

# 虾蟹池塘自动投饲平台航向控制系统设计与试验

唐 荣\* 刘世晶

中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海

邮箱: tangrong@fmiri.ac.cn

**摘 要:** 本文针对虾蟹池塘自动投饲平台作业过程中保持航向稳定的需要设计了航向控制系统, 通过直接测量法和间接测量法同时监测投饲平台与池塘堤岸之间的相对航向, 采用基于负反馈原理的 PID 控制算法, 以相对航向为控制目标, 根据航向偏差实时计算控制输出量。控制输出信号经由控制电路调整左右两台螺旋桨推进器的转速, 从而改变平台两侧推力, 实现对航向的实时控制。样机试验表明该系统可以很好地控制投饲平台的相对航向, 保持前进方向与池塘堤岸基本平行, 满足投饲作业需要。

**关键词:** 自动投饲; 相对航向; PID 控制算法

收稿日期: 2019-09-29; 录用日期: 2019-10-20; 发表日期: 2019-11-02

# Design and Test of Heading Control System for Automatic Course Platform of Shrimp and Crab Pond

Tang Rong\*   Liu Shijing

Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai

**Abstract:** In this paper, a course control system is designed to keep the course stable during the operation of automatic feeding platform for shrimp and crab pond. The relative course between the feeding platform and the pond bank is monitored simultaneously by direct and indirect methods. The PID control algorithm based on the negative feedback principle is adopted, taking the relative course as the control target, and the control output is calculated in real-time according to the course deviation. The control output signal adjusts the rotation speed of the left and right propellers through the control circuit, so as to change the thrust on both sides of the platform and realize the real-time control of the course. The prototype test shows that the system can control the relative course of the feeding platform well, keep the forward direction basically parallel to the pond bank, so as to meet the feeding operation needs.

**Key words:** Automatic Feeding; Relative Course; PID Control Algorithm

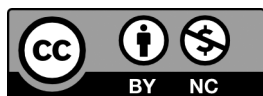
Received: 2019-09-29; Accepted: 2019-10-20; Published: 2019-11-02

---

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## 1 引言

虾和蟹是我国重要的水产养殖品种。在虾蟹养殖过程中, 饲料投喂是一项重要的日常工作, 与养殖效益直接相关。由于缺少合适的设备, 目前虾蟹饲料主要由人工投喂, 一般采用划船投饲或沿岸边行走投饲的方式 [1]。人工投饲劳动强度大, 人为因素不可控, 无法做到均匀投饲, 造成虾蟹个体生长差异较大。同时也导致残饵增多, 限制了饲料利用率的提高并引起养殖水体富营养化污染, 对养殖经济效益和生态效益都带来不利影响。

针对虾蟹池塘自动投饲作业需要, 近几年有关机构研制了自主巡航式投饲船, 一般是基于 GPS 定位系统实时跟踪投饲船在池塘内的位置, 采用自动控制技术实现自主航行, 能够按照设定的路线在池塘内航行并进行投饲作业。常规的民用 GPS 标称定位精度在 10 m 左右 [2], 并不能满足实际生产作业需要, 必须采用差分定位技术来提高定位精度。胡庆松等设计的虾塘投饵船采用了北斗卫星定位系统, 通过差分算法实现了亚米级定位精度 [3]。孙月平等设计的船载自动投饵系统采用 GPS 定位系统, 通过实时动态差分技术 (RTK) 达到了厘米级定位精度 [4-5]。但差分定位方式需要基准站来构建差分定位系统, 成本较高, 操作不方便。在山区或室内养殖等卫星信号不佳的环境下, 定位信息可能出现丢失或延迟, 影响正常作业。为了在保证投饲均匀度的同时便于观察残饵情况, 在实际养殖生产中沿池塘岸边投饲是一种常见方法。针对沿岸边自动投饲需要, 我们前期研发了一种自动投饲平台, 采用测距传感器测量投饲平台与堤岸的距离, 并通过自动控制系统将离岸距离控制在设定范围内, 从而实现投饲平台巡边航行。投饲平台上安装撒料机, 撒料出口设置在投饲平台侧面。投饲平台沿池塘岸边航行, 同时自动投撒饲料。理想的状态是投饲平台前进方向与池塘岸边平行, 将饲料投放在离岸边一定距离的带状区域内。前期试验过程中发现, 由于风浪等因素的影响, 投饲平台航向波动较大, 且难以保持与池塘岸边的平行状态, 导致投饲区域超出预定范围, 影响正常作业。本文针对这

