

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.04.006

基于无人船的水质监测及控制系统设计

王柏林¹, 唐梦奇², 李 佳¹, 刘云平²

(1. 中国华云气象科技集团公司, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学 信息与控制学院, 江苏 南京 210044)

摘 要: 针对执行水质监测任务过程中固定浮标监测站单点监测存在局限性、船载观测人员取样耗时耗力等问题, 本文设计了一种搭载多点、分层自动采水取样装置的智能无人船水质监测系统, 可实现目标水域的多点、分层连续水质数据测量及取样。该智能无人船具备基于快速随机树 (Rapid Random Tree) 算法的自主避障和快速路径规划功能, 解决了现有无人船技术存在的多障碍自主路径规划难等问题。同时, 本设计结合了 ARM9 控制芯片、M5310 无线传输模块, 通过可视化的显示界面和远程 WEB 访问的功能, 大大提升了科研人员及时处理特殊情况便捷性。通过实验测试及比对分析, 证明本设计具有智能高效、稳定可靠等优点, 能够满足职能部门对于水质监测工作的需要。

关键词: 水质数据; 定点、分层采水; 无人船; 无线传输

中图分类号: TP39 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-2029(2019)04-0032-07

目前国家特别注重水质管理和监测工作, 强调要加强水域环境保护的策略。随着水域污染问题日趋严重, 我国政府采取了一系列预防和管理措施, 保护水域生物资源和生态系统。我国水质环境监测技术也在不断提高和进步。最近几年, 国家的水质环境监测机构已经对相关水域采取了全方位监控, 以确保能够有效地监测水域环境状况。以往, 我国针对水质监测, 主要采用人工采样分析和浮标定点监测两种方式。对于人工采样, 排污口等往往是水质监测的重点区域, 还有水域情况复杂的区域, 大船往往不能驶入, 通常的做法是监测人员租用小木筏或者小渔船到定点区域采样, 这对人员工作造成一定的危险^[1]。对于浮标定点监测, 主要存在以下几方面问题: (1) 多点布置需要多套浮标设备, 而浮标设备价格昂贵, 多点布置导致费用高; (2) 浮标设备维护保养难度大且费用高, 由于浮标长期安放在海上, 需要定期对监测传感器上的附着物进行清洗, 在大风浪情况下维护人员安全不能得到保障; (3) 无机动性, 不能对污染物进行跟踪, 所监测水域范围有限; (4) 浮标也不具备采水样功能, 针对特殊水

域的水质分析需要, 研究人员还需要到现场采集污水样品。所以, 需要一艘具有自主机动性、小型便捷的设备应用于水质监测领域。

美国的水文自动化技术研发最早、应用也最广泛, 其中基于卫星通信和网络同步方式的水质信息探测是全球最先进的相关技术。基于无线传感网的实时在线系统, 它不仅能够实现常规水质数据监测, 还可以实现大范围的采集端数据通信, 避免了大面积的布线所带来的不足。而对于无人船的应用方面, 国外起步较早, 美国打造了各种无人船的平台。例如, 位于弗吉尼亚州的 UOV 公司研发了太阳能、风能等能源型无人船, 可以长时间续航, 不间断地监测海洋数据。除了美国之外, 葡萄牙波尔图大学研制的水面自主航行器——“剑鱼”也可用于多种水质信息采集。其船体作为一个移动的探测平台, 利用船载设备高精度导航系统、水下声学调制解调器等, 可以实现导航、探测和计算等多种功能。珠海云洲智能科技有限公司推出的水质监测移动船是国内水质监测方面的代表, 该公司推出的 Surf20 型遥控测量无人船采用 RF 无线视频点对点

收稿日期: 2018-12-13

作者简介: 王柏林 (1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为气象探测技术研究方法。E-mail: wbl3309@126.com

双向通信方式,最远距离可以达到 2 km,最高航速为 1.8 m/s,船舱内置高精度 GNSS,能够实现自主定位和导航的功能,可应用于地表水采样、水体富营养化监测等领域。此外,中国海洋大学、上海交通大学、浙江大学等国内高校都先后开展了无人船平台的研发^[2-3]。

