

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.046

智能投饵船研究现状与展望

郭子淳 黄家悱 王水传 俞舜庭 张林泉

(广东省现代农业装备研究所水产工程装备技术研究开发中心, 广州 510630)

摘要: 饵料、药剂、微生物等精准投喂是水产健康养殖重要环节,智能投饵船因具备自动避障定位、多点精准投放、支持水质和视频监测集成等功能而逐渐受到关注。从投饵机构、路径控制、投饵策略3方面总结国内外智能投饵船研究现状,重点介绍现有下料机构及抛料机构、路径控制方式、航向控制算法、投饵路径策略和智能投饵技术,并针对当前研究不足,总结未来研发趋势:进一步改善抛饵破碎率及抛洒均匀性、融合5G通信和RTK视觉识别的高精度导航定位系统、开发计算简易的航向高精度控制算法、开发基于机器视觉与声学信息分析的智能投饵管控算法、实现智能投饵船的多功能化发展、构建数字孪生的智能投饵船远程监控系统。

关键词: 智能投饵船; 投饵结构; 路径控制; 投饵策略

中图分类号: S969; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0385-12

Research and Prospect of Intelligent Bait-dropping Boat

GUO Zichun HUANG Jiayi WANG Shuichuan YU Shunting ZHANG Linquan

(Research Center of Aquatic Engineering Equipment Technology, Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China)

Abstract: Precise feeding of bait, medicine and microorganism is an important part of healthy aquatic breeding. The research of intelligent bait-dropping boat has gradually attracted attention due to its automatic cruise, obstacle self-avoidance, multi-point accurate delivery, supporting for the integration of water quality and video monitoring. The domestic and foreign research of intelligent bait-dropping boat was summarized from three aspects, including bait-feeding structure, path control and bait-feeding strategy. Among them, the existing conveying and throwing structure, path control mode, heading control algorithm, feeding path strategy and intelligent feeding technology were systematically analyzed. In view of the current research deficiencies, the future R&D trends were obtained: further improvement of bait breaking rate and throwing uniformity, high-precision navigation and positioning system integrated with 5G communication, high-precision heading control algorithm, intelligent bait-dropping algorithm that combined visual and acoustic information analysis, more multifunction of intelligent feeding boat, construction of a remote monitoring system for smart bait-dropping boat based on satellite Internet of things and digital twins. The content was of great significance to the development of digital, precise and intelligent of the intelligent bait-dropping boat.

Key words: intelligent bait-dropping boat; conveying and throwing structure; path control; bait-feeding strategy

0 引言

科技发展和农业人口老龄化,加速了国内外水产养殖从人工劳动力为主转为以机械化、自动化、智能化为主^[1-3]。池塘养殖是我国水产养殖的重要方式

之一。2019年,全国池塘养殖面积2 644.73千hm²,占淡水养殖面积51.69%^[4]。投料是池塘养殖过程中劳动力投入较多环节之一,且投饵均匀性、破碎率、精准性是影响水产健康和水质良性净化的关键指标之一^[5]。

收稿日期:2020-08-13 修回日期:2020-09-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0700900)和省级农机科研能力提升项目(粤财农[2020]39号)

作者简介:郭子淳(1993—),男,助理工程师,主要从事智能水产装备研究,E-mail:977768854@qq.com

通信作者:黄家悱(1980—),女,高级工程师,博士,主要从事农业智能装备与信息化研究,E-mail:2796426373@qq.com

智能投饵船搭配自主路径导航系统可实现投饵过程的无人化^[6-7];投饵结构优化能有效降低饵料破碎率并提高其分布均匀性^[8-9]。近年来,国外学者开发了多类型的智能投饵算法,如基于机器视觉的鱼群探测、基于声波系统的残饵影像等,可根据探测到的数据信号智能决策投饵量及位置,实现投饵的精准化^[10-11]。

由于鱼虾生活习性不同,其投饵方式存在明显差异:前者多采用定点投饵,后者需采用均匀投饵方式^[12],由于不同鱼虾在不同生长阶段的养殖水体调控需求不同,使得投饵策略更加复杂。智能投饵船将成为鱼虾养殖自动化、智能化、无人化进程中得力装备之一^[13]。

智能投饵船的结构可分为船体、饵料箱、下料结构、抛料结构、驱动结构以及控制装置^[14-15]。国内外学者针对定量化投饵、均匀化抛洒、饵料破碎率降低、智能化路径控制、投饵策略进行了大量研究,主要集中在智能投饵船的投饵结构、路径规划方式、投饵策略3方面。

本文主要对国内外池塘智能投饵船关键组成部分的研究现状进行研究,包括:①投饵结构:下料结构、抛料结构。②路径控制方式:物理控制式、离岸测距控制式、导航定位控制式。③投饵策略:投饵路径策略、智能投饵技术。旨在梳理国内外池塘智能投饵船的研究现状与进展,分析当前研究存在的不足,提出展望。

1 投饵机构

1.1 下料机构

下料是投饵机构第1环节,主要作用是保证定量送料,同时确保送料安全和效率。电磁铁吸拉式是投饵机最早使用的下料结构^[16],由于其定量性差,已被螺旋输送式、偏心轮振动式以及旋转输送式所代替。近年来,养殖户发现饵料破碎率也会影响鱼类摄食情况,因此如何有效降低饵料破碎率也成为下料机构需解决的重要问题之一^[8]。

1.1.1 螺旋输送式

洪扬等^[17]为能够精确定量计算下料时饵料的移动速度,研制了一种螺旋输送式的下料机构,并在螺旋输送式机构出口处设置迷宫式密封方式,如图1所示,该机构能够精确定量计算饵料输送过程中的移动速度,迷宫式密封方式能够在保证密封的同时,防止破碎饵料堵塞密封口。根据饵料运动示意图(图2),推导出饵料移动速度表达式为

$$v_1 = \frac{Snc\cos\alpha}{60\cos\varphi} \cos(\alpha + \varphi) \quad (1)$$

式中 v_1 ——饵料轴向移动速度,mm/s
 φ ——饵料与结构材料的摩擦角,(°)
 α ——螺旋叶片升角,(°)
 S ——螺旋叶片螺距,mm
 n ——转速,r/min

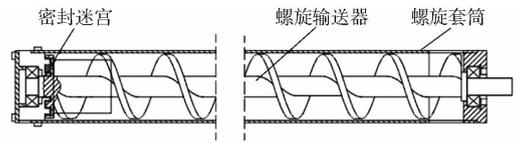


图1 螺旋下料机构

Fig. 1 Auger unloading structure

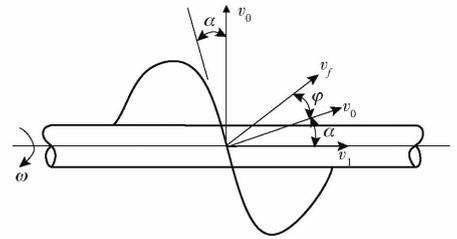


图2 饵料运动示意图

Fig. 2 Movement diagram of feed

马迪红^[8]在原有螺旋机构基础上,将螺旋轴中间段的芯轴去除,保留两端起连接作用,研制一种无芯轴的螺旋输送式下料机构,可以有效提高饵料输送效率,且确保定量输送,如图3所示。该机构单次输送饵料量为

$$M = \rho V \quad (2)$$

其中

$$V = \pi \frac{D^2 - d^2}{4} nST$$

式中 M ——单次输送饵料量,kg

ρ ——饵料密度,kg/m³

V ——单次输送饵料体积,m³

D ——螺旋外径,mm

d ——螺旋轴径,mm

T ——送料时间,s

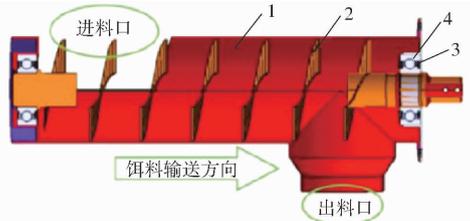


图3 无芯轴螺旋输送式下料机构

Fig. 3 Screw conveying unloading structure without mandrel

1. 送料轴外壳 2. 送料轴 3. 轴承座 4. 轴承

1.1.2 偏心轮振动式

针对螺旋输送式机构会造成一定饵料破碎,影响摄食情况,导致残饵增多、水体水质富营养化、低质残污增多^[18]等问题,胡庆松等^[19]研制了一种偏

心轮振动式的平衡式抖料机构。该机构将抖动支点设置在料箱中点位置,利用左右重力平衡特点减小料箱底部的抖动阻力,如图 4 所示。其工作原理是利用偏心轴转动给料箱底部带来周期性的高低变化,使其实现周期定量的抖动,通过改变偏心轮、支点位置、偏心轴转速、底板倾斜角来实现不同的下料量和速度,同时可以有效降低饵料破碎率。该下料机构运动机构数学模型如图 5 所示,抖动角 α_3 表达式为

$$\alpha_3 = \arcsin \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} - \arctan \frac{A}{B} \quad (3)$$

