

一种高精度量程自适应电导率检测电路

苏淑靖 郭杨盛 吴梦香 亢叶飞 闫丹 李二赛

(中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051)

摘要:针对传统的水质检测、农业灌溉、金属材料工艺控制以及新兴的酒类鉴别,含盐量检测、药物提取等新型问题中,对电导率测量精度、测量范围的要求不断提高,要求电导率测量设备不仅要适用于实际生产应用中低电导率的测量,还需要兼顾高电导率的测量,且电导率测量精度需求越来越高。针对以上问题设计了一种高精度自校准量程自适应的电导率检测电路,通过电路将带有电导率信息的激励信号与未过电导池的参考激励信号进行互相关运算并由低通滤波器对其进行滤波得到与电导率相关的电压信号。正弦激励幅度可调电路与电导率测量电路中自动校准模块相互合作完成电路的自动校准、量程切换电路保证了电导率测量的宽量程、采用互相关算法降低电路噪声及去除电导池等效电容,弥补了传统电导率测量电路定量程、测量范围小、精度差的缺点。测试结果表明,电导率测量电路可以测量电导率范围为 $0 \sim 30\,000\ \mu\text{S}/\text{cm}$,测量精度为 $0.01\ \mu\text{S}/\text{cm}$,测量基线噪声为 $0.3\ \text{nS}/\text{cm}$ 。

关键词:互相关;高精度;自校准;量程自适应;电导率测量

中图分类号: TN782⁺.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

High-precision self-calibrating range adaptive conductivity detection circuit

Su Shujing Guo Yangsheng Wu Mengxiang Kang Yefei Yan Dan Li Ersai

(State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In view of the traditional water quality detection, agricultural irrigation, metal material process control and emerging wine identification, salt content detection, drug extraction and other new problems, the requirements for conductivity measurement accuracy and measurement range are constantly improving. The conductivity measurement equipment is not only suitable for the measurement of low conductivity in actual production applications, but also needs to take into account the measurement of high conductivity, and the demand for conductivity measurement accuracy is getting higher and higher. In this paper, a high-precision self-calibration range adaptive conductivity detection circuit is designed for the above problems. The excitation signal with conductivity information and the reference excitation signal without the conductivity cell are cross-correlated by the circuit and filtered by the low-pass filter to obtain the voltage signal related to the conductivity. The sine excitation amplitude adjustable circuit and the automatic calibration module in the conductivity measurement circuit cooperate with each other to complete the automatic calibration of the circuit. The range switching circuit ensures the wide range of conductivity measurement. The cross-correlation algorithm is used to reduce the circuit noise and remove the equivalent capacitance of the conductivity cell, which makes up for the shortcomings of the traditional conductivity measurement circuit, such as quantitative range, small measurement range and poor accuracy. The test results show that the conductivity measurement circuit can measure the conductivity range of $0 \sim 30\,000\ \mu\text{S}/\text{cm}$, the measurement accuracy of $0.01\ \mu\text{S}/\text{cm}$, and the measurement baseline noise of $0.3\ \text{nS}/\text{cm}$.

Keywords: cross-correlation; high precision; self-calibration; range adaptive; conductivity measurement

0 引言

随着多学科研究的扩展和交叉,电导测量从传统的农业灌溉、工业制造和环保问题等与水质检测相关的应用拓展到食品安全、医药制造等使用电导率来测量其他相关参数的新型问题中。在农业上,通过电导率测量探测退耕地土壤电导率从而得到探测土地的水分数据,根据水分数据对植株制定不同的培养方案,有助于植株生长稳健,提升产量;在工业上,原材料处理过程根据电导率控制槽液浓度使电导稳定在一定范围使之符合生产条件;另外,电厂、大型空调设备都使用冷水带走多余的热量,而这些水通常都是循环利用的,随着循环次数的增加循环水的电导率不断增加,必须通过检测电导率来适时补充新的冷却水调节循环水的电导率,减少循环水对管道设施的损害及腐蚀。食品安全方面,通过测量油水分离后的水相电导率来判断是否参杂有地沟油。因此,研制一款高精度、宽范围、自适应能力高的电导检测电路以满足以上需求具有重要的现实意义^[1-2]。

电导检测仪器测量方法多使用电极式电导率测量法和电磁式电导测量法。电磁电导率测量法不用接触样品,可以做到对检测样品的原样保持,但因其原理限制导致该方法只能适用于高电导率方面的测量,如测量生物组织的电导率,应用范围窄,且其成本较高。电极式电导率测量法相对电磁式电导测量法结构简单,测量范围较广,成本低,应用范围广。文献[3]使用方波为电导率测量的激励源,对通过电导池的方波进行调制解调及滤波后进行测量,通过电导池后的方波带有成分复杂的噪声只通过滤波电路很难消除,且溶液等效电容带来的误差没有进行相关处理;文献[4]通过四电极传感探头以正弦波为激励调制解调得到与电导率相关的电压幅值,并且可以根据电导率大小自动切换量程,该方法设电路相对误差低于0.6%,测量范围为1~1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。但在电导率测量电路中采用的调制解调方法并不能消除无关噪声及溶液等效电容带来的误差;文献[5]通过双频率激励来消除溶液等效电容带来的误差,相对误差可以控制在 $\pm 1\%$ 。但没有对电路噪声进行相关处理。

