

基于电桥的高精度电阻测量系统的设计与实现^{*}

何乃龙^{1,2} 沙奕卓³ 行鸿彦^{1,2}

(1. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044;

2. 江苏省气象传感网技术工程中心 南京 210044; 3. 中国气象局气象探测中心 北京 100081)

摘要: 针对现有的电阻测量仪器和设备对于电阻测量的精度不高以及价格昂贵的问题,设计了一款基于电桥的高精度电阻测量系统。系统采用电桥电路作为测量电路,利用 STM32F103RBT6 单片机作为控制核心,主要通过基准电压电路和 A/D 模块电路实现测量电阻数据的采集与模数转换,同时,为了实现对电阻的高精度测量,通过硬件去耦滤波和软件数字滤波及误差补偿 2 种方式共同减小了接触电阻、导线电阻以及其他各类噪声的影响。系统在测量电阻时可以通过液晶显示六位有效位数字,即精度可达到十万分之一,分辨率为 1 mΩ;它具备电阻测量的操作简单、数据采集稳定、灵敏度高和成本低廉等特点,可以对各类电阻包括精密电阻的阻值测量,并且适用于应用于实验、维修和工程开发等多种场合。

关键词: 电阻测量;电桥电路;STM32F103RBT6;高精度;接触电阻

中图分类号: TN710-34 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Design and Realization of the precision measuring resistance system based on bridge

He Nailong^{1,2} Sha Yizhuo³ Xing Hongyan^{1,2}

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044, China;

2. School of electronic and information engineering, Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing 210044, China;

3. Atmospheric Observation Technology Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: According to resistance measuring instruments and equipment for precision resistance measurement not enough, and there is a high-cost problem, This article designed a high-precision resistance measurement system based on bridge. The system uses the bridge circuit as the core of the measurement circuit, the use of STM32F103RBT6 SCM to control the core of the system, mainly to achieve acquisition and analog-digital conversion of data to measure the resistance by the reference voltage circuit and A/D module circuit, at the same time, in order to achieve high-precision measurement of the resistance, both hardware decoupling filter and software digital filtering and error compensation methods by reducing the influence of the common lead resistance, contact resistance and other types of noise. The system measures the resistance can display six significant digit by the LCD, that accuracy can reach one hundred thousandth resolution 1 mΩ; Simple operation with resistance measurement, stable data acquisition, high sensitivity and low cost characteristics, can measure all kinds of resistance, including resistance precision resistors, and apply to be applied to a variety of occasions experiments, maintenance and engineering development.

Keywords: resistance measurement; bridge circuit; STM32F103RBT6; high-precision; contact resistance

1 引言

在生活、实验和工程实践中对于电阻测量的精

度^[1]不高,是个一直需要克服的问题,尤其在小电阻的测量问题上尤为突出,对于不能准确排除小电阻的影

收稿日期:2014-10

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61072133)、江苏省产学研联合创新资金计划(BY2013007-02, BY2011112)、江苏省高校科研成果产业化推进(JHB2011-15)、江苏省“信息与通信工程”优势学科平台资助项目

响而引起实验数据与理论值之间存在较大误差,从而影响实验效果^[2]。测量电阻的方法有很多种,如欧姆表法、伏-安法等,目前的电阻测量仪大多采用欧姆定律法。与此同时,电阻测量分小电阻测量与大电阻测量,小电阻测量施加电流源,大电阻测量施加电压源。但它们多数都不同程度地受电表精度和接入误差的影响,从而使测量精度受到影响^[3]。电桥法测电阻是一种比较法,上述的影响比较小,只要桥臂参考电阻很精确,数据采集稳定,那么就能很好的测量待测电阻^[4],并且可以通过电桥的基本公式可以初步的计算出测量的电阻阻值。

另外,目前 STM32 单片机广泛应用于工业控制、智能仪表、计算机网络通信、医疗、汽车等众多领域。作为系统的控制核心,采用 STM32F103RBT6 单片机作为系统的控制核心,使各部分电路协调工作^[5]。与传统单片机相比,STM32 系列基于专为要求高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用专门设计,它的主频和定时器的频率可以通过 PLL 倍频高达 72 MHz^[6],高分辨率的定时器协同 24 位的 A/D 芯片为高精度的电阻测量提供了重要保证。

设计的基于电桥的高精度电阻测量系统,采用电桥电路为核心测量电路,因为电桥电路的测量方法有效地避免了电源随时间变化造成的误差,也避开电流表分压、电压表分流、过多导线分压等问题^[7],同时还具备便于精确计算和安全性高的优越性;利用 ARM Cortex-M3 内核的高性能的 STM32 单片机为系统的控制核心,使得数据采集和处理更加高效,系统的性能更加稳定。

2 基于电桥的高精度电阻测量系统的设计

系统是以电桥电路作为核心的电阻测量电路,通过精度高且低温漂的电阻作为电桥的桥臂电阻,不仅解决了参考电阻阻值精确和受温度影响的问题;利用电桥公式反推待测电阻的基本公式,再通过程序算法对测量得到的电阻值进行修正;利用 STM32F103RBT6 单片机控制整个系统的运行。

系统为基于电桥的高精度电阻测量控制系统的设计,硬件部分的大体框图如图 1 所示:系统由电桥电路、STM32F103RBT6 单片机控制基本电路、基准电压电路、A/D 转换模块电路、电源电路、USB 下载与串口通信电路、TFTLCD 液晶显示电路、Flash 存储电路、RTC 时钟电路、按键控制电路和 LED 电路。它们共同实现电阻数据的测量、处理、存储和显示的功能,显示的数据不仅包括推算得到的电阻值还包括采集到的电桥电路输出的电位值,这样就方便对测得的电阻值进行修正提供可靠的数据支持,从而可以使最终电阻阻值达到更加精确的效果。

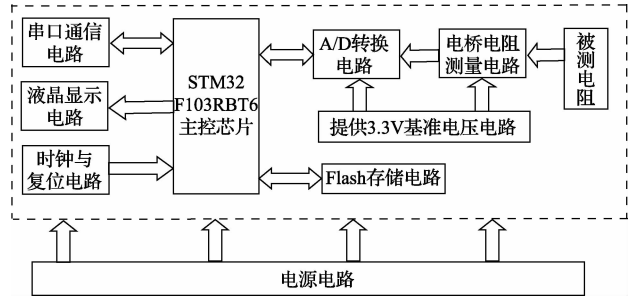


图 1 系统的硬件部分的大体

3 数据信号采集

系统以电桥电路作为电阻的测量电路,通过 A/D 转换模块电路实现系统电桥电路输出电位的采集与转换,通过选择高精度 A/D 转换芯片提高精度测量的方法,利用基准电压模块电路给电桥电路和 A/D 转换芯片提供基准电压,数字信号与模拟信号通过零欧姆的电阻进行隔离,减小不同信号之间的相互干扰,从而可以更加稳定的采集数据。

3.1 电桥电路的搭建

系统电桥电路是将原本电桥的 4 个桥臂的其中 1 个桥臂接待测电阻,另外 3 个桥臂都接精度为万分之一且低温漂的精密电阻,这样可以使得电桥电路工作更加稳定和测量电阻数据更加精确。

如图 2 所示系统电桥部分电路: R_{x1} 、 R_{x2} 和 R_{x3} 是 3 个精密电阻作为电桥其中 3 个桥臂的参考电阻,待测电阻由 HT3 接线端子或 GX16-2-HK 航空插头接入,通过航空插头接入可以大大减小了接触电阻的影响;电路通过零欧姆的电阻接地,减小其他接地器件的干扰从而使得电路工作更加稳定。

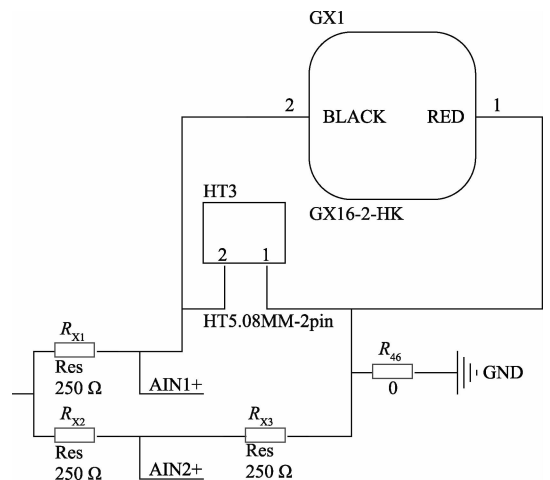


图 2 系统电桥部分电路

3.2 A/D 转换模块电路

本系统所采用的 A/D 芯片的型号为 AD7793,它具有 3

个差分模拟通道输入,从而可以实现 3 组通道进行采集电压数据,它是一款适合高精度测量应用的低功耗、低噪声、完整

模拟前端,内置一个低噪声 16 位/24 位 Σ - Δ 型 ADC,集成了片内低噪声仪表放大器,因此可直接输入小信号。

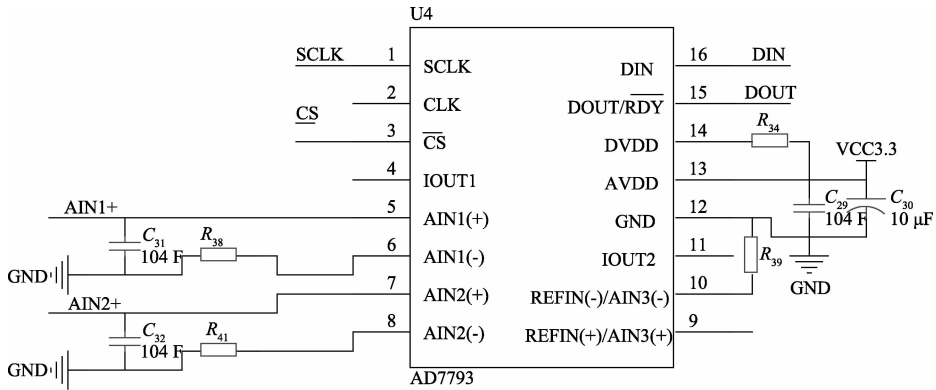


图 3 A/D 转换模块电路

系统中用到了其中 2 组通道实现了电桥电路两端的输出电位的采集,如图 3 所示:系统通过 AD7793 的通道 1 (AIN1)和通道 2 (AIN2)共同完成电桥电路输出电位的采集;在 A/D 芯片供电和电位采集部分接口都用了零欧姆电阻和滤波电容大大降低了外界噪声的干扰,使得 A/D 芯片工作更加稳定和高效^[8]。

3.3 基准电压产生电路

为了消除 A/D 芯片内置基准电压源噪声较大的问题和满足高测量精度的要求,系统选用外置的基准电压源。

系统采用的基准电压芯片是 AD743REF196,它可以提供 3.3V 的基准电压。

基准电压产生电路如图 4 所示:考虑到系统的电桥电路与 A/D 转换芯片都需要外部提供稳定的基准电压,而又电桥电路接入待测电阻不同和基准电压芯片本身负载能力影响,本系统就通过 2 块型号相同的基准电压芯片分别给电桥电路和 A/D 转换芯片通过基准电压,使得这两部分电路工作稳定并不相互干扰。

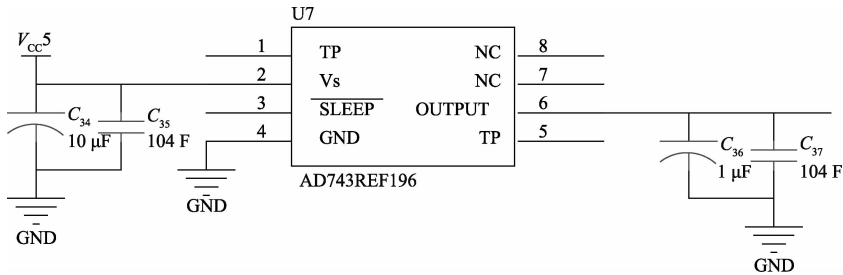


图 4 基准电压产生电路

系统通过上述的电桥电路、A/D 转换模块电路和基准电压电路 3 部分电路共同完成了系统待测电阻的接入、电桥电路输出电位的采集及模数转换和 A/D 转换芯片与单片机进行数据通信的功能;另外,系统采用低温漂的精密电阻作为电桥桥臂电阻和 24 位的 A/D 转换芯片保证了系统所要达到高精度的要求。

4 数据信号处理

对于通过电桥电路采集过来的信号,经过 A/D 转换模块电路模数转换后所得的数据传送给单片机进行首次计算处理待测电阻的阻值;再通过分析数据信号采集时的导

线电阻、接触电阻和系统电路电气特性等,以及通过具体的实验来进一步修正待测的电阻的阻值;通过上述 2 个步骤实现最终待测电阻阻值的获取,并可以通过 Flash 存储电路实现对最终的电阻阻值存储。

4.1 电桥测量电阻的原理与计算

在本系统中的电桥部分电路简易示意图^[9]如图 5 所示。A、B、C 和 D 点分别表示导线的接触点, U 是通过基准电压产生电路获得的基准电压, R_1 、 R_2 和 R_3 为精密电阻, R_x 为待测电阻, U_{out} 为电桥输出电压,这样就可以先测量 B 和 C 两点的电位,从而可以进一步计算得到待测电阻的阻值。

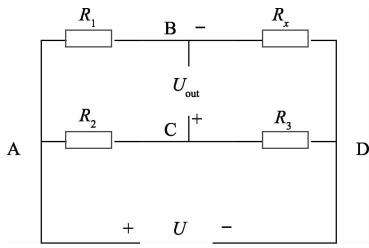


图5 电桥电路简化示意

根据图示的电桥电路可得:

$$U_{out} = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_x}{(R_2 + R_3) \cdot (R_1 + R_x)} \quad (1)$$

$$R_x = R_1 \cdot \frac{UR_3 - U_{out}(R_1 + R_2)}{UR_1 + U_{out}(R_1 + R_2)} \quad (2)$$

$$U_{out} = UCD - UBD \quad (3)$$

式中:电桥电路的基本公式如式(1)所示,通过对电桥电路两端的输出电位的采集从而可以计算得出上述的 U_{out} 如上述式(3)所示,单片机对采集过来的数据进行计算处理首先根据上述 R_x 的式(2)可以计算出待测电阻的阻值。

4.2 电阻阻值的修正

虽然系统对于各类噪声、导线电阻与接触电阻以及硬件电路的电气特性对最终电阻值的影响,通过硬件措施进行了严格改进,但是误差是永远存在的,那么就需要通过实际的实验,对产生的误差进行进一步分析,从而对上述计算所得的电阻阻值进行进一步修正,这样可以使得系统测得的电阻阻值更加精确^[10]。如表1所示系统所测的15组精密电阻的阻值。

表1 系统测量数据 (Ω)

序号	精密电阻 电阻值	本系统 测量值	两者的 误差
1	2	2.039	0.039
2	10	10.041	0.041
3	30	30.046	0.046
4	51	51.048	0.048
5	100	100.050	0.050
6	120	120.051	0.051
7	150	150.050	0.050
8	180	180.049	0.049
9	220	220.049	0.049
10	250	250.050	0.050
11	270	270.048	0.048
12	330	330.049	0.049
13	470	470.050	0.050
14	510	510.052	0.052
15	600	600.054	0.054
16	800	800.048	0.048
17	1 000	1 000.047	0.047
18	1 500	1 500.048	0.048
19	1 800	1 800.051	0.051
20	2 000	2 000.046	0.006

对于本系统所测量的精密电阻的阻值与其所标定的值进行了对比并在表1中附上了两者的误差值,为了使实验的结果更加明显和直观,通过MATLAB画出上面的15组数据的散点图并进行了线性拟合^[11],如图6所示。

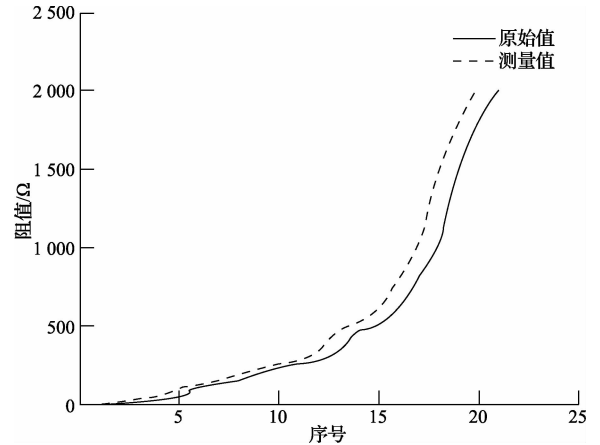


图6 精密电阻的原始值与系统的测量值的对比

为了使精密电阻的原始值与系统的测量值的对比人眼更加能够容易分辨,在MATLAB程序中将电阻原始值曲线向右移动了一位,这样就可以清晰的看出两者的大致趋势图;从表1和图6可以看出系统的测量值与电阻的原始值相差约为 0.050Ω ,这些误差来源可能是接触电阻、导线电阻和所用元器件自身的阻抗等,但从实验可以发现它们所存在的阻抗比较稳定,因而可以在STM32F103RBT6单片机中对系统测得的电阻阻值进行进一步补偿即将测得值减去 0.050Ω ,这样可以使得系统的测量值更加精确。

将设计出来的系统拿到了电路实验室中使用,发现系统在电阻测量过程中性能非常的好,并且与市场其他类型的电阻测量仪器对比有明显精度高和稳定性高的特点,另外它的电阻测量操作简单,而且更加智能,因此具有很强开发和推广的意义。

4.3 电阻阻值的存储

系统考虑到对于最终测量的电阻数据方便日后查看与实验使用,并且人工记录数据速度慢且查询也不方便,系统设计了Flash存储电路以方便用户对实验所得数据进行存储,如图7所示为Flash存储部分的电路。

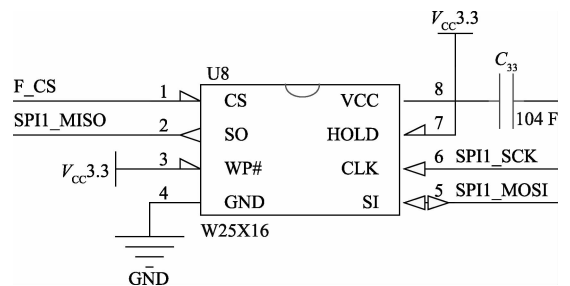


图7 Flash存储部分电路

系统通过 2 个配备的功能按键实现对 Flash 进行数据存储与读取的操作,其中 Flash 存储部分电路所用到的存储芯片是 W25X16,它的容量为 16 Mb 也就是 2 M 字节,完全满足电阻阻值数据存储容量的需求,由于该芯片是通过 SPI 的方式进行数据读写操作,STM32F103RBT6 单片机上也有 SPI 接口^[12],因此方便两者之前的通信,另外该芯片还具有占用 PCB 空间小和低功耗等特点,是该系统硬件电路更加精炼。

综上所述,通过对电桥测量电阻原理的分析,利用高性能 32 位的 STM32 单片机计算处理电阻阻值;通过误差分析和实验对计算所得到的电阻阻值进行进一步修正,使得最终所获取的电阻阻值更加精确,同时精度也达到要求;另外,系统还可以实现电阻阻值的存储和读取操作,使得系统的功能得到进一步的完善。

5 系统的软件设计

系统的软件设计主要是完成对实验数据进行计算与修正、用户操作界面的设计以及驱动系统各部分硬件电路,使得系统进行有条不紊的工作;系统软件的代码是通过 KEIL4 编译软件,利用 C 语言编写 STM32F103RBT6 单片机的程序来完成软件部分的设计。

5.1 软件数字滤波

系统硬件部分虽然采取了很多抗干扰提高精度的措施,但很难彻底抑制各种干扰,为了提高系统的稳定性和可靠性,本系统在软件设计中采用了软件数字滤波的方法增加系统的抗干扰能力。

