

DOI: 10.7652/xjtuxb201703011

多路温度同步测量系统开发与实现

付远明, 孟现阳, 吴江涛

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对多路温度同步测量的需求,研制了一种基于可编程逻辑阵列(field program gate array, FPGA)和低功耗内核(STM32)的多路温度同步测量系统。该系统以 FPGA 为主控制器,直接驱动多片模数转换器件,对多路电信号进行同步测量,使用 STM32 实现温度信号的转换和计算。系统预期测温范围为 $-200\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$,测温精度达到 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验结果表明,该系统在使用 PT100 温度传感器测温且测温范围为 $-200\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,系统测量误差小于 $0.003\text{ }^{\circ}\text{C}$,全量程($-200\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$)范围内系统测量误差小于 $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。所设计的多路温度同步测量系统尽管随温度增大测量误差存在增大趋势,但在全量程范围内实现了 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测温精度的目标,并具有多路温度同步测量、通道数易于扩展等优点,具有一定的实用价值。

关键词: 可编程逻辑阵列;低功耗内核;温度;同步测量

中图分类号: TN98 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)03-0062-06

Development and Realization of a Multi-Channel Synchronous Temperature Measurement System

FU Yuanming, MENG Xianyang, WU Jiangtao

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the demand of multi-channel temperature measurement, a multi-channel temperature measurement system was developed based on field programmable gate array (FPGA) and low power core (STM32). The FPGA chip is the main controller of the system, which directly drives the multiple analog to digital converter chips to measure the multi-channel electric signals synchronously. The STM32 was used to perform the conversion and calculation of the temperature signal. The accuracy of the temperature measurements is expected to be within $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the temperature range from -200 to $850\text{ }^{\circ}\text{C}$. The system was validated in the temperature range from -200 to $850\text{ }^{\circ}\text{C}$. The experimental results showed that the accuracy is less than $0.003\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the temperature range from -200 to $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, and less than $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ at temperatures up to $850\text{ }^{\circ}\text{C}$. The system has high measuring accuracy, can be used in multi-channel synchronous measurement, and is easy to expand the number of channels.

Keywords: field programmable gate array; low power core; temperature; synchronous measurement

温度是工业应用和科学实验中普遍且重要的物理参数。多路温度同步测量在电力、化工、石油、热

收稿日期: 2016-06-24。 作者简介: 付远明(1989—),男,博士生;孟现阳(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(41590850);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2015JM5214)。

网络出版时间: 2016-12-16 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161216.0925.004.html>

处理和食品等领域具有广泛应用。现有的仪器及相关文献主要采用扫频、通道选择的方式实现多路温度测量,并没有实现多个通道的完全同步^[1]。目前的多路温度同步测量研究中,大多采用集成温度传感器^[2],这些传感器将温度信息直接转化为数字信号。以 DS18B20 为例,受限于集成电路工艺,测温范围为 $-55 \sim 125^{\circ}\text{C}$,分辨率最高可达 0.0625°C ^[3],满足不了高精度、宽范围的工业应用。可编程逻辑阵列以极高的集成度、稳定的性能以及高速、易用的特点,尤其适用于多路信号的同步测量^[4]。因此,本文选择铂电阻作为温度传感器,采用可编程逻辑阵列(FPGA)与知识产权(intellectual property, IP)核重用技术进行测量部分的设计,使用低功耗内核(STM32)实现数据处理等外围电路的设计,并将整个系统从功能上进行划分,各部分独立工作又相互配合,实现了多路温度的同步测量,提高了系统测量的稳定性和数据传输的可靠性。

