

虾蟹塘自动投饵船研究现状与展望

陈雷雷，沈凯琪，胡庆松，李俊*

(上海海洋大学工程学院，上海 201306)

摘要：自动投喂是提升虾蟹池塘养殖效益的关键，也是虾蟹池塘养殖机械化、自动化发展的重要组成部分。虾蟹塘自动投饵船因为具有精准定位、自动导航、自主运行和均匀投饵等功能，受到越来越多的关注。该文调研了国内外科研机构和企业对虾蟹塘自动投饵船的研究和应用现状，并从投饵船驱动装置、投饵送料机构、精准投喂控制技术 3 个方面归纳总结了虾蟹塘自动投饵船的研究现状。针对当前研究不足，展望了未来研究的趋势，即提升复杂环境的适应能力和运行可靠性，深入饲料颗粒-投饵船-养殖生物的互作用机理研究，提升精准化性能和人工智能新技术的应用，以及标准化和系统化。综述分析可为国内虾蟹塘自动投饵船的进一步研究、开发和应用推广提供借鉴。

关键词：养殖；渔业；自动投饵船；驱动机构；投饵送料机构；精准控制

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403131

中图分类号: S969; S23

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-23-0026-12

陈雷雷, 沈凯琪, 胡庆松, 等. 虾蟹塘自动投饵船研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 26-37. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403131 <http://www.tcsae.org>

CHEN Leilei, SHEN Kaiqi, HU Qingsong, et al. Research status and prospects of automatic feeding boats for shrimp and crab ponds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(23): 26-37. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403131 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国是水产养殖大国,截止至 2022 年,全国淡水养殖面积达 5 033.08 千 hm^2 ,其中,池塘养殖面积达 2 624.88 千 hm^2 ,占总面积的 52.15%^[1],虾蟹总产量达 684.84 万 t,是水产养殖业的重要组成部分。虾蟹养殖中,饵料投喂是最重要的作业环节之一,也是控制养殖成本和降低养殖水体污染的关键,同时,也是传统虾蟹池塘养殖模式下,劳动力消耗最大的作业。因此,饵料投喂作业的机械化、自动化对于虾蟹养殖而言尤为重要,近年来,虾蟹塘无人投饵船逐渐成为水产养殖自动化装备领域的研究热点。相比于传统的人工投饵方式,无人投饵船在很大程度上减少了人工劳动量,提高了投饵作业效率。因此,研发和应用虾蟹塘无人投饵船,是虾蟹养殖行业落实 2023 年中央一号文件关于发展健康养殖和大力发展智慧农业要求的重要举措。

尽管虾蟹塘无人投饵船的研究已经取得了一定的成果和应用成效,但总体还处在逐步完善和成熟的过程中。为此,本文对虾蟹塘无人投饵船、投饵船关键机构、精准投喂技术及投饵船控制技术的研究进展进行综述分析,

并结合国内虾蟹养殖行业的现状,分析讨论虾蟹塘投饵船现阶段存在的问题,展望虾蟹塘投饵船及其关键技术的研究和发展趋势,以期国内虾蟹塘无人投饵船的技术研究、产品开发及应用推广提供借鉴。

1 虾蟹塘投饵船发展现状

鉴于饵料投喂对水产养殖的重要性,世界上主要的水产养殖国家对自动投饵装备的研究都比较重视,发达国家和发展中国家根据自身养殖模式选择了不同的发展方向。发达国家如挪威、日本、加拿大、美国等主要以陆基工厂化养殖和大型网箱为主^[2],美国 ETI (environment technology inc) 和意大利 Feeding Systems 等公司通过对养殖环境进行精确控制提高饲料的利用率,实现高效生产,但该方式的运营成本和系统故障风险较高^[3]。印度、埃及等发展中国家仍以人工池塘养殖为主,投饵船的研究处于起步阶段。PREM 等^[4]以双体船为载体,设计了一种类似于水上自行车的投饵船,为池塘养殖提供了一种较为经济的投饵方法,但驱动及投饵仍需人工操作,自动化程度相对较低。AL-RAJHI 等^[5]设计了一种可远程控制的投饵船,减小投饵作业量的同时有效提升了作业效率,但未实现自主导航投饵。

国内对投饵船的研究相对较早,为使投饵船能够适应不同的池塘养殖模式和作业环境,许多学者针对投饵船关键机构、精准投喂技术及投饵船控制技术进行了一系列研究,出现了多种形式的投饵船以提高投喂效果和降低劳动量。如陈晓龙等^[6]针对巡边觅食的对虾,研发了物理轨道式投饵船,船体沿架设于池塘内沿岸布置的物理轨道进行投饵,较好地满足了对虾巡边投喂的需求。

收稿日期: 2024-03-20 修订日期: 2024-09-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD0900401); 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心项目 (2021 科技 02-12); 上海市科技兴农推广项目 (沪农科推字 (2018) 第 3-3 号)

作者简介: 陈雷雷, 博士, 副教授, 研究方向为农业装备与自动化技术。

Email: llchen@shou.edu.cn

*通信作者: 李俊, 讲师, 研究方向为渔业工程装备。

Email: junli@shou.edu.cn

但轨道架设成本较高，长距离轨道的弧垂问题也无法解决。基于类似的思路，周达辉等^[7]研发了沿岸测距式投饵船，通过船身一侧和船头安装测距传感器，使投饵船始终在离岸一定距离的航道上航行，从而实现了无轨巡边投饵。但实际养殖池塘岸线形状不规则，构成复杂，常导致测距传感器数据丢失或工作不稳定，从而影响行船轨迹。此外，孙月平等^[8-9]基于风力驱动投饵船及明轮驱动投饵船，主要对河蟹养殖塘精准投饵技术进行研究。孙月平等^[10-11]基于机器视觉技术对河蟹养殖塘中的河蟹及养殖塘中障碍物等进行识别，为实现投饵船定点投饵，自动避障等技术奠定基础，并在此基础上，研究了适用于河蟹养殖塘的遍历式投饵船路径规划方法^[12]。李俊等^[13-14]通过 CFD（computational fluid dynamics）方法分别对船体的水动力性能、浮态及稳性进行分析和优化，提升了行船效率。胡庆松等^[15-19]针对不同养殖环境的蟹蟹塘设计了螺旋桨，明轮及螺杆驱动的投饵船，并设计了振动下料机构，有效提高了饵料输送效率。上述研究主要基于科研项目对机构和精准投饵技术进行探索和示范，在投饵船产品化和实际生产应用方面的研究工作相对较少。

随着国内蟹蟹池塘养殖规模逐渐增长以及国家政策和科研项目的支持，部分企业在蟹蟹塘投饵船的研发方面开展了相关工作，并取得了一定成果。佛山市中渔科技生产的智能投饵船（图 1a）采用单侧明轮前进，船头明轮转向的驱动方式，一定程度上降低了水生植物对行船的影响。它采用精准超声波，在自动避障的同时控制航向，并采用了太阳能板与蓄电池结合的供能方式，续航达 16 h，但存在船体容量小、行走速度慢的问题，影响了投饵船的投饵效率和对大水面养殖的适用性。江苏卡尔曼航天应用有限公司生产的投饵船（图 1b）采用动蹼明轮驱动技术，应用厘米级北斗高精度导航技术，能在鱼塘、虾塘、蟹塘等不同场合进行自主导航投饵作业，料仓采用施肥机相似结构，能抛撒颗粒饵料和软黏饵料，但该船功率大、续航时间短、成本高。葛迅一等^[20]生产的智能投饵船（图 1c），采用滚筒下料、抛盘投撒实现饵料投喂，支持颗粒料、冰鲜鱼、玉米混合料等多种饲料投喂，应用北斗定位实现高精度巡航投喂作业，并配套开发了转塘设备，但主体为金属结构，自身质量大，且同时载饵容量较小，作业时功耗大，下料频率低，饵料分布离散度大。袁浩等^[21]研发了料仓、药箱一体化的智能投饵施药船（图 1d），该投饵船不仅料仓/药箱容积大，具有高精度导航，还兼备施药功能，整体性价比较高，且通过上层搅动、下层绞龙输出的结构，使软黏性饵料能够顺畅下料。