上述研究通过改变反馈电阻的阻值调整电导率测量范围,实现电导率量程的自动切换,但切换过程中并没考虑到电导率在换挡边界时会出现反复切挡,导致数据出错。本文设计的电导检测电路包括控制模块、可调幅正弦激励发生模块、电导检测模块。其中控制模块以单片机为主控芯片,负责协调控制各模块工作;可调幅正弦激励发生模块以文氏电桥为基础,通过16 bit DAC提供电压基准以控制正弦波发生器输出激励信号的幅度值;电导检测模块基于互相关原理对带有电导信息的信号进行处理,同此方法可以很好的消除电路中与激励信号无关的噪声及溶液等效电容带来的误差;根据采回值与量程表进行实时对比进行滞回式挡位切换。通过上述方法达到宽范围,高

精度电导率检测的要求。通过模块之间的相互配合,电路最终可实现自校准、量程自适应、电导测量范围为0~30 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、测量精度为0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、基线噪声为0.3 nS/cm。^[6-9]

1 电导检测电路总体方案

如图1所示,本文设计的电导检测电路包括单片机控制模块、可调幅正弦激励发生模块、自校准、自适应电导检测模块、温控模块、嵌入式主机及供电模块。该电路主要实现两个功能,电导检测功能及电导池温度控制功能^[10]。

电导池温度控制功能主要是为了保持电导池温度恒定,电导池温度会对测量的电导率造成影响。在电路实现电导池温度控制功能的基础上,嵌入式主机通过串口发送控制指令,单片机控制模块对控制指令进行解析,根据下发指令的不同完成电导池自校准及电导率检测功能^[11]。当下发指令为电导池自校准指令时,电导测量电路接入参考电导,通过程序对正弦发生电路进行控制,调节产生的正弦波幅度直至测量值与参考电导率相同;当下发指令为电导检测时,正弦发生电路产生固定频率两路正弦信号,一路正弦信号作为电导池的激励信号,通过电导池后传入电导检测模块。另一路正弦信号作为参考信号传入电导检测模块。

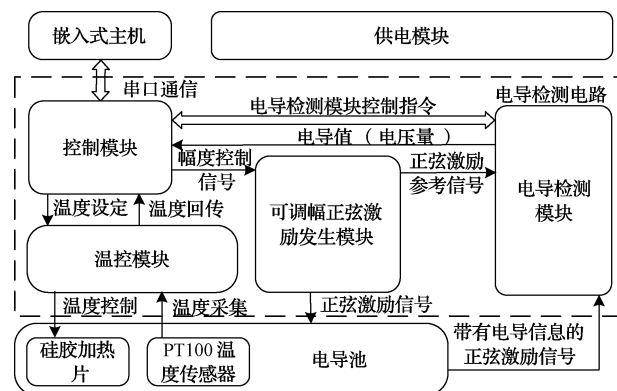


图1 电路整体结构

电导检测模块对参考信号与带有电导信息的信号进行互相关运算,通过该方法可以去除电导液中与所需信号无关的噪声及电容带来的误差,完成电导率的检测。测量时通过滞回式量程自适应电路实时切换量程,防止在两挡交界处出现挡位频繁切换,造成错误数据^[12-15]。

2 电导检测电路设计

2.1 可调幅正弦激励发生模块

可调幅正弦激励发生模块主要作用是产生电导池所需的电压激励信号及自校准自适应电导检测模块的参考信号。正弦激励发生模块电路包括固定频率自激振荡电路,幅度限制电路,自动增益控制电路构成,其结构如图2所示。

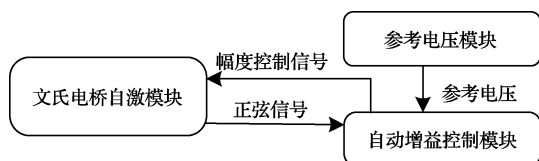


图2 可调幅正弦发生模块结构

该电路的电路原理如图3所示。固定频率自激振荡电路由电阻 R_1 、 R_2 及电容 C_9 、 C_{10} 构成的文氏电桥通过自

激振荡产生指定频率的正弦信号。

该自激振荡电路可由选频网络增益表达式如下：

$$A_{\text{选频}} = \frac{U_+}{U_o} = \frac{R_2 // \frac{1}{j\omega C_{10}}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_{10}} + R_1 // \frac{1}{j\omega C_9}} = \frac{1}{3 + j\left(\omega R_2 C_{10} - \frac{1}{\omega R_1 C_9}\right)} \quad (1)$$

