

面向槽式光热系统的高精度多通道模拟量采集方法

喻志睿

上海新能睦控技术有限公司, 中国·上海 200241

摘要: 为满足槽式集热控制器对传感器信号实时、高精度采集的需求, 本文设计了一种基于 STM32F446 单片机为核心控制器, 围绕 AD7689 多通道模数转换芯片构建数据采集单元, 支持每路通道灵活配置为电流信号或 RTD (热电阻) 信号采集模式, 适应不同类型传感器输入。系统采集过程中引入滑动窗口滤波算法, 有效抑制噪声, 提高数据稳定性与可靠性。数据采集后可通过网口准确传输至上位控制器, 并支持通过上位机实现通道校准与参数配置。在槽式集热实验平台上的测试结果表明, 该单元具备良好的性能表现, 误差小、精度高, 能够满足槽式光热系统中对多通道高精度模拟信号采集的工程应用需求。

关键词: 槽式光热; 模拟量; 高精度

Research on high-precision multi-channel analog acquisition method for trough type photothermal system

Yu Zhirui

Shanghai New Energy Digital Technology Co., Ltd., China Shanghai 200241

Abstract: In order to meet the real-time and high-precision acquisition requirements of sensor signals for slot type heat collection controllers, this paper designs a data acquisition module based on STM32F446 microcontroller as the core controller, which is built around AD7689 multi-channel analog-to-digital conversion chip. It supports flexible configuration of each channel as current signal or RTD (thermal resistance) signal acquisition mode to adapt to different types of sensor inputs. The sliding window filtering algorithm is introduced during the system acquisition process to effectively suppress noise and improve data stability and reliability. After data collection, it can be accurately transmitted to the upper controller through a high-speed interface, and supports channel calibration and parameter configuration through the upper computer. The test results on the trough type heat collection experimental platform show that the module has good performance, small error, high accuracy, and can meet the engineering application requirements of multi-channel high-precision analog signal acquisition in trough type photothermal systems.

Keywords: Trough photothermal; Analog quantity; High precision

0 引言

槽式光热发电技术 (Parabolic Trough Solar Thermal Power) 利用抛物槽式聚光器将太阳辐射能聚焦至集热管中, 通过传热工质 (如熔盐) 转换为热能, 驱动热力循环以实现发电, 是当前可再生能源领域的重要发展方向之一^[1]。该系统在运行过程中需对集热管熔盐温度、反射镜倾角、液压压力等关键参数进行实时监测, 以保障光热转换效率和系统运行的安全性。其中, 铂电阻 (RTD) 信号用于精确采集集热器各节点的温度分布; 而 4 - 20 mA 电流信号则用于获取高精度倾角传感器的角度数据。这些模拟信号的同步、高精度采集, 是实现光热系统智能调控和故障预

警的基础^[2]。

然而, 槽式光热系统通常部署在野外环境中, 系统结构庞大、测点分布密集, 对数据采集模块提出了严苛要求: 不仅需支持十路以上的模拟量通道并行采集, 还需实现微伏级电压与毫安级电流的高精度解析能力。例如, 为满足热场控制需求, RTD 采集通道通常要求测温精度优于 $\pm 0.1\%$ ^[3]。目前, 工程实践中普遍采用工业可编程逻辑控制器 (PLC) 及其扩展模块 (如西门子 S7 系列、施耐德 M340 系列等) 实现信号采集^[4]。尽管 PLC 具备良好的稳定性与模块化扩展能力, 但其硬件成本较高, 不利于大规模部署; 同时其针对 RTD 三线制补偿、温漂优化等光热

