第 47 卷 第 5 期
2025 年 10 月

光 学 仪 器
OPTICAL INSTRUMENTS

Vol. 47, No. 5
October, 2025

文章编号：1005-5630(2025)05-0001-08 **DOI**: 10.3969/j.issn.1005-5630.202407180082

双波长图像测温方法影响因素实验研究

曹华宇[1]，李海波[2]，倪 虎[1]，杨 斌[1]

（1. 上海理工大学 能源与动力工程学院 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室，上海 200093；
2. 北京动力机械研究所，北京 100074）

摘要：针对双波长图像测温方法的影响因素研究，通过理论分析优选 680 nm、760 nm 双波长，搭建了标准高温黑体辐射的双波长图像测温系统开展实验研究。通过设定不同的温度对标准黑体进行双波长辐射图像测量，基于热辐射定律建立了温度反演算法，实现了温度测量相对偏差与不确定度评价。在此基础上，开展曝光时间、成像距离与增益等影响因素实验研究，结果显示：不同曝光时间及成像距离下，双波长辐射强度变化规律一致；双波长测温法可通过双波长强度比值消除曝光时间及成像距离对测温结果的影响，测量相对偏差均在 3.5% 以内。不同增益下，双波长辐射强度增长符合指数规律，需对增益强度进行校正，回归到无增益状态下的强度值后再进行处理，以消除增益响应规律对温度测量结果的影响，增益校正后测温相对偏差仍在 3% 以内。上述研究为双波长图像测温方法的测温精度提升及工业应用提供参考。

关键词：温度测量；光学辐射测温方法；双波长法；辐射图像法；影响因素
中图分类号：TB 942 **文献标志码**：A

Exploring the influencing factors of dual wavelength image temperature measurement method

CAO Huayu[1]，LI Haibo[2]，NI Hu[1]，YANG Bin[1]

（1. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China）

Abstract: A study on the influencing factors of dual wavelength image temperature measurement method was conducted. Through theoretical analysis, a standard high-temperature blackbody radiation dual wavelength image temperature measurement system was built by selecting 680 nm and 760 nm dual wavelengths. Different temperatures were set to measure the standard blackbody radiation dual wavelength image. Based on the law of thermal radiation, a temperature inversion algorithm was established to evaluate the relative deviation and uncertainty of temperature

收稿日期：2024-07-18
基金项目：国家自然科学基金青年项目(51806144)
第一作者：曹华宇 (2000—)，男，硕士研究生，研究方向为燃烧与多相流动光学测量方法。E-mail：1102316508@qq.com
通信作者：杨 斌 (1985—)，男，副教授，研究方向为燃烧与多相流动光学测量方法。E-mail：yangbin@usst.edu.cn

measurement. On this basis, experimental research was conducted on the influencing factors such as exposure time, imaging distance, and gain. The results showed that the variation law of dual wavelength radiation intensity was consistent under different exposure times and imaging distances. The dual wavelength temperature measurement method can eliminate the influence of exposure time and imaging distance on the temperature measurement results through the ratio of dual-wavelength intensity, and the relative deviation of the measurement is within 3.5%; The growth of dual wavelength radiation intensity under different gains follows an exponential law, and it is necessary to correct the gain intensity and regress it to the non gain intensity value for processing, in order to eliminate the influence of the gain response law on temperature measurement results. The relative deviation of gain corrected temperature measurement is still within 3%. The research provides reference for the exploration of temperature measurement accuracy and industrial application of dual wavelength image temperature measurement method.

Keywords: temperature measurement; optical radiation temperature measurement method; dual wavelength method; radiation imaging method; influence factor

温度是用来衡量物体冷热状态的基本物理量。准确实时的温度测量可为工业过程优化、状态评估和故障预警提供数据支持[1-4]。工业广泛采用的热电偶测温元件通过冷热端温差产生的热电动势来确定温度，其温度测量范围受材料限制，其中钨铼热电偶测温上限可达 2300 ℃。但这类接触式测温元件通常为单点测温，时间响应较慢，对测量对象有严格的要求，并且容易干扰流场[5]。光学辐射测温方法基于热辐射定律，通过测量高温对象自身辐射来确定温度，具有非接触式在线测量、测温上限高的优势，逐步在工业测温领域广泛应用[6-11]。为了提高测量精度，相继发展了单波长法[7-8]、双波长法[9]、多波长法[10]与光谱法[11]，在化工、冶金、能源动力等领域提供了有效的高温测量手段。

