

# 基于 AD9833 的电导率仪激励源的设计

李应祁欣\*

(北京化工大学理学院, 北京 100029)

**摘要:** 分析并研究了激励源系统的设计原理,提出了基于 AD9833 的电导率仪激励源的设计方案。系统硬件包括 AD9833 波形发生器、极性设置模块、三阶 Sallen-Key 滤波器模块、人机交互界面,系统软件设计基于 IAR 开发平台,使用 C 语言模块化编程方法实现。利用本系统测试了 3 种水溶液样品,并与 DDSJ308A 电导率仪进行对比实验,实验结果证实了当激励信号频率较低时(<1 kHz)会引入较大的测量误差,而较高的频率(>2 kHz)有助于测量结果准确性的提高。

**关键词:** 电导率; 激励源; AD9833

**中图分类号:** TB942

## 引言

水溶液电导率是用数字来表示水溶液传导电流的能力,它与水中溶解性矿物质有着密切的关系。水溶液电导率的测量广泛应用于生产、生活各领域,水溶液电导率的分析对电子、石化、冶金、医疗、环保等行业都有非常重要的作用<sup>[1]</sup>。长期以来,如何准确测量水的电导率,一直是人们十分关注的问题<sup>[2]</sup>。

在实际测量中,电导率测量电极与待测溶液中的水分子、离子一起构成了一个极其复杂的电化学系统,其中存在许多影响电导率准确测量的因素,如激励信号的频率、温度和电极常数等,在高纯水电导率测量中尤其明显<sup>[3-4]</sup>。根据电导率双电极测量原理,一般采用铂黑电极进行测量。而施加在铂黑电极传感器上的激励信号对测量的准确度有着十分重要的影响。造成测量误差增大的主要原因是铂黑电极和待测溶液组成的电化学体系中存在化学极化和浓差极化现象,严重降低了电导率测量的准确度。

针对不同的溶液(超纯水和 0.1 mol/L 的 KCl 溶液),施加不同频率范围的正弦波激励信号,会对其电导率测量结果产生影响。对每一种待测溶液,在特定的频率范围内,测量仪器寄生参数的影响可

达到最小,并且测量的结果能够比较真实的反映被测溶液的电导率<sup>[5]</sup>。因此,选取合适频率的激励信号成为设计电导率仪的核心目标。本文提出了一种基于 AD9833 的高精度电导率仪激励源系统解决方案,通过测试标准电导率溶液,获取传感器激励信号的最佳频率,以达到高精度测量的目标。

## 1 水溶液电导率的测量原理

电解质的电导计算公式如式(1)所示。

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{A}{l} = k \frac{A}{l} \quad (1)$$

其中,  $k = \frac{1}{\rho}$ , 为电导率,  $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$  或  $\text{S}/\text{cm}$ ;  $G$  表示电导,  $\Omega^{-1}$ ;  $l$  为电导池长度,  $\text{cm}$ ;  $A$  为电解质溶液导电的截面积,与电极结构密切相关,  $\text{cm}^2$ 。通常使用  $k$  表示电解质溶液的导电能力,其物理意义为边长 1 cm 的立方体溶液中电导的大小。将式(1)改写成

$$k = G \frac{l}{A} = GK \quad (2)$$

式(2)中  $K$  为电极常数,与电极结构有关,并且电极结构一旦固定,电极常数基本固定,但在使用中,电极常数会发生改变,需要定期使用标准溶液进行标定。

电极测量中产生的极化现象包括化学极化效应和浓差极化效应,增加了电导率测量的误差。采用交流激励测量方法可以有效避免或减少电极极化对水溶液电导测量的影响,使用该方法的测量误差比直流激励引起的测量误差要小很多。

