

卤钨灯辐射光谱特性及其补偿方法

刘昶江¹, 潘永强¹, 徐郁盛¹, 刘光海^{1,2}, 张雄星¹, 王伟^{1,2*}

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 四川物科光学精密机械有限公司, 四川 绵阳 621022)

摘要: 在辐射温度测量领域, 通常使用黑体炉进行标定。为了应对黑体炉成本较高且测量条件苛刻的问题, 提出了一种使卤钨灯光谱曲线更接近理想黑体的方法, 即通过对一系列控制电流下卤钨灯光谱曲线值进行测量, 与其归一化拟合度最高的黑体曲线进行比较, 测量出通用补偿系数, 从而对卤钨灯的辐射出射度曲线进行补偿, 使其在较高精度范围内代替黑体炉。利用互相关算法, 着重分析了不同温度下卤钨灯辐射曲线与光谱补偿后曲线的拟合度。实验结果表明: 在2 200~3 000 K温度范围、700~1 700 nm波段内可以用卤钨灯代替黑体进行标定, 拟合度可达0.999 9, 解决了黑体炉标定问题, 提高了可操作性, 简化了实验步骤, 有广阔的应用前景。

关键词: 黑体炉; 标定; 光谱测量; 卤钨灯; 互相关算法

中图分类号: TH741

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025022

引用格式: 刘昶江, 潘永强, 徐郁盛, 等. 卤钨灯辐射光谱特性及其补偿方法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(2): 164-171.

LIU Changjiang, PAN Yongqiang, XU Yusheng, et al. Radiation spectral characteristics of tungsten halogen lamp and its compensation method[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(2): 164-171.

Radiation Spectral Characteristics of Tungsten Halogen Lamp and Its Compensation Method

LIU Changjiang¹, PAN Yongqiang¹, XU Yusheng¹, LIU Guanghai^{1,2},
ZHANG Xiongxing¹, WANG Wei^{1,2*}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Sichuan Buko Optical Precision Machinery Co., Ltd., Mianyang 621022, China)

Abstract: In the field of radiation temperature measurement, blackbody furnaces are usually used for calibration. In order to deal with the problems of high cost and harsh measurement conditions of blackbody furnace, a method is proposed to make the spectral curve of tungsten halide light closer to the ideal blackbody, that is, by measuring the spectral curve value of tungsten halide light at a series of controlled current, comparing with the blackbody curve with the highest normalization fitting degree, measuring the general compensation coefficient, and compensating the radiation emission curve of tungsten halide lamp. The blackbody furnace is replaced in a high precision range. By using a cross-correlation algorithm, the fitting degree of the radiation curve and spectral compensated curve of the tungsten halide lamp at different temperatures is analyzed. The experimental results show that a tungsten halogen lamp can be used to calibrate

收稿日期: 2024-05-24

基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2024GX-YBXM-041)

作者简介: 刘昶江(1999—), 男, 硕士生, 主要从事多光谱辐射温度测量技术研究。E-mail: liuchangjiang@st.xatu.edu.cn.

* **通信作者:** 王伟(1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事极端环境下的光纤传感技术及其工程化, 光电瞬态测量技术与仪器, 光纤激光器研究。E-mail: wangwei@xatu.edu.cn.

blackbody in the temperature range of 2 200~3 000 K and in the band of 700~1 700 nm, and the fitting degree can reach 0.999 9. The problem of calibration of the blackbody furnace is solved and the operability is improved. the experimental steps are simplified and the application prospect is broad.

Key words: blackbody furnace; calibration; spectral measurement; halogen tungsten lamp; cross correlation algorithm

0 引 言

在工业领域,对高温苛刻条件下的测温方式可以分为接触式和非接触式两种^[1-2]。接触式测温手段已趋于成熟稳定,如热电偶测温是常见的接触式测温手段,一般采用人工手持快速热电偶的方式测量温度^[3],由于快速热电偶测温是接触消耗型测温,每次测温都会消耗热电偶,且测温领域受限。

非接触测温法兴起于20世纪70年代末期,由于非接触测温法具有响应速度快、不影响被测物体温度场等优势,相比于接触测温法更适合测量快速变化的高温对象。随着电子技术的发展,非接触测温法已经成为测量苛刻环境温度的主流方法。其中,辐射测温法应用最为广泛^[4]。该方法通过测量目标物体辐射出的能量来计算物体的温度值。多光谱辐射测温属于辐射测温法,具有抗干扰能力强、精度高、实时性高以及适用范围广等优点,被广泛用于各个领域^[5]。