其中 $A = 2l_1 l_3 \sin\alpha_1$ $B = 2l_3(l_4 - l_1 \cos\alpha_1)$
 $C = l_2^2 - l_1^2 - l_3^2 - l_4^2 + 2l_1 l_4 \cos\alpha_1$

式中 l_1 ——电机轴旋转曲柄长度
 l_2 ——偏心轴承座杆长度
 l_3 ——料箱长度
 l_4 ——支点到电机固定中心的杆长度
 α_1 ——电机轴旋转曲柄与水平方向夹角

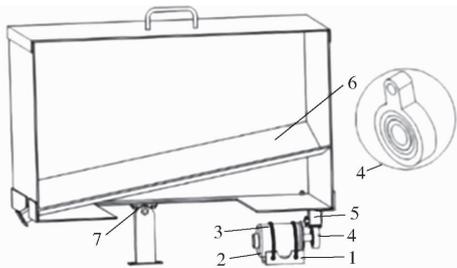


图 4 平衡式抖料机构

Fig. 4 Balanced buffeting structure

1. U 型托架 2. 直流电机 3. 卡箍 4. 偏心轮 5. 振动托架 6. 料箱坡板 7. 外球面带座轴承

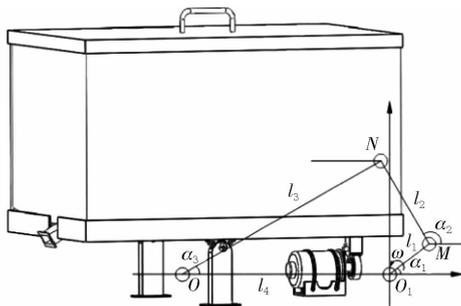


图 5 平衡式抖料机构运动机构数学模型

Fig. 5 Mathematical model of moving mechanism of balanced buffeting structure

基于相同偏心振动工作原理,程文平^[9,20]研制了另一种偏心轮凸轮机构,见图 6。下料部分主要部件为盘式电机、抖料盘、偏心轴、偏心轴套,饵料经由落料口落入抖料盘中,通过盘式电机带动偏心轮,促使抖料盘抖动,再将饵料振动落入抛料转盘中。该下料机构运动机构数学模型如图 7 所示,抖动角

α_3 表达式为

$$\alpha_3 = 2 \arctan \frac{-G \pm \sqrt{G^2 - 4FH}}{2F} \quad (4)$$

其中

$$F = -h_1 + (1 - h_3) \cos\theta_1 + h_5$$

$$G = -2 \sin\theta_1$$

$$H = h_1 - (1 + h_3) \cos\theta_1 + h_5$$

$$h_1 = \frac{l_6}{l_1} \quad h_3 = \frac{l_6}{l_5}$$

$$h_5 = \frac{l_6^2 + l_1^2 - l_2^2 + l_5^2}{2l_1 l_5}$$

式中 l_5 ——抖料盘长度

l_6 ——支点到抖料盘固定中心的杆长度

θ_1 ——支点到抖料盘固定中心的杆与水平方向夹角

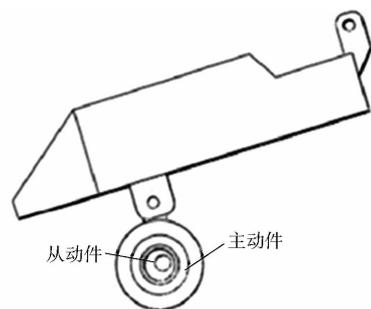


图 6 偏心轮凸轮机构

Fig. 6 Eccentric cam structure

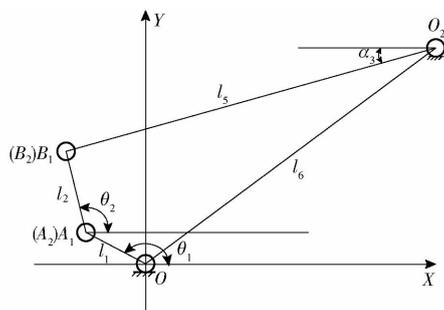


图 7 偏心轮凸轮机构运动机构数学模型

Fig. 7 Mathematical model of eccentric cam mechanism

1.2 抛料机构

抛料是投饵机构的第 2 环节。抛料机构直接影响投饵分布均匀程度、投饵范围、饵料破碎率等指标,是投饵机构中的关键机构。在 1983 年,丹东修造船厂报道了 DSC001C 型自动投饵船,其工作原理是利用人工脚踏产生动力,通过传动机构使得投料辊转到料辊的板齿上,再将饵料带动投入水中^[21]。随后 1990 年大连水产学院突破人力产生动力问题,研制了一种新型抛料结构:以柴油机为动力源,带动开式叶轮水泵运转,将饵料通过喷嘴喷洒出去^[22]。

随着水产养殖的发展,为节省成本以及提高养殖质量,农户越来越关注智能投饵船小型化、电量持久性、投饵分布均匀性、饵料破碎率低等指标^[23]。

而早期研发的料辊式、喷嘴式抛料机构难以满足以上指标,促使国内外学者专家提出新的抛料方式:凹槽抛料和抛盘抛料。

1.2.1 凹槽抛料式

周达辉等^[24]研制了一种旋转凹槽抛料式机构:在滚筒中开一条凹槽,饵料从料箱落落到凹槽,再转动滚筒一定角度使得饵料掉入水里,如图8所示。凹槽尺寸决定了该机构单次投饵量 M ,其表达式为

$$M = \rho V = \frac{(L_1 + L_2)h}{2} D_e \quad (5)$$

式中 L_1 ——上凹槽长度,mm
 L_2 ——下凹槽长度,mm
 h ——凹槽宽度,mm
 D_e ——凹槽深度,mm

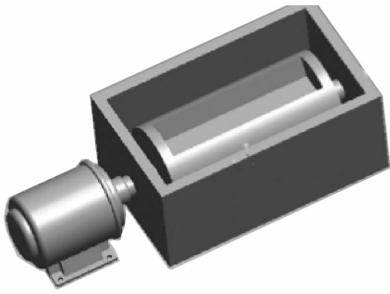


图8 旋转凹槽抛料式机构

Fig.8 Rotating groove throwing structure

旋转凹槽抛料式机构能精确定量控制投饵速度和投饵量并有效减少破碎率,但投饵覆盖范围小且分布不均匀,不适于对分布均匀性要求高的应用场景。

1.2.2 抛盘抛料式

抛盘抛料式机构能够根据电机转速调节投饵范围、投饵均匀性和投饵量,定量性强,已成为当前最常用的抛料方式^[25]。

(1) 基本机构

以王真亮^[26]设计的抛盘抛料式机构为例,如图9所示,其工作原理为饵料从下料机构掉入抛盘叶片间的扇区,抛盘被电机带动进行高速旋转,使得饵料在抛盘叶片的作用下离心运动,沿着叶片抛射出去。

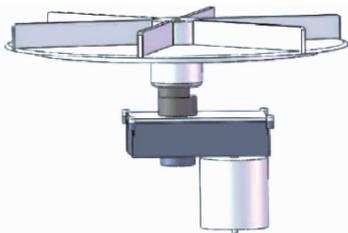


图9 抛盘抛料式机构

Fig.9 Plate throwing structure

为定量计算抛盘抛料式结构的投饵范围,孙月

平等^[27]对该机构中斜抛饵料颗粒进行了运动建模,模型示意图如图10所示。其中 H_0 为抛盘中心与水面的垂直距离,m; θ_0 为抛盘与水平方向的夹角, $(^\circ)$ 。考虑饵料颗粒自身重力以及空气阻力的作用,计算饵料颗粒从抛盘斜抛出来的运动轨迹和距离,运动方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{dt} = v_{x2} \\ \frac{dz_2}{dt} = v_{z2} \\ m \frac{dv_{x2}}{dt} = -kv_i^2 \cos\theta = -kv_i v_{x2} \\ m \frac{dv_{z2}}{dt} = -F \sin\theta - G = -kv_i v_{z2} - mg \end{cases} \quad (6)$$

