制精度受限于机械调节机构的响应速度，且在动态流场干扰下可能面临稳定性挑战。这一研究揭示了浮力-推进协

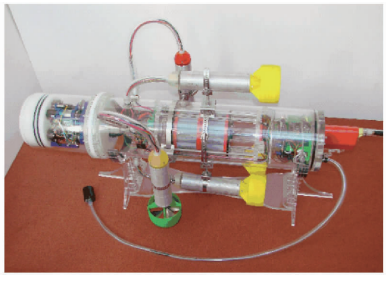

图 12　AMOUR V 机器人实物图[101]

Fig. 12　AMOUR V robot physical prototype[101]

同优化在能效提升中的潜力,但同时也表明,现有机械式浮力调节方案在快速性、鲁棒性方面仍存在局限。

水下机器人机械结构系统面临三重核心挑战:复杂流体环境不仅要求仿生推进器精确复现生物涡旋控制机制,水流扰动还会显著影响浮力调控的姿态稳定性[102];空间约束导致推进器布局自由度受限,例如四推进器方案虽能提升各向同性推力却伴随能耗增加,八推进器设计虽可增强容错能力却会加剧系统复杂性[103];软体材料需同步满足高频驱动与深海耐压需求,其密封性、轻量化性能及疲劳寿命构成当前亟待突破的关键技术瓶颈[94]。

未来研究需突破三重技术局限:首先应开发智能材料与结构创新融合技术,提升水下机器人深潜能力与生态兼容性,实现渔业监测群体的非侵入式嵌入观测;其次需发展多机器人协同集群架构,依托资源共享机制延长连续作业周期,同步提升作业效能并降低系统能耗;最后须优化仿生-传统混合推进系统,融合低噪声特性与抗流扰动能力,兼顾高速巡航与运动稳定性双重优势。

5 技术难点与发展展望

渔业水下机器人在环境监测、生物识别及生态维护领域的技术迭代面临 3 项核心瓶颈:①受复杂水流、设备震动及盐雾腐蚀等干扰,现有传感器在渔业生产数据采集与机器人位姿感知中存在精度不足问题,其智能化水平低、多源数据融合困难,难以满足自主导航与精准作业需求[104]。②水下机器视觉在低照度浑浊水域的环境适应性亟待提升:当前算法训练过度依赖清澈水体与恒定光照等理想条件,而实际渔业环境普遍存在高浑浊度水体、随机光照变化及复杂生物背景干扰,致使硬件受限场景下视觉感知失效,进而影响捕获作业可靠性。③在复杂海流与湍流干扰下,传统渔业水下机器人易因动态流场建模不足与结构的设计不当导致轨迹偏移和能耗激增[105]。

当前,渔业水下机器人技术正向多模态协同与跨域集成方向演进,特征表现为环境感知智能化、作业功能模块化及应用场景多元化[106]。在环境监测领域,搭载多源传感器的渔业水下机器人通过即时定位与地图构建(Simultaneous localization and mapping, SLAM)技术与水下物联网(Internet of things, IOT)融合[107-108],提升了养殖场域的定位精度与数据时效性,但对浑浊水体中声光信号衰减的补偿能力仍存在局限。视觉识别技术虽在理想条件下实现 95% 以上分类准确率,支撑了鱼类密度估计与疾病诊断等功能,但自然环境中悬浮物干扰、光照波动及生物遮挡导致模型泛化性能显著下降。水下清洁机器人功能扩展方面,刚性折纸结构与高压水射流技术结合提高了网箱清洁效率,同时可利用声呐和光学传感器评估清洁效果[109]。

渔业环境监测、生物识别与捕获、生态环境维护这 3 类渔业水下机器人的技术交叉融合趋势日益显著,SLAM 技术不仅服务于环境监测水下机器人的导航,还为视觉识别水下机器人提供三维环境建模支持;而区块链技术与 IOT 的结合则增强了全产业链数据的可信度[110]。

未来渔业水下机器人发展方向将聚焦于群集机器人协同作业、能源自持系统优化以及仿生学设计等方面,以应对复杂水流环境和长期作业需求:①开发基于深度学习的水动力-机械联合仿真框架,提升动态流场建模精度。②构建视觉-触觉-声呐融合感知系统,增强复杂环境下的目标识别与决策能力。③优化仿生推进机制与轻量化结构设计,通过优化 CFD 结合结构创新设计来延长续航时间。④推动群体机器人协同作业与物联网集成,实现养殖全流程的智能闭环管理,推动渔业智能化发展。通过跨学科交叉与工程实践验证,渔业水下机器人技术将进一步突破应用瓶颈,促进其向仿生化、智能化发展,推动渔业养殖迈向资源集约化、生态友好化方向转型,为全球渔业可持续发展提供坚实的技术支撑。

参 考 文 献

[1] 刘浩杨. 海洋牧场鱼类识别及统计方法[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
LIU Haoyang. Fish detection and statistical methods in marine ranching[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)

[2] 崔建玲. 机械化助力水产养殖高质量发展[N]. 农民日报, 2023-12-01(6).

[3] 联合国粮农组织.《2024 年世界渔业和水产养殖状况》报告[J]. 世界农业, 2024(7):145.

[4] ABBOTT J K, WILLARD D, XU J. Feeding the dragon: the evolution of China's fishery imports[J]. Marine Policy, 2021, 133:104733.

[5] 马雅如. 现代机械化设备在水产养殖业中的应用[J]. 中国设备工程, 2018(2):214-215.
MA Yaru. Application of modern mechanized equipment in aquaculture industry[J]. China Plant Engineering, 2018(2): 214-215. (in Chinese)

[6] 中华人民共和国农业农村部. 关于加快水产养殖机械化发展的意见[EB/OL]. (2020-11-10)[2025-03-28]. http://www.

njhs. moa. gov. cn/tzggjzcjd/202011/t20201110_6356101. htm.
[7] 夏英凯，朱明，曾鑫，等. 水产养殖水下机器人研究进展[J]. 华中农业大学学报，2021，40(3)：85－97.
XIA Yingkai，ZHU Ming，ZENG Xin，et al. Research advances in underwater robots for aquaculture[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2021，40(3)：85－97.（in Chinese）
[8] LUO Q. Dynamic regulation of ecological water quality in fishery waters based on factorial analysis[J]. Environmental Technology & Innovation，2021，21：101224.
[9] SU X，SUTARLIE L，LOH J X. Sensors，biosensors，and analytical technologies for aquaculture water quality[J]. Research，2020(1)：15.
[10] 胡金有，王靖杰，张小栓，等. 水产养殖信息化关键技术研究现状与趋势[J]. 农业机械学报，2015，46(7)：251－263.
HU Jinyou，WANG Jingjie，ZHANG Xiaoshuan，et al. Research status and development trends of information technologies in aquacultures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(7)：251－263.（in Chinese）
[11] ROHIT M H，BARUA S，AKTER I，et al. IOT based submersible ROV for pisciculture[C]// The 28th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication，2019.
[12] 陈凌轩，吴清云，谢辰旻，等. 渔业养殖水质监测改善一体化水下机器人设计[J]. 湖北农业科学，2022，61(19)：145－151.
CHEN Lingxuan，WU Qingyun，XIE Chenmin，et al. Design of integrated underwater robot for water quality monitoring and improvement of fishery breeding[J]. Hubei Agricultural Sciences，2022，61(19)：145－151.（in Chinese）
[13] 张佳奇，谢永和，李德堂，等. 养殖工船作业型水下机器人结构设计与研究[J]. 南方水产科学，2024，20(1)：11－24.
ZHANG Jiaqi，XIE Yonghe，LI Detang，et al. Structural design and research of underwater robot for aquaculture ship operation[J]. South China Fisheries Science，2024，20(1)：11－24.（in Chinese）
[14] 曹春杰，程大果，王隆娟，等. 基于 AES 加密算法和轻量级 ROV 的水质监测系统[J]. 通信学报，2018，39(增刊 2)：204－212.
CAO Chunjie，CHENG Daguo，WANG Longjuan，et al. Water quality monitoring system based on AES encryption algorithm and lightweight ROV[J]. Journal on Communications，2018，39(Supp. 2)：204－212.（in Chinese）
[15] ROJAS J，BAATAR G，CUELLAR F，et al. Modelling and essential control of an oceanographic monitoring remotely operated underwater vehicle[J]. IFAC－PapersOnLine，2018，51(29)：213－219.
[16] 周晶，司玉林，林渊，等. 海底 AUV 关键技术综述[J]. 海洋学报，2023，45(10)：1－12.
ZHOU Jing，SI Yulin，LIN Yuan，et al. A review of subsea AUV technology[J]. Acta Oceanologica Sinica，2023，45(10)：1－12.（in Chinese）
[17] BERGET G E，EIDSVIK J，ALVER M O，et al. Dynamic stochastic modeling for adaptive sampling of environmental variables using an AUV[J]. Autonomous Robots，2023，47(4)：1－20.
[18] EICHHORN M，AMENT C，JACOBI M，et al. Modular AUV system with integrated real-time water quality analysis[J]. Sensors，2018，18(6)：1837.
[19] BONIN FONT F，LALUCAT J，OLIVER CODINA G，et al. Evaluating the impact of sewage discharges on the marine environment with a lightweight AUV[J]. Marine Pollution Bulletin，2018，135：714－722.
[20] 李佳萍，宋妍霏，李思远，等. 用于水质动态监测的渔业养殖管家机器人[J]. 现代信息科技，2024，8(16)：168－171，177.
LI Jiaping，SONG Yanfei，LI Siyuan，et al. Fishery aquaculture housekeeping robot for dynamic water quality monitoring[J]. Modern Information Technology，2024，8(16)：168－171，177.（in Chinese）
[21] RYUH Y S，YANG G H，LIU J，et al. A school of robotic fish for mariculture monitoring in the sea coast[J]. Journal of Bionic Engineering，2015，12(1)：37－46.
[22] CHEN X J，LI D J，MO D Y，et al. Three-dimensional printed biomimetic robotic fish for dynamic monitoring of water quality in aquaculture[J]. Micromachines，2023，14(8)：1578.
[23] KAR S，HOSSAN I，MOHAMMAD R，et al. A smart underwater robot for research，rescue，and water quality monitoring[C]// 2024 27th International Conference on Computer and Information Technology（ICCIT）. IEEE，2024：91－96.
[24] 卢有旺. 面向水下对接的 UUV 视觉引导控制研究[D]. 武汉：华中农业大学，2023.
LU Youwang. Research on UUV visual guided control for underwater docking[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2023.（in Chinese）
[25] MAJIDI C. Soft robotics：a perspective-current trends and prospects for the future[J]. Soft Robotics，2014，1(1)：5－11.
[26] DORIGO M，THERAULAZ G，TRIANNI V. Reflections on the future of swarm robotics[J]. Science Robotics，2020，49(5)：eabe4385.
[27] DUARTE M，GOMES J，COSTA V，et al. Application of swarm robotics systems to marine environmental monitoring[C]// OCEANS，Shanghai，2016.
[28] LI J，ZHANG M，OUYANG M，et al. Design and simulation of an octopus-like AUV[J]. Academic Journal of Engineering and Technology Science，2023，6(10)：29－38.
[29] 何小龙. 轨道式水质监测机器人研究[D]. 宁波：宁波大学，2021.

HE Xiaolong. Research on water quality monitoring robot moving along track[D]. Ningbo: Ningbo University, 2021. (in Chinese)

[30] 裴蕾. 模块化水下机器人设计及力学分析[D]. 西安:西安工业大学, 2018.
PEI Lei. Modular underwater robot design and mechanical analysis[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018. (in Chinese)

[31] 张光义. 水下安全检测有缆遥控机器人控制系统研制及预测控制研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2018.
ZHANG Guangyi. Development and implementation of a control system for an underwater safety detection robot and research on the predictive control of ROV[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

[32] GOMEZ BRAVO F, GARROCHO CRUZ A, MARIN CANAS O, et al. A control architecture for developing reactive hybrid remotely operated underwater vehicles[J]. Machines, 2024,12(1):1.

[33] DEN OUDEN C J, WILLS P S, LOPES L, et al. Evolution of the hybrid aerial underwater robotic system (HAUCS) for aquaculture: sensor payload and extension development[J]. Vehicles, 2022,4(2):390 - 408.

[34] BJERKENG M, KIRKHUS T, CAHARIJA W, et al. ROV navigation in a fish cage with laser-camera triangulation[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021,9(1):79.

[35] 俞国燕,钱利文,刘皞春,等. 基于双目相机和深度学习的鱼类摄食强度分析方法[J]. 农业机械学报, 2025,56(3):403 - 413, 424.
YU Guoyan, QIAN Liwen, LIU Haochun, et al. Design and experimentation of fish feeding intensity system based on binocular cameras and deep learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(3):403 - 413,424. (in Chinese)

[36] 李道亮,姜国旗,杨建安,等. 基于计算机视觉的鱼类低氧胁迫行为检测与跟踪算法[J]. 农业机械学报, 2023,54(10):399 - 406.
LI Daoliang, JIANG Guoqi, YANG Jian'an, et al. Detection and tracking algorithm of fish hypoxia stress behavior based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(10):399 - 406. (in Chinese)

[37] 彭秋珺, 李蔚然, 李振波. 基于人工智能的鱼类行为识别研究综述[J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊 1):283 - 295.
PENG Qiujun, LI Weiran, LI Zhenbo. Review of fish behavior recognition methods based on artificial intelligence[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp. 1):283 - 295. (in Chinese)

[38] CADRIN S X. Advances in morphometric identification of fishery stocks[J]. Reviews in Fish Biology & Fisheries, 2000,10(1):91 - 112.

[39] 刘世晶,刘阳春,钱程,等. 基于 CycleGAN 和注意力增强迁移学习的小样本鱼类识别[J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊 1):296 - 302.
LIU Shijing, LIU Yangchun, QIAN Cheng, et al. Recognition of small sample cultured fish based on CycleGAN and attention enhanced transfer learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp. 1):296 - 302. (in Chinese)

[40] LIANG J M, MISHRA S, CHENG Y L. Applying image recognition and tracking methods for visual physiology detection based on a fish sensor[J]. Sensors, 2022,22(15):5545.

[41] SALMAN A, JALAL A, SHAFAIT F, et al. Fish species classification in unconstrained underwater environments based on deep learning[J]. Limnology and Oceanography:Methods, 2016,14(9):570 - 585.

[42] LIU K, WANG S, WU Y, et al. Underwater inhomogeneous light field based on improved convolutional neural net fish image recognition[J]. Open Journal of Applied Sciences, 2023,13(7):1079 - 1095.

[43] 郑荣才,谭鼎文,徐青,等. 基于改进 YOLO v7 的鲑鱼检测模型轻量化研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(11):132 - 139.
ZHENG Rongcai, TAN Dingwen, XU Qing, et al. Lightweight salmon detection model based on improved YOLO v7[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(11):132 - 139. (in Chinese)

[44] LI S, ZUO H, FU C, et al. Intelligent fish detection system with similarity-aware transformer[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2024.

[45] SHEDRAWI G, MAGRON F, VIGGA B, et al. Leveraging deep learning and computer vision technologies to enhance management of coastal fisheries in the pacific region[J]. Scientific Reports, 2024,14:20915.

[46] 徐立鸿,崔钰惠,刘世晶,等. 基于帧间深度特征差分的大西洋鲑鱼群活跃度分类模型[J]. 农业机械学报, 2023,54(11):259 - 265.
XU Lihong, CUI Yuhui, LIU Shijing, et al. Classification model of atlantic salmon activity intensity based on deep feature differencing between frames[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(11):259 - 265. (in Chinese)

[47] 徐龙琴,郑钦月,高学凯,等. 基于轻量级 CDW - YOLO v7 的鱼类排便行为自动检测方法[J]. 农业机械学报,2025,56(6):554 - 564.
XU Longqin, ZHENG Qinyue, GAO Xuekai, et al. Automatic detection of fish defecation behavior based on lightweight CDW - YOLO v7[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(6):554 - 564. (in Chinese)

