

# 双极性电压脉冲激励的智能电导率测量仪

An Intelligent Conductometer Based on Bipolar Pulse Voltage Excitation

赵学亮 史云 冯苍旭

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北 保定 071051)

**摘要:** 基于双极性脉冲电压技术,设计了一种智能电导测量仪。该测量仪不仅能够削弱直流激励模式下介质的极化现象,而且避免了传统交流激励模式下所必须的放大、滤波和信号调理等复杂处理环节,简化了电路结构。此电导率测试结果表明,测量仪具有温度自动补偿、量程自动转换、测量精度高和检测速度快的特点,其测量相对误差小于5%。

**关键词:** 电导 MSC1210 双极性脉冲 温度补偿 量程切换 参数修正

**中图分类号:** TP216+.1 **文献标志码:** A

**Abstract:** An intelligent conductometer based on bipolar pulse voltage technology has been designed. The instrument eliminates the polarization effect of the media under weak DC excitation, also avoids the complicated processing sections of amplifying, filtering and signal conditioning under traditional AC excitation and simplifies the structure of circuitry. The result of experimental test shows that the conductometer features automatic temperature compensation, automatic range switchover, high accuracy and fast speed detection; the relative measuring error is less than 5%.

**Keywords:** Conductivity MSC1210 Bipolar pulse Temperature compensation Range switchover Parameter correction

## 0 引言

电导率是水质鉴定和监测中一项非常重要的指标,电导率仪则是一种测量水溶液电导率的常规分析仪器。传统的电导测量方法一般采用交流激励方式来避免介质的极化现象,其仪器电路结构比较复杂,数据采集速度较慢。针对以上问题,介绍了一种基于脉冲激励的液体电导测量方法。该方法在双极性脉冲电压激励下能有效克服介质极化现象<sup>[1]</sup>,并且省去了传统测量电路中一些必要的信号调理环节,大大地简化了电路,提高了测量速度及抗干扰能力。

## 1 测量原理

本文采用的双极性脉冲方波激励源如图1所示。由于在激励信号的前半个周期和后半个周期,信号幅值相同,极性相反,在被测系统直流激励模式下,介质的极化现象得以削弱;且在测量的半个周期内,被测介质可以看作是受到恒定直流电压的激励,通过软件控制采样电压波形稳定后的平坦部位,从而使被测电压信号不再需要复杂处理,极大地简化了系统的结构,提高了数据的采集速度<sup>[2]</sup>。

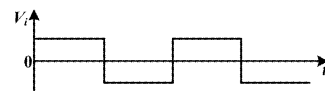


图1 双极性脉冲激励示意图

Fig. 1 Schematic of the bipolar pulse excitation

系统测量电路如图2所示。其中, $R_x$ 为电导池电阻, $C_x$ 为极化效应产生的电容, $C_p$ 为电导池的极间电容和连接电缆的分布电容。通常 $C_x$ ( $\mu\text{F}$ 级) $\gg C_p$ ( $\text{pF}$ 级)。