式中 x_2 ——饵料颗粒在水平方向上位移,m

z_2 ——饵料颗粒在垂直方向上位移,m

v_i ——饵料颗粒实际速度,m/s

v_{x2} ——饵料颗粒水平分解速度,m/s

v_{z2} ——饵料颗粒垂直分解速度,m/s

θ ——饵料颗粒斜抛角, $(^\circ)$

m ——饵料颗粒质量,kg

k ——空气阻力系数

t ——飞行时间,s

F ——饵料颗粒斜抛受到的空气阻力,N

G ——饵料颗粒自身重力,N

g ——重力加速度,取 9.80 m/s^2

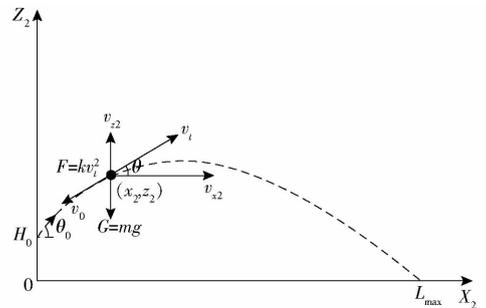


图10 斜抛饵料颗粒运动模型

Fig.10 Movement model of oblique throwing feed particles

设 $\mathbf{u} = [x_2 \ z_2 \ v_{x2} \ v_{z2}]$,令 $u_3 = v_{x2}$ 、 $u_4 = v_{z2}$,则式(6)可转换为

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \begin{bmatrix} u_3 \\ u_4 \\ -\frac{k}{m} \sqrt{u_3^2 + u_4^2} u_3 \\ -\frac{k}{m} \sqrt{u_3^2 + u_4^2} u_4 - g \end{bmatrix} \quad (7)$$

设抛盘半径为 r_p ,转速为 n_p ,则抛盘角速度 $\omega = \pi n_p / 30$,饵料颗粒斜抛最远水平距离 L_{\max} 为

$$L_{\max} = x_2(t_1) |_{z_2(t_1) = 0} \quad (8)$$

饵料颗粒斜抛最近水平距离 L_{\min} 为

$$L_{\min} = x_2(t_2) |_{z_2(t_2)=0} \quad (9)$$

(2) 机构改进

程文平^[9]发现基础的抛盘机构存在投饵不均匀的情况,提出通过折弯抛盘叶片的方法提高投饵均匀性,如图 11 所示。利用 ADAMS 软件分别对折弯角 0° 、 6° 、 12° 、 18° 进行仿真,结果发现当叶片折弯角为 12° 时,饵料的抛料轨迹较为对称,也即投饵较为均匀。

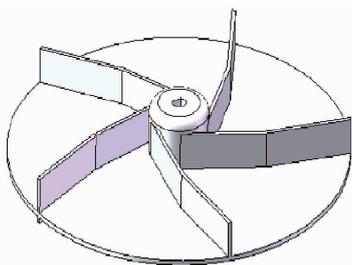


图 11 叶片折弯抛盘三维模型

Fig. 11 3D model of blade bending plate

另外,针对饵料破碎问题,马迪红^[8]提出饵料破碎的主要原因是:饵料掉落受到叶片冲击力而被打碎。另外,为了饵料能够顺利从抛盘飞出,需使其产生克服径向摩擦力 f_y 的离心力 F_y 。

$$F_y = m\omega^2 r \quad (10)$$

$$f_y = \mu mg \quad (11)$$

式中 r ——饵料落下位置与抛盘中心距离, m

μ ——饵料与抛盘的摩擦因数

由式(10)、(11)得到饵料落下位置与抛盘转速的临界关系为 $r = \mu g / \omega^2$,而抛盘转速很高,摩擦因数可看成趋向于 0,因此 r 也趋向于 0。

针对该原理,为降低饵料受到的冲击力 P ,研制了一种从盘心下料的闭式 360° 抛料盘,如图 12 所示。饵料在抛盘中心掉落,不会受到叶片打击;底盘做成凹盘,一是可以装下更多的饵料,二是形成一定的角度使得饵料斜抛出去,该机构能使饵料破碎率降低 70%。

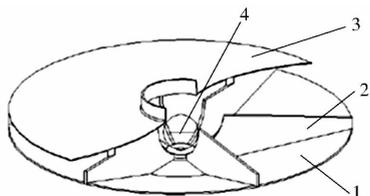


图 12 闭式 360° 抛盘示意图

Fig. 12 Closed 360 degree plate

1. 抛料底盘 2. 叶片 3. 盖板 4. 饵料缓冲容积

1.3 投饵机构适用性讨论

在实际养殖过程中,为补充虾类营养,养殖户会将其与益生菌混合后再进行投饵,此时饵料会有一

定的湿度而形成轻微粘稠,对于这类混合粘稠饵料极易造成螺旋输送机堵塞,因此不适用于螺旋输送式结构。

另外,虾类饵料直径一般为 $0.8 \sim 1.2$ mm,而鱼类饵料直径一般为 $2.0 \sim 4.0$ mm,是虾料直径的两倍多,且多为浮水料,极易被抛盘叶片冲击力打碎。因此对于鱼类养殖,为保持较低的破碎率,一般多采用凹槽抛料方式,若是在深海养殖场景,则可通过风机吹送方式进行大规模输送。

2 路径控制

单个养殖池塘面积一般为 $0.334 \sim 0.667$ hm^2 ,而养殖对象可能分布在池塘的各个位置,特别是虾养殖,若投饵环节不能很好地均匀遍洒,容易导致部分水产品缺少营养补充而生长不良甚至死亡^[28-34]。由此,对智能投饵船路径规划提出了要求,投饵船路径控制常用的方式有 3 种:物理控制式、传感器控制式、导航定位控制式。

2.1 物理控制式

陈晓龙等^[35]利用机械导向结构,设计了一种带滑动叉的投饵船,如图 13 所示,滑动绳在牵引线上滑动,牵引绳与事先在池塘定好位置的导向支架相连接,以此引导投饵船的航行方向。该控制方式能够较理想地控制投饵船的航行路径,然而前期导向支架与牵引绳搭建困难,特别对于面积较大池塘,导向支架难以搭建在池塘中间区域,只适用于小池塘。

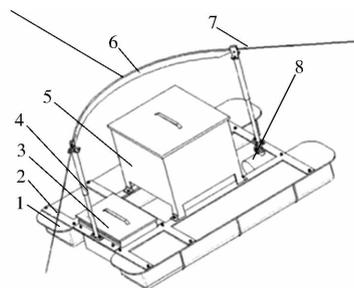


图 13 带滑动叉的投饵船

Fig. 13 Feeding boat with sliding fork

1. 浮船 2. 固定支架 3. 电池箱 4. 滑动叉 5. 投饵机 6. 导向支架 7. 牵引绳 8. 推进器

2.2 离岸测距控制式

对于鱼类养殖,鱼群可以自由游动,并通过竞争性抢食方式来提高品质,一种较为常用的投饵方式是与岸边保持一定距离,匀速航行并同时投饵,鱼群自主游到岸边摄食,实现投喂,如图 14 所示。

唐荣等^[36]和周达辉等^[24]均采用了传感器测距法,实现了离岸一定距离的航行轨迹。在船身一侧装置两个测距传感器,以测量离岸距离,若检测到离岸距离超过阈值,则通过 PLC 控制系统控制航行方

