

基于 FPGA 的高精度 S 型热电偶温度测量系统设计 *

王乐群¹,文 丰^{1,2},张凯华¹

(1.中北大学 电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051;

2.中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西 太原 030051)

摘要: 针对传统的多通道 S 型热电偶测温系统测量精度低、各通道精度相差较大的问题,提出了一种以 FPGA 为核心的高精度 S 型热电偶测温系统。系统以 FPGA 为核心控制器,采用模块化设计,利用 AD590 温度传感器对 S 型热电偶进行冷端补偿。采用多通道采集、单通道调理的设计方法以改善由于元器件差异引起的各种通道精度相差较大的情况。同时选用高精度 ADC 将采集的温度模拟信号转换为数字信号传输到上位机显示,上位机通过查表法准确确定温度值,提高测温精度。经过多次试验验证,该测温系统温度采集精度优于 0.2%F.S.。目前该系统已经应用到工程实践中,为多通道 S 型热电偶测温系统设计提供了有效、可靠的手段。

关键词: S 型热电偶;FPGA;冷端补偿;RFI 滤波电路;高精度

中图分类号: TP274

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.211896

中文引用格式: 王乐群,文丰,张凯华. 基于 FPGA 的高精度 S 型热电偶温度测量系统设计[J]. 电子技术应用, 2022, 48(2): 41–45.

英文引用格式: Wang Lequn, Wen Feng, Zhang Kaihua. Design of temperature measuring circuit of S-type thermocouple based on temperature sensor[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(2): 41–45.

Design of temperature measuring circuit of S-type thermocouple based on temperature sensor

Wang Lequn¹, Wen Feng^{1,2}, Zhang Kaihua¹

(1.State Key Laboratory of Electronic Testing Technology ,North University of China ,Taiyuan 030051 ,China ;

2.Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education ,North University of China ,Taiyuan 030051 ,China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional multi-channel S-type thermocouple temperature measurement system has low measurement accuracy and each channel is quite different, a high-precision S-type thermocouple temperature measurement system based on FPGA is proposed. The system uses FPGA as controller, with modular design, and uses AD590 to perform cold junction compensation for S-type thermocouples. A high-precision ADC is used to convert the collected temperature analog signal into a digital signal and transmit it to the upper computer for display and locates the temperature value through the look-up table method to improve the temperature measurement accuracy. After many tests, it is verified that the temperature acquisition accuracy of this temperature measurement circuit is better than 0.2%F.S. At present, the circuit design has been applied to engineering practice, which provides an effective and reliable means for the design of temperature measuring circuit of S-type thermocouple.

Key words: S-type thermocouple;FPGA;cold end compensation;RFI filter circuit;high precision

0 引言

在某些特殊测试中,经常需要监视关键设备的环境因素,而温度作为环境因素中的重要参数,直接决定测试的成败^[1],因此测量温度的精度就显得尤为重要。在要求高温测量时,S型热电偶可以达到0~1 600 ℃的测量温度范围,满足大部分测量温度的需求。因此,提高S型热电偶在试验中温度采集的精度是有必要的。

本文提出了一种以 FPGA 为控制核心的高精度 S 型

热电偶测量系统。核心控制器完成模拟开关选通以及高精度 ADC 完成模数转换。同时使用多通道采集,单通道调理的设计方法改善由于元器件差异而导致的各路精度不一致的情况。上位机通过使用查表法来更精确地确定温度值,以此提高热电偶测温系统的精度^[2]。经过多次试验测试,验证了该系统的可靠性。

1 整体设计

在整体设计中使用多通道采集、单通道调理的设计方法。在多通道采集中,设计使用 RFI 滤波电路和 AD590 冷端补偿电路以提高温度采集的精度,单通道调理完成

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFF01010500)

