

引用格式: HUANG Wendan, MA Heng, LIU Zhanwei. Analysis of the Influencing Factors of Radiation Temperature Measurement Range of a Single Camera at a Certain Exposure[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(2):0211003
黄文丹,马恒,刘战伟.曝光一定时单相机辐射测温范围的影响因素分析[J].光子学报,2023,52(2):0211003

曝光一定时单相机辐射测温范围的 影响因素分析

黄文丹,马恒,刘战伟

(北京理工大学宇航学院,北京 100081)

摘要:针对单相机单波长测温 and 比色测温过程中测温范围较窄的问题,以单波长测温过程为基础,推导了相机传感器动态范围和工作波长对单相机测温范围影响的理论公式,并对波段选取过程中的影响因素进行了分析。理论分析结果表明:相机动态范围和波长的选取限制了一次曝光时测温范围的最大跨度值,在相机传感器唯一确定时,相机动态范围一定,根据波段选取原则选定工作波段,选定估计温度范围下限之后,由公式即可确定待测温度上限,再根据实际测温范围调整波段和估计测温下限;配合调节曝光及光圈,充分利用相机传感器的全动态范围,可实现单相机辐射测温法中宽温度范围的测量。此外,通过涡流加热实验和熔池温度场测量实验对上述影响因素进行验证,选取更优波长和更优曝光时间,可提高单次测温跨度至少 40%,为单相机测温技术的具体实施提供技术参考。

关键词:光学测量;宽测温范围;辐射测温;相机成像;动态范围;比色测温技术

中图分类号:TK311

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235202.0211003

0 引言

温度检测对工业生产^[1]、材料冶金^[2]、航天军工^[3]和日常生活等都具有重要意义。常见的温度测量方法大致分为两类:接触法和非接触法^[4]。接触法中测得的是被测物体某一可接触部位的局部温度,无法表现整个待测物体温度场的情况。非接触式测温法相比传统接触式测温具有测温范围广、响应时间短、可实时动态地测量待测物体温度场等优点,目前辐射测温法是非接触式测温技术中的常见手段。基于单相机传感器的辐射测温技术^[5]将电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)成像技术、数字图像处理技术和辐射测温方法相结合,可以实现温度场的实时在线测量,是近年来温度检测领域的研究重点。但实际应用中常常受相机传感器性能以及辐射测温方法的限制,传感器响应饱和而无法正确测量温度,无法满足对温度测量范围的需求。

在辐射测温技术中单色测温法通常是测量某一特定波长附近范围的辐射能量,以此推算物体的温度,易受环境和待测物体本身状态的干扰,应用并不十分广泛。当前数字图像测温方法大多采用比色测温方法,比单色测温法精度高。将相机传感器和比色测温技术结合起来实现温度测量的方式,可以有效避免不同光路以及不同传感器性能差异所带来的误差。TANG Y^[6]采用改进的双色方法进行碳化硅材料火焰加热实验,测得温度范围仅有 750~1 000 K。孙华杰等^[7]采用比色测温与比例-积分-微分控制策略相结合的方法实现了熔池温度范围 1 300~1 800 °C 的闭环控制研究。FIRAO V 和 WOJCIK W^[8]采用互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)图像传感器 MT9V034C12STC,结合辐射测温技术,实现了 1 100~2 000 K 温度范围的高精度测量。郝策^[9-11]利用中心波长分别为 790 nm 和 900 nm 的滤

基金项目:国家自然科学基金(No.11972084)

第一作者:黄文丹,3120200007@bit.edu.cn

通讯作者:刘战伟,liuzw@bit.edu.cn

收稿日期:2022-10-31;录用日期:2022-12-05

<http://www.photon.ac.cn>

光片,结合 Sony IMX252 CMOS 型号的相机传感器,用比色测温法测量了激光网状成形(Laser Engineered Net Shape, LENS)增材制造过程中的熔池温度场,实验过程中发现曝光时间一定时的单次测温范围为 1 400~2 600 K。目前单相机传感器的辐射测温范围较窄,孙元等^[12]发现在 CCD 镜头前加高衰减率的中性滤光片可防止相机传感器出现饱和,以扩大测温范围,但效果有限,仍难以满足高温测量的需求。根据曝光量控制以及图像融合处理技术去扩大 CCD 测量动态范围^[13-14]的方法正被广泛应用,但无论是图像动态范围的硬扩展还是软扩展,都需要采集不同曝光快门下的多幅图像去合成宽动态范围的图像,比单次曝光成像过程复杂,且图像融合存在因插值引入的误差,导致图像精度不足。对于单相机传感器辐射测温过程,没有相关理论去分析如何有效利用全动态范围实现宽温度范围测量。因此,本文旨在分析相机传感器动态范围一定时,测量系统中的元器件、参数选取对于测温范围的影响,为实现单相机宽辐射测温范围提供参考。

1 辐射测温原理

1.1 普朗克黑体辐射定律

物理学家普朗克提出了黑体普朗克辐射定律^[15],表述了黑体的光谱辐射出射度与波长、温度的某种关系,为辐射测温技术提供了理论基础,其公式表述为

$$M_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1)$$

式中, $M_b(\lambda, T)$ 为黑体光谱辐射出射度, λ 为波长, T 为热力学温度; 第一辐射常数 $c_1 = 3.741\,774\,9 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; 第二辐射常数 $c_2 = 1.438\,775\,2 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。由黑体辐射定律表达式,可以绘制不同温度下黑体辐射的不同波长的强度曲线,如图 1 所示。

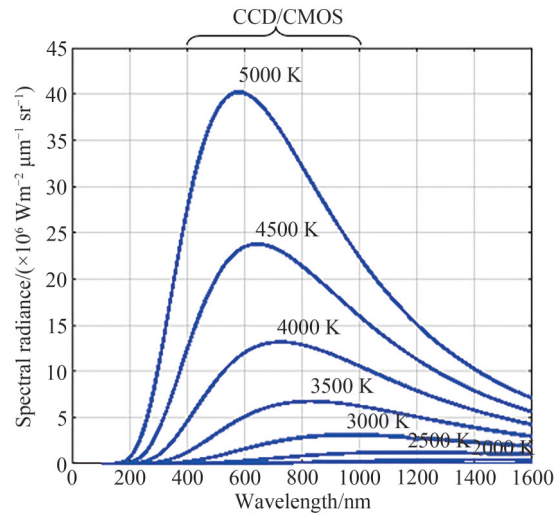


图 1 理想黑体在不同温度下的光谱辐射特性

Fig. 1 Spectral radiation characteristics of an ideal blackbody at different temperatures

物理学家维恩提出维恩位移定律,即黑体某一温度下的峰值波长 λ_m 与该温度数值的乘积为一常数。具体公式表达为

$$\lambda_m T = 2\,897 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2)$$

一般来说,若满足 $c_2/\lambda T \gg 1$,则维恩公式可以代替黑体普朗克公式使用,即

$$M_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad (3)$$

1.2 单色测温原理

自然界中不存在真正的黑体,于是引入发射率的概念来描述实际物体的辐射出射度,即

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot M_b(\lambda, T) \quad (4)$$

