

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105838

基于 NB-IoT 的养殖塘水质监测无人艇系统研究*

张启元 张烈山 兰益成 陈莉 余箫

(浙江理工大学机械与自动控制学院 杭州 310018)

摘要: 针对日前水产养殖业中水质监测难、调节难的行业痛点,采用 NB-IoT 技术,设计并研制了一种水质监测无人艇系统,可实现自主巡航采集水质,并在云端对水质进行实时监测与调节。采用数字罗盘、BD-GPS 与 IMU 进行组合导航实现无人艇自主巡航以及运动数据获取,航行过程中通过 pH、浊度、溶解氧传感器采集水质数据,然后通过 NB-IoT 模块将水质与运动数据上传至 OneNET 云平台。以溶解氧调节为例,设计水质调节节点接收云平台指令对增氧机进行控制,从而实现水体溶解氧调节。实验结果表明,本系统较好的实现了设计目的与要求,在云端可实时观察水质与运动信息并下发指令控制增氧机调节溶氧含量,远程开启 25 min 后,溶氧量增加了 0.11 mg/L;巡检某面积约为 1 公顷池塘的 9 个目标点,平均用时在 5 min 内,显示出良好的工作性能。

关键词: 水质监测;NB-IoT;无人艇;组合导航;云平台;水质调节

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Research on water quality unmanned vehicle system based on NB-IoT for aquaculture ponds

Zhang Qiyuan Zhang Lieshan Lan Yicheng Chen Li Yu Xiao

(School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In view of the difficulty of water quality monitoring and regulation in aquaculture industry, a water quality monitoring unmanned vehicle system is designed and developed by using NB-IoT technology, which can realize autonomous cruise collection of water quality and real-time monitoring and regulation of water quality in the cloud platform. The integrated navigation of digital compass, BD-GPS and IMU is used to realize the autonomous cruise and motion data acquisition of the unmanned vehicle. During the navigation, the water quality data is collected by pH, turbidity and dissolved oxygen sensors, and then the water quality and motion data are uploaded to the OneNET cloud platform through NB-IoT module. Taking dissolved oxygen regulation as an example, the water quality regulation node is designed to receive the cloud platform instructions to control the aerator, so as to achieve dissolved oxygen regulation. The experimental results show that the system can achieve the design goals and requirements well. In the cloud platform, the system can observe the water quality and movement information in real time, and issue instructions to control the aerator to adjust the dissolved oxygen content. After 25 minutes of remote opening, the dissolved oxygen content increases by 0.11 mg/L. The system inspects 9 target points of a pond with an area of about 1 hectare, the average time is within 5 minutes, and shows good performance.

Keywords: water quality monitoring; NB-IoT; unmanned vehicle; integrated navigation; cloud platform; water quality regulation

0 引言

随着经济水平的发展与生活水平的提高,人们对水产品(以鱼类养殖为例)的种类与质量都有着越来越高的要求^[1-2]。而传统水产养殖模式常常存在管理滞后、效率低等

问题,不仅难以稳定产出高品质的水产品,并且由于无法及时调节水质可能造成大面积水污染,导致水产品生长缓慢,肉质的安全和质量无法保证,给养殖户带来重大的经济损失。因此,如何结合现代信息技术高效监测管理大面积水产养殖场已成为当下研究的热点^[3-4]。

收稿日期:2021-02-24

* 基金项目:浙江省基础公益研究计划项目(LGF21F050004)、国家级大学生创新创业训练计划项目(201910338022)资助

在国家的大力支持与相关技术的推动下,WIFI、ZigBee、Bluetooth、NB-IoT等物联网无线传输技术都已经在养殖业中有了相关的应用^[3-6],其中NB-IoT(narrow band internet of things)作为低功耗广域网的一种,具有覆盖范围大、占用带宽低、成本低等特点,特别适用于大范围、远距离的通信场合^[9]。

无人水面艇(unmanned surface vessel,USV)是一种理想的水质监测载体工具,USV的研究最早始于二战时期,美国在USV搭载武器,对敌人进行远程打击^[10]。而随着远程武器的发展,无人艇的研究与应用逐渐转移至科学考察以及一些民用场合。1997年德国Veer公司就开始研发可以在渔业应用的USV^[11];2004年英国普利茅斯大学MIDAS科研小组开始研发USV-“Springter”用来对内河、水库和沿海等水域追踪污染物,测量水质环境信息^[12];国内在USV的研究起步较晚,目前已步入实际应用阶段。中国航天科工集团公司与中国气象局共同研制了我国首艘无人驾驶海上气象探测船—“天象一号”,在海洋湖泊等大型环境的监测预警方面具有重要意义。近年来随着集成化技术与无线感知技术的成熟^[13],USV逐渐向低成本、小型化、智能化发展,并在水质监测领域应用越来越广泛,例如刘星桥等^[14]提出了基于GPS的自学习游弋式水质检测系统,利用GPRS模块实现信息的远距离传输并利用ZigBee网络实现对船只的遥控。虽然增大了通信范围,但对于船只的遥控距离有限并且无法对具体监测区域水质调节设备进行及时的远程调控。Simone等^[15]提出了一种低成本实时水质监测集成系统,采用基于扩频技术的超远距离无线传输方案(LoRa)将数据上传至云平台。虽然大大提高了数据传输范围,但LoRa工作在非授权频段,频段本身干扰不可控,一旦发送的数据产生碰撞,只能退回重发,通信质量难以保证。

针对上述研究现状,为了更好地解决大面积水产养殖场水质监测难、调节难的问题,本文提出利用搭载水质测量传感器的自主巡航无人艇进行自主规划采集水质数据,并通过广域低功耗的NB-IoT技术实现与云平台间数据的上传与指令的下发,从而对无人船的航迹以及水质调节模块进行控制,最终实现对水质的实时监测与及时调节,对减少因水质恶化带来的经济损失具有积极意义。

1 系统架构

本文设计的鱼塘水质云端监测水面无人艇系统是一个典型的物联网系统,它由监测系统感知层、NB-IoT网络层、传输层以及云平台应用层共同组成,系统的基本架构如图1所示。