对各路温度信号增益调整以及 VCVS 二阶滤波。高精度 ADC 将采集的温度模拟信号转化为数字信号上传至上位机进行实时监测,整体设计框图如图 1 所示。

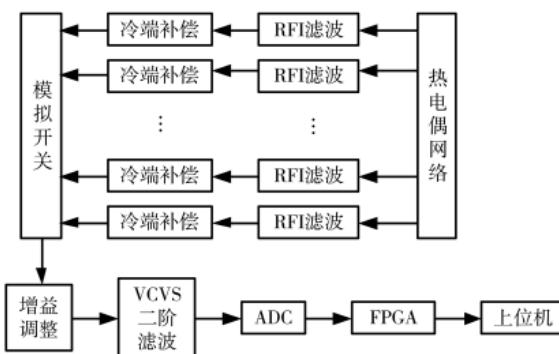


图 1 整体设计框图

2 硬件设计

硬件电路设计主要包括 RFI 滤波电路设计、冷端补偿电路设计、增益调整电路设计以及 VCVS 滤波电路设计。

2.1 RFI 滤波电路设计

RFI 即射频干扰,会严重影响高精度模拟电路的直流性能。本测温系统通过设计 RFI 滤波电路来消除本热电偶测温电路所受到的射频干扰噪声的影响^[3],如果没有滤波电路,热电偶长导线带来的噪声在进入后续增益调整电路后,同样会被后续电路中仪表放大器增益,并最终在输出端导致不必要的直流失调^[4],这会显著降低测量温度的精度。图 2 所示为设计的 RFI 滤波电路。

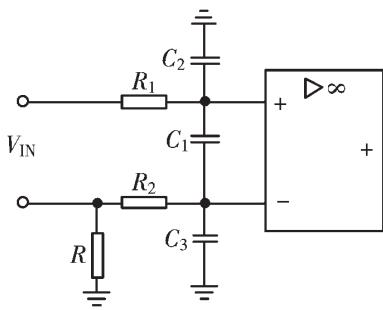


图 2 RFI 滤波电路

在 RFI 滤波电路中,共模和差模信号均受到完全平衡的滤波,如果 R_1/C_2 和 R_2/C_3 的值没有进行严格匹配,输入共模信号就会转换为仪表放大器输入端的差模信号。因此,在设计中,电容和电阻的精度应尽可能地高,在本次温度测量系统设计中, R_1 和 R_2 选择 $7.5\text{ k}\Omega/1\%$ 的电阻, C_2 和 C_3 选择容值为 10 nF 的电容器^[5]。在 RFI 滤波电路中,选用的 C_1 容值应当比 C_2 和 C_3 的容值大很多($C_1 \geq 10C_2, C_3$),来抑制由于两个一阶 RC 滤波电路(R_1/C_2 和 R_2/C_3)时间常数不匹配所引起的共模-差模转换。因此, C_1 选择 100 nF 的电容。

此时 RFI 滤波的差模截止频率为:

$$\text{BWDIFF} = \frac{1}{2\pi R(2C_2+C_1)} = 101.1 \text{ Hz} \quad (1)$$

RFI 滤波的共模截止频率为:

$$\text{BWCM} = \frac{1}{2\pi RC_3} = 2.12 \text{ kHz} \quad (2)$$

当差模频率大于 101.1 Hz ,共模频率大于 2.12 kHz 时,该 RFI 滤波电路具有较好的抑制作用。

2.2 冷端补偿电路设计

在热电偶系列中,S 型热电偶具有高精度、高稳定性、宽测温范围的优势。同时在高温下 S 型热电偶具有良好的抗氧化性,热电势输出稳定^[6]。

热电偶的冷端与热端温度差值决定了其热电动势的输出^[7],在 S 型热电偶测量温度时使用的分度表中,将 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 设定为冷端温度,然而在工作试验等实际应用时并不能确保热电偶的冷端温度一直为 $0\text{ }^\circ\text{C}$,这时再使用分度表时就有了误差。因此,必须采取相应的措施进行补偿或纠正^[8-9]。本温度测量系统设计了 S 型热电偶的冷端补偿电路。

AD590 是美国 AD 公司的温度传感器,其输出电流与绝对温度成正比,AD590 提供高阻抗电流输出,这使得 AD590 可以很好地降低电源的纹波对温度测量电路的影响。此次系统设计中,温度传感器使用 AD590。图 3 为基于 AD590 的冷端补偿电路^[10]。