特有应用缺乏灵活性与优化空间^[6]。

为降低成本，部分研究尝试使用通用嵌入式控制器（如 STM32 系列）实现采集任务。尽管其具备较高的性价比，但受限于其内置 12 位 ADC 精度、通道数量有限（≤ 8 路）以及抗干扰能力不足，难以满足槽式光热系统对大规模、分布式、精密采集的工程需求。例如，刘旻等人设计了基于 AT89 单片机和 4 通道 ADC 的模拟量采集系统^[6]，陈建钢等采用 FreeRTOS 调度策略提升并发控制能力^[7]，但均未能在通道数与采集精度方面满足实际光热项目的应用标准。

针对上述问题，本文设计并实现了一种面向槽式光热系统的高精度多通道模拟量采集单元。本单元以 16 位高精度 ADC 芯片 AD7689 为核心，支持 12 路模拟信号输入，兼容 RTD 2/3/4 线制补偿测量及 4 - 20 mA 电流信号直采。硬件采用低噪声模拟前端与低温漂基准源设计，实现 ±0.1% FSR 级别的模拟信号采集精度；软件层则基于 FreeRTOS 构建多任务调度系统，确保所有通道在百毫秒级采样周期内完成同步采集与滑动滤波处理。控制器通过以太网芯片与上位机通信，在保障系统稳定性与数据完整性的同时，大幅降低单通道成本，提供一种可靠、经济、适配性强的槽式光热系统信号采集解决方案。

1 总体设计

模拟信号采集单元的的总体系统框架如图 1 所示。来自传感器的模拟信号首先通过输入保护电路，以防止过压或浪涌干扰；随后输入至模拟开关模块，实现不同类型信号（电流、RTD）的通道选择与工作模式切换。

选通后的信号进入差分放大电路，根据具体信号特性进行电平放大与共模干扰抑制，之后经过保护与 RC 低通滤波处理，以抑制高频噪声并提高采集稳定性。经信号调理后的模拟信号输入至高精度 16 位 ADC 芯片 AD7689，完成模数转换。

转换后的数字信号由 STM32F446 单片机接收处理，并通过集成以太网芯片进行网络通信，将数据上传至上位机系统，实现远程监控与智能决策。

整个系统具备高性能、多路隔离输入能力，支持高精度、低功耗、实时性强的数据采集需求，显著提升槽式光热系统边缘控制层的数据处理效率与部署灵活性（见图 1）。

2 硬件电路设计

2.1 模拟量输入接口电路设计

模拟量输入电路需要对电流、RTD 信号进行同步采样。因此在信号进入采样链路前需进行基础的信号转换与保护。如图 2 所示，接口电路部分主要包括输入防护与信号匹配功能。

对于 4 - 20 mA 电流信号，接口电路首先通过 150 Ω 高精度采样电阻将其转换为对应的电压信号（范围约 0.6 V 至 3 V）。此信号随后进入由限流电阻与瞬态电压抑制二极管（TVS）构成的保护网络，用于防止输入端过压或浪涌损坏后级器件。

