

文章编号: 1674-5566(2023)05-0953-14

DOI: 10.12024/jsou.20230604232

渔业养殖监测用 AUV 及其控制系统

吴诗昊¹, 周悦¹, 敖琪¹, 施迅¹, 邢博闻¹, 郭威^{2,3}

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对当前渔业养殖移动监测装备续航能力低、成本高、难以普遍应用的现状, 提出并研制了一台小型便携式渔业养殖移动与定点监测用 AUV。该 AUV 采用“类海豹式”作业模式和模块化结构, 用常规 GNSS 代替昂贵的水下惯导系统, 3 个主要舱体呈“品”字型分布以增加平稳性, 并以步进电机控制活塞改变外置油囊体积来实现无动力潜浮。以低功耗 STM32F407 芯片为控制核心, 采用 FreeRTOS 嵌入式实时操作系统和 LabVIEW 开发环境, 设计与开发 AUV 水面自主巡航和动态避障系统、数据图像采集与通信系统和岸基智慧渔业大数据人机交互界面。能耗分析和仿真实验结果分别表明该 AUV 能耗低, 当携带锂电池电量为 5.184 kWh 时, 续航时间可达约 77 h, 且能够实现自主巡航。样机试验表明能够与岸基上位机进行通信并有效采集水域水质信息及水下视频图像。渔业养殖监测用 AUV 搭载传感器灵活、续航时间长、功耗小、成本低、易维护和升级, 能够满足不同类型渔业养殖的立体化移动和长期定点监测需求。

关键词: 渔业养殖监测用 AUV; 类海豹式作业模式; 模块化结构; 无动力潜浮; 低成本; 低能耗

中图分类号: TP 242.6

文献标志码: A

我国是世界第一渔业养殖大国, 渔业养殖产量已连续 33 年位居全球首位。国务院农业农村部指出, “十四五”时期是渔业高质量发展的重要战略机遇期, 到 2025 年我国将基本实现渔业现代化^[1-2]。伴随渔业养殖的迅速发展, 现代化养殖监测装备研制也备受瞩目^[3]。

现代化渔业养殖监测装备主要分为定点监测和移动监测两大类。定点监测^[4]以自动监测站和网箱监测为主, 适用于长期定点观测。移动监测以无人船和遥控水下机器人 ROV 为主, 其中无人船^[5-6]拽式监测难以实现不同深度的精准立体探测; ROV 受缆绳制约, 探测范围有限。无缆自主水下机器人(AUV)由于具有作业范围广、操作灵活等特点, 在大范围移动监测领域具有较大应用前景。AUV 多用于海底地形勘测、海洋资源探查等领域, 如美国 WHOI 研究所研发的 REMUS AUV^[7]、中国科学院沈阳自动化研究所研发的潜龙系列 AUV^[8]。近年来, 随着渔业的快速发展,

用于近远海渔业监测的 AUV 受到广泛关注。瑞士 Hydromea 公司发布的 Vertex AUV^[9] 具有定深航行能力和 6 h 续航, 用于海洋水体要素测量。西班牙 Girona 大学研制的 Sparus II AUV^[9] 面向浅海地区渔业监测, 搭载 5 个推进器, 运动性能出色。国内西北工业大学和天和防务公司^[10] 研制的“中国无影”系列 AUV 可执行渔业勘测、水质测量等任务, 并完成航行器组网编队的初步应用。中科探海(苏州)海洋科技有限责任公司^[11] 发布的精灵 M120 AUV 搭载小型声学载荷实现渔业探查, 续航 12 h。但这类传统 AUV 由于搭载大能耗的多推进器和水下惯导系统, 续航时间较短, 研制和运营成本较高, 难以在渔业养殖中普适化应用。

针对浅水域渔业养殖低成本、低能耗、立体移动和定点监测需求, 本文从作业模式、模块化结构、控制系统、水面自主巡航和人机交互界面等方面进行了“类海豹式”作业模式的渔业养殖监测用 AUV 设计与样机实现。

收稿日期: 2023-06-15

修回日期: 2023-08-21

基金项目: 上海市 2022 年度科技创新行动计划(22010502200)

作者简介: 吴诗昊(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业工程装备。E-mail: wsh2321@sina.com

通信作者: 周悦, E-mail: y-zhou@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>

1 材料与方法

1.1 AUV作业模式及结构

1.1.1 作业模式

传统AUV为实现水下导航定位功能,大多采用成本较高的水下惯导系统,并通过传输速率较低的水声通信技术实现与母船上位机的通信^[12]。不同于地面的平面化运动,AUV在水下立体空间中的运动具有6个自由度,是1个强耦合的非线性系统。AUV通过控制大能耗的多自由度推进器系统完成水下运动,由于靠自身携带电池供电,限制了AUV的续航能力。因此,高成本、续航能力弱限制了AUV在渔业养殖监测领域的应用。

不同于鱼类依靠腮部呼吸,海豹是一种依靠肺部呼吸的水生动物。海豹无法在水中呼吸,需上浮至水面,换气游行后再潜入水下,周而复始。基于海豹的呼吸特性,本文提出了一种“类海豹式”的渔业养殖监测用AUV作业模式。

“类海豹式”作业模式将AUV的运动分解为水面航行运动和水下潜浮运动。AUV首先通过水面航行运动前往指定监测点,此时AUV上舱体部分略露出水面,保证安装在舱体内侧上壁的全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)贴片天线接收位置信息。抵达指定监测点后进行无动力下潜,执行水下坐底定点监测作业,该监测点作业结束后,AUV上浮至水面,经水面航行前往下一个监测点,以此重复,完成不同作业点和水面的监测任务。作业期间,AUV上舱体中电控模块通过水密电缆与水面通信浮标相连,进而与岸基上位机建立实时通信,保证水面水下监测和控制的实时性。

水下潜浮运动时,区别于传统AUV依靠垂直推进器驱动,本文设计AUV以步进电机控制活塞改变外置油囊体积为主和垂直推进器为辅控制AUV无动力潜浮,降低系统功耗,提高AUV续航能力。AUV下潜时,步进电机控制活塞吸油使外置油囊体积减小,减小浮力,AUV开始无动力下潜至坐底。反之,进行上浮运动时,步进电机控制活塞排油使外置油囊体积增大,增加浮力。在下潜坐底后,AUV如需调整监测角度来提高对水底水产动物的监测效果,或者需克服水底黏土吸力上浮运动时,可短时间运行垂直推进器提供额外上浮动力。

“类海豹式”作业模式在保证AUV能够执行长时间、大范围、立体化移动和定点监测任务的同时,规避了采用昂贵水下惯导系统和多自由度推进器系统存在的成本高、续航能力弱、通信速率低和实时性差等问题,极大降低了渔业养殖监测用AUV的研制和运营成本。

1.1.2 结构

为保证AUV在水中运动及坐底定点监测时姿态的平稳性,本文设计AUV为上轻下重的“品”字型结构,主要包括T型支架、上舱体、2个结构相同的下舱体、视频图像采集舱体和水面通信浮标,如图1所示。

考虑到AUV长时间水下作业的特殊环境,T型支架采用耐腐蚀、使用寿命长的铝合金材质。其作为AUV整体支撑框架,既为AUV整体结构的紧固提供保障,又便于相关水质传感器搭载。

3个鱼雷形舱体利用卡箍固定在T型支架上。上舱体主要内置密封的电控模块、照明模块以及由步进电机、油囊和垂直推进器组成的浮力调节模块,质量小,以产生正浮力。2个下舱体主要内置电池模块提供电源,又因质量大会产生负浮力。3个舱体呈“品”字型分布,浮心和重心之间垂直距离大,上轻下重,以保持AUV航行姿态平稳。这种“品”字型结构还能保证AUV下潜坐底或回收后均能平稳放置,无须专用支架。安装在下舱体艏部的2个水下推进器组成AUV推进系统。上舱体内基于模块化设计思想,各模块间通过密封法兰盘连接,如更替或维修某个功能模块,只需单独拆卸该模块,可有效降低运营与维护成本。

