

水质监测与采样一体化无人船设计与试验

李俊, 陈普坤, 陈雷雷, 张丽珍, 胡庆松

Design and experiment of water quality monitoring and sampling integrated unmanned boat

LI Jun, CHEN Pukun, CHEN Leilei, ZHANG Lizhen, HU Qingsong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20220103694>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于仿生航行器的养殖水环境要素检测分析系统设计

Design of detection and analysis system for aquaculture water environment factors based on bionic vehicle

上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 650 <https://doi.org/10.12024/jsou.20191102858>

池塘偏心式水动力装备控制系统设计与实现

Design and realization of pond eccentric hydrodynamic equipment control system

上海海洋大学学报. 2017, 26(4): 621 <https://doi.org/10.12024/jsou.20161201916>

水产品活体运输智能监控系统的设计

The design of intelligent monitoring system for live aquatic products transportation

上海海洋大学学报. 2017, 26(3): 473 <https://doi.org/10.12024/jsou.20161001888>

一种半潜式无人艇的设计

Design of an unmanned semi-submersible vehicle

上海海洋大学学报. 2019, 28(2): 313 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180802378>

虾蟹塘投饵船三叶螺旋桨设计及水动力仿真分析

Hydrodynamic simulation analysis of three-blade propeller of shrimp and crab pond feeding boat

上海海洋大学学报. 2021, 30(5): 893 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200503028>

文章编号: 1674-5566(2023)02-0405-12

DOI:10.12024/jsou.20220103694

水质监测与采样一体化无人船设计与试验

李俊, 陈普坤, 陈雷雷, 张丽珍, 胡庆松

(上海海洋大学 工程学院, 上海 201306)

摘要: 良好的水体水质是池塘健康养殖的基础, 为了实现监测和采样的自动化, 设计一体化无人水质监测船并进行性能试验。兼顾水质监测与采样需求, 对船体结构进行设计, 考虑承重和稳性对船舱传感器与采样、电源与控制盒、水样采集瓶功能区进行布局设计, 基于双螺旋桨差速驱动模型融合 GPS 和姿态传感器开发自主巡航控制系统, 应用物联网技术集成水质采样控制系统和水质监测数据平台。综合试验结果表明: 无人船行驶轨迹准确, 监测点位最大偏差量为 1.49 m, 最小偏差量为 0.39 m, 平均偏差量为 1.003 m; 监测及采样功能稳定, 可实时回传水体的 pH、温度和溶氧数据, 6 只 500 mL 水样采集瓶能够实现符合国家标准的水下 50 cm 精准取样。研究结果为水产养殖全水面水质监控提供一种低成本、高可靠的实施方案。

关键词: 水质监测; 水体采样; 无人船; 自主导航

中图分类号: S 959 **文献标志码:** A

我国是世界水产品的生产大国, 由于水产养殖过程中管理体系不完善, 养殖户对水环境保护的重视程度不够^[1], 药品的滥用、投喂环节的饵料残留、无法及时清理的生物排泄物等会导致水质的恶化与环境的破坏^[2]。传统的水产养殖模式下存在水质管理滞后的问题, 由于无法及时调节水质, 水体的各项指标失衡会造成水产品生长滞缓、生病甚至死亡, 导致生产效率低下和经济损失, 水产品品质也难以得到有效保障。因此提高养殖水域的水质监测效率与精准性, 可以为水质调控提供可靠决策依据, 为水产养殖环节减小风险^[3]。

现有的水质监测方式多以实验室检测与自动监测站为主^[4], 存在设备部署工程量、监测范围有限^[5]、定期传感器维护成本高、水样采集仍以人工采集为主等问题, 较大的局限性^[6-7]导致了水质监测系统的覆盖率及应用数量不足。移动式水质监测船机动性好, 无需前期部署, 是一种行之有效的方案。目前, 美国、英国、挪威、俄罗斯等国相继研发了用于军事、货运、护航和

资源勘察等领域的无人船^[8-10]。我国无人船研究起步较晚: 上海大学“精海”系列无人船已实现海域测绘应用作业^[11]; 云洲智能科技有限公司推出了环境测量无人船与海洋调查无人船^[12]; 也有无人船相继应用于城市内河水质监测与水样采集作业^[13]。池塘养殖是我国目前水产养殖的主要形式, 池塘养殖产量已经超过总水产养殖产量的 50%^[14], 已有水质监测船通常船型较大或成本较高, 集成水质实时监测与水样采集设计的并不多, 还不能很好地适用于水产养殖池塘环境, 亟需设计一种低成本小型化水质监测与水样采集一体化无人船。

水产养殖区通常面积较大, 塘口面积小且数量多, 布设自动监测站成本高, 而已有水质监测船通常不适用于养殖池塘环境, 因此针对水产养殖领域水质监测的需求, 以提高水质监测效率与自动化程度为目标, 本文结合无人船控制技术与水质监测方案, 设计了一种水质监测与水样采集一体化无人船。对船体结构进行设计, 结合传感器与水样采集系统, 运用物联网技术, 进行了各

收稿日期: 2022-01-19 修回日期: 2022-04-05

基金项目: 上海市科技兴农推广项目(沪农科推字[2018]第 3-3 号); 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)

作者简介: 李俊(1982—), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为渔业工程装备。E-mail: junli@shou.edu.cn

通信作者: 胡庆松, E-mail: qshu@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

系统单元性能测试与现场应用测试。

1 材料与方法

1.1 总体方案设计

船体设计、设备搭载与功能实现包括无人船的船体设计与装配、控制系统的设计、传感器的选型、数据的回传等,提出以下设计方案:

(1) 结构设计与优化。基于船的负载量、可靠性等问题,设计与双船体平台匹配的舱体结构用于控制器、传感器、电源等的安装固定。结合船体在水域中航行姿态,优化各设备的设计与布局。

(2) 水质监测与水样采集一体化方案设计。基于水质监测的采样精度、灵敏性与可靠性,进行水质参数传感器的选型与适用性测试;设计水样采集方案,根据科学水样采集要求,保证水样质量,分析水样采集流速与采集量等要求,设计

水样采集系统,包括采样瓶尺寸、采样瓶固定架中水样瓶布局、采水泵效率和采水导管尺寸等的选型与设计。结合以上各部分实现情况设计科学水质监测与采样方案。

(3) 船体控制系统设计。基于船体定位精度、路径控制的可靠性与纠偏性能,设计基于定位与姿态传感器的控制系统,开发自主巡航算法。通过 GPS 感知定位情况,融合姿态传感器感知偏角情况,进行算法分析处理,控制船体在水域的航行状况。