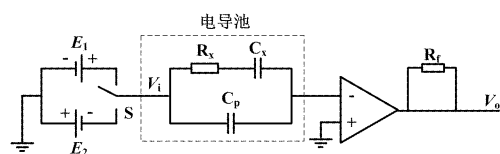


图2 系统测量电路图

Fig. 2 Measuring circuit of the system

使用双极性脉冲激励法,通过电导池和反馈电阻的待测电压波形如图3所示。

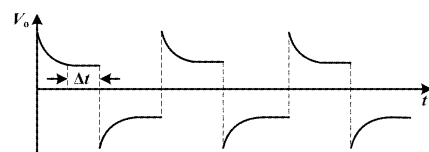


图3 待测电压波形

Fig. 3 Voltage waveform to be measured

由图3可知,由于存在引线分布电容和双电层电

修改稿收到日期:2010-05-11。

第一作者赵学亮,男,1982年生,2008年毕业于河北农业大学机电工程学院,获硕士学位,助理工程师;主要从事水质自动检测仪器方面的研究。

容,因此,正负的快速切换同样会产生电容效应。在每个脉冲开始时,  $C_p$  被迅速充电,致使总电流中含有非法拉第充电电流。为精确地分离出法拉第电流,数据采集时间  $t$  要远小于  $R_x$  和  $C_x$  乘积(时间常数)。此时,落在双电层电容  $C_x$  上的电压足够小,而  $C_p$  由于充电完成,没有电流流过,相当于断路,所以,激励电压可以认为全部降落在等效电阻  $R_x$  上。而流经被测介质的瞬时电流  $I = V_i / R_x$ , 因此,在  $t$  采样时间测得的瞬时电流与溶液电导成正比,与  $C_x$  和  $C_p$  无关,消除了极化双电层电容和引线分布电容的影响。该电流经运放转化为电压后供测量使用,则电导池的电阻为<sup>[3]</sup>:

$$R_x = -V_i \times R_f / V_o \quad (1)$$

电导率  $K$  为:

$$K = 1(V_i / V_o) (\Phi / R_f) \quad (2)$$

式中:  $\Phi$  为已知电极常数,由电极生产商提供;  $R_f$  为已知反馈电阻;  $V_i$  为已知激励幅值。所以,溶液电导率  $K$  与待测电压  $V_o$  成正比。

## 2 硬件电路设计

基于双极性电压脉冲激励的智能电导率测量仪选用 TI 公司的 MSC1210 作为核心处理器。MSC1210 芯片以 8051 微控制器为内核,内部集成了 16 位 PWM、24 位高精度  $\Delta-\Sigma$  A/D 转换器和可编程增益放大器等;芯片的高集成度使硬件线路变得简单,大大提高了系统的可靠性。测量仪按功能分为双脉冲激励模块、量程切换模块、I-V 转换模块、温度采集模块和液晶显示模块等。双脉冲激励模块产生占空比为 50% 的正负脉冲电压加到电导池电极的两端,流经电导池的电流经过运放后变为电压信号,送入单片机再经 A/D 转换,完成电导率信号的采样,然后进行溶液温度的采样,最后通过式(2)和温度补偿公式(3)得到真实状态下的电导率并进行显示<sup>[2]</sup>。

系统整体结构如图 4 所示。

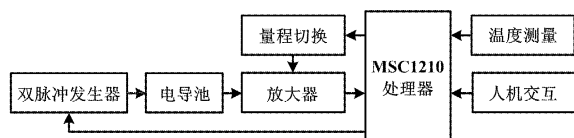


图 4 系统整体结构框图

Fig. 4 Structure diagram of the overall system

### 2.1 双脉冲激励源电路

高频双极性脉冲方波的正负脉冲幅值必须一致,且占空比严格要求为 50%。由于在激励信号的前半个周期和后半个周期内,激励电流同值反向,从而削弱

了介质极化现象。但频率不易太高,否则会使电导池的极间电容引起较大的测量误差。根据系统要求,本系统采用频率为 2 kHz、幅值为  $\pm 2$  V 的脉冲信号。该脉冲信号是由 2 kHz 的方波信号控制模拟电子开关 CD4051 对  $\pm 2$  V 的恒定电压源切换产生的<sup>[3]</sup>。 $\pm 2$  V 的恒压源是由高精度、低温漂的带隙基准源 MC1403 产生的 1 V 基准电压经同相放大和反相放大后得到的精密恒压源。2 kHz 的方波控制信号是通过 MSC1210 的 PWM 输出管脚产生的,通过该管脚可输出连续的方波信号,其占空比为 50%,频率可通过编程确定。这样,电导池上就会出现交变的  $\pm 2$  V 方波电压。实验证明其频率稳定性和对称性很好。精密  $\pm 2$  V 恒压电路如图 5 所示。