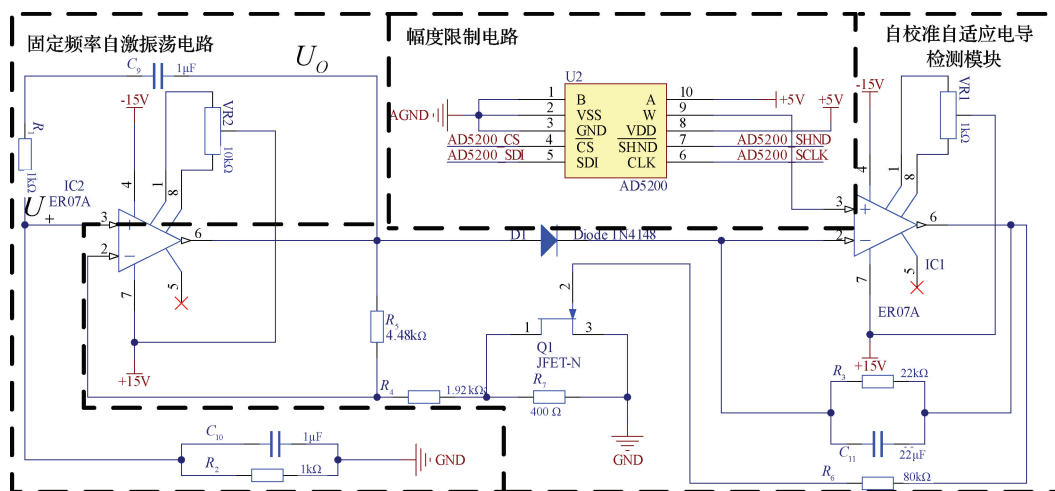


图3 可调幅正弦发生模块电路原理

当 $\omega=1/RC$ 时， $|A_{\text{选频}}|$ 的值为最大值 $1/3$ ，此时相移角度为 0 。本文通过自动增益控制电路为文氏电桥提供 3 倍以上的增益，就可以产生 $\omega=1/RC$ 频率的正弦波。自动增益控制电路通过比较文氏电桥自激产生的电压值与幅度限制电路产生的电压值后，控制自动增益控制电路是否导通。

如果幅度限制电路产生的电压值大于 U_o 减 0.7 V ，二极管 $D1$ 不导通，电容 C_{10} 无电流充电，该积分电路等效为跟随电路，则施加在结型场效应栅极的电压为 U_o 减 0.7 V ，场效应管导通，此时文氏电桥的增益大于 1 ，电路持续自激，反之电路不自激。通过来回调节自激状态产生幅度可控的正弦激励信号，可调幅正弦发生模块电路仿真结果如图4所示。

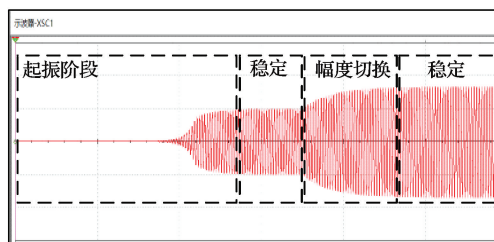


图4 可调幅正弦发生模块电路仿真结果

从图4可以看出，当电路通电后经过一段时间电路开始起振，通过自动增益控制电路及参考电压产生模块对电

路进行反馈调节，使产生的正弦波幅度稳定。当进行幅度切换时，同样经过上述过程最后趋于稳定。

产生的自激信号的幅度需要受到参考电压的控制，否则会导致信号的失真。本文电路采用AD5200数字电位器，具有低线性误差，低温度系数，及高分辨率等优点，作为幅度控制电路中的调幅元件来使用，比直接使用滑动变阻器更加精确，并且其分压阻值可由主控芯片直接控制。产生的参考电压通过自动增益控制电路对文氏电桥增加负反馈环节，使其放大倍数在 >1 和 <1 之间改变，从而控制电压的幅度。

2.2 电导检测模块

如图5所示，电导检测模块包括功能选择电路、自校准电路、量程自适应电路及互相关电导检测电路。此模块以互相关电导检测电路为主要核心，其他电路在其基础上为其服务。

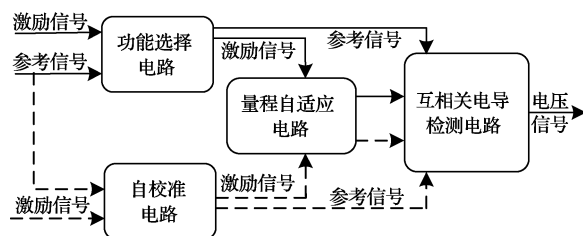


图5 电导检测模块结构

1) 互相关原理介绍

互相关法是通过两路信号的相关性来提取有用信息的一种方法,其原理示意图如图6所示。

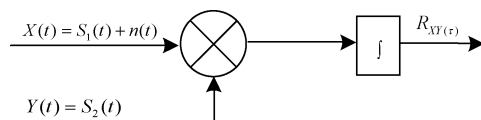


图6 互相关原理

互相关法需要两路信号,一路带有噪声的有用信息,另一路为基准信号,两路信号通过乘法及积分得到互相关函数,该函数计算过程如下。

输入信号:

$$S_i(t) = s_1(t) + n(t) \quad (2)$$

参考信号:

$$S_{ref}(t) = s_2(t) \quad (3)$$

经过互相关性计算,得到的相关函数为:

$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S_i(t) S_{ref}(t - \tau) dt =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} [s_1(t) + n(t)] [s_2(t - \tau)] dt =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s_1(t) s_2(t - \tau) dt + \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} n(t) s_2(t - \tau) dt \right] =$$

$$R_{s_1 s_2}(\tau) + R_{ns_2}(\tau) \quad (4)$$

式(4)可以看出对信号进行互相关计算后可以得到 $R_{s_1 s_2}(\tau)$ 、 $R_{ns_2}(\tau)$ 两个值, $R_{s_1 s_2}(\tau)$ 表示参考信号 $s_2(t)$ 和输入信号 $s_1(t)$ 的互相关函数, $R_{ns_2}(\tau)$ 表示噪声信号 $n(t)$ 与参考信号 $s_2(t)$ 的互相关函数,因为噪声与参考信号不相关,则 $R_{ns_2}(\tau)$ 为 0。所以式(4)结果只有一项 $R_{s_1 s_2}(\tau)$,参考信号是正弦激励信号产生电路产生的已知信号,而输入信号相当于参考信号通过被测电导后的信号,因为参考信号的频率在 2 kHz 左右,所以信号可以忽略电导的寄生电容及寄生电感带来的信号位移变换。

2) 互相关电导检测电路设计

互相关电导检测电路是对激励信号通过电导池后的信号与参考信号,如图7所示。本文电路的参考信号为未过电导池的信号,进行互相关计算,激励信号经过被测电导后除了携带电导信息还有无用的噪声信息,通过参考信号与激励信号的相关性及参考信号与噪声信号的不相关性,对经过电导之后的激励信号与参考信号进行互相关运算。

电导池等效电路如图8所示。由正弦发生电路产生的激励信号,通过激励信号输入缓冲器接入被测电导或者自校准电路,通过后的激励信号变为带有电导信息或者校准信息的掺杂着噪声信号的电导信息的信号,最后与正弦发生电路产生基准电压同时传入互相关电导检测电路,进行互相关运算。基于互相关原理,可以对电路功能进行数学推导(式(5))。

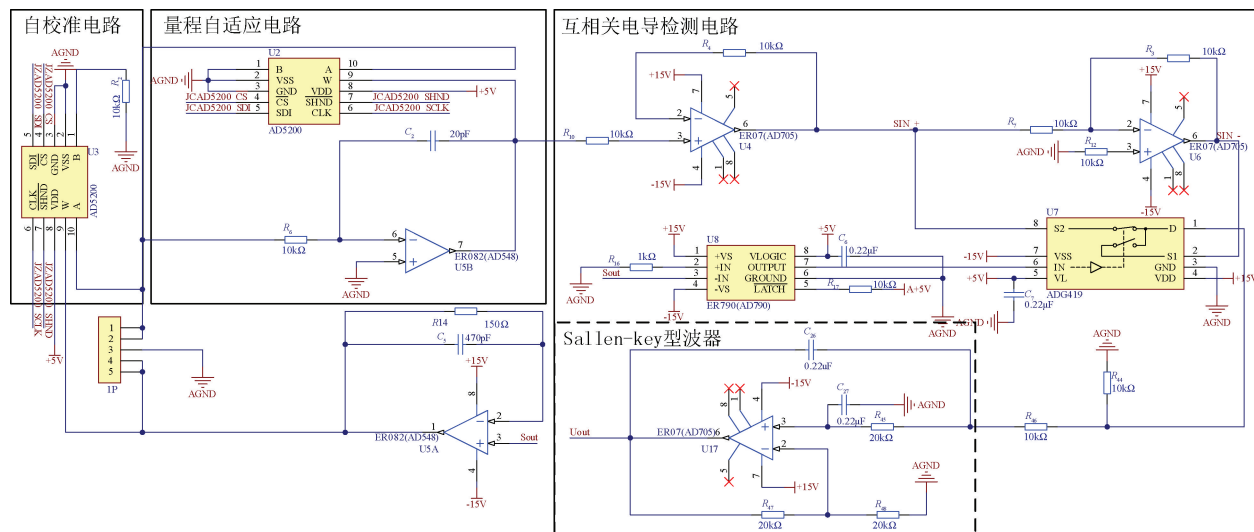


图7 互相关电导检测电路原理

$$\begin{cases} U(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) Y(t) dt \\ X_c(t) = V_{xc} \cos(\omega t + \theta_0) + n_c(t) \\ X_R(t) = V_{xr} \sin(\omega t + \theta_0) + n_r(t) \\ Y(t) = \frac{2V_y}{\pi} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin(2n+1)\omega t + \theta_1 \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $X_{xc}(t)$ 为通过等效电阻的带有电导信息或者校准

