

漂流式水质监测系统设计

王柏林¹ 杨加春² 李佳¹ 徐洁²

(1 中国华云气象科技集团公司, 北京 100081; 2 天津华云天仪特种气象探测技术有限公司, 天津 300384)

摘要: 区别于监测站点数量众多、监测处理时间长的传统水质监测系统, 设计开发了一种基于GPRS无线传输、北斗/GPS位置定位的水面漂流式水质监测系统, 搭载水质参数传感器和温度传感器, 可实现实时水质状况监测、水流速度监测、水质数据评价、洪水预警。通过实验测试和对比分析, 证明本设计具有便携高效、安全可靠等优点, 能够满足水文部门对于常规及应急水质监测工作的需要。

关键词: 漂流, 水质监测, 无线传输

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.02.007

Design of Drift Water Quality Monitoring System

Wang Bailin¹, Yang Jiachun², Li Jia¹, Xu Jie²

(1 China Huayun Meteorological Technology Group Corporation, Beijing 100081

2 Tianjin Huayuntianyi Special Meteorological Sounding Co.,Ltd, Tianjin 300384)

Abstract: Different from the traditional water quality monitoring system with a large number of monitoring sites and long monitoring and treatment time, this paper designs and develops a water drifting water quality monitoring system based on GPRS wireless transmission and Beidou/GPS location positioning, equipped with water quality parameter sensors and temperature sensors, which can realize real-time water quality status monitoring, water flow speed monitoring, water quality data evaluation, and flood early warning. Through experimental testing and comparative analysis, it is proved that this design has the advantages of portability, efficiency, safety and reliability, and can meet the needs of the hydrological department for routine and emergency water quality monitoring.

Keywords: drifter, water quality monitoring, wireless transmission

0 引言

随着经济社会的快速发展和进步, 我国面临的水资源短缺、水体污染严重、生态环境急剧恶化等问题日益突出。近年来, 诸如2005年松花江硝基苯污染、2007年巢湖、滇池蓝藻暴发, 这类水污染事件给人们的生产生活带来了严重的影响。据相关报告显示, 水污染的成因主要是工业废水、城市污水和农业污水, 根本原因是水环境没有得到很好的监测和管理, 因此政府相继出台了一系列相关水环境法律法规, 水质检测和治理已迫在眉睫。此外, 洪水灾害是我国重点防控的自然灾害之一, 在预防洪水灾害时, 不仅需要实时监测水位、流速等主要水文要素, 还需要了解水质情况。

传统的水质检测手段主要有: 人工监测、浮标水质监测、固定水质监测和无人船水质监测, 存在着价格昂贵、监测范围较窄、监测不便捷、应急情况安全系数低等问题。国外报道澳大利亚昆士兰大学研发的

“Drifter”^[1-2], 是一种可用于洪水易发的地区的漂流式水质监测系统, 通过蓝牙、集成GPS/GPRS模块来实现定位和无线传输数据, 实时监测pH值、浊度、盐度、溶解氧、温度, 揭示沉积物和污染物的位置、流量流速等高分辨率数据。目前, 新西兰、美国、德国等国也开始研究和移动使用移动式水质漂流设备^[3-7]。国内还没有类似的成熟产品出现, 中国海洋大学^[8]利用国外进口设备开展近海GPS/GPRS漂流轨迹观测系统及应用, 长江南京航道管理处^[9]利用国产水面跟踪测量仪对航道水面流速、流速进行测量。

本项目设计研发的漂流式水质监测系统主要针对河道水质动态监测, 借鉴“Drifter”设计思路, 采用积木式模块化设计, 可以通过无人机、无人船等小型移动平台在河道或复杂水域抛投使用, 通过物联网数据传模块及北斗定位模块将传感器实时监测数据和位置信息传至上位机, 能够极大提升河道水质监测的时效性和监测范围, 提高水质监测的可靠性。

1 漂流式水质监测系统构成

漂流式水质监测系统主要由两部分构成: 水质监测漂流器(以下简称: 漂流器)和监控上位机, 两者

收稿日期: 2020年4月8日; 修回日期: 2022年2月28日
第一作者: 王柏林(1979—), Email: Wangbailin@cnhyc.com
通信作者: 李佳(1976—), Email: Lijia@cnhyc.com

