

引用本文:马霄汉,李岩峰,邵海颖,等.用于热电偶动态校准系统的比色测温装置研究[J].光通信技术,2026,50(3):65-70.

用于热电偶动态校准系统的比色测温装置研究

马霄汉,李岩峰,邵海颖,陈刚,李佳*,褚越强

(北华航天工业学院 电子与控制工程学院,河北 廊坊 065000)

摘要:针对基于激光器的热电偶动态校准系统中单色红外测温法易受表面发射率影响、需预标定不同热电偶发射率的局限,设计了一种用于热电偶动态校准系统的比色测温装置。阐述了双波长辐射比值测温原理,优化选取了1 483 nm和1 600 nm工作波长及滤光片带宽,并开展了静态标定与动态响应实验。实验结果表明:该装置在600 ℃以上测量相对误差低于1%,响应时间小于2 μs,满足瞬态测温需求。将该装置应用于热电偶动态校准系统,成功获取了激光加热下热电偶表面激励温度变化曲线,验证了其在实际校准中的有效性与可靠性。

关键词:热电偶;动态校准;比色测温;波长选取;静态标定

中图分类号:TN21 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2026)03-0065-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.03.011

Research on a colorimetric temperature measurement device for thermocouple dynamic calibration system

MA Xiaohan, LI Yanfeng, SHAO Haiying, CHEN Gang, LI Jia*, CHU Yueqiang

(School of Electronic and Control Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: To overcome the limitation that monochromatic infrared thermometry in laser-based thermocouple dynamic calibration systems is susceptible to surface emissivity and requires pre-calibration for different thermocouples, a colorimetric temperature measurement device for thermocouple dynamic calibration systems is designed. The principle of dual-wavelength radiation ratio thermometry is described, and the optimal operating wavelengths of 1 483 nm and 1 600 nm together with the corresponding filter bandwidths are determined through optimization. Static calibration and dynamic response experiments are carried out. Experimental results show that the relative measurement error of the device is below 1% for temperatures above 600 ℃, and the response time is less than 2 μs, satisfying the requirements for transient temperature measurement. The device is applied to the thermocouple dynamic calibration system, and the excitation temperature evolution on the thermocouple surface under laser heating is successfully obtained, validating its effectiveness and reliability in practical calibration scenarios.

Key words: thermocouple, dynamic calibration, colorimetric temperature measurement, wavelength choice, static calibration

0 引言

热电偶传感器作为一种接触式传感器,广泛应用

收稿日期:2025-04-01。

基金项目:国家自然科学基金项目(62341114)资助;北华航天工业学院科研创新项目(YKY-2023-19)资助;2022年河北省高等学校科学研究项目(ZC2022006)资助。

作者简介:马霄汉(2001—),男,河北邯郸人,硕士,主要研究方向为嵌入式系统、动态测试与校准技术。参与国家自然科学基金项目“比色测温装置研制”及军委装备发展部“火工品输出性能动态测试项目—薄膜热电偶动态校准”相关研究。

***通信作者:**李佳(1981—),男,河北廊坊人,硕士,讲师,主要研究方向为微弱信号采集处理技术、无源无线温度测量技术等。



于极端环境下的瞬态高温测量。由于传感器与被测对象之间存在换热过程,其热惯性会引入动态测量误差。为掌握热电偶的动态特性,在实际应用于动态温度测量之前,需对其进行动态校准。常用的动态校准设备包括恒温水油槽、热风洞、激波管及激光器等。基于激光器的热电偶动态校准系统利用激光快速加热的特性,在热电偶表面施加温度激励。采用辐射测温法获取激励温度作为参考真值,对热电偶进行校准。通过建立热电偶的动态模型,分析其动态特性,获得相关的动态性能参数^[1-2]。

热电偶激励温度的测量精度是决定动态校准结果可靠性的关键因素。然而,现有激光动态校准系统

马霄汉,李岩峰,邵海颖,等:用于热电偶动态校准系统的比色测温装置研究

普遍采用的单色辐射测温法严重依赖被测表面发射率参数,难以消除发射率变化引入的系统误差。相比之下,比色测温法基于两波长辐射比值进行温度测量,受被测物体发射率影响较小。在合理选择工作波长的前提下,该方法可显著减小由发射率变化及中间介质吸收所引起的测量误差。国内外学者在比色测温领域已取得系列进展^[3-4]:高温瞬态测量(800~3 000 °C)多采用遥测法,但低温段精度不足;中低温段依赖制冷型探测器与窄带滤光片,存在成本高、系统复杂等问题;基于彩色电荷耦合器件(CCD)的多维测温方案则受限于光谱响应范围,工作波长选择灵活性较差。上述方法在本系统所面向的激光加热热电偶动态校准场景中均存在适用性局限。因此,针对特定应用场景优化波长选取与装置结构,仍是提升比色测温性能的关键途径。