信息的掺杂着噪声信号的电导信息的信号; $X_{xc}(t)$ 为通过等效电容的带有电导信息或者校准信息的掺杂着噪声信号的电导信息的信号; $Y(t)$ 与激励信号同频的方波信号; $U(t)$ 为通过互相关电导测量电路后的电压信号。

对式(5)联立并根据噪声信号与有用信号的不相关性,及通过 Sallen-key 滤波器滤除高频分量,此处高频指 1 倍频率及 1 倍频率以上的频率。最后得到的电压值为:

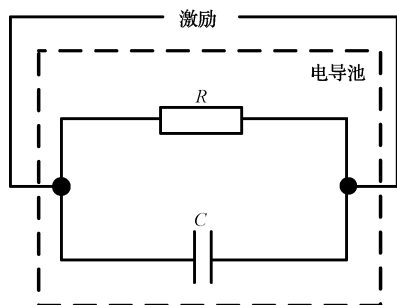


图8 电导池等效电路

$$\begin{cases} U_R(\theta_0, \theta_1) = \frac{V_{xr} V_y}{\pi} (\cos\theta_0 \cos\theta_1 + \sin\theta_0 \sin\theta_1) \\ U_C(\theta_0, \theta_1) = \frac{V_{xc} V_y}{\pi} (\cos(\theta_0 + \pi/2) \cos\theta_1 + \sin(\theta_0 + \pi/2) \sin\theta_1) \end{cases} \quad (6)$$

由式(10)看出,互相关电导检测电路得到的电压值只与 $X_{xr}(t)$ 、 $X_{xc}(t)$ 和 $Y(t)$ 相位角 θ_0 、 θ_1 有关。且在相位角相差等于0时, $X_{xr}(t)$ 达到最大值、 $X_{xc}(t)$ 为0。由前文可知,两信号的相位差几乎相同。到此就可以得到电

导率与测量值一一对应的关系为:

$$\begin{cases} U_R = \frac{V_x V_y}{\pi} \\ U_C = 0 \end{cases} \quad (7)$$

得到输出电压 U 与电导池激励电压的关系为:

$$U = CV_{xr} \quad (8)$$

式中: C 为常数,且 $C = \frac{V_y}{\pi}$ 。

根据以上对电路的数学分析可以看出通过上述互相关算法来对电导检测只进行测量可以有效抑制电路噪声及去除电导池的等效电容值,使实验结果更加准确。

参考信号通过ER790比较电路产生与激励信号同频的方波信号,带有电导信息或者校准信息的参杂有噪声信号的电导信息的信号通过跟随器和反相器产生频率相同相位相反的两路信号 $VSINW+$ 及 $VSINW-$,如图9所示。ADG419高速开关以参考信号产生的方波为开关选择信号 $SINREF$,以同向、反向信号为两路输入信号,通过高速开关将参考信号的频率与电压电导信号的频率关联起来,完成对电导信号中有用信号的筛选,通过该电路得到互相关运算后的信号,即式(8)中的 U 。

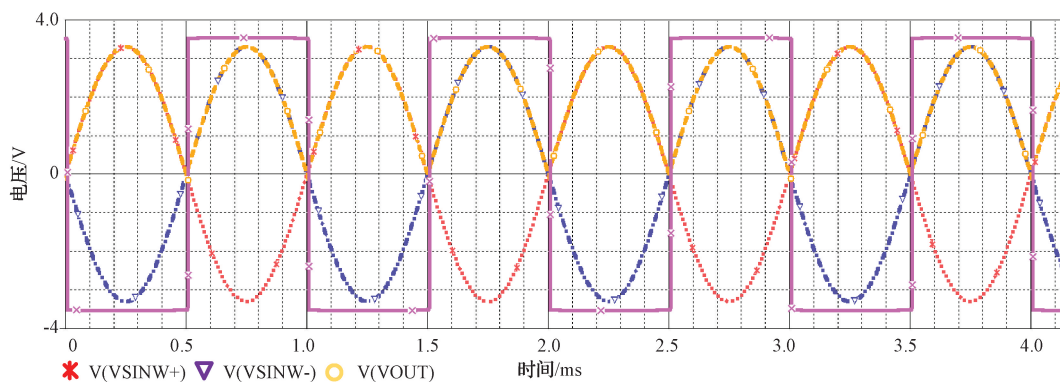


图9 互相关电导检测模块电路仿真

该信号通过滤波器后变为直流信号, $VOUT$ 为相敏检波后的信号, U_o 为经过S-K滤波器后的信号,如图10所示。可以看到信号经过滤波器后变为与电导率相关的直流信号。该直流信号就是与电导率相关的电压信号。