式中, $M(\lambda, T)$ 表示实际物体的辐射出射度, $\epsilon(\lambda, T)$ 表示实际物体的光谱发射率。发射率数值范围在0到1之间,一般通过标定得到。在满足维恩公式的适用条件下,将式(3)和(4)结合,推导得到单波长辐射测温计算公式为^[16]

$$T = \frac{c_2}{\lambda \cdot [-\ln M(\lambda, T) - 5 \ln \lambda + \ln \epsilon(\lambda, T) + \ln c_1]} \quad (5)$$

当探测器类型是CCD/CMOS图像传感器时,辐射出射度经光电转换等过程之后以灰度 $G(x, y)$ 的形式表现,在相机未饱和的条件下相机接收的强度与图像灰度近似成比例关系,表达式为

$$G(x, y) = k_1 \cdot M(x, y) \quad (6)$$

式中, k_1 是由单色测温系统决定的比例系数。结合式(5)和(6)可知,可将发射率系数与比例系数组合进行整体标定,之后通过相机获取灰度信息,代入单波长测温公式(5)便可实现非接触式温度测量。

1.3 比色测温原理

假设待测物体为灰体,且满足维恩公式的适用条件, λ_1 和 λ_2 是比色测温法选取的两个波长。在两种波长下物体光谱辐射出射度为

$$M(\lambda_1, T) = \epsilon(\lambda_1) \cdot \frac{c_1}{\lambda_1^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right) \quad (7)$$

$$M(\lambda_2, T) = \epsilon(\lambda_2) \cdot \frac{c_1}{\lambda_2^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right) \quad (8)$$

联立式(7)和(8)变换得到比色测温公式为

$$T = \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{M(\lambda_1, T)}{M(\lambda_2, T)} - \ln \frac{\epsilon(\lambda_1)}{\epsilon(\lambda_2)} + 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (9)$$

若选取CCD/CMOS图像传感器为探测器,两种波长下的辐射出射度比值与成像灰度比值的的关系为

$$\frac{M(\lambda_1, T)}{M(\lambda_2, T)} = k_2 \frac{G_1}{G_2} \quad (10)$$

式中, k_2 是由比色测温系统决定的比例系数。将式(10)代入式(9),可得最终比色测温公式为^[17]

$$T = \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{G_1}{G_2} + \ln k_2 + \ln \frac{\epsilon(\lambda_2)}{\epsilon(\lambda_1)} + 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (11)$$

波长 λ_1 和 λ_2 接近时,可认为 $\epsilon(\lambda_1) \approx \epsilon(\lambda_2)$ 。比例系数 k_2 可通过黑体炉标定等方法得到,再利用相机得到两种波长下的灰度比值,代入式(11)计算得到比色温度值。

1.4 辐射测温法的测温误差影响机制分析

参考单波长辐射测温公式,在单色测温过程中测温误差的影响机制主要从以下三个方面来分析。第一,对发射率的准确标定在很大程度上影响着测温精度^[18]。单色测温法适用于某些发射率已知或发射率较易于标定的材料的温度测量,而对于某些无法直接准确标定其发射率的温度场(如熔池表面温度场),因发射率无法测量会引入较大的测温误差,于是物体材料发射率的在线测量是单色测温法中迫切需要解决的问题。第二,滤光片的选取在一定程度上影响测温精度。测温过程使用窄带宽滤光片近似为工作波长,从这个角度分析,滤光片的带宽越小越好,并且滤光片透过率曲线的起止斜率越陡测温精度越高;但从另一角度分析,滤光片带宽越窄,相机需要调节增益等相关参数以增强对特定波段的响应,反而引入更大的噪声,所以滤光片带宽并非越小越好。另外,由于辐射测温法是利用物体辐射光进行测温,如果测温波段选在物体因漫反射或环境光等影响下产生额外光强所在的波段,那么也会对测温精度造成较大的影响。第三,辐射测温法基于相机采集的灰度图像计算温度,相机特性与其采集的图像质量在一定程度上对其有较大影响。常用相机像素深度在8 bit,若选用10 bit及以上像素深度的相机,可以获得更丰富的灰度值分级层次,使得图像对于光强的描述更加细腻;也可选用高信噪比的相机,结合图像滤波处理算法,以减小图像噪声,有助

于提高测温精度。

相较于单色测温法中需要考虑发射率如何准确测量的问题,比色测温方法在所选工作波段近似的时候,通常可以忽略发射率和采集图像过程中的光学噪声对测温精度的影响,精度大幅提升,因此适用于像激光打印熔池这种无法测量真实发射率的材料。另外考虑到比色测温公式中存在较多比值关系,因相机引起的噪声也可以通过比值而近似消去。但是由滤光片选取而引入的测温误差同样存在于比色测温法中。HAO C^[9]利用单相机比色测温法测量LENS工艺熔池温度场,利用黑体炉验证了所搭建的测量系统具有较高的测温精度,在600~3 000 °C范围内测量误差小于1%,满足熔池温度场在线测量的需求。

2 测温范围理论分析

2.1 相机的动态范围

CCD/CMOS图像传感器是目前较为广泛用于记录数字图像的探测器。通过拍摄待测物体图像信息,经CCD/CMOS面阵感光、光电转换、模拟信号和A/D转换,最终以像素矩阵记录数字图像。动态范围是CCD/CMOS图像传感器的一项重要评价指标,反映的是图像传感器能够在同一帧图像中同时探测到的最大光强信号和最小光强信号的范围。从接收光能的角度出发,CCD/CMOS图像传感器的动态范围可以被定义为

$$D_R = 20 \lg \left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \right) \quad (12)$$

式中, I_{\max} 和 I_{\min} 分别表示探测器可接收最大非饱和光强和最小可探测光强,单位为lm; D_R 表示动态范围,单位为dB。

动态范围也可以通过单位面积接收光强(即光照度)的范围来表示,即

$$D_R = 20 \lg \left(\frac{E_{\max}}{E_{\min}} \right) \quad (13)$$

式中, E_{\max} 和 E_{\min} 分别表示探测器可接收最大非饱和光照度和最小可探测光照度,单位为lx。目前常见的CCD/CMOS图像传感器的动态范围一般在60~80 dB,根据式(14)可知, $\frac{E_{\max}}{E_{\min}}$ 的取值范围在1 000~10 000之间。

2.2 单色测温过程

在辐射测温法的实际应用中,有很多因素会影响相机单色测温过程,进而影响相机的测温范围。对于相机成像过程中各结构之间能量转化的模型描述如图2所示^[19],首先假设待测物体为朗伯辐射体,同时不考虑背景环境对测温的影响。