为实现温度空间分布测量，结合光学成像技术，辐射图像测温法通过采集高温对象的辐射图像，基于热辐射定律反演获得温度分布[12-14]。双波长法由于采用两个不同波长处高温对象辐射强度比确定温度，无需提前确定物体辐射率参数，并且可消除同光路辐射传输的影响。因此，通过不同窄带滤波的双相机成像可以实现高温对象的温度分布测量。Vallabh 等[15]通过双波长成像法对激光粉末床熔融增材制造过程中的熔池温度进行测量和监测，获得其温度分布。Marsh等[16]利用双波长图像系统以 20 Hz 采样频率拍摄固体推进剂铝颗粒离开燃面的动态双波长图像，由此测得铝颗粒平均投影表面温度为(494±231)K。Dio 等[17]采用双波长辐射图像法研究了固体推进剂燃面附近铝颗粒表面温度与压强和粒径的关系。然而在光学辐射测温过程中，光学成像与相机参数对温度测量具有重要影响。Yao 等[18]通过数字微镜器件解决了双波长成像过程中需要光路分束导致的像素匹配问题。Gao 等[19]总结了发动机涡轮叶片光学辐射测温影响因素，通过校正算法及模型改进解决了高温气体的辐射和吸收效应。

对此，本文针对双波长图像测温方法开展光学成像与相机参数等影响因素研究，通过理论分析优选 680 nm、760 nm 波长对搭建标准高温黑体辐射双波长图像测温实验系统开展实验研究，重点分析曝光时间、成像距离及增益对温度测量的影响，为双波长图像测温方法测温精度探究及工业应用提供了参考。

1　双波长图像测温方法原理与波长优选

1.1　测量原理

工业相机互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)接收高温物体辐射将光信号转化为电信号从而采集高温对象的数字图像。其获取的辐射强度满足 Planck 热辐射定律，它描述了不同温度下黑体的

光谱辐射强度与波长之间的关系，具体描述如图 1 所示。

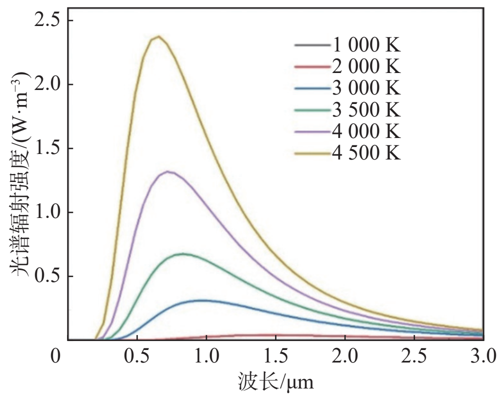


图 1　Planck 热辐射定律

Fig. 1　Planck's law of thermal radiation

根据 Planck 热辐射定律，黑体的光谱辐射强度可以表示为

$$E_b(\lambda,T)=C_1\cdot\lambda^{-5}\cdot\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)-1\right]^{-1} \tag{1}$$

式中：E_b 为黑体辐射强度，$W\cdot m^{-3}$；C_1 和 C_2 分别为第一辐射常量和第二辐射常量，C_1=3.741 9×10^{-16} $W\cdot m^2$，C_2=1.438 8×10^{-2} m·K；λ 为波长，m；T 为温度，K。

然而，实际物体的辐射强度总是小于黑体的辐射强度。实际物体在不同波长下的光谱辐射强度可以表示为

$$E(\lambda,T)=C_1\cdot\varepsilon(\lambda,T)\cdot\lambda^{-5}\cdot\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)-1\right]^{-1} \tag{2}$$

式中：$\varepsilon(\lambda,T)$ 为实际物体的辐射率，当 $\lambda T\leqslant$ 3 000 μm·K，$\exp(C_2/\lambda T)>>1$。

因此，对于可见或近红外高温物体光谱测量，可将 Planck 热辐射定律简化为 Wien 位移定律，Wien 位移定律描述了物体的最大光谱辐射强度对应的波长 λ_{max} 与温度 T 的乘积恒等于 2 897.8 μm·K，如图 2 所示。

