

文章编号: 1671-7449(2026)04-0482-11

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(4): 482-492.

基于FPGA的多通道温度采集系统装置设计

郑伟华, 洪应平*, 国胜, 王天晔, 张渊鹏

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 针对航天领域内摇杆测试系统设备的空阶段性测温特性, 为应对多种模拟信号输出的需求, 设计了一种以FPGA为温度采集核心处理系统, 采用高精度16位模数转换器AD7616与PT1000铂热电阻构建的多通道测温网络, 通过集成低噪声仪表放大器与自适应滤波电路实现传感器信号的高精度调理与温度补偿。另外, 通过基于UDP逻辑模块设计数据传输协议和按需调控以太网的数据传输模式, 实现多通道温度数据实时性传输与整体通信网络负载之间的平衡。针对传感器非线性特性, 采用滑动均值滤波和牛顿-拉夫逊法优化测温数据, 有效抑制环境噪声所造成的温度漂移, 降低系统非线性误差, 提高多通道测温系统的响应速度和传输效率。实验表明, 在 $-40\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 该多通道温度采集系统所测温度的相对误差在 0.016% 以内, 在整体验证测试过程中, 测温系统运行流畅、稳定, 具备工业级环境下的强鲁棒性。因此, 该采温系统可用于高精度和快速响应的航空航天等领域中多通道温度检测应用场景。

关键词: 温度采集; FPGA; 滑动均值滤波; 牛顿-拉夫逊法

中图分类号: TH811

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026035

引用格式: 郑伟华, 洪应平, 国胜, 等. 基于FPGA的多通道温度采集系统装置设计[J]. 测试技术学报, 2026, 40(4): 482-492.

Zheng Weihua, Hong Yingping, Guo Sheng, et al. Design of a multi-channel temperature acquisition system based on FPGA[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(4): 482-492.

Design of A Multi-Channel Temperature Acquisition System Based on FPGA

Zheng Weihua, Hong Yingping*, Guo Sheng, Wang Tianye, Zhang Yuanpeng

(State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the phased temperature measurement of the rocker test system equipment in the aerospace field and meeting the needs of various analog signal outputs, a multi-channel temperature acquisition system based on an FPGA as the core processing system is designed. The high-precision 16-bit analog-to-digital converter AD7616 and PT1000 platinum thermal resistance are used to construct a multi-channel temperature measurement network. The high-precision conditioning and temperature compensation of the sensor signal are realized by integrating a low-noise instrumentation amplifier and an adaptive filtering circuit. In addition, through the design of a data transmission protocol based on a UDP logic module and the on-demand control of Ethernet data transmission mode, the balance between the real-time transmission of multi-channel temperature data and the overall communication network load is achieved. To address the nonlinear characteristics

【收稿日期】2025-05-27

【修回日期】2025-10-17

【录用日期】2025-10-21

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(51705475)

【作者简介】郑伟华(1997—), 男, 硕士生, 主要从事电路与嵌入式系统研究。E-mail: a291765994@163.com。

*【通信作者】洪应平(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事极端环境下测试技术及仪器研究。E-mail: honggyingping@nuc.edu.cn。

of the sensor, the sliding mean filtering and Newton-Raphson method are used to optimize the temperature measurement data, which can effectively suppress the temperature drift caused by environmental noise, reduce the nonlinear error of the system, and improve the response speed and transmission efficiency of the multi-channel temperature measurement system. The experimental results show that the relative error of the temperature measured by the multi-channel temperature acquisition system is within 0.016 % in the range of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$. The temperature measurement system runs smoothly and stably in the overall verification test process, and has strong robustness in the industrial environment. Therefore, the temperature acquisition system can be used in multi-channel temperature detection application scenarios in aerospace and other fields with high precision and fast response.

Key words: temperature acquisition; FPGA; slippery mean filtering; Newton-Raphson methods

0 引言

在航天器地面联合试验中,摇杆测试系统作为飞行控制机构的核心验证平台,其温度波动状态直接关联伺服作动器的力矩输出特性与寿命预测精度^[1]。然而,现有的基于微控制单元(Microcontroller Unit, MCU)的多通道温度采集系统不但受限于顺序采样架构与有限的硬件资源,难以满足航天测试中多类型传感器的同步高密度测温需求,而且动态标定误差大^[2-3]。孙巍等^[4]基于STM32H743系列微控制器设计了一种小型化、低功耗水声数据采集存储系统,集成多通道模拟数字转换器(Analog to Digital Converter, ADC)、伪静态随机存储器缓存(Pseudo Static Random Access Memory, PSRAM)、大容量SD卡存储与以太网高速传输功能,专用于小型水下平台长时间稳定采集水声换能器数据。但由于SD卡阵列并行控制及以太网传输速率的特点,导致系统的实时处理效率与整体能效不足。张慧贤等^[5]基于实验室虚拟仪器工程平台(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, LabVIEW)开发了消防机器人底盘热防护8通道温度采集系统,集成PT100传感器、串行通信协议(Modbus Remote Terminal Unit, Modbus-RTU)及小波降噪算法,实现 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温环境的多点实时监测与超温报警。但该系统依赖上位机处理,硬件集成度与嵌入式实时处理能力未充分优化。张楠楠等^[6]基于Xilinx公司推出的全可编程片上系统ZYNQ平台设计了一种无线供电64通道温度采集系统,集成ADS8168 ADC、WiFi传输及磁共振无线供电模块,专用于复杂工业场景远程监控,其支持95 kSa/s采样率,温度误差小于0.28%,并在1 cm供电距离下连续工作8 h。但该集成系统无线传输距离受限(1 cm),且多通道并行采样时存在的网络延迟未优化。胡鹏程等^[7]基于

参考电阻基准、双向恒流激励与半导体制冷器控温(Thermo-Electric Cooler, TEC)的高精度铂电阻开发了一种通过消除恒流源漂移和热电势影响,实现了 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测量准确度,满足超精密激光干涉测量的测温系统。但该系统受限于铂电阻温度-阻值关系的标定误差,需要更加精密的标定方法和多通道切换技术以提升测量分辨力和检测能力。

为解决上述问题,本文提出了基于FPGA的温度采集系统装置,通过引入多通道高精度ADC采集芯片和PT1000铂热电阻构建采温装置。多通道温度采集系统装置使用了惠斯通桥式电路、以UDP逻辑模块设计数据传输协议、可按需调控数据传输模式的以太网,以及采用滑动均值滤波和牛顿-拉夫逊法处理测温数据。

