

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105821

基于 ARM 的实验室数字源表设计^{*}

杨莫非 刘士兴 廖福宁 刘光柱

(合肥工业大学 电子科学与应用物理学院 合肥 230009)

摘要:设计了一种以 ARM Cortex-M4 为核心的数字源表。通过数模转换芯片 AD5422 实现电压、电流源输出,输出精度在 0~10 V,0~20 mA 范围内达到五位,误差在 0.02% 以内;通过模数转换芯片 LTC2440 实现对电压、电流、电阻的测量功能,测量精度达到六位半,其中电压测量误差小于 0.003%;信号的测量经选通放大后由 ADC 进行采样,采用滑动均值滤波滤除采样干扰,最小二乘法校准采样数据;测量和输出数据在 LCD 上显示。本数字源表成本低,集成度高且方便操作,适合在电子信息类本科教学实验中广泛使用。

关键词:数字源表;滑动均值滤波;最小二乘法;嵌入式处理器

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Design of laboratory source meter based on ARM

Yang Mofei Liu Shixing Liao Funing Liu Gaungzhu

(School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A source meter has been designed, which is based on ARM Cortex-M4. The output of voltage and current source is implemented by the AD5422, and the output accuracy is 5 digits in the range of 0~10 V and 0~20 mA, the error is within 0.02%. The measurement functions of voltage, current, and resistance are realized by LTC2440, and the measurement accuracy reaches six and a half digits, the voltage measurement error is less than 0.003%. The measurement of the signal is sampled by ADC, which is amplified by strobe, the sliding mean filter method has been used to filter the sampling disturbance, and the least square method is used to calibrate the data. The measurement and output data are displayed on the LCD. The digital source meter has low cost, high digital integration and easy operation, which is suitable for being widely used in the undergraduate teaching experiment of electronic information.

Keywords: digital source meter; sliding mean filter; least square method; embedded processor

0 引言

数字源表(source meter)是一种能输出直流电压、直流电流,能测量直流电压、直流电流和电阻的电子仪器^[1]。数字源表为半导体、计算器、汽车医疗等常规特性测试和生产测试应用而设计,它具有低至纳安、微安量级的小电流功能,可提供六位半分辨率、软件仿真,融合了精密电压源、电流源、六位半数字多用表等功能,常用于中低电平测试和实验室研发使用,其内置源-测功能,极大地缩短测试、开发所需时间,同时降低购买成本。

目前国外对数字源表的研究相对成熟,文献[2]介绍了专为低压材料和半导体测试而设计的源测量仪器,但其人机交互较为复杂,且数码管显示面板无法完成特定的 I-V 特性分析。文献[3-4]介绍了新型高性能数字源表,通过简

单的触控快速获取测量结果,减少仪器的操作学习时间,并且融入自动化的生产测试分析,但仪器高昂的价格,在电子课程教学和实验室中未能广泛应用。随着集成电路和新型材料的发展,孙如昊等^[5]设计了基于吉时利源表的薄膜渗透率测试系统,通过虚拟仪器技术实现电势差、材料器件测量。刘霞美等^[6]通过数字源表实现高精度小电流校准,大大提高了小电流源表的测量能力。可见数字源表在国内多在仪器的应用阶段。

基于以上分析,本课题针对美国 Keithley 的 2401(低压款)型号,研制一台应用于实验教学的可编程数字源表。将电路按照源、测功能进行模块化设计,整体硬件结构分为数字板和模拟板,采用智能化的触控方式代替繁琐的按键交互。它相比 2401 数字源表具有集成度高、电路简单、成本低、易操作等优点。

收稿日期:2021-02-20

^{*} 基金项目:合肥工业大学实验室自制仪器项目(2004800143)、安徽省质量技术监督科技计划项目(2018AHQT26)资助

1 系统设计

数字源表的系统整体结构如图 1 所示。该系统主要由嵌入式处理器、功能板块、电源和接口扩展模块组成,其工作原理为通过触控液晶显示器(liquid crystal display, LCD)显示屏实现人机交互,选择测量、源输出或源-测功能。在测量端,电压、电流、电阻的采集信号统一转化为电压信号送入模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)转换,数据经滤波校准后显示在 LCD 上;同理,在源输出端,处理器接收到来自 LCD 触控的输入数据后,通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)控制 DAC 输出相应的电压源、电流源,根据设置电流的大小自动选择是否接入扩流电路。

