

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.013

# 明轮驱动虾塘自主导航投饵船设计与可靠性试验

胡庆松 曹佳瑞 郑波 陈雷雷 李俊

(上海海洋大学工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 基于明轮驱动的虾塘投饵船能够适应养殖池塘复杂的环境、满足全塘抛撒的要求,可靠性是其进行推广的关键。采用滚塑工艺设计了全封闭投饵船体,利用免油脂润滑不锈钢链轮和明轮作为驱动机构,以避免对水体的污染,螺旋输送饵料装置可满足船载投饵过程中重心位置稳定的要求,通过GPS+电子罗盘的方式实现了自主导航定位和姿态控制需求。根据虾塘投饵和控制性能要求,进行投饵船直线运动和转弯运动模型的构建,采用PID航向、航速运动控制算法进行巡航路径控制,池塘测试平均速度为0.72 m/s,直行和转弯最大偏航量分别为0.8 m和0.5 m。40 d的养殖塘现场试验结果表明,自主导航投饵船在复杂路径下运行平稳,可满足虾塘饵料投喂要求,同时对强风、大雨等恶劣环境进行了可靠性测试,发现并解决了相关问题。

**关键词:** 虾塘养殖; 投饵船; 明轮; 自主导航; 可靠性

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)11-0121-08

## Design and Reliability Test of Paddle Wheel Driven Shrimp Pond Autonomous Navigation Feeding Boat

HU Qingsong CAO Jiarui ZHENG Bo CHEN Leilei LI Jun

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

**Abstract:** In order to reduce the cost of shrimp pond breeding and achieve uniform delivery of bait, a self-guided feeding boat based on paddle wheel drive was designed. The paddle-driven shrimp pond feeding boat can adapt to the complex environment of the breeding pond and meet the requirements of the whole pond throwing. Reliability was the key to its application. Fully enclosed feeding hull was designed by rotomolding process. Oil-free lubricating stainless chain and paddle wheel were used as driving mechanism to avoid pollution to pond water. Spiral bait conveying device met the requirements of stable barycenter position in the process of boat-borne bait delivery. The requirements of autonomous navigation, positioning and attitude control were realized through GPS and electronic compass. According to the feeding and control performance requirements of shrimp ponds, the feeding boat straight and spot turning motion model was constructed, and the cruise path control was carried out by PID heading and speed motion control algorithm. The results of the aquaculture pond test showed that the average speed was 0.72 m/s, and the maximum yaw amount of the autonomous navigation feeding boat based on the paddle wheel drive was 0.8 m and 0.5 m when going straight and turning, respectively. The 40-day aquaculture pond field test results showed that the self-guided feeding boat ran smoothly under complicated path and met the feeding requirements of shrimp ponds. Fully reliability tests were carried out on harsh environments such as strong winds, heavy rains, and related problems were found and solved, enabling it to be promoted and applied.

**Key words:** shrimp pond breeding; feeding boat; paddle wheel; autonomous navigation; reliability

## 0 引言

我国虾类养殖总产量达216万t,其经济价值

高,在水产养殖中占有重要地位<sup>[1]</sup>。养鱼投饵已实现机械化,但虾塘养殖还是依赖人工撒料。随着劳动力成本提高,人工投喂饵料已成为限制虾类养殖

收稿日期: 2019-07-03 修回日期: 2019-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309150)和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: 胡庆松(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事渔业工程装备研究,E-mail: qshu@shou.edu.cn

产业发展的瓶颈问题。此外,人工饵料抛撒不均匀,虾摄食的领地性特征导致其生长规格差别较大,且局部饵料过剩易形成水体环境污染<sup>[2-3]</sup>。虾类养殖塘中存在的增氧机固定绳等障碍物浮于水面之上,严重影响船体行驶。螺旋桨驱动容易产生缠绕,故设计流线型船体并采用明轮驱动是可行的方案之一<sup>[4]</sup>。自主导航技术在农业领域获得了很多应用<sup>[5-14]</sup>,也陆续研发了一些自主投饵、割草等装置<sup>[15-19]</sup>,在导航、全塘投喂等方面获得了突破,但在可靠性等方面还存在一些问题,因此尚未得到大规模推广。

为解决这一问题,从满足虾类养殖需求出发,设计基于明轮驱动的虾塘自主导航投饵船。从全封闭式船体、明轮驱动结构、饵料传送机构、自动驾驶控制策略与算法等方面进行高可靠性设计,并将投饵船进行长周期测试,以期为投饵船的推广应用奠定基础。