本文设计了一种以无人船为载体的水质监测平台,阐述了定点分层采水、路径规划和避障、微弱信号采集处理、上位机智能控制的设计特点和实现方法。通过试验测试可知,移动监测平台数据采集稳定准确,路径规划智能高效,该平台与现有监测浮标协作可构成“点面结合”、“动静互补”的新型监测模式,能够极大提升水质监测的时效性和覆盖范围,提高水质数据监测的管理和服务水平。

1 无人船水质监测系统构成

无人船水质监测系统主要由两部分构成:无人监测船和岸基上位机,两者之间采用无线传输通信。无人监测船搭载 ARM9 控制芯片、多种传感器、采集控制模块和无线传输模块,对目标水域进行大范围的水质参数测量,ARM9 控制芯片时钟频率高、指令周期好,实现了无人船的多指令执行及稳定性的提高。同时无人船上配置多个采水瓶,进行定点采水和分层采水,最大程度实现采集样本的多样化,减少受局部环境影响而导致的单点测量数据失真。岸基上位机部分包括无线接收模块和上位机软件,用于对无人监测船的数据接收以及指令发送。上位机软件采用 QT 编写界面,具有数据可视化和远程 WEB 访问的功能。系统框图如图 1 所示。

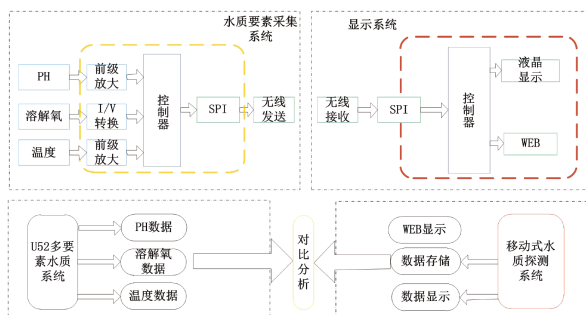


图1 系统框图

2 无人船路径规划算法

无人船使用路径规划算法,可以提高水质监测

的工作效率,节约人力,同时相较于传统的遥控器控制更加方便和稳定,使水质监测智能化、便捷化。

文中采用的是 RRT 算法实现无人船的路径规划。RRT 算法分为路径构建和路径查询两个阶段。在路径构建阶段,首先,以状态空间中的初始点用作整个搜索树的根节点;然后,根据用户设置的函数在搜索区域中生成一个随机点,依据设定的某种约束搜索其在搜索树上的父节点。其次,在父节点和随机点之间通过自己定义的约束条件得到新节点,并将其添加到搜索树上;最后,确定产生的新节点是否到达目标区域,如果没有到达则重复进行上述步骤,直到产生的新节点满足条件。当满足要求时,可在形成的树中找到一条躲避障碍物到达目标点的路径。RRT 新节点位置的计算公式:

$$X_{\text{new}} = X_{\text{near}} + P \times \frac{X_{\text{rand}} - X_{\text{near}}}{|X_{\text{rand}} - X_{\text{near}}|} \quad (1)$$

式中: P 为 RRT 的生长步长。

在路径查询阶段,在最终形成的搜索树上,根据自己制定的搜索规则,从目标点依次寻找其父节点,直至到达初始点,由此找到一条满足约束的全局路径。

图 2 描述了 RRT 算法的扩展过程。新节点加入已有的随机树中在允许的时间内不断迭代,如果扩展的新节点的距离目标终点的距离在最大允许的范围内,则返回随机树以及路径,规划成功。RRT 算法的具体流程图如图 3 所示。

在 Matlab 平台上进行了路径规划仿真。在 24×19 的栅格中绘制工作环境,起点用绿色圆圈表示,目标位置用红色圆圈表示,障碍物用蓝色圆圈表示,无人船航行的区域就是黑色粗线包围的区域。栅格每一格的边长为 1,圆圈的半径统一设置为

