

大气与环境影响分析的红外比色测温方法

吕游^{1,2}, 杨波³, 魏仲慧¹, 何昕¹, 常松涛^{1,2}, 孙志远¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长春理工大学 电信学院, 吉林 长春 130033)

摘要:传统的比色测温法通常利用可见光和近红外波段, 对距离较近的高温目标具有较高的测量精度, 而对距离较远的中低温目标无法精确测量。针对传统比色方法适用局限性, 提出考虑大气和环境影响的红外比色测温方法, 建立基于中波红外相机的比色测温实验系统。首先使用标准黑体进行中波红外相机和比色系统单波段定标; 然后推导加入环境辐射参数的比色测量模型, 进而建立新的目标辐射亮度比值与目标温度间的函数关系; 最后, 进行了实验室内自制灰体目标温度测量实验, 验证了提出方法的可行性。实验表明: 在实验温度范围内, 温度绝对误差和相对误差分别小于 4 °C 和 6.7%, 目标辐射亮度测量精度高于 10%, 考虑大气与环境影响的比色测温方法可实现中低温目标温度精确测量。

关键词: 非接触测温; 比色测温方法; 环境辐射; 比色定标; 温度

中图分类号: TP732.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2309-06

Middle infrared colorimetric temperature measurement method considered influence of atmosphere and ambient

Lv You^{1,2}, Yang Bo³, Wei Zhonghui¹, He Xin¹, Chang Songtao^{1,2}, Sun Zhiyuan¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Institute of Telecommunications, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130033, China)

Abstract: Traditional colorimetric temperature measurement method commonly used in visible and near infrared band, can only get high precisions when measuring near high temperature target, and can't get high precisions when measuring far low-middle temperature target. Aimed at the limitations of traditional method, infrared colorimetric temperature measurement method was put forward considering atmosphere and ambient radiance, an colorimetric temperature measurement system based on middle infrared camera was established. First, standard blackbody was used for calibration of middle infrared camera and single-band of colorimetric system; then colorimetric temperature measurement model with ambient radiance parameter was deduced, a new function between ratio of two radiances and temperature of target was established; finally, measurement temperature of home-made gray-body in the laboratory was made, the feasibility of proposed method was verified. Experiments show that: in the experimental temperature

收稿日期: 2014-12-08; 修订日期: 2015-01-13

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121502)

作者简介: 吕游(1988-), 男, 博士生, 主要从事数字图像处理、红外辐射特性测量方面的研究。Email: lvyou8863@163.com

导师简介: 何昕(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事数字图像处理、光电测量等方面的研究。Email: hexin6627@sohu.com

range, absolute error of temperature measurement is less than 4 °C, the temperature relative error is less than 6.7%, the measurement accuracy of radiation intensity is higher than 10%. The colorimetric temperature measurement method considering atmosphere and ambient is greatly superior to traditional method.

Key words: non-contact temperature measurement; colorimetric temperature measurement; environmental radiation; calibration of colorimetric; temperature

0 引言

温度是物质本身的重要特性之一,作为目标特性的重要参数,温度测量在国防军事领域发挥着十分重要的作用^[1]。辐射测温法是一种以普朗克辐射定律为基础的非接触测温方法,具有测温范围宽、实时性高、灵敏度高、安全可靠且不破坏被测物温度场等特点,因此在恶劣环境测温中广泛应用^[2]。辐射测温法主要包括亮度测温法、全辐射测温法和比色测温法^[3]。比色测温法作为一种非接触测温方法,具有辐射测温法的全部优点,同时相比亮度测温法和全辐射测温法,比色测温法无需知道被测物的发射率,即可获取被测物的真实温度,解决了发射率测量困难对测温的限制^[4-5]。

目前,比色测温方法广泛应用在国防、军事、科研及工业生产中^[6-7],这些应用一般在可见光和近红外波段近距离测量高温目标(600 °C以上)^[8-9],探测路径上的大气和环境辐射对测温结果影响较小,因此比色测温中未考虑大气和环境辐射对目标比色测温的影响。针对以上问题,冯文婧设计了基于中波红外探测器比色测温仪,但只能测量高温目标^[10]。曹立华、邢冀川等人提出基于中、长波双波段比色测温方法,考虑大气影响,提高了目标测温精度^[11-12],但所选波段较宽,对于多数目标无法保证比色测温方法中的发射率相等的假设,很难满足实际应用。

