

基于北斗定位授时的水质监测及预警系统

【摘要】随着经济增长引发的环境问题与民众对环境的需求之间的矛盾日益突出，绿色发展已成广泛关注的焦点。近期，日本核污水排海问题更加引发人们对海洋污染的广泛讨论，加剧了对水质安全的信任危机。传统水质监测方式多采用人工取样、实验室分析、水质自动监测站等方式，存在实时性不足、覆盖范围有限、高耗能和昂贵的问题。针对这些问题，本项目设计了一种利用北斗技术定位授时、LoRa 自组网进行数据传输，具有高效检测及精准预警功能的采充一体化水质监测系统。系统由数据采集终端、无线通信电路和远程控制中心构成。数据采集终端搭载在自主设计的浮标上，由 STM32 单片机主控模块、北斗定位模块、水质监测传感器组等器件组成，分布于检测水域内，实现对水域多参数及核放射物质含量的监测。采用 Lora 无线通信方式，实现各个浮标之间的数据交流和自组网功能，并将所采集收集的数据上传至服务器，以图形和表格形式呈现给用户。系统通过对数据分析可实现水质突变状况时污染定位、水质预警等功能，通过北斗定位可实现浮标单元的回收和检修。经过实地测试，系统运行状况良好，可实现水质监测、水质预警等各项功能，能够满足对水质信息自动化远程监测和绿色可持续发展的需求。

【关键词】北斗定位，绿色发展，水质监测，LoRa 无线通信

【Abstract】 With the contradiction between environmental problems caused by economic growth and people's demand for environment becoming increasingly prominent, green development has become the focus of widespread attention. Recently, the issue of Japan's nuclear sewage discharge into the sea has triggered a wide discussion on Marine pollution, which has intensified the crisis of trust in water quality safety. The traditional water quality monitoring methods mainly use manual sampling, laboratory analysis, water quality automatic monitoring station, etc., which has some problems such as insufficient real-time, limited coverage, high energy consumption and expensive. To solve these problems, this project designed an integrated water quality monitoring system with efficient detection and accurate early warning functions using Beidou technology for positioning and timing and LoRa AD lib for data transmission. The system consists of data acquisition terminal, wireless communication circuit and remote control center. The data acquisition terminal is mounted on the self-designed buoy, composed of STM32 microcontroller master module, Beidou positioning module, water quality monitoring sensor group and other devices, distributed in the detection waters to realize the monitoring of multi-parameter and nuclear radioactive substance content in the water. Lora wireless communication mode is adopted to realize the data exchange and AD hoc networking function between each buoy, and the collected data is uploaded to the server and presented to the user in the form of graphics and tables. Through data analysis, the system can realize the functions of pollution location and water quality early warning when the water quality changes, and the recovery and maintenance of the buoy unit can be realized through Beidou positioning. After field testing, the system runs well, can realize water quality monitoring, water quality early warning and other functions,

and can meet the needs of automatic remote monitoring of water quality information and sustainable development.

【 Key words 】 BeiDou Positioning, Green Development, Water Quality Monitoring, Lora Wireless Communication

一、国内外发展现状

绿色发展已成为社会关注焦点,在日本不顾社会反对执意将核污水排海后,人们深刻意识到污水的处理不当给环境带来了很大的影响,不仅阻碍了社会经济的发展,更会对国民的身体健康带来危害。同时,还会造成目前大规划化和高养殖密度的水产行业的水域水质逐年恶化,水产品污染所导致的患病率也会不断地升高。

1.1 国内现状分析

我国在水质监测方面的研究起步晚。从 1973 年 8 月的第一次国家环境保护会议成功召开后,水质监测才慢慢变为我国的重点研究内容。

早期的水质监测采取离线方式,这种方式具有检测周期长、不能实现实时监测等缺点^[1,2]。后来,随着网络科技的进步,基于无线传输网络的水质监测技术逐步发展起来,Encinas^[3]、乔欣^[4]基于紫蜂(ZigBee)协议,以温度、pH 值及溶解氧 DO 为水质特征参数,实现了实时监测。张刚^[5]基于 ZigBee 技术,通过多参数的传感器,达到对数个区域监测的实时数据采集及图形化显示。姚达雯^[6]、杨瑞峰^[7]结合了 ZigBee 技术和通用分组无线服务技术(GPRS),利用 zigBee 技术采集和汇总节点信息,并于节点汇集处通过 GPRS 上传数据,达到了低功耗、多点远程实时监控。李秋慧^[8]基于 GPRS 移动通信的远程可控水质监测船,检测员可以实时获得水质检测数据以及船只所在位置,且监测范围广。