1 系统总体设计

多路温度同步测量系统主要分为恒流源及传感器接口设计、多路信号调理及同步采集、温度计算与传输3部分,系统结构如图1所示。

恒流源、待测铂电阻与高精度参考电阻串联组成回路,系统正常工作时,恒流源使能,输出持续恒定的电流,铂电阻和标准电阻两端产生压差,即待测差分信号。将多路差分信号接入后级信号调理电路,完成差分放大和低通滤波处理,然后接入模数转换电路,模数转换器(analog to digital converter, ADC)选择 LTC2440I,由 FPGA 芯片 EP4CE15F17-C8N 驱动,多个底层驱动分别控制对应的模数转换芯片,对待测电压进行同步采集,从硬件资源确保多路差分信号的同步测量,测量值暂存于各底层驱动的寄存器。FPGA 内部建立数据重组模块,待模数

转换器转换完成读取结果,提取出有效电压值并重组数据格式,通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)将重组后的数据传递给 STM32F407,在 STM32 中实现多路温度值的计算、传输及显示,通过通用串行总线(universal serial bus, USB)与上位机连接,实现数据可靠、高速的传输。

2 系统硬件设计

2.1 恒流源及传感器接口设计

本系统使用的恒流源及接口如图2所示,为消除导线电阻 R_w 的影响,信号测量采用四线制接法,测量中使用的激励设计为 1 mA 恒流源,经测试波动小于 $0.1\text{ }\mu\text{A}$ 。根据《JJG 229—2010 工业铂、铜热电阻》,电测设备供感温元件的测量电流为 1 mA ,自热引入的标准不确定度为 $2 \sim 3\text{ mK}$ ^[5],不会对系统不确定度评定带来显著影响,故恒流源的设计符合要求。为消除恒流源长期相对漂移等对温度测量造成的影响,引入一个高精度参考电阻 R_{REF} 与多路待测铂电阻温度传感器串联^[6],系统正常工作时,对所有铂电阻及参考电阻上电压进行采集,准确测量出各铂电阻传感器的电阻值。以第一通道为例,设铂电阻上测得电压为 U_{R1} ,标准电阻上测得电压为 $U_{R_{\text{REF}}}$,标准电阻 R_{REF} 阻值已知,铂电阻阻值为

$$R_{\text{PT1}} = \frac{U_{R1}}{U_{R_{\text{REF}}}} R_{\text{REF}} \quad (1)$$

根据各自通道测得电压与标准电阻测得电压及标准电阻的阻值,算出其他通道铂电阻阻值。根据金属铂的电阻值随温度变化而变化的物理特性,可计算出同一时刻多个通道的温度值。恒流激励源设计为双向恒流激励源,电流方向相反时在铂电阻、参考电阻两端获得大小相等方向相反的电压,可有效减小温差电动势对温度测量的影响。