综上,在对中低温目标进行比色测温时,需考虑大气及环境对测温精度的影响。文中首先分析了比色测温的基本原理,给出使用滤光片进行比色测温可行性,并考虑大气及环境因素,对传统比色方法定标和测量模型进行改进,搭建基于中波红外相机的单通道比色测温实验平台,进行中低温目标实验室内测温实验,获得了较高的测温精度,为比色测温方法在光电测量系统中的应用奠定基础。

1 比色测温原理

比色测温方法以黑体辐射普朗克定律为基础,通过建立被测目标在两个波长下的光谱辐射亮度之比与温度之间的函数关系来确定被测目标的真实温度^[13]。

实际应用中,使用窄带滤光片获取目标在窄波段段的能量,温度为 T 的目标单波段等效辐射亮度可表示为:

$$L_r = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\Delta\lambda_N} \tau_{\text{atm}}(\lambda) \times \tau_{\text{opt}}(\lambda) \times R_{\text{det}}(\lambda) \times R_{\text{fil}}(\lambda) \times L_b(\lambda, T) d\lambda \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_N$ 为滤光片的透过波段; ε 为 $\Delta\lambda_N$ 波段内的目标发射率; $\tau_{\text{atm}}(\lambda)$ 为 $\Delta\lambda_N$ 波段内大气光谱透过率; $\tau_{\text{opt}}(\lambda)$ 为 $\Delta\lambda_N$ 波段内光学系统光谱透过率; $R_{\text{det}}(\lambda)$ 为探测器的光谱响应率; $R_{\text{fil}}(\lambda)$ 为滤光片的光谱透过率; $L_b(\lambda, T)$ 为温度 T 黑体的普朗克公式。

近距离测量时,忽略大气吸收影响,视光学系统光谱透过率为常数 τ_{opt} ,则目标在两个滤光片透过波段的辐射亮度比值 $R(T)$ 可表示为:

$$R(T) = \frac{L_{r1}}{L_{r2}} = \frac{\frac{\varepsilon_1 \tau_{\text{opt}}}{\pi} \int_{\Delta\lambda_{N1}} R_{\text{det}}(\lambda) R_{\text{fil1}}(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda}{\frac{\varepsilon_2 \tau_{\text{opt}}}{\pi} \int_{\Delta\lambda_{N2}} R_{\text{det}}(\lambda) R_{\text{fil2}}(\lambda) L_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (2)$$

式中:所有物理量定义与之前相同,下标 1 和 2 为滤光片序号。

假设目标在波段 $\Delta\lambda_{N1}$ 和 $\Delta\lambda_{N2}$ 发射率相等,由上式可消去发射率和光学系统透过率影响,得到 $R(T)-T$ 曲线,由被测目标双波段辐射亮度比值反演得到目标真实温度^[14]。

2 考虑环境影响的比色测温方法

2.1 定标模型

文中比色测温实验系统定标采用镜头前定标方法,即定标时将黑体放在光学镜头前,覆盖测量系统

入瞳,为减小探测路径上大气程辐射、吸收和散射等因素对定标的影响,黑体与相机入瞳的距离尽量小^[15],如图 1 所示。

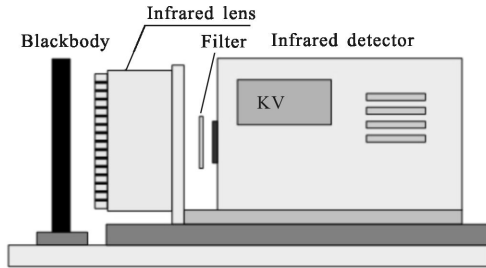


图 1 定标示意图

Fig.1 Schematic diagram of calibration

考虑滤光片对目标辐射亮度的影响,温度为 T_b 的黑体滤光片范围内窄带辐射亮度 $L_{BN}(T_b)$ 可表示为:

$$L_{BN}(T_b) = \tau_{opt} \int_{\Delta\lambda_N} R_{det}(\lambda) R_{fil}(\lambda) \times L_b(\lambda, T_b) d\lambda \quad (3)$$