综上所述，目前国内的蟹蟹塘投饵船研究已经取得一定的成效，但大部分处于样机阶段（科研样机或生产试制样机），在适用性、稳定性、经济性及自动化水平等方面仍需要进一步优化、改良。其中，投饵船驱动装置、投饵送料机构、精准投喂控制技术仍是当前研究的重点。



注 (Note): 图 1a: <https://detail.1688.com/offer/541228815726.html?spm=a2615.2177701.autotrace-offerGeneral.11.112bd8a6iduzm9>; 图 1b: <https://item.taobao.com/item.htm?spm=a230r.7195193.1997079397.6.76596893qkzEzJ&id=671167357167&abbucket=14>

图 1 投饵船示例
Fig.1 Examples of feeding boat

2 投饵船驱动机构研究现状

为保证蟹蟹的摄食效果和投饵船的作业效率，需要科学设计和合理配置驱动装置。蟹蟹塘投饵船驱动装置主要有明轮驱动和螺旋桨驱动两种形式，近年也有学者基于河蟹养殖的多水草环境尝试研究风力驱动和整体螺杆驱动。

2.1 明轮

明轮推进器主要由叶桨、轮辐、滚筒等组成，常用于多水草水域，特别是水草种植茂密的蟹塘，形式上分为定蹼明轮和动蹼明轮，可以根据不同的应用场景选择，它们各有优点和缺点（见表 1）。

Table 1 Comparison of fixed and dynamic paddle wheels		
驱动机构 Driving mechanism	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
定蹼明轮	结构简单，制造和维护成本低	桨叶固定不可调，灵活性相对较差
动蹼明轮	桨叶可调节，灵活性高，浸于水中的面积更多，水动力性能相对较好	设计较为复杂，维护和制造成本高

明轮的推力主要由浸没于水中的桨叶部分提供，行船效率低，船速相对较慢。针对以上问题，胡庆松等^[16]设计了减速机构来增大明轮的扭矩，并采用质量轻、硬度高的航空铝制作明轮，一定程度上提高了投饵船明轮驱动的性能。张先阳^[22]在此基础上设计了带底板的明轮，进一步降低了水生植物缠绕对行船的影响，并且加大了桨叶边缘处的面积，使其在水中获得更大的推力，提高了行船效率。江苏卡尔曼航天应用有限公司设计的动蹼明轮驱动投饵船（图 1b），提升了投饵船的行船速度，但也存在制造和维护成本高的问题。杨静雷等^[23]采用 CFD 方法对不同桨叶数量的高转速明轮推进性能进行研究，为投饵船明轮推进器的设计提供了参考。目前对

于投饵船明轮推进器的研究主要集中在提升其在养殖塘中的推进能力,但明轮的行船效率仍较为有限,且明轮体积相对较大,易发生磕碰,故对于明轮投饵船运输、转塘及维护等方面仍有待进一步探索。

2.2 螺旋桨

螺旋桨主要由螺旋叶片及传动轴组成,工作时整体浸没于水中,相较于明轮具有更高的驱动效率^[24],因其易受到水草缠绕影响,一般用于水草较少的水域,多见于虾塘投饵船。虾蟹塘投饵船为小型船只,一般用小型螺旋桨作为驱动,为保证小型螺旋桨的驱动效率和能力,国内外针对小型螺旋桨的水动力性能开展了一系列的研究工作。RANS (reynolds-averaged navier-stokes) 方程, SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) 算法以及 SST $k-\omega$ (shear stress transport $k-\omega$) 模型常被用于对小型螺旋桨整体水性能^[25-28]和流动特性^[29-31]研究,并具有较好的预测效果。在此基础上,陈雷雷等^[32]采用 RANS 方程和 SST $k-\omega$ 模型对不同直径的螺旋桨建立水动力模型进行仿真,通过分析叶片界面压力、转速及平均轴向射流速度之间关系,设计出了一种能使投饵船工作效率高且水动力性能良好的三叶螺旋桨。此外,李振兴^[33]根据船机桨匹配原理使用 MATLAB/Simulink 软件对小型船舶的螺旋桨进行优化,降低了 44% 的加速时间,有效提升了螺旋桨的水动力性能,为投饵船螺旋桨的设计提供了一种思路。目前,螺旋桨的研究主要通过仿真分析的方式研究具有良好水动力性能的螺旋桨并取得了一定成效,但在实际养殖塘环境中,由于其结构和工作原理使得螺旋桨无可避免地受到水生植物缠绕对行船的影响,因而,螺旋桨驱动在蟹塘投饵中的应用对池塘水草的“宜机化”种植要求较高,螺旋桨防水草结构也有待进一步研究。

2.3 其他驱动机构

由于虾蟹池塘养殖特别是河蟹养殖池塘环境特殊,塘内水草密布,因此近年也有学者探索使用风力驱动和螺杆驱动。孙月平等^[8]设计了以风机驱动的投饵船,避免了驱动机构与水草的接触,但是存在船速低,能耗大等问题。胡庆松等^[17]将整体螺杆装置进行改良应用于蟹塘投饵船,通过 CFD 的方法验证了其水动力性能良好,但该机构的研究处于理论研究和试验阶段,尚未开始实际应用。这些研究和探索为蟹塘多水草环境下的投饵船研制提供了新的思路。

研究和实际应用中,投饵船驱动以明轮和螺旋桨为主,明轮的应用研究主要关注如何通过结构设计和控制系统改进提高航速、效率和操控性能;螺旋桨则以水动力研究为主,需要进一步关注防水草能力和控制精准度。风机驱动由于能耗和噪声的问题,应用受到很大限制,整体螺杆驱动的相关研究尚处于起步阶段。不同驱动机构的优缺点及其应用情况如表 2 所示。

表 2 不同驱动机构的优缺点对比及适用场景

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of different drive mechanisms and applicable scenarios

驱动机构 Drive mechanisms	优势 Advantages	劣势 Disadvantages	适用场合 Applicable scenarios
明轮	不易缠绕水生植物	驱动效率不高,行船速度较慢	虾蟹塘均有应用
螺旋桨	水动力性能好,驱动效率高	易受水生植物影响	多用于虾塘,较少用于蟹塘
风机	不受水生植物影响	能量损耗大,船速较慢,噪声大	多用于蟹塘,部分应用于虾塘
螺杆机构	不易缠绕水生植物	机构较为复杂,尚不成熟	蟹塘应用为主

3 投饵船送料机构研究现状

驱动装置的合理性保障了投饵船的高效移动,但投饵的均匀性和有效性主要依赖于由下料机构和抛料机构组成的送料机构。

3.1 下料机构

根据投饵船投喂作业需求,当前投饵船下料机构形式主要有螺旋输送机构,旋转阀机构及振动机构三种形式。

(1) 螺旋下料机构

螺旋下料机构主要由管道、螺旋叶片和传动电机组成。通过传动电机带动螺旋叶片转动,使其与物料相对运动,物料根据螺旋叶片的转向沿指定方向输送^[34],在虾蟹投饵船中应用较为普遍。

投饵船螺旋下料机构分为水平机构及竖直机构两种。针对不同的需求,学者们对螺旋下料机构进行了相应的改良。袁浩等^[21]针对软黏性饵料下料困难的问题,在螺旋水平机构上方增设了搅拌装置,使软黏性饵料在两个机构的配合下实现顺畅下料。马迪红^[35]在螺旋水平机构基础上探索了无轴芯螺旋结构设计,经过仿真与实物验证,下料效率最高可提升 11%。洪扬等^[36]研究了螺旋竖直机构,一端采用迷宫式封闭,有效避免饵料压碎后造成堵塞的同时提高了密封性和饵料输送稳定性。还有学者通过离散元法研究螺旋下料机构的能耗和破碎率。张昊晨等^[37-38]基于 EDEM (event driven execution manager) 对螺旋输送机构中影响输送效率和能耗的因素进行单因素及正交试验,得到了较佳的螺旋输送机构运动学设计参数。张克平等^[39]通过 EDEM 对物料在等螺距和变螺距的螺旋输送机构中的破碎情况进行仿真,结果表明变螺距螺旋输送机构能够降低物料与叶片之间的挤压与摩擦,从而改善破碎现象。螺旋下料机构既能按照需求输送饵料又能一定程度上实现定量控制,但在实际应用中存在因螺旋机构加工精度等问题,存在饵料挤压破碎和控料精度不高等问题,同时下料速度也较为有限。