(4) 水质传感器所采集数据的传输与实时监测平台的设计与开发。基于物联网平台,建立水质数据的物模型,实现水质参数在线采集、控制与上传,并且可在平台上记录、分析、显示水质参数的变化趋势。

基于以上设计与实施方案,总体框架结构设计如图 1 所示。

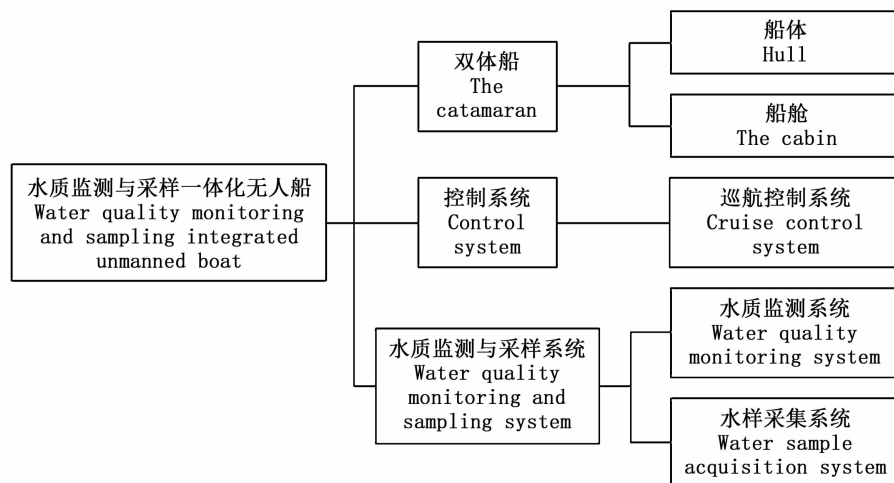


图 1 水质监测与采样一体化无人船结构框图

Fig. 1 Structural block diagram of water quality monitoring and sampling integrated unmanned boat

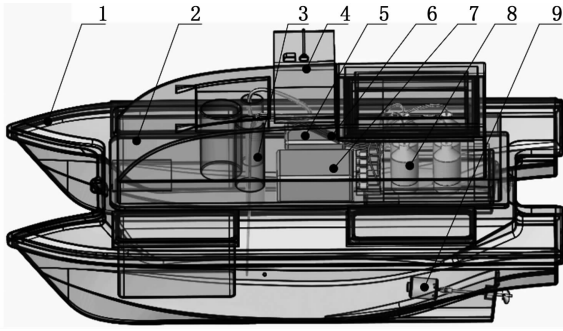
1.2 船体结构与船舱设计

1.2.1 船体总体结构及载重计算

(1) 船体总体结构。双体船的兴波阻力小、船体稳性好、安全性高、甲板空间大、水动力性能优良^[15],因此采用胡庆松等^[16]设计的双体船底船作为船的主体部分,图 2 为所设计的船体结构图,尺寸设计为 1.80 m × 1.10 m × 0.76 m,最大

吃水 0.28 m,由 PE 材料滚塑工艺制成。

(2) 船体自重与载重量计算。船体的自重与负载能力是船体设计的重要部分。需要对船体的排水量进行计算,同时统计总装机质量,以分析船体设计是否符合使用需求^[17]。船体各部件质量如表 1 所示。



1. 双体船; 2. 船舱; 3. 水质传感器; 4. 通信及 GPS 天线; 5. 控制盒; 6. 水样采集导管; 7. 锂电池; 8. 水样采集瓶组; 9. 驱动电机。

1. The catamaran; 2. The cabin; 3. Water quality sensor; 4. Communication and GPS antenna; 5. The control box; 6. Water sample collection catheter; 7. The lithium battery; 8. Water sample collection bottle group; 9. Drive motor.

图 2 船体结构图

Fig. 2 Structure of the boat

表 1 船体各部件质量表

Tab. 1 Mass of hull parts kg

部件 Components	质量 Mass
船体 The hull	21.54
船舱 The cabin	8.54
电机 The motor	5.90
采样瓶组 Water sample collection bottles group	5.74
水质传感器 Water quality sensor	2.00
控制盒 The control box	0.94
锂电池 The lithium battery	9.92
水泵 The water pump	0.72
其他负载 Other load parts	60.00
总计 Total	115.30

船体在水中受重力与浮力的作用,只有当重力与浮力相等且作用在同一条铅垂线上时,船体才能达到平衡。船体的总质量为构成船舶各部分的所有质量之和,故由重力方程式得:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n = \sum W_i \quad (1)$$

式中: W 为船舶总质量, t ; $\sum W_i$ 为构成船舶各部分的所有质量之和, t 。

浮力方程式:

$$\Delta = \gamma k \nabla \quad (2)$$

式中: Δ 为对应载况下的船舶排水量, t ; γ 为水密度, t/m^3 , 淡水为 $1.0 t/m^3$; k 为附体体积系数, 小船取 $k = 1.01$; ∇ 为对应载况下的排水体积, m^3 。

当船舶在水中达到平衡时,其浮力等于重力,故由浮性方程式得:

$$\Delta = \sum W_i = \gamma k \nabla \quad (3)$$

由 SolidWorks 软件模型测算,最大吃水深度为 28 cm 时,船体排水体积 $\nabla = 0.176 m^3$ 。

经计算, $W = 115.30 kg$, $\Delta = 177 kg$ 。船体所能提供最大浮力大于总装机质量,满足使用需求。

1.2.2 船舱设计

船舱需要为供电电源、控制器、水质采样瓶组等提供充足的空间,在考虑到各组件的体积大小、安装位置、拆装难度以及正面风阻等,将其设计为前部弧形、中后部方形的结构。

如图 3 所示为使用 SolidWorks 软件设计的船舱、船舱顶天线架和内部水样采集瓶组。船舱与船体材料相同,尺寸为 $1.3 m \times 0.45 m \times 0.3 m$,采用滚塑工艺加工制成,红色船舱在使用环境中易于辨识。船舱上部安装一个高 0.2 m 的用于放置通信天线、GPS 天线和姿态传感器的支架。由于 PE 材料的强度不够高,下部两船体仅凭平面连接将会出现下船体向内翻凹的情况^[18],因此通过船舱与船体的连接以加强双体船的结构。