在中波红外探测器的线性响应区内,比色测温系统探测器像元的输出灰度值可以表示为^[16-17]:

$$h = G_N \times L_{BN}(\lambda, T_b) + B_N \quad (4)$$

式中: G_N 为比色测温系统对目标等效射辐射亮度的响应率; B_N 为比色测温系统定标模型的偏置,包含红外系统内部杂散辐射(光学镜头及机械结构的辐射等)引起的像元灰度输出和探测器自身(暗电流等)引起的像元灰度值输出,同时包含滤光片自身辐射引起的像元灰度值输出。

比色测温系统单波段定标时,采用线性最小二乘方法拟合黑体辐射亮度 $L_{BN}(T_b)$ 和对应灰度值 h 得到单波段定标曲线的斜率 G_N 和偏置 B_N ,完成比色测温实验系统单波段定标。

2.2 测量模型及比色定标曲线

根据比色测温法的假设,认为比色测温目标为灰体,发射率为 ε ,受外界环境影响,比色测温系统接收到的辐射不只是目标自身辐射,同时包含环境辐射经被测目标表面反射的辐射和大气环境自身辐射^[18]。测量过程中,到系统入瞳处的总辐射亮度可表示为:

$$L_{tot} = \tau_{atm} \varepsilon L_{obj} + L_{path} + (1 - \varepsilon) L_{atm} \quad (5)$$

根据比色测温系统的定标结果,将 L_{tot} 带入定标公式(6)中,得到比色系统测量模型:

$$h = G_N \tau_{atm} \varepsilon L_{obj} + G_N L_{path} + G_N (1 - \varepsilon) L_{atm} + B_N \quad (6)$$

对于两片滤光片分别存在于探测路径中,分别有测量公式:

$$h_1 = G_{N1} \tau_{atm1} \varepsilon_1 L_{obj1} + G_{N1} L_{path1} + G_{N1} (1 - \varepsilon_1) L_{atm1} + B_{N1} \quad (7)$$

$$h_2 = G_{N2} \tau_{atm2} \varepsilon_2 L_{obj2} + G_{N2} L_{path2} + G_{N2} (1 - \varepsilon_2) L_{atm2} + B_{N2} \quad (8)$$

以上两式中,所有变量与前文所述相同,下标 1 和 2 为滤光片序号。

由公式(7)、(8)分别表示发射率,并根据之前假设,目标发射率在两个滤光片透过波段相等,可得:

$$\frac{\alpha_2 L_{obj2} - \beta_2}{\alpha_1 L_{obj1} - \beta_1} = \frac{h_2 - B_{N2} - G_{N2} L_{path2} - \beta_2}{h_1 - B_{N1} - G_{N1} L_{path1} - \beta_1} \quad (9)$$

式中: $\alpha_1 = G_{N1} \tau_{atm1}$, $\alpha_2 = G_{N2} \tau_{atm2}$, $\beta_1 = G_{N1} L_{atm1}$, $\beta_2 = G_{N2} L_{atm2}$,所有参数均为已知量。

根据公式(9),定义比色测温系统中两个滤光片黑体辐射亮度比值如下式:

$$R(T) = \frac{\alpha_2 L_{obj2} - \beta_2}{\alpha_1 L_{obj1} - \beta_1} \quad (10)$$

测温前,根据公式(10)计算系统双波段辐射亮度比值 $R(T)$,获得比色定标曲线,测温时,分别采集两个波段目标测量图像,将图像灰度值及相应物理量带入公式(9)右侧,计算双波段辐射能实际比值,并代入 $R(T)-T$ 曲线中,反演目标真实温度。

3 比色测温实验

3.1 比色测温实验平台搭建

文中比色测温实验系统以中波红外相机为基础,主要包括中波红外探测器、光学镜头、带通红外干涉滤光片、黑体和灰体模拟装置。红外探测器工作波段 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$,光谱响应曲线如图 2 所示,探测像元大小 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,输出图像位数 14 位,光学镜头焦距 100 mm , $F/\# = 2$ 。该系统中的滤光片为 Spectrogon 公司的中波红外带通干涉滤光片,其中心

