

文章编号 1004-924X(2014)04-0988-08

高精度铂电阻测温系统

胡鹏程*, 时玮泽, 梅健挺

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:普通四线制铂电阻测温系统受恒流源长短期漂移、导线热电动势影响,其测量准确度难以超过 0.1°C 量级。本文分析了一种改进型 4 线制高精度铂电阻测温方法的原理误差,并设计了相应的高精度铂电阻测温系统。采用温度系数小、阻值稳定性好的参考电阻作为铂电阻阻值测量基准,消除了恒流源长期漂移引起的铂电阻测温误差;分别在正、反向恒流激励条件下测量了铂电阻上的电压,利用导线热电动势大小与方向的短期不变性,对得到的两电压量求差以消除导线热电动势的影响;通过半导体致冷器(TEC)控制恒流源温度来减小恒流源的短期电流漂移,进而减小其对铂电阻测温精度的影响;设计了精度高、阶跃响应速度快的分时复用式电压信号采集单元用来高精度地测量铂电阻和参考电阻上电压量的比值。等效实验和校准实验结果表明,高精度铂电阻测温系统的测量稳定性优于 $0.005^{\circ}\text{C}/10\text{ day}$,测量分辨率优于 0.005°C ,测量准确度为 $0.02^{\circ}\text{C}(k=2)$,满足超精密激光干涉测量系统提出的高精度温度测量需求。

关键词:铂电阻;测温系统;参考电阻基准;双向恒流源;电流漂移

中图分类号:TH811.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.0988

High precision Pt-resistance temperature measurement system

HU Peng-cheng*, SHI Wei-ze, MEI Jian-ting

(*Ultra-precision Optoelectronic Instrumentation Engineering Center,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*)

* *Corresponding author, E-mail: hupc@hit.edu.cn*

Abstract: Interfered by factors such as short and long term drifts of a constant current source and the thermal electromotive force of a wire, the measurement accuracy of conventional 4-wire Pt-resistance temperature measurement system is hard to achieve the order of 0.1°C . After analyzing the principle error of an enhanced 4-wire Pt-resistance temperature measurement method, a high precision Pt-resistance temperature measurement system was designed. By using a reference resistance with small temperature coefficient and high stability as the Pt-resistance measurement datum, the temperature measurement error caused by the long term drift of a constant current source was eliminated. At the same time, the short-term drift of the constant current source was suppressed by temperature control using a Thermoelectric Cooler(TEC). For wire thermal electromotive force, it was a great advantage to be short-term invariable. Measured under the positive and negative current conditions, the two voltages on Pt-resistance were subtracted. In this way, the effect of wire thermal electromotive force was eliminated. To realize high precision voltage measurement for Pt-resistance and reference resist-

收稿日期:2013-12-05;修订日期:2014-01-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51105114);教育部博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20102302120006);中国博士后科学基金资助项目(No. 20090450131)

ance, a time-sharing voltage acquisition unit with high precision and quick step response was also designed. Experimental results show that the high precision Pt-resistance temperature measurement system can achieve the stability of $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ day}$, the resolution of $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the accuracy of $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($k=2$). It meets the requirements of high accuracy temperature measurement in ultra-precision laser interferometers.

Key words: Pt-resistance; temperature measurement system; reference resistance; bidirectional constant current source; current drift

1 引言

随着大型超精密加工与装备制造业的发展,迫切需要采用激光干涉仪这一经典手段来解决大尺寸工件的超精密测量问题,其相对测量准确度一般要求高达 $10^{-7}\sim 10^{-8}$,如一等量块的检定不确定度要求已提高到 $\pm 0.2\text{ }\mu\text{m}/\text{m}^{[1-2]}$ 。然而,在实际测量现场,测量环境和被测件的温度变化严重影响了激光干涉仪的测量精度。以激光干涉仪测量金属工件几何尺寸为例,在测量过程中环境温度变化将引起空气折射率变化和工件线膨胀,随之带来的相对测量误差分别高达 10^{-6} 和 $10^{-5}/^{\circ}\text{C}^{[3]}$ 。为此,超精密激光干涉测量系统中必须对环境温度和工件温度进行准确度高达 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 量级的温度测量,并进行相应的环境温度控制、空气折射率补偿和工件线膨胀补偿^[4]。

