

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.03.014

一种高精度温度测量系统设计

杜帅帅¹, 柯沪琦², 胡燕海^{1*}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;
2. 宁波戴维医疗器械股份有限公司, 浙江 宁波 315040)

摘要:针对温度测量中精度偏低的问题,提出了一种基于铂电阻温度传感器 PT100 的高精度温度测量系统。介绍了铂电阻测量温度的原理;设计了四线制铂电阻的接线电路;设计了减弱外界干扰的电路;通过在软件中加入补偿值的方法提高测量精度。实验结果表明系统能够实现高精度的温度测量且稳定性好。该系统能够实现多数生产场合下的温度测量,操作简易,精度较高。

关键词:温度测量;铂电阻;四线制;补偿值

中图分类号:TH811 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2016)03-0061-04

Design of Temperature Measurement System with High Precision

DU Shuaishuai¹, KE Huqi², HU Yanhai^{1*}

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;
2. Ningbo David Medical Devices Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315040, China)

Abstract: Aiming at the problem of low temperature measurement precision, a high precision temperature measurement system was put forward based on the PT100 platinum resistance temperature sensor. This paper introduced the principle of platinum resistance measuring temperature; Designed a four wire system of platinum resistance connection circuit; Designed the circuit which could reduce the interference; The accuracy of measurement was improved by joining in the software compensation value method. Experimental results show that the system can realize high precision temperature measurement and has good stability, this system can be applied to most of the production situations of temperature measurement, and it is also easy to operate and has high precision.

Key words: temperature measurement; platinum resistance; four wire; compensation value

温度对于工业生产和日常生活有着非常重要的影响,温度的检测和调节的准确性直接影响着产品的生产品质和人们的生活体验,随着社会的发展,对于温度参数的要求也越来越高,伴随而来的是测量精度的要求也越来越高。

张瑜等^[1]利用恒流源驱动四线制铂电阻传感器,实现了对温度的高精度检测,有效的避免了铂电阻的引线电阻,但是没有对测量误差进行标定,精度不够高。方益喜等^[2]设计出一种三线制铂电阻利用恒流源驱动的温度测量系统,对系统的测量误差和温度漂移问题进行了分析并给出了校准方案,但是没有给出

引线电阻对温度测量影响的解决办法,无法保障系统采集数据的准确性。刘孟德等^[3]介绍了恒流源驱动热敏电阻的温度测量方法,分析并解决了测温系统中存在的热敏电阻的引线电阻和自热效应问题,但是对于存在的外界干扰问题没有分析,难以保证系统在实际应用中的有效性。

铂电阻温度传感器有线性度好,精度高,响应速度快等优点。基于铂电阻的以上特性,铂电阻经常被作为高精度测量系统的理想测温元件。但是作为一种高敏热传感器,在将铂电阻应用于高精度的温度测量时还存在一些问题需要解决:自热效应、引线电阻、外界

收稿日期:2015-11-09;修回日期:2016-01-20

基金项目:宁波市重大科技专项(2015C110033)。

作者简介:杜帅帅(1989),男,安徽淮北人,硕士研究生,主要研究方向为机电设备控制技术。通信作者:胡燕海(1966-),男,浙江舟山人,教授,硕士研究生导师,主要从事机电产品开发研究。E-mail:huyanhai@nbu.edu.cn

干扰等^[4-5]。为了有效解决以上问题,系统从硬件和软件 2 个方面进行优化来实现高精度的目标要求^[6-7]。

1 温度测量电路与工作原理

1.1 电路系统组成

为了更好地实现高精度测量工作,系统选用恒流源电路驱动四线制铂电阻,配合信号调理电路得到输出电压,将电压经过 A/D 转换发送至单片机中进行算法处理、存储,通过液晶屏进行数据显示^[8]。系统可有效减弱自热效应、引线电阻误差以及外部信号的干扰。系统组成如图 1 所示。

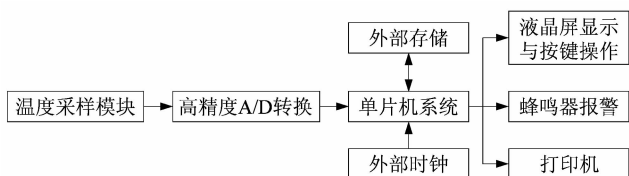


图 1 电路系统组成

Figure 1 Circuit system

1.2 铂电阻的特性

能否准确地测量出铂电阻传感器在电路中的电阻值,是铂电阻作为测温元件进行温度采样的关键。参照 IEC751 国际标准,常用的铂电阻温度传感器 PT100 ($R_0 = 100 \Omega$) 具有以下温度特性:

在 $-200 \text{ }^\circ\text{C} < t < 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围