## 1 结构与工作原理

### 1.1 总体结构

移动式虾类养殖投饵船主要由双体式船体、明轮推进器、螺旋输送装置、抛料装置等部分构成,其总体结构如图1所示。投饵船船体尺寸为 $1.8\text{ m} \times 1.1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,船体采用PE材料滚塑成型,为全封闭结构,最大负载量 $60\text{ kg}$ ,空载吃水深度为 $0.21\text{ m}$ ,满载吃水深度 $0.27\text{ m}$ 。单体船稳定性较差,双体船航行可控性更好,以双体船作为装置载体进行投饵平台设计。其中,料仓位于船体上部,用来存放饵料;螺旋输送装置位于料仓下部,用来输送饵料至抛料装置;电源和板卡控制盒分别置于料仓侧面和螺旋输送装置侧面;抛料盘位于船体尾部船舱开口部位,用来抛撒饵料;明轮安装在船体两侧,作为动力装置。船体配备一个容量为 $12\text{ V}/60\text{ A}\cdot\text{h}$ 动力锂电池供电,具有无污染、效率高等优点。

### 1.2 工作原理

为了灵活应对多种环境的投饵需求,移动式虾类养殖投饵船设有遥控和自主导航两种控制方式,其系统结构框图如图2所示。

主控制器采用ST公司基于Cortex-M4内核设计的低成本、高效率、功耗低的32位处理器STM32F407。自主导航模式中,主控制器获取定位信息(GPS模块)、姿态信息(电子罗盘)后使用开发的导航算法进行处理,根据处理的结果调用PWM(Pulse width modulation)驱动模块(驱动明轮和饵料输送装置)和GPIO(General purpose input output)输出模块(控制抛料盘),控制船体的航行和投饵。

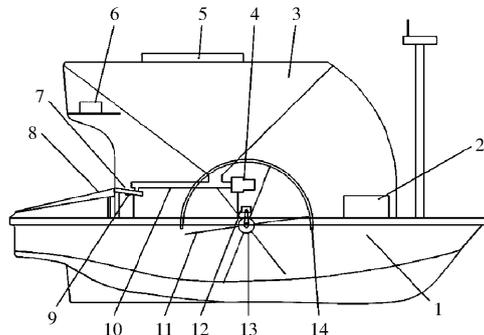


图1 移动式虾类养殖投饵船结构图

Fig.1 Overall structure diagram of mobile shrimp pond feeding device

1. 船体 2. 板卡控制盒 3. 料仓 4. 螺旋输送电机 5. 仓盖
6. 锂电池 7. 抛料盘 8. 下料板 9. 抛料电机 10. 螺旋输送装置
11. 明轮 12. 直流电机 13. 减速装置 14. 防缠绕保护罩

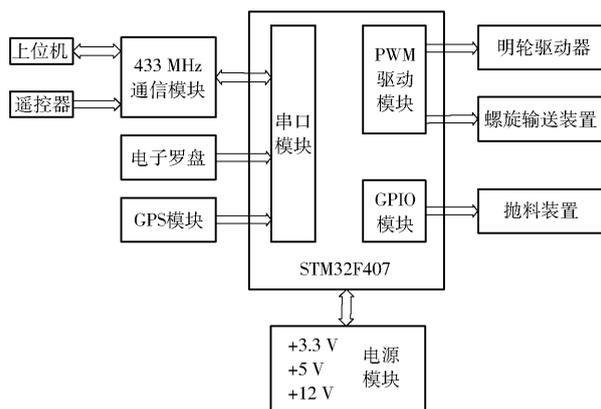


图2 系统结构框图

Fig.2 Block diagram of system structure

433 MHz通信模块与STM32F407通过串口进行通信,接收来自上位机的指令,并将船体位置、航向等信息上传至上位机。电源模块提供电压有 $3.3\text{ V}$ 、 $5\text{ V}$ 、 $12\text{ V}$ 。

GPS采用的是NEO-M8N模块,它是一款高性能、高灵敏度的GPS导航定位模块,RF架构和干扰抑制可以保证芯片在反GNSS环境下保持良好的性能。电子罗盘采用的是迈科传感科技的SCM345型号产品,它是一款高精度三维电子罗盘,采用三维补偿专利技术,当罗盘水平放置在船体上时,可在船体受风向、风力影响横滚或俯仰倾斜为 $\pm 40^\circ$ 的角度范围内提供准确的航向数据,航向精度为 $1^\circ$ ,具有体积小、功耗低、高可靠性等特点,可以满足要求。

### 1.3 主要结构特点

#### 1.3.1 明轮推进器

实际池塘养殖中,由于存在增氧机固定绳等障碍物,而空气螺旋桨成本和维护要求较高,故采用成本低、低速机动性好、航控性较好、可顺利跨过障碍物的明轮作为推进器<sup>[20]</sup>。明轮材料采用航空铝,硬度高,抗氧化性好,结构为定蹼式6叶桨,并在旋转