(2) 旋转阀下料机构

旋转阀机构由阀体、壳体、叶片、转子和轴承组成^[40],以物料从料箱掉落至旋转阀叶片之间组成的腔体内,随着转子转动物料从阀体下方定量掉落,适用于颗粒及粉状物料,下料量主要由腔体体积决定^[7]。

旋转阀工作时，壳体与叶片之间存在间隙，易产生阀体叶片受到物料阻塞而无法下料的情况，王铭松等^[41-42]对旋转阀卡涩及下料能力不足等问题展开力学分析，并提出改善意见。此外，硬质颗粒在输送过程中存在受到叶片与壳体的挤压出现破碎的现象，姜忠爱等^[43]通过对颗粒受到挤压时的受力情况进行分析，得出曲线型的叶片更有利于颗粒回退至料箱，降低颗粒的破碎率，为投饵船旋转阀的设计提供了参考。

旋转阀机构下料定量性良好，但其工作方式实质上是间歇性下料，下料的连续性和流动性不够好，同时，旋转阀机构体积受限于投饵船结构，单次下料量有限，如何提升旋转阀机构下料连续性下料效率有待进一步探索。

(3) 振动下料机构

振动下料主要依靠电机或电磁振动器带动料箱或料斗作周期性的往复运动，从而使饵料沿一定方向运动完成下料。

胡庆松等^[17-18]基于封闭向量多边形法设计了两种偏心振动机构（图 2a、2b），通过电机转动使饵料随机机构周期性往复运动而掉落，物理试验表明，该机构具有较高下料速度。张丽珍等^[44]和彭飞等^[45]用结构更为简单的振动电机代替偏心振动机构，并将其安装在料箱底部，通过电机振动使饵料滑落，解决由于料箱倾斜角度小容易产生积料的问题。陈雷雷等^[46]（图 2c）基于振动电机设计了一种单振源多功能一体式下料机构，该机构具有 2 个落料导轨，有效提升了饵料下料效率。朱倬^[47]在 EDEM 中建立饵料黏结模型，对饵料在通过偏心振动机构和振动电机下料的破碎情况进行研究，探索性地应用仿真方法研究振动下料机构的饵料破碎率问题，为振动机构的优化设计提供了一种新的思路。振动下料的研究目前以机械结构实现和应用效果研究为主，从振动下料、送料机理及控料精准化进行研究将是这一领域的研究重点。

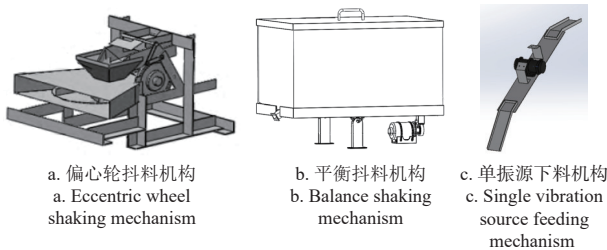


图 2 振动下料机构
Fig.2 Vibrating feeding mechanism

总体而言，不同下料机构的研究各有侧重，它们的优劣分析如表 3 所示。螺旋下料机构和旋转阀下料机构的研究主要集中于提升下料速度和降低颗粒破碎率，振动下料机构则以结构设计探索和应用为主，尚处于起步阶段。在实际设计中，为减小风阻和提高稳定性出发，对投饵船船身整体高度有较为苛刻的要求，加上养殖对投喂量和投饵效率的追求，振动下料未来会有更广阔的应用前景，因此，振动机构的下料精度和颗粒破碎率等基础性问题都有待进一步研究。

表 3 不同下料机构的优缺点对比

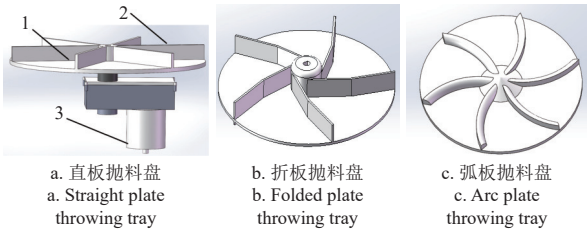
Table 3 Comparison of advantages and disadvantages of different discharging mechanisms

下料机构 Discharging mechanisms	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
螺旋输送机构	定量性好，输送方向灵活	料箱高度高不利投饵船整体设计，输送速度较慢
旋转阀机构	定量性好，可输送粉料和颗粒料	料箱高度高不利整体设计；饵料输送速度和精度均有限
振动机构	料箱高度低，输送效率高	定量性缺乏基础研究，对控制系统要求高

3.2 抛料机构

抛料机构是投饵船投饵作业的终端执行机构，对投饵作业的效率和质量有较大影响。当前蟹塘投饵船实际应用中以离心式抛料为主，也有部分学者基于对蟹的摄食特性在蟹塘应用直接落料的方法。

离心式抛料的执行部件为抛料盘，主要由肋板、底板和电机组成^[48-49]，根据肋板形状不同，分为直板抛料盘、折板抛料盘和弧板抛料盘，如图 3 所示。该机构工作时通过电机带动抛料盘转动产生离心力，使饵料在掉落至转动中的抛料盘后，受到离心力和肋板引导的共同作用，从而使饵料的抛撒具有一定的广度。



1.底板 2.肋板 3.电机 1.Bottom plate 2.Rib plate 3.Motor

图 3 抛料盘结构示意图
Fig.3 Structure schematic diagram of throwing tray

实际抛料作业过程中，饲料间及饲料与离心抛料盘之间的碰撞将产生一定的饲料破碎率，从而降低饲料利用率，针对该问题，姜忠爱等^[43]和张丽珍等^[50]分别分析了蟹塘饲料在抛料盘上的受力情况，并通过离散元法模拟不同结构的抛料盘的抛料情况，探究饲料在离心抛离过程中的破碎机理，寻找饲料破碎率更低的离心抛料结构。另一方面，张先阳等^[22,51]分析了饲料颗粒在抛料盘上及离开抛料盘后的运动状况，通过 EDEM 软件对影响饲料运动状态的不同因素进行单因素试验和正交试验，以最小饲料分布变异系数作为目标进行优化，最终设计出具有良好抛料均匀度的离心抛料机构。张丽珍等^[52]和胡庆松等^[53]通过增设下料口和抛料盘的方式，有效提高了投饵覆盖面，为提升投饵作业效率提供了新的思路，但双盘抛料存在抛料覆盖面重叠的问题，减小重叠面积，提高饵料利用率尚有待研究。通过离散元法改善离心抛料盘投饵破碎率和均匀度取得了一定成果，提升了离心抛料的投饵效率，但目前研究主要限于静止情况下，而投饵船投饵是一个将饵料动态分配的过程，故还应将投饵覆盖面与投饵路径的设计相结合，以进一步提升饵料利用率。

直接落料是指饵料由下料机构将饵料从料箱中定量取出后, 不经过抛料直接落入养殖塘, 适用于具有巡边觅食习性的虾类养殖塘。陈晓龙等^[6]在料箱底部通过下落式下料器进行投饵, 落入水中的饵料经由推进器播散, 保证了一定的抛撒距离, 符合虾类的生活习性。陈雷雷等^[54]为投饵船设计了一种中心抖动双侧落料的落料机构, 有效扩大了饵料投放面积, 提高了作业效率。目前, 直接落料应用相对较少, 主要局限在于投饵面积相对较小, 适用于可沿边投饵且对饵料扩散面积要求不高的应用场景。

4 精准投喂控制技术研究现状

驱动装置和送料机构研究为优化虾蟹塘投饵船性能奠定了硬件基础。作为整个投饵作业的指挥系统, 投饵船精确投喂控制技术近年也广受关注。这项技术主要围绕 3 个核心方向展开: 精确路径规划、虾蟹自动辨识技术以及投饵量的精准预测。