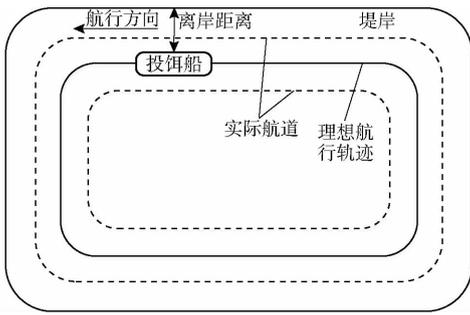


图 14 离岸一定距离的航行轨迹

Fig. 14 Sailing route at a certain distance from shore

向,使投饵船保持在离岸距离阈值范围内。其中,投饵船离岸距离计算示意图如图 15 所示,其中 D_1 、 D_2 为传感器 1 和传感器 2 与岸边垂直距离, m。离岸距离 D_0 表达式为

$$D_0 = \frac{L_3 + L_4}{2} \cos \left(\arctan \frac{L_3 - L_4}{S_0} \right) \quad (12)$$

式中 L_3 、 L_4 ——传感器 1 和传感器 2 测得离岸边的距离, m

S_0 ——传感器 1 与传感器 2 的距离, m

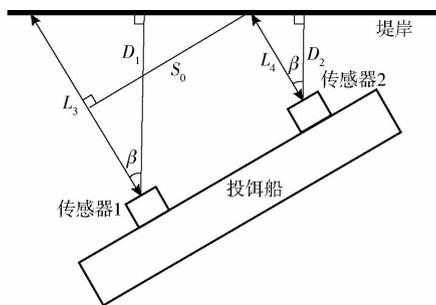


图 15 离岸距离计算示意图

Fig. 15 Schematic of offshore distance calculation

对于航行障碍物的躲避,曹阳^[37]采用多路传感器方式,利用视觉模块、超声波传感器实时识别路径上的障碍物,合理进行避障。

2.3 导航定位控制式

物理控制和离岸测距控制仅适用于鱼类养殖的小面积池塘。虾类养殖和鱼类养殖有两方面需要注意:一方面虾类不能在水里快速游动,若投饵位置较远则无法摄食。另一方面对于鱼类,若投饵位置较远则无法吸引其摄食。因此,对于虾类养殖池塘或者鱼类养殖的大面积池塘,投饵的最大需求就是要做到遍洒池塘,对此可采用配置路径规划算法的导航定位路径控制方式^[38-39],包括基于 GPS 的导航定位^[27,40-41]和基于北斗的导航定位^[26,42-43]。

2.3.1 导航定位方式

全覆盖的航行轨迹分为折返式和螺旋式两种形式^[26],如图 16 所示,一般只适用于形状较规整的矩形池塘。若池塘形状不规则,投饵船航行轨迹则需要进一步计算。孙月平等^[27]利用 GPS 定位得到池

塘 4 个顶点坐标,获得池塘平面坐标系,根据四边尺寸自动计算螺旋式的航行轨迹。

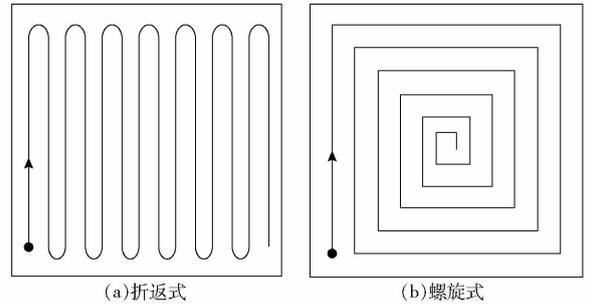


图 16 两种形式的航行轨迹

Fig. 16 Two forms of navigation track

以 GPS 定位为导航系统的智能投饵船^[44-46],其工作原理是利用 GPS 导航系统实现路径跟踪,ARM 主控制器通过 GPRS 接收路径信息,然后 ARM 主控制器通过通信装置再将该信息传输到通信基站,再由通信基站传输到监控服务器,最后由监控服务器传输到各监控终端,让用户实时收到投饵船的路径信息,进行远程监控或操控,如图 17 所示。

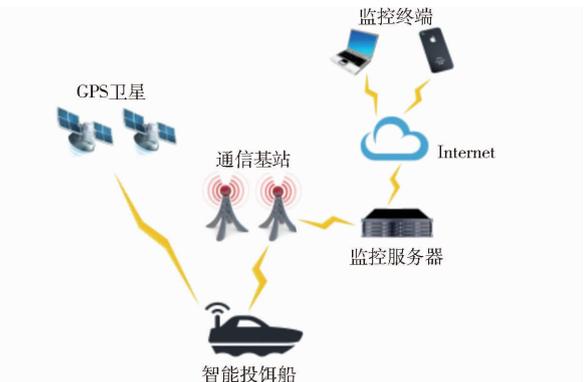


图 17 基于 GPS 定位系统的智能投饵船

Fig. 17 Intelligent feeding boat based on GPS positioning system

以北斗定位为导航系统的智能投饵船^[43],其工作原理是通过船上的监测终端接收北斗卫星信号,然后控制芯片根据信号解析出船体的路径信息,通过通信装置传输到监控工作站的数据库,最后各监控终端可以通过对数据库的读取监控船体路径信息,或者对数据库发生操作请求以进行远程操控,如图 18 所示。

2.3.2 航向控制算法

智能投饵船利用定位导航系统,通过对航向和航速的控制,实现多种航线规划,并沿此航线动态均匀地抛洒饵料^[47-48]。其中最大的难题就是如何保持航向不偏离可接受范围,同时船体横摇角度不宜过大,需限制在一定的边界内。因此,控制投饵船存在一定问题,具体分为以下两点:①时变扰动^[49]。

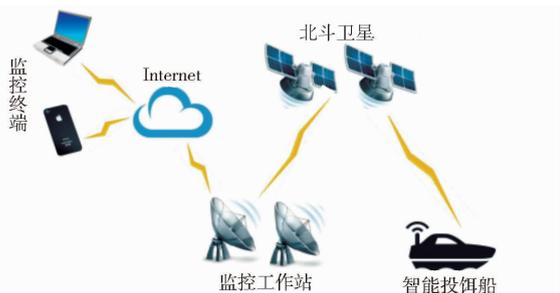


图 18 基于北斗定位系统的智能投饵船
Fig. 18 Intelligent bait boat based on Beidou positioning system

抛盘式投饵船在抛盘过程中会产生离心力,对船体形成反作用力。由于投饵幅度和宽度与鱼虾的种类、生长期和养殖密度密切相关,所以反作用力和系统扰动都是时变信号。同时,电机的剧烈振动也给船体带来外部干扰。可见时变扰动会严重影响船体控制系统的精度和稳定性。②系统输入饱和^[50]。为避免碰撞池堤、不重复投饵,投饵船的转弯半径需尽可能小,而船体动力驱动系统相应往往滞后于输入信号指示,导致系统输入饱和,使得投饵船控制系统不稳定、性能下降。

对此,国内外学者做了大量研究,仍然没有很好地解决智能投饵船在控制上的两大难题。ZHAO等^[51]设计了一种模糊 PD 控制方案,但该方案没有考虑时变扰动和输入饱和,影响控制性能;RUAN等^[52]采用模糊 PID 控制方式,实现了均匀投饵的直线航迹跟踪,但仍未考虑船载投饵机产生的时变干扰,故控制性能仍较差;GHAEMI等^[53]提出了模型预测控制(MPC)方案,该方案能主动处理控制系统的约束条件,实现系统滚动优化,在一定程度上解决了系统输入饱和问题。随后 LI等^[54]发现基于标称模型的 MPC 方案不能直接及时地抑制或补偿由强时变扰动带来的不确定性,因此提出了一种基于 Taylor 线性化的线性模型—RMPC 预测模型,该模型突破了以往智能投饵船航向控制系统未考虑时变扰动的漏洞,但仍存在以下不足^[55]:①Taylor 线性化给 RMPC 模型带来了更多的不确定性。②RMPC 模型采用一步预测方式,不存在终端约束条件,这给闭环控制系统的稳定性分析带来了困难。针对该问题,ZHANG等^[56]提出在 RMPC 模型中,采用混合 H_2/H_∞ 代价函数来提高控制的鲁棒性,并通过滚动优化考虑输入饱和问题,该方案有效解决了时变扰动、系统输入饱和和两大问题,可是控制计算复杂、负荷较大。戴小康等^[57]设计了一种基于障碍 Lyapunov 函数的自动航向保持控制方法,实现了对航向偏差和横摇角度的约束,并通过有限时间的分数幂项抑制风向和水流干扰的影响。