之间采用无线通信传输数据。漂流器搭载32位ARM微控制芯片、高精度水质监测传感器、北斗/GPS双定位模块、物联网数据传输模块,对水质监测数据、漂流器位置信息进行长时间长距离连续监测。本项目选用的STM32F103系列ARM微控制芯片时钟频率达到72 MHz,不仅可满足本设计需要的数模转换、RS485串口通信、UART异步串口通信等功能,还具备低功耗功能,将大大增加漂流式水质监测系统的续航时间。采用QT开发平台编写漂流式水质监测系统监控上位机软件界面,具有数据可视化和远程访问的功能,可同时接收、处理多台设备观测数据。漂流器系统结构框图如图1所示。

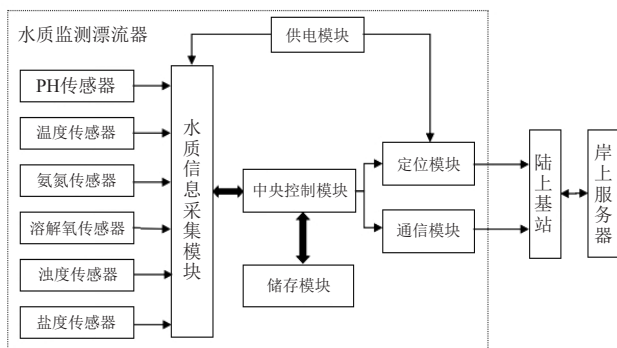


图1 漂流器系统结构框图

Fig. 1 Structure block diagram of drifter system

2 水质数据分析模型

利用证据理论,对水质传感器采集数据进行融合处理,可以提高水质监测数据的准确性。由于漂流器的移动性,在同一范围内可有 N 个探测节点,每个探测节点都可独立传回酸碱性、氨氮、溶解氧等数据,采用证据理论对 N 个节点进行同种信息融合,以酸碱性为例,对数据进行特征提取,选择pH数据值,把 N 个数据进行融合后处理,将检测到的pH数据记为: $A_1, A_2, A_3, \dots, A_N$ 。假设 ϕ 表示无限个数据集,以此构建一个基于 $\phi = \{A_1, A_2, A_3, \dots, *\}$ 的数据信息框架,同时对数据进行可融合性分析,数据分析公式如下所示:

$$m_{i,1}(A_1) + m_{i,2}(A_2) + \dots + m_{i,n}(A_n) + m_{i,j}(\ast) = 1, \quad (1)$$

利用,式(1)作归一化处理,式中 i 表示水质监测传感器, j 表示该传感器采集到的第 j 个数据,归一化得:

$$P_i = \frac{1}{\{\prod_{j=1, \dots, n} [1 - m_{i,j}]\} [1 + \sum_{j=1}^n \frac{m_{i,j}}{1 - m_{i,j}}]}, \quad (2)$$

利用式(2)剔除极端值和传感器导致的异常值。

其次建立单次采集架构 ξ , $\xi = \{A_i(m_{1,i}), B_i(m_{2,i}), C_i(m_{3,i}), \dots\}$,表示单次同时采集到的不同传感器数据的集合,则经归一化处理系

数为:

$$P = \frac{1}{\{\prod_{i=1, \dots, n} [1 - m_{n,j}]\} [1 + \sum_{i=1}^n \frac{m_{n,j}}{1 - m_{n,j}}]}, \quad (3)$$

最后根据 P 的取值范围判定水质污染等级。

3 产品设计

漂流式水质监测系统由外罩、天线、控制器仓、电池仓、传感器、防污罩等组成(图2),是对江、河、湖泊的移动水质数据采集及数据分析、预警系统。漂流器采用聚氯乙烯(PVC)材料,由5个不同直径的主要隔层组成。外壳上部装有聚苯乙烯泡沫塑料环,以保持漂流器在水中的正浮力和直立位置。配重层放在漂流器的底部,确保漂流器保持直立姿态。漂流器的设计总重量小于3 kg。

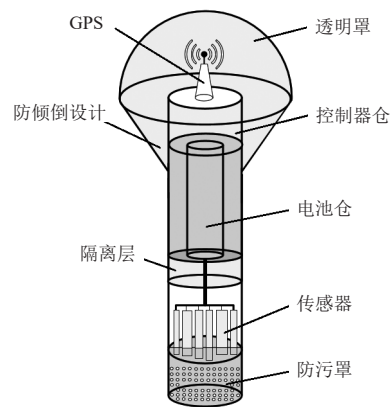


图2 设备内部结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of internal structure of equipment

3.1 漂流器地理信息数据采集

漂流器使用NEO-6M北斗/GPS定位模块采集地理信息数据,具有高灵敏度、低功耗、小型化、高追踪灵敏度等特点。GPS定位模块接收到单片机的申请指令,通过串口控制向控制器模块提供实时定位信息,再通过单片机经数据传输模块反馈给上位机,反馈的定位信息包含漂流器的实时经纬度、地面高程、移动速度和定位时间,定位信息反馈给MCU后经M5310数传模块发送至上位机端。

3.2 漂流器水质数据采集

漂流器使用pH值、氨氮、溶解氧、浊度传感器等传感器采集水质信息,这些信息经过中央控制器综合处理,通过数据通信模块回传给上位机,最终实现水质信息的采集处理。主控制器控制各个传感器的数据采集和处理,由于使用的溶解氧传感器、氨氮传感器、浊度传感器和盐度传感器均使用RS485协议通信,构成一个RS485通信协议的通信网络,水质传感器工

作流程图如图3所示。

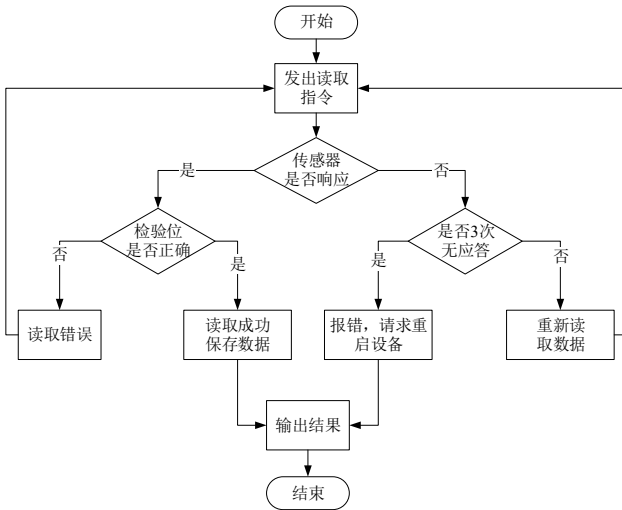


图3 水质传感器工作流程图
Fig. 3 Working flow chart of water quality sensor

(1) 水中溶解氧含量检测

水中溶解氧含量是影响水质的一个重要因素，因此溶解氧含量的测量是水质监测中必不可少的参数，影响水中溶解氧含量的因素有很多，比如水中动物和植物的分布情况、大气压强、水体温度、天气状况等。溶解氧传感器有极谱型、原电池型、荧光法型三种。这三种传感器在测量方法上有本质的区别，根据漂流器应用场景、使用寿命以及产品成本等因素，本产品选用原电池型溶解氧传感器。

原电池型溶解氧传感器采用惰性金属（如金、银等）作为阴极、铅或锡等金属作为阳极，两个电极同时浸入氯化钾电解质中，当水中的氧气透过薄膜浸入电极内时，发生氧化还原反应，电极间会产生微弱的电流，转化的电压值与水中溶解氧含量呈线性相关关系，可通过测量电压模拟量得出溶解氧的浓度，溶解氧传感器参数如表1所示。

表1 溶解氧传感器参数
Table 1 Parameters of dissolved oxygen sensor

检测指标	技术参数
测量原理	原电池法
测量范围	0.00~20.00 mg/L
温度测量范围	0.0~60 ℃
灵敏度	0.01 mg/L
精度	2%
信号输出	RS485 (Modbus/RTU)
防护等级	IP68
耐压范围	0~4 bar