种情况进行分析和研究。

## 2 航向控制系统设计

### 2.1 航向控制要求

投饲平台自动作业时，大多数时间内其前进方向与池塘堤岸存在夹角  $\phi$ ，如图 1 所示。该夹角可视为投饲平台与池塘堤岸的相对航向角。由于航行过程中投饲平台的航向波动较大，撒料机出口无法保持稳定的方向，导致撒料不均匀。为了实现稳定、均匀的投饲作业，自动投饲平台沿池塘岸边作业时，既要维持与岸边的距离，又要尽可能保持航行方向与岸边平行。本文针对投饲平台沿岸边航行过程中航向的测量与控制技术进行了研究，希望将投饲平台航向与池塘堤岸的相对航向角保持在  $15^\circ$  以内，并尽可能减少航向波动。

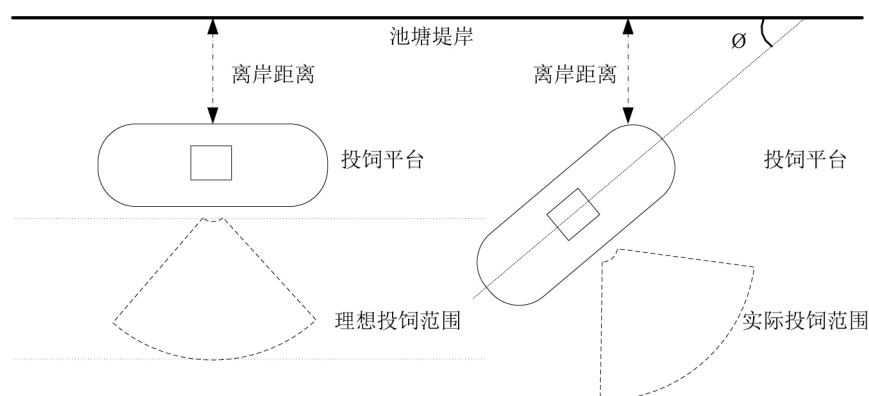


图 1 投饲作业示意图

Figure 1 Diagram of Feeding Operation

### 2.2 试验样机

本文在前期开发的自动投饲平台样机上开展航向测量与控制试验。样机结构如图 2 所示，该投饲平台采用双体船结构，两个船型浮体通过支架连接成为整体结构。相比于单体船，双体船结构具有更好的稳定性。投饲装置采用直流电机驱动的投饲机，安装在平台甲板支架上。投饲机出料口设置在机身侧面，

工作时向与平台前进方向垂直的方向抛洒饲料。平台采用两台电动螺旋桨推进器作为航行动力，由蓄电池供电。蓄电池安装在平台中间的电池仓内。自动投饲平台的两台水下电动推进器采用对称布置，且这两台推进器螺旋桨转动方向相反，从而消除了侧向扭矩 [6]。

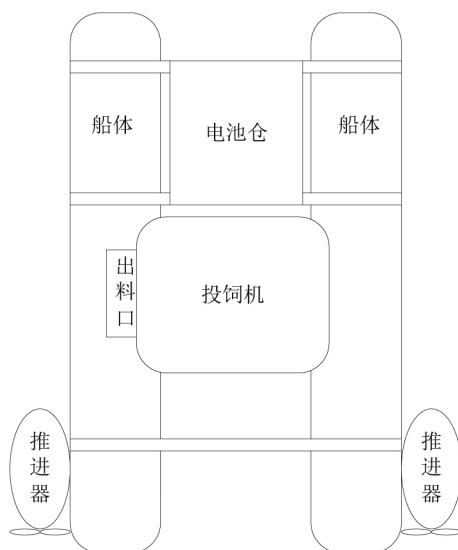


图 2 投饲平台样机结构示意图

Figure 2 Structure Diagram of Feeding Platform Prototype

## 2.3 航向测量方案

### 2.3.1 航向测量方法分析

测量航向一般采用磁罗盘、陀螺仪、GPS 等方法。磁罗盘是一种重要的导航工具，根据地球磁场的水平分量永远指向磁北极这一原理，通过磁敏元件测量地球磁场的北方向，从而推算出载体航向角。该航向角即当前方向和磁北的夹角。随着半导体技术的进步和微机械工艺的成熟，出现了集成磁力传感器和检测电路的电子罗盘 [7]。由于体积小、成本低，电子罗盘得到了大量应用。但地球磁场的北方和地理上的北方存在一定偏差，即磁偏角。磁偏角的大小在不同的地理位置上是不同的，因此必须知道罗盘所在的位置才能进行准确的磁偏角补偿，从而得出真实的北方向。此外，地磁场以外的其他磁力源，例如罗