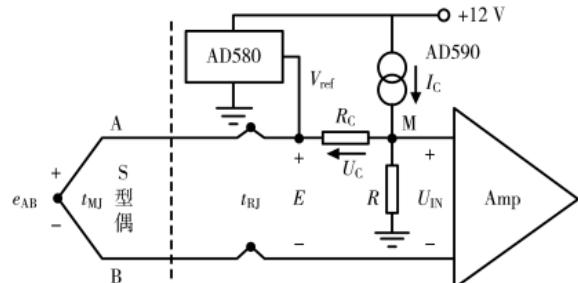


图 3 AD590 冷端补偿电路

S 型热电偶输出热电势为:

$$E_{AB}(t_{MJ}, t_{RJ}) = e_{AB}(t_{MJ}) - e_{AB}(t_{RJ}) \quad (3)$$

进入仪表放大器的电压为:

$$U_{IN} = U_C + E_{AB}(t_{MJ}, t_{RJ}) \quad (4)$$

当 $U_C - e_{AB}(t_{RJ}) = 0$ 时,该补偿电路已完全补偿。

补偿电压 U_C 为:

$$U_C = U_M - V_{ref} \quad (5)$$

根据节点电压法,电压 U_M 为:

$$U_M = \frac{R}{R + R_C} (V_{ref} + R_C I_C) \quad (6)$$

当该电路完全补偿时,即:

$$\frac{R}{R + R_C} [R I_C - V_{ref}] - e_{AB}(t_{RJ}) = 0 \quad (7)$$

因为大多数测温实验都在室温($25\text{ }^\circ\text{C}$)下进行,所以只要在此时完成冷端补偿电路的补偿,即 S 型热电偶在

此时的热电势率等于补偿电压对温度的变化率时,该电路即可实现完全补偿。由上则:

$$\frac{RR_C}{R+R_C} \times 10^{-6} = k_{25^\circ\text{C}} \quad (8)$$

通过查阅 S 型热电偶的分度表得知,25 ℃时 S 型热电偶的输出热电势为 0.143 mV,同时 AD590 在的输出电流为 298 μA,此时 S 型热电偶的热电势率为 6×10^{-3} mV/℃,参考电压 $V_{\text{ref}}=2.5$ V,联立式(7)、式(8)可得,当 $R_C=6.004 \Omega$, $R=9\,111.894 \Omega$ 时,室温情况下 S 型热电偶输出热电势等于补偿电压,即可完全补偿。

2.3 增益调整电路

设计中选用的 AD7621 的电压输入范围为 0~2.048 V,而 S 型热电偶在 1 600 ℃时的热电势输出为仅为 18.612 mV,因此需要对 S 型热电偶的电压信号进行增益调整以使其满足 AD7621 的电压输入范围。本温度测量系统设计选用轨到轨运放 AD7621 作为仪表放大器,配置增益调整电路来完成对 S 型热电偶输出热电势的放大。根据其芯片资料可知,该放大器可通过调节外部配置电阻来达到不同的增益倍数^[11]。根据 AD7621 的输出电压公式:

$$V_{\text{OUT}}=G \times (V_{\text{IN+}} - V_{\text{IN-}}) + V_{\text{ref}} \quad (9)$$

其中, G 为 AD8227 的放大倍数,其公式为:

$$G=5+\frac{80 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (10)$$

其中, R_G 为 AD7621 的外部配置电阻,如果想使输出电压达到 2 V,仅需配置 $R_G=781 \Omega$ 。

2.4 VCVS 滤波电路设计

在多路采集模块中,射频滤波电路滤除了高频噪声以及部分低频噪声的影响,但是在电路中仍然存在着大量的通道间串扰噪声。为消除通道间串扰带来的噪声,在此次系统设计中使用 VCVS 滤波电路。电路设计如图 4 所示。

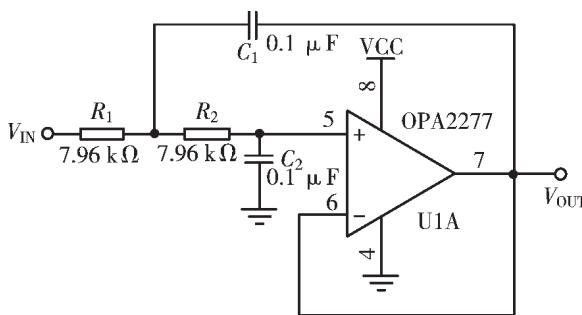


图 4 VCVS 滤波电路

由于热电偶信号要求其频率响应不低于 100 Hz,如果将滤波器的截止频率设置为 100 Hz,滤波后的信号满足不了频响的要求。因此,本着能够对信号进行无误的采集原则,应当将滤波器的截止频率设置为大于 100 Hz,本设计将二阶低通滤波器的截止频率设置为 200 Hz。此时 -3 dB 截止频率为 199.469 Hz,图 5 为该 VCVS 滤波电路的仿真结果。

