

Design of picoammeter based on domestic electronic components

Weikang Wu Changlei Wu

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Cuangdong, 518124, China

Abstract

In order to promote the development of domestic high-end instruments, this article designs a picoammeter based on domestic electronic components. All electronic components in this meter are domestically produced. It has pA level accuracy, 10fA level resolution, and self calibration function. This meter has two working modes, manual and automatic. It can automatically switch the range according to the measured current. It can display the current value and range information, and improve the accuracy of the meter through calibration. It has serial communication function, and can be controlled by a computer. The meter has high reliability and stability, meeting the precise weak current testing requirements in fields such as radioactive detection, medical instruments, and semiconductors.

Keywords

picoammeter; transimpedance amplifier; microprocessor; weak signal

基于国产电子元器件的皮安表设计

武维康 吴长雷

中广核核电运营有限公司, 中国 · 广东 深圳 518124

摘要

为了推动国产高端仪表的发展, 本文设计了一款基于国产电子元器件的皮安表。该表所有电子元器件均为国产器件、具有 1pA 级精度、100fA 级分辨率且具有自校准功能。该表具有手动和自动两种工作模式、可以根据被测电流的大小自动切换量程、能够显示电流值和量程信息、可以通过校验提高仪表的准确度、具有串口通信功能、可以通过电脑对其控制。经测试该表具有较高的可靠性和稳定性, 满足辐射探测、医疗仪器和半导体等领域的精密微弱电流测试需求。

关键词

皮安表; 跨阻放大器; 微处理器; 微弱信号

1 引言

皮安级电流测量源表在辐射探测、医疗仪器以及半导体等领域应用广泛, 且高度依赖高端模拟器件^[1]。目前该类源表的核心模拟器件主要依赖美国的亚德诺和德州仪器两家公司^[2]。随着国产电子元器件的发展, 高端模拟器件已经逐步满足微弱电流检测源表的设计需求。

为了解决国内产业对微弱电流采集的需求, 本文设计了一款基于国产静电计级运算放大器^[3]RS8491 的皮安表。该表所有元器件均采用国产器件, 通过电子元器件的筛选, 保障设备的精度和稳定性。经测试该表综合性能指标已经

达到国际同类产品的水平, 完全满足国内微弱电流测量的需求。

2 皮安表系统方案设计

基于国产电子元器件的皮安表硬件结构如图 1 所示, 主要由 I/V 转换电路、ADC 电路、GD32 微处理器电路、人机接口电路和电源电路组成。I/V 转换电路为跨阻式电流电压转换电路^[4], 运算放大器选择江苏润石科技有限公司的 RS8491, 该器件为静电计级运算放大器, 其输入偏置电流典型值 $\pm 50\text{fA}$, 最大 $\pm 200\text{fA}$ 、输入偏置电压 $54\mu\text{V}$ 、供电电压 5V 至 25V ($\pm 2.5\text{V}$ 至 $\pm 12.5\text{V}$)。ADC 选择圣邦微电子的 SGM58200, 该器件为 24 位 ADC 芯片、内部自带电压基准、最高转换速率为 960SPS。微处理器选择兆易创新的 GD32F103RCT6, 该器件具有 48KSRAM、256KFLASH、最高运行速率 108MHz。

电源电路将 220VAC 电源转换成放大器、ADC、微处理器以及其他电子元器件工作所需的电压; 运算放大器和反

【作者简介】武维康 (1985-), 男, 中国江苏徐州人, 本科, 工程师, 从事微弱信号检测研究。

【通信作者】吴长雷 (1984-), 男, 中国江苏徐州人, 硕士, 高级工程师, 从事微弱信号检测研究。

馈电阻网络构成跨阻式 I/V 转换电路，量程切换开关实现对反馈电阻的选择，在此选择干簧管继电器作为量程切换开关；ADC 实现对电压信号的采集，将模拟电压转换成数字信号；GD32 微处理器实现对系统的整体控制；OLED 显示屏、按键和通讯接口构成人机接口。

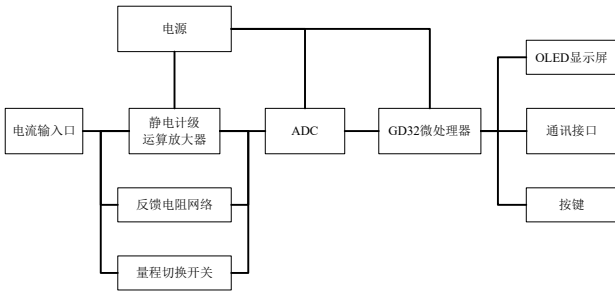


图 1 硬件系统结构图

3 主要硬件电路设计

3.1 电源电路设计

220VAC 经过变压器、整流电路和稳压电路生成两路 5VDC 电源分别为数字电路和模拟电路供电。SGM4024-2.5V 电压基准和运算放大器生成 2.5V 精准电压源为前置放大器电路提供偏置参考电压。

3.2 跨阻放大电路设计

跨阻放大器主要由静电计级运算放大器、反馈电阻网络、量程切换继电器以及继电器驱动电路组成。输入电流信号经过限流电阻 R8 连接到 RS4891 的反向输入端，正向输入端接到 AV+2.5V，输出电压经过反馈电阻连接到反向输入端形成跨阻式电流放大电路。该电路电压输出范围为 0~5V。

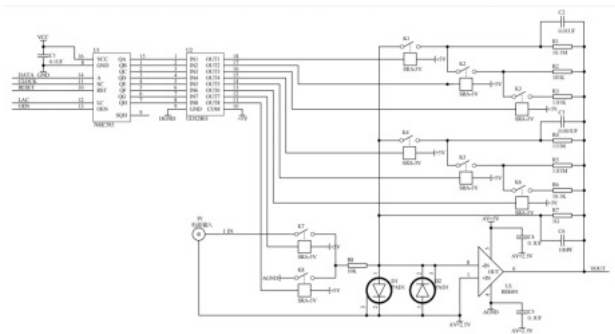


图 2 跨阻放大器电路图

通过量程继电器的闭合和断开选择反馈电阻，从而实现电流量程的选择。正常工作时 K7 闭合，K8 断开。当 K7 断开，K8 闭合时，运放输入端接地，可以对模拟通道的零点进行校验。

各量程反馈电阻对应关系如表 1 所示，R7 一直连接在运放的输出端和反向输入端。当继电器闭合时，其通道对应的电阻 RX 与 R7 并联，反馈电阻值变成 $RX||R7$ 。

表 1 电流量程与继电器状态对应表

量程编号	量程范围	反馈电阻	等效阻值
7	$\pm 2\text{mA}$	$R1 R2 R3 R7$	1K
6	$\pm 200\mu\text{A}$	$R4 R5 R6 R7$	10K
5	$\pm 20\mu\text{A}$	$R R2 R7$	100K
4	$\pm 2\mu\text{A}$	$R4 R5 R7$	1M
3	$\pm 200\text{nA}$	$R1 R7$	10M
2	$\pm 20\text{nA}$	$R4 R7$	100M
1	$\pm 2\text{nA}$	R7	1G

3.3 ADC 电路设计

模数转换芯片选择 SGM58200，该器件为 24 位自带电压基准的 IIC 接口 ADC 芯片，具有 4 路单端输入通道或 2 路差分输入通道，内部自带 PGA，最高采样速率 960SPS。跨阻放大器的输出接差分输入通道 1，外部校准信号接差分输入通道 2。

3.4 通信电路设计

该表对外接口为 RS232，电平转换芯片为南京国微电子有限公司的 WS3232E，该芯片兼容 3.3V 供电，速度高达 250KPS。为了保证通信的可靠性和稳定性，防止拔插接头以及静电产生的高压对电路的损害，在信号线上串接 33Ω 电阻并增加 TVS 管。

4 系统软件关键模块设计

4.1 A/D 采集程序设计

A/D 采集时首先对 GPIO 和 IIC 初始化，读取寄存器初始值，配置 ALERT/RDY 引脚输出模式，配置工作模式为连续转换模式，配置信号输入范围为 $\pm 4.096\text{V}$ ，配置信号输入模式为 AIN0,AIN1 差分输入，配置转换速率为 960SPS。

4.2 量程自动切换程序设计

该表具有 7 个量程，满量程电流信号从 $\pm 2\text{nA}$ 至 $\pm 2\text{mA}$ ，两个相邻量程为 10 倍关系。通过控制干簧管继电器的状态从而改变反馈电阻的大小来实现量程切换。软件启动后首先将量程设置成最大量程，每次读取 ADC 数值获得当前电流值，将当前电流值与量程切换阈值进行比较，高量程切换阈值为 0.93 倍满量程，当电流值超过该阈值时，向高量程切换；低量程切换阈值为 0.087 倍满量程，当电流值低于该阈值时，向低量程切换；当电流在两个阈值之间，维持量程不变。量程切换前需要对量程数值有效性进行判断，数值范围为 1~7，当小于 1 时需要保持数值为 1，大于 7 时保持数值为 7 并输出超量程信息。

4.3 数据通信软件设计

该系统对外通信接口为 RS-232，通信协议为 SCPI，主要为 set 和 query 两个操作，其中 set 操作为改变仪器状态的操作，query 操作为查询仪器状态的操作。

set 操作主要包括波特率设置、设备地址设置、工作模式设置、校验设置、补偿参数设置等功能。query 操作主要包括基本参数读取、校准数值读取和电流数值读取。

4.4 校准程序设计

为了提升该表的精确度，预留校准功能。基准源表为泰克公司的 6220 微电流源，校准时通过 RS-232 线连接本表和 6220。在本表菜单中选择校准界面进行自动校准。每个量程取满量程的 0.1、0.5 和 0.9 倍电流值作为测试电流，控制 6220 输出电流值，该表读取当前电流值，根据输入电流和所测电流之间的关系计算出该量程的零点偏差值和斜率值。通过对 7 个量程的校准获得 7 个零点偏差值和斜率值。当仪表正常工作时，测得电流值后，根据当前量程获取零点值和斜率值，根据以下公式计算得到实际电流值。

5 系统测试

为了验证该皮安表的性能，对该表进行了精度测试、线性度测试和稳定性测试。

使用泰克公司的微电流源 6220 作为测试电流源，向被测表注入测试电流，使用 PC 机串口读取实时数据。

5.1 精度测试

控制 6220 输出测试电流，电流值为 20pA 至 2mA，分别注入对应量程电流的 0.25、0.5、0.75 和 1 倍，等待数据稳定后，连续读取 10 次数据取平均值。根据测量结果和注入电流得到相对误差，取其绝对值测试结果如图 3 所示，随着电流的增大，误差值逐渐减少；电流低于 1nA 时由于反馈电阻和泄漏电流的影响，误差偏大，但是低于 0.4%；当电流高于 1nA 时，误差低于 0.1%。

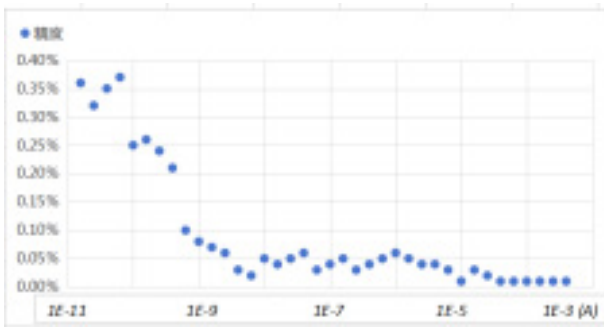


图 3 误差图

5.2 线性度测试

每个量程以满量程 0.01 倍步进改变测试电流、测量输出计算测量值、根据测量值和理论输出值得到偏差 ΔY 、整个量程最大偏差值 ΔY_{MAX} 、量程最大输出值 Y 、计算线

性度值 δ 为：

$$\delta = \frac{\Delta Y_{MAX}}{Y} \cdot 100\% \quad (1)$$

量程最大输出值 Y 为 2V。各量程线性度如表所示：

表 2 线性度表

量程	ΔY_{MAX} (V)	δ
100uA~1mA	0.0008	0.04%
10uA~100uA	0.0012	0.06%
1uA~10uA	0.0016	0.08%
100nA~1uA	0.0010	0.05%
10nA~100nA	0.0014	0.07%
1nA~10nA	0.0024	0.12%
~1nA	0.0034	0.17%

5.3 稳定性测试

根据研发经验，对该表进行短期稳定性测试（8H）和长期稳定性测试（168H）。测试过程中使用标准仪表注入测试电流信号；使用记录仪记录模拟量输出，PC 通过串口读取测量值；测试结束后对记录仪的数据进行分析。该装置在连续测试过程中功能正常、性能稳定、无异常波动、精度无明显变化。

6 结语

本文在国产静电计级运算放大器 RS8491 的基础上设计了一款皮安表。该表前置放大器为跨阻放大器，采用干簧管继电器作为量程切换开关，通过 GD32 微处理器对整个系统进行控制，通过人机接口以及 RS232 实现对仪表的操作。经验证系统的精度、线性度以及稳定性均符合设计要求，能够满足特殊行业对微弱电流信号采集的需求。

参考文献

- [1] 班郁. 一种大带宽、高增益的高速跨阻放大器芯片设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(1): 35-39.
- [2] 贾小冬. 浅析电荷放大器的使用分析[J]. 中国仪器仪表, 2024(9): 89-92.
- [3] 陈中悦, 朱伟芳. 基于运放和模拟开关的可编程放大器实验设计[J]. 电气电子教学学报, 2024, 46(1): 205-209.
- [4] 程华, 陈科君, 王旭光, 等. 低噪声水声信号前置放大器设计[J]. 湖北大学学报(自然科学版)2024, 46(2): 282-288.