

改进的可见光-近红外比色测温系统与性能评估



陈金龙¹, 姜泓宇¹, 易方正¹, 王东颖^{1,2}, 刘涛¹, 胡晓贺¹

1. 重庆大学, 重庆 400044

2. 西北机电工程研究所, 咸阳 712000

【摘要】 可见光-近红外比色测温系统已经被广泛应用在科研和工业高温监测领域。由于系统的灰度值范围有限, 现有研究通常将不同系统参数(曝光时间、光圈)下的测温带宽拼接, 以扩展测温范围。然而系统两个通道的灰度值和温度的拟合曲线为指数函数, 且两条曲线的增长速度相差较大, 将导致系统存在测温带宽变窄、系统灵敏度的线性度差等问题。此外, 现有研究对比色测温系统性能的评估和分析方法还不够完善。针对以上问题, 本文改进了可见光-近红外比色测温系统, 提出用衰减灰度值的方法来扩展系统的测温带宽; 使用黑体炉进行标定实验后, 对改进后系统和原始系统的通道灵敏度、测温带宽和系统灵敏度进行了比较分析, 发现该方法将系统的测温带宽扩展了两倍以上, 同时有效地提高了系统灵敏度的线性度; 最后将该系统与其他系统的整体性能进行了比较, 验证了系统的实用性。

【关键词】 可见光-近红外; 比色测温系统; 测温带宽; 灵敏度; 不确定度评估

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2022.0211

【引用本文】 陈金龙, 姜泓宇, 易方正, 等. 改进的可见光-近红外比色测温系统与性能评估 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(11): 53-58.

Improved Visible Near-Infrared Colorimetric Thermometry System and Performance Evaluation

CHEN Jinlong¹, JIANG hongyu¹, YI fangzheng¹, WANG Dongying^{1,2}, LIU Tao¹, HU Xiaohe¹

1. Chongqing University, Chongqing 400044, China

2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712000, China

【Abstract】 Visible near-infrared colorimetric thermometry system instruments have been widely used in scientific research and industrial high-temperature monitoring. Since the gray value range of the instrument is limited, the existing research usually splices the temperature measurement bandwidth under different system parameters (exposure time, aperture) to extend the temperature measurement range. However, the fitted curves of grayscale values and temperature of the two channels of the system are exponential functions, and the growth rate of the two curves differs significantly, which will lead to the problems of narrowing the temperature measurement bandwidth and poor linearity of the system sensitivity. In addition, the existing evaluation and analysis methods for the performance of colorimetric thermometry system are not perfect. Given the above problems, a set of visible light near-infrared colorimetric thermometry system is developed, and a method of gray value attenuation is proposed to expand the temperature measurement bandwidth of the system. After the calibration experiment with the blackbody furnace is carried out, the channel sensitivity, temperature measurement bandwidth and system sensitivity of the improved and the original systems are compared and analyzed. It is found that this method extends the temperature measurement bandwidth of the instrument by more than two times, and effectively improves the linearity of the system sensitivity. Finally, the system's overall performance is compared with other instruments to verify the practicability of the instrument.

【Key words】 visible near-infrared, colorimetric thermometry system, temperature measurement bandwidth, sensitivity, uncertainty evaluation

基金项目: 国防科工局基础科研项目(JCKY2020208B002)。

作者简介: 陈金龙(1993-), 重庆大学在读博士研究生, 研究方向: 光电测控技术与仪器, 邮箱: 1070314025@qq.com。

0 引言

光学辐射测温系统已经被广泛应用于燃烧、炼钢、熔丝制造、爆炸等领域^[1-6]。近些年许多学者对多光谱辐射测温系统的开发和性能评估展开了研究,包括多波段测温系统、多波长测温系统和比色测温系统等^[7]。