然而,目前在 Agilent 5530、Renishaw XL80 等典型激光干涉测量设备中,出于技术难度、仪器体积和应用成本的考虑,一般仅仅配置由热敏电阻或集成型数字测温芯片构成的测温探头,其测量精度只能达到 $0.1\sim 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,无法满足超精密级激光干涉测量的需求^[5]。与热敏电阻、集成型数字测温芯片等温敏元件相比,铂电阻具有测温范围宽、线性度好、稳定性高、结构简单等优点,已被国际温度标准 IST-90 推荐为插值温度标准。然而,铂电阻的相对温度灵敏度极低,其测温精度易受导线电阻、热电动势、电压测量误差等因素影响,高精度的铂电阻测温系统结构复杂、实现困难且价格昂贵。

针对超精密加工装备和超精密测量装备对高精度温度测量的迫切需求^[6],本文对一种基于高精度参考电阻和双向激励恒流源的高精度铂电阻测温原理进行了研究,分析了各项测温误差源,并据此设计、实现了一种满足超精密激光干涉测量

需求的高精度铂电阻测温系统。

2 高精度铂电阻测温原理

铂电阻是中低温区常用的测温元件,它利用铂金属丝在温度变化时其电阻随之发生变化的特性来测量温度。由于铂材料的物理化学性能很稳定,因此铂电阻具有很高的稳定性,是一种理想的精密测温元件。铂电阻的阻值和温度之间具有以下关系:

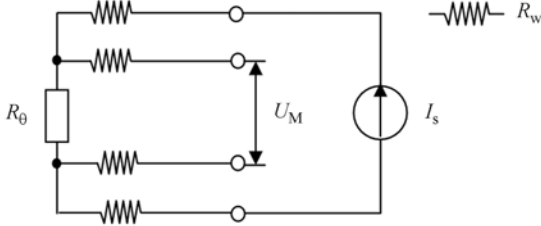
$$R_{\theta} = R_0 [1 + A\theta - B\theta^2 - C\theta^3(\theta - 100)], \quad (1)$$

其中: R_0 为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时铂电阻的阻值, R_{θ} 为 $\theta\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时铂电阻的阻值, A 、 B 、 C 分别为 1、2、3 阶温度系数。在 $0\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,根据 IST 标准设计的铂电阻其阻值 R_0 通常有 25、50、100 和 1 000 Ω 等,而铂电阻的常见温度系数 A 、 B 、 C 分别为: $3.908\ 02\times 10^{-3}$ 、 $5.801\ 95\times 10^{-7}$ 和 $4.273\ 51\times 10^{-12}$ 。

由于铂电阻阻值小、温度系数低,在远程测量中其测温精度易受导线电阻、接触电阻等附加电阻 R_w 影响。高精度铂电阻测温系统中,常采用开尔文电路即四线制方法来消除导线电阻的影响^[7]。普通四线制铂电阻测温原理如图 1(a) 所示,铂电阻两端引出 4 根导线可分为两组,其中一组导线连接测量端的恒流源并为铂电阻提供恒流激励 I_s ,另一组导线则将恒流激励作用下铂电阻两端产生的电势差传输给远端的电压采集单元。由于电压采集单元的内阻远大于导线电阻,故导线电阻对铂电阻测温结果的影响可忽略不计。然而如图 1(b) 所示,开尔文电桥式铂电阻测温系统还受到恒流激励源误差 ΔI_s 、热电动势 E_0 和电压测量误差 ΔU_M 的影响,其中 ΔI_s 主要表现为恒流源的长、短期电流漂移, E_0 包括各种导线材料之间的接触电势以及远程传输导线上各点温度不均引起的温差电势。此时温度测量误差可表示为:

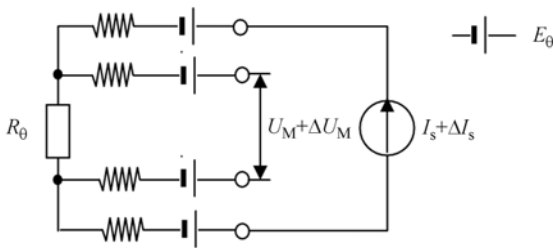
$$\Delta\theta_{t,E,U} \approx \frac{1}{A} \frac{\Delta I_s}{I_s} + \frac{1}{A} \frac{E_\theta}{I_s R_\theta} + \frac{1}{A} \frac{\Delta U_M}{U_M}. \quad (2)$$