视频图像采集舱体利用卡箍固定在上舱体上方。当AUV执行水面任务时,视频图像采集舱体露出水面,能够实现对水面环境的实时监测。当AUV执行水下任务时,视频图像采集模块浸没在水中,AUV根据光线强弱,通过照明模块提供不同亮度的光源,能够实现对水产动物生长情况的实时监测。

水面通信浮标内置有4G、LoRa和GNSS天线。具有微正浮力的水密电缆一端连接水面通信浮标,另一端穿过AUV上舱体艏部与电控模块相连,以保证AUV执行水下任务时能与岸基上位机建立实时通信以及AUV执行水下作业时接收GNSS位置信息。水密电缆长度可根据具体水域

的水深来定制,本文样机设计为5 m。另外,水面通信浮标还能够发挥定位信标作用,即当AUV出现故障导致无法自主上浮时,操作人员可观察水面通信浮标位置,进行人工打捞,降低AUV丢失风险。值得说明的是,由于水面自主巡航及动态

避障时水面通信浮标与AUV主体存在相对位移,依据浮标内定位天线获取的定位信息实现自主巡航及避障误差较大,因此上舱体内侧上壁还安装了GNSS贴片天线,与水面通信浮标内置GNSS天线构成冗余设计。

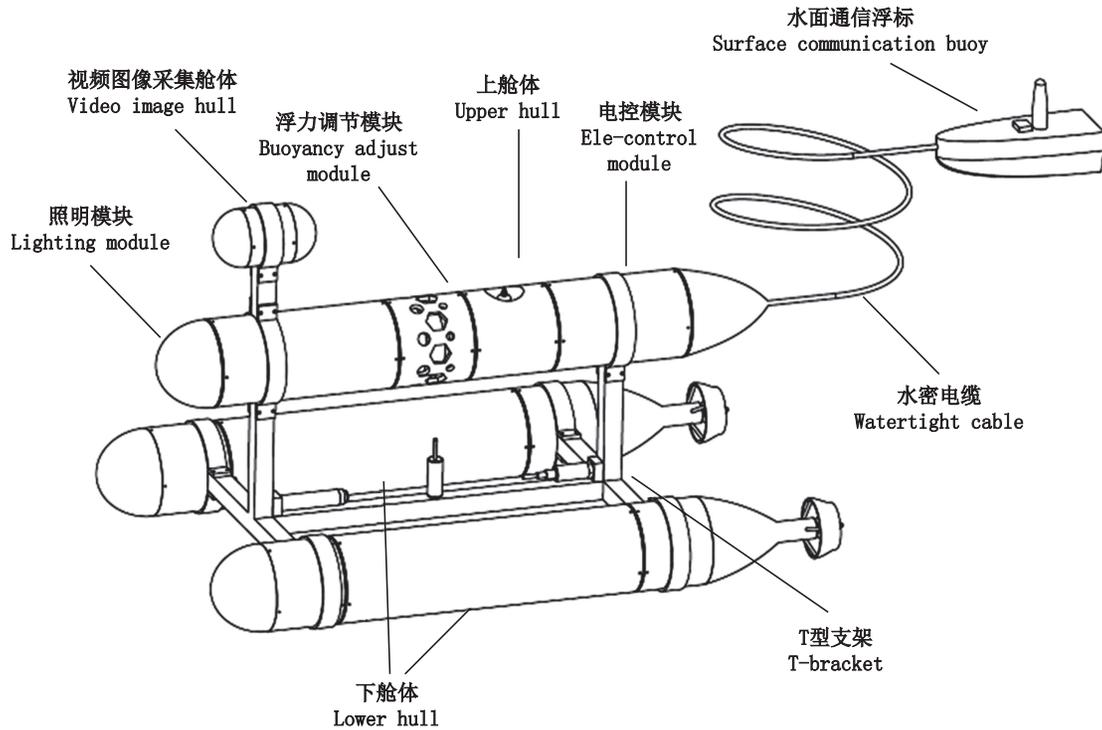


图1 渔业养殖监测用AUV主体结构

Fig. 1 Major structure of the AUV for aquaculture monitoring

考虑到AUV的3个舱内模块尺寸、重浮力差调节的实现以及AUV水面运动时水动力优化^[13],本文设计的渔业养殖监测用AUV主要参数如表1所示。

由于渔业养殖监测用AUV在水中长时间工作,其水密性能要求较高。为保证AUV在水中工作时的水密安全性,本文进行了水密设计:充电口设计是水下装置设计时需考虑的问题。无线充电方式是解决AUV充电口水密问题的有效解决方案,但目前无线充电技术尚存在充电效率低、价格昂贵、研制成本高等问题^[14]。本文设计AUV在传统有线充电的基础上,通过水密电缆连接外置防水插座件的方式优化了充电口水密设计。电源模块充电端通过线径仅5 mm的水密电缆穿过舱体,与外置的LD12航空防水接插件连接,作为充电接口。该设计仅需在舱体与水密电缆的接触处开小孔,尽可能地缩小了传统充电插座所需的开孔尺寸,有效提高了AUV的水密安全性。

表1 渔业养殖监测用AUV主要参数

Tab. 1 Main structural parameters of the AUV for aquaculture monitoring

项目 Item	参数 Parameter
主框架尺寸 Main frame dimensions	1 150 mm×650 mm×550 mm
水面通信浮标尺寸 Surface communication buoy dimensions	350 mm×130 mm×255 mm
上/下舱体直径 Upper/Lower hull diameter	130 mm
质量 Mass	30 kg
水密电缆长度 Watertight cable length	5 m
控制方式 Control mode	手动/自主 Manual/Autonomous
通信范围 Communication range	4G基站覆盖区 4G base station coverage area
能源 Energy	自携带锂电池 Self-carrying lithium battery

本文设计AUV在下舱体电源模块内安装有磁力开关,通过磁铁控制磁力开关的吸合与断

开,从而实现非接触式控制AUV的启动和关闭,解决电源开关水密问题。此外,舱体各模块之间通过密封法兰盘进行密封紧固连接、上舱体与左右下舱体以及浮标之间的连线采用密封舱穿线螺栓搭配环氧树脂AB胶灌封处理等设计,均可保证渔业养殖监测用AUV水密性能。

1.2 控制系统设计

渔业养殖监测用AUV控制系统主要为实现AUV的立体化运动控制、监测数据采集与传输和上位机显控,即主控单元需采集各传感器数据信

息,并将数据和图像信息进行分析处理后实时上报至岸基上位机;岸基上位机需对下位机下达控制及查询指令;基于双舵推进器差速模型融合GNSS和姿态传感器,对AUV进行自主巡航和动态避障控制。