与非旋转部件间隙处设有不锈钢防缠绕罩,如图 3 所示。根据船体航行速度不小于 0.6 m/s 要求,船体采用 12 V/60 W 的 GPG-07SC 型有刷直流电动机,通过不需油脂润滑的不锈钢链传动驱动明轮转动,实现两侧明轮的转速差控制船体前进、后退以及转向。



图 3 明轮驱动投饵船

Fig. 3 Paddle-driven feeding boat

### 1.3.2 螺旋输送与抛料装置

与固定式养鱼用投饵机不同,若直接将投饵机料仓放置于船尾,随着饵料的投放,投饵船重心会有很大的变化,导致船体驱动性能变化较大。为解决这一问题,将料仓置于船体重心位置,通过螺旋输送方式将饵料输送至尾部的抛料盘,抛料盘通过电动机的带动,将饵料抛向池塘。为了保证 1~3 kg/min 下料量、低破碎率、抛料均匀性和宽度,采用直径为 70 mm、螺距为 40 mm、长度为 500 mm 的螺旋轴,如图 4 所示。采用折弯角度为 12° 的 5 叶桨抛料盘,其横向断面均匀性较好。螺旋输送电动机采用 12 V/60 W、额定转速为 1 800 r/min 的 GPG-07SC 型有刷直流电动机;抛料电动机采用 12 V/50 W、额定转速为 2 500 r/min 的扁平电动机。



图 4 螺旋输送装置

Fig. 4 Screw conveyor

## 2 导航控制系统设计

### 2.1 运动模型构建

采用直线和原地转弯相结合的运动方式,即直线运动到转弯点时先减速到零,进行原地转弯后再加速到巡航速度。该运动方式可以形成折线而非带

圆弧的巡航轨迹,在满足投饵需求的前提下实现航速和航向更好的解耦,降低控制难度,提升抗干扰能力。直线和原地转弯是投饵船工作中的两个基本运动形式,对其进行建模是对投饵船进行控制的基础。

#### 2.1.1 直线运动模型

单个明轮推力计算公式为<sup>[21]</sup>

$$F_e = C_F S_F \rho n^2 D^2 \quad (1)$$

其中  $S_F = 2bh$  (2)

式中  $F_e$ ——单个明轮推力, N

$C_F$ ——推进力系数

$S_F$ ——明轮水力作用面积,  $m^2$

$b$ ——明轮宽度, m

$h$ ——明轮底部边缘到吃水线的距离, m

$\rho$ ——水密度,  $kg/m^3$

$n$ ——明轮工作转速, r/s

$D$ ——明轮直径, m

推进力系数取 3,明轮宽度为 0.075 m,明轮底部边缘到吃水线的距离满载时为 0.25 m,则明轮水力作用面积为 0.037 5  $m^2$ ,水的密度为 1 000  $kg/m^3$ ,明轮的工作转速 1 r/s,明轮直径 0.48 m,将以上数据代入公式(1),并通过计算,可得船体平衡状态下的总推力为 51.84 N。

船体直线航行时阻力计算公式为<sup>[22]</sup>

$$F_z = C_z \rho v^2 S/2 \quad (3)$$

式中  $F_z$ ——船体直线航行时阻力, N

$C_z$ ——阻率

$v$ ——船体运行速度, m/s

$S$ ——船体吃水面积,  $m^2$

船体满载运行平衡状态时船体运行速度为 0.72 m/s,船体吃水面积 3.1  $m^2$ ,根据船体受力平衡状态方程得到阻率为 0.06。

根据牛顿第二定律,加速和减速过程中船体动态过程可以描述为

$$2F_e - F_z = m^* \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

式中  $m^*$ ——船载总质量, kg

由于明轮转速变化量小,变化时间短,因此可把明轮推力看作满载平衡时推力,即 51.84 N。则式(4)表示为

$$\frac{2F_e - F_z}{m^*} = \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

$$0.39 - 0.71v^2 = \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

所以在加速阶段的速度为

$$v = 0.75 \tanh(0.53t + 0.53C_0) \quad (7)$$

式中  $C_0$ ——常数  $t$ ——时间, s

当时间为零,船体运行速度也为零时,代入式(7)可得  $C_0$  为零,式(7)表示为

$$v = 0.75 \tanh(0.53t) \quad (8)$$

当加速到 0.72 m/s 时,加速时间为 3.67 s,实际测试时间为 3.5 s。

同理,在减速阶段,明轮反转,所以式(4)变为

$$\frac{-2F_e - F_z}{m^*} = \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