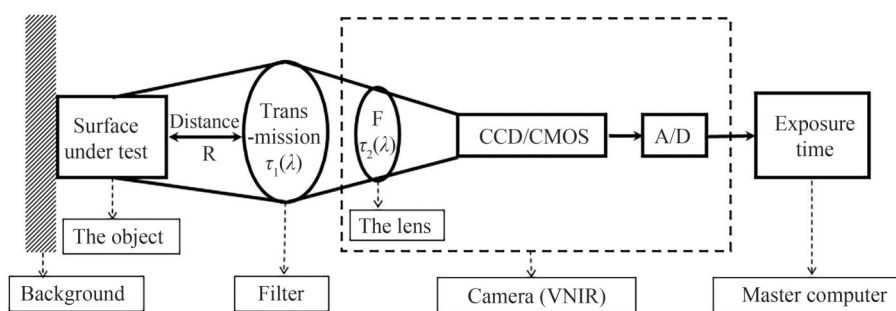


图2 相机成像系统模型

Fig. 2 Camera imaging system model

待测物体可拍摄面积为 S ,温度为 T ,发射率为 $\epsilon(\lambda)$,滤光片的光谱透过率为 $\tau_1(\lambda)$,黑体光谱辐亮度为 L_0 。参考式(3),当待测表面与相机间距为 R 时,待测物体通过滤光片之后的辐射能量为

$$L_1 = L_0 \times \frac{S}{R^2} \times \tau_1(\lambda) \times \epsilon(\lambda) = \frac{M_b(\lambda, T)}{\pi} \times \frac{S}{R^2} \times \tau_1(\lambda) \times \epsilon(\lambda) \quad (14)$$

待测物体经 CCD/CMOS 探测器感知后的辐射能量为

$$L_2 = L_1 \times \frac{1}{4F^2} \times \tau_2(\lambda) \quad (15)$$

式中, F 表示相机的光圈数, $\tau_2(\lambda)$ 表示光学镜头对不同波段的光谱透过率。当 CCD/CMOS 相机的光谱响应效率为 $S(\lambda)$ 时, 光电转换后的模拟信号所表示的辐射能量值为

$$L_3 = S(\lambda) \times L_2 \quad (16)$$

模拟信号经模拟数字(Audio Digital, AD)转换后变为数字信号时, 受 AD 转换性能影响造成一定程度的能量耗散, 此时相机中数字信号所表示的辐射能量值为

$$L_4 = \alpha \times L_3 \quad (17)$$

式中, α 表示 AD 转换过程的能量耗散系数。最后, 辐射能量传输到上位机, 以灰度值的形式表示。当曝光时间为 t 时, 待测物体最终成像所代表的辐射能量为

$$L_5 = L_4 \times t \quad (18)$$

综合式(14)~(18)来看, 在相机成像过程中, 当曝光时间一定时, 待测物体最终成像在相机中的辐射能量与物体本身辐射能量存在以下关系

$$L_5 = f(\lambda) \times L_0 \quad (19)$$

式中, $f(\lambda)$ 表示成像过程中因光学系统、相机性能等因素引起的衰减损耗系数, 在光学系统一定时, 该项系数仅与波长相关。

相机成像过程中相机接收的能量均以辐射量为计量尺度, 辐射量是描述物体电磁辐射的物理量。而 2.1 节中描述相机动态范围是以光学量为计量尺度, 光学量是视觉感受度量。要想将相机动态范围和相机成像过程结合起来理论分析辐射测温法的测温范围, 就需要知道辐照度与光照度之间的转换关系^[20], 即

$$E = L \times \phi(\lambda) \quad (20)$$

式中, E 表示光照度, L 表示辐照度, $\phi(\lambda)$ 表示辐照度与光照度之间的转换系数, 该系数与波长有关, 不同光源下转换系数也不同。

综合式(19)和(20)来看, 当相机动态范围为 72 dB 时, 可知相机接收最大与最小光照度之比为 3 981.08。在波长一定时, 根据光照度与辐照度之间的转换关系, 可认为相机接收最大与最小辐照度之比为 3 981.08, 在相机参数一定时, 等价于待测物体本身辐射能量最大与最小之比为 3 981.08^[21]。表达式为

$$\frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \frac{L_{0\max}}{L_{0\min}} = \frac{M_{\max}}{M_{\min}} = \frac{M(\lambda, T_{\max})}{M(\lambda, T_{\min})} = \exp\left[\frac{c_2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{T_{\max}}\right)\right] = 3\,981.08 \quad (21)$$

从式中可看出, 单相机辐射测温法的测温范围受相机动态范围的影响最大。当相机动态范围确定后, 单波长测温法中的单次测温范围(光圈值及曝光时间固定)受波长影响而变化。

2.3 波长对于单相机测温范围的影响

单波长测温时的单次测温范围受波长选取的影响。根据式(21), 在相机动态范围 72 dB 一定时, 单波长测温的中心波长与测温范围的最值之间存在一定关系。选取彩色相机的三个通道 R/G/B 对应波长 460 nm、550 nm 和 650 nm 以及两个近红外光的波长 780 nm 和 905 nm, 绘制单波长测温的单次测温范围上限与下限之间的关系。如图 3 所示, 以单相机辐射测温的温度上下限相差不低于 50 K 为测温跨度下限, 此时相机可测得最小的单次温度范围为 400~448 K。从图中带有三角形标记点的曲线来看, 当单波段测温所选取的中心波长在 550 nm 时, 如果想要测量 800 K 的下限温度, 那么单次测温范围上限可达到 1 073 K, 合计单次测温跨度 273 K; 而如果测温下限在 1 500 K, 那

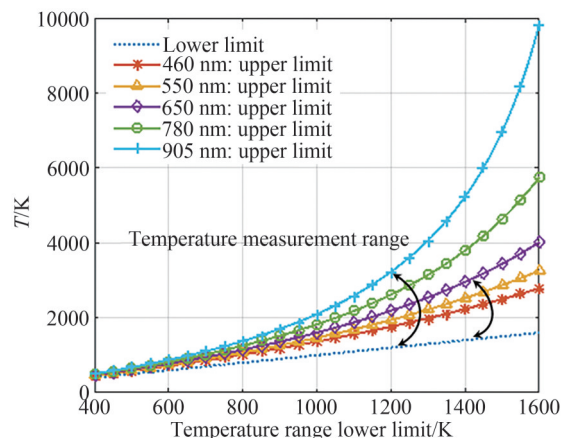


图3 不同波长下的单波长单次测温范围曲线
Fig. 3 Curves of single wavelength single temperature measurement range under different wavelengths

么单次测温上限可达到 2 868 K, 合计单次测温跨度有 1 368 K; 也可以实现下限 2 000 K, 上限 5 480 K 的单次测温跨度为 3 480 K 的温度测量。综合多条曲线来看, 在测温下限一致时, 波长越长, 可测得的温度上限越高。由此得出, 如果要在中低温区(1 200 K 以下)有较高的单次测温范围, 应选取中长波作为工作波长, 如在近红外、红外波段选取工作波长^[22-24], 对于高温区的测量(1 200 K 以上), 选取可见光波段作为工作波长就可得较宽的单次测温范围; 对于单波长测温法, 需要根据待测物体温度分布来选取恰当的工作波长以实现宽测温范围。

比色测温法的单次测温范围受多个因素影响。参考 1.3 小节, 比色测温法要求在两个工作波长下 CCD/CMOS 均未达到饱和。结合单波长测温范围的影响因素来看, 为了使测温范围尽可能宽泛, 除了增加相机的动态范围, 另外的可行性方案就是设计改变光学器件的参数使得两种波长下最终进入相机的能量最小值(或最大值)相同, 表达式为

$$E_{\min} = L_{\min} \times f(\lambda_1) \times \phi(\lambda_1) = \frac{M(\lambda_1, T_{\min})}{\pi} \times f(\lambda_1) \times \phi(\lambda_1) = \frac{M(\lambda_2, T_{\min})}{\pi} \times f(\lambda_2) \times \phi(\lambda_2) \quad (22)$$