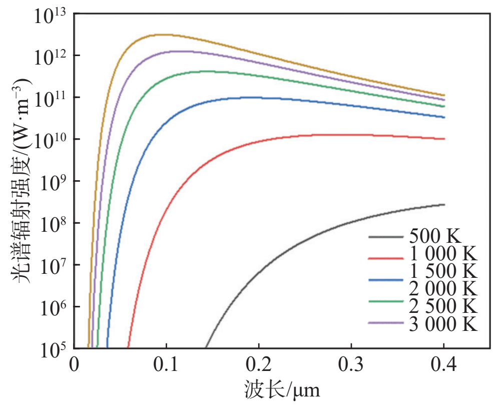


图 2　Wien 位移定律

Fig. 2　Wien displacement law

因此根据 Wien 定律，可将 Planck 定律简化为

$$E(\lambda,T)=\varepsilon(\lambda,T)\cdot C_1\cdot\lambda^{-5}\cdot\exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T}\right) \tag{3}$$

双波长图像法通过在两个黑白相机前加装不同中心波长窄带滤光片的方式获得不同波长下辐射强度并计算比值来反演温度，其具体温度反演过程如下所示。

假设温度为 T 时，两波长所对应的光谱辐射强度为 $E_1(\lambda_1,T)$、$E_2(\lambda_2,T)$，两者比值为

$$\frac{E_1(\lambda_1,T)}{E_2(\lambda_2,T)}=\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\cdot\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5\cdot\exp\left[\frac{C_2}{T}\cdot\left(\frac{1}{\lambda_2}-\frac{1}{\lambda_1}\right)\right] \tag{4}$$

考虑到实际物体的辐射率难以确定，所以经典的双波长辐射测温法在选取两波长时，尽量选取靠近的两波长来消除辐射率对测量精度的影响，即认为两波长相近时，$\varepsilon_1=\varepsilon_2$，满足灰体特性，由此可得双波长辐射测温方法温度计算式

$$T=\frac{C_2\cdot\left(\frac{1}{\lambda_2}-\frac{1}{\lambda_1}\right)}{\ln\frac{E_1}{E_2}-5\ln\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \tag{5}$$

式中：E_1、E_2 为通过光电探测设备并修正获得；λ_1、λ_2 为选定窄带滤光片的中心波长。因此，当双波长选定时，温度 T 是双波长对应光谱辐射强度比值的单值函数。

1.2　双波长优选

双波长图像测温法中波长的选择对测量精度与灵敏度都有很大的影响。为了对双波长辐射测温法波长进行优选，定义双波长辐射强度比 $R(T)$ 与测温灵敏度 $S(T)$ 作为分析对象，其表达式为

$$R(T)=\frac{E_1(\lambda_1,T)}{E_2(\lambda_2,T)}=\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5\cdot\exp\left[\frac{C_2}{T}\cdot\left(\frac{1}{\lambda_2}-\frac{1}{\lambda_1}\right)\right] \tag{6}$$

$$S(T)=\frac{\partial R(T)}{\partial T}=-\frac{C_2}{T^2}\cdot\left(\frac{1}{\lambda_2}-\frac{1}{\lambda_1}\right)\cdot\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5\cdot\exp\left[\frac{C_2}{T}\cdot\left(\frac{1}{\lambda_2}-\frac{1}{\lambda_1}\right)\right] \tag{7}$$

为了更好的满足双波长辐射测温反演，在选择双波长时，双波长辐射强度比值 $R(T)$的变化范围要尽可能宽以便有更好的温度分辨率，同时测温灵敏度 $S(T)$值尽可能大且在测温范围内相对稳定[20-22]。根据上述原则，综合考虑光电探测常用 400～1 000 nm 光谱响应范围以及窄带滤光片常用带宽 10～30 nm，以 400～1 000 nm 为双波长筛选波段范围，双波长间隔选取 30，50，80，120，150 和 200 nm，针对 773～1 973 K 温度范围，按照步长 20 nm 进行双波长优选，获得 λ_1=680 nm、λ_2=760 nm 为最优双波长组合。680～760 nm 双波长辐射强度比与测温灵敏度如图 3 所示。