$$-0.39 - 0.71v^2 = \frac{dv}{dt} \quad (10)$$

所以减速阶段的速度为

$$v = 0.74 \tan(-0.53t + C_1) \quad (11)$$

式中  $C_1$ ——常数

当时间为 0,船体运行速度为 0.72 m/s 时,代入式(11)可得  $C_1$  为 0.77,式(11)表示为

$$v = 0.74 \tan(-0.53t + 0.77) \quad (12)$$

当减速到速度为 0 时,减速时间为 1.45 s,实际测试时间为 1.5 s。

这里将驱动力作为常量进行计算,根据上述构建的模型进行了多组试验,船体运行速度、加减速时间与模型计算结果误差较小,说明所建模型具有较高的准确性。

### 2.1.2 原地转弯运动模型

明轮驱动船体原地转弯时,转矩计算公式为

$$T = 2F_e L/2 \quad (13)$$

式中  $L$ ——船体宽度, m

$T$ ——转矩, N·m

原地转弯时,船体受到的阻力矩计算公式为

$$T_z = \lambda \omega_z \quad (14)$$

式中  $\omega_z$ ——船体转动瞬时角速度, rad/s

$\lambda$ ——阻尼系数

$T_z$ ——阻力矩, N·m

当船体原地转弯处于平衡状态时,船体宽为 1.1 m,根据公式(13)得转矩为 28.51 N·m,船体转动瞬时角速度为 0.628 rad/s,根据力矩平衡方程,得到阻力系数为 45.4。

由力矩平衡方程知

$$J \frac{d\omega_z}{dt} = T - T_z \quad (15)$$

式中  $J$ ——船体转动惯量, kg·m<sup>2</sup>

由于原地转弯时明轮转速变化量小,变化时间短,可把动力矩看作满载平衡时力矩,即 28.51 N·m。根据表 1 数据,由 SolidWorks 建模分析得原地转弯时转动惯量为 26.9 kg·m<sup>2</sup>,则式(15)表示为

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{T - T_z}{J} \quad (16)$$

表 1 投饵船各部分质量

Tab.1 Quality of various parts of feeding boat kg

部件	数值
船体	44.88
螺旋输送装置	6.38
抛料盘	1.28
明轮	1.32
链轮	1.67
有刷电动机	7.8
扁平电动机	0.93
锂电池	2.9
板卡控制盒	0.99
天线杆	0.71
下料板	2.31
电子罗盘	0.15
GPS	0.03

$$\frac{d\omega_z}{dt} = 1.06 - 1.69\omega_z \quad (17)$$

所以在非匀速阶段的角速度为

$$\omega_z = C_2 e^{-1.69t} + 0.63 \quad (18)$$

式中  $C_2$ ——常数

当时间为 0,角速度也为 0 时,代入式(18)可得  $C_2$  为 -0.63,式(18)表示为

$$\omega_z = -0.63 e^{-1.69t} + 0.63 \quad (19)$$

当角速度加速到 0.628 rad/s 时,加速时间为 3.41 s,实际测试时间为 3.5 s。这里将动力矩作为常量是一种近似计算,根据上述构建的模型进行了多组试验,船体原地转弯角速度、转弯时间等与计算结果误差较小,说明所建模型具有较高的准确性。

### 2.2 自动导航路径规划与实现

本系统使用基于 RTK (Real time kinematic) 模式的高精度 GPS 系统采集池塘四角坐标,进一步根据投喂路径计算和设定航道关键点(出发点、插入点、转弯点)处的位置坐标,插入点根据直线运动的长度进行确定。将关键点坐标下载至投饵船控制系统,控制系统根据出发点和插入点及转弯点之间的位置信息进行相应的直行和转弯动作。