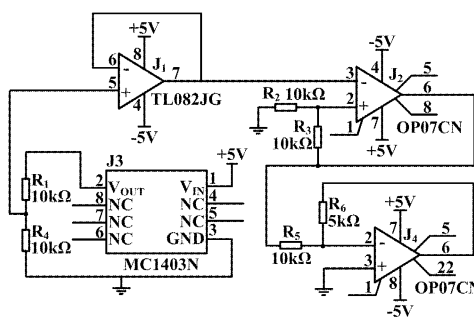


图 5 恒压电路

Fig. 5 Constant voltage circuit

### 2.2 量程切换电路

水质电导率测试仪需要测量的水电导率变化范围很大(跨越 4~5 个数量级),而 A/D 转换器的线性转换区间是非常有限的,本系统中 A/D 转换器的转换区间为 0~2.000 0 V。为了保证 A/D 转换的精度,对于不同电导率的水溶液,必须分别选择适合量程电阻  $R_i$ ,从而使送入 A/D 转换器的  $|V_o|$  始终落在 A/D 转换器的线性转换区间。本设计取其满度的 10% 至满度为模拟量  $|V_o|$  的转换区间,共分为 6 个档位<sup>[4]</sup>。

自动量程换挡电路如图 6 所示。

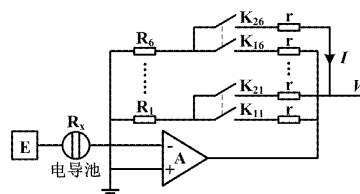


图 6 量程换挡示意图

Fig. 6 Schematic of the range switchover

图 6 中:  $R_1 \sim R_6$  为量程电阻;  $K_{11} \sim K_{16}$  和  $K_{21} \sim K_{26}$  为两组联动的六选一模拟开关;  $r$  为模拟开关的导通电阻。由于输出端连接到高阻抗输入端,经  $K_{21} \sim K_{26}$

流过电阻  $r$  的电流  $I$  近似为零,所以,待测电压  $V_0$  只与换档电阻有关。这就消除了模拟开关导通电阻对测量的影响。系统采用两片多路模拟开关 CD4051 实现了量程切换。表 1 给出了仪器中使用的六个量程电阻和对应的等效电阻测量范围。

表 1 量程电阻及对应的测量范围

Tab.1 The measurement resistance and corresponding measurement range

档位	$R_t$	$R_x$
第一档	100 $\Omega$	100 ~ 1 000 $\Omega$
第二档	1 k $\Omega$	1 ~ 10 k $\Omega$
第三档	10 k $\Omega$	10 ~ 100 k $\Omega$
第四档	100 k $\Omega$	100 ~ 1 M $\Omega$
第五档	1 M $\Omega$	1 ~ 10 M $\Omega$
第六档	10 M $\Omega$	10 ~ 100 M $\Omega$

由表 1 可知,电导池的等效电阻测量范围为 100  $\Omega$  ~ 100 M $\Omega$ 。为了扩大向下测量的底线,给电导池(电极)串联了一个 200  $\Omega$  的精密电阻。此时,电导池的等效电阻  $R_x$  的测量范围就可以表示为<sup>[2]</sup>:

$$100 \Omega \leq R_x + 200 \Omega \leq 100 \text{ M}\Omega$$

由上式可以看出,电导池的等效电阻测量范围比未串联电阻  $R$  前向下扩展了 100  $\Omega$ 。这样,电导池等效电阻的测量下限就扩大到了 0  $\Omega$ 。因此,只要使用合适的电导池,本仪器就可以在全范围内(0  $\Omega$  ~ 100 M $\Omega$ )进行自动换档测量。

### 3 软件设计

系统程序流程如图 7 所示。

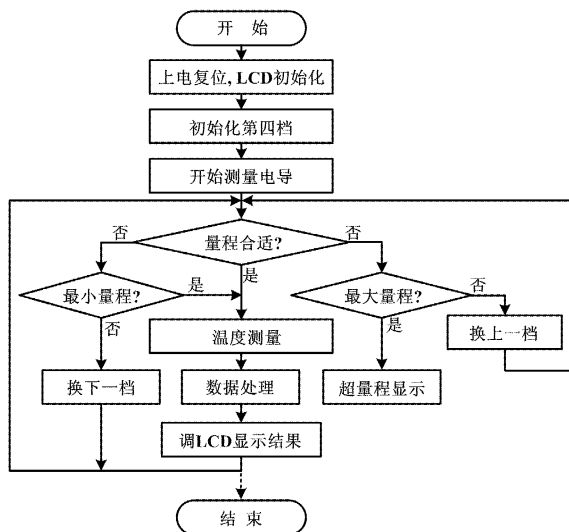


图 7 系统程序流程图

Fig. 7 Flowchart of system program

系统软件采用 C 语言编制<sup>[5]</sup>,并使用模块化编程思想,主要包括系统主程序、数据处理、A/D 转换子程序、显示子程序、电导率计算子程序和温度采集子程序等。

