

文章编号:1001-5078(2023)12-1871-06

· 红外技术及应用 ·

比色测温法的最优波段及测温精度的研究

黄志成, 李新娥, 赵夏青

(中北大学 省部级共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:目前火炮膛温测试存在测试难度大、精准度低和条件恶劣等问题。针对此类问题,本文设计了基于比色测温的火炮膛温测试系统。论证了波长的选择和标定误差是影响比色测温精度的两大重要因素,并通过分析波长与采集电压之间的灵敏度关系,得出最优波段为 $0.960\ \mu\text{m}$ 和 $1.000\ \mu\text{m}$,提高了比色测温法的测温精度。分别使用最小二乘法和遗传算法(GA)对实验数据进行拟合,对系统进行测试验证。结果表明:选择最优波长能够提高测温精度,遗传算法在精度上对比最小二乘法有明显提高,整体测量误差小于 $4\ ‰$ 。

关键词:膛温;比色测温;最优波长;遗传算法;数据拟合

中图分类号:TN29 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.12.013

Research on the optimal band and temperature measurement accuracy of temperature measurement method

HUANG Zhi-cheng, LI Xin-e, ZHAO Xia-qing

(North Central University State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The current artillery chamber temperature test has problems such as high testing difficulty, low accuracy and harsh conditions. In this paper, a fire chamber temperature measuring system based on colorimetric temperature measurement is designed to solve above problems. It is proved that the selection of wavelength and calibration error are two important factors affecting the accuracy of colorimetric thermometry. By analyzing the sensitivity relationship between wavelength and acquisition voltage, the optimal band is $0.960\ \mu\text{m}$ and $1.000\ \mu\text{m}$, which improves the accuracy of colorimetric thermometry. And the least square method and genetic algorithm(GA) are used to fit the experimental data so as to test and verify the system. The results show that choosing the optimal wavelength can improve the accuracy of temperature measurement. Compared with the least square method, the accuracy of genetic algorithm is significantly improved, and the overall measurement error is less than $4\ ‰$.

Keywords: chamber temperature; colorimetric temperature measurement; optimal wavelength; genetic algorithm; data fitting

1 引言

目前火炮膛温主要的测量方法大多采用热电偶的接触式测量方法^[1-2],但该方法将热电偶放置在炮膛内部会破坏炮管结构,且只能得到膛内某点的

某时刻的温度值。火炮发射过程中,火药猛烈燃烧产生大量高温高压气体和固体颗粒,具有瞬态性和单一性等特点,使得测量环境复杂,操作困难。随着辐射测温^[3-7]技术的发展,其在瞬态温度测试领域

作者简介:黄志成(1996-),男,硕士研究生,研究方向为动态测试与智能测控。E-mail:12742166787@qq.com

通讯作者:李新娥(1972-),女,教授,硕士生导师,研究方向为动态测试与智能测控。E-mail:Zn1xe@163.com

收稿日期:2023-03-08;修订日期:2023-04-12

中被广泛运用。其中多光谱测温法^[8-11]通需同时测量过多个辐射光谱,再通过测试信息处理得到辐射源的发射率和温度。但数据模型处理复杂,不易达到理想状态。红外热成像法和 CCD 高速摄影法^[12-14],常用于测试温度场热图像,但未解决发射率的准确测试问题。比色测温法^[15-17]具有较高的测试精度,并且受发射率的影响小,抗环境干扰能力强等特点,能够有效降低火药燃烧产物对测试结果的影响,针对恶劣的测试环境有明显效果。但是对于双波段的选择,目前的选取过程复杂不易操作,通过不断调试才能得到合适的波段,没有明确简单的选择手段。

针对现阶段火炮膛温测量存在的问题,本文通过分析火炮膛温的测试环境,运用比色测温法,给出最优波段的选择方法,同时给出实际过程中的标定方法及误差分析等,实现对火炮膛内温度的测试。

2 比色测温原理

根据普朗克黑体辐射定律,热力学温度为 T 的非黑体物质,其波长 λ 与光谱辐射出射度 $M(\lambda, T)$ 的关系为:

$$M(\lambda, T) = \frac{\varepsilon(\lambda, T)C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (1)$$

式中, $C_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 为第一辐射常数; $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 为第二辐射常数。由维恩公式近似代替有:

$$M(\lambda, T) = \frac{\varepsilon(\lambda, T)C_1}{\lambda^5 e^{C_2/\lambda T}} \quad (2)$$