当两种波长下进入相机的能量最小值近似时, 表现为同一曝光时间下相机对两个波长的响应近似相同, 避免出现其中一个波段下的灰度值过低或过饱和的情况, 以拓宽比色测温法的单次测温范围。从式(22)中可以看出, 待测物体本身的发射光谱、滤光片不同波段的透过率、镜头的光谱透过率、光照度辐照度转换系数以及相机的光谱响应率等都是和波长有关的数值, 实际实验中可从这几个因素来计算修正以达到拓宽单次测温范围的目的; 另外, 相机的曝光和光圈设置也是有效影响进入相机能量最小值的关键因素。参考式(18), 待测物体辐射进入相机的能量值在其他参数设置不变的条件下与曝光时间存在线性关系, 想要有效利用相机的全动态范围, 需要多次配合调整相机光圈和曝光时间组合, 以保证最终进入相机中的能量范围与相机可接收的能量范围分布尽可能一致, 最终可测得覆盖温度测量所要求的测温范围。

以比色测温法测量熔池温度分布为例, 选用相机传感器型号 SONY IMX250 CMOS, 其动态范围为 72 dB, 光路中所用滤光片中心波长分别为 780 nm 和 905 nm, 滤光片半带宽为 10 nm, 峰值透过率分别为 60% 和 70%, 相机的光谱响应在两个工作波长处的数值分别为 0.8 和 0.35。参考式(22), 忽略熔池本身在两个不同工作波长下的辐射能量以及两个波长下光照度与辐照度的转换, 得到两个波长下可进入相机的能量最小值之间的关系: $E_{\min}^{\lambda=780 \text{ nm}} = 1.7 \times E_{\min}^{\lambda=905 \text{ nm}}$ 。基于上述关系式绘制熔池温度测量在比色测温法中的单次测温范围, 如图 4 所示。以波长 780 nm 测温范围下限代表的能量代表相机可接收能量最小值, 图中阴影部分表示应用比色测温法所得测温范围。

对于系统的测温范围, 主要从两个方面进行分析, 包含比色测温方法本身的适用温度范围, 以及系统中所用到的光学元器件的适用温度范围。从比色测温方法的角度来看, 公式推导中用到了维恩公式, 该式存在适用条件为 $c_2/\lambda T \gg 1$ 。如, 在熔池测温过程一般选择近红外波段, 这里近似取 $\lambda = 900 \text{ nm}$, 当 $T = 5 000 \text{ K}$ 时,

$c_2/\lambda T \approx 3.2$, 因此粗略估计该方法测温上限不超过 5 000 K; 从相机本身考虑, 由于相机图像传感器自身曝光时间存在适用范围, 当待测物体温度低到一定程度, 无论怎么增大曝光时间和提高光圈值, 得到的灰度图像都过暗, 此时对应的温度值就是系统的测温下限。如使用大恒公司型号 MER-301-125U3M, 像素深度 8 bit 的相机进行静态测温测试发现, 当不锈钢待测物表面温度低于 690 °C 时, 所得图像灰度值与背景环境灰度没有较大差别, 因此估计系统测温下限约为 1 000 K。比色测温法由于本身方法所限, 需要考虑两个波长下同时使相机达到不饱和条件, 并且两种波长下进入相机能量的最小值不可能完全相同, 因此其单次测温跨度比两个工作波长以单波长测温法应用时较小的单次测温跨度还小, 且系统测温下限高于单波长测温法的系统测温下限。

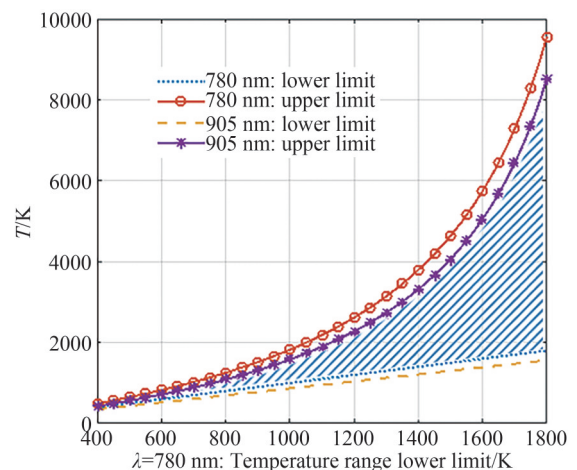


图 4 比色测温法的单次测温范围

Fig. 4 Single temperature measurement range of colorimetric thermometry

2.4 单相机辐射测温法中波段选取参考原则

辐射测温法中工作波段的选取受多方面因素的影响,合理选取工作波长对提高测温范围和测量精度具有重要的意义。

首先,所选波段对应的辐射强度应该尽量大,因为在测温过程中,辐射光经过窄带滤光片后强度会大幅衰减,而且在高速测量需求下,相机曝光时长往往较低,只有所选波段辐射能足够大,探测器才能够准确采集辐射信号。

第二,波段选取应该避免环境光强的干扰。当相机采集图像中包含物体因漫反射而产生的额外光强,会增大测量误差,因此所选波段的辐射光强度应远大于漫反射光的强度。如在测量电弧增材制造过程中的温度分布时,所选波段应避免电弧本身发射光谱的窗口期。

第三,不同探测器类型有着不同的响应波段,应在探测器的响应波段范围内进行选择。例如常见的基于硅材料的CCD和CMOS相机,其光谱响应波段范围约为350~1000 nm。尤其对于基于拜耳滤光片的彩色相机,在选取比色测温双波段时,应考虑避免所选波段在相机光谱曲线上存在过多的颜色串扰。

第四,比色测温法中所选的两个波段辐射能差异应尽量大,差异性越大,经过后端处理得到的两组图像灰度比值的范围越大,有利于提高系统的测温精度和灵敏度,但该距离不宜过大,否则将会违背“双波段发射率近似相等”的前提假设,应该在合理范围内尽量选择距离较大的两个波段。

第五,滤光片的选择在一定程度上影响着测温精度,比色测温原理是把滤光片的两个窄带波段近似当成双波长,因此滤光片的带宽越小越好,并且滤光片透过率的起止斜率越大越好;但滤光片的带宽越窄,相机接收光强越弱,需要调节相机增益等参数以增强响应,会使得相机引入更大的噪声,所以带宽需要通过实验测试的方式合理选取。

第六,根据2.3节的分析,为了提高系统的单次测温范围,在工作波段的选取上也需要考虑待测场的温度分布。在待测温度较低时,尽可能选取长波(如近红外波)作为工作波长;待测温度较高时,可选择可见光波段或近红外波段作为工作波长。

2.5 提高测温范围的方法及技术分析

提高单相机测温范围本质上就是提高单相机光强的动态测量范围,对于单相机辐射测温法中单次测温范围的提高,主要从三个方面来实现:首先,对于相机传感器型号,考虑选用动态范围更大的相机传感器(例 $D_R=80$ dB的高动态范围相机);其次,参考2.3和2.4节中对工作波段及滤光片带宽的选取,选择合适的工作波长可以有效提高单相机单次测温范围;最后,通过实验多次测试反复调整选取一组最优的相机曝光时间和光圈组合,使相机的全动态范围被充分利用,从而实现单相机单次宽辐射测温范围的测量。