马银鑫等结合 Modbus/RS485 通信协议,将数据显示在 LCD 屏并保存在 SD 卡中实现水质监测^[9]。此套方案应用 RS485 通信协议,但是无法实现远程监测。王明军等结合嵌入式技术与 FreeRTOS 系统设计了基于 LoRa(Long Range)无线传输的水质监测系统^[10]。谭华结合 LoRa 无线串口模块实现上位机与下位机的实时通信^[11],LoRa 网络具有传输距离远、组网节点多等优点,但随着 LoRa 设备与网络部署不断增多,相互之间会出现一定的频谱干扰,且 LoRa 传输数据有效负载较小。王军等基于窄带物联网技术设计了一种远程水质监测系统^[12],应用了物联网云平台,在 PC 端与移动端查看数据。赵世栋设计的基于物联网技术的化工厂污水水质监测系统^[13],运用 BP 神经网络建立模型进行训练,实现对水质等级的实时评估。

1.2 国外现状分析

20 世纪,美国、日本等发达国家先后建立了水质监测站,从上世纪 80 年代开始,美国等发达国家已完成了多个领域的水质监测,对有机物的检测类别就高达近 140 种,并且朝着更高效、更精确的方向发展。英国于同期完成了水质的关键参数监测系统,对该国的泰晤士河进行了连续地监测。随着互联网技术的逐步发展,水体参数监测的自动化技术已逐渐实行。

Charef 等设计出了一种新型的智能化传感器,结合了化学、物理变量和光谱技术来计算水体中被污染的参数^[14]。Prasad^[15]等运用物联网和遥感监测技术,设计出了一个智慧型的水质监测仪,该仪器可完成对不同水体的监测,并且能将观测到的数据建立分类器,最后对水质实现详细的分析。Simbeye 等实现了基于

GSM 的远程数据传输^[16]。Mohammad 等结合无线技术研制出了一种水下的监测系统^[17]。Chensky 等设计出了一种名叫“保护者”的无人式充气型的船艇,该船艇上放置了好几个传感装置,可用于监测海洋的环境和水质参数^[18]。Adamo 等基于 IEEE 标准提出了一个基于无线传感器网络的监测仪,完成了大面积海洋的实时和远程监测^[19]。Saravanan 等利用 GSM 的通信方式,以及数据采集与监控系统,对印度的马德拉斯邦某河流的含盐量、浑浊度和温度等水质参数进行检测^[20]。Truong 等设计出了一个廉价的、用于水质监测和预警的仪器,该仪器由一个 ArduinoMega2560 开发板、以及溶解氧、温度和 PH 值传感器等组成,用户可以通过手机和短信通知来查看数据^[21]。

二、研究目标

本项目秉承着“中国的北斗、世界的北斗、一流的北斗”的发展理念,充分发挥北斗技术在全球范围内的优势,旨在为水资源的保护和防治做出积极贡献。项目以浮标单元为基础,依托北斗导航、混合感知、LoRa 通信、物联网等前沿技术,旨在实现以下研究目标:

1. 解决传统水质监测实时性差、精度低的问题

传统监测点通常要将数据从采集点传输到中央数据库或监测中心,这个过程需要一段时间,导致实时性差。数据采集后,通常需要一定时间进行处理、分析和报告生成,这会延迟数据的可用性,且无法实现实时监测和数据趋势分析。

2. 解决传统水质监测点集成度低的问题

传统水质监测点通常使用分散的监测设备,每个监测点可能配备不同的仪器和传感器,导致监测设备的种类和型号多样化,数据通常在不同的监测点独立收集,而且这些数据可能以不同的格式和协议存储。使得数据管理和分析变得复杂,难以进行综合分析。

3. 解决传统水质监测成本高的问题

传统水质监测设备通常需要不间断地运行,包括传感器、数据采集设备、通信设备等。这些设备的运行需要耗费大量电能,特别是在远程或分散的监测点,因此设备需要人工定期的维护、校准和设备更换。

三、创新性

(1) **高精度预警:** 借助北斗卫星系统的高精度定位和精密授时技术,实现对浮标位置和时间的精确记录,为水质数据的可信度和准确性提供强大支持,从而提高整个系统的可靠性,对水域环境参数异常情况进行高精度实时预警。

(2) **自组网低功耗数据传输:** 传统水质监测方式采用各个设备独立进行数据传输,存在功耗高的问题。本系统采用 LoRa 无线组网技术,利用其长距离传输能力和低功耗特性,保证设备具备强大的无线覆盖范围的同时,实现设备低功耗运行。

(3) **“绿色低耗”长续航:** 设备搭载大量传感器,耗电能力大,仅使用电池供电不能满足对浮标的长时间供电。因此,系统采用太阳能辅助供电,可延续传感器的生命周期,有助于延长系统运行时间并减少能源消耗。

(4) **采充一体化陀螺浮标设计:** 系统采用自主设计的三角陀螺形状的浮标结构,具有重心低、防侧翻的特性。浮标结构整面覆盖太阳能板以供电,进一步提高了浮标的自足性,并采用电池仓与主机分离的设计,有助于降低总体维护成本,使维护和维修工作更为经济高效。

四、主要研究内容及实现思路

4.1 系统总体方案设计

基于北斗定位授时的水质监测及预警系统主要由数据采集终端、无线通信电路和远程管理中心三部分组成，系统方案设计如图 1 所示。数据采集终端主要由水质传感器组、北斗定位模块、STM32 处理器和电源电路组成。水质传感器组收集到的定位信息、水温、光照、PH、TDS 等数据经过 STM32 处理器处理并打包后，再通过无线通信电路被发送到远程控制中心，远程管理中心包括数据接收终端和上位机软件，数据接收终端接收无线通信电路发送过来的数据，并将这些数据在上位机软件上进行显示和储存。

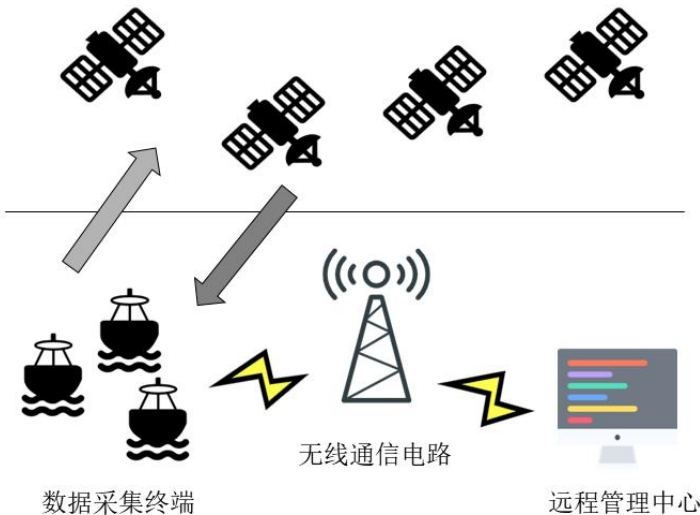


图 1 系统方案设计

4.1.1 北斗系统

（一）北斗定位

北斗卫星的定位精度可以达到厘米级别，通过其对浮标单元进行高精度的定位，我们能够准确地追踪和定位浮标单元在水域中的位置。这种精准的定位不仅有助于监测水质和环境参数的变化，还为各种应用提供了精确的地理信息，例如水域管理、浮标回收和环境研究等领域提供了可靠的数据支持，北斗定位示意图如图 2。

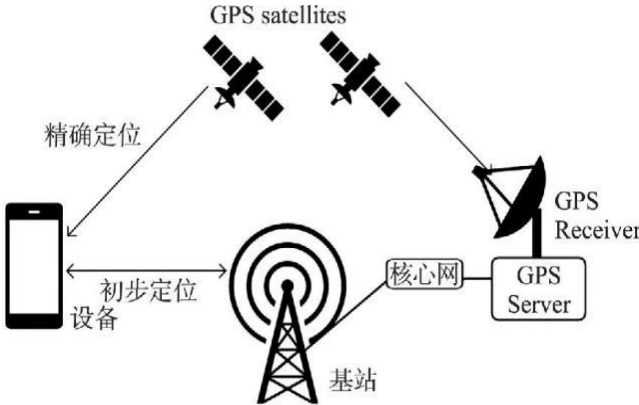



图 2 北斗定位示意图

（二）北斗授时

相较于本地定时器、LTE 信号和网络授时（如表 1），北斗授时技术实现了 10 纳秒级别的时间测量精度，为水质监测系统提供了坚实的时间基准，从而显著提高了系统的可靠性和实时性。借助这项技术，我们能够精确记录浮标时间，使系统能够高精度地实时预警水域环境参数异常情况。这种高精度的时间基准成为水质监测系统的可靠支持，有助于其高效运行和提高可信度。

表 1 授时方式对比表

| 本地定时器 | LTE 信号 | 网络授时 | GNSS |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| 本地已用时间 | 随处提供相对时间 | 随处提供绝对时间 | 户外绝对时间和相对时间 |
| 优点 | | | |
| • 始终提供足够的电力 | • 广泛可用，甚至在地下 • 出色的短期稳定性 | • 广泛适用于互联设备 | • 出色的准确性 • 出色的长期稳定性 |
| 缺点 | | | |
| • 适用性受漂移、温度和老化的限制 | • 绝对授时可能不确定 • 观察时间取决于信号传播距离 | • 受可变延迟的限制，具体取决于网络，这会影 响授时准确性 | • 限于信号接收不受遮挡 的情况（不适用于室内 和地下） |

4.1.2 数据采集终端

（1）结构设计

传统浮标结构，特别是简单的圆柱形或球形浮标，可能在恶劣天气条件下的稳定性较差。它们容易受到波浪、风暴和水流的影响，可能更容易侧翻或失去稳定性。并且，可能在波浪影响下产生振动或摆动，可能影响到精确的水质测量。本系统数据采集终端搭载在自主设计的浮标上，采用三角陀螺形状的浮标结构，更能抵抗浮标振动，具有更高的稳定性，浮标结构设计如图 3 所示：

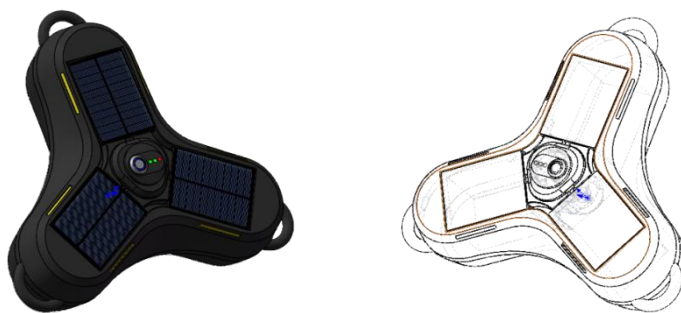


图 3 浮标结构图

（2）模块搭建

传感器组主要有 pH 传感器、温度传感器、TDS 传感器、光照传感器、核放射检测器和 GPS/北斗定位模块构成，将多种传感器的数据进行融合，以便更全面、准确地感知水域环境变化，进一步提高浮标单元的自动化程度。STM32 处理器采用 STM32F103 系列单片机，该系列的单片机具有功耗低、接口丰富、I/O 口

易扩展的特点。GPS/北斗定位模块采用 ATGM336H-5N 模组,可同时接受六个卫星导航系统的 GNSS 信号。

数据采集终端内置的 STM32 处理器,负责对采集到的数据进行处理和打包,包括数据的格式转换、时钟同步、错误检测和纠正等功能,以确保数据的准确性和可靠性。集成 GPS/北斗定位模块,用于获取浮标的精确位置信息,有助于定位浮标的位置,并将数据与具体的地理位置相关联。数据采集终端结构图如图 4 所示:

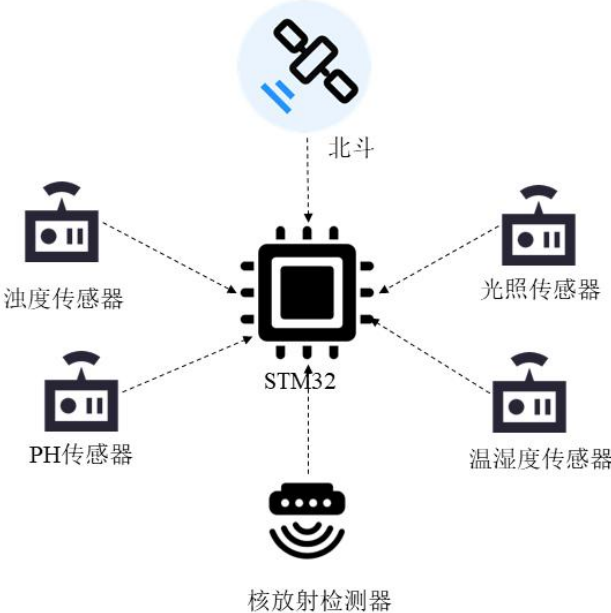


图 4 数据采集终端结构图

考虑到本系统需要在户外长时间运行,系统采用了 12V 大容量锂电池,并搭配太阳能电池板以供电。此外,系统还配备了快速充电电路,根据需要采用不同的启动方式,以降低能耗,有助于延长节点的电池寿命,减少维护和更换电池的频率,实现绿色可持续发展。在这一部分的电源管理中,电压需要从 12VDC-DC 降至 5V 以及 LDO 降至 1.8V,以满足不同模块的供电需求。在充电过程中,系统会关闭所有功能,以避免干扰和功能冲突,确保充电的有效性。