辐射测温系统中,标定是对系统响应的校准,其结果直接影响测量结果的准确性。光电探测器将光信号转换为电信号^[6],以便对输入的辐射能量进行后续的数据处理。对光电探测器进行标定是保证其测量精度的关键,在这一环节中,标定源的选择至关重要。

黑体炉作为热辐射源,其辐射发射率 ϵ 可达0.99,温度范围为-50~3 000 °C,可以用于测温仪表的分度、标定、检校^[7]。

Lucas等^[8]介绍了实验室常用黑体炉辐射源的温度分布,证明了黑体炉作为标定源的可靠性。Fujihara等^[9]开发了一种标准黑体炉用于校准辐射温度计,精度精确到1 K。牛兴军等^[10]基于高温黑体炉设计了一种适用于钨铼热电偶的校准方法,在1 073~1 573 K与S型热电偶标准热电势间差异小于273.65 K,精度更高。孙林林等^[11]设计了温度测量系统并进行了标定实验,该实验使用的黑体炉温度在1 500 K左右,限制了标定温度。杨娟等^[12]利用黑体炉对测温系统进行标定实验,标

定实验温度范围为1 073~1 473 K。姜志伟等^[13]通过黑体炉标定CCD相机,标定温度为1 353~1 553 K,温度范围只有200 K,且标定温度不高,这对相机像素和采样时间提出了更高的要求。

黑体炉价格昂贵,市场上大部分的黑体炉温度只能上升到1 700 K左右,温度可升至3 000 K的黑体炉价格达到百万级别。黑体炉温度上升也极慢,升温至1 400 K需要1.5 h。因此,实验中需要一种可以代替黑体炉的标定设备。

卤钨灯是一种常见的代替黑体炉标定的光源,目前常选用国防计量二级站的标准钨带灯(黑体的二级传递标准)^[14]即卤钨灯代替,其优点包括:1)具有宽波段特性且辐射光谱与黑体接近;2)可以通过控制卤钨灯的电流来精确控制卤钨灯的色温;3)廉价、安全、实用;4)标定温度可达3 000 K等。

Carbonaro等^[15]使用卤钨灯对辐射热通量探针校准。金阳^[16]使用卤钨灯对光谱仪进行标定,通过特定几个波长,利用最佳标定方程对全光谱进行补偿。Woodruff等^[17]使用卤钨灯对高温计和热像仪进行校准,并计算了校准因子。Myers等^[18]在使用彩色摄像机计算熔池温度前,首先使用黑体源进行系统校准,再使用卤钨灯光源进行验证。

卤钨灯作为黑体的二级传递标准,需要对卤钨灯进行标定,在标定过程中,使用高精度辐射计分别测量一级黑体及卤钨灯的辐射输出。根据测量数据,计算其光谱辐射出射度的不确定度,通常为3%。如何进一步提升卤钨灯作为标定源时的测量精度是目前研究的一个方向。

Taleb等^[19]将实测光谱和理论光谱进行比较以校准光谱仪,该思路对于本文的研究提供了启发。Sneppen^[20]通过举例说明了典型波长的光谱矫正,为本文提供了思路:即将卤钨灯的光谱补偿接近理想黑体,替代黑体炉进行标定。

为了应对黑体炉在使用中存在的缺陷,使用卤钨灯作为标定源,并对卤钨灯光谱特性曲线进行补偿,使其更接近理想黑体,提升了实验的简便性,降低了实验成本,代替黑体炉进行标定实验,降低了使用卤钨灯标定的误差,使之可以与

使用黑体炉标定的精度相媲美。

1 光谱补偿相关理论

1.1 光谱补偿法概述

1) 通过测量卤钨灯光谱分布, 并与拟合度最高的理想黑体光谱信息进行比较, 得到补偿系数。

2) 用补偿系数补偿目标卤钨灯的辐射光谱, 使其更接近黑体光谱。

3) 将补偿后的光谱替代黑体标定源所辐射的光谱用于标定。

1.2 普朗克辐射定律

温度高于绝对零度的物体会发射电磁波, 这一现象被称为热辐射。热辐射理论是辐射温度测量技术开创发展的基础。

普朗克辐射定律是描述黑体辐射的基本定律, 数学表达式为

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1}, \quad (1)$$

式中: $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$; M 为光谱的辐射出射度, W/m^2 ; λ 为辐射的波长, m 。

