

基于最小二乘法与 RBF 神经网络的溶解氧检测系统设计

綦声波, 王 榕, 尹保安, 张 阳

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 为克服温度对溶解氧传感器的影响, 对极谱型溶解氧检测系统的溶解氧电极激励源、高精度信号采样、软件标定和温度补偿等方面进行研究。通过对极谱型溶解氧传感器工作原理进行分析, 设计了极谱型溶解氧传感器检测电路; 根据溶解氧电极的温度特性, 设计了基于 NTC(负温度系数)热敏电阻的硬件温度补偿电路, 并利用最小二乘法及 RBF 神经网络构建了软件温度补偿模型。利用饱和蒸馏水进行温度补偿实验, 结果表明: 经温度补偿后, 该溶解氧检测系统的相对误差及采样波动均在 1% 以内, 大大减小了传感器的非线性误差, 测量精度和稳定性均可满足应用要求。

关键词: 溶解氧; 电极激励源; 温度补偿; RBF 神经网络; 软件标定

中图分类号: TP23 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)10-0107-07

DOI: 10.11759/hyxx20191016003

溶解氧是指溶解于水中的分子态氧, 记作 DO, 是水生物生存的必要条件, 也是衡量水溶液自我净化能力的重要指标。当溶解氧过低时, 水中的厌氧菌会大量繁殖, 导致水中有机物死亡、腐败, 引起水体污染, 造成经济损失; 因此, 实现水样溶解氧的精确测量及连续监测对于水质处理具有重要意义^[1]。

目前, 溶解氧的检测方法主要有碘量法、荧光猝灭法、电化学法^[2]。碘量法是根据碘离子的氧化还原反应来检测溶解氧, 相较于传统的温克勒法而言, 该方法精度和可重复性高, 但无法进行在线测量, 且由于需要大量的化学试剂, 待测溶液易受其他化学成分的干扰, 无法满足较低浓度(<0.2 mg/L)的溶解氧测量要求; 荧光猝灭法是根据荧光猝灭原理来检测溶解氧, 是一种新型测量方法, 具有线性度好、分辨率高、稳定性强的优点, 且检测下限为 0.05 μg/L, 但由于检测中所使用的光学传感膜价格昂贵, 目前尚未普及; 电化学法是根据原电池原理或极谱原理来检测溶解氧, 原电池型溶解氧传感器重复性好, 但响应时间达 3 min 以上, 无法实现快速测量, 极谱型溶解氧传感器^[3]选用贵金属(金、银)作为电极的制作材料, 具有良好的金属稳定性, 不易被氧化, 测量原理简单, 精度高, 虽然扩散电流较小, 易受温度的影响, 但只要合理设计, 便可以消除测量误差。

在以往的一些溶解氧检测系统中, 信号的采集相对单一, 检测结果未经标定及温度补偿, 且未消除线路板所带来的误差, 检测精度相对较低。

针对上述问题, 本文采用极谱型溶解氧传感器进行溶解氧检测, 根据极谱型溶解氧电极的工作原理设计了溶解氧检测电路, 实现溶解氧数据的快速采集, 并对极谱型溶解氧电极的温度特性和相关的温度补偿算法进行研究和分析, 构建了基于 LS-RBF 温度补偿模型。实验结果表明: 该溶解氧检测系统的相对误差及采样波动均在 1% 以内, 大大减小了传感器的非线性误差, 测量精度和稳定性均可满足应用要求。

1 溶解氧电极的工作原理及温度特性

正如前文所述, 极谱型电极法基于电化学法原理, 通常选用贵金属作为电极的制作材料, 阴极(极化电极)一般由铂、金构成, 阳极(辅助电极)一般由银构成, 电解液采用 0.1 mol/L 的氯化钾溶液。测量时, 在金、银两极间接入 0.68 V 极化电压后, 氧分子透过透氧膜, 在阴极上还原, 通过电子转移产生扩散电流^[4], 且回路上的扩散电流值与待测溶液中的氧分压成正比, 两个电极上的化学反应方程式如下式所示:

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-11-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(201964014)

[Foundation: Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 201964014]

作者简介: 綦声波(1970-), 男, 山东平度人, 教授, 主要研究方向为嵌入式系统与智能仪器仪表, 电话: 18661824998, E-mail: qishengbo@ouc.edu.cn; 王榕(1996-), 女, 山东济南人, 硕士, 主要研究方向为嵌入式系统与智能仪器仪表, 电话: 17865326597, E-mail: wangrongrong312@163.com

阴极: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

阳极: $4Ag + 4Cl^- \rightarrow 4AgCl + 4e^-$

总反应: $O_2 + 2H_2O + 4Ag + 4Cl^- \rightarrow 4AgCl + 4OH^-$

由上式可知,测量过程中需要消耗银电极,当银电极材料消耗过量时传感器无法继续使用。溶解氧传感器示意图如图1所示。

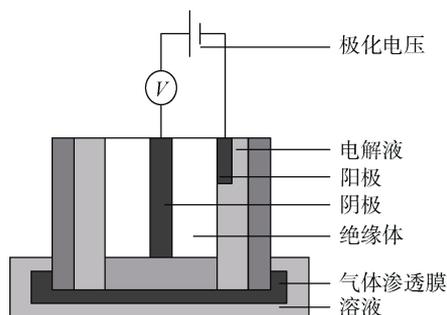


图1 溶解氧传感器示意图

Fig. 1 Schematic of the dissolved oxygen sensor

由溶解氧电极的工作原理可知,在温度不变的情况下,溶解氧电极的输出电流与溶液中的氧分压成正比;然而,在特定的氧分压下,由于溶解氧透氧膜的透氧系数受温度影响,随着温度的升高,透氧系数增大,对应的氧分压测量结果也随之增大^[5]。

温度对透氧膜的影响由阿伦尼乌斯定律进行推导,输出电流如式(1)所示:

$$I_T = Ap_{O_2} e^{-\alpha/T} + I_0 \quad (1)$$

式中: I_T 为传感器正常工作时的输出电流, A 和 α 为常数且只与电极材料和结构相关, p_{O_2} 为被测水样中的氧分压, T 为被测水样中的温度, I_0 为残余电流,一般近似为零。

由式(1)可知,只要测得在特定温度下溶解氧电极的电流值及水样的温度值,便可得到此时待测水样中的氧分压 p_{O_2} , 通过转化可得出水样中的氧含量^[6]。

当氧分子透过透氧膜后,溶液向电极表面扩散,根据亨利定律:

$$P = CH, \quad (2)$$

式中: P 为氧分压, C 为溶解氧浓度, H 为亨利(Herry)系数,受温度、盐度等因素影响。

待测水样的溶解氧浓度与该水样的氧分压成正比关系,但对于不同温度下的水样,其氧分子的溶解度也不同^[7],在恒温下,水样中氧分子的溶解度越小,亨利定律的准确度越高。

将式(2)代入式(1)可得:

$$I_T = ACHe^{-\alpha/T} + I_0, \quad (3)$$

由式(3)可知,溶解氧的透氧系数及亨利系数均受温度影响,环境温度对溶解氧电极的输出电流有极大的影响,必须对传感器进行温度补偿。

2 溶解氧检测系统设计

作为溶解氧检测系统的关键组成,硬件设计在检测技术的发展中占据越来越重要的地位,成为制约其检测精度的首要因素。该系统在充分探究检测方案、抗干扰性能的基础上,利用极化电压驱动源、高精度采样、温度补偿等关键技术,进行溶解氧信号的采集。