4.1 精准路径规划

投饵船路径的合理规划和精准执行是实现精准投喂的前提条件之一, 根据虾蟹觅食习性不同, 虾蟹塘投饵船的路径规划方式主要分为巡边式和遍历式。

(1) 巡边式路径规划

巡边式路径一般应用于虾类养殖塘(虾类具有巡边觅食的习性)。除第 1 节中提及的通过架设物理轨道和传感器测距实现投饵船在如图 4a、4b 所示的规则塘口和不规则塘口的巡边投饵, 越来越多的学者采用定点巡航的方式, 即通过卫星系统将养殖塘中沿岸点位的经纬度信息存储至投饵船控制系统, 使投饵船按照点位顺序行驶, 从而实现巡边作业的效果。胡庆松等^[15-16,55-57]通过定点巡航的方式自主规划作业路径, 基于航向角与推进器偏转角之间的传递函数建立了模糊 PID (Proportional-Integral-Derivative) 控制器, 使投饵船在具有障碍物的作业环境复杂的养殖塘中巡边行驶(图 4c)时具备一定的巡边航行的精度。赵德安等^[9]为了获得更高的行船精度, 基于高精度 GPS (global positioning system) 系统实时解算当前时刻的目标点位并设计相应的转弯及航道切换策略, 实现实时插点的航道位置计算, 经过航速及自动导航试验, 表明该方法能够使投饵船在直行及转弯时均能获得更好的控制精度。投饵船巡边和定点巡回路径规划的研究中基于高精度定位的多感知系统融合是重要的发展趋势, 其路径规划和执行效果取决于定位系统的精度和路径规划算法的适用性。

(2) 遍历式路径规划

鉴于河蟹领地意识和争食特性, 蟹塘投饵船常常要求全塘均匀遍撒, 行走路径需遍历全塘。孙月平等^[56-57]分别通过 GPS (global positioning system) 系统和北斗卫星导航系统获取养殖塘 4 个顶点的经纬度坐标, 结合路径规划算法, 生成如图 5a、5b 所示的折返式路径和螺旋式路径, 使投饵船实现全塘遍洒。但对于具有长条形增氧装置的养殖塘, 传统的折返式路径和螺旋式路径无法很好地覆盖养殖塘, 存在投饵死区, 为解决该问题, 王

小雨^[58]提出了一种由几组折返式路径组合的全塘遍历路径规划方式, 该算法根据增氧管道将池塘划分为若干子区域, 通过改进 BCD (boustrophedon cellular decomposition) 与 A*算法衔接各子区域, 实现折返式路径全塘遍历, 如图 5c 所示。

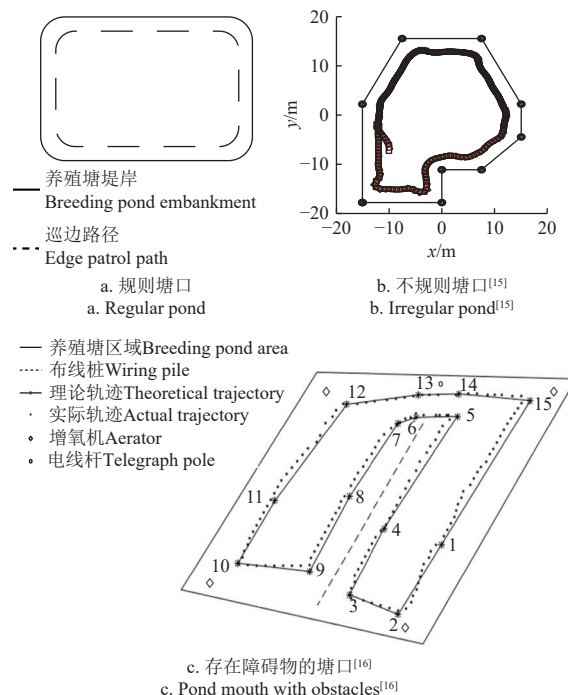


图 4 巡边式轨迹示意图

Fig.4 Schematic diagram of patrol-style trajectory

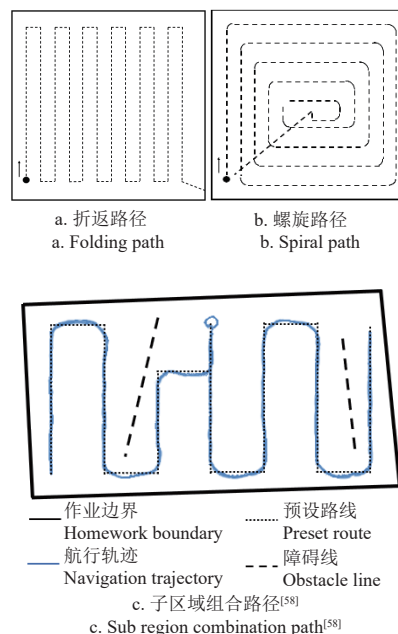


图 5 遍历式路径示意图

Fig.5 Schematic diagram of traversal path

以上几种形式的路径规划一定程度上满足了投饵船作业需求, 提高了投饵船行走投饵的精度, 但在实际使用情景中, 还应具备一定自主规划路径的功能, 以实现自动避障, 应对从不同位置返航填充饲料或自主转塘等问题。对此, 孙月平等^[10]提出了一种基于改进 YOLOv5s

的轻量化蟹塘障碍物检测方法, 进行竹竿、蟹笼和增氧机等障碍物的检测。在此基础上, 孙月平等^[59]又提出一种基于改进 A*算法与人工势场法相融合的蟹塘投饵船动态路径规划算法, 显著提升了路径规划的动态避障能力, 为投饵船在复杂养殖环境中的自主导航、避障、返航和转塘提供了一个综合解决方案。

投饵船的精准路径规划需要考虑养殖对象的觅食习性和养殖池塘的实际环境, 已有投饵船路径规划方式及其实现, 一定程度上满足了投饵船路径规划的需求, 提高了投饵船行走和投饵精度, 但路径规划算法如何提高自主智能路径规划能力, 考虑养殖生物分布进行规划等问题仍有待进一步探索。

4.2 虾蟹自动识别

虾蟹的识别有助于精准掌握虾蟹在养殖池塘中的分布和数量, 为投饵船定点巡航和投饵量控制提供依据。虾蟹自动识别技术以机器视觉为主, 也有学者基于虾类摄食前发出的声音差异提出通过识别声音信号来控制投饵。

机器视觉识别通过摄像机捕捉虾蟹图像, 应用图像识别技术进行虾蟹识别, 但虾蟹养殖塘环境复杂, 存在悬浮物和气泡、光照条件有限且虾蟹姿态形态多样, 虾蟹识别存在困难。对此, 孙月平等^[59]和 JI 等^[60]分别采用 Retinex 和多尺度金字塔融合等算法增强图像细节和对比度, 一定程度上降低了水下光线衰减大、视野模糊等对图像识别产生的影响, 在河蟹特征清晰、环境干扰小的情况下识别精度接近 100%。CAO 等^[61]提出了一种自动粗到细联合检测和实例分割网络, 能够处理河蟹的重叠情况, 提高检测质量和分割准确性, 为水下非结构化活体螃蟹的分割与统计提供了稳健而高效的方法。另一方面, 投饵船整体硬件资源有限, 故适配于投饵船识别的轻量化模型也是虾蟹自动识别技术的研究重点之一。孙月平等^[62]在 YOLOv5s 模型中引入 Ghost 卷积减少模型参数和计算量实现了模型的轻量化, 结合 BiFPN (bidirectional feature pyramid network) 结构提升了复杂环境中中小目标的检测能力, 并通过 CA (coordinate attention) 注意力机制增强特征识别, 实现了模型检测精度和速度的平衡。视觉识别技术轻量化的研究, 有助于其在投饵船特定场景的应用, 但也存在受外部环境影大、无法进行水下障碍物识别等局限性。

鉴于视觉识别技术在水下应用的局限性, 也有学者探索应用声学技术进行虾蟹识别。张丽珍等^[63]和曹正良等^[64]将获取的对虾发声信号进行分频和降噪等预处理后, 对对虾摄食前后发声信号主峰频率进行统计分析, 发现对虾发声信号主峰频率在进食前后有明显区别, 这种信号差异为未来通过声学信号控制投饵船精准投饵提供了可能。李钊丞等^[65]研究了南美白对虾不同游动行为的发声信号特征, 得出对虾弹射信号清晰可辨, 对对虾监管和精准投饵有一定参考价值。