实际上,对于不同的被测溶液,在不同的激励源

收稿日期: 2012-05-21

第一作者: 男, 1987 年生, 硕士生

\* 通讯联系人

E-mail: qixin@mail.buct.edu.cn



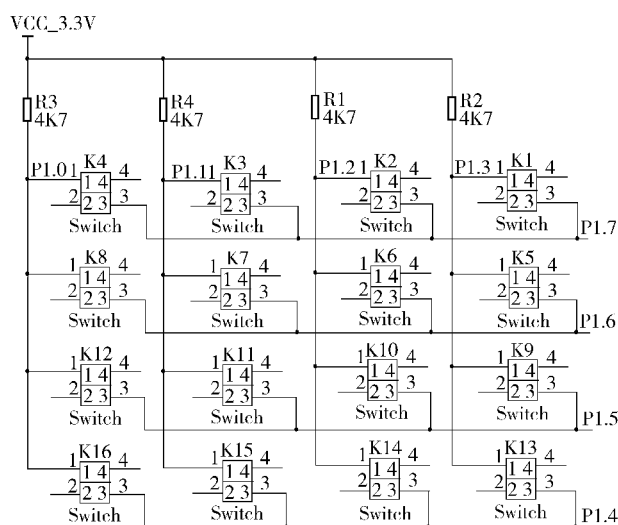


图3 4×4 矩阵键盘电路图

Fig. 3 The 4×4 matrix keyboard

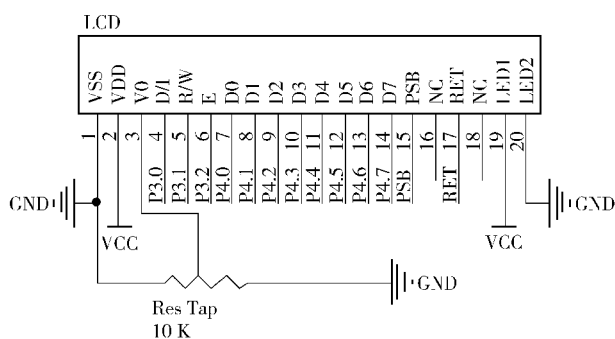


图4 128×64 液晶接口电路图

Fig. 4 The 128×64 LCD interface circuit

系统中设计了极性设置子模块部分,如图5所示。模块采用 LM258 实现,包含两个运放模块,第一个运放模块用于构建同相和反相放大器,第二个运放模块构建电压跟随器,隔离前后级。信号幅度使用滑动变阻器 R1 进行调节,而极性可通过 R4 设置。

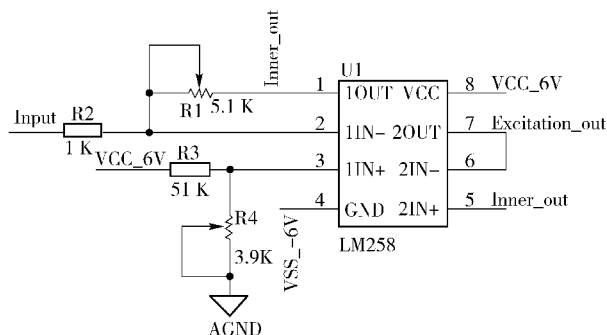


图5 激励信号极性设置电路

Fig. 5 Polarity setting circuit of the excitation source

## 2.5 Sallen-Key 低通滤波器

在系统中,采用单位增益 Sallen-Key 形式的三阶巴特沃斯低通滤波器,如图6所示。

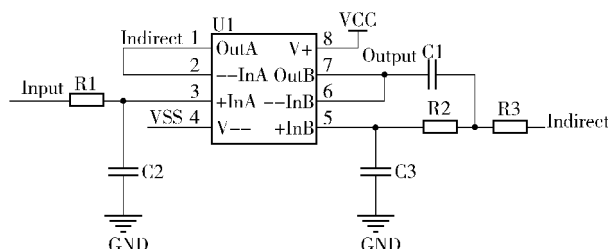


图6 三阶 Sallen-Key 低通滤波器示意图

Fig. 6 Low-pass schematic view of the third order Sallen-Key filter

Sallen-Key 滤波器是同相滤波器,具有高输入阻抗、增益设置与滤波器所用电阻电容元件无关等优点,Sallen-Key 的增益精度很高,当设置为单位增益时,对元器件的敏感度较低。低通滤波器的 -3 dB 截止频率设置为  $f_c$ 。

在有源滤波器的设计中,需要重点考虑运放的两个参数。一个是增益带宽积 (GBP)  $Y$ ,另一个是压摆率 (SR)  $X$ 。对于确定的品质因素  $Q$  和增益  $G$ ,要求增益带宽积满足要求:当  $Q \geq 1$  时,  $Y \geq 100GQ^3f_c$ ;当  $Q \leq 1$  时,  $Y \geq 100Gf_c$ 。对于压摆率,需要满足的条件为:  $X \geq 2\pi U_{pp}f_c$ ,其中  $U_{pp}$  为输出电压峰值。

滤波输入信号来自极性设置电路的输出,滤波输出作为电导率传感器的激励信号。

## 2.6 系统软件实现

处理器采用 16 位超低功耗混合信号处理器 MSP430F149。微控制器配备 2 个内建的 16 位定时器,一个快速的 12 位 AD 转换器,一个或者两个 USART,拥有 48 个 IO 口供用户使用<sup>[7]</sup>。

软件采用模块化编程方法,本系统构建了较为完善的人机交互功能。用户可自主设置 DDS 的输出波形的类别(包括正弦波,三角波,方波)、频率、初始相位和峰峰值,以及通过滑动电阻器调节激励的极性。所有的配置 DDS 的相关信息都通过 4×4 矩阵键盘输入至混合信号处理器 MSP430F149 中。处理器根据用户设定的 DDS 设置信息控制 AD9833 输出需要的激励信号。

## 3 激励源测试及电导率测量实验

### 3.1 激励源实现与测试

系统实现了单路波形输出,可选波形为正弦波、

方波、三角波。波形的频率、初始相位、峰峰值均由用户设置。默认输出双极性正弦波，峰峰值为 1.5 V，频率为 2.6 kHz。系统设计实现的指标如表 1 所示。

表 1 输出波形参数  
Table 1 Parameters of the output waveform

波形类型	最大频率/kHz	频率步进/Hz	频率稳定度/ $10^{-6}$	频率误差/Hz	电压峰峰值/V	电压步进/mV
正弦波	250	0.1	10	<0.5	0~5	5
三角波	230	0.2	15	<1.0	0~5	5
方波	200	0.5	20	<1.0	0~5	5

