

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802286

基于 N 型热电偶的智能化多通道测温系统

徐健 林皓琨 肖新帅

(西安工程大学 电子信息学院 西安 710048)

摘要: 针对冶金、机械制造等工业生产中对温度测试的需求,设计了一种基于 N 型热电偶测温原理的高精度多通道的测温系统。该系统以 STM32 为控制核心,ADS1148 作为采集芯片,并通过 WiFi 处理模块 Esp8266 实现数据的传送,使得用户可以远距离随时查看和监控数据。同时运用曲线拟合的最小二乘法对不同的传感器进行标定补偿,有效地提高了测温精度,避免了硬件调节的困难。实验结果表明,该系统的测温精度可以达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,且体积小、性能可靠,在工业生产具有良好的应用前景。

关键词: PT100; N 型热电偶; ADS1148; Esp8266; 最小二乘法

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Intelligent multi-channel temperature measurement system based on N-type thermocouple

Xu Jian Lin Haokun Xiao Xinshuai

(School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the demand for temperature test in industrial production such as metallurgy and machinery manufacturing, a high-precision multi-channel temperature measurement system based on N-type thermocouple temperature measurement principle was designed. The system uses STM32 as the control core, ADS1148 as the acquisition chip, and the data transmission through the WiFi processing module Esp8266, so that users can view and monitor data at any distance. At the same time, the least square method of curve fitting is used to calibrate and compensate different sensors, which effectively improves the temperature measurement accuracy and avoids the difficulty of hardware adjustment. The experimental results show that the temperature measurement accuracy of the system can reach $\pm 0.1^\circ\text{C}$, and the volume is small and the performance is reliable. It has a good application prospect in industrial production.

Keywords: PT100; N-type thermocouple; ADS1148; Esp8266; least squares method

0 引言

当设备运行在高低温环境中时,温度控制一直是人们所关心的问题,随着技术更迭,温度控制系统技术朝着更智能、高安全、功能多样等方面发展。K 型热电偶是现在工业生产中应用最广泛的测温元件,具有价格便宜、测温范围广、抗氧化性能强等优点,但是 K 型热电偶在 $250^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$ 中由于短程“有序无序”转换会造成测量误差,以及在 $150^\circ\text{C} \sim 260^\circ\text{C}$ 范围内会发生磁性转变引起热电势活动^[1]。目前国内外传统的测温器件多是采用 RS485 总线有线传输,受距离影响较大。许谨等^[2]提出一种数据采集系统,多个前端数据采集设备与主机通过 RS485 总线远距离传输数据,系统结构清晰但电路较复杂且成本较高。传

感器则大部分采用 K 型热电偶^[3],而 N 型热电偶可以抑制磁性转变。主控部分大多使用单片机 STC89C52,荆海霞等^[4]以 STC89C52 为核心设计了一种测温系统,虽然保证了小部分成本,但是其 I/O 口功能少且处理速度较慢。

基于此,本文设计了一种基于 N 型热电偶的高精度智能化测温系统,该系统包括上下位机的软硬件模块设计,上位机与下位机之间通信采用 Esp8266 WiFi 模块,使监测温度时受距离因素影响较小,方便实用。

1 系统的总体结构

本系统使用 STM32F103VET6 对整个系统进行控制,其内核是 Cortex-M3, 32 位 ARM 微控制器。温度信号采集使用 4 片 TI 的 16 位高精度模数转换 ADS1148 芯片,

STM32F103VET6 与 ADS1148 之间采用串行外部设备接口(serial peripheral interface, SPI)总线进行通信,与上位机之间采用 Esp8266 WiFi 通信模块,传送数据。系统结构框图如图 1 所示。

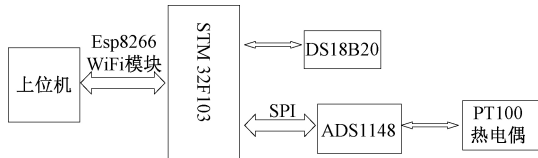


图 1 系统结构框图

由图 1 可知,ADS1148 将 PT100 和热电偶的模数转换值通过 SPI 传送给主控芯片 STM32F103VET6。在主控芯片读取冷端补偿温度和自身 ADC 芯片的转换结果后,通过 Esp8266 WiFi 模块将温度上传到上位机显示。

2 硬件设计电路设计

2.1 SPI 总线协议

SPI 通信总线,使双向的数据进行瞬时的信号传输,同步高速^[5],具有传送速率快、通信简单等优点。它以主从方式工作,允许挂接多个 ADC 芯片。它的接口必须包含设备选择、时钟及串行数据输入/输出等信号线。本系统采用一主多从的四线制 SPI,主控与 ADS1148 通信采用标准的串行接口。当 SPI 收到激活信号后,通信才会开始。

2.2 ADS1148

ADS1148 是高度集成的精密 16 位模数转换器,具有非独立,低噪声,可编程增益放大器(PGA),以及单周期建立数字滤波器的精密 delta-sigma ADC 和内部振荡器。并且 ADS1148 对外供给 10 mA 输出容量的内置电压基准,以及两个匹配的可编程电流数模转换器(DAC)。ADS1148 为温度传感器应用提供完整的前端解决方案,包括热电偶,热敏电阻和电阻温度检测器(RTD)。ADS1148 具有输出速率高,自我和系统校准,通用的 I/O 口以及 SPI 兼容的串行接口等特性。ADS1148 与外部设备的接法如图 2 所示。

ADS1148 的外部器件中,RTD 对应于 PT100 传感器, R_{LEAD} 为连接 PT100 传感器的导线等效电阻, R_{BIAS} 选用的是高精度、低温漂的精密电阻。在温度传感器接入 ADS1148 之前,两者之间需要添加 1 个前置滤波器来消除噪声,因为温度信号是一个低频信号。低通滤波器主要由两个匹配的电阻,1 个差分电容,两个共模电容组成。片上参考电压输入管脚为 REFP0 和 REFNO,参考电压值为:

$$V_{REF} = 2 \times IDAC \times R_{BIAS} \quad (1)$$

运放输入电压值为:

$$VAIN0 = IDAC \times (R_{LEAD} + RTD) + V_N \quad (2)$$

$$VAIN1 = IDAC \times R_{LEAD} + V_N \quad (3)$$

式中: V_N 为 PT100 两线段的电势值,计算公式为:

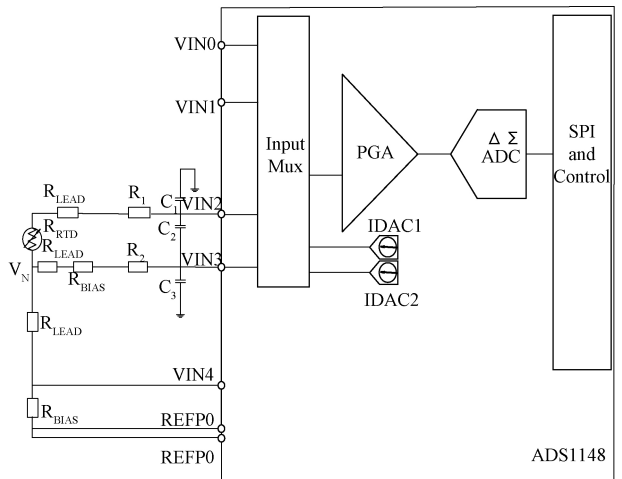


图 2 PT100 和 ADS1148 电路接法

$$VIN = VAIN0 - VAIN1 \quad (4)$$

当 RTD 随温度变化时,对应 VIN 也会变化:

$$VIN = VAIN0 - VAIN1 = IDAC \times RTD \quad (5)$$

可以看出,运放的差分输入电压值与导线的电阻值大小无关^[6]。

2.3 热电偶测温单元设计

作为结构简单的测温元件,热电偶原理^[7]主要是由 2 种不同材料的导体或者半导体的两端进行连接,并且使 2 个节点产生温度差,此时闭合回路中就会产生电流,即 2 个端点之间存在热动势。通常工作的一端温度较高,自由端(冷端)温度低,其温度一般是恒定的。根据中间温度定律得出:

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0) \quad (6)$$

式中: $E_{AB}(t, 0)$ 为补偿后的热电偶电动势; $E_{AB}(t, t_0)$ 为通过测量得出的热电势; $E_{AB}(t_0, 0)$ 为自由端温度 t_0 相对 0°C 时的热电势。

因此,本系统采用 DS18B20 测量环境温度,通过查热电偶分度表的方式得到电压。将测得的温度值通过查表转化为电压值,最终的通道电压通过相加不同的电压值得到,即热电偶自由端和 ADS1148 测得的电压值,最后再次查表,将最终电压值转换为最终的通道温度^[8-10]。温度传感器 DS18B20 与主控 MCU 之间无需外部元件仅用一条总线就能完成通信。其测温范围为 $-55^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$ ^[11]。若将其放置在参考结合点,测得在温度 $-10^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 之内,测温精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。热电偶测温流程如图 3 所示。

2.4 WiFi 通信(Esp8266)

本设计采用 Esp8266 WiFi 处理模块进行通信,实时传输数据,用户可以不受距离限制就能对采集板进行控制及环境温度的监测。Esp8266 WiFi 模块支持多路 TCP 客户连接,它内部有 TCP/IP 的协议线,内置 32 位的 MCU,也可以用作处理器, Esp8266 WiFi 模块支持 3 种工作模式,分别是 STA、AP 以及 STA+AP^[12-14]。本设计采用的是

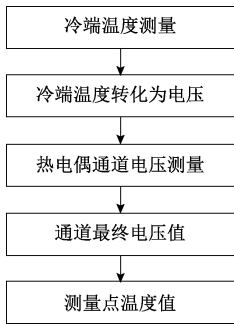


图 3 热电偶测温流程

STA 模式,连接到热点后将 Esp8266 WiFi 处理模块与主控板 MCU 通过串口连接,一般建立连接后会分配一个默认 IP 192.168.4.2。之后将测温采集终端采集到的数据发送给路由器,再由路由器传送到后台显示到上位机界面供用户查看。STA 模式下的组网结构如图 4 所示。

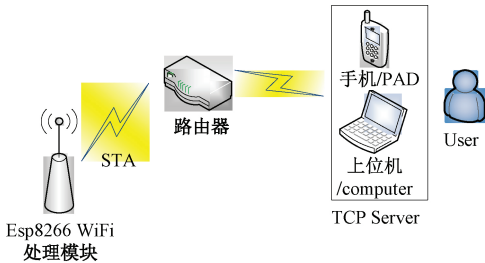


图 4 STA 组网结构

3 系统软件设计

3.1 软件流程设计

多通道测温系统的软件主要完成对 DS18B20 输入端的温度测量、各通道电压的测量之后,分析数据并将通道电压值转换为温度值送入终端显示。程序流程如图 5 所示。

由于热电偶是根据两端结合点温度差来测量温度的原理,为了减小误差,获取自由端温度后并对其进行补偿。这样才能得到最终的测量温度,减少误差。为了减少主控的负荷和功耗,可以在通道中进行电流测量,若通道回路中电流大于一定值时,那么就可以测量通道中的电压值;反之,则认为通道开路,无动作。

3.2 标定补偿及最小二乘

因为 DS18B20 的测量精度仅有 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,为了提升系统精度,采用最小二乘法对其进行标定,缩小传感器的误差。采用精密数字温度计的测量值作为实际温度,与温度传感器的测量值进行对比。如图 6 所示,精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 精密数字温度计与 DS18B20 在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内所测得的 10 组温度值。以最小二次多项式作为目标函数,表达式为:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (7)$$

式中: y 为实际温度值; x 为传感器所测得的温度值; $a_0\sim$

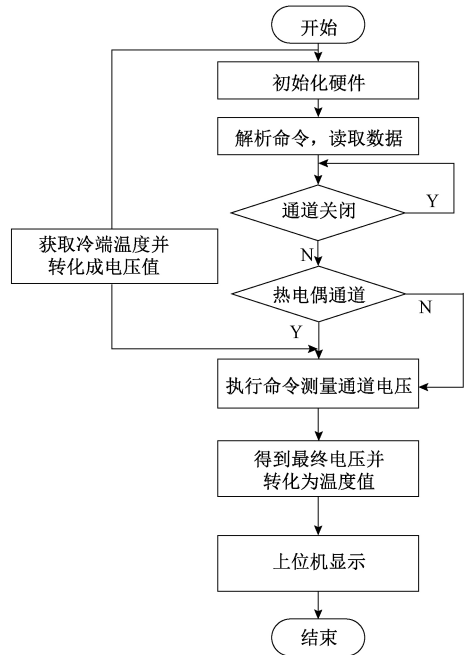


图 5 系统软件流程

a_2 均为待定系数。

由最小二乘多项式拟合原理^[15]可知:

$$\begin{bmatrix} 10 & \sum_{i=0}^9 x_i & \sum_{i=0}^9 x_i^2 \\ \sum_{i=0}^9 x_i & \sum_{i=0}^9 x_i^2 & \sum_{i=0}^9 x_i^3 \\ \sum_{i=0}^9 x_i^2 & \sum_{i=0}^9 x_i^3 & \sum_{i=0}^9 x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^9 y_i \\ \sum_{i=0}^9 x_i y_i \\ \sum_{i=0}^9 x_i^2 y_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