考虑到单相机单次测温范围受相机传感器型号及波长限制,目前有较多方法和技术可以克服单相机单次测温范围的限制,实现宽动态测温范围的测量。从硬件上来说,由于单相机比色测温法时两个波段的能量会经过同一个曝光时间和光圈组合,于是考虑在相机前布置光路,在其中一个波段的传播光路中放置中性滤光片;也可利用双相机系统可各自调控两个波段曝光时间的优势,保证两个波段最终进入相机的最小辐射强度相等,以提高单相机比色测温法的单次测温范围。从软件上来说,两次或多次曝光法是目前扩展动态范围的方法中性能最好、应用最广的一个,基本思路就是在两个或多个不同曝光时间下快速拍摄图像,再进行图像合成等图像处理,从而得到宽动态测温范围。

3 实验验证与应用

为了验证本文所分析的影响单相机单波长测温法和比色测温法单次测温范围的因素,设计进行了涡流加热合金试件^[25]、熔池温度场在线测量等相关实验,在不同的温度范围内完成测温范围影响因素的实验验证。

3.1 涡流加热实验

利用如图5所示的感应涡流加热装置,给镍基合金块加热至预设温度,通过红外点式测温仪测量合金块表面的温度,实时反馈到控制器对电流调控,使得合金块温度保持在预设温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的范围内,在合金块温度稳定后,通过相机(装配窄带通滤光片)采集图像。预设温度范围为960~1260 K,每间隔50 K采集一次图像,记录合金块表面真实温度与对应温度下的平均灰度值,拟合灰度—温度曲线,估计单次测温范围。

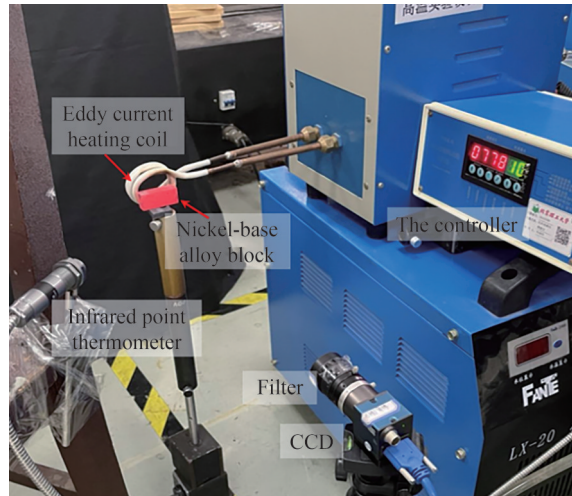


图5 感应涡流加热装置
Fig. 5 Induction eddy current heating device

涡流加热实验采用的相机型号为大恒图像MER2-502-79U3M/C,位深8 bit,传感器为SONY IMX250 CMOS类型,该型号传感器动态范围约为72 dB。所用滤光片型号为FB650-10和FB550-10(来源Thorlabs)。涡流加热实验分为两部分完成,第一部分采用两种波长的滤光片,在物距、光圈、曝光时间等其他条件不变时,分析波长选取对于单次测温范围的影响。其中曝光时间的设置需要多次调整以满足预设温度范围内相机成像灰度均不饱和的条件。在物距为38 cm,曝光时间为80 ms时,两个波长下分别拟合出的曲线如图6所示。

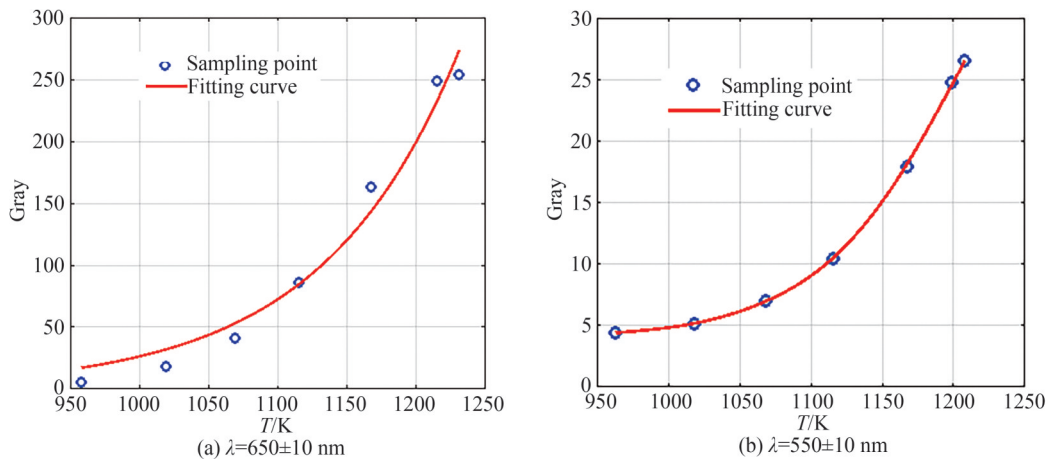


图6 两种波长下的灰度-温度拟合曲线
Fig. 6 Gray-temperature fitting curves at two wavelengths

从图6(a)中的拟合曲线来看,当灰度等级从10~250时(认为灰度等级低于10时受噪声影响严重,高于250时已达到饱和状态),对应650 nm波长所估计的单次测温范围为905~1225 K,合计测温跨度320 K,根据2.3节模拟计算分析,以905 K为测温范围最小值时,测温最大值可达到1374 K,测温跨度约为469 K,理论分析此波长下的单次测温跨度可提高至实验测温跨度的46%。而实际实验中测温跨度较低可能是以下几个原因:估计的测温范围是根据灰度等级10~250计算的,而不是从0~255计算;曝光时间的选择并不能够使得进入相机的能量最小值和相机可接收的能量最小值相等,因此实际实验测温跨度较小。图6(b)中对应550 nm波长所估计的单次测温范围为1135~1355 K,合计测温跨度220 K。参考2.3节在波长550 nm时单次测温范围的理论解为1135~1773 K,合计测温跨度638 K。理论上此波长下的单次测温跨度可提高至实验测温跨度的190%。对比两个波长下实验得到的单次测温跨度可知,波长为650 nm时的测温跨度比波长550 nm时的测温跨度提高了45%。从图中采样点结果可以看出,该合金试件加热过程中在550±10 nm波段下辐射能量较少,采样点对应的灰度等级都偏小,故而根据灰度值10~250来估计测温跨度存在较大偏差,导致估计测温范

围偏小,同时也反映出辐射测温中工作波长的选取需要考虑待测试件的发射光谱情况。结合图6中两种波长下的拟合曲线来看,如果以这两个波段作为比色测温法的工作波长,最终在曝光时间为80 ms时的单次测温范围为1 135~1 225 K,合计测温跨度90 K,远小于单波长测温法以550 nm为工作波长时的单次测温跨度,根据分析可知这是在不改动测量系统中影响比色测温范围的因素时的测温范围,与2.3节中的理论分析一致。

实验第二部分主要是验证曝光时间的选取对于单次测温范围的影响。工作波长为 650 ± 10 nm,物距为38 cm,在曝光时间分别为70 ms和80 ms时进行涡流加热实验,预设温度范围和实验第一部分保持一致。两个曝光时间下的灰度—温度拟合曲线如图7所示。由图7(b)可估计灰度等级从10~250时的单次测温范围为965~1 225 K,合计测温跨度260 K。