然而,在实际测量中常采用的毫安级小型恒流源模块,其电流长期相对漂移高达 $(0.5 \sim 1) \times 10^{-3}$,且在远程传输线中热电动势可达到数毫伏^[8],两者引起的测温误差超过 0.1°C ,无法满足超精密激光干涉测量提出的材料温度测量需求。



(a) 测量原理

(a) Schematic for measurement



(b) 测量误差

(b) Measurement error

图 1 普通四线制铂电阻测温系统测量原理与测量误差示意图

Fig. 1 Schematic and measurement error of conventional 4-wire Pt-resistance temperature measurement system

为消除恒流源长期稳定性、热电动势等对温度测量系统造成的影响,采用了如图 2 所示的改进型四线制铂电阻测温方法^[9]。该方法首先引入一个与铂电阻串联的高精度参考电阻,其与铂电阻具有完全相同的激励电流;同时将单向恒流激励源改进为双向恒流激励源,当电流方向相反时可在铂电阻、参考电阻两端获得大小相等、方向相反的激励电压;此外,采用同一电压测量单元对铂电阻和参考电阻上的电势差进行测量,以提高电势差测量的一致性。

测温系统工作流程如下:首先,控制恒流激励源方向为正,分别在 t_1 、 t_2 时刻测出铂电阻和参考电阻上的电势差 U_{M+} 和 U_{R+} 。设电压测量单

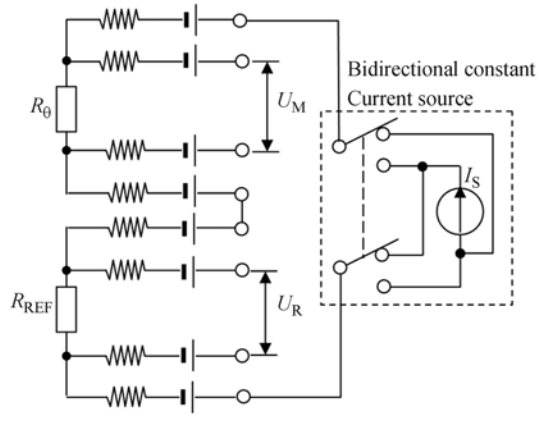


图 2 改进型四线制铂电阻测温系统原理图

Fig. 2 Schematic of enhanced 4-wire Pt-resistance temperature measurement system

元灵敏度误差为 α ,零点误差为 ΔU_0 ,而测量非线性、电压分辨力和采集噪声等引起的电压测量误差为 ΔU^* ,在 t_1 、 t_2 时刻分别测得铂电阻和参考电阻上的电势差为:

$$\begin{cases} U_{M+} = (1 + \alpha) [I_s \times R_\theta + E_\theta] + \Delta U_0 + \Delta U^* \\ U_{R+} = (1 + \alpha) [I_s \times R_{REF} + E_\theta] + \Delta U_0 + \Delta U^* \end{cases} \quad (3)$$

接着,控制恒流激励源方向为负,分别在 t_3 、 t_4 时刻测得铂电阻和参考电阻上的电势差:

$$\begin{cases} U_{M-} = (1 + \alpha) [-I_s \times R_\theta + E_\theta] + \Delta U_0 + \Delta U^* \\ U_{R-} = (1 + \alpha) [-I_s \times R_{REF} + E_\theta] + \Delta U_0 + \Delta U^* \end{cases}, \quad (4)$$

则铂电阻的阻值可表示为:

$$R_\theta = R_{REF} \times \frac{U_{M+} - U_{M-}}{U_{R+} - U_{R-}}, \quad (5)$$

根据式(3)~(5),铂电阻测温误差可表示为:

$$\Delta\theta \approx \frac{1}{A} \left(\frac{\Delta R_{REF}}{R_{REF}} + \frac{\Delta I_s^*}{I_s} + \frac{\Delta U^*}{U} \right), \quad (6)$$

其中: ΔR_{REF} 为参考电阻的阻值误差,主要包括标称值偏差、温度漂移和老化漂移; ΔI_s^* 为激励电流源在 $t_1 \sim t_4$ 时间内的短期电流漂移。