通过两个光电二极管将两波长的光谱辐射出射度转化为电压信号,其关系为:

$$V_1 = \alpha_1 M(\lambda_1, T) \quad (3)$$

$$V_2 = \alpha_2 M(\lambda_2, T) \quad (4)$$

式中, α_1, α_2 由测试系统的电路结构决定。在比色

测温中,通过物体在两个相近波长 ($\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} = 1$)

的辐射功率比值以确定被测物体温度。根据公式 (2) ~ (4) 可以得到:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\alpha_1 C_1}{\alpha_2 C_2} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-5} \exp\left[\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\frac{C_2}{T}\right] \quad (5)$$

$$\text{令 } K = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \eta = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right), \text{ 有:}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = K \frac{C_1}{C_2} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-5} \exp\left(\frac{\eta}{T}\right) \quad (6)$$

式中,当波长确定后 β 为确定的数值, K 值为修正值,与传感器感光系数和被测物体发射率有关,可以通过高温黑体炉对比色测温系统进行标定得到。根据公式 (6) 测得两个光电二极管的电压就可以被测物体的温度。

3 最优波段的选择

在比色测温法中,由于两段波长选取十分接近,

并由此假设该两段波长的发射率相等 ($\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} =$

1), 即 $\ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} = 0$, 来处理发射率的问题,这样

处理简单但测量精度却受限于此。在实际过程中两段波长的发射率只能是相近,并不会相等,所以波长的选择会直接影响测量结果的精度。想要进一步提高测温系统的精度,如何选择合适的波长至关重要。

3.1 火炮膛内环境分析

根据内弹道参数方程,火药燃气状态方程为:

$$Sp(l_\psi + l) = \omega\psi RT \quad (7)$$

可知温度 T 是与燃气压力 P ; 炮口横截面积 S ; 弹丸行程距离 l ; 药室自由容积缩颈长 l_ψ ; 火药已燃百分比 ψ ; 火药质量 ω 和火药气体常数 R 相关的函数。根据某火炮参数,利用 matlab 软件模拟得到其火药燃气温度随时间的变化 $T-t$ 曲线如图 1 所示。

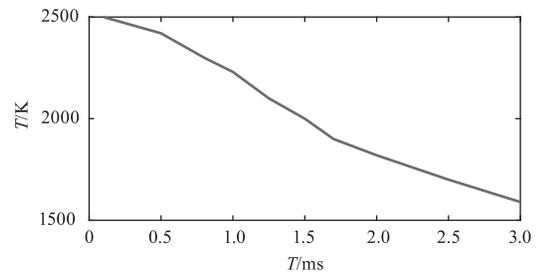


图 1 火药燃气温度 $T-t$ 曲线

Fig. 1 $T-t$ curve of gunpowder gas temperature

由图 1 可以看出,火药点燃发射的瞬间温度就达到了峰值,最大峰值在 2500 K 左右。随着弹丸的运动,将膛内大量的高温高压气体带出膛,使得温度迅速下降。可知膛温具有瞬态性和不可重复性等特点,属于高温瞬态测试。

3.2 火药燃烧光谱分析

根据公式 (1) 可知同一温度下的不同波长对应着不同的辐射功率,而辐射功率和被测物体的发射率有直接关系。为降低发射率的影响,需选择两段黑体辐射出射度峰值对应的相近波长,根据黑体辐