本文通过ADC采集电路对其进行采集后,传入嵌入式主机进行数据处理和实时显示。

自校准电路的原理是通过AD5241实现,AD5241具有256 bit分辨率,最大量程为1 M Ω ,低温系数 $30 \times$

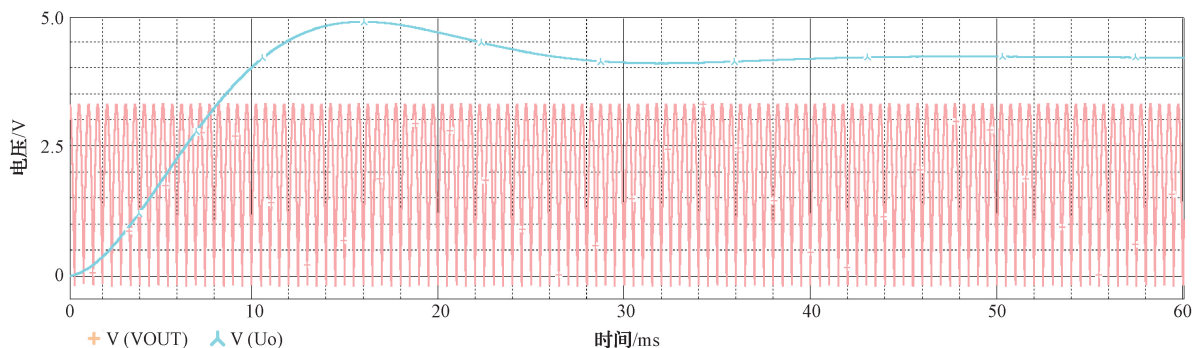


图10 互相关电导检测模块滤波电路仿真

$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。根据测量挡位设计不同,通过上位机来设置自校准电路电阻值的大小,然后通过调节激励电压的大小,使读回的测量值与 AD5241 设定的电导率相同,完成测量电路的校准^[16]。

每次上电时,都会对各个挡位值进行校准,并将得到的激励电压值记录。在正式测量时,如果量程进行切换,就可以通过事先测量好的激励电压值进行激励电压的设置。自校准电路电阻值与测量电导范围之间的关系如表 1 所示^[17]。

表 1 电阻值与测量电导率范围之间的关系

流压转换电阻 及激励电压	上限测量电导 (对应电压值)	下限测量电导 (对应电压值)
500 Ω , 0.66 V	30 303.03 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3.15 V)	1 463.91 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3.15 V)
500 Ω , 3.3 V	6 060.61 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3.15 V)	292.78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0.15 V)
1 k Ω , 3.3 V	3 030.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3.15 V)	146.39 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0.15 V)
5 k Ω , 3.3 V	367.76 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3.15 V)	17.77 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0.15 V)
41.2 k Ω , 3.3 V	101.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3.15 V)	4.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0.15 V)
150 k Ω , 3.3 V	20.20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3.15 V)	0.98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0.15 V)

自适应电路同样通过 AD5241 实现,AD5241 通过设定不同的电阻值,完成对不同电导率的测量。挡位滞回比较如图 11 所示。

其中 U_H 为 0 挡上限电压,高于此电压则切换至高一档即 1 挡; U_L 为 1 挡下限电压,低于此电压则切换至低一档即 0 挡。

自动切换量程思路如下:先从大电导挡对被测电导进行测量,如果测量结果到达上限阈值,则切换至次大的电导挡进行测量,测量过程中重复此过程完成自适应量程功能。

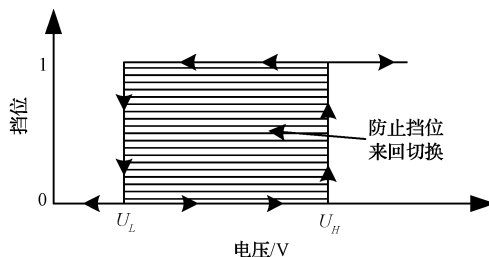


图 11 挡位滞回比较

在阈值设定的时候为了防止被测电导率的值在两档交接处,导致出现频繁切档的问题,采用滞回比较的方法对电导进行测量。通过上述方法完成电导测量电路的量程自适应及自动校准功能。

2.3 温度控制模块

温度对于电导检测有一定影响,对于电导池来说,温度升高,溶液的电离度变大,离子活泼性加强,离子移动速率增大,从而加速了带电离子的运动,使电导率增加,反之减弱。可见电导测量电路中温度控制电路是不可缺少的一环^[18-19]。