比较式(2)和式(6)可知,改进型四线制铂电阻测温方法可消除恒流源长期漂移、温差电势以及电压测量中零点误差、灵敏度误差等引起的测温误差,其测温精度仅取决于参考电阻准确度 $\Delta R_{REF}/R_{REF}$ 、恒流源短期稳定度 $\Delta I_s^*/I_s$ 以及电压测量误差中的 $\Delta U^*/U$ 。同时根据式(6),在 0.01°C 量级高精度测温系统中, $\Delta R_{REF}/R_{REF}$ 、 $\Delta I_s^*/I_s$ 和 $\Delta U^*/U$ 这三个相对误差指标均应优于 2×10^{-5} 。为此,这里一方面采用具有超精密、

超低温漂特性的 Vishay 金属膜电阻作为参考电阻将 $\Delta R_{REF}/R_{REF}$ 控制在 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 以内;另一方面,分别通过下文所述恒流源稳流技术、高精度信号调理与采集技术来提高恒流源的短期相对稳定性 $\Delta I_s^*/I_s$ 和电压相对测量精度 $\Delta U^*/U$ 。

3 基于 TEC 控温的高稳定性恒流源

高精度铂电阻测温系统要求恒流源的短期相对稳定性优于 2×10^{-5} ,超出了普通小型恒流源模块的稳定能力。鉴于电子器件的热漂移是恒流源模块产生电流漂移,特别是短期电流漂移的主要因素,这里利用 TEC 控制恒流源模块的温度来提高短期电流稳定性。

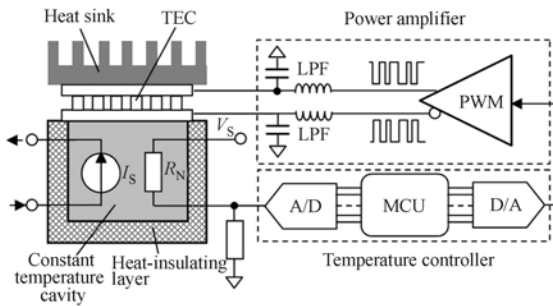


图 3 用于提高恒流源短期稳定性的温度控制系统原理图

Fig. 3 Temperature control system to enhance current stability of constant current source

图 3 所示为基于 TEC 控温的恒流源稳流控制系统原理:将 0.5 mA 恒流源模块置于铝制恒温腔中,恒流源模块和恒温腔之间采用导热胶黏结并填充有 Al_2O_3 粉末,以保证二者的温度一致性;在恒温腔中嵌入负温度系数热敏电阻 R_N ,以实时测量恒温腔的温度;采用聚氨酯保温泡沫制作的隔热层来阻断恒温腔与外界大气环境的自发性热交换,并通过半导体制冷器 TEC 实现恒温腔与外界散热片之间的可控性热交换;温度控制器采集 R_N 传递的恒温腔温度信号 θ_{CAV} 并求得其与设定温度 θ_{SET} 的差值,进而根据相关控制算法,驱动功率放大器输出脉宽调制信号(PWM)来调节 TEC 中的电流方向和电流值大小,从而实现恒温腔和恒流源模块的温度控制,最终将其温度锁定为 θ_{SET} 。需要指出的是,考虑到恒温腔温度控制和测量的最终目标温度为恒定值,因此尽管 R_N 具有很强的非线性,但鉴于其灵敏度高、稳定性好

且信号变换形式简单而被用于测量恒温腔的温度。

根据 TEC 控温的相关研究^[10],此类温度控制系统中的广义被控对象可简化为一阶大惯性加纯滞后环节:

$$G(s) = k_p \times \exp(-t_D s) / (1 + t_p s), \quad (7)$$

其中: k_p 为比例增益系数, t_p 是惯性时间常数, t_D 为滞后时间常数。

针对被控对象的工作特性,采用 PFC 算法控制恒温腔的温度;在 k 时刻首先根据被控对象传递函数和基函数递推出控制对象的预测模型,得到 p 步后的预测输出 $y_m(k+p)$;然后,利用当前时刻的实际输出 $y(k)$ 和预测输出 $y_m(k)$ 的误差来修正 p 步后的预测输出值;最后,将修正后的预测输出值和预设温度变化参考轨迹 $c(k+p)$ 同时输入单步优化器进行优化求解,得出当前输出值 $u(k)$ 进行反馈控制。 $u(k)$ 可表示为:

$$u(k) = \frac{c(k+p) - \beta^p c(k) - y(k)(1-\beta)}{k_p} + \frac{y_m(k)}{k_p}, \quad (8)$$

