

基于 MSP430 的热敏电阻高精度测温设计

倪秀辉, 张琳琳, 任国兴

(山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东青岛 266001)

摘要:针对快速响应高精度测温的要求,提出了一种基于 MSP430F2013 单片机的热敏电阻高精度测温方案。利用单片机片上 20 ppm(1 ppm = 10⁻⁶)电压基准和 16 位 A/D,辅助以非平衡电桥和过采样的方式,能实现高灵敏度的热敏电阻信号激励和数字化;通过多项式拟合的方法矫正非线性能使系统获得测温高精度。所完成的测温系统具有集成度高、测温精度高、功耗低、对分立器件要求低的特点。

关键词:热敏电阻;高精度;温度测量;MSP430

中图分类号:TP212.6 **文献标识码:**B **文章编号:**1002-1841(2009)03-0100-02

Design of High Precision Thermistor Temperature Measurement Based on MSP430F2013

NI Xiu-hui, ZHANG Lin-lin, REN Guo-xing

(Institution of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China)

Abstract: Aiming at the requirement of fast-response high-precision temperature measurement, this paper presented a thermistor temperature measurement scheme based on the MSP430 microcontroller MSP430F2013. Thermistor signal was excited and digitized with the on-chip 20 ppm voltage reference and 16 bit ADC. Using ratio metric operation, over-sampling method and 3-order polynomial fitting calculation, the system realized high-resolution, high accurate temperature measurement. This design has the feature of simple structure, low cost implementation and low power consumption.

Key words: thermistor; high precision; temperature measurement; MSP430

0 引言

测温电路通常需要恒压或恒流源、A/D 转换器和高精度运算放大器。当测量精度要求较高时,复杂的调理电路和高位数的 A/D 转换器使成本和功耗上升。随着电子技术的发展,出现很多低功耗大规模集成电路,其片上带有多种外设模块可以形成集成解决方案,为设计低功耗高精度测温系统提供了硬件基础^[1]。

利用 MSP430F2013 的片上 16 位 A/D 和 18 ppm(1 ppm = 10⁻⁶)电压基准,辅助以非平衡电桥和过采样的方式,能实现高精度的热敏电阻信号激励和数字化。所完成的测温系统具有集成度高、精度高、功耗低、对分立器件要求低的特点。

1 热敏电阻和其测温硬件电路设计

高精度温度测量通常可以使用 RTD 和高精度热敏电阻实现。RTD(尤其是铂电阻)具有卓越的重复性和稳定特性;热敏电阻互换性不好,阻值随温度变化的线性度也很差,但其灵敏度很高,响应速度很快,尤其是珠状玻封热敏电阻,这种特性在一些特殊应用中是有价值的(如海水温度剖面测量)。

在温度采集应用中,需要高分辨率 A/D 转换器把测量电路所含热敏电阻产生的信号进行数字化。MSP430 是 16 位单片机,其 F20XX 系列具有超低功耗和最高 16 MIPS 的运行速度, MSP430F2013(文中简称 F2013)内部有功能强大的 SD16_A(增强 16 位的 Σ - Δ ADC) 模块,集成程控增益放大器(PGA)和温漂 18 ppm 的 1.2 V 参考电压^[2],适合做低功耗智能传感器信号

采集和处理 MCU。

系统利用 MSP430F2013 进行智能数据采集,从前端传感器采集来的数据经过程控增益放大器进行放大,随后进入模数转换器进行模数转换,转换完成后进行滤波和校正计算最终获得温度结果。

图 1 是系统电路图。F2013 片上 1.2 V 电压基准的特点是低温漂 18 ppm,配置内部缓冲后其 1 mA 的输出电流能力也足够用于激励热敏电阻电桥。该电压基准既为 A/D 转换器产生基准,同时用于激励热敏电阻电桥,以形成比值测量系统,因为比值工作,所以消除测量系统中的漂移误差,该方法是完全比值,电压源变化不降低系统性能^[3]。