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

在 $0 \text{ }^\circ\text{C} < t < 850 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围

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

式中: R_0 为 PT100 在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的电阻值; R_t 表示 PT100 在温度 t 时的电阻值; $A = 3.9083 \times 10^{-3}$; $B = -5.7750 \times 10^{-7}$; $C = -4.1830 \times 10^{-12}$ 。可以看出 PT100 线性度较好,其温度特性公式可简化为

$$R_t = R_0 (1 + 0.003851t). \quad (3)$$

由 $R_0 = 100 \Omega$, 可得出温度计算公式

$$t = (R_t - 100) / 0.3851. \quad (4)$$

根据 PT100 的温度特性^[9-10],设计温度采样模块,如图 2 所示。

1.3 四线制铂电阻接口电路设计

为减少铂电阻引线电阻对检测精度造成的误差,PT100 采用四线制接法^[11]。接口电路如图 3 所示。

在图 3 所示接法中,利用恒流源驱动铂电阻,铂电阻两端电势差先经过运算放大器放大一定倍数后传输至 A/D 转换器中。由图 3 可知引线电阻 R_{L1} 和 R_{L4} 不影响测量,根据运算放大器虚断特性得出引线 $L2, L3$ 中没有电流,故引线电阻 R_{L2}, R_{L3} 对测量结果没有影

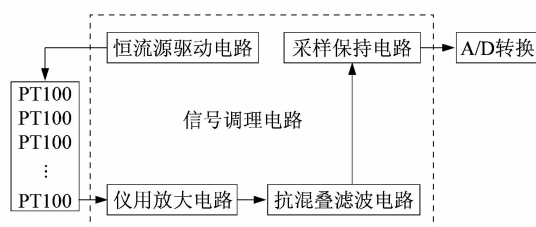


图 2 温度采样模块

Figure 2 Temperature sampling module

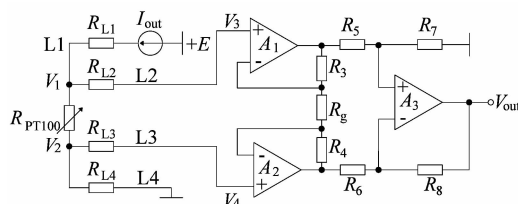


图 3 PT100 四线制接线图

Figure 3 PT100 four-wire wiring diagram

响,可以得出 $V_1 = V_3, V_2 = V_4$, 故

$$V_{out} = A_d (V_3 - V_4) = A_d (V_1 - V_2), \quad (5)$$

$$R_{PT100} = (V_1 - V_2) / I = \frac{V_{out}}{A_d} \cdot I. \quad (6)$$

式中 A_d 为运放增益。由式(6)可知引线电阻对热电阻测量没有影响。

在实际应用中,电流流过电阻会产生热量,造成测量误差,根据电阻发热功率 $W = I^2 R$ 可知,发热程度受通过电流和自身电阻影响。其中电阻是测量温度的关键变量,不可人为干涉,所以为了减少自热效应,要确保恒流源电流足够小。将 PT100 型铂电阻用不锈钢保护管进行封装,对其进行自加热,测试数据显示,当输入恒流源电流达到 1 mA 时,自加热造成的温升为 $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$; 当电流为 $500 \mu\text{A}$ 时,自加热造成的温升只有 $0.003 \text{ }^\circ\text{C}$ 。所以当恒流源电流较小时,自加热造成的温升较小,可忽略不计。

1.4 减弱外界干扰的电路设计

为了有效抑制外界干扰和提高 A/D 转换精度,系统中加入了抗混叠滤波电路和采样保持电路如图 4 所示。

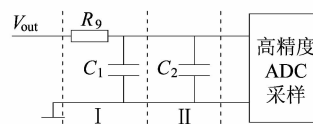


图 4 滤波和采样保持电路

Figure 4 Filtering and sample and hold circuit

图 4 中,电路 I 为抗混叠滤波电路,电路 II 为采样保持电路。在图示电路中,电路 I、II 2 部分直接相连,抗混叠滤波电路与采样保持电路构成一个充放电回路,电容 C_1 放电的同时,电容 C_2 进行充电。电容 C_2 得到 C_1 上的电荷,电容 C_1 失去电荷后电压值减小。如果采样时间不够长,电容 C_1 和 C_2 上的电压无法完全稳定,电容 C_2 采样得到的电压就不是实际的采样电压值,就会造成很大误差,导致整体电路测量精度的下降。为了尽量减少这种误差,电容 C_1 相对于 C_2 要足够大,以保证电容 C_2 的充电饱和,当采用的 A/D 转换器为 12 位时,需要保证 $C_1/C_2 \geq 2^{12}$ [12]。

1.5 A/D 转换

A/D 转换器作为数据采样中的主要元器件,直接影响测量精度。系统采用逐次逼近式 12 位串行 A/D 转换器 TLV2548,其拥有 8 个模拟通道,模拟通道可以通过编程进行选择采样或循环采样;工作电压范围宽广为 2.7 VDC 到 5.5 VDC;模拟量的输入电压为 0 V 到芯片的实际工作电压;线性误差 $< 0.05\%$;最高采样频率达 200 kHz;具有同步串行 (SPI) 接口,主处理器接口容易 [13]。

1.6 电路参数选择

通过调节电路参数设置运放增益 $A_d = 100$,恒流源 $I_{out} = 240 \mu A$,温度为 $0 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$,对应 PT100 电阻范围为 $100.00 \sim 138.51 \Omega$,可得 $V_{out} = 2.4 \sim 3.3 \text{ V}$,为 A/D 提供 5 V 工作电压,则可保证输入电压维持在满量程的 $1/2 \sim 2/3$,可充分发挥 A/D 转换器的功能。由公式(4)可得

$$t = \left(\frac{V_{out}}{I_{out} \cdot A_d} - 100 \right) \div 0.3851 = 108.197 \times V_{out} - 259.673. \quad (7)$$

2 测试结果与误差分析

为了验证测量数据的准确性,选用高精度恒温槽制造温度环境,要求恒温槽温度波动度在 $\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ 每 30 min [14],并以恒温槽设置温度作为实际温度值,将测量值与实际温度值进行比较。为了保证采集数据的有效性,设置 A/D 采样速率为 1000 Hz ,采样 10 s ,对待测点温度输出电压采样 10000 次后求平均作为最终输出电压代入公式(7)中,进行电压-温度的转换。将恒温槽温度作为实际温度值,系统测量温度与实际温度对比如表 1 所示。

由表 1 可知由系统测量的温度与实际温度还是存在较大的误差,这是因为在系统设计时通过电路设计和电路参数协调并不能完全消除外界干扰和自热效

表 1 加入补偿前测量温度与实际温度对比

Table 1 Measured temperature and actual temperature compensated contrast before adding the measured

序号	实际温度/ $^\circ\text{C}$	测量温度/ $^\circ\text{C}$	误差 Δ / $^\circ\text{C}$
1	10.00	10.340	0.340
2	20.01	20.339	0.338
3	29.99	30.349	0.350
4	40.00	40.360	0.360
5	50.00	50.359	0.359
6	60.01	60.369	0.368
7	70.00	70.359	0.359
8	79.99	80.358	0.359

应,铂电阻温度传感器出厂时也会存在一定的系统误差,为了提高系统的测量精度,保障测量数据的准确性,需要进行温度标定。本文采用加入补偿值的方法,即对表 1 中误差值进行均值处理,去除最大值 0.368 和最小值 0.338,对余下的 6 组值进行求平均得到平均误差 $\Delta_{\text{平均}} = 0.354 \text{ }^\circ\text{C}$,则温度-电压转换公式为

$$t = 104.496 \times V_{out} - 259.673 - \Delta_{\text{平均}} = 104.496 \times V_{out} - 260.027. \quad (8)$$

加入补偿之后系统测量温度与实际温度对比如表 2 所示。

表 2 加入补偿后测量温度与实际温度对比

Table 2 Measured temperature and actual temperature contrast after adding compensation

序号	实际温度/ $^\circ\text{C}$	测量温度/ $^\circ\text{C}$	误差 Δ / $^\circ\text{C}$
1	10.01	9.998	-0.003
2	20.00	19.987	-0.013
3	29.99	29.997	-0.002
4	40.00	40.006	0.006
5	50.00	50.007	0.007
6	60.00	60.017	0.017
7	69.99	70.007	0.008
8	80.00	80.006	0.006

通过数据对比可知,加入补偿值后系统测量值与实际温度之间偏差差不超过 $\pm 0.02 \text{ }^\circ\text{C}$,测量数据的精度有了较大的提高。

3 结语

系统基于铂电阻传感器,设计出高精度的温度测量系统,采用四线制驱动有效解决了引线电阻的问题;通过选用输出较小电流的恒流源,有效减弱了铂电阻本身的自热效应;设计出抗混叠干扰与采样保持电路大大减少了外界干扰对测量精度造成的影响;利用添加补偿值的软件处理方法,有效提高了系统的最终输出数据的精度。经试验论证,系统精度可达 $\pm 0.02 \text{ }^\circ\text{C}$,

测量精度较高。但是在实际生产推广中,该系统还存在受环境条件影响的问题,下一步将在抗外界干扰方面做进一步研究。

参考文献:

- [1] 张瑜,张升伟. 基于铂电阻传感器的高精度温度检测系统设计[J]. 传感技术学报,2010,23(3):311-314.
- [2] 方益喜,雷开卓,张群飞,等. 基于三线制恒流源驱动的高精度温度测量系统[J]. 计算机工程与应用,2012,48(增刊2):531-534.
- [3] 刘孟德,贺海靖,杜立彬. 高精度温度测量电路设计[J]. 山东科学,2012,25(2):72-75.
- [4] 汪定国,王怡苹. 一种高精度铂电阻温度测量方法[J]. 电子测量技术,2012,35(11):104-107.
- [5] 郑泽祥,姜周曙,黄国辉,等. 铂电阻高精度温度测量系统设计[J]. 机电工程,2013,30(12):1494-1497.
- [6] 吴新杰,刘志峰,刘一婷,等. 基于遗传算法的铂电阻温度传感器非线性校正方法[J]. 辽宁大学学报(自然科学版),2006,33(1):35-37.
- [7] 田炳丽,胡超,丁风雷. 一种提高 Pt1000 铂电阻测温精度的新方法[J]. 机电工程,2013,30(5):603-605.
- [8] 马毅,张宏宇. 多路铂电阻测温系统设计[J]. 电子测量技术,2012,35(5):87-89.
- [9] 朱育红. 工业铂电阻精确测温的方法[J]. 中国测试技术,2007,33(4):50-52.
- [10] 徐莉振,鲍敏. 面向 Pt100 铂电阻的高精度多路测温系统[J]. 机电工程,2013,30(1):65-68.
- [11] 周敏,葛兴时. 三线制及四线制热电阻测量方法的探究[J]. 工业计量,2015,25(3):33-34.
- [12] 李刚,程立君,林凌. 高精度数据采集抗混叠滤波器的设计[J]. 国外电子元器件,2007,15(8):30-33.
- [13] 施奕平,吴国安. A/D 转换器 TLV2548 的工作原理及应用[J]. 电子元器件应用,2001,3(9):19-22.
- [14] 隋宇博,韩超,聂茂增,等. 浅谈恒温槽技术性能的测试方法[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(增刊1):114-116.

=====

(上接第 56 页)

参考文献:

- [1] 冯雷. 陀螺效应作用下水下航行体动力学特性研究[D]. 华中科技大学,2012:7-17.
- [2] 梅端经. 攻击型潜艇的对转电力推进[J]. 船电技术,1995(2):30-35.
- [3] 高钰阁. 对转双转子永磁同步风力发电机的设计与分析[D]. 沈阳工业大学,2010:7-24.
- [4] PISEK P, STUMBERGER B, MARCIC T, et al. Design analysis and experimental validation of a double rotor synchronous PM machine used for HEV[J]. IEEE transaction on magnetics,2013,49(1):152-155.
- [5] 邓志君,罗玉涛,周斯加,等. 新型车用对转双转子电机的研究[J]. 电气传动,2007,37(7):10-13.
- [6] 余海阔,陈世元,王耀南. 双转子电机及其应用的分析[J]. 电机技术,2009(5):1-4.
- [7] 郭嘉. 双转式永磁无刷直流电机的控制器设计[J]. 科学技术与工程,2009,19(1):119-130.
- [8] 杨光,李醒飞. 无刷直流电机反电势过零点检测转子位置研究[J]. 电力电子技术,2008,42(10):18-20.
- [9] 刘伟,王长松. 无位置传感器无刷直流电机转子位置检测的研究[J]. 轻工机械,2007,25(3):108-110.
- [10] 沈建新,陈永校. 永磁无刷直流电动机基于反电势的无传感器控制技术综述[J]. 微特电机,2006,34(7):36-40.
- [11] LEE W J, SUL S K. A new starting method of BLDC motors without position sensor[J]. IEEE transaction on industry application,2006,42(6):1532-1538.
- [12] 胡家兵,贺益康,年珩. 基于磁饱和凸极效应的面贴式 PMSM 零速下无传感技术[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):152-157.

=====

(上接第 60 页)

- [4] 马潮. AVR 单片机嵌入式系统原理与应用教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007.
- [5] 王兆安,刘进军. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [6] 程智,王宗培. 步进电动机电流型驱动的单管和双管控制方式[J]. 微电机,2000,33(2):15-17.
- [7] 楚斌. IR2110 功率驱动集成芯片应用[J]. 电子工程师,2004,30(10):33-35.
- [8] 张明,章国宝. IR2110 驱动电路的优化设计[J]. 电子设计工程,2009,17(12):66-67.
- [9] 赵亮. 单片机 C 语言编程与实例[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [10] 宋爱俊,刘景林,韩英桃,等. 二相混合式步进电机驱动器的优化设计[J]. 电气传动,2006,36(2):59-60.