系统在进行测量电阻时会有随机噪声对信号产生干扰,使得测量值在一定范围内上下波动^[13],因此软件滤波采用算术平均滤波法降低随机噪声的干扰。该方法去除几个最大值和最小值可避免干扰很大的变异信号对测量结果的影响,求平均值是最简单且有效的软件滤波方法。具体的软件滤波程序流程:连续采集一组经 A/D 转换后的数据,将这组数据按从大到小的顺序排序,根据预先设定的 N 值去除 N 个最大值和 N 个最小值后求余下的数据的平均值,将平均值返回给主程序用于计算待测电阻的阻值。

5.2 系统工作的软件流程

本系统工作流程主要为:系统初始化、数据采集控制、数据处理、数据存储控制和显示设置;其中系统初始化主要是 STM32F103RBT6 单片机^[14] 系统时钟、A/D 芯片、TFTLCD 液晶和 RTC 实时时钟的初始化以及 TFTLCD 液晶用户界面的设置,系统软件程序流程图如图 8 所示;对于数据信号的采集与处理地工作流程和实现方法在上文均匀进行详细叙述。本系统的用户操作界面具有丰富的显示内容^[15],以方便用户进行具体操作和观测具体的数据,同时 RTC 时钟模块在显示实时时钟,以方便用户在测量电阻过程中把握好时间。

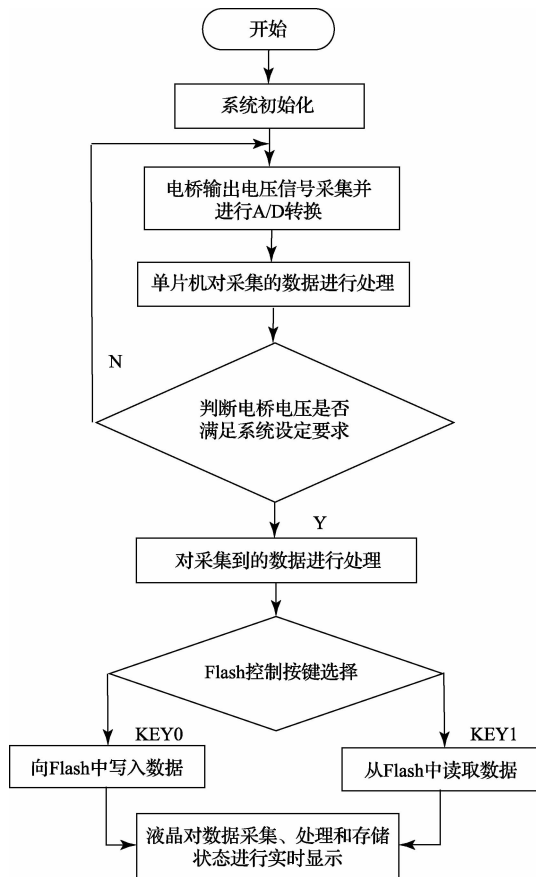


图 8 系统软件程序的流程

在系统软件程序的设计过程中引入了上述的软件数字滤波方法,最终完成了系统的软件部分的工作,系统能够正常稳定的工作并且可以获得精确的待测电阻的阻值。

6 结 论

设计的基于电桥的高精度电阻测量系统采用电桥电路作为电阻测量电路,利用 STM32F103RBT6 单片机作为控制核心,主要通过基准电压电路和 A/D 模块电路实现测量电阻数据的采集与模数转换,利用 2 片基准电压芯片分别给电桥电路和 A/D 转换芯片通过基准电压,使得电桥与 A/D 模块共同完成的数据采集部分的工作电路更加稳定;同时,为了实现对电阻的高精度测量,通过硬件和软件 2 种方式共同减小了接触电阻和导线电阻的影响。系统在测量电阻时可以通过液晶显示六位有效位数字,即精度可达到十万分之一,分辨率为 1 mΩ;并且提供实时时钟和 Flash 存储电路的辅助功能,方便测试者把握时间和实现对数据的存储;另外,本文设计的系统拥有丰富用户界面,可以进行个性化设计,它还具备测量操作简单、数据采集稳定、灵敏度高和成本低廉等特点,在一定程度上解决了现有的电阻测量仪器和设备对于电阻测量的精度不高以

(下转第 103 页)