射的普朗克定律 600 ~ 3000 K 温度下的普朗克曲线如图 2 所示。

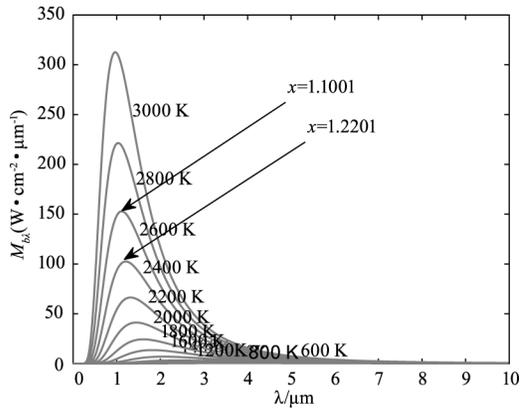


图 2 600 ~ 3000 K 温度下的普朗克曲线
Fig. 2 Planck curve at 600 ~ 3000 K temperature

黑体辐射出射度的峰值对应的波长都在 1 μm 左右,且温度越高,越靠近 1 μm,而火炮膛温的温度峰值能够达到 2500 K,考虑到噪声的影响和光电二极管传感器的感光灵敏度,为增大信噪比,应该选择黑体辐射出射度最大值时对应的波段。2400 K 的辐射功率峰值对应的波长在 1.2 μm 左右,2600 K 的辐射功率峰值对应的波长在 1.1 μm 左右。结合实际情况,火药的燃烧是在密闭的狭小空间内,所以不用考虑大气对测试结果的影响,而火药燃烧后的主要产物是大量的 CO₂、N₂ 和少量的 K₂S、CO,主要考虑避免 CO₂、N₂ 其对光谱的主要吸收带(表 1),所以基于比色测温的火炮膛温测试系统的测温波段的大致范围为 0.9 ~ 1.2 μm。

表 1 CO₂ 和 N₂ 对光谱的主要吸收带
Tab. 1 Main absorption bands of CO₂ and N₂

对象	吸收带/μm
CO ₂	2.0、2.7、4.3
N ₂	4.30

为进一步划分波长,需考虑不同波长情况下光电二极管传感器测得的电压与温度之间的关系。根据公式(2)、(3)有:

$$V = \alpha \frac{\varepsilon(\lambda, T) C_1}{\lambda^5 e^{C_2/\lambda T}} \quad (8)$$

为增强测温系统的适应性和稳定性,避免较小的扰动或者噪声引起测量结果的剧增,将 1 K 的温度变化量引起光伏强度的变化量从而导致电压的变化量定义为感光灵敏度 $S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$,灵敏度越大则系统

稳定性越好,在 0.9 ~ 1.3 μm 的范围内选择两个灵敏度最好的波段。根据公式(8)对温度 T 求导则为感光灵敏度:

$$S = V' = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta T} = \alpha \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1 C_2}{\lambda^6 T^2 e^{C_2/\lambda T}} \quad (9)$$

根据公式(9)在波长为 0.9 ~ 1.3 μm 的范围内,最高温度为 2500 °C 时,波长与电压—温度灵敏度之间的关系如图 3 所示;感光灵敏度在波长为 0.961 μm 达到峰值,且随着波长增大,感光灵敏度 S 逐渐减小,而波长 λ₁ 和 λ₂ 不宜相差过大,所以本系统的最优波长选择为 λ₁ = 0.960 μm, λ₂ = 1.000 μm。