监测系统感知层由多传感器模块、水质调节设备以及无人艇等组成,通过NB-IoT模块可以实现水质测量参数上报,以及接收网络层下发的控制指令,实现水质调节与无人艇远程操控;NB-IoT网络层由通信服务商基站构成,只

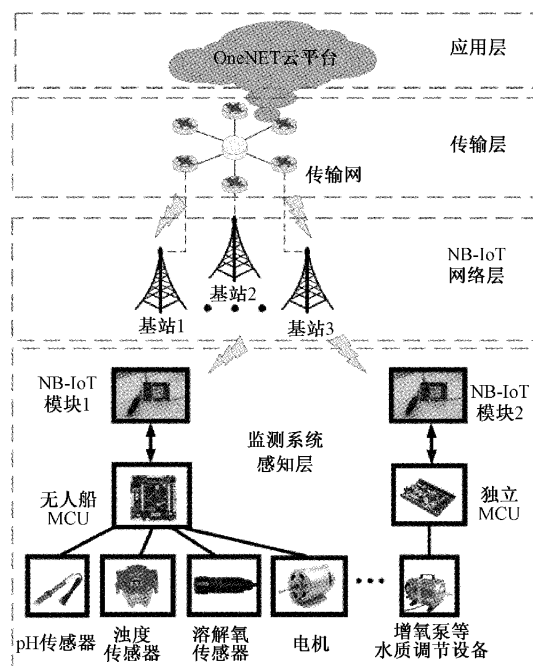


图1 系统架构

要在通信基站覆盖的范围内都能实现无人艇与平台的数据互传;传输层主要借助移动基站之间的传输网络,使用LwM2M通信协议与云平台应用层进行连接,将获取的数据最终上传至云平台,同时可以接收云平台的控制指令,经处理后下发;应用层采用了中国移动OneNET的开放云平台,用户可以在PC端与手机移动端观察水质监测数据与无人艇运动信息并且可以下发控制指令,对感知层设备进行控制,从而实现水质的调节与无人艇的远程操控。

2 系统硬件设计

无人艇内部硬件与养殖塘中的水质调节设备(以增氧机为例)共同组成了系统的硬件结构如图2所示。

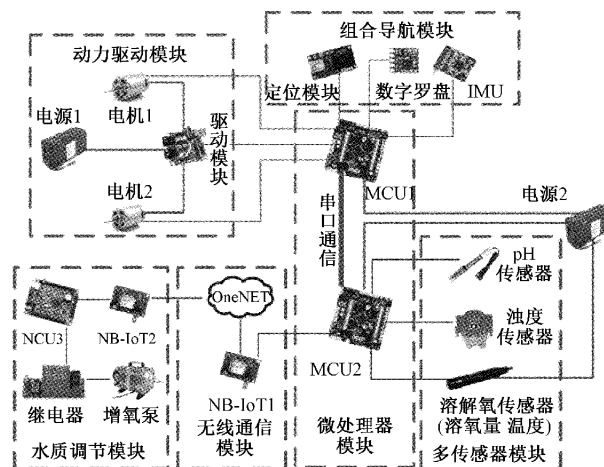


图2 系统硬件结构

图2中微控制器模块、多传感器模块、组合导航模块、

无线通信模块与动力驱动模块构成无人艇的硬件系统;水质调节模块由水质调节设备(本文以增氧机为例)、独立 MCU(micro controller unit)与 NB-IoT 模块组成^[16-17]。

当无人艇上电后,MCU1 进行组合导航与电机控制程序初始化,MCU2 进行无线通信与传感器输入通道程序初始化。当 MCU1 初始化完毕后,通过组合导航控制双电机的转速与转向,无人艇向程序设定的水产养殖鱼塘的目标点行进。在航行过程中 MCU1 通过串口 1 不断将当前无人艇的位置与运动信息发送给 MCU2。当 MCU2 接收到 MCU1 发送的一串完整数据的结束符时,将此时获取到的各传感器数据连同无人艇运动与位置数据打包并通过 NB-IoT 模块发送至云平台,用户可在云平台观察到对应位置处的鱼塘水质情况。以溶解氧含量为例,当发现某片区域溶解氧含量偏低,可以通过云平台下发开启控制指令。当对应 NB-IoT 模块接收到开启控制指令时,MCU3 即可控制电磁继电器打开最近的增氧机对水体溶氧量进行调节。

2.1 微控制器模块设计

微控制模块采用 ST 公司微控制器 STM32F103ZET6,该 MCU 拥有丰富的资源:64 KB SRAM 与 512 KB FLASH 可以满足多变量的运算与大量程序代码的存储;5 个串口、3 个 12 位 ADC 与 1 个 12 位 DAC 等可以满足与多外设进行通信与数据传递。并且考虑到单 MCU 处理压力大、数据传输速度慢等影响系统性能的缺陷,采用双控制器共同控制。

2.2 多传感器模块设计

根据 GB 11607-89 中对渔业水质标准的要求以及现阶段的研究条件,选取了溶解氧传感器(内置温度传感器)、浊度传感器、pH 传感器组成了多传感器模块。综合考虑系统的功耗与传感器的性能后,各传感器与主控 MCU 电路连接如图 3 所示。

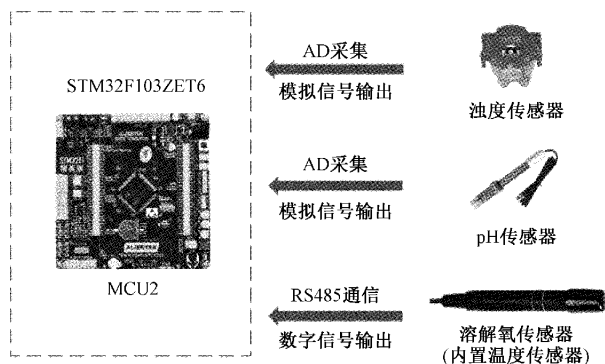


图 3 水质传感器硬件连接

图 3 中采用型号为 TSW-30 的浊度传感器,该传感器内置一个红外发射二极管与光敏二极管,其基本工作原理是通过红外发射二极管发出红外线,光敏二极管接收到的透射光强度与水的浑浊度成线性关系,浑浊度越高接收到光强度越弱,输出的模拟电压经由 MCU 的 AD 通道采