多波段测温系统通常直接利用相机的 RGB 三个通道进行测量,具有使用方便和价格便宜的优点。FU 等在理论和实验上对多波段测温系统的系统参数(光圈、积分时间)、灰度值、系统测温范围、测温灵敏度、相对误差等进行了分析^[8-12]。多波长测温系统的开发通常基于光谱仪,ZHANG 等多波长测温系统进行了研究,包括建立多波长测温系统的噪声模型以及评估噪声对温度测量准确性的影响^[13-14]。多波长测温的优势在于可根据测量结果对发射率进行建模,当选择的发射率模型适合测量目标时测量误差相对较小。由于发射率模型的确定与材料的种类、目标表面的状态、选择的发射率函数等因素有关,多波长测温系统只适用于部分材料^[7],且只能测量一个点的温度,因此多波长测温系统通常被用来辅助测量目标的发射率。

比色测温系统的优势在于计算模型简单,能够拍摄整个平面的温度分布,对于部分发射率较高的材料可以使用单色假设,取得高精度的测量结果^[5,15]。比色/多波段测温系统通常是基于相机进行开发的,在灰度值范围有限的情况下,需要在标定时不断调整相机参数(光圈、积分时间),并拼接不同参数下的测温带宽来提升测温范围。基于图像传感器开发的测温系统容易造成系统存在测温带宽变窄、系统参数过多、数据利用不充分的问题^[16-17]。

针对上述问题,本文开发了一套可见光-近红外的比色测温系统,并提出利用衰减灰度值的方法来扩展系统的测温带宽。基于比色测温法和 CMOS 相机成像原理,使用黑体炉对该系统进行了标定。在原有性能评估方法的基础上^[8],针对比色测温系统的特点,将原始系统和改进后系统的通道灵敏度、测温系统测温带宽和测温系统的灵敏度进行比较分析,最后将本文开发的比色测温系统与之前文献中比色测温系统的整体性能进行了比较,以验证该系统的实用性。

1 比色测温法

在光学辐射测温中,绝对黑体的热力学温度可

以通过辐射波长和光谱辐射亮度的关系表示,即普朗克公式。在满足 $c_2/\lambda T \gg 1$ 时,普朗克公式就可以简化为维恩公式,如式(1)所示^[5]。

$$L(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (1)$$

其中, $L(\lambda, T)$ 表示绝对黑体的光谱辐射亮度; T 表示热力学温度; λ 表示辐射波长; c_1 为普朗克第一常数; c_2 为普朗克第二常数。

由式(1)可知,当黑体的温度发生变化时,不同波长对应的光谱辐射亮度也会变化。而比色测温法就是根据同一温度下两个不同波长对应的光谱辐射亮度的比值计算的,所以黑体的温度可以表示为式(2)所示^[2]。

$$T = \frac{c_2(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \cdot \frac{1}{\ln \frac{L(\lambda_1, T)}{L(\lambda_2, T)} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (2)$$

图像灰度值可以表示为式(3)所示^[17]。

$$G_i = \Phi \cdot \frac{\Delta t}{F^2} \cdot \int_{\lambda_m}^{\lambda_k} s_i(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot L(\lambda) d\lambda + n_i \quad (3)$$

其中, G_i 表示图像的灰度值; Δt 表示积分时间; s_i ; F 表示光圈的大小; (λ_m, λ_k) 为窄带滤波片的波长范围, nm; Φ 表示辐射衰减,是观测距离、观测角度的函数; $s_i(\lambda)$ 是分光片、衰减片、窄带滤波片以及传感器光谱灵敏度等参数组合的函数; $L(\lambda)$ 是光谱辐射到达相机的光谱分布, $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$; $\varepsilon(\lambda, T)$ 是目标的发射率。下角标 i 为 A 或 B, 分别表示比色测温系统的两个通道。结合式(2)和式(3),可将黑体温度表示为式(4)所示^[2]。

$$T = \frac{c_2(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \cdot \frac{1}{\ln \frac{G_1}{G_2} + \ln \frac{s_2(\lambda)}{s_1(\lambda)} + \ln \frac{\varepsilon(\lambda_2, T)}{\varepsilon(\lambda_1, T)} + 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (4)$$

$s_2(\lambda)/s_1(\lambda)$ 需要经过黑体炉来标定。 $\varepsilon(\lambda_2, T)/\varepsilon(\lambda_1, T)$ 指辐射体在两个不同波长处的发射率之比。

2 比色测温系统的标定

2.1 系统的标定

比色测温系统的结构原理如图 1 所示。目标表面发射出辐射光,经过水蒸气和灰尘的衰减后,进入光学系统。在光学系统中,分光片将入射光一半反射一半透射后形成两束相同的光,再分别经过两个不同通道的窄带滤波片,最后在相应的相机中成像,通道 B 前多添加了通过率为 25% 的衰减片。相机的型号是 FASTCAM SA5, 位深为 12 bit, 只能选择

8 bit 的输出,灰度值的范围是 0~255。相机的最小曝光时间可以设置为 1 μs,光圈设置范围为 $f/2.8 \sim f/11$ 。窄带滤波片 A、B 的半高宽为 10 nm,中心波长分别为 695 nm 和 800 nm。比色测温系统的标定系统如图 2 所示,使用一个开口直径是 15 mm、测温范围为 800℃~1200℃ 的黑体炉,并通过如下步骤对比色测温系统进行标定^[11]: 1) 标定系统的基本设置。将比色测温系统固定在距离黑体炉 1 m 的位置后,将相机的积分时间设置为 5 ms,焦距为 80 mm,光圈大小为 2.8。2) 将黑体炉加热到目标温度后,保持 15 分钟,以确保温度的稳定性。3) 从黑体炉的开口处连续拍摄 100 张照片。4) 增加目标温度 20℃。5) 重复 2~4 的步骤。

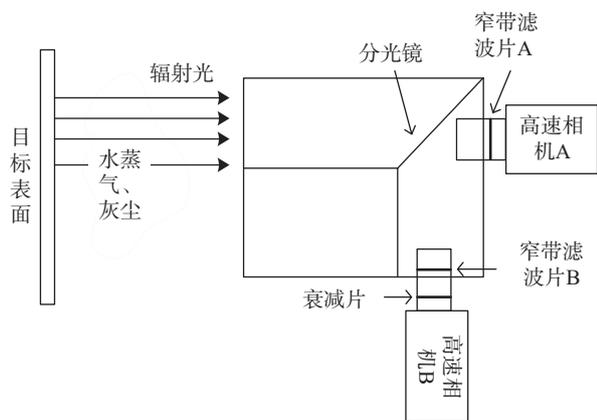


图 1 比色测温系统的结构原理图
Fig.1 Structural schematic diagram of colorimetric thermometry system

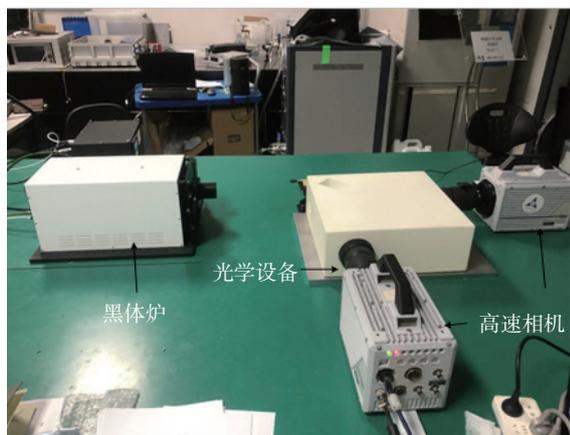


图 2 比色测温系统的标定
Fig.2 Calibration of colorimetric thermometry system

2.2 系统参数的标定

为了拼接不同测温带宽来扩展系统的测温范围,通常需要对积分时间、光圈与灰度值的关系进行拟合。因此,对系统参数与灰度值的关系进行了

标定,并对单个通道的灵敏度进行了测量。

2.2.1 积分时间和灰度值

积分时间的大小如果调整不当会造成灰度值的过饱和或过暗。式(3)虽然表明积分时间和图像的灰度值之间是线性关系,但是这一点仍需在实际测量中验证^[8]。保持标定系统的基本设置,将黑体炉的温度设置为 1000℃ 并保持 15 分钟后,只改变相机的积分时间,并在每个积分时间连续拍摄 100 张照片。收集到不同曝光时间的实验数据,最后得到灰度值和积分时间的关系如图 3(a) 所示。当拟合为二次函数时,曲线的拟合优度较好。