4.1.3 无线通信电路

LoRa (Long Range) 自组网技术是一种专用于低功耗广域网络 (LPWAN) 通信的协议,它具备出色的通信范围和能效。LoRa 自组网技术借助无线射频通信,采用正交频分多路复用 (OFDM) 和正交调频 (OQPSK) 等调制技术,使 LoRa 设备能够在不同信道和带宽下进行通信,以满足各种应用和环境需求。

该技术的核心组成部分包括设备、网关和应用服务器。设备通过 LoRa 模块与网关通信,网关负责将数据传输至应用服务器,从而实现设备和云端服务器之间的通信。这个无线通信电路主体由 LoRa 自组网构成,通过数据采集装置,包括基站和采集网关,用于采集传感器数据并将其上传至服务器。这些数据经由 LoRa 自组网传输,并最终通过不同公共网络传送至服务器。

LoRa 自组网通过对每个 LoRa 设备进行通信频率、数据传输速率和射频功率等基本参数的配置,将这些设备分为不同类型的节点,包括终端设备和网关。终端设备负责采集传感器数据,而网关则与互联网相连,将数据上传至云端服务器。这些设备能够形成多层级的网络拓扑结构,并在需要时自动建立网络连接,使

LoRa 网络更具弹性，以适应不断变化的环境条件。

总之, LoRaWAN 拓扑结构是一种灵活、高效的 LPWAN 解决方案, 通过各种设备协同工作, 实现了长距离、低功耗的通信, 适用于各种应用场景。LoRaWAN 拓扑结构如图 5 所示:

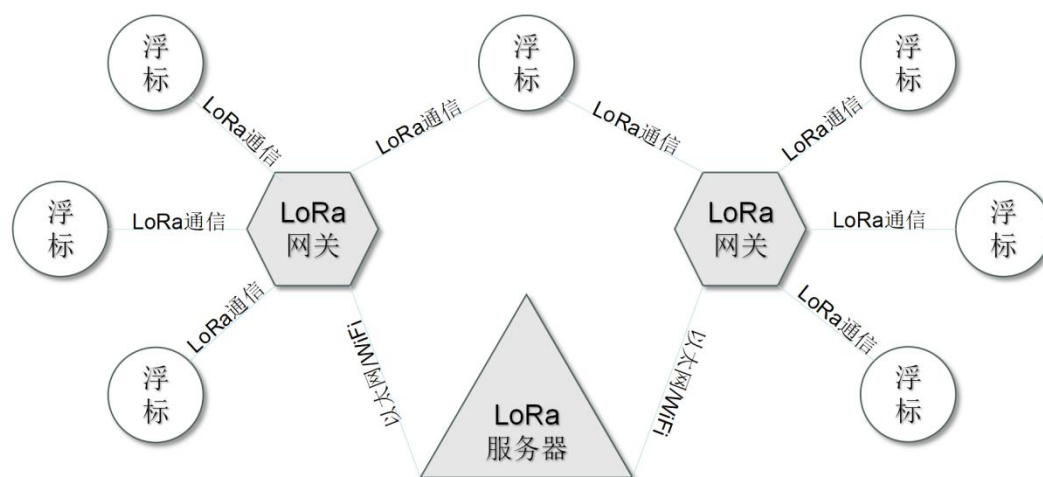


图 5 LoRaWAN 拓扑结构

4.1.4 远程管理系统

远程管理系统集设备监控、数据分析、看板展示于一体，系统负责将采集器获取的信息以图形和表格形式呈现给用户，供用户管理浮标、解读与分析浮标使用状态和水域情况，以及对水质情况进行预警，水质监测管理图如图 6 和图 7 所示。