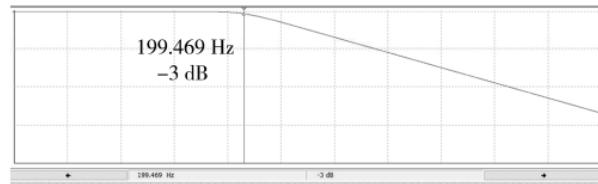


图 5 VCVS 滤波仿真图

3 软件设计

3.1 采样通道控制设计

在传统的采样通道控制程序设计中通常使用变量来暂存通道的控制信息,通过变量不断递增加“1”或者变量重新赋值的方式来控制采集通道切换。传统的采样通道控制将导致很复杂的时序控制^[12]。

针对采样通道多且采样通道控制复杂的情况设计了一种根据 ROM 表中信息配置采样通道的多通道采样方式。将所有的采样通道控制信息写入 ROM 表中,在进行采集时,首先读出 ROM 表中的采样通道控制信息,设置好采样通道以及模拟开关的通道选择,再控制 ADC 进行模数转换。当一次采集完成后,读 ROM 的地址加“1”,指向下一次采集通道的配置。

3.2 采样控制逻辑设计

AD7621 对数据的转换受 CNVST 信号的控制,CNVST 信号下降沿时,BUSY 信号被拉高,ADC 开始模数转换;转换完成后 BUSY 信号被拉低,通过判断 BUSY 信号的高低情况判读是否将转换完成的数据按照高低位的数据读出^[13]。数据转换时序图如图 6 所示。

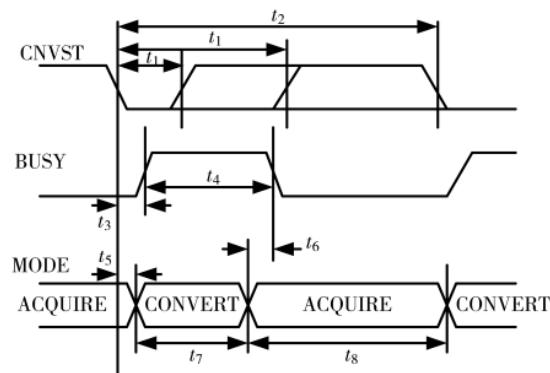


图 6 转换时序图

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 不小于 500 ns。对于热电偶信号,系统设计所需总采样率为 160 kHz,选用的时钟晶振为 40 MHz,因此将晶振时钟进行 250 分频即可。当时钟计数 count 计数到 10 时,ROM 的读时钟发生一次跳变,控制模块开始从 ROM 中读出某一通道的地址并将其赋值给模拟开关和 ADC。当 count 计数到 170 时进行数模转换,此时为了防止各个通道间的信号串扰,拉低 CNVST 信号 11 个时钟周期,即 275 ns,当计

数到 210 时开始对转换后的数据进行读取，中间时序持续间约为 1 μs，远大于时序所需求。在读取数据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 位为高时读取数据的高 8 位，反之取数据的低 8 位。等到时序计数达到 250 时，计数自动清零进行下一轮的转换计数。A/D 转换时序如图 7 所示。

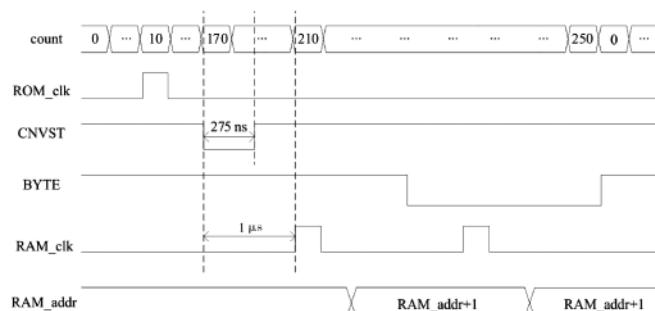


图 7 A/D 转换时序

3.3 上位机查找表设计

查找表即根据热电偶的测量电势去比对标准的 S 型热电偶分度表，从而可以准确地定位到温度值。此时温度采集的误差就主要来源于采样和调理电路，可以有效地提高测温精度。对于有序线性表，最常用的查表法有顺序查表法和二分法查表法，顺序查表法需对整个表进行遍历，与二分法查表法相比时间复杂度更高。由于 S 型热电偶分度表为有序线性表，表中数据量约有 3 000