综上所述,比色测温装置的性能高度依赖于工作波长的优选与结构设计的适配性。鉴于此,针对基于激光器的热电偶动态校准系统中激励温度测量的特殊需求,本文研制一种用于热电偶动态校准系统的比色测温装置。通过系统优化滤光片波长参数、构建高精度标定模型及量化评估动态响应特性,突破现有技术在测温范围、精度及可靠性方面的局限。

1 比色测温原理与装置研制

1.1 比色测温原理

普朗克定律构成了红外辐射测温的理论基石,单色测温、全辐射测温与比色测温均属于基于该定律的非接触式测温方法。由于被测物体表面发射率的时变性与不确定性会显著影响测温精度,比色测温法通过双波段辐射强度比值运算,在合理选取工作波长的前提下,可有效抵消发射率项的耦合影响,从而提升红外测温的准确度与适应性。

当比色双波长 λ_1 和 λ_2 均小于2 200 nm,且黑体辐射温度低于1 200 °C时,普朗克定律中的指数项起主导作用,可采用维恩公式进行简化计算。在此条件下,两波长的光谱辐射出射度比值 $R(T)$ 如式(1)所示。

$$R(T) = \frac{M(\lambda_1, T)}{M(\lambda_2, T)} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \exp \left(\frac{C_2}{\lambda_2 T} - \frac{C_2}{\lambda_1 T} \right) \quad (1)$$

式中: T 为温度, $M(\lambda_1, T)$ 和 $M(\lambda_2, T)$ 为黑体的辐射功率, ε_{λ_1} 和 ε_{λ_2} 为黑体在 λ_1 、 λ_2 这2个工作波长下对应的发射率, C_2 为第二辐射常数。

在实际工程应用中,若假设被测物体在双波长 λ_1 和 λ_2 处的光谱发射率近似相等($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$),式(1)中的发射率项可消去。此时,通过比值 $R(T)$,可直接反演温度 T_s 为

$$T_s = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln R(T) + 5 \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad (2)$$

比色测温法采用辐射能量比值与温度关系的原理进行测温,由于在一定程度上消除了发射率的影响,因此具有较高的测量精度。但在实际应用中,还需考虑比色测温装置参数的影响,比如探测器光谱响应度、滤光片带宽等。

1.2 装置结构设计

基于普朗克黑体辐射定律,被测物体在双波长处的光谱辐射出射度比值 $R(T)$ 是温度 T 的单值函数。当被测体为黑体或灰体时,双波长辐射功率的比值可消除发射率,从而有效削弱了发射率不确定性对测温精度的影响。

基于上述原理,本文设计的比色测温装置结构如图1所示。该装置主要由聚焦透镜、分叉光纤、准直器、滤光片、铟镓砷探测器及数据采集处理系统组成。其中,聚焦透镜作为装置的光学窗口,用于将热辐射汇聚至光纤端面;分叉光纤将汇聚后的辐射能量等分为2路,分别传输至不同的工作波长路径;每路光信号依次经准直器准直、滤光片波长筛选后,由铟镓砷探测器转换为电信号;最终由数据采集处理系统同步采集2路信号并进行分析处理。

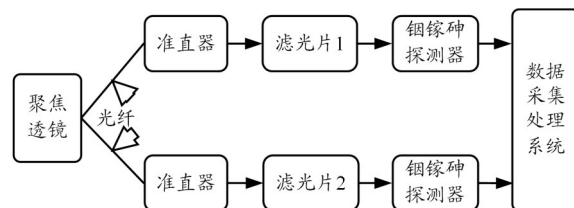


图1 比色测温装置结构框图

装置中,近红外分叉多模光纤的工作波段为400~2 200 nm,耦合比为50:50,可将目标热辐射能量等分为2路传输。窄带干涉滤光片基于多层介质膜干涉原理实现光谱选择性透过,但当入射光偏离法线方向时,滤光片中心波长将发生蓝移,透射谱线展宽且峰值透过率下降,导致两通道光谱响应失配,进而引入比色测温误差^[5-6]。为此,本文在光纤与滤光片间加入准直器,该准直器可将光纤出射端具有一定发散角的