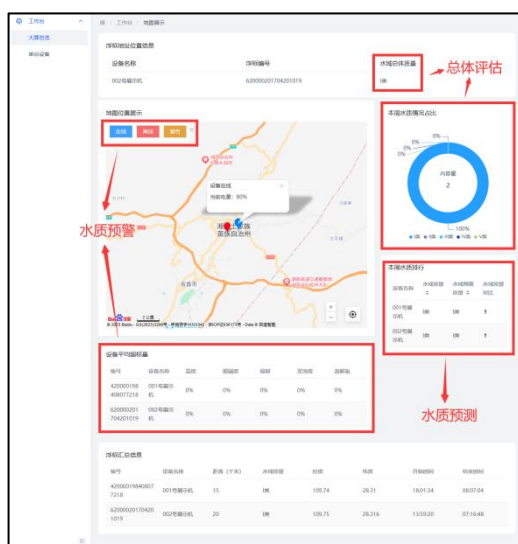


图 6 大屏总览图



图 7 单台设备展示图

该系统根据采集设备记录并上传的信息,通过云端大数据算法分析后生成水质数据的图像化展示和值。用户可在线监测看板实时监控当前用户下的所有设备工作和报警状态,监控实时数据变化,也可选择某一款设备或采集点位查看历史采集记录。系统可实时获取特定地点的水质数据,监控特定区域水质状况,具有参数超标自动报警等功能。

4.2 系统软件设计

系统软件分为三个模块：LoRa 节点程序，LoRa 节点程序和服务器程序。

（一）LoRa 节点程序

系统用于采集水质信息的操作包括传感器数据采集、中央控制器处理以及通过数据通信模块传回至上位机。初始阶段，系统启动 STM32 时钟进行初始化，并通过 RTC 时钟唤醒 STM32 单片机。随后，系统对采集节点的 STM32 单片机、LoRa 模块、定位模块以及各传感器模块进行初始化。这些模块开始采集并储存各项数据。数据采集端的程序流程如下图 8 所示：

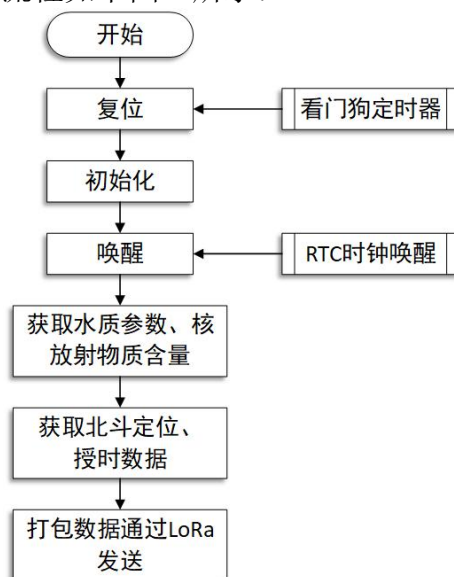


图 8 数据采集端程序流程图

（二）LoRa 节点程序

STM32 单片机节点在初始化 LoRa 模块后，需等待监控中心的 STM32 单片机、其附属 LoRa 模块以及 ESP32 模块完成初始化。一旦监控中心设备初始化完成，节点的 LoRa 模块将发起入网申请，并建立通信连接与监控中心的 LoRa 模块。成功接收到应答后，确认节点已成功入网。接收到节点数据后，将数据进行打包并上传至服务器。以下是 LoRa 网关程序的流程图，如图 9 所示：

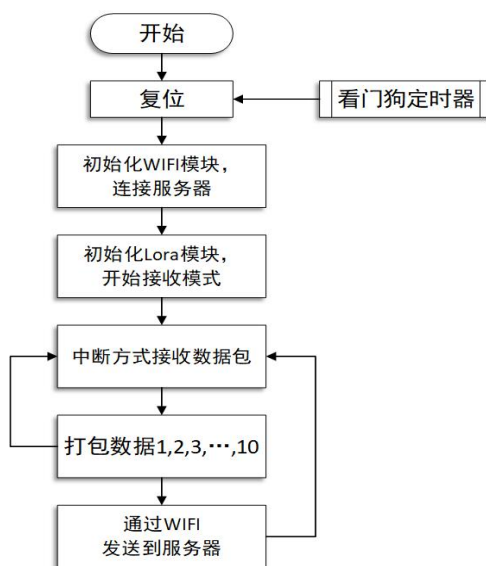


图 9 数据集中器程序流程图

（三）服务端程序

该系统负责将采集器获取的信息以图形和表格形式呈现给用户。用户可以通过监测看板获取有关浮标的使用状态，以及水域监测等重要参数。此外，用户还能接收来自监测服务平台的预警信息。如果参数数值不在正常值范围内，出现含量超标或不足的迹象，服务平台将向用户发出警报。用户可以根据情况迅速采取相应措施，从而实现智能化水质监测管理并提供相应的支持服务。服务器程序功能图如图 10 所示：