船舱分为 3 个安装区,如图 4 所示。船舱前部预留 3 个直径分别为 0.063、0.090 和 0.125 m 的通孔,不同尺寸的通孔适用性较好,可用于水质传感器及支架、采水管和传感器升降结构等的安装。所搭载设备的安装位置会对船体的浮态产生极大的影响^[19],因此在船舱的几何中心位置放置质量较大的 60 Ah 锂电池与控制盒,船舱后部放置水样瓶与水泵安装架,使得大部分质量作用在船体的中间位置,在保证船体稳定时满足螺旋桨入水深度要求,保证驱动效能^[20]。

1.2.3 船体巡航控制系统设计

船体巡航控制系统的主控板使用意法半导体公司的 STM32F4 微控制器,控制板由电源整流电路、电机驱动电路、水样采集电路、GPS 及姿态传感器处理电路和通信电路等主要模块组成。

水质监测船的控制采取手控与自主巡航相结合的方式。手控模式中,可根据现场需要由遥控器控制船体行驶到指定位置进行采样与水质监测。在自主巡航状态下,由 PC 端设定多个监测点的位置信息,船体依靠 GPS 定位模块与姿态传感器自动接收当前定位信息和预设航线的航向偏差角度实现巡航状态感知,经控制算法计算后对螺旋桨驱动装置进行控制,以此实现船体

航行状态的实时调控。如图 5 所示,设船体起始位置为 A,目标位置为 B,当前位置为 C;正北方向线为 L_0 ,以位置点 A 为端点,起始位置 A 与下一目标点 B 之间连接线为理论航线 L_1 ,当前位置

C 与目标位置 B 连线为当前航线 L_2 ,船体航向线为 L_3 ,则 L_0 与 L_2 夹角 α 为航线角, L_0 与 L_3 夹角 β 为船体航向角,航线角与航向角夹角 θ 为航偏角,当前位置 C 与理论航线距离为 d 。

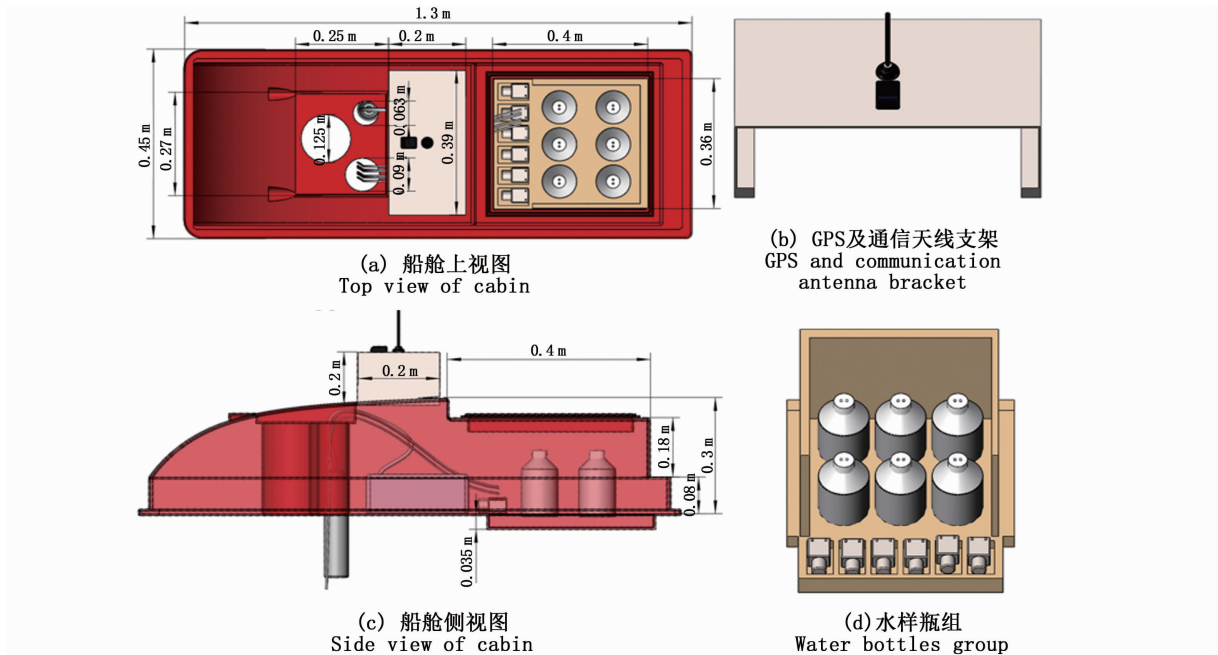


图 3 船舱及内部布置

Fig.3 Cabin and interior layout

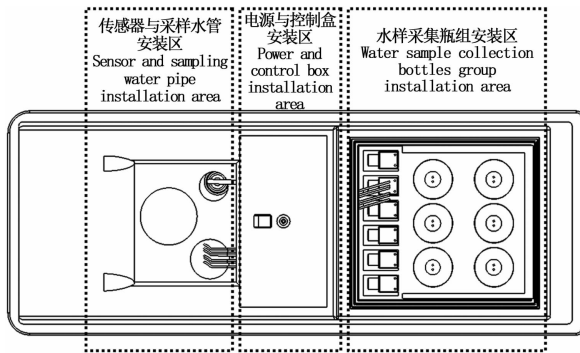


图 4 船舱内部分区

Fig.4 Interior division of cabin

自主巡航时,通过双螺旋桨的差速控制实时调控航偏角,以角度差 30° 为区间的 12 个角度区间内,航偏角越大时螺旋桨差速调控量越大,逐渐使航偏角 θ 趋于 0° ;计算当前点与理论航线的垂直距离 d ,当判定距离 d 大于 2 m 时,原航线失效,重新以当前点与目标点形成理论航线。当到达最后监测点位后再通过巡航算法返回到起始点,完成一次巡航作业任务。