个，因此使用二分法查表法效率较高。二分法查表法算法流程如图 8 所示。

由于标准的 S 型热电偶分度表只有整数，即相邻温度为 1 ℃。经过上位机查表后得到的温度除非刚好是整数，否则肯定会落到两个整数之间。这种情况不能简单地取大或者取小，可以使用线性外推的方法来获得温度，即：

$$T_{\text{实测}} = \frac{T_{\text{大}} - T_{\text{小}}}{V_{\text{大}} - V_{\text{小}}} (V_{\text{实测}} - V_{\text{小}}) + T_{\text{小}} \quad (11)$$

其中， $T_{\text{实测}}$ 、 $V_{\text{实测}}$ 分别为当前 S 型热电偶测量的温度以及对应的热电势， $T_{\text{大}}$ 、 $T_{\text{小}}$ 分别为通过二分法查表法最后定位的温度最大值和最小值， $V_{\text{大}}$ 、 $V_{\text{小}}$ 分别为温度最大值和最小值对应的热电势。完整的 S 型热电偶查找表算法均可利用上述方法进行类似分析^[14]。

4 试验结果及误差分析

为了验证该系统的工作性能，在 0~100 ℃时使用超级恒温油槽(GHY-3005)进行测试验证，在 100~1 600 ℃ 使用管式炉(SGL1700C)对该系统进行验证，并且在温度测量端接入标准温度传感器。测试结果如表 1、表 2 所示，其中表 1 对比 T1 通道所测量的温度与标准温度传感器测量温度可知该系统测量误差小于 0.2%F.S.，表 2 通过对比 T2、T3、T4、T5 通道间的绝对误差可知该系统各通道温度测量精度一致性较好，验证了该系统设计的准确性以及可靠性。

5 结论

本文设计了一种以 FPGA 为控制核心的 S 型热电偶

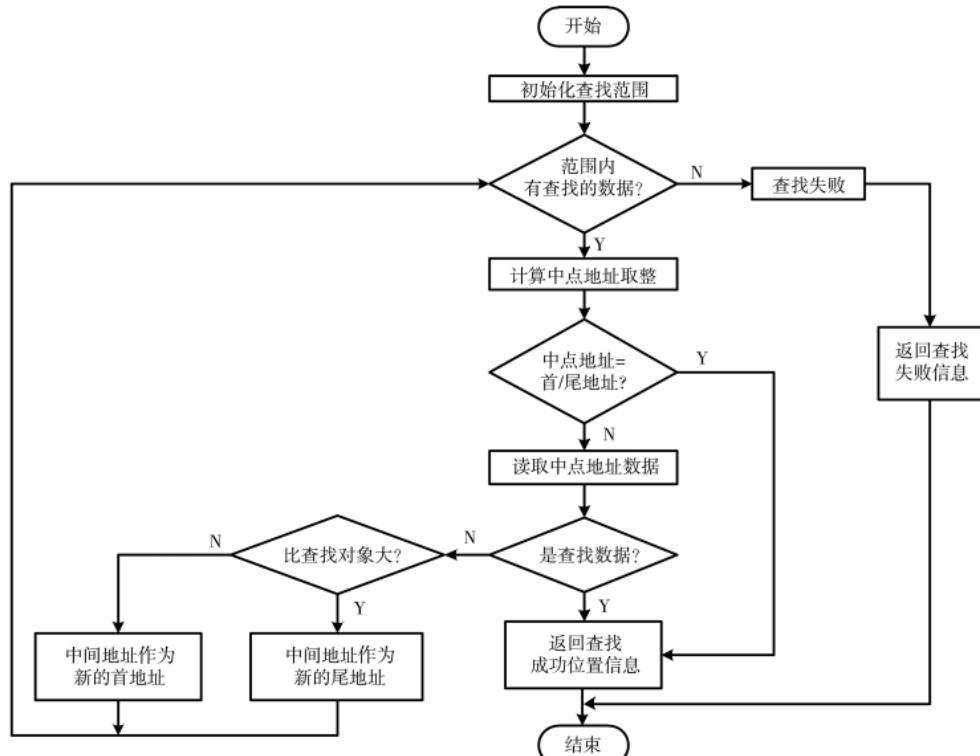


图 8 二分法查表法算法流程图

表 1 全量程范围测试数据

标准传感器 测得温度/℃	采集系统 测得温度/℃	绝对误差/℃	相对误差/%
0	0.28	0.28	/
100	100.19	0.19	0.19
300	299.54	-0.46	-0.15
500	499.38	-0.62	-0.12
800	800.56	0.56	0.07
1 000	1 001.21	1.21	0.12
1 300	1 301.77	1.77	0.14
1 600	1 602.14	2.14	0.13