1.2.1 系统硬件设计

根据渔业养殖监测用AUV功能需求,将AUV控制系统分为主控单元、数据采集单元、通信单元、运动控制单元和电源单元等五大单元。控制系统硬件架构图如图2所示。

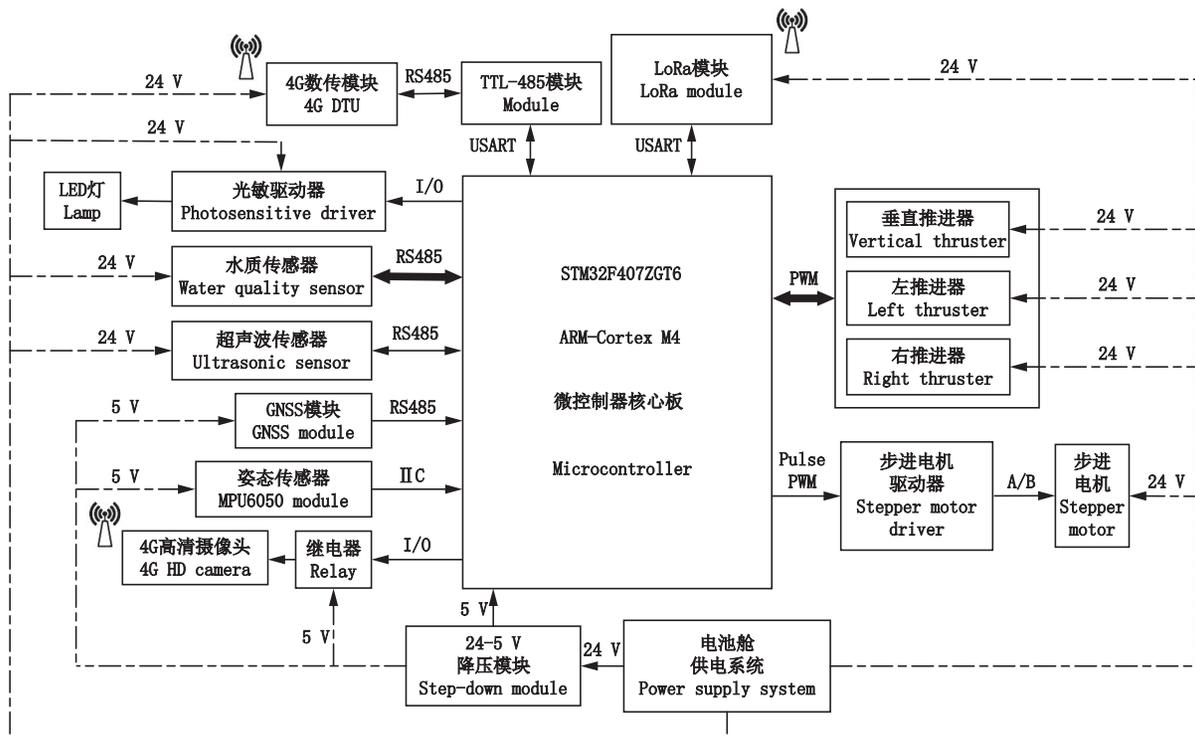


图2 控制系统硬件架构图
Fig. 2 Architecture diagram of control system hardware

主控单元用于运动控制、处理和传输采集到的数据信息,选用高性能、低能耗、外设资源丰富的STM32F407ZGT6作为主控芯片,并搭载FreeRTOS嵌入式实时操作系统。

数据采集单元包括GNSS、姿态、水质、超声波和视频图像采集等模块及外围电路。由于位置信息和姿态信息是AUV自主巡航时的关键数据,选用2个集成6种卫星导航系统的WTGPS-M多模定位模块和价格低、性能可靠的MPU6050芯片。养殖池塘水体的温度、pH和溶氧量是影响水产动物生长的3个关键参数,在满足渔业养殖需求精度的基础上进行性价比分析,选用pH传感

器RMD-ISDC2M12、溶解氧传感器RMD-IDSY10和温盐深传感器CTD-206A。针对水面障碍物探测,超声波传感器较红外传感器具有精度高和不易受环境干扰的优势,选用体积小、防水深度可达10m的超声波传感器L041M4W。为减轻主控芯片信号传输负担、提高系统实时处理能力,选用C1HC网络高清摄像头,视频图像数据经过通信单元的4G DTU再经水面通信浮标直接上传至岸基上位机。

通信单元包括LoRa无线通信、4G无线通信、RS485通信和IIC总线通信。LoRa和4G无线通信负责主控板与岸基上位机之间的远程通信。

LoRa无线通信功耗低、抗干扰能力强且使用免费,但其穿墙能力弱、传输距离受限,无法实现超远程通信。4G无线通信传输性能稳定,岸基上位机在4G基站覆盖范围内均可与主控板建立实时通信,但其功耗相对较高且需消耗4G流量费用。为此,本文设计LoRa与4G无线通信构成双冗余组合通信,可根据不同应用场合切换合适的无线通信模式,选用E22-400T30D LoRa模块和USR-G806s 4G DTU。RS485和IIC通信负责将水质数据、GNSS位置数据、超声波障碍物数据和姿态数据传送到主控板。

运动控制单元用于控制AUV水面航行运动和水下潜浮运动。主控芯片根据期望转速和实际转速间的偏差值,通过控制算法计算出PWM驱动信号并下发至电子调速器,驱动艉部推进器实现正反转和不同转速。考虑到AUV运动需克服水阻力和航速要求,艉部推进器和垂直推进器均选用最大推力为3.5 kg的ROV-360水下推进器,该推进器自带双向电子调速器。根据改变外置油囊体积的推力要求,选用静力矩为1.176 N·m的57BYGH301步进电机。

电源单元为系统提供独立能源供电,对电池的容量和尺寸都有较高要求^[15],考虑渔业养殖需求,选用18个输出电压24 V、容量12 Ah的18 650锂电池包。为满足控制系统内各模块的不同电压需求,选用WG8-50S503降压模块,将24 V直流电降至5 V。根据锂电池剩余电量与电压近似成正比特性,设计通过检测锂电池电压来判断锂电池剩余电量,选用IM1253B测量模块进行能量管理。

1.2.2 水面自主巡航设计

考虑到AUV执行长时间监测任务时耗时长、人员成本高,设计AUV采用手动操纵模式和自主监测模式相结合的方案。自主监测模式中,AUV能够根据作业任务要求自主实现点到点的水面航行、水下潜浮和水下监测。基于双艉推进器差速模型,结合GNSS及相关传感器,开发了AUV水面自主巡航及动态避障系统。

双艉推进器差速模型类似汽车转向的差速

器原理^[16],通过控制双艉推进器的正反转和不同转速来控制AUV的整体航向和航速,模型如图3所示。

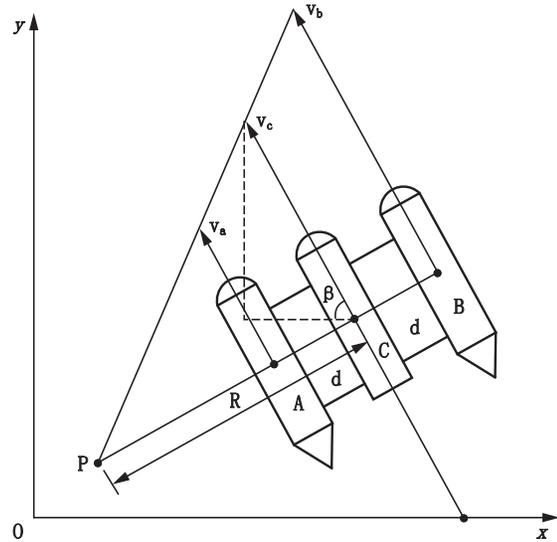


图3 双艉推进器差速模型

Fig. 3 Double stern thrusters differential model

AUV整体结构以点C为中心,速度为 v_c 。对称式艉部推进器固定在AUV左右下舱体艉部,提供轴向推力。点A、点B分别为左右下舱体的中心,分速度为 v_a 、 v_b 。由于左右下舱体对称分布,故点A、点B到点C的距离相等,设距离为 d 。点P为AUV运动的速度瞬心。点P到点C的距离为转动半径 R 。速度 v_c 与水平轴 x 之间的夹角为 β ,规定逆时针方向为正。AUV转艉角速度为 ω 。

当AUV逆时针转动时,有:

$$\begin{cases} v_a = (R - d)\omega \\ v_b = (R + d)\omega \\ v_c = \frac{v_a + v_b}{2} \end{cases} \quad (1)$$

可得:

$$\begin{cases} \omega = \frac{v_b - v_a}{2d} \\ R = \frac{v_a + v_b}{v_b - v_a} \end{cases} \quad (2)$$

此时,AUV绕速度瞬心P做圆弧转艉运动,由此可得AUV运动学方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{\beta} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 \\ \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 \\ \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2d} & \frac{1}{2d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\beta}{2} & \frac{\cos\beta}{2} \\ \frac{\sin\beta}{2} & \frac{\sin\beta}{2} \\ \frac{1}{2d} & \frac{1}{2d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据以上运动学方程,通过已知的距离 d ,由姿态传感器获取角度 β 以及PWM信号控制的双艃推进器转速可控制AUV水面任意航速及任意方向的转艃运动。