辐射光转换为发散角约为 0.055° 的近平行光,有效抑制斜入射引起的光谱漂移。本装置选用美国Thorlabs公司的PDA10CS-EC型钢镓砷探测器作为光/电转换器件,其探测波长范围为900~1 700 nm。装置中,窄带干涉滤光片具有一定带宽,因此光电探测器接收的是一波段内的辐射能量总和。当滤光片带宽较窄时,可假定滤光片光谱透过率、探测器光谱响应函数及系统光谱透过率不随波长变化;当2个工作波长距离较近时,被测物体在2个工作波长下的发射率近似相等。因此,2个探测器输出电压之比可近似看作只与温度有关的函数^[7]。

2 比色测温装置工作波长优化设计

2.1 波长范围选择

工作波长的选择对比色测温性能具有决定性影响,需综合考虑测温范围、探测器光谱响应特性、大气传输窗口、系统灵敏度及信噪比等因素^[8]。此外,经济性也是工程选型中的重要考量:中远红外波段的光电探测器及滤光片,其成本显著高于近红外波段的同类器件。

基于上述原则,本文选用钢镓砷光电探测器作为光/电转换器件,其标称探测波长范围为900~1 700 nm,该探测器的光谱响应率曲线,如图2所示。可以看出,探测器在1 470~1 620 nm波段内的光谱响应率最高,该波段位于探测器响应曲线的峰值区域。

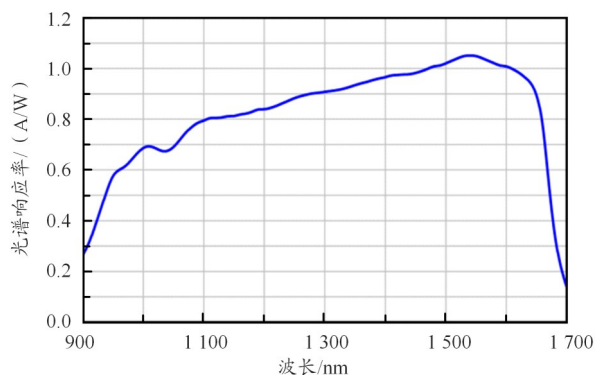


图2 光电探测器响应曲线

本装置设计的测温范围为773.15~1 473.15 K。根据维恩位移定律,该温度范围内黑体辐射峰值波长为1 960~3 700 nm。综合考虑大气传输窗口及探测器响应特性,工作波长应尽可能靠近1 960 nm以获取更强的辐射能量。因此,本文确定在1 470~1 620 nm波段内开展比色双波长及滤光片参数的优化选取,该波段

既满足探测器高响应率要求,又兼顾了辐射能量强度与大气传输特性。

2.2 工作波长 λ_1 的选择

为确定最优的第一工作波长 λ_1 ,需分析波长选择对双波长比色测温灵敏度的影响。本文定义灵敏度 S 为固定波长间隔条件下,温度每变化1 K所引起的比值 R 的相对变化率 ΔR ,即 $S = (\Delta R/R)/\Delta T$,该指标反映了装置对温度微小变化的分辨能力。设定两波长间隔 $\Delta\lambda$ 为50 nm。在1 470~1 620 nm内以10 nm为步长进行逐点计算,选取其中部分代表性波长(间隔20 nm)绘制灵敏度 S 随温度 T 的变化曲线,如图3所示。可以看出,随着 λ_1 增大,测量灵敏度下降,波长越短时灵敏度越高。因此,在1 470~1 620 nm内,综合波长对灵敏度的影响及滤光片带宽限制,本装置选择 $\lambda_1 = 1 483$ nm。