2.2 多路信号调理及同步采集

本文设计的多路温度同步测量系统需要同时对

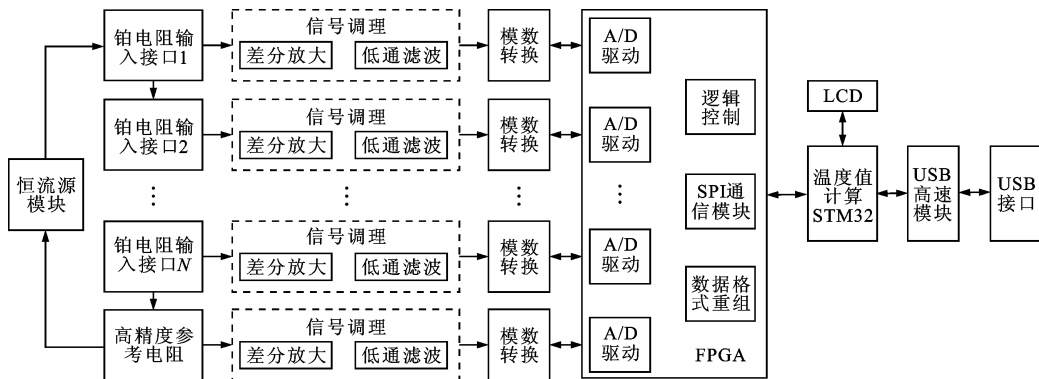


图1 系统结构框图

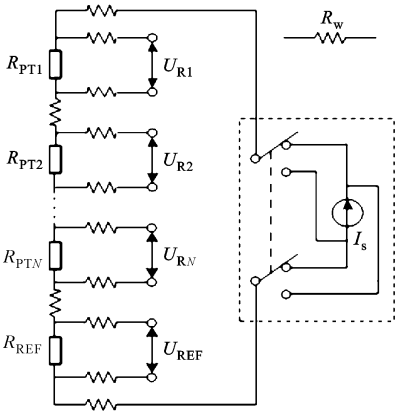


图 2 恒流源及传感器接口设计

铂电阻和高精度参考电阻上电压信号进行采集,实现多路温度的同步测量。以其中一路测量电路为例,分析由差分放大电路和滤波处理组成的信号调理模块^[7],单路信号采集电路如图 3 所示。

将待测的差分信号接入同级运算放大器 U1 和 U3 的同相端,采用差分输入可提高系统抗干扰能力。 R_3 和 R_2 、 R_4 组成反馈网络引入负反馈,两运放的输入端形成虚短和虚断,因而流入电路的电流等于 0,输入电阻无穷大,差分放大倍数可表示为

$$A_v = \frac{R_2 + R_3 + R_4}{R_3} \quad (2)$$

式中: R_2 、 R_3 、 R_4 的精度均为 0.1%。经过仿真计算和电路调试,电容 C_6 、 C_{11} 的值选用 47 nF,可在本设计中更好地滤除干扰,并可在全量程范围内提高测量电路的稳定性。模数转换模块的性能好坏将直接决定测量电路能否满足数据采集的要求,本系统选择 LTC2440I,具有 5×10^{-6} 积分非线性和 $5 \mu\text{V}$ 失调电压的高速无延迟三角积分型模数转换器,并采

用了能实现可变速度和分辨率的专有三角积分架构。当参考电压的压差为 5 V 时,可在 $\pm 2.5 \text{ V}$ 的全量程下实现 $0.298 \mu\text{V}$ 的分辨率,完全满足本文测量系统对电信号采集精度的要求。本系统设计有多路相同的电压采集单元,分别测量多个通道铂电阻和标准电阻上电信号,将测得数据通过 LTC2440I 的 SPI 接口同步传给 FPGA,再由 FPGA 进行后续处理。

2.3 温度计算与传输

这部分功能由 STM32 控制外围器件实现,为方便实时观测系统工作状态及多路温度值,采用 5 寸触摸屏作为人机交互界面,通过程序设计,还可输入铂电阻温度计参数。数据传输采用 USB3300 通过 ULPI 接口与 STM32F407 连接,实现数据可靠、高速传输。

3 系统软件设计

程序设计包括 FPGA 和 STM32 程序设计。FPGA 内实现多路电信号的同步采集,并将数据格式重组之后通过 SPI 接口传递给 STM32^[8],STM32 实现温度值的计算、显示及传输。

3.1 FPGA 程序设计

FPGA 程序设计分为 A/D 驱动模块、数据重组模块、SPI 通信模块及逻辑控制模块^[9]。逻辑控制是 FPGA 程序设计的核心,负责协调各模块工作时序,控制数据流向,实现多路电信号的同步采集,并将有效数据进行格式重组,通过 SPI 接口传给 STM32,进行温度值的计算。逻辑控制模块状态转换如图 4 所示。