如图 5 所示,1、2、3、4、5、6 为 6 个关键点,点 0

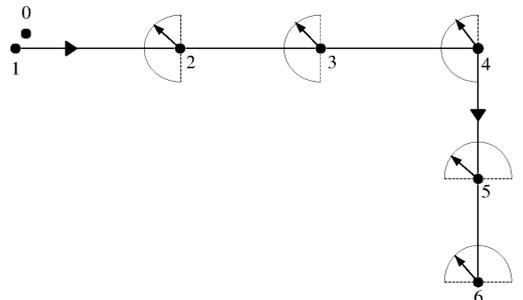


图 5 直行和转弯示意图

Fig.5 Straight and turn diagram

为船体当前位置,点 1 为起点,航道方向为 1→2→3→4→5→6。点 0 首先按 1→2 行走,主控制器不断计算船体和前方点 2 的距离向点 2 运行,当点 0 与点 2 之间距离大于 2 m 时,船体按航道正常航行,当点 0 与点 2 之间距离小于 2 m 时,主控制器认为船体已接近位置点 2,将下一个关键点 3 作为新的巡航目标点,根据点 2 与点 3 的位置信息,进行巡航。当点 0 与点 3 之间距离大于 2 m,船体按航道正常航行,当点 0 与点 3 之间距离小于 2 m 时,主控制器认为船体已接近位置点 3,将下一个关键点 4 作为新的巡航目标点,根据点 3 与点 4 的位置信息,进行巡航。当点 0 与点 4 之间距离大于 2 m,船体按航道正常航行,当点 0 与点 4 之间距离小于 2 m 时,主控制器认为船体已接近位置点 4,将下一个关键点 5 作为新的巡航目标点,根据点 4 与点 5 的位置信息,主控制器判断此处需先停止,正常投料,再进行原地转弯,然后向点 5 直线巡航。当点 0 与点 5 之间距离大于 2 m,船体按航道正常航行,当点 0 与点 5 之间距离小于 2 m 时,主控制器认为船体已接近位置点 5,根据点 5 与点 6 的位置信息进行直线巡航,最后当点 0 与点 6 之间距离小于 2 m 时,船体减速运行到目标点 6。

### 2.3 航向、航速控制算法

投饵船工作于池塘,其面积较小,环境较为单一,受到的干扰主要是快速变化的风力和水流阻力。船体本身运动速度低,特别是本文中投饵船主要是直行和原地转弯两个相对独立的动作,目标是进行折线而非曲线运动,该控制目标下的航速、航向控制具有较好的解耦效果,所以把船体的航行控制分为航向控制和航速控制两部分,控制系统框图如图 6 所示<sup>[23-25]</sup>。①主控制器通过定位模块获取投饵船实际航速  $v_2$  和实时的经纬度坐标,并结合预设目标点经纬度坐标计算目标航向  $\varphi_1$ 。②利用电子罗盘解析出当前航向  $\varphi_2$ 。③把目标航向与当前航向的差值  $\Delta\varphi$  作为 PD 控制器的输入量,输出量为  $\varphi^*$ ,把目标航速与实际航速的差值  $\Delta v$  作为 PI 控制器的输入量,输出量为  $v^*$ 。最后,主控制器根据  $\varphi^*$  和  $v^*$  解耦结果进行投饵船的自动导航控制。航速控制采用 PI 控制,通过积分环节消除航速的稳态误差。航向控制采用 PD 控制,通过微分环节减小航向角超调量、保持船体稳定。

控制系统把速度调整量  $v^*(k)$  作为基准,将左右明轮速度分别加上和减去  $\varphi^*(k)/2$  来进行解耦,得到左右明轮的速度分别为  $V_1(k)$  和  $V_2(k)$ 。控制器根据  $V_1(k)$  及  $V_2(k)$  的值设定 PWM 模块的占空比,控制船体左右明轮转速。

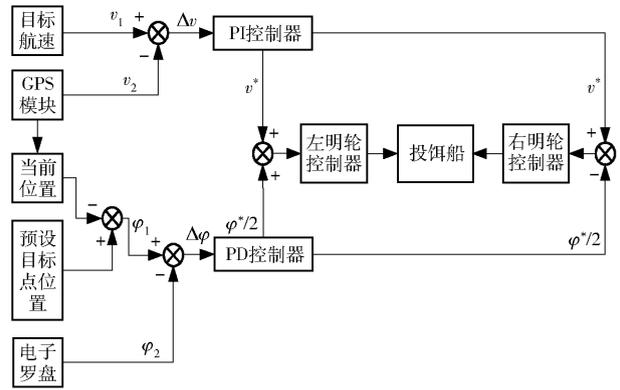


图 6 组合导航控制框图

Fig. 6 Combined navigation control block diagram

## 3 试验与可靠性分析

### 3.1 现场试验

将投饵装置制造和安装后进行系统调试及样机的性能试验,主要对投饵装置进行自主导航系统测试和投饵能力测试。2019 年 4 月 28 日在上海市崇明区崇东水产养殖合作社池塘进行投饵试验,天气为多云,风力 1~2 级,温度 15~19℃。分别在两种不同水域情况的养殖塘进行现场路径规划测试,1 号养殖塘,不规则四边形水域,最长边约 180 m,最短边约 150 m,水深约为 1 m,面积约为 29 000 m<sup>2</sup>,池塘中间有一排布线桩,四周有增氧机,靠近岸边的地方有电线杆,路径规划时,需规避;2 号养殖塘,不规则四边形水域,最长边约 280 m,最短边约 130 m,水深约 1 m,面积约 40 000 m<sup>2</sup>,池塘 4 个角落均有增氧机,路径规划时,需规避。