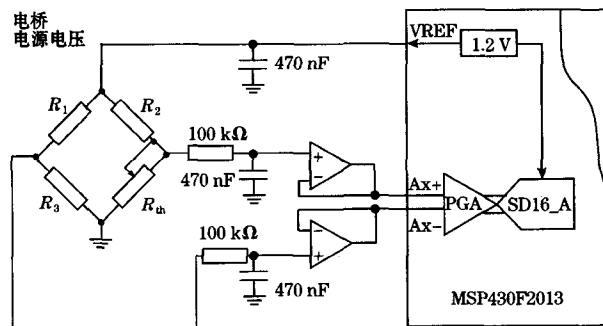


图 1 系统硬件电路图

电路中 3 个电阻器与热敏电阻 R_{th} 构成一个单臂电桥,电桥的作用在于激励出热敏电阻差分电压信号。设计中 R_1 、 R_2 、 R_3 均采用 7.5 K(1/1000)25 ppm 的标准精密金属膜电阻,热敏电

阻值3~15 Ω变化会形成约-0.25~+0.20 V的差分信号输出。当SD16_A工作在内部电压基准、增益为2的差分输入模式时,F2013适用±0.25 V的输入信号范围,通过Σ-ΔADC的过采样技术系统能达到所需的μV级测量分辨率。

F2013的SD16_A模块不带输入缓冲,其差分输入阻抗在PGA增益等于2时约为250 kΩ,直接测量输出阻抗为kΩ级的电桥输出时,会造成mV级的测量偏差。为提高测量精度,要在外部提供输入缓冲。缓冲运放选用低噪低温漂双运放^[4]。

系统对前端模拟电路分立器件要求不高,选择温漂、时漂小的元器件可以提高系统整体稳定性,各种容差可在单片机软件中进行校正。同时系统具有低功耗的特点,当运行在1 MHz的时钟条件下,F2013工作电流为220 μA,其内部的SD16_A模块和参考电压模块耗电小于1.5 mA(采样时峰值电流)。由于间断休眠的运行方式降低了系统耗电,系统连续采样温度整体运行功耗(包括前端电路)小于1 mA,适合电池供电的连续温度采集应用。

2 STEINHART-HART 方程和测温电路的校正方法

NTC热敏电阻,其阻值随着温度升高而迅速减小,阻值和温度的关系近似于指数关系。使用一些建模技术可以将NTC的热敏电阻的精度调制得很高^[5]。麻省科德角伍德修尔海洋学研究所工作的2名海洋学家在海洋研究中为了得到精确的温度测量方法,通过累试法加上数字直觉,得出

$$1/T = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3 \quad (1)$$

式中:T指开氏温标的绝对温度;A、B、C是热敏电阻常量参数;R是热敏电阻的欧姆电阻值;ln是自然对数。

式(1)即为以2位科学家命名的Steinhart-Hart方程,三阶方程可以在0~100℃的测温范围内达到±0.001℃曲线拟合^[5]。A、B、C系数必须先根据3个校准点确定,它们是在有关温度量程低端、中点、高端的电阻值。将每对电阻-温度值都插入到公式中,产生一组3方程联立方程式,解联立方程就可得到A、B、C。该设计中使用MF51高精度热敏电阻,温漂为0.002℃/年,其三阶Steinhart-Hart方程R-T模型曲线如图2所示,并给出了18个实测点和曲线拟合误差。

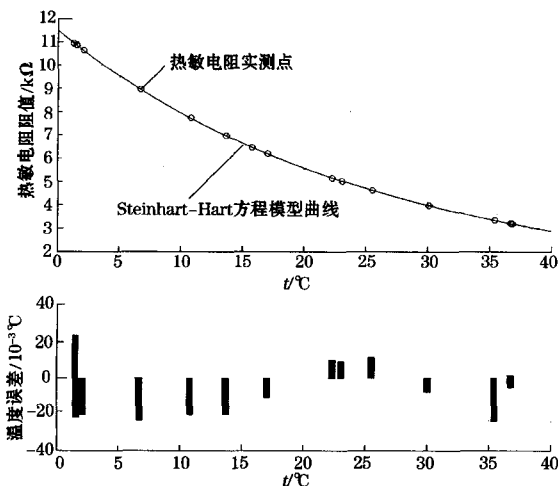


图2 所使用的MF51高精度热敏电阻R-T特性曲线

用一等标准温度表测得摄氏温度,用6位半数字表测得此温度下热敏电阻的阻值,在0~40℃温度范围内,18个实测点的温度与曲线点最大温度误差为0.026℃,可见方程拟合精度高于0.03℃.使用更高分辨率的温度测量设备和更高精度的阻值测量设备,还可以获得更高校正精度的R-T模型曲线。