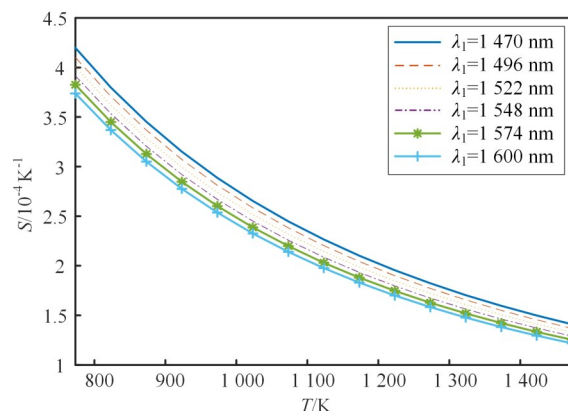


图3 λ_1 变化时灵敏度 S 与温度 T 的关系曲线

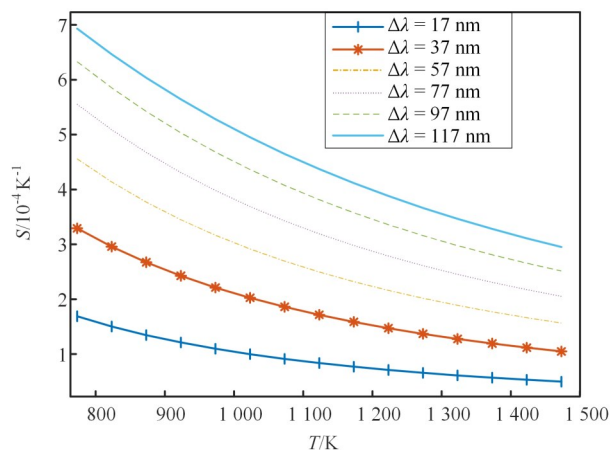
2.3 两波长间隔 $\Delta\lambda$ 的选择

在确定 $\lambda_1 = 1 483$ nm的基础上,进一步优化两波长间隔 $\Delta\lambda$ 。以温度 T 为自变量,在17~117 nm内以20 nm为步长进行逐点计算,选取其中部分代表性间隔(17、37、57、77、97、117 nm)绘制灵敏度 S 随温度 T 的变化曲线,如图4所示。可以看出,在773.15~1 473.15 K内,两波长间隔越大,系统灵敏度越高。当 $\Delta\lambda = 117$ nm时,灵敏度最优。因此,本文选取 $\Delta\lambda = 117$ nm,即比色测温装置的第二工作波长 λ_2 为1 600 nm。

2.4 带宽 δ 的选择

滤光片的带宽参数 δ 常用半高宽(FWHM)进行表征,即滤光片峰值透射率一半所对应的波长宽度。研究表明,当滤光片带宽分别为40、60、80 nm时,比值 R 随温度 T 的变化曲线基本一致,表明带宽变化对比值曲线的影响较小。

适当增大滤光片带宽有助于提升低温段探测器

图4 两波长间距变化灵敏度 S 随温度 T 变化曲线

接收到的辐射能量,从而改善系统信噪比。然而,带宽过大会加剧不同波长处发射率差异所带来的影响,同时在高温段易使探测器输出信号趋于饱和,限制系统的温度测量范围。此外,滤光片的最小带宽还受限于光电探测器的最小可探测功率。经计算,中心波长为1 483 nm的滤光片带宽不应小于60 nm,中心波长为1 600 nm的滤光片带宽不应小于39 nm。

综合上述分析,本文选取中心波长为1 600 nm、带宽为60 nm的滤光片,以及中心波长为1 483 nm、带宽为83 nm的滤光片。

3 装置性能测试

3.1 静态标定实验

为便于与黑体炉温控设定值及工程应用对标,后续实验及结果分析中的温度均采用摄氏温度($^{\circ}\text{C}$),理论计算中对应的绝对温度 K 可按 $T(K)=t(^{\circ}\text{C})+273.15$ 换算。

为确定温度与电压比值之间的关系曲线,本文对比色测温装置进行了静态标定。标定实验采用泰安德美机电设备有限公司生产的DY-HT3型黑体炉作为辐射源,其腔口发射率优于0.995。实验时,将聚焦透镜正对黑体炉炉口,置于距炉口10 cm处,以确保透镜能够有效接收炉内辐射。实验装置如图5所示。

在400~1 200 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,以50 $^{\circ}\text{C}$ 为步长设置标定点。待各温度点稳定后,记录比色测温装置的输出电压。不同温度下两通道电压比值与对应温度的实验数据如表1所示。可以看出,随着被测温度升高,通道 CH_1 和 CH_2 的输出电压均呈现单调上升的趋势,该现象符合普朗克定律关于辐射出射度随温度增加的描述。此外,由于探测器输出电压与接收的辐射