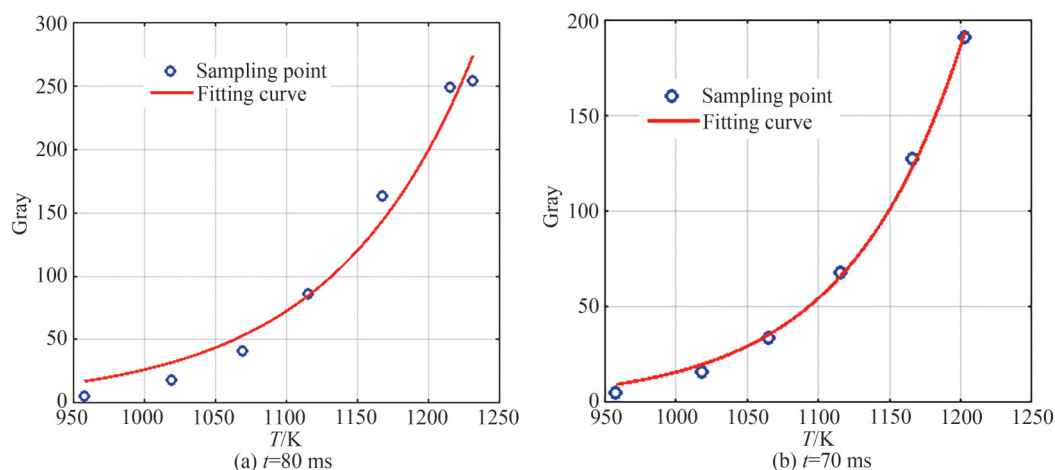


图7 两个曝光时间下的灰度—温度拟合曲线

Fig. 7 Gray-temperature fitting curve for two exposure time

对比图7(a)的估计单次测温范围,可以发现曝光时间的选取会影响单次测温范围,本实验中曝光时间为80 ms时的测温跨度更大,较曝光时间为70 ms时的测温跨度提高了23%。参考2.3节,曝光时间对于测温范围的影响,根本原因在于受曝光时间调制下的最终进入相机中的能量与相机可接收的最小能量是否相等。如果相等,表示传感器的全动态范围都被使用,才能得到理论分析中的最大单次测温范围,这也意味着需要多次尝试实验去设置正确的曝光时间。该部分实验设置的两个曝光时间并非最合适的曝光时间,因此实验估计的单次测温范围均低于理论分析的结果。

此外,物距、光圈值、镜头的透过率等因素都会影响最终进入相机的能量。在曝光时间的调整无法满足与相机传感器的动态范围匹配时,可以从这些因素去考虑,如在镜头前加入中性密度滤光片控制进入相机中的能量的衰减,实现与相机可接收的能量范围之间的匹配,以测量出尽可能大的单次测温范围。

3.2 熔池温度场在线测量实验

在增材制造过程中,熔池温度场分布的在线监测对提高打印零件质量有重要意义。熔池温度较高(钛合金打印过程中温度可达4 000 K),比色测温技术是目前测量熔池温度分布的有效手段。

考虑到熔池在近红外波段具有较强的辐射强度,且在近红外波段选用工作波长可以避免环境光的影响,于是选用两个工作波段分别为 (780 ± 10) nm和 (905 ± 10) nm,实验设计了基于单台高速相机的双波长分光与色差校正系统,使熔池辐射的两个工作波段的光波分两条光路同时聚焦在高速相机靶面上,以实现比色测温法测量熔池温度场分布,整体熔池测温系统详细描述见文献[26-28]。选择性激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)打印过程中熔池温度场在线测量实验布置如图8所示。

实验采用的高速相机型号为FASTCAM NOVA S12,传感器类型为Proprietary Design Advanced CMOS,该型号传感器动态范围约为60 dB。滤光片型号为FB780-10和FL905-10(来源Thorlabs)。实验前通过黑体炉实验标定出比色测温公式中的比例系数,正式实验利用上述装置实时采集SLM工艺下金属粉末熔融过程中的灰度图像,将两个波段下的熔池图像进行标定匹配,代入比色测温公式推演出实时熔池温度分布,如图9所示。

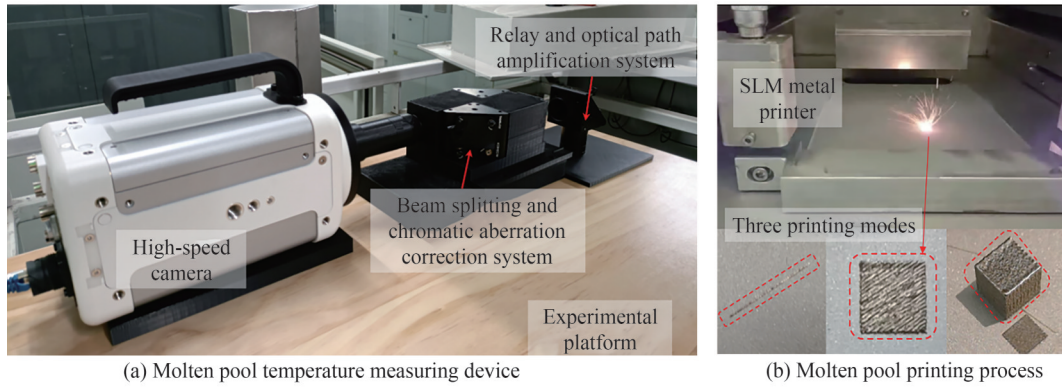


图8 熔池温度在线测量实验布置图

Fig. 8 Experimental arrangement of on-line measurement of molten pool temperature

