

一种实用的精密气温测量算法与实现

敖振浪 李源鸿 吕玉嫦

(广东省大气探测技术中心, 广州 510080)

提 要: 为了精确测量气温, 可以用铂电阻(Pt100)作为温度传感器制作测温装置, 但是铂电阻具有电阻与温度成非线性特性。从介绍铂电阻特性入手, 在实践中提出了一种铂电阻传感器非线性信号转换成温度的精密算法, 也就是软件查表法和平均法进行非线性误差粗、精两级校正。这种算法由硬件和软件两部分构成。硬件是以性能优越的 A/D 转换器为核心组成的具有自校准和系统校准功能的精密转换电路, 软件由给出的主要源程序代码组成。

关键词: 气温测量 算法 精密校正 铂电阻(Pt100) 设计

A Pragmatic Precise Air Temperature Measurement Algorithm and Its Realization

Ao Zhenlang Li Yuanhong Lv Yuchang

(Guangdong Atmospheric Observation Technology Centre, Guangzhou 510080)

Abstract: In order to accurately measure the temperature, it can be taken platinum resistance (Pt100) as a sensor of temperature measurement device, but it brings about the temperature-resistance nonlinear characteristics. A unique precise algorithm for the conversion of platinum resistance nonlinear signals into air temperature is put forward by introducing platinum resistance characteristics, and it is also the software table look-up law and the method of average which carry out the two levels of error adjustments. The realization of this unique algorithm consists of the hardware and software parts. The hardware is based on the good performance of A/D converter for the core component of the self-calibration and system calibration features in the precision conversion circuit, and the software is given by the principal source code, to achieve precision temperature measurement. The method is well applied in the temperature measurement devices.

Key Words: temperature measurement algorithm precision correction platinum resistance (Pt100) design

资助项目: 广东省科技厅科技计划项目“地面气象综合探测自动化系统的研制”(2005B60401024)

收稿日期: 2008年1月23日; 修定稿日期: 2009年2月5日

引 言

在空气温度测量中,无论是在自然界还是实验室,许多场合都要求测量精度达到 0.03°C 。为了满足精密的测量要求,通常使用铂电阻传感器(Pt100),但是它的温度变化特性是非线性的,目前常用的误差补偿方法是用分度查表法,但这种校正精度还是不能满足精密测量的要求。因此需要一种精密的误差补偿算法,还需要设计精密的转换电路,两者结合起来才能实现高精度温度测量。通过推导和实践,总结出一种更加精密的、容易实现的补偿方法,并且在自动站温度现场标校模拟仪器上得到很好的应用。下面重点介绍这种方法的推导过程和软件、硬件的实现。

1 温度传感器特性分析

温度是表征物体冷热程度的物理量,可以通过比较敏感的物体随温度变化而其电阻或电压发生变化等特性的方法来间接测量。金属铂(Pt100)的电阻值随温度变化而变化,并且它的重现性和稳定性都很好,目前精确测量气体温度普遍采用它。Pt100 铂电阻温度传感器零度阻值为 100Ω ,电阻变化率为 $0.3851\Omega/^{\circ}\text{C}$ 。铂电阻温度传感器的精度高稳定性好,是中低温段($-200\sim 650^{\circ}\text{C}$)最常用的一种温度检测器。它的特性关系式^[1]为:

当 $-200^{\circ}\text{C} < t < 0^{\circ}\text{C}$ 时,

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \quad (1)$$

当 $0^{\circ}\text{C} < t < 630.74^{\circ}\text{C}$ 时,

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (2)$$

其中 R_t 和 R_0 分别是在 $t^{\circ}\text{C}$ 和 0°C 时的电阻值。 $A=3.90802 \times 10^{-3}$, $B=-5.80195 \times 10^{-7}$, $C=-4.27350 \times 10^{-12}$ 。根据关系式画出温度与电阻之间的近似曲线图,如图 1 所