首先,在 1 号养殖塘进行现场投饵试验,采用凹形路径规划,进行自主导航试验。选取 15 个合适目标点,经纬度坐标如表 2 所示,1 号点设在码头边,方便装料及维护,试验如图 7 所示。

表 2 1 号塘位置坐标

Tab. 2 Position coordinates of No. 1 pond

航道转弯点序号	经度/(°)	纬度/(°)
1	121. 775 104 9	31. 479 354 3
2	121. 774 861 0	31. 478 808 9
3	121. 774 552 2	31. 478 963 5
4	121. 774 779 8	31. 479 480 4
5	121. 775 194 9	31. 480 358 3
6	121. 774 961 0	31. 480 350 8
7	121. 774 861 0	31. 480 305 1
8	121. 774 584 7	31. 479 732 7
9	121. 774 357 1	31. 479 146 6
10	121. 773 950 6	31. 479 211 6
11	121. 774 162 0	31. 479 700 0
12	121. 774 568 5	31. 480 453 0
13	121. 774 975 0	31. 480 526 4
14	121. 775 202 6	31. 480 534 6
15	121. 775 609 0	31. 480 481 8



图7 1号养殖塘试验

Fig.7 Breeding test in No.1 pond



图9 2号养殖塘试验

Fig.9 Breeding test in No.2 pond

航道方向为从1到15顺序航行,最后回到起点。根据上位机接收的船体位置信息绘制投饵船航行轨迹如图8所示,自主导航试验测试数据分析如表3所示。由图表可知,自主导航系统航行效果较好,能按预设轨迹投饵,导航偏航量不超过0.8 m。由于所采用导航模块本身定位误差在0.8 m左右,两者叠加总误差不超过1.6 m,满足虾塘投饵定位精度需求。

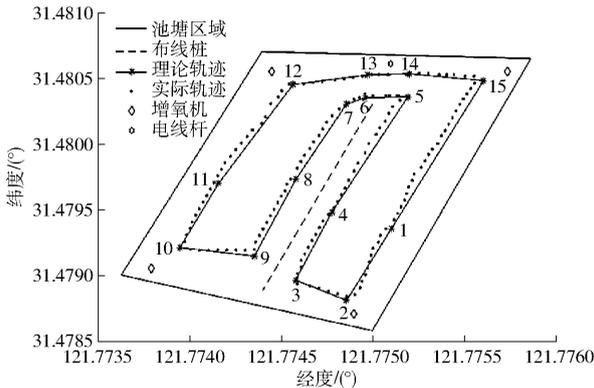


图8 1号塘自主导航测试经纬度轨迹

Fig.8 Autonomous navigation test latitude and longitude trajectory of No.1 pond

表3 1号塘自主导航试验数据

Tab.3 Autonomous navigation test data in No.1 pond

参数	平均速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	直行最大 误差/m	直行平均 误差/m	转弯最大 误差/m	转弯平均 误差/m
数值	0.72	0.8	0.5	0.5	0.4

然后,在2号养殖塘进行系统投饵测试,试验如图9所示,采用往返式路径规划,如图10,分为5个航道进行满载投饵试验。选取16个航道目标点,1号点设在码头边,经纬度坐标如表4所示。

投饵船从1到16顺序航行,最后回到起点。进行3次投饵试验,船体运行稳定,抛料盘抛撒宽度10 m左右,抛料均匀,能够按照预设路径巡航投饵,现场试验数据如表5所示。由数据可知,单台投饵装置投饵时长在32 min左右,平均投饵1.3 kg/min,能够覆盖整个养殖池塘。投饵船投饵速率有机械和

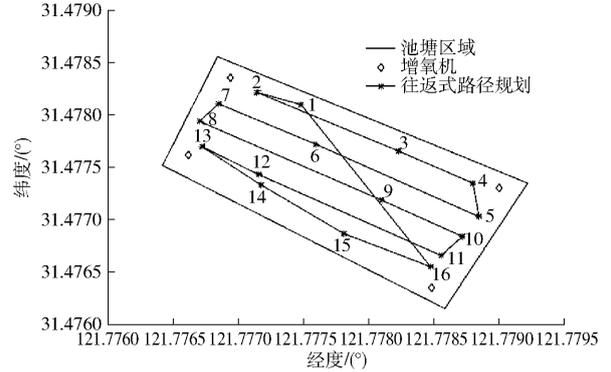


图10 2号塘往返式路径规划

Fig.10 Round-trip path planning of No.2 pond

表4 2号塘位置坐标

Tab.4 Position coordinates of No.2 pond

航道转弯点序号	经度/(°)	纬度/(°)
1	121.777 478 3	31.478 101 3
2	121.777 136 9	31.478 219 3
3	121.778 226 0	31.477 657 8
4	121.778 794 9	31.477 352 6
5	121.778 843 6	31.477 031 1
6	121.777 592 0	31.477 722 8
7	121.776 844 3	31.478 109 3
8	121.776 698 0	31.477 942 5
9	121.778 095 9	31.477 189 8
10	121.778 713 6	31.476 843 9
11	121.778 551 0	31.476 660 8
12	121.777 153 1	31.477 433 8
13	121.776 714 2	31.477 702 3
14	121.777 169 4	31.477 336 1
15	121.777 803 3	31.476 872 3
16	121.778 469 7	31.476 554 9