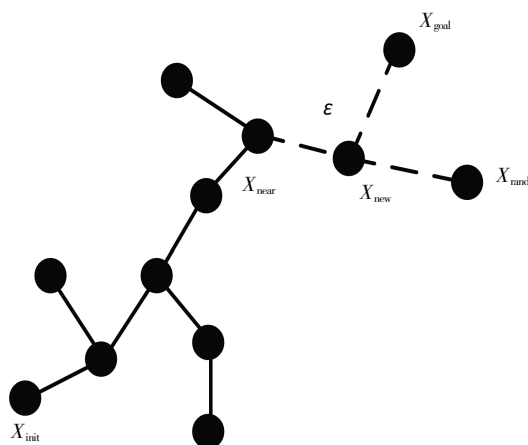


图2 RRT 算法

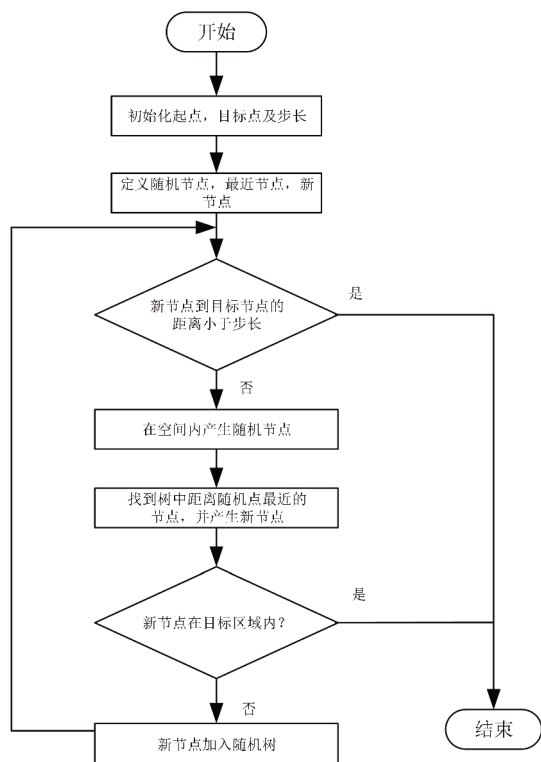


图 3 RRT 算法流程图

0.5。仿真中随机扩展树用宽为 2 的粉色线条表示;未经平滑的路径用宽为 3 的红色线条表示;平滑后的路径用宽为 5 的绿色线条表示。当随机步长 $\text{param.res}=0.3$, 与终点的距离参数 $\text{param.thersh}=0.5$ 时,得到的路径规划图如图 4 所示。

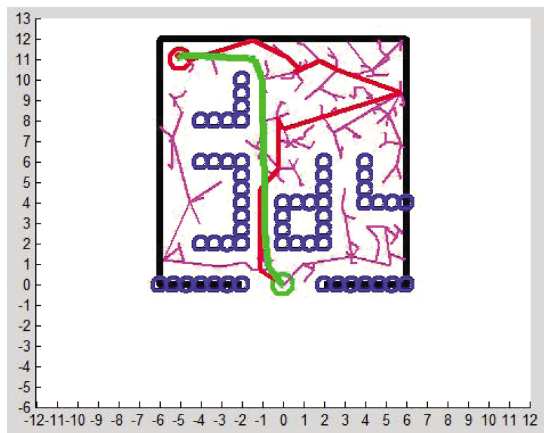


图 4 仿真规划路径

3 数据采集系统

在无人监测船上安装了 pH 酸碱度传感器、温度传感器、溶解氧传感器以及采集控制模块和无线传输模块,监测船行驶到指定位置时控制传感器采集数据。测量信号经过放大或转换为合适量程的电

压信号,再由单片机 ADC 模块将电压信号转换数字信号,然后对数字信号重新赋值,按照约定的数据格式输出到串口,最后通过基于 3G 通信原理的无线发送模块将测量数据传输到岸基上位机显示系统。

3.1 pH 值测量

酸碱度传感器的核心部分是其测试电极。本系统测试电极是采用玻璃电极和参比电极组合而成,组合后的测量元件被用来测量水溶液中的氢离子浓度,即 pH 值。该传感器有两个电极,即测量电极和参比电极,两电极之间的电压符合能斯特(NERNST)公式,能斯特电位和温度有密切关系,因此在实验时必须注意温度^[4-5]。

该元件测量信号比较微弱,不能被单片机捕获,必须经过一定的信号调理才能被单片机识别。信号调理模块的放大增益可通过电位器进行调节,以满足不同的需要。放大模块采用两级放大,第一级采用输入阻抗较大的场效应管 CA3140AMZ,减少信号的损失,第二级采用的是通用的运算放大器 TL081BCDG4,将信号进行更大倍数的放大,两个放大器均采用典型电路进行搭建。增益电路原理图如图 5 所示。