1.3 卤钨灯辐射光谱特性

黑体炉作为辐射源达到理论的辐射性能需要苛刻的条件。在实际应用中, 卤钨灯作为更便捷、成本更低的光源, 往往代替黑体炉在标定领域广泛地应用。

根据焦耳定律, 电流通过钨丝时升温并发光, 在初次通电的瞬间, 温度会快速升高。随着时间的推移, 温度会趋于稳定, 形成热平衡。即可达到通过调节卤钨灯电流控制其温度和发光亮度的目的。焦耳定律数学表达式为

$$Q = I^2 R, \quad (2)$$

式中: Q 为产生的热量, J ; I 为电流强度, A ; R 为钨丝电阻, Ω ; t 为电流通过时间, s 。

卤钨灯作为二级黑体标定光源具有如下优势:

- 1) 卤钨灯能够提供较为全面的光谱信息;
- 2) 卤钨灯是一种相对常见、成本适中且易于获取的光源;

3) 通过调节卤钨灯电流大小可以改变卤钨灯的温度, 方便估计真实温度范围。

卤钨灯用来校准非接触辐射测温装置的装置图如图1所示, 左侧为恒流源, 右侧为卤钨灯源。

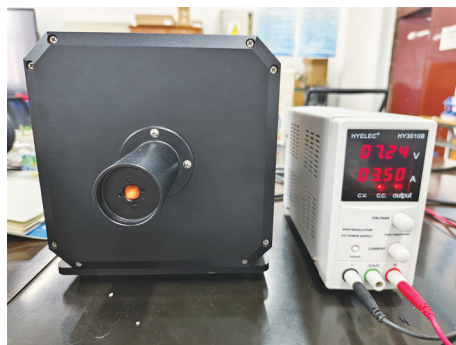


图1 卤钨灯标定装置

Fig. 1 Tungsten halide lighting device

光谱仪测得的控制电流在3.50 A下卤钨灯光谱特性曲线, 如图2所示。

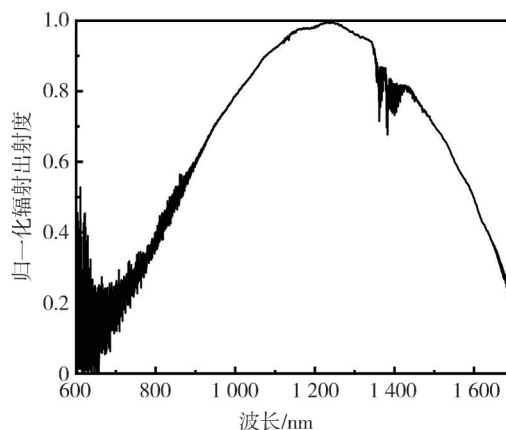


图2 归一化实测光谱图

Fig. 2 Normalized measured spectrogram

由图2分析得出, 卤钨灯光谱特性曲线有普朗克黑体曲线的波形。在600~700 nm和1300~1400 nm处波形波动严重, 为了提高拟合度, 选取实测曲线中平滑波段800~1300 nm。

在1000~3000 K范围内, 每1 K生成一条黑体辐射曲线。计算每一温度处的归一化黑体辐射曲线与卤钨灯归一化光谱特性曲线的皮尔逊线性相关系数 R , R 取得最大值处的黑体辐射曲线对应的温度即可认为是卤钨灯的温度。

皮尔逊线性相关系数 R 可以表示为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\left\{ \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}, \quad (3)$$

式中: X_i 为黑体在第 i 个波段的归一化辐射出射度值; Y_i 为卤钨灯在第 i 个波段的归一化辐射出射度

值, W/m^2 ; $\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i/n$; $\bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i/n$ 。