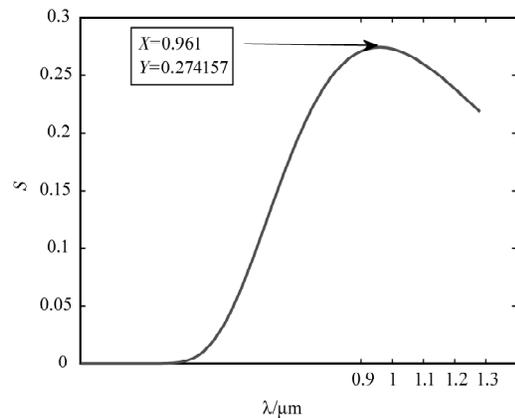


图 3 波长与感光灵敏度关系曲线

Fig. 3 Curve of wavelength vs. sensitivity of photosensitivity

由公式(6)可绘制出当波长 λ₁ = 960 nm、λ₂ = 1000 nm 时, η = -5.99 × 10²,此时电压比值与温度之间的关系如图 4 所示。

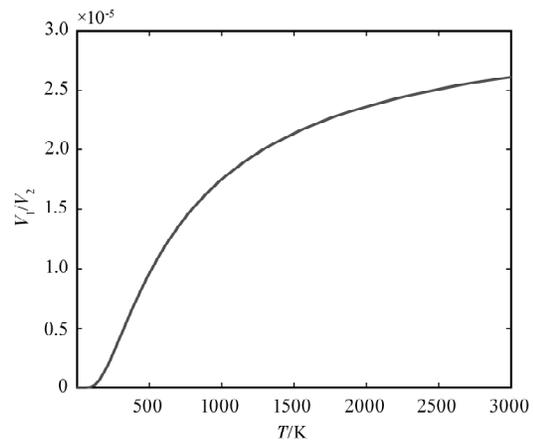


图 4 电压比值与温度关系曲线

Fig. 4 Relation curve between voltage ratio and temperature

4 比色测温系统

测温系统主要由光学系统、光电转换和放大电路、采集和存储模块组成。其整体结构如图 5 所示。

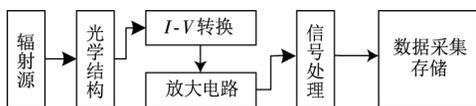


图 5 系统结构图

Fig. 5 System structure diagram

光学系统由高强度光窗、滤光片和光辐探测器组成如图 6 所示。该系统是一个单通道的结构,由光窗接收到光信号,同时可以起到缓冲作用和内外隔离,防止高温高压使滤光片损坏。光信号经过透镜汇集到滤光片上,被光辐探测器捕获,这里使用的是光电二极管,能够根据不同的光辐强度转变为不同的电压信号,实现光电的转换。

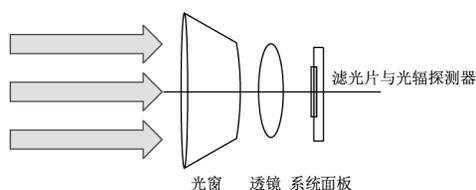


图 6 光学系统结构图

Fig. 6 Optical system structure

光电转换及差分放大电路如图 7 所示,电路结构放置于高强度壳体内如图 8 所示,再由光窗与外壳密封处理放置于火炮膛内,火药燃烧产生热辐射通过光学结构,经光电转换和放大电路将光信号转换为合适的电压信号,然后对两个通道进行数据的采集处理得到测试温度,最后进行数据的存储,将整个系统连接至计算机可读取测试数据。

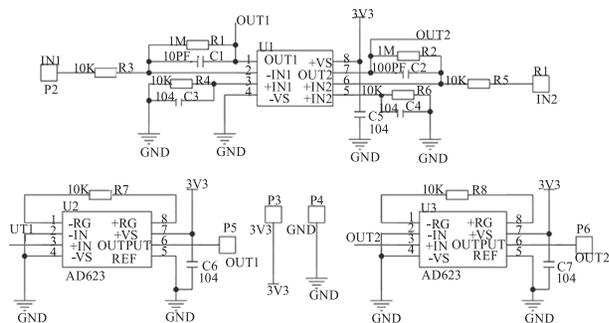


图 7 光电转换及差分放大电路

Fig. 7 Photoelectric conversion and differential amplifier circuit



图 8 光窗与壳体

Fig. 8 Light window and physical shell

5 系统标定实验

由公式(6)可知,当波长确定后 K 是一个与温度无关仅与系统相关的系数。将高精度黑体炉作为标准辐射源,再通过测试系统测量当前温度,得到此温度下的电压比值 V_1/V_2 ,将此刻的标准温度代入公式(6)中可推算出 K 的值。本次实验中光窗距离黑体炉透射窗口 10 cm,测量的温度范围为 1500 ~ 2500 K,每个温度通过多次测量取平均值的方法。实测结果如表 2 所示。

表 2 实验测量结果

Tab. 2 Experimental measurement results

标准温度 /K	电压比值 V_1/V_2	标准温度 /K	电压比值 V_1/V_2
1500	0.7486	2100	0.8391
1600	0.7675	2200	0.8501
1700	0.7846	2300	0.8602
1800	0.8002	2400	0.8696
1900	0.8143	2500	0.8784
2000	0.8273	/	/

利用 matlab 软件分别使用最小二乘法和遗传算法对表 2 数据进行拟合,遗传算法^[18-19]具有很强的并行、随机和自适应的全局优化能力,本次实验中将误差设为优化目标,能够很好的适用于曲线拟合这类函数优化问题。通过“优胜劣汰”的原则不断迭代,在产生的初始个体中通过不断的复制、交叉、变异等操作找到最优的子代,子代通过不断进化直到收敛到最符合目标条件地最优个体,即最优解。过程如下:

- 1) 选用实数编码的方式,更为直观,快速,准确。
- 2) 随机生成大量初始个体,再从中经过筛选出满足适应度函数的个体构成初始种群。
- 3) 为减少进化过程中产生的局部最优解,使算法满足非负特性,将适应度函数变换为:

$$\begin{cases} f' = e^{-af(x)} \\ a = \frac{m}{f_{avg} + \epsilon} \sqrt{t}, m = 1 + \log T \end{cases} \quad (10)$$