集后换算出对应的浊度等级。浊度等级高低对应于采集输出的模拟电压,对应关系如表 1 所示。

表 1 浊度等级对应关系

浑浊度等级	电压参考值/V
1 级	2.96~5
2 级	2.64~2.96
3 级	1.84~2.64
4 级	0~1.84

pH 传感器采用复合电极输出 mV 级电压信号,经过系列放大滤波电路后,同样经由 MCU 的 AD 通道采集,由式(1)可计算出被测水体 pH 值。

$$\text{pH} = -5.754 \cdot \left[\text{adc}x \cdot \frac{3.3}{4096} \right] + 16.654 \quad (1)$$

式中:adcx 为 AD 通道采集的模拟电压值,最终测量所得 pH 值精度可达 ± 0.01 pH(25 °C)。

溶解氧传感器采用数字传输式膜法溶解氧检测电极,并且内置温度与饱和度传感器,可以对溶解氧含量进行温度与压力补偿,测量精度小于 0.5 mg/L。获取数据主要通过 MCU 两线式 485 串口通信向传感器发送固定指令,等待直至接收到回复指令后,根据传感器给定的数据处理公式换算出对应水质指标。

以读取命令为例,当向传感器发送读取数据指令,MCU 会接收到一串 22 位的数据,假设该串数据为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{22}$,其中固定的有效数据位为第 7~18 位,每 4 位构成一组 4 位的 16 进制数,其中前 4 位代表温度,中间 4 位代表溶解氧浓度,最后 4 位代表饱和度,由式(2)可计算出对应的指标。

$$\begin{cases} \text{Temp} = (x_7 \cdot 2^3 + x_8 \cdot 2^2 + x_9 \cdot 2^1 + x_{10} \cdot 2^0) \cdot 0.1 \\ \text{Do} = (x_{11} \cdot 2^3 + x_{12} \cdot 2^2 + x_{13} \cdot 2^1 + x_{14} \cdot 2^0) \cdot 0.01 \\ \text{Sat} = (x_{15} \cdot 2^3 + x_{16} \cdot 2^2 + x_{17} \cdot 2^1 + x_{18} \cdot 2^0) \cdot 0.1\% \end{cases} \quad (2)$$

式中:Temp 表示温度,单位为 °C;Do 表示溶解氧浓度,单位为 mg/L;Sat 为饱和度,是一个无量纲量。

2.3 组合导航模块设计

无人艇自主巡航主要依靠组合导航模块结合相关算法^[18-21]实现,具体组合导航模块的技术实现路径如图 4 所示。

1) 坐标转换算法

经定位模块获取的是无人艇在 WGS84 世界大地坐标系中的经纬度坐标,该坐标系是以地球质心为原点的空间坐标系。而无人艇在水域中运动可以近似看成在二维平面上的运动,因此需要将空间坐标系下的经纬度信息转换为平面坐标系下的 (x, y) 坐标以获取更加精确的期望航向。本文采用基于二次高斯-克吕格算法进行坐标转换^[22-23],具体转换简化公式如下:

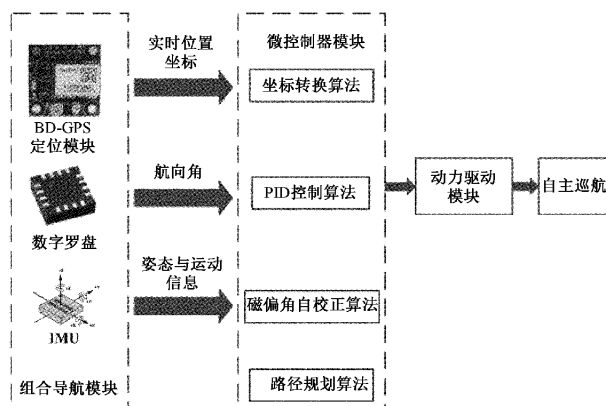


图4 无人艇自主巡航实现路径

$$\begin{cases} x = X + \frac{N}{2} \tan(B) \cos^2(Bl^2) \\ y = N \cos(Bl) \\ X = A_0 \frac{B \cdot \pi}{180 \cdot 3600} - B_0 \sin B \cos B \\ A_0 = a(1 - e^2) \left(1 + \frac{3}{4} e^2\right) \\ B_0 = a(1 - e^2) \left(\frac{3}{4} e^2\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中： X 为赤道至纬度为 B 的子午线弧长； N 为卯酉圈曲率半径； l 为某点经度与中央经线的差； e 为地球第一偏心率； a 为地球长轴半径。经过坐标转换后得到的坐标即可在平面坐标系下计算出准确期望航向。

2) 磁偏角自校正算法

得到了准确的期望航向后，只有获取到当前无人艇的航向角才能控制无人艇以最短的路径驶向目标点^[24-25]。相较于采用IMU获取航向角，本文采用数字罗盘获取航向角，该方法运算量小，可以减轻MCU处理负担。由于数字罗盘只想地磁北时航向角为 0° ，但对于平面直角坐标系而言，地理的正北方向与地磁的正北方向会存在一个磁偏角，并且磁偏角随时间与位置不同都会产生变化。以实际航行的某种情况为例，倘若未修正磁偏角误差，实际无人艇运行可出现如图5所示的航行偏差。