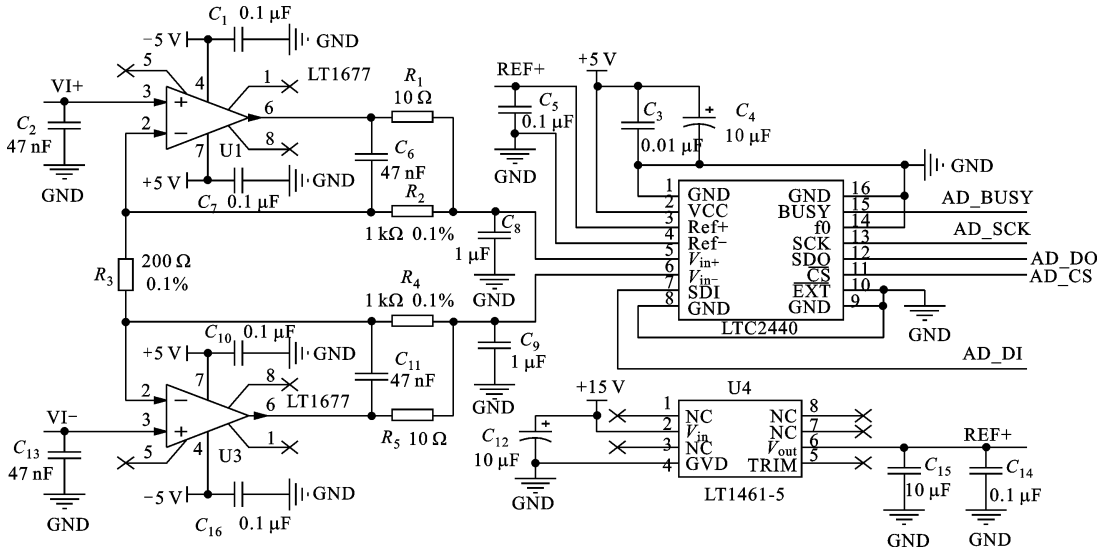


图 3 单路信号采集电路

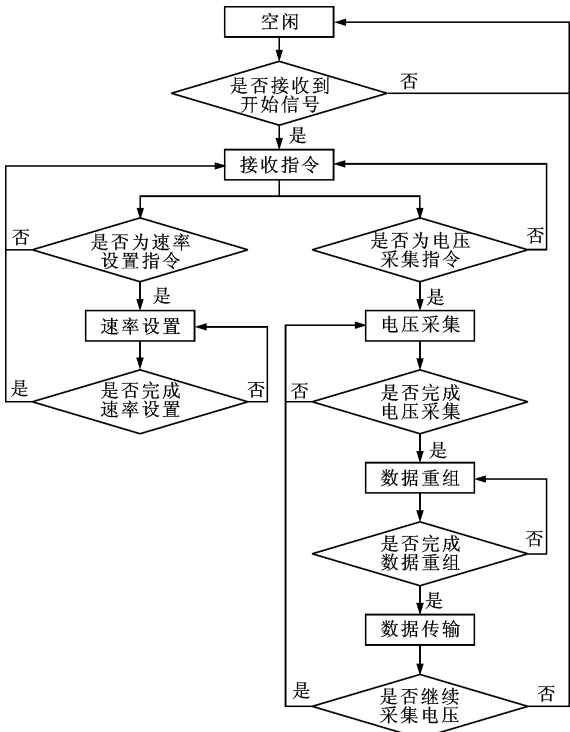


图 4 逻辑控制状态转换框图

逻辑控制模块的状态机设计有空闲、接收指令、电压采集、速率设置、数据重组和数据传输这 6 个状态。上电之后,该模块处于空闲状态,等待由 SPI 模块传来的开始信号,SPI 模块通过 STM32 接收来自上位机的指令。逻辑控制模块接收到来自 SPI 模块的开始信号之后,转移到接收指令状态,如果第一次使用,接收到的应该是采集速率设置指令,转移到速率设置状态,输出使能信号和采集速率字到模数转换器底层驱动,配置模数转换芯片的采集速率,完成以后回到接收指令状态。这时应该接收到的是电压采集信号,转移到电压采集状态,由各底层驱动控制各自模数转换器工作,由于 FPGA 的特性,可完全实现多路电压信号的同步采集。电压采集完成后,转移到数据重组状态,由数据重组模块实现有效数据的格式重组,将转换完成的二进制数从模数转换器驱动取出,解析数据,得出有效电压值,进行数据格式重组便于发送。数据重组完成后,转移到数据传输状态,控制 SPI 模块与 STM32 通信,将完成数据重组的电压值传递给 STM32,进行后续处理。完成数据传输之后,如果继续需要采集,将转移到电压采集状态,如果不需要,转移到空闲状态,完成一次完整的状态转换流程。

