

多通道热电偶温度采集系统设计与实现

张旭博, 姚雪美, 徐贺扬, 洪应平

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 随着温度测量技术迅速发展, 近年来在多种工业测温环境中开始使用热电偶来测温, 很大程度上提高了用户测量的便利性; 针对国内热电偶采集系统多通道、高精度、快速测量的要求, 实现了一种使用 STM32 控制的 90 通道高精度热电偶温度采集系统, 系统采用 STM32 作为主控单元, 使用分辨率为 24 位的 A/D 转换器 AD7793, 并使用 K 型热电偶传感器实时监测实验环境温度, 并使用 PT100 温度传感器作为冷端补偿, 进行热电偶信号的温度校准, 最终实现在 $-20\sim 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的 90 通道热电偶温度监测; 该系统支持 RS485 通信接口, 并使用上位机软件实现温度的实时显示和记录; 经验证, 该系统能够实现 90 通道温度的精确采集, 通过高低温箱进行温度测试该系统符合项目需求指标, 且误差范围在 ± 0.25 , 为工业领域温度测量和记录提供了便利、稳定的工程化解决方案。

关键词: 温度采集; 热电偶; 冷端补偿; STM32; 多通道

Design and Implementation of Multi-channel Thermocouple Temperature Acquisition System

ZHANG Xubo, YAO Xuemei, XU Heyang, HONG Yingping

(Key Laboratory of Instrumental Science and Dynamic Testing of Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: With the rapid development of temperature measurement technology, thermocouples are increasingly used in various industrial temperature measurement environments in recent years, greatly enhancing the convenience of users' measurements. To meet the requirements of multi-channel, high-precision, and rapid measurement of domestic thermocouple acquisition systems, a 90-channel high-precision thermocouple temperature acquisition system controlled by STM32 is developed. The system uses STM32 as the main control unit, a 24-bit resolution A/D converter AD7793, and K-type thermocouple sensor to monitor the temperature of the experimental environment in real time, and adopts PT100 temperature sensor as the cold end compensation to calibrate the temperature of the thermocouple signal. Finally, it achieves 90-channel thermocouple temperature detection with a temperature range from -20 to $280\text{ }^{\circ}\text{C}$. The system supports RS485 communication interface and uses upper computer software to achieve real-time temperature display and recording. After verification, the system can accurately collect the temperature of 90 channels. Through temperature tests in high and low-temperature chambers, the system meets the requirements and indicators of the project, with an error range of $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$. It provides a convenient and stable engineering solution for temperature measurement and recording in the industrial field.

Keywords: temperature acquisition; thermocouple; cold end compensation; STM32; multi-channel

0 引言

热电偶基于塞贝克效应当两种不同金属的导线两端接触并且存在温度差的时候, 接触点会产生与温差成比例的电压差, 以此为原理来测量温度。该传感器

在工业温度测量、电力、汽车、航天等领域有较多应用, 多种热电偶类型、不同的冷端补偿方式和多线制电路设计可以很好地满足这些领域内多个温度采集点、广泛温度范围和较高精度等要求。热电偶采集系统可以显著提升用户的测量便捷性。随着技术进步和更高

收稿日期: 2024-12-25; 修回日期: 2025-02-21。

作者简介: 张旭博(1999-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 洪应平(1984-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 张旭博, 姚雪美, 徐贺扬, 等. 多通道热电偶温度采集系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4): 270-276, 321.

的要求,对热电偶温度采集系统提出了更精准更快速更广泛的要求^[1-3]。因此本文以高精度和多通道为核心,就高精度热电偶采集系统的硬件设计和实现开展了研究,并且提出一种实现高精度热电偶采集的硬件系统,其具备90个通道,测温范围覆盖 $-20\sim 280\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度准确度最高达 $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

热电偶测温法、辐射测温法和示温漆测温法是目前使用较多用于测量宽温度范围、高精度的测量方法^[4]。热电偶是一种无源传感器且具有高性价比和良好的可靠性,基于热电效应产生一个与温差相关的电动势,通过测量这个电动势利用已知热电偶类型的电动势与温度的热电偶分度表计算出测量端的温度^[5]。由于热电偶的电动势不仅与测量端的温度相关,还与参考端的温度有关,所以在实际测量时还需要进行冷端补偿,从而提高测量的准确性。热电偶测温系统通过将热电偶传感器所转换的电势差并叠加冷端补偿后,最终计算出被测量的温度值。其中电桥补偿法、温度集成芯片法、温度直接测量法是较为常用的冷端补偿的方法^[6]。目前,美国、日本、德国等在精度和多通道上的热电偶温度采集技术较为先进。美国VTI公司的EX1000A-TC热电偶采集系统^[7],具有48路独立热电偶采集通道,每通道支持最高1 ksa/s采样率;温度测量范围覆盖 $-200\sim 1\ 820\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度分辨率可达到 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。德国安捷伦公司的数据采集仪采用模块化设计,可实现多种类信号输入,包括热电偶温度信号、电流和电压信号等,且具有热电偶冷端补偿功能,具有较小的测量误差。东莞联仪公司SH-XL系列多通道记录仪^[8]采用可插拔模块测量范围覆盖 $-100\sim 1\ 370\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度分辨率在 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,支持RS485、RS232通信接口。综上所述,国内发展相较于国外发展较晚,在冷端补偿多采用热敏电阻补偿,受环境温度波动影响较大,使用专用冷端补偿芯片如(MAX31856)依赖进口且成本较高,通道数较少且扩展性不足,通信延迟高等。在精度、范围、实时性和可扩展等方面仍然有待提高。本文设计的方案使用PT100用于温度补偿,模块化硬件设计和RS485通信对数据通信、可扩展性、补偿方案等技术问题提供了解决方案。

本文结合国内外现有产品的技术指标和热电偶测量原理,实现一种具有90通道高精度宽范围热电偶温度采集系统。本设计使用AD7793和STM32,比使用高端ADC或集成方案成本更低,适合多通道扩展;设计模块化架构可以满足90通道同时测温且具有较好的扩展性;基于PT100的动态校准冷端补偿算法受环境温度变化影响较小。RS485总线传输距离长,可多节点部署且抗干扰能力强。通过测试验证,该系统使用K型热电偶采集,能够实现最高 $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测量精度。为热电偶采集提供了更多通道和较高精度的技术方案。

1 系统结构及原理

本文提出的多通道高精度热电偶温度采集系统,包括硬件实现和软件设计两部分。其中硬件部分主要包括冷端补偿以及多通道控制技术,采用STM32作为主控芯片,通过RS485和USB通讯接口与上位机进行数据交互与指令下发,实现对硬件电路的测试。其主要由5块ADC采集板卡和一块主控板卡以及K型热电偶传感器的冷端补偿组成,AD7793是一款低功耗、低噪声、具有完整模拟前端^[9-10],内置PGA、基准电压源、时钟和激励电流的采集芯片,适用于高精度测量,可以直接输入热电偶的微小电压信号,从而大大简化了热电偶系统设计。各个采集板卡通过SPI串行接口控制多个AD7793高精度ADC采集芯片采集18路K型热电偶温度信号,通过写入通信寄存器控制状态寄存器、模式寄存器、配置寄存器、IO寄存器等寄存器配置AD7793的模式与配置等功能,从而使得采集芯片正常采集K型热电偶的温度信息。主控板卡与采集板卡之间通过五个RS485串口连接,分别控制5块板卡各个ADC采集通道的采集功能和进行数据处理。主控板卡通过RS485串口与上位机相连接,由上位机软件整体协调温度采集系统的采集功能。

为了得到采集的温度数值,还需要由上位机软件通过电压值计算出真实的温度值,还需要通过上位机对数据进行线性拟合以减小热电偶非线性误差^[11],从而得到更加准确的温度值。最终由上位机显示采集到的温度信息,使上位机软件达到处理、显示、分析和存储采集到的温度信息的功能。具体设计流程如图1所示。

2 系统硬件设计

2.1 硬件选型

硬件主要包括热电偶传感器、冷端补偿电路、主控板卡、ADC采集电路和通信电路。硬件选型如表1所示。

表1 主要器件型号

温度传感器	K型热电偶
冷端补偿	PT100
ADC芯片	AD7793
主控芯片	STM32F103RCT6
通信接口	RS485

热电偶原理最早由托马斯塞贝克发现,他指出当不同金属存在温度梯度时,会产生与温度差相关的电动势^[12]。如果将这两种金属端点相连形成温度结,并将另一端接入差分结作为恒温参考端,就会在焊接结处产生与温度成正比的电压 V_{OUT} 。这个电压随温度变化而变化,且无需外部电压或电流激励即可工作。K型热电偶是一种常用的温度传感器,能够测量的温度范围广泛,从 $-200\sim 1\ 372\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。特别是在 $-50\sim +350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温

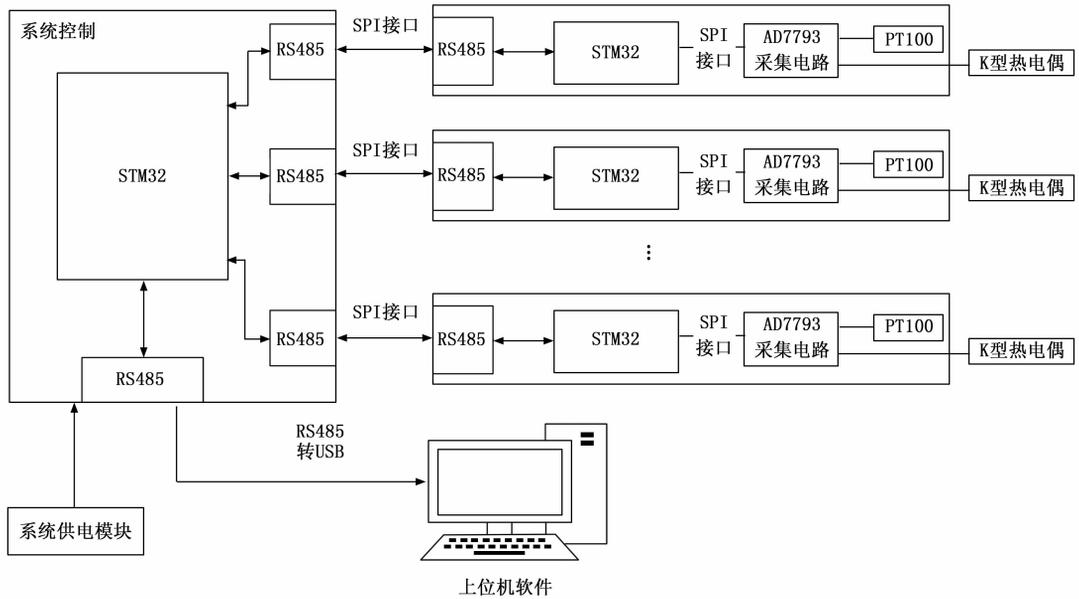


图 1 热电偶采集系统结构

度范围内，K 型热电偶的输出电压与温度的关系呈现出较好的线性特性，线性度较为理想。在该温度范围内，K 型热电偶的平均灵敏度^[13]约为 $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，因此非常适合用于测量 $-20 \sim +280 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间的目标温度。值得注意的是在低于 $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ 和高于 $+350 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度区间，K 型热电偶的输出电压相较于绝对线性度会出现明显偏差。由于 K 型热电偶具有较高的灵敏度，且输出电动势相对较弱^[14]，因此为了准确读取温度信号，系统需要使用高精度的模拟数字转换（ADC）芯片。在本设计中，采用了 AD7793 芯片，这是一款内置增益放大的 24 位高精度 ADC 芯片，能够有效放大热电偶输出的微弱信号，确保测量结果的精确性。AD7793 模数转换过程如图 2 所示。



图 2 模数转换

经过 $\Sigma-\Delta$ 调制器后，带宽内的噪声会被移至较高频段。数字滤波器的主要作用是去除这些高频噪声，并通过抽取滤波器降低采样频率。由于初始的过采样频率远高于奈奎斯特频率，因此需要降采样，即在固定间隔下提取采样值，形成新的采样序列。这种方法不仅能有效降低输出采样率，还能保留原始信号中的关键信息^[15]。此外，为了保证准确的温度测量，系统还配备了冷端补偿模块。冷端补偿是通过使用 PT100 铂电阻来实现的，PT100 电阻的温度响应特性稳定、精确，能够有效补偿由于环境温度变化对热电偶接点产生的影响，进一步提高系统的测量精度。系统的主控芯片选择了 STM32F103RCT6，这款芯片成本低廉，具备较高的计算能力和稳定的性能，能够处理复杂的计算和控制任

务。为了实现与外部设备的高效通信，系统采用了工业标准的 RS485 串行接口，这种接口在工业环境中应用广泛，具有较强的抗干扰能力和较远的传输距离，确保了系统的可靠性和稳定性。

2.2 冷端补偿电路设计

为了实现冷端补偿，设计选用了 PT100 温度传感器。PT100 传感器与 AD7793 的 AIN2 通道相连接，采用外部基准电压（REFIN）进行电压参考。为保持与热端采样一致的精度，冷端采样的增益设置为 1，以避免过度放大可能产生的噪声影响。对于冷端信号的采集，系统通过写入 IO 寄存器配置了电流源 IEXCEN1 和 IEXCEN0，分别设定其电流源值为 $210 \mu\text{A}$ 。两个电流源均连接至引脚 IOOUT1，用于驱动 PT100 温度传感器。电流源的选择直接影响 PT100 传感器的工作精度，确保其能够在良好的工作状态下进行温度测量。冷端补偿是为了修正由于热电偶冷端温度变化引起的误差，因此通过精确的冷端温度补偿，可以有效提高热电偶测量的总体精度。

热电偶由两种不同材料的导体 A 和 B 组成闭合回路，当同一导体的两端温度发生变化时会在回路中产生温度差，从而生成热电流，进而产生热电势。在这个回路中，温度较高的部分称为热端，温度较低的部分为冷端。由于冷端需要保持恒定温度而且大多数常见热电偶的输出电压与温度之间存在较强的非线性关系^[16]，如果没有适当的补偿，热电偶的误差可能会达到数十摄氏度。因此，在利用热电偶进行温度测量时，必须进行冷端补偿。假设冷端温度 T_0 相对 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热电偶电动势为 $E_{AB}(T, 0)$ ，测量得出的热电偶电动势为 $E_{AB}(T, T_0)$ ，则可知冷端补偿后的热电偶电动势 $E_{AB}(T, 0)$ 如公式 (1) 所示：

$$E_{AB}(T, 0) = \frac{k}{e} \int_0^T \ln \frac{N_A}{N_B} dt = \frac{k}{e} \int_{T_0}^T \ln \frac{N_A}{N_B} dt + \frac{k}{e} \int_0^{T_0} \ln \frac{N_A}{N_B} dt = E_{AB}(T, T_0) + E_{AB}(T_0, 0) \quad (1)$$

在冷端补偿的常见方法中, 冰点法需要保持冰点恒定, 电桥补偿法则需要进行复杂的电路调节和补偿, 系统复杂性较高且对精度要求严格, 稍有偏差可能会影响最终测量结果的准确性^[17-18], 增加使用成本且使用不便。为了简化系统设计并提高应用的便利性, 本文采用了温度直接测量法。这种方法通过使用铂电阻和配套的采样电路, 直接测量冷端的温度, 从而避免了复杂的外部补偿电路和设备的依赖。铂电阻具有良好的稳定性和高精度, 可以实现较为精确的温度测量, 同时与采样电路结合后, 整个系统的结构简洁、实现容易, 且具有较高的可靠性和较低的维护成本。因此, 采用温度直接测量法不仅降低了系统的复杂度, 而且提高了测量的效率和精度。流程如图 3 所示。

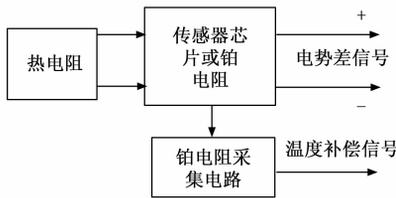


图 3 温度直接测量法

PT100 具有较高的精度, 且使用温度范围在 $-200 \sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$, 具有较好的长期稳定性。针对 K 型热电偶, 本文使用 PT100 铂电阻温度传感器进行冷端温度补偿^[19], 即在每个通道热电偶采集的后端放置一个 PT100 温度传感器来获得冷端的温度即可进行冷端补偿, 将热电偶传感器放置于待测量环境中, 获取热电电压, 为了获得稳定的冷端电压, 将 PT100 铂电阻焊接在 AD7793 板卡上, 在热电压传入后进行冷端补偿。

$$PT100_{\text{temt}} = \frac{\text{data}}{0x\text{FFFFFF}} * 402 \quad (2)$$

该公式将传感器原始数据转换为一个中间温度值, 其中 0x7FFFFFF 传感器数据输出的最大的正值。

$$T_{pt100} = \frac{PT100_{\text{temt}} - 100}{0.385055} \quad (3)$$

其中: 100 和 0.385055 是 PT100 传感器特定的系数。由上述 PT100 的标准公式可以计算出 PT100 对应的温度值。为了将热电偶电压转换为温度值, 使用热电偶逆多项式将热电偶电压转换为实际温度值, 从一个一直热电压提供可用温度^[20]。在 K 型热电偶的应用中, 近似反函数的系数可以表示为热电压 E 的函数, 从而在选定的温度和电压范围内计算出相应的温度 t_{90} , 函数的形式为:

$$t_{90} = C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + \dots + C_n E^n \quad (4)$$