(2) 氨氮含量检测

水体中氨氮含量过高会产生对人体有害的致癌

物质，同时会严重影响水产品的生长和质量。氨氮传感器可以快速检测水中铵离子的浓度，通过测量铵离子的含量来确定水中氨氮的含量。氨氮传感器按照使用场景不同可分为流通式和投注式，由于传感器安装在漂流器上，随水流漂动，本产品选用投注式氨氮传感器。

氨氮传感器将水中铵离子的浓度转化成电压模拟量，电压模拟量与铵离子含量呈线性相关关系，可通过采集电压模拟量得出氨氮的浓度，氨氮传感器参数如表2所示。

表2 氨氮传感器参数
Table 2 Parameters of Ammonia/Nitrogen sensor

检测指标	技术参数
测量原理	铵离子测量法
传感器类型	投注式
测量范围	0.1~18000 ppm
温度测量范围	0.0~60 ℃
斜率	56 mV (25 ℃)
膜电阻	1~4 MΩ
信号输出	RS485 (Modbus/RTU)
防护等级	IP68
耐压范围	0~3 bar

注：1 ppm = 10⁻⁶。

(3) 盐度传感器

盐溶解于水中时是以离子的形态存在的，测量水中盐的含量是通过测量水体电导率来实现的，在水中盐度饱和之前，水的电导率会随着盐度的增加增大，因此测量水中电导率的大小就可以测量出盐度。电导率传感器根据测量原理可分为电极型、电感型和超声波型三种类型。根据漂流器应用场景，本产品选用电极型电导率传感器。

电极型电导率传感器的测量过程中是一个复杂的电化学系统，简单来说是将两个电极两侧施加恒定的电压，水中盐度的变化会导致电阻的变化，从而使流过电极的电流发生变化，在符合欧姆定律的情况下，用电导率代替电阻率，用电导代替金属中的电阻，即用电导率和电导来表示液体的导电能力，从而实现液体电导率的测量，进而转化为盐度，盐度传感器的参数如表3所示。

(4) 温度传感器

常用温度传感器有PT100、PT1000等，不同铂电阻温度传感器之间的主要差别在于测量范围、精度、输出信号类型等，本产品使用的是PT100温度传感器。

PT100温度传感器是电阻式温度检测器，它的电阻值会随着温度的上升而增大，属于正电阻系数，温度传感器的参数如表4所示。

表3 盐度传感器参数
Table 3 Parameters of salinity sensor

检测指标	技术参数
测量原理	电极型
测量范围	0~5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
温度测量范围	0.0~80 $^{\circ}\text{C}$
测量精度	1% FS
响应时间	1 s
信号输出	RS485 (Modbus/RTU)
防护等级	IP68
供电电压	7~30 V
额定功率	<0.2 W

表4 温度传感器参数
Table 4 Temperature sensor parameters

检测指标	技术参数
测量原理	热胀冷缩
测量范围	-50~300 $^{\circ}\text{C}$
绝缘电阻	>100 M Ω (20 $^{\circ}\text{C}$ 时)
响应时间	0.15 s
信号输出	RS485 (Modbus/RTU)
防护等级	IP68
供电电压	5 V

(5) pH值传感器

pH值传感器用于测量水中的碱度和酸度，根据原理可以分为组合传感器，差分传感器，实验室传感器和过程传感器。由于漂流器需要满足长期检测的要求，因此pH值传感器选用差分pH值传感器。

pH值传感器采用原电池原理，用氢离子玻璃电极与比较电极组成原电池，在玻璃膜与被测水中氢离子进行交换过程中，通过测量两个电极之间电位差来检测水中氢离子浓度，从而获得水的pH值，pH值传感器的参数如表5所示。

表5 pH传感器参数
Table 5 Parameters of pH sensor

检测指标	技术参数
测量原理	原电池法
测量范围	0~14 pH
测量温度	0~80 $^{\circ}\text{C}$
零电位	7 \pm 0.5 pH (25 $^{\circ}\text{C}$)
斜率	PTS值 \geq 95% (25 $^{\circ}\text{C}$)
内阻	\leq 250 M Ω (25 $^{\circ}\text{C}$)
耐压力	\leq 0.6 MPa
供电电压	5 V
输出信号	模拟信号

pH值传感器输出的信号为微量电压值，需要将传感器输出的电压值通过电压放大电路放大，然后用模数转换电路将输出的电压模拟量转换为数字量，最后通过标定得到检测的pH值。

4 上位机软件设计

漂流式水质监测系统上位机显示系统利用QT开发平台实现，实现系统管理、数据管理、数据查询、数据分析等软件功能。

(1) 系统管理

系统管理主要为用户提供用户管理、日志管理等内容。添加权限管理以及日志审核功能确保系统的安全性以及可靠性。用户需要进行注册才可登录，登录后可对系统进行相应操作，软件界面如图4所示。

(2) 数据管理

管理员可通过数据管理模块将水质数据上传共享，根据权限等级普通用户可查看相应的水质数据，也可进行数据上传操作，经管理员审核后实现共享。

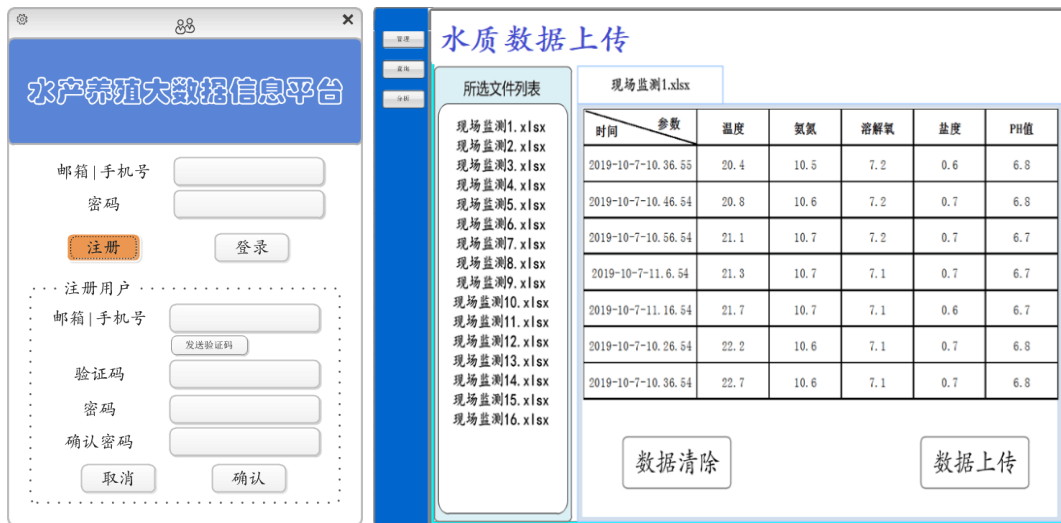


图4 水质监测系统软件界面

Fig. 4 Software interface of water quality monitoring system

(3) 数据查询

以图表的方式展示数据查询结果，既可查询同一地点按时间分布的历史数据，水质要素呈现折线图变

化，也可按照污染等级在地图上标示水质要素，同时，地图上会实时显示漂流器的位置，点击漂流器可见该点实时检测数据，水质监测数据查询界面如图5所示。

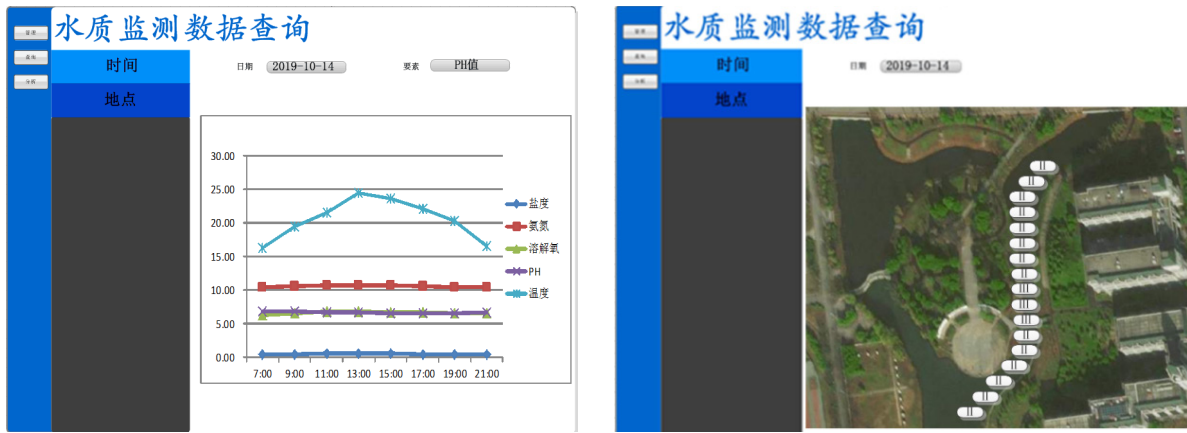


图5 水质数据查询
Fig. 5 Water quality data query

5 系统测试与实验分析

为了验证漂流式水质监测系统的性能，项目组于2019年11月，开展了水质传感器与专业仪器数据对比分析、采集和通信系统测试。在测试开始前，首先完成了电路功能验证、结构密封防水测试，确保水质监测漂流器在水中正常工作。

2019年9月，在长江流域南京地区及滁河流域开展了水质传感器与专业仪器数据对比分析、采集和通信系统测试，采集的数据信息包括温度、氨氮浓度、溶解氧浓度、盐度以及pH值。项目组以每两天为间隔采集数据，共采集24组数据，以两组数据平均值作为一组数据记录，前半月在长江流域进行数据采集，后半月在长江流域进行数据采集，详细记录如表6所示，根据记录数据得到的数据变化如图6所示。