3.2 STM32 程序设计

STM32 程序设计主要实现指令分析、温度值计

算、数据显示及传输 3 个功能,STM32 程序流程图如图 5 所示。

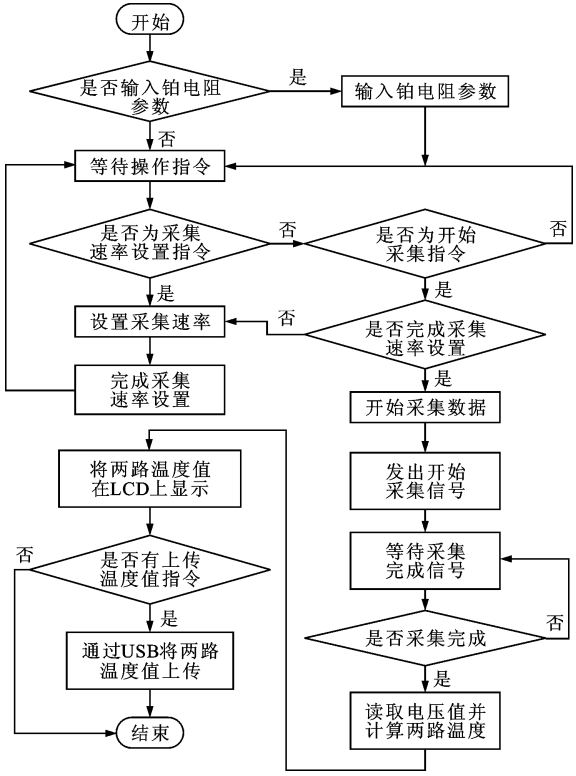


图 5 STM32 程序流程图

系统上电,STM32 程序运行,首先判断是否需要输入铂电阻参数,如果需要,由触摸屏输入,也可通过上位机设置,如果不需要,直接进行操作指令的判断。指令分别是采集速率设置和开始采集指令,只有完成采集速率设置之后才可以开始数据采集,数据采集完成,读取从 FPGA 传回的多路电压值,计算出对应通道温度值,在触摸屏上显示,如果接收到上传温度值指令,将温度值通过高速 USB 模块传入上位机。

4 测试结果

多路温度同步测量系统的实现以两路为例,进行分辨率测试及全量程范围内测量误差分析。鉴于高稳定性、高分辨率、较宽温度范围恒温环境的搭建及标准铂电阻温度计的标定较为复杂,可通过等效实验验证本系统的相关指标。利用 ZX74E 型直流电阻器模拟恒温条件下的铂电阻温度计,采用四线制接法进行测试。首先进行分辨率测试,将电阻器阻值拨到 100 Ω,以 0.002 Ω 为步进值增加,对应的温度步进值应该为 0.005 ℃ 左右,每个点连续采集 60 min,对系统的分辨率和稳定性进行测试,测量结

果通过 USB 传至上位机保存,进行数据分析。测试数据如图 6 所示。测试结果表明,两通道可有效分辨出 0.005℃ 的温度变化,当输入稳定时测量值波动均小于 0.005℃,且测得温度值与理论值接近,在误差允许范围之内,两通道波动趋势基本一致。