电气两种调整方式,可以满足随着养殖对象生长带来的不同投饵速率的使用要求。

表5 2号塘自主导航投饵试验数据

Tab.5 Autonomous navigation feeding test data in No.2 pond

次序	投饵时长/min	投料质量/kg	投饵速率/(kg·min <sup>-1</sup> )
1	30	40	1.33
2	32	41	1.28
3	33	43	1.30

### 3.2 可靠性测试

为检验投饵船的可靠性,特别把使用人员因素一并纳入考虑,在由技术人员完成现场测试后进行可靠性测试。本次试验由一线养殖人员独立实施,即在调试完成并对一线养殖人员进行培训后完全由其自行操作,2019年5月19日正式开始。在40 d测试中,投饵船总体使用正常,无机械损坏。60 A·h 电池剩余40%电量的情况下可以连续工作2.8 h,实际应用中2 d 充电一次,每次工作30 min 左右,40 d 中未发现续航力问题。在测试期间经历了大风、大雨、操作失误等,具体如下:

#### (1) 大风环境下的可靠性

5月25日,东南风5~6级,导航系统正常工作,导航精度有所偏大但不影响投喂。解决办法:在5~6级大风下可以正常工作,但在更大风力情况下应该不能正常使用,待后期进行测试。

#### (2) 潮湿饵料导致积料

6月12日,养殖人员将微生物制剂溶液倒入饵料中,导致饵料粘结,螺旋输送部位积料。解决办法:目前投饵机采用了50 cm 的螺旋输送到抛料盘,以解决投喂过程中船体重心变化过大问题,暂时不能用于投放湿料,后期根据现场需求进行新的整体抖动式投饵装置开发。

#### (3) 操作失误下的可靠性

6月16日,抛料盘在未启动的情况下,操作人

员开启螺旋输送电机进行工作,导致饵料在抛料口堆积。解决办法:将控制算法进行修改,把抛料盘电机工作作为螺旋输送电机工作的先决条件,避免了在抛料口积料。

#### (4) 大雨环境下的可靠性

6月17日,大雨,料仓内少量进水,因为扇形抛料口朝上10°设计,抛料口为点焊而成,焊缝处有一定渗水;解决办法为:在投饵船停泊时头部略微上翘,避免进水,后期加工中进行全焊,避免渗水。

## 4 结论

(1) 设计了基于明轮驱动的移动式虾塘自主投饵船,能够适应现场工作环境,易于维护,加长螺旋输送机构投饵机能够将处于船体重心位置的料仓饵料送至抛料盘,前期试验和现场测试中未发现机械损坏现象,具有较高的成熟度。

(2) 对投饵船进行了直线和原地转弯运动建模,自主导航系统控制策略较为合理,自主导航时,平均速度0.72 m/s,最大直线偏航量为0.8 m,最大转弯偏航量为0.5 m,性能比较稳定,能够通过折线运动方式解决池塘中存在增氧机、电线杆等障碍物的巡航轨迹设计问题,特别是在大风环境下的正常使用显示了控制系统较强的环境适应性。