本文电路设计采用 PT100 传感器做温度测量,使用硅胶加热片对温度进行调节。PT100 采用恒流源提供激励电流, KY5530 为 32 bit $\Delta-\Sigma$ ADC 将 PT100 两端的电压模拟量转化为数字量。参考电压滤波模块对参考信号进行共模信号及差模信号的滤波。抗混叠滤波器抑制 $\Delta-\Sigma$ ADC 内部 SINC 滤波器的高频段噪声。通过 ADC 的采集,硅胶加热模块达到对温度的闭环控制,电路设计如图 12 所示。

电路对温度和数据进行实时采集,上位机对得到的数据根据式(9)进行温度补偿。

$$\begin{cases} K_s = K_T / (0.0169t + 0.5583), & 1^{\circ}\text{C} \leq t \leq 10^{\circ}\text{C} \\ K_s = K_T / (0.018t + 0.5473), & 10^{\circ}\text{C} \leq t \leq 20^{\circ}\text{C} \\ K_s = K_T / (0.189t + 0.5281), & 20^{\circ}\text{C} \leq t \leq 30^{\circ}\text{C} \\ K_s = K_T / (0.022t + 0.45), & \text{其他} \end{cases}$$

(9)

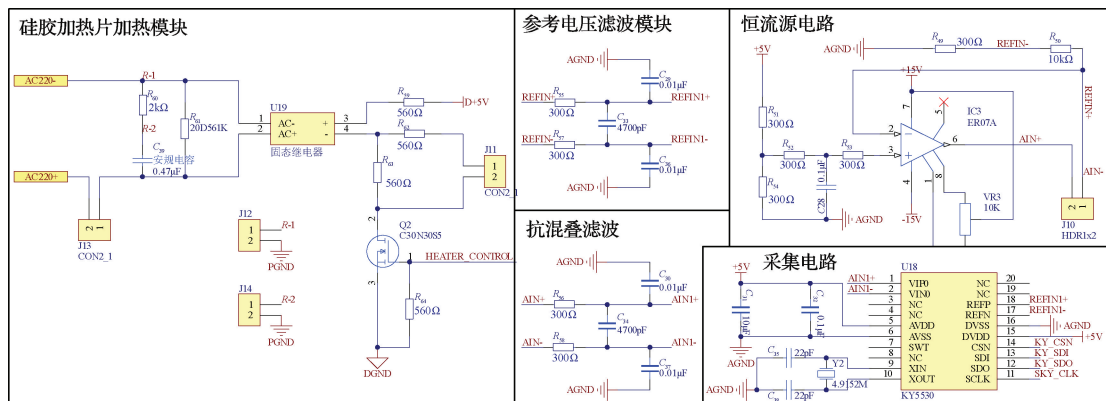


图 12 温度控制模块电路

3 实验结果与分析

本文设计的电导检测电路应用在流体相关参数检测对相关领域的科研和生产过程中。其电路实物如图 13 所示。

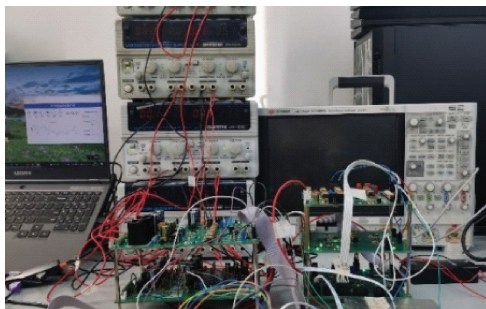


图 13 电导检测电路实物

测试采用标准物质编号为 GBW00847(A) 电导率标准溶液及 GBW00849 系列电导率标准溶液进行电路功能及指标参数测试,激励信号为 2 kHz 正弦波。分别对电路基线噪声、电导率测量精度、电导率测量范围进行测试。

电路通过上位机设置电导液温度并实时获取以降低电导测量过程中温度对电导测量的影响。在保证温度恒定的情况下,上位机对电导率进行实时采集,处理后的电导信息实时显示在上位机界面,完成对电导率的测量。

使用该电路对纯水进行电导率的测量,该目的是为了测量电路的基线噪声,测量结果如图 14 所示,测量方法为使用该电路测量纯水电导率(电导率为 $0.6275 \mu\text{S}/\text{cm}$) 30 min,测量值中的最大值与最小值的差值为该电路的基线噪声,通过测量并计算后该电路的基线噪声为 $0.28 \text{ nS}/\text{cm}$ (以电导率为单位)。

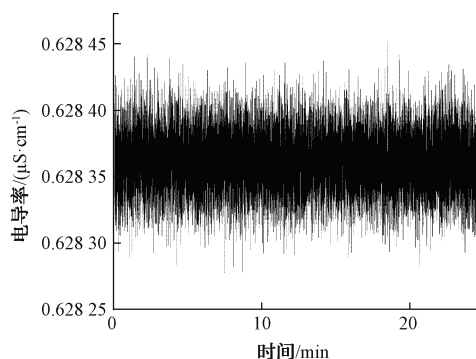


图 14 纯水电导率

选用不同的电导率的溶液在溶液温度稳定在 25°C 的情况下测量电导率,测量结果如表 2 所示。通过得到的测量结果可以看出,测量的相对误差低于 $0.01 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。