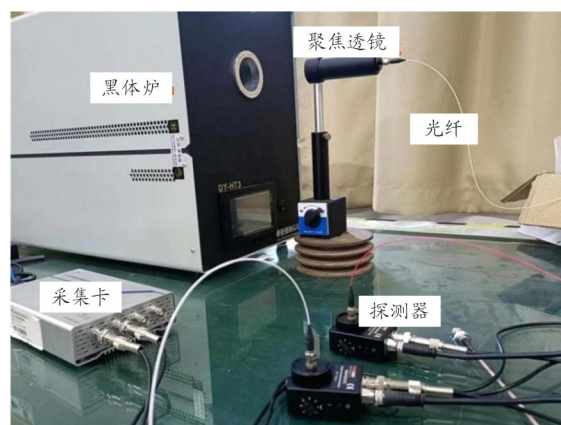


图5 静态标定实验

表1 400~1 200 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,探测器的输出与其比值

$T/^{\circ}\text{C}$	CH_1 输出电压/mV	CH_2 输出电压/mV	CH_1/CH_2
400	5.800	11.800	2.035
450	11.500	22.800	1.983
500	21.000	39.000	1.857
550	39.100	67.200	1.719
600	66.300	108.800	1.641
650	115.300	177.000	1.535
700	175.300	257.700	1.470
750	270.400	377.500	1.396
800	388.000	517.600	1.334
850	547.000	694.500	1.270
900	766.500	926.000	1.208
950	1 019.500	1 176.500	1.154
1 000	1 397.000	1 533.500	1.098
1 050	1 855.000	1 940.000	1.046
1 100	2 295.000	2 302.000	1.003
1 150	2 882.500	2 762.700	0.958
1 200	3 698.500	3 285.000	0.888

能量呈正相关关系, CH_1 与 CH_2 的电压比值(CH_1/CH_2)随温度升高而逐渐减小的趋势,与本文前文推导的式(1)中辐射能量比值的变化趋势一致,从而验证了该理论模型的正确性。

本文采用多项式拟合和指数衰减函数2种拟合方式进行数据的标定,根据表1中静态标定数据,使用3次多项式对数据进行拟合。拟合函数如式(3)所示,拟合曲线如图6所示。由图可见,拟合曲线与实测数据吻合良好,表明该指数衰减函数能够准确描述被测参数与输出信号之间的关系。多项式输出拟合 T_{poly} 为

$$T_{\text{poly}} = -60.26R^3 + 591.9R^2 - 2\,020R + 2\,584 \quad (3)$$

采用指数衰减函数对实验数据进行拟合。该函

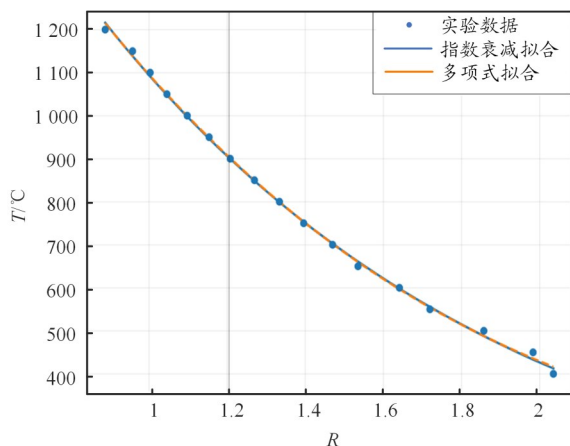


图6 2种拟合结果

数广泛应用于电容放电及其他衰减过程的描述,对应的指数衰减拟合 T_{exp} 输出函数表达式如式(4)所示。

$$T_{\text{exp}} = 2807\exp(-0.942R) \quad (4)$$

为了验证2种拟合曲线的准确性,设定黑体炉温度为 T_1 ,并记录该温度下黑体炉的实测温度以及2个探测器的输出电压比值。利用标定所得曲线对电压比值进行反演计算,得到测量温度 T_2 ,结果如表2所示,进一步计算 T_1 和 T_2 之间的差值,以评估拟合曲线的测量精度^[9]。

表2 拟合温度和实际温度的差值

电压 比值	实际温 度 $T_1/^\circ\text{C}$	多项式拟合		指数衰减拟合	
		温度 $T_2/^\circ\text{C}$	误差 $^\circ\text{C}$	温度 $T_2/^\circ\text{C}$	误差 $^\circ\text{C}$
1.866	500	484.360	-15.640	484.420	-15.580
1.698	559	569.480	10.480	567.400	8.400
1.589	632	630.890	-1.110	628.900	-3.100
1.378	771	766.430	-4.570	767.180	-3.820
1.317	816	810.840	-5.160	812.680	-3.320
1.154	950	948.630	-1.370	947.150	-2.850
1.020	1 075	1 071.580	-3.420	1 074.300	-0.700
1.072	1 165	1 167.940	2.940	1 166.400	1.400

