

基于传递函数法的 PT100 的高精度测温设计

邓友 丁卫撑 陈浩峰

(成都理工大学核技术与自动化工程学院 成都 610059)

摘要: 针对铂热电阻在工业温度测量中的应用,提出基于传递函数法的非线性校正方法并验证了其优越性和实用性。给出了一种基于 PT100 三线制连接的多点测温系统的设计方案,该系统以 C8051F410 处理器为核心,采用片内 ADC 分时控制,实现多路温度采集。实践表明,本方案可以提高温度测量精度和系统开发效率,可广泛应用于工业控制领域。

关键词: PT100;温度;非线性

中图分类号: TH811 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Design of high precision temperature measurement of the transfer function based on PT100

Deng You Ding Weicheng Chen Haofeng

(Nuclear technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: For application of PT100 in industrial temperature measurement, the transfer function method based nonlinear correction is proposed and its superiority and practicality is verified. Multi-point temperature program is designed based on three-wire PT100, using C8051F410 processor as the core, using the on-chip ADC time-shared control, and multi-channel temperature acquisition is realized. Practice showed that this scheme can increase the temperature measurement accuracy and efficiency of system development, and can be widely used in industrial control field.

Keywords: platinum resistance; temperature; nonlinear

1 引言

温度是工业生产检测和控制中最常见、最基本的工业参数之一,例如冶金、机械、电子、化工等各类工业生产和控制过程中广泛采用的各种加热炉、热处理炉、反应炉等,整个过程中的温度是严格控制的,所以温度测量的准确度和精确度直接影响生产状况和产品质量。铂热电阻是一种广泛应用于工业现场温度精确测量和控制的温度传感器,具有精度高、稳定性好、互换性好、耐腐蚀、测温范围宽、使用方便等优点^[1]。但铂热电阻阻值与温度之间存在非线性的缺点,在利用铂热电阻进行精确温度测量时必须对这种非线性误差进行必要的校正,以确保测量的精度。非线性校正方法有多种,例如多项式直接拟合法,查表法,A/D 变换器^[2]校正法,模拟电路线性化法^[3],都可有效地减小非线性误差的影响。

本文基于非平衡电桥的 PT100 测温方式提出传递函数法的非线性校正方法。

2 总体设计方案

该测温系统硬件主要包括温度电压转换、数据采集^[4](放大、滤波)、串口数据输出和电源部分,其总体结构如图 1。图 1 中 8 路 PT100 铂电阻的信号由惠斯通电桥驱动产生,采用三线制密封良好耐高压的 PT100。

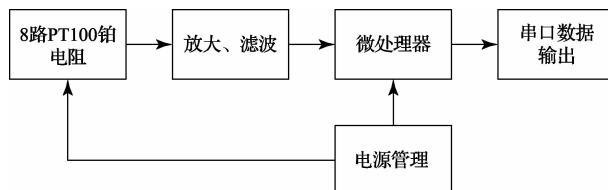


图 1 硬件结构框图

2.1 硬件电路设计

首先将PT100铂电阻输出的电阻信号转换为电压信号,经OPA333运放放大,经多路开关选择分时送给单片机

片内模数转换器ADC处理。为抑制温漂和减小计算误差,图2中的电阻选择低温漂高精度电阻和高稳定性的参考电源。

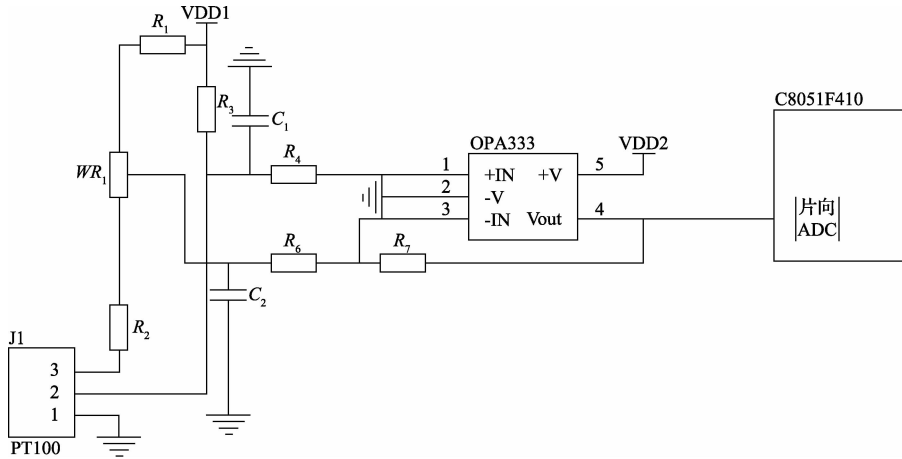


图2 温度采集电路图

为了减少硬件电路,增加系统的稳定性,选用C8051F410单片机。C8051F410的ADC子系统包含1个可编程增益放大器PGA和1个200 ksp/s 12位分辨率的逐次逼近型ADC^[5]。要提高ADC分辨率,在不使用高分辨率的片外ADC的情况下,对于温度等慢速系统^[6]可以采用过采样和求均值的方法提高分辨率,将测量精度从12位提高到16位。采用内部基准电压2.2V,PGA增益为2,用过采样和求均值技术使有效位数增加到16位时,电压分辨率为 $2.2\text{ V}/(2^{16} \times 2) = 16.785\ \mu\text{V}/\text{code}$,测温系统测温范围设计为 $t = 0 \sim 600\text{ }^\circ\text{C}$,温度每变化 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 的电压变化 $2.2\text{ V}/600\text{ }^\circ\text{C} = 3.667\text{ mV}/\text{ }^\circ\text{C}$,16位测量的温度分辨率是 $(16.785\ \mu\text{V}/\text{code})/(3.667\text{ mV}/\text{ }^\circ\text{C}) = 0.005\text{ }^\circ\text{C}/\text{code}$,采用过采样和求均值技术的情况下用同一个片内12位ADC可以测量的最小理论温度变化是 $0.005\text{ }^\circ\text{C}$,达到了高精度的测量要求。

2.2 PT100 桥式测温原理及传递函数

铂电阻的阻值 R_t 随温度 t 的变化而变化计算公式如下:

$$R_t = R_0[1 + at + bt^2 + c(t - 100)t^3] \quad (1)$$

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

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2) \quad 0\text{ }^\circ\text{C} \leq t < 850\text{ }^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中: R_t 为 $t\text{ }^\circ\text{C}$ 时的电阻值, R_0 为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时的阻值,PT100即 R_0 为 $100\ \Omega$ 。 $a = 3.9083 \times 10^{-3}$ 、 $b = -5.775 \times 10^{-7}$ 、 $c = -4.183 \times 10^{-12}$ ^[7]。

铂电阻驱动电路如图3所示。驱动电路设计采用的是常用的惠斯通电桥, E 为精密基准电压源。 V_1 、 V_2 是电压输出端。图中 E 、 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_t ,组成测量电桥。根据电桥原理,测量桥路电压输出值为 V_m 为 $V_m = V_2 - V_1$,即:

$$V_m = E \frac{R_t}{R_3 + R_t} - E \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

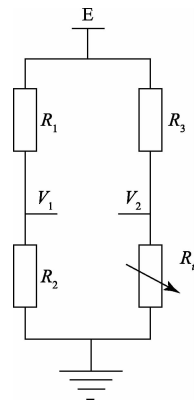


图3 铂电阻PT100桥式测温电路

设线性放大器放大倍数为 K_1 ,设 $V = K_1 V_m$

$$V = K_1 V_m = K_1 E \left(\frac{R_t}{R_3 + R_t} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (4)$$

$V = K_2 f(\text{ADC})$, K_2 为电压与ADC转换比例系数, $f(\text{ADC})$ 为不同温度下的ADC读数

$$f(\text{ADC}) = \frac{V}{K_2} = \frac{K_1 V_m}{K_2} = \frac{K_1 E}{K_2} \left(\frac{R_t}{R_3 + R_t} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (5)$$

在实际电路中, K_1 、 K_2 、 E 都是常数,令 $A = \frac{K_1 E}{K_2}$,定义

A 为刻度系数,即

$$A = \frac{f(\text{ADC})}{\left(\frac{R_t}{R_3 + R_t} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)} \quad (6)$$

$$\text{令 } B = \frac{R_i}{R_3 + R_i} \quad (7)$$

$$\text{得 } B = \frac{f(ADC)}{A} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (8)$$

$$R_i = R_0(1 + at + bt^2) = R_0 + \Delta R \quad (9)$$

由(7)、(9)得

$$\Delta R = \frac{R_3 \times B}{1 - B} - R_0 \quad (10)$$

$$\Delta R = \frac{R_1 R_3 f(ADC) + R_2 R_3 f(ADC) + AR_2}{AR_1 - (R_1 + R_2)f(ADC)} \quad (11)$$

在实际应用中, R_1, R_2, R_3, A 都是常数, 可以看出 ΔR 是 $f(ADC)$ 的函数。

同时 $\Delta R = R_0(at + bt^2)$, 得到温度 t 的函数为:

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-aR_0 \pm \sqrt{a^2 R_0^2 + 4bR_0 \Delta R}}{2R_0 b} \quad (12)$$

根据铂电阻的变化值 ΔR , 就可以求得温度 t 。

2.3 系统定标及测量

测温范围 t 在 $0 \sim 600$ °C, $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 1$ k Ω , $R_7 = 8.2$ k Ω , $WR_1 = 500$ Ω , R_2 为 100 Ω , E 为 3.0 V, a 为 3.9083×10^{-3} , b 为 -5.775×10^{-7} , R_0 为 100 Ω 。系统定标^[8]步骤如下:

1) 使用 M630 型高精度程控热电阻箱模拟电阻输出 100 Ω , 接入图 2 中的 J1 端口, 调节 WR_1 , 设置刻度零点, 使 0 °C 时仪器读数为 0 °C;

2) 在不同标准温度下, 根据式(2)得到相应 R_i , 代入式(6), 得到刻度系数 A , 求均值得 $\bar{A} = 297.155$, 如表 1;

表 1 刻度—实验测量结果

实际温度/°C	R_i/Ω	$f(ADC)$	刻度系数 A
50.0	119.40	4 688	297.235
98.3	137.86	8 992	297.109
120.0	146.07	10 864	297.122

3) 代入式(8), 得到 B 的值, 把 B 的值代入式(10), 得到 ΔR 的值;

4) 把 ΔR 的值, 代入式(12), 舍去不合理值, 得到温度值 t 。

定标后, 对系统进行对比性测试, 测试数据如表 2。

表 3 为多路 PT100 在相同温度下一致性测试结果。

表 2 实测测量结果

实际温度/°C	$\Delta R/\Omega$	测量温度/°C	温度差/°C
25.0	9.73	24.99	-0.01
50.0	19.40	50.01	0.01
185.5	70.51	185.50	0.00
270.0	101.33	270.04	0.04
400.0	147.10	400.05	0.05
550.0	197.52	550.10	0.10
600.0	213.74	600.04	0.04

表 3 多路 PT100 测温结果

编号	实际温度/°C	测量温度/°C	实际温度/°C	测量温度/°C
1	100.0	99.99	250.0	250.01
2	100.0	100.01	250.0	250.03
3	100.0	100.01	250.0	249.98
4	100.0	100.03	250.0	249.98
5	100.0	100.01	250.0	250.01
6	100.0	100.01	250.0	250.01
7	100.0	99.99	250.0	250.01
8	100.0	100.03	250.0	249.98

根据上述方法, 在 $0 \sim 600$ °C, 实测温度值与标准温度值之差小于 0.1 °C, 实现了温度的高精度测量。在不同标准温度下, 多路 PT100 实测温度一致性好。实测结果表明上述方法的优良性。

工业产品以高精度和高可靠性为设计目标^[9], 利用铂热电阻 PT100 桥式电路测温, 其电路结构简单, 同时利用软件对误差特性进行数学建模, 成本较低, 通用性好, 且补偿精度较高^[10]。考虑到电流产生的热效应, 使用传递函数方法可用于对电路进行不确定度分析和电路各元件的误差分配^[11]。

3 结 论

本文基于工程实际对温度精度的要求, 以 C8051F410 单片机为核心的多路信号采集电路设计, 利用自身的片上资源, 采用过采样原理提高模数转换的精度。该系统设计较好地解决了铂电阻测温电路中不平衡电桥的非线性误差问题。

该系统经过大量的实验测试, 其性能稳定可靠, 测温误差在 0.1 °C 之内, 所以此方案测量的温度精度高、一致性好, 同时仪器结构简单, 维护升级方便, 可在工业控制领域广泛应用。

参考文献

- [1] 张莉莉, 沙奕卓, 行鸿彦. 自动气象站高精度温度校准系统[J]. 电子测量技术, 2012, 35(6): 5-10.
- [2] 黄兆梁. 用 A/D 转换器实现铂电阻温度计的非线性校正[J]. 自动化仪表, 2006, 27(6): 47-50.
- [3] 姬建伟, 李平, 宋家友. 铂电阻高精度测量和非线性校正的研究[J]. 微计算机信息, 2007 (05S): 164-165.
- [4] 李红刚, 张素萍. 基于单片机和 LabVIEW 的多路数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 62-67.
- [5] 李刚, 林凌. 与 8051 兼容的高性能、高速单片机-C8051Fxxx [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [6] 董长飞. C8051F 系列单片机开发与 C 语言编程

- [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [7] 赵天池. 传感器和探测器的物理原理和应用[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [8] 蒋玲,陈智军,高智翔,等. 反射率补偿型声表面波标签的温度测量[J]. 仪器仪表学报,2014,35(10):2372-2377.
- [9] 李聪,代后兆,张亚宁,等. 一种新型低成本高精度热电阻测温模块的研制[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(6):577-584.
- [10] 行鸿彦,武向娟,吕文华,等. 自动气象站数据采集器

温度通道的环境温度补偿[J]. 仪器仪表学报,2012,33(8):1868v1875.

- [11] 李强,安强. 铂热电阻 Pt100 桥式温度变送器电路的传递函数[J]. 铁道技术监督,2012,40(11):20-25.

作者简介

邓友,硕士研究生,主要研究方向为智能仪器与测控。

E-mail:dengyou0809@qq.com

丁卫撑,副教授,主要研究方向为智能核仪器。

(上接第 88 页)

- [12] 沈文伟,杨建华,陈叶富,等. 嵌入式数据库 SQLite 在可视嗅觉系统中的应用[J]. 仪器仪表学报,2010,31(6):1289-1293.
- [13] 史恒亮,白光一. 嵌入式数据库的现状和发展趋势[J]. 计算机系统应用,2010,19(2):205-208.
- [14] 曾云,胡频. 嵌入式数据库在 QT 中的应用研究与实现[J]. 国外电子测量技术,2010,29(9):73-76.
- [15] 秦振华,夏斌,谢宏,等. 便携式心电图信号采集电路设计[J]. 电子设计工程,2010,18(8):123-126.

(上接第 91 页)

从图中可以看出 X、Y 方向定位均控制在 $2\ \mu\text{m}$ 以内,对 X、Y 方向数据求标准偏差,可以得到 X 方向定位精度为 $0.87\ \mu\text{m}$,Y 方向为 $0.86\ \mu\text{m}$,满足使用要求。

7 结 论

本文介绍了一种利用直线电机驱动气浮平台的实现过程,对系统组成、气浮平台原理、直线电机建模及伺服控制方式实现等进行了论述,最后对定位精度进行了测试。结果表明,该定位平台运行可靠,结构稳定,精度满足使用要求。

参考文献

- [1] 孙麟治,李鸣鸣,程维明. 精密定位技术研究[J]. 光学精密工程,2005,11(13):69-75.
- [2] 何学明,陈学东,曾理湛,等. 超精密气浮平台的定位精度分析[J]. 华中科技大学学报,2008,3(36):8-11.
- [3] 张刚,刘品宽,张波,等. 直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制器设计[J]. 光学精密工程,2013,2(21):371-379.
- [4] 张从鹏,刘强. 直线电机气浮精密定位平台设计与控制[J]. 北京航空航天大学学报,2008,2(34):224-228.
- [5] YUN Y, LI Y. Design and analysis of a novel 6-DOF redundant actuated parallel robot with compliant

hinges for high precision positioning[J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 61(4): 829-845.

- [6] RAKOTONDRABE M, HADDAB Y, LUTZ P. Voltage/frequency proportional control of stick-slip micropositioning systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(6): 1316-1322.
- [7] 王海霞,颜桂定,李宝辉,等. 直线电机运动控制系统的软件设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报,2013,3(27):264-268.
- [8] 余晓芬,程伶俐,胡佳文,等. 大行程纳米二维工作台的动态优化设计[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(3):289-293.
- [9] 方明星,吴敏,余锦华. 基于等价输入干扰补偿的直流电机定位控制[J]. 仪器仪表学报,2009,30(9):1081-1086.
- [10] 邵珠华,李强,褚进. 直线电机伺服系统的二自由度内膜控制器设计[J]. 机电一体化,2013,6:63-67.

作者简介

姬琪,1978 年出生,现为中国科学院院长春精密机械与物理研究所副研究员,主要研究方向为光电设备精密检测技术。

E-mail:jiqu@ciomp.ac.cn