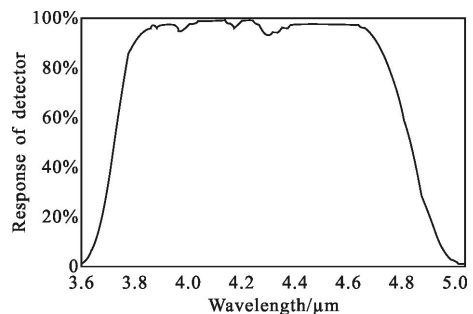


图 2 探测器的光谱响应曲线

Fig.2 Spectral response of detector

波长为 4 520 nm 和 4 665 nm, 带宽分别为 220 nm 和 240 nm, 将其分别固定在滤光片切换装置上, 置于探测器与光学镜头之间, 并紧贴探测器前端, 保证透过镜头的辐射能量全部到达探测器入瞳处。

实验中使用的黑体为以色列 CI 公司的 SR800 型高精度面源黑体, 黑体口径 100 mm×100 mm, 温度范围 0~125 °C, 发射率 0.97, 控温精度 0.01 °C。

为了验证文中比色测温方法的测温精度, 自制灰体模拟装置模拟灰体目标, 该装置是将自制的发射率板固定在恒温加热台加热表面, 自制发射率板为中波段内的灰体, 在滤光片波段发射率近似相等。灰体模拟装置采用热电阻加热, 加热温度范围为 20~400 °C, 温度精度 0.2 °C, 测温热电偶内置在加热台中心位置, 温度值可由显示装置实时显示。灰体模拟装置实物图如图 3(a)所示。

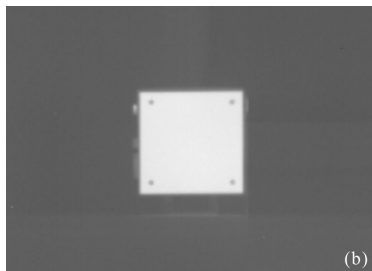
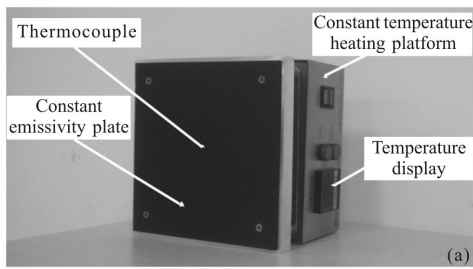


图 3 灰体目标及其测量图像

Fig.3 Gray-body and its measurement image

3.2 实验流程

3.2.1 定标实验

文中实验红外相机积分时间为 0.66 ms, 实验前将滤光片放置在探测器前相同位置, 调节红外相机至 9 m 远目标清晰成像状态, 定标时将面源黑体放置在镜头前, 覆盖系统入瞳, 单波段定标如图 4 所示。

以 10 °C 间隔采集黑体在不同滤光片波段下的 30~120 °C 定标图像, 最小二乘拟合定标图像灰度值与黑体辐射亮度曲线, 两个单波段定标结果如公式(11)、(12)所示。

$$h=1\,275.3\times L_{\text{effBN}}(\lambda, T_b)+2\,178.3 \quad (11)$$

$$h=1\,275.2\times L_{\text{effBN}}(\lambda, T_b)+2\,240.2 \quad (12)$$

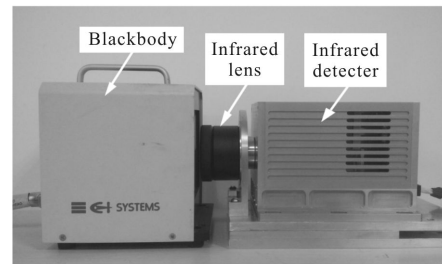


图 4 全波段辐射定标

Fig.4 Radiance calibration

依据单波段定标结果, 结合公式(10)建立 $R(T)-T$ 曲线, 如图 5 所示, 完成比色测温系统定标。

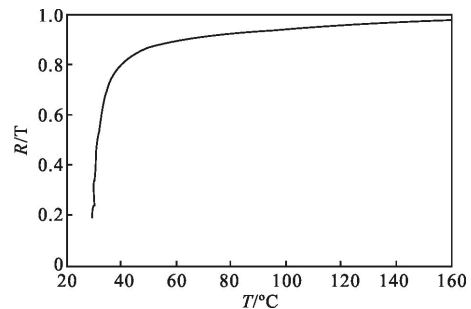


图 5 辐射亮度比值与温度关系曲线

Fig.5 $R(T)$ as a function of T

3.2.2 测量实验

在实验室内进行灰体目标温度测量实验, 选择积分时间为 0.66 ms, 测量距离为 9 m, 环境温度 22.9 °C, 分别采集不同滤光片波段下, 40 °C、80 °C、100 °C、120 °C、150 °C 目标测量图像。为了准确获取两个滤光片波段的探测路径上的大气透过率和程辐射, 在目标附近放置参考黑体, 以 10 °C 为间隔, 分别采集不同滤光片波段的黑体 60~120 °C 测量图像, 使用标校方法, 计算探测路径上的大气透过率和程辐射, 大气透过率、程辐射及环境辐射计算结果如表 1 所示。

表 1 大气参数和环境辐射

Tab.1 Atmospheric parameters and ambient radiance

| | Atmosphere transmittance | Path radiance / $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ | Ambient radiance / $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ |
|----------|--------------------------|---|--|
| 4 520 nm | 0.790 3 | 0.091 1 | 0.304 3 |
| 4 665 nm | 0.849 9 | 0.079 6 | 0.320 2 |

目标在中心波长为 4 665 nm 滤光片波段的测量图像如图 3(b)所示,目标成像区域均匀,在目标区域中心选取 49 pixel×49 pixel 区域为测温区域,将表 1 中数据及测温区域内各点灰度值代入公式(10)右侧计算实际辐射亮度比值,结合 曲线,反演各测温像素点温度,取所有测温点温度平均值为被测目标温度,以热电偶测量的温度为目标表面温度真值,测量结果如表2 所示。

表 2 文中方法测温结果

Tab.2 Measurement results of proposed method

| Temperature /°C | Average of R | Measured temperature/°C | Relative error of temperature | Radiance in middle infrared | | |
|-----------------|--------------|-------------------------|-------------------------------|---|--|-------------------|
| | | | | Radiance /W·m ⁻² ·sr ⁻¹ | Measured radiance /W·m ⁻² ·sr ⁻¹ | Error of radiance |
| 40 | 0.8192 | 42.68 | 6.69% | 2.0819 | 2.2744 | 9.24% |
| 80 | 0.9200 | 83.43 | 4.28% | 6.8168 | 7.4561 | 9.38% |
| 100 | 0.9426 | 101.20 | 1.20% | 11.2393 | 11.5611 | 2.86% |
| 120 | 0.9575 | 123.95 | 3.30% | 17.6331 | 19.1744 | 8.74% |
| 150 | 0.9731 | 151.49 | 0.99% | 32.0498 | 32.9434 | 2.79% |

使用文中实验数据,采用传统比色测温方法与文中方法进行精度比较,传统比色测量方法进行近距离高温目标测量时不考虑大气的影响,而在距离稍远时考虑大气透过率的影响但不考虑程辐射和背景反射辐射。采用考虑大气透过率的传统比色测温方法得到的结果如表 3 所示。

表 3 传统比色测温方法测温结果

Tab.3 Measurement results of traditional method

| Temperature /°C | Average of R | Measured temperature/°C | Relative error of temperature | Radiance in middle infrared | | |
|-----------------|--------------|-------------------------|-------------------------------|---|--|-------------------|
| | | | | Radiance /W·m ⁻² ·sr ⁻¹ | Measured radiance /W·m ⁻² ·sr ⁻¹ | Error of radiance |
| 40 | 0.9609 | 34.12 | -14.70% | 2.0819 | 1.7051 | -18.10% |
| 80 | 1.0018 | 82.92 | 3.65% | 6.8168 | 7.3576 | 7.93% |
| 100 | 1.0212 | 110.98 | 10.98% | 11.2393 | 14.4741 | 28.78% |
| 120 | 1.0341 | 131.80 | 9.83% | 17.6331 | 22.5360 | 27.81% |
| 150 | 1.0474 | 155.53 | 3.69% | 32.0499 | 35.4645 | 10.65% |