1 系统总体设计

传统铂电阻测温系统凭借结构简单,成本低廉的优势,在工业温度监测领域被广泛使用。然而,在现今的航天系统应用中,该系统易受恒流源漂移和导线热电势及环境温度波动等因素干扰,导致传统铂电阻应用时,在精度要求很高的场景下受限。为此,本研究提出了一种改进方案,针对传统铂电阻的测温采集系统进行改良和优化,来提升它的性能。具体措施包括采用多通道同步采集技术、高精度控制策略和实时操作系统,旨在解决易受恒流源漂移及环境温度波动等局限性,并实现高精度的温度采集和提升测温系统的整体性能^[8]。

如图1所示,该系统由含有放大电路(AD623ARZA)和跟随电路(AD8091ARTZ)的热电阻采集模块、模拟到数字转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)采样模块、现场可编程门阵列系统模块(Field Programmable Gate Array, FPGA)、以太网信号传输模块,以及上位机模块

组成。

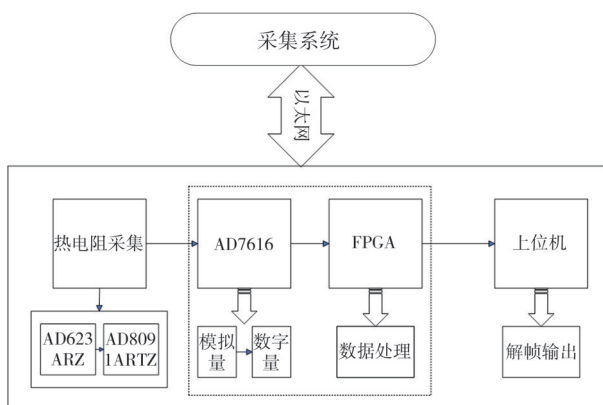


图1 总体框架图

Fig. 1 Overall framework diagram

相比于传统温度传感器的简单测温,该多通道测温系统具有高实时性和高精确性。该系统的温度采集使用的铂热电阻选型为JL GK-WZP-105B(PT1000),其电压特性会随着温度变化而较灵敏,并由以太网传输数据实现系统和上位机的指令间的交互。在实验中,该采温系统可将温度偏差率控制在 $\pm 0.02\%$ 。

FPGA采用一种基于门阵列的结构,每一个芯片由二维的逻辑块构成,每一个逻辑块由水平和垂直的布线通道连接。FPGA有多种配置模式:并行主模式由一片FPGA和一片EPROM组成,FPGA作为主设备主动从EPROM中读取配置数据完成自身编程;外设模式是将FPGA作为微处理器的外设,由微处理器对其编程。

该采温系统中,通过热电阻采集电阻值转为电压值。AD623ARZA是一款仪表放大器,具有极低的功耗(典型值 $<10\text{ mW}$)和宽输入带宽(-3 dB 带宽高达 50 MHz)特点。该器件提供优异质量的信号(信噪比 $\text{SNR}>90\text{ dB}$)和灵活的电源管理选项。AD623ARZA的增益可通过单个外部电阻编程设置为6倍(增益范围通常为 $1\sim 1\,000$ 倍),为信号调理提供了高度灵活性。AD8091ARTZ是一款常见的高速ADC器件,可提供12位分辨率与 1 GSPS 的超高采样率,电压值经过该器件后,被放大一倍,并保持稳定。随后,AD7616将AD8091ARTZ输出的模拟量信号电压值转换为数字量信号,提供给主控FPGA进行后续数据处理。

2 关键电路设计

2.1 温度传感器设计及调理模块

温度传感器为PT1000,采用Ag-Pt复合电极设计,经标定后测量不确定度可达 $\pm 0.1\%$,相较于其他类型的温度传感器,其在 $-200\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超宽工作范围内表现出色,这个工作温度范围远大于其他类型的温度传感器。该温度传感器输出信号与电源电压变化无关,具备极强的抗干扰能力,能够应对航电设备的高精度温度敏感场景^[9]。

如图2所示,基于惠斯通电桥原理^[10],结合AD623ARZ仪表放大器与AD8091ARTZ电压跟随器,构建了高精度铂电阻(PT1000)测温电路。

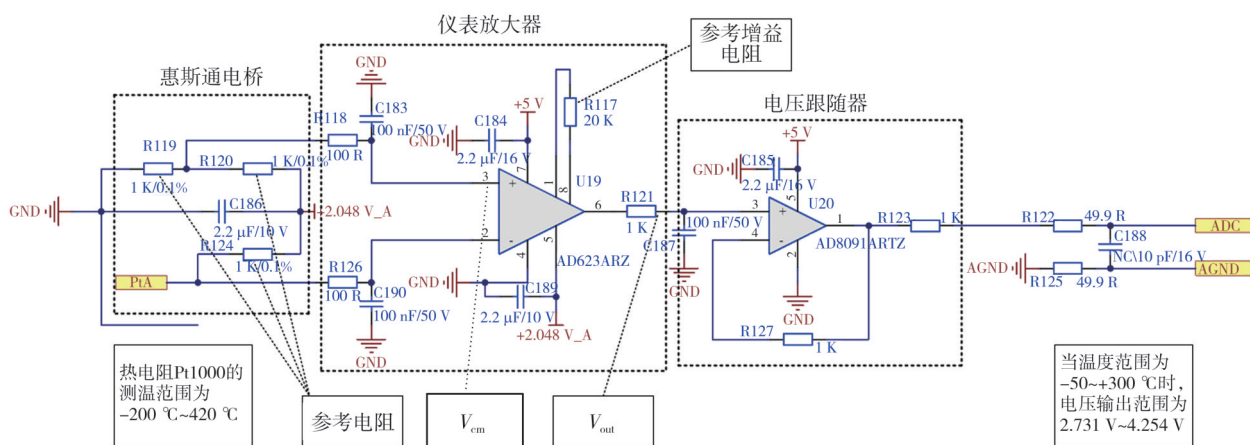


图2 运放电路

Fig. 2 Operational circuit

该电路采用改进型三线制半桥结构,PT1000与参考电阻($R_{\text{ref}}=1\text{ k}\Omega$,电阻温度系数为 $\pm 5\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$)R119、R120和R124构成桥臂,并由精密恒流源($I_s=$

1 mA)激励。三线制接线法通过独立电流注入与电压检测路径,完全消除导线电阻($R_{\text{lead}}\leq 1\text{ }\Omega$)的影响。在惠斯通桥式电路的输出端,AD8091ARTZ作为缓

当温度范围为
 $-50\sim +300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,
 电压输出范围为
 $2.731\text{ V}\sim 4.254\text{ V}$