其中: $\beta = \exp(-t_s/t_r)$, t_s 为采样周期, t_r 为参考轨迹的时间常数。

图 4 所示为 TEC 控温前后恒温腔的温度变化以及此过程中恒流源电流漂移的典型实验数据曲线。在 0~15 min 时间段,未控温的恒流源温度漂移高达 $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$,此时电流源短期漂移最大值为 16.6 nA/min ;从 15 min 开始将恒流源置于恒温腔内,启动温度控制系统对恒温腔进行温度控制;从第 20 min 开始,恒温腔的温度被锁定在 $(20 \pm 0.02) \text{ }^\circ\text{C}$ 内,恒温腔中恒流源的短期电流漂移

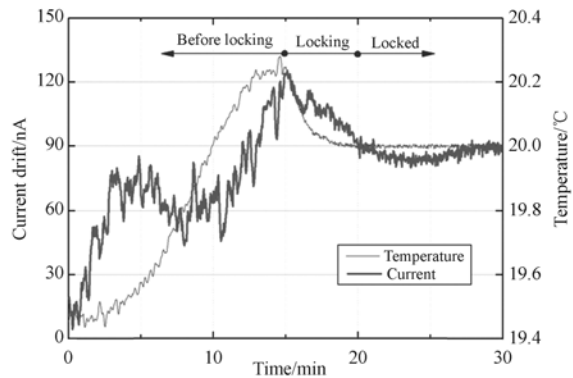


图 4 温度控制前后恒流源的电流漂移

Fig. 4 Current drifts of DC source before and after temperature lockings

降低为 4.7 nA/min, 电流源稳定性由 $3.3 \times 10^{-5}/\text{min}$ 提高至 $0.94 \times 10^{-5}/\text{min}$ 。

4 分时复用式高精度电压测量单元

由高精度铂电阻测温原理可知, 铂电阻阻值测量中需采用同一电压测量模块对铂电阻和参考电阻在正反向电流激励时产生的 4 个直流电压值分别测量。该电压测量模块需同时满足以下两个要求: (1) 相对测量精度高, 根据式(6), 其测量非线性、有效分辨力和采集噪声等引起的相对测量误差低于 2×10^{-5} ; (2) 阶跃响应特性好, 对电压测量单元而言, 相互切换的 4 个直流电压信号可视为系列阶跃输入信号, 为提高测量精度和测量速度, 要求电压测量模块具有较短的阶跃响应时间。

分时复用式高精度电压测量模块工作原理如图 5 所示, 包括分时切换、信号放大、低通滤波、模数转换以及微处理器 MPU 等单元。其中, 分时切换单元采用双刀双掷式信号继电器来构建, 以避免普通模拟开关带来的漏电流和附加噪声。该信号继电器绝缘电阻可达到数吉欧姆, 而开关时间仅为数毫秒, 完全可以满足切换速度和阻抗需求。

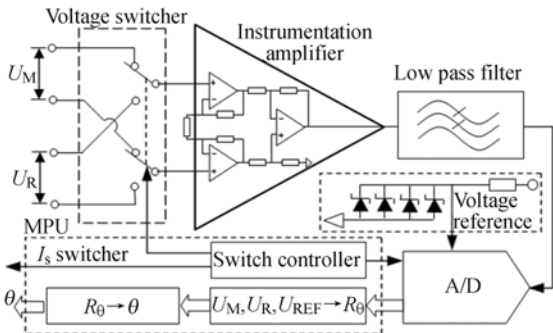


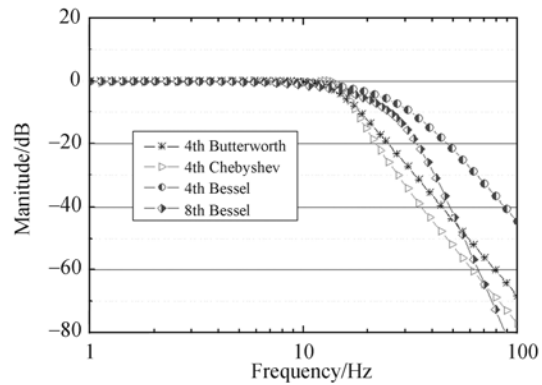
图 5 分时复用式电压信号调理与测量原理图

Fig. 5 Scheme of processing and measurement for time division multiplexing voltage signal