3.3 结果分析

表 2 和表 3 给出了文中方法及传统比色测温方法 5 个温度的测温结果。由表 2 可知,文中测温方法测温绝对误差在 4 °C 以内,相对误差在 7% 以下,温度测量精度较高,中波辐射亮度相对误差在 10% 以内,被测目标温度越高测温精度越高,符合。表 3 为传统比色测温方法测温结果,可以看出温度计算结果较实际温度偏差很大,在 100 °C 和 120 °C 时,温度绝对误差和中波辐射亮度相对误差甚至达到了 11 °C 和 28%,这种偏差主要源于在计算实际辐射亮度比值时未考虑目标反射环境辐射和程辐射的影响,导致比值偏大,温度计算值偏大。

由以上分析可以看出,传统比色测温法即使考虑大气吸收的影响,测温精度依旧较低,尤其是在低温区域,可见使用传统比色测温方法测量低温时,大气程辐射和环境辐射影响对测温精度影响较大;而文中比色方法同时考虑了大气和环境对测温影响,不仅适用于高温目标温度测量,且对中低温目标也有较高的测温精度。文中实验测量目标最高温度为 150 °C,实际测温过程中可选定更低积分时间以提高测量温度范围上限,值得说明的是,由于篇幅限制,文中只给出了一个积分时间下的温度计算结果,其它积分时间温度计算结果表明,在探测器的线性响应区内,探测器光谱通道的灵敏度对文中方法测温精度几乎没有影响。

4 结 论

远距离测温受目标发射率、大气参数和环境辐射的影响,传统比色测温方法能够很好的消除发射率的影响,但未考虑大气参数和环境辐射,中低温段精度不高。文中提出考虑大气和环境影响的比色测温方法,建立考虑环境因素的比色测温定标和测量模型,实现对中低温目标的精确测温。实验表明,文中比色测温实验方法能够有效减小大气和环境对比色测温的影响,对中低温目标测温精度高于传统比色测温法。

文中比色测温方法考虑了大气和环境辐射影响,可在不同使用环境和测量距离的情况下,实现目标温度测量。在工业生产的温度监测过程中,当监测距离或者周围环境发生变化时,文中方法只需重新测量大气参数和环境温度即可实现目标温度测量,

因此文中方法对监测距离变化情况具有更强的适用性。在军事方面文中方法可应用在目标辐射测量系统中,理论上可实现被测目标真实温度测量,对提高低红外发射率目标辐射特性测量精度的研究具有一定意义。

参考文献:

- [1] Feng Chi, Zhang Chongguan, Wang Zhaofeng, et al. The wavelength selection of colorimetric temperature measurement [J]. *Applied Science and Technology*, 2013, 40(3): 45-49.
- [2] Shahla Keyvan, Rodney Rossow, Carlos Romero. Blackbody-based calibration for temperature calculations in the visible and near-IR spectral ranges using a spectrometer[J]. *FUEL*, 2006, 85: 796-802.
- [3] Li Jun, Liu Meidong, Zen Yike, et al. Research on non-contact infrared temperature measurement [J]. *Piezoelectrics & Acousto Optics*, 2001, 23(3): 202-205.
- [4] Shi Deheng, Dai Qirun, Chen Yuke, et al. Optimal design of a practical dual-wavelength high-precision fiber-optic colorimeter [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(12): 1238-1243.
- [5] Si Yang. Research of dual-wavelength temperature measurement method based on color image sensor [D]. Xi'an: North University of China, 2013. (in Chinese)
- [6] Wu Haibin, Wang Peng, Zhou Houwei, et al. Influence of furnace environment radiation on colorimetry temperature measurement [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(2): 224-229. (in Chinese)
- [7] Sun Yuan, Peng Xