

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.022

基于无线传感器网络的水质监测系统研究

张国杰, 陈 凯*, 颜志刚, 王文豪
(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310000)

摘要:针对传统水质监测系统存在的布线麻烦、造价高与系统精度低等问题,通过对水质监测系统的数据通信模式、传感器节点硬件、传感器节点软件、水质信息感知元件等方面进行了研究。设计了一种基于无线传感器网络的水产养殖水质参数监测系统,该系统由多参数信息融合功能水质无线监测节点、无线路由节点、上位机监控中心组成。研究了水质信息传输过程,信息采集由传感器节点完成,系统采集到的数据由无线传感器网络发送给汇聚节点,汇聚节点再将水质数据通过 RS232 串口发送给本地监测中心。传感器节点采用了 STM32 高性能单片机,传感器部分采用了工业 pH 电极和 YDC100 溶解氧电极作为感知元件。研究了对水质进行实时监测、对超过限定数据进行报警,并且对水质状况进行预测预警等功能。对系统的性能进行了研究。研究结果表明,pH、溶解氧和温度的平均相对误差为 4.06%、3.10% 和 0.85%,可满足水产养殖水质监测的应用要求。

关键词:水质监测;传感器;无线网络;实时监测

中图分类号:TP277;TH7

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0361-07

Water environment monitoring system based on wireless sensor network

ZHANG Guo-jie, CHEN-Kai, YAN Zhi-gang, WANG Wen-hao

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou dianzi University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the existence of traditional water quality monitoring system in wiring trouble, high cost and low accuracy of the system, through the study of water quality monitoring system data communication mode, the sensor node hardware, sensor node software, quality information sensing elements, a wireless water environment monitor system based wireless sensor networks was designed, the system consists of water quality monitoring node of multi-source information fusion, router node and upper computer monitor software. Water quality information was collected by the sensor nodes, the collected data was sent by a wireless sensor network node to the sink and the local PC monitoring center via RS232 serial port. High performance STM32 microcontroller was used in sensor nodes, industrial pH electrode, YDC100 oxygen electrode was used in sensor portion as the sensing element. Research on the real-time monitoring of water quality for more than the alarm data, and be able to predict water quality warning function. The research results show that pH, dissolved oxygen and temperature average relative error of 4.06%, 3.10% and 0.85%, which meet the aquaculture water quality monitoring applications.

Key words: water quality monitoring; sensor; wireless networks; real-time monitoring

0 引 言

中国水产养殖产量占到了全世界总产量的 73%,是名符其实的水产养殖大国。随着物联网养殖技术的出现,传统的养殖模式开始向这一新兴养殖模式靠拢。集成智能水质传感器、无线传感网络、无线通信、智能

管理系统和视频监控系统等专业技术,对养殖环境、水质、鱼类生长状况等进行全方位监测管理,最终实现节能降耗、增产增收的目标。

传统检测水质方法是仪表配合经验操作,不但需要耗费大量时间和精力,而且只能在有限范围内进行监测,检测周期很长,根本无法达到实时对水质环境的变化做出一个正确且有效的措施^[1-2]。现场布置总线

收稿日期:2015-11-09

作者简介:张国杰(1990-),男,浙江台州人,主要从事农业自动化设备方面的研究. E-mail:398603625@qq.com

通信联系人:陈凯,男,教授,博士,硕士生导师. E-mail:1875168124@qq.com

的水质监测系统需要布置大量的电线电缆,且时间一长,线路比较容易老化,维修保养不方便,施工也比较麻烦。而无线传感网络具有集成性高,智能化程度高,覆盖的区域广,信息实时采集并对水质的变化随时做出响应等特征,将之用来检测水质及相关工作范畴必有极为广阔潜力。现下,中外学者已经展开了以无线传感设备及网络为基础的检测技术研究,并尝试将其用于水产养殖行业。美国 Heliosware 公司的 EMNET 系统通讯速率水平低,体积颇大,其耗能较多,当下尚不宜在大范畴内推行^[3]。王骥等^[4]尝试使用 zigbee 传感网络(无线)搭建海洋水质的实时监测系统,实现了海洋水质的监测,灾害数值预测等功能。本研究在前期研究的成果上以温度、PH 值和溶氧值为监测对象,实现这 3 个数值参数阈值的设定,预警和自动检查等功能。