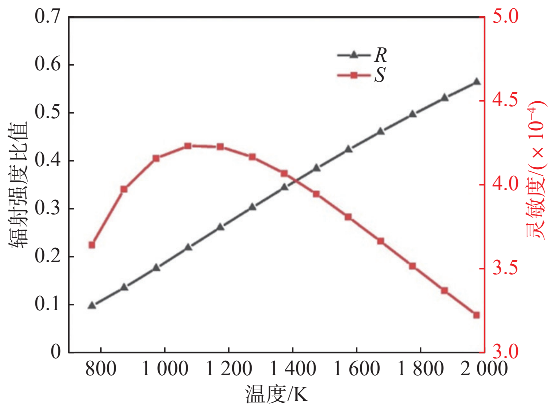


图 3　680～760 nm 双波长辐射强度比和测温灵敏度

Fig. 3　680-760 nm dual wavelength radiation intensity ratio and temperature sensitivity

2　实验装置与测量系统

由于工业相机采集得到响应值是通过光电转换后的相对强度，需要通过高温黑体辐射源进行响应标定修正得到绝对辐射强度，标定实验采用的高温黑体辐射源型号为 BR1450，温度范围为 100～1450 ℃，温度分辨率为 1 ℃，精度为±0.4%满量程，发射率为 0.99。图像采集采用的工业相机分辨率为 1936×1216，最大满帧帧率为 50 帧/s；镜头为一分二镜头，采用二色镜进行分光，透射 750～1100 nm，反射 300～750 nm，镜头总长 288 mm，视场角为 75°，焦距为 153 mm。采用的窄带滤光片中心波长分别为 680 nm 和 760 nm，带宽为 10 nm。进行标定实验时，将相机固定在光学升降平台上，通过光学导轨调整成像距离；图像采集通过软件触发，采集过程中需保证图像采集高温黑体炉靶面中的 S 型铂铑热电偶清晰成像。窄带滤光片通过镜夹固定在镜头前，如图 4 为 680 nm、760 nm 双波长相机响应标定实验装置。最后以黑体辐射理论计算值作为参考值，对双波长相机进行光电响应标定，获得其光电响应特性曲线。

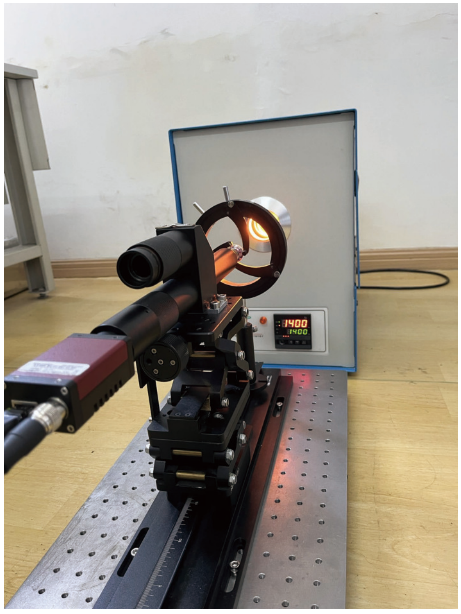


图 4　相机响应标定实验装置

Fig. 4　Camera response calibration experimental device

3　实验结果与分析

3.1　双波长图像测温结果分析

利用上述黑体炉标定实验系统，分别采集 1273～1673 K，温度间隔为 50 K(共 9 组)不同温度下的黑白黑体辐射图像。680 nm、760 nm 双波长相机的曝光时间分别设置为 3000 μs 和 2900 μs，成像距离设置为 245 mm，增益设置为 0，采集得到的 680 nm、760 nm 双波长辐射图像如图 5所示。黑体炉的辐射率接近 1，随着设定温度的升高，680 nm、760 nm 双波长辐射图像的响应值也随之升高。