由表2可知,在实际温度 $\leq 559^\circ\text{C}$ 时,2种拟合方法计算得到的温度与实际温度偏差较大,主要原因是低温下探测器输出信号信噪比较低,导致测量误差增大。随着实际温度升高,探测器输出信号增强,信噪比改善,比色测温系统输出温度与实际温度之间的差异逐渐减小。当温度 $\geq 632^\circ\text{C}$ 时,测量误差可控制在1%以内。经计算,多项式拟合的误差平方根为7.29,指数衰减拟合的误差平方根为6.70,表明指数衰减拟

合方法的函数表征更为准确。

3.2 装置响应时间实验

比色测温装置的响应时间受电子器件、光电二极管响应特性以及光路耦合程度等因素共同影响,通常通过实验测定^[10-11]。本文采用激光指示器模拟被测物体的红外辐射,以测量装置的响应时间。该激光指示器可输出上升时间为几百皮秒至几纳秒的脉冲激光信号。实验中,将激光指示器直接照射装置的光学窗口,采集比色测温装置的电压输出信号,并据此计算响应时间。经实测,该装置2个通道的上升时间(输出信号从幅值的10%上升至90%所需时间)分别为 $1.96\ \mu\text{s}$ 和 $2.00\ \mu\text{s}$,据此确定装置的响应时间为 $2\ \mu\text{s}$ 。

4 动态校准实验

4.1 校准系统构成

基于激光器的热电偶动态校准系统如图7所示,系统中,高功率激光器输出脉冲激光,经过微透镜阵列后整形为功率均匀分布的激光光束,保证激光加热热电偶的一致性,提高动态校准实验的重复性和准确性。激光辐照到热电偶表面,使被校准热电偶表面快速升温,同时采集热电偶输出信号和激励信号,通过系统辨识建立动态模型,分析其动态特性。激励温度通过红外测温仪进行测量,热电偶信号经调理后输出到采集设备^[12]。

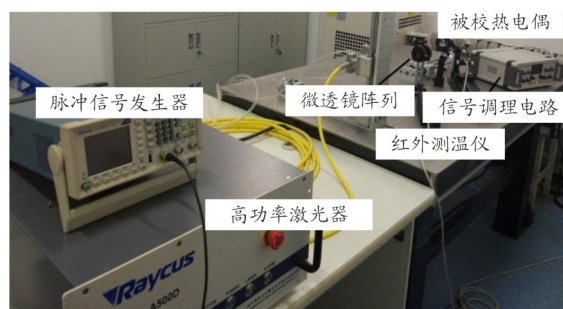


图7 基于激光器的热电偶动态校准系统

4.2 实验结果与分析

本文将所研制的比色测温装置应用于基于激光器的热电偶动态校准系统中,替代原有的单色红外测温仪,用于测量热电偶表面激励温度,如图8所示。在动态校准实验中,被校热电偶为直径0.5 mm的K型热电偶丝。设置激光器功率为50 W,激光脉冲宽度为400 ms。数据采集卡同步采集比色测温装置双通道的电压输出和热电偶的电压输出。

本文采用小波去噪法对实验数据进行处理。依据拟合的温度-辐射功率比值 R 关系,将比色测温装置

马霄汉,李岩峰,邵海颖,等:用于热电偶动态校准系统的比色测温装置研究

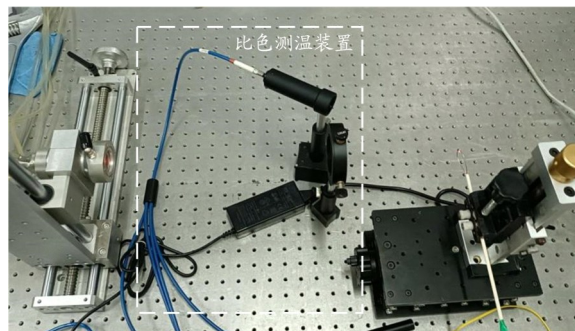


图8 基于激光器的热电偶动态校准实验实物图

测得的电压比值曲线转换为温度曲线;同时,将热电偶输出的电压信号经小波去噪后转换为温度信号,结果如图9所示。可以看出,在0~0.4 s时间内,激光器持续照射热电偶,使其表面温度不断上升,最高温度达到1 200 ℃。激光器停止加热后,热电偶温度逐渐下降。在低温阶段,测量所得温度曲线波动较大,主要原因是此时比色测温装置2个通道的输出电压较小,受噪声影响较为明显。热电偶输出的温度信号与比色测温装置测得的激励温度信号变化趋势一致,但热电偶温度信号相对于激励温度变化存在明显滞后,这与热电偶迟滞特性所决定的动态温度测量特性相吻合。