5.1 传感器数据对比分析

为验证漂流使水质监测系统的性能，项目组于

表6 详细数据信息记录表

Table 6 Record of detailed data information

指标		长江流域						滁河流域					
		第1组	第2组	第3组	第4组	第5组	第6组	第7组	第8组	第9组	第10组	第11组	第12组
温度/℃	漂流器	19.2	19.9	19.9	20.0	19.0	19.9	19.4	19.6	19.5	19.9	19.0	19.7
	专业仪器	19.1	19.4	19.7	19.2	19.7	19.8	19.9	19.1	19.6	19.1	19.3	19.4
氨氮浓度/mg·L ⁻¹	漂流器	11.4	11.1	11.2	11.5	11.1	11.9	11.8	11.5	11.2	11.5	11.9	11.4
	专业仪器	11.7	11.7	11.9	11.3	11.9	11.6	11.7	11.2	11.8	11.8	11.6	11.8
溶解氧浓度/mg·L ⁻¹	漂流器	6.1	6.5	6.3	6.8	6.7	6.2	6.1	6.7	6.3	6.2	6.3	6.9
	专业仪器	6.2	6.9	6.4	6.6	6.6	6.7	6.6	6.3	6.6	6.2	6.6	6.9
盐度/%	漂流器	0.3	0.1	0.5	0.9	0.8	0.8	0.3	0.3	0.7	0.6	0.8	0.8
	专业仪器	0.6	0.5	0.2	0.2	0.2	0.3	0.6	0.5	0.8	0.6	0.8	0.5
pH值	漂流器	7.3	7.7	7.2	7.4	7.7	7.9	7.3	7.5	7.1	7.6	7.4	7.1
	专业仪器	7.3	7.6	7.3	7.5	7.7	7.8	7.3	7.6	7.2	7.6	7.5	7.2