以设定温度黑体辐射理论计算值作为参考，取黑体辐射图像中最大强度值为响应值，工业相

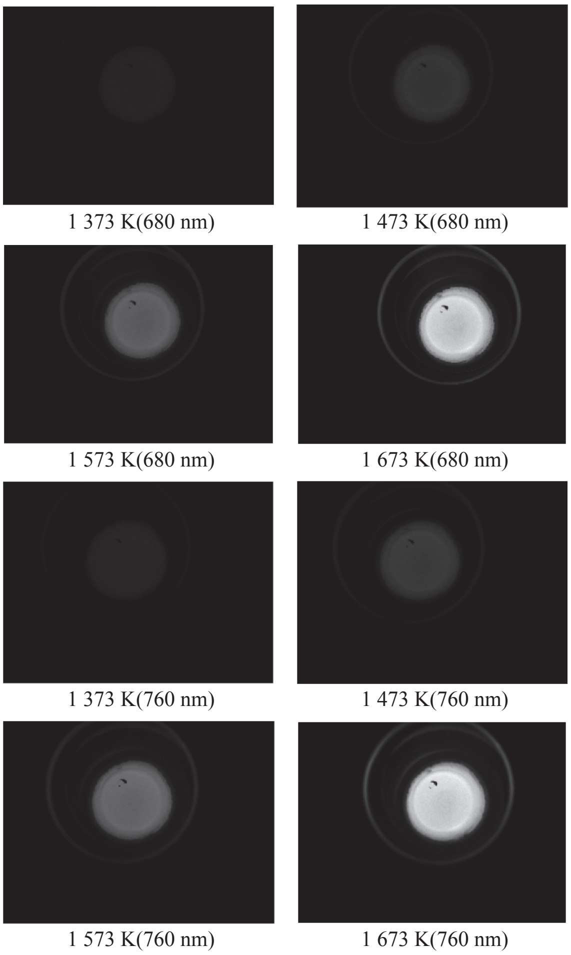


图 5　典型温度黑体双波长辐射图像

Fig. 5　Typical temperature blackbody dual-wavelength radiation image

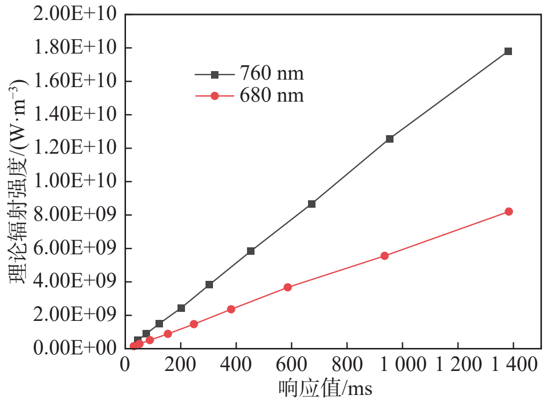


图 6　680 nm、760 nm 双波长相机光电响应特性

Fig. 6　Optoelectronic response characteristics of 680 nm and 760 nm dual wavelength cameras

机分别在 680 nm、760 nm 双波长的响应特性曲线如图 6 所示，可见双波长相机的响应特性呈线性增加趋势。

为了验证设计的双波长图像测量系统的测温精度与不确定度，将黑体辐射源温度设置为 1383.2，1393.2，1403.2，1413.2，1433.2，1443.2，1453.2 和 1463.2 K，按照光电响应修正与双波长测温原理得到测温结果，如表 1 所示。其中，每组工况采集 6 组双波长图像，对 6 组测量结果进行不确定度分析，表中测温结果表达为：测温平均值±测量不确定度，可见对于标准黑体辐射测温，双波长辐射测温重复性与稳定性较好，不确定度优于±0.6 K。以黑体炉设定温度为参考值，双波长图像测温相对偏差在 1% 以内，验证了系统测温准确性。

表 1　双波长图像测温系统测量结果

Tab. 1　Measurement results of dual wavelength image temperature measurement system

参考温度/K	测量温度（平均值±不确定度）/K	相对偏差/%
1 383.2	1 373.6±0.6	0.69
1 393.2	1 383.3±0.2	0.71
1 403.2	1 393.0±0.2	0.72
1 413.2	1 402.7±0.2	0.74
1 433.2	1 422.8±0.4	0.72
1 443.2	1 432.7±0.3	0.72
1 453.2	1 442.5±0.4	0.73
1 463.2	1 451.8±0.4	0.78

3.2　曝光时间对测温的影响分析

通过控制曝光时间的方式来调整进光量是使得图像响应值处在较高信噪比区域的常用方式，但曝光时间与成像设备响应值之间并非一定为线性关系，这会给测温带来误差。为讨论 680 nm、760 nm 双波长相机的响应值与曝光时时间之间的关系，将黑体炉温度设置为 1 400 ℃，移动光学导轨使得成像距离为 245 mm，680 nm、760 nm 双波长相机曝光时间分别为 500 μs、1 000 μs、1 500μs、2 000 μs、2 500 μs、3 000 μs 和 400 μs、900 μs、1 400μs、1 900 μs、2 400 μs、2 900 μs。获得的 680 nm 和 760 nm 双波长相机的响应值与曝光时间的关系如图 7 所示，可见 680 nm、760 nm 双波长相机的响应值与曝光时

间是线性关系，仪器的响应值随着曝光时间的增大而增加。

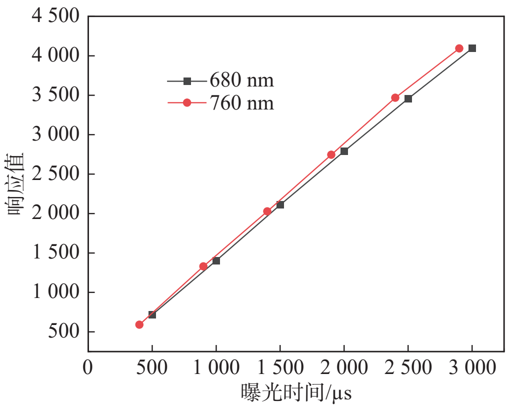


图 7　响应值随曝光时间的变化

Fig. 7　The variation of response value with exposure time

为了衡量线性度，用 R^2 表示，成像设备各波段下的响应值与曝光时间用一阶方程来拟合，拟合时模型将存在误差，R^2 计算方法为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y-\hat{y})^2}{\sum (y-\bar{y})^2} \tag{8}$$

式中：y 为真实数据；$\bar{y}$ 为数据平均值；$\hat{y}$ 为拟合数据。

通过线性度计算发现，680 nm、760 nm 双波长相机的响应值随曝光时间变化的 R^2 均超过 0.99，说明双波长相机响应值与曝光时间之间线性度较好。并且在探究光电响应关系时，本研究建立的是理论黑体辐射强度与单位曝光时间下的响应值之间的关系。因此对于确定的测温对象，仅改变曝光时间不会影响测温结果。为了更直观的显示曝光时间对测温的影响，将采集得到的不同曝光时间下的黑体图像，根据获得的双波长光电响应关系修正，得到 1400 ℃ 下黑体的实际辐射强度；再利用推导的双波长测温公式计算出温度，测得的不同曝光时间下的黑体炉靶面温度如表 2 所示。

3.3　成像距离对测温的影响分析

随着成像距离的增大，相机接收的光强会受到一定程度的衰减，从而影响响应值的变化，最终影响测温精度，因此有必要探究仪器响应值与成像距离的关系，并进一步探究测温精度受成像距离变化的影响。将黑体炉温度设置为 1400 ℃，680 nm、760 nm 双波长相机曝光时间分别设置为 3000 μs、2900 μs，移动光学导轨使得成像距离分别为 245，275，305，335，365 和 395 mm，得到双波长相机的响应值随成像距离的变化关系如图 8 所示，可见随着成像距离的增大双波长相机的响应值都减小。根据获得的双波长光电响应关系将响应值进行修正得到 1400 ℃ 下黑体的实际辐射强度，在利用推导的双波长测温公式计算出温度，测得的不同成像距离下的黑体炉靶面温度如表 3 所示，可见成像距离的改变对测温精度的影响很小，测温相对偏差均在 3.5% 以内，因此在实际测温过程中，只需要调节合适的曝光时间，以保证辐射图像响应值处于较高信噪比并成像清晰，可忽略成像距离对测温的影响。

表 2　不同曝光时间下温度测量结果

Tab. 2　Temperature measurement results at different exposure times

曝光时间/μs	参考温度/K	测得温度/K	相对偏差/%
500/400	1673.2	1678.8	0.3
1000/900	1673.2	1638.2	2.1
1500/1400	1673.2	1658.2	0.9
2000/1900	1673.2	1646.3	1.6
2500/2400	1673.2	1631.8	2.5
3000/2900	1673.2	1631.0	2.5

3.4　增益对测温的影响分析

增益作为相机可调参数之一也会改变响应值，将黑体炉温度设置为 1400 ℃，移动光学导

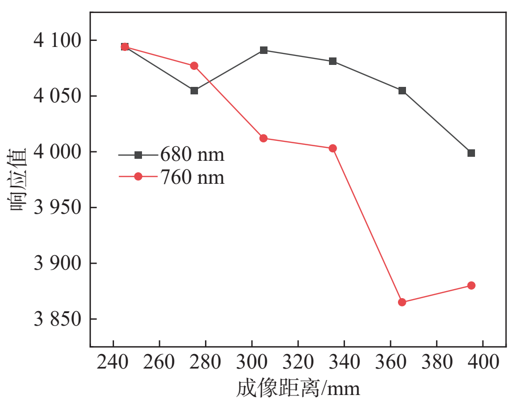


图 8　响应值随成像距离的变化

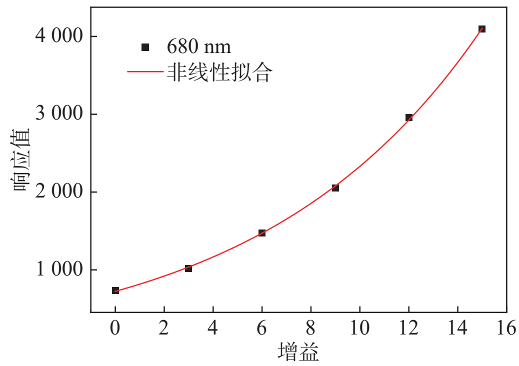
Fig. 8　The variation of response value with imaging distance

表 3　不同成像距离下温度测量结果

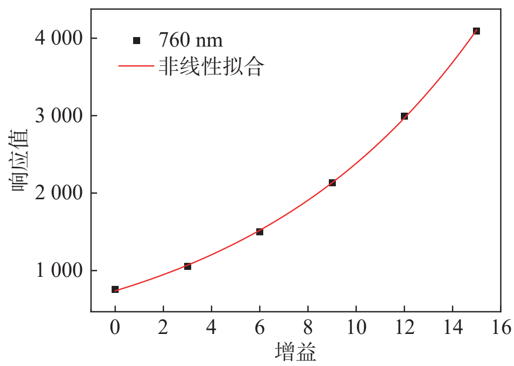
Tab. 3　Temperature measurement results at different imaging distances

成像距离/mm	参考温度/K	测得温度/K	相对偏差/%
245	1 673.2	1 631.0	2.5%
275	1 673.2	1 619.9	3.2%
305	1 673.2	1 648.2	1.5%
335	1 673.2	1 646.4	1.6%
365	1 673.2	1 670.6	0.2%
395	1 673.2	1 645.0	1.7%

轨使得成像距离为 245 mm，680 nm、760 nm 双波长相机曝光时间分别设置为 520 μs、500 μs，采集增益为 0、3、6、9、12、15 下的高温黑白图像，得到的双波长相机响应值与增益之间的关系如图 9 所示。通过非线性函数拟合可以发现，680 nm、760 nm 双波长相机的响应值与增益之间呈指数非线性关系。由于双波长相机的响应值随增益都是非线性变化，因此需要将有增益的响应值根据各自非线性关系校正到无增益时的响应



(a) 680 nm



(b) 760 nm

图 9　响应值随增益的变化

Fig. 9　Response value varies with gain

值再进行温度反演，无增益直接与有增益校正处理温度测量结果如表 4 所示。通过增益非线性校正后，双波长图像测温系统依然能保持 3% 以内的相对偏差。

表 4　不同增益下温度测量结果

Tab. 4　Temperature measurement results under different gains

处理方法	参考温度/K	测得温度/K	相对偏差/%
无增益直接处理	1 673.2	1 637.9	2.1
有增益校正处理	1 673.2	1 625.0	2.9

4　结　论

本文以高温标准黑体辐射源为研究对象，探究了曝光时间、成像距离及增益对双波长图像测温精度的影响，为实际工业现场双波长测温提供了参考。由于本实验研究依赖的是标准黑体辐射热源，因此设计搭建的双波长图像测温系统精度高、稳定性好。在实际工业测温中，高温多相的复杂环境会引起很多干扰，这会给双波长图像测温带来极大挑战，因此还需进一步根据实际工业现场进行相关温度修正才能达到较好的测温效果。本文通过实验研究得到的主要结论如下。

（1）通过理论分析选择 680 nm、760 nm 波长对搭建标准高温黑体辐射双波长图像测温实验系统，通过设定不同的温度开展标准黑体辐射双波长辐射图像测量，基于热辐射定律建立了温度反演算法，并实现了温度测量误差与不确定度评价。

（2）开展曝光时间、成像距离与增益等影响因素实验研究，结果显示不同曝光时间及成像距离下双波长辐射强度变化规律一致，双波长测温法可通过双波长强度比值消除曝光时间及成像距离对测温结果的影响，测量相对偏差均在 3.5% 以内；不同增益下，双波长辐射强度随增益的增长符合指数规律，因此需要对增益下的辐射强度进行校正，将其回归到无增益强度值后再进行处理，以消除增益响应规律对温度测量结果的影响，增益校正测温相对偏差仍在 3% 以内。

参考文献:

[1] 邓伟, 张宇, 刘常鹏, 等. 钢坯在线测温技术在加热炉加热制度优化中的应用 [J]. 冶金能源, 2007, 26(3): 54 – 57.

[2] 周怀春, 李框宇, 安元, 等. 燃煤电站锅炉及工业窑炉三维燃烧温度分布监测研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(10): 1 – 14.

[3] ROSS-PINNOCK D, MAROPOULOS P G. Review of industrial temperature measurement technologies and research priorities for the thermal characterisation of the factories of the future[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(5): 793 – 806.

[4] KUS A, ISIK Y, CAKIR M C, et al. Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting[J]. Sensors, 2015, 15(1): 1274 – 1291.

[5] NI H, FAN R, HU H H, et al. Synchronized measurement method of burning rate and combustion temperature of a solid propellant specimen[J]. Applied Optics, 2024, 63(13): 3420 – 3429.

[6] 钱袁栋, 马增益, 张艺颗, 等. 基于图像处理的重金属污泥熔融温度场研究 [J]. 能源工程, 2022, 42(5): 48 – 52, 67.

[7] KETUI D, CHI F, SHAN G. Single wavelength and ratio pyrometry reflection errors in temperature measurement of gas turbine blade[J]. Measurement, 2016, 86: 133 – 140.

[8] LI D, FENG C, GAO S, et al. Effect of pyrometer type and wavelength selection on temperature measurement errors for turbine blades[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 94: 255 – 262.

[9] HIJAZI A, SACHIDANANDAN S, SINGH R, et al. A calibrated dual-wavelength infrared thermometry approach with non-greybody compensation for machining temperature measurements[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(2): 025106.

[10] LIU H W, ZHENG S. Measurement of temperature and wavelength-dependent emissivity distributions using multi-wavelength radiation thermometry[J]. Optics Communications, 2020, 472: 125895.

[11] PING L, XIE J W, YANG B, et al. Research on on-line measurements of radiation parameters for high-temperature particles based on radiation spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(2): 640 – 645.

[12] 孙尚. 高温背景下的辐射测温方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.

[13] 李东. 燃气轮机涡轮叶片辐射测温方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

[14] SUN J, HOSSAIN M M, XU C L, et al. Investigation of flame radiation sampling and temperature measurement through light field camera[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 121: 1281 – 1296.

[15] VALLABH C K P, ZHAO X Y. Melt pool temperature measurement and monitoring during laser powder bed fusion based additive manufacturing via single-camera two-wavelength imaging pyrometry (STWIP)[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 486 – 500.

[16] MARSH A W, WANG G T, HEYBORNE J D, et al. Time-resolved size, velocity, and temperature statistics of aluminum combustion in solid rocket propellants[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(3): 4417 – 4424.

[17] DOI R, KUWAHARA T, YAMAMOTO K, et al. Surface temperature of agglomerated aluminum particles in a reaction zone[J]. Journal of Propulsion and Power, 2017, 33(6): 1351 – 1357.

[18] YAO X R, LAN R M, LIU X F, et al. High throughput dual-wavelength temperature distribution imaging via compressive imaging[J]. Optics Communications, 2018, 410: 287 – 291.

[19] GAO S, ZHANG X Q, CHEN L W, et al. Radiation temperature measurement methods for engine turbine blades and environment influence[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 123: 104204.

[20] ECKE W. Optical fibre grating strain sensor network for X-38 spacecraft health monitoring[C]//Proceedings of SPIE 4185, Fourteenth International Conference on Optical Fiber Sensors. Venice: SPIE, 2000: 41850 K.

[21] OBERSON P, HUTTNER B, GUINNARD O, et al. Optical frequency domain reflectometry with a narrow linewidth fiber laser[J]. IEEE photonics technology letters, 2000, 12(7): 867 – 869.

[22] YU Y L, LUI L, TAM H, et al. Fiber-laser-based wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating sensor system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(7): 702 – 704.

（编辑: 张　磊）