由于铂电阻测温电路工作在直流状态, 部分低频段的噪声将通过容性耦合等形式变成共模干扰, 并且考虑到铂电阻的输出阻抗大于 $1 \text{ k}\Omega$, 信号调理中首先采用仪用运算放大器来抑制共模干扰、放大电压信号并实现阻抗变换。与普通运算放大器相比, 仪用运算放大器具有很高的共模抑制比, 可将微弱差模信号从共模噪声中精密地分

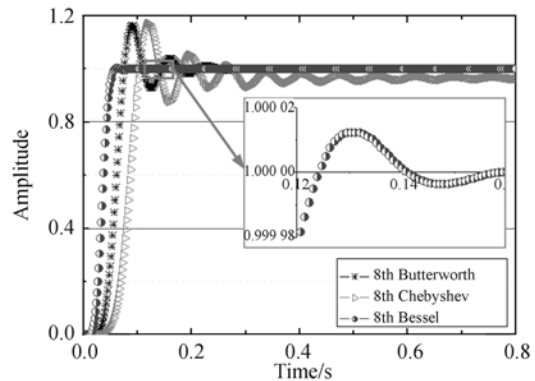
离出来; 而与高共模抑制比差分运算放大器相比, 仪用运算放大器具有更高的输入阻抗。本文采用的 AD620 型仪用放大器其共模抑制比为 100 dB, 输入阻抗为 $10 \text{ G}\Omega$, 建立时间小于 $100 \mu\text{s}$, 且典型非线性为 1×10^{-5} , 可满足铂电阻测温信号放大的精度和速度需求。此外, AD620 中采用温度系数仅为 2×10^{-6} 的超低温漂电阻来设定其放大倍数, 可有效提高放大电路的增益稳定性。

为进一步减小被测直流电压信号中存在的 50 Hz 及以上频率的差模噪声, 采用低通滤波器对放大后的信号进一步滤波。在常用的 Chebyshev、Butterworth、Bessel 低通滤波器中, Bessel 在阻带内的衰减能力最低, 但 Bessel 滤波器具有更快的阶跃响应速度, 在信号切换后可更快地达到信号稳定, 进行温度测量。权衡测温精度和测温速度, 采用截止频率为 14 Hz 的 8 阶



(a) 幅频特性

(a) Magnitude-frequency characters



(b) 单位阶跃响应

(b) Unit-step responses

图 6 Bessel 滤波器的幅频特性与阶跃响应特性

Fig. 6 Magnitude-frequency characters and step responses of Bessel and other filters

Bessel 低通滤波器。8 阶 Bessel 低通滤波器可有效提高阻带衰减速度,其在 50 Hz 处的衰减可达到 -42 dB。同时如图 6 所示,8 阶 Bessel 低通滤波器的阶跃响应速度要远快于同阶 Butterworth、Chebyshev 滤波器,在 0.15 s 之内幅值稳定性可达到 5×10^{-6} 。

模数转换单元采用 $\Sigma-\Delta$ 型模数转换器 AD7734,其标称分辨率为 24 位,典型非线性为 1×10^{-5} 。设计中还将 4 个高精度电压基准源并联、为 AD7734 提供基准电压,以降低电压基准的随机噪声、提高模数转换单元的测量稳定性。实际测试结果表明:在 ± 10 V 的测量范围内,该模数转换单元的测量稳定性可达 ± 0.03 mV/10 min。

微处理器 MPU 的作用包括:控制恒流源作周期为 0.8 s 的电流方向切换;控制分时切换元作周期为 0.2 s 的电压采集切换;控制 AD620 进行电压信号采集;处理采集的电压信号,求解铂电阻阻值;通过多项式拟合 $R_t-\theta$ 之间的关系,并将当前被测温度下测得的铂电阻阻值转换为对应的温度值。

5 实验与分析

鉴于实验室条件下难以获得高稳定性、高分辨力的温度信号发生装置,本文首先通过等效实验来考察铂电阻测温系统的测量稳定性和有效分辨率;铂电阻测温系统的测量准确度受铂电阻元件参数误差的限制,需通过校准实验精确标定铂电阻元件的温度-阻值关系,以通过多项式精确拟合阻值-温度关系;最后通过校准实验,考察铂电阻测温系统的测量准确性。