将所测得的数据代入式(8),得出待定系数的值,则可以得到最终的拟合表达式:

$$y = -0.0208 + 1.0030x - 0.0001x^2 \quad (9)$$

式中: y 为标定补偿后的温度值,单位为 $^{\circ}\text{C}$; x 为传感器所测得的温度值,单位为 $^{\circ}\text{C}$;

经过拟合之后,实际温度与所测温度的值如图 7 所示。通过比较结果可知,所测温度值经过二次拟合之后,精确度明显提高,与实际温度值的中心点基本重合,拟合效果较好。

同理,由于 PT100 铂电阻的非线性特征,为了提高装置精度,在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测温范围内对其进行分段线性建模,表达式分别为:

$$-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}: y = 2.5599x - 255.7586 \quad (10)$$

$$50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}: y = 2.6452x - 266.0922 \quad (11)$$

$$150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}: y = 2.7317x - 280.1423 \quad (12)$$

式中: y 代表拟合温度; x 代表阻值。通过理论计算,最大误差分别 $-0.09623\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0.098896\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及 $0.094516\text{ }^{\circ}\text{C}$, 误差均在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

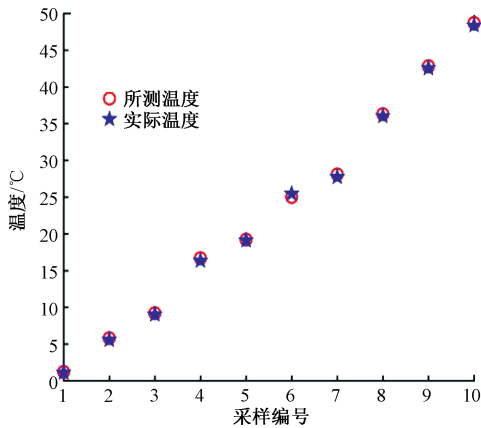


图 6 拟合前

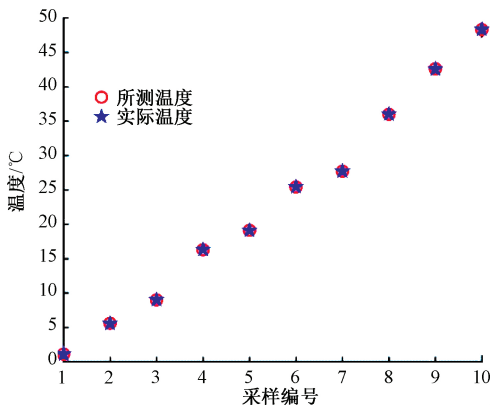


图 7 拟合后

4 测试结果

为比较试验结果,将恒温箱初始温度设置为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,PT100 与 N 型热电偶放置在恒温箱内,每隔 10 min 恒温箱温度变化一次,每次变化 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,等待恒温箱温度达到设定值后开始测试。测试结果如表 1 所示。

表 1 测试结果及误差

标准温度/ $^{\circ}\text{C}$	实际阻值 R/ Ω	拟合温度 t/ $^{\circ}\text{C}$	热电偶温度 T/ $^{\circ}\text{C}$
-50	80.34	-50.096 23	-50.06
-10	95.98	-10.059 398	-10.10
30	111.65	30.054 235	30.09
70	127.02	69.901 104	70.02
110	142.16	109.949 432	110.15
150	157.32	150.050 664	149.89
190	172.14	190.092 538	190.25
230	186.78	230.084 626	230.05

结果表明,温度传感器 PT100 和 N 型热电偶的测量误

差均达到系统精度 0.1 级的要求。铂电阻 PT100 的测量误差主要是因为传感器自身非线性误差、双匹配电流源误差和 ADS1148 测量误差造成的,而 N 型热电偶的测量误差主要来源于 DS18B20 自由端测量误差、传感器非线性误差和 ADS1148 测量误差。本系统的上位机使用 C# 设计。上位机界面如图 8 所示,用户通过上位机设定区灵活选择每一通道,确定后在显示区就可以显示出当前通道的温度值,误差保持在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,满足精度要求。

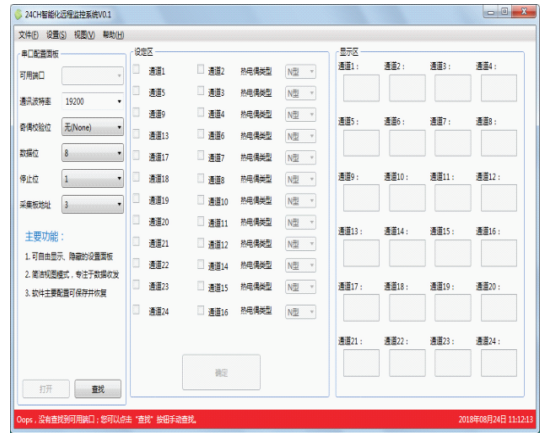


图 8 上位机界面

5 结 论

本文介绍了基于 ADS1148 芯片的 N 型热电偶的多通道测温系统的软硬件设计及实现,上下位机使用 Csp8266 WiFi 模块通信,使用户监控数据可以不受距离限制。并采用多种方式提高系统精度,包括查表、滤波以及使用最小二乘法对传感器进行标定,最终系统精度均控制在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。而且系统装置体积小便于携带,后期可以增设通道,并添加不同的热电偶,也可以增加 4~20 mA 电流^[6]温湿度传感器用以测湿度、压力等丰富系统功能,以便更好地适应工业生产要求。

参考文献

- [1] 肖琳.N型热电偶热电势稳定性的研究[J].功能材料,2006(9):1411-1412.
- [2] 许谨,齐胜男,王扬扬.基于 RS485 总线的供热性能监测系统的设计[J].北京电子科技学院学报,2011,19(4):91-94.
- [3] 王利,杨斌,伍先明,等.基于 K 型热电偶的温度测量系统及实验研究[J].装备制造技术,2017(5):201-203.
- [4] 荆海霞,周琳勃,王仁道,等.基于单片机的热电偶测温系统的设计[J].微计算机信息,2009(23):88-89.
- [5] 张奇贤,李斌,刘兆金.基于 ARM 的多通道高精度内记仪器系统设计[J].国外电子测量技术,2012,31(11):55-57.
- [6] 王晓丹,孟令军,尹维汉,等.基于 ADS1148 的多路高

- 精度测温装置[J].自动化与仪表,2014,29(12):66-68.
- [7] 彭瑞元,吴少石.一种机载热电偶温度测试系统设计[J].中国科技信息,2017(23):31-32.
- [8] 湛月,林洁.低温铂电阻变送器设计[J].自动化与仪表,2018,33(7):71-74,93.
- [9] 徐旭,谢剑芳.基于 ADS1248 的 K 型热电偶温度测量系统[J].自动化仪表,2018,39(6):75-77.
- [10] 顾吉林,刘淼,耿杨,等.基于 PT100 的高精度温度测量电路的设计[J].测控技术,2018,37(5):101-103.
- [11] 徐正平,许永森,孙超,等.多通道并行温度采集系统[J].电子测量技术,2014,37(12):93-98.
- [12] 曹振民,陈年生,马强,等.基于 ESP8266 的无线控制电路设计[J].工业控制计算机,2017,30(1):68-69.
- [13] 杨莹,周晓旭,郭晓澎,等.基于 WiFi 的分布式无线数据
采集系统[J].电子测量技术,2016,39(11):122-125.
- [14] 赵宁社.远程数据采集的现场虚拟仪器控制系统设计与实现[J].国外电子测量技术,2018,37(6):130-134.
- [15] 钟尔杰,黄延祝.数值分析[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [16] 林勇.工业控制用 4~20 mA 电流变送器[J].电子器件应用,2006,27(7):28-29,30.

作者简介

徐健,教授,主要研究方向为物联网、信号处理、电能质量检测、图像处理。

林皓琨(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统应用,图像处理。

E-mail:705271400@qq.com

肖新帅,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统应用。