为使得智能投饵船能够在规划的航行轨迹上行驶,除了需要对船体航向精准控制,还需及时判断船体是否偏离规划轨迹。一旦偏离,需调整相关参数值,这对智能投饵船完成实际航线十分重要^[58-59]。王真亮^[26]给出了航行轨迹路线的数学模型,如图 19 所示。船体正确的航行轨迹是从点 A 到点 B,而定位系统监测船偏离到点 P_1 ,点 P_0 为前一次定位系统监测船体的位置。根据这 4 个点的位置信息,可以计算得到该时刻船体与正确航行路线的垂直距离 d_{ev} 、船体需要调整的航行角 γ_1 、正确航行方向与水平方向的夹角为 θ_{AB} 、实际航行方向与水平方向的夹角 $\theta_{P_0P_1}$ 。计算式为

$$\theta_{AB} = \arctan 2 \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad (13)$$

$$d_{ev} = \sqrt{(x_1 - x_A)^2 + (y_1 - y_A)^2} \sin(\theta_{AP_1} - \theta_{AB}) \quad (14)$$

$$\theta_{P_0P_1} = \arctan \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (15)$$

$$\gamma_1 = \frac{(x_B - x_1)(x_1 - x_0) + (y_B - y_1)(y_1 - y_0)}{\sqrt{(x_B - x_1)^2 + (y_B - y_1)^2} \sqrt{(y_1 - y_0)^2 + (x_1 - x_0)^2}} \quad (16)$$

其中 $\theta_{AP_1} = \arctan 2 \frac{y_1 - y_A}{x_1 - x_A}$

式中 x_A, y_A ——点 A 坐标值
 x_0, y_0 ——点 P_0 坐标值
 x_1, y_1 ——点 P_1 坐标值

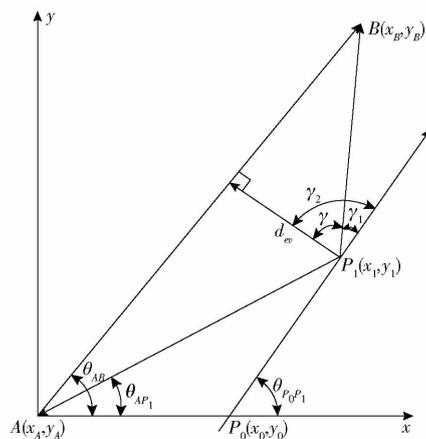


图 19 航行轨迹判断数学模型

Fig. 19 Mathematical model for judging navigation trajectory

由式(13)可知,当 d_{ev} 为正时,船体实际航迹在正确航迹的右边,当 d_{ev} 为负时,船体实际航迹在正确航迹的左边。设 γ 为投饵船最大允许的偏差角,则可以通过计算 $\theta_{P_0P_1}$ 是否在 $(\theta_{AB} - \gamma, \theta_{AB} + \gamma)$ 之间来判断投饵船是否在理想航迹上。

3 投饵策略

过量投饵会造成浪费且污染水质、引起疾病;饵料量不足,不能满足鱼虾生长所需的能量和营养,导致鱼虾不能维持体重而减产^[60-62]。影响投饵量的因素有水产品的种类和习性、水温、水中溶氧量、季节、天气、历史摄食情况等^[63],因此精准投饵策略,可有效降低投饵成本、缓解饵料过量、提高投饵效率,成为学术界和企业重点关注问题之一。目前,机器视觉和声学技术已逐渐被应用,许多学者开展了大量研究。

3.1 投饵路径策略

鱼类具有群息习性,喜欢成群活动。对此,王真亮^[26]提出了一种鱼群聚集点投饵路径规划方案,利用超声波影像分析法获得池塘中鱼类的游动区域或虾类的栖息区域,将这些区域画成圆面,取圆心为投饵路径规划点,利用蚁群算法计算投饵最短路径,实现池塘中的精准投饵,避免过度投饵造成浪费及污染。不同混养模式对投饵量的要求不同,以鱼鳖混养为例,进一步优化了鱼群聚集点投饵路径规划方案,同样通过超声波影像技术获得鱼和鳖的栖息水域,在投饵最短路径基础上加载鱼鳖栖息点,船上的投饵机构自动根据栖息点的水产种类相应的调整饵料下料量及抛饵速度。

考虑到鱼虾类活动范围并非一成不变,虾类在大风、低温等恶劣天气会成群活动,造成大面积聚集,不宜采用全遍历均匀投饵方式,对此程文平^[9]提出一种区域自适应投喂路径规划方案,可根据气候变化计算虾聚集区域,智能调配聚集区域和其他区域的投饵参数。

3.2 智能投饵技术

近年来,随着科学技术的不断进步,为追求投饵的精准化、智能化,形成了各种各样的智能投饵技术^[64-65]。在国外,挪威 AKVA 研发的 MarinaCC 中央投饵系统配置了基于声波传感系统的多普勒单元,此单元主要利用超声成像原理生成残饵影像,然后通过残饵量指导投饵,适合应用于数字化养殖^[66];日本一种新型投饵船可通过热敏电阻和光敏电阻来读取空气温度和光照强度参数,投饲次数由空气温度和光照强度来确定^[26];英国一种带有水下监控设备的投饵机,当有鱼群处于监测范围时,扫描设备输出鱼群影像信号,并将影像信号转换成电子信号,计算机根据输出的电子信号将投饵机开启,投饵机立刻投射相应质量的饵料,保证鱼群正常生长^[67]。

另外,在水产养殖领域,机器视觉和声学技术也

逐渐应用于投饵环节^[68-69]。早在 1995 年,MPR Teltech 公司^[70]利用水下摄像头获取鱼类活动区域,规划投饵位置。PAPADAKIS 等^[71]研制的远程机器视觉系统,可根据鱼类摄食前后的不同游动动作,自动识别鱼类是否处于饥饿状态,以此作为投饵机开关的信号。穆春华等^[72]认为水体环境复杂多变,基于机器视觉来判断鱼类位置、摄食行为不可靠性,提出通过机器视觉对残饵进行识别,根据残饵和粪便的特征差异对残饵精准计数,从而为投饵提供反馈,对投饵参数进行相应调控。钱阳^[73]设计了基于图像动态获取的智能投饵系统,采用二维旋转图像采集机构进行浮饵图像的识别,利用腐蚀和膨胀算法处理,建立 LS-SVM 模型实现浮饵投放的预测控制。纵观国内外基于机器视觉的投饵技术发展现状,在智能投饵机中加载图像识别系统及投饵控制算法已成为精准化投饵的未来发展趋势。但水下环境复杂、光线不足、水下摄像头自清洗效果不佳等问题,容易导致图像分析结果出现较大偏差,对机器视觉在水下监测应用的推广造成很大制约。

在声学技术方面,LAGARDERE 等^[74]利用鱼类摄食过程中的声音信号较强烈、容易识别的特点,通过监测鱼类摄食声音,获得不同体重鱼类在摄食过程中的声音信号变化,得到摄食声功率与摄食活力的正相关关系,以此作为投饵机开关信号。汤涛林等^[11]构建了声学检测平台,通过平均功率谱方法,采集罗非鱼摄食过程中产生的声音信号,分析罗非鱼摄食活力,对投饵机进行信号反馈。综上,基于声学技术的智能投饵技术主要是得到鱼类的摄食活力,判断饥饿程度,仅能为智能投饵机提供投饵速率信号,难以精准计算投饵量。

结合机器视觉技术及声音技术可实现投饵精准化以及投饵时机判断的特点,郭俊^[75]提出了一种基于图像与声音信息的智能投饵技术,通过机器视觉提取鱼群面积、鱼群密集度、鱼群数目判断投饵量,通过声音信号计算鱼群摄食声功率来判断投饵速率,利用多信息融合技术,形成多输入量的智能投饵技术。

4 发展趋势与展望

发展智能化投饵船已成为现代智慧水产养殖的重要环节,是推动精准化、绿色化、无人化养殖的一大助力,其未来发展趋势可总结为以下几方面:

(1)投饵部件向低破碎率、均匀化方向改进。通过选择具有轻微缓冲效果的材料作为投饵机构的选材,或者在叶片上加一层能够轻微吸收冲击力的涂层,可减少饵料破碎率。在结构方面,可以将叶片