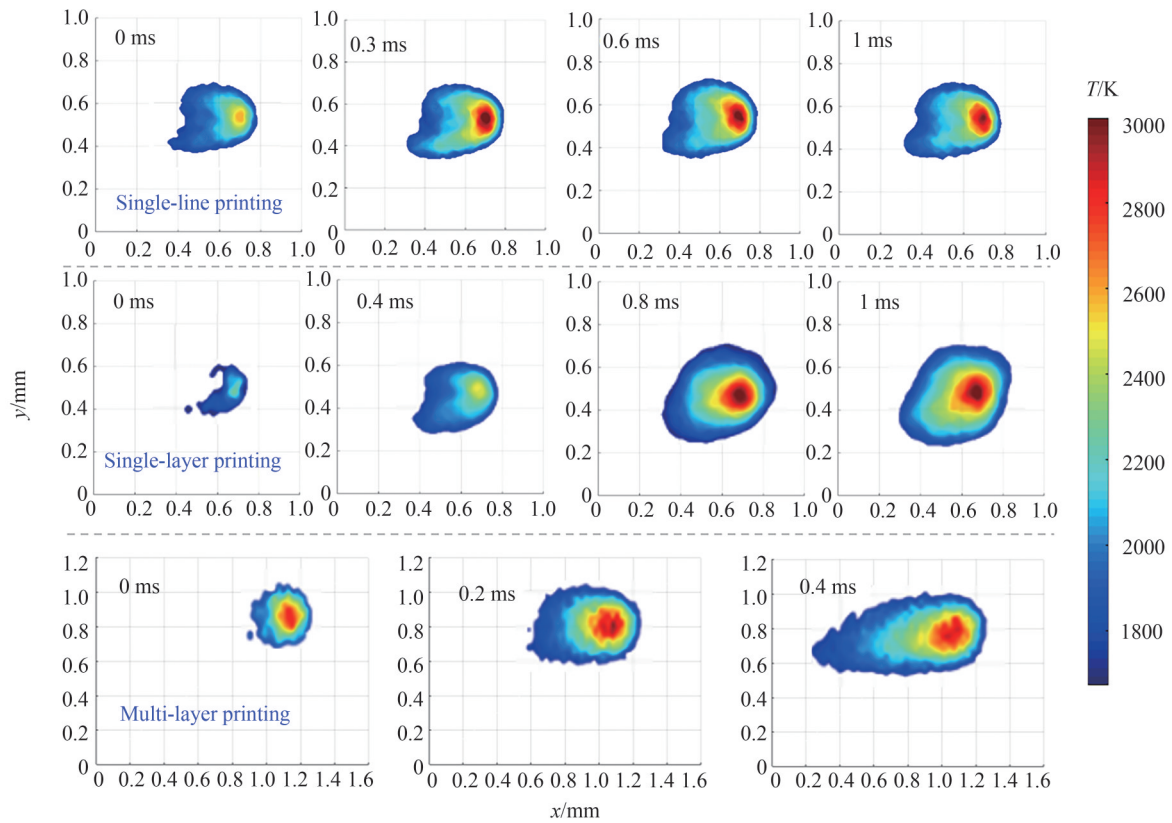


图9 打印过程中熔池温度场随时间的演化

Fig. 9 Evolution of molten pool temperature field with time during printing

首先从理论上分析,结合式(21)来看,当波长 $\lambda = 780 \text{ nm}$ 时,如果测温下限为 1600 K ,那么测温上限可达 4015 K ,测温跨度为 2415 K ;当波长 $\lambda = 905 \text{ nm}$ 时,如果测温下限为 1600 K ,那么测温上限可达 5288 K ,测温跨度为 3688 K 。结合式(22)来看,两个工作波段下的熔池辐射强度最终进入到相机的能量最小值并不相同,因此本次实验的理论单次测温跨度应该为 $\Delta T \leq 2415 \text{ K}$ 。图9中的熔池温度场是在相同曝光时间和相机光圈值下测量得到的,可发现本次实验中的单次测温范围是 $1600 \sim 3000 \text{ K}$,测温跨度可达 1400 K ,实验结果与理论分析结果相符。由于比色测温技术限制了两个工作波长下无法设置同一个曝光时间实现相机的整个动态范围的使用,因此实验结果单次测温跨度低于理论单次测温跨度。在后续实验过程中,通过调整曝光时间,多次实验得到整个系统的测温范围为 $1000 \sim 4000 \text{ K}$ 。

HOOPER PA^[29]利用比色测温技术测量激光粉末床熔池温度场分布时,综合考虑了相机响应函数、黑体的辐射强度以及光学元件的透过等和波长相关的数值,最终选定 700 nm 和 950 nm 作为比色测温法的两

个工作波长。文献所用高速相机的传感器芯片动态范围同样是 60 dB,最后在 100 kHz 的帧率和 10 μ s 的曝光时间下,相机传感器的峰值像素强度刚好低于饱和点,说明正在使用传感器的全动态范围,实验得到测温范围为 2 000~4 000 K,测温跨度为 2 000 K,系统整体测温范围为 1 000~5 000 K。对比本文实验结果,实验所得单次测温跨度较小,整个系统测温范围也较小,在工作波段选取不同,且曝光时间的选取完全使用传感器的动态范围情况下,HOOPEP A 的实验单次测温跨度较之提高了 42.9%。

4 结论

本文结合相机成像过程分析了单相机辐射测温法单次测温范围较窄的原因,并通过涡流加热实验和熔池温度在线测量进行实验验证。结果表明:传感器的动态范围和选定的工作波长从理论上决定了各个温度分布段单次测温跨度的最大值;对于单相机辐射测温法,若要实现宽温度范围的测量,当测量对象为低温分布场时,考虑在近红外光等长波段选取工作波长,当测量对象为高温分布场时,考虑在可见光等短波段选取工作波长;合理调整测量系统中如滤光片波段、透过率、带宽等参数信息,以扩宽比色测温法的单次测温范围;多次调整曝光时间,以保证可以使用传感器的全动态范围,为以后实现单相机宽温度范围测量提供参考。由于条件限制,对滤光片中心波长透过率、带宽大小的设置方面有待进一步的实验研究。

参考文献

- [1] DAVY M H, GARNER C P, KIRCHEN P, et al. Two-colour pyrometry measurements of low-temperature combustion using borescopic imaging[C]. Proceedings of the 2021 SAE WCX Digital Summit, 2021.
- [2] PAN D, JIANG Z, CHEN Z, et al. Temperature measurement and compensation method of blast furnace molten iron based on infrared computer vision[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 68(10): 3576-3588.
- [3] SORRENTINO G, SABIA P, JOANNON M, et al. Influence of preheating and thermal power on cyclonic burner characteristics under mild combustion[J]. Fuel, 2018, 233: 207-214.
- [4] SUN Shang. Study on radiation temperature measurement under high temperature background [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
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.
- [5] ZHANG Yongjin. Research on temperature field measurement system based on digital image processing technology [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
张勇进. 基于数字图像处理的高温目标温度场测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [6] TANG Y, ZHANG J, MENGKUN Y, et al. Deep learning-based super-resolution images for synchronous measurement of temperature and deformation at elevated temperature [J]. Optik, 2021, 226: 1657-1664.
- [7] SUN Huajie, SHI Shihong, SHI Tuo, et al. Research of close-loop control of molten pool temperature during laser cladding process based on color CCD[J]. Laser Technology, 2018, 42(6): 745-750.
孙华杰, 石世宏, 石拓, 等. 基于彩色 CCD 的激光熔覆熔池温度闭环控制研究[J]. 激光技术, 2018, 42(6): 745-750.
- [8] FIRAGO V, WOJCIK W. High-temperature three-colour thermal imager[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2015, 91(2): 208-214.
- [9] HAO C, LIU Z, XIE H, et al. Real-time measurement method of melt pool temperature in the directed energy deposition process[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 177: 115475.
- [10] LIU Zhanwei, HAO Ce, XIE Huimin, et al. An optimized temperature measurement method based on single camera colorimetric temperature measurement system: China, 110954222B[P]. 2020-11-03.
刘战伟, 郝策, 谢惠民, 等. 一种基于单相机比色测温系统的优化测温方法: 中国, 110954222B[P]. 2020-11-03.
- [11] HAO Ce, LIU Zhanwei. Application of single-camera melt pool surface temperature field measurement technique in LENS process[C]. Proceedings of the 26th Annual Conference of Beijing Mechanics Society, 2020: 1704.
郝策, 刘战伟. 单相机熔池表面温度场测量技术在 LENS 过程中的应用[C]. 北京力学学会第 26 届学术年会论文集, 2020: 1704.
- [12] SUN Yuan, PENG Xiaoqi, LI Sheng, et al. Research on dynamic range of CCD radiation temperature measurement[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, (2): 24-26.
孙元, 彭小奇, 李晟, 等. CCD 辐射测温的动态范围研究[J]. 传感器与微系统, 2008, (2): 24-26.
- [13] HAN J, ZHOU C, DUAN P, et al. Neuromorphic camera guided high dynamic range imaging[C]. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020: 1730-1739.
- [14] RIZA N A, MAZHAR M A. 177 dB linear dynamic range pixels of interest DSLR CAOS camera[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(3): 1-10.
- [15] BOYERT H. Blackbody radiation in classical physics: a historical perspective[J]. American Journal of Physics, 2018, 86