冲器,增益为1,意味着放大1倍,其有效隔离后级电路负载对电桥平衡的干扰,能够确保信号的完整性,与此同时,其带宽(110 MHz)与压摆率(1 600 V/ μ s)支持快速瞬态响应,避免信号延迟导致的相位失真。AD623ARZ能够有效抑制电源噪声和共模干扰。首先,PT1000采集的电阻信号被转换为电压信号;随后,电压信号被仪表放大器AD623ARZ进行放大,增益为6倍;最后,放大后的信号再经一个二阶低通滤波器滤除高频噪声。

在整体的桥式电路中,根据综合精度计算,系统总误差由多因素叠加构成,可以采用均方根(RMS)误差合成公式

$$\xi_{\text{total}} = \sqrt{\xi_{\text{sensor}}^2 + \xi_{\text{bridge}}^2 + \xi_{\text{amp}}^2 + \xi_{\text{ADC}}^2 + \xi_{\text{env}}^2}, \quad (1)$$

式中: ξ_{sensor} 为传感器非线性, 分段线性化后残差 $\pm 0.02\% \text{F.S.}$; ξ_{bridge} 为电桥失衡误差, 参考电阻温漂 ($5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) 导致满量程误差 $\pm 0.003\% \text{F.S.}$; ξ_{amp} 为放大器误差, AD623ARZ 增益误差 $\pm 0.5\%$ 、共模抑制衰减引入 $\pm 0.01\% \text{F.S.}$; ξ_{ADC} 为 ADC 量化误差; ξ_{env} 为环境温漂, 通过 TEC 控温将恒流源温度波动抑制至 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 。最后可得电流漂移误差 ξ_{total} 为 $\pm 0.005\% \text{F.S.}$ 。

2.2 ADC 采集芯片

在惠斯通电桥结构中, PT1000的非接地端输出电压可通过分压网络进行计算。AD623ARZ 仪表放大器的同相输入端连接至 PT1000 的电压信号, 反相输入端则接入由精密电阻分压产生的 1.024 V 基准电压, 与同相端的输入电压形成差分信号。该差分电压经 AD623ARZ 仪表放大器放大至设定增益。AD623ARZ 能在较高增益下提供优异的共模抑制比(CMRR), 从而将由共模干扰引起的误差降至最小^[11]。CMRR 无穷大时, 共模信号不影响输出, 运放输出电压值 V_{out} 仅由差分信号和增益决定; 但 CMRR 有限时, 共模信号会通过 $\frac{V_{\text{cm}}}{\text{CMRR}}$ (V_{cm} 为共模电压) 项导致输出误差, CMRR 越大, 共模误差越小, 输出电压越精确。计算公式为

$$V_{\text{ref}} \left(\frac{R_{119}}{R_{119} + R_{120}} - \frac{V_{\text{out}}}{\frac{PTA}{PTA + R_{124}}} \right) \left(1 + \frac{100}{R_{\text{ref}}} \right), \quad (2)$$

式中: R_{119} 、 R_{120} 、 R_{124} , PTA 为图 2 中的电阻, 通过 +5 V 供电; $R_{ref}=R_{117}$ 为参考增益电阻值, 为 20 k Ω ; V_{ref} 为 2.048 V; V_{out} 为运放输出电压值。最

后的输出电压值被采集到AD7616运算放大器中,进行模数转换(见图3)^[12]。AD7616是一款16位DAS,支持对16个通道进行双路同步采样,采用5 V单电源供电,可以处理 $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 5\text{ V}$ 和 $\pm 2.5\text{ V}$ 真双极性输入信号,同时每对通道均能以高达1 MSPS的吞吐速率和90.5 dB SNR采样。利用芯片内过采样模式可实现更高的SNR性能(过采样率为2时,SNR为92 dB)。

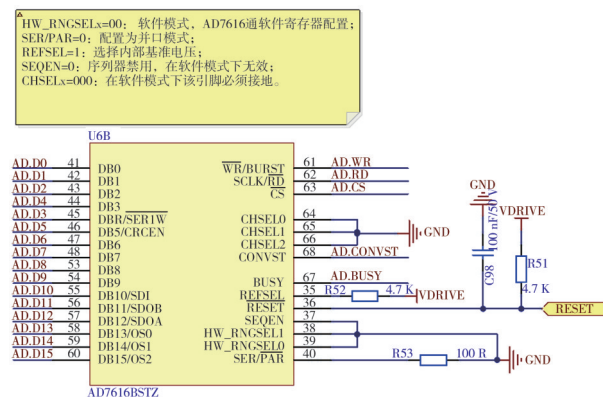


图 3 运放调理电路

Fig. 3 Operational amplifier conditioning circuit

$$V_{\text{out}} = \frac{V_0}{2^{16}} \quad (3)$$

由式(2), 式(3)得出 $PTA=0.000\ 05\ ^\circ\text{C}$ 。经过实验阶段人为计算校准后, 温控系统的测量相对误差可以控制在 $\pm 0.1\%$ 。

2.3 FPGA 主控芯片

图4为该系统中的主控芯片FPGA的接口电路,选取了赛灵思(Xilinx)Spartan-6系列中一款,该型号为XC6SLX45-2FGG484I。

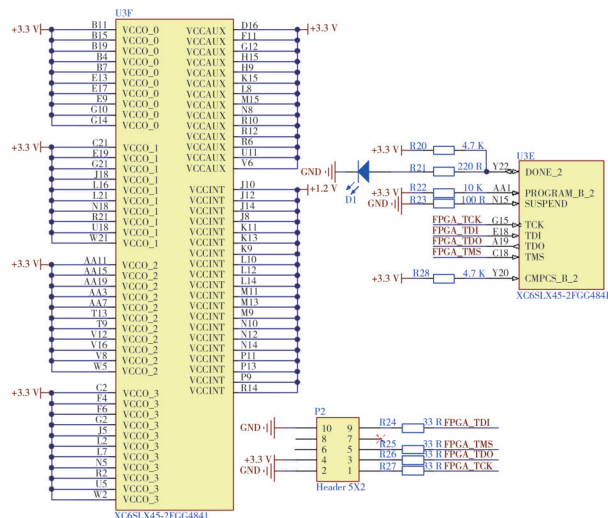


图 4 FPGA 接口电路

Fig. 4 FPGA interface circuit

该型号电子元器件是一款处理器及微控制器, 它的二级分类属于FPGA 现场可编程门阵列。基于Xilinx Spartan-6系列FPGA 的Bank 分区架构, 多电压域设计提升了控制系统的灵活性与可靠性。