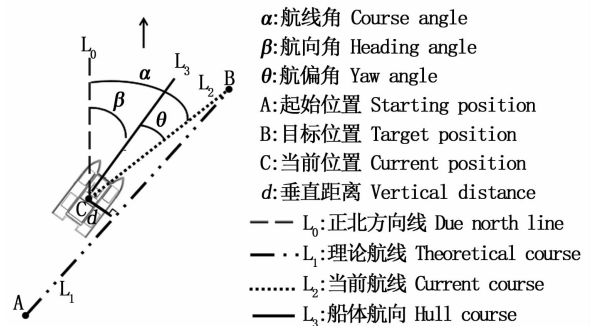


图 5 自主巡航控制示意图

Fig.5 Schematic diagram of autonomous cruise control

图 6 为双螺旋桨差速控制示意图。螺旋桨驱动安装于双体船两片体尾部, S_1 、 S_2 分别是左、右驱动作用点,点间距 S_1S_2 为 d ,m; C 为 S_1S_2 的中心点。 xoy 为大地坐标系, V_1 、 V_2 及 V_c 分别为左、右侧和中心 C 点的推进速度,m/s。设 C 点在大地坐标系中的坐标为 (x, y) ,则船体的姿态角度可以用航向与 x 轴之间夹角 γ 表示,规定逆时针为正,则向量 (x, y, γ) 表示船体在大地坐标系

xoy 中的位置与姿态。 S_c 是船体的速度瞬心,忽略船体运动时的横向移动,则 C 点的速度为 V_c , m/s 。

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (4)$$

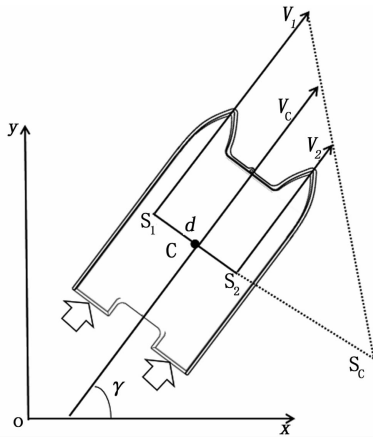


图 6 双螺旋桨差速控制示意图
Fig. 6 Schematic diagram of differential control of twin propellers

设船体的转向角速度为 ω , rad/s ; 如图 6 为作顺时针转向运动, 因此有:

$$\begin{cases} V_1 = \omega(R + \frac{d}{2}) \\ V_2 = \omega(R - \frac{d}{2}) \\ \omega = \frac{V_1 - V_2}{d} \end{cases} \quad (5)$$

由 V_1 、 V_2 之间的 3 种关系决定了差速驱动船体的 3 种运动方式:

(1) 当 $V_1 = V_2$ 时, $V_c = V_1 = V_2$, $R = \infty$, 船体作直线运动;

(2) 当 $V_1 = -V_2$ 时, $V_c = 0$, 船体作旋转运动;

(3) 当 $V_1 \neq \pm V_2$ 时, $V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$, 船体作转动半径 $R = \frac{V_c}{\omega} = \frac{d}{2} \frac{V_1 + V_2}{V_1 - V_2}$, m ; 绕船体瞬心 S_c 的圆弧运动。

由此, 船体运动学方程可表示为

$$V_c = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 \\ \sin\gamma & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 \\ \sin\gamma & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{d} & -\frac{1}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

整理得:

$$V_c = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\gamma}{2} & \frac{\cos\gamma}{2} \\ \frac{\sin\gamma}{2} & \frac{\sin\gamma}{2} \\ \frac{1}{d} & -\frac{1}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由以上分析可知, 可通过控制尾部 2 个有刷电机间接控制船体航行速度 V_c 和转向角度, 理论上可以实现船体任意方向的运动。

1.3 水质监测与水样采集系统设计

1.3.1 监测与采样方案

船体开始工作前, 需先在 PC 端设置所有监测点位置信息, 其中, 初始位置也需要水质监测和水样采集工作, 设置完成所有监测点位置信息后, 将初始位置作为下一目标监测点。

监测与采样工作开始时, 首先判断当前位置是否为初始监测点, 如若非预设初始监测点则读取初始监测点作为目标监测点, 通过自主巡航算法返回到初始监测点, 在回归初始监测点后判断是否遍历所有监测点, 若未遍历所有点位, 即视为未完成全部工作, 开始进行定点水质监测与水样采集, 完成后继续读取下一目标监测点位, 通过自主巡航算法前往下一目标监测点, 在判断遍历完所有监测点位, 即完成所有监测点的水质监测与水样采集工作并回到初始位置后, 停机, 完成一次水质监测与采样作业。在船体行驶的全过程中, 水质监测传感器持续工作并回传数据, 后续可根据时间节点结合船体返回的定位信息分析各处水域水质情况。整体控制系统流程图如图 7 所示。