其中: t_{90} 为电压范围内温度 ($^\circ\text{C}$), E 为热电电压

(mV)。

本系统中的热电偶温度采集范围为 $-20 \sim 280 \text{ }^\circ\text{C}$, 所选用逆多项式系数如表 2 所示。

表 2 K 型热电偶逆多项式系数表

温度范围/ $^\circ\text{C}$	$-60 \sim 0$	$0 \sim 280$
电压范围/ μV	$-5\ 891 \sim 0$	$0 \sim 206\ 44$
C_0	0.000 000 000 0	0.000 000 000 0
C_1	$2.517\ 346\ 2 \times 10^{-2}$	$2.508\ 355 \times 10^{-2}$
C_2	$-1.166\ 287\ 8 \times 10^{-6}$	$7.860\ 106 \times 10^{-8}$
C_3	$-1.083\ 363\ 8 \times 10^{-9}$	$-2.503\ 131 \times 10^{-10}$
C_4	$-8.977\ 354\ 0 \times 10^{-13}$	$8.315\ 270 \times 10^{-14}$
C_5	$-3.734\ 237\ 7 \times 10^{-16}$	$-1.228\ 034 \times 10^{-17}$
C_6	$-8.663\ 264\ 3 \times 10^{-20}$	$9.804\ 036 \times 10^{-22}$
C_7	$-2.045\ 059\ 8 \times 10^{-23}$	$-4.413\ 030 \times 10^{-26}$
C_8	$-5.192\ 057\ 7 \times 10^{-28}$	$1.057\ 734 \times 10^{-30}$
C_9		$-1.052\ 755 \times 10^{-35}$
误差范围/ $^\circ\text{C}$	$0.04 \sim -0.02$	$0.04 \sim -0.05$

对于本系统通过设置 AD7793 的配置采集热电偶的电压信号用以计算热电偶的热端温度, 通过合理配置采集芯片的增益、转换速率、工作模式等从而获得采集芯片输出的电压值, 以此为基础计算得到热电偶的真实温度, 计算公式如下:

$$V_{90} = \frac{T_1 * 1.17}{0x\text{FFFFFF} * 32} \quad (5)$$

其中: V_{90} 为计算得到的电压值; T_1 为计算的偏移量, 计算输入数据与最大可能值之间的差异; 采集芯片增益设置 32。热点偶电压对应的温度值, 经过冷端补偿后, 获得温度值为:

$$T = 249\ 27.655\ 86\ V_{90} + T_{pt100} \quad (6)$$

式中, T 为经过冷端补偿的最终温度值, V_{90} 为计算得到的电压值, T_{pt100} 表示 PT100 铂电阻对应温度值。

通过合理配置 AD7793 的增益、采样模式和时钟源等参数, 结合 PT100 冷端补偿方案, 实现了高精度的热电偶温度测量。该系统的关键优势在于能够实时更新采样结果, 并通过冷端补偿有效地消除热电偶测量中的环境因素影响, 从而提高温度测量的准确性和稳定性。

本节主要介绍了冷端补偿的原理和冷端后的温度计算, 通过公式 (2) 和 (3) 计算出冷端温度值 T_{PT100} 后, 通过公式 (5) 计算出 AD7793 的输出的电压值 V_{90} , 最后通过公式 (6) 计算出冷端补偿后的最终温度值 T 。

2.3 AD7793 采集电路设计

AD7793 是一款用于高精度测量应用的采集芯片, 使用者可以根据相应的系统设计要求对各个芯片的功能寄存器进行合理的配置。具体使用配置如下:

在热端温度采集部分, 系统通过配置 AD7793 的模拟输入通道选择了 AIN1 作为热电偶的有效输入通道。为了提高采样精度, 选择了内部基准电压源, 同时设置

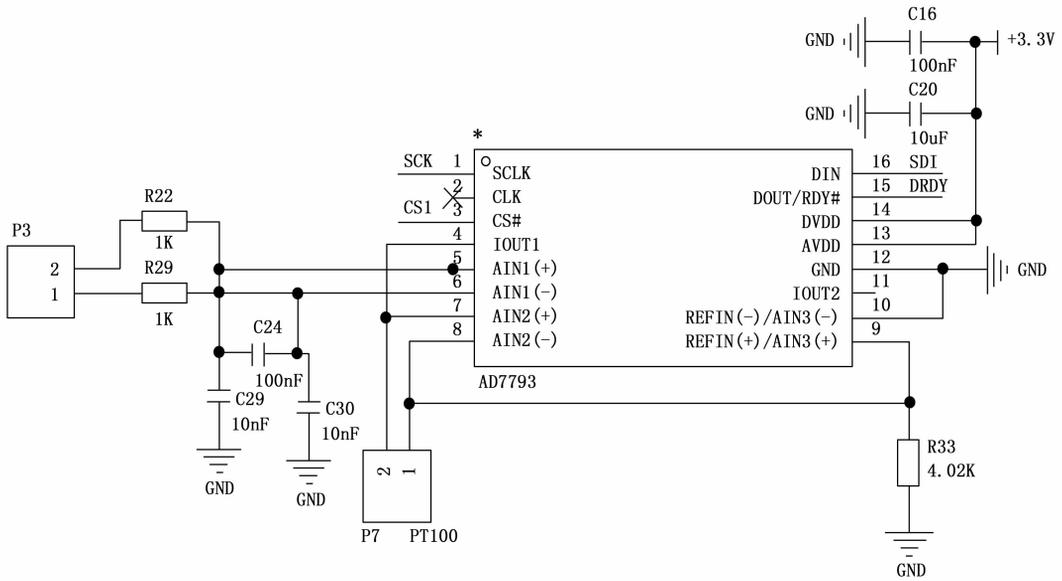


图 4 ADC 采集电路

增益为 32，这样可以在一定程度上提高输入信号的放大，从而增强热电偶信号的分辨率。模拟输入的负端 [AIN1 (-)] 的最大偏置电压被连接至 AVDD/2，这是 AD7793 的输入端偏置电压限制，确保了热电偶信号的稳定性和准确性。

系统配置了 AD7793 的工作模式为默认的连续转换模式 (Continuous Conversion Mode)。在此模式下，AD7793 会持续不断地进行数据采样，并将转换结果写入数据寄存器中，供 STM32 微控制器进一步处理和分析。为确保采样速度与精度之间的平衡，AD7793 的时钟源选择了 64 kHz 的内部时钟，同时 CLK 引脚未外接时钟信号。为获得较为稳定的输出数据，更新速率被设置为 12.5 Hz，这适用于大多数温度监测应用场合，同时不会因过高的更新速率引入过多的噪声。

通过上述硬件配置，AD7793 持续对热端和冷端的温度信号进行采样，并将采集到的数据传输给 STM32 微控制器。STM32 通过通信协议读取 ADC 转换结果，进一步进行数字处理，包括温度值的计算和冷端补偿的处理。最终，得到的温度值可通过 RS485 串口输出的方式传输和显示在上位机。

2.4 AD7793 主控板卡设计

数据采集板卡的控制模块主要是将各种控制命令发送到所需要控制的采集芯片，使得芯片正常工作且将采集通道传输过来的温度信号传输至上位机处理。该模块以 STM32 作为主控制器，每个通道的温度数据首先传入 ADC 进行量化处理，再通过主控单元完成数据的计算、处理和输出等操作。通过轮询机制，可以依次读取每个模块的转换结果，确保系统能够周期性地获取所有热电偶的温度数据。单个采集板中 SPI 与

STM32 的通信结构如图 5 所示。

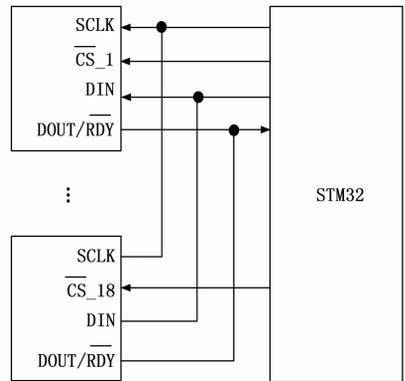


图 5 数据采集结构

多个 AD7793 芯片通过轮询的策略采集数据：轮询读取数据的核心是通过 SPI 协议与 AD7793 通信，每个 AD7793 模块的输入输出数据都需要通过 SPI 总线与单片机的互相通信从而进行处理，对于一块采集板卡的 18 路 AD7793 来说，每个模块通过一个唯一的片选信号 CS 与 SPI 总线连接，单片机通过控制这些片选信号来选择当前与之通信的 AD7793。通过拉低目标 AD7793 的片选 CS 信号，启动模数转换后对通信寄存器执行写操作以便指示下一操作为读取寄存器操作，等待其 DRDY (数据就绪) 引脚变为低电平，数据信息将在 SCLK 下降沿被置于 DOUT 引脚上，且在 SCLK 上升沿有效，一旦转换完成，单片机通过 SPI 接口读取 24 位数据。该轮询过程不断循环执行，确保每个 AD7793 模块能够周期性地提供最新的温度信息。

2.5 通讯接口设计

系统采用了 5 块采集板卡和一块主控板卡的硬件架构，为了通过分布式的硬件布局实现大规模的温度采集

和数据传输。通讯模块采用 USB 或者 RS485 模块进行通信, 主控模块主要负责将使用者通过上位机发送的采集指令或者其他功能命令进行解析, 然后再通过 RS485 接口发送到需要控制的目标采集板卡后通过 SPI 总线传输至目标 ADC 芯片, 从而控制目标通道的功能寄存器使得芯片开始正常地采集数据, 采集板卡通过 RS485 串口将测量数据传输到主控板卡随后在主控模块进行处理, 通过 RS485 接口传送至上位机进行实时显示和数据分析等操作。

本设计采用 RS485 半双工通信, 具有传输距离远, 接收灵敏度高的优点。采集板卡还加入了 CP2102-GM 芯片, 将 RS485 串口信号转换为 USB 接口, 能够实现 USB 与 RS485 之间的无缝连接。通过 USB 接口可以通过标准的 USB 接口与采集板卡进行连接。当 5 个采集板卡主控板卡通过 RS485 接口互相连接后, 便可以通过延伸出的额外 USB 接口接收和调试各个采集板卡的采集数据, 分别对各个通道的工作情况进行监测和调试, 从而对整个测温系统的运行情况进行功能调试和运行测试。接口电路设计如图 6 所示。

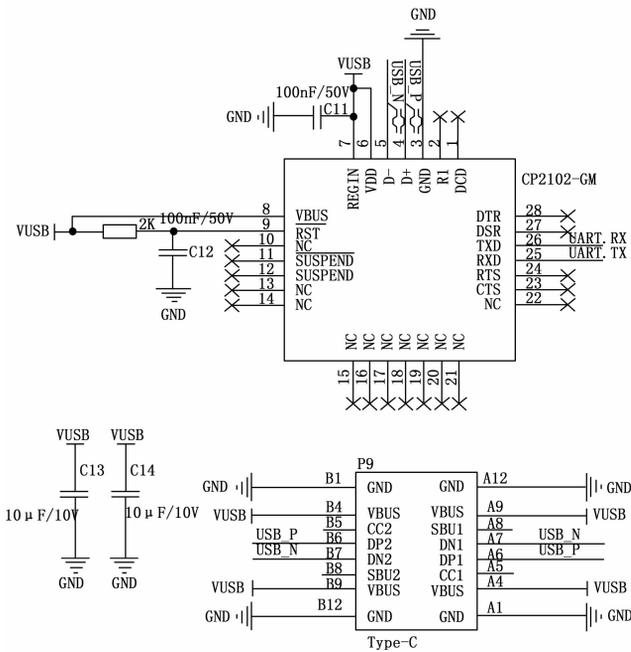


图 6 RS485 接口电路

3 系统软件设计

本系统采用 STM32 作为该系统的控制单元, 总共可采集 90 路温度信号, 并且各个通道独立运行, 系统将轮询采集到的各个通道温度数据通过 RS485 传送到上位机进行实时分析和保存。上位机基于 Windows 操作系统, 使用 C#、Winform 编程语言进行软件 and 用户界面的设计和开发, 使用 VisualC# 开发平台, 为上位机

提供了稳定、互动性强的开发环境, 其界面如图 7 所示。



图 7 上位机主界面

软件系统主要由 3 个模块组成: 首先是温度监测数据的实时显示模块, 能够即时展现各个通道的温度数据, 并提供可视化的监控界面; 其次是测量数据的实时保存模块, 它能够采集到的数据进行实时存储, 以便后续查看和分析; 最后是数据分析模块, 它对每个通道的温度数据进行详细分析和处理, 以便及时发现异常波动或潜在故障, 上位机结构如图 8 所示。

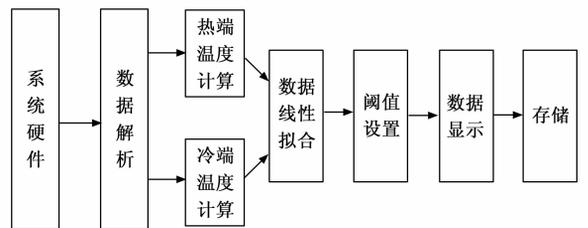


图 8 上位机结构

测温系统的上位机不仅承担着计算被测温度、显示和存储数据等基本功能, 还需要对初始采集到的原始数据进行线性拟合处理。由于 K 型热电偶的输出信号具有一定的非线性特性, 直接使用未经处理的原始数据可能会导致测量结果出现偏差, 从而影响系统的精度和可靠性。为了解决这一问题, 上位机采用最小二乘法对初始数据进行线性拟合。通过这种数学方法, 可以有效地减小由于非线性误差引起的数据偏差, 使得拟合后的数据更加接近真实的温度值, 从而提高系统的测量精度。最小二乘法通过最小化误差平方和, 得到了一个最佳的线性拟合模型。这一过程不仅能够显著提升温度测量结果的准确性, 还能够优化系统在长时间运行中的稳定性。此外, 通过对每个温度点进行精确拟合, 系统能够在不同温度范围内表现出更高的线性度, 能够有效消除因热电偶特性导致的非线性误差, 从而为用户提供更加精确和可靠的温度监测结果。拟合后的曲线如图 9 所示。

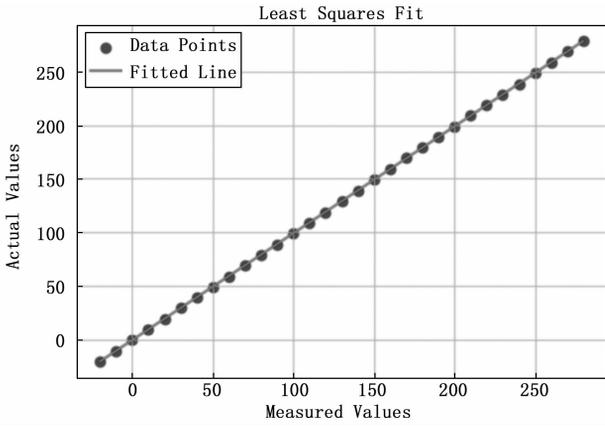


图 9 拟合结果曲线 ($K=0.998\ 1, b=-0.694\ 0$)