#### 3.1 温度补偿软件实现

温度是影响电导率最大的外在因素。因此,电导率检测必须采取合理的温度补偿措施。本仪器采用了美国 DALALS 公司生产的数字式温度传感器 DS18B20。由于 DS18B20 遵循单总线协议,测温分辨率高,因此,其对时序及电特性参数要求较高,必须严格按照 DS18B20 的时序要求操作。

由于不同纯度的水在不同温度下有不同的温度系数,所以,温度系数不是一个常数,而是一变量,其数值在 0.02 ~ 0.09 之间随温度和水的纯度的不同而连续变化。通过大量实验,系统在 1 ~ 30  $^{\circ}\text{C}$  内三个温度段分别进行直线回归分析和综合<sup>[6]</sup>,得到温度校正公式如下<sup>[2]</sup>:

$$K_s = \begin{cases} K_t / (0.0169t + 0.5583) & 1 \leq t \leq 10 \\ K_t / (0.0180t + 0.5473) & 11 \leq t \leq 20 \\ K_t / (0.0189t + 0.5281) & 21 \leq t \leq 30 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $K_s$  为水溶液在室温 25  $^{\circ}\text{C}$  下的电导率值; $K_t$  为  $t$   $^{\circ}\text{C}$  时的电导值; $t$  为现场测试温度。使用式(3)对温度进行补偿,可以实现在 1 ~ 30  $^{\circ}\text{C}$  之间任一温度与 25  $^{\circ}\text{C}$  标准值的精确转换。

#### 3.2 数据拟合

由于元件参数误差等因素的影响,被测电导与输出电压之间并不完全符合式(1),需要对电导测量值进行校正。

本文通过测量标准电阻,获取一组样本数据,然后采用 Matlab 进行多项式拟合<sup>[7]</sup>,获得了不同档位范围内的标定模型。

档位为 1 时,  $y = 1.0156x - 243.46$ ; 档位为 2 时,  $y = 1.0024x - 432.6$ ; 档位为 3 时,  $y = 1.0341x - 3.023$ ; 档位为 4 时,  $y = 0.9456x - 12.463$ ; 档位为 5 时,  $y = 0.002x - 1.754$ ; 档位为 6 时,  $y = 3.142x - 33.004$ 。其中,  $x$  为测量电阻值;  $y$  为经拟合模型处理后的最终电阻值。

### 4 测量结果

全国地方病综合研究地质调查项目的项目组成员使用实验室调试成功的仪器,对宁夏回族自治区灵武市、吴忠市和青铜峡市的农村地下水水质电导率进行了取样测试,并在同样条件下,将测试结果与两台美国哈希公司的 sension<sup>TM</sup>156 型号水质快检仪器测试结果

进行了对比,数据对照表如表2所示。

表中 C-ZK-2 为本研制仪器命名的型号,哈希 1 和哈希 2 分别为 2 台 sension™156 型号仪器。

表 2 测试数据对照表  
Tab.2 Cross reference of the test data

测量地点	测量结果/ $(\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1})$			相对误差/%	
	C-ZK-2	哈希 1	哈希 2	哈希 1	哈希 2
灵武市 杜家滩 3 队	711	717	716	0.836 8	0.698 3
灵武市 大泉林场	613	593	600	3.372 6	2.166 7
灵武市 崔渠口村 10 队	1 318	1 315	1 347	0.228 1	2.153 0
吴忠市 干饭渠村 1 队	4 390	4 390	4 380	0	0.228 3
吴忠市 五星村 5 队	1 364	1 329	1 373	2.633 5	0.655 4
吴忠市 新接堡村 5 队	1 563	1 586	1 556	1.450 1	0.449 9
青铜峡市 王老滩 5 队	960	960	969	0	0.928 7
青铜峡市 大坝立新 1 队	1 409	1 408	1 399	0.071 0	0.714 7
青铜峡市 中滩村 10 队	1 410	1 408	1 374	0.142 8	2.620 0