式中,由于是求最小化问题, $f(x)$ 为原目标函数; a 为动态正数,随进化代数改变; t 为当前进化代数; ϵ 为足够小的正数; f_{avg} 为种群适应度的平均值,且为非负数,可满足分母不为零; T 为种群最大遗传数。

4)采用比例选择法筛选优良的子代。即每个子代个体被选择的概率为:

$$P_i = f_i / \sum f_i \quad (11)$$

其中, f_i 为个体的适应度;

5)交叉算子采用整体算术交叉算子,随机选择 n 个个体以概率 P_c 进行交叉。

对公式(6)两边同时取对数,进行线性转换有:

$$\ln V = \ln K + \frac{\eta}{T} + A \quad (12)$$

式中, $V = \frac{V_1}{V_2}$; $A = \ln \frac{C_1}{C_2} - 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$; A 与 η 均为常数。

令: $x = \frac{1}{T}$; $y = \ln V$ 。则式(12)以 $y = \eta x + b + A$ 的线性方程进行拟合。 K 的值为:

$$K = \exp(\bar{y} - \eta \bar{x} - A) \quad (13)$$

二乘法拟合曲线如图 9 所示,遗传算法拟合曲线如图 10 所示。

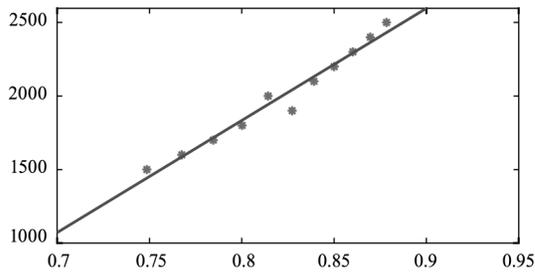


图 9 最小二乘法拟合曲线
Fig. 9 Least square fitting curve

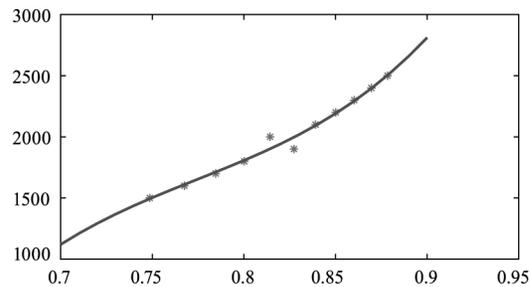


图 10 遗传算法拟合曲线
Fig. 10 Fitting curve of genetic algorithm

分别计算两种方法的误差、残差平方和和标准差进行拟合结果对比如表 3 所示。

由表三可知,遗传算法拟合结果的误差、残差平方和都要比传统的最小二乘法的拟合结果小,标准差相差不大,在精度上有明显提高。由于最小二乘法对初值的要求更强,而初值往往很难确定,利用遗传算法可以确定初值,收敛快,在多参数的数据拟合更占优势。

表 3 两种方法的结果对比

Tab. 3 Comparison of the results of the two methods

标准温度 /K	最小二乘法 /K	误差 /%	遗传算法 /K	误差 /%
2000	2016.98	0.85	1997.43	0.13
2100	2124.54	1.17	2105.79	0.28
2200	2189.56	0.47	2196.80	0.15
2300	2334.60	1.50	2294.05	0.26
2400	2423.87	0.99	2395.82	0.17
2500	2482.32	0.71	2508.16	0.33
残差平方和 Q	312.58		66.59	
标准差 σ	3.28		3.55	

6 结论

通过对火炮膛内环境和比色测温波长与采集电压之间的感光灵敏度关系的分析,得出基于比色测温的火炮膛内温度测试仪的最优波长为 $0.960 \mu\text{m}$ 和 $1.000 \mu\text{m}$,给出了比色测温法在实际过程中最优波段的选取方法。在标定过程中,相比最小二乘法,遗传算法在曲线拟这类函数优化问题上精度要更高,整体测量误差不超过 4%,对火炮膛温测试研究具有重要意义。

参考文献:

[1] Zhao Yankai. The gun fire in transient temperature measurement technology research [D]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
赵彦凯. 火炮膛内瞬态温度测试技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2021.

[2] Shi Haowei. Research on pressure temperature test and calibration technology in fire gun chamber [D]. Taiyuan: North University of China, 2022. (in Chinese)
师浩伟. 火炮膛内压力温度测试及其校准技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.