RTD 信号接口通过 STM32 控制模拟开关输出激励电流以此测得电压信号，每路通道均有独立的激励电流源与补偿线，确保三线制测温电路具有线阻消除能力（见

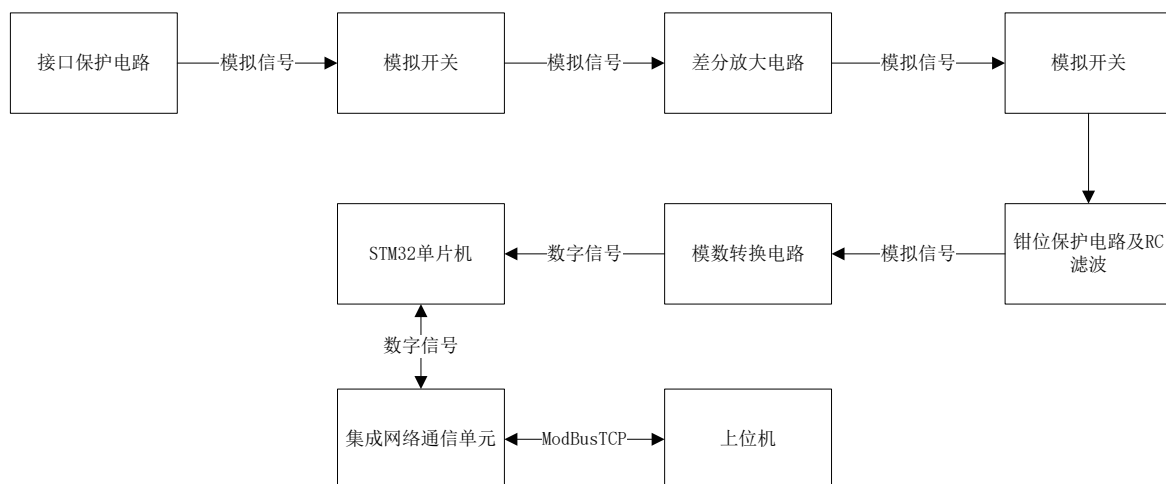


图1 模拟信号采集单元总体系统框图

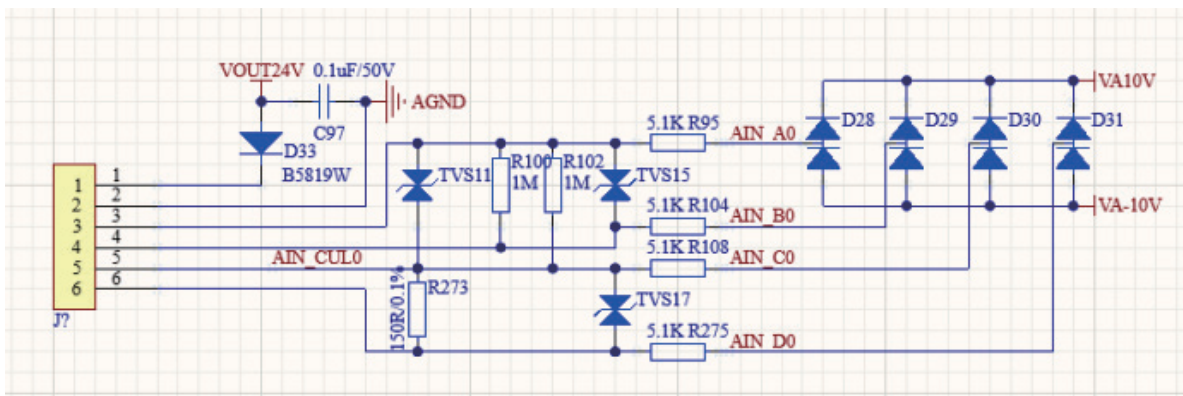


图2 模拟量输入接口电路原理图

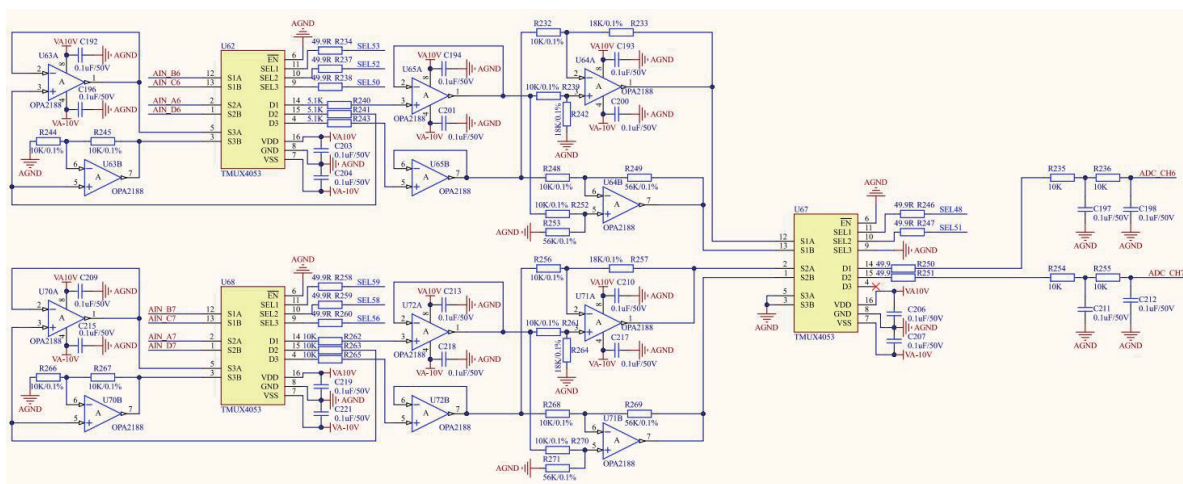


图3 模拟量输入前端电路原理图

图2)。

2.2 模拟量输入前端电路设计

整体电路由信号模式切换、差分放大、前后级模拟开关、多路复用路径切换单元及钳位保护与低通滤波网络构成，其结构如图3所示，具体功能分述如下：

2.2.1 模式切换与三线 RTD 补偿电路

输入信号首先通过第一级模拟开关进行采集模式选择，支持电流模式与 RTD 模式的动态切换。

对于电流信号输入，来自 4 - 20 mA 传感器的模拟信号通过 150 Ω 精密采样电阻转换为 0.6 - 3 V 的电压信号；

对于 RTD 温度信号，外部恒流源激励 RTD，分别产生两个测温端电压，若为 3 线制 RTD，则通过模拟开关的 S3B 将 U- 电压放大一倍以进行线阻消除，提升测量精度。

2.2.2 差分放大与信号调理

模式切换后的信号依次进入高共模抑制比 (CMRR) 差分放大电路，基于高精度低漂运算放大器构建。根据信

号类型分别配置不同增益路径：

电流通道设定放大倍数为 1.1，用于适度放大采样电压；RTD 通道则配置为 5.1 倍，以提升小信号分辨率并做好匹配 ADC 动态范围。