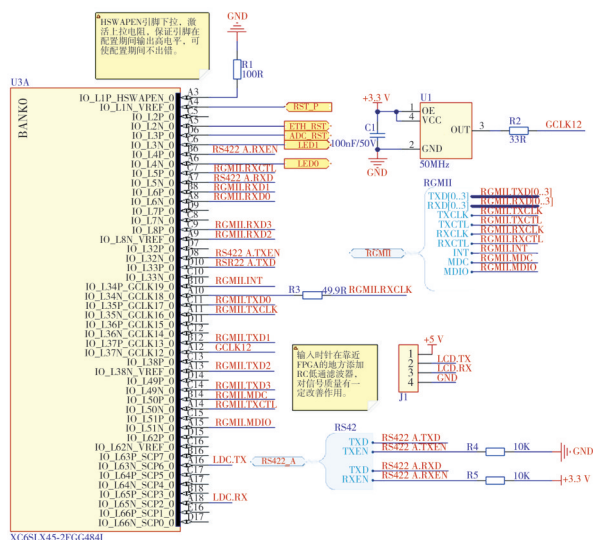


图5 FPGA 电路

Fig. 5 FPGA circuit

在图5中, FPGA(XC6SLX45)模块与以太网模块的协同设计, 实现了数据采集与网络通信的

硬件级优化。FPGA 通过Bank0 的RGMII 接口连接千兆以太网PHY 芯片(RTL8211E), 利用硬件逻辑实现IEEE 1588 精确时钟同步, 相较传统CPU 软处理方案延迟率降低83%。FPGA 内部构建并行处理通道, 通过RS422 接口连接16 路运算放大器传感器(1 MS/s 采样率), 是一对多的通信总线, 最高传输速率可达 $10 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.4 以太网传输网络

图6 为以太网硬件架构图, FPGA 与以太网模块通过高速网络协议栈构成实时通信系统的核心数据通路。其显示以太网物理层(PHY)芯片通过RGMII (Reduced Gigabit Media Independent Interface) 与FPGA 的专用I/O Bank 连接, 其数据通道包含8 位并行总线(TXD[7:0]/RXD[7:0]) 及随路时钟(TX_CLK/RX_CLK)。值得注意的是, FPGA 内部集成Tri-Speed Ethernet MAC 控制器。如图6 所示架构, FPGA 内部嵌入了基于状态机的自适应速率协商模块, 并通过串行总线接口(Management Data Input/Output, MDIO)动态配置PHY 芯片的速率与双工模式^[13]。

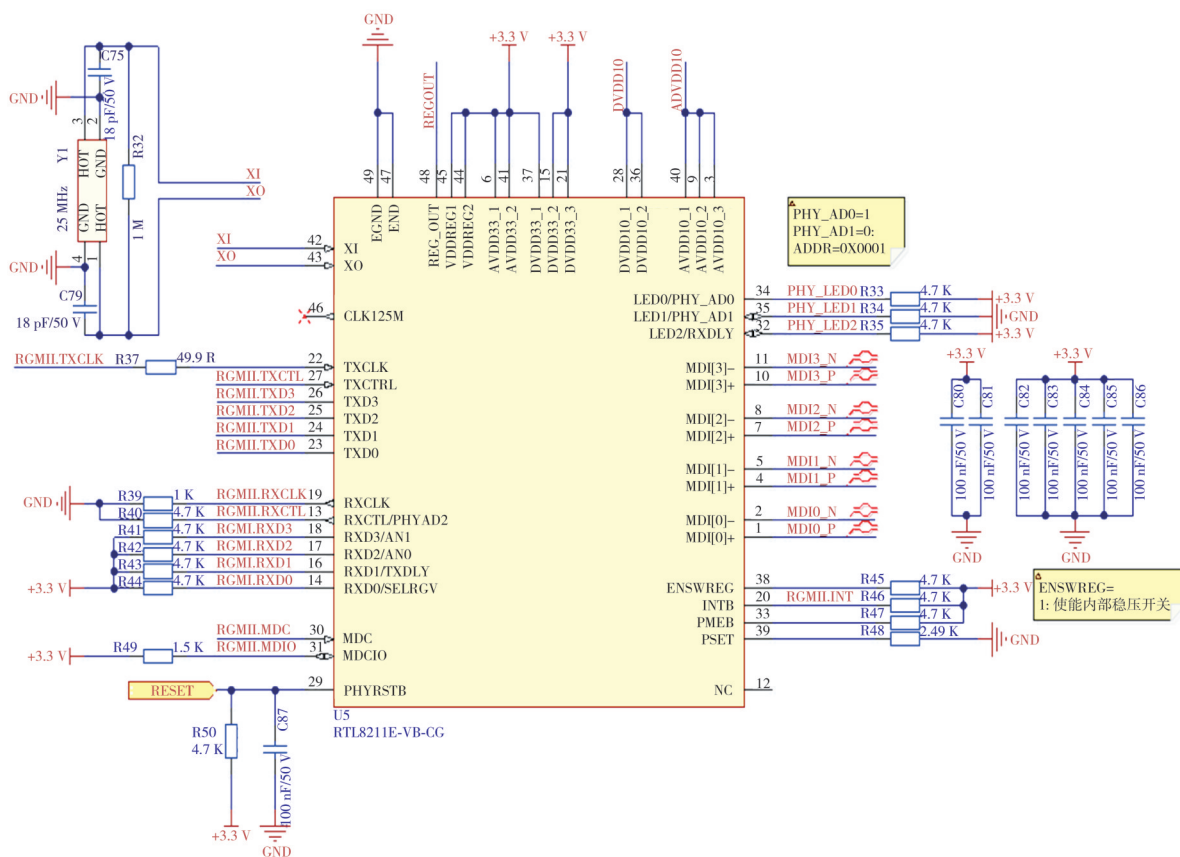


图6 以太网电路

Fig. 6 ETH circuit

相位调整电路(如PLL锁相环与MMCM多模分频锁相环模块)可实现125 MHz时钟与数据流的精确同步,其时钟偏移补偿精度可达 ± 50 ps,满足IEEE 802.3—2012标准对千兆以太网的时序要求。在协议处理层面,FPGA逻辑层采用硬件加速设计,图6中的循环冗余校验32位算法模块(Cyclic Redundancy Check 32, CRC32)与数据总线直连传输协议(AXI-Stream),能实现帧校验与数据封装的流水线操作。

3 系统软件设计

3.1 系统控制逻辑设计

系统的总体控制逻辑如图7所示,系统上电后会对所有板卡芯片进行复位和初始化,通信背板通过网线连接电脑,以太网传输层协议为UDP。通信背板接收到UDP数据后,进入指令接收主进程,进而对接收的指令进行判读,并将有效指令解析完成后控制各功能板卡的输出。