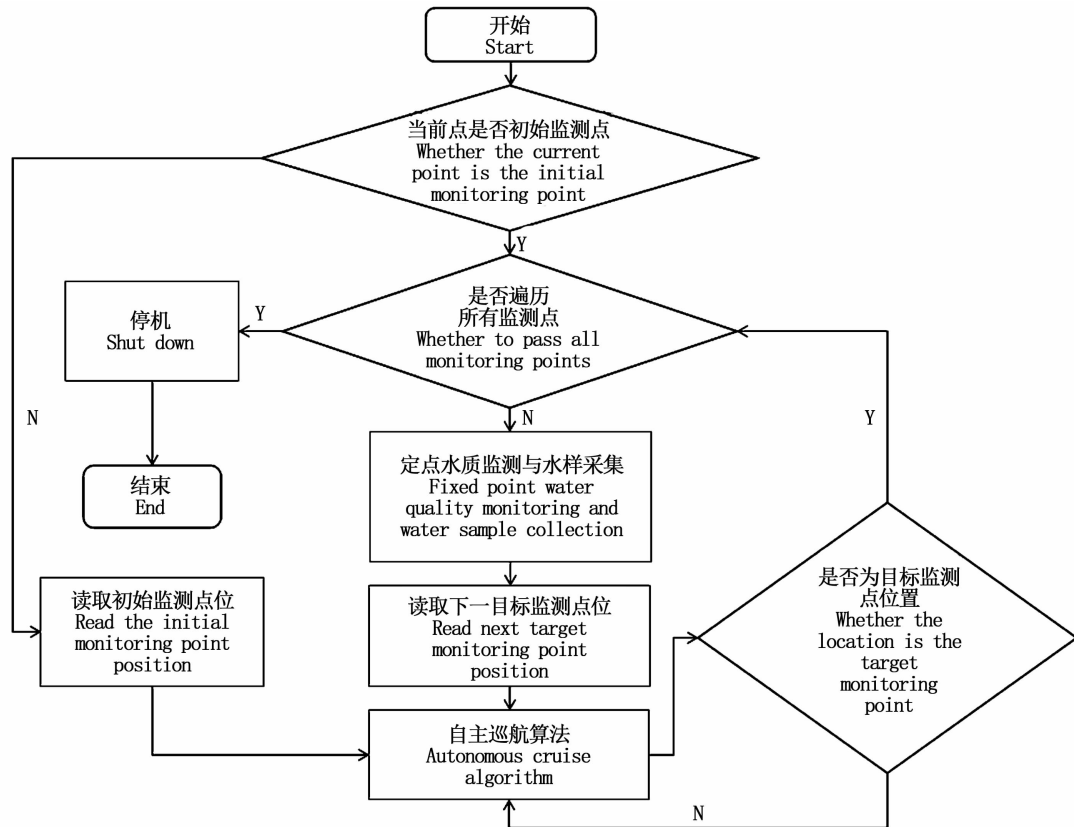


图 7 控制系统流程图

Fig. 7 Flow chart of control system

1.3.2 水质监测系统与水样采样系统设计

(1) 水质实时监测系统。水质实时监测系统采用多参数水质传感器,从船体前部孔位向下入水获取水质数据,上传至物联网云平台^[21]并通过网页实时显示。

水温、pH 和溶氧是众多影响养殖水体最为关键的 3 个参数^[22],而水温和溶氧受外界环境影响较大,应现场实时采集。本试验采用 Aquaread 公司型号为 AP-2000 的多参数水质分析仪,该水质传感器可以按需配备温度、溶氧、pH、深度、电导率、浊度等 13 种探头,该传感器长 30 cm,直径为 4 cm,集成度较高,体积较小,易于携带与安装。本试验中配备温度、溶氧和 pH 探头。

传感探头采集的电信号通过 RS485 通信协议传输到 Blackbox 中,经数据转换模块分析与转换形成 16 进制数据。16 进制的水质数据通过透

传模块传输至物联网云平台,物联网云平台经过数据转换后将数据显示在物模型和网页中,同时流转到数据库中(图 8)。

(2) 水样采集系统。水样采集系统主要是实现采取水样的功能,整体系统由采样乳胶管、隔膜式微型水泵、采样瓶、水泵及采样瓶组的固定架组成。6 只采样水瓶固定在瓶架中,为减小因震荡和光照引起的水样性质变化,瓶体与瓶架之间采用海绵减缓瓶体震荡,瓶体周身包裹锡纸用以避光。如图 9 所示,每只采样瓶拥有单独的进水管,进水管一端由船中部孔位向下探入水中 0.5 m,满足环保行业水质采样深度的要求,另一端经由隔膜式微型水泵抽取水样至采样瓶底部,出水管位于采样瓶瓶口,以排出采样瓶中的气体和多余水样,可以满足瓶水样采集和避免多采集点的水质混合污染影响检测结果。

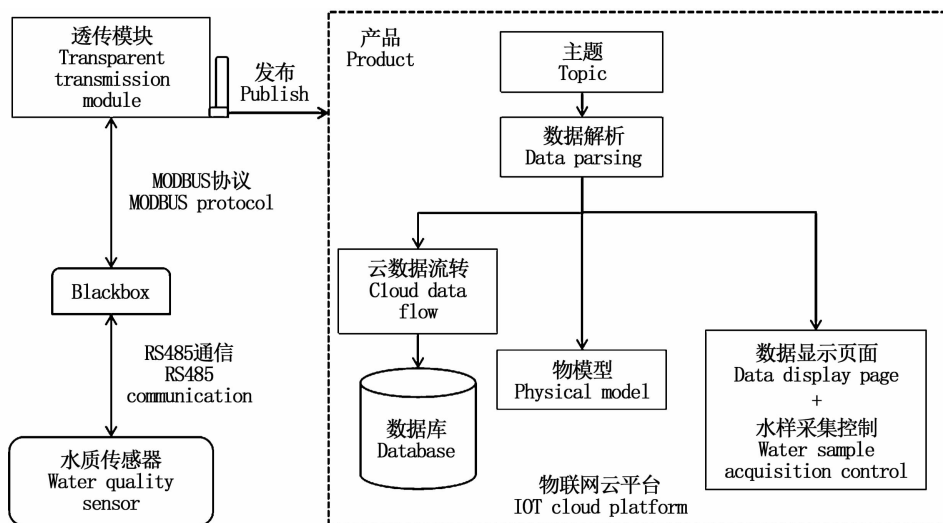


图 8 水质监测系统结构图

Fig. 8 Structure diagram of water quality monitoring system

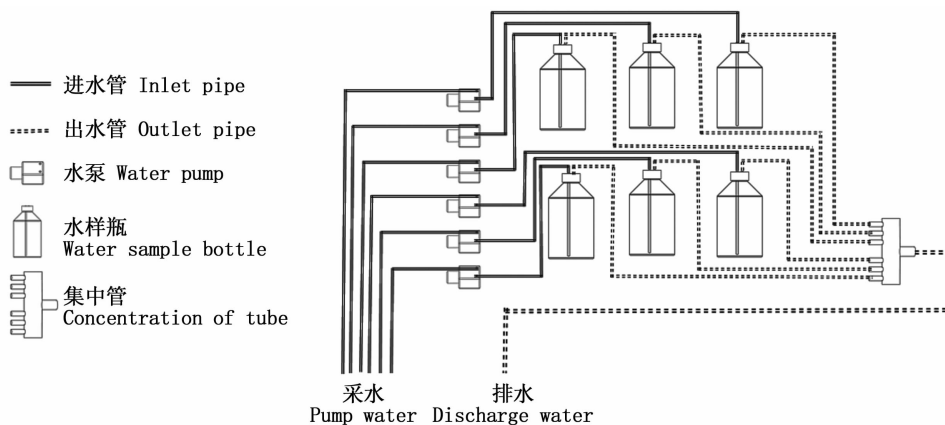


图 9 采样瓶组采水示意图

Fig. 9 Schematic diagram of sampling bottles group collecting water

抽取水样时流速过快会导致水样性质发生变化,为降低水样在水管中的流动速度,采用抽取液体流量为 320 mL/min 的某 O2-A 型微型隔膜泵,选用内径为 10 mm 的乳胶管。经计算,采样流速为 0.068 m/s,水流速度较为缓慢,可以减少水流扰动对水样的影响。

根据采样需求,选用 6 只容量为 500 mL 的采样瓶,经计算单次水样采集过程中水泵采样工作时长约为 93.75 s,考虑到采样乳胶管采水经由船体等需要的时间,采样时间延长至 115 s。

2 结果与分析

2.1 船体航行状态试验

选取河长 150 m 宽 60 m 深 2 m 的上海市浦东新区海基六路西侧芦潮引河,用以模拟占地 0.006 666 7~0.013 333 3 km² 的养殖池塘,在该水域内进行模拟池塘的自主巡航测试,向控制器发送 6 个水质监测点的定位数据,同时记录多次水质船到达各监测点的定位数据,如表 2 所示。

表 2 6 个监测点经纬度表
Tab. 2 Longitude and latitude of the six monitoring points

监测点 Points	设定监测点 Setted point		第 1 次 Test 1		第 2 次 Test 2	
	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)
1	121.904 897	30.865 528	121.904 882 8	30.865 535 4	121.904 904 2	30.865 531 4
2	121.904 719	30.865 395	121.904 720 0	30.865 409 3	121.904 720 0	30.865 405 2
3	121.904 560	30.865 254	121.904 557 2	30.865 266 9	121.904 557 2	30.865 258 7
4	121.904 789	30.865 075	121.904 785 1	30.865 079 7	121.904 785 1	30.865 079 7
5	121.904 944	30.865 241	121.904 931 6	30.865 230 3	121.904 931 6	30.865 238 3
6	121.905 094	30.865 375	121.905 078 1	30.865 368 6	121.905 078 1	30.865 372 7

监测点 Points	第 3 次 Test 3		第 4 次 Test 4		第 5 次 Test 5	
	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)
1	121.904 899 0	30.865 531 4	121.904 899 0	30.865 531 4	121.904 905 3	30.865 535 4
2	121.904 720 0	30.865 409 3	121.904 720 0	30.865 401 2	121.904 720 0	30.865 405 2
3	121.904 557 2	30.865 258 7	121.904 557 2	30.865 266 9	121.904 557 2	30.865 262 8
4	121.904 785 1	30.865 079 7	121.904 785 1	30.865 075 6	121.904 785 1	30.865 079 7
5	121.904 931 6	30.865 242 5	121.904 931 6	30.865 238 4	121.904 947 9	30.865 234 3
6	121.905 078 1	30.865 372 7	121.905 078 1	30.865 372 7	121.905 078 1	30.865 371 6

采用卫宇^[23]的椭球体两点距算法,以地球椭球中心为坐标系原点,Z 轴指向地极,X 轴由坐标系原点指向起始子午面,Y 轴与 X、Z 轴构成右手坐标系。

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos B \times \cos L \\ Y = (N + H) \cos B \times \sin L \\ Z = [N(1 - e^2) + H] \times \sin B \end{cases} \quad (8)$$

式中: N 为椭球的卯酉圈半径; L 为经度; B 为纬度; H 为高度; e 为椭球第一偏心率。

$$N = \alpha \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B} \quad (9)$$

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (10)$$

式中: a 和 b 分别为椭球的长半径和短半径,代入

地球的赤道半径和极半径,可得 $e = 0.081 7$ 。

设两点 $A(L_1, B_1, H_1)$ 和 $B(L_2, B_2, H_2)$ 经转换可得坐标 $A(X_1, Y_1, Z_1)$ 和 $B(X_2, Y_2, Z_2)$, 则两点距离 D_L 为

$$D_L = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2} \quad (11)$$

由于本水质监测船在较小范围的水面海拔高度差较小,因此高度差 $Z_1 - Z_2$ 为 0, 则:

$$D_L' = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \quad (12)$$

根据公式(12)对表 2 中数据进行定位误差分析,结果如表 3 所示,监测点最大偏差量为 1.49 m,最小偏差量为 0.39 m,平均误差量为 1.003 m。

表 3 监测点位偏差量
Tab. 3 Monitoring point position deviation

监测点 Points	第 1 次点位偏差量 Point deviation in test 1/m	第 2 次点位偏差量 Point deviation in test 2/m	第 3 次点位偏差量 Point deviation in test 3/m	第 4 次点位偏差量 Point deviation in test 4/m	第 5 次点位偏差量 Point deviation in test 5/m	均偏差 Average deviation/m
1	1.154 123 04	0.796 241 17	0.394 461 66	0.575 847 20	1.111 980 21	0.806 530 658
2	1.433 492 24	1.024 890 24	1.433 492 24	0.628 012 74	1.024 890 24	1.108 955 539
3	1.320 037 88	0.858 661 75	0.547 083 17	1.320 037 88	1.273 106 44	1.063 785 424
4	0.610 737 26	0.754 320 89	0.610 737 26	0.832 165 85	0.610 737 26	0.683 739 702
5	1.492 146 11	1.269 054 77	1.249 039 63	1.266 964 88	0.775 241 90	1.210 489 456
6	1.178 855 38	1.114 001 80	1.212 023 10	1.114 001 80	1.108 016 25	1.145 379 664
均偏差 Average deviation /m						1.003

通过接收控制器回传的定位、姿态等信息,在 MATLAB 软件绘制航行路线并进行分析,行驶路线如图 10 所示。图 10 中河水流向为从左上至右下,在所绘制航线中,船体在监测点 1 附近未启动时因水流冲击偏离原位,启动后驶向监测点 1,点位均偏差量为 0.8 m;船体到达监测点 4 时

均偏差量最小,为 0.68 m。船体行驶到达监测点 2、3、5、6 时有 1.1~1.2 m 均偏差量,点位偏差量最大不超过 1.5 m;船体在 1~2、2~3、5~6 监测点间的航径较为平稳,在监测点 3~4、4~5 间尽管航径波动较大,但仍能到达下一目标点,船体正常行驶状态稳定。