考虑到水域环境中存在风力、水流及水面障碍物等因素干扰,AUV执行水面自主巡航任务时可能会偏离最初理想航迹,航迹模型如图4所示。AUV起点为点 $S(x_s, y_s)$,目标点为点 $T(x_t, y_t)$,当前点为点 $F(x_f, y_f)$ 。点 S 到点 T 为最初理论航迹 L_1 ,点 F 到点 T 为当前理论航迹 L_2 ,当前实际航迹为 L_3 。最初理论航迹 L_1 与 x 轴夹角为 μ ,点 S 到点 F 连线与 x 轴夹角为 ρ ,当前理论航迹 L_2 与 x 轴夹角为理论航向角 γ ,当前实际航迹 L_3 与 x 轴夹角为实际航向角 α ,当前理论航迹 L_2 与当前实际航迹 L_3 夹角为偏航角 θ 。当前点 F 到最初理论航迹 L_1 的偏航垂直距离为 m 。

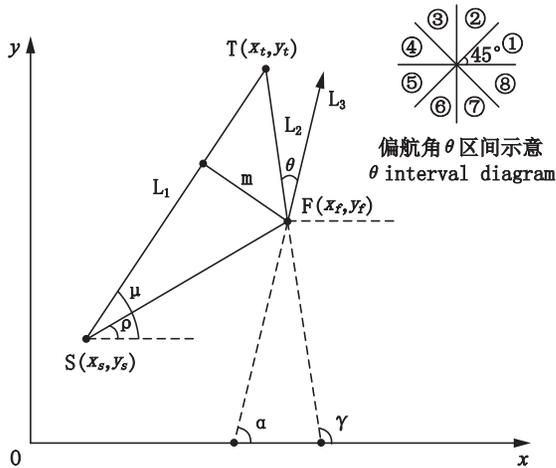


图4 AUV航迹模型
Fig. 4 Track model of AUV

根据已知条件有:

$$\begin{cases} \mu = \arctan\left(\frac{y_t - y_s}{x_t - x_s}\right) \\ \rho = \arctan\left(\frac{y_f - y_s}{x_f - x_s}\right) \\ m = \sqrt{(x_f - x_s)^2 + (y_f - y_s)^2} \times \sin(\mu - \rho) \end{cases} \quad (4)$$

由此可得偏航垂直距离 m :

$$m = \sqrt{(x_f - x_s)^2 + (y_f - y_s)^2} \times \sin\left[\arctan\left(\frac{y_t - y_s}{x_t - x_s}\right) - \arctan\left(\frac{y_f - y_s}{x_f - x_s}\right)\right] \quad (5)$$

偏航角 θ 可由如下公式得出:

$$\begin{cases} \gamma = \pi - \arctan\left(\frac{y_f - y_s}{x_f - x_s}\right) \\ \theta = \gamma - \alpha \end{cases} \quad (6)$$

AUV由手动操纵切换到自主巡航后,在上位机界面设置起始点 S 和目标点 T ,并将这两点坐标下发至下位机主控单元。同时,GNSS模块和姿态传感器获取当前点 F 的位置坐标以及AUV当前航速、航向角 α 等航迹信息并发送至主控单元。主控单元通过上述航迹模型计算出偏航角 θ 和偏航垂直距离 m 。AUV驱动艃部推进器,通过双艃推进器差速调节法控制航速和偏航角。对于渔业养殖监测,自主巡航的轨迹精度不是首要考虑因素,若选用偏航角无极调节设计,势必频繁调节偏航角,从而降低艃部推进器使用寿命、提高运营成本。因此,本文以 45° 为1个区间,将偏航角 θ 划分为8个区间,如图4右上角所示。根据偏航角所在区间,偏航区间越高,则主控单元下发的调节强度越大,逐区间调节使偏航角 θ 最终趋近于 0° 。以AUV当前航速为参考,计算偏差范围内最大垂直距离 m_{max} 。当偏航垂直距离 m 大于 m_{max} 时,主控单元判定最初理论航迹失效,以当前点 F 为新起点,重新规划航迹。直至AUV到达目标点 T ,本次自主巡航结束。

由于养殖池塘水面可能存在各种类型障碍物,如人工浮标、水生植物以及漂浮的轻量垃圾等,AUV在点对点自主巡航时需要对航迹上的障碍物进行规避。对于较大且位置固定的障碍物,可在卫星地图上直接标注。针对障碍物较小、动态障碍物或地图更新不及时等情况,则需对AUV进行动态避障控制。

AUV搭载3个超声波传感器作为障碍物检测装置,均安装于上舱体上方的视频图像采集舱体内。考虑L041M4W超声波传感器测量角度为 50° ,1个超声波传感器安装角度为舱体轴向正前方,其余2个分别以 30° 角的间距安装在第一个超声波传感器的左右位置,从而达到 110° 的探测范围,3个传感器协同采集障碍物数据并传输至主控单元进行处理。AUV执行避障任务时,为保证航行安全,AUV根据当前航速及超声波传感器探测距离确定获取探测数据的间隔时间和安全距离。检测到障碍物后,主控单元根据障碍物大小和距离,通过双艃推进器差速法控制AUV转艃规避,实时调节航向角确保避障成功。AUV水面自主巡航设计工作流程示意图,如图5所示。

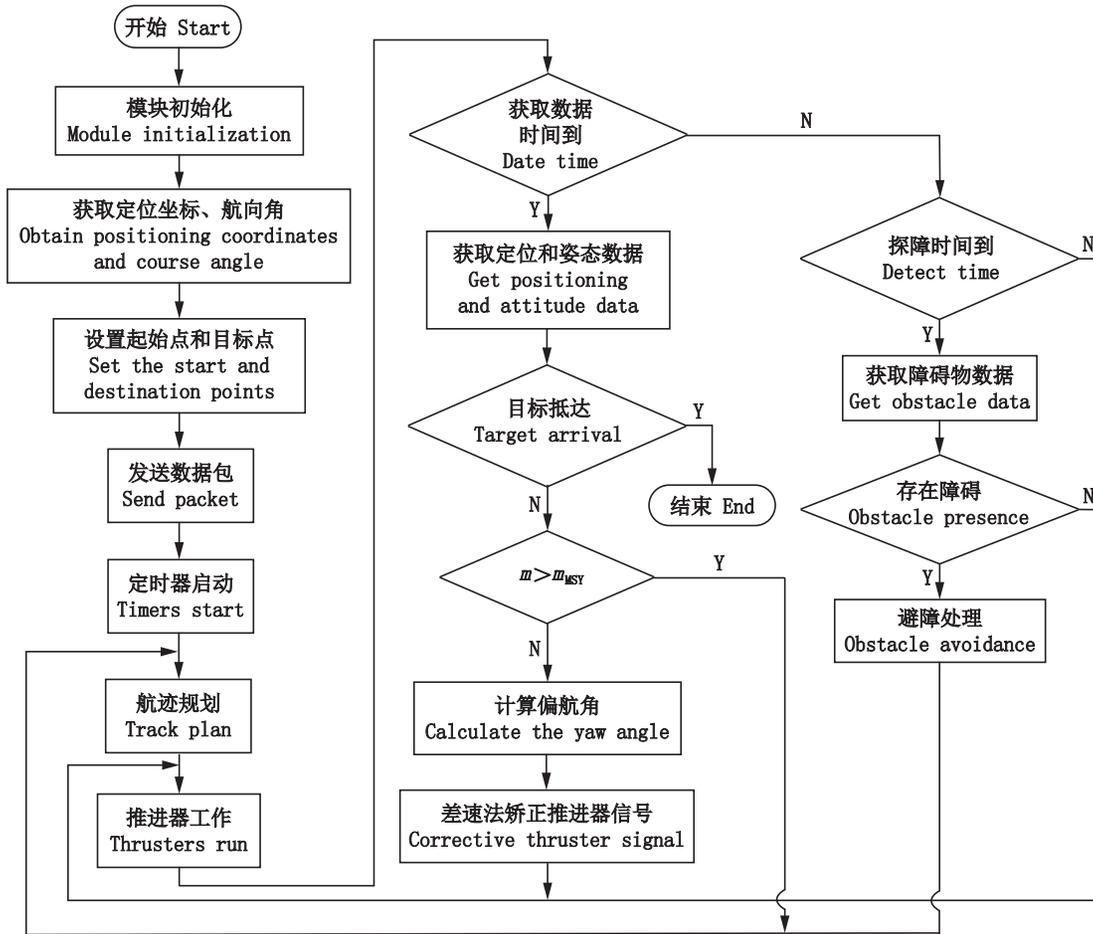


图5 AUV水面自主巡航设计工作流程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of AUV surface autonomous cruise design workflow