- (7): 495-509.
- [16] LI Hui. Study on flame temperature filed three-dimensional reconstructions based on emission spectral tomography[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2007.
李辉. 发射光谱层析火焰温度场三维重建研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2007.
- [17] HAO Ce, LIU Zhanwei. Colorimetric temperature measurement method of two-band based on single CCD [C]. Proceedings of the 24th Annual Conference of Beijing Mechanics Society, 2018: 39-40.
郝策, 刘战伟. 基于单台 CCD 的双波段比色测温方法[C]. 北京力学学会第二十四届学术年会会议论文集, 2018: 39-40.
- [18] HONNER M, HONNEROVA P. Survey of emissivity measurement by radiometric methods[J]. Applied Optics, 2015, 54(4): 669-683.
- [19] LIU Jiwei. Visible and near-infrared two-color imaging temperature measurement technology[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences), 2020.
刘纪伟. 可见光-近红外双色成像测温技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020.
- [20] SONG Xianjie, HU Rongsheng. Conversion of illuminance to irradiance[J]. Lamps & Lighting, 1997, (1): 20-21.
宋贤杰, 胡荣生. 光强度和辐照度的转换[J]. 光源与照明, 1997, (1): 20-21.
- [21] FU Tairan, CHENG Xiaofang, ZHANG Maohua, et al. Relationship between temperature range and wavelength bandwidth for multi band pyrometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, (9): 1994-1997+2005.
符泰然, 程晓舫, 钟茂华, 等. 基于波段带宽的谱段测温法的测温范围分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, (9): 1994-1997+2005.
- [22] ZHANG Lin, ZHANG Zhijie, LI Yanfeng. Application of dual-waveband colorimetric temperature measurement technology[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(8): 1-5.
张林, 张志杰, 李岩峰. 双波段比色测温技术的应用[J]. 现代电子技术, 2019, 42(8): 1-5.
- [23] WU Haibin, ZHANG Tieyi, ZHOU Houwei, et al. Selection of two-color wavelengths in colorimetric temperature measurement of uncooled IRFPA[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, 7(5): 385-389.
吴海滨, 张铁译, 周后伟, 等. 非制冷红外焦平面阵列比色测温双波长的选择[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(5): 385-389.
- [24] WANG Yukun, XIAO Chunsheng. Discussion on the key technology of infrared radiation temperature measurement[J]. Changjiang Information & Communications, 2020, (6): 45-46.
王玉坤, 肖春生. 红外辐射温度测量关键技术探讨[J]. 信息通信, 2020, (6): 45-46.
- [25] CHEN X, TIAN G, WU J, et al. Feature-based registration for 3D eddy current pulsed thermography[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(16): 6998-7004.
- [26] MA H, MAO Z, FENG W, et al. Online in-situ monitoring of melt pool characteristic based on a single high-speed camera in laser powder bed fusion process[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118515.
- [27] FENG W, MAO Z Z, YANG Y, et al. Online defect detection method and system based on similarity of the temperature field in the melt pool[J]. Additive Manufacturing, 2022, 54: 102760.
- [28] LIU Zhanwei, MA Heng, XIE Huimin, et al. Online monitoring device and method for high speed high resolution high precision ultra-high temperature molten pool temperature field: China, 112212977B[P]. 2022-02-08.
刘战伟, 马恒, 谢惠民, 等. 高速高分辨高精度超高温熔池温度场在线监测装置与方法: 中国, 112212977B[P]. 2022-02-08.
- [29] HOOPER P A. Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 548-559.

Analysis of the Influencing Factors of Radiation Temperature Measurement Range of a Single Camera at a Certain Exposure

HUANG Wendan, MA Heng, LIU Zhanwei

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: As a common means of non-contact temperature measurement technology, radiation temperature measurement is often limited by the performance of the detector, and the temperature measurement range is narrow, which can not meet the measurement needs of wide temperature range distribution. The analysis of radiation temperature measuring range and influencing factors of a single

camera has certain application value in practical engineering applications. As the error of temperature measurement is an important issue to be considered in the process of temperature measurement, this paper briefly introduces the principle of monochrome temperature measurement and two-color temperature measurement and analyzes the influence mechanism of temperature measurement error in detail. The accurate measurement of emissivity is the key factor affecting the error of temperature measurement in the monochromatic method. The accuracy of the colorimetric method is higher than that of the monochromatic method, which can meet the need of temperature measurement accuracy in actual working conditions. Aiming at the problem that the temperature range of the single camera is narrow in the process of single wavelength temperature measurement, the process of object radiation energy conversion into camera and imaging is introduced in detail from the process of single wavelength temperature measurement, and the theoretical formula of the influence of camera sensor dynamic range and working wavelength on the temperature range of the single camera is derived. Combined with the formula, then the influence mechanism of exposure time on the temperature range of radiation thermometry was analyzed, and the influencing factors in the process of band selection are analyzed. The reference principle of band selection is given to select the band where the object radiation is stronger than diffuse reflection and ambient light as far as possible. In colorimetric thermometry, the selection of two working bands should be close to meet the premise that the emissivity of the two bands is approximately equal. The central band and bandwidth of the filter should be selected according to the actual conditions of the test, in order to ensure a high temperature measurement accuracy and a wide range of temperature measurements. The theoretical analysis results show that the selection of camera dynamic range and wavelength limits the maximum span of temperature measurement range during one exposure. When the camera sensor is uniquely determined, the dynamic range of the camera is certain, and the working band is selected according to the band selection principle. After the lower limit of the estimated temperature range is selected, the upper limit of the temperature to be measured can be determined by the formula. Then the band and the lower limit of the estimated temperature are adjusted according to the actual temperature measurement range. By adjusting the exposure and aperture, and making full use of the full dynamic range of the camera sensor, the measurement of the wide temperature range in the radiometric thermometry method of a single camera can be realized. According to the formula, combined with the induction eddy current heating device, the relevant experiments are carried out, and the measurement of a wide temperature range in the single camera radiometric method is realized. Combined with the on-line measurement of the molten pool temperature field, the spectral response function of the camera and the characteristics of the optical components were considered comprehensively, and the relevant verification of the formula was carried out. In addition, for the distribution range of different temperatures, the influence of working wavelength and exposure time on the temperature range is similar, which verifies the results of the theoretical analysis. The selection of better wavelength and better exposure time can improve the single temperature measurement span by at least 40%, which provides important technical reference for the specific implementation of single camera temperature measurement technology.

Key words: Optical measurement; Wide temperature measurement range; Radiation temperature measurement; Camera imaging; Dynamic range; Colorimetric temperature measurement technology

OCIS Codes: 120.4820; 280.6780; 300.2140; 300.6550