表 2 剩余通道的测量精度

标准传感器 测得温度/℃	T2 相对 误差/%	T3 相对 误差/%	T4 相对 误差/%	T5 相对 误差/%
0	/	/	/	/
100	0.19	0.19	0.18	0.19
300	-0.14	-0.15	-0.14	-0.14
500	-0.12	-0.12	-0.12	-0.10
800	0.06	0.07	0.07	0.06
1 000	0.10	0.12	0.12	0.11
1 300	0.14	0.14	0.15	0.15
1 600	0.14	0.13	0.13	0.13

测温系统,使用多通道采集单通道调理的设计方法,保证了采集精度。详细介绍了该测温系统的测量电路设计并通过二分法查找表算法准确定位温度以提高测温精度。对该系统的测试表明,该温度测量系统可广泛应用于工程温度测量环境,且可以完成多通道、高精度的测温任务。

参考文献

- [1] 谢清俊.热电偶测温技术相关特性研究[J].工业计量,2017(5):9-12.
- [2] 王霆.热电偶的冷端温度补偿与线性校正分析[J].仪器仪表标准化与计量,2016(2):36-39.
- [3] 曾小信,邱立运.热电偶测温采集精度的影响因素及优化方法[J].自动化与仪表,2016,31(9):37-40.
- [4] 王冰,任勇峰,贾兴中,等.一种基于热电偶 CJC 测温电

(上接第 14 页)

- [11] 刘红岩,陈剑,陈国青.数据挖掘中的数据分类算法综述[J].清华大学学报(自然科学版),2002(6):727-730.
- [12] 李学龙,龚海刚.大数据系统综述[J].中国科学:信息科学,2015,45(1):1-44.
- [13] 宋杰,郭朝鹏,王智,等.大数据分析的分布式 MOLAP 技术[J].软件学报,2014,25(4):731-752.
- [14] 杨彦波,刘滨,祁明月.信息可视化研究综述[J].河北科技大学学报,2014,35(1):91-102.
- [15] 张明.一种 SAP 低代码开发平台的设计与实现[D].济南:

路的设计[J].电子器件,2016,39(4):907-912.

- [5] 王迪,甄国涌,张凯华.基于 WRe5-26 型热电偶的高精度温度信号调理电路设计[J].中国测试,2020,46(9):96-102.
- [6] 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):99-10.
- [7] 王浩.计量检测用管式电阻炉温度场均匀性的研究[D].沈阳:东北大学,2010.
- [8] ALIFANOV O M,CHEREPANOV V V,MORZHUKHINA A V. Investigation of the formation mechanism and the magnitude of systematic error of thermocouple measurements in high-temperature heat shield aerospace materials[J].Journal of Engineering Physics and Thermophysics,2018,91(3):574-584.
- [9] 李梦雨,黄乐天,李强.基于带温度补偿的转换器的时域温度传感器[J].电子技术应用,2018,44(9):52-55.
- [10] 王晨辉,赵冬青,贾兴中,等.一种热电偶温度采集装置的优化设计[J].电子设计工程,2021,29(6):44-48.
- [11] 张亮.一种基于 AD590 宽范围测温电路[J].电子制作,2016(7):9-12.
- [12] 刘晓春.基于单片机、温度传感器的温度智能控制系统的设计[J].电子世界,2011(9):24-25.
- [13] 鄭玲玲.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.
- [14] 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.

(收稿日期:2021-06-25)

作者简介:

王乐群(1998-),通信作者,男,硕士研究生,主要研究方向:测试计量技术与仪器、电路与系统,E-mail:1053538263@qq.com。

文丰(1977-),男,博士,教授,主要研究方向:高冲击测量技术、微系统集成技术、传感器测量技术。

张凯华(1991-),男,硕士,硬件工程师,主要研究方向:电子测试仪器与系统。



扫码下载电子文档

山东大学,2020.

(收稿日期:2021-07-19)

作者简介:

要蕾(1989-),通信作者,女,硕士,工程师,主要研究方向:人力资源管理,E-mail:ylcasc@163.com。

张志成(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:计算机信息系统、软件工程。

张瑞权(1984-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:信息系统管理、数据治理与信息安全。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所