硬件设计部分主要包括溶解氧检测电路、电源管理电路、单片机最小系统和串口通信电路。硬件结构示意图如图2所示。

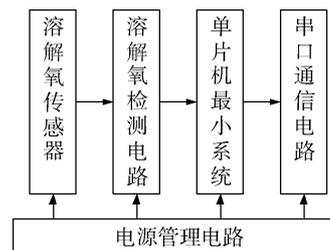


图2 系统硬件结构图

Fig. 2 Schematic of the system hardware structure

单片机最小系统以 STM32 为核心处理器;溶解氧传感器检测电路设计包含以下部分:首先将极化电压电路提供的极化电压加载到传感器的极化电极和辅助电极之间,使溶解氧传感器中的电极进入工作状态;然后使用电压跟随电路进行溶解氧电极的阻抗匹配;然后经 I/V 转换电路,将工作电极输出的扩散电流转化为电压信号,并对此电压信号进行放大滤波处理,转化为模数转换器能够采集的信号;最后经 AD 芯片采集至单片机进行处理。

2.1 极化电压电路

根据极谱型电极的工作原理可知,溶解氧电极需要 0.65~0.75 V 的极化电压驱动,本系统根据其电极特性选择极化电压为 0.68 V。极化电压由基准电压源通过精密电阻分压获得;由于普通分压电阻温漂较大,易受温度影响,使得扩散电流产生波动,故分压电阻选用 0.1%金属精密电阻。

为保证输出电压与输入电压相等,防止后级

电路的输入阻抗影响极化电压,需在极化电压后加电压跟随器作为缓冲器。本系统选取轨对轨运放 TLC27L2 作为电压跟随器的核心运放,其输入阻抗较高,具有宽范围的电源电压,能够减小极化电压的损耗,同时提高电路的负载能力,保证极化电压的稳定性。电压跟随器的原理框图如图 3 所示。

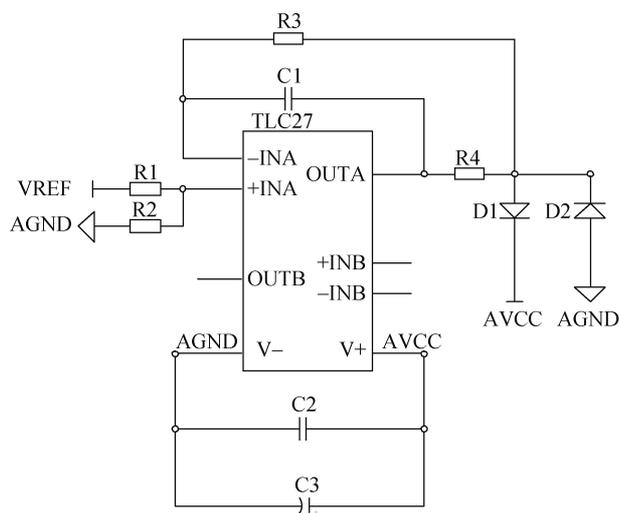


图 3 电压跟随器原理框图

Fig. 3 Block diagram of the voltage follower principle

如图 3 所示,在该运放的输出端与反向输入端接入一个电阻,构成基本的电压跟随器模型;并在电阻两端并联一个电容,起到滤波作用;同时,在溶解氧电极的输入与输出端分别设计两只二极管 IN4148,起到续流保护的作用。

2.2 电流/电压(I/V)转换电路

极谱型溶解氧传感器在工作时,产生的扩散电流十分微弱,为降低检测过程中的能量扩散,减小后续放大电路对扩散电流测定的影响,需使用电流/电压(I/V)转换电路作为第一级高阻抗放大电路,将溶解氧传感器产生的扩散电流信号转化为电压信号。

本系统选取 CA3140 作为此级运算放大器,由于其输入阻抗较高且偏置电流较低,可满足极谱型电极的阻抗匹配要求。I/V 转换电路原理框图如图 4 所示。

2.3 滤波放大电路

对于溶解氧电极而言,经一级放大后输出电压范围为 0~300 mV,为达到 AD 转换要求,需要将电

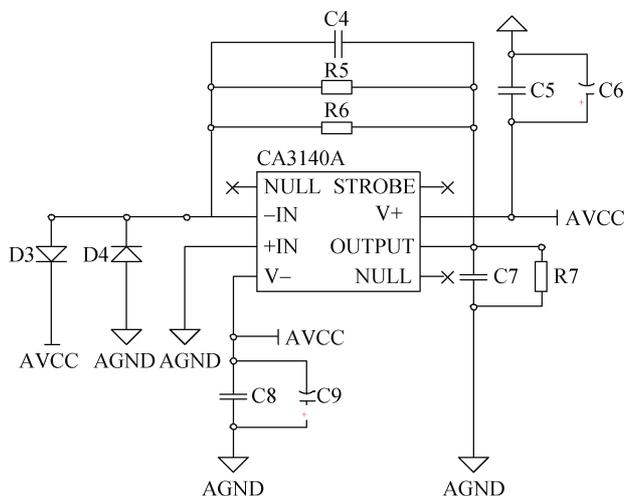


图 4 I/V 转换电路原理框图

Fig. 4 Block diagram of the I/V conversion circuit principle

压信号进一步放大^[8]。本系统采用精密低噪声仪用放大器 INA121U 进行二级放大,放大倍数为:

$$G = 1 + \frac{50}{R_g}, \quad (4)$$

该放大倍数需与 AD 采样电路兼容,以实现最佳采样。滤波放大电路原理框图如图 5 所示。

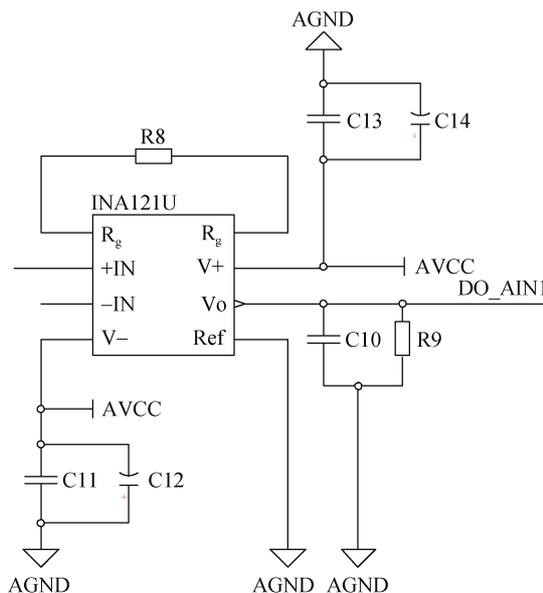


图 5 滤波放大电路原理框图

Fig. 5 Block diagram of the filter amplifier circuit principle

2.4 系统软件设计

STM32 微控制器使用 IAR 软件进行 C 语言编写,运用了模块化的程序设计方法。整体包括溶解氧数据采集模块、A/D 转换模块、数据处理模块及串口

通信模块。软件流程如图 6 所示。

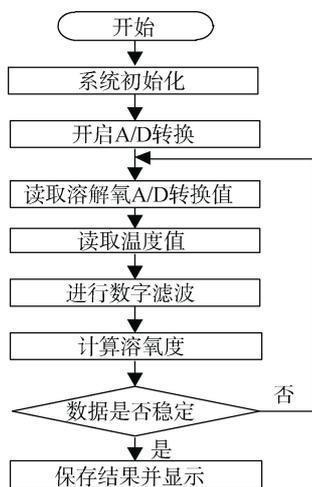


图 6 软件流程示意图

Fig. 6 Schematic of the software flow

2.5 温度补偿设计

根据溶解氧电极的温度特性，本论文采用两种温度补偿方式。一是采用 NTC 热敏电阻进行硬件补偿，通过阿伦尼乌斯定律^[9]与 NTC 热敏电阻阻值公式，得到电极调理电路的输出电压与温度的表达式，消除温度对透氧膜的影响；二是根据亨利定律^[10]，使用最小二乘法及神经网络相关算法对亨利系数进行温度补偿，消除温度对亨利系数的影响。

