文章编号:1673-0291(2017)05-0052-06 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.2017.05.008

基于 Pt100 的高精度测温电路

骆 丽[1],杨永刚[1],胡文涛[1],林佳本[2]

(1.北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044;2.中国科学院国家天文台,北京 100012)

摘 要:多通道双折射滤光器是太阳磁场观测的重要仪器,旨为提高太阳单色观测能力.本滤光器中双折射晶体的折射率对温度变化敏感,因此需对环境进行恒温控制.温度测量是恒温控制的前提.本文设计并完成一个基于 Pt100 的高精度温度测量系统,给出了高精度测温原理,温度采集系统电路及温度校准测量方案.利用 RR9710,TD—1 等高精度测温仪对精度进行间接标定.测试结果表明:本温度测量系统性能稳定,小型高效,测量精度可达到 0.02 ℃.

关键词:集成电路设计;温度测量;Pt100;高精度

中图分类号:TN402 **文献标志码**:B

High-precision temperature measurement circuit based on Pt100

LUO Li[1],*YANG Yonggang*[1],*HU Wentao*[1],*LIN Jiaben*[2]

(1.School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044,China;
2.National Astronomical Observatories of the Chinese Academy of Sciences,Beijing 100012,China)

Abstract: The multi-channel birefringent filter, which is designed to improve the ability to observe the monochromatic property of the sun, is regarded as an important instrument for solar magnetic field observation. The refractive index of the birefringent crystal in the optical filter is-sensitive to temperature. Therefore, it is necessary to control constant temperature. Measuring temperature is premise of constant temperature control. A high-precision temperature measurement system based on Pt100 is studied and designed. The principle of high-precision temperature measurement, the circuit of temperature acquisition system and the scheme of temperature correction are provided.Finally, the high-precision temperature measurement instruments, such as RR9710, TD-1,are used to calibrate accuracy indirectly. The test results show that the temperature measurement system is stable and efficient.The accuracy could be reached to 0.02 ℃.

Keywords: integrated circuit design;temperature measurement;Pt100;high-precision

随着微电子等技术的飞速发展,尤其是新型智能设备的广泛应用,对测温技术及测温精度的要求不断提高.在新型天文望远镜系统中,多通道双折射滤光器[1]是观测太阳磁场运动的重要仪器,但滤光器中材料需在恒温下工作.高精度温度测量是实现恒温控制,保证滤光器稳定工作的关键所在[2].国家天文台提出了一种热敏电阻和高精度 ADC 结合的测温电路设计方案[3],但该方案主要采用的是闭

收稿日期:2016-11-17
基金项目:国家自然科学基金天文联合基金项目(U1431119)
Foundation item: National Natural Science Foundation of China(U1431119)
第一作者:骆丽(1966—),女,四川资阳人,教授,博士.研究方向为集成电路设计.**email**:lluo@bjtu.edu.cn.

引用格式:骆丽,杨永刚,胡文涛,等.基于 Pt100 的高精度测温电路[J].北京交通大学学报,2017,41(5):52—57.
LUO Li, YANG Yonggang, HU Wentao, et al. High-precision temperature measurement circuit based on Pt100 [J].Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(5): 52—57.(in Chinese)

环自动控制技术,得到的是温度偏差量的闭环系统,而非此时刻器件工作时所处的温度参数[4].相对于热敏电阻,采用铂(Pt)电阻测量温度是一种可行性良好的高精度测温方法[5].文献[6]提出了以 Pt100 为测温元件的高精度温度测量方案,但精度不佳(±0.4 ℃).文献[7]提出了三线制恒流源驱动法驱动测温方案,但结构复杂,不适用于多通道双折射滤光器.鉴于放大器输入端子的 $+V$ 与 $-V$ 之间等效的输入阻抗很大,故采用四线制铂电阻可最大限度消除引线电阻误差[8].

本文作者提出了一种高精密电阻与铂电阻并联,并将两者电压作为模拟输入的电路设计方法,能够将测量温度值转为测量温度相对一个恒定值的变化量,此办法能有效解决单臂电桥等电路中数字信号取值范围利用率低的问题,同时可提高测量温度的有效分辨率和精度.

1　高精度测温电路原理及方案

1.1　高精度测温电路原理

铂电阻传感器是利用金属铂的电阻值 R_t 随温度变化而变化的物理特性制成的温度传感器[9].以铂电阻作为测温元件进行温度测量的关键是能准确地测量出金属铂的电阻值.本文采用铂金属 Pt100,其温度电阻的转换公式为

$$R_t = 100 + 0.3851T \tag{1}$$

式中,T 为摄氏温度.

现有的控温电路有分压式电路与单臂电桥如图 1 和图 2 所示[10].分压式电路是依据串联电路中电流不变的原理设计而成,其结构可减小测量范围的浪费.然而,分压式电路采用电压源供电,考虑到自热效应[11],测温电路阻值不宜太小,但高精度电阻 R_c 与测温电阻 R_t 比例又不能太大,所以相应的就需要更大阻值的温度传感器——热敏电阻,但热敏电阻线性度较差,测量精度难以满足要求.单臂电桥电路由于自热效应严重,也无法用于高精度的测量.

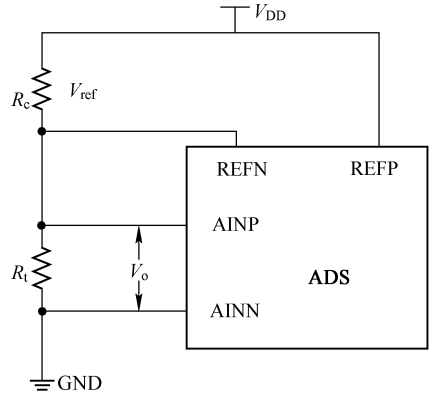


图 1　分压式电路

Fig.1　Divider circuit

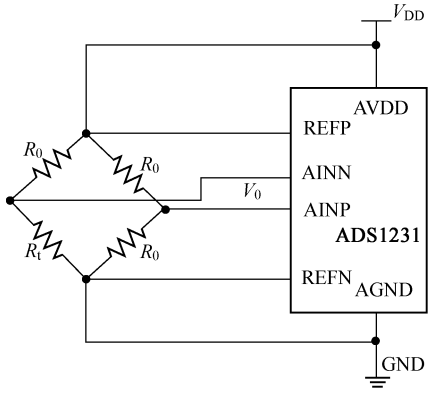


图 2　单臂电桥电路

Fig.2　Wheatstone bridge circuit

分压式电路提供了变绝对温度值为相对温度值的思路,即将式(1)中常量 100 在输入电压中消去,因为只要设置合适的相对参量,相对温度取值就可以为 0.基于此,本文提出了一种新型的测温电路解决方案,如图 3 所示,图中 I_{out1} 和 I_{out2} 为 ADC 芯片输出电流.

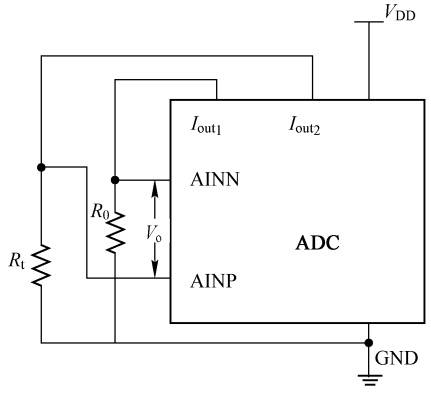


图 3　分压式改进方案

Fig.3　Improved scheme of divider circuit

1.2　高精度测温电路方案

将恒定阻值的 R_c 和 R_t 并联,分别通过 ADC 芯片的两个基准电流源输出口供电,可得

$$V_0 = I_{out1}R_t - I_{out2}R_c \tag{2}$$

取 $I_{out1} = I_{out2} = I = 210\ \mu A$,$R_c = R$,$R_t = R + \Delta R$ 且 $R = 100\ \Omega$,式(2)可化为

$$V_0 = I\Delta R \tag{3}$$

根据 AD 转换关系式,可得

$$V_0 = DV_{ref}/k \tag{4}$$

式中:D 为数字量取[0,1];k 为放大增益.由此通过式(3)和式(4)变换得到

$$\begin{cases} \Delta R = DV_{ref}/kI \\ \Delta T = DV_{ref}/0.385kI \end{cases} \tag{5}$$

式中：设置电压 V_{ref} 为 1.17 V；电流 I 为 210 μA；ΔR 为铂电阻对应摄氏温度下的阻值与 100 Ω标准阻值的差. k 为最大系数 128 时，可得

$$\Delta T = 113.057D \tag{6}$$

说明满量程温度变化 113.057 ℃，已经达到了充分利用 D 的数位要求.

对于分辨率，假设当 T =0.000 1 ℃时，对应电阻为 R =39 μΩ，那么在 210 μA 的电流下，输入电压为 V_0=8.19 nV，放大 128 倍，为 1.048 3 μV.使用内部基准电压 1.17 V 作为参考电压，在放大倍数为 128 时，AD 最大的有效分辨率为 19 位，则此时最低数字量度为 $1.17/2^{19}\approx 2.231\ 6$ μV，约为 1.048 3 μV 的 2.13 倍，故该改进电路理论分辨率可达 0.000 2 ℃，能够满足实际测量要求.

虽然上述改进电路方案可以提高有效分辨率和有效数字位的利用率，但是该电路中精密电阻仍会带来误差.

引入误差的参量.结合式(1)～式(5)，可得

$$\Delta T = \frac{[(DV_{ref}/kI) \pm (a+b)]}{(0.385 - 10^{-4}c)} \tag{7}$$

式中：a 与 b 分别为 R_c 与 R_t 在 0 ℃下的绝对误差. 由于采用测温精度为 0.15 ℃的铂热电阻，其固定误差约为 0.06.将 a =0.1，b =0.06，c =50 带入式(7)，得

$$\Delta T = (DV_{ref}/0.38kI) \pm 0.4156 \tag{8}$$

对比式(6)，考虑误差后多了 0.415 6 的绝对误差，但该误差属于系统误差，该电路测温示数与现有标准仪器示数进行对比时，可予以消除.

因此，设计一个将绝对温度转换为相对温度的方案，既采用 100 Ω的 R_c 和 R_t 设计串联电路，将两者电压差作为模拟输入，并以 ADC 芯片的内部基准电压为参考电压.以 ΔR 表示 ΔT，ΔV 作为模拟输入表达 ΔR，通过这种办法可解决现有电路中数字信号取值范围利用率低的问题，同时提高了测量温度的有效分辨率，也有利于提高精度.

2 测温系统电路设计

硬件电路主要有温度信号采集电路、电源供电电路、放大电路、滤波电路及 AD 转换电路等.

2.1 温度信号采集电路

利用 Pt100 电阻测温时，需要把温度变化 ΔT 引起的阻值变化 ΔR 转换为电压变化 ΔV，再通过引线传递到 ADC 芯片上进行放大、滤波等处理，最后通过 SPI 传输至温度处理芯片，其中 ADC 芯片为 Pt100 提供激励.温度变化引起 Pt100 的阻值变化，通过测量电阻变化值，可得到温度的变化量.

本设计中使用 ADC 芯片作为内部参考电压源，提供激励电流分别流过 Pt100 和精密电阻，产生一个微弱的信号.信号经过 RC 滤波输入至 ADC 芯片的模拟差分输入端 AIN1(+)和 AIN1(−)，进行放大及 AD 转换，转换完成后的数据通过 ADC 芯片的 DOUT 接口输出.设计完成温度信号采集电路如图 4 所示.

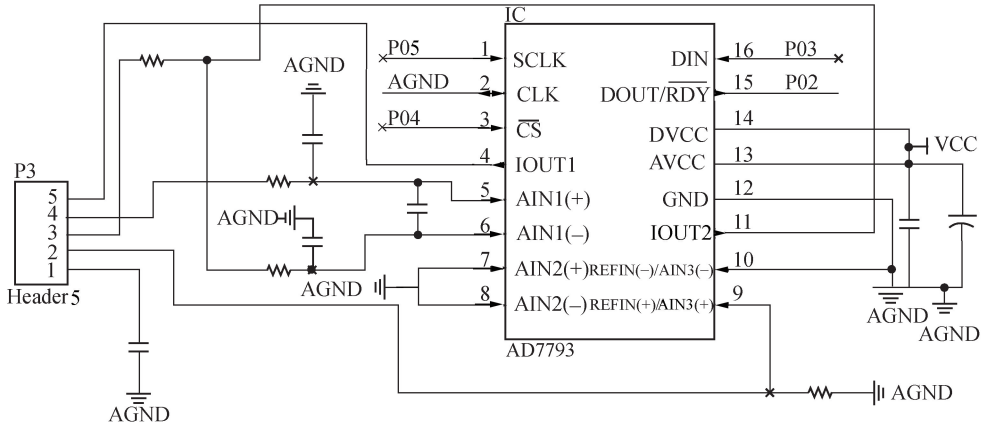


图 4 温度信号采集电路

Fig.4 Circuit of temperature signal acquisition

2.2 电源供电电路

使用电池会导致空间要求增加，考虑在电路中设计电源稳压模块.最后选用 RT8010－33 稳压芯片，输入电压 5 V，额定输出 3.3 V，1 A 的输出电流可完全满足节点需要.其中，电容 C_3 是储能电容，DS1 用于抑制纹波，其他电容的作用是滤波.最后设计完成的电源供电电路如图 5 所示.

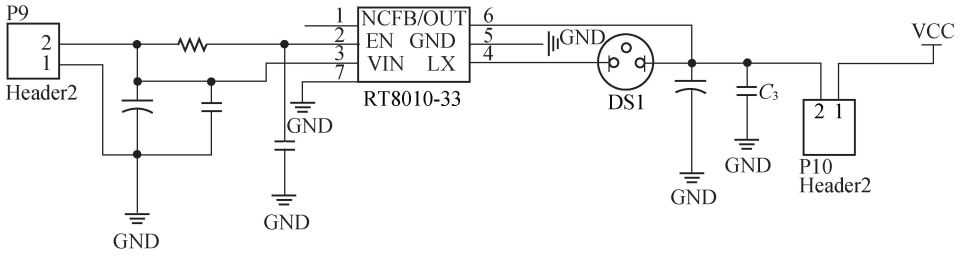


图 5　电源供电电路

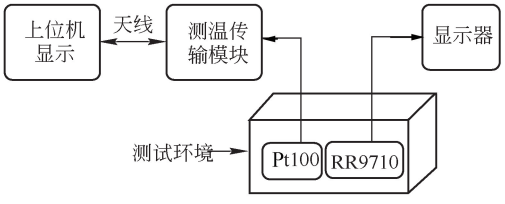
Fig.5　Circuit of power supply

3　温度测量及校准

为了减小系统误差和随机误差,在系统设计完成后,需进行测试及后期数据处理,并利用 RR9710,TD−1 等高精度测温仪来间接标定精度.将测温仪和本系统的温度传感器置于一起,保证两者所测温度为同一值.在 PC 端设计一个 Labview 上位机,用来显示和保存所测温度值.

3.1　基于 RR9710 测温仪的测温实验

本设计中采用了两种温度校准方案,第 1 种使用标准温度计 RR9710,其测温分辨率可以达到 0.01 ℃,测温精度可以达到 0.1 ℃.测试时由于环境所限,只将标准温度计与 Pt100 绑在一起置于自制保温箱中,保证测量不受外界风力和湿度影响.测温环境如图 6 所示.



(a)示意图

(b)实物图

图 6　基于 RR9710 的测试

Fig.6　Tests based on RR9710

测温时,温度变化和时间呈负相关关系,测出 15 ℃～85 ℃之间多组温度数据和 AD 转换后电压,对这些数据最小二乘法拟合,并在同一图上显示出 Pt100 的标准化曲线,如图 7 所示.

使用 Matlab 进行线性拟合得出函数如下

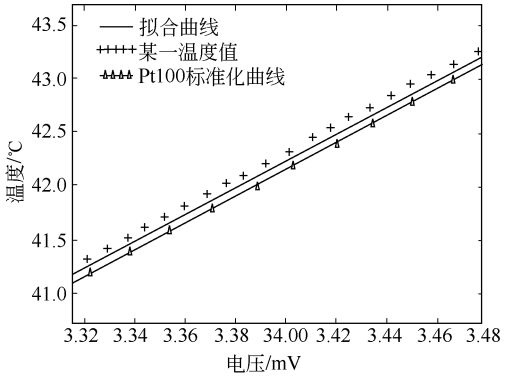


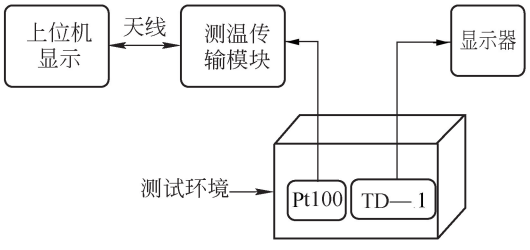
图 7　基于 RR9710 的拟合曲线

Fig.7　Fitting curves based on RR9710

$$T = -0.5102 + 12.6821\,V - 0.027\,V^2 \quad (9)$$

3.2　基于 TD—1 测温仪的测温实验

为保证测温仪和 Pt100 测温点的温度数据完全吻合来构建恒温环境,并加宽测温范围,使用 TD—1 数字测温仪和 Pt100 在保温杯中进行温度拟合,测试环境如图 8 所示.



(a) 示意图

(b)实物图

图 8　基于 TD—1 测试

Fig.8　Tests based on TD—1

测出 15 ℃～85 ℃之间多组温度数据和 AD 转换后电压，对这些数据最小二乘法拟合，并在同一图上画出 Pt100 的标准化曲线，如图 9 所示.

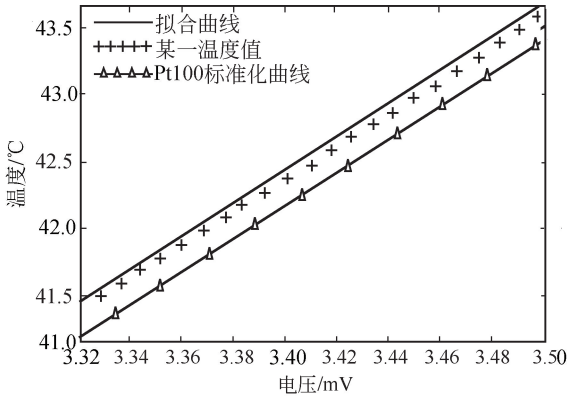


图 9 基于 TD—1 的拟合曲线

Fig.9 Fitting curve based on TD—1

使用 Matlab 进行线性拟合得出函数如下

$$T = -0.4172 + 12.6725\,V - 0.028\,V^2 \quad (10)$$

对比式(9)和式(10)可知：

1)两式常数项相差 0.09 ℃，而一次项和二次项差别很小，说明本设计温度和电压的拟合关系确定，常数项的误差来自于测温表本身的系统误差.

2)除了测温表的系统误差，拟合曲线和标准化曲线存在一定的系统误差，这主要来自于 Pt100 的工艺误差、A/D 芯片的恒流源和恒压源的误差，已通过拟合修正.

在系统误差修正之后，本文设计的主要误差来自于随机误差.为保证采样结果的准确性，在 42 ℃恒温环境下，对采样节点进行短时间多次测量，数据分布和数据概率分布分别如图 10 和图 11 所示，滤波后数据为 42.007 ℃，可知本设计温度数据的随机误差较小，滤波后温度数据较为可靠.

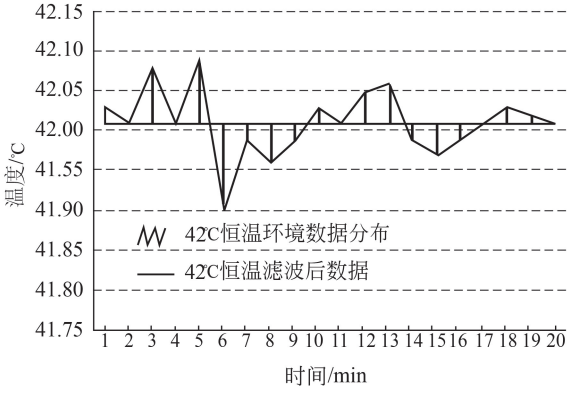


图 10 42 ℃恒温下温度的数据分布

Fig.10 Data distributions of temperature at 42 ℃

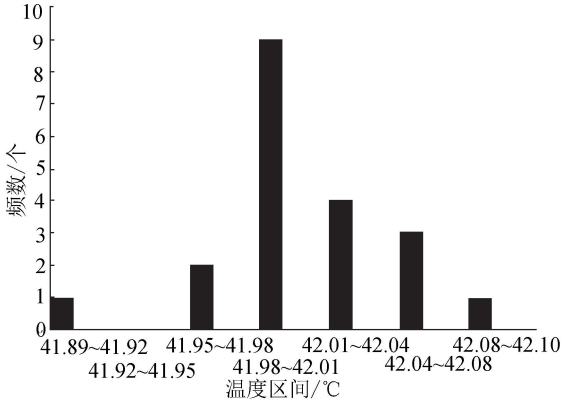


图 11 42 ℃恒温下温度的数据概率分布

Fig.11 Probability distribution temperature at 42 ℃

4 结论

本文作者对比现有高精度测温方案及结合天文测温系统的实际要求，提出了一个新型的电路设计方案.

1)利用给 100 Ω的高精密电阻与铂电阻输入相同的电流，并将二者电压作为模拟输入的电路设计方法，有效解决单臂电桥等电路中数字信号取值范围利用率低的问题，同时提高测量温度的有效分辨率.

2)在上位机中对测得的数据进行拟合，可有效消除随机误差和噪声对测量结果的影响，有利于提高了温度测量精度和稳定度.

3)通过与其他高精度测温仪对比实验，对系统进行标定和实测，并修正了温度电压关系式，得到更符合实际的值.实验表明：此温度测量系统精度较高，能够达到 0.02 ℃.

参考文献(References)：

[1] 贺芝宇，焦宏飞，程鑫彬，等. 基于光子晶体带隙特性的反射式多通道滤光片设计[J]. 光学学报，2014，34(2)：312－318.
HE Zhiyu, JIAO Hongfei, CHENG Xinbin, et al. Design of reflective multichannel filter based on photonic crystal band gap [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 312－318.(in Chinese)

[2] 胡晓青，车延博，薛慧云. 高精度双通道激光器恒流驱动电源设计[J]. 激光杂志，2015，36(7)：8－12.
HU Xiaoqing, CHE Yanbo, XUE Huiyun. Design of high-precision dual-channel constant current driving source for laser diode[J]. Laser Journal, 2015, 36(7): 8－12.(in Chinese)

[3] 胡文涛. 基于无线传感器网络的天文望远镜高精度温度测量方案的研究[D]. 北京：北京交通大学，2014.

HU Wentao. The study of telescopes precision temperature measurement solutions based on wireless sensor networks [D].Beijing :Beijing Jiaotong University,2014.(in Chinese)

[4] 徐哲,刘云峰,董景新. 利用测温电路线性补偿 MEMS 加速度计零偏温漂[J]. 仪表技术与传感器,2015(8):45－47.
XU Zhe, LIU Yunfeng, DONG Jingxin.Linear compensation of zero drift of MEMS accelerometer using temperature measurement circuit [J].Instrument Technique and Sensor,2015(8):45－47.(in Chinese)

[5] 徐莉振,鲍敏. 面向 Pt100 铂电阻的高精度多路测温系统[J]. 机电工程,2013,30(1):65－68.
XU Lizhen, BAO Min.Multichannel high-precision temperature measurement system based on Pt100 platinum resistance [J].Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2013,30(1):65－68.(in Chinese)

[6] 易先军,文小玲,刘翠梅.一种高精度温度测量电路设计[J].仪器仪表用户,2008,15(6):72－73.
YI Xianjun,WEN Xiaoling,LIU Cuimei.A high-precision temperature measurement circuit design[J]. Electronic Instrumentation Customer,2008,15(6):72－73.(in Chinese)

[7] 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.
FANG Yixi, LEI Kaizhuo, QU Jiankang, et al. High-precision temperature measurement system based on PT1000[J]. Electronic Design Engineering, 2010, 18(10): 79－82. (in Chinese)

[8] LIU J, LI Y, ZHAO H. A temperature measurement system based on PT100[C]// International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010:296－298.

[9] 汪定国,王怡平.一种高精度铂电阻测量方法[J].电子测量技术,2012,35(11):104－107.
WANG Dingguo, WANG Yiping.Method of high precision temperature measure based on platinum resistance [J].Electronic Measurement Technology,2012,35(11):104－107.(in Chinese)

[10] 陈桂生,付志勇,朱育红.工业铂热电阻不同检定方法检定结果可信度研究[J].中国测试,2014,40(6):18.
CHEN Guisheng, FU Zhiyong, ZHU Yuhong. Study on credibility of industrial platinum resistance measurement results of different verification methods[J].China Measurement & Test, 2014,40(6):18. (in Chinese)

[11] 朱育红.工业铂电阻精确测温方法[J].中国测试技术,2007,33(4):50－52.
ZHU Yuhong. An accurate measurement method for platinum resistance [J].China Measurement & Test, 2007,33(4):50－52. (in Chinese)