2.2.2 光圈和灰度值

除了积分时间外,光圈也是影响灰度值的一个重要参数。光圈的相邻档位之间的进光量刚好相差一倍,但是这不能保证灰度值也呈相同倍数增长。将黑体炉的温度设置为 1000℃ 并保持 15 分钟后,保持标定系统的基本设置,在 $f/2.8 \sim f/11$ 范围内连续调整光圈,并在每个固定光圈值处连续拍摄 100 张照片,得到灰度值和光圈的关系如图 3(b) 所示。在拟合积分时间、光圈与灰度值的关系时,当拟合为二次函数时,曲线的拟合优度更好。

在拍摄过程中系统容易受到环境中的水蒸气、灰尘、相机本身的噪声、光谱响应灵敏度差异等因素的干扰。灰度值之间极小的差异都会导致测温结果受到很大影响,因此在具体使用时需要对积分时间、光圈和灰度值之间的关系进行详细标定。

2.2.3 通道的灵敏度

通道的灵敏度 S 定义为灰度值的改变量和温度的改变量之间的比值^[9],反映了通道的线性度,数学表达如式(5)所示。通道 A、B 的灵敏度变化如图 3(c) 所示,扩展前两个通道的灵敏度范围分别是 0.5~1 和 2~4,灵敏度范围相差较大;扩展后两个通道的灵敏度在整个温度范围都比较接近,分布范围是 0.5~2.5。

$$S = \frac{\Delta G}{\Delta T} \quad (5)$$

3 测温系统的性能评估

3.1 测温带宽

由图 4(a) 可知灰度值和温度的关系是幂指数函数,因此很容易导致相机的灰度值饱和,进而影响系统的测温带宽。扩展前系统的测温带宽称作典型带宽(820℃~900℃),由通道 A 和通道 B 组成;扩展后的测温带宽(820℃~1000℃),由通道 B 和添加衰减片的通道 A 组成。扩展后的测温带宽达到了

