

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.02.009

一种基于两电极体系的电导率检测系统*

綦声波, 黄霖, 尹保安

(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要:针对电导率检测过程中宽量程信号采集和误差补偿准确度问题,对电导率检测系统的交流激励源、高精度信号采样、量程自动切换、软件标定和温度补偿等方面进行了研究。通过对两电极体系的原理分析,设计了两电极体系的检测电路,利用精密电阻箱建立了电导率输出量与输入量之间的关系,使用电导率标准液进行了温度补偿模型测试,并基于STM32微控制器进行了该电导率检测系统实验。研究表明:该系统能实时检测电导率信号,具有量程自动切换、数据处理、软件标定、温度补偿等多项功能,并且检测系统的相对误差小于0.5%。

关键词:电导率;两电极体系;双极性方波;软件标定;温度补偿

中图分类号:TH832

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)02-0158-05

Conductivity detection system based on two-electrode system

QI Sheng-bo, HUANG Lin, YIN Bao-an

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Aiming at the wide range signal acquisition and error compensation accuracy in the process of conductivity detection, the AC excitation source, high-precision signal sampling, automatic range switching, software calibration and temperature compensation of the conductivity detection system were researched. The detection circuit of the two-electrode system was designed based on the principle study of the two-electrode system. The relationship between the output and input of the conductivity was established by using the precision resistance box, and the temperature compensation model was tested by using the conductivity standard liquid, as well as the conductivity detection system was realized based on the STM32 microcontroller. The experimental results show that the conductivity can be detected in real time, and multiple functions are provided such as automatic range switching, data processing, software calibration, temperature compensation, etc. The relative error of the detection system is less than 0.5%.

Key words: conductivity; two-electrode system; bipolar square wave; software calibration; temperature compensation

0 引言

水质监测技术是监视和测量水体中污染物的种类、浓度及变化趋势,评价水质状况的技术。水体盐度是水质监测的重要内容,通过电导率检测来推导盐度已成为一种通用的技术手段^[1]。电导率检测主要有两种:电极式测量和感应式测量^[2]。因尺寸小、测量

电路简单、工作稳定可靠等特性,电极式电导率传感器得到了快速发展。

目前,国内市场的主导仪器是两电极电导率传感器。为降低极化效应,该传感器在进行电导池检测电路设计时,通常为电导池施加交流激励^[3]。检测电路将电导池检测到的电导率信号转换为电信号,经放大、滤波后采样进行数据处理。因此,检测电路在分辨率、精度、线性度、稳定性、温度补偿等方面的性能是电导

收稿日期:2018-08-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC1400800);国家自然科学基金资助项目(51475197)

作者简介:綦声波(1970-),男,山东平度人,教授,硕士生导师,主要从事嵌入式系统、海洋智能仪器方面的研究。E-mail:qishengbo@ouc.edu.cn

率检测的关键^[4]。

在以往的电导率检测系统中,信号的采集处理相对单一,易造成检测精度低下。首先是在全量程检测范围内,电导率信号的放大倍数相同,无法保证信号的高精度采样;其次是检测系统未经标定和温度补偿,由线路板所带来的误差无法消除,且环境温度变化越大,检测误差就越大。

为此,本文将针对所选取的两电极电导率传感器,设计一种基于温度补偿双极性方波驱动的电导率检测系统,并通过实验以验证该方法的有效性。

1 测量原理

1.1 两电极体系原理

两电极电导率传感器在一对电极上施加恒定激励,电导池中液体电导的变化将导致流过电极对的电流发生改变^[5]。用电导率代替电阻率,用电导代替极间电阻,即可实现液体电导率的测量^[6]。

电导池的设计原则是:

- (1) 电极的长期性能要稳定,一般采用贵金属作为电极材料,如铂金、黄金等;
- (2) 电极在电导池中的位置要牢固,其引线与电导池基体之间的烧结必须良好^[7];
- (3) 待测溶液流过电导池时要流畅,不能产生气泡,以保证充分热交换,减少测量误差。

两电极体系电导池内共有两个电极,电极的有效面积与距离决定电极常数。通常要求:

- (1) 电极的有效面积应尽可能大,以减小电流密度,从而降低极化效应;
- (2) 电极间距要长,以减少寄生电容,从而降低电容效应。

该系统电导率测量范围较宽,因此在电导池设计时选择电极常数为 10 cm^{-1} 的铂黑电极进行检测。

1.2 两电极体系检测电路工作原理

两电极体系检测电路包括交流激励源、电导池、量程切换、温度采集等部分。

检测电路框图如图1所示。

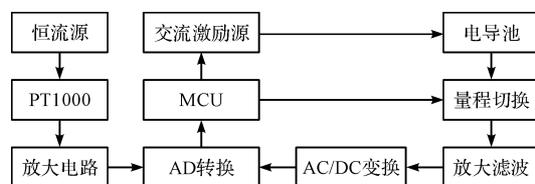


图1 两电极体系检测电路框图

两电极体系检测电路的工作原理是:

使用 DA 转换芯片产生高精度模拟信号,作用于由精密电阻和运算放大器构成的减法电路生成交流激励信号,继而由电导池和运算放大器构成负反馈电路形成闭环,此后经量程切换、放大滤波、交-直流变换,最终输出包含电导率信息的直流电压信号,使用 AD 转换完成电压采样。

2 硬件设计

作为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,利用交流激励源、高精度采样、量程切换、温度补偿等关键技术,进行信号采集。

2.1 交流激励源

为降低电导池极化效应与电容效应,提高电导池使用寿命,两电极体系使用频率为 1 kHz 的交流激励信号^[8]。

交流激励源如图2所示。

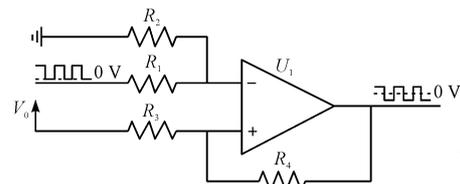


图2 交流激励源

交流激励源由精密电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 和运算放大器 U_1 组成,通过调节输入直流方波的电压幅值和各电阻阻值即可产生交流激励。

为提高交流激励输出精度,设计使用方波信号;同时,交流方波还包含基础波形以外的诸多高次谐波,能够增强系统抗干扰能力。

2.2 高精度采样

为使待测溶液电导率和流经电导池的电流成比例,需保证电导池的端电压恒定。基于此,笔者设计负反馈电路,将电导池的电压信号与交流激励进行比较,其差值送到运算放大器的反相输入端,逐步形成恒压源以驱动电导池。

负反馈电路如图3所示。

待测溶液的电导率 C 可通过测量流经电导池的电流 I 和电导池等效电阻的电压 V_c 进行计算,即:

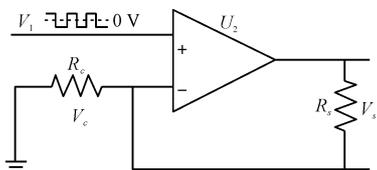


图 3 负反馈电路

R_s —低温漂精密取样电阻; R_c —电导池等效电阻

$$C = \frac{1}{R_c}K = \frac{I}{V_c}K \quad (1)$$

式中: K —电导池的电极常数。

该电导池采用交流激励,其电流不易测量。为此,笔者在负反馈回路中串入低温漂精密取样电阻 R_s ,只需测出 V_s 和 V_c ,即可求出待测溶液电导率 C :

$$C = \frac{V_s}{R_s}K = \frac{V_s}{V_c R_s}K \quad (2)$$

该电路主要保证电导池等效电阻两端电压恒定,即 V_c 为定值。根据运算放大器“虚短”、“虚断”原理,负反馈电路会在 $V_1 \approx V_c$ 条件下平衡,此时如果待测溶液电导率变化,电导池等效电阻压降 V_c 就将改变,而电路最终仍在 $V_1 \approx V_c$ 条件下平衡,该平衡将迫使负反馈回路电流发生改变。

式(2)中,因 V_c 、 R_s 、 K 均为定值,只需获取电压 V_s 即可求得待测溶液电导率。

2.3 量程切换

该系统基于电阻分压原理来测量液体电导率。因待测溶液的电导率测量范围较宽,为提高测量精度,需选择合适的分压电阻来反映流经电导池电流的变化。该系统使用差分四通道数控模拟开关提供 4 个档位,对于较大电导率溶液使用低档位,对于较小电导率溶液使用高档位。

2.4 温度补偿

温度对液体电导率影响很大,它直接影响溶液电解质的电离度、溶解度等,从而影响电导率的准确测量。同种溶液在不同温度下的电导率也不尽相同,温度越高,电导率越大,反之电导率越小。该系统使用自制精密恒流源驱动 PT1000 进行温度检测,而后使用软件对电导率检测进行温度补偿。