用电阻模拟电导池电导率由 $0\sim 30\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 变化,测量结果如图 15 所示。从图 15 可以看出,电路的测量范围为 $0\sim 30\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$,电路测量量程范围宽,且可自动换

表 2 不同的电导率溶液在 25°C 下的测量结果

($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		
标准溶液电导率	测量电导率	相差值
12.88	12.881 82	0.001 82
84	83.996 24	-0.003 76
146.5	146.509 86	0.009 86
1 413	1 413.004 138	0.004 13
12 852	12 851.994 22	-0.005 78
25 704	25 704.008 38	0.008 38



图 15 电导率测量曲线

挡,挡位切换时无换挡期出现。

通过上面 3 方面对电路功能进行测试可知,基线噪声小于 $0.3 \text{ nS}/\text{cm}$ 、测量精度为 $0.01 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、测量电导范围为 $0\sim 30\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。从结果可以看出,通过本文电路可以很好的抑制电路噪声及消除电导池等效容值,提高了测量量程及测量精度。

4 结 论

为了让电导率测量更好应用在食品安全、医药制造等使用电导率来测量相关参数的新型问题中,分析了影响电导率测量系统应用范围受限的因素,设计了一种基于互相关性原理可自校准、量程自适应的高精度电导检测电路。通过 Pspice 仿真软件对电路进行仿真分析,通过文氏电桥与增益自动控制电路控制激励信号源幅度。通过自校准电路与可控幅度激励信号源相互配合,让电路在不同环境中可以实现自校准,提高测量精度;基于互相关的原理的电导检测方法,为电极提供正负交替的激励信号,减小电极腐蚀;基于互相关算法的电路设计,可以去除电导液中与所需信号无关的噪声及电容带来的误差;采用滞回式挡位切换方法有效防止了切换时测量数据异常情况。实验表明,基于互相关性原理的电导检测电路可以测量电导范围为 $0\sim 30\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$,测量精度为 $0.01 \mu\text{S}/\text{cm}$,基线噪声小于 $0.3 \text{ nS}/\text{cm}$,且通过模块之间的相互配合,电路可实现量程自适应。

参 考 文 献

- [1] 虞历尧,章焕,姚静远,等. 电导率仪检定结果的不确定度分析[J]. 工业计量, 2022, 32(4): 51-53.
- [2] 贾会,冯帅博,许建军. 电导率仪检定/校准结果质量

- 控制[J]. 化学分析计量, 2022, 31(7): 69-72.
- [3] 赵明忠, 陈庆荣, 陈冬峰, 等. 土壤溶液电导率测量仪设计[J]. 电子器件, 2019, 42(5): 1309-1313.
- [4] 郭峰, 崔永俊, 韩一德. 基于电导率测量的水纯度检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(4): 75-79, 84.
- [5] 贾子伦, 赵纯, 冷锡金. 一种基于双频率电导率测量方法的研究[J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(4): 90-94, 99.
- [6] 陈海琪. 便携式燃油电导率检测仪设计及应用[D]. 北京: 北方工业大学, 2022.
- [7] 翟长连, 白松春. 用于水质监测的在线离子色谱仪的开发与应用[J]. 仪表技术, 2021(4): 6-9, 26.
- [8] 刘冉, 赵海波, 王冰玥, 等. 浅谈电导率仪的发展和计量方法的研究[J]. 分析仪器, 2021(3): 112-116.
- [9] 樊英杰. 超声电导仪的研究与设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- [10] 魏鹏, 林国辉, 方杰. 一种电导率仪自动检定装置的研制[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(3): 20-22, 25.
- [11] 李登. 高精度嵌入式电导率仪的研制[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [12] 周黎斌. 循环水系统嵌入式电导率仪的开发及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [13] 张梦玲. 嵌入式七电极电导率仪的开发及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [14] 周永好. 电导率仪的研究与实现[D]. 南昌: 江西科技师范大学, 2016.
- [15] 卢书杰. pH/电导率在线检测仪的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [16] 王宏庆, 霍松岷. 五电极电导检测技术研究[J]. 化学工程与装备, 2013(11): 32-34.
- [17] 林琦珊. 电导率测量误差不确定度分析[J]. 计量与测试技术, 2013, 40(7): 87-88.
- [18] 金倩倩. 在线水溶液电导率仪的研制[D]. 抚州: 东华理工大学, 2013.
- [19] 高学敏. 基于五电极电容耦合式非接触电导测量技术的小通道流量检测系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

作者简介

苏淑靖(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为感知与探测、信号处理。

E-mail: 313488113@qq.com

郭杨盛, 硕士研究生, 主要研究方向为锁相环、电路与系统、信号处理。

E-mail: 632210983@qq.com