3阶Steinhart-Hart方程转化计算得到每个ADC量值与温度值对应关系,如图3所示。图中圆点表示实测所得温度和ADC量值对应点。

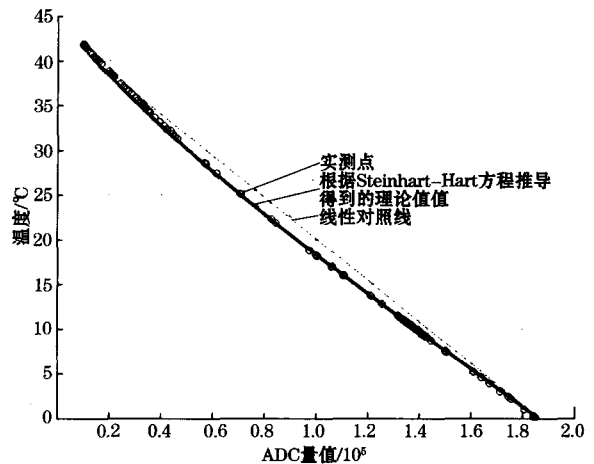


图3 ADC量值与温度对应曲线

实际电路中元器件的非理想特性造成了实测点与理论值的小量偏差,系统的主要误差源有电桥电阻的容差和温漂、SD16_A模块的误差和温漂以及缓冲运放失调电压等。选用高精度的电路元器件和硬件校正措施可以将偏差减小,但必然会造成成本的上升。

软件校准是另一种可行的方法:根据实测点计算出拟合函数公式(三阶多项式就可以达到0~40℃温度范围内小于0.01℃的拟合精度),然后在MCU中用此拟合函数计算所测得ADC量值对应的温度值。该方法虽然需要测取大量温度和所对应ADC量值,但它使得系统最终测温精度依赖于后期校正工作,而不是依赖于高精度的电路元器件。用一等温度计测得93个数据点获得三阶拟合函数可使系统测温误差小于±0.1℃,低温漂的电桥电阻和低噪双运放就可以保证系统最终测温精度为0.1℃.同时MSP430单片机具有较强的运算能力,采用浮点运算实现三阶多项式拟合并不耗费系统过多资源。

3 系统软件设计

采用C语言对单片机编程,主程序流程图如图4所示:主程序初始化部分主要是系统时钟的初始化,使系统工作频率为DCO指定的标准1 MHz时钟;通过SD16相关寄存器,设定SD16工作在开中断连续采样模式、选择差分通道并设内部增益为2倍;最后打开1.2 V内部参考电压为外部电桥供电。在1 min延时等待输出信号稳定后,打开SD16A开始采样,系统进入休眠模式,等待SD16A完成256次采样并退出休眠模式。最后将得到的ADC量值通过三阶拟合函数运算得到温度值。

MCU循环完成该过程,连续得到温度值。SD16A可以达到4 K的采样速度,但是过采样需要256次结果(下转第120页)

$$\sum \sin(t/366\ 693) [K \sin(t/366\ 693) - \lambda] = 0$$

根据上式求得 K 的数值:

$$K = \frac{\sum \lambda \sin(t/366\ 693)}{\sum \sin^2(t/366\ 693)} \quad (6)$$

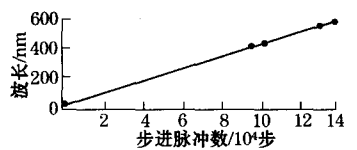
获得 K 的计算式(6)后,代入表1中波长 λ 和步进脉冲 t 的实测数据,求得

$$K = 1\ 585$$

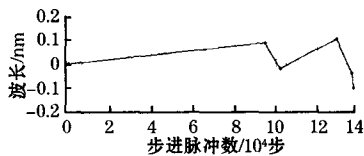
最后确定波长标定公式为:

$$\lambda = 1\ 585 \sin(t/366\ 693) \quad (7)$$

为验证波长标定公式的拟合效果,使用不同的步进脉冲 t ,代入到式(7)中,计算对应谱线的波长 λ ,这些数值可以绘制出拟合曲线如图3所示。图中上半部分是拟合曲线,同时标出了实测数据点的位置;图中下半部分是拟合残差的分布情况,从中可以看出,所有5条谱线的拟合偏差都小于0.1 nm。