1 系统设计方案

该系统主要包括:传感器、路由和汇聚 3 种节点以及 PC 机(本地)及远程监测两大监测中心,具体架构如图 1 所示。其中各传感器均布设在需要监测的区域内,将采集到的数据传送到基于 STM32 处理器的控制柜上显示,控制柜内数据经由串口(RS232)转送至 PC(本地)设备,被安装与 PC 的监测程序对此数据汇整、处置、分析,随后一边储存,一边显示在终端屏幕上,若数据异常,系统将自动报警。如此该系统便能够实现对该范畴内水环境的实时检测,并在线传输和现实监测结果。汇聚节点能够经由 GPRS 模块联通网络,将所得数据传转送至上位机(或直接送至客户移动终端—例如手机)。

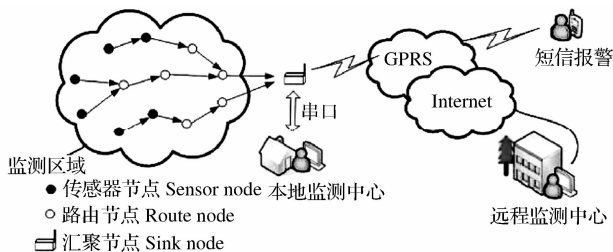


图1 无线监测系统设计方案

2 无线传感器节点硬件设计

无线传感器网络就是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成一个多跳的自组织网络系统。无线传感器网络节点包含传感器、路由以及汇聚三大节点,其中路由节点上布设的设备也是传感器,汇聚节点的作用是联通 PC

机(本地)。

2.1 硬件构成

水产水质监测系统硬件结构主要由下位机多参数控制仪、总线接口、无线传感器监测网络装置、PC 机(本地)和远程监测计算机等组成,其硬件构成具体如图 2 所示。传感器节点主要包括四大模块:传感器、处理器、供电以及通信(无线)模块。传感器电板由传感器、信号调理电路构成。主控电板由供电、无线通信、处理器三大模块组成。主控电板和封装电路如图 3 所示。

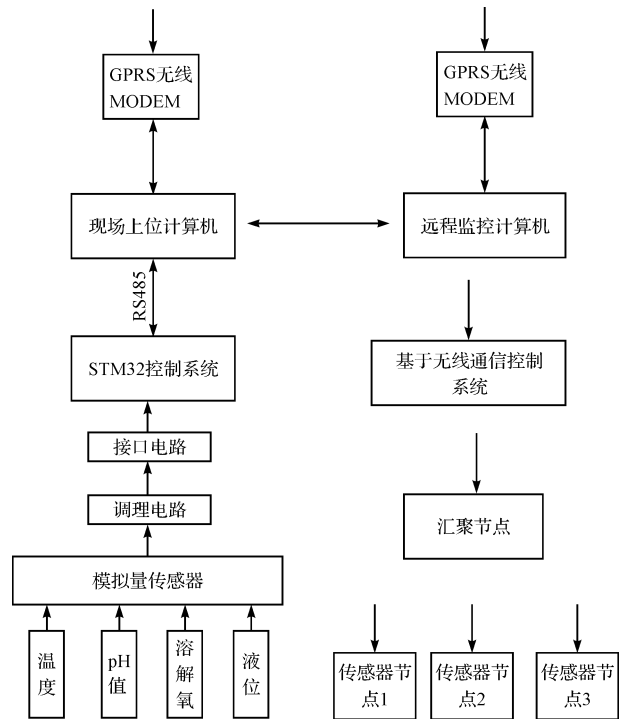
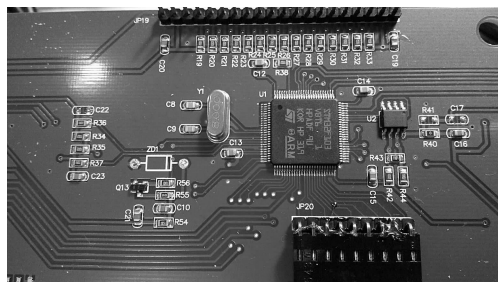


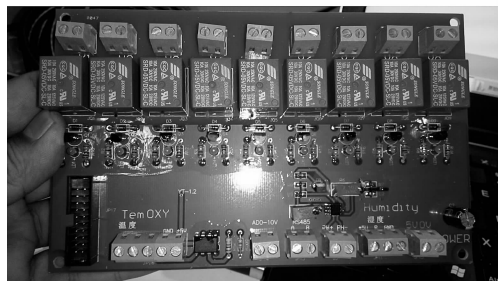
图2 硬件结构图

处理器模块采用 ST 出品 STM32 系列的 32 位微控装备型号为 Cortex-M3 RISC 的 CPU,该内核是专门为满足对性能要求较高,同时要求能耗达到较低水平,并且能够实施采集并传输数据的嵌入式产品,而且该内核价格低廉,因此总体性价比极高^[5]。本研究系统芯片选择型号 STM32F103,采用 Cortex-M3 内核。采用了 ARM-V7 架构,支持 2 种工作状态,Thumb 状态和调试状态。内置快速的中断控制器,提高了实时性。STM32 允许客户从 3 种模式(能耗水平均较低)中自由选择,而且提供给的时钟控制机制也非常灵活,用户完全可以依据实际需求合理选择。并且 ST 还基于用户提供高效率与完整的专用开发库函数以及工具包,能够显著减少开发耗时。

STM32F103 的运行频率高达 72 MHz,而且已经集成 Flash(容量 512 KB)以及 RAM(容量 64 KB),集成



(a) STM32主控板



(b) 节点电路封装

图 3 主控板与电路封装图

了 ADC(12 位)1 个,双通 DAC(12 位)1 个,以及计时器(16 位)1 个,同时其配备标准通讯端口(最多可接 SPI-2 个, I²C-2 个, USART-3 个)。内部总线和两条 APB 总线将片上系统和外设资源紧密地连接起来,其中内部总线是主系统总线,连接了 CPU、存储器和系统时钟等。

STM32 系列的微处理器需要的工作电压是 3.3 V,在该系统中选用了主流的 AMS1117 芯片。该芯片可提供稳定的 3.3 V 电压输出,并且具有电流限制和热保护功能,输出电流可达 900 mA ~ 1 500 mA。

该系统采用的液晶模块为 WSM19264-3,比市场上的产品兼容性强稳定性好,抗干扰能力好。

传感器模块内含传感器、信号调节电路两个模块,综合考量应用需要、费用、能耗以及系统可靠性,本研究选择杭州联测仪表出品 PH 电极(工业)和上海联祥环保科技有限公司的 YDC100 溶解氧传感器来测水体 PH、溶解氧浓度以及水温。其中 PH 电极的检测范畴最小 0,最大为 14.00,测定溶解氧的电极的检测范畴最小 0 mg/l,最大 20.00 mg/l,内部均嵌有热敏电阻,能测定温度或者当温度较低时予以补偿。

2.2 PH 值微弱信号调理电路

PH 值测定复合电极输出电压信号精度达到毫伏水平,而且内有极大内阻^[6]。电子单元由信号测量、运算显示、网络通讯及面板指令等组成。PH 和温度的变送阻抗变换,将 PH 变为 459.16 mV/PH(25 °C)低阻信号;将 NTC 变换为电压信号。仪表与 PH 电极配套,实现对溶液酸碱度的 PH 值监测,传感器是由 PH

电极(玻璃)以及甘汞(亦或 Ag/AgCl)参比电极构成的电池,依据下述公式可计算溶液 PH 值对应电位差:

$$E_X = E_0 + S_{PH} \quad (1)$$

该电位差值经由阻抗输入水平极高的放大装置(前置)放大,同时热敏器件转送相应温度信号,两信号均被放大之后进入完成 A/D 转换^[7],通过 I/O 端口芯片,并由 CPU 算出结果之后在显示屏上醒目显示。

PH 值调理电路输出电压(V_{PH} , V)为

$$V_{PH} = \frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{R_3 + R_p}{R_2}\right) V_{in} - \frac{3R_6}{R_6 + R_7} \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) \quad (2)$$

式中: V_{in} —pH 值电极输出电压 V ; R_p —可调电阻; $R_2 \sim R_7$ —固定电阻。

根据实际情况 PH 微弱信号调理电路为如图 7 所示。

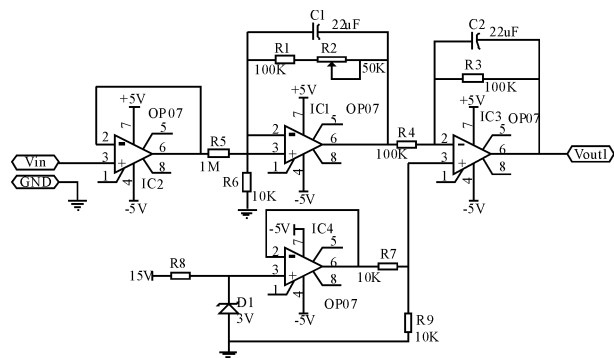


图 4 PH 值调理电路

注:1~2—PH 电极的“+”,“−”端口; V_{in} —其电压输出; V_{PH} —放大装置电压输出值; D_1 —稳压管; $U_1 \sim U_3$ —1 级、3 级 OP07 芯片的标志符; $C_1 \sim C_2$ —滤波电容; R_p —可调整大小的电阻; $R_1 \sim R_8$ —固定电阻。

2.3 溶解氧微弱信号调理电路

溶解氧传感器工作原理为原电池电化学原理^[8-10],电极阳极为 Ag 片,阴极为 4 mm Au 片构成,两极间有大量电解液,顶部用特殊薄膜掩盖。若在其上加电压大小为 0.7 V 电压(极化)之后,一部分穿透薄膜的氧分子在“−”极被还原,此时电极表面反应(氧化还原),电子流动产生与氧分压成正比的电流。倘若没有氧,则传感器内不会产生电流;反之,则会产生电流,且电流大小用公式表示为:

$$i = K \times N \times F \times A \times C \times P/L \quad (3)$$

式中: i —扩散电流; K —常数; N —工作时失去电子数; F —法拉第常数; A —阴极的面积; C —样品中氧分压; P —薄膜渗透系数; L —薄膜的厚度。

溶解氧微弱信号调理电路如图 4 所示,第一级装置是电压跟随器,将 R_p (分压)接入阴极,并给阴极

加载电压;第二级将溶解氧的“+”级装置连接到放大装置的反向输入端,使阳极电压为0,调解 R_p 使传感器两极电压为 0.7 V,保证传感器正常工作,运算放大器将电流信号转换为电压信号,第三级放大电压信号,使其满足实际需要。输出电压为 $V_{DO_OUT}(V)$:

$$V_{DO_OUT} = \frac{R_2 R_5}{R_4} \quad (3)$$

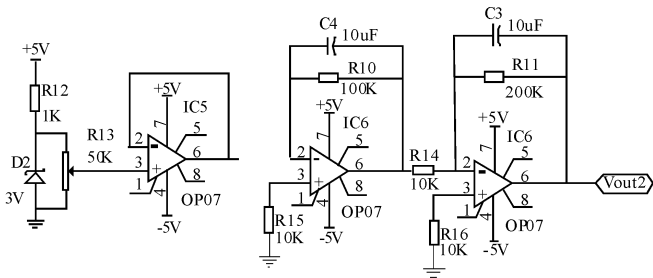


图5 溶解氧调理电路

注:1~2—传感器阳极及其端口(溶氧),I—电极电流输出; V_{O_2} —放大装置电压输出; D_1 —稳压管; $U_1 \sim U_3$ —1、3级OP07芯片(放大装置)的标志符; $C_1 \sim C_2$ —滤波电容; R_p —可调整大小电阻; $R_1 \sim R_6$ —固定电阻。

2.4 温度传感器

温度采集采用了 Maxim 公司的 DS18B20 传感器^[11],DS18B20 传感器是一种单总线的数字传感器,只需接一个 4.7 kΩ 的上拉电阻就可以正常工作了。和其他的温度传感器相比,降低了电路的复杂程度,提高了系统的稳定性。

3 系统软件设计

软件的功能是对送入 STM32 单片机的模拟信号进行采集,转化成数字信号,并把并把输入的信号与给定阈值进行比较,如果低于限值,则警报器响起且在设定时间内启动增氧机。在转换时还需要对数字信号进行补偿一定的处理,控制数据显示、存储或传输。其主服务器和控制柜程序流程图分别如图 6(a)、(b)所示。

4 试验结果分析

4.1 试验结果

本研究对比了三信测量仪(标准测量仪器)所得数据以及该设计系统所测数据。温度、pH、溶解氧、三个被测参数值分别列入下表 1-3。与三信测量仪标准数据相比,pH 与溶解氧的相对误差比例小于 5%,温度相对误差占比不超过 1%。而且经过较小波动的

幅度、滤波以及温度补偿时候,误差均被控制在标准范畴之内。

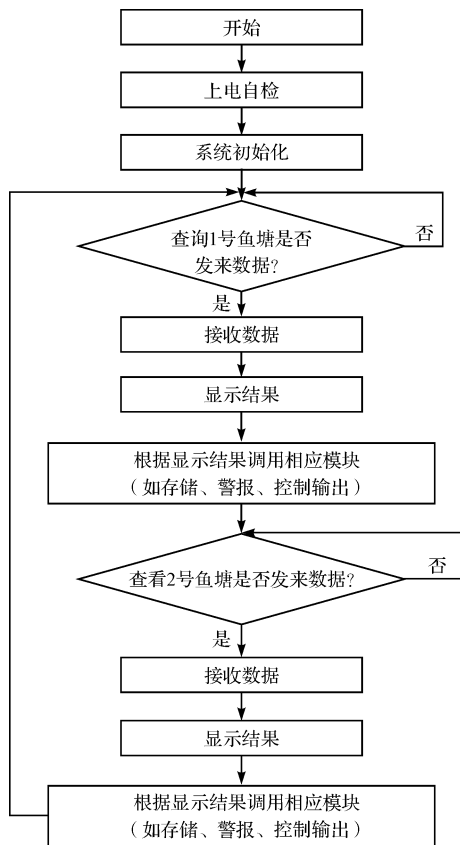


图6(a) 主服务器程序流程图

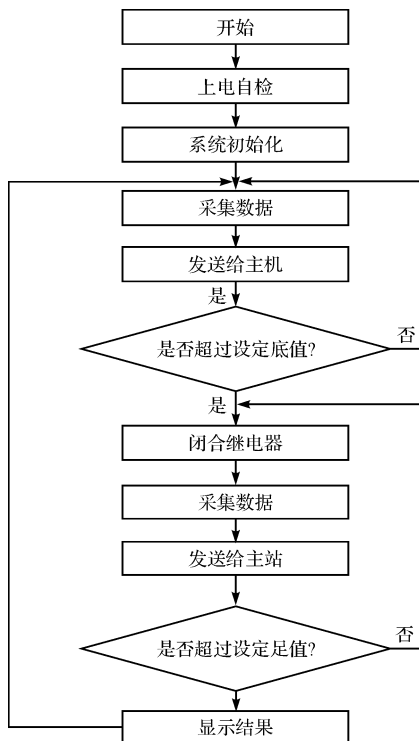


图6(b) 控制柜程序流程图

该设计系统内,检测得到 PH、溶解氧的子系统均采用温度补偿,将精度及控制精度均有效控制于特定

标准之中。而且均使用无线通讯,摆脱了网线物理限制。经过现场试验证明,网络通信稳定,数据采集正常并且稳定。

4.2 水质参数检测测试

pH 测试之前首先运用 6.86&9.18 标准液体校准电极,以便清除其中误差,随后在常温(25 ℃)情况下,运用邻苯二甲酸氢钾以及四硼酸钠配成 pH 值各异的溶液完成测试,结果与上海三信测量仪的测量值进行比较,上海三信测量仪的 PH 精度最大能够达到 ±0.01 pH 水平,试验所得结果如表所示。水温、溶解氧参数均用养殖水予以降温及加热实验,结果对比溶氧仪测得值。该测试所用溶氧仪在使用之前,需要先运用浓度为 5% 的亚硫酸钠(无水)制成无氧水测定其监测标准,本设备溶氧监测可达到 ±0.3 mg/L 精度,而温度监测可达到 ±0.3 ℃ 精度,所得数据如表 1-3 所示。从表 1-3 可见,系统和对比监测设备所得数据十分接近,3 个监测参数值的相对误差均值分别为 4.06% (PH)、0.85% (水温)、3.10% (溶解氧),设计系统精度达到应用需要。实验所用实物如图 7 所示。



图 7 试验器材

表 1 温度的实际值与标准值的比较

温度标准值/℃	本系统测量仪	相对误差
25.8	26	0.77%
26.1	26	0.38%
26.2	26	0.76%
26.4	26	1.51%

表 2 pH 的实际值与标准值的比较

PH 标准值	本系统测量值	相对误差/(%)
4.03	3.8	5.71
4.52	4.3	4.86
4.84	4.6	4.95
5.31	5.1	3.95
6.04	5.9	2.31
6.96	6.8	2.23
7.21	7.0	2.91
8.38	8.1	3.34
8.81	8.4	4.65
9.21	8.7	5.78

表 3 溶解氧的实际值与标准值的比较

溶解氧标准值/mg · L ⁻¹	本系统测量值	相对误差/%
6.51	6.78	4.14
7.02	7.24	3.13
7.82	8.04	2.81
8.02	7.86	1.99
8.14	7.86	3.43

5 神经网络 BP 标准算法在水质参数预测中的应用

在标准 BP 神经网络的训练算法中,目前应用最广泛的还是标准 BP 算法。标准 BP 算法的基本方法是:沿着误差梯度下降最快的方向,通过对样本数据的不断训练学习,调整偏差和修正网络权值,使得网络输出误差达到最小^[12]。标准 BP 算法分为误差反向传播与信息正向传递,设输入为 X ,输入层神经元个数为 m ,隐含层神经元个数为 S_1 ,隐含层激活函数为 f_1 ,实际输出为 a ,目标输出为 T ,输出层神经元个数为 S_2 ,输出层激活函数为 f_2 。则误差反向传播的过程如图 7 所示。

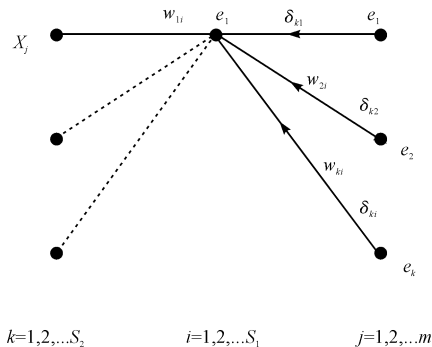


图 7 误差反向传播示意图

从图 7 可得知,误差反向传播其实是通过计算输出层神经元的实际输出和期望输出的差值得到输出误差 e_k ,然后将其与输出层的激活函数的一阶导数 f_2 ,相乘求得 δ_{ki} 。因为隐含层没有直接给出期望输出,所以 BP 算法利用输出层得到的 δ_{ki} 反向求出隐含层的权值变化量 ΔW_{ki} ,进而求得隐含层输出误差 e_i ,再同样与隐含层的激活函数的一阶导数相乘求得 δ_{ij} 。

标准 BP 算法的步骤可总结如下:

- (1) 确定 BP 网络的结构;
- (2) 依据预处理后的样本数据,求解各层结果;
- (3) 核算网络和各层误差;
- (4) 核算各层内出现的误差,反推出各层权值的变化,调整各层权值;
- (5) 设定误差最大值 E_{\max} ,检查网络误差 E 的精度,当 E 小于 E_{\max} 时候达到精度要求停止训练,否则重复训练。

现将 2015 年 9 月 10 日至 9 月 13 日的样本数据作为测试样本,预测 9 月 14 日的水质状况。Matlab 仿真模型如图 8 所示。

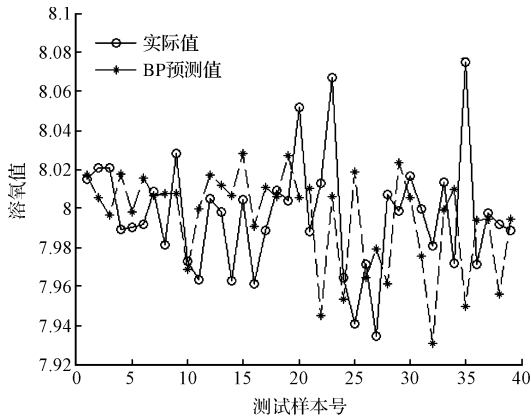


图8 标准 BP 神经网络预测溶解氧的结果

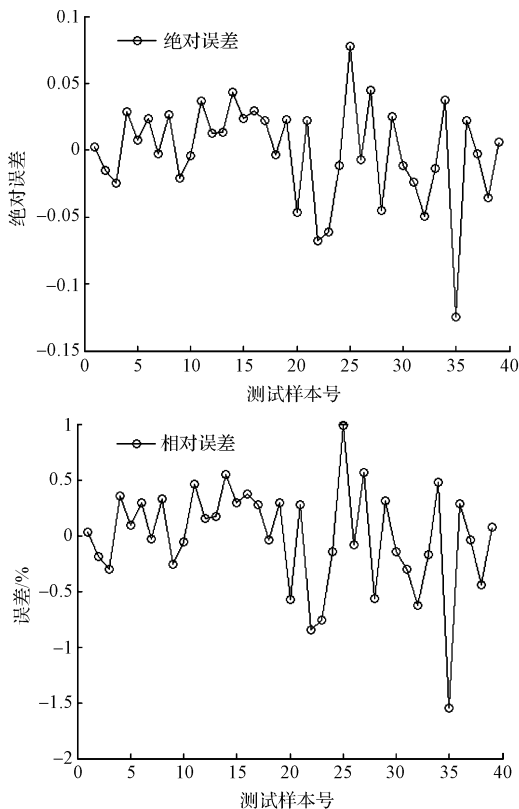


图9 标准 BP 神经网络预测溶解氧的绝对误差与相对误差

本试验仅对数值预报做了初步研究,在具体技术问题上还有一些缺点和不足,主要是预测网络不够稳定导致结果重视性不够理想。为解决这一点,应该改善输入样本的初始化方式,增加学习的输入,考虑更多的影响因素。相信随着学习样本的不断增长和各种信息的不断完善和丰富,神经网络在水质预测问题上会有良好的应用前景和推广价值。

6 结束语

(1) 本研究采用无线传感网络技术设计完成可实时监测养殖水质的系统。该系统利用传感节点来采集数据温度、PH 值和溶氧值等数据,利用汇聚节点收集监测数据,并通过 RS232 串口将数据传送至本地 PC 机监测中心,实现对水质环境的实施监测,其能够运用 GPRS 装置联通 Internet,把数据直接传输给主服务器实现远程监控。

(2) 本研究所用节点传感器装置为杭州联测仪表公司的工业 PH 电极和上海联祥环保科技有限公司的 YDC100 溶解氧传感器来测水溶液的 PH 值、溶解氧浓度和温度。并且为了成本考虑,控制柜采用了市电供电,能对大范围水域进行监测。

(3) 通过 Matlab 仿真进行水质参数溶解氧的预测,并得到了相当有效的预测数据。试验证明标准 BP 算法在水质参数预测中有着重要的地位。系统运行较稳定,并将测得的溶解氧、PH 值数据对比标准溶液,求解所得参数结果相对误差分别为 3.10% (溶解氧)、4.06% (PH)、0.85% (水温)。

为监控更多参数,还必须对该设计系软、硬件予以长期测试及优化,进一步提高系统的可靠性。并在使用过程中对不足的地方进行改进,为向市场大量推广做好准备。后期笔者将在该设计系统基础上,对其他功能、通信协议乃至智能控制等方面展开进一步探索研究。

参考文献 (References):

- [1] 刘星桥,赵德安,等. 水产养殖多环境因子控制系统的研究[J]. 农业工程学报,2003,19(3):205-208.
- [2] 刘星桥,孙玉坤,赵德安,等. 水产工厂化养殖智能监控系统[J]. 仪器仪表学报,2006,27(5):527-530.
- [3] 邹赛,刘昌明,李法平,等. 基于无线传感器网络的水环境监测系统[J]. 传感器与微系统,2010,29(9):104-109.
- [4] 王骥,周文静,沈玉利,等. 基于无线传感器网络的海洋环境监测系统研究[J]. 计算机工程与设计,2008,29(13):3334-3337.

- [5] Cortex-M3 Technical Reference Manual. [Z]. ARM Limited, 2005.
- [6] 李成春. 基于 CC2430 无线多参数传感器检测网络的设计[D]. 镇江:江苏大学电气信息工程学院, 2010.
- [7] 杨素英,尹景鹏,仲崇权,等. pH 智能测量技术的研究与实现[J]. 仪器与仪表, 2003(10):7-9.
- [8] 徐 维,赵德安. 水产养殖中溶解氧的检测与控制技术的研究[J]. 农机化研究, 2007,1(1):74-77.
- [9] 邓霖杰,任德均,盘 龙. 温控箱远程监控系统软件设计[J]. 机电工程技术, 2014,43(7):119-121,147.
- [10] 夏克盛,姚世远,仲崇权. 数据共享技术的燃气热泵空调网络监控系统中的应用[J]. 流体机械, 2014,42(2):27, 91-93.
- [11] 李贺然,腾志军,王 黎,等. Zigbee 在通讯电缆温度监测中的应用[J]. 信息技术, 2011(9):111-115.
- [12] 阴 辉. 人工神经网络 BP 算法的改进与分析[J]. 硅谷. 2008(14):29-30.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

张国杰,陈 凯,颜志刚,等. 基于无线传感器网络的水质监测系统研究[J]. 机电工程, 2016,33(3):361-367.

ZHANG Guo-jie, CHEN-Kai, YAN Zhi-gang, et al. Water environment monitoring system for aquatic products based on wireless sensor network[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(3):361-367.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 318 页)

4 结束语

本研究在对变电站的数据流分析基础上,将其划分为周期性、随机性以及突发性数据流,并根据数据流的时间特性进行数学模型的建立,为接下来网络模型的建立奠定了基础;然后利用 OPNET 仿真软件对数字化变电站的网络拓扑进行建模仿真,选用绍兴某变电站通信网络,分别从节点、网络、业务 3 个方面对变电站网络进行了系统性建模;针对真实的变电站通信网络,笔者提出了完整的基于 OPNET 的仿真参数配置;绍兴某变电站通信网络性能的实际仿真验证了提出的 OPNET 模型及配置方案的正确性和有效性。

参考文献 (References):

- [1] 吴在军,胡敏强. 基于 IEC61850 标准的变电站自动化系统研究[J]. 电网技术, 2003,27(10):61-65.
- [2] 杜双育,王先培,谢光彬,等. 基于 IEC61850 的变电站自动化系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012,40(5):32-36.
- [3] 徐天奇,李 琰,尹项根,等. 数字化变电站自动化系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2011,35(19):12-17.
- [4] 金乃正,张 亮,章坚民,等. 数字化变电站智能设备及网络在线监测与状态评估系统[J]. 机电工程, 2015,32(5):671-676
- [5] 窦晓波,胡敏强,吴在军,等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析[J]. 电网技术, 2008,32(17):98-104.
- [6] 丁冠军,樊邦奎,兰海滨,等. 智能电网信息安全威胁及防御策略研究[J]. 电力信息与通信技术, 2014,12(5):58-63.
- [7] 董 楠,朱 林,段献忠. 基于 OPNET 的变电站过程层网络的仿真研究[J]. 继电器, 2006,34(21):40-45
- [8] 李琪林,范荣全,肖 红. 基于 OPNET 的 GOOSE 网仿真平台的实现[J]. 计算机科学, 2011,38(10A):459-461
- [9] 方晓洁,季夏轶,卢志刚. 基于 OPNET 的数字化变电站继电保护通信网络仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010(23):137-140.
- [10] 黄明辉,邵向潮,张 弛,等. 基于 OPNET 的智能变电站继电保护建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2013,33(5):144-149
- [11] 龙 华. OPNETModeler 与计算机网络仿真[M]. 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [12] 陈 岩,董淑福,蒋 磊. OPNET 网络仿真技术及其应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2009,19(2):199-201.
- [13] 陈 敏. OPNET 网络仿真[M]. 清华大学出版社, 2004.
- [14] SIDHU T S, YIN Y. Modeling and simulation for performance evaluation of IEC61850-based substation communication systems [J]. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, 2007,22(3):1482-1489.
- [15] ALI I, THOMAS M S. Substation communication networks architecture [C]//Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on. IEEE, 2008: 1-8.
- [16] 童晓阳,廖晨淞,周立龙,等. 基于 IEC 61850-9-2 的变电站通信网络仿真[J]. 电力系统自动化, 2010(2):69-74.
- [17] 王海柱,张延旭,蔡泽祥,等. 智能变电站过程层网络信息流潮流模型与计算方法[J]. 电网技术, 2013,37(9):2602-2607.

[编辑:张 豪]