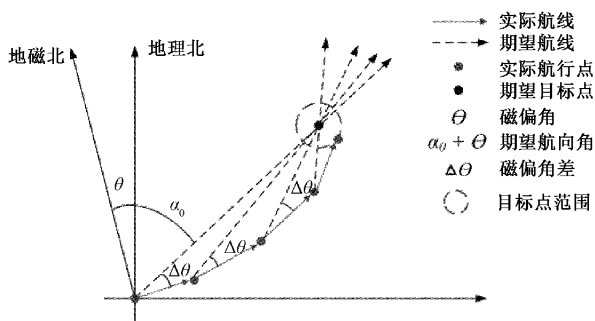


图5 巡航偏差示意图

本文设计的无人艇航行过程中允许实际罗盘航向角与期望航向角之间允许存在 $\pm 5^\circ$ 的偏差，当实际航向角与期

望航向角偏差在该范围之内时，无人艇保持直行，否则根据偏差情况进行方向的调整。从图5可以看出如果无法得到准确的磁偏角，始终会存在一个磁偏差 $\Delta\theta$ 。

为消除磁偏差 $\Delta\theta$ ，磁偏角自校正算法的基本思想是在无人艇直行时利用IMU获取无人艇的运动速度，进一步计算出不依靠数字罗盘与GPS的情况下，小船相对于平面直角坐标系下的航向角，并将这个独立的航向角与数字罗盘获取的航向角进行比较，计算出这个磁偏差 $\Delta\theta$ ，从而实现对磁偏角的校正，如图6所示。通过该算法可以提高控制系统的快速性与稳定性。

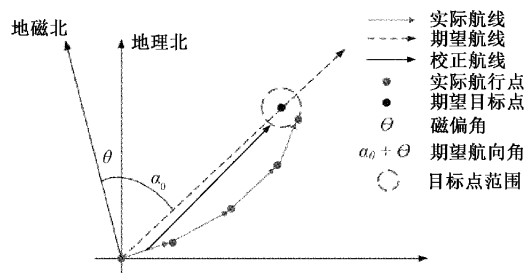


图6 磁偏角校正前后航线对比

3) PID控制算法

在获取到准确的期望航向角与实际航向角后，采用PID控制算法对无人艇进行自主航行控制^[26]，具体控制流程如图7所示。

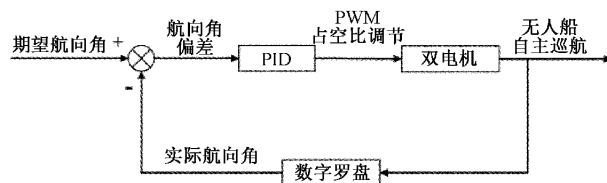


图7 PID控制流程

本文PID的控制思路主要是通过比较期望航向角与实际航向角获取航向角偏差，进而将航向角偏差作为PID控制的输入。通过理论分析与实验合理设置PID控制参数，最终对USV驱动电机PWM进行调节，实现无人艇的航行控制。

4) 路径规划算法

无人艇巡航鱼塘中目标点顺序的选择主要依据贪心算法，算法具体思路如图8所示。

首先将无人艇出发原点与预期航行目标点坐标求出，进而由两点距离公式得到所有目标点之间的距离矩阵。无人艇航行开始后，首先从原点开始选择距离原点最近的期望点作为当前目标，当到达该目标后又将目标点切换至距离当前位置最近的期望点，以此类推，直至返航。

2.4 无线通信模块

本文设计的无线通信模块采用中移物联网的M5310-A模块，其模块主要硬件实物如图9所示。

图9模块自带天线接口以及与嵌入式芯片的硬件接

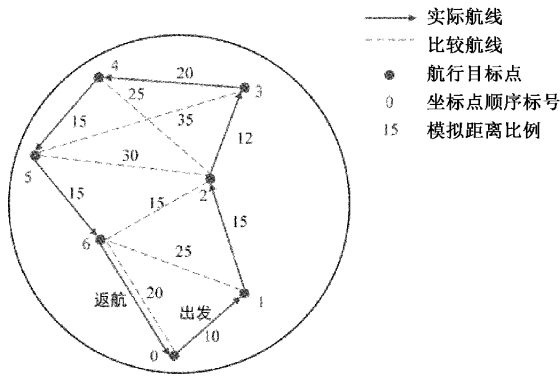


图 8 贪心算法原理

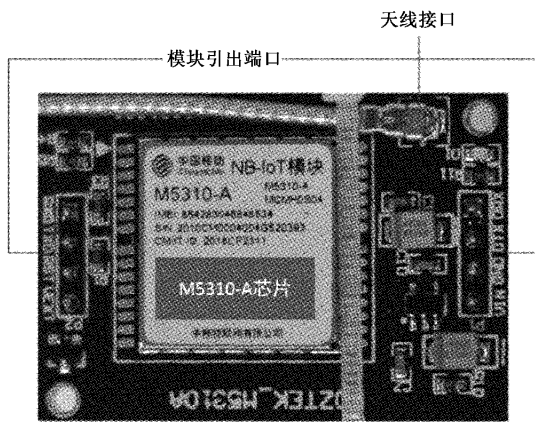


图 9 M5310-A 硬件电路实物

口,方便进行二次开发。在 MCU2 没有接收到完整的数据时,该模块处于低功耗省电模式,一旦接收到完整的数据则通过 LwM2M 协议与中国移动 OneNET 物联网云平台建立通信连接,上传数据或者接收下发的控制指令。

2.5 多模块间通信设计

由于无人艇系统内部结构较为复杂,涉及多个模块之间数据的互相交流,本文进行了如图 10 所示的多模块间通信设计。通信涉及的方式包括 IIC 总线通信、串口通信、AD 采集与 485 通信。

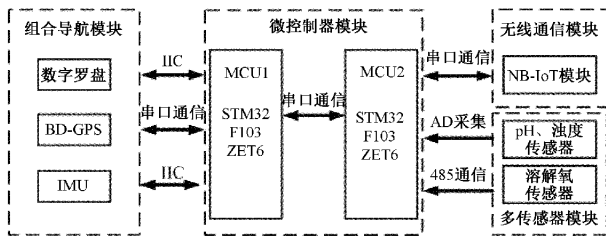


图 10 多模块间通信设计

多模块间的通信主要分为数据上传与控制指令下发两个过程:

数据上传时首先由组合导航模块获取航向角、姿态与运动信息与位置坐标,然后分别通过 IIC 总线通信与串口通信传输至 MCU1。随后 MCU1 通过串口通信将信息传

至 MCU2。当接收到 MCU1 传输的所有信息时,MCU2 通过 2 通道 AD 采集与 485 通信获取传感器数据,然后连同 MCU1 传输来的数据打包,最后通过串口通信将数据传输至 NB-IoT 模块,最终利用 NB-IoT 技术将数据包上传到 OneNET 云平台。

控制指令下发始于云平台下发的控制命令,NB-IoT 模块接收后通过串口通信将控制命令传递至 MCU2。控制指令的内容主要包括对双电机转向与转速的控制、无人艇运行模式的切换与水质调节设备运行状态的控制。前两种控制指令需要 MCU2 进一步将指令通过串口下发至 MCU1 并由 MCU1 执行指令;水质调节设备的控制直接由水质调节设备配备的独立 MCU 接收 NB-IoT 模块的控制指令实现。

2.6 水质调节模块设计

本文设计的水质调节模块(以溶解氧调节为例)由增氧机、独立 MCU、NB-IoT 模块以及继电器组成,如图 11 所示。

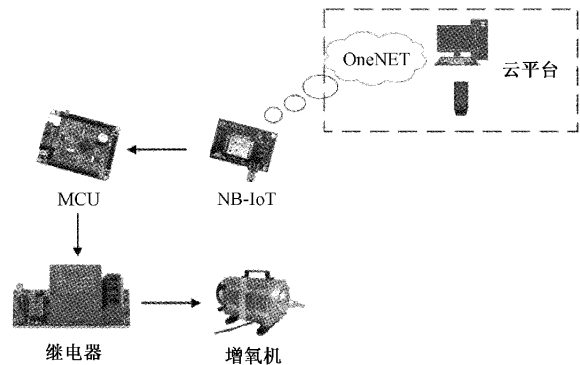


图 11 水质调节模块结构

当在手机移动端观测到水质溶解氧含量过低时,可以通过 OneNET 云平台控制按钮向独立 MCU 发送开启控制指令,MCU 进而控制继电器实现对增氧机的启停控制,从而达到调节溶解氧含量的目的。

3 系统软件设计

3.1 组合导航模块程序设计

组合导航模块的软件设计由坐标转换、路径规划、航向角更新与航向控制 4 部分子程序组成,具体设计流程如图 12 所示。

利用该组合导航程序进行无人艇的航迹控制,以 4 个目标点为例,无人艇理想自主巡航程序执行过程如图 13 所示。无人艇从起始点出发,首先对所有目标点进行距离计算得出距离矩阵,进而确定第 1 个目标点,然后根据目标点计算出航向,无人艇开始进行自主巡航。当无人艇驶入目标点 1 的范围内后,继续根据路径规划算法确定下一个目标点,以此类推遍历所有导入的航行目标点。考虑到实际鱼塘养殖时水质参数不会在极小的区域内发生突变,因此

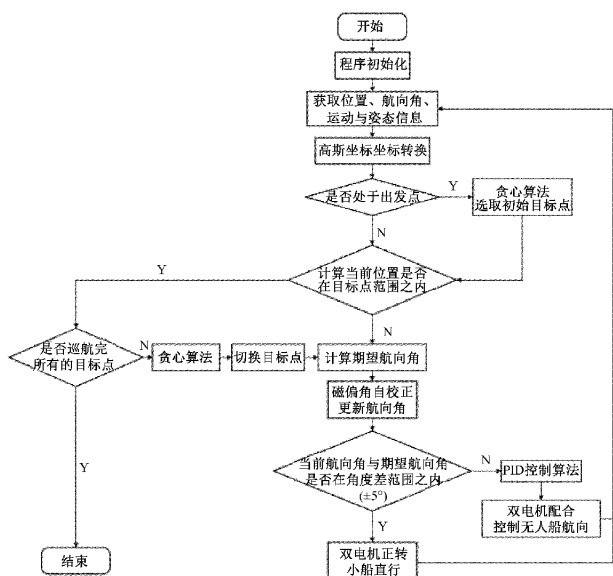


图12 组合导航模块程序设计流程

在目标点附近设置一定范围的区域。只要驶入该区域,即认为无人船抵达了目标点。这样设计既可以减轻MCU处理自主巡航控制算法的负担,也符合实际生产的要求与标准。

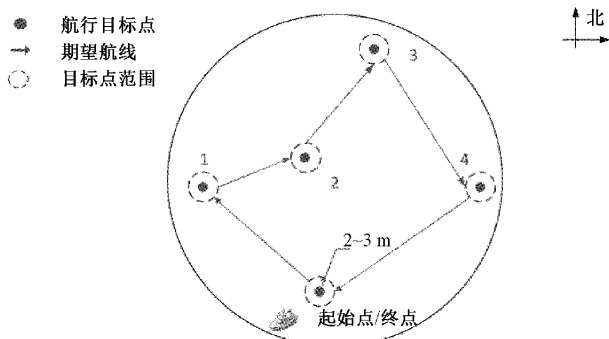


图13 自主巡航程序执行过程

3.2 无线通信模块程序设计

无线通信模块程序流程如图14所示。对相关硬件接口初始化完成后,MCU发送AT指令进行设备在线检查与网络配置,其中网络配置操作包括检查网络附着情况、获取网络信号强度与卡号。上述基本配置完成后,利用LWM2M协议的AT代码指令集在OneNET平台上创建实例与订阅资源。当NB-IoT模块接收到MCU上传的数据集后,通过特定的指令将数据上报给OneNET平台并显示,同时MCU不断检测网络的附着情况与状态,并等待下此数据的上报。当观察到相关水质指标异常时,云平台下发控制指令对水质调节设备进行下行控制。