理想黑体和实测光谱的归一化曲线如图 3 所示。

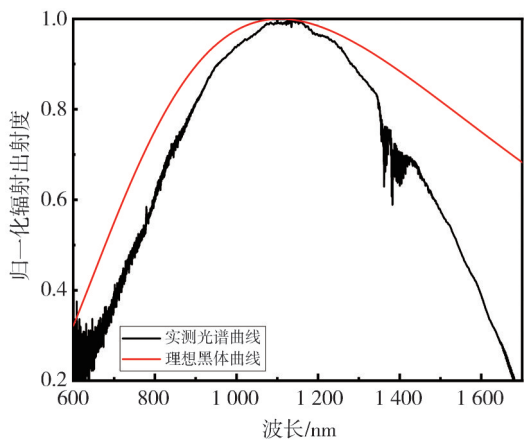


图 3 实测光谱曲线与理论黑体曲线对比图

Fig. 3 Comparison between measured spectral curve and theoretical blackbody curve

由图 3 可以看出, 卤钨灯实测光谱曲线与理论黑体光谱曲线有良好的一致性, 证明了卤钨灯用来标定的合理性, 但是仍可以观察到两条曲线存有一定的偏差。通过改变电流观察到, 即使辐射温度变化, 两者波形的对比仍为图 3 所示。定性判断对卤钨灯的光谱补偿具有可行性。

1.4 卤钨灯辐射出射度曲线的补偿原理

卤钨灯测得波段的波长与其理想黑体对应波长之比作为补偿系数 k_i , 表达式为

$$k_i = \frac{X_i}{Y_i}, \tag{4}$$

式中: X_i 为通过光谱仪测量得到的卤钨灯各波长的辐射功率归一化值; Y_i 为对应各波长下理想黑体辐射出射度归一化值, 波长范围为 700~1 700 nm, 分度取 0.11 nm。

经过计量机构检定得到几组控制电流下卤钨灯的真温, 其电流-温度特性如表 1 所示。

由表 1 可知, 随着控制电流的增大, 真温也升高。将卤钨灯控制电流调整到表 1 提供的数值下, 通过光谱仪可得到该电流下的辐射功率, 对应电流下的真温通过式(1)即可得到对应波长下的黑体辐射出射度, 将两组数据分别进行归一化, 即为式(4)中的 X_i 和 Y_i , 进而可得补偿系数 k_i 。

当卤钨灯电流为 4.40 A 时, 其补偿系数 k_i 值曲线如图 4 所示。

补偿后的光谱特性曲线表达式为

表 1 卤钨灯电流-温度特性表

Tab. 1 Current-temperature characteristics of tungsten halide lamp

卤钨灯电流/A	真温/K
3.00	2 100
3.41	2 250
3.50	2 584
4.00	2 720
4.40	2 800
4.50	2 850
5.00	3 000
5.50	3 058
5.78	3 100

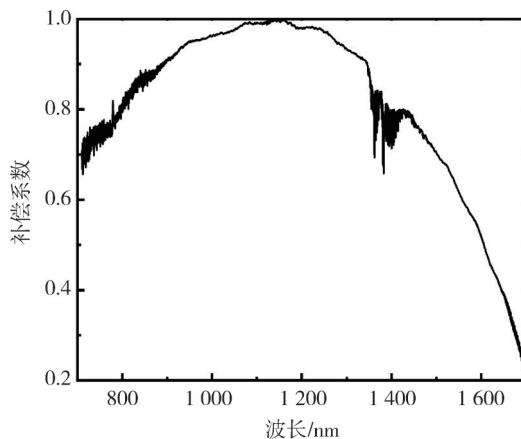


图 4 补偿系数图

Fig. 4 Compensation coefficient diagram

$$M\tilde{M}_i = \frac{M_i}{K_i}, \tag{5}$$

式中: M_i 为波长为 700~1 700 nm, 卤钨灯特定控制电流下的实测功率归一化值; \tilde{M}_i 为对应波长下补偿后的数值; K_i 为补偿系数。

2 光谱补偿实验

2.1 光谱收集系统

卤钨灯光谱收集装置系统如图 5 所示, 主要包括光谱仪、光纤、恒流源、卤钨灯。

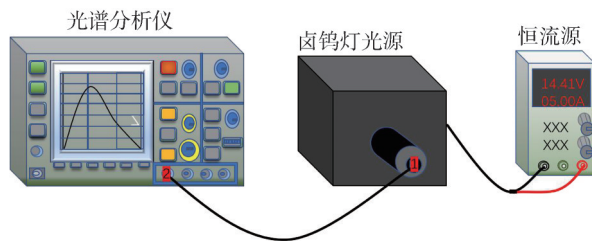


图 5 卤钨灯光谱收集系统图

Fig. 5 Tungsten halide light spectrum collection system diagram

光谱分析仪的型号是 YOKOGAWA 公司的 AQ6370D, 波长范围为 600~1 700 nm, 波长精度为 ± 0.01 nm, 波长分辨率为 0.02 nm, 功率精度为 ± 0.4 dB, 功率线性度为 ± 0.05 dB, 是一款高

性能和高精度的光谱仪,适用于单模和多模光纤,是在科学实验中常用的光谱仪。恒流源的型号为华谊HY3010B,输出电压为0~30 V,输出电流为0~10 A,输出精度为10 μ A,纹波噪声 ≤ 0.5 mV/ms。卤钨灯的额定电压为24 V,额定功率为150 W。选用的光纤为纤芯直径400 μ m的熔石英近红外多模光纤,长度50 cm,该光纤在可见光及近红外波段损耗极低,可以忽略。

2.2 实验操作

2.2.1 实验采集

根据卤钨灯光谱收集系统搭建了收集装置,如图6所示。

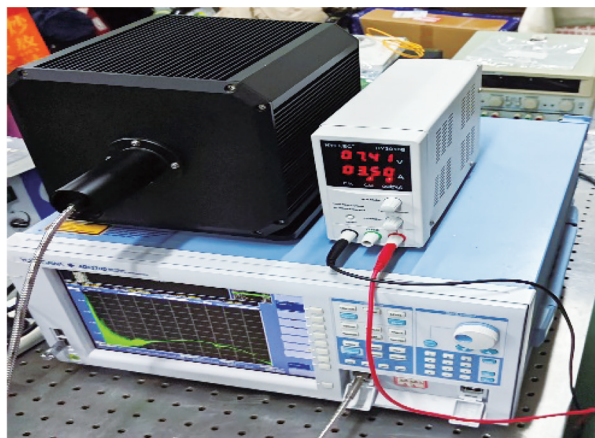


图6 卤钨灯光谱装置图

Fig. 6 Tungsten halide light spectrum device

通过调节恒流源电流来调节卤钨灯温度,卤钨灯的辐射光进入光纤1端口,从2端口进入光谱仪得到卤钨灯光谱辐射出射度图像,利用计算机上的Matlab软件进行处理分析。

实际测量发现,卤钨灯控制电流小于3.30 A时对应的光谱波动较大,不适用于研究。控制电流大于6 A时灯丝容易烧断。因此,设置控制电流在3.30~6 A之间,随机得到多组数据进行研究。

2.2.2 实验处理

对收集到的实验数据进行如下操作:

1) 选取实测卤钨灯光谱特性曲线700~1700 nm部分用于后续计算补偿系数。

2) 根据表1卤钨灯电流-温度特性,得到卤钨灯的辐射真温,进而生成该温度下黑体在700~1700 nm波段内的光谱曲线。

3) 在700~1700 nm波段内,将实测光谱特性

曲线归一化值与同温的黑体光谱曲线归一化值作比,利用式(4)得到一组补偿系数 K 。

4) 改变电流,重复步骤1)~3),得到不同温度下的补偿系数,取平均值得到通用补偿系数 \bar{K} 。

5) 将补偿系数 \bar{K} 对特定电流下对应的光谱曲线进行补偿,即利用式(5)得到补偿后的光谱曲线。

6) 利用式(3)皮尔逊相关系数,对表1特定电流下,光谱补偿前后的光谱曲线分别进行温度计算,相关系数 R 最大的黑体曲线即为对应等温黑体曲线,进而得到补偿前后温度及其相关系数。通过与表1温度作对比以及相关系数的提升,来证明补偿效果的良好。

2.3 补偿结果定性分析

在3.0~5.5 A范围内每隔0.5 A取一组控制电流进行补偿系数 K 计算,并取平均补偿系数 \bar{K} 。补偿系数曲线如图7所示。

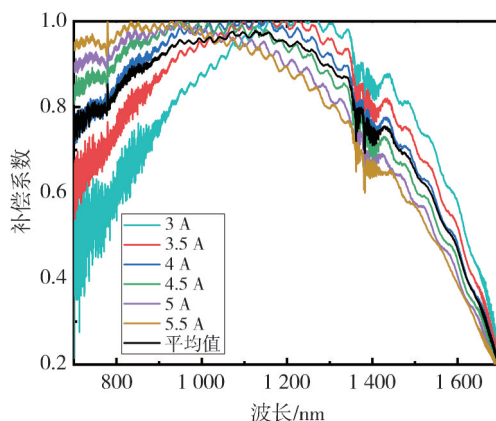


图7 各组电流下的补偿系数曲线及其平均值曲线

Fig. 7 The compensation coefficient curve and its average value curve of each group of current currents

由图7观察到各组控制电流下计算得到的 K 有相同的波形,且平均值曲线 \bar{K} 有很好的代表性。

利用Matlab将测得数据进行计算,当卤钨灯电流分别为3.41、4.00、4.40、4.50、5.00、5.50 A时,卤钨灯的归一化光谱特性曲线、补偿后的归一化光谱特性曲线、同温度黑体归一化光谱特性曲线如图8所示。

由图8宏观来看,波形基本一致。卤钨灯实测光源在1000 nm以前波动较大,1000 nm以后波形趋于平滑。补偿曲线与同温黑体辐射波形基本吻合,补偿效果明显,随着卤钨灯控制电流增大,补偿效果总体良好。

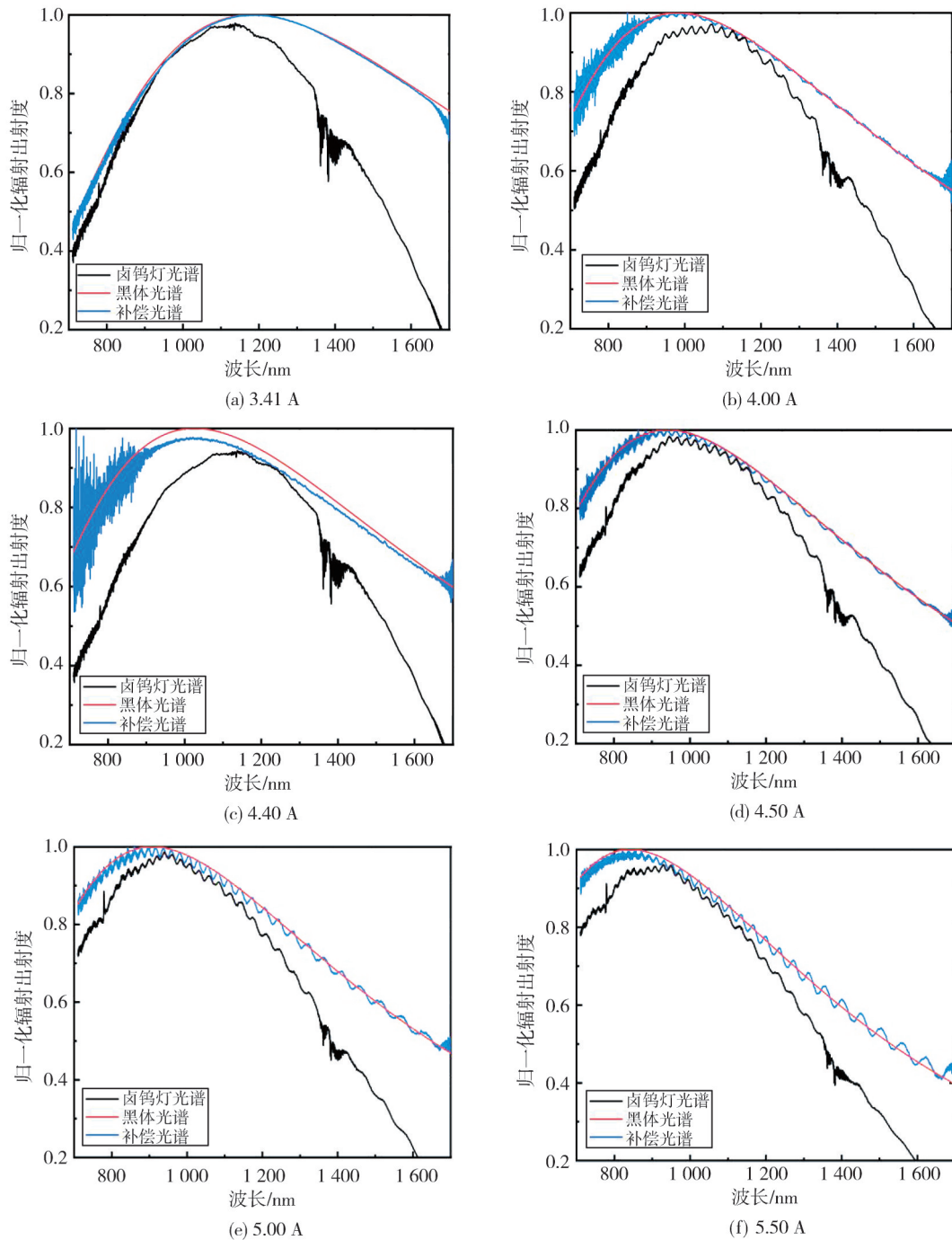


图 8 多组电流下实测光谱、理想黑体光谱与补偿后光谱曲线对比图

Fig. 8 Comparison of measured spectrum, ideal blackbody and compensated spectral curve under multiple currents

2.4 补偿结果定量分析

根据式(1)和式(3)计算得到控制电流分别为 3.41、4.00、4.40、4.50、5.00、5.50 A 下的光谱补偿前后卤钨灯温度, 卤钨灯实测光谱与理想黑体的拟合度 1, 补偿光谱与其理想黑体的拟合度 2, 见表 2。

由表 1 观察到卤钨灯控制电流在 3.41~4.00 A 之间温度跨度较大, 4.00 A 以后温度增长

均匀。在每一组电流下都可观察到, 补偿后光谱曲线计算得到的温度相较于补偿前更接近真温, 表明补偿系数确实对温度精度作了提升, 且温度差距相较补偿前可提升到 15 K 之内。拟合度对比可知, 对应各组控制电流下补偿后的光谱曲线与理想黑体光谱曲线拟合效果相较于补偿前有效提升, 拟合度可达 0.999 9, 对光谱进行了良好的补偿, 且效果显著。

表2 光谱补偿前后各组电流下与理想黑体的拟合度及相应温度对比表

Tab. 2 The fitting degree and corresponding temperature comparison table of each group of current and ideal blackbody before and after spectral compensation

灯丝电流/A	拟合度1	拟合度2	补偿前温度/K	补偿后温度/K
3.41	0.988 1	0.999 9	2 201	2 236
4.00	0.972 2	0.999 9	2 553	2 698
4.40	0.983 1	0.999 7	2 712	2 778
4.50	0.982 7	0.999 9	2 780	2 818
5.00	0.982 7	0.999 9	2 889	2 938
5.78	0.984 4	0.999 9	2 978	3 035

3 结 论

为了应对黑体炉价格高昂、测量条件苛刻等问题,提出了一种将卤钨灯辐射出射度曲线进行补偿,使其更接近理想黑体曲线的方法,以代替黑体炉作为标定源。结果表明,对于2 200~3 000 K温度范围、700~1 700 nm波段内可以用卤钨灯代替黑体进行标定,拟合度可达0.999 9,减少了使用卤钨灯标定的误差,增加了实验的简便性,降低了实验成本,在标定领域有相当广阔的前景。后续工作将对3.41~4.40 A温度跨度较大的区域提高测量分度,细分温度信息,做到全温度细分化,使标定更加完善。

参考文献:

- [1] 王魁汉, 苏菲. 高温测量前沿技术的发展与应用[J]. 自动化仪表, 2023, 44(12): 1-6.
WANG Kuihan, SU Fei. Development and application of frontier technologies for high temperature measurement [J]. Process Automation Instrumentation, 2023, 44(12): 1-6. (in Chinese)
- [2] 景亚冬, 王可宁, 冯嘉双, 等. 多普勒加速度测量的数字相关鉴相算法[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 103-109.
JING Yadong, WANG Kening, FENG Jiashuang, et al. Digital correlation phase discrimination algorithm for Doppler acceleration measurement [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 103-109. (in Chinese)
- [3] 潘冬, 蒋朝辉, 许川, 等. 高炉铁水温度检测方法的研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 280-296.
PAN Dong, JIANG Chaohui, XU Chuan, et al. Research progress of measurement methods of molten iron temperature in blast furnace [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 280-296. (in Chinese)
- [4] 孙岷. 爆炸火焰真温测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [5] 叶鑫. 强冲击下辐射场的温度反演技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- [6] 张磊, 陈绍武, 赵海川, 等. 基于光电探测的多光谱测温装置[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 289-293.
ZHANG Lei, CHEN Shaowu, ZHAO Haichuan, et al. Multi-spectral temperature measuring system based on photoelectric detection [J]. Chinese Optics, 2019, 12(2): 289-293. (in Chinese)
- [7] 宋学青. 对黑体炉有效发射率值标定的探讨[J]. 中国测试, 2009, 35(6): 28-29.
SONG Xueqing. Discussion on effective emissivity calibration for blackbody furnace [J]. China Measurement & Test, 2009, 35(6): 28-29. (in Chinese)
- [8] DE LUCAS J, SEGOVIA J J. Geometrical and thermal optimization of cylinder-conical blackbody cavities to uniform radiance temperature profiles in the infrared [J]. Infrared Physics & Technology, 2023, 131: 104684.
- [9] FUJIHARA T, HATTORI S, HISHIKARI I, et al. Standard blackbody furnace for the calibration of radiation thermometer [J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 1987, 23(6): 558-564.
- [10] 牛兴军, 张婷婷, 方立德, 等. 基于高温黑体炉的钨铼热电偶校准方法研究[J]. 计量学报, 2022, 43(5): 590-596.
NIU Xingjun, ZHANG Tingting, FANG Lide, et al. Research on Calibration method of tungsten-rhenium thermocouple based on high temperature Blackbody furnace [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(5): 590-596. (in Chinese)
- [11] 孙林林, 方华, 施圣贤. 光场多光谱辐射测温[C]//中国力学学会流体力学专业委员会. 第十二届全国流体力学学术会议摘要集. 上海交通大学机械与动力工程学院航空动力研究所, 中国航发湖南动力研究所发动机涡轮研究部: 2022.
- [12] 杨娟, 周骛, 蔡小舒, 等. 基于多光谱显微成像的颗粒表面温度分布测量[J]. 光学仪器, 2022, 44(3): 1-7.
YANG Juan, ZHOU Wu, CAI Xiaoshu, et al. Measurement of particle surface temperature distribution based on multispectral microscopic imaging [J]. Optical Instruments, 2022, 44(3): 1-7. (in Chinese)
- [13] 姜志伟, 张安琪, 易正明, 等. 碳氢火焰辐射特性快速判定方法研究[J]. 热科学与技术, 2022, 21(3):

- 283-289.
JIANG Zhiwei, ZHANG Anqi, YI Zhengming, et al. Research on the method of quickly judging the radiation characteristics of hydrocarbon flame [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2022, 21(3): 283-289. (in Chinese)
- [14] 沈华, 陈磊, 朱日宏, 等. 等离子体激发和辐射温度瞬态光谱测试方法[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2216-2220.
SHEN Hua, CHEN Lei, ZHU Rihong, et al. Spectroscopic diagnostication of transient excitation and radiation temperature of plasma [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2216-2220. (in Chinese)
- [15] CARBONARO M, MARSILI R, MAGGIORANA P. An innovative methodology in the characterization of the halogen lamp as a reference source for heat flux sensor calibration [J]. Measurement Science Technology, 2002, 13(6): 932-938. (in Chinese)
- [16] 金阳. 双光谱红外测温补偿技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- [17] WOODRUFF C, DEAN S W, CAGLE C, et al. In-situ thermal analysis of intermetallic and thermite projectiles in high velocity impact experiments [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 187: 122565.
- [18] MYERS A J, QUIRARTE G, OGOKE F, et al. High-resolution melt pool thermal imaging for metals additive manufacturing using the two-color method with a color camera [J]. Additive Manufacturing, 2023, 73: 103663.
- [19] TALEB A, SHEN C, MORY D, et al. Echelle spectrometer calibration by means of laser plasma [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2021, 178: 106144.
- [20] SNEPPEN A. On the blackbody spectrum of kilonovae [J]. The Astrophysical Journal, 2023, 955(1): 44.

声 明

本刊已许可中国知网、万方数据知识服务平台、超星网等多家单位以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述各家网络著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。