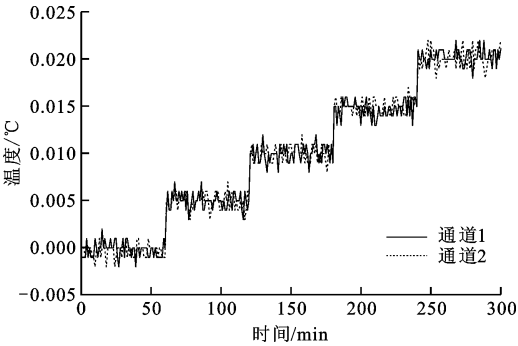


图 6 系统分辨率及稳定性测试

系统误差测试时首先设定需要采集的温度点,根据铂电阻温度电阻特性方程,计算出对应电阻值,再改变电阻器阻值设定相应的温度点标称值。经过多路温度同步测量系统,测得两通道温度值,系统定标及测量误差如表 1 所示。由测量结果可得,相同温度点下两通道绝对误差接近,当待测温度大于 0 时,随着待测温度升高,绝对误差增大,全量程范围内,系统的最大误差为 0.005℃。系统的误差由测得数据的实验标准偏差衡量^[10],用来估计测量数据偏离算术平均值的程度,定义为

$$s(x_i) = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2} \tag{3}$$

式中： $\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 是实验样本方差。式(3)即贝塞尔公式。

在上述每个温度点标称值下测量 1 000 组数据。根据测得数据,计算各通道对应温度点的实验

标准偏差,由于数据量较大,故只给出计算结果,如图 7 所示。

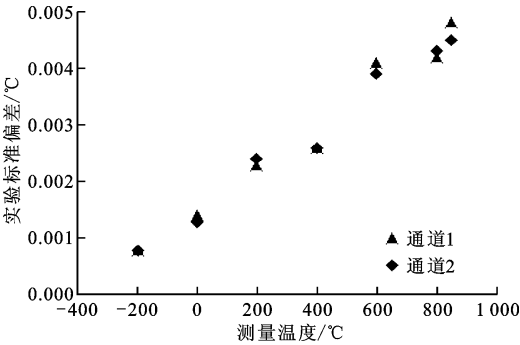


图 7 实验标准偏差统计

由测试结果可得,随着温度升高,系统测量误差逐渐加大,主要从恒流源、阻值误差及信号调理 3 方面分析误差增大的可能原因。用 ZX74E 型直流电阻器等效温度传感器,随着温度升高,传感器阻值增大,即恒流源的负载加大,输出功率升高,器件发热量增加,恒流源受温度影响,稳定性下降,导致测量误差增大,恒流源模块添加恒温装置,可有效提高短期电流稳定性;电阻器在 10、100Ω 档准确度为 ±0.01%,随着阻值增大绝对误差增大,测得温度值的绝对误差对应增大;信号调理主要受运算放大器的积分非线性、反馈网络器件参数等影响,随着待测信号的增大,经过信号调理,实际值与理论值偏差增大,若要减小这部分误差,应该使其参数尽量接近于运放的理想模型。

尽管全量程范围内数据测量的标准偏差随着待测温度升高而增大,但两通道变化趋势一致,实现了多通道同步测量的功能。另外,在 -200~400℃ 范围内,系统的测量误差小于 0.003℃,在全范围内误差小于 0.005℃,满足系统全量程范围内 0.01℃ 的测温精度要求,达到了预期设计目标。

表 1 系统定标及测量误差

设定温度/℃	电阻器电阻/Ω	测量温度/℃		绝对误差/℃	
		通道 1	通道 2	通道 1	通道 2
-200	18.493	-200.002	-200.003	-0.002	-0.003
0	100.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
200	175.840	199.998	199.999	-0.002	-0.001
400	247.038	400.002	400.001	0.002	0.001
600	313.594	599.997	599.998	-0.003	-0.002
800	375.509	799.997	799.997	-0.003	-0.003
850	390.262	849.996	849.995	-0.004	-0.005

5 结 语

本文研究开发的 FPGA 与 STM32 的多路温度同步测量系统,充分发挥 FPGA 并行操作优势,设计状态机,控制协调各模块有条不紊运行,实现了多路信号的同步采集。使用 STM32 完成指令分析及数据处理,软硬件架构设计合理,有效保证了数据采集的同步性、实时性及数据处理能力。实验结果表明,该系统完全符合设计要求。该系统还可根据实际需求进行通道数扩展,在多路信号同步测量中有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 行鸿彦,武向娟,吕文华,等. 自动气象站数据采集器温度通道的环境温度补偿 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1868-1875.
XING Hongyan, WU Xiangjuan, LV Wenhua, et al. Environmental temperature compensation for the temperature channel of data-acquisition unit in automatic weather station [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1868-1875.
- [2] 王欢,黄晨. 高精度无线环境温湿度测量系统设计研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3): 211-216.
WANG Huan, HUANG Chen. Design and study of temperature and humidity measurement system in high accuracy wireless environment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(3): 211-216.
- [3] 孔令荣,王昊,庄涛. 多点无线温度监测系统研究与实现 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(8): 97-103.
KONG Lingrong, WANG Hao, ZHUANG Tao. Research and implement of multi-point wireless temperature monitoring system [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(8): 97-103.
- [4] 卞楠,马聪. 基于 CPLD 的光伏数据采集系统的设计 [J]. 电子技术应用, 2016, 42(2): 68-70.
BIAN Nan, MA Cong. Design of photovoltaic data acquisition system based on CPLD [J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(2): 68-70.
- [5] 全国温度计量技术委员会. 工业铂、铜热电阻: JJG 229—2010[S]. 北京: 中国计量出版社, 2010: 24.
- [6] 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.

- [7] 郑泽祥,姜周曙,黄国辉,等. 铂电阻高精度温度测量系统设计 [J]. 机电工程, 2013, 30(12): 1494-1497.
ZHENG Zexiang, JIANG Zhoushu, HUANG Guohui, et al. Design of platinum resistance high-precision temperature measurement system [J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2013, 30(12): 1494-1497.
- [8] 柳炳琦,庾先国,贺春燕,等. 基于 FPGA 的通用 SPI 总线 IP 核设计与实现 [J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(3): 331-335.
LIU Bingqi, TUO Xianguo, HE Chunyan, et al. The design and realization of general SPI bus IP core bases on FPGA [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2014, 34(3): 331-335.
- [9] 张松,李筠. FPGA 的模块化设计方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(5): 560-565.
ZHANG Song, LI Jun. Modular design of FPGA design methodology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 25(8): 560-565.
- [10] 邵建新. 标准偏差与测量结果标准不确定度的 A 类评定 [J]. 统计与决策, 2014(12): 8-12.

[本刊相关文献链接]

- 刘雨薇,张卫正,叶福浩. 单个微凸体接触过程中的闪点温度研究. 2016, 50(3): 90-93. [doi:10.7652/xjtuxb201603014]
- 赵康,毕胜山,吴江涛. 邻二甲苯、间二甲苯和对二甲苯表面张力的实验研究. 2016, 50(3): 50-54. [doi:10.7652/xjtuxb201603008]
- 杨竹强,冯松,潘辉,等. 双毛细管式碳氢化合物黏度测量方法研究. 2015, 49(7): 37-41. [doi:10.7652/xjtuxb201507007]
- 毕胜山,赵贯甲,吴江涛,等. HFE7000、HFE7200 的表面张力和黏度实验研究. 2015, 49(7): 1-5. [doi:10.7652/xjtuxb201507001]
- 樊祥山,孙德魁,王井山,等. 利用分子理论估算四氢呋喃的热物理特性参数. 2015, 49(3): 44-49. [doi:10.7652/xjtuxb201503008]
- 唐学强,黄东,龚勤勤,等. 风冷冰箱蒸发器除霜特性及箱温回升的实验研究. 2014, 48(11): 81-85. [doi:10.7652/xjtuxb201411014]
- 张可,孟现阳,杨小莉,等. 最低可燃温度实验测量系统的研制. 2014, 48(5): 78-81. [doi:10.7652/xjtuxb201405014]
- 李勇,郭蓓,黄官飞,等. 太阳能热发电复合相变蓄热材料的实验研究. 2014, 48(3): 49-53. [doi:10.7652/xjtuxb201403010]

(编辑 荆树蓉)