电路反馈网络通过精密电阻设定，确保各类信号在调理后均落于 ADC 的 0 - 4.096 V 工作范围内，有效抑制共模干扰与输入失调误差。

2.2.3 信号路径复用与后级模式选择

经过放大后的两路信号再次通过第二级模拟开关统一调度至 ADC 输入端。该模块负责选择当前采集通道为电流路径或 RTD 路径，实现软硬协同的信号通道复用策略，不仅减少模拟通道占用，还简化了系统电路资源配置。

2.2.4 钳位保护与二阶 RC 低通滤波网络

为了提升系统的抗浪涌干扰能力及抑制高频噪声，在 ADC 输入端前引入了钳位保护电路与二阶 RC 低通滤波器^[8]。

钳位保护电路由缓冲运放与反向并联二极管构成，可在输入信号发生过压或静电放电（ESD）时快速钳位，有效保护 ADC 输入端不受损伤；滤波网络则由两个 RC 单元级联构成，典型配置为每级 10 kΩ 串联电阻与 1 nF 对地电容，整体形成二阶低通滤波器，截止频率约为（见图 3）：

$$f_c \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1C_1 \cdot R_2C_2}} \approx 11.3\text{KHz} \quad (1)$$

2.3 AD7689 采集电路设计

本系统模拟信号采集单元采用 ADI 公司推出的 AD7689 芯片作为模数转换核心器件。AD7689 为 16 位逐次逼近型 ADC，内置多路模拟输入开关，支持最多 8 路伪差分信号采集，最大采样速率可达 250 kSPS，并具有高精度、低功耗等特点，能够满足多通道模拟量高分辨率采集需求。

AD7689 采用 SPI 串行接口方式与 STM32F446 单片机通信，控制方式灵活，通信可靠，物理连接简单，便于电路板布局设计，结构如图 4 所示。系统通过两片 AD7689 的复用，通过不同的片选信号进行选择，实现 12 路信号的多路复用采集，采样前由 STM32 发送配置字选择当前采集通道，采样完成后将 16 位数字数据传送至主控处理。

芯片采用内部输出的 4.096V 基准源电压作为参考（基准源电压同时也可以通过软件配置为 2.5V）与前端信

号调理电路输出范围严格匹配，确保模数转换精度。采样启动通过 STM32 向 CNV 引脚发送片选信号以启动通信，结合 FreeRTOS 系统完成定时调度与数据同步采集，适用于光热电站复杂应用环境中的多传感器高精度信号获取任务（见图 4）。

3 软件程序设计

3.1 STM32CubeMX 软件配置

STM32CubeMX 是 ST 公司推出的一款图形化配置工具，能够显著简化 STM32 微控制器的外设初始化与驱动开发流程。本文采用 STM32CubeMX 对 STM32F446 微控制器的 GPIO、SPI、USART、定时器等外设进行初始化配置，并生成对应的 Keil 工程文件。

在此基础上，利用 STM32Cube 提供的 HAL 库函数编写 SPI 通信驱动、AD7689 控制逻辑以及数据传输任务，配合 FreeRTOS 实现多通道模拟信号的定时采样与并发处理，提升系统开发效率与可靠性。

3.2 FreeRTOS 实时操作系统

FreeRTOS 是一款轻量级开源实时操作系统，具备任务调度、时间管理、队列通信等多种功能，广泛应用于资源受限的嵌入式系统中。本文在 STM32F446 平台上引入 FreeRTOS，主要用于实现模拟信号采集与数据通信任务的多线程调度与管理。

系统将数据采集、滤波处理、SPI 通信及网络上

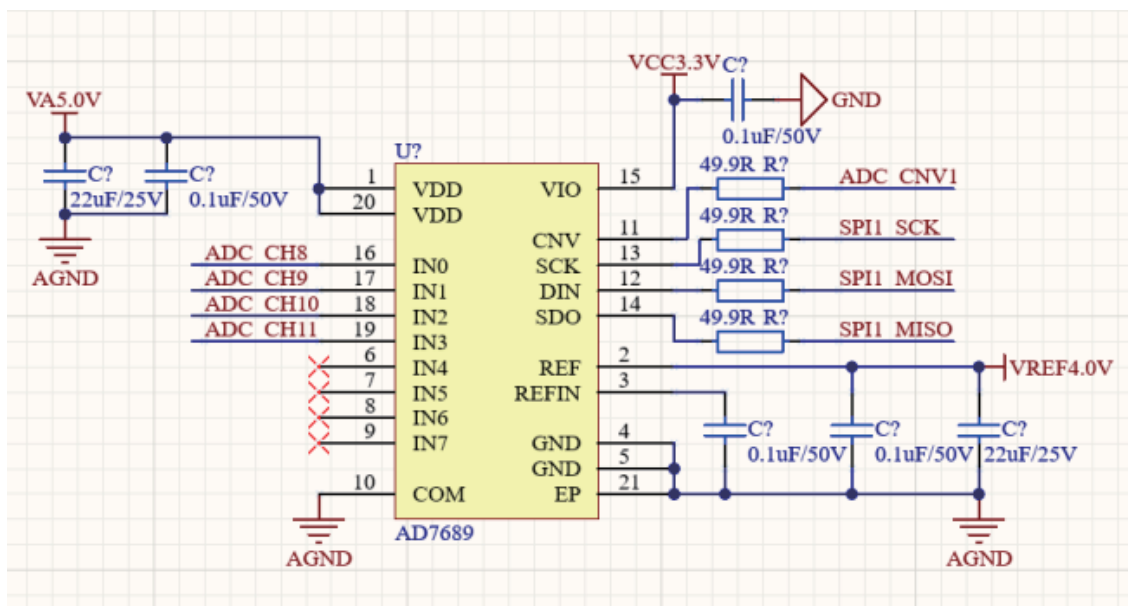


图4 AD7689电路原理图

传等功能划分为独立任务，并设定不同优先级，通过 FreeRTOS 的时间片轮转与抢占式调度机制，实现多通道数据的同步采样与高效处理，提升边缘控制器的实时性与响应能力。