1.3 软件设计

1.3.1 下位机软件设计

下位机软件采用多任务实时调度的FreeRTOS嵌入式操作系统设计。根据渔业养殖监测用AUV实际作业需求分配4个运行任务,分别为初始化任务、数据采集任务、运动控制任务和通信任务。多任务功能协调工作,可提高控制系统的实时性和可靠性,下位机软件架构如图6所示。

初始化任务用于完成控制系统的初始化配置,主要包括系统时钟初始化、各GPIO口初始配置,通过xTaskCreate()函数创建数据采集、运动控制和通信任务并进入挂起态。

数据采集任务用于采集各传感器测得的数据。鉴于一般养殖池塘水质变化不频繁^[17],为尽可能减小功耗、提高续航能力,根据养殖监测实际需求^[17],设计每30秒采集1次水质数据,每6次计算1次平均值后主动上报至岸基上位机更新显示及存储。岸基上位机也可主动下发查询命令,

下位机接收到查询命令后立即上报最近1次水质数据。如采集数据出现异常,则及时通知岸基上位机操作人员进行异常处理。

运动控制任务用于控制AUV的航行和潜浮运动,手动操纵模式下通过岸基上位机下达控制指令完成,自主监测模式下通过自主巡航和避障系统完成。运动控制任务与岸基上位机之间采用应答响应机制交互。运动控制任务工作流程如图7所示。

通信任务主要用于实现下位机和岸基上位机之间的通信,主要包括LoRa和4G无线通信。两种通信方式均采用标准的Modbus RTU通信协议。系统初始化后,主控板在线等待USART接收中断函数。岸基上位机下发指令后,触发USART接收中断函数,通知通信任务。如通信任务此时尚未就绪或未运行则立即退出中断,进入任务调度使通信任务获得控制权,从而根据通信协议解析报文控制各从机设备,如水质传感器、艏部推进器等。

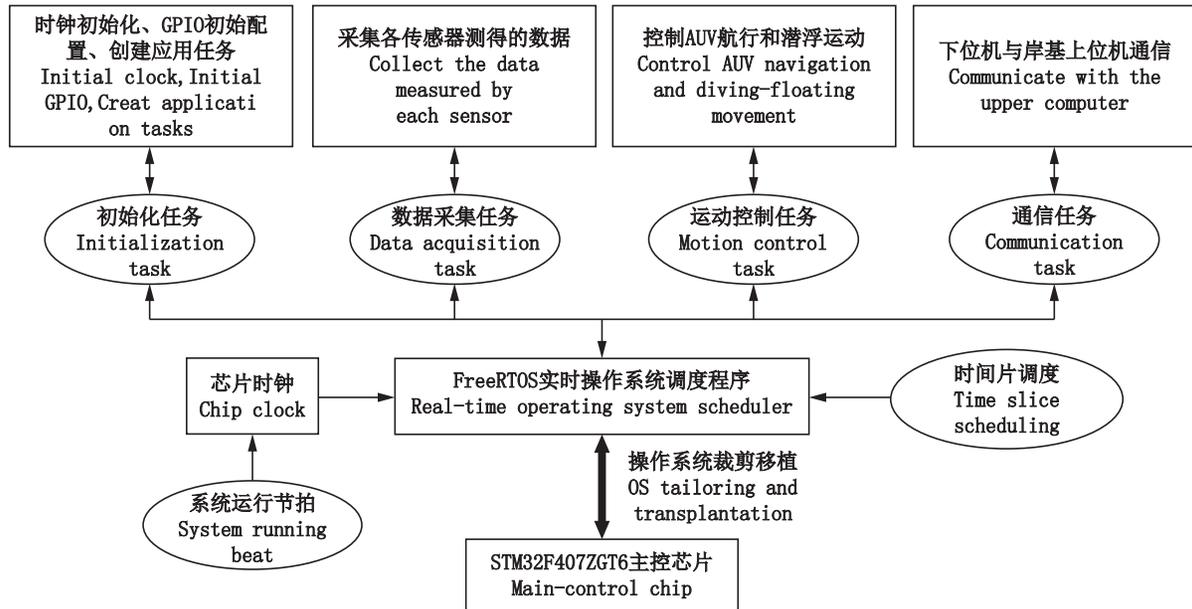


图6 下位机软件架构图

Fig. 6 Lower computer software architecture diagram

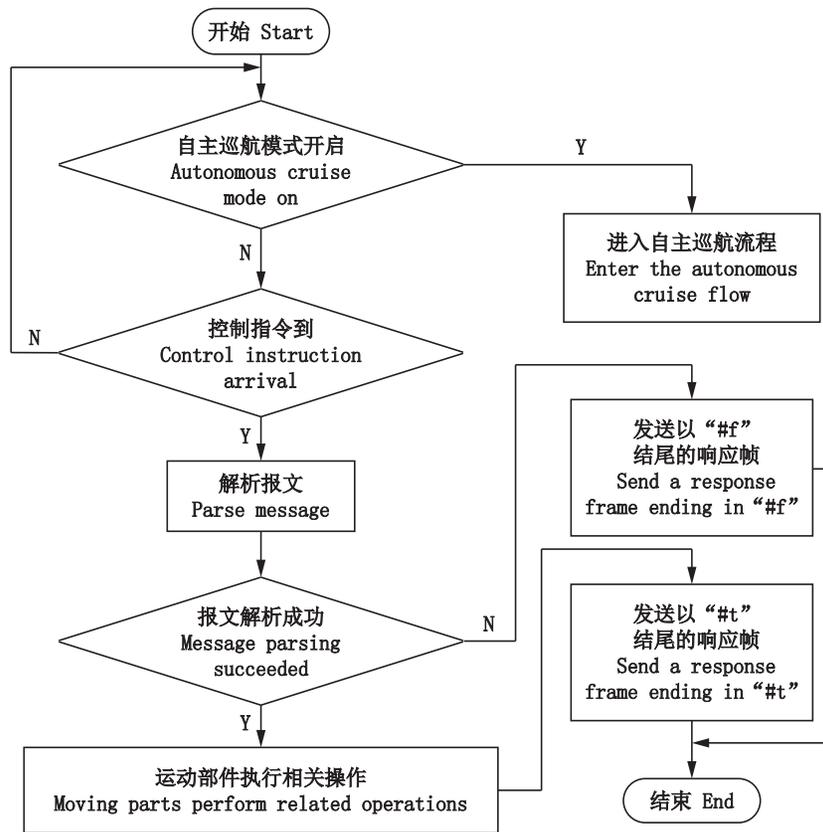


图7 运动控制工作流程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of motion control workflow

1.3.2 人机交互界面设计

渔业养殖监测用AUV岸基人机交互界面基于NI公司的LabVIEW程序开发环境设计。为增强人机交互友好性及操作便捷性,基于模块化设

计理念设计1个主界面和3个分界面:运动控制界面、数据监测界面、数据存储界面。

设计基于多个AUV集群组网的智慧渔业大数据人机交互界面。该界面能够集中显示和分

析系统覆盖的AUV集群信息,操作人员可根据大数据分析结果,找到数据之间的内在联系,避免形成数据孤岛,推动渔业向智能化养殖方向发展。人机交互界面软件架构如图8所示。