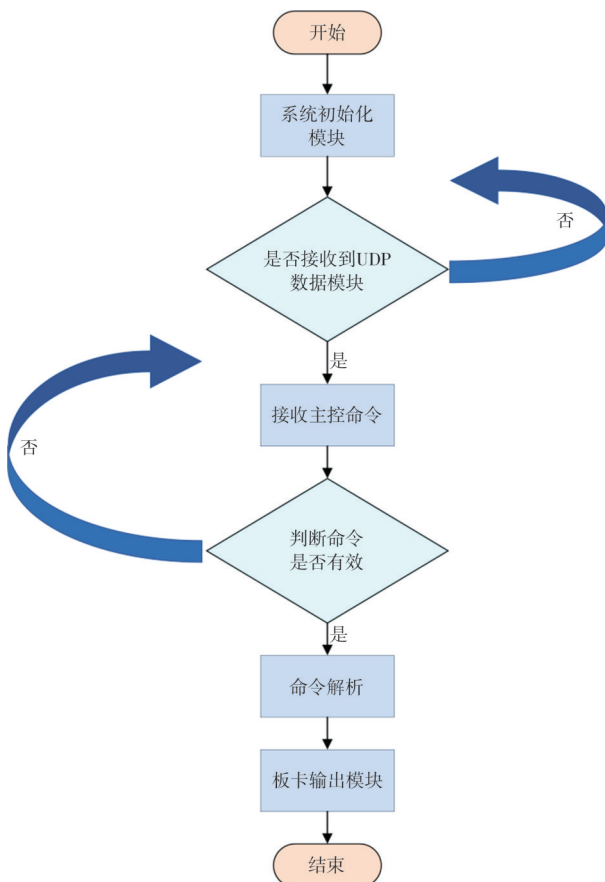


图7 控制逻辑流程图

Fig. 7 Control logic flow chart

通信指令采用统一的数据格式,完整的指令包设定为10个字节,包括帧头、板卡号命令和帧

尾等信息,具体格式见表1。

表1 指令包数据格式

Tab. 1 Instruction package data format

名称	帧头	板卡号	CMD	DATA	帧尾
字节数/B	2	2	2	2	2
内容	AAAF				FFFF

3.2 UDP逻辑模块设计

本系统中通信背板和时间触发以太网板卡(Time Triggered Ethernet, TTE)的以太网收发模块采用的是UDP传输协议。UDP不需要连接,传输速度比TCP快,且易于纯逻辑实现^[14]。图8和图9分别展示了完整的以太网数据帧格式架构及UDP接收模块的有限状态机设计,其中状态机通过预设的时序跳转逻辑实现数据包的高效解析与处理流程。这种设计在保证数据处理实时性的同时,有效降低了FPGA逻辑资源的消耗。

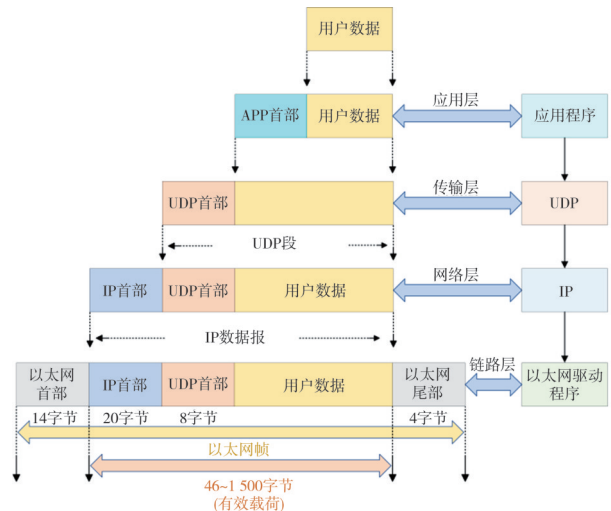


图8 以太网数据包格式

Fig. 8 Ethernet packet data format

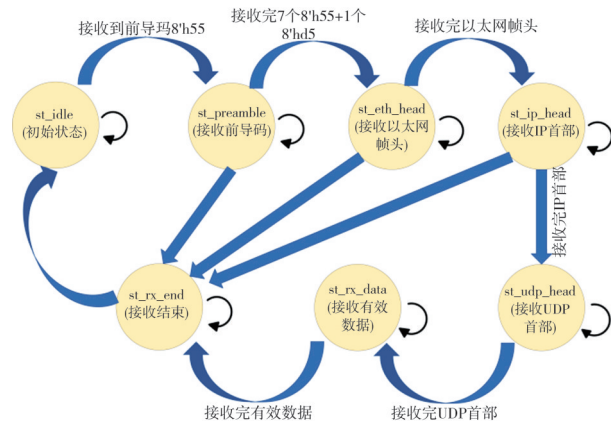


图9 UDP接收模块的状态跳转图

Fig. 9 State jump diagram of UDP receiving module

3.3 滑动均值滤波

滑动均值滤波器是一种在数字信号处理中广泛应用的简单且有效的滤波器。其采用移动窗口内数据点的算术平均运算来抑制随机噪声干扰,可显著提升信号平滑度。在温度控制系统中,该算法以前向滑动窗口方式对传感器采集的模拟电压序列进行实时处理:设采样序列为 $V_0, V_1, \dots, V_n$,当系统获取第 n 个采样点时,算法自动选取包含当前点在内的连续 K 个样本构建数据窗口,计算其算术平均值作为有效输出值,其数学描述为

$$\bar{V}_n = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{k-1} V_{n-i}, \quad (4)$$

式中: k 为预设滤波窗口宽度,为时间序列采样点索引。随着采样过程推进,窗口以“先进先出”机制动态更新,持续生成平滑后的信号波形。在温度控制系统中,滑动均值滤波的应用具有显著优势,可以同时实现平滑和去噪,有效滤除高频噪声,而且,对于非线性信号也有较好的适应性,适用于实时信号处理。

3.4 牛顿-拉夫逊法计算阻值

在传统温度检测系统中,铂电阻(PT1000)的温度-阻值关系常被建模为线性方程。通过最小二乘法拟合可得经验公式 $R_{\text{line}} = 3.7874T + 986.4$, $R^2 = 0.9993$ 。虽然该模型在统计学上表现出高相关性,但其物理本质忽略了铂电阻的非线性特性^[15]。实验表明,线性模型有时会有几摄氏度的偏差。针对上述问题,本系统引入牛顿-拉夫逊法,其通过迭代求解的方式,能够准确处理温度-电压转换过程中的非线性特性,特别适合在环境条件复杂的场合中实现高精度温度检测与调控。其核心迭代公式为

$$T_{n+1} = T_n - \frac{f'(T_n)}{f(T_n)}, \quad (5)$$

式中: $f(T)$ 为铂电阻实际测量值; T_n 为需要计算的温度。 R_0 为 $1000\ \Omega$, R_{meas} 与理论模型 $R(T)$ 的残差函数为

$$f(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3) - R_{\text{meas}}. \quad (6)$$

通过求解该非线性方程,算法可自适应式(7)中的二次/三次多项式模型^[16],有效克服检测环境中温度-电压转换的非理想特性。

$$\varphi(x) = x_1 - \frac{f'(x_1)}{f(x_1)},$$

$$R = R_0(1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3),$$

$$R = R_0(1 + AT + BT^2), \quad (7)$$

式中: R 为铂电阻阻值; T 为需要计算的温度; $A = 3.908 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$; $B = -5.775 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}^2$; $C = -4.183 \times 10^{-12}/^\circ\text{C}^{17}$ 。

4 实验结果与分析

本文所设计的多通道温度采集系统装置如图10所示,包括集成人机交互界面、16通道输出接口、千兆以太网端口、PT1000温度传感器阵列及FPGA主控板卡。测温上位机软件实现了系统控制逻辑,滑动均值滤波与牛顿-拉夫逊解算算法。图10(b)展示了设备连接PT1000传感器后,通道1在室温环境下的实时测温场景。



(a) 多通道温度采集系统装置



(b) 16通道采温设备

图10 多通道温度采集系统装置实物图

Fig. 10 Physical diagram of multi-channel temperature acquisition system device

为确保16通道采集的温度数据高效、同步和实时上传,以及应对航天摇杆测试系统对实时状态监控的需求,本系统采用上文所定制的UDP协议栈进行数据传输^[18]。如表2所示,数据帧专为多通道采集设计,帧头AAAF后顺序携带16个通道(CH1-CH16)的温度数据(每个通道2B),以实现多通道数据在单帧内的紧凑封装与高效传输。

为验证多通道采温系统的通信功能能否在不同工况下可靠承载多通道数据流,并确定最优的

传输参数。本文测试了自动上报更新周期(即数据包发送间隔)对关键性能指标如有效接收帧率与带宽占用率的影响,结果如表 3 与图 11 所示。

表 2 以太网通信协议帧格式

Tab. 2 Ethernet communication protocol frame format					
名称	帧头	CH1	CH2	...	CH16
字节数/B	2	2	2	2	2
内容	AAAF				

表 3 以太网通信性能测试

Tab. 3 Ethernet communication performance test				
自动上报模式	更新周期/ms	时长/s	接收总帧数	带宽 占用率/%
I(持续流)	—	10	8 510	82
II	1	10	5 640	67
III	10	10	5 620	45
IV	500	10	17	8.3

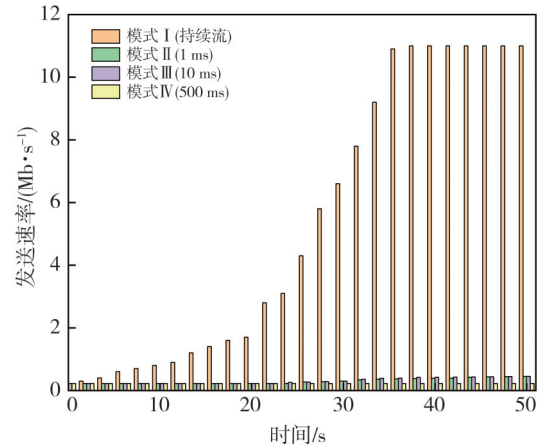
表 3 清晰揭示了更新周期与峰值带宽占用率之间的关系。对比模式 II、III 和 IV, 将更新周期从 1 ms 增至 500 ms, 带宽占用率从 67% 阶梯式下降至 8.3%。更新周期与传输带宽的变化规律为本文设计的多通道温度采集系统提供了所测温度数据流传输调控依据。

如图 11(a) 所示, 在模式 I 下(无周期限制, 持续流), 温度采集系统的数据发送速率迅速上升并稳定在最高值($11.0 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$)。模式 II(更新周期 1 ms)、模式 III(更新周期 10 ms)和模式 IV(更新周期 500 ms)的最高发送速率分别为 0.45、0.45 和 $0.224 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 11(b), 模式 I~IV 的最高接收速率为 7.7、0.5、0.5 和 $0.104 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 。模式 I 在最高发送和接收速率工作状态下, 传输温度数据所占用峰值带宽率达 82%, 该状态接近千兆以太网 UDP 传输的极限。对比模式 II、III 和 IV 可知, 缩短更新周期会显著提高带宽占用率。

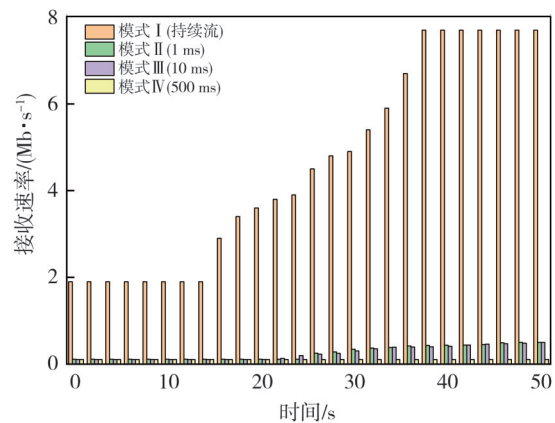
当采温系统需要高数据刷新率时(如模式 II, 1 ms 周期), 本文所设计的多通道温度采集系统仍能 67% 的带宽占用率稳定运行, 确保了 16 通道所采集的温度数据近实时(毫秒级)同步更新。当适当延长更新周期(如模式 III, 10 ms 周期), 将带宽占用率降至 45%, 从而为数据传输网络上的其他控制指令留出充足带宽, 可提升整个温控系统的通信的确定性与可靠性。

采温系统所使用的以太网通信的性能测试结果表明, 基于 FPGA 的 UDP 传输系统, 能够灵活适配从高实时性到低资源占用的不同需求。通过量化分析并调控“更新周期”这一关键参数, 可以

实现多通道温度数据吞吐量、传输实时性与整体网络通信负载之间的最佳平衡, 这为航天摇杆测试系统在不同测试阶段的稳定、可靠运行提供了坚实的通信保障。



(a) 以太网数据传输发送速率



(b) 以太网数据传输接收速率

图 11 不同自动上报模式下以太网通信性能测试图

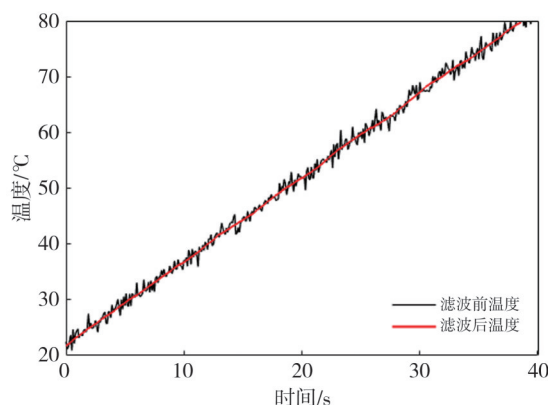
Fig. 11 Ethernet communication performance test under different automatic reporting modes

多通道温度采集系统的 PT1000 传感器所采集的原始信号易受环境噪声干扰, 为此本文在处理与分析温度数据时采用滑动均值滤波的方法进行实时处理。滤波效果如图 12 所示, 其中图 12(a) 对比了滤波前后通道 1 的温度曲线, 图 12(b) 为局部放大图。

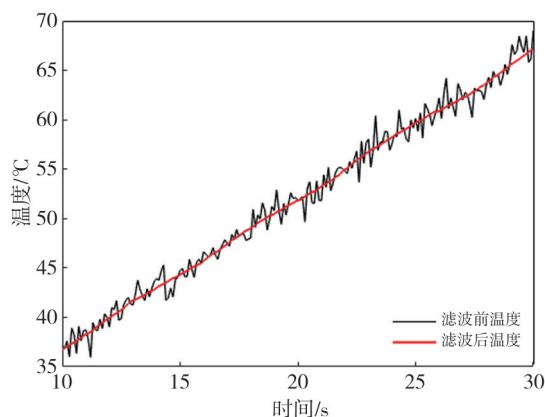
分析图 12(a) 可知, 经滑动均值滤波后, 温度曲线的随机高频噪声分量被有效抑制, 信号轨迹变得平滑。从图 12(b) 可以进一步观察到, 滤波过程在保持温度变化趋势的同时, 消除了原始信号的频繁波动, 提升了温度数值信号的质量。该温度信号数据处理过程有效降低了系统内或外部环境噪声对后续温度解算环节(牛顿-拉夫逊法)的干

扰,为本测温系统实现高测量精度提供了必要的

信号处理保障。



(a) 引入滤波前后对比



(b) 局部放大图

图 12 滑动均值滤波

Fig. 12 Moving average filter

为评估牛顿-拉夫逊法对提升多通道测温系统全温域一致性的贡献,本文在 $-40\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内选取了通道1中的12个温度点进行分析。如表4所示,线性拟合法在 $-40\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内所测试的

温度的误差随温度增大呈现系统性偏离,绝对温度误差显著增大(从 $0.038\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增至 $10.08\text{ }^{\circ}\text{C}$),且相对温度误差分布离散($3.45\%\sim 10.8\%$)。

表 4 两种算法处理通道1所采集温度数值的对比

Tab. 4 Comparison of two algorithms for processing temperature values collected from channel 1

设定温度/ $^{\circ}\text{C}$	线性拟合			牛顿-拉夫逊法		
	实测温度值/ $^{\circ}\text{C}$	绝对温度误差/ $^{\circ}\text{C}$	相对温度误差/ $\%$	实测温度值/ $^{\circ}\text{C}$	绝对温度误差/ $^{\circ}\text{C}$	相对温度误差/ $\%$
-40	-38.33	1.68	4.20	-39.992	0.008	0.020 0
-20	-19.31	0.69	3.45	-19.999	0.001	0.005 0
1	1.038	0.038	3.80	1.000 8	0.000 8	0.080 0
20	17.84	2.16	10.80	19.999 4	0.000 6	0.003 0
40	37.18	2.82	7.05	39.998 6	0.001 4	0.003 5
60	56.52	3.48	5.80	59.998 2	0.001 8	0.003 0
80	75.68	4.32	5.40	79.997 6	0.002 4	0.003 0
100	94.55	5.45	5.45	99.996 5	0.003 5	0.003 5
120	113.22	6.78	5.65	119.994	0.006	0.005 0
140	131.68	8.32	5.94	139.992	0.008	0.005 7
160	149.92	10.08	6.30	159.988	0.012	0.007 5
180	172.98	7.02	3.90	179.984	0.016	0.008 9

与温度变化强相关的误差特性意味着,在不同工作温度下,系统各通道的测量偏差不一致且难以进行预测。线性拟合法严重制约了多通道系统进行宽温域精准监测与通道间数据比对的可信度。

相比之下,当采用牛顿-拉夫逊法时,测温系统的测温精度显著提高。全量程内($-40\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$)中测温的最大绝对误差仅为 $0.016\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时),仅为线性拟合法在 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所得温度的绝对误差的 0.22% 。牛顿-拉夫逊法在全部12个测试点上的相对温度误差稳定保持在 $0.003\text{ }0\%\sim 0.020\text{ }0\%$ 范围内。该实验结果证明了牛顿-拉夫逊法能够有效克服铂电阻PT1000测温的非线性特性带来的温漂,并且能够确保16个采集通道在 $-40\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的任意测试

点上均能提供具有一致精度基准的温度数据。因此,牛顿-拉夫逊法的引入,解决了传统线性方法在宽温域应用中“误差随温度发散”的核心问题,为多通道系统实现全温域、高一致和可互信的温度测量提供了算法保障。

由表4与表5可知,本文设计的基于16通道温度输出、PT1000温度传感器阵列及FPGA主控板卡,以千兆以太网为传输网络,并采集温度时使用滤波法去噪和牛顿-拉夫逊法处理温度数值的多通道温度采集系统可实现高精度、实时性好和宽温度区间的温度采集($-40\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间内的测温相对误差 $<0.02\%$,绝对误差 $<0.016\text{ }^{\circ}\text{C}$)。如表5所示,对比牛顿-拉夫逊法和线性拟合法在处理同一温度点($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

不同采温通道所测得温度可知,当使用牛顿-拉夫逊法时采温系统具有更高的测温精度。

表 5 两种算法处理不同通道在测温点 20 ℃ 所采集温度数值的对比
Tab. 5 Comparison of two algorithms for processing temperature values collected from different channel at 20 ℃

通道	线性拟合			牛顿-拉夫逊法		
	实测温度值/℃	绝对温度误差/℃	相对温度误差/%	实测温度值/℃	绝对温度误差/℃	相对温度误差/%
1	17.88	2.12	10.60	19.999 5	0.000 5	0.002 5
3	17.90	2.10	10.50	19.999 2	0.000 8	0.004 0
5	17.81	2.19	10.95	19.999 7	0.000 3	0.001 5
7	17.84	2.16	10.80	19.999 4	0.000 6	0.003 0
9	17.77	2.23	11.15	19.999 1	0.000 9	0.004 5
11	18.01	1.99	9.95	19.999 8	0.000 2	0.001 0
13	18.11	1.89	9.45	19.999 3	0.000 7	0.003 5
15	17.95	2.05	10.25	19.999 6	0.000 4	0.002 0
17	17.98	2.02	10.10	19.999 9	0.000 1	0.005 0

5 结 论

综上所述,本系统通过引入控制逻辑设计系统作为核心框架,承担了“硬件初始化-指令接收-数据处理-控制输出”的全流程管理,是各模块协同工作的基础。采用UDP 逻辑模块设计来优化通信层,控制逻辑中的参数配置模块支持实时调整,实现了传输帧率与带宽占用率的精准匹配。并且基于滑动均值滤波和牛顿迭代法,对传统温控系统中进行了双重优化,解决了传统滤波矛盾和传统线性拟合法在宽温域应用中“误差随温度发散”的问题。这些针对测温系统的改进旨在解决传统温控系统在实时性能和测量精度方面的局限性,从而实现了高精度、实时响应的温度控制系统。该系统能够满足摇杆测试作为飞行控制机构的核心验证的多通道温度检测的应用需求。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。
All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

[1] 任勇峰,赵逢锦,张凯华,等. 基于FPGA的多通道温度采编装置设计[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(1): 70-76.
Ren Yongfeng, Zhao Fengjin, Zhang Kaihua, et al. Design of multi-channel temperature editing device based on FPGA[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(1): 70-76. (in Chinese)

[2] 郝晓剑,张志杰,周汉昌. 高温测量及其校准技术研究现状与发展趋势[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 1-7.
Hao Xiaojian, Zhang Zhijie, Zhou Hangchang.

Research status and development trend of high temperature measurement and calibration technology[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 1-7. (in Chinese)

[3] 徐贺杨,洪应平,杨松霖,等. 基于FreeRTOS和增量式PID的实时温度控制系统优化设计[J]. 测试技术学报, 2025, 39(3): 346-353.
Xu Heyang, Hong Yingping, Yang Songlin, et al. Optimized design of real-time temperature control system based on FreeRTOS and incremental PID[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(3): 346-353. (in Chinese)

[4] 孙巍,孙芹东,马士全,等. STM32H743系列水声数据采集存储系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 98-102.
Sun Wei, Sun Qindong, Ma Shiquan, et al. Design and implementation of STM32H743 series underwater acoustic data acquisition and storage system[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(16): 98-102. (in Chinese)

[5] 张慧贤,张学贺,马利民,等. 消防机器人底盘热防护多通道温度采集系统设计与试验[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 190-196.
Zhang Huixian, Zhang Xuehe, Ma Limin, et al. Design and experiment of multi-channel temperature acquisition system for fire fighting robot chassis thermal protection[J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(4): 190-196. (in Chinese)

[6] 张楠楠,张鹏辉,王奕杰,等. 基于ZYNQ的无线温度采集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2025(5): 121-126.
Zhang Nannan, Zhang Penghui, Wang Yijie, et al. Design of wireless temperature acquisition system based on ZYNQ[J]. Instrument Technique and Sensor, 2025(5): 121-126. (in Chinese)

- [7] 胡鹏程, 时玮泽, 梅健挺. 高精度铂电阻测温系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 988-995.
Hu Pengcheng, Shi Weize, Mei Jianting. High precision Pt-resistance temperature measurement system[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 988-995. (in Chinese)
- [8] Miao Z. Temperature measurement of dimethyl silicone oil using thin film thermocouples[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3043(1): 012121.
- [9] Jadhav A M, Ranpise P. Temperature compensation of low-cost sensors for accurate temperature measurement[J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2025, 15(1): 328-344.
- [10] 罗钰, 翁存程, 蒋丽钦. 惠斯通电桥实验的分析[J]. 大学物理实验, 2023, 36(2): 66-68.
Luo Yu, Weng Cuncheng, Jiang Liqin. Analysis of Wheatstone bridge experiment[J]. Physical Experiment of College, 2023, 36(2): 66-68. (in Chinese)
- [11] 余秋军, 李丹, 杜娟, 等. 基于AD623信号处理的压力变送器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2018(4): 24-27.
Yu QiuJun, Li Dan, Du Juan, et al. Design of pressure transmitter for AD623 signal processing[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(4): 24-27. (in Chinese)
- [12] 蔺红彦. 基于AD7616的多通道准同步数据采集系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2024: 56.
Lin Hongyan. Research on multi-channel quasi-synchronous data acquisition system based on AD7616[D]. Taiyuan: North University of China, 2024: 56. (in Chinese)
- [13] 许卓. 基于ARM的多通道温度采集系统的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 6.
Xu Zhuo. The research of ARM-based Multi-channel temperature acquisition system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 6. (in Chinese)
- [14] 洪明森, 洪应平, 林雅坤, 等. 基于FPGA的高精度多通道信号源设计与实现[J]. 电子器件, 2023, 46(3): 592-597.
Hong Mingsen, Hong Yingping, Lin Yakun, et al. Design and implementation of high-precision multi-channel signal source based on FPGA[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(3): 592-597. (in Chinese)
- [15] Rădulescu A T, Rădulescu G M T, Naş S M, et al. Enhancing data collection time intervals and modeling the structural behavior of bridges in response to temperature variations[J]. Buildings, 2025, 15(3): 418.
- [16] 赵世峰, 何哲健. 基于K型热电偶的多通道温度采集系统设计[J]. 软件导刊, 2017, 16(11): 108-109.
Zhao Shifeng, He Xijian. Design of multichannel temperature acquisition system based on type-K thermocouple[J]. Software Guide, 2017, 16(11): 108-109. (in Chinese)
- [17] 孙毅刚, 何进, 李岐. 基于LabVIEW的多通道温度监测系统设计[J]. 现代电子技术, 2017, 40(8): 183-186.
Sun Yigang, He Jin, Li Qi. Design of multi-channel temperature monitoring system based on LabVIEW[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(8): 183-186. (in Chinese)
- [18] 邹伟, 王云峰, 景金荣, 等. 无人机多通道实时测温系统设计[J]. 测试技术学报, 2021, 35(4): 310-316.
Zou Wei, Wang Yunfeng, Jing Jinrong, et al. Design of multi-channel real-time temperature measurement system for UAV[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2021, 35(4): 310-316. (in Chinese)