示。从关系式可以看出,存在二次项、三次项和四次项,就是铂电阻的阻值与温度之间不是线性关系,因此在精密测量的实际应用中必须考虑它的非线性校正问题。

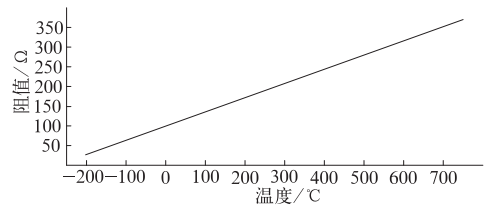


图 1 温度-电阻曲线示意图

2 信号/温度转换算法的推导

对于精度级别为 1/3DIN B 和 A 级铂电阻传感器,从铂电阻特性公式的式(1)和式(2)中计算可以得出,在 $-100^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$ 的气温测量范围里,通过计算可得表 1,上述式(1)的二次项、三次项和四次项造成的温度最大误差为 -1.7286°C ;式(2)二次项造成的温度最大误差为 -1.5066°C 。因此在计算气温时可以首先考虑一次项和常数项组成的线性关系式 $R_t = R_0(1 + At)$,然后再采用补偿方法进行二次项、三次项和四次项校正^[2]。

表 1 非线性误差表(以每 10°C 为间隔)

温度 t ($^{\circ}\text{C}$) (负温区)	二次、三次和 四次项造成 误差($^{\circ}\text{C}$)	温度 t ($^{\circ}\text{C}$) (正温区)	二次项造成 误差($^{\circ}\text{C}$)
-100	-1.7286	0	0.0000
-99	-1.6909	10	-0.0151
-90	-1.3741	20	-0.0603
-80	-1.0665	30	-0.1356
-70	-0.8030	40	-0.2411
-60	-0.5807	50	-0.3767
-50	-0.3975	60	-0.5424
-40	-0.2510	70	-0.7382
-30	-0.1395	80	-0.9642
-20	-0.0613	90	-1.2204
-10	-0.0152	99	-1.4766
0	0.0000	100	-1.5066

对简化以后的线性关系式 $R_t = R_0(1 +$

At), 可以用图 3 电路来实现。图 3 电路中电流 I 同时流过 R_0 、 R_t 和 R_3 , 则 $IR_t = IR_0 + IR_0At$, 即 $V_t = V_0 + AV_0t$, 那么, $t = \frac{V_t - V_0}{AV_0}$, 也就是说, 只要分别测量出标准电阻 R_0 和被测电阻 R_t 两端的电压 V_0 和 V_t , 就可以计算出温度值 t , 但这个温度是没有进行非线性补偿的。

3 粗、精误差校正算法的推导

3.1 粗误差

对于设计高精度的铂电阻测温装置, 必须进行精密的误差校正。但对于嵌入式系统来说, 对式(1)和式(2)直接进行公式求解法求解出温度 t 是难以实现的。线性关系式

$$t = \frac{V_t - V_0}{AV_0}$$

可以直接计算出线性部分, 但上述式(1)和式(2)的二次项、三次项和四次项造成的温度误差由下面算法获得。在 $-100^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$ 内事先以每 1°C 为间隔预先计算出其对应的误差, 精确到小数点后 4 位, 如表 1 所示, 存储在一张误差分度表 $P_TCalError[101]$ 和 $N_TCalError[101]$ 中, 显然, 以 1°C 为间隔进行补偿是不能满足 0.03°C 精度或者更高精度, 因此, 把此误差分度表定义为粗误差, 如图 2 所示的 X_1 和 X_2 。传统的非线性校正只是考虑这种粗误差。

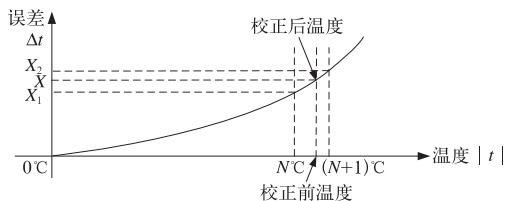


图 2 误差校正示意图

3.2 精误差

精误差校正是如何实现的呢? 从误差分

度表中可以看出, 分度之间还有最大 0.03°C 的误差, 为了再对 1°C 间隔之间进行微小误差校正, 也就是总结出来的所谓精校正, 方法是, 从图 2 可以看出, $N^\circ\text{C}$ 和 $(N+1)^\circ\text{C}$ 之间的误差变化很小, 可以近似看作线性, 把它分为 10 等分, 根据 t 的小数点后 1 位数字 a 来计算真实误差 X , 计算方法是 $X = X_1 + a \times \frac{X_2 - X_1}{10}$, 其

中以公式 $t = \frac{V_t - V_0}{AV_0}$ 计算出来的温度值取整作为误差分度表的地址 N , 分别读取该 N 单元和 $N+1$ 单元的温度粗误差值 X_1 和 X_2 和 t 的小数点后 1 位数字 a , 然后将 X 与 t 相加就得出校正后的温度值。校正工作可以全部通过软件实时计算来完成。对于 A 级铂电阻来说, 可以计算, 从表 1 看出, 1°C 间隔之间的误差在 -100°C 和 -99°C 之间最大, 误差 $= -1.7286 - (-1.6909) = -0.0377^\circ\text{C}$, 那么通过这种精误差补偿后铂电阻的最大非线性误差为 -0.00377°C 。

4 硬件支持

4.1 精密模/数转换电路的设计

为了实现高精度的气温测量, 首先要设计分辨率高、温度漂移小的模/数电路, 这是精密测温的关键所在。本设计主要采用了核心器件十六位分辨率 A/D 转换器 AD7706 (U1)、恒流源 HL1、标准电阻 R_0 、被测铂电阻 R_t 和基准参考电压源 REF198 (U2), 原理图如图 3 所示。AD7706 利用了 $\epsilon - \Delta$ 转换技术实现了 16 位无丢失代码性能, 三线串行输入数字接口, 可以通过软件配置芯片的增益值、输入信号极性和数据更新速率。还具有自校准和系统校准功能, 能够消除器件本身和系统的增益以及偏移误差, 也是提高测量精度的关键技术之一。电路中由 U2 产生一个非常稳定的 4096mV 基准电压加到测

量信号取样电路上,恒流源 HL1 产生恒定的 2mA 电流,同时流过标准电阻 R_0 和被测铂电阻 R_t 。实践证明,电流不能太大,否则铂电阻 R_t 会产生自热而影响测量精度,太小又容易受到毛刺干扰同样影响测量精度。这里阻值 100 Ω 标准电阻 R_0 精度应优于 $\pm 0.01\%$,温度系数应优于 10^{-6} ,而被测铂电阻 R_t 的阻值是随温度变化而变化的,在自然界气温测量范围 $-100^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$ 中, R_t (Pt100) 的阻值变化范围是 60.26 \sim 138.51 Ω ,那么 2mA 电流流过 R_t 时它的电压降范围是 120.52 \sim 277.02mV。实际测量方法是通过模拟开关 SW1(ADG507)切换交替测出 R_0 和 R_t 的压降,再经过计算得出温度值。值得一提的是,这里用同一模拟通道和同一

A/D 转换器对 R_0 和 R_t 的电压降进行交替测量,能够消除 R_0 和 A/D 转换器由于温漂而产生的系统误差。

本设计中, R_3 是必不可少的,因为 AD7706 的输入差分放大器负端(-)输入接近 0 电平的位置线性不好, R_3 产生台阶电压迫使离开非线性区。注意基准电压输出端应该并联 10u 和 1000p 去耦电容 C8 和 C9,同时第一通道输入端须加入由三个 1000P 电容 C5、C6、C7 和两个 10K 电阻 R_1 、 R_2 组成的去耦电路,因为微小的噪声电平都会影响 A/D 转换器转换精度^[3]。由于被测铂电阻传感器的安装一般远离 A/D 转换电路,所以必须采用四线制接法,避免引线电阻引入附加误差。

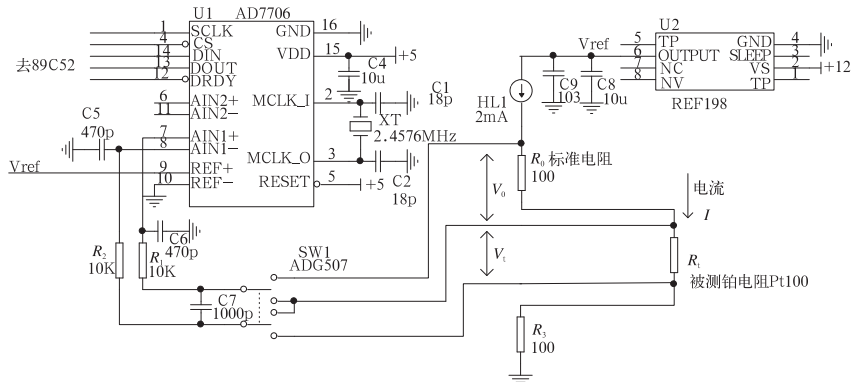


图 3 高精度 A/D 转换电路

4.2 转换精度分析

前面讲到,在 $-100^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 的气温测量范围,图 3 中 2mA 电流流过 R_t 时它的电压降范围是 120.52 \sim 277.02mV,但是在常规气象观测中气温测量范围通常是 $-60 \sim 60^\circ\text{C}$ ^[4],所以 2mA 电流流过 R_t 时它的电压降范围是 153.1 \sim 246.9mV,流过 R_0 和 R_t 的电压降都是 100.0mV,因此 AD7706 的最大共模输入电压为 446.9mV。因为 A/D 转换器的基准参考电压等于 4096mV,也就要求输入信号经过放大以后必须满足电压 \leq

4096mV,由此算出 AD7706 的增益应该设置为 9.16 倍,实际取 8 倍,AD7706 的分辨率是 16 位,这时信号电压分辨率 = $8 \times 446.9 \div 65536 = 54.6\mu\text{V}/\text{字}$; $-60 \sim +60^\circ\text{C}$ 全程范围温度分辨率 = $120^\circ\text{C} \div 65536 \text{ 字} = 0.0018^\circ\text{C}/\text{字}$ 。一般来说最后一位是不确定的,所以 A/D 转换最小分辨率是 $0.018^\circ\text{C}/\text{字}$ 。

5 软件编程

粗、精误差校正可以通过软件来实现。采用单片机高级语言 Keil C51 编程^[5],代码

高效简洁,易读。根据推导公式 $t = \frac{V_t - V_0}{AV_0}$ 计算温度,其中 $A = 3.90802 \times 10^{-3}$, V_t 和 V_0 是 A/D 转换器转换出来的实测电压值。

举例,假设实测数字量 $V_t = 226$, $V_0 = 200$,那么上述代码算出温度 $t = 33.10^\circ\text{C}$ 。

6 结束语

实现精密的温度测量,取决于硬件电路的设计方法和元器件的稳定性和精度,同时必须找到可行的微小误差校正方法。针对铂电阻(Pt100)非线性温度特性,本设计总结出来一种独特的粗和精两级误差校正方法,粗校正是以 1°C 间隔分度快速查表,精校正是在粗校正基础上用平均法以 0.1°C 间隔进行微小误差校正。硬件以性能优越的 AD7706 为核心构成精密转换电路,它具有实时自校

准和系统校准功能。本设计方法既能应用于一般的工程测量,也可以应用于较高精度的测温装置。据此方法设计的自动站温度现场标校模拟仪器通过与气象一级计量检定设备比对,在常规气象观测的气温测量范围 $-60 \sim +60^\circ\text{C}$ 内,能够实现不确定度 0.03°C 。

参考文献

- [1] 广州德力权仪表有限公司. 铂电阻温度传感器[OL]. http://www.sensycon.cn/product/gb/product_detail.asp?productid=19
- [2] 张翠莲,杨家强,李伟,等. 铂电阻温度传感器的非线性特性及其线性化校正方法[J]. 微计算机信息, 2002, 18(1): 43-45.
- [3] 张雄希,田向丽,海红. 一种便携式高精度数据采集系统的设计[J]. 电子技术应用, 2006, 32(4): 68-70.
- [4] 胡桂芳,李芸,李德萍. 山东近百年来的最高、最低温度变化[J]. 气象, 2004, 30(11): 43-46.
- [5] 电子开发网. Keil C51 使用详解[OL]. <http://www.dz kf.cn>, 2006-12-20.