盘附近的磁性物体和电流会对电子罗盘的测量产生干扰 [8]。陀螺仪是利用角动量守恒原理测量载体航向,当陀螺转子高速旋转时,其旋转轴具有方向稳定的特性。在载体转弯时,虽然陀螺仪整体随之转向,但陀螺的转子仍稳定在一定方向上,此时航向刻度盘指出了载体所转过的角度。随着微电子机械系统 (MEMS) 技术的发展,出现了微机械陀螺仪,其原理是利用科里奥利力来测量载体的航向等姿态参数,一般采用振动物体传感角速度的概念,利用振动来诱导和探测科里奥利力。微机械陀螺仪没有转动部件,具有体积小、成本低、可批量生产等特点。但普通陀螺测量误差较大,而且由于被测角度与陀螺输出之间存在积分关系,长时间工作时会出现误差累积,因此不适用于长时间载体航向角的测量 [9]。高精度陀螺仪成本高昂,一般用于武器装备等特殊用途。GPS 定向一般采用双天线姿态测量,基于 GPS 载波相位观测法,在相同时刻测量基线向量两端天线接收到的 GPS 载波信号相位,求得相位差,用相位差法求解基线向量,得到载体的运动姿态 [10]。其中的关键技术就是对两台或者多台 GPS 接收机天线间双差整周模糊度的搜索解算,然后通过正确的整周模糊度解实现接收机天线间的准确定位 [11]。这种方法需要两套载波相位 GPS 接收机和天线,成本高、体积大。在恶劣天气、建筑物遮挡等情况下 GPS 信号可能会出现减弱甚至暂时中断,影响正常工作。

自动投饲平台在作业过程中对航向的测量精度要求不是非常高,但必须连续稳定运行。综合考虑性价比、易用性等因素,本文设计采用以电子罗盘为测量工具的直接测量法和以测距传感器数据计算相对航向的间接测量法来监测自动投饲平台作业过程中的实时航向。

### 2.3.2 直接测量法

本文设计采用 DCM260B 高精度三维电子罗盘测量自动投饲平台在池塘水面上的绝对航向角。绝对航向角与池塘堤岸方向的磁盘角之差即为投饲平台的相对航向。该电子罗盘航向角测量范围  $0 \sim 360^\circ$ , 分辨率  $0.1^\circ$ , 安装平面倾斜小于  $10^\circ$  时航向精度可达  $0.8^\circ$ 。提供标准的 RS232/RS485 输出接口,便于控制器读取航向测量结果,最大输出速率可达 20 Hz/s。该电子罗盘采用 5VDC 电源供电,便于集成到嵌入式控制电路中。除了测量航向,该电子罗盘同时测量横

滚角和俯仰角，可补偿设备倾斜引起的航向测量误差。电子罗盘会附件的磁性物体和带电流的电线会对航向测量产生干扰，影响测量结果，尤其是变化的电流产生的磁干扰难以进行补偿。因此，将本文设计将电子罗盘安装在 0.7 米高的铝合金立杆上，远离投饲平台上的蓄电池、电线和其他磁性部件，以保证测量结果准确可靠。电子罗盘的安装平面与投饲平台甲板平行，其轴向与投饲平台轴线前进方向平行。

### 2.3.3 间接测量法

本文设计的虾蟹池塘自动投饲平台作业时沿着池塘四周巡边航行，航向控制的目的是尽量保持投饲平台与池塘堤岸平行，保证饲料投入设置的范围内。因此，在实际运行中主要关注投饲平台前进方向轴线与堤岸的夹角  $\Phi$ ，即相对航向角。该相对航向角越小，则投饲平台与池塘堤岸平行度越高。投饲平台侧面装有测距传感器，用于实时测量与堤岸的距离。为了实现相对航向测量，在投饲平台侧面加装另一个传感器。两个传感器同时测量与堤岸的距离，如图 3 所示。通过公式（1）计算投饲平台与池塘堤岸的相对航向角  $\Phi$ ：

$$\Phi = \tan^{-1} \left( \frac{L_1 - L_2}{S} \right) \quad (1)$$

其中  $L_1$  和  $L_2$  分别是两个测距传感器与堤岸的距离， $S$  是两个测距传感器的间距。

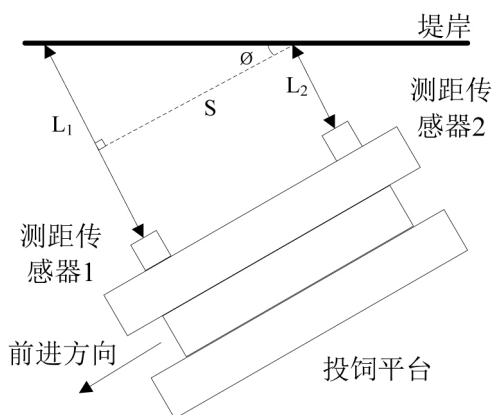


图 3 相对航向示意图

Figure 3 Diagram of Relative Course

测距传感器采用激光原理。相对于超声波测距技术，激光的传播不需要依赖任何介质，在室外测量时不会受到气温和风等因素的影响，且激光信号的波束角较小，能量集中，传输过程中信号衰减小，测量距离远。本文选用 YITA100 型激光传感器，其测距范围 0.1 ~ 10.1 m，提供标准 RS232 通信接口，供电电压为 24VDC。

## 2.4 航向控制方案

### 2.4.1 控制系统设计

在确定航向测量方案的基础上，集成嵌入式控制器、电子罗盘、激光传感器、直流电机调速器和电压输出模块，构建专用的控制系统，如图 4 所示。嵌入式控制器作为控制系统核心控制单位，通过 RS232 和 RS485 接口读取电子罗盘输出的航向角和激光传感器输出的距离数据，并计算出相对航向角  $\Phi$ 。电机调速器用于两台电动推进器的转速控制。通过电机调速器提供的调速接口，可以采用 1 ~ 5 VDC 的调速电压信号调节推进器转速，实现无级调速。电压输出模块用于产生 1 ~ 5 V 的直流电压，作为电机调速器的调速信号，以此来调整推进器的转速。该模块通信接口为 RS485，供电电压为 24 VDC。嵌入式控制器通过 RS485 接口向电压输出模块发送指令，控制其两路通道输出相应的调速电压。调速电压小于 1 V 时电动推进器转速为零，调速电压 5 V 时电动推进器达到最大转速。

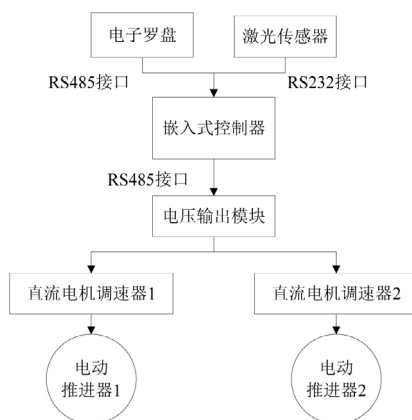


图 4 航向控制系统示意图

Figure 4 Diagram of Course Control System



## 2.4.2 航向控制方法

当两台推进器转速相同时，其产生的推力相同，则投饲平台保持当前方向前进；当两台推进器转速不同时，投饲平台两侧产生大小不同的推力，航向会向推力小的一侧偏转，从而调整平台航向 [12]。因此，当投饲平台与池塘堤岸的相对航向角超过设定范围时，通过调节两台推进器的转速差即可调整投饲平台航向。嵌入式控制器根据实时测量的相对航向与设定值计算航向偏差，采用经典 PID 负反馈控制器计算输出控制量  $\Delta u$ ，如式 2 所示。将该控制量叠加至原有的基础电压  $u$ ，从而生成推进器电机调速信号  $u_1$  和  $u_2$ ，进而调整两台推进器的转速，实现对航向的控制。控制流程如图 5 所示。

$$\Delta u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2)$$

其中： $K_p$  —— 控制器的比例系数

$T_i$  —— 控制器的积分系数

$T_d$  —— 控制器的微分系数

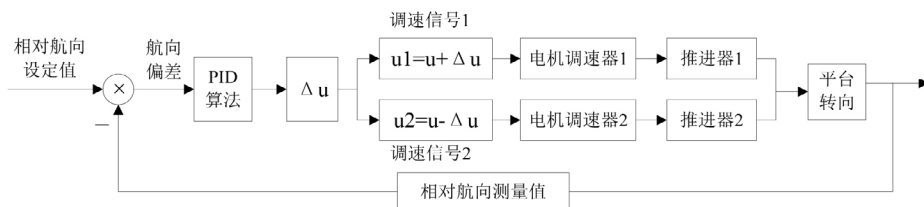


图 5 PID 控制流程图

Figure 5 Course Control Flow Chart

航向自动控制的目标是尽量保持投饲平台与池塘堤岸平行，即平台与堤岸的相对航向角尽可能小。由激光传感器测距数据计算出的投饲平台与堤岸的夹角即为相对航向角，因此 PID 控制算法中以相对航向角作为航向测量反馈值来计算航向偏差。投饲平台在风浪较大时摇摆剧烈，激光传感器随平台晃动时可能偶尔会出现激光信号照射至水面的情况，此时激光信号无法反射回传感器，导致传感器测距数据异常，系统无法计算相对航向。此时，电子罗盘输出的航向角作为备用信号，该航向角与事先测量的沿池塘堤岸方向磁偏角的差值即为

相对航向。该相对航向作为 PID 控制算法的实时航向反馈输入。当激光传感器测距数据恢复正常时,则重新采用间接法计算出的相对航向作为 PID 控制算法的输入。

### 3 样机试验

投饲平台样机在中国水产科学研究院池塘生态工程中心的池塘内进行试验。试验池塘长度 100 米,宽度 50 米。试验期间风速为 3 ~ 5 级。

#### 3.1 单独航向控制试验

为了保证航向平稳变化,避免出现剧烈波动,对 PID 控制器计算的调速电压增量  $\Delta u$  进行限幅,使其最大值不超过  $\pm 0.2 \text{ V}$ 。采用这种控制方法在池塘内进行了航向自动控制试验,PID 控制器参数取值为  $K_p=5$ ,  $T_i=0.5$ ,  $T_d=0.01$  时航向控制曲线如图 6 所示。航向设定值为  $10^\circ$ ,进入航向自动控制程序后,投饲平台与池塘堤岸的相对航向从  $82^\circ$  开始减少,逐渐向目标航向调整。实际航向与航向设定值的偏差大约从第 20 秒开始小于  $10^\circ$ 。航向调整过程中一直平稳变化,没有出现太大波动,稳定后航向偏差小于  $5^\circ$ ,达到控制要求。

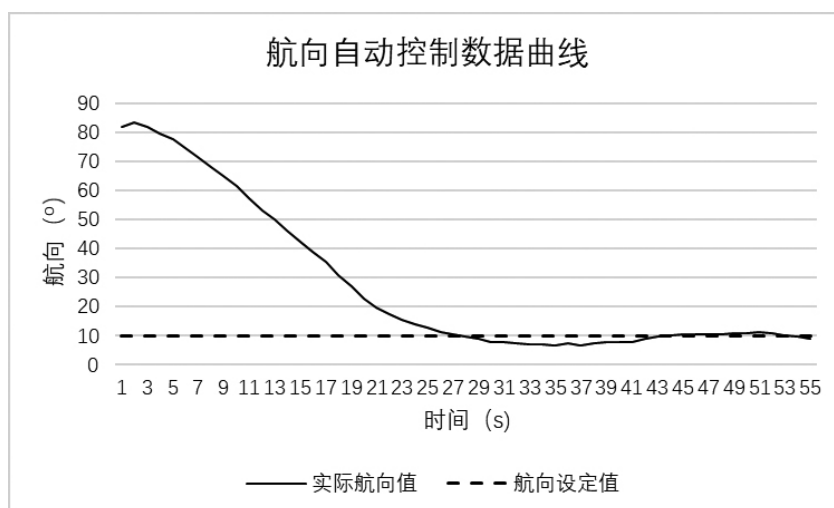


图 6 航向控制曲线

Figure 6 Curve of Course Control

### 3.2 距离跟踪下航向控制试验

在离岸距离自动跟踪控制前提下，对航向控制效果进行试验。距离自动跟踪控制过程中会实时调整推进器转速来调整离岸距离，为了避免航向波动太大，在控制程序中对相对航向变化幅度进行限制，最大变化范围不超过  $\pm 15^\circ$ 。PID 控制器参数取值为  $K_p=5$ ， $T_i=0.5$ ， $T_d=0.01$  时航向控制曲线如图 7 所示。大约 20 秒以后距离跟踪控制进入稳定状态，此后投饲平台与池塘堤岸的相对航向保持在  $\pm 15^\circ$  范围内变化，大部分时间保持在  $-10^\circ \sim 5^\circ$  以内，达到了控制要求。

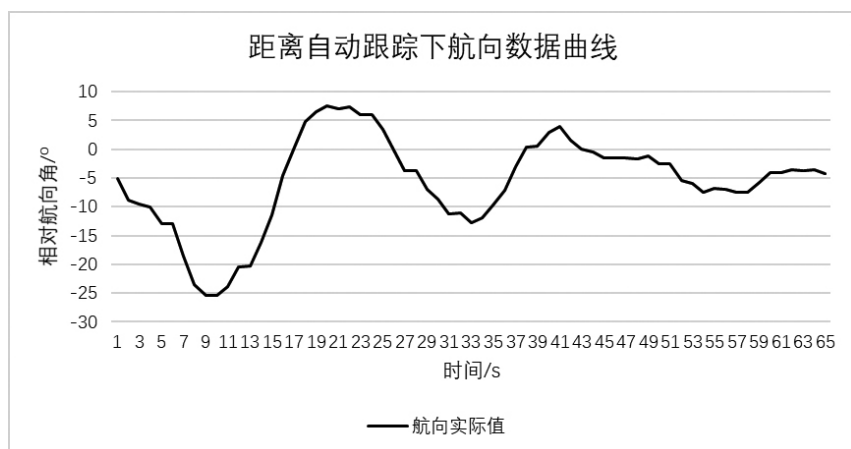


图 7 距离自动跟踪下航向控制曲线

Figure 7 Curve of Course Control Under Range Automatic Tracking

## 4 结论

本文以控制自动投饲平台相对于池塘堤岸的相对航向为目标，设计开发了航向控制系统，结合电子罗盘和基于距离换算的间接方法测量投饲平台实时航向，采用经典 PID 控制算法实时调整推进器转速来控制航向。现场试验表明，通过选取合适的控制参数可以达到良好的控制效果，将投饲平台相对航向保持在较小范围内。但控制参数的调试需要大量测试数据支撑，必须花费大量时间进行现场试验。下一步将对控制参数的自动调整方法进行研究，通过参数自整定等技术实现控制器参数自动寻优，从而减少人工调试工作。

## 基金项目

中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所基本科研业务费资助 (2017YJS0015)。

## 参考文献

- [1] 汪万里, 陈军. 新型对虾养殖投饲装置研究 [J]. 江苏农业科学, 2013, 41 (4): 365-366, 376.
- [2] 赵传华, 吴智亮, 潘山, 等. 手持 GPS 单点定位精度分析 [J]. 矿山测量, 2018 (2): 68-71.
- [3] 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 (2): 63-66, 71.
- [4] 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 (11): 39-47.
- [5] 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.
- [6] 唐荣, 邹海生, 汤涛林, 等. 自动投饲船及其测控系统的设计与开发 [J]. 渔业现代化, 2013, 40 (6): 30-35.
- [7] 郭新伦, 王华豫. 浅析电子罗盘原理与误差分析 [J]. 数字通信世界, 2019 (7): 151.
- [8] 蒋贤志. 数字电子罗盘误差分析及校正技术研究 [J]. 现代雷达, 2005, 27 (6): 39-41.
- [9] 支炜, 褚金奎, 王寅龙. 基于偏振光与 MEMS 陀螺的航向角测量系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2015 (1): 109-111.
- [10] 夏佩, 王峰, 黄祖德, 等. 基于双天线的 RTK-GPS 定向方法 [J]. 中国新通信, 2018, 20 (22): 63-65.
- [11] 刘永彪. 基于 GPS 双天线的定向研究 [D]. 南昌大学, 2011.
- [12] 刘杨, 王莹. 基于双螺旋桨差动调节的双体船航向智能控制研究 [J]. 微型机与应用, 2010 (11): 58-60.