4 实验结果与分析

基于系统的硬件设计,对无人艇系统内部的硬件进行了搭建。设计时充分考虑了船体内部的质量分布,尽量保

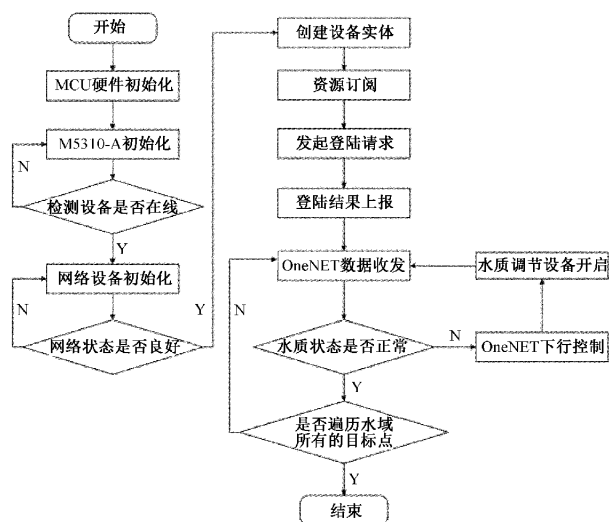


图14 无线通信模块程序流程

证船体质心位于中心位置,减少船体倾覆的风险,其示意图如图15所示。

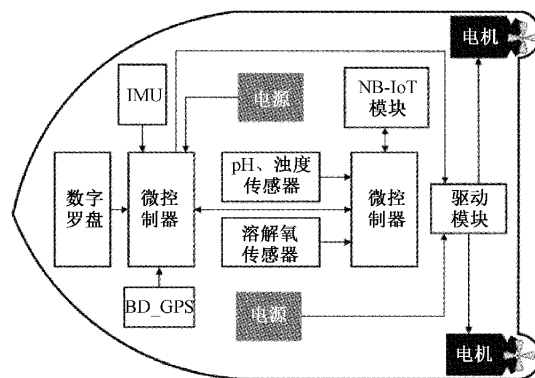


图15 无人艇内部硬件示意图

无人艇系统硬件搭建完毕后,在某池塘进行了多次实验测试,主要为验证无人艇系统以下的3个功能:

- 1)无人艇与PC端云平台以及手机移动端是否能实现稳定的远距离无线通信,可在云端实时观测数据。
- 2)无人艇的自主巡航与返航,是否遍历所有的目标点后完成返航。
- 3)云端可下发控制指令实现对无人艇运动状态与增氧机设备的控制。

图16为无人艇系统的实验画面,本文测试环境选择了某大小为1公顷的池塘,船内搭载了组合导航相关模块与水质测量传感器以及两块大容量的锂电池,保证持久续航能力,计划遍历黄色区域所设定的部分目标点。

将无人艇上电后,无人艇开启自主巡航模式,此时观察到PC端与手机端云平台界面如图17、18所示。首先是手机端界面可以通过量表或是折线图观测到5个水质指标的数据变化;其次从PC端界面(以航行经度为例)也能观测到数据随时间的变化图,验证功能1云端观测水质数据的要求。

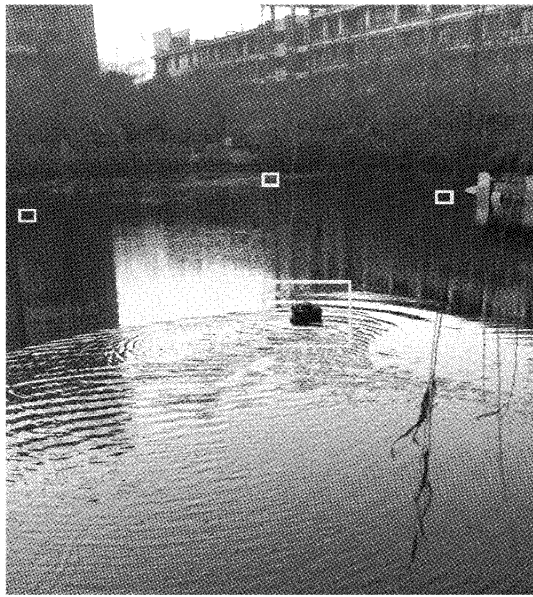


图 16 某池塘实测图

同时手机端设有控制选板,主要分为无人艇运动状态控制按钮与增氧机设备控制按钮。当观测溶解氧含量过低,可通过增氧机控制按钮远程控制水质调节节点的继电器开启增氧机实现水质调节;当需要更改无人艇运动轨迹或状态时,可通过运动控制的 5 个按钮进行远程操作实现。正常航控模式开启与否,对应选择的是自主巡航模式或远程操控模式,如果关闭正常航控,即可通过右侧的 4 个按钮对航迹进行更改。

PC 端云平台不仅可以观测当前数据,同时可以查询过往保存在云平台自带数据库的历史数据,方便用户对不同时间段的水质信息进行管理与分析,总结养殖规律与经验。

为验证无人艇系统能否遍历所有目标点进行自主巡航,在测试池塘合理设置了包含出发点在内的 9 个目标点并进行标号,每当驶过目标点后目标点标号即会进行切换,通过实验得到了如表 2 所示的自主巡航实验数据。从表 2 中可以看出预先设置了航行目标点,无人艇可以实现所有目标点的遍历,但实际返回云端的目标点坐标与预设目标

表 2 自主巡航实验数据

目标点编号	预设目标点位置/(°)	返回目标点位置/(°)	两点距离/m
1	(120.346 88,30.314 55)	(120.346 85,30.314 55)	1.92
2	(120.346 82,30.314 71)	(120.346 83,30.314 72)	1.47
3	(120.346 70,30.314 58)	(120.346 70,30.314 56)	2.22
4	(120.346 62,30.314 68)	(120.346 63,30.314 66)	2.42
5	(120.346 70,30.314 80)	(120.346 68,30.314 81)	2.21
6	(120.346 80,30.314 90)	(120.346 81,30.314 91)	1.47
7	(120.346 95,30.314 80)	(120.346 94,30.314 79)	1.48
8	(120.347 04,30.314 72)	(120.347 04,30.314 74)	2.22
0	(120.346 82,30.314 48)	(120.346 83,30.314 48)	0.96