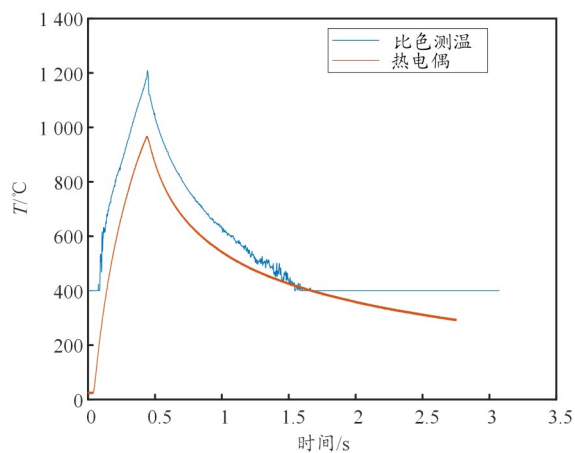


图9 热电偶温度输出与比色测温输出

5 结束语

针对基于激光器的热电偶动态校准系统中表面激励温度的测量需求,本文研制了一套适用于该系统的比色测温装置。该装置采用双波长辐射比值法,有

效抑制了被测物体发射率变化对测温精度的影响,解决了传统单色红外测温仪在使用前需标定热电偶表面发射率的问题。

在装置研制过程中,系统优化了工作波长,确定最优双波长组合为1 483 nm和1 600 nm,并完成了滤光片带宽的合理选配。通过黑体炉静态标定实验,建立了温度与电压比值之间的指数衰减拟合模型。结果表明,在600 ℃以上的测温范围内,系统相对误差小于1%。采用激光指示器测得的装置响应时间为2 μs,能够满足瞬态温度测量的快速响应需求。

本文将所研制装置应用于热电偶动态校准系统,成功获取了热电偶表面的激励温度变化曲线,并与热电偶输出信号进行了对比分析,验证了该装置在实际动态校准场景中的有效性与可靠性。本研究为热电偶动态校准系统中激励温度的获取提供了一种新的技术途径。

参考文献:

- [1] 张启威,程扬帆,夏煜,等. 比色测温技术在瞬态爆炸温度场测量中的应用研究[J]. 爆炸与冲击,2022,42(11):103-115.
- [2] 兰芳,李彦,张丽丽,等. 高温测量及其校准技术研究现状与发展趋势[J]. 环球市场,2021(17):391.
- [3] Budwig R, Quijano C. A new method for in situ dynamic calibration of temperature sensors[J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(12): 3717-3720.
- [4] 郝晓剑. 瞬态表面高温测量与动态校准技术研究[D]. 太原:中北大学,2005.
- [5] 俞侃,吉紫娟,黄德修,等. 非平行条件下高斯光束斜入射窄带滤光片的透射光强分布[J]. 光学学报,2011,31(10):115-121.
- [6] 廖红波,李多. 影响石英单模光纤数值孔径测量的因素及分析[J]. 大学物理,2021,40(5):33-36,54.
- [7] 李云红,王瑞华,李禹萱. 双波段比色测温技术及实验测试[J]. 激光与红外,2013,43(1):71-75.
- [8] 蔡璐璐. 双波长光纤辐射温度测量仪的设计及其应用技术的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2005.
- [9] 韩泽岩,纪冲,王昕,等. 比色测温系统钨丝灯标定实验[J]. 机电产品开发与创新,2022,35(3):35-37,42.
- [10] 唐宵. 基于燃爆场的快速响应热电偶动态特性标定[D]. 杭州:中国计量大学,2017.
- [11] 刘岩,刘建华,张雷博,等. 瞬态测温传感技术研究进展[J]. 遥测遥控,2020,41(3):30-36.
- [12] 王涵宇. 基于脉冲响应的热电偶动态测试系统研究[D]. 太原:中北大学,2023.