

基于 FPGA 的多通道温度采编装置设计

任勇峰 赵逢锦 张凯华 庞云飞

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 电子测试技术国家重点实验室 太原 030051)

摘要:针对飞行试验中对设备温度测量的需求,设计了一种适用于飞行测试的高精度多通道温度采编装置。设计以 FPGA 构建信号采集处理系统,采用 AD8227 和 AD590 来实现信号的调理和温度冷端补偿,通过标准 RS422 协议实现 16 路温度信号传输,并采取线性拟合的方式对输出进行非线性校正,提高了系统准确率和稳定性。测试结果表明,测温电路全量程内最大测量误差为 $\pm 0.083\%$ F.S.。经过测试验证,该方案传输过程无丢帧零误码,系统运行高效、可靠。

关键词:温度采集;冷端补偿;线性拟合

中图分类号: TN791 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Design of multi-channel temperature editing device based on FPGA

Ren Yongfeng Zhao Fengjin Zhang Kaihua Pang Yunfei

(Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In response to the requirements for equipment temperature measurement in flight tests, a high-precision multi-channel temperature acquisition device suitable for flight tests is designed. The signal acquisition and processing system is built with FPGA, and AD8227 and AD590 are used to realize signal conditioning and temperature cold end compensation, which improves the accuracy and stability of the system. The 16-channel temperature signal transmission is realized through the standard RS422 protocol, and the output is nonlinearly corrected by linear fitting, which improves the accuracy and stability of the system. The test results show that the maximum measurement error in the full range of the temperature measurement circuit is $\pm 0.083\%$ F.S.. After testing and verification, the transmission process of this scheme has no frame loss and zero error code, and the system runs efficiently and reliably.

Keywords: temperature acquisition; analog-to-digital conversion; linear fitting

0 引言

在飞行试验中,环境因素会直接影响测试精度和结果可靠性,温度变化下的指标对系统的研发和改进都有重要意义。温度作为飞行器研发过程中基本的测量参数,对其进行标定很有必要^[1]。传统采用的温度采集方法大多是以单片机为主控制器,通过对每个监测点的温度依次读取来实现^[2]。这种方法可以同时采集的通道数少、功能单一、设备维护量大且精度较低。近几年,国内外针对温度的采集测试技术也在不断更新。从对输出补偿的角度来看,文献[3]采用分段线性拟合校正方法,减少测试结果非线性误差,将测试准确度提升到 $\pm 0.2\%$ 。文献[4]通过噪

声耦合分析对调理电路进行优化,设计了 A/D 转换驱动电路,实现全温度范围采集精度优于 1%。文献[5]对每种传感器设计了特定的冷端补偿电路来测量飞行试验时飞行仓的温度,能够完成 S 型、K 型热电偶和铂电阻共四路温度信号的采集。为了实现多点实时检测并提高系统抗干扰能力,文献[6]设计了基于现场可编程门阵列(FPGA)和 STM32 的测温系统,在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,满足温精度优于 $\pm 0.2\%$,满足了热加工领域分布式测温及时性的要求。

综上,提出一种优化的电路结构和计算方法,实现冷端温度动态补偿。与其他现有方案相比,温度测试范围更广泛,测试数据更可靠。

本文设计需要对环境进行多路高低温数据采集。从测温范围和实用性方面考虑,热电偶传感器有很大的优势,所以使用热电偶作为监测点的温度传感器,并采用FPGA实现整个系统的功能,设计多通道同步采集电路并结合ROM地址查找表控制通道切换的方法去实现。该设计可以在采集数据的同时差分传输,结合上位机可以监测每个温度点,实时显示测点的数字量和物理量,具有很强的实用性和实时性。设计方法可靠稳定、可继承性强,可以应用到各类多路模拟信号采集的领域。

1 总体方案

设计基于RS422接口进行数据交互,由硬件和软件部分共同组成,如图1所示。其中硬件实现主体功能,软件逻辑是在硬件基础上实现对接口的控制和温度数据的实时采样。在硬件电路方面,根据测温范围选用K型热电偶传感器,设计热电偶补偿电路对输入的温度信号进行补偿。为了使系统具有更高的抗干扰能力,设计信号调理电路、增益调整电路、低频滤波电路等,将微弱的输入信号调理到可以测量的范围,提高系统信噪比与传输精度。在逻辑设计方面,采用自顶向下的设计方法,把系统划分为不同功能模块来实现相应的逻辑,确保装置具有很好的数据处理能力。