机器视觉技术和声学信号识别技术在虾蟹及其生物量识别方面的应用还处于探索阶段, 但这将是虾蟹塘投饵船实现精准投喂技术中非常具有潜力的研究方向。

4.3 投饵量预测与精准控制

在精准路径规划和虾蟹识别的基础上, 投饵量预测和精准控制技术有助于进一步提高虾蟹塘投饵船的投喂精准性^[66]。

(1) 投饵量预测

投饵量预测旨在解决传统养殖中投饵量不准确引起的虾蟹争食或饵料过剩等问题, 提高饵料利用率和养殖效益。孙月平等^[67]设计了基于河蟹生长模型的精准投饵系统, 通过输入水温、pH 值、溶解氧等环境因子, 利用遗传算法-反向反馈神经网络对精准投饵预测模型进行训练, 得出总投饵量, 并根据池塘河蟹实际分布和水质参数分配投饵量。何津民等^[68]为提高对虾饲料利用率, 提出一种基于自注意力机制和卷积神经网络-长短期记忆网络的预测模型, 预测对虾整个生长周期的投饵量, 有较好的预测效果, 并能够为对虾投饵量的管控提供参考。类似地, 赵思琪等^[69]根据溶解氧、温度、体质量等影响摄食需求的关键因子构建投饵需求量预测模型, 通过蚁群优化算法的模糊 PID 控制技术实现精准投喂。投饵量预测一般基于智能算法和神经网络, 目前仍以理论模型探索为主, 还需要实际应用的进一步验证。

(2) 投饵量精准控制技术

投饵量精准控制技术主要从饵料质量检测与投饵量自适应控制技术着手。孙月平等^[8]在投饵机料斗底部对称安装 NS-TH6 压力传感器检测料箱中饵料的质量, 用于下料量以及抛料盘转速的闭环控制。张丽珍等^[70]针对由环境、投饵船自身系统等因素造成饵料称量不准确问题, 提出了一种适用于投饵船动态称量的自适应跟踪无迹卡尔曼滤波算法, 具有更高的动态测量精度和更好的降噪效果。另外, 张丽珍等^[44]为了实现对下料量的精准控制, 在投饵船料箱底部安装开门机构, 并经过试验得到开门机构开度与投饵速度的关系, 以实时投饵量为反馈, 对开门机构进行闭环 PID 控制, 试验结果表明, 该控制方式下投饵误差在 0.3% 以下, 满足精准投饵要求。程文平^[49]通过实时比对当前船速与预设航速, 当两者不相等时, 并将信号反馈给控制系统, 调整投饵速度。叶杰民等^[71]经过试验测算出投料口开度与船速之间的关系, 投饵船控制系统通过超带宽定位系统实时测算船速, 再经过投料口开度与船速之间的关系, 可得出需要的投饵量并进行实时调整, 由此实现精准投饵。可见, 投饵精准控制技术主要以特定投饵结构的控制模式和控制方法的研究为主。

投饵量预测和投饵精准控制技术的研究还不是很成熟, 特别是投饵量预测技术尚处于起步阶段, 进一步提高投饵量预测和控制的准确性有助于提高投饵船整体智能化水平, 也有助于提高饵料利用率和减少饵料残余量。

5 展 望

虾蟹养殖是国内水产业的重要支柱之一, 虾蟹养殖的机械化和自动化能够促进水产养殖行业的转型升级。虾蟹塘自动投饵船的研究和应用是推动虾蟹养殖自动化

和智能化发展的重要举措。虽然目前已研制出了多种类型的虾蟹塘投饵船并在应用示范中取得了较好的效果,投饵船驱动装置、投饵送料机构、精准投喂控制技术等关键部件和技术的研究也取得了一定的进展,然而,目前虾蟹塘投饵船还存在复杂实际工况适应能力不足,稳定性、精准性和智能性有待提升,标准化程度欠缺等问题,仍需不断摸索与深化,展望未来虾蟹塘投饵船及其相关技术的研究应重点关注以下几个方向:

1) 针对虾蟹养殖池塘复杂环境的适应能力和运行可靠性提升的研究。对于自动投饵船,虾蟹养殖池塘复杂环境主要来源 2 个方面,由于池塘天然条件不同,使得养殖池塘形状不规则、水深不一等;另一方面,由于养殖生产的要求,养殖池塘中设有增氧设备,增氧管线,食台等设施,设施数量和位置具有随机性;此外,对于河蟹养殖,水草的种植区域、位置、面积也是很重要的影响因素。能否应对这些客观条件和复杂性,是自动投饵船能否被养殖企业接收并应用的前提条件。这个方向的研究主要突破点在于:(1) 新型驱动装置的研发和传统驱动装置的改进,船体的稳定行走是对复杂环境的适应性和运行可靠性的基础,因此,诸如可适应水草作业环境的新型驱动装置的研发、螺旋桨中防水草和管线保护性能的提升、明轮动力效率和环境适应性的平衡等;

(2) 智能感知和算法的应用,应用 AI 识别等新兴技术手段识别环境的复杂因素,并结合智能避障等算法提升投饵船的复杂环境适应和自决策能力。

2) 饲料颗粒-投饵船-养殖生物的互作用机理研究。首先是饲料颗粒特性及其运动机理对投饵机储料、送料机构设计的影响,虽然目前已有学者通过离散元等方法对颗粒在机构中的运动状况和破碎状况进行探索,但饲料颗粒特性和送料机构运动特性如何相互作用并影响下料精度和饲料破碎的机理还不完善,通过进一步研究,有助于优化送料机构提升输送效率和减小耗能,也有助于送料机构的优化,从而提高输送效率、降低破碎率、提高下料精度和投饵均匀度。其次是投饵船机构设计、作业方式和虾蟹等养殖生物的习性和生长规律相互关系,虾蟹塘自动投饵船的应用的首要目的是促进虾蟹生长、提升养殖效益,因此,基于虾蟹生活习性、生物量及布局进行投饵船作业方式和路径规划研究,基于养殖生物生长规律或生长情况智能识别进行投饵量智能调整和控制研究,基于投饵船应用的养殖生物生长情况对比研究等,都将有助投饵船整体改进和完善,也有助于提升投饵船的应用效果。

3) 投饵船精准化性能提升和人工智能技术的应用研究。投饵船精准化控制是一个系统性工程,需要综合考虑多个方面:(1) 投饵船运动特性(定位、速度、转向角以及倾角等)的精准感知与智能控制,涉及精准化传感器应用、多源异构数据融合算法的研究、自适应控制技术的研究等;(2) 投饵船下料送料精准化研究,涉及精准化控料装置、下料量智能感知系统和精准控制算法的研究等;(3) 投饵船精准路径规划与执行,涉及投饵

船动态路径规划方法、结合路径的投饵量决策模型及方法研究等。近年来人工智能技术开始渗透到各个领域,其在投饵船研究中的应用主要体现在以下几个方面:

(1) 通过图像识别和机器学习技术,投饵船可以自动识别虾蟹的种类、生长阶段和摄食需求,从而对投饵量和时间智能决策;(2) 利用智能控制技术,投饵船可以根据养殖环境的实时数据(如水质、气象等)进行自动调整投饵量;(3) 人工智能技术可以对投饵船的历史数据进行深度分析,找出最佳的投饵策略。

4) 投饵船的标准化和系统化研究。虾蟹塘投饵船已经形成多种类型的样机系统,通过推进制定投饵船的设计、制造、检测和验收等标准,规范投饵船的生产和使用,提高其性能和可靠性,标准化的投饵船可以更好地实现批量生产和质量控制,降低生产成本,提高市场竞争力。同时,为实现虾蟹塘投饵船的推广应用,除投饵船本身的标准化外,还需要配套研究和解决自动停泊、充电及加料等问题,形成系统化的虾蟹塘投饵船系统和操控方式。

6 结束语

虾蟹塘自动投饵船作为虾蟹池塘养殖产业转型升级的核心装备,其驱动装置、投饵送料机构及精准投喂控制技术等关键环节的研究与应用已取得显著成效,显著提升了投饵作业的效率、精准度与机械化水平,有效减轻了养殖者的劳动强度。展望未来,针对国内虾蟹养殖业的特点与需求,该领域的研究与发展应聚焦于以下几个方向:一是增强投饵船对复杂养殖环境的适应能力与运行稳定性;二是深入探究饲料颗粒、投饵船与养殖生物之间的相互作用机理,以优化投喂策略;三是融合人工智能等前沿技术,进一步提升投饵船的智能化与精准化水平;四是推动投饵船的标准化与系统化研发,促进技术成果的普及与应用。国内虾蟹养殖池塘分布广、形式多样,结合不同养殖品种与生产场景,制定个性化的投饵船应用方案,并加快专项鉴定与农机购置补贴政策的实施,也有助于加速技术成果的转化与落地。此外,鉴于池塘环境多样性与设备布置不规范的现状,未来还需重视“改塘适机”的池塘宜机化改造,为先进装备的应用创造良好条件,共同推动国内虾蟹养殖业向更高质量、更高效益的方向发展。

致谢:感谢国家重点研发计划项目(2019YFD0900401)、上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心项目(2021 科技 02-12)、上海市科技兴农推广项目(沪农科推字(2018)第 3-3 号)的经费支持。同时,感谢上海高水平地方高校创新团队——渔业工程装备创新团队的支持。

[参 考 文 献]

- [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. 2023 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2023.