[3] Wang B T, Niu Y X, Yang Y, et al. Sapphire fiber high-temperature sensor based on colorimetric method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-6.

[4] Cui Wenli, Han Yan. Research on reconstruction technology of explosion temperature field [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2009, 31(3): 38-41. (in Chinese)
崔文丽, 韩焱. 爆炸温度场的重建技术研究 [J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(3): 38-41.

[5] Han Chu, Zhou Wen. Discussion on a specific wavelength radiation temperature measurement method [J]. Metrology

- and Measurement Technique, 2021, 48(6): 74 - 75. (in Chinese)
- 韩础, 周文. 浅谈一种特定波长的辐射测温方法[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(6): 74 - 75.
- [6] Zhang Wei. Radiation temperature measurement based on optimization algorithm simulation research [D]. Huangshi: Hubei Normal University, 2020. (in Chinese)
- 张伟. 基于最优化算法的辐射测温仿真研究[D]. 黄石: 湖北师范大学, 2020.
- [7] Sun K, Sun Xiaogang, Yu Xiaoyang, et al. Development of a multispectral thermometer for measuring the true temperature of explosion flame-field experiment and measurement accuracy analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1719 - 1722. (in Chinese)
- 孙崐, 孙晓刚, 于晓洋, 孙晓明. 测量爆炸火焰真温的多光谱温度计的研制——现场实验与测量精度分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1719 - 1722.
- [8] Hong Tu. Research on temperature field measurement technology based on multi-spectral camera [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- 洪途. 基于多光谱相机的温度场测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- [9] Rao K S, Ganesh D, Yehya F, et al. A comparative study of thermal stability of TNT, RDX, CL20 and ANTA explosives using UV 266 nm-time resolved photoacoustic pyrolysis technique [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 211: 212 - 220.
- [10] Shi W, Li Y, Chen R, et al. Research on synchronous measurement technique of temperature and deformation fields using multispectral camera with bilateral telecentric lens [J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2022, 12(3): 100345.
- [11] Girard F, Battuello M, Florio M. Multiwavelength thermometry at high temperature; why it is advantageous to work in the ultraviolet [J]. International Journal of Thermophysics, 2014, 35: 1401 - 1413.
- [12] Zhou Hui, Liu Yang, Zhu Xiuwei, et al. Design of wireless channel temperature measurement system based on infrared sensing and image processing [J]. Medical Equipment, 2022, 35(23): 38 - 42, 45. (in Chinese)
- 周惠, 刘洋, 朱秀委, 白思思. 基于红外传感与图像处理的无线通道测温系统的设计[J]. 医疗装备, 2022, 35(23): 38 - 42, 45.
- [13] Qian Yujiao. Study on temperature field of laser 3D printing monitored by color CCD [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022. (in Chinese)
- 钱雨皎. 彩色 CCD 监控激光 3D 打印温度场的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [14] Junhong Y, Xiaoqing B. Research on slab surface temperature-measurement of continuous casting based on CCD imaging [C] // IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, IEEE, 2011, 3: 29 - 32.
- [15] Yan R, Xiaomin Z, Li F. Survey of dual waveband colorimetric temperature measurement technology [C] // The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), IEEE, 2014: 5177 - 5181.
- [16] Zhang Qiwei, Cheng Yangfan, Xia Yu, et al. Application of colorimetric temperature measurement technique in transient explosion temperature field measurement [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(11): 105 - 117. (in Chinese)
- 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): 105 - 117.
- [17] Wan Ni. Detection and numerical simulation of flame temperature and carbon black concentration distribution based on spectral method and colorimetric temperature measurement [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022. (in Chinese)
- 万倪. 基于光谱法与比色测温技术的火焰温度与碳黑浓度分布检测与数值模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [18] Liu Qingqing, Yang Youliang, Meng Fanwei, et al. Improved genetic algorithm in the application of metal temperature measuring system [J]. Journal of Modern Electronic Technology, 2018, 9(21): 96 - 100, 105. (in Chinese)
- 刘晴晴, 杨友良, 孟凡伟, 等. 改进遗传算法在金属测温系统中的应用[J]. 现代电子技术, 2018, 41(21): 96 - 100, 105.
- [19] Guo S, Liang J. Research on boiler temperature field reconstruction algorithm based on genetic algorithm [C] // 2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC). IEEE, 2017: 682 - 685.