由表 2 可知,该仪器与两台哈希测试仪器之间的相对误差处于 5% 之内。同时,经保定计量所检定,该仪器测量相对误差  $\leq 5\%$ ,完全符合野外实际测量结果。

## 5 结束语

本电导仪采用双极性电压脉冲作为激励源,克服了直流激励模式下介质的极化现象,省去了传统交流激励模式下所必须的信号调理电路;使用 MSC1210 处理器实现了仪器的量程自动切换、温度自动补偿、参数修正、模拟信号高精度采集和结果实时显示等。

经测试,仪器进行一次完整的测量大约需要 3 s,相对误差最大为 1%,操作携带方便、可靠性性强,在野外水环地调工作和工业生产中具有广泛的应用前景。

### 参考文献

- [1] 朱建平,王保良,黄志尧,等.基于双极性脉冲电压技术的新型电导率测量仪[J].仪器仪表学报,2005(2):57-58.
- [2] 贾科进,张效玮,林波,等.基于单片机 MSC1210 的智能电导率在线测量仪[J].自动化仪表,2007,28(5):43-46.
- [3] 林波.自动换档水电导率仪控制系统的设计[D].天津:河北工业大学,2006.
- [4] 陈志永.自动换档水电导率仪的研制[D].天津:河北工业大学,2004.
- [5] 马志梅,籍顺心,张凯,等.单片机 C 语言应用程序设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003:16-58.
- [6] 赵国莲.电导率温度校正计算方法的改进[J].环境卫生工程,2000,8(4):153-154.
- [7] 许波,刘征. MatLab 工程数学应用[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [8] 究现状[J].化工自动化及仪表,2008,35(4):1-6.
- [9] [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 6913-2008 锅炉用水和冷却水分析方法——磷酸盐的测定[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [10] [5] 马光军.锅炉水磷酸盐处理的应用[J].中国科技博览,2009(28):309-309.
- [11] [6] 朱志平,杨道武,李宇春.磷酸盐处理汽包锅炉技术的比较研究[J].发电设备,2003,17(3):14-19.
- [12] [7] Strong F C. Theoretical basis of the bouguer-beer law of radiation absorption[J]. Anal. Chem.,1952,24(12):2013.
- [13] [8] 赵元黎,杜娟,张永利,等.便携式现场甲醛检测仪的设计[J].自动化仪表,2009,30(12):76-79.
- [14] [9] Dedkov Y M, Musatov A V. Study of the chemical mechanism of color reactions of selenium(IV) with o-arylenediamines[J]. Anal. Chem.,2007,62(2):225-232.
- [15] [10] 王丽,侍洪波.过程系统的故障监控与监督技术发展概述及研
- [16] [11] 张震,黄国辉,王剑,等.高性能的工业通用型数据采集卡的研制[J].自动化仪表,2009,30(12):72-75,79.
- [17] [12] 吴霆,龙希伟,陆平,等.光电传感器在水体检测中的应用[J].舰船防化,2008(2):31-33.
- [18] [13] Lee C T, Lin Jinmin, Hong zengwei, et al. An application-oriented Linux kernel customization for embedded systems[J]. Information Science and Engineering,2004,20(6):1093-1097.
- [19] [14] 曾洁,贾世杰,陈少华.基于串口通信方式实现对工控微处理器的代码下载与调试[J].化工自动化及仪表,2009,36(1):86-88.
- [20] [15] Ye Weidong, Li Shenglong. Research and design of database for distributed bridge data acquisition system[C]// ICEMI 2009 - Proceedings of 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, Beijing China,2009:1814-1819.
- [21] [16] 王浩南,刘益成.基于嵌入式 Linux 系统下的 Qt 开发[J].电脑开发与应用,2010,23(1):11-13.

《自动化仪表》 邮发代号: 4-304, 2011 年定价: 12.00 元, 全年价: 144.00 元; 国外代号: M 721

欢迎赐稿, 欢迎订阅, 欢迎宝贵建议, 欢迎惠刊各类广告