2.5.1 NTC 热敏电阻硬件补偿

由上述可知，温度对透氧膜的影响主要是式(1)的指数项，该影响可通过热敏电阻进行补偿。将提取溶解氧电极输出电流信号的放大器输入端接地，并将 NTC 热敏电阻作为负反馈电阻接在输出端与反向输入端之间，组成深度负反馈电路。因此，在一定程度上，选择合适的热敏电阻，便可以抵消温度对透氧系数的影响^[11]。

NTC 热敏电阻的阻值可简化为：

$$R_T = \beta e^{B/T}, \quad (5)$$

式中： β 为常数， B 是热敏指数， T 是温度。

当使用热敏电阻作为负反馈电阻时，一级运放的输出电压为：

$$U_T = I_T R_T = A p_{O_2} e^{(B-\alpha)/T} + I_0 \beta e^{B/T}, \quad (6)$$

如式(6)所示，在测得传感器常数 α 后，选择合理 B 的热敏电阻，即可实现放大器的输出电压只与氧分压有关，与温度无关的目的，故最终放大器输出电压的计算公式为：

$$U_T = A \beta p_{O_2}. \quad (7)$$

2.5.2 基于 LS-RBF 神经网络的软件补偿

首先，在不同温度下，分别对调理电路输出电压和对应的溶解氧含量进行线性拟合，具体操作步骤如下：

(1) 在饱和亚硫酸钠溶液中测量溶解氧电极的零点电压 U_0 ，测得 U_0 为 168 mV；

(2) 用饱和氧蒸馏水作为试验溶液，置于恒温水浴中，使其温度从 0℃ 逐步加热到 40℃，每隔 5℃ 用高精度溶氧仪测量此温度 T_n 下的溶氧量，并记录调理电路输出电压值 U_n ；

(3) 采用最小二乘法进行线性拟合，得到不同温度下的溶解氧含量 C_n 与调理电路输出电压 U_n 的关系式，如式(8)所示：

$$C_n = U_0 + K_n U_n. \quad (8)$$

通过 MATLAB 仿真可得溶解氧含量 C_n 与调理电路输出电压 U_n 的拟合关系曲线。拟合关系曲线图如图 7 所示。

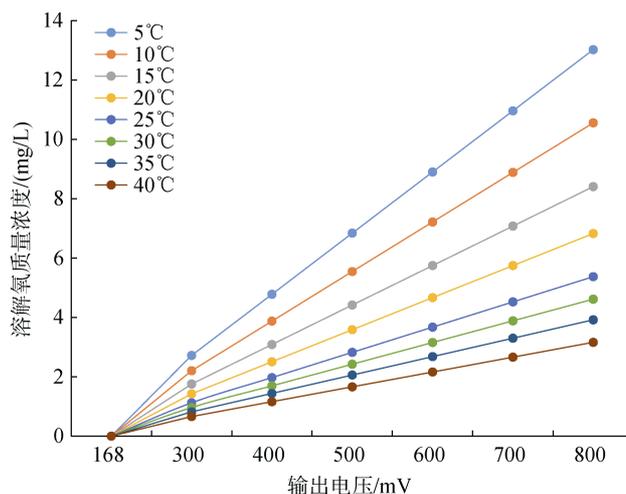


图 7 拟合曲线图

Fig. 7 Simulation diagram of the fitting curve

如图 7 所示，当温度一定时，溶解氧含量 C_n 与调理电路输出电压 U_n 呈线性关系；然而，在不同温度下，上述拟合曲线具有不同斜率 K_n ，故需找出上述拟合曲线斜率 K_n 随温度变化的规律，即得到溶解氧含量 C_n 和温度 T 的关系。

其次，在实际应用中常用的溶解氧温度补偿算法有最小二乘法、BP 神经网络及 RBF 神经网络^[12]。最小二乘法^[13]通过最小化误差平方和寻找数据的最佳函数匹配，对未知数据进行预测，应用广泛且较

为可靠,但最小二乘法不能拟合非线性数据,当系统的影响因素较多且不可控,或含有非线性数据时,不能保证数据优化的准确性;BP神经网络由于其系统的复杂程度与节点之间的相互连接关系,对噪声神经有较强的鲁棒性和容错能力,且能充分逼近复杂的线性关系,但BP神经网络存在收敛速度慢、学习速度慢等缺陷;RBF神经网络由于在神经网络的隐含层中添加了径向基函数,可被作为线性模型来优化,无需反向传播过程,收敛速度得以加快,在保证学习速度的前提下,RBF神经网络^[14]的各项性能依旧接近BP神经网络。

综上所述,本论文采用RBF神经网络构建斜率 K_n 的温度补偿模型,通过该补偿模型训练对应温度下的斜率 K_n ,代入公式(8)中,可得经温度补偿后的溶解氧含量;并将RBF神经网络与最小二乘法、BP神经网络进行对比分析,验证RBF神经网络对溶解氧温度补偿的适用性。

3 实验验证

3.1 温度补偿实验

根据温度补偿设计,在得到溶解氧含量 C_n 与调理电路输出电压 U_n 的拟合曲线后,为对比最小二乘法、BP神经网络及RBF神经网络对斜率 K_n 的温度补偿效果,将温度与当前对应温度下的斜率 K_n 在MATLAB中分别使用以上3种补偿算法进行温度补偿实验,各算法性能指标如表1所示。

表1 算法性能指标

Tab.1 Algorithm performance indicators

算法	拟合优度	误差均值
最小二乘法	0.885 52	0.011 158
BP神经网络	0.915 37	0.007 235
RBF神经网络	0.999 97	0.000 067

如表1所示,最小二乘法对已有数据的拟合优度为0.885 52,BP神经网络的拟合优度为0.915 37,RBF神经网络的拟合优度为0.999 97,且RBF神经网络的误差均值最小,故RBF神经网络更适用于对溶解氧进行温度补偿。

综上,本论文采用RBF神经网络建立斜率 K_n 的温度补偿模型。温度补偿模型如图8所示。

由图8可知,在25~40℃,温度补偿效果较好。由于篇幅有限,本论文中仅给出8组补偿值,如表2所示。

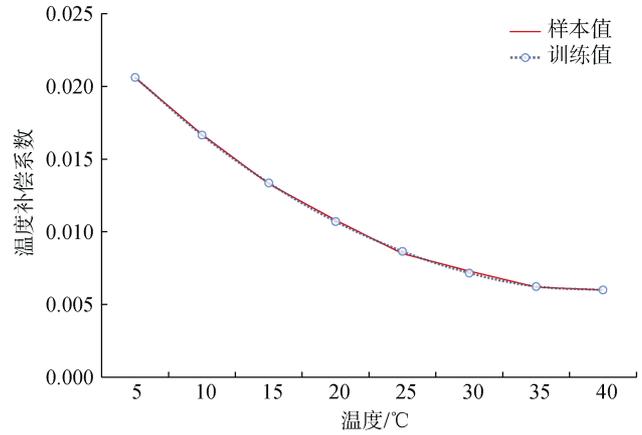


图8 斜率 K_n 的温度补偿模型

Fig. 8 Temperature compensation model of slope K_n

表2 温度补偿系数测试结果

Tab.2 Temperature compensation test results

温度/°C	温度补偿系数		
	样本	训练	误差
5	0.020 6	0.020 616 7	0.000 016 7
10	0.016 7	0.016 652 4	0.000 047 6
15	0.013 3	0.013 359 5	0.000 059 5
20	0.010 8	0.010 704 7	0.000 095 2
25	0.008 5	0.008 654 7	0.000 154 8
30	0.007 3	0.007 161 9	0.000 123 8
35	0.006 2	0.006 235 7	0.000 035 7
40	0.005 8	0.005 800 0	0.000 000 0

在得到最优斜率 K_n 的温度补偿模型后,通过该补偿模型训练对应温度下的斜率 K_n ,并将其代入公式(8),即可得经温度补偿后的溶解氧含量。

3.2 系统测试实验

为验证该系统的溶解氧检测性能,用饱和蒸馏水作为试验溶液,在0~40℃温度范围内,每隔5℃用高精密度溶解氧测量仪测量此温度下的溶解氧浓度,以本系统所采集的溶解氧浓度作为测量值,两者进行比较。由于篇幅有限,本论文中仅给出3组检测数据,如表3所示。

表3 系统测试监测数据

Tab.3 System test monitoring data

温度/°C	溶氧度/(mol/L)		相对误差/%
	标准值	检测值	
30	7.46	7.502	0.56
20	9.53	9.404	0.58
10	11.52	11.611	0.78

如表 3 所示, 其相对误差均小于 1%, 准确度较高, 可满足水质检测要求。

由于本系统工作环境为室外, 要求具有一定的稳定性, 为验证系统的稳定性, 将溶解氧采集系统置于恒温水浴中进行稳定性测试。在保证系统持续供电的前提下, 每隔 8 min 采样一次, 共采样 5 次, 精密性测试结果如图 9 所示。

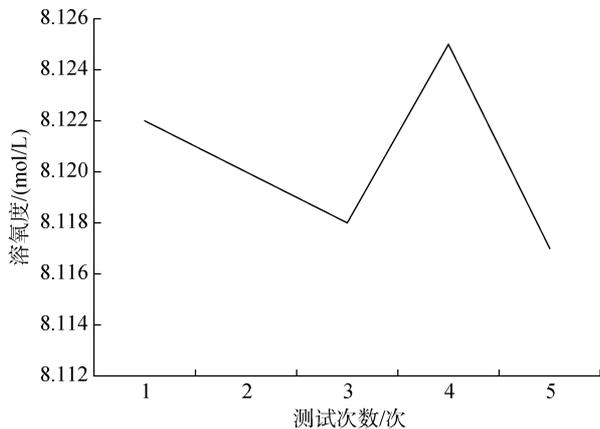


图 9 精密性测试结果

Fig. 9 Precision test results

如图 9 所示, 该系统的采样波动比例在 0.1% 以内, 精密性较高; 故此, 经温度补偿后, 系统的随机误差和随机误差均较小, 可满足检测装置的性能要求。

4 结论

本文设计了一种基于 LS-RBF 神经网络的溶解氧检测系统, 该系统使用 STM32 微处理器, 通过软硬件设计来实现系统信号的采集、软件标定及温度补偿等功能, 可以有效检测溶解氧信号; 其中, 采用最小二乘法、BP 神经网络、RBF 神经网络算法进行温度补偿实验, 构建了基于 LS-RBF 神经网络的温度补偿模型。

实验结果表明: 经温度补偿后, 该溶解氧检测系统的相对误差小于 1%, 采样波动比例在 0.1% 以内, 测量精度满足应用要求, 对于水质监测具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 郑贵林, 徐沾伟. 一种新型高精度溶解氧传感器的设计[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(2): 112-114.
Zheng Guilin, Xu Zhanwei. Design of a new type of high-precision dissolved oxygen sensor[J]. Sensors and Microsystems, 2012, 31(2): 112-114.

[2] 曾文辉, 匡迎春, 欧明文, 等. 水产养殖水质监测温度补偿系统[J]. 中国农学通报, 2016, 32(11): 17-21.
Zeng Wenhui, Kuang Yingchun, Ou Mingwen, et al. Temperature compensation system for aquaculture water quality monitoring[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(11): 17-21.

[3] 郭萌. 电化学传感器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
Guo Meng. Research on electrochemical sensors[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.

[4] 刘庆, 邹应全, 行鸿彦. 基于 MSP430 单片机的溶解氧测量仪[J]. 仪表技术与传感器, 2009(9): 33-35.
Liu Qing, Zou Yingquan, Xing Hongyan. Dissolved Oxygen Measuring Instrument Based on MSP430 Microcontroller[J]. Instrument Technology and Sensor, 2009(9): 33-35.

[5] 张国城. 溶解氧测定仪温度补偿原理及其检定方法[J]. 中国计量, 2010(11): 88-90.
Zhang Guocheng. Principle of temperature compensation for dissolved oxygen meter and its verification method[J]. China Metrology, 2010(11): 88-90.