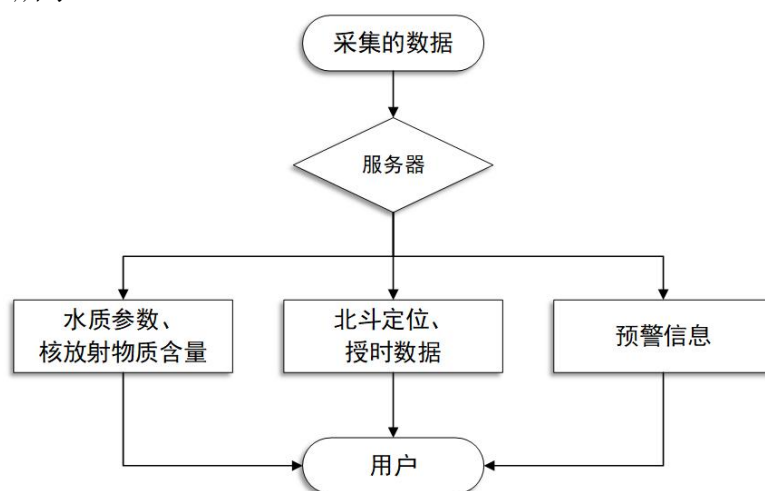


图 10 服务器程序功能图

五、作品实物展示

在硬件搭建完成后，我们进行了功能测试和调试，确保浮标的运行稳定、数据监测准确，并满足水域监测的需求，图 11-13 是我们的实物展示图。



图 11 浮标一代



图 12 浮标二代



图 13 LORA 网关

六、应用前景

世界经济快速发展，环境污染问题越发突出，水体污染已成为最严重的污染之一。在水污染防治工作中，水质监测是提高水环境管理保护的必要手段和重要环节，在环境监测中占有很大比重。

国务院生态环境部提出《生态环境监测规划纲要(2020-2035年)》，确保碧水保卫战各项目标落地见效，推动地表水监测由人工监测与自动监测并行，向以自动监测为主过渡。它可以缩短检测周期，降低运行成本，提高工作效率。

传统的水质监测技术利用人工通过单个设备进行采集或者通过水质取样实验室分析得到的水质参数，这种采集水质的方式时间跨度长，对人力的成本要求也较高，集成度低。经过我国水质监测技术的发展，水质监测大多采用串行总线进行数据的接收，在水域复杂的情况下存在着布线困难，移动性差等问题。采用该系统能大大解放人工劳动，促进社会绿色发展，提高水质监测准确度，并解决上述水质监测设备生产和经营中存在的题，不仅有助于人类对水资源进行管理、保护和利用，还可以利于人类监测水产养殖的水质，以提高养殖水产品的质量和产量，同时提高自动化和智能化水平，对促进我国水域环境改善具有重要意义。

七、挑战性和不确定性

(一) 挑战性

(1) 浮标需要长时间运行，时钟漂移可能会影响数据的时间戳准确性，需要考虑时钟同步机制以保持准确时间记录。

(2) 多设备接入时可能出现数据采集时间延迟，需要保证数据采集的时间同步，以实现水质数据实时监测。

(3) 设备需要长时间独立运行，为延长设备运行的生命周期，在数据传输期间和不活动期间都能保持低功耗状态。

(4) 自组网技术需要确保设备之间的互联，实现无缝集成的同时保持低功耗。确定最佳的网络拓扑结构，以实现设备之间的有效通信，是一个挑战。

(5) 具有重心低、防侧翻的浮标结构的设计具有一定的挑战性。

(二) 不确定性

在实际水域中进行试验可能面临天气、水域条件等不确定因素的影响，在不同水域环境中进行系统的试验和验证是必要的，以确保系统在不同条件下的可靠性和性能。因此，团队将在试验之前制定详细的试验计划，考虑不同情况下的风险因素，并准备备用方案以应对突发情况。

八、下一步计划

系统秉持绿色发展理念，最终设想是持续优化，以解决现有挑战并提供更卓越的性能和便捷性。项目的未来发展方向包括降低功耗，延长产品续航时间，以及改进充电方案，以确保系统在不同环境下的可靠性和持久性。未来计划将在该项目中引入浮标波浪发电装置，以捕获波浪能量并将其转化为浮标内的电机能源，随后再将其进一步转化为可储存二次能源，进一步提高产品续航能力，浮标波浪发电装置设计的四视图与总览图分别如图 14、图 15 所示：