- [2] 雷高辉, 刘峰, 董小宁, 等. 水产养殖智能投饵技术研究进展[J]. 饲料工业, 2024, 45(14): 132-144.
LEI Gaohui, LIU Feng, DONG Xiaoning, et al. Research progress of intelligent feeding technology in aquaculture[J]. Feed Industry, 2024, 45(14): 132-144. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张世中, 张天时, 刘国涛, 等. 深水网箱养殖水性給料投饲机设计与研究[J]. 渔业现代化, 2024, 51(2): 39-44.
ZHANG Shizhong, ZHANG Tianshi, LIU Guotao, et al. Design and study of water-based feeding machine for deep-sea cage culture[J]. Fishery Modernization, 2024, 51(2): 39-44. (in Chinese with English abstract)
- [4] PREM R, TEWARI V K. Development of human-powered fish feeding machine for freshwater aquaculture farms of developing countries[J]. *Aquacultural engineering*, 2020, 88: 102028.
- [5] AL-RAJHI M A I, OSMAN Y K, EL-WAHAB A G G, et al. A small boat for fish feeding[J]. *Aquacultural Engineering*, 2023, 103: 102371.
- [6] 陈晓龙, 陈军, 唐荣, 等. 对虾船载投饲机的研制[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(1): 152-160.
CHEN Xiaolong, CHEN Jun, TANG Rong, et al. Development of boat-borne feeding machine for shrimps[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(1): 152-160. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周达辉, 朱晓敏, 刘伟清. 基于 PLC 的自巡航虾塘投饲机研究[J]. 江苏农机化, 2016(4): 23-27.
- [8] 孙月平, 赵德安, 洪剑青, 等. 河蟹养殖船载自动均匀投饵系统设计及效果试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 31-39.
SUN Yueping, ZHAO De'an, HONG Jianqing, et al. Design of automatic and uniform feeding system carried by workboat and effect test for raising river crab[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(11): 31-39. (in Chinese with English abstract)
- [9] 赵德安, 罗吉, 孙月平, 等. 河蟹养殖自动作业船导航控制系统设计与测试[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(11): 181-188.
ZHAO De'an, LUO Ji, SUN Yueping, et al. Design and experiment of navigation control system of automatic operation boat in river crab culture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(11): 181-188. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙月平, 孙杰, 袁必康, 等. 基于改进 YOLOv5s 的轻量化蟹塘障碍物检测与定位方法[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(23): 152-163.
SUN Yueping, SUN Jie, YUAN Bikang, et al. Lightweight crab pond obstacle detection and location method based on improved YOLOv5s[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(23): 152-163. (in Chinese with English abstract)
- [11] 赵德安, 刘晓洋, 孙月平, 等. 基于机器视觉的水下河蟹识别方法[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 151-158.
ZHAO De'an, LIU Xiaoyang, SUN Yueping, et al. Detection of underwater crabs using machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3): 151-158. (in Chinese with English abstract)
- [12] WANG X, HONG J, SUN Y, 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.
- [13] 李俊, 朱逸凡, 陈雷雷, 等. 蟹塘双体投饵船行驶阻力分析及船型优化[J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(1): 269-277.
LI Jun, ZHU Yifan, CHEN Leilei, et al. Analysis of driving resistance and optimization of boat type for crab pond catamaran bait boat[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(1): 269-277. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王萍, 张丽珍, 陈雷雷, 等. 基于 CFD 的虾塘投饵船浮态及稳性分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(1): 261-268.
WANG Ping, ZHANG Lizhen, CHEN Leilei, et al. Analysis of floating state and stability of shrimp pond bait boat based on CFD[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(1): 261-268. (in Chinese with English abstract)
- [15] 胡庆松, 陈研霖, 陈普坤, 等. 虾塘差速无人投饵船巡边算法设计与仿真分析[J]. *渔业现代化*, 2021, 48(4): 1-8.
HU Qingsong, CHEN Yanlin, CHEN Pukun, et al. Design and simulation analysis of edge-tracking algorithm for unmanned differential-speed feeding ship in shrimp pond[J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(4): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [16] 胡庆松, 曹佳瑞, 郑波, 等. 明轮驱动虾塘自主导航投饵船设计与可靠性试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 121-128.
HU Qingsong, CAO Jiarui, ZHENG Bo, et al. Design and reliability test of paddle wheel-driven shrimp feeder. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 121-128. (in Chinese with English abstract)
- [17] 胡庆松, 程文平, 李俊. 移动式虾塘投饵装置偏心抖料及抛饵系统优化与试验[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(5): 794-800.
HU Qingsong, CHENG Wenping, LI Jun. Eccentric shaking and bait throwing system optimization and experiment of the mobile shrimp feeding machine[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(5): 794-800. (in Chinese with English abstract)
- [18] 胡庆松, 郑波, 曹佳瑞, 等. 船载投饵装置平衡抖料系统设计与试验[J]. *上海海洋大学学报*, 2020, 29(6): 928-937.
HU Qingsong, ZHENG Bo, CAO Jiarui, et al. Design and test of balanced shaking system for boat-borne bait feeding