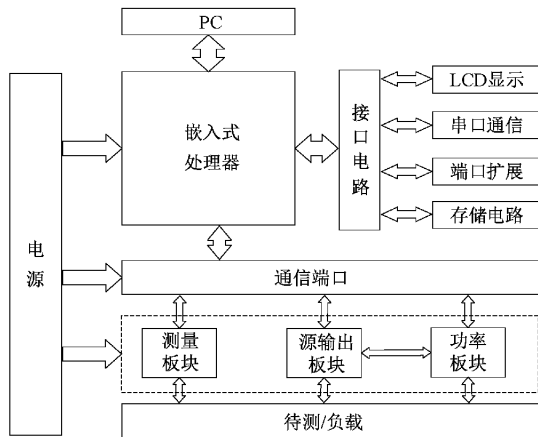


图 1 数字源表系统结构

1.1 主要硬件单元设计

系统硬件上整体分为数字板和模拟板,数字板包括以嵌入式处理单元为核心的外围电路和 LCD 显示屏、串口、存储等接口扩展电路;模拟板包括电压源、电流源、扩流电路、电压、电流、电阻采集电路、程控放大、电源和保护电路等。

1) 电压源电流源设计

电压源、电流源由数模转换器 AD5422 输出,其内部电路如图 2 所示,嵌入式处理器控制 DAC 经缓冲和比例缩放输出电压;或由压控恒流源电路输出电流,图中放大器 B 与 Q1 场效应管组成负反馈跟随电路^[7],Q1 源极与放大器 B 反相输入端相连,根据运放虚短、虚断特性可得 Q1 漏极电流:

$$I_{ND} = \frac{V_{DAC}}{R_{SET}} \quad (1)$$

放大器 C 与电阻 R_2 、 R_3 和 Q2 构成镜像电流源电路,由运放虚短特性可知 R_2 与 R_3 压降相同。当 Q1 正常工作时,源极电流近似等于漏极电流,则:

$$I_{R_3} = \frac{I_{NS} \times R_2}{R_3} = \frac{I_{ND} \times R_2}{R_3} \quad (2)$$

其中,电流 I_{R_3} 通过功率管 Q2 输出电流源。

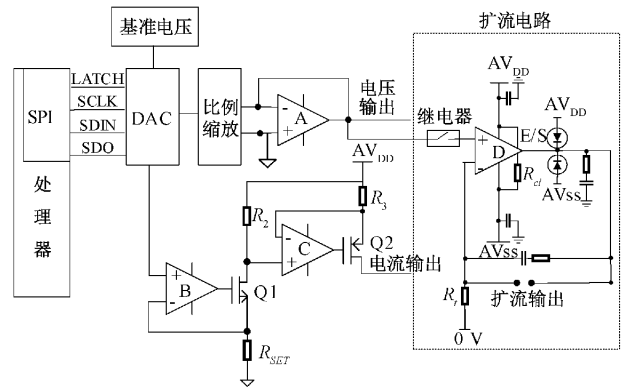


图 2 电压源与电流源电路

本源表拟设计输出 0~1 A 的电流源,由于集成芯片 AD5422 的电流源输出为 0~20 mA,需要扩流电路,增大输出电流。数模转换器(digital to analog converter, DAC)通过继电器连接功率运放 D 的正输入端,当负载接入时,运放与负载构成负反馈回路,由运放的特性可知,采样电阻 R_t 两端的电压差 ΔV 等于 DAC 的输出电压减去参考点的电压 0 V,由式(3)可知,负载的电流等于采样电阻的电流,从而实现扩流的功能^[8]。采样电阻 R_t 取 10 Ω ,DAC 输出 0~10 V,实现 0~1 A 的任意输出。电阻 R_c 作为运放的限流电阻,限制电流最大输出为 1.5 A,与二极管共同保护电流源电路。

$$I_{out} = \frac{V_{DAC} - 0}{R_t} \quad (3)$$

电压电流输出数值可以用式(4)、(5)表示。 D 是载入 AD5422 的代码的十进制等效值, N 代表 DAC 的分辨率, V_{REFIN} 为输入 5 V 基准电压, $Gain$ 是芯片内部输出的增益倍数,这里为 4 倍。 I_{OUT1} 为 AD5422 电流输出, I_{OUT2} 为扩流输出。

$$V_{OUT} = V_{REFIN} \times Gain \left[\frac{D}{2^N} \right] - \frac{Gain \times V_{REFIN}}{2} \quad (4)$$

$$I_{OUT1} = \left[\frac{20 \text{ mA}}{2^N} \right] \times D \quad I_{OUT2} = \frac{V_{DAC}}{R_t} \quad (5)$$

2) 电压电流测量设计

ADC 可以直接读取电压信号,由于本设计源表的电压测量范围为 0~100 V,ADC 的电压量程有限,因此采集电压必须经过衰减、放大电路,将信号幅度调整到 ADC 的有效输入范围。如图 3 所示,为了精确采集电压信号,嵌入式处理器控制继电器和模拟开关以适应 100 mV、1 V、10 V、100 V 四个范围,采用 1 : 1、10 : 1、100 : 1 的分压电阻网络,将电压信号转化在 0~1 V 适合 ADC 转换范围内。

分压电阻采用集成电阻网络,每个电阻温漂系数和整体温漂系数相同^[9],由式(6)得出此种结构信号不受温度变化的影响。

$$U_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} = \frac{R_2 + kR_2}{R_1 + kR_1 + R_2 + kR_2} V_{in} =$$

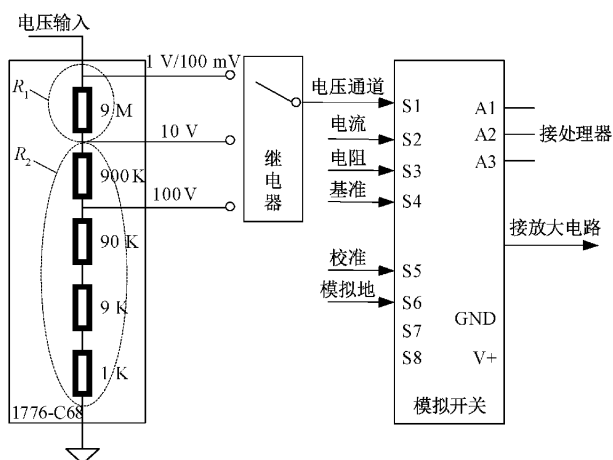


图 3 电压测量电路

$$\frac{(1+k)R_2}{(1+k)R_1+(1+k)R_2}V_{in} = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_{in} \quad (6)$$

电流测量的原理为:通过低温漂合金电阻采样输入电流,根据欧姆定律将待测电流转为相应的电压,如图 4 所示。电流经过 1.5 A 熔断器和保护电路,由继电器选择接入 100、10、1 倍压降后送入模拟开关电流通道,4 个二极管共同作用将采样电阻对地两端电压限制在 ± 1.4 V 之间,防止采样电阻两端电压过大^[10],运放作为跟随器,使 4 个二极管中点电位与电流输入电位相等,减小保护电路的漏电流对测量的影响。

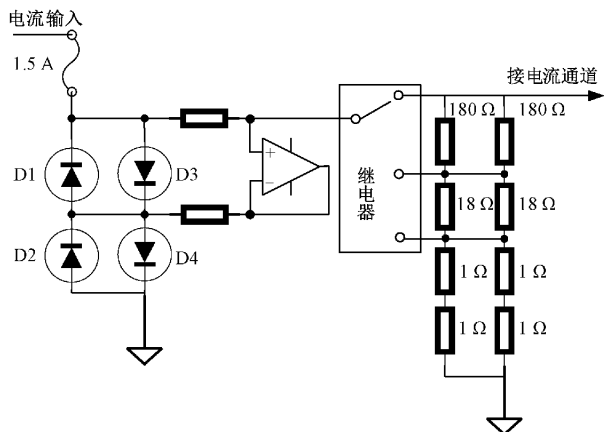


图 4 电流测量电路

3) 四线电阻测量设计

采用恒流源法测量电阻,即在被测电阻上施加电流,再测量两端的电压,其简化电路如图 5 所示。

R_{d1} 和 R_{d2} 为驱动端与被测电阻之间的接触电阻; R_{m1} 和 R_{m2} 为测量端与被测电阻之间的接触电阻^[11]。驱动电流 I 通过导线加载到电阻 R 上;设测量 R 上的电压为 V_C , R 两端实际电压为 V_R ,由于测量端输入的阻抗非常高,流过测量端导线电流非常小,可以忽略,即 V_{Rm1} 、 V_{Rm2} 为 0,则:

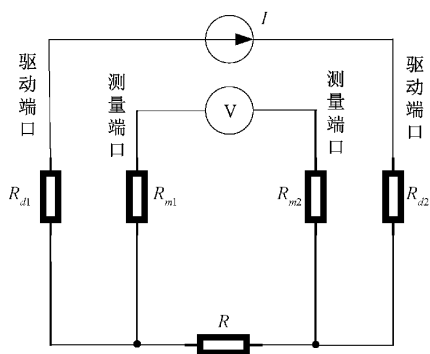


图 5 四线法测量电阻等效电路

$$R = \frac{V_R + V_{Rm1} + V_{Rm2}}{I} = \frac{V_C}{I} \quad (7)$$

由式(7)知四线法测量电阻可以消除测量导线和被测接触点产生的误差,提高测量电阻的准确度^[12]。

针对电阻测量范围在 0~1 M 之间,对电阻采用分档测量,主要分为 5 个档位:100 Ω、1 kΩ、10 kΩ、100 kΩ、1 MΩ,对不同档位的电阻测量设计不同档位的恒流源 1 mA、0.1 mA、10 μA、1 μA。实际电路如图 6 所示,模拟开关用于选择 4 个不同的标准电阻,5 V 基准、运放 A、Q1 共同作用将 1 V 电压送入运放 B 的正向输入端,运放 B、Q2 和模拟开关共同作用使标准电阻两端的电压始终保持 1 V,由欧姆定律产生标准的恒流源。在运放的输出端与负端接入电容防止震荡。同时,考虑到测量的便捷性,由嵌入式处理器控制继电器和模拟开关实现二线、四线测电阻的任意切换。

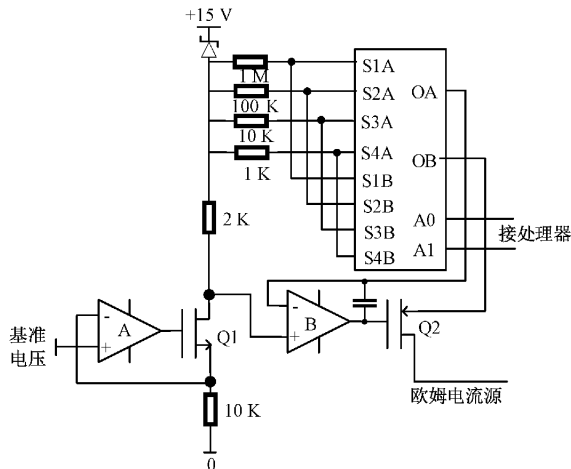


图 6 欧姆电流源电路

4) 程控电压放大设计

本设计中,电压测量 100 mV 和电阻测量 100 Ω 档位转换后的信号需要满足 ADC 的最佳测量范围,因此需要将信号放大。电路如图 7 所示,电压放大使用两级精密放大器级联,放大器 A 作为主放大器实现 1 或 10 倍放大,B 作为容性负载驱动器驱动 ADC。

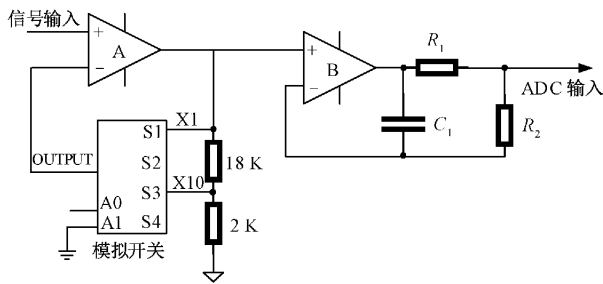


图 7 程控电压放大电路

选用四选一低导通电阻模拟开关进行电压放大倍数的切换,其选通控制输入端 A0 与嵌入式处理器相连^[13],根据输入电压信号的大小控制输入信号 S1、S3 通道转换,采用低温漂精密电阻网络 LT5400 作为运放反馈电阻,串联后阻值分别为 18 K 和 2 K。当 S3 通道导通,则:

$$V_{ADC} = \left(1 + \frac{R_{18K}}{R_{2K}}\right) V_{input} \quad (8)$$

由式(8)即可得电压放大倍数为 10。同理,当 S1 导通时,运放 A 变为电压跟随器不放大信号。由微处理器读取 ADC 数据的高位是否在合适的范围而进行 1 倍或 10 倍自动切换。

1.2 电源设计

电源模块采用直流转换器 (direct current-direct current converter, DC/DC) 和低压差线性稳压器 (low dropout regulator, LDO) 混合设计的方式。DC/DC 主要将输入电压转换为所需电压。LDO 主要为系统的芯片提供低噪声电源^[14]。电源输入 5 V 电压,采用电源芯片将其转换为: -15、3.3、5.5、15 V,其中 3.3 V 为数字板电源,5 V、5.2 V 分别供给运放、继电器、基准芯片、DAC 等。电源结构如图 8 所示

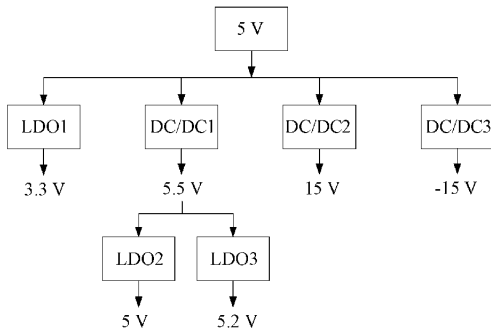


图 8 电源结构

1.3 系统软件设计

本系统的编译环境为 Keil5,使用 C 语言编写应用程序。由触控屏选择不同功能,能够实现电压、电流、电阻值的测量及显示,自动或手动跳档选择合适的档位,同时向 LCD 中虚拟键盘写入电压源、电流源值输出,超过电流范围会自动接入扩流电路。本设计软件整体包括主程序和两个中断服务程序。主程序完成各个功能模块的初始化和

LCD 显示及校准参数的读取与存储,一个定时器中断负责处理数据的采集、处理、滤波、自动量程跳转等,一个外部中断负责接收 LCD 的触发信号。系统的软件流程如图 9 所示,初始化校准参数后,由嵌入式处理器控制继电器继电器和模拟开关实现功能选择。初始化包括处理器、定时器、LCD、中断、串口、默认档位初始化。定时器中断以任务环的形式循环执行采集、数据处理、滤波、串口输出、LCD 显示数值。在采集、输出过程中,数据超过程序设定阈值后,控制继电器自动跳档选择合适范围。

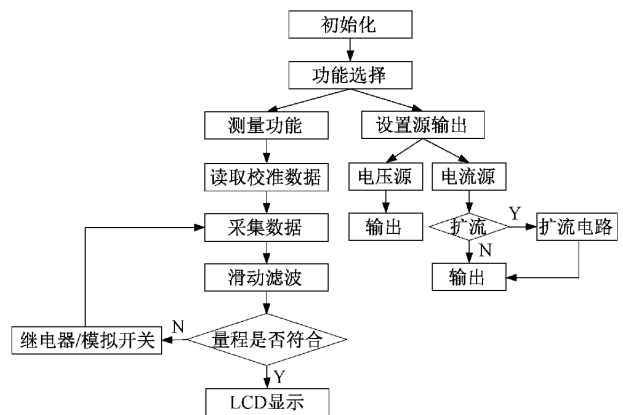


图 9 数字源表软件流程

1.4 校准及抗干扰设计

由于测量环境的不同、电磁干扰、电路模块之间的干扰以及电阻值的准确度都会给测量带来误差,误差可分为随机误差和系统误差。

对于系统误差,可以通过软件修正。源表在理想的情况下采集值和输出值与真实数值相同,即传输函数是一条过零点且斜率一定的直线^[15],但由于元器件特性所引起的零点误差、增益误差、非线性误差偏移理想直线,在很小一段范围内,曲线可以看做一条直线,因此误差也符合线性关系,两曲线函数通过最小二乘法拟合后得到最终的测量函数。因此校准以基准电压为参考,每个量程采样 10 次^[16],求得函数曲线的斜率和偏移值存入内部 flash 中作为校准参数对测量结果补偿。

对于随机误差,如温湿度和电磁干扰等无法用软件修复,本设计采取以下方式减小随机误差的影响:选用轨对轨、低噪声、低失调电压、极低输入偏置电流的运放 AD8629;选用精密电阻网络 1776-C68 作为电压测量的衰减电路,减小温漂带来的影响;选用精密、低温漂金属箔电阻作为欧姆电流源的标准电阻,减小恒流源的误差;选用将数字地和模拟地分开,加粗电源线,对关键信号线底层铺地,增加源表的抗干扰能力;选用低导通的模拟开关 ADG508 和磁保持继电器作为选通信号,减小导通电阻和大电流闭合开关带来影响;DC/DC 电源电路与其他模拟电路分开并用电磁屏蔽罩减小电磁干扰;对电路中的稳压管、功率电阻、功率运放加装散热片,减少温漂的影响;在信号

传输不同元器件之间加入磁珠,电源与低之间接入去耦电容;继电器、运放、ADC 等采用多路供电,提高整体系统的稳定性。

2 数据采集结果及分析

数字源表实物如图 10 所示,在室温的条件下,使用吉时利 2401 数字源表与本源表数据结果进行对比,使用直流电源给源表供电以便观察电流变化。使用六位半电压源、电流源作为测量标准值,精密金属箔电阻作为测量电阻,电阻测量均使用准确度较高的四线制测量模式。由表 1 可知,经校准后,电压测量在 0~100 V 误差在 0.003% 以内,高于 2401 型数字源表电压的准确度 0.015%。电流测量在 0~1 A 内误差为 0.03%,由于在电流测量电路中的欧姆转换电路使用合金采样电阻,这种电阻精度不高,且随着测量时间变长,采样电阻温度也随着升高,电阻的温漂会导致电流测量的不准确。电阻测量在 0~1 M 范围内误差为 0.005%,满足电阻六位半精度的指标。由表 2 可知,源表的电压源输出在 0~10 V、电流源输出在 0~20 mA 范围内误差为 0.02%。本设计在源输出方面做到五位的精度,因此为了保证电阻测量精度,采用欧姆恒流源的方法作为驱动电流源,后续在源输出的精度提升至六位半,直接为电阻测量的提供驱动源,可进一步简化电路。

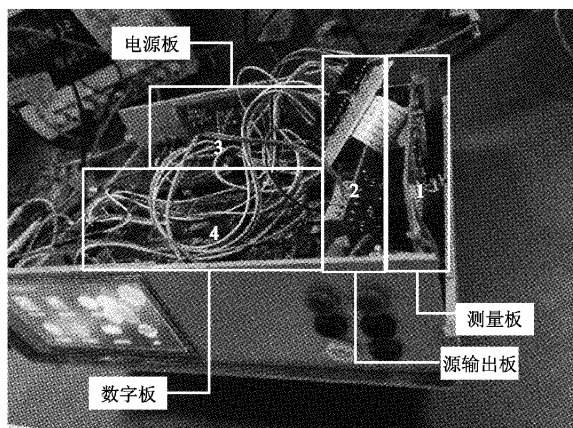


图 10 数字源表实物

表 1 测量端数据结果

测量端	标准值	测量值	相对误差/%
电压	50.006 8 mV	50.007 5 mV	0.001 3
	0.899 943 V	0.899 963 V	0.002 2
	9.499 71 V	9.499 99 V	0.002 9
电流	17.998 9 V	17.998 6 V	0.001 6
	50.000 mA	49.985 mA	0.030 0
测量	0.300 000 A	0.300 089 A	0.029 6
电阻	0.982 430 kΩ	0.982 134 kΩ	0.003 0
	14.993 23 kΩ	14.992 51 kΩ	0.004 8

表 2 源端数据结果

输出端	设定值	输出值	误差/%
电压	2 V	2.000 1 V	0.005
输出	10 V	10.000 4 V	0.004
电流	10 mA	10.001 2 mA	0.012
输出	18 mA	18.003 6 mA	0.020

3 结 论

本仪器以 ARM Cortex-M4 嵌入式处理器为核心,采用排阻网络代替传统的分立电阻分压,实现了 0~100 V 电压测量、0~1 A 电流测量、设计高精度的欧姆电流源,四线测量法消除接线电阻和导线电阻的误差,实现 0~1 M 电阻测量,且电压电流电阻测量精度达到六位半;选用性价比高的 $\Sigma-\Delta$ 型 ADC LTC2440 有效的提高测量速度和准确度。输出电压源、电流源在 0~10 V、0~20 mA 达到五位半精度,通过扩流电路最高实现 1 A 的电流输出。系统数据可通过串口形式输出至上位机,测量和输出结果可在 LCD 上显示。本仪器集成度高、操作简单、成本低,非常适合应用于高校电子信息类专业的教学实验中。

参考文献

- [1] 姜欣怡. 数字源表(源功能)校准结果的不确定度评定[J]. 品牌与标准化, 2017(5): 89-91.
- [2] 丛秋波. 新型数字源表专为低电压测试而优化[J]. 电子设计技术, 2011, 18(12): 16.
- [3] 吉时利推出全球首款 2450 型触摸屏数字源表[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(9): 906.
- [4] 吉时利三款最新型 2600B 系列数字源表为台式应用而优化拓展数字源表(SourceMeter)源测量单元(SMU)系列产品[J]. 电子测量技术, 2012, 35(9): 138-139.
- [5] 孙如昊, 刘禹, 刘江, 等. 基于 LabVIEW 和 Arduino 的薄膜电阻率测试系统开发[J]. 自动化仪表, 2019, 40(8): 26-31, 37.
- [6] 刘霞美, 吴爱华, 乔玉娥, 等. 一种高精度数字源表小电流校准方法[J]. 宇航计测技术, 2019, 39(S1): 42-46.
- [7] 王凌伟, 王永国, 秦冲. 高精度宽范围数控电流源模块设计[J]. 信息通信, 2016(4): 102-103.
- [8] 马宁. IC 自动测试系统中精密测量单元的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [9] 刘亚旭. 多用表测量电路优化及精度提高技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [10] 刘敏. 手持式智能万用表的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [11] 顾卓璟, 张兴敢, 唐岚, 等. 一种高精度电阻测量仪系统设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(3): 184-187.
- [12] 薄志峰. 远程通用火工品检测仪设计与应用[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3): 77-80.

(下转第 178 页)

- 38(11): 96-99.
- [7] 武延坤, 陈益清, 雷萍. 水质监测技术现有问题分析及物联网应用框架[J]. 中国给水排水, 2012, 28(22): 9-13.
- [8] 李鑫星, 王聪, 田野, 等. 基于 ZigBee 的多参数水质在线监测系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(S1): 168-173.
- [9] 杨观止, 陈鹏飞, 崔新凯, 等. NB-IoT 综述及性能测试[J]. 计算机工程, 2020, 46(1): 1-14.
- [10] 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV 发展现状及展望[J]. 中国造船, 2014, 55(4): 194-205.
- [11] BERTRAM V. Unmanned surface vehicles-a survey[R]. Skibsteknisk Selskab, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [12] WASIF N, ROBERT S, TAO X. An integrated multi-sensor data fusion algorithm and autopilot implementation in an uninhabited surface craft[J]. Ocean Engineering, 2012, 39: 43-52.
- [13] 朱健楠, 虞梦苓, 杨益新. 无人水面艇感知技术发展综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(10): 1486-1492.
- [14] 刘星桥, 陈海磊, 朱成云. 基于 GPS 的自学习导航游弋式水质监测系统设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 84-90.
- [15] SIMONE G, DARIO M, ALESSANDRO P, et al. An integrated system for real-time water monitoring based on low cost unmanned surface vehicles[C]. 2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), IEEE, 2019:1-6.
- [16] 晁鹤, 郑恩让. 基于 STM32 的无人船控制系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10): 129-133.
- [17] 杨菊花, 李文元, 陈光武, 等. 引入滑模观测器的 GPS/INS 组合导航滤波方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 78-86.
- [18] 刘军, 吴贤勇, 田甜. 基于 AUKF 的 SINS/GPS 紧组合导航系统研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(2): 97-102.
- [19] 陈永泽, 舒军勇, 王真亮, 等. 基于 GPS 定位的无人艇自主导航[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016, 30(8): 117-121.
- [20] 田宏图. 基于北斗定位导航系统的区域 CORS 系统精度与性能分析[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 128-131.
- [21] 周建民, 康永, 刘蔚. 无人机导航技术应用与发展趋势[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 274-277, 286.
- [22] 姜楠. 坐标转换算法研究与软件实现[D]. 淮南:安徽理工大学, 2013: 6-24.
- [23] 张兵兵. 坐标换算程序设计及实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(6): 32-34.
- [24] 韩鹏, 刘志林, 周泽才, 等. 基于 LOS 法的自航模航迹跟踪控制算法实现[J]. 应用科技, 2018, 45(3): 66-70.
- [25] 陈天元, 袁伟, 俞孟蕙. 基于显式模型预测控制的无人船航迹控制方法[J]. 船舶工程, 2020, 42(9): 122-127.
- [26] 刘洋, 行鸿彦, 侯天浩. 四旋翼无人机串级变论域模糊 PID 姿态控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 46-52.

作者简介

张启元, 本科生, 主要研究方向为无线传感器网络技术。

E-mail: zqyagy@qq.com

张烈山(通信作者), 讲师, 硕导, 工学博士, 主要研究方向为无线传感器网络技术、机器视觉测量技术、水声测量技术等。

E-mail: zhangoptoacoustic@163.com

(上接第 169 页)

- [13] 张朵, 许宜申, 吴茂成, 等. 基于四线测量法的智能微电阻测试仪设计[J]. 电测与仪表, 2015, 52(10): 29-34, 55.
- [14] 宋亚杰. 基于 PXIe 的软 X 射线相机多通道数据采集系统设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [15] 李玲. LXI 六位半数字多用表的硬件设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [16] 许伟明, 李瑜煜, 方浩, 等. 针对热电材料的高精度宽范围电阻测量电路[J]. 电子测量技术, 2016, 39(2): 14-17, 24.

作者简介

杨莫非, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统与综

合测试。

E-mail: 740541397@qq.com

刘士兴, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为光电探测技术、可编程器件和系统设计。

E-mail: liusx@hfut.edu.cn

廖福宁, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统综合与测试。

E-mail: 549789961@qq.com

刘光柱, 博士, 讲师, 主要研究方向为自动化技术与核科学技术。

E-mail: 343546310@qq.com