3.3 底层驱动设计

AD7689 是一款具备 16 位分辨率的多通道逐次逼近型 ADC 芯片，支持最多 8 路差分信号输入，并具备串行 SPI 接口通信功能。数据采用高位在前、低位在后的格式进行传输，每次采样需连续读取两字节数据，组合后获得完整采样值。

系统通过 STM32F446 单片机控制 AD7689 的片选、时钟与数据引脚，实现配置与采样过程。在初始化阶段，首先通过 SPI 写入控制字以设定采样通道、输入模式和参考配置，将 AD7689 配置为序列器模式进行循环采样，减少写命令次是；随后单片机发起读数命令读取两字节结果并回读采样命令。通过串行接口顺序读取 MSB 与 LSB，并将其合并得到原始数据，同时通过回读命令确定对应采样通道。

由于 AD7689 返回的数据为无符号整数格式，为实现对物理量的准确解析，需结合校准系数对采样数据进行线性转换，通用转换模型如下

$$y=kx+b \quad (2)$$

其中， x 为原始 ADC 采样值， k 为比例系数， b 为偏置补偿量，二者由上位机通过对比标准输入值与采集值进行线性拟合后获得。转换后的 y 表示对应的物理量输出，可为阻值（RTD 模式）或电流值（mA 模式）。

当系统处于 RTD 模式时，转换结果为热电阻的阻值（单位： Ω ）。随后通过查表插值的方法，将阻值进一步换算为实际温度值。

在 FreeRTOS 系统中，将数据采集流程封装为独立任务，周期性触发 AD7689 完成多通道模拟量采样，并通过消息队列将采样结果传递给后续的数据处理与上传任务。在处理任务中，首先对原始采样数据应用滑动窗口滤波算法^[9]，以抑制瞬时干扰与高频噪声，提高信号稳定性。随后，滤波后的数据结合上位机下发的校准系数与模式选择进行线性转换，最终得到各通道对应的电流值或温度测量结果，为系统状态评估与故障监测提供可靠依据。

3.4 任务设计

任务是实现特定功能的函数，内部通常使用，循环结构或者阻塞状态。在基于 FreeRTOS 系统的设计中，将系统的不同功能划分为独立的任务，每个任务负责执行一个具体的功能。这使得系统可以同时处理多个任务，并且根据优先级进行调度。

在基于 FreeRTOS 的系统架构中，本文将模拟量采集功能划分为 Task_BoardDriver 板卡驱动任务的一个子功能，以提升系统的并行处理能力和响应效率。主函数中通过 xTaskCreate 创建了底层驱动任务 Task_BoardDriver，该任务负责完成 AD7689 模数转换芯片的初始化与轮询采样操作，并周期性读取模拟输入信号，实现对电流、温度等数据的实时采集。

此外，采集到的原始数据还将通过上位机配置的模式与校准参数进行计算转换，输出为对应的工程量值（如电流或温度）。各任务间通过消息队列和信号量等机制进行同步，保证数据处理的连续性与可靠性。该结构提高了系统整体的模块化程度，便于后期维护与扩展。

4 实物调试与验证

4.1 调试步骤

(1) 启动 Keil uVision 集成开发环境，在菜单栏中选择 Build 选项，对包含 AD7689 控制逻辑的程序进行编译。Keil 会输出编译日志和错误提示，用于检查程序中是否存在语法或配置问题。