折弯方案与闭式 360°抛盘相结合,形成抛洒均匀、破碎率低的结构。

(2)融合 5G 通信的导航定位系统,可进一步提升导航精度。民用 GPS 和北斗定位系统的定位精度在 0.5 ~ 1.0 m 之间,精度不够会直接影响整个区域的投饵均匀度。通过 RTK 等视觉识别可有效降低定位误差,但对高通量信息传输的即时性提出了更高要求。5G 作为新一代高速通信方式,能很好解决该问题,快速的信息传输可支持智能投饵船更快、更大信息量的及时反馈,辅助提高投饵船导航定位精度。

(3)航向控制算法向计算简易、多参数融合方向发展,进一步提高航向控制精度及可操作性。航向控制需考虑多种干扰因素,如水流速度、风向风速、抛饵反作用力等,保证投饵船行驶和悬停时路径不偏离,完成规划路径上的均匀投饵。因此亟待开发考虑输入饱和与时变扰动的航向控制简易算法。

(4)投饵策略向多信息融合方向发展。单一信息采集容易导致决策偏差,多信息融合可以有效降低信息偏差^[76-77],例如通过机器视觉实现投饵量化,通过声音系统实现投饵速率调控,两种信息融合互补,可提高投饵策略的准确性和可靠性。

(5)智能投饵船向多功能一体化方向发展。目前,增氧、环境生态监测、喷洒药物等功能往往由不同设备实现,鉴于无人船可搭载多个功能部件^[78],开发投饵、监测、洒药、增氧、改底、捕捞一体化的无人船,可有效降低养殖成本,提高装备综合利用,为实现智慧水产提供有力支撑。

(6)构建基于卫星物联网和数字孪生的智能投饵船远程监控系统。水产养殖数字化、智慧化是未来农业的发展方向^[79],基于卫星物联网、三维成像、虚实融合等技术,构建基于数字孪生的智能投饵船远程监控系统,实现对投饵路径、投饵策略的监测与调控,为数字化水产养殖奠定基础。

参 考 文 献

- [1] ZHOU C, LIN K, XU D, et al. Near infrared computer vision and neuro-fuzzy model-based feeding decision system for fish in aquaculture[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2018,146:114 - 124.
- [2] CHANG C M, FANG W, JAO R C, et al. Development of an intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel [J]. *Aquacultural Engineering*, 2005,32(2):340 - 353.
- [3] 赵圣涛, 常青, 刘慧, 等. 物联网在工厂化水产养殖中的应用分析[J]. *渔业现代化*, 2019,46(4):8 - 13.
ZHAO Shengtao, CHANG Qing, LIU Hui, et al. Analysis on application of Internet of Things in industrial aquaculture[J]. *Fishery Modernization*, 2019,46(4):8 - 13. (in Chinese)
- [4] 农业部渔业渔政管理局. 2020 年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [5] 秦鹏, 徐海俊. 水产养殖污染防治的现实困境与规范进路[J]. *农村经济*, 2019(12):88 - 95.
QIN Peng, XU Haijun. Practical dilemma and standard approach of aquaculture pollution prevention and control[J]. *Rural Economy*, 2019(12):88 - 95. (in Chinese)
- [6] 胡庆松, 许哲, 王世明, 等. 自主导航船案例在《控制理论基础》课程教学中的应用研究[J]. *教育教学论坛*, 2018, 393(51):53 - 54.
HU Qingsong, XU Zhe, WANG Shiming, et al. Application of autonomous navigation bait casting boat in the elementary theory of control[J]. *Education Teaching Forum*, 2018, 393(51):53 - 54. (in Chinese)
- [7] 张旋武, 谢磊, 初季民, 等. 无人船路径跟随控制方法综述[J]. *交通信息与安全*, 2020,38(1):20 - 26.
- [8] 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. Design and experiment of mobile feeding system for shrimp pond [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. (in Chinese)
- [9] 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 experiment of intelligent mobile feeding device for shrimp pond [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. (in Chinese)
- [10] 胡利永, 魏玉艳, 郑堤, 等. 基于机器视觉技术的智能投饵方法研究[J]. *热带海洋学报*, 2015,34(4):90 - 95.
HU Liyong, WEI Yuyan, ZHENG Di, et al. Research on intelligent bait casting method based on machine vision technology [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015,34(4):90 - 95. (in Chinese)
- [11] 汤涛林, 唐荣, 刘世晶, 等. 罗非鱼声控投饵方法[J]. *渔业科学进展*, 2014,35(3):40 - 43.
TANG Taolin, TANG Rong, LIU Shijing, et al. Acoustic control of feeding in Tilapia culture [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2014,35(3):40 - 43. (in Chinese)
- [12] 刘思, 罗艳媚, 俞国燕. 轨道式自动投饲系统设计与试验[J]. *渔业现代化*, 2018,45(1):27 - 32.
LIU Si, LUO Yanmei, YU Guoyan. Design and experiment of rail-type automatic feeding system [J]. *Fishery Modernization*, 2018,45(1):27 - 32. (in Chinese)
- [13] 孟祥宝, 黄家怿, 谢秋波, 等. 基于自动巡航无人驾驶船的水产养殖在线监控技术[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(3):276 - 281.
MENG Xiangbao, HUANG Jiayi, XIE Qiubo, et al. Online monitoring equipment for aquaculture based on unmanned automatic

- cruise boat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(3):276-281. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150340&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.040. (in Chinese)
- [14] 张效莉, 胡忠, 纠手才. 基于 Logistic 二元离散选择模型的养殖智能投饵装备产业化问题实证研究——以智能投饵船为例[J]. 海洋经济, 2018,8(5):11-21.
ZHANG Xiaoli, HU Zhong, JIU Shoucai. An empirical study on the industrialization of aquaculture intelligent feeding equipment based on Logistic two element discrete selection model: taking the intelligent feeding boat for example[J]. Marine Economy, 2018,8(5):11-21. (in Chinese)
- [15] SUN Y P, ZHAO Y Y, ZHAO D, et al. Design of automatic aquaculture workboat driven by air propellers[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,556:2553-2558.
- [16] 焦仁育. 投饵机下料机构现状分析[J]. 河南水产, 2011(1):23-24.
JIAO Renyu. Current situation analysis of feeding mechanism of feeder[J]. Henan Fisheries, 2011(1):23-24. (in Chinese)
- [17] 洪扬, 陈晓龙, 田昌凤, 等. 蟹、虾养殖池塘移动投饵装置的设计与试验[J]. 渔业现代化, 2018,45(3):9-14.
HONG Yang, CHEN Xiaolong, TIAN Changfeng, et al. Design and test of a kind of moving feeding device for crab and shrimp ponds[J]. Fishery Modernization, 2018,45(3):9-14. (in Chinese)
- [18] 蒋艾青, 郑陶生, 杨四秀. 池塘残饵分解对养殖水环境影响的研究[J]. 水利渔业, 2006,26(5):81-82.
JIANG Aiqing, ZHENG Taosheng, YANG Sixiu. Effects of uneaten food on water environment in ponds[J]. Reservoir Fishers, 2006,26(5):81-82. (in Chinese)
- [19] 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(1):1-11.
HU Qingsong, ZHENG Bo, CAO Jiarui, et al. Design and experiment of balance shaking system for shipboard bait feeder[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020,29(1):1-11. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 霍凤金, 王永兴. DSC001C 型自动投饵船[J]. 水产科学, 1983,2(1):44-46.
HUO Fengjin, WANG Yongxing. DSC001C automatic bait ship[J]. Fisheries Science, 1983,2(1):44-46. (in Chinese)
- [22] 何宝快. 对虾养殖投饵装置的研制[J]. 水产科学, 1990,9(2):21-24.
HE Baokuai. Development of feeding device for shrimp culture[J]. Fisheries Science, 1990,9(2):21-24. (in Chinese)
- [23] 于泽, 姜忠爱, 张靖铎, 等. 水产养殖自动投饵机发展现状[J]. 河北渔业, 2020(1):57-60.
YU Ze, JIANG Zhongai, ZHANG Jingduo, et al. Development status of automatic feeding machine for aquaculture[J]. Hebei Fisheries, 2020(1):57-60. (in Chinese)
- [24] 周达辉, 朱晓敏, 刘伟清. 基于 PLC 的自巡航虾塘投饵机研究[J]. 江苏农机化, 2016(4):23-27.
ZHOU Dahui, ZHU Xiaomin, LIU Weiqing. Research on feeding machine of self cruise shrimp pond based on PLC[J]. Agricultural Mechanization in Jiangsu, 2016(4):23-27. (in Chinese)
- [25] 汪万里, 陈军. 新型对虾养殖投饵装置研究[J]. 江苏农业科学, 2013,41(4):365-366, 376.
WANG Wanli, CHEN Jun. Study on a new feeding device for shrimp culture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013,41(4):365-366, 376. (in Chinese)
- [26] 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 engery feeding ship based autonomous cruise method[D]. Hefei: Anhui University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [27] 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与效果试验[J]. 农业工程学报, 2015,31(11):31-39.
SUN Yueping, ZHAO Dean, 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 CSAE, 2015,31(11):31-39. (in Chinese)
- [28] 徐皓, 刘兴国, 吴凡. 淡水养殖池塘规范化改造建设技术(一)[J]. 科学养鱼, 2011(1):14-15.
XU Hao, LIU Xingguo, WU Fan. Standardized reform and build technique of freshwater pond(one) [J]. Scientific Fish Farming, 2011(1):14-15. (in Chinese)
- [29] 徐皓, 刘兴国, 吴凡. 淡水养殖池塘规范化改造建设技术(二)[J]. 科学养鱼, 2011(2):12-14.
XU Hao, LIU Xingguo, WU Fan. Standardized reform and build technique of freshwater pond(two) [J]. Scientific Fish Farming, 2011(2):12-14. (in Chinese)
- [30] 徐皓, 刘兴国, 吴凡. 淡水养殖池塘规范化改造建设技术(三)[J]. 科学养鱼, 2011(3):12-14.
XU Hao, LIU Xingguo, WU Fan. Standardized reform and build technique of freshwater pond(three) [J]. Scientific Fish Farming, 2011(3):12-14. (in Chinese)
- [31] 徐皓, 刘兴国, 吴凡. 淡水养殖池塘规范化改造建设技术(四)[J]. 科学养鱼, 2011(4):12-13.
XU Hao, LIU Xingguo, WU Fan. Standardized reform and build technique of freshwater pond(four) [J]. Scientific Fish Farming, 2011(4):12-13. (in Chinese)
- [32] 徐皓, 刘兴国, 吴凡. 淡水养殖池塘规范化改造建设技术(五)[J]. 科学养鱼, 2011(5):12-13.