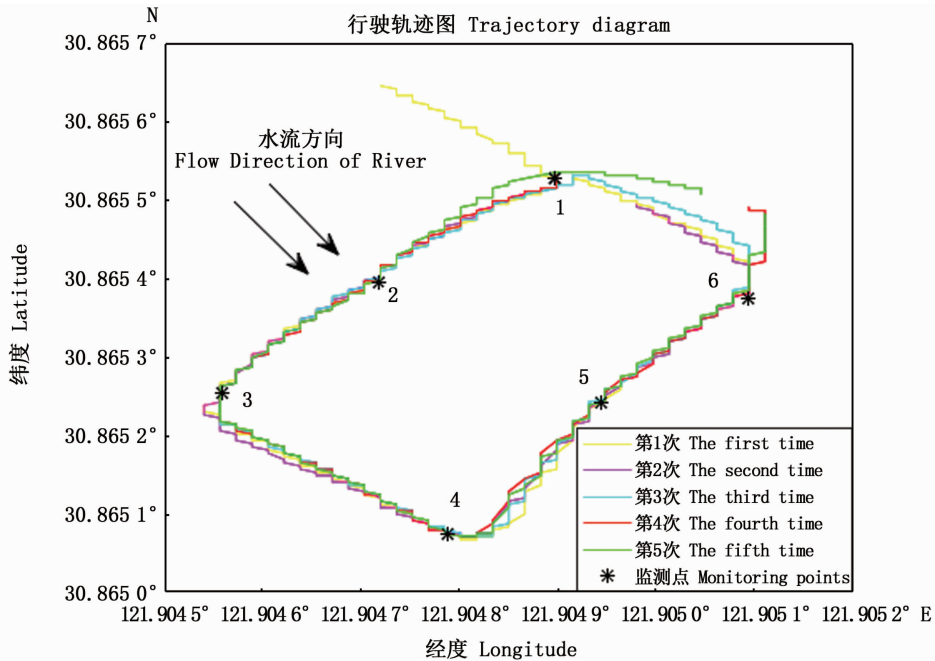


图 10 水质监测船行驶轨迹路线

Fig.10 Water quality monitoring boat track route

2.2 多参数水质监测系统验证试验

多参数水质传感器获取数据是本系统的关键环节之一,需对水质数据监测性能的可靠性进行评估。本试验采集上海海洋大学明湖水样进行测试,将水质传感器放入水样中,间隔 15 s 总计测试 90 s,实时获取回传数据,再对数据进行分析。获取数据情况如图 11 所示。

由图 11 可知,水温、pH、溶氧分别在 45、45、60 s 趋于稳定。经标准水质分析仪对水样进行分析,水样温度为 20.1 °C, pH 为 7.6,溶氧质量浓度为 9.1 mg/L,经对比,水温、pH 和溶氧的测量误差分别为 0.15%、0.26% 和 0.33%。误差较小,满足在线水质监测需求,由此,在水质船到达监测点后先停留 60 s,等待传感器稳定后再进行数据采集。

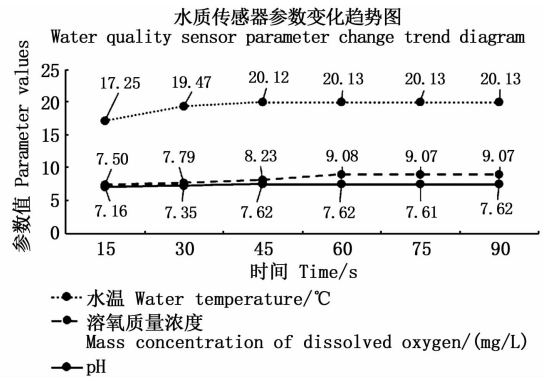


图 11 水质传感器参数变化趋势图

Fig.11 Variation trend of water quality sensor parameters

2.3 应用试验

在上海市浦东新区海基六路西侧芦潮引河对

水质船进行应用测试。预设6个水质监测点,水质监测船在到达每个监测点时会在当前点位停留,完成水质数据监测与水样采集工作。

表4为6个监测点所采集到的水质参数。在监测水域中,最高水温为30.75℃,最低水温为30.10℃,不同点位温差较小;pH最高为7.84,最低为7.17;溶氧质量浓度最高为6.44 mg/L,最低为6.32 mg/L,溶氧质量浓度较为稳定。在实际作业中,可以选取养殖水面的上风口、塘中心、下风口等有代表性的点位,结合不同深度具体分析水质情况。

表4 水质监测数据
Tab.4 Water quality monitoring data

监测点 Points	水温 Water temperature/℃	pH	溶氧质量浓度 Mass concentration of dissolved oxygen/(mg/L)
1	30.10	7.17	6.44
2	30.30	7.33	6.40
3	30.25	7.27	6.42
4	30.65	7.58	6.35
5	30.75	7.66	6.32
6	30.38	7.84	6.40

为保证所采水样的有效性,在进行采样作业之前做好器具清洗、贴好标签与密封工作^[24]。水样采集工作结束后,1~6号水样瓶中均完成各监测点水样的采集,水样满瓶且上部无气体残留,可在完成水域水质监测与采样任务后,归岸取出带回实验室进一步精细化分析,极大地减小了人工水样采集的工作量。

3 讨论

根据水产养殖领域水质监测的需要,设计了包含自主导航、水质实时监测与回传、水样自动采集功能的无人水质监测与采样船。船体航行状态性能试验表明,导航定位偏差量平均为1.003 m,最大不超过1.5 m,船体巡航路径稳定,监测点定位精度受水流和风影响较大。多参数水质监测系统验证试验表明,水质传感器可在开机后60 s稳定工作,所用AP-2000多参数水质参数精度满足水质监测需求,所开发的云终端实时监测系统工作稳定,可以实时回传水体的pH、温度、溶氧等传感器在线数据,实现了实时数据可视化。所设计水样采集系统采水效果良好,搭载了6只500 mL水样采集瓶,能够实现水下50 cm

精准抽取,满足实际水质监测与采集的应用需要,有效降低了水样采集的人工成本。

在现场应用中,所研发的无人水质监测与采样船弥补了传统水质采样监测中无法及时获取采样时水温、溶氧等易变信息,而水质实时监测无法获取监测点微生物、藻类等复杂水质信息的缺点,实现了水质实时监测与采样分析的一体化。船体定位精度较高,可对关键监测点精准位置进行多次数据采集,进而提升关键监测点水质数据分析的准确性。由于该船的自主巡航特性,养殖用户在实际使用时可以根据监测需求自行设定监测点,作业时可在单监测周期内实现固定时间间隔的多次采样,若以1 d为周期,可每天进行3~5次间隔水质监测,连续采样多个周期后能够基于不同的分析目的进行整体水域水质情况的系统性分析。