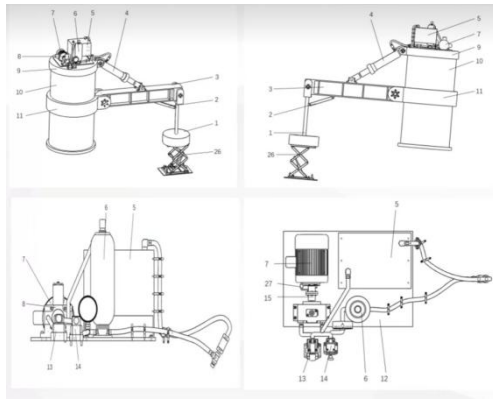


图 14 浮标波浪发电装置四视图

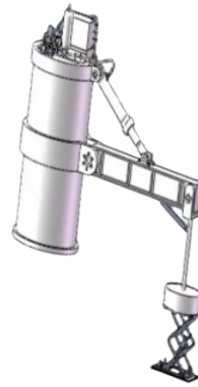


图 15 浮标波浪发电装置总览图

参考文献

- [1] 易继坤.便携式多参数水质检测仪的信号采集及传输系统设计与实验[D].重庆大学,2009.
- [2] 邢建勇.基于 HY-2A 多传感器的风反演精度和同化研究[D].北京:中国科学院大学, 2016.
- [3] ENCINAS C,RUIZ E,CORTEZ J,et al.Design and implementation of a distributed IoT system for the monitoring of water quality in aquaculture[C]// Wireless Telecommunications Symposium.IEEE,2017:1-7.
- [4] 乔欣, 孔兵.基于 ZigBee 技术的巢湖水质监测系统设计与实现[J].巢湖学院学报, 2019(3):7-13.
- [5] 张刚, 胡洋洋, 韩祥兰, 等.淡水珍珠蚌循环水养殖模式下分布式水质监控系统设计[J].农业工程学报, 2020(7):239-247.
- [6] 姚达雯, 周国平, 王鑫鑫, 等.基于 WSNs-SMS 的低功耗水质检测系统设计[J].传感器与微系统, 2014(11):109-112.
- [7] 杨瑞峰,王雄,郭晨霞等.基于 ZigBee 无线传感网络环境监测系统设计与应用[J].电子器件,2017,40(03):760-765.
- [8] 李秋慧,李洁,王传敏等.基于 GPRS DTU 的远程可控水质监测船[J].电子技术与软件工程,2021(05):94-96.
- [9] 马银鑫,郭来功,朱明智等.基于微控制器的水质监测系统设计与实现[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2022,32(03):53-57.
- [10] 王明军, 樊思雨.基于 LoRa 无线传输的水质监测系统[J].计算机系统应用, 2022,31(8):80-87.
- [11] 谭华.基于 Labview 监控的远程无线多参数水质监测系统设计与实现[J].网络安全技术与应用, 2022(8):36-38.
- [12] 王军, 胡刚雨, 肖晶晶.基于 NB-IoT 的水质监测系统研究[J].现代电子技术, 2022,45(16):50-54.
- [13] 赵世栋.基于物联网技术的化工厂污水水质监测系统的研究[D].淮安: 淮阴工学院, 2021.
- [14] Measurement,2000,28(3):219-224.Azedine C,Antoine G,Patrick B,et al.Water quality monitoring using a smart sensing system[J].
- [15] Congress on Computer Science and Engineering(APWC on CSE).IEEE,2015:1-6.A.N P,K.A M,F.R I,et al.Smart water quality monitoring system[C]//2015 2nd Asia-Pacific World.
- [16] Networks[J].Journal of Networks,2014,9(4):840.Daudi S S,Shi F Y.Water Quality Monitoring

and Control for Aquaculture Based on Wireless Sensor.

- [17] Quality Monitoring[J].IETE Journal of Research,2013,59(5):523-534.Waseem,Alamzeb,Mustafa,et al.Design of a Low-cost Underwater Wireless Sensor Network for Water.
- [18] Chensky D A,Aisuev B B, Chensky A G, et al. Water environment monitoring with an autonomous unmanned surface vessel[J].Journal of Physics: Conference Series, 2021,1728(1):012002.
- [19] Adamo F,Attivissimo F, CarducciC G C, et al. A Smart Sensor Network for Sea Water Quality Monitoring[J].IEEE sensors journal, 2015,15(5):2514-2522.
- [20] Saravanan K,Anusuya E, Kumar R, et al. Real-time water quality monitoring using Internet of Things in SCADA.[J]. Environmental monitoring and assessment, 2018,190(9):1-16.
- [21] Le P T. Cost-effective Evaluation,Monitoring, and Warning System for Water Quality based on Internet of Things[J]. Sensors and Materials, 2021,33(2):575-583.