- XU Hao, LIU Xingguo, WU Fan. Standardized reform and build technique of freshwater pond(five) [J]. Scientific Fish Farming, 2011(5):12-13. (in Chinese)
- [33] 徐皓, 刘兴国, 吴凡. 淡水养殖池塘规范化改造建设技术(六)[J]. 科学养鱼, 2011(6):12-14.
XU Hao, LIU Xingguo, WU Fan. Standardized reform and build technique of freshwater pond(six) [J]. Scientific Fish Farming, 2011(6):12-14. (in Chinese)
- [34] REIS J, NOVRIADI R, SWANEPOEL A, et al. Optimizing feed automation: improving timer-feeders and on demand systems in semi-intensive pond culture of shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. Aquaculture, 2019,519(1):734-759.
- [35] 陈晓龙, 陈军, 唐荣, 等. 对虾船载投饵机的研制[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)
- [36] 唐荣, 邹海生, 汤涛林, 等. 自动投饵船及其测控系统的设计与开发[J]. 渔业现代化, 2013,40(6):30-35.
TANG Rong, ZOU Haisheng, TANG Taolin, et al. Design of an automatic feeding boat and its control system[J]. Fishery Modernization, 2013,40(6):30-35. (in Chinese)
- [37] 曹阳. 基于 Android 智能手机的全自动水产养殖作业船监控系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
CAO Yang. Research on automatic monitoring system of aquaculture vessel based on Android smart phone[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [38] 许仕杰, 冯辉, 向金林, 等. 基于云端环境数据监测和弹性栅格算法的无人艇智能投饵系统[J]. 科技风, 2018, 1(4):70.
XU Shijie, FENG Hui, XIANG Jinlin, et al. Intelligent feeding system of unmanned aerial vehicle based on cloud environment data monitoring and elastic grid algorithm[J]. Science and Technology, 2018,1(4):70. (in Chinese)
- [39] 阮承治, 赵德安, 刘晓洋, 等. 基于 IPSO-UKF 的水草清理作业船组合导航定位方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7):38-45.
RUAN Chengzhi, ZHAO Dean, LIU Xiaoyang, et al. Integrated navigation positioning method based on IPSO-UKF for aquatic plants cleaning workboat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(7):38-45. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170705&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.005. (in Chinese)
- [40] 侍厅厅. 全自动水产养殖船的远程实时智能监控系统设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
SHI Tingting. Design of remote real time intelligent monitoring system for automatic aquaculture ship[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [41] 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/OL]. 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 pond autonomous navigation feeding boat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(11):121-128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191113&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.013. (in Chinese)
- [42] 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.
HU Qingsong, CHENG Wenping, CHEN Leilei, et al. Design and test of autonomous navigation control system for shrimp casting boat based on BDS[J]. Measurement Control Technology, 2017,36(2):58-61. (in Chinese)
- [43] 张丽珍, 杨加庆, 邵祺, 等. 基于北斗定位系统的虾塘投饵管控系统的设计和实现[J]. 全球定位系统, 2017,42(2): 83-87.
ZHANG Lizhen, YANG Jiaqing, SHAO Qi, et al. Design of management and control system of feeding in shrimp farming based on BDS[J]. GNSS World of China, 2017,42(2):83-87. (in Chinese)
- [44] 管凯. 基于 GPS/INS 的河蟹养殖无人作业船系统研究与设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
GUAN Kai. Research and design of unmanned crab breeding vessel system based on GPS/INS[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [45] 孙雪雁. 河蟹养殖作业船 INS/GPS 组合导航算法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
SUN Xueyan. Research on INS/GPS integrated navigation algorithm for crab breeding vessel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [46] 陈永泽, 舒军勇, 王真亮, 等. 基于 GPS 定位的无人艇自主导航[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016,30(8): 117-121.
CHEN Yongze, SHU Junyong, WANG Zhenliang, et al. Unmanned surface vehicle automatic navigation based on GPS[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2016,30(8):117-121. (in Chinese)
- [47] 郑志营. 自动投饵机器船的轨迹优化方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
ZHENG Zhiying. Research on trajectory optimization method of automatic feeding robot ship[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015. (in Chinese)
- [48] 洪剑青, 赵德安, 孙月平, 等. 水产养殖无人导航明轮船运动仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(3):124-130.
HONG Jianqing, ZHAO Dean, SUN Yueping, et al. Motion simulation and test of aquaculture unmanned navigation paddlewheel vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3):124-130. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160303&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.024