[48] CUTKOSKY M R. On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1989,5(3):269 – 279.
[49] BIRK A, DOERNBACH T, MUELLER C, et al. Dexterous underwater manipulation from distant onshore locations[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2018,25(4):24 – 33.
[50] LI J Y, ZHOU H, HUANG H, et al. Design and vision based autonomous capture of sea organism with absorptive type remotely operated vehicle[J]. IEEE Access, 2018,6:73871 – 73884.
[51] LIU Q, JING T, MO A, et al. A novel robot hand with the magneto-rheological fluid solidification[C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2015.
[52] FARROW N, CORRELL N. A soft pneumatic actuator that can sense grasp and touch[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015.
[53] MEMARIAN M, GORBET R, KULIC D. Control of soft pneumatic finger-like actuators for affective motion generation[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2015.
[54] GALLOWAY K C, BECKER K P, PHILLIPS B, et al. Soft robotic grippers for biological sampling on deep reefs[J]. Soft Robot, 2016,3(1):23 – 33.
[55] KOIVIKKO A, DROTLEF D M, SITTI M, et al. Magnetically switchable soft suction grippers[J]. Extreme Mechanics Letters, 2021,44:101263.
[56] 王春森. 自适应欠驱动仿生机械手的设计[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2023.
WANG Chunsen. Design of adaptive underactuated biomimetic manipulator[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2023. (in Chinese)
[57] 汪小昱, 武尧, 肖茂华,等. 水产养殖中智能识别技术的研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2023,44(1):24 – 33.
WANG Xiaochan, WU Yao, XIAO Maohua, et al. Research progress of intelligent identification technology in aquaculture[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023,44(1):24 – 33. (in Chinese)
[58] 徐立鸿, 黄志尊, 龙伟,等. 基于 MobileViT – CBAM – BiLSTM 的开放式养殖环境鱼群摄食强度分类模型[J]. 农业机械学报, 2024,55(11):147 – 153.
XU Lihong, HUANG Zhizun, LONG Wei, et al. Classification model of fish feeding intensity based on MobileViT – CBAM – BiLSTM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(11):147 – 153. (in Chinese)
[59] 张镇府. 基于机器视觉的圈养鲈鱼智能决策投饵系统的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2022.
ZHANG Zhenfu. Research on intelligent decision feeding system for captive perch based on machine vision[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[60] 张微微, 祝开艳. 基于图像融合的低光照水下图像增强[J]. 计算技术与自动化, 2023,42(4):85 – 92.
ZHANG Weiwei, ZHU Kaiyan. Low illumination underwater image enhancement based on image fusion[J]. Computing Technology and Automation, 2023,42(4):85 – 92. (in Chinese)
[61] VO T T E, KO H, HUH J H, et al. Overview of smart aquaculture system: focusing on applications of machine learning and computer vision[J]. Electronics, 2021,10(22):2882.
[62] ZHANG S, YANG X, WANG Y, et al. Automatic fish population counting by machine vision and a hybrid deep neural network model[J]. Animals, 2020,10(2):364.
[63] UBINA N A, CHENG S C, CHEN H Y, et al. A visual aquaculture system using a cloud-based autonomous drones[J]. Drones, 2021,5(4):109.
[64] 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.
CHENG Shiqi, SHI Jiangao, YUAN Rui, et al. Current situation and future development direction of marine cage in China[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2022,49(6):369 – 376,380. (in Chinese)
[65] 彭安华, 刘成文, 陆波. 一种带有清洗装置和数据采集系统的深水网箱[J]. 南方农业, 2016,10(3):169 – 171.
PENG Anhua, LIU Chengwen, LU Bo. A deep-water cage with cleaning device and data acquisition system[J]. South China Agriculture, 2016,10(3):169 – 171. (in Chinese)
[66] 宋协法. 网箱养殖配套设备的设计与试验研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2006.
SONG Xiefa. The farming auxiliary equipments of net cage design and research with experiment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. (in Chinese)
[67] 林广, 李伟洪, 肖景强,等. 一种网箱清理水下机器人设计[J]. 南方农机, 2022,53(17):129 – 131,135.
LIN Guang, LI Weihong, XIAO Jingqiang, et al. Design of an underwater robot for cage cleaning[J]. Agricultural Equipment Research & Development, 2022,53(17):129 – 131,135. (in Chinese)
[68] 房熊. 一种新型水下网箱清洗机器人的设计探索[J]. 机电设备, 2020,37(6):57 – 60,64.
FANG Xiong. Design of a new type of underwater cage cleaning robot[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2020,37(6):57 – 60,64. (in Chinese)
[69] 庄集超, 庞洪臣, 刘子浪,等. 一种新型深海网箱网衣清洗机器人设计[J]. 机械, 2018,45(1):72 – 75.
ZHUANG Jichao, PANG Hongchen, LIU Zilang, et al. Design of a new deep-sea net cage cleaning robot[J]. Machinery,

2018,45(1):72 – 75. (in Chinese)
[70] 王志勇. 网箱养殖水下清洗装置设计[J]. 现代农业科技, 2018(17):169,171.
WANG Zhiyong. Underwater cleaning device for cage culture[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(17): 169,171. (in Chinese)
[71] 赖泓杰, 陈泽佳, 吴志安,等. 某面向深水网箱作业的水下机器人[J]. 机电设备, 2021,38(6):48 – 54.
LAI Hongjie, CHEN Zejia, WU Zhian, et al. An underwater robot for deep-water cage operations[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2021,38(6):48 – 54. (in Chinese)
[72] 刘冠灵, 卫泓宇, 李志鹏,等. 履带式深海网箱清洗机器人的设计[J]. 机械制造, 2019,57(4):11 – 14.
LIU Guanling, WEI Hongyu, LI Zhipeng, et al. Design of a crawler-type deep-sea cage cleaning robot[J]. Machinery Manufacturing, 2019,57(4):11 – 14. (in Chinese)
[73] CHEN Y. Research advances in marine aquaculture net-cleaning robots[J]. Sensors, 2024,24(23):7555.
[74] 林礼群, 刘平, 王志勇. 基于空化射流技术的养殖网箱水下清洗喷嘴数值模拟[J]. 渔业现代化, 2020,47(5):59 – 65.
LIN Liqun, LIU Ping, WANG Zhiyong. Numerical simulation of underwater cleaning nozzle of aquaculture cage based on cavitating jet technology[J]. Fishery Modernization, 2020,47(5):59 – 65. (in Chinese)
[75] 张磊. 水下网箱清洗机器人运动控制技术研究[D]. 济南:齐鲁工业大学, 2023.
ZHANG Lei. Research on motion control technology of underwater cage cleaning robot[D]. Ji'nan: Qilu University of Technology, 2023. (in Chinese)
[76] 颜承昊, 林远山, 李然,等. 一种基于 PPO 的 AUV 网箱巡检方法[J]. 计算机与数字工程, 2023,51(1):93 – 97.
YAN Chenghao, LIN Yuanshan, LI Ran, et al. An AUV cage inspection method based on PPO[J]. Computer & Digital Engineering, 2023,51(1):93 – 97. (in Chinese)
[77] VASILEIOU M, MANOS N, KAVALLIERATOU E. MURA: a multipurpose underwater robotic arm mounted on kalypso UUV in aquaculture[J]. Marine Systems & Ocean Technology, 2023,18:111 – 123.
[78] AKRAM W, CASAVOLA A, KAPETANOVIC N, et al. A visual servoing scheme for autonomous aquaculture net pens inspection using ROV[J]. Sensors, 2022,22(9):3525.
[79] FLOERL O, SUNDE L M, BLOECHER N. Potential environmental risks associated with biofouling management in salmon aquaculture[J]. Aquaculture Environment Interactions, 2016,8:407 – 417.
[80] 黄达. 水下鱼池清刷机器人关键技术研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2020.
HUANG Da. Research on key technologies of underwater fish tank cleaning robot[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020. (in Chinese)
[81] KAPETANOVI N, GORIANEC J, VATAVUK I, et al. Heterogeneous autonomous robotic system in viticulture and mariculture: vehicles development and systems integration[J]. Sensors, 2022,22(8):2961.
[82] 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, 2020,2:1946.
[83] 张欢欢. 水下机器人运动控制方法研究[D]. 西安:西安工业大学, 2019.
ZHANG Huanhuan. Research on motion control method of underwater vehicle[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019. (in Chinese)
[84] ZHANG W, ZHU K, YANG Z, et al. Development of an underwater detection robot for the structures with pile foundation[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024,12(7):1051.
[85] LIU Q, CHEN H, WANG Z, et al. A manta ray robot with soft material based flapping wing[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022,10(7):962.
[86] TAKADA Y, ARAKI R, NAKANISHI Y, et al. Development of small fish robots powered by small and ultra-light passive-type polymer electrolyte fuel cells[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2010,22(2):150 – 157.
[87] RAJ A, THAKUR A. Fish-inspired robots: design, sensing, actuation, and autonomy-a review of research[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2016,11(3):031001.
[88] ARAGAKI D, NISHIMURA T, SATO R, et al. Biomimetic soft underwater robot inspired by the red muscle and tendon structure of fish[J]. Biomimetics, 2023,8(2):133.
[89] WANG Y, CAI Y, XIE B, et al. A computational study on the hydrodynamics of bio-inspired quadrupedal paddling[J]. Biomimetics, 2025,10(3):148.
[90] MITRA S, SEHGAL V, RATHORE S, et al. Design and control strategy of bio-inspired underwater vehicle with flexible propulsor[J]. Journal of Modern Mechanical Engineering and Technology, 2021,8:57 – 65.
[91] LUO Y, XU T, HUANG Q, et al. A numerical investigation on thrust and torque production of a batoid fish with asymmetric pectoral fins flapping[J]. Ocean Engineering, 2022,263:112342.
[92] CHEN L, BI S, CAI Y, et al. Design and hydrodynamic experiment research on novel biomimetic pectoral fins of a ray-inspired robotic fish[J]. Machines, 2022,10(8):606.
[93] LIU F F, LEE K M, YANG C J. Hydrodynamics of an undulating fin for a wave-like locomotion system design[J]. IEEE/

ASME Transactions on Mechatronics, 2012,17(3):554 – 562.
[94] KATZSCHMANN R K, DELPRETO J, MACCURDY R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish[J]. Science Robotics, 2018,3(16):eaar3449.
[95] HUANG H C, SHENG C W, WU J N, et al. Hydrodynamic analysis and motion simulation of fin and propeller driven manta ray robot[J]. Applied Ocean Research, 2021,108:102528.
[96] LAMAS M I, RODRIGUEZ J D D, VIDAL C G R. CFD analysis of biologically-inspired marine propulsors[J]. BRODOGRADNJA, 2012,63(2):125 – 133.
[97] LAMAS M I, RODRIGUEZ J D D, VIDAL C G R, et al. Three-dimensional CFD analysis to study the thrust and efficiency of a biologically-inspired marine propulsor[J]. Polish Maritime Research, 2011,18(1):10 – 16.
[98] HELMAOUI M, SAIDI F, LAIDOUDI H, et al. Layout effect of two autonomous underwater vehicles on the hydrodynamics performances[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2020,19(7):47 – 54.
[99] GARCIA N S, GARCIA R M A, ZAMORA S A E, et al. Development of a 6 degree of freedom unmanned underwater vehicle: design, construction and real-time experiments[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023,11(9):1744.
[100] DANG T, LAPIERRE L, ZAPATA R, et al. Energy-efficient configuration and control allocation for a dynamically reconfigurable underwater robot[J]. Sensors, 2023,23(12):5439.
[101] YASILESCU I, DETWEILER C, DONIEC M, et al. AMOUR V: a hovering energy efficient underwater robot capable of dynamic payloads[J]. International Journal of Robotics Research, 2010,29(5):547 – 570.
[102] ZHANG F R, HOU J Y, NING D Y, et al. Depth control of an oil bladder type deep-sea AUV based on fuzzy adaptive linear active disturbance rejection control[J]. Machines, 2022,10(3):163.
[103] PUGI L, ALLOTTA B, PAGLIAI M. Redundant and reconfigurable propulsion systems to improve motion capability of underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2018,148:376 – 385.
[104] SUN L X, WANG Y, HUI X L, et al. Underwater robots and key technologies for operation control[J]. Cyborg and Bionic Systems, 2024,5:0089.
[105] FENG H D, YUAN D H, MIAO J L, et al. Efficient navigation of a robotic fish swimming across the vortical flow field[J]. Journal of Hydrodynamics, 2024,36:1118 – 1129.
[106] WRIGHT M, XIAO Q, DAI S H, et al. Design and development of modular magnetic bio-inspired autonomous underwater robot-MMBAUV[J]. Ocean Engineering, 2023,273:113968.
[107] RAHMAN S, LI A Q, REKLEITIS I. SVIn2: an underwater SLAM system using sonar, visual, inertial, and depth sensor[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Macau, 2019:1861 – 1868.
[108] OLANUBI O O, AKANO T T, ASAOLU O S. Design and development of an IOT-based intelligent water quality management system for aquaculture[J]. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2024,11:15.
[109] TEIXEIRA P V, FOURIE D, KAESS M, et al. Dense, sonar-based reconstruction of underwater scenes[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2019.
[110] ZHANG H W, GUI F K. The application and research of new digital technology in marine aquaculture[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023,11(2):401.
[111] WIBISONO A, PIRAN M J, SONG H K, et al. A survey on unmanned underwater vehicles: challenges, enabling technologies, and future research directions[J]. Sensors, 2023,23(17):7321.