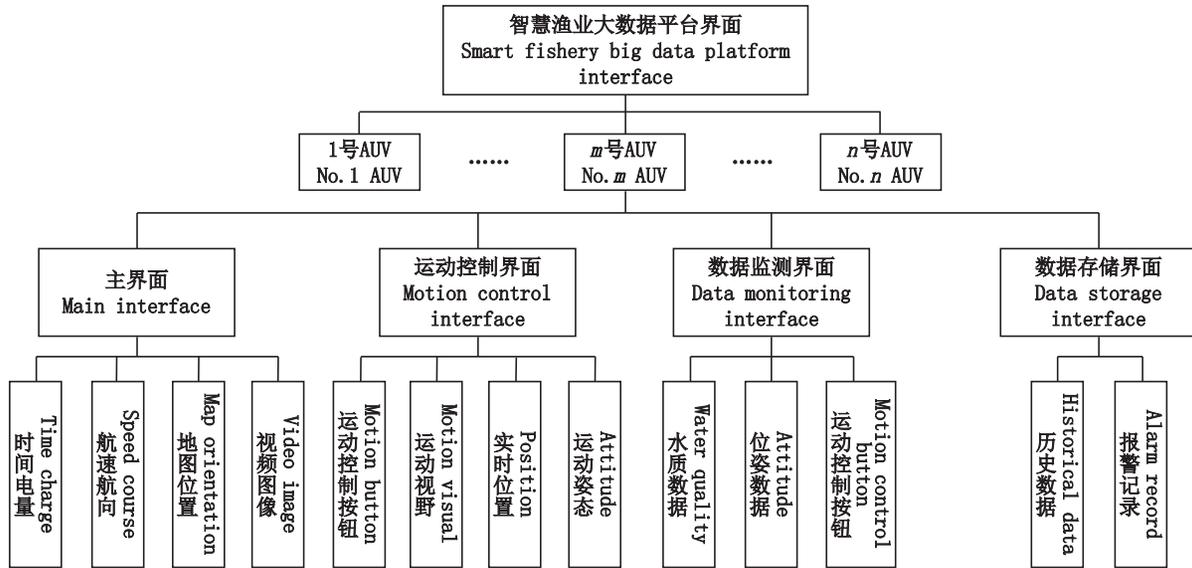


图8 人机交互界面软件架构

Fig. 8 Software architecture of human-computer interaction interface

2 结果与分析

2.1 AUV能耗分析

采用“类海豹式”作业模式,不仅降低成本,而且降低能耗。根据养殖监测需求,将AUV从一个监测点出发,移动监测至下一监测点,执行坐

底监测任务,至浮出水面,构成1个作业周期 T ,包括水面直航、下潜、坐底和上浮等4个阶段,对应时间分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 ,如图9所示。其中, t_{sm} 为潜浮运动时步进电机工作时间, t_{vt1} 和 t_{vt2} 分别为坐底监测期间和上浮初期垂直推进器提供辅助动力时间。

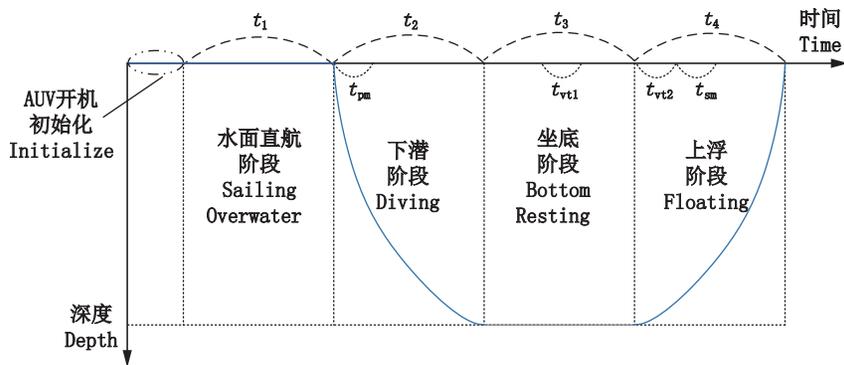


图9 AUV单作业周期示意图

Fig. 9 Schematic diagram of AUV single operation cycle

AUV水面直航时,因主舱体基本处于水面以下,故忽略风阻等影响,此时能耗主要用于克服水阻力,其中水阻力与AUV航速的平方成正比。考虑到实际养殖监测场景中航速要求,本文以1 m/s航速进行分析,AUV系统主要能耗器件参数如表2所示。

由表2可知,AUV系统能耗主要来自双艏推

进器、垂直推进器和步进电机等运动部件,其中步进电机仅吸排油时转动10 s,耗电量小。为方便计算,以5 m深的养殖池塘为参考,在符合养殖监测需求的前提下,设定1个作业周期 T 内 t_1 为600 s, t_2 和 t_4 均为180 s, t_3 为2 400 s, t_{sm} 为10 s, t_{vt1} 为20 s, t_{vt2} 为5 s。假设在整个作业周期内均进行监测作业,各阶段系统能耗:

$$\begin{cases} W_{so} = (P_{cc} + P_d + P_{lt} + P_{rt}) \cdot t_1 = 65.83 \text{ Wh} \\ W_{dv} = (P_{cc} + P_d) \cdot t_2 + P_{sm} t_{sm} = 0.63 \text{ Wh} \\ W_{br} = P_{vt} V_{vt1} + (P_{cc} + P_d) \cdot t_3 = 8.93 \text{ Wh} \\ W_{fl} = P_{sm} t_{sm} + P_{vt} V_{vt2} + (P_{cc} + P_d) \cdot t_4 = 1.03 \text{ Wh} \end{cases} \quad (7)$$

式中： W_{so} 为水面直航阶段能耗； W_{dv} 为下潜阶段能耗； W_{br} 为坐底监测阶段功耗； W_{fl} 为上浮阶段能耗。

表2 AUV系统主要能耗器件参数
Tab. 2 Main energy consumption device parameters of AUV system

硬件 Hardware	平均功率 Mean power/W	功率符号 Power symbol	工作时间 Run time
主控及通信单元 Control and communication unit	6	P_{cc}	t_1, t_2, t_3, t_4
数据采集单元及灯光 Data acquisition unit LED	5	P_d	t_1, t_2, t_3, t_4
左、右推进器 Left/Right thruster	192	P_{lt}, P_{rt}	t_1
垂直推进器 Vertical thruster	288	P_{vt}	t_{vt1}, t_{vt2}
步进电机 Stepper motor	30	P_{sm}	t_{sm}

AUV完成1次周期作业的总能耗可表示为

$$W_T = W_{so} + W_{dv} + W_{br} + W_{fl} = 76.42 \text{ Wh} \quad (8)$$

根据电池单元的硬件选型，AUV所携带的锂电池电量 E_b 为5.184 kWh。当电池电量剩余10%

时，AUV结束当前工作，回收充电。因此，AUV续航时间 t_s ：

$$t_s = \frac{E_b \times 90\%}{W_T} \cdot T = 77.32 \text{ h} \quad (9)$$

由于“类海豹式”作业模式的特殊性，式(9)中得出的续航时间 t_s 随坐底监测时间的不同而上下浮动。分析结果表明，相较于大多传统AUV的3~24 h的续航时间，本文设计的渔业养殖监测用AUV因在水面漂浮和水下坐底时推进器几乎不消耗能量，因此工作时间得到极大提升，有利于在渔业养殖领域的普及应用。