180℃,与典型带宽相比较,系统的测温带宽扩展了2.25倍。对通道A进行25%的线性衰减后,通道

A和通道B的灰度值范围都达到了6.5~255。

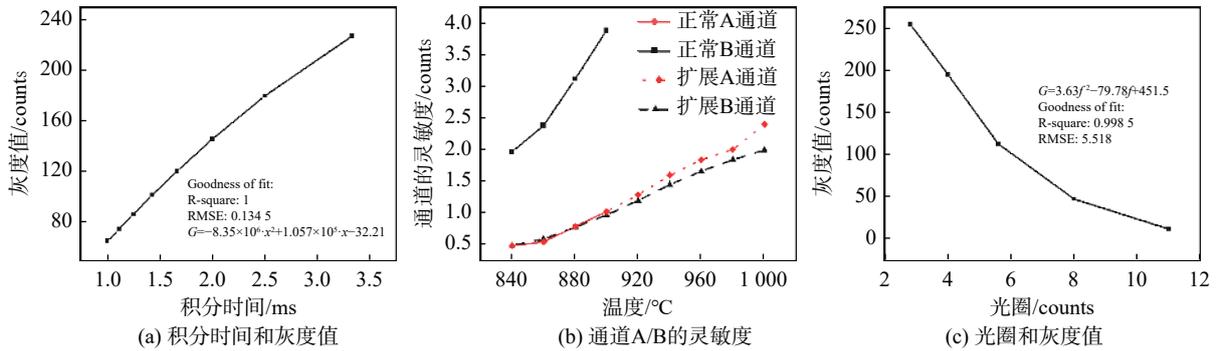


图3 标定的系统参数

Fig.3 Calibration of system parameters

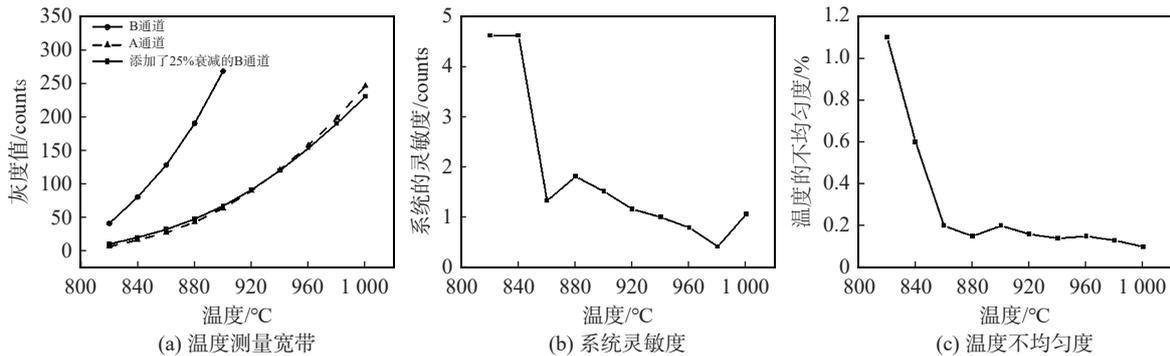


图4 系统性能评估

Fig.4 System performance evaluation

3.2 系统的灵敏度

系统的灵敏度与两个通道相对灰度值的改变和温度值有关,其数学表达如式(6)所示。

$$R_{TS} = \frac{\Delta G_B / G_B - \Delta G_A / G_A}{\Delta T / T} \quad (6)$$

其中, R_{TS} 表示系统的灵敏度; T 表示标定温度; G_A 、 G_B 分别表示A、B通道的灰度值; ΔT 是温度的增量; ΔG_A 是通道A灰度值的增量; ΔG_B 是通道B灰度值的增量。

在图4(b)中,原始系统灵敏度在典型带宽内的分布范围是1.5~4.5。改进后的系统灵敏度由典型带宽部分和扩展带宽部分构成,在典型带宽部分系统的灵敏度与原始系统的相同,在扩展带宽部分系统的灵敏度分布范围是0.5~1.5。因此,测温带宽的扩展并没有影响原始系统的灵敏度,还提高了整体系统灵敏度的线性度。

3.3 温度的不均匀性

温度的不均匀性指每个像素点的温度与拟合温

度之间的差异^[8],其数学表达如式(7)所示。

$$R_m = \frac{1}{T_c} \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [T_c - T(i, j)]^2} \quad (7)$$

其中, R_m 表示温度的不均匀度; T_c 表示测温系统的拟合温度; M 和 N 表示从黑体炉中拍摄图像有效像素的行数和列数; $T(i, j)$ 表示对应像素点的拟合温度。如图4(c)所示,温度的不均匀性变化范围是0.1%~1.1%,并且在温度为820℃时温度的不均匀性最高。这可能是因为温度范围为820℃~840℃时,通道的灵敏度较高,灰度值随温度的变化较小,且容易受到噪声的影响,所以导致了温度的不均匀性较高。在温度范围为860℃~1000℃时,温度的不均匀性随着温度的升高而逐渐趋于平稳。因此,温度的不均匀性主要受到通道灵敏度的影响,与系统的灵敏度无关。

3.4 标准不确定度分析

JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》规

定了测量不确定度的评定与表示的通用方法,适用于测量系统的校准、检定^[21]。根据式(4),得到测温的不确定度如式(8)所示^[5]。

$$\Delta T^2 = \left(\frac{\partial T}{\partial \sigma_{\lambda_1}}\right)^2 (\Delta \sigma_{\lambda_1})^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \sigma_{\lambda_2}}\right)^2 (\Delta \sigma_{\lambda_2})^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \lambda_1}\right)^2 (\Delta \lambda_1)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \lambda_2}\right)^2 (\Delta \lambda_2)^2 + 2 \frac{\partial T}{\partial \sigma_{\lambda_1}} \frac{\partial T}{\partial \sigma_{\lambda_2}} \text{cov}(\sigma_{\lambda_1}, \sigma_{\lambda_2}) \quad (8)$$

其中, $\Delta \sigma_{\lambda_1}$ 、 $\Delta \sigma_{\lambda_2}$ 分别是 A 通道、B 通道的灰度值的方差; $\text{cov}(\sigma_{\lambda_1}, \sigma_{\lambda_2})$ 是两个通道的协方差; $\Delta \lambda_1$ 、 $\Delta \lambda_2$