4 实验结果与分析

为了验证所设计的多通道温度采集系统的采集功能是否能达到预期效果，搭建了一个高低温测试平台用以验证，使用高低温测试箱作为系统的主要测试方法。

实验步骤：该平台采用高低温测试箱作为温控环境设备，通过精确的温度控制，从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐步升高至 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，然后再降温至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在这一过程中，分别在升温 and 降温阶段各进行两次温度测量，并记录相应的温度数据，还需要对每个通道在不同温度点进行单独测量，确保每个通道的传感器没有因温度范围差异而产生偏差，以检验测温系统的各个测温通道在不同温度区间下的稳定性和测量精度能否达到 $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，并且测试上位机软件在测量环境中能否及时进行数据处理和响应。如表 3 所示。

由于 K 型热电偶的温度与电压关系存在非线性，测试数据会出现一定的非线性误差。因此，通过上位机

软件设计的最小二乘法线性拟合功能，对测量得到的数据进行线性拟合，调整系统的温度数据输出。最小二乘法通过计算每一个温度点的偏差并最小化误差的平方和，从而得到一条最优的拟合曲线。这一过程有助于减小测量系统中的非线性误差，提高温度测量的精准性。利用搭建好的高低温箱测试平台，对测温系统的各通道的控制功能、上位机数据处理功能以及测试结果的准确度等进行测试，以验证该温度采集系统是否符合预定指标。

由于本系统通道数据较多，测量数据非常庞大，因此选取其中 10 路通道进行测试分析，整理后的温度数据如下表所示，通过与高低温测试箱的实际温度进行对比，可以看出，针对 K 型热电偶，所测温度波动范围在 ± 0.25 之间，满足设计要求。

5 结束语

本文设计了一款应用于温度监测系统中的多通道热电偶采集系统，介绍了硬件电路的组成、温度校准的实现过程，以及上位机测试软件的功能。通过实验验证了多通道热电偶温度采集系统的可行性以及准确性，测试结果反映出该系统能够实时采集温度并进行显示，达到了预期效果。但针对由于导线的接入产生电阻，导致系统在测量时产生的测量误差，还需要更加有效的硬件结构去消除这部分误差，以达到更高的精度。

本设计创新性地使用通信板卡加上主控板卡的模块化设计实现了 90 通道的灵活扩展，使用 PT100 替代热敏电阻，结合线性化算法降低了补偿误差且减少了环境温度的影响，使用 STM32 和 AD7793 的设计方案，相较于集成方案降低了设计成本，使得该系统在保持 90 通道协调运转的前提下还能保持较高的测量精度。本文

表 3 温度测试数据

被测温度/ $^{\circ}\text{C}$	测温通道									
	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-20	-20.21	-20.22	-19.92	-20.18	-19.93	-20.15	-19.89	-20.09	-20.23	-20.15
0	-0.11	0.08	0.14	0.13	0.09	0.11	-0.07	0.08	-0.08	0.12
20	20.22	20.15	19.87	20.11	20.15	20.12	19.84	20.1	19.85	20.1
40	40.21	40.21	40.12	40.18	40.18	40.18	40.23	40.13	39.92	40.15
60	59.8	59.88	59.93	60.12	60.12	60.25	59.82	60.14	60.25	59.95
80	80.19	79.92	80.22	80.14	80.18	80.14	79.91	80.09	80.16	79.89
100	99.85	100.12	100.09	100.11	100.25	99.81	100.11	100.13	99.88	100.1
120	120.25	119.75	120.18	120.15	120.22	119.87	119.87	120.19	120.24	119.97
140	140.18	139.93	139.91	140.25	140.19	139.89	139.85	140.15	140.12	139.89
160	159.93	160.22	160.09	160.18	160.15	160.17	159.91	160.11	159.94	160.21
180	180.22	179.88	180.11	180.22	180.18	179.85	179.81	180.12	180.22	179.95
200	199.82	200.15	199.94	200.15	200.22	200.18	200.09	200.09	199.83	200.11
220	220.22	219.91	220.09	220.11	220.12	219.88	219.88	220.14	220.23	219.98
240	240.11	239.85	240.12	240.13	240.18	239.83	239.87	240.16	240.18	239.92
260	259.89	260.18	259.87	260.19	260.19	259.89	259.81	260.16	259.91	260.15
280	279.81	280.23	280.14	280.22	280.21	279.88	279.89	280.19	279.85	280.12

(下转第 321 页)