2.2 自主巡航与避障仿真实验

为验证AUV水面自主巡航设计的可行性，基于MATLAB软件搭建仿真模型，添加水流、风力和障碍物等干扰素，结合改进DL D*Lite算法^[18]和水面自主巡航控制策略，将障碍物进行膨胀化处理，考虑AUV体积和安全裕量，膨胀半径为1.5 m，进行自主巡航仿真实验。在岸基上位机界面中以当前位置为起点和第1个监测点，再依次输入其余5个监测点的经纬度坐标，并设定好航速和各监测点停留时间后，启动自主巡航模式。根据预设监测点坐标值和模拟仿真得出的AUV实时定位数据，绘制预设轨迹曲线和实际轨迹曲线，如图10所示。

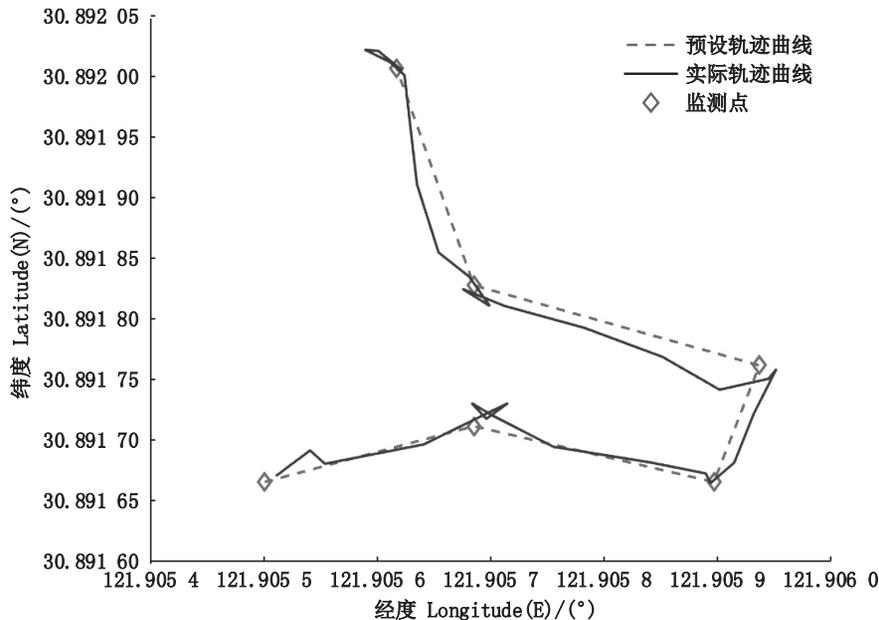


图10 AUV轨迹仿真图

Fig. 10 Track route simulation diagram of AUV

在AUV抵达各预设监测点后，岸基上位机界面记录AUV定位数据，与预设监测点经纬度坐标进行对比，如表3所示，6个监测点中最大绝对误差

值小于0.92 m，最小绝对误差值小于0.51 m，平均误差值小于0.70 m。仿真数据表明AUV自主巡航功能可正常运行，精度满足自主巡航和避障需求。

表3 监测点坐标对比表
Tab.3 Coordinate comparison table of monitoring points

监测点 Points	预设监测点坐标 Preset point		实际监测点坐标 Actual point		绝对误差 Absolute error/m
	经度 Longitude(E)/(°)	纬度 Latitude(N)/(°)	经度 Longitude(E)/(°)	纬度 Latitude(N)/(°)	
1	121.905 501	30.891 666	121.905 509	30.891 669	0.833 072
2	121.905 685	30.891 712	121.905 691	30.891 715	0.662 619
3	121.905 896	30.891 666	121.905 892	30.891 670	0.586 098
4	121.905 936	30.891 762	121.905 941	30.891 755	0.912 951
5	121.905 685	30.891 828	121.905 679	30.891 825	0.662 618
6	121.905 617	30.892 007	121.905 621	30.892 004	0.506 912
平均误差 Average error					0.694 045

2.3 样机试验

经过硬件采购加工、各模块组装、系统联调和水密性测试,研制出渔业养殖监测用AUV样机,如图11所示。

2.3.1 人机交互界面展示

AUV岸基人机交互界面如图12所示。基于模块化设计理念,主界面显示部分主要信息,如北京时间、剩余电量、AUV航行速度和航向等,其他信息则显示在各分界面中,通过菜单栏按钮切换。

运动控制界面可手动操纵AUV运动或进行自主巡航参数设置,数据监测界面显示详细的水

质监测数据、视频图像信息和航速航姿数据,数据存储界面可查阅各个时间记录的数据。



图11 渔业养殖监测用AUV样机
Fig.11 Prototype of AUV for aquaculture monitoring



(a) 主界面
Main interface



(b) 运动控制界面
Motion control interface



(c) 数据监测界面
Data monitoring interface



(d) 数据存储界面
Data storage interface

图12 AUV人机交互界面
Fig.12 Human-computer interface of AUV

2.3.2 水质监测试验

水质监测试验以2023年5月26日在上海海洋大学校内一处水域下水试验为例进行分析。试验水域面积约为7 077 m²,当日天气阴天且2级轻风,气温19~24 ℃,试验时间为17时~18时30分。试验选取温度、pH、溶氧量和电导率等4个参数作为监测目标,并利用多参数专业水质检测仪HQ40d,将人工取样的各监测点水质参数作为对照组。水质数据如表4所示。

由表4数据可知,在本次试验水域的6个监测点中,AUV测得最高温度为25.1 ℃,最低温度为24.6 ℃,与对照组的平均误差为0.3 ℃,各监测点温差较小;AUV测得pH最大值为8.37,最小值为8.01,与对照组的平均误差为0.1,整体水质偏弱碱性;AUV测得溶氧量最高为7.42 mg/L,最低为7.12 mg/L,与对照组的平均误差为0.185 mg/L,符合当季自然水域溶氧量一般标准;AUV测得电

导率最高为1 683 μS/cm,最低为1 663 μS/cm,与对照组的平均误差为10.167 μS/cm,电导率较一般淡水偏高。分析地理环境因素可知,本次试验水域靠近我国东海海岸,所在片区为滨海盐碱地,测得的水质偏弱碱性及电导率较高这一现象符合试验水域属性,数据准确。因此,本文设计的AUV能够有效采集水域水质信息并满足渔业养殖的水质监测精度需求。

2.3.3 水下视频图像试验

为验证AUV全天候水下视频图像采集效果,分别选取光照较好的下午和光照微弱的夜晚两个时段进行测试。在光照较好的条件下,AUV可利用搭载的4G高清摄像头直接采集水下水产动物的视频图像信息,并通过水面通信浮标实时传输给岸基上位机。在光照微弱的条件下,AUV自动打开艏部LED灯,增强观测效果。两个时段的观测效果图如图13所示。

表4 水质数据对比表

Tab. 4 Comparison table of water quality data

监测点 Points	检测值 Detection value				对照值 Deference value			
	温度 TEMP/℃	酸碱度 pH	溶氧量 DO/(mg/L)	电导率 EC/(μS/cm)	温度 TEMP/℃	酸碱度 pH	溶氧量 DO/(mg/L)	电导率 EC/(μS/cm)
1	25.1	8.01	7.41	1 663	25.3	8.18	7.51	1 680
2	24.9	8.12	7.34	1 683	24.6	8.21	7.46	1 671
3	24.8	8.16	7.24	1 679	24.5	8.31	7.59	1 690
4	24.8	8.24	7.23	1 681	24.4	8.29	7.47	1 672
5	24.7	8.37	7.42	1 678	25	8.31	7.55	1 675
6	24.6	8.19	7.12	1 674	24.3	8.27	7.29	1 665
平均误差 Average error					0.3	0.10	0.19	10.167