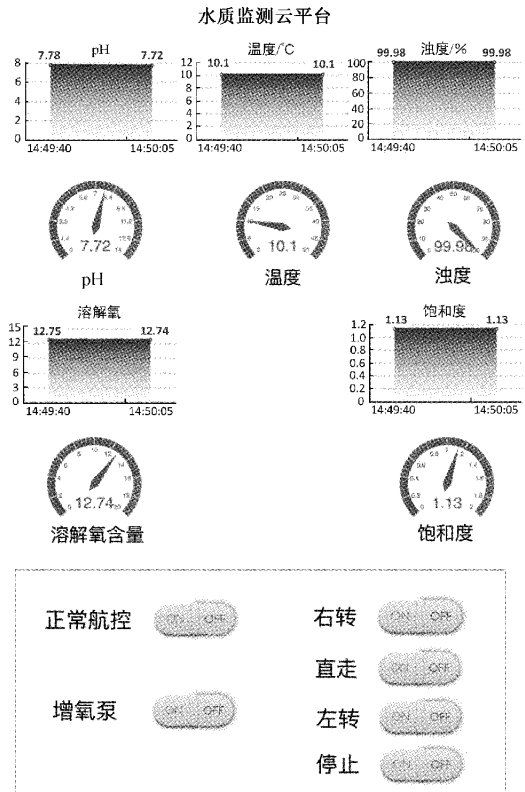


图 17 手机移动端云平台部分界面

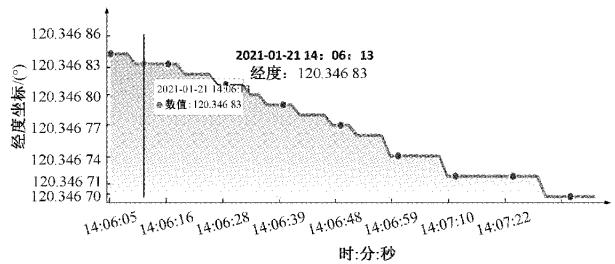


图 18 PC 端云平台部分界面(经度监测界面)

点存在一定的距离差,距离差值在 2.5 m 内。这主要与前文组合导航程序所述,在预设目标点处设置一个经纬度范围约束,只要无人艇当前经纬度坐标与预设目标点经纬度

坐标值之差在这范围内,即认为抵达了目标点。这样做主要是为了减少无人艇MCU处理负担,同时符合了水质指标不会在极小范围内突变的特征,能够满足实际需求。

为验证云端对水质的调节能力,对同一目标点在较短的时间内(排除因天气变化造成溶解氧含量变化)对比远程开启增氧机前后一段时间内溶解氧含量进行观测,图19为对目标点1进行的溶解氧前后变化数据观测。从图19中可以看出,初始状态增氧机处于关闭状态,溶解氧含量为12.52 mg/L;然后通过手机端控制按钮打开增氧机对目标点1附近水域进行溶解氧调节,每5 min对该点附近水域进行一次巡航测量,25 min后,共记录下6组增氧机开启后的溶解氧含量的数据,溶解氧含量达到了12.63 mg/L,增加了0.11 mg/L;最后关闭增氧机,25 min后,目标点溶解氧含量下降了0.03 mg/L。由此可证明通过远程控制增氧机,可在短时间内对溶解氧含量有较快地提升,增加鱼的活性,并且发现远程关闭增氧机后溶解氧含量下降较为缓慢,能够维持在某一溶氧含量之上一段时间,减少增氧机持续工作造成过大的电能损耗。

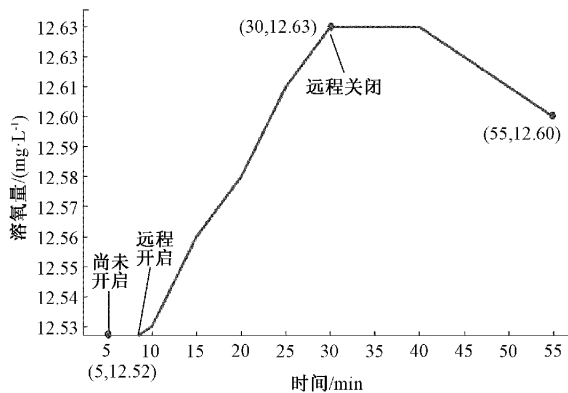


图19 调节前后溶解氧含量变化

同时为验证无人艇系统相较于传统人工池塘巡检可以大大提高检测效率,对系统整体工作性能进行测试,记录下自主巡航过程中各目标点的水质指标以及巡航用时如表3所示。从表3中可以看出本系统可以完成对目标点

表3 池塘实验水质数据

目标点编号	pH值	溶解氧含量/(mg·L ⁻¹)	温度/℃	浊度等级	时间/(时:分:秒)
1	7.70	13.34	8.5	99.88	8:00:45
2	7.73	13.35	8.3	99.92	8:01:22
3	7.72	13.35	8.2	93.15	8:01:53
4	7.71	13.35	8.3	95.78	8:02:35
5	7.71	13.34	8.3	96.47	8:03:04
6	7.73	13.36	8.2	96.88	8:03:37
7	7.73	13.36	8.2	99.02	8:04:08
8	7.74	13.35	8.3	98.48	8:04:29
0	7.73	13.35	8.3	97.38	8:04:53

的遍历与水质数据的上传,并且对面积约为1公顷的池塘中的9个目标点进行巡航遍历后用时在5 min之内。相较于人工巡检在这种场合用时至少在20 min以上,并且无法获取一些位于池塘中央位置处的水质信息,本系统具有良好的工作性能。