(2) 使用 ST-Link 工具将带有 STM32 单片机的采集电路板连接至计算机，利用 Download 选项将测试程序烧录至板载 Flash，验证单片机基本运行状态是否正常。

(3) 利用标准信号源为 AD7689 的模拟输入通道提供稳定的模拟电压信号，同时使用万用表测量通道引脚上的实际电压，确认输入信号在 AD7689 允许的量程范围内。

(4) 将完整的采集程序烧录至电路板，通过上电启动系统，并使用串口或 USB 接口进行通信调试。使用 Keil 的 Debug 功能，在 AD7689_SamplePoll() 或相关采集位置设置断点，逐步查看寄存器状态与采样数据，验证转换结果是否与输入信号一致。

(5) 使用校准过的传感器信号进行实际采样测试，比较采集得到的数据与理论值的一致性，进一步验证电流 /

表1 部分通道测量值与基准值对比

通道	信号类型	相关值	单位	1	2	3	4	5
0	RTD	输入值	°C	-200	0	200	400	600
		测量值		-200.2	-0.3	200.2	400.1	599.8
	电流	输入值	mA	4	8	12	16	20
		测量值		4.001	8.001	12.002	16.001	20.001
1	RTD	输入值	°C	-200	0	200	400	600
		测量值		-200.1	-0.2	200.1	399.9	599.7
	电流	输入值	mA	4	8	12	16	20
		测量值		4.001	8.001	12.001	16.001	20.001
2	RTD	输入值	°C	-200	0	200	400	600
		测量值		-200.3	-0.2	200.1	399.9	599.8
	电流	输入值	mA	4	8	12	16	20
		测量值		3.999	8.001	12.001	16.001	19.999
3	RTD	输入值	°C	-200	0	200	400	600
		测量值		-200.2	-0.2	200.2	399.9	599.8
	电流	输入值	mA	4	8	12	16	20
		测量值		3.999	8.002	12.002	16.002	20.001

温度转换精度和系统整体采集性能。调试过程中可通过串口或上位机软件观察原始采样值及转换结果，以确保采集系统运行稳定可靠。

4.2 调试结果

对于 RTD 模式在温度范围为 -200°C 至 600°C 与电流模式范围为 4mA 至 20mA 之间，采样等分划法作为输入值，对系统多个通道的测量精度进行测试。本文以四个通道的 RTD 温度采集和电流采集结果为例进行统计分析。部分测量结果如表 1 所示，输入值分别为标准温度的 RTD 阻值或标准电流，保留三位小数的测量值用于评估系统的实际采集性能。

在 RTD 温度测试中，选取 -200°C、0°C、200°C、400°C 和 600°C 五个点位，测得各通道平均值分别为 -200.2°C、-0.225°C、200.15°C、399.95°C 和 599.78°C，最大绝对误差为 0.3°C，残差范围控制在 ±0.3°C 以内。在电流采集测试中，选取 4mA、8mA、12mA、16mA、20mA 五个点位，测得各通道平均值分别为 4.000、8.001、12.002、16.001 和 20.001mA，最大绝对误差为 0.002mA，误差极小，几乎可以忽略。

利用 MATLAB 对 RTD 三个通道的采集值进行可视化处理，绘制采集值与输入值对比图与残差图，如图 5 所示。图 5 中的折线图表明采集值与标准输入高度一致，残差图则表明温度采集的误差呈随机分布，无明显系统偏差，