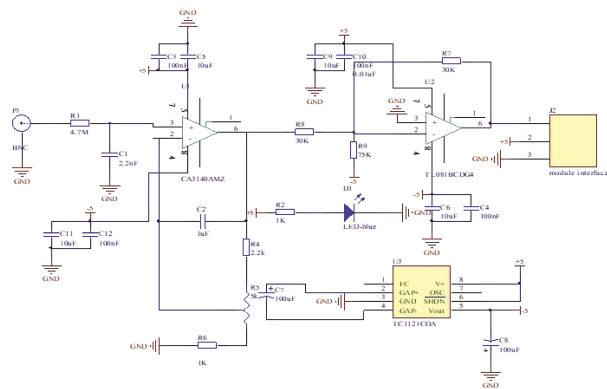


图 5 增益电路

3.2 溶解氧测量

溶解氧测量是测量氧在水中的溶解度,其具体大小取决于温度、压力、水中溶解的盐等参数。该传感器是由阴极、阳极以及氢氧化钾溶液组成。通常在测量过程中需要在阴阳两极之间的电解液中施加 0.712 5 V 恒定电压,使用 70 μm 厚度的聚乙烯薄膜将电极与被测水样隔开以防止直接接触影响测量结果。当氧气通过膜侵入到电解液时,在阴阳电极间构成回路,从而产生电流,根据电流大小测量溶解氧的浓度^[6-8]。

因为溶解氧传感器的电极输出的电流极小,在

100 μ A 之内,而目前的 AD 转换器只能对电压信号进行调理,所以在进行溶解氧传感器调理电路设计的过程中,首先要将电路信号转换为电压信号,之后对电压进行放大滤波,直到将电压调节到 ARM 控制器可读的范围之内。文中设计的调理电路中输出电压的公式为 $V_0 = I_{in} * R_1 * \left(1 + 2 * \frac{R_2}{R_3}\right) * \frac{R_7}{R_6}$; 溶解氧的调理电路如图 6 所示。

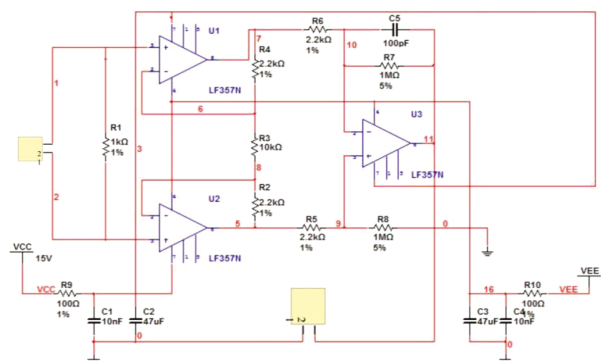


图6 调理电路

3.3 温度测量

PT100 温度传感器是由金属 Pt 制成,该传感器阻值大小随温度变化而变化,0 $^{\circ}$ C 时,它的阻值大小为 100 Ω 。PT100 硬件电路一般包括采集电路、放大电路、ADC 转换电路 3 个部分。文中使用的是直流电桥法,放大电路使用的是 LM358 差分运放器,通过调节电阻大小来调节放大倍数,采集放大电路如图 7 所示。

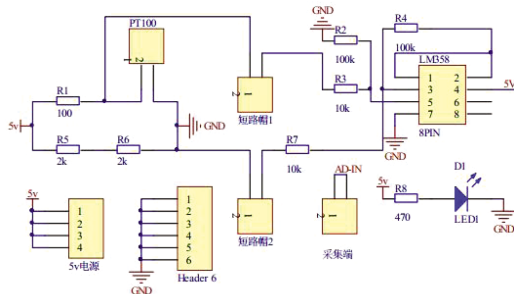


图7 采集与放大电路

从图 7 中可以看出,R1,R5,R6 和 PT100 组成了直流电桥,PT100 的变化会使得电桥中的信号发生变化,微弱的信号输入到 LM358 组成的差分放大器电路中,放大器对输入的信号进行放大。R2,R3,R4 和 R7 构成 LM358 外围电路,且 R4 和 R7 在本次设计中为可调电阻,设计中可以通过示波器来查看信号的放大倍数,如果放大倍数较小,可以调节 R4 和 R7,使得运放倍数达到理想状态。