- // www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160318&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.018. (in Chinese)
- [49] YANG Y, DU J, LIU H, et al. A trajectory tracking robust controller of surface vessels with disturbance uncertainties[J]. Control Systems Technology, 2014,22(4):1511-1518.
- [50] HUANG J, WEN C, WANG W, et al. Global stable tracking control of underactuated ships with input saturation[J]. Systems Control Letters,2015,85:1-7.
- [51] ZHAO Dean, LUO Ji, SUN Yueping, et. Design and experiment of navigation control system of automatic operation boat in river crab culture[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(11):181-188.
- [52] RUAN C, ZHAO D, SUN Y, et al. Design and testing of a control system associated with the automatic feeding boat for farming Chinese river crabs[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,150:14-25.
- [53] GHAEMI R, OH S, SUN J. Path following of a model ship using model predictive control with experimental verification[C]// American Control Conference, 2010.
- [54] LI Z, SUN J. Disturbance compensating model predictive control with application to ship heading control[J]. Transactions on Control Systems Technology, 2012,20(1):257-265.
- [55] ZHENG H, NEGENBORN R R, LODEWIJKS G. Predictive path following with arrival time awareness for waterborne AGVs[J]. Transportation Research, 2016,70:214-237.
- [56] ZHANG J, SUN T, ZHAO D, et al. Robust model predictive control of the automatic operation boats for aquaculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017,142:118-125.
- [57] 戴小康, 张军, 孙太任, 等. 基于障碍 Lyapunov 的自动作业船有限时间航向保持控制[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2019,22(3):50-54.
DAI Xiaokang, ZHANG Jun, SUN Tairen, et al. Finite time course keeping control for automatic operating boat based on barrier Lyapunov function[J]. Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition), 2019,22(3):50-54. (in Chinese)
- [58] 孟浩, 赵国良. 基于神经网络参考模型的船舶航向智能自适应控制系统[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003,24(4):395-399.
MENG Hao, ZHAO Guoliang. Intelligent adaptive ship course control system based on neural network reference model[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003,24(4):395-399. (in Chinese)
- [59] 高源. 基于云计算技术的船舶航向智能控制技术研究[J]. 舰船科学技术, 2019,41(18):37-39.
GAO Yuan. Research on intelligent control technology of ship course based on cloud computing technology[J]. Ship Science and Technology, 2019,41(18):37-39. (in Chinese)
- [60] 王宪君. 养殖对虾投饵量的研究(II)[J]. 海洋科学, 1992,16(5):33-36.
WANG Xianjun. Study on the feeding amount of prawn (II)[J]. Marine Sciences, 1992,16(5):33-36. (in Chinese)
- [61] 付鹏. 高产塘生态综合调水健康养殖技术模式[J]. 科学养鱼, 2019(3):18-19.
FU Peng. Technical model of ecological comprehensive water transfer and healthy aquaculture in high yield pond[J]. Scientific Fish Farming, 2019(3):18-19. (in Chinese)
- [62] 陈辅利, 高光智, 刘磊. 投饵量对许氏平鲈幼鱼生长和水环境中污染指标的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2012,27(2):177-181.
CHEN Fuli, GAO Guangzhi, LIU Lei. Effects of feeding rate on growth and pollution in aquaculture of Schlegel's rockfish *Sebastes schlegelii*[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2012,27(2):177-181. (in Chinese)
- [63] 吴春霞, 姜坤. 雨季鱼类科学养殖管理技术[J]. 农民致富之友, 2019(11):169.
WU Chuxia, JIANG Kun. Scientific fish culture and management technology in rainy season[J]. Friends of farmers, 2019(11):169. (in Chinese)
- [64] ZHOU C, XU D, LIN K, et al. Intelligent feeding control methods in aquaculture with an emphasis on fish: a review[J]. Reviews in Aquaculture, 2017,10(4):975-993.
- [65] COOKE S J, HINCH S G, WIKELSKI M, et al. Biotelemetry: a mechanistic approach to ecology[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2004,19:334-343.
- [66] 庄保陆, 郭根喜. 水产养殖自动投饵装备研究进展与应用[J]. 南方水产, 2008,4(4):67-72.
ZHUANG Baolu, GUO Genxi. The evolution and application of automatic feeding system in aquaculture[J]. South Aquatic Products, 2008,4(4):67-72. (in Chinese)
- [67] LIU W, ZHENG Z, CAI K Y. Bi-level programming based real-time path planning for unmanned aerial vehicles[J]. Knowledge Based Systems, 2013,44(1):34-47.
- [68] SARKER P K, BUREAU D P, HUA K, et al. Sustainability issues related to feeding salmonids: a Canadian perspective[J]. Reviews in Aquaculture, 2013,5:199-219.
- [69] PARSONAGE K D, PETRELL R J. Accuracy of a machine-vision pellet detection system[J]. Aquacultural Engineering, 2003,29:109-123.
- [70] FOSTER M, PETRELL R, ITO M R, et al. Detection and counting of uneaten food pellets in a sea cage using image analysis[J]. Aquacultural Engineering, 1995,14(3):260-269.

- [12] ZHYBAK M T, VAGIN M Y, BENI V, et al. Direct detection of ammonium ion by means of oxygen electrocatalysis at a copper-polyaniline composite on a screen-printed electrode[J]. *Microchim Acta*, 2016, 183(6): 1981–1987.
- [13] MARIA A R, CHRISTOPHER A P, JACEK J, et al. A new approach to dealing with high-to-low concentration ratios of sodium and ammonium ions in ion chromatography[J]. *Journal of Chromatography A*, 1998, 804(1–2): 201–209.
- [14] 王作芬. 纳氏试剂分光光度法对水中氨氮的测定研究[J]. *天津化工*, 2019, 33(5): 30–32.
- [15] 张贵刚, 黎文豪. 纳氏试剂分光光度法测定氨氮标准曲线的线性分析[J]. *化工管理*, 2019(22): 22–24.
- [16] 张根宝, 刘晓勇, 谢晓静. 基于水杨酸法的水质氨氮在线检测系统的设计[J]. *计算机工程应用技术*, 2015, 11(36): 123–125.
- ZHANG Genbao, LIU Xiaoyong, XIE Xiaojing. Design of water ammonia nitrogen online detection system based on salicylic acid[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2015, 11(36): 123–125. (in Chinese)
- [17] 何双. 浅谈氨氮在线分析仪比对验收监测的现状与建议[J]. *绿色科技*, 2013(5): 208–209.
- [18] 林秉承, 秦建华. 微流控芯片实验室[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 71–73.
- [19] WANG W, WANG Z J, LIN X L, et al. Simultaneous analysis of seven oligopeptides in microbial fuel cell by micro-fluidic chip with reflux injection mode[J]. *Talanta*, 2012, 100(15): 338–343.
- [20] XU Y, ZHANG J, ZHANG X F, et al. Separation of amino acids by in-situ polymerized anion exchange micro-monolithic column on micro-fluidic chip[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2006, 34(1): 43–46.
- [21] 方肇伦. 微流控分析芯片[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [22] 李战华, 吴健康. 微流控芯片中的流体流动[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

(上接第 396 页)

- [71] 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.
- [72] 穆春华, 范良忠, 刘鹰. 基于计算机视觉的循环水养殖系统残饵识别研究[J]. *渔业现代化*, 2015, 42(2): 33–37.
- MU Chunhua, FAN Liangzhong, LIU Ying. Research on the residual feeds recognition of recirculating aquaculture systems based on computer vision[J]. *Fishery Modernization*, 2015, 42(2): 33–37. (in Chinese)
- [73] 钱阳. 基于图像动态获取的水产养殖智能投饵机控制系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- QIAN Yang. Research on control system of aquaculture intelligent feeder based on dynamic image acquisition[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- [74] LAGARDERE J P, MALLEKH R. Feeding sounds of turbot (*Scophthalmus maximus*) and their potential use in the control of food supply in aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2000, 189: 251–258.
- [75] 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 Jun. Study on feeding pattern and feeding technology of cultured fish based on image and sound information[D]. Ningbo: Ningbo University, 2018. (in Chinese)
- [76] 黄飞, 毛罕平, 缪小花. 池塘养殖船自动导航系统的设计与研究[J]. *农机化研究*, 2015, 37(4): 117–120.
- HUANG Fei, MAO Hanping, MIU Xiaohua. Design and research of automatic navigation system for pond culture boat[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(4): 117–120. (in Chinese)
- [77] 缪新颖, 邓长辉, 高艳萍. 数据融合在水产养殖监控系统中的应用[J]. *大连水产学院学报*, 2009, 24(5): 436–438.
- MIU Xinying, DENG Changhui, GAO Yanping. Application of data fusion in an aquaculture supervisory system[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2009, 24(5): 436–438. (in Chinese)
- [78] 蒋建明, 朱正伟, 李正明, 等. 水产养殖中复合精确自动增氧技术研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 334–339.
- JIANG Jianming, ZHU Zhengwei, LI Zhengming, et al. Technology of green accurate oxygen enhancement in aquaculture[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12): 334–339. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171241&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.041. (in Chinese)
- [79] 段青玲, 刘怡然, 张璐, 等. 水产养殖大数据技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(6): 1–16.
- DUAN Qingling, LIU Yiran, ZHANG Lu, et al. State-of-the-art review for application of big data technology in aquaculture[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6): 1–16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180601&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.001. (in Chinese)