5.1 测量稳定性、分辨率等效实验

采用温漂系数为 $2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、年漂移为 5×10^{-6} 的高稳定电阻模拟恒温条件下的铂电阻,进行测温稳定性等效实验。在为期 10 d、每天连续 1 h 的测试中,同时考察了普通四线制、改进型四线制铂电阻测温系统的示值稳定性。实验结果如图 7 所示:普通四线制铂电阻测温系统在 1 h 内的漂移大于 0.04 $^\circ\text{C}$,在 10 d 内的测量漂移高达 0.1 $^\circ\text{C}$;在对恒流源采取温度控制前,改进型四线制铂电阻测温电路在 1 h 内和在 10 d 内的测量漂移基本相同,约为 0.02 $^\circ\text{C}$;在对恒流源进行温

度控制后,改进型四线制铂电阻测温电路在 1 h 内和在 10 d 内的示值漂移均小于 0.005 $^\circ\text{C}$ 。测量稳定性实验表明:与采用恒流源作为铂电阻测量基准的普通四线制铂电阻测温系统相比,改进型四线制铂电阻测温系统采用稳定性更高的参考电阻作铂电阻测量基准,可以提高系统测量稳定性;对恒流源进行温度控制、减小其短期漂移后,改进型四线制铂电阻测温系统的测量稳定性得到了进一步提高。

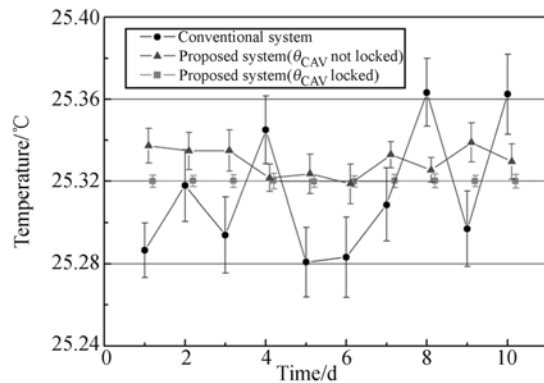


图 7 温度测量系统稳定性测试数据

Fig. 7 Stability test of temperature measurement system

利用 ZX74A 型直流开关电阻箱模拟高分辨力温度发生器,以等效测试高精度铂电阻测温系统的测量分辨率。ZX74A 的最小阻值步进为 0.001 Ω ,可模拟出 0.00025 $^\circ\text{C}$ 的最小温度步进。通过多次测量分析,确认高精度铂电阻测温系统的有效分辨率优于 0.005 $^\circ\text{C}$ 。图 8 为 0.005 $^\circ\text{C}$ 等效温度步进的测量实验,可以看出,建立的系统可有效分辨出 0.005 $^\circ\text{C}$ 的温度变化。

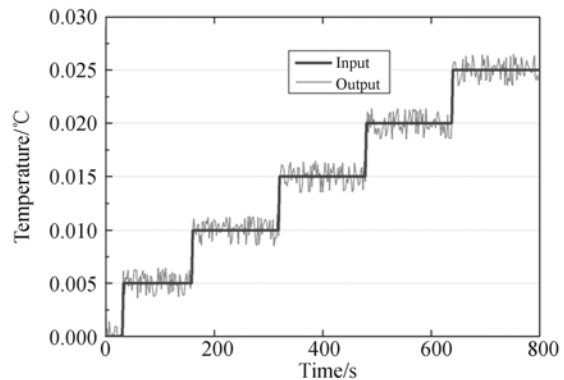


图 8 温度测量系统的分辨率测试

Fig. 8 Resolution test of temperature measurement system

5.2 铂电阻标定与测温系统校准

采用 1/3B 级 Pt1000 薄膜铂电阻制作了体积仅为 15 mm×3 mm×5 mm 的小型铂电阻探头。经标定,该铂电阻探头阻值与温度之间的函数关系为:

$$\theta = -0.766\ 25 + 0.262\ 24 \times R_0 - 1.333\ 11 \times 10^{-5} \times R_0^2 \quad (9)$$

将该三次多项式系数固化在 MPU 内,可实现阻值到温度的精确转换输出,最终研制出高精度温度测量系统 UOI-TS003。

表 1 UOI-TS003 校准数据表

Tab. 1 Calibration data of UOI-TS003 (°C)

Temperature set	Real temperature	Measured value
10	9.974	9.954
15	14.992	14.979
20	19.982	19.969
25	24.974	24.959
30	30.009	29.996