(3) 40 d 测试结果表明,所研发的投饵船具有较高的可靠性,满足现场应用要求。

## 参 考 文 献

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 2018 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2018.
- [2] 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)
- [3] 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 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)
- [4] 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. Simulation and experiment of unmanned navigation paddle steamer in aquaculture[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?flag=1&file\_no=20160318&journal\_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.018. (in Chinese)
- [5] 熊斌,张俊雄,曲峰,等. 基于BDS的果园施药机自动导航控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):45-50. XIONG Bin, ZHANG Junxiong, QU Feng, et al. Automatic navigation control system of orchard application machine based on BDS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):45-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx?flag=1&file\_no=20170206&journal\_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.006. (in Chinese)
- [6] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等. 基于DGPS与双闭环控制的拖拉机自动导航系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):11-19. LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Tractor automatic navigation system based on DGPS and double closed loop control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):11-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx?flag=1&file\_no=20170202&journal\_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.002. (in Chinese)
- [7] 郭娜,胡静涛,王鹤. 基于GPS导航的插秧机作业控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(1):200-204. GUO Na, HU Jingtao, WANG He. The operation control system of rice transplanter based on GPS navigation[J/OL].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 200 - 204. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130138&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130138&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.038. (in Chinese)
- [8] 刘柯楠, 吴普特, 朱德兰, 等. 太阳能渠道式喷灌机自主导航研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 141 - 146. LIU Kenan, WU Pute, ZHU Delan, et al. Study on autonomous navigation of solar channel sprinkler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 141 - 146. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160921&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160921&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.021. (in Chinese)
- [9] 丁幼春, 王书茂. 联合收获机视觉导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 137 - 142. DING Youchun, WANG Shumao. Design and experiment of visual navigation control system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 137 - 142. (in Chinese)
- [10] 周俊, 陈钦, 梁泉. 基于强化学习的农业移动机器人视觉导航[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 53 - 58. ZHOU Jun, CHEN Qin, LIANG Quan. Visual navigation of agricultural mobile robot based on reinforcement learning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 53 - 58. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140210&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140210&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.010. (in Chinese)
- [11] SI Haiping, LI Yanling, SUN Changxia, et al. A hierarchical game approach on real-time navigation scheduling of agricultural harvesters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 112 - 118.
- [12] LI Shichao, XU Hongzhen, JI Yuhan, et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 335 - 344.
- [13] FLAVIO B P, MALVAZI, FRANCK M, et al. LiDAR-only based navigation algorithm for an autonomous agricultural robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 71 - 79.
- [14] PERERA L P, FERRARI V, SANTOS F P, et al. Experimental evaluations on ship autonomous navigation and collision avoidance by intelligent guidance[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 40(2): 374 - 387.
- [15] 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 and implementation of shrimp pond feeding control system based on Beidou positioning system[J]. Global Positioning System, 2017, 42(2): 83 - 87. (in Chinese)
- [16] 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): 63 - 66, 71. HU Qingsong, CHENG Wenping, CHEN Leilei, et al. Design and experiment of navigation control system for shrimp pond feeding boat based on BDS[J]. Measurement and Control Technology, 2017, 36(2): 63 - 66, 71. (in Chinese)
- [17] 周长宾. 水产养殖机器人: 201310155373.1 [P]. 2013 - 05 - 02.
- [18] 刘会贵, 赵德安, 孙月平, 等. 水草全自动清理船控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 281 - 286. LIU Huigui, ZHAO Dean, SUN Yueping, et al. The control system of automatic grass cleaning ship[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 281 - 286. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2014s146&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s146&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.046. (in Chinese)
- [19] 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 Dean, LUO Ji, SUN Yueping, et al. Design and test of navigation control system for river crab automatic operation ship[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 181 - 188. (in Chinese)
- [20] 李旭英, 尚士友, 杜健民, 等. 9GSCC-1.4H 型沉水植物收割机船队的设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 59 - 62. LI Xuying, SHANG Shiyu, DU Jianmin, et al. Design of 9GSCC-1.4H submersible plant harvester fleet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 59 - 62. (in Chinese)
- [21] 杨月琳, 尚士友. 水草收割机明轮推进器的建模与仿真分析[J]. 农机化研究, 2009, 31(9): 14 - 17. YANG Yuelin, SHANG Shiyu. Modeling and simulation analysis of water wheel harvester paddle wheel propeller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(9): 14 - 17. (in Chinese)
- [22] ERNEST M, ZHENG Chen, STEPHAN S, et al. Modeling of biomimetic robotic fish propelled by an ionic polymer-metal composite actuator[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, 2008.
- [23] 洪剑青, 赵德安, 孙月平, 等. 水产养殖自动导航无人明轮船航向的多模自适应控制[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 95 - 101. HONG Jianqing, ZHAO Dean, SUN Yueping, et al. Multi-mode adaptive control of aquaculture auto-navigation unmanned steamer heading[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 95 - 101. (in Chinese)
- [24] 曹诗杰, 曾凡明, 陈于涛. 无人水面艇航向航速协同控制方法[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(6): 74 - 80. CAO Shijie, ZENG Fanming, CHEN Yutao. Collaborative speed control method for unmanned surface craft[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(6): 74 - 80. (in Chinese)
- [25] 蒋娇, 李丽娜, 陈国权, 等. 基于 SIHC 仿真平台的船舶航向控制算法性能测试[J]. 上海海事大学学报, 2013, 34(4): 13 - 17, 81. JIANG Jiao, LI Lina, CHEN Guoquan, et al. Performance test of ship heading control algorithm based on SIHC simulation platform[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2013, 34(4): 13 - 17, 81. (in Chinese)