(a) 白天观测效果图
Observation picture during the day



(b) 夜晚观测效果图
Observation picture at night

图13 视频图像观测效果图

Fig. 13 Video image observation picture

3 结论

本文介绍了渔业养殖监测领域的发展现状

和不足,提出并研制了一台新型渔业养殖监测用AUV。本文以解决AUV因多自由度水下推进器系统能耗大、水下惯导系统成本高和水下声学通

信速率低、实时性差等问题为出发点,结合渔业养殖监测领域的实际应用需求,提出AUV采用“类海豹式”的作业模式,并基于模块化设计理念对AUV的3个主要舱体采用“品”字型设计,保证AUV航行及坐底姿态平稳,便于调试、维护和后续升级。AUV以STM32F407ZGT6芯片为控制核心,采用多任务实时调度的FreeRTOS嵌入式操作系统和LabVIEW开发环境,对AUV水面自主巡航和避障系统、数据图像采集与通信系统以及岸基人机交互界面进行了设计和开发。最后,本文进行了AUV能耗分析和自主巡航与避障仿真实验,完成了样机的水质监测和 underwater 视频图像采集等试验,试验结果良好,通信稳定可靠,满足预期设计要求。

本文设计的渔业养殖监测用AUV功耗小、续航能力强、维护和运营成本低,可长时间执行监测任务,适用于池塘、湖泊等浅水域普及应用,并与现有的定点和移动监测设备协同作业,形成多元立体化渔业养殖监测网络,促进渔业养殖监测现代化、智能化发展。未来将根据渔业养殖需求,加强路径规划及跟踪控制、定深控制、水下目标识别、外形结构优化等方面研究与开发,不断完善AUV的功能和性能。

参考文献:

- [1] 鲁泉,陈新军. 改革开放40年来中国渔业产业发展及十四五产量预测[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(2): 339-347.
LU Q, CHEN X J. Development of Chinese fishery industry in 40 years of reform and opening up and production forecast in the 14th five-year plan[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(2): 339-347.
- [2] 中华人民共和国农业农村部. “十四五”全国渔业发展规划 [EB/OL]. (2022-01-07) [2023-05-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/07/content_5666850.htm.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Plan for National Fishery Development [EB/OL]. (2022-01-07) [2023-05-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/07/content_5666850.htm.
- [3] WU Y H, DUANY H, WEI Y G, et al. Application of intelligent and unmanned equipment in aquaculture: A review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107201.
- [4] WEI Y G, WEI Q, AN D. Intelligent monitoring and control technologies of open sea cage culture: A review [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169: 105119.
- [5] 李俊,陈普坤,陈雷雷,等. 水质监测与采样一体化无人船设计与试验[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(2): 405-416.
LI J, CHEN P K, CHEN L L, et al. Design and experiment of water quality monitoring and sampling integrated unmanned boat [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(2): 405-416.
- [6] 江先亮,尚子宁,金光. 基于无人船的水产养殖水质动态监测系统设计与实验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 175-185, 174.
JIANG X L, SHANG Z N, JIN G. Design and test of dynamic water quality monitoring system for aquaculture based on unmanned surface vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 175-185, 174.
- [7] 吴有生,赵羿羽,郎舒妍,等. 智能无人潜水器技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 26-31.
WU Y S, ZHAO Y Y, LANG S Y, et al. Development of autonomous underwater vehicles technology [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(6): 26-31.
- [8] 方红伟,李紫嫣. 自主水下航行器能源系统技术综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(8): 18-26.
FANG H W, LI Z Y. Overview of energy system techniques for autonomous underwater vehicles [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(8): 18-26.
- [9] 许裕良,杜江辉,雷泽宇,等. 水下机器人在渔业中的应用现状与关键技术综述[J]. 机器人, 2023, 45(1): 110-128.
XU Y L, DU J H, LEI Z Y, et al. Review: Applications status and key technologies of underwater robots in fishery [J]. Robot, 2023, 45(1): 110-128.
- [10] 西安天和防务技术股份有限公司. “中国无影”系列化水下AUV亮相2018中国航展 [EB/OL]. (2018-11-06) [2023-04-20]. <http://www.thtw.com.cn/news/220.html>.
Xi'an Tianhe Defense Technology Co., Ltd.. 'China Wuying' serialized underwater AUV unveiled at the 12th China International Aviation and Aerospace Expo [EB/OL]. (2018-11-06) [2023-04-20]. <http://www.thtw.com.cn/news/220.html>.
- [11] 中科探海(苏州)海洋科技有限责任公司. 精灵M120 [EB/OL]. (2021-08-25) [2023-04-20]. <https://www.dxguanxian.org/wap.php/news/showNews/nid/3275.html>.
T-SEA Marine Technology Co., Ltd.. Product: Jingling M120 [EB/OL]. (2021-08-25) [2023-04-20]. <https://www.dxguanxian.org/wap.php/news/showNews/nid/3275.html>.
- [12] 夏英凯,朱明,曾鑫,等. 水产养殖水下机器人研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 85-97.
XIA Y K, ZHU M, ZENG X, et al. Progress of underwater robots for aquaculture [J]. Journal of Huazhong

- Agricultural University, 2021, 40(3): 85-97.
- [13] 提云钊. 多推进器AUV结构设计及水动力学分析[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021: 49-54.
- TI Y Z. Structure design and hydrodynamic analysis of a multi-thruster AUV [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2021: 49-54.
- [14] CHITTOOR P K, CHOKKALINGAM B, MIHET-POPA L. A review on UAV wireless charging: Fundamentals, applications, charging techniques and standards[J]. IEEE Access, 2021, 9: 69235-69266.
- [15] 孙洪鸣, 郭威, 周悦, 等. 全海深着陆车机构设计及其潜浮运动性能分析[J]. 机器人, 2020, 42(2): 207-214.
- SUN H M, GUO W, ZHOU Y, et al. Mechanism design and diving-floating motion performance analysis on the full ocean depth landing vehicle [J]. Robot, 2020, 42(2): 207-214.
- [16] 王军年, 杨斌, 王庆年, 等. 汽车转矩定向分配驱动技术发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 92-104.
- WANG J N, YANG B, WANG Q N, et al. Review on vehicle drive technology of torque vectoring[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18): 92-104.
- [17] 徐嘉波, 刘永士, 施永海, 等. 淡水集中连片池塘与养殖尾水处理系统的综合水质评价[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 170-180.
- XU J B, LIU Y S, SHI Y H, et al. Comprehensive water quality evaluation of freshwater concentrated continuous ponds and aquaculture tail water treatment system[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(1): 170-180.
- [18] 黄鲁, 周非同. 基于路径优化D* Lite算法的移动机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 877-884.
- HUANG L, ZHOU F T. Path planning of moving robot based on path optimization of D* Lite algorithm [J]. Control and Decision, 2020, 35(4): 877-884.

AUV for aquaculture monitoring and its control system

WU Shihao¹, ZHOU Yue¹, AO Qi¹, SHI Xun¹, XING Bowen¹, GUO Wei^{2,3}

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, Hainan, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the current situation of low endurance and high cost of mobile monitoring equipment for aquaculture, which limits the widespread application of such equipment, a small portable AUV for mobile and fixed-point monitoring of fishery aquaculture is proposed and developed. A seal-like operation mode is proposed, replacing expensive underwater inertial navigation systems with conventional GNSS. The three main hulls are arranged in a pin pattern with a modular structure to increase smoothness. The unpowered diving and floating are controlled by the motor-controlled piston altering the volume of the external oil bladder. With the low-power STM32F407 chip as the control core, FreeRTOS embedded real-time operating system and LabVIEW development environment are employed to develop the AUV water surface autonomous cruise and dynamic obstacle avoidance system, data image acquisition and communication system, and shore-based intelligent fisheries big data interaction interface. The results of energy consumption analysis and simulation experiments show that the AUV has low energy consumption, and the endurance time is about 77 h when carrying a lithium battery of 5.184 kWh, which can perform autonomous cruising. Tests show that the prototype can effectively communicate with the shore-based host computer, collect water quality information and underwater video images. The AUV for aquaculture monitoring has flexibility in carrying sensors, long endurance, low power consumption, low cost, easy maintenance and upgrading, and is able to meet the demand for three-dimensional movement and long-term fixed-point monitoring of various aquaculture.

Key words: AUV for aquaculture monitoring; seal-like operation mode; modular structure; unpowered diving and floating; low cost; low power consumption