分别是波长的方差,即窄带滤波片 A、B 的半波宽,如表 1 所示^[2]。

在 820℃ ~ 1000℃ 的温度段内,由黑体辐射公式得到的理想比值曲线为 $y = -0.0375T + 43$ 。即整个测温范围内,两个通道的灰度值之比的变化范围为 8 ~ 15,造成两个通道光谱辐射度差距较大,再加上环境光、衰减片、窄带滤波片等因素的影响导致相机的光谱响应系数不稳定。具体表现在图 5 中,系统的不确定度增长趋势主要与表 1 中灰度值的方差增长趋势一致。

表 1 比色测温系统的标准不确定度项

Tab.1 Uncertainty term of colorimetric thermometry system

| 温度/℃ | 820 | 840 | 860 | 880 | 900 | 920 | 940 | 960 | 980 | 1000 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A通道方差 | 0.30 | 0.48 | 0.57 | 0.53 | 1.89 | 2.42 | 5.35 | 7.55 | 9.75 | 9.32 |
| B通道方差 | 0.51 | 0.57 | 0.70 | 0.35 | 0.47 | 0.54 | 1.01 | 1.31 | 1.6 | 1.24 |
| A、B通道的协方差 | 0.004 | 0.009 | 0.183 | 0.096 | 0.295 | 0.572 | 0.701 | 0.823 | 1.187 | 1.321 |

在 820℃ ~ 1000℃ 的温度段内,由黑体辐射公式得到的理想比值曲线为 $y = -0.0375T + 43$ 。即整个测温范围内,两个通道的灰度值之比的变化范围为 8 ~ 15,造成两个通道光谱辐射度差距较大,再加上环境光、衰减片、窄带滤波片等因素的影响导致相机的光谱响应系数不稳定。具体表现在图 5 中,系统的不确定度增长趋势主要与表 1 中灰度值的方差增长趋势一致。

由式(8)可知,系统的不确定度只和图像的灰度值、波长有关。本文标定得到标准不确定度如图 5 所示。在 820℃ ~ 1000℃ 的范围内,比色测温系统的标准不确定度分布范围是 0.85% ~ 1.42%。系统与之前文献研发的测温系统相比较,不确定度或相对误差比较如表 2 所示,系统本文研发的比色测温系统测温带宽比常规的比色测温系统扩展了两倍,与多波段测温系统、多波长测温系统的测温带宽几乎相

同。此外,本文研制的比色测温系统的不确定度分布范围是 0.85% ~ 1.42%, 低于绝大多数的测温系统。

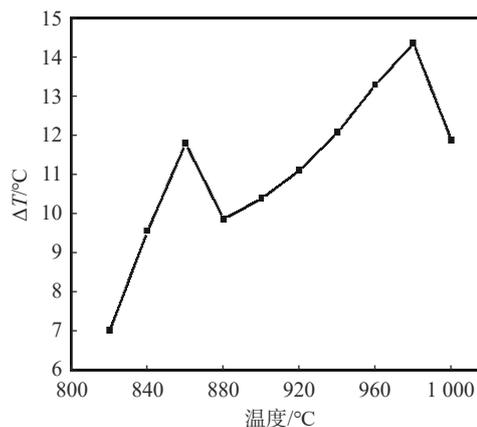


图 5 比色测温系统的标准不确定度

Fig.5 Uncertainty of colorimetric thermometry system

表 2 不同测温系统比较

Tab.2 Comparison of various thermometry instruments

| 系统类型 | 波段 | 探测器类别 | 测温区间 | 测温带宽 | 相对误差 | 标准不确定度 | 参考文献 |
|------|---------------|--------|---------------------------------|-------------|--------|---------------|------|
| 比色 | 695 nm和800 nm | CMOS相机 | 820℃ ~ 1000℃ | 180℃ | | 0.85% ~ 1.42% | 本文 |
| 比色 | | 光电传感器 | 1227℃ ~ 2727℃ | 100℃ | | 3.79% | [5] |
| 多波段 | RGB | CCD相机 | | 190℃ ~ 265℃ | | 0.13% ~ 2.14% | [8] |
| 多波段 | 450 ~ 850 nm | CMOS相机 | 600℃ ~ 1100℃ | | ±0.75% | | [12] |
| 多波段 | RGB | CCD相机 | 1226℃ ~ 2736℃ | | 1.8% | | [15] |
| 多波长 | 500 ~ 900 nm | 光谱仪 | 1100℃ ~ 1250℃ 和1200℃ ~ 1400℃ | 150/200℃ | | 2% ~ 6% | [21] |