所设计水质监测与采样一体化无人船采用模块化设计,所采用船体材料、传感器成本等较低,可在对船体进行消毒后通过移塘操作实现全养殖区域多池塘的水质监测,塘均使用成本低。通过水质实时监测与水样采集的复合式工作,弥补了传统监测方式设备搭建周期长和人工成本高的问题,为水产养殖领域水质监测提供了一套可行方案,具有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] 蔡诗巍, 裴兆斌, 郭昕黎. 我国渔业治理体系和治理能力现代化研究[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(11): 62-66.
CAI S W, PEI Z B, GUO X L. Research on fishery governance system and governance capability modernization [J]. Ocean Development and Management, 2021, 38(11): 62-66.
- [2] 罗国芝. 水产养殖用水可重复利用性评估指标及相关标准分析[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(5): 748-755.
LUO G Z. The evaluation parameters and criteria of the reuse possibilities of aquaculture water [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(5): 748-755.
- [3] 尹宝全, 曹闪闪, 傅泽田, 等. 水产养殖水质检测与控制技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 1-13.
YIN B Q, CAO S S, FU Z T, et al. Review and trend analysis of water quality monitoring and control technology in aquaculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 1-13.
- [4] 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 J, ZHU Y F, CHEN L L, 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.
- [5] ZHANG M F, LI D L, WANG L Z, et al. Design and development of water quality monitoring system based on wireless sensor network in aquaculture [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture IV. Nanchang: Springer, 2010: 629-641.
- [6] CHEN J H, SUNG W T, LIN G Y. Automated monitoring system for the fish farm aquaculture environment [C]//2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Hong Kong, China: IEEE, 2015: 1161-1166.
- [7] RAJU K R S R, VARMA G H K. Knowledge based real time monitoring system for aquaculture using IoT [C]//2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference. Hyderabad: IEEE, 2017: 318-321.
- [8] RIVKIN B S. Unmanned ships: navigation and more [J]. *Gyroscope and Navigation*, 2021, 12(1): 96-108.
- [9] SHIPUNOV I, NYRKOV A, KATORIN Y, et al. On the issue of building sea convoys from unmanned ships [J]. *E3S Web of Conferences*, 2021, 244: 08013.
- [10] 叶章颖, 鲍伟君, 张丰登, 等. 多台转鼓式微滤机多模式控制系统设计与实验 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(3): 334-340.
- YE Z Y, BAO W J, ZHANG F D, et al. Design and experiment of multi-mode control system of multiple microscreen drum filters [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 334-340.
- [11] 张文杰. 基于深度学习的无人艇运动姿态预报 [D]. 上海: 上海大学, 2020: 11-12.
- ZHANG W J. Motion attitude prediction of unmanned surface vehicle based on deep learning [D]. Shanghai: Shanghai University, 2020: 11-12.
- [12] 李易珊. 云洲智能: 无人系统领航深蓝探索 [J]. *海洋与渔业*, 2018(8): 68-69.
- LI Y S. Yunzhou intelligence: unmanned system piloting deep blue exploration [J]. *Ocean and Fishery*, 2018(8): 68-69.
- [13] 路春晖, 东林, 付振楷, 等. 基于 LabVIEW 的无人监测船水质采样系统设计 [J]. *实验室研究与探索*, 2020, 39(2): 68-71, 107.
- LU C H, DONG L, FU Z K, et al. Design of water quality sampling system for unmanned monitoring ship based on LabVIEW [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2020, 39(2): 68-71, 107.
- [14] 田昌凤, 车轩, 刘兴国, 等. 池塘养殖沉积物收集装置的研制 [J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(1): 103-108.
- TIAN C F, CHE X, LIU X G, et al. Design of sediment collection device for pond culture [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(1): 103-108.
- [15] 王骏. 高性能船舶研究现状及发展趋势 [J]. *船舶物资与市场*, 2020(8): 7-9.
- WANG J. Research status and development trend of high performance ships [J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2020(8): 7-9.
- [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 Q S, CAO J R, ZHENG B, et al. Design and reliability test of paddle wheel driven shrimp pond autonomous navigation feeding boat [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 121-128.
- [17] 林焰, 于雁云, 陈明, 等. 船舶设计原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 13-30.
- LIN Y, YU Y Y, CHEN M, et al. The principles of ship design [M]. Beijing: Science Press, 2019: 13-30.
- [18] 岳兴华, 毛斌峰, 赵经玲, 等. 小水线面双体船结构有限元分析 [J]. *广东造船*, 2020, 39(2): 29-32.
- YUE X H, MAO B F, ZHAO J L, et al. Finite element analysis of structural strength for SWATH [J]. *Guangdong Shipbuilding*, 2020, 39(2): 29-32.
- [19] 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 P, ZHANG L Z, CHEN L L, 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.
- [20] 胡庆松, 郑波, 曹佳瑞, 等. 船载投饵装置平衡抖料系统设计及试验 [J]. *上海海洋大学学报*, 2020, 29(6): 928-937.
- HU Q S, ZHENG B, CAO J R, 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.
- [21] 李林. 基于阿里云的智慧粮仓监测系统的设计与实现 [J]. *南方农机*, 2021, 52(19): 140-142.
- LI L. Design and implementation of intelligent granary monitoring system based on Ali Cloud [J]. *South Agricultural Machinery*, 2021, 52(19): 140-142.
- [22] DUPONT C, WUSSAH A, MALO S, et al. Low-Cost IoT solutions for fish farmers in Africa [C]//2018 IST-Africa Week Conference (IST-Africa). Gaborone: IEEE, 2018: 1-8.
- [23] 卫宇. 考虑地球曲率情况下两点距离问题的求解 [J]. *航空兵器*, 2008(3): 7-12.
- WEI Y. Solution of distance between two points considering curvature of the earth [J]. *Aero Weaponry*, 2008(3): 7-12.
- [24] 程清清. 环境监测水质现场采样技术要点分析 [J]. *低碳世界*, 2021, 11(9): 17-18.
- CHENG Q Q. Analysis on key points of sampling technology for environmental monitoring water quality [J]. *Low Carbon World*, 2021, 11(9): 17-18.

Design and experiment of water quality monitoring and sampling integrated unmanned boat

LI Jun, CHEN Pukun, CHEN Leilei, ZHANG Lizhen, HU Qingsong

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

Abstract: Favourable water quality is the basis of pond healthy aquaculture. In order to realize the automation of monitoring and sampling, an integrated unmanned water quality monitoring and sampling boat was designed and its performance test was carried out. Considering the requirements of water quality monitoring and sampling, the hull structure was designed, and the layout of the functional areas of water quality sensor, sampling system, power supply, control box, and water sample collection bottles in the cabin was designed considering the load bearing and stability. The autonomous cruise control system was developed based on the differential twin-propellers driven model and the integration of GPS and attitude sensor. The water sampling control system and water quality monitoring data platform were integrated with Internet of Things technology. The comprehensive test results showed that the trajectory of unmanned boat was accurate, the maximum deviation of monitoring point was 1.49 m, the minimum deviation was 0.39 m, and the average deviation was 1.003 m. The water quality monitoring and sampling function was stable, and the pH value, water temperature and dissolved oxygen of water could be returned in real time. Six 500 mL water sampling bottles could collect water samples of underwater 50 cm accurately, which is in line with national standards. The results provide a low-cost and reliable implementation scheme for the whole surface water quality monitoring of aquaculture.

Key words: water quality monitoring; water sampling; unmanned boat; autonomous navigation