4 上位机设计

上位机软件由数据显示界面和路径规划窗口组成,采用了面向对象的 C# 语言编写,在 VS2013 环境下编译完成,此环境集成了大量实用的类库,只要选择需要的控件,对代码稍加修改即可,高效地实现了无人船数据的实时读取和显示。

无人船获取的水质监测数据经 M5310 无线传输模块发送至服务器,经中转发往岸基上位机无线接收模块。同时,工作人员只需选定无人船的驶向目的地,将指令通过无线传输模块发送到无人船。上位机根据无人船所处的环境,运用快速随机树 (RRT) 算法进行快速路径规划并发送给无人船,即可实现自主巡航。操控无人船采集数据时,只需在显示系统触摸屏界面中根据语音提示打开传感器相应串口号、设置传输速率,即可显示采集数据^[9-13]。

上位机主要是监控无人船采集节点发送的水质数据,因此采集节点的设计也是整个系统的核心部分之一;keil uVision5 作为采集节点开发平台,主要包括 ADC 转换、温度采集等功能。无人船节点发送软件流程如图 8 所示。

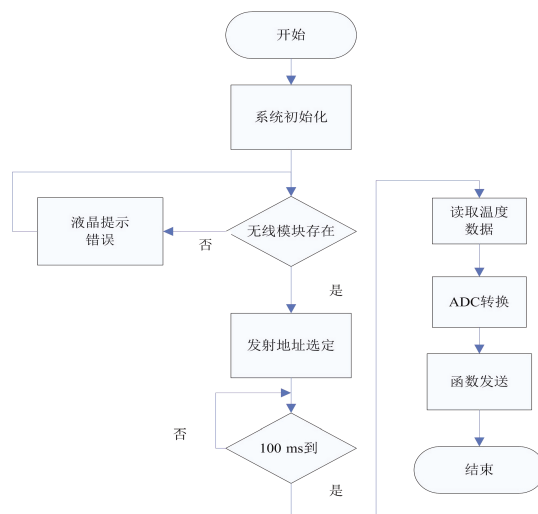


图8 发送端流程图

5 系统测试与实验分析

设计的系统测试包括控制采集系统测试、控制系统测试、路径规划测试和通信系统测试。测试前完成电路功能验证,判断整个系统是否正常运转,并检测密封性^[14]。

5.1 采集系统测试

将各测量电极与单片机进行连接,在实验室利用串口调试助手观察各电极是否正常采集数据,有没有数据漂移等现象出现。在连续测试 2 h 之后,数据显示正常。水质监测信息界面如图 9 所示。

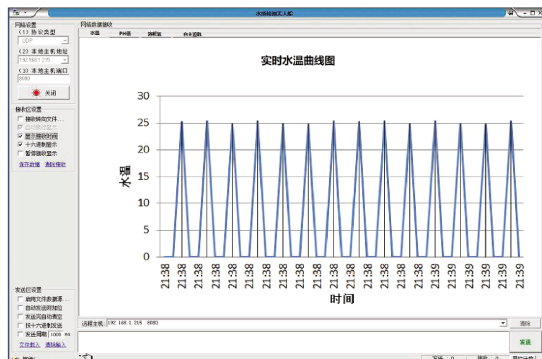


图 9 水质监测信息界面

5.2 控制系统测试

分别将制作好的采集端二进制文件、uboot、内核、文件系统烧写到相应的目标板之中,设置接收端 IP 地址并正常接收到数据后,即可开始实验。

为保证测试的安全性,在整个实验之前,需要预先在实验室进行船体密封性测试和电机、舵机正常稳定工作测试。测试结果表明,无人船浸泡 24 h 后船体未漏水,舵机能够正常调整角度,推进电机运转,既可以差速工作(辅助转向)也可以同步工作(直推),响应速度达到设计要求。

将无人船放入湖中,开启总线电源,按照既定路线开展多点连续测量。测试中,无人船的性能基本能满足实验要求,在较平静的水面中以 0.2 m/s 的速度前行,并且转弯控制有效。系统的电路和湖水做到了隔离,无侵水现象发生。无人船实验现场如图 10 所示。



图 10 无人船实验

5.3 实验数据分析

2017 年 6 月 11 日,项目组在无锡市某化工园区内利用无人船搭载便携式水质多参数分析仪,在内部河道指定位置进行了水质采样和实时监测,并

将采回的水样在实验室用专业仪器进行检测,两者数据对比如表 1 所示。实验数据分析结果表明:无人船搭载水质检测仪器测量数据与实验室专业仪器测量数据相差较小,无人船水质测量数据可信度较高。

表 1 数据对比表

测试数据项目	无人船数据	专业仪器数据
水温/℃	30.6	31.3
溶解氧浓度/mg·L ⁻¹	3.22	3.3
酸碱度(pH 值)	6.4	6.6

在化工园区内部河道中,无人船通过 RRT 算法规划路径,开展自主避障采水,实验路线如图 11 所示。

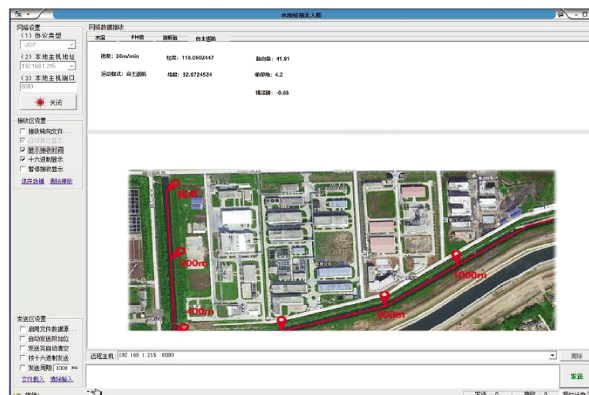


图 11 自主避障采水实验路线示意图

在实验中,项目组在河流中设置了障碍物,并在上位机上标注。经过实验,RRT 算法可以实现自主路径规划及避障功能。无人船进行水质数据采集,按照预先设定好的路线自动巡航,驶向指定水质检测位置,每隔 50 m 采集数据一次,水深度约 2 m 左右,采集结束后生成水质信息报告,数据采集结束后返航。其测得的数据与环保局专业仪器进行对比,绘制成图 12~图 14。可以看出,温度均在 29.5~32 ℃之间,可决系数 $R^2=0.934\ 2$ 。溶解氧均在 3.2~3.3 mg/L 之间,其可决系数 $R^2=0.985\ 8$,可靠度很

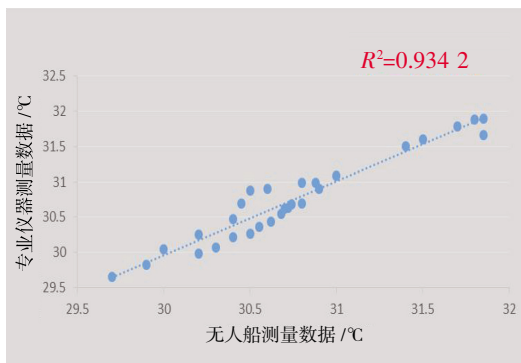


图 12 温度对比

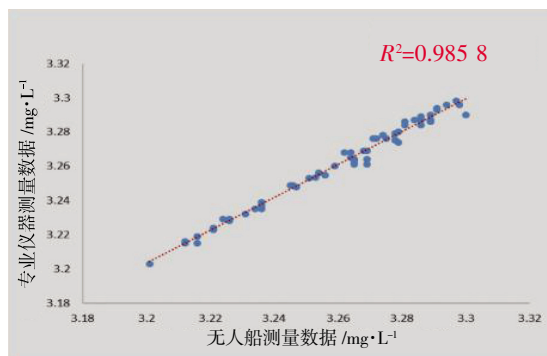


图13 溶解氧对比

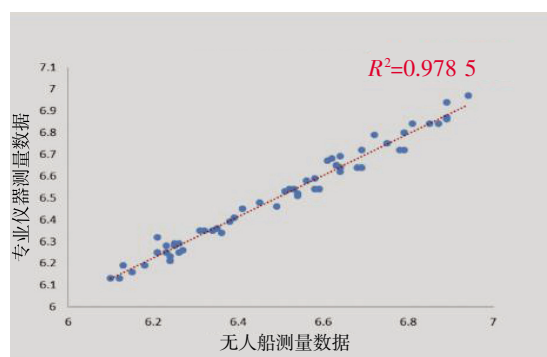


图14 酸碱度对比

高。项目组测得酸碱度数据在 6.05~6.98 之间,专业仪器测得的数据在 6.12~7.05 之间,相差也很小,可决系数为 0.978 5,所以能够满足环保局检测需求。

6 总结

水质数据采集系统以无人船为载体,结合了 ARM 技术、无线传输技术,通过远程控制实现目标水域的多点连续的 pH 值和溶解氧等数据测量,通过可视化显示界面和远程 WEB 访问功能,以便于工作人员及时、全面地掌握水质变化情况。通过实验测试及比对分析,本设计具有智能高效、稳定可靠等特点,对于我国的水质监测工作具有一定的现实意义和实用价值。在未来,将充分利用 ARM9 的高时钟频率和强大的计算能力,采用 UTMD 算法,实现无人船在未知区域的路径规划,进一步提升无人船的便捷性。同时,无人船将搭载更丰富的传感器,如水流传感器等,实现水质监测的多样化。

参考文献:

- [1] 曲茉莉,王强,邢洁,等. 新型应急技术在突发环境污染中的应用[J]. 科技创新导报, 2015, 14: 93-94.
- [2] Zhuiykov S. Solid-state sensors monitoring parameters of water quality for the next generation of wireless sensor networks[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2012, 161(1): 1-20.
- [3] Tomperi J, Juuso E, Eteläniemi M, et al. Drinking water quality monitoring using trend analysis[J]. Journal of Water & Health, 2014, 12(2): 230.
- [4] 廖斯达,贾志军,马洪运,等. 电化学基础(II)—热力学平衡与能斯特方程及其应用[J]. 储能科学与技术, 2013, 1(2): 63-68.
- [5] 陈瑶,薛月菊,陈联诚,等. pH 传感器温度补偿模型研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(8): 1034-1038.
- [6] 彭晓彤,周怀阳. 溶解氧传感器探测技术及应用中的若干问题[J]. 海洋科学, 2003, 27(8): 30-33.
- [7] 辛联庆,陈娟,朱祥庭. 微量溶解氧传感器的研制[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 89-92.
- [8] 马从国,王建国,周恒瑞. 国内养殖池塘溶解氧智能监测与调控研究进展[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(3): 261-264.
- [9] 周鹏飞. 基于嵌入式的推杆电机控制系统设计[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [10] Zheng Z, Zhao Y. Research on the water quality monitoring system for inland lakes based on remote sensing [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10(2): 1707-1711.
- [11] 刘博,辛峰. 一种星载电源系统下位机设计[J]. 现代电子技术, 2015(4): 159-162.
- [12] 余德华. 基于 ARM 的嵌入式水质数据采集系统研究与实现[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [13] 冒晓莉,杨博,杨静秋,等. 基于 MSP430 单片机的节能型数字调频发射机[J]. 电子技术应用, 2013, 39(5): 138-140.
- [14] 张秀再,陈彭鑫,张光宇,等. 河流水质实时监测系统[J]. 电子技术应用, 2015, 02: 82-85.

Design of a Mobile Water Quality Data Monitoring System Based on Unmanned Ship

WANG Bai-lin¹, TANG Meng-qi², LI Jia¹, LIU Yun-ping²

1. *China Huayun Meteorological Technology Group Corporation, Beijing 100081, China;*

2. *College of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu Province, China*

Abstract: In the process of water quality monitoring, the sampling time and energy consumption of shipborne observers are limited by single point monitoring of fixed buoy monitoring station. This paper designs an intelligent unmanned vessel-borne water quality monitoring system equipped with multi-point layered automatic water sampling devices. The multi-point stratified continuous water quality data measurement and sampling can be achieved, and the intelligent unmanned ship is capable of autonomous obstacle avoidance and fast-path planning based on the Rapid Random Tree algorithm. It solves the problems of multi-obstacle autonomous path planning and difficulty in existing unmanned ship technology. At the same time, this design combines ARM9 control chip M5310 wireless transmission module. Through the function of visual display interface and remote WEB access, it greatly improves the convenience of scientific researchers to deal with special cases in an in-time manner. Through experimental testing and comparative analysis, it is proved that this design has the advantages of intelligent, efficient, stable and reliable operation, and can meet the needs of functional departments for water quality monitoring.

Key words: water quality data; spot and layer water collection; unmanned ship; wireless transmission