(a) 正弦拟合曲线



(b) 拟合残差分布

图3 正弦曲线拟合及其残差

得到了波长标定式(7)以后,可以把这个函数关系式写入

到仪器的测量程序中,便可以进行正常的光谱测量了。这些是对1 200/mm光栅所进行的标定工作,随后,又对600/mm光栅进行了类似标定。曾经使用多种光源,经过了多次测试,绘制了多条光谱曲线,对标定过程进行检验。实验结果达到预期要求,标定精度满足仪器设计精度要求。

4 结束语

针对自动单色仪这种测量仪器的实际结构,进行了技术分析与实验验证,充分表明正弦曲线拟合标定技术是一种很好的技术方案。这种方法的标定方程符合光栅的理论方程,无需太多的标定点就可以满足仪器的测量精度要求。由于待定参数选择适当,大幅度减少拟合运算过程中的计算复杂性,计算量与线性拟合相当。基于上述优势,可以预见,这种正弦拟合标定技术会获得广泛应用。

参考文献:

- [1] 徐海松,叶关荣. 快速光谱光度计的研制. 仪表技术与传感器, 1996(10):20-21.
- [2] 邓世虎,张荣君,倪卫明,等. 智能化多光栅单色仪的研制. 上海红外与毫米波学报, 2002, 21(S): 133-137.
- [3] 沈杭城,潘建根,冯华军,等. 多通道快速光谱仪的波长定标. 光学仪器, 2006, 28(2): 51-55.
- [4] KINGSLAKE R. Applied Optics and Optical Engineering. New York and London: Academic Press, 1969, Chapter 2: Diffraction gratings.
- [5] 陈光,任志良,孙海柱. 最小二乘曲线拟合及Matlab实现. 软件技术, 2005, 24(3): 107-108.

作者简介:乔道鄂(1963—),工学博士,主要从事机电系统测量与控制方面的研究. E-mail: qiaodaoye@gmail.com

(上接第101页)

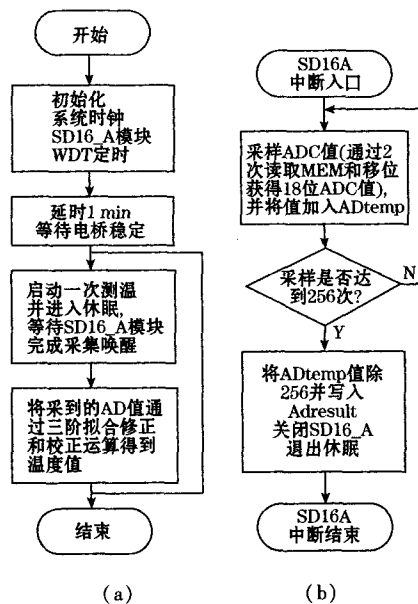


图4 程序流程图

取平均,系统最终采样速度约为13 Hz,能够有效克服因偶然因素引起的波动干扰,提高采样精度,尤其适用于温度等变化较缓慢的物理量。

4 结束语

该系统硬件设计简单,采用具有很高的集成度的MCU芯片MSP430F2013为核心,片上完成信号放大、A/D转换、软件滤波和非线性校正,实现了低成本高精度测温。具有对分立器件要求低、低功耗等特点。对热敏电阻高精度测温应用开发具有一定的参考价值。系统温度分辨率超过0.001℃,系统测温误差小于±0.1℃,实际设计中如果采用更高精度和分辨率的温度标定设备和用更多的数据点计算高阶拟合函数,系统会达到更高的精度。

参考文献:

- [1] 赵志诚. 国家传感器科技攻关和技术发展. 仪表技术与传感器, 2000(8):1-3.
- [2] Texas Instruments Inc. MSP430F20X3 Mixed Signal Microcontroller Datasheet[EB/OL]. [2006-07-09]http://www.ti.com/.
- [3] GRADY A O'. 热敏电阻结合高分辨率ΔA/D变换器测量温度[EB/OL]. [2005-08-01]http://www.analog.com/.
- [4] LEPKOWSI J. 嵌入式应用的温度测量电路[EB/OL]. [2006-07-09]http://www.microchip.com.
- [5] ATP INC. NTC thermistor engineering notes[EB/OL]. [2006-10-01]http://www.atpsensor.com/.

作者简介:倪秀辉(1981—),硕士研究生,主要研究方向为海洋仪器和智能仪表. E-mail: nixiuhui@gmail.com