电导率测试系统主要使用正弦波作为电导率传感器的激励信号，有效值幅度范围为 0.5~2 V，测量频率为 2 Hz~250 kHz。

3.2 基于设计激励源的电导率测量实验

使用型号为 DDSJ308A 的电导率测试仪，分别测量 3 个水溶液样品，测得电导率依次为 417  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，813  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，1835  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。待测溶液选用 HCl 溶液配制，二氧化碳吸附处于平衡状态，测量温度为常温 25  $^{\circ}\text{C}$ 。

使用设计的激励源系统，产生峰值为 1.5 V 的正弦波激励信号，将频率从 2 Hz 逐步增加到 250 kHz，在其他测量模块的辅助下，测量并记录上述 3 个水溶液样品的电导率随频率变化的数值，如图 7 所示。

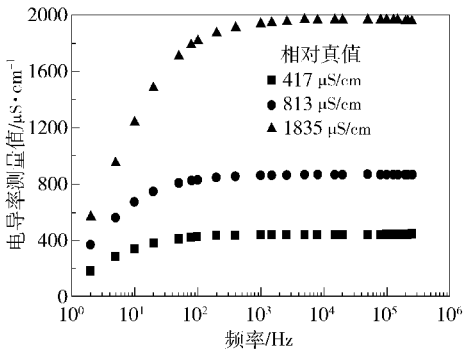


图 7 不同激励频率下测量结果示意图  
Fig. 7 Effect of changing the frequency of the excitation source

测量实验表明，激励信号的频率对测量有一定的影响。如图 7 所示，在相对真值为 417  $\mu\text{S}/\text{cm}$  和 813  $\mu\text{S}/\text{cm}$  下，超过 200 Hz 的激励频率，测量结果有较高的稳定性。在相对真值为 1835  $\mu\text{S}/\text{cm}$  下，超过 2000 Hz 的激励频率，测量结果也有相当的稳定性。在高达 250 kHz 的激励频率下，测量值依然保持稳定。

在低频区，测量值都比较低，这是因为在低频

率，电极和溶液构成的电化学体系有较高的极化效应，有较大的测量误差，而在相对高频区域，比如 1000 Hz 以上，测量值比较稳定，极化效应引起的误差比较小。

4 结论

(1)设计的激励源系统硬件包括 AD9833 波形发生器、极性设置模块、三阶 Sallen-Key 滤波器模块、人机交互界面，软件基于 IAR 开发平台，采用 C 语言编程的模块化编程方法。

(2)较低激励源频率(<1 kHz)使电导率测量结果的误差较大，而较高的激励源频率(>2 kHz)可以得到更加准确的结果。

参考文献：

[1] 刘燕群. 影响电导率测量准确度的综合因素[J]. 河北化工, 2004(1): 63-64.  
Liu Y Q. Affect the electrical conductivity measurement accuracy of a combination of factors[J]. Hebei Chemical Engineering and Industry, 2004(1): 63-64. (in Chinese)  
[2] 郑联英. 水溶液电导率的测量方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2004.  
Zheng L Y. Studies of Conductivity Measurement for Liquids[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2004. (in Chinese)  
[3] Sengupta P P, Adhikari B. Influence of polymerization condition on the electrical conductivity and gas sensing properties of polyaniline[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 459: 278-285.  
[4] 董永贵. 传感技术与系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 51-62.  
Dong Y G. Sensor Technology and Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 51-62. (in Chinese)  
[5] Ferrara E, Callegaro L, Durbiano L. Optimal frequency



- range for the measurement of A. C. conductivity in aqueous solutions [C] // Instrumentation and Measurement Technology Conference: Proceedings of the 17th IEEE. Baltimore, USA, 2000: 775-779.
- [6] Analog Devices. Low Power, 12.65 mW, 2.3 V to +5.5 V, Programmable Waveform Generator [EB/OL]. [2011-04-01]. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD9833.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9833.pdf).
- [7] Texas Instruments. 16-Bit Ultra-Low-Power Microcontroller [DB/OL]. [2004-06-03]. <http://www.ti.com/lit/gpn/msp430f149.pdf>.

## Design of the excitation source of a conductivity measuring device based on AD9833

LI Ying    QI Xin

(School of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** An excitation source for a conductivity measuring device has been designed based on AD9833 by analyzing the basic features of the excitation source. The hardware of the excitation source include the AD9833 waveform generator, polarity setting module, a third-order Sallen-Key filter module, and the human-machine interface. The software design of the system is based on an IAR embedded workbench by using modular programming methods with the C language. Three aqueous samples were tested using this excitation source, and the test results were compared with the results obtained using a DDSJ308A conductivity measuring device. The experimental results indicated that a larger measurement error would be introduced when the excitation signal is lower ( $<1$  kHz), while the accuracy of the measurements would be enhanced when a higher signal ( $>2$  kHz) is used.

**Key words:** electrical conductivity; excitation source; AD9833