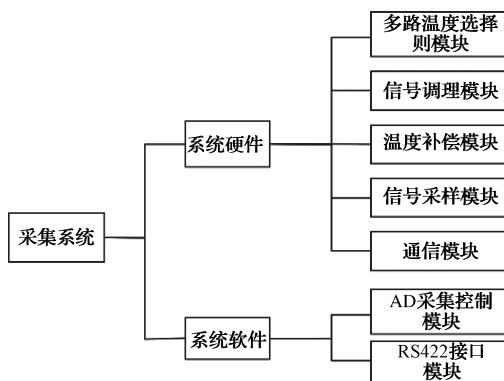


图1 系统组成框图

由于热电偶传感器本身特性使得数据易受外界噪声的干扰,测量结果具有一定的非线性,会对数据后续的标定和分析产生影响^[7]。因此,测试时把热电偶传感器检测到的温度信号处理成模拟电压值,然后传输给选择单元和信号调理单元处理,再经过信号采样单元将其转换成数字量传送至处理单元,最后通过RS422接口传回上位机进行数据分析。为保证采样模块和数字处理模块之间的数据传输的准确性,设计采用双差分通道传输。

2 硬件设计

2.1 热电偶信号调理电路优化设计

热电偶作为传感转换元件,无需外加电源就可以实现“温度→电动势”的转换,并且具有价格低廉、结构简单、测

温范围广泛等优点,广泛应用于测温系统中^[8]。但是热电偶为测温敏感元件,易受前置放大器温漂的影响而产生误差,所以其调理电路和恰当的补偿设计至关重要。

在采集过程中,热电偶传感器信号首先进入采集装置信号调理电路中进行温度信号的采集和变换,如图2所示。热电偶的输出幅值一般为毫伏级别,电路难以准确测得,所以要将温度信号放大到一定倍数后再进行采样^[9],并且增加低频滤波电路滤除高频信号噪声,提高系统的信噪比。

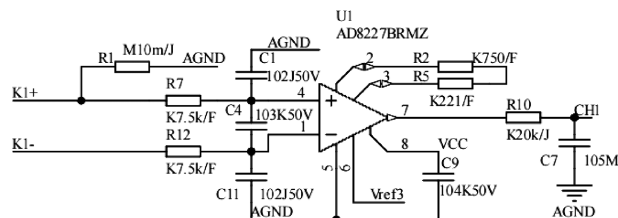


图2 调理电路

采集电路选用AD8227对K型热电偶输出的微小电动势进行放大。AD8227是一款宽电源电压范围、低输入噪声、共模抑制比较大的放大器,输出可以实现轨到轨,只需要一个外部电阻来设置增益,增益范围为5~1 000。

为了使电路更具有抗干扰能力,在热电偶输入端与AD8227芯片之间接入RFI射频滤波器^[10],可以有效滤除干扰信号。 R_7 、 R_{11} 电阻的取值不能过大,否则会因为仪表放大器的输入偏置电流产生附加误差。同时,两个一阶RC滤波器之间的不匹配会使电路整体的共模抑制比变小,所以电容容值选择时通常取 $C_4 \geq 10C_1$,以避免电路运行稳定性受到影响。由于射频信号多为高频噪声,所以滤波器的截止频率不需要很低,设计中实际选取 $R_7 = R_{12} = 7.5 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_{11} = 10 \text{ nF}$, $C_4 = 100 \text{ nF}$ 。

其差模截止频率为:

$$f_{DM} = \frac{1}{2\pi R_7 (2C_4 + C_1)} = 101.1 \text{ Hz} \quad (1)$$

其共模截止频率为:

$$f_{CM} = \frac{1}{2\pi R_7 C_1} = 2.12 \text{ kHz} \quad (2)$$

设计中 R_2 和 R_5 为增益配置电阻,增益调整电路根据热电偶测温范围的不同进行增益调整,要求满足后端模数转换的要求,保证原模拟量输出。电阻 R_{10} 和电容 C_7 构成一阶低通滤波器,由截止频率计算公式(式(3))得截止频率为7.96 Hz,能够有效抑制电源引入的50 Hz的工频噪声和其他高频噪声,保证电源信号输入稳定。

$$f_s = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3)$$

同时大电阻 R_{10} 的存在,避免了因后级接入模拟开关和模数转换器电容性负载而导致的运放输出产生相移,致使信号失真^[11]。

本文设计中,K型热电偶的测温区间为 $0^\circ\text{C} \sim 1\,200^\circ\text{C}$,其对应的输出热电势大小为 $0 \sim 48.838 \text{ mV}$;其灵敏度为

0.040 mV/℃。经过采集电路调理后的输出:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times G_1 + V_{\text{ref3}} \quad (4)$$

$$G_1 = 5 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{R_2 + R_3}$$

式中: V_{out} 为传感器的热电势经过采集电路 AD8227 调理后的输出; G_1 为测试结点温度采集电路的增益系数; V_{ref3} 为热电偶的冷端补偿电势。

2.2 冷端补偿电路设计

通常情况下,热电偶是在冷端温度为 0℃ 的环境下进行测量的^[12],但是这种要求成本较高,难度也较大,所以采取冷端补偿的措施来防止热电偶参考端因温度变化而造成测量误差^[13-14]。本文采用在环路加入补偿电压的方式,该电压应等于热电偶冷端在常温下的电势输出,同时可以适应一定范围环境温度改变时冷端输出电势的变化。

设计采用 AD590 对 K 型热电偶进行冷端补偿。AD590 具有高精度、宽电压输入及高输入阻抗等优点,并且可以很好地抑制电源电压漂移和纹波对测温电路的影响,广泛应用于温度测量系统中^[15]。对应设计的冷端补偿电路如图 3 所示。设计将冷端温度补偿至 0℃,保证测量精度。

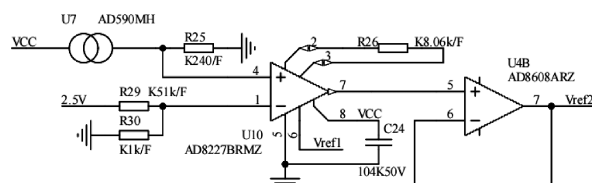


图 3 温度补偿电路设计

AD8227 芯片的同相输入端利用电阻 R_{25} 将 AD590 产生的电流转换为电压量,而反相输入端则利用电阻 R_{29} 和 R_{30} 进行分压,拉高电位,根据式(5)可得,拉高 48 mV,可以使得 AD8227 在增益后的输出 V_{ref2} 满足后级 A/D 采集电路输入范围。

$$V_{\text{in-}} = 2.5 \times \frac{R_{30}}{R_{29} + R_{30}} = 48 \text{ mV} \quad (5)$$

式中: $V_{\text{in-}}$ 为温度补偿电路 AD8227 的反相输入端电压。

若将 V_{ref2} 直接接入第一级温度测量电路,运放的参考引脚会影响 AD8227 内部运放电路结构的对称性,还会干扰增益系数和共模抑制比^[16]。为使得产生的电压信号符合后端 A/D 采集电路的输入幅值要求,电路需要对信号进行增益调整,同时进行低输出阻抗的设计,为避免影响后端的滤波电路,通常采用运放进行分压跟随设计。所以在 AD8227 输出后,采用 AD8608 设计一级电压跟随器用来调控阻抗, R_{26} 为增益配置电阻。参考电压接入 $V_{\text{ref1}} = 227 \text{ mV}$ 保证了电路在单正电源供电情况下可进行在 0℃ 以下测量^[17]。综上,可得 V_{ref3} :

$$V_{\text{ref3}} = [i(t_{RJ}) \times 240 - 48] \times G_2 + V_{\text{ref1}} \quad (6)$$

$$G_2 = 5 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{R_{26}}$$

式中: G_2 为热电偶冷端补偿电路 AD8227 的增益系数; $i(t_{RJ})$ 为 AD590 由于参考结点的温度改变产生的热电流。

整个温度测量系统采用两种感温元件,测量结点使用的为热电偶,而参考结点使用 AD590 温度传感器。通过确定两个放大倍数将两者的灵敏度调整成一致,即可实现热电偶冷端的完全补偿。

冷端参考温度为 0℃ 时,对应的绝对温标为 273.15 K。此刻 AD590 输出为:

$$273.15 \times 240 \div 1000 - 48 = 17.556 \text{ mV} \quad (7)$$

调理最终输出应小于 5 000 mV,即:

$$48.838 \text{ mV} \times G_1 + (17.556 \text{ mV} \times G_2 + 227) < 5000 \text{ mV} \quad (8)$$

且:

$$0.041 \text{ mV/}^\circ\text{C} \times G_1 = 0.24 \text{ mV/}^\circ\text{C} \times G_2 \quad (9)$$

联立两式得 $G_1 < 91.7$, $G_2 < 15.69$ 。暂定 G_2 取 15,则 $R_{26} = 8 \text{ k}\Omega$,经查阅阻值表,设定 $R_{26} = 8.06 \text{ k}\Omega$;重新计算 $G_1 = 87.39$, $G_2 = 14.826$ 。此时, $R_2 + R_3 = 971 \Omega$,取 $R_2 = 750 \Omega$, $R_3 = 221 \Omega$ 。最大电压为 4 755.41 mV < 5 V。

选用 AD590 温度传感器进行温度补偿,可以简化电路,有效提高了热电偶传感器的抗干扰能力和采集精度,方便可靠,为后续模拟信号的采样分析提供了基础。

3 逻辑设计

装置实现的主要功能是 FPGA 控制采集模块进行数据采集、滤波、编帧和转发,根据逻辑实现功能可以将系统分为两个功能模块,A/D 控制模块和 RS422 接口模块。

3.1 转换控制逻辑设计

进行温度采集时,FPGA 通过内部指令控制模拟开关 ADG706 进行通道选择和模数转换器 AD7667 进行采集编帧并写入数组,最后按照接口通信格式采用异步串行协议进行数据转发。为了提高总体采集精度,传输前需要对采集回来的数据进行数字低通滤波^[18]。

设计要求每个通道的采样频率均为 40 Hz,为进一步提高温度测量精度,软件对单通道进行 8 倍超采, $16 \times 8 \times 40 = 5120 \text{ Hz}$,总采样时钟为 5 120 Hz,基础时钟为 40 Hz。数据量 12.8 kbps,符合 RS422 接口速率要求。对每通道采集数据进行“去最大最小值、求平均”的滤波算法^[19]得出采样值。测量装置数据编帧格式如表 1 所示。

表 1 测量装置编帧格式

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
帧头	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
5A54	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	帧计数	帧计数	帧尾
T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	IDH	IDL	5AFE

在进行 A/D 控制逻辑设计时,设置一个计数指针,在一个计数周期内对一个通道的数据进行采集和转换,当指针数到 7 812 的时候,采集一个通道的地址。由于设计采用 8 倍超采,每通道数据要采集 8 次,系统时钟为 40 MHz,则一次数据采集到完成的时间为 $7\,812 \times 16 \times 8 \times 1/40\text{ M} = 24.99\text{ ms}$,小于上位机下发的采集指令 25 ms,因此设计满足任务要求。采集逻辑的流程如图 4 所示。

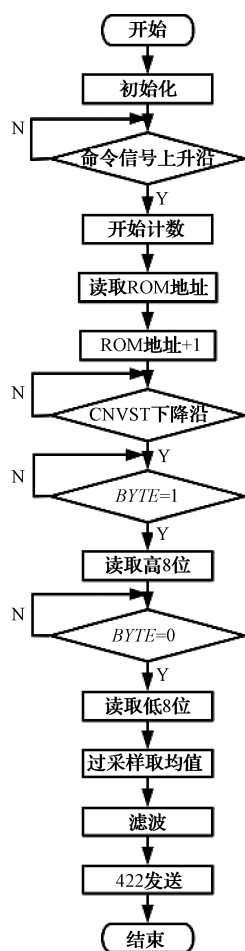


图4 采集逻辑控制流程

装置采集的为多通道信号,需要使用模拟开关对通道进行选择和切换。通道的控制采取 ROM 表的方式,利用 FPGA 内部 ROM 存储模块来控制通道的切换^[20]。按照地址编码方式对每一模拟开关的使能信号和通道的选择信号进行编码,然后在 ROM 中保存编号的地址代码,通过 ROM 读取地址进行采集时的通道选择。

模数转换器 AD7667 对数据的操作受 CNVST 信号控制,BUSY 信号在 CNVST 信号下降沿到来时被拉高,开始数据转换;转换完成后信号拉低,需要在下一次转换开始前,即 ACQUIRE 时段内完成接收。根据高低位的数据来判断 BUSY 信号的高低情况,判读转换完成的数据是否被读出。在读取时数据是以字节的形式读出,通过

BYTE 位的高低切换分别将数据的高低 8 位存入相应的 RAM 中,当 BYTE=1 时取数据的高 8 位,当 BYTE=0 时取数据的低 8 位。数据转换时序图如图 5 所示。

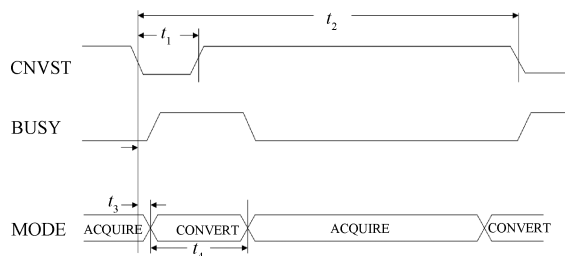


图5 转换时序图

CNVST 引脚拉低后经过 t_3 延时后开始转换,转换脉冲宽度 t_4 时间内完成转换。在对模数转换进行控制时,要满足转换所需的时间, t_1 时间不小于 15 ns,两次转换开启的时间 t_2 为 25 ms。发数速率远大于采集速率,保证了数据传输的可靠性。

3.2 标定方法研究

上位机软件中通过将数字量信号转换成温度值的方法进行热电偶标定,即求出数字量与采集温度之间的对应函数值关系。温度值可以通过查找分度表得到,但是分度表的间隔是 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,许多情况下无法精确找到对应温度,所以需配合线性方程一起标定。设计采用多项式拟合的方法来减小非线性误差过大的问题。

$$f(x) = \sum_{i=0}^n d_i x^i \quad (10)$$

实际测温时,测量温度与实际温度的误差不是恒为正或恒为负。这是由于硬件电路器件本身就存在线性误差^[21]以及拟合过程所带来误差,如图 6 所示。

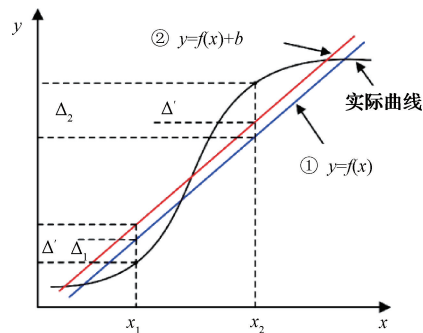


图6 拟合曲线与实际曲线对比

设计通过对拟合函数增加校准系数来减小这种误差。分别找到最大正负误差 Δ_1 、 Δ_2 (一般情况下 $\Delta_1 \neq \Delta_2$),将原拟合曲线沿 y 轴平移,将使得最大正误差量 Δ_1 与最大负误差量 Δ_2 近似相等,改进的标定方法拟合曲线为 $y = f(x) + b$,则现拟合函数为:

$$y = f(x) - \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \quad (11)$$

4.1 数据传输功能测试

性能测试从 3 方面入手,分别通过验证帧格式、采集信噪比分析和采集精度来验证装置的可行性。测试平台主要由温度测量装置、热电偶校准仪、上位机以及用于通信和供电的外部电缆网组成。热电偶校准仪的功能是模拟热电偶传感器输出不同温度下相应的电动势。测量装置将热电势信号调理、采集和编码后以数字信号的形式传输给上位机。上位机软件按照约定的通信协议对数字量进行解包处理,并对温度值进行实时监测。此外,还可以进行数据分析和绘图处理,对数据传输的完整性和准确性进行验证。

日期	时间	事件
2023年9月23日	15:11:51.689	测控台主控卡索引 0x680000b
2023年9月23日	15:11:51.727	测控台主控卡连接成功
2023年9月23日	15:11:51.756	主菜单切换：单元测试
2023年9月23日	15:12:03.660	主菜单切换：数据处理
2023年9月23日	15:18:23.798	主菜单切换：平台配置
2023年9月23日	15:19:08.217	主菜单切换：单元测试

主控卡已连接

采集数据经转发单元打包编帧后上传至测试台,上位机对数据进行解包处理。RS422 采样数据以帧为单位,数据格式应为“帧标识 5A54+16 路变换单元数据+帧计数+帧尾 5AFE”。为验证数据在不同测试环境下的传输功能,分别将装置置于-40℃和80℃环境下进行多轮高低温试验及振动、加速度试验,在实验前中后,分别进行数据采集。如图8所示,随机筛选的一段数据帧格式与帧结构设计完全对应,可以看出数据包计数连续,证明采集到的数据未出现丢包情况,因此数据的准确性得以验证。针对数据的完整性,利用上位机软件对丢帧问题和帧计数进行检验,结果如图9所示,数据传输完整连续,无多帧、丢帧的现象。试验证明温度采集装置具有高稳定性、较强的抗干扰性。

航头	数据																												航计数	航尾			
SA	02	03	04	05	06	07	08	09	08	05	06	08	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	16	18	20	21	22	23	24	25	26	27	
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SA	02	03	04	07	07	04	04	04																									

4.2 采集信噪比分析测试

信噪比是描述放大器输出的有用信号与噪声之间关系的一个指标,一般用分贝表示其大小^[22]。采集设备的

图 9 数据下载校验报告

图 10 温度信号数据分析

4.3 采集精度验证

为保证数据的准确性,还需要验证采集精度。首先需要标准温度源,本设计选用标准的温度校准仪模拟 K 型热电偶输出,选择单个通道,构建温度测试平台,采用高温箱式马弗炉对系统进行验证。校准仪所给温度每次增加 100 ℃,以均匀的温度间隔表示整个量程,采集精度测试结果如表 2 所示。

表2 全量程范围温度测试 (°C)

实际温度	测量温度	绝对误差
100	100.367	0.367
200	199.516	0.484
300	299.506	0.494
400	400.653	0.653
500	500.461	0.461
600	599.36	0.64
700	700.648	0.648
800	800.633	0.633
900	900.885	0.885
1 000	1 000.746	0.746
1 100	1 100.957	0.957
1 200	1 201	1

从测试结果可以看出,在测温范围 0 °C~1 200 °C 的量程当中,K 型热电偶最大的绝对误差为 1 °C,全量程内最大测量误差为 $\pm 0.083\%$ F.S.。

选取装置处于温箱 60 °C 和 -40 °C 环境温度下所测室温数据进行分析,此时绝对温度传感器测得室内温度为 25 °C。该 K 型热电偶测温电路实时温度曲线如图 11 所示,可以看出所测温度波动范围在 ± 0.4 °C,相对误差范围为 $\pm 0.03\%$ F.S.,满足设计要求。此外,随机选取通道

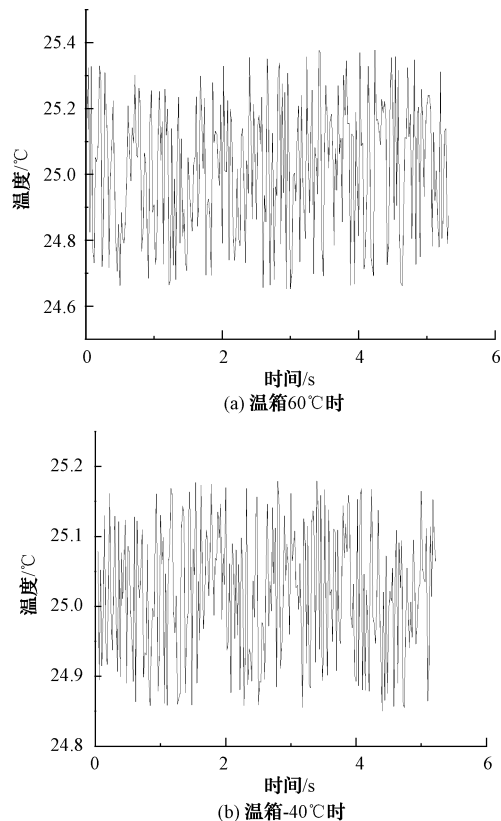


图11 室温 25 °C 时采集曲线

1、3、5、7 进行对比,如图 12 所示,可以看出通道之间的波动范围较小,仅有 0.03% F.S.,说明不同测温通道的测试结果具有一致性。

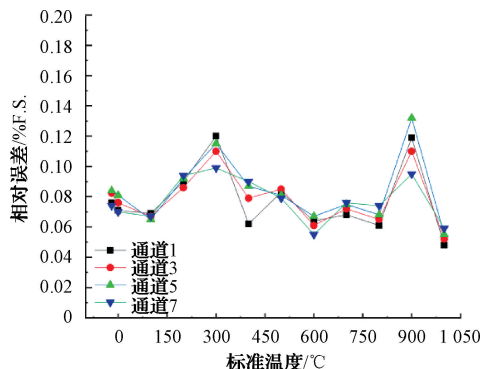


图12 部分通道相对误差对比

5 结论

本文根据飞行试验中复杂试验环境、温度范围广、精度要求高等特点,设计了一种高精度温度采集转发装置,实现了多通道温度数据的接收和转发。通过对系统数据采集及处理功能的验证、上位机通信波形的抓取检验和对上位机显示的实测温度数据进行误差分析,验证了基于 FPGA 的多通道温度测量系统设计的合理性和功能完整性,实测数据和标准输入在 0 °C~1 200 °C 相对误差低于 $\pm 0.083\%$ F.S.。在复杂温度条件下,仍可保持正常工作。本文在测试通道数方面还有很大提高潜力,可以通过调整模数转换电路实现多通道扩展。

参考文献

- [1] 乔鑫. 基于热电偶传感器的温度采集系统设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [2] 李平,魏长宝. CAN 总线检测系统的多接口设计研究[J]. 电子器件,2015,38(4):917-921.
- [3] 丁润琦,甄国涌,张凯华. 温度传感器 S 型热电偶测温电路设计[J]. 中国测试,2020,46(1):99-104.
- [4] 陈晓敏. 基于 FPGA 的多通道模数混合采编与传输设备的设计[D]. 太原:中北大学,2021.
- [5] 黄巧峰,任勇峰,贾兴中. 基于 AD8495 和 Sigma-Delta 的多通道高精度数字测温设计[J]. 仪表技术与传感器,2020(3):84-88.
- [6] 周广兴,苏淑靖,梁文科,等. 基于 FPGA 与 STM32 的多通道温度采集系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2022(5):10-15,132.
- [7] 杨兆欣,顾正华,张文清,等. 基于热电偶的低速风洞气流温度误差补偿方法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(5):68-76.
- [8] LI Y F, ZHANG Z J, HAO X J, et al. A measurement system for time constant of thermo-

- couple sensor based on high temperature furnace[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2585.
- [9] BHALLA K S, ZEHNDER A T, HAN X. Thermomechanics of slow stable crack growth: closing the loop between experiments and computational modeling[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(17): 2439-2458.
- [10] 肖新帅, 林晓焕, 胡念祖, 等. 多类型高精度测温系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(3): 75-79.
- [11] 李亚政, 甄国涌, 贾兴中, 等. 基于 AD590 的热电偶冷端方法优化设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(12): 156-160.
- [12] 鄢玲玲. 基于 FPGA 的高精度采集转发装置的设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [13] 王闯. 热电偶温度信号的采集及其标定方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [14] DEY D, MUNSHI S. A new intelligent scheme for simultaneous cold junction compensation and linearization of thermocouples[J]. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2012, 10(19): 13-28.
- [15] 王立刚. 一种基于 STC89C52 和 AD590 的温度测控系统设计[J]. 物联网技术, 2019, 9(6): 20-21.
- [16] 郭锐, 徐玉斌. K 型热电偶冷端补偿方案[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S1): 331-333.
- [17] 王立志, 山鹏, 张彦军. 高精度多通道温度与应变测试系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021 (8): 50-54.
- [18] 王小兵, 任勇峰, 张凯华. 基于 FPGA 的分布式采集系统设计[J]. 电子器件, 2018, 41(4): 997-1002.
- [19] 程心怡, 任勇峰, 贾兴中. 基于多种类型热电偶的分层测温电路设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(17): 143-147.
- [20] 任勇峰, 李晋涛, 李辉景, 等. 一种温度补偿的压力测量电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12): 86-89.
- [21] 霍明瑞. 多通道高精度温度测量装置的研究与设计[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [22] 刘一兵, 李荣宽. 一种基于传感器温度补偿的双指数函数拟合算法[J]. 电子技术应用, 2017, 43(11): 47-50.

作者简介

任勇峰, 教授, 主要研究方向为测试计量技术及仪器、电路与系统。

E-mail: renyongfeng@nuc.edu.cn

赵逢锦(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为测试计算技术及仪器、高速信号传输等。

E-mail: 345259765@qq.com