- device[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(6): 928-937. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈雷雷, 任万川, 李俊, 等. 蟹塘投饲船螺旋驱动装置设计与水动力性能分析[J]. 渔业现代化, 2022, 49(3): 27-35. CHEN Leilei, REN Wanchuan, LI Jun, et al. Design and performance analysis of spiral drive device of crab pond bait boat[J]. Fishery Modernization, 2022, 49(3): 27-35. (in Chinese with English abstract)
- [20] 葛迅一, 朱虹, 孙崇明, 等. 虾蟹养殖智能投饵(药)无人船设计与研究[J]. 江苏农机化, 2023(5): 4-7.
- [21] 袁浩, 张先阳, 赵德安, 等. 一种水产养殖投 12 饵施药无人作业船: CN202111305066.8[P]. 2022-03-15.
- [22] 张先阳. 可均匀抛撒粘性饵料的河蟹水产养殖投饵船关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022. ZHANG Xianyang. Research on Key Technologies of River Crab Aquaculture Feeding Boat for Uniform Spreading of Viscous Bait[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [23] 杨静雷, 邓志鹏, 侯亮, 等. 不同桨叶数量的高转速明轮推进性能[J]. 广东海洋大学学报, 2024, 44(3): 136-142. YANG Jinglei, DENG Zhipeng, HOU Liang, et al. Propulsive performance of high rotation speed paddlewheels with different numbers of paddles[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2024, 44(3): 136-142. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张瑞杰, 李兆祥, 吴振铭, 等. 水下机器人视景仿真研究[J]. 机械设计, 2024, 41(5): 170-176. ZHANG Ruijie, LI Zhaoxiang, WU Zhengming, et al. Research on view simulation of underwater robot[J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(5): 170-176. (in Chinese with English abstract)
- [25] 姜东栓. CFD 技术在螺旋桨粘性流场计算中的可靠性预报分析[J]. 中国水运, 2017(7): 43-44.
- [26] 杨美红, 李铁骊, 胡俊明, 等. 基于 CFD 法的对转螺旋桨敞水性能参数匹配研究[J]. 船舶工程, 2016, 38(11): 42-46. YANG Meihong, LI Tieli, HU Junming, et al. Study on open water performance of parameters matching of counter-rotating propellers based on CFD method[J]. Ship Engineering, 2016, 38(11): 42-46. (in Chinese with English abstract)
- [27] 孙承亮, 赵江滨. 基于 CFD 的对转螺旋桨水动力性能分析[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(3): 36-40. SUN Chengliang, ZHAO Jiangbin. Hydrodynamic performance analysis of counter-rotating propellers based on CFD[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(3): 36-40. (in Chinese with English abstract)
- [28] YAO J X. Investigation on hydrodynamic performance of a marine propeller in oblique flow by RANS computations[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2015, 7(1): 56-69.
- [29] WANG L, MARTIN J E, FELLI M, et al. Experiments and CFD for the propeller wake of a generic submarine operating near the surface[J]. Ocean Engineering, 2020, 206: 107304.
- [30] ZHANG Q, JAIMAN R K. Numerical analysis on the wake dynamics of a ducted propeller[J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 202-224.
- [31] KORSSTR M A, MIETTINEN P, HÄNNINEN S K, et al. Investigation of the propeller slip stream over an Azipod propulsor by PIV measurements and CFD simulations[C]. // Proceedings of the 4th International Symposium on Marine Propulsors. Austin, 2015.
- [32] 陈雷雷, 冉胡泽, 胡庆松, 等. 蟹塘投饵船三叶螺旋桨设计及水动力仿真分析[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(5): 893-904. CHEN Leilei, RAN Huzhe, HU Qingsong, et al. Design and hydrodynamic simulation analysis of three-blade propeller for shrimp and crab pond feeding boat[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(5): 893-904. (in Chinese with English abstract)
- [33] 李振兴. 纯电动智能小型船舶性能优化[D]. 厦门: 集美大学, 2022. LI Zhenxing. Performance Optimization of Pure Electric Smart Small Ships[D]. Xiamen: Jimei University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [34] 宋欢, 李勇, 马迎亚, 等. 基于离散元法的定量螺旋输送机的优化研究[J]. 起重运输机械, 2016(2): 30-34. SONG Huan, LI Yong, MA Yingya, et al. Optimal study on rationed screw conveyor based on discrete element method[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2016(2): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- [35] 马迪红. 虾塘移动式投饵系统设计与实验[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017. MA Dihong. The Design and Experiment of Movable Shrimp Feeding System[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [36] 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 Yang, CHEN Xiaolong, TIAN Changfeng, et al. Design and test of a moving feeding device for crab and shrimp ponds[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(3): 9-14. (in Chinese with English abstract)
- [37] 张昊晨, 张超, 曹宪周. 基于 EDEM 的螺旋输送机输送效率和能耗分析[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(1): 8-13. ZHANG Haochen, ZHANG Chao, CAO Xianzhou. Analysis of conveying efficiency and energy consumption of screw conveyor based on EDEM[J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(1): 8-13. (in Chinese with English abstract)
- [38] OWEN P J, CLEARY P W. Screw conveyor performance: comparison of discrete element modelling with laboratory

- experiments[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal, 2010, 10(5-6): 327-333.
- [39] 张克平, 王国华, 柴强. 基于离散单元法的螺旋输送装置工作过程数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(6): 285-291.
- ZHANG Keping, WANG Guohua, CHAI Qiang. Numerical simulation of working process of screw conveyor based on discrete element method[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2016, 34(6): 285-291. (in Chinese with English abstract)
- [40] 周甲伟, 闫翔宇, 郑泽冰, 等. 气力输送关键装置及管内流动特性研究现状及展望[J]. 过程工程学报, 2023, 23(5): 649-661.
- ZHOU Jiawei, YAN Xiangyu, ZHENG Zebing, et al. Research status and prospects of key installations and flow characteristics of pneumatic conveying[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2023, 23(5): 649-661. (in Chinese with English abstract)
- [41] 王铭松. PTA 装置旋转阀常见故障分析及处理[J]. 聚酯工业, 2013, 26(1): 58-59.
- WANG Mingsong. Common faults analysis and treatment of rotary valve in PTA plant[J]. Polyester Industry, 2013, 26(1): 58-59. (in Chinese with English abstract)
- [42] 华强. 旋转加料器常见故障分析与处理[J]. 设备管理与维修, 2020(9): 66-68.
- [43] 姜忠爱, 于红, 吴俊峰, 等. 投饵机下料及抛洒结构优化设计[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(3): 10-16.
- JIANG Zhongai, YU Hong, WU Junfeng, et al. Optimization of feeding and dispensing structure of feeding machine[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2023, 43(3): 10-16. (in Chinese with English abstract)
- [44] 张丽珍, 刘单寒, 陈雷雷, 等. 虾塘养殖船载精准投饵机设计[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(5): 203-206, 210.
- ZHANG Lizhen, LIU Danhan, CHEN Leilei, et al. Design of precision feeding machine for shrimp pond culture[J]. Machine Design & Research, 2021, 37(5): 203-206, 210. (in Chinese with English abstract)
- [45] 彭飞, 宋雨龙, 张丽梅, 等. 基于 TRIZ 理论的水产养殖投饵船创新设计[J]. 饲料工业, 2023, 44(9): 8-13.
- PENG Fei, SONG Yulong, ZHANG Limei, et al. Innovative design of aquaculture bait carrier based on TRIZ theory[J]. Feed Industry, 2023, 44(9): 8-13. (in Chinese with English abstract)
- [46] 陈雷雷, 李怀进, 沈凯琪, 等. 一种用于颗粒料投饵设备的单振源多功能一体式送料机构: CN202211673900.3 [P]. 2023-04-28.
- [47] 朱倬. 离心式投饵机饲料破碎率研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- ZHU Tan. Study on Feed Breaking Rate of Centrifugal Feeder[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [48] 王真亮. 水面自主巡航式太阳能投饵船的设计与研究[D]. 合肥: 安徽工业大学, 2017.
- WANG Zhenliang. The Design and Study on Solar Energy Feeding Ship Based on Autonomous Cruise Method[D]. Hefei: Anhui University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [49] 程文平. 智能型虾塘移动式投饵装置研发与试验[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- CHENG Wenping. Development and Testing of Intelligent Mobile Feeding Equipment for Shrimp Ponds[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [50] 张丽珍, 朱倬. 离心式投饵机抛料盘对饲料破碎率的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(6): 107-116.
- ZHANG Lizhen, ZHU Tan. Influence of centrifugal disc of centrifugal feeder on breaking rate[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(6): 107-116. (in Chinese with English abstract)
- [51] 赵思琪, 丁为民, 赵三琴, 等. 基于 EDEM-Fluent 的气动式鱼塘投饵机性能优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 130-139.
- ZHAO Siqi, DING Weimin, ZHAO Sanqin, et al. Performance analysis and optimization of pneumatic fishpond feeder based on EDEM-Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 130-139. (in Chinese with English abstract)
- [52] 张丽珍, 马迪红, 胡庆松, 等. 移动式双盘对称抛料投饵系统的设计与试验[J]. 机械设计, 2018, 35(9): 73-78.
- ZHANG Lizhen, MA Dihong, HU Qingsong, et al. Design and experimentation of mobile symmetric double-disc feeding system[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(9): 73-78. (in Chinese with English abstract)
- [53] 胡庆松, 沈凯琪, 黄克诚, 等. 一种 V 字排列两盘同步增宽型虾蟹塘投饵船: 上海市: 202310113683.0[P]. 2023-07-25.
- [54] 陈雷雷, 沈凯琪, 李怀进, 等. 一种中心抖动双侧落料的虾塘投饵船: CN202310113680.7[P]. 2023-05-30.
- [55] 刘雨青, 杨喜清, 楚慧勇, 等. 自主巡航无人船控制系统设计与实现[J]. 制造业自动化, 2022, 44(10): 127-131.
- [56] 孙月平, 赵德安, 洪剑青, 等. 河蟹养殖全覆盖自动均匀投饲的轨迹规划与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 190-200.
- SUN Yueping, ZHAO De'an, HONG Jianqing, et al. Trajectory planning and testing for comprehensive coverage, automatic, and uniform feeding in river crab aquaculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(18): 190-200. (in Chinese with English abstract)
- [57] 胡庆松, 程文平, 陈雷雷, 等. 基于 BDS 的虾塘投饵船导航

