

基于恒流源的高精度空间光学遥感器测温电路^{*}

何云丰 曹小涛 刘南南 王 栋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要:热控系统精度对空间光学遥感器的成像质量起着关键性作用,而高精度的测温电路是实现精密热控的前提。为了满足某空间光学热控系统的高精度测温要求,以 NTC 热敏电阻为测温元件,设计了一种基于恒流源的温度采集电路。详细阐述了恒流源测温电路方案,并对电路中恒流源、仪表放大器、电压跟随器和 AD 转换器误差进行了分析。实验结果表明,设计的恒流源测温电路稳定可靠,在对测温电路进行标定和补偿后,测温精度达到了 0.025°C ,达到了空间光学遥感器的精密热控需求。

关键词:恒流源;空间光学遥感器;温度测量;误差分析

中图分类号: TN371 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

High precision space optical remote sensor temperature measure circuit based on constant current source

He Yunfeng Cao Xiaotao Liu Nannan Wang Dong

(Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: Accuracy of thermal control system plays a crucial role in space optical remote sensor imaging quality. To realize precise thermal control, first of all must have a high precision of temperature measurement circuit. In order to satisfy a space optical remote sensor thermal control system of high precision temperature measurement requirements, this paper choose NTC thermistor as the temperature measurement components, and designed a temperature acquisition circuit based on constant current source. Expounds the constant-current source temperature measurement circuit, analyzed the error of current source, instrument amplifier, the circuit voltage follower and AD converter. The experimental results show that the temperature detection circuit design of constant current source is stable and reliable, after calibration and compensation of temperature measuring circuit, temperature measurement precision is 0.025°C , satisfy the precision thermal control requirements of space optical remote sensor.

Keywords: constant current source; space camera; temperature measurement; error analysis

1 引言

在空间光学遥感器中,热控系统负责控制温度变化与温度分布,以维持热量吸收、转化及排散平衡,保障其稳定可靠工作,进而获取高质量的图像数据。温度测量电路是空间光学遥感器热控系统的重要组成部分,是正确执行热控策略的前提条件,其性能的好坏直接影响着空间光学遥感器热控系统的性能,因此对测温电路性能以及提高测温电路测温精度的研究具有非常重要的意义。

在地面的高精度测温电路当中,一般选取铂电阻作

为温度传感器^[1-2],采用恒流源式测温方案,在对测温电路优化设计和数字处理后^[3-4],能够达到较高的测量精度,方益喜等设计了一种基于 PT1000 的高精度温度测量系统^[5],其测量精度可达到 0.01°C 。与地面应用不同,在空间光学遥感器中,考虑到电路的可靠性,采用 NTC (negative temperature coefficient)热敏电阻作为温度传感器。在对测温精度要求不高的热控系统设计中,选用惠斯通电桥测温实现测温方案^[6-7],例如王永成等运用容差分析法对电桥式测温电路进行分析^[8],最后对关键位置电阻再次标定筛选,使得测温精度能达到 0.3°C ,但由于电桥测温电路受电桥输入电压 U 、电桥非线性、3 个电桥

收稿日期:2016-01

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(41175028)项目资助

电阻精度等多种干扰因素影响,要进一步提高温度测量精度十分困难。

随着空间光学遥感器技术的不断发展,光学遥感器的成像质量和分辨率得到了不断的提高,与此同时,对光学遥感器的热控系统也提出了更高的要求,传统的惠斯通电桥测温电路不再能够达到测温精度要求,对此,本文针对基于恒流源的热敏电阻温度采集电路展开了研究,设计了基于恒流源的温度采集实现方案。

2 恒流源测温电路实现方案

某空间光学遥感器的控温精度要求保持在 $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$, 由于测温精度要高于控温精度,设计时留出 4 倍裕量,则要求测温精度能够达到 0.025°C , 整体要求达到的高精度测温范围为 $15 \sim 25^\circ\text{C}$, 测温电路由电压基准源、恒流源、热敏电阻、仪表放大器、电压跟随器、AD 转换器和处理器组成,设计的恒流源温度测量电路原理如图 1 所示。

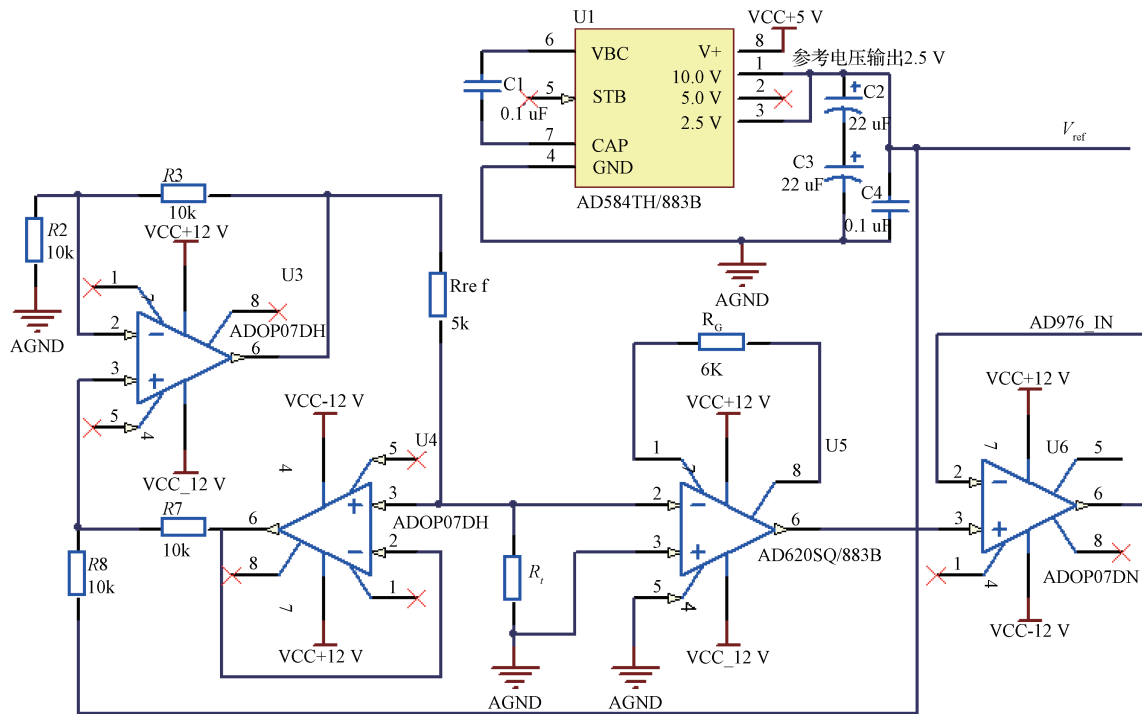


图 1 基于恒流源的测温电路原理

电路中电压基准源选用了 AD584,其输出电压的最大容差为 $\pm 6 \text{ mV}$;恒流源由两个低噪声、低失调、高开环增益双极性运算放大器 OP07 构成,其中放大器 U3 构成加法器,U4 构成跟随器,恒流源输出电流可通过参考基准 V_{ref} 和电阻 R_{ref} 进行配置,为保证输出电流精度,配置电阻采用定制的 UPR 塑封金属铂电阻,这种电阻具有 0.01% 的初始精度,小于 5 ppm 的温度稳定性,经测试该恒流源电路在负载变化范围内的线性度优于 5 ppm;放大电路由 ADI 公司的低功耗、高精度仪表放大器 AD620 构成,其放大倍数由一个外接 UPR 塑封金属铂电阻 R_g 进行调节;在 AD620 与 AD 转换器之间加入由运算放大器 OP07 构成的电压跟随器,完成 AD620 输出和 AD976 输入之间的阻抗匹配;AD 转换器选取了 ADI 公司的一款 16 位并行数模转换芯片 AD976,转换速率最高为 200 ksps,16 bit 双极性输出,能达到 0.03 mV 的分辨率。

恒流源测温电路的工作原理如下:恒流源输出电流在流经热敏电阻后,由 AD620 采集对热敏电阻两端电压进

行放大,其输出电压经电压跟随器送入 AD976 进行模数转换,再由处理器读取 AD 转换数据并计算处理得出采集电压,从而得出热敏电阻阻值 R_t ,最后根据阻值与温度之间对应关系,得出当前测量温度 t ,从而实现测温的目的。

为抑制基准电压波动引起的影响,设计采用一个基准电压源 AD584 提供恒流源参考和 AD 转换器参考,根据 AD 转换器的计量比率变化原理,可以消除参考电压基准不稳定因素引起的误差。测温电路使用的热敏电阻型号为 MF501,其热敏电阻阻值 R_t 与测量温度 t 之间的关系为:

$$t = \frac{2 \times c}{-b + \sqrt{b^2 - 4 \times a \times c(a - \ln R_t)}} \quad (1)$$

式(1)为热敏电阻生产厂家提供的热敏电阻阻值与温度的经验公式,其中系数 a 、 b 、 c 与热敏电阻的材料有关,在实际使用中,热敏电阻阻值 R_t 与温度 t 对应关系可通过高精度温箱标定实验得到,如图 2 所示为 MF501 热敏电阻在 $15 \sim 25^\circ\text{C}$ 范围内的标定结果。

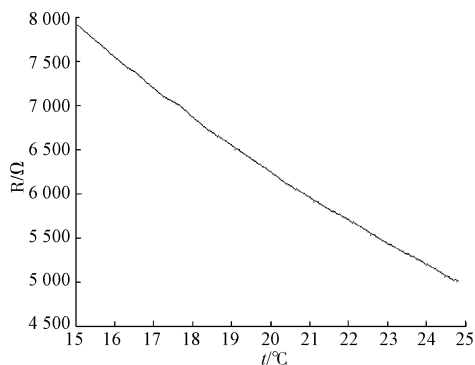


图2 热敏电阻阻值与温度关系曲线

针对图1设计的恒流源温度采集电路,AD转换器输出量的理论计算公式为:

$$V = \frac{R_t I G}{V_{ref} K} \times 2^n \quad (2)$$

式中: G 为仪表放大器放大倍数, K 为AD转换器电压输入范围与参考电压的比值, n 为AD转换器的位数。

由于恒流源电路参考电压与输出电流的关系可表示为:

$$I = \frac{V_{ref}}{R_{ref}} \quad (3)$$

则可式(2)可化简为:

$$V = \frac{R_t G}{K R_{ref}} \times 2^n \quad (4)$$

由式(4)可知,恒流源测温电路输出量是热敏电阻 R_t 、恒流源配置电阻 R_{ref} 、放大器放大倍数 G 和AD转换器位数 n 组成的多元函数,输出电压与热敏电阻的阻值为线性关系,且输出值与电路供电电压、恒流源输出电流无关,因此与惠斯通桥式测温电路相比,消除了电桥非线性及基准电压源稳定性影响因素对测温结果的干扰。

3 恒流源测温电路精度分析

式(5)为测温电路的理论输出量,但在电路实际工作中,测温精度不仅与 R_t 、 R_{ref} 和 G 的精度有关,还受热敏电阻接入线缆阻抗、仪表放大器、AD转换器精度、外界环境干扰和电路噪声等因素的影响。在设计电路方案时,要想对以上所有的误差干扰详细分析是十分困难的,因此下面对各种影响因素带来的误差采取理论与实践相结合的方式进行分析 and 估算。

3.1 恒流源

在铂电阻式的恒流源测温电路中,以使用PT1000铂电阻为例,其无自热效应的上限是0.5 mA,电路设计时也按照该电流大小进行设计^[9]。与铂电阻不同,热敏电阻的阻值变化范围大,在本文恒流源测温电路设计中,恒流源电流大小进行如下考虑:

当选取的恒流源电流过大时,热敏电阻自身的发热问题将对测量精度带来影响,同时,随着测温温度过低时热

敏电阻阻值过大,电流变大时将引起恒流源的带载能力变小,恒流源输出电流不再稳定,影响电路的精密测温范围;当选取的恒流源电流过小时,仪表放大器的输入电压范围变小,则放大器的倍数变大,此时将引起电路的信噪比降低,影响测量精度。设计电路在高精度温度采集范围内,由图2可知,热敏电阻阻值在5~8 kΩ之间变化,根据文献[3]提出的不同阻值范围对应不影响测温精度的电流关系,选定恒流源电路的输出电流值为0.05 mA,可以避免热敏电阻自身发热对测温精度的影响。

由式(5)可知设计的恒流源测温电路输出已经抵消了由恒流源输出电流不稳定问题带来的误差干扰,因此在恒流源中测温精度与恒流源配置电阻 R_{ref} 的精度和温度漂移有关,已知选用 R_{ref} 精度为0.01%,温度稳定性小于5 ppm,将恒流源带来的测温误差转换为百万分率,具体计算过程如表1、2所示。

表1 恒流源电路绝对误差估算

误差源	恒流源电路 误差估算	总误差 /ppm	能否 校正
绝对精度:TA=25°C			
输入失调电压 ΔV_1 ,mV	0.01%	100	
	总绝对误差	100	可校正

表2 恒流源电漂移误差预算

误差源	恒流源电路误差估算	总误差 /ppm	能否 校正
漂移至+85°C			
增益漂移,ppm/°C	(5 ppm)/°C × 60°C	300	
	总漂移误差	300	不可校正

由表1、2的估算结果可知,恒流源带来的总绝对误差为0.01%,在计入漂移误差后,总的测温误差为0.04%,按对应温度比例关系,恒流源电路带来的测温误差为 $\delta_t = 0.01^\circ\text{C}$,在以上误差中,由电路工作环境温度变化引起的漂移误差是不可校正误差。

3.2 仪表放大器

在测温电路应用中,系统精度会受到仪表放大器性能参数带来的影响,主要参数包括:增益失调 ΔG 、输入失调电压 ΔV_1 、输出失调电压 ΔV_2 、输入失调电流、共模抑制比、增益非线性、典型电压噪声等。

根据实际电路和集成仪表放大器AD620的性能参数^[10],AD620增益为25, $R_G = 6\text{K}$,共模电源为2.5 V,对AD620放大电路引入的测温误差进行估算,以实际电路400 mV的满量程输入电压为基准,并将所有误差折合到放大器输入端并转换为百万分率(ppm),具体误差计算过程如表3~5所示。

表3 仪表放大器 AD620 绝对误差预算

误差源	AD620 误差估算	总误差 /ppm	能否校正
绝对精度:TA=25℃			
输入失调电压 $\Delta V_1, \text{mV}$	50 $\mu\text{V}/400 \text{ mV}$	125	
输出失调电压 $\Delta V_2, \text{mV}$	500 $\mu\text{V}/25/400 \text{ mV}$	50	
输入失调电流, nA	1 nA $\times 6\ 000/400 \text{ mV}$	39	
CMR, dB 增益	0.15%	1 500	
	总绝对误差	1 714	可校正

表4 仪表放大器 AD620 漂移误差预算

误差源	AD620 误差估算	总误差 /ppm	能否校正
漂移至+85℃			
增益漂移, ppm/℃	(50 ppm+ 10 ppm)/℃ $\times 60\text{℃}$		
输入失调电压, mV/℃	0.6 $\mu\text{V}/\text{℃} \times$ 60℃/400 mV		
输入失调电流, pA/℃	1.5 pA/℃ $\times 6\ 000$ $\times 60\text{℃}/400 \text{ mV}$		
输出失调电压, mV/℃	7 $\mu\text{V}/\text{℃} \times$ 60℃/25/400 mV		
	总漂移误差	3 733.25	不可校正

表5 仪表放大器 AD620 分辨率误差预算

误差源	AD620 误差估算	总误差 /ppm	能否校正
分辨率			
增益非线性度, 满量程 ppm	40 ppm	40	
典型 0.1~10 Hz 电压噪声, mV/℃	0.55 $\mu\text{V p-p}/$ 400 mv	3.75	
	总分辨率误差	43.75	可校正

由表3~5的误差预算结果可知,失调误差和增益误差属于可校正的误差,而由温度变化引起的漂移误差属于不可校正误差,在设计电路的温度测量范围内,当考虑仪表放大器所带来的全部误差时,整体测量精度的百分比约为0.55%,按对应温度比例关系,仪表放大器测温带来的误差为0.147℃,不能满足电路精度设计要求。若对可校正误差采取校正措施进行校正补偿,且保证测温系统工作时环境温度维持在 $25\pm 1\text{℃}$ 附近,则由温度漂移带来的误差也将大大减小,此时由仪表放大器带来的误差约为0.01%,仪表放大器测温带来的误差为 $\delta_f=0.002\ 7\text{℃}$,能够满足高精度测温电路设计的精度需求。

3.3 电压跟随器

电压跟随器引入的误差包含运算放大器输入电压源的噪声、运算放大器电流源的噪声以及电阻噪声等,将上述噪声源相加,再乘以运算放大器的噪声增益,即可得出电压跟随器的输出噪声^[11],根据对电路实测,由OP07构成的电压跟随器输出噪声不超过2.6 μV ,因此电压跟随器对测温精度影响约为 $\delta_s\approx 0.000\ 7\text{℃}$,该项误差对测温电路整体带来的误差很小。

3.4 AD转换器

设计采用了16位AD模数转换器AD976,具有0.305 mV的电压分辨率,其最大积分误差为3 LSB,则可近似认为AD976的测量精度为0.005%,对应测温误差 δ_{AD} 不超过0.002 5℃,能够满足测温电路在0.025测温精度下对AD转换器的精度要求。

3.5 其他影响因素

在实际电路中,除去以上分析的各项误差,测温精度还会受线缆阻抗、环境干扰等因素 δ_{js} 的影响,由于以上两项误差不宜定量计算,因此在精度分析中未进行定量分析,这两项误差可通过以下补偿手段进行补偿和抑制:

1)线缆阻抗,对于接入线缆阻抗带来的影响,可通过四线制接线方式予以补偿;

2)环境干扰,环境干扰的影响可通过选取屏蔽抗干扰实验环境并采取相关屏蔽措施。

3.6 总测温误差估算

根据误差理论,系统的总误差是由各个环节的分项误差共同作用而形成的,即总误差是各分项误差的函数^[12]。若按随机误差来合成总误差,且认为各个直接测量量之间相互独立,用标准偏差表示误差的传播关系,则间接测量量 y 可表示为:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n 为直接测量量,即各分项测量结果;

用标准偏差表示的总误差 δ_y 为:

$$\delta_y = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x_1})^2 \delta_{x_1}^2 + (\frac{\partial f}{\partial x_2})^2 \delta_{x_2}^2 + (\frac{\partial f}{\partial x_{1n}})^2 \delta_{x_{1n}}^2} \quad (6)$$

式中: δ_{x_i} 为用标准偏差表示的第 i 个分项误差, $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 为第 i 个分项误差, δ_{x_i} 的传播系数。

结合实际电路,认为上文进行分析的各项误差之间相互独立,按照各项误差的估值,由式(6)可合成的总温度测量误差为:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_f^2 + \delta_j^2 + \delta_s^2 + \delta_{AD}^2 + \delta_{js}^2} \quad (7)$$

当考虑全温度范围内的各项误差时,总的测温误差为:

$$\delta_{\Sigma 1} = \sqrt{0.01^2 + 0.147^2 + 0.000\ 7^2 + 0.002\ 5^2} = 0.147\ 3\text{℃} \quad (8)$$

当将电路的温度进行控制以抑制温度漂移带来的误差时,测温电路总的测温误差:

$$\delta_{22} = \sqrt{0.0025^2 + 0.002^2 + 0.0007^2 + 0.0025^2} = 0.004^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

由以上分析结果可知,测温的主要误差来源于恒流源配置电阻与仪表放大器的绝对误差和温度漂移误差,若不采取补偿措施,电路实现的测温精度仅能达到 0.147°C ,为了达到设计的测温精度要求,必须对电路进行标定和误差补偿,经电路标定和补偿后,系统的误差主要与热敏电阻标定精度和电路噪声有关,此时测温电路可满足测温的精度要求。

4 实验测试

4.1 测温电路标定

完成了恒流源测温电路的制板与调试,测温电路如图3所示,利用高精度电阻代替热敏电阻,对测温电路在 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 温度范围为进行标定,根据热敏电阻 R_t 的标定数据,改变不同的高精度阻值,将处理电路采集的 AD 转换器数据传至上位机,得到的部分标定数据如表6所示。

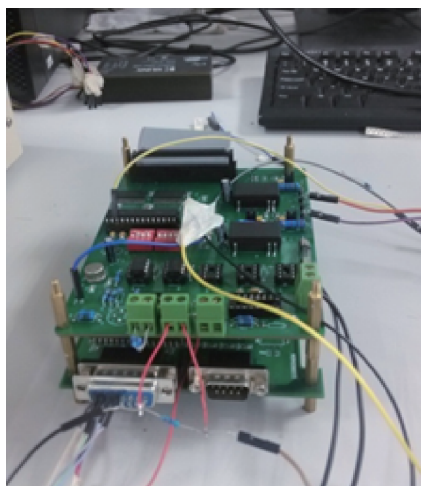


图3 恒流源测温电路

表6 测量电路标定数据

设定温度 / $^{\circ}\text{C}$	高精度电阻值 / $\text{k}\Omega$	实测温度值 / $^{\circ}\text{C}$	测温偏差 / $^{\circ}\text{C}$
15	7.936 3	14.987	-0.013
16	7.561 0	15.992	-0.008
17	7.206 2	17.011	0.011
18	6.870 6	18.003	0.003
19	6.552 9	19.009	0.009
20	6.252 2	20.016	0.016
21	5.967 3	21.028	0.028
22	5.697 4	22.037	0.037
23	5.441 5	23.050	0.050
24	5.198 9	24.057	0.057
25	4.968 6	25.063	0.063

由表6中数据可知,设计测温电路的测温结果的偏差为 0.092°C ,对以上偏差数据进行存储,作为测温电路测温的标定补偿数据。

4.2 恒温箱实测

将热敏电阻传感器置入高精度恒温箱(温控精度 0.01°C),并以四线制接法接入测温电路,保持测温电路周围环境温度稳定,对温度测量系统在 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 温度范围为进行测量,在不同温度下补偿标定试验的测温误差得到测量温度值及处理结果如表7所示,其中,随机误差是温箱在以某温度点稳定后,对多次测量数据计算出的标准偏差,系统误差是恒温箱设定温度值与测温电路经采集和标定后的差值。

表7 恒温箱测温结果及误差

设定温度 / $^{\circ}\text{C}$	测量温度值 / $^{\circ}\text{C}$	随机误差 / $^{\circ}\text{C}$	系统误差 / $^{\circ}\text{C}$
15	14.991	0.002	-0.009
16	15.993	0.002	-0.007
17	17.009	0.002	0.009
18	18.004	0.002	0.004
19	19.011	0.002	0.011
20	19.995	0.002	-0.005
21	21.012	0.002	0.012
22	22.017	0.002	0.017
23	23.014	0.003	0.014
24	24.015	0.003	0.015
25	25.021	0.003	0.021

由表4数据可知,测温电路在 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的随机误差不超过 0.003°C ,表明设计的电路具有良好的信噪比,经标定后的电路测温结果仍有系统误差,该项误差为测温标定残差和恒温箱精度引入的误差;测温电路最大的测温误差不超过 0.021°C ,说明设计的恒流源测温电路具有较高的测温精度,满足了 0.025°C 的测温精度指标要求。