[6] 张涛. 海洋原位溶解氧检测仪设计与开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Zhang Tao. Design and development of marine in situ dissolved oxygen detector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[7] 秦宏鹏, 刘翔宇, 陈娟. 溶解氧多参数智能补偿校正检测技术的研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2019, 46(3): 99-104.
Qin Hongpeng, Liu Xiangyu, Chen Juan. Research on dissolved oxygen multi-parameter intelligent compensation correction detection technology[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition, 2019, 46(3): 99-104.

[8] 秦文正, 吴亚英. 高精度数字式溶氧仪[J]. 分析仪器, 1998(1): 28-31.
Qin Wenzheng, Wu Yaying. High precision digital dissolved oxygen meter[J]. Analytical Instrument, 1998(1): 28-31.

[9] 丁启胜, 马道坤, 李道亮, 等. 溶解氧智能传感器补偿校正方法研究与应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2011, 42(4): 567-571.
Ding Qisheng, Ma Daokun, Li Daoliang, et al. Research and application of compensation and correction method for smart sensor of dissolved oxygen[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2011, 42(4): 567-571.

[10] 安爱民, 祁丽春, 丑永新, 等. 基于 BP 神经网络的溶解氧浓度软测量方法研究[J]. 计算机与应用化学, 2016, 33(1): 117-121.
An Aimin, Qi Lichun, Qiu Yongxin, et al. Research on

- soft-sensing method of dissolved oxygen concentration based on BP neural network[J]. *Computer and Applied Chemistry*, 2016, 33(1): 117-121
- [11] 郑贵林, 徐沾伟. 一种新型高精度溶解氧传感器的设计[J]. *传感器与微系统*, 2012, 31(2): 112-114.
Zheng Guilin, Xu Zhanwei. Design of a new type of high-precision dissolved oxygen sensor[J]. *Sensors and Microsystems*, 2012, 31(2): 112-114.
- [12] Zhang Wen, Wang Ping, Zhu Mengfu, et al. The design of dissolved oxygen detection system based on C8051F020[C]// Zhang Jiajie. 2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation(1). Tianjin: IEEE Computer Society, 2011: 1253-1255.
- [13] Liao Heqin, Qiu Zurong, Feng Guohong et al. The research of dissolved oxygen detection system based on fluorescence quenching principle[C]// IEEE. International Conference on Electronic & Mechanical Engineering & Information Technology. Harbin: IEEE, 2011: 3575-3578.
- [14] Yan Wu, Yang Yang. A new neuron model based on multilayer perceptron and radial basis transfer function[C]//IEEE. International Conference on Neural Networks & Brain. Beijing: IEEE, 2005: 335-338.

Design of the dissolved oxygen detection system based on the least square method and RBF neural network

QI Sheng-bo, WANG Rong, YIN Bao-an, ZHANG Yang
(Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Oct. 16, 2019

Key words: dissolved oxygen; electrode excitation source; temperature compensation; RBF neural network; software calibration

Abstract: A polarographic dissolved oxygen detection system is studied in this paper to understand the dissolved oxygen electrode excitation source, high-precision signal sampling, software calibration, and temperature compensation for overcoming the influence of temperature on the dissolved oxygen sensor during dissolved oxygen detection. Further, a polarographic dissolved oxygen sensor detection circuit is designed by analyzing the working principle of the polarographic dissolved oxygen sensor. Subsequently, a hardware temperature compensation circuit was designed based on the NTC (negative temperature coefficient) thermistor according to the temperature characteristics of the dissolved oxygen electrode. The software temperature compensation model is established using the least squares method and the RBF neural network. The temperature compensation experiments are conducted using saturated distilled water. The experimental results prove that the relative error and sampling fluctuation of the dissolved oxygen detection system are within 1% after temperature compensation, considerably reducing the nonlinear error associated with the sensor. The measurement accuracy and stability can satisfy the application requirements.

(本文编辑: 刘珊珊)