- 控制系统设计与试验[J]. 测控技术, 2017, 36(2): 58-61, 66.
- HU Qingsong, CHENG Wenping, CHEN Leilei, et al. Design and testing of autonomous navigation control system for shrimp casting boat based on BDS[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(2): 58-61, 66. (in Chinese with English abstract)
- [58] 王小雨. 河蟹养殖自动投饵船作业轨迹规划研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- WANG Xiaoyu. Research on Trajectory Planning of Automatic Feeding Boat for Crab Culture[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [59] 孙月平, 方正, 袁必康, 等. 基于 FIA*-APF 算法的蟹塘投饵船动态路径规划[J]. 农业工程学报, 2024, 40(9): 137-145.
- SUN Yueping, FANG Zheng, YUAN Bikang, et al. Design of automatic and uniform feeding system carried by workboat and effect test for raising river crab[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(9): 137-145. (in Chinese with English abstract)
- [60] JI W, PENG J, XU B, et al. Real-time detection of underwater river crab based on multi-scale pyramid fusion image enhancement and MobileCenterNet model[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 204: 107522.
- [61] CAO S, ZHAO D, SUN Y, et al. Automatic coarse-to-fine joint detection and segmentation of underwater non-structural live crabs for precise feeding[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 180: 105905.
- [62] 孙月平, 袁必康, 詹婷婷, 等. 基于改进 YOLOv5s 的河蟹与饵料检测方法[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 178-187.
- SUN Yueping, YUAN Bikang, ZHAN Tingting, et al. Detecting river crab and bait using improved YOLOv5s[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(22): 178-187. (in Chinese with English abstract)
- [63] 张丽珍, 陆天辰, 杨加庆, 等. 南美白对虾进食前后发声信号特点分析[J]. 声学技术, 2020, 39(4): 413-418.
- ZHANG Lizhen, LU Tianchen, YANG Jiaqing, et al. Analysis of sound characteristics of *Penaeus Vannamei* before and after feeding[J]. Technical Acoustics, 2020, 39(4): 413-418. (in Chinese with English abstract)
- [64] 曹正良, 沈梦庭, 李钊丞, 等. 摄食不同粒径颗粒饲料的凡纳滨对虾发声信号特征[J]. 南方水产科学, 2022, 18(6): 26-34.
- CAO Zhengliang, SHEN Mengting, LI Zhaocheng, et al. Characteristics of feeding acoustic signals of *Litopenaeus Vannamei* fed with pellets of different sizes[J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(6): 26-34. (in Chinese with English abstract)
- [65] 李钊丞, 项盛羽, 沈梦庭, 等. 南美白对虾快速游动发声特征及其信息利用研究[J]. 水生生物学报, 2023, 47(6): 997-1006.
- LI Zhaocheng, XIANG Shengyu, SHEN Mengting, et al. Acoustic characteristics of fast swimming and its information utilization for *Litopenaeus Vannamei*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(6): 997-1006. (in Chinese with English abstract)
- [66] 朱明, 张镇府, 黄凰, 等. 鱼类养殖智能投喂方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(7): 38-47.
- ZHU Ming, ZHANG Zhenfu, HANG Huang, et al. Research progress on intelligent feeding methods in fish farming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(7): 38-47. (in Chinese with English abstract)
- [67] 孙月平, 陈祖旭, 赵德安, 等. 池塘河蟹养殖精准投饵系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 291-301.
- SUN Yueping, CHEN Zuxu, ZHAO De'an, et al. Dynamic path planning for feeding boat in crab pond using FIA*-APF algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 291-301. (in Chinese with English abstract)
- [68] 何津民, 张丽珍. 基于自注意力机制和 CNN-LSTM 深度学习的对虾投饵量预测模型[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(2): 304-311.
- HE Jinmin, ZHANG Lizhen. Shrimp feeding quantity prediction model based on self-attention mechanism and CNN-LSTM deep learning[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2022, 37(2): 304-311. (in Chinese with English abstract)
- [69] 赵思琪, 赵三琴, 国振淇, 等. 池塘水产养殖精准投喂系统研制与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 27-34.
- ZHAO Siqi, ZHAO Sanqin, GUO Zhenqi, et al. Development of the precise feeding system for pond culture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(22): 27-34. (in Chinese with English abstract)
- [70] 张丽珍, 李旗明, 吴迪等. 基于改进强跟踪无迹卡尔曼滤波的饵料动态称重算法[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(5): 967-977.
- ZHANG Lizhen, LI Qiming, WU Di, et al. Dynamic weighing algorithm of bait based on improved strong tracking unscented Kalman filtering[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(5): 967-977. (in Chinese with English abstract)
- [71] 叶杰民, 张丽珍, 吴迪, 等. 虾塘投饵船载自适应速度投饵系统设计与实现[J]. 渔业现代化, 2021, 48(4): 9-16.
- YE Jiemin, ZHANG Lizhen, WU Di, et al. Design and implementation of adaptive speed feeding system for shrimp pond feeding boat[J]. Modern Fisheries, 2021, 48(4): 9-16. (in Chinese with English abstract)

Research status and prospects of automatic feeding boats for shrimp and crab ponds

CHEN Leilei , SHEN Kaiqi , HU Qingsong , LI Jun[※]

(College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A large-scale aquaculture of shrimp and crab ponds can be found with a high demand for automatic feeding in China. Automated feeding is crucial to the output and quality of cultivated species, due to cost savings and minimum pollution of aquaculture water bodies. It is also one of the most critical steps to enhance the efficiency of shrimp and crab pond aquaculture in mechanization and automation. Given the limited swimming ability of shrimp and crabs, it is essential to evenly distribute feed throughout the pond, according to their feeding behaviors. Previous research has been increasingly focused on the automatic feeding boats of shrimp and crab ponds, particularly on precise positioning, uniform feeding, automatic navigation, and operation. In this study, a research survey was implemented on the feeding boats for the shrimp and crab ponds in the world. Subsequently, the current research status of automatic feeding boats was outlined for the shrimp and crab ponds. Three key aspects were: the propulsion system of feeding boats, the bait delivery mechanism, and precise feeding control technology. Firstly, the current propulsion systems of feeding boats were primarily paddle wheels and propellers, each of which shared their own strengths and weaknesses suitable for different scenarios. Structural optimizations were conducted to improve the speed, efficiency, and maneuverability. Additionally, the blowers and integrated screw systems were explored for feeding boats, in response to the aquaculture environment with dense aquatic plants. However, two mechanisms were still in the exploratory phase. Secondly, the feeding and scattering mechanisms were designed to achieve the transportation and scattering of feed under various aquaculture conditions. 1) The feeding mechanism mainly included a screw, rotary valve, and vibrating feeding. The lower feed breakage rates and higher transportation speeds were achieved for the high efficiency and accuracy. 2) The scattering mechanism was primarily used as centrifugal scattering discs, particularly for a wide scattering range. Some optimizations were also implemented to achieve higher uniformity in the scattering and lower feed breakage rates using various simulation software. According to the feeding characteristics of shrimp, direct feeding was applied in shrimp ponds. Thirdly, the precise feeding control technology focused mainly on three aspects: 1) According to different breeding needs, path planning involved planning edge-following and coverage paths using a combination of sensors, satellite navigation systems, and path planning. 2) Automatic recognition was used for shrimp and crabs using machine vision and acoustic technology. The feeding boat was formulated feeding strategies, according to their distribution within the aquaculture pond. 3) Precise control was carried out to predict and accurately adjust the amount of feed using deep learning. Furthermore, the limitations of current research were examined to predict future trends: 1) To enhance adaptability and operational reliability in complex environments, 2) To investigate the interaction mechanism among feed particles, feeding boats, and breeding organisms, 3) To improve precision performance using artificial intelligence technologies, and 4) To realize the standardization and systematization. From the perspective of practical application, an emphasis was put on the standardizations of equipment layout, pipeline distribution, and waterweed planting. The findings can offer valuable insights for further research, development, and promotion of automatic feeding boats for shrimp and crab ponds in China.

Keywords: cultivation; fishery; automatic feeding boat; driving mechanism; feed feeding mechanism; precision control