5 结 论

本文对基于NB-IoT的无人艇系统进行了设计与研究,首先对系统的架构进行了设计,明确了系统各个层次的功能;其次分别对系统的硬件与软件进行设计,采用双MCU联合处理提高了系统的综合性能,分析了pH、浊度与溶解氧传感器数据的处理方法,在组合导航中采用磁偏角自校正算法与贪心算法提高了无人艇自主巡航的快速性与稳定性,并详细地给出了程序设计思路;最后搭建了PC端云平台与手机移动端APP,通过LwM2M协议与NB-IoT模块实现双向通信,完成数据的上传以及指令的下发。通过实验验证表明无人艇系统可以实现水域的自主巡航、水质数据上云与远程控制增氧机调节水体溶解氧含量。并且系统对面积约为1公顷的鱼塘进行巡航监测用时在5 min内,与传统人工巡检相比大大提高了检测效率,具有良好的工作性能,为养殖户提供了一种低成本便捷可行的水质监测管理方法。但本系统目前缺乏对无人艇续航能力的评估,需进一步添加电池电量检测模块,在云端为用户提供电量信息,以防出现中途断电难回收的问题。

参考文献

- [1] JUNG SAM L, JONG HOH N. Current status of aquaculture information and directions for integrated management[J]. The Journal of Fisheries Business Administration, 2015, 46(2): 43-57.
- [2] 全球渔业和水产养殖最新状况[J]. 世界农业, 2020(7): 110.
- [3] 胡金有,王靖杰,张小栓,等. 水产养殖信息化关键技术研究现状与趋势[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 251-263.
- [4] KWAMENA K Q, STEPHEN A, CHARLES C N. Aquaculture information sources for small-scale fish farmers: The case of Ghana [J]. Aquaculture Research, 2009, 40(13): 1516-1522.
- [5] ISMAIL A, RIDVAN Y, MUSTAFA N, et al. Internet of things implementation of nitrate and ammonium sensors for online water monitoring[J]. Analytical Sciences; The International Journal of The Japan Society for Analytical Chemistry, 2020, 20: 396.
- [6] 张琴,戴阳,杨胜龙,等. 基于LoRa的低功耗水产养殖水质监测系统设计[J]. 传感器与微系统, 2019,

- 38(11): 96-99.
- [7] 武延坤, 陈益清, 雷萍. 水质监测技术现有问题分析及物联网应用框架[J]. 中国给水排水, 2012, 28(22): 9-13.
- [8] 李鑫星, 王聪, 田野, 等. 基于 ZigBee 的多参数水质在线监测系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(S1): 168-173.
- [9] 杨观止, 陈鹏飞, 崔新凯, 等. NB-IoT 综述及性能测试[J]. 计算机工程, 2020, 46(1): 1-14.
- [10] 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV 发展现状及展望[J]. 中国造船, 2014, 55(4): 194-205.
- [11] BERTRAM V. Unmanned surface vehicles-a survey[R]. Skibsteknisk Selskab, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [12] WASIF N, ROBERT S, TAO X. An integrated multi-sensor data fusion algorithm and autopilot implementation in an uninhabited surface craft[J]. Ocean Engineering, 2012, 39: 43-52.
- [13] 朱健楠, 虞梦苓, 杨益新. 无人水面艇感知技术发展综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(10): 1486-1492.
- [14] 刘星桥, 陈海磊, 朱成云. 基于 GPS 的自学习导航游弋式水质监测系统[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 84-90.
- [15] SIMONE G, DARIO M, ALESSANDRO P, et al. An integrated system for real-time water monitoring based on low cost unmanned surface vehicles[C]. 2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), IEEE, 2019:1-6.
- [16] 晁鹤, 郑恩让. 基于 STM32 的无人船控制系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10): 129-133.
- [17] 杨菊花, 李文元, 陈光武, 等. 引入滑模观测器的 GPS/INS 组合导航滤波方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 78-86.
- [18] 刘军, 吴贤勇, 田甜. 基于 AUKF 的 SINS/GPS 紧组合导航系统研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(2): 97-102.
- [19] 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.
- [20] 田宏图. 基于北斗定位导航系统的区域 CORS 系统精度与性能分析[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 128-131.
- [21] 周建民, 康永, 刘蔚. 无人机导航技术应用与发展趋势[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 274-277, 286.
- [22] 姜楠. 坐标转换算法研究与软件实现[D]. 淮南:安徽理工大学, 2013: 6-24.
- [23] 张兵兵. 坐标换算程序设计及实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(6): 32-34.
- [24] 韩鹏, 刘志林, 周泽才, 等. 基于 LOS 法的自航模航迹跟踪控制算法实现[J]. 应用科技, 2018, 45(3): 66-70.
- [25] 陈天元, 袁伟, 俞孟蕙. 基于显式模型预测控制的无人船航迹控制方法[J]. 船舶工程, 2020, 42(9): 122-127.
- [26] 刘洋, 行鸿彦, 侯天浩. 四旋翼无人机串级变论域模糊 PID 姿态控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 46-52.

作者简介

张启元, 本科生, 主要研究方向为无线传感器网络技术。

E-mail: zqyagy@qq.com

张烈山(通信作者), 讲师, 硕导, 工学博士, 主要研究方向为无线传感器网络技术、机器视觉测量技术、水声测量技术等。

E-mail: zhangoptoacoustic@163.com

(上接第 169 页)

- [13] 张朵, 许宜申, 吴茂成, 等. 基于四线测量法的智能微电阻测试仪设计[J]. 电测与仪表, 2015, 52(10): 29-34, 55.
- [14] 宋亚杰. 基于 PXIe 的软 X 射线相机多通道数据采集系统设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [15] 李玲. LXI 六位半数字多用表的硬件设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [16] 许伟明, 李瑜煜, 方浩, 等. 针对热电材料的高精度宽范围电阻测量电路[J]. 电子测量技术, 2016, 39(2): 14-17, 24.

作者简介

杨莫非, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统与综

合测试。

E-mail: 740541397@qq.com

刘士兴, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为光电探测技术、可编程器件和系统设计。

E-mail: liusx@hfut.edu.cn

廖福宁, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统综合与测试。

E-mail: 549789961@qq.com

刘光柱, 博士, 讲师, 主要研究方向为自动化技术与核科学技术。

E-mail: 343546310@qq.com