且温度采集值全部位于 ±0.3°C 以内。同样展示了电流采集值与输入值的对比和残差分布，均保持在 ±0.003mA 以内，表现出极高的一致性。

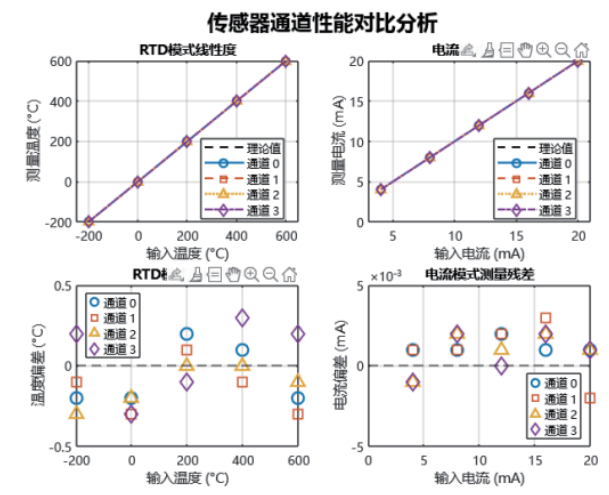


图5 传感器通道性能对比分析图

根据《GBT 13283—2008 工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级》标准^[10]，本系统 RTD 通道和电流通道均达到了 1.0 级精度要求，完全满足高精度工业采集需求。

5 结语

(1) 本文设计了一种面向槽式光热系统的高精度多通道模拟量采集方法，核心采集器件选用两片 AD7689 模数转换芯片，并结合 STM32 系列微控制器构建数据采集模块。通过分别控制两片 AD7689 的片选线，实现对 12 路通

道的独立切换采集,支持 RTD 温度传感器与 4-20 mA 工业电流信号的采集需求。

AD7689 芯片具备 16 位分辨率和较高的采样速率,内部集成采样保持电路和参考电压缓冲,能够简化外围硬件设计。本设计通过统一的输入接口,实现多种传感器信号的兼容接入,提升模块的通用性与扩展性,适应光热系统复杂多变的现场测量需求。

(2) 在软件设计方面,本文引入滑动窗口平均滤波算法,针对光热系统中常见的温度或电流波动,能够有效平滑短期干扰,提高采集数据的稳定性与可信度。同时,系统支持通过上位机实现数据的标定校准,并在采集后进行实时线性转换,可直接输出温度或电流物理量,降低后处理负担,提升系统智能化水平。

(3) 经过实测验证,该模拟量采集方法在温度范围(-200℃至600℃)与电流范围(4 mA至20 mA)内均表现出良好的测量精度,配合校准模型后误差维持在±0.1%以内,完全满足槽式光热系统对于传感器数据高精度、高可靠性的现场需求。

参考文献:

[1] 田永,申红娜. 50MW 槽式光热电站效益分析 [J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2017(5): 369.

[2] 张维蔚. 热管式真空管太阳能聚光集热系统传热特

性分析 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 202-209.

[3] 槽式太阳能光热发电站集热器安装调试技术规程(NB/T 11575-2024) [S]. 国家能源局, 2024.

[4] 王奔. 基于 PLC 的槽式光热太阳能追踪控制系统的研究与应用 [J]. 中国电力, 2020, 53(11).

[5] 国网能源研究院. 槽式和塔式光热发电技术的经济性对比研究 [R]. CSPPLAZA 光热发电网, 2014.

[6] 寇剑菊, 刘旻. 一种基于 AD7865 的数据采集系统的设计 [J]. 国外电子元器件, 2007(9):37-39.

[7] 陈建钢. 基于 STM32 与 FreeRTOS 的物联网鱼缸 [J]. 物联网技术, 2023,13(1):140-143.

[8] 沈威, 钱波, 樊红星. 含 RC 滤波电路的多通道复用模拟信号采集时序研究 [J]. 机械工程与自动化, 2024,(02): 37-38+41.

[9] 牛梦毫, 周前柏, 师璟桐等. 一种基于单片机的模拟量采集滤波算法设计 [J]. 电作, 2024,32(03):88-90.

[10] 上海工业自动化仪表研究所. 工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级: GBT 13283—2008 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2008.

作者简介: 喻志睿 (2001.10-), 男, 汉族, 四川广安人, 本科, 硬件助理工程师, 现任职于上海新能睦控技术有限公司, 研究方向: 硬件设计工作。