在黑龙江省测试院对高精度测温系统 UOI-TS003 进行校准检定,获得如表 1 所示的温度测试点校准数据。表 1 中第一行温度数据为温度校准炉的设定温度值;第二行温度数据为利用二等标准铂电阻杆与 Fluke1950 超级电阻温度计测得的温度值,作为实际温度值;第三行温度数据为

UOI-TS003 测得的温度值。根据校准结果分析,可知 UOI-TS003 铂电阻测温系统的测量不确定度为 0.02 °C ($k=2$)。

需要指出的是,对测温系统工作原理、设计实现过程分析可知,本测温系统的测量精度目前主要受铂电阻温度-阻值关系标定误差的影响,如能进一步提高铂电阻温度-阻值关系的标定精度,则整个铂电阻测温系统的测量不确定度有望优于 0.01 °C。

6 结 论

本文在分析改进型四线制铂电阻测温系统测量误差的基础上,采用 TEC 控温方法来提高恒流源的短期电流稳定性,并采用分时复用式高精度电压信号调理与采集技术来减小电压测量误差,设计并实现了高精度铂电阻测温电路。实验结果表明,设计的高精度铂电阻测温系统在 10~30 °C 内的测量准确度优于 0.02 °C ($k=2$),符合超精密激光干涉测量系统提出的温度测量需求。

本文为激光干涉测量中的空气、材料温度测量与补偿提供了一种低成本、高精度解决方案。当然,通过实验分析可知,该系统可通过更加精确的铂电阻标定来提高系统测温精度,也可在下一步工作中引入多通道铂电阻切换测量技术,以满足大尺寸测量应用中存在的多点测温需求。

参考文献:

- [1] FEIGE V K S, BALK L J. Calibration of a scanning probe microscope by the use of an interference-holographic position measurement system [J]. *Meas. Sci. Tech.*, 2003, 14:1032-1039.
- [2] 贾方秀,丁振良. 激光测距仪的脉冲电流供电温度控制系统[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9):2128-2135.
- [3] 胡鹏程,谭久彬,闫磊,等. 一种基于温度轨迹控制的塞曼稳频激光器预热方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6):91-95.
- [4] 张福民,曲兴华,叶声华. 面向对象的大尺寸测量不确定度分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11):2239-2243.
- [5] HIETA T, MERIMAA M, VAINIO M, et al.. High-precision diode-laser-based temperature measurement for air refractive index compensation [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(31):5990-5998.
- [6] DOROZHOVETS N V, HAUSOTTE T, MANSKE E, et al.. Novel control scheme for a high-speed metrological scanning probe microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6):91-95. (in Chinese)
- [7] ZHANG F M, QU X H, YE SH H. Uncertainty estimation of large-scale measurement for special fitting task [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2239-2243. (in Chinese)
- [8] JIA F X, DING ZH L. Temperature control system supplied by pulse-drive current for laser range finder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2128-2135. (in Chinese)

method for frequency stabilized Zeeman He-Ne laser based on temperature trajectory control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6):91-95. (in Chinese)

- Meas. Sci. Technol.*, 2011, 22: 094012.
- [7] 胡鸿志. 基于新型温度传感器的数字温度计设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(8):741-744.
HU H Z. Design of digital thermometer based on novel temperature sensor [J]. Thermal-resistor temperature measuring device based on current method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument.* 2011, 25(8):741-744. (in Chinese)
- [8] 金伟正. 实用四线制 PT100 测温电路研究[J]. 电子测量技术, 2000, 2:27-28.
JIN W ZH. The new kind of 4-wire temperature measure circuit using Pt100 [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2000, 2:27-28. (in Chinese)
- [9] 张培. 精密温度测量系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
ZHANG P. *Research on precise temperature measurement system* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [10] 张瑜, 张升伟. 基于铂电阻传感器的高精度温度检测系统设计 [J]. 传感技术学报, 2010, 23(3): 311-314.
ZHANG Y, ZHANG SH W. A design of high accurate temperature measuring system based on platinum resistance transducers [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(3): 311-314. (in Chinese)

作者简介:



胡鹏程(1979—),男,江苏东台人,博士,副教授。2001年、2003年、2008年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事快速超精密激光干涉测量技术与仪器工程、精密激光测距技术研究。E-mail: hupc@hit.edu.cn



时玮泽(1987—),男,山东德州人,硕士研究生。2011年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要研究方向为超高精度信号采集与超精密温度测量。E-mail: shiweize.ok@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)