通过多组对比实验测试，本项目产品漂流器与专业传感器在温度、氨氮浓度、溶解氧浓度等方面的测试中，由图6可见，漂流器与专业仪器数据采集数据基本一致。

有丢包、乱码等现象。

经过5 h连续测试，数据传输中断1次，但2 s内恢复正常连接，丢包率为0，无乱码现象，数据无失真，数据接收串口如图7所示。

5.2 采集和通信系统测试

将水质监测漂流器放在河道中（系留状态）连续测试5 h，检测各传感器数据采集结果是否正常，是否出现数据漂移、失真等现象，检查无线通信系统是否

6 总结与展望

漂流式水质监测系统以漂流器为下位机，结合了嵌入式技术、无线通信技术以及GPS定位技术，实

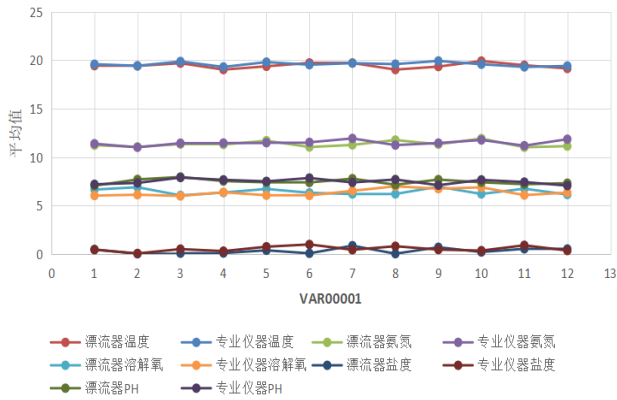


图6 漂流器与专业仪器数据对比
Fig. 6 Comparison of data between drifter and professional instrument

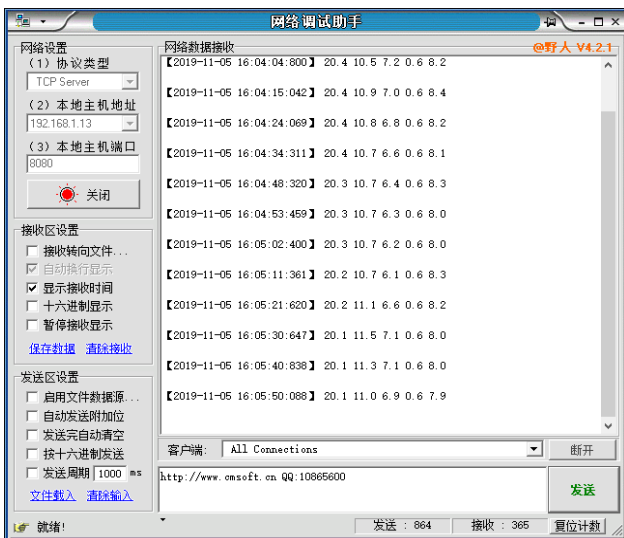


图7 无线传输串口接收测试
Fig. 7 Receiving test of wireless transmission serial port

现了目标水域的pH值、溶解氧、盐度、温度等要素移动、连续测量。通过可视化显示界面访问上位机软件，以便于用户及时、全面地掌握河道水质变化情况。

通过实验测试及数据对比分析，漂流式水质监测系统具有测量准确性高、通信传输稳定可靠、监测范围广等特点，对于我国河道水质监测工作具有一定的现实意义和实用价值。在未来，还将充分利用STM32高效、低功耗的特点，采用证据理论，优化水质信息的评价模型，进一步提升漂流式水质监测系统的准确性、多样化。

参考文献

- [1] Suara K, Wang C, Feng Y, et al. High-resolution GNSS-tracked drifter for studying surface dispersion in shallow water. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(3): 579-590.
- [2] 环球网. 工程师研制可实时监测洪水状况的“漂流瓶”. (2018-07-24). <https://tech.huanqiu.com/article/9CaKrnKaHPi>.
- [3] Johnson D, Stocker R, Head R, et al. A compact, low-cost GPS drifter for use in the oceanic nearshore zone, lakes, and estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(12): 1880-1884.
- [4] Ohlmann J C, White P F, Sybrandy A L, et al. GPS Cellular Drifter Technology for Coastal Ocean Observing Systems. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(9): 1381.
- [5] Suara K, Brown R, Borgas M. Eddy diffusivity: a single dispersion analysis of high resolution drifters in a tidal shallow estuary. *Environmental Fluid Mechanics*, 2016, 16(5): 1-21.
- [6] Meyerjürgens J, Badewien T H, Garaba S, et al. A state-of-the-art compact surface drifter reveals pathways of floating marine litter in the German bight. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 58.
- [7] Spydell M, Feddersen F, Guza R T, et al. Observing surf-zone dispersion with drifters. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(12): 2920-2939.
- [8] 毛新燕, 赵亮, 徐鹏, 等. 近海GPS-GPRS漂流轨迹观测系统及应用. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(9): 12-16.
- [9] 苏芬, 涂瑶, 陈先国. GPS/GPRS技术在水面流速、流向测量中的应用. *中国水运*, 2011, 11: 30-31.