4 结论

本文改进了一套基于可见光-近红外的比色测温系统。利用衰减片对通道的灰度值进行衰减后,系统的测温带宽扩展了两倍以上。对系统参数进行了标定,并对原始系统和扩展后的系统性能进行了对比。结果表明,使用灰度值衰减的方法改进后的测温系统,不仅有效提升了测温带宽,而且提高了系统灵敏度的线性度。本文对比色测温系统的性能评估结果,可以为后续光学测温系统的开发和评估提供一定的参考。

参考文献

- [1] ZHANG Y Z, XIE Z H, ZHAO Z W, *et al.* Online surface temperature measurement of billets in secondary cooling zone end-piece based on data fusion[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(3): 612-619.
- [2] THEVENET J, SIROUX M, DESMET B, *et al.* Measurements of brake disc surface temperature and emissivity by two-color pyrometry[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(6-7): 753-759.
- [3] LIU G, LIU D. Direct simultaneous reconstruction for temperature and concentration profiles of soot and metal-oxide nanoparticles in nanofluid fuel flames by a CCD camera[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 564-575.
- [4] ZOLTAN P. Mathematical analysis of transient temperature changes in the chip root during milling[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(9-12): 4219-4232.
- [5] MONIER R. Liquid metals surface temperature fields measurements with a two-colour pyrometer[J]. *Measurement*, 2017, 101: 72-80.
- [6] ZHANG Y. Development of a CCD-based pyrometer for surface temperature measurement of casting billets[J]. *Measurement Science & Technology*, 2017, 28(6): 65903.
- [7] ANTONIO J M, Araújo M. Multi-spectral pyrometry - a review[J]. *Measurement Science & Technology*, 2017, 28(8): 082002.
- [8] FU T, YANG Z, WANG L, *et al.* Measurement performance of an optical CCD-based pyrometer system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(4): 586-593.
- [9] ZHANG Y, ZHANG W, DONG Z, *et al.* Calibration and measurement performance analysis for a spectral band charge-coupled-device-based pyrometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(6): 064904.
- [10] MA B. Intensity-ratio and color-ratio thin-filament pyrometry: Uncertainties and accuracy[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(4): 908-916.
- [11] ZHANG Y. Noise characterization and compensation for a charge-coupled-device-based pyrometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(5): 054902.
- [12] KELLY D L, SCARBOROUGH D E, THUROW B S, *et al.* A novel multi-band plenoptic pyrometer for high-temperature applications[J]. *Measurement science & technology*, 2021, 32(10): 105901.
- [13] ZHANG Y. Measurement performance analysis for a charge-coupled-device-based near-infrared multi-spectral pyrometer[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 106: 103273.
- [14] 翟洋, 沈华, 朱日宏, 等. 多光谱辐射瞬态高温测温计的研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11): 3161-3165.
- [15] JIMENEZ S. Two-color, two-dimensional pyrometers based on monochrome and color cameras for high-temperature (>1000 K) planar measurements[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(11): 114901.
- [16] CHRZANOWSKI K. Evaluation of commercial thermal cameras in quality systems[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(10): 2556-2567.
- [17] FU T, LIU J, TIAN J, *et al.* VIS-NIR multispectral synchronous imaging pyrometer for high-temperature measurements[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(6): 1522-1530.
- [18] HUANG Y, LONG M, CHEN D, *et al.* A New Wavelength Selection Criterion for Two-color Pyrometer Interfered with Participating Media[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 93: 136-143.
- [19] 张华, 廖宝剑, 潘际銮, 等. ICCD 双色热图像温度场检测系统的波长选择[J]. *红外与毫米波学报*, 1996, 35(6): 433-438.
- [20] SHU Z, YU Y. Temperature and emissivity measurements from combustion of pine wood, rice husk and fir wood using flame emission spectrum-ScienceDirect[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 204: 106423.
- [21] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2008.

本文编辑: 石亚楠