经测试,该温度传感器线性度良好、灵敏度高,精度达 $0.05\text{ }^\circ\text{C}$,可满足温度补偿的需求。

3 软件设计

主控单元采用 STM32 单片机,主要功能是按照通

信协议,接收上位机通过串口下发的指令,解析后执行温度检测及电导率检测,数据处理完毕后经串口回发,完成信息通信。

3.1 检测控制流程

STM32 微控制器使用 IAR 软件进行 C 语言编程,通过检测程序控制电导率采样过程中的档位自动切换,实现宽量程检测。

其流程图如图 4 所示。

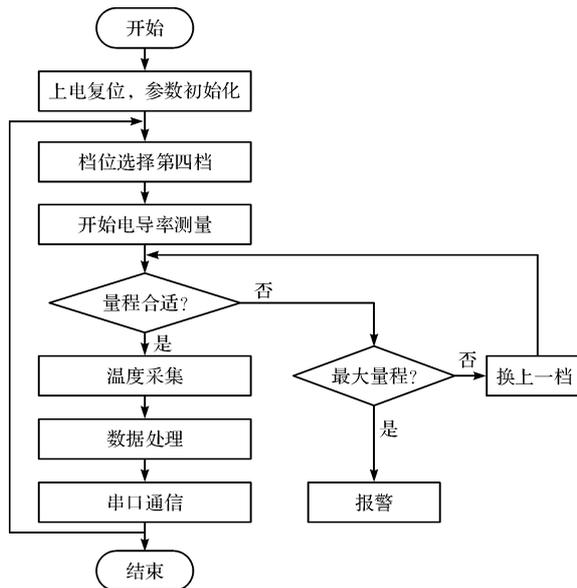


图 4 检测控制程序流程图

检测控制程序中,换挡是通过一个多项判断来实现的,采用逐级增加。在换挡程序中设置了两个极限阈值 U_H 和 U_L ,把转换电压 U_x 与 U_H 、 U_L 相比较。若 $U_H \leq U_x \leq U_L$,则量程合适;反之开始换挡,直到找到合适的档位,若超过最大量程则报警。

3.2 数据处理流程

在检测系统中,传感器获取被测量的信息,并将获取的信息按照一定规律变换为电信号输出。该系统中,经检测控制程序采样后,所获数据为包含电导率信息的模拟值,故需进行数据处理,以获取最终检测值。

数据处理主要包含标定与温度补偿两部分。标定用来确立传感器输出量和输入量之间的对应关系,从而确定标定后的全量程测量精度。温度补偿则是消除电导率检测的温度影响(温度越高,参与导电的粒子运动就越活跃,电导率就越大^[9])。数据处理时,将采集到的数据进行数据分类、数据变换等预处理,此后判断是否为所选量程电导率数据,若合格则进行滤波和

标定补偿计算,完成电导率输出。

4 实验验证

为验证检测系统的有效性,本文设计了标定、温度补偿和验证分析实验,来进行实物测试。

4.1 标定实验

不同元器件存在参数误差,即使在硬件设计中使用温漂系数低于 15 ppm 的精密器件,仍无法保证被测溶液的等效电阻与输出电压之间完全符合线性关系。因此,需使用精密电阻箱对电导池等效电阻进行标定。通过使用上海电工仪器厂的 ZX32P 交/直流电阻箱替代电导池等效电阻进行系统测量,建立电导池等效电阻与系统测量电阻之间的关系模型,随后将模型参数保存至单片机。

系统的电导率测量范围是 200 uS/cm ~ 80 000 uS/cm,采取切换模拟开关的方式进行换挡实验。

通过测量交/直流电阻箱的输出电阻,获取系统测量电阻值,在 Matlab 中使用最小二乘法计算出拟合表达式,获取不同档位的标定模型,即:

$$\begin{cases} y = 1.050\ 04x - 257.62 & 200 \leq C \leq 2\ 000 \\ y = 1.003\ 83x - 18.822 & 2\ 000 < C \leq 20\ 000 \\ y = 0.987\ 79x - 0.823 & 20\ 000 < C \leq 50\ 000 \\ y = 0.988\ 13x - 0.901 & 50\ 000 < C \leq 80\ 000 \end{cases} \quad (3)$$

式中: x —系统测量电阻值; y —经拟合模型处理后的电阻值; C —电导率值。

4.2 温度补偿实验

本研究对标定完成的检测系统进行测试,取电导率标准液在恒温箱中进行实验,对电导率实测值与温度进行二次拟合。

拟合曲线如图 5 所示。

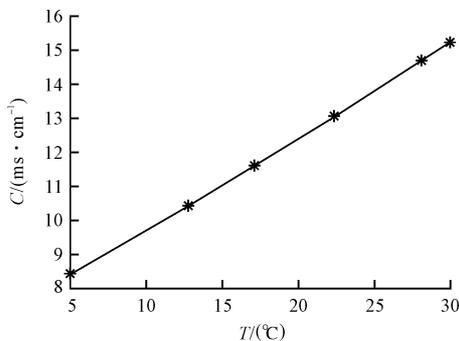


图 5 电导率实测值对温度变化曲线

由图 5 可知:

在一定温度段内,电导率与温度近似成线性关系,说明检测系统存在明显的温度漂移,须通过温度补偿来消除温度对检测的影响。

通过使用多项式对温度补偿斜率进行拟合,获取电导率对温度的补偿模型。经大量实验,系统在 1 °C ~ 35 °C 内进行回归分析与综合,得到温度补偿模型为:

$$C_s = (-1.094\ 57 \times 10^{-4} T^2 + 1.446\ 34 \times 10^{-4} T + 0.978\ 03) C_T \quad (4)$$

式中: C_T — T °C 时电导率实测值; C_s —经温度补偿后的最终电导率值; T —待测溶液温度。

4.3 实验及结果分析

为验证电导率检测系统标定补偿实验的准确性,本研究取待测溶液于恒温箱中进行实验,电导率标准值由意大利 Idronaut 公司 OCEAN SEVEN 304Plus CTD 多参数水质仪测得,标定值为本文设计的检测系统所得。

不同环境温度下,待测溶液的标定电导率测量结果如表 1 所示。

表 1 不同环境温度电导率测量结果

温度/ (°C)	标准值/ (mS · cm ⁻¹)	标定值/ (mS · cm ⁻¹)	绝对误差/ (mS · cm ⁻¹)	相对误差/ (%)
5.85	8.408 7	8.394 7	-0.014 0	-0.17
16.45	10.796 5	10.817 1	0.020 6	0.19
17.10	10.974 3	11.012 4	0.038 1	0.35
22.55	12.282 1	12.274 5	-0.007 6	-0.06
28.40	13.728 5	13.782 3	0.053 8	0.39

由表 1 可知:

待测溶液在不同温度下的电导率有较大漂移,温度补偿后能够保证电导率相对误差均小于 0.5%,能够有效提高测量精度。

不同待测溶液的标定电导率测量结果如表 2 所示。

表 2 不同待测溶液电导率测量结果

标准值/ (mS · cm ⁻¹)	标定值/ (mS · cm ⁻¹)	绝对误差/ (mS · cm ⁻¹)	相对误差/ (%)
0.966 2	0.962 7	-0.003 5	-0.36
1.180 8	1.179 2	-0.001 6	-0.14
8.351 2	8.374 2	0.023 0	0.28
11.285 7	11.324 8	0.039 1	0.35
33.528 5	33.573 1	0.044 5	0.13

由表 2 可知:

该检测系统的绝对误差最大值为 0.0445 mS/cm, 相对误差均小于 0.5%, 检测系统能满足测量要求。

5 结束语

本文设计了一种带有温度补偿双极性方波驱动的电导率检测系统, 通过实验给出了系统的标定模型和温度补偿模型。该系统使用 STM32 微处理器, 通过软硬件设计来实现系统的信号采集、量程切换、软件标定、温度补偿等功能, 可以有效检测电导率信号, 检测精度高。

实验结果表明: 经标定和温度补偿后的电导率检测精度有效提高, 检测系统的相对误差均小于 0.5%, 满足实时检测要求。

参考文献 (References):

[1] 张 挺. 基于高精度温度、电导率传感器的新型盐度计集成设计[D]. 天津: 国家海洋技术中心海洋测量传感器技术研究室, 2017.

[2] 张兆英. 海水电导率、温度和深度测量技术探讨[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 38-41.

[3] 余 翔, 张 冰, 林 楨, 等. 基于 Van Der Pauw 原理的溶液电导率计[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015, 49(2): 371-375.

[4] 贾文娟, 兰 卉, 李红志. 三电极电导率传感器测量电路的研制[J]. 海洋技术学报, 2013, 32(3): 33-36.

[5] 李 琳, 陈文芾. 频率自适应电流源克服电容影响的电导率测量[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(12): 2256-2259.

[6] 张高燕, 吴少华, 赵 湛. 基于 MEMS 工艺的硅基四电极电导率与温度集成传感器芯片的研制[J]. 传感技术学报, 2011, 24(7): 966-969.

[7] 兰 卉. 七电极电导率传感器及 CTD 测量系统技术研究[D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2012.

[8] JONES R G. Measurements of the electrical conductivity of water[J]. **IEEE Proceedings-Science Measurement and Technology**, 2002, 149(6): 320-322.

[9] 刘致滨, 宋文晓, 杨晶娟, 等. 透析液电导率测量仪的研究[J]. 自动化仪表, 2013, 34(1): 64-68.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式: