



· 综述 ·

中国水产养殖装备发展现状

刘世晶^{1,2}, 李国栋¹, 刘 晃¹, 郑浩君³, 陈 军^{1*}

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;

2. 中国海洋大学三亚海洋研究院, 海南 三亚 572011;

3. 大连海洋大学航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 水产养殖装备是高效发展现代水产养殖, 促进水产养殖产业结构改革的重要技术支撑。基于养殖装备、信息技术和自动控制等多学科协同发力的智慧水产养殖模式已成为现代渔业高质量发展的新趋势与重要抓手, 这也对水产养殖现有装备及其相关技术提出了更高的智能化要求。本文梳理了池塘、工厂化、网箱、筏式和底播养殖等 5 种主要养殖方式装备发展现状, 从数字化和智能化角度分析了环境监测、对象感知、饲料投喂、分级计数等养殖环节中常用装备的研究进展, 指出了制约我国水产养殖智能装备与技术发展的关键问题, 提出了“机械化、自动化、智能化”的水产养殖装备与技术发展的新思路, 旨在实现我国从水产养殖大国向水产养殖强国的历史转变。

关键词: 水产养殖; 装备; 机械化; 自动化; 智能化

中图分类号: S 969

文献标志码: A

我国是水产养殖大国, 2021 年养殖产量达到 5394 万 t, 占水产品总产量 80%, 占世界养殖产量 60% 以上, 是世界上唯一养殖总量超过捕捞总量的主要渔业国^[1]。水产养殖产品在改善居民膳食结构、供给优质蛋白等方面作用突出, 为保障我国粮食安全做出了重要贡献^[2-4]。但是, 随着社会城镇化的发展, 青年就业观念的变化以及人口老龄化的推进^[5], “谁来养鱼”已经成为严峻的社会问题。改变水产养殖劳动密集型生产作业方式, 将装备技术和智能技术有机整合, 以机器人代, 实现渔业生产机械化、自动化、智能化是解决上述问题的有效途径^[6]。

伴随着渔业生产力的发展, 我国的水产养殖装备从无到有, 取得了长足的进步, 但是相比于农业其他领域, 我国水产养殖机械化水平仍然偏低,

机械化率仅为 30% 左右。2020 年全国水产养殖机械装备总量约为 456.51 万台, 其中增氧机、投饲机分别达到 337.33 万台和 106.76 万台, 分别占到总数的 74% 和 23%^[7], 主要生产环节基本实现有机可用, 但装备种类单一, 环境调控、捕捞、分选、废弃物收集处理等配套作业装备相对较少, 不同养殖方式机械化水平差异较大, 存在结构不平衡, 发展水平不平衡等问题。近年来, 随着信息技术的发展, 智能传感^[8]、物联网^[9]、装备智控^[10]、云计算^[11]等技术逐渐应用到水产养殖领域, 水产养殖机械化生产装备逐步向自动化、智能化方向发展^[12], 新技术和新装备不断涌现, 为提升水产养殖智能化作业能力、提高养殖生产效率提供了有效的技术支撑。

本文围绕池塘、工厂化、网箱、筏式以及底

收稿日期: 2023-10-06 修回日期: 2023-11-03

资助项目: 青岛海洋科技中心山东省专项经费 (2022QNLMO30001-2)

第一作者: 刘世晶, 从事渔业信息化、图像处理、模式识别和机器视觉相关领域研究, E-mail: liushijing@fmiri.ac.cn

通信作者: 陈军 (照片), 从事数字渔业相关领域研究, E-mail: chenjun@fmiri.ac.cn



播式等我国主要养殖方式, 深入分析不同养殖模式机械装备应用现状, 并从环境监测^[13]、养殖对象感知^[14]、智能投喂^[15]和分级计数^[16-17]等方向分析我国水产养殖智能装备技术的研究进展, 指出制约我国水产养殖装备发展的关键问题, 提出“机械化、自动化、智能化”的水产养殖装备与技术发展的新思路。

1 水产养殖装备发展现状

1.1 池塘养殖装备

作为我国水产养殖主要生产方式, 池塘养殖产量占养殖总产量的50%以上^[18]。池塘作业装备主要分为水质监测、水质调控、投喂、疫苗注射、捕捞、分选以及清淤等方向, 其中投喂环节和水质调控中增氧环节已经实现机械化^[19-20], “十三五”以来, 一批新研发的船载式^[21]、机载式移动投喂^[22]以及料塔式固定投喂装备^[23]已经逐步应用到养殖生产过程中, 太阳能底质改良机^[24]、移动式增氧机^[25]等新型水质调控装备也进行了小范围的推广应用, 取得了良好的应用效果。水质监测装备方面, 随着传感器技术的成熟, 溶解氧^[26]、pH值^[27]、浊度^[28]、盐度^[29]、水温^[30]等传感器得到一定程度应用, 但受养殖特点、作业方式以及设备寿命和价格等多种因素影响, 水质监测应用潜力有待进一步释放^[31]。此外, 捕捞、分选以及疫苗注射环节基本依靠人工, 虽然相关机构开展了专用技术研究, 但技术、制造以及应用成熟度仍然偏低, 相关装备应用较少^[19]。

1.2 工厂化养殖装备

工厂化养殖是指在相对可控的环境下, 采用工业化生产方式为养殖对象提供适宜稳定的生长环境, 以提升养殖产量、品质和效益。受政策、环境以及资源等多重影响, 近年来工厂化养殖发展迅速, 虽然养殖产能仅占总产量的1%左右^[32], 但养殖机械化水平比较高, 据调查显示, 江苏、安徽等5个渔业大省工厂化养殖机械化水平达到61.79%^[19], 远远高于池塘养殖水平。

工厂化养殖核心装备主要分为感知装备、自动控制装备和作业装备等, 主要涵盖温控、投喂、过滤、增氧、杀菌、集污、分级、起捕等生产环节^[19]。其中常规水质监测^[33]、自动投喂^[34]、集污排污分离器^[35]、微滤机^[36]、增氧脱气装备^[37]、杀菌装备^[38]、生物滤器^[39-40]等重点环节装备基本实

现国产化, 但是自动清污、精准投喂、死鱼起捕、无人巡检等智能化装备缺失, 仍是我国工厂化养殖发展的薄弱环节。

1.3 网箱养殖装备

网箱养殖作为水产养殖重要组成部分, 其养殖产量占我所水产养殖总产量的5%左右^[7]。我国网箱养殖始于20世纪70年代, 多集中于港湾内及近岸海域, 随着环境污染和环保压力的增加, 淡水网箱和近岸小型网箱逐渐被深水网箱所取代^[41]。网箱作为一种集约化渔业生产方式, 其作业装备不仅包括环境监测、投喂、起捕、分选、网衣清洗等机械设备, 还包括网箱装备本体。近年来, 得益于我国深远海养殖产业快速发展, 网箱以及与之相配套的设备发展较为迅速, 大型桁架式和重力式深水网箱初步实现国产化, 并逐步应用到产业生产当中^[42], 但是在网箱的性能、使用寿命方面与国外相比仍有较大差距^[43]; 在投喂和起捕装备方面, 国内目前仍主要采用传统人力方式或半自动作业的方式^[44], 但集中投喂系统、投喂船、离心式、真空室吸鱼泵等机械装备已经逐步应用到生产实践当中, 且基本实现国产化^[41]。网衣清洗环节目前主要依靠人工, 潮流动力型网箱清洗装置、轨道式网箱清洗装置以及水下清洗机器人等机械设备尚处于研发阶段, 离实际产业生产应用还有一定距离。

1.4 筏式吊笼与底播养殖装备

筏式吊笼与底播养殖在我国沿海地区规模较大, 产量大约占了水产养殖总产量的30%以上^[45], 其中筏式养殖作业包括育苗、布放、采收、清洗、转运和分级等环节^[19], 底播养殖作业主要包括布放、采收、转运和分级等环节。我国的养殖筏架架设一般是根据经验, 缺乏相对一致的建设规范, 吊绳、吊笼设置各异, 筏架控制及升降工程化程度低^[45]; 而底播养殖由于播撒面积大、水域底质环境复杂, 且主要养殖贝类、海参等低运动能力生物, 增加了采收装备技术应用难度, 上述问题制约了筏式吊笼与底播养殖机械化装备的深度应用。整体来看, 除电动拔笼、电动拔梗等部分简化装置外^[19], 滩涂贝播苗与采捕、坛紫菜采收、养殖吊笼清洗以及海带、牡蛎海上自动收获和清洗等环节的机械化程度较低^[46], 养殖生产主要依靠人工, 相关机械设备尚处于研发阶段。

2 智能水产养殖装备研究进展

2.1 养殖环境监测装备

养殖环境监测装备作为水产养殖产业应用最成熟的信息感知装备, 已在池塘、工厂化、网箱等各种养殖模式得到广泛应用^[47]。养殖环境监测装备主要包括水质监测和气象监测两种类型, 其中气温、气压、风向、风速、光辐照度、降雨量等气象监测传感器已经非常成熟, 相关产品已经实现国产化^[48]。水产养殖是一种以水为载体的生产作业方式, 水质监测在水产养殖种起到十分重要的作用。近年来, 相关企业和研究机构纷纷开

始水质监测传感器研究, pH值、盐度、溶解氧、浊度等常规水质传感器陆续实现国产化^[26-30], 荧光溶解氧传感器^[49]、水凝胶pH传感器^[50]、光纤浊度传感器^[51]等新技术、新产品不断涌现, 并逐步开始产业化应用。但是, 面向水产养殖产业水环境监测需求, 三态氮、亚硝酸盐、COD等与水产养殖安全生产紧密相关的水质参数尚缺乏有效的在线监测手段, 常见的抽水式监测设备主要采用分光光度法、比色计等实验室手段实现自动化测量^[52-53], 设备运行对工况条件要求较高、安装和维护复杂、经济性低, 无法满足大面积产业应用需要^[54]。

表 1 环境监测装备产业应用现状

Tab. 1 The current application status of environmental monitoring equipment industry

系统类型 type	典型代表 typical representative	获取数据 data procurement	应用现状 current status
养殖环境监测系统	养殖用水监测	溶氧、pH、水温、盐度、氧化还原电位(ORP)等	逐步开始产业化应用
	尾水监测	三态氮、亚硝酸盐、COD等	应用较少
	养殖气象监测	气温、气压、光辐照度、风速、风向、降雨量等	广泛应用

2.2 养殖对象信息感知装备

水产养殖对象信息感知技术主要是利用声光电等感知设备、数据库、大数据分析等自动化平台装备及信息化技术手段, 系统、高效地获取养

殖对象表型、行为、集群(生物量)等信息(图1), 包含从基因与环境相互作用形成的作物表型原始数据^[55]、从生理与环境相互作用形成的养殖生物行为和集群原始数据^[54]。

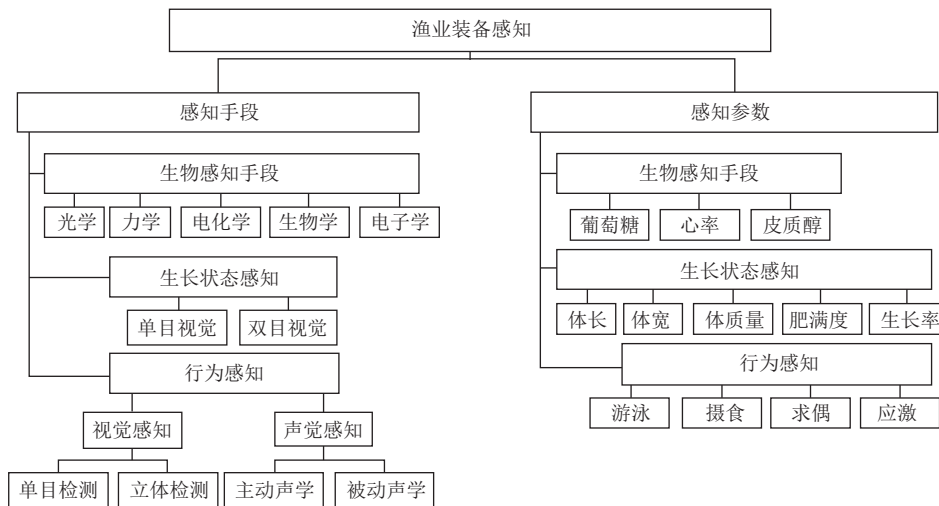


图 1 养殖对象信息感知技术框图

Fig. 1 Aquaculture objects intelligent sensing technology framework

生物感知装备 作为在线生物监测的工具, 生物传感器广泛用于鱼类健康和福利研究^[56]。目前, 生物感知技术主要监测心率、葡萄糖、皮质醇等指标, 主要采用穿戴式监测方式, 涉及力学、

电子学、光学、电化学、生物学等方法^[57]。目前, 心率感知相关技术比较成熟, 已被用于评估鱼类急性压力、压力恢复时间以及压力相关的潜在死亡率^[58]。皮质醇和葡萄糖作为胁迫指标具有快速、

灵敏度高、可重复等优点, 目前已经成为生物感知技术研究热点^[57]。目前, 皮质醇感知技术主要利用基于免疫反应和电化学测量实现皮质醇检测^[59-60], 并使用葡萄糖氧化酶作为信息放大器增加皮质醇检测范围^[61]; 葡萄糖感知技术主要采用插入式针型鱼尾静脉传感器以及植入式鱼眼球巩膜组织间液酶传感器两种类型^[62-63]。整体上看, 大多数生物传感器都需要植入鱼体内^[57], 这不可避免地会对鱼类健康和行为造成影响, 未来的研究重点是开发不影响鱼类活动和行为的生物传感器^[64]。

生长状态感知装备 全长、体长、宽度、厚度等表型信息以及体重等状态数据是养殖对象重要的生长指标, 是精准投喂控制和辅助养殖策略制定的依据^[65]。目前, 生长状态感知主要对象为鱼类^[66-67], 主要手段为视觉观测技术^[54], 但是由于水下场景光线吸收散射以及光路折射等干扰因素影响, 传统的立体观测和图像分析技术和装备无法直接应用到水下场景, 因此高通量在线感知鱼类表型信息、精准反演鱼类体重数据, 成为现代化智能养殖生产决策亟待解决的难题。

在鱼类表型观测领域, 相关研究主要集中在实验室场景^[68], 主要使用单目视觉技术通过约束养殖对象和相机距离测量鱼类表型数据^[69]。随着立体视觉技术的发展, 已经有相关研究机构采用传统的空气中的感知手段开展水下观测技术研究, 但是由于没有考虑水下环境噪声干扰, 导致测量误差较大, 无法直接应用到养殖实践中。在鱼类体质量预测领域, 由于缺乏相关鱼类表型详细信息, 相关研究主要利用体长和重量构建回归模型, 实现重量预测^[70], 由于没有考虑鱼体宽度和厚度等个体差异指标, 导致预测精度误差较大。

近年来, 国内研究机构围绕水下立体视觉观测技术开展攻关研究, 攻克了水下立体噪声去除、小样本识别、水下高精度测量以及高通量计算等关键技术, 研发了全球首套水下鱼类生长状态观测系统^[71], 实现鱼类表型和生长状态高通量在线观测, 相关技术已经在遗传育种、水产养殖实际生产实践中推广应用, 取得了良好的应用效果。

行为感知装备 准确的水产养殖对象行为识别有助于实现精细化养殖, 保障养殖福利, 提升养殖经济效益^[72]。目前养殖对象行为感知技术研究主要关注鱼、虾、蟹等具备游动能力的养殖

对象, 主要感知游泳、摄食、体色和其他应激行为发生时外在表现(速度、方向、空间分布、体色变化)等。

①视觉感知装备。随着计算机技术的发展, 机器视觉方法已被普遍应用于监测鱼的游泳行为, 这为运动模式监测提供了一种非接触且有效的方法^[73]。基于可见光的机器视觉系统分为单目检测和立体检测, 通过感知和理解像素级图像信息, 为鱼类检测和识别提供自动化工具。目前基于视觉检测方法鱼类行为研究主要集中在环境可控实验室场景, 主要检测分析包括运动速度、运动方向、运动加速度等个体运动行为^[74]以及空间分布和群体运动等群体游泳行为等^[75], 研究手段逐渐从单目视觉检测发展到立体视觉检测, 研究趋势也从单帧图像识别发展到综合时空信息利用多帧图像联合分析^[76]。近年来, 随着硬件计算能力和深度学习技术的发展, 为大流量连续视频监控提供了可能的技术手段, 视觉检测技术还被应用到呼吸频率、摆尾频率和体色等具有微小、复杂运动特征的生理活动监测^[77-79]。视觉技术可以有效获取鱼类运动信息, 并分析环境变化对鱼类行为可能产生的影响, 但是由于鱼类在游泳行为和对压力的生理反应方面表现出很大的差异, 建立数学模型来量化鱼类压力与行为反应之间的关系是一件非常具有挑战性的工作。此外, 面向水体浑浊、光照条件不足以及群体运动遮挡等强噪声实际养殖场景, 如何获取清晰可用的鱼类图像, 是视觉技术产业化应用必须解决的问题。

②声学感知装备。水声学为研究鱼类行为和空间分布提供了一种可靠的方法。与基于机器视觉的方法相比, 基于声学的方法扩大了测量范围, 克服了对透明度和照明条件的依赖。目前, 基于声学的鱼类行为观测主要分为主动声学方法和被动声学方法, 其中主动声呐作为主动声学方法代表性产品, 已应用于水生动物行为研究^[80]。主动声呐技术是指装备主动发射声波, 而后接收水中目标反射的回波时间, 以及回波参数以测定目标的参数, 主要用于水生生物行为观测中目标检测、分类、定位和跟踪^[80-82]。高频图像声呐由于其良好的成像性能, 相比光学图像处理图像声呐能够提供包括回波强度和能量等额外信息, 已经用于评估鱼类在深海中的分布和空间位置^[83]。然而, 面向水产养殖产业生产实际, 该技术在广泛应用

之前, 必须根据产业生产实际在综合考虑声纳设备分辨率和经济性基础上开展工作。被动声学方法是一种非侵入性监测方法, 通过监听鱼类产生的声音进而分析鱼类行为。相关技术已经应用到水生动物摄食、求偶、产卵等发声行为监测^[84-86]。影响被动监听效果主要因素包括声音信号的强度、声源的距离以及水面和水下噪音, 目前基于机器学习方法在噪声去除方面取得较好的效果^[87], 但是面对全频噪声滤除以及如何选择有效监听距离和频段, 仍是影响被动声学技术产业深入应用限制因素。

2.3 精准投喂装备

饲料投喂是水产养殖生产作业核心环节之一, 智能投喂装备的发展对提高产业的生产效率具有重要作用。目前, 智能投喂装备研究主要分为两个方向, 一是从硬件设备角度出发, 通过结构、功能集成设计, 结合装备传感器和工业控制器, 开展具备自动、精准作业能力装备本体研发; 另一种是从智能决策角度出发, 利用视觉、声学等感知手段、大数据处理方法和人工智能技术对养殖生物摄食行为、空间分布等影响投喂过程决策的重要因素进行识别和量化, 结合反馈控制模型构建, 实现投喂量或者投喂时间智能调控^[88]。

针对池塘、工厂化、网箱等不同水产养殖生产模式以及鱼、虾、蟹等不同养殖品种智能投喂需求, 投喂装备主要从定点式集中投喂和移动式均匀投喂两个方向开展研究, 先后研发了自巡航虾塘移动投喂船^[21]、料塔式集中投喂机^[23]等适用于池塘、轨道式投饲机^[89]、智能投饲车等^[90]适用于室内工厂化以及远距离风力投喂^[91]、智能投喂船^[92]等适用于网箱养殖场景的投喂装备(表2)。

表 2 投喂装备研究现状

Tab. 2 Research status of feeding equipment

应用场景 application scenarios	主要研究方向 main research directions	成熟度 stage
池塘	自巡航虾塘移动投喂船	试验样机
	料塔式集中投喂机	产品成熟
工厂化	轨道式投饲机	试验样机
	智能投饲车	研发阶段
网箱	远距离风力投喂	产品成熟
	大型投喂船	产品成熟

在智能投喂决策算法方面, 基于机器视觉的摄食行为量化研究较多, 已经开展了基于水上和

水下两种不同视觉观测方式相机的鱼类摄食行为识别量化方法研究, 并对摄食行为进行了细粒度分割, 为动态投喂决策制定提供了有效的行为变量反馈信息^[93-95]。基于摄食声音强度和残饵回声探测是基于声学摄食状态监测两种主要手段, 其中基于摄食声音强度相关研究主要集中在鱼、虾两种品种以及池塘、工厂化两种场景^[86], 而残饵回声探测研究主要集中在网箱养殖场景^[96]。目前, 鱼类摄食行为识别量化技术研究仍集中在特定实验场景, 尚没有形成可产业化应用稳定、可靠的技术手段。

表 3 智能投喂决策算法研究现状

Tab. 3 Research status of intelligent feeding decision algorithms

技术类型 type of technology	主要研究方向 main research directions	适用场景 applicable scene	成熟度 stage
光学 optics	水上摄食行为监测	池塘、工厂化、网箱	研发阶段
	水下集群行为监测	工厂化、网箱	研发阶段
声学 acoustics	被动声学技术	池塘、网箱	试验样机
	主动声学技术	网箱	研发阶段

2.4 分级计数装备

水产养殖生物分级计数是养殖生产作业重要内容, 覆盖苗种采购入池、差异规格分池以及起捕销售等多个生产环节。目前, 分级计数装备核心研究对象为鱼类, 其原理是利用鱼体外形尺寸与体质量差异进行分级, 辊轴式^[97]和回转式^[98]分级装置是两个主流研究方向, 而计数装置一般采用光电计数器。近年来, 随着智能制造技术的不断发展, 融合机器视觉技术体尺测量、体重估算和数量精准统计已经成为无损、高效分级计数装备的主要研究方向, 其工作原理是将机器视觉装置放置于鱼类传输轨道上方, 通过目标识别、定位、测量过程实现大小分级和数量统计^[99]。利用机器视觉实现无接触式的鱼类体尺测量, 主要有基于二维图像^[100]、深度图像^[101]或点云数据^[102]进行建模的方法, 其中基于二维图像建模方法应用结构简单, 主要根据相机和轨道空间位置关系统计鱼体尺寸, 对结构稳定性和安装标准性有较高要求^[100]; 深度图像建模方法主要是利用立体视觉相机获取鱼类尺寸和数量信息, 对工作距离和安装方式鲁棒性较强, 但需要较高数据计算能力, 相对成本较高^[101]; 点云数据建模方法主要是利用结构光等立体视觉技术, 实现鱼体尺寸和数量统

计, 具备测量精度高、计算速度快等优点^[102], 但是由于结构光测量方式需要结合鱼类姿态和输送速度进行数据换算, 对整机稳定性和速度匹配性有较高要求, 且由于结构光测量仪器价格较高, 导致其装配成本远高于二维图像和深度图像建模方法。目前, 基于辊轴式和回转式分级技术装置已经逐步开始产业实践应用^[97-98], 而国内基于机器视觉的装置尚处于试验研发阶段, 尚未开展产业推广应用。

3 存在问题及解决思路

3.1 存在问题

我国水产养殖装备正向自动化、智能化方向发展, 但是面向水产养殖装备发展现状以及不同生产环节机械化作业需求, “机器人”无人作业方式仍有很多技术问题需要攻克, 存在配套的机械化作业生产模式尚未建立、水产养殖装备核心技术、关键技术不足、信息技术与装备融合度不够等问题。

全程机械化作业生产模式尚未建立 我国水产养殖具有养殖种类多、养殖模式多、养殖区域广等特点, 对水产养殖装备多样性要求较高, 不同养殖模式装备发展极不均衡。例如, 筏式吊笼与底播养殖等生产作业环境复杂, 生产作业标准化程度低, 缺乏装备技术应用的基础条件; 池塘养殖捕捞等环节主要通过社会化服务方式解决, 标准化装备研发难度大, 对装备技术应用和发展造成较大影响。此外, 我国很多地区水产养殖模式以“一家一户”生产方式为主, 集约化、规模化养殖企业较少, 很大程度上制约了其大范围应用。

水产养殖装备核心技术、关键技术不足

自 20 世纪 80 年代, 叶轮式增氧机等国产化装备研制成功后, 我国水产养殖装备研究步伐逐渐放缓, 20 世纪 90 年代以来, 我国渔业装备技术发展主要依靠引进和消化吸收, 水产养殖装备基础技术研究不足, 装备核心技术、关键技术匮乏, 自主创新能力较弱。例如, 池底清污、网箱清洗等作业过程主要依靠人工, 可靠、柔性、低扰动的清污和行走关键部件缺乏。集中式投喂、轨道式投喂、水下巡检等方面对进口产品依赖度较高, 国产化装备在稳定性、可靠性等方面存在不足, 场景针对性差, 故障率较高, 尚不能为养殖装备

应用推广提供全方位的技术支撑。

信息技术与装备融合度不够 我国水产养殖装备主要处于机械替代人力阶段, 以电控技术为核心实现自动化是目前的主流, 养殖环境、养殖对象等信息与装备融合度不够。目前, 大多数增氧、投喂、换水装备只能做到手动或者定时开关, 而鱼类生长状态、饥饿程度、水质变化规律等模型算法缺乏, 导致精准投喂与环境智控模型存在功能性缺陷, 无法将装备作业活动与环境参数、生长状态和鱼类行为有效结合, 成为水产养殖装备转型升级、绿色发展的瓶颈。

3.2 解决思路

针对水产养殖装备发展过程中存在的问题, 必须分阶段、分步骤、分场景因地制宜地开展相关研究, 逐步实现人工作业环节的机械化升级、机械化作业环节的自动化升级以及自动化作业装备的智能化升级, 形成“机械化、自动化、智能化”的水产养殖机械装备发展思路, 是提升我国水产养殖装备现代化发展的有效路径。

水产养殖重要生产环节机械化全覆盖是一项长期任务。需着力提升水产养殖生产全程机械化水平, 补齐全程机械化短板。主要围绕池塘捕捞、池底清污、网箱清洗以及海带、牡蛎海上自动收获和清洗等主要以人工生产方式为主的关键作业环节, 开展机械化关键技术研究, 实现“机械代人”, 推进水产养殖机械化生产关键环节减损提质、构建全程机械化高效生产体系。

机械作业环节自动化改造是实现装备升级重要任务。推进绿色高效水产养殖自动化机械装备研发应用, 集成应用先进工业控制技术, 重点围绕自动控制增氧、投喂、换水、过滤、杀菌等生产环节, 实现设备启停、功率、工作时间等关键参数的自动控制, 降低生产环节人为操作失误带来的养殖风险, 推进机械化生产数字化管理、提高养殖生产标准化作业能力。

养殖装备智能化是实现产业现代化的主要标志。推动水产养殖装备技术创新、示范运用智能化技术, 实现装备控制和决策管理的智能化, 主要包括环境、对象及作业过程信息的智能感知、基于感知数据智能分析的装备智能控制和自主作业、面向养殖生产全过程基于全局智能决策的装备物联与协同作业等, 是“机器人”高级表现形式。

4 水产养殖智能化装备发展展望

本文在梳理我国水产养殖机械化发展现状的基础上, 从水产养殖装备智能感知、智能投喂、分级计数和养殖机器人等方向系统分析了我国水产养殖智能装备技术的研究进展, 为实现我国从水产养殖大国向强国转变, 提出了“机械化、自动化、智能化”的水产养殖智能装备发展新思路。

4.1 养殖对象智能感知装备研发

面向现代化水产养殖全方位信息监测的产业发展需求, 如何有效获取、传输与智能分析多元化数据将是研究重点。在数据获取方面, 需要着重攻克心率、皮质醇、葡萄糖养殖对象生命信息穿戴式传感器新原理; 研究适用于不同养殖场景水下生物表型、行为等高精度、在线传感器的新原理和算法, 提高传感器的精度和可靠性。同时, 还需从实际应用场景出发, 综合衡量获取成本与信息价值。在信息传输方面, 需要根据数据结构和实时性要求, 综合考虑边缘计算和分布式计算方式, 降低大流量数据传输对带宽和中央处理器处理能力的要求。在数据智能分析方面, 应该积极引入大模型处理思路, 有效提升多元数据关联耦合分析能力, 提高水产养殖大数据综合利用效能。

4.2 多路并举生产作业装备研发

我国水产养殖区域广、模式多、品种多, 不同养殖模式、生产环节机械化装备需求和机械化率差异较大。因此, 水产养殖装备研究应当因地制宜, 面对工厂化、工船等机械化率较高的养殖模式, 应着重攻克自动精准投喂、无损起捕、智能增氧换水等自动化、智能化装备升级关键技术; 面对池塘、网箱池等不同作业环节机械化率分布不均的养殖模式, 需重点提升起捕分级、疫苗注射、网衣清洗等环节机械化作业能力, 研发专用机械装备。同时, 提升增氧、投喂等机械化率较高的生产环节自动化、智能化作业能力; 面对筏式吊笼与底播等主要以人工为主的水产养殖模式, 应着重解决布放、采收等重要生产环节机械化装备缺乏问题, 实现重点环节基本有机可用。

4.3 水产养殖机器人的进一步研制与推广

目前水产养殖作业机器人尚处于初级研究阶段, 水产养殖机器人研究需要根据不同技术研究和应用现状分步、分项开展研究。针对技术成熟、

产业化应用较为普遍的通用装备技术, 需针对性开展场景适应性研究, 解决装备防水、防腐和防雾等问题; 针对巡检、死鱼收集、网衣清洗等涉及感知、决策、作业等多个技术环节机器人研究, 应着重攻克多源信息耦合分析、融合决策、多扰动补偿控制等关键技术, 真正实现无人智能作业; 在机器人专用性技术研发方面, 应该着重攻克水下网衣清洗、水下定位等行业特点明显的专用技术难点, 研发相关仪器设备, 进一步推动水产养殖机器人产业应用进程。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 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. 2021 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2021 China Fisheries Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021 (in Chinese).
- [2] 阮雯, 王芸, 纪炜炜, 韩保平, 方海. 水产养殖业可持续发展及管理的研究进展[J]. *渔业信息与战略*, 2013, 28(4): 267-272.
Ruan W, Wang Y, Ji W W, *et al.* Progress of sustainable development and management of aquaculture[J]. *Fishery Information & Strategy*, 2013, 28(4): 267-272 (in Chinese).
- [3] “中国水产养殖业可持续发展战略研究”课题综合组. 环境友好型水产养殖业发展战略[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 1-7.
Task Force for the Study on Sustainable Development Strategy of Chinese Aquaculture Comprehensive Research Group. Development strategy on environmentally friendly aquaculture[J]. *Engineering Sciences*, 2016, 18(3): 1-7 (in Chinese).
- [4] 叶乃好, 庄志猛, 王清印. 水产健康养殖理念与发展对策[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 101-104.
Ye N H, Zhuang Z M, Wang Q Y. Development strategy for realizing the healthy aquaculture industry concept[J]. *Engineering Sciences*, 2016, 18(3): 101-104 (in Chinese).
- [5] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术

- 研究现状与发展趋势分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(1): 1-18.
- Liu C L, Lin H Z, Li Y M, *et al.* Unmanned fishing grounds leading agricultural intelligence[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1): 1-18 (in Chinese).
- [6] 黄一心, 鲍旭腾, 徐皓. 中国渔业装备科技研究进展[J]. *渔业现代化*, 2023, 50(4): 1-11.
- Huang Y X, Bao X T, Xu H. Research progress of fishery equipment science and technology in China[J]. *Fishery Modernization*, 2023, 50(4): 1-11 (in Chinese).
- [7] 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. 2022 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2022 China Fisheries Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022 (in Chinese).
- [8] Liu T C, Liu J, Wang J, *et al.* Optimization of the intelligent sensing model for environmental information in aquaculture waters based on the 5G smart sensor network[J]. *Journal of Sensors*, 2022, 2022: 6409046.
- [9] Ehlers S M, Maxein J, Koop J H E. Low - cost microplastic visualization in feeding experiments using an ultraviolet light - emitting flashlight[J]. *Ecological Research*, 2020, 35(1): 265-273.
- [10] Wei Y G, Li W S, An D, *et al.* Equipment and intelligent control system in aquaponics: A review[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 169306-169326.
- [11] Føre M, Frank K, Norton T, *et al.* Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 173: 176-193.
- [12] Biazi V, Marques C. Industry 4.0-based smart systems in aquaculture: A comprehensive review[J]. *Aquacultural Engineering*, 2023, 103: 102360.
- [13] 曹守启, 葛照瑞, 张铮. 基于物联网的浮标水质监测系统与溶解氧浓度预测模型[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(11): 210-218.
- Cao S Q, Ge Z R, Zhang Z. Buoy water quality monitoring system and prediction model based on internet of things[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2021, 52(11): 210-218 (in Chinese).
- [14] 张佳林, 徐立鸿, 刘世晶. 基于水下机器视觉的大西洋鲑摄食行为分类[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(13): 158-164.
- Zhang J L, Xu L H, Liu S J. Classification of Atlantic salmon feeding behavior based on underwater machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(13): 158-164 (in Chinese).
- [15] 左渠, 田云臣, 马国强. 水产养殖智能投饲系统研究进展和存在问题[J]. *天津农学院学报*, 2020, 27(4): 73-77.
- Zuo Q, Tian Y C, Ma G Q. Research progress and problems of aquaculture intelligent feeding system[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2020, 27(4): 73-77 (in Chinese).
- [16] 李明智, 张光发, 于功志, 等. 扇贝苗分级计数装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 93-101.
- Li M Z, Zhang G F, Yu G Z, *et al.* Design and experiment of grading and counting device for scallop seedling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21): 93-101 (in Chinese).
- [17] 巩沐歌, 孟菲良, 黄一心, 等. 中国智能水产养殖发展现状与对策研究[J]. *渔业现代化*, 2018, 45(6): 60-66.
- Gong M G, Meng F L, Huang Y X, *et al.* Research on development status and countermeasures of intelligent aquaculture in China[J]. *Fishery Modernization*, 2018, 45(6): 60-66 (in Chinese).
- [18] 黄一心, 丁建乐, 鲍旭腾, 等. 中国渔业装备和工程科技发展综述[J]. *渔业现代化*, 2019, 46(5): 1-8.
- Huang Y X, Ding J L, Bao X T, *et al.* Development research on China fishery equipment and engineering technology[J]. *Fishery Modernization*, 2019, 46(5): 1-8 (in Chinese).
- [19] 周小燕, 倪琦, 徐皓, 等. 2021年中国水产养殖全程机械化发展报告[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(12): 1-4.
- Zhou X Y, Ni Q, Xu H, *et al.* Development report of China aquaculture whole-process mechanization in 2021[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(12): 1-4 (in Chinese).
- [20] 顾海涛, 王逸清. 我国池塘增氧技术现状与发展趋势[J]. *渔业现代化*, 2014, 41(5): 65-68.
- Gu H T, Wang Y Q. The development status, issues and trends of pond aeration technology in China[J]. *Fishery Modernization*, 2014, 41(5): 65-68 (in Chinese).

- [21] Wang X Y, Hong J Q, Sun Y P, *et al.* Design of trajectory planning system for river crab farming with automatic feeding boat[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2020, 1575(1): 012143.
- [22] 洪扬, 陈晓龙, 田昌凤, 等. 蟹、虾养殖池塘移动投饲装置的设计与试验[J]. *渔业现代化*, 2018, 45(3): 9-14. Hong Y, Chen X L, Tian C F, *et al.* Design and test of a kind of moving feeding device for crab and shrimp ponds[J]. *Fishery Modernization*, 2018, 45(3): 9-14 (in Chinese).
- [23] 陈晓龙, 田昌凤, 杨家朋, 等. 高密度养殖池塘自动气力投饲机的设计试验[J]. *渔业现代化*, 2016, 43(5): 18-22. Chen X L, Tian C F, Yang J P, *et al.* Research on pneumatic automatic feeding machine for intensive pond aquaculture[J]. *Fishery Modernization*, 2016, 43(5): 18-22 (in Chinese).
- [24] 刘兴国, 徐皓, 张拥军, 等. 池塘移动式太阳能水质调控机研制与试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 1-10. Liu X G, Xu H, Zhang Y J, *et al.* Development and experiment of movable pond aquaculture water quality regulation machine based on solar energy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 1-10 (in Chinese).
- [25] 吴宗凡, 程果锋, 王贤瑞, 等. 移动式太阳能增氧机的增氧性能评价[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 246-252. Wu Z F, Cheng G F, Wang X R, *et al.* Evaluation on aeration performance of movable solar aerator[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(23): 246-252 (in Chinese).
- [26] 尚景玉, 唐玉宏. 溶解氧传感器研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2014, 51(3): 168-175,202. Shang J Y, Tang Y H. Research progress of the dissolved oxygen sensor[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2014, 51(3): 168-175,202 (in Chinese).
- [27] Liu Y S, Diao Y X, Hu G X, *et al.* Renewable antimony-based pH sensor[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2023, 928: 117085.
- [28] Trevathan J, Read W, Sattar A. Implementation and calibration of an IoT light attenuation turbidity sensor[J]. *Internet of Things*, 2022, 19: 100576.
- [29] Chauhan M, Singh V K. Hydrothermally grown ZnO nanorods based optical fiber sensor for salinity detection[J]. *Measurement*, 2022, 203: 111913.
- [30] Liu F, Wei S P, Li B, *et al.* A novel fast response and high precision water temperature sensor based on Fiber Bragg Grating[J]. *Optik*, 2023, 289: 171257.
- [31] 黄一心, 田昌凤, 孟菲良, 等. 中国池塘养殖设施装备历史、现状和发展研究[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(3): 10-15. Huang Y X, Tian C F, Meng F L, *et al.* Research on the history, current situation and development of pond culture facilities and equipment in China[J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(3): 10-15 (in Chinese).
- [32] 黄一心, 徐皓, 丁建乐. 我国陆上水产养殖工程化装备现状及发展建议[J]. *贵州农业科学*, 2016, 44(7): 87-91. Huang Y X, Xu H, Ding J L. Situation of China Land-based Aquaculture Engineering Equipment and Suggestion for Its Development[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2016, 44(7): 87-91 (in Chinese).
- [33] 杨金明, 朱红飞. 升降式水产养殖水质自动检测系统设计[J]. *渔业现代化*, 2016, 43(4): 1-5. Yang J M, Zhu H F. Lift type automatic water quality detection system for aquaculture[J]. *Fishery Modernization*, 2016, 43(4): 1-5 (in Chinese).
- [34] 崔龙旭, 倪琦, 庄保陆, 等. 基于PLC的工厂化水产养殖轨道式自动投饲系统设计与试验[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(22): 159-165. Cui L X, Ni Q, Zhuang B L, *et al.* Design and experiment for PLC-based rail-type automatic feeding system of factory aquaculture[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(22): 159-165 (in Chinese).
- [35] 肖茂华, 李亚杰, 汪小昂, 等. 水产养殖尾水处理技术与装备的研究进展[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(1): 1-13. Xiao M H, Li Y J, Wang X C, *et al.* Research progress of aquaculture tailwater treatment technology and equipment[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(1): 1-13 (in Chinese).
- [36] 陈华. 转筒式反冲洗微滤机的设计与应用[J]. *福建农机*, 2022(1): 4-7,25. Chen H. Design and application of rotary drum backwashing microfilter[J]. *Fujian Agricultural Machinery*, 2022(1): 4-7,25 (in Chinese).
- [37] Roy S M, Pareek C M, Machavaram R, *et al.* Optimiz-

- ing the aeration performance of a perforated pooled circular stepped cascade aerator using hybrid ANN-PSO technique[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2022, 9(4): 533-546.
- [38] 管崇武, 杨菁, 单建军, 等. 工厂化循环水养殖中臭氧/紫外线反应系统的水处理性能[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 253-259.
Guan C W, Yang J, Shan J J, *et al.* Water treatment performance of O₃/UV reaction system in recirculating aquaculture systems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(23): 253-259 (in Chinese).
- [39] 史明明, 阮贇杰, 刘晃, 等. 基于CFD的循环生物絮团系统养殖池固相分布均匀性评价[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 252-258.
Shi M M, Ruan Y J, Liu H, *et al.* Solid phase distribution simulation of culture pond with recirculating bio-floc technology based on computational fluid dynamics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(2): 252-258 (in Chinese).
- [40] 张海耿, 管崇武. 新型流化床生物滤器处理海水养殖废水性能研究[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(29): 29-35.
Zhang H G, Guan C W. Effluent purifying performance of new style fluidized-sand biofilter in recirculating aquaculture system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(29): 29-35 (in Chinese).
- [41] 黄小华, 庞国良, 袁太平, 等. 我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述[J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(6): 121-131.
Huang X H, Pang G L, Yuan T P, *et al.* Review of engineering and equipment technologies for deep-sea cage aquaculture in China[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(6): 121-131 (in Chinese).
- [42] 鲍旭腾, 谌志新, 崔铭超, 等. 中国深远海养殖装备发展探议及思考[J]. *渔业现代化*, 2022, 49(5): 8-14.
Bao X T, Chen Z X, Cui M C, *et al.* Discussion and consideration on the development of deep sea aquaculture equipment in China[J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49(5): 8-14 (in Chinese).
- [43] 付晓月, 黄大志, 徐慧丽等. 深远海网箱水产养殖发展概述[J]. *水产养殖*, 2021, 42(10): 23-26.
Fu X Y, Huang D Z, Xu H L, *et al.* Overview of the Development of Cage Aquaculture in Deep Sea[J]. *Journal of Aquaculture*, 2021, 42(10): 23-26 (in Chinese).
- [44] 王志勇, 冯书庆. 网箱养殖鱼类起捕技术现状[J]. *水产养殖*, 2021, 42(7): 64-65.
Wang Z Y, Feng S Q. Current status of fish capture technology in cage aquaculture[J]. *Journal of Aquaculture*, 2021, 42(7): 64-65 (in Chinese).
- [45] 黄一心, 徐皓, 丁建乐. 我国离岸水产养殖设施装备发展研究[J]. *渔业现代化*, 2016, 43(2): 76-81.
Huang Y X, Xu H, Ding J L. Research on the development of offshore aquaculture facilities and equipment in China[J]. *Fishery Modernization*, 2016, 43(2): 76-81 (in Chinese).
- [46] 2022年池塘养殖尾水处理及筏式吊养与底播增养殖轻简化技术装备遴选结果 [EB/EO]. (2022-10-14). <http://www.amic.agri.cn/secondLevelPage/info/30/146652>.
Selection results of light simplified technical equipment for pond aquaculture tail water treatment and raft suspended and bottom sowing enhanced aquaculture in 2022[EB/EO]. (2022-10-14). <http://www.amic.agri.cn/secondLevelPage/info/30/146652> (in Chinese).
- [47] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 1-20.
Li D L, Yang H. State-of-the-art review for internet of things in agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 1-20 (in Chinese).
- [48] 尹宝全, 曹闪闪, 傅泽田, 等. 水产养殖水质检测与控制技术研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(2): 1-13.
Yin B Q, Cao S S, Fu Z T, *et al.* Review and trend analysis of water quality monitoring and control technology in aquaculture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(2): 1-13 (in Chinese).
- [49] Zhang K, Zhang H L, Li W J, *et al.* PtOEP/PS composite particles based on fluorescent sensor for dissolved oxygen detection[J]. *Materials Letters*, 2016, 172: 112-115.
- [50] Rungsima C, Boonyan N, Klorvan M, *et al.* Hydrogel sensors with pH sensitivity[J]. *Polymer Bulletin*, 2021, 78(10): 5769-5787.
- [51] Prerana M R, Shenoy B P, Pal B D, *et al.* Design, ana-
中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- lysis, and realization of a turbidity sensor based on collection of scattered light by a fiber-optic probe[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(1): 44-50.
- [52] Pu H B, Liu D, Qu J H, *et al.* Applications of imaging spectrometry in inland water quality monitoring—a review of recent developments[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(4): 131.
- [53] Carstea E M, Bridgeman J, Baker A, *et al.* Fluorescence spectroscopy for wastewater monitoring: A review[J]. *Water Research*, 2016, 95: 205-219.
- [54] 李道亮, 刘畅. 人工智能在水产养殖中研究应用分析与未来展望[J]. *智慧农业(中英文)*, 2020, 2(3): 1-20.
- Li D L, Liu C. Recent advances and future outlook for artificial intelligence in aquaculture[J]. *Smart Agriculture*, 2020, 2(3): 1-20 (in Chinese).
- [55] 段延娥, 李道亮, 李振波, 等. 基于计算机视觉的水产动物视觉特征测量研究综述[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 1-11.
- Duan Y E, Li D L, Li Z B, *et al.* Review on visual characteristic measurement research of aquatic animals based on computer vision[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(15): 1-11 (in Chinese).
- [56] Endo H, Wu H Y. Biosensors for the assessment of fish health: A review[J]. *Fisheries Science*, 2019, 85(4): 641-654.
- [57] Li D L, Wang G X, Du L, *et al.* Recent advances in intelligent recognition methods for fish stress behavior[J]. *Aquacultural Engineering*, 2022, 96: 102222.
- [58] Hvas M, Folkedal O, Oppedal F. Heart rate bio-loggers as welfare indicators in Atlantic salmon (*Salmo salar*) aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2020, 529: 735630.
- [59] Wu H Y, Aoki A, Arimoto T, *et al.* Fish stress become visible: A new attempt to use biosensor for real-time monitoring fish stress[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, 67: 503-510.
- [60] Wu H Y, Ohnuki H, Hibi K, *et al.* Development of a label-free immunosensor system for detecting plasma cortisol levels in fish[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2016, 42(1): 19-27.
- [61] Wu H Y, Ohnuki H, Ota S, *et al.* New approach for monitoring fish stress: A novel enzyme-functionalized label-free immunosensor system for detecting cortisol levels in fish[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2017, 93: 57-64.
- [62] Endo H, Yonemori Y, Musiya K, *et al.* A needle-type optical enzyme sensor system for determining glucose levels in fish blood[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 573-574: 117-124.
- [63] Takase M, Yoneyama Y, Murata M, *et al.* Mediator-type biosensor for real-time wireless monitoring of blood glucose concentrations in fish[J]. *Fisheries Science*, 2012, 78(3): 691-698.
- [64] Makaras T, Razumienė J, Gurevičienė V, *et al.* A new approach of stress evaluation in fish using β -D-Glucose measurement in fish holding-water[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 109: 105829.
- [65] Saberioon M, Cisař P. Automated within tank fish mass estimation using infrared reflection system[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 150: 484-492.
- [66] Hao M M, Yu H L, Li D L. The measurement of fish size by machine vision—a review[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. Beijing, China: Springer, 2016: 15-32.
- [67] Pérez D, Ferrero F J, Álvarez I, *et al.* Automatic measurement of fish size using stereo vision[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Houston: IEEE, 2018.
- [68] 刘世晶, 李国栋, 涂雪滢, 等. 水产养殖生产信息化技术发展研究[J]. *渔业现代化*, 2021, 48(3): 1-9.
- Liu S J, Li G D, Tu X Y, *et al.* Research on the development of aquaculture production information technology[J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(3): 1-9 (in Chinese).
- [69] Garcia R, Prados R, Quintana J, *et al.* Automatic segmentation of fish using deep learning with application to fish size measurement[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2020, 77(4): 1354-1366.
- [70] Costa C, Antonucci F, Bognione C, *et al.* Automated sorting for size, sex and skeletal anomalies of cultured seabass using external shape analysis[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 52: 58-64.
- [71] 钱程. 渔机所自主研发的水下鱼类高通量生长状态立体检测系统顺利完成“国信1号”船上测试并交付

- 使用 [EB/OL]. (2022-11-24). <http://www.fmiri.ac.cn/info/1013/22528.htm>.
- Qian C. The three-dimensional detection system for high-throughput growth status of underwater fish independently developed by the Fishery Machinery Institute has successfully completed on-board testing and been delivered for use on the "Guoxin 1" ship[EB/OL]. (2022-11-24). <http://www.fmiri.ac.cn/info/1013/22528.htm> (in Chinese).
- [72] Papadakis V M, Papadakis I E, Lamprianidou F, *et al.* A computer-vision system and methodology for the analysis of fish behavior[J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 46: 53-59.
- [73] Wang H, Zeng L J, Yin C Y. A video tracking system for measuring the position and body deformation of a swimming fish[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(12): 4381-4384.
- [74] Dell A I, Bender J A, Branson K, *et al.* Automated image-based tracking and its application in ecology[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(7): 417-428.
- [75] Kleinhappel T K, Pike T W, Burman O H P. Stress-induced changes in group behaviour[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 17200.
- [76] Israeli D, Kimmel E. Monitoring the behavior of hypoxia-stressed *Carassius auratus* using computer vision[J]. *Aquacultural Engineering*, 1996, 15(6): 423-440.
- [77] Zheng H Y, Liu R, Zhang R, *et al.* A method for real-time measurement of respiratory rhythms in medaka (*Oryzias latipes*) using computer vision for water quality monitoring[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 100: 76-86.
- [78] Terayama K, Hioki H, Sakagami M A. Measuring tail beat frequency and coast phase in school of fish for collective motion analysis[C]//Proceedings of SPIE 10225, Eighth International
- [79] Kelley J L, Phillips B, Cummins G H, *et al.* Changes in the visual environment affect colour signal brightness and shoaling behaviour in a freshwater fish[J]. *Animal Behaviour*, 2012, 83(3): 783-791.
- [80] Li D L, Hao Y F, Duan Y Q. Nonintrusive methods for biomass estimation in aquaculture with emphasis on fish: A review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(3): 1390-1411.
- [81] Ohshimo S. Spatial distribution and biomass of pelagic fish in the East China Sea in summer, based on acoustic surveys from 1997 to 2001[J]. *Fisheries Science*, 2004, 70(3): 389-400.
- [82] Rowell T J, Nemeth R S, Schärer M T, *et al.* Fish sound production and acoustic telemetry reveal behaviors and spatial patterns associated with spawning aggregations of two Caribbean groupers[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2015, 518: 239-254.
- [83] Handegard N O, Tenningen M, Howarth K, *et al.* Effects on schooling function in mackerel of sub-lethal capture related stressors: Crowding and hypoxia[J]. *PLoS One*, 2017, 12(12): e0190259.
- [84] Jézéquel Y, Bonnel J, Coston-Guarini J, *et al.* Sound characterization of the European lobster *Homarus gammarus* in tanks[J]. *Aquatic Biology*, 2018, 27: 13-23.
- [85] Hassan S G, Ahmed S, Iqbal S, *et al.* Fish as a source of acoustic signal measurement in an aquaculture tank: Acoustic sensor based time frequency analysis[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(3): 110-117.
- [86] 殷雷明, 陈雪忠, 张旭光, 等. 玻璃钢水槽内大黄鱼养殖环境噪声测量与分析[J]. *海洋渔业*, 2017, 39(3): 314-321.
- Yin L M, Chen X Z, Zhang X G, *et al.* Measurement and analysis of the aquaculture noise for *Larimichthys crocea* in the fiberglass fish tank[J]. *Marine Fisheries*, 2017, 39(3): 314-321 (in Chinese).
- [87] Brown A, Garg S, Montgomery J. Automatic rain and cicada chorus filtering of bird acoustic data[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 81: 105501.
- [88] 左渠, 田云臣, 马国强. 水产养殖智能投饲系统研究进展和存在问题[J]. *天津农学院学报*, 2020, 27(4): 73-77.
- Zuo Q, Tian Y C, Ma G Q. Research progress and problems of aquaculture intelligent feeding system[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2020, 27(4): 73-77 (in Chinese).
- [89] 袁凯, 庄保陆, 倪琦, 等. 室内工厂化水产养殖自动投饲系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 169-176.
- Yuan K, Zhuang B L, Ni Q, *et al.* Design and experiments of automatic feeding system for indoor industrialization aquaculture[J]. *Transactions of the Chinese*
- 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 169-176 (in Chinese).
- [90] 肖红俊, 刘凯, 李莉莉, 等. 多层水槽式工厂化循环水养殖系统智能投饲车设计[J]. *渔业现代化*, 2019, 46(1): 21-26.
- Xiao H J, Liu K, Li L L, *et al.* Design of intelligent feeding car for multi-layer sink-type industrialized recirculating aquaculture system[J]. *Fishery Modernization*, 2019, 46(1): 21-26 (in Chinese).
- [91] 刘志强, 刘双喜, 李伟, 等. 海上网箱养殖投饲炮的设计与试验[J]. *渔业现代化*, 2015, 42(3): 38-42.
- Liu Z Q, Liu S X, Li W, *et al.* Design and test on feeding gun for marine cage culture[J]. *Fishery Modernization*, 2015, 42(3): 38-42 (in Chinese).
- [92] Oehme M, Aas T S, Sørensen M, *et al.* Feed pellet distribution in a sea cage using pneumatic feeding system with rotor spreader[J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 51: 44-52.
- [93] 赵建, 朱松明, 叶章颖, 等. 循环水养殖游泳型鱼类摄食活动强度评估方法研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 288-293.
- Zhao J, Zhu S M, Ye Z Y, *et al.* Assessing method for feeding activity of swimming fishes in RAS[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 288-293 (in Chinese).
- [94] 陈彩文, 杜永贵, 周超, 等. 基于图像纹理特征的养殖鱼群摄食活动强度评估[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 232-237.
- Chen C W, Du Y G, Zhou C, *et al.* Evaluation of feeding activity of shoal based on image texture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(5): 232-237 (in Chinese).
- [95] 乔峰, 郑堤, 胡利永, 等. 基于机器视觉实时决策的智能投饵系统研究[J]. *工程设计学报*, 2015, 22(6): 528-533.
- Qiao F, Zheng D, Hu L Y, *et al.* Research on smart bait casting machine based on machine vision technology[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2015, 22(6): 528-533 (in Chinese).
- [96] 郭俊. 基于图像与声音信息的养殖鱼群摄食规律与投饵技术研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2018.
- Guo J. Research on feeding patterns and bait technology of fish culture based on information of image and sound[D]. Ningbo: Ningbo University, 2018 (in Chinese).
- [97] 赵良, 宋协法, 李贤, 等. 辊道式鱼类分级机的设计与模拟仿真[J]. *渔业现代化*, 2023, 50(4): 68-75.
- Zhao L, Song X F, Li X, *et al.* Design and simulation of roller fish grader[J]. *Fishery Modernization*, 2023, 50(4): 68-75 (in Chinese).
- [98] 洪扬, 朱焯, 江涛, 等. 回转式活鱼分级与计数设备的设计与试验[J]. *渔业现代化*, 2019, 46(4): 49-54.
- Hong Y, Zhu Y, Jiang T, *et al.* Design and test of rotary live fish grading and counting device[J]. *Fishery Modernization*, 2019, 46(4): 49-54 (in Chinese).
- [99] 马先英, 李明, 熊文超, 等. 基于图像识别技术的海参分级与计数设备的设计[J]. *大连水产学院学报*, 2016, 24(6): 549-552.
- Ma X Y, Li M, Xiong W C, *et al.* Design of sea cucumber grading and counting equipment based on technology of image recognition[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2016, 24(6): 549-552 (in Chinese).
- [100] 周晓林, 马超, 王兆平, 等. 基于机器视觉的鲤、鲫鱼性状测量系统的设计与实现[J]. *渔业现代化*, 2022, 49(6): 108-117.
- Zhou X L, Ma C, Wang Z P, *et al.* Design and implementation of trait measurement system for common carp (*Cyprinus carpio*) and crucian carp (*Carassius auratus*) based on machine vision[J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49(6): 108-117 (in Chinese).
- [101] 李艳君, 黄康为, 项基. 基于立体视觉的动态鱼体尺寸测量[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(21): 220-226.
- Li Y J, Huang K W, Xiang J. Measurement of dynamic fish dimension based on stereoscopic vision[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(21): 220-226 (in Chinese).
- [102] Liao Y H, Zhou C W, Liu W Z, *et al.* 3DPhenoFish: Application for two- and three-dimensional fish morphological phenotype extraction from point cloud analysis[J]. *Zoological Research*, 2021, 42(4): 492-502.

Current development status of aquaculture equipment in China

LIU Shijing^{1,2}, LI Guodong¹, LIU Huang¹, ZHENG Haojun³, CHEN Jun^{1*}

(1. *Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;*

2. Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China, Sanya 572011, China;

3. School of Navigation and Naval Architecture, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: Aquaculture equipment is an important technical support for the efficient development of modern aquaculture and the promotion of structural reform in the aquaculture industry. The intelligent aquaculture model based on the collaborative efforts of multiple disciplines such as aquaculture equipment, information technology, and automatic control, has become a new trend and an important lever for the high-quality development of modern fisheries, which also puts forward higher intelligent requirements for the existing equipment and related technologies of aquaculture. This article summarizes the current development status of five main aquaculture methods and equipment, including pond, factory, cage, raft, and bottom sowing aquaculture. From the perspectives of digitization and intelligence, it analyzes the research progress of commonly used equipment in aquaculture processes such as environmental monitoring, object perception, feeding, and graded counting. It points out the key issues that restrict the development of intelligent equipment and technology in aquaculture in China. A new concept of "mechanization, automation, and intelligence" for the development of aquaculture equipment and technology has been proposed, aiming to achieve the historical transformation of China from a major aquaculture country to a strong aquaculture country.

Key words: aquaculture; equipment; mechanization; automation; intelligence

Corresponding author: CHEN Jun. E-mail: chenjun@fmiri.ac.cn

Funding projects: Marine S&T Fund of Shandong Province for Qingdao Marine Science and Technology Center (2022QNLM030001-2)