5 结论

本文以 NTC 热敏电阻作为测温元件,设计了基于恒流源的测温电路,相比惠斯通电桥式测温电路,恒流源测温电路有效克服了电桥非线性及基准电压稳定性的影响;对电路各环节的误差的分析估算表明,若想实现测温的精度要求,必须对电路的绝对误差和漂移误差进行补偿。在实验测试中,通过对电路采取标定和补偿,将测温电路的测温误差控制在 0.021°C 以内,满足了 0.025°C 的测温精度需求。该电路在进一步优化和可靠性设计后,将在某空间光学传感器的热控系统中进行验证。

参考文献

- [1] 刘岩俊. 基于 DSP 的嵌入式温度测量系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12): 78-81.
- [2] 黄强, 腾召胜, 唐享, 等. 电子分析天平温度漂移补偿算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1987-1995.
- [3] CHEN G Y, DU L B, HE H J, etc. Research on key techniques of expendable conductivity temperature depth measuring system[J]. Instrumentation, 2015, 1(2): 18-27.
- [4] 刘明亮, 朱江森. 数字信号处理对电子测量与仪器的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1041-1046.
- [5] 方益喜, 雷开卓, 屈健康, 等. 基于 PT1000 的高精度温度测量系统[J]. 电子设计工程, 2010, 18(10): 79-82.
- [6] 李云辉, 王晓东, 朱晓明. 基于 NTC 的非平衡桥式测温电路的误差分析[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 51-54.
- [7] 李纪莲, 曹聚亮, 张开东. 航空重力测量应用中高精度测温电路精度研究[J]. 测试技术学报, 2010, 24(2): 128-132.
- [8] 王永成, 党源源, 徐抒岩, 等. 容差分析在空间光学遥感器测温电路中的应用[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1333-1339.
- [9] 郑晓文, 郑红. 工作电流对热敏电阻测温的影响[J]. 宇航计测技术, 2001, 21(4): 44-51.
- [10] 刘利峰. 单片精密仪器仪表放大器应用电路[J]. 国外电子测量技术, 2003, 22(1): 29-30.
- [11] 胡军柯. 电流测量电路的误差补偿和降噪技术的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [12] 庄严, 段慧达. 误差分配与合成在智能仪器中的设计与应用[J]. 测量与设备, 2002(6): 9-10.

作者简介

何云丰, 1989 年出生, 工学硕士, 研究实习员, 主要研究方向为空间光学遥感器电子学系统设计。
E-mail: hyf421@163.com

(上接第 72 页)

- [8] 胡敏. Web 系统下提高 MySQL 数据库安全性的研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [9] 黄兮. 基于电子交易的农产品溯源模型的设计与实现[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2009.
- [10] 赖武光. 基于 LabVIEW 的温度监控系统软件设计[J]. 科技与创新, 2016(1): 68-69.
- [11] SINGLA S K, YADAV R K. Optical character recognition based speech synthesis system using LabVIEW[J]. Journal of Applied Research & Technology, 2014, 12(5): 919-926.
- [12] 李红刚. 基于单片机和 LabVIEW 的多路数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 62-67.
- [13] 戴冬冰, 刘正光. 基于虚拟仪器的大功率高精度电子负载[J]. 仪表技术与传感器, 2015(9): 40-43.
- [14] 何杰. 基于关系型数据库的单元测试的研究与实践[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

作者简介

陈硕章, 1994 年出生, 本科在读, 主要研究方向为测控技术、虚拟仪器和信号处理。
E-mail: chenshuozhang1234@126.com

(上接第 75 页)

- [8] Standard commands for programmable instruments[S]. USA, SCPI, Consortium, 1999.
- [9] 韩桂芬. 采用频谱分析仪测量信号源功率电平及校准不确定度[J]. 现代电信科技, 2006(5): 49-51.
- [10] JEFFERY. WINDOWS 核心编程[M]. 第 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 232-233.

作者简介

侯月振, 1983 年 3 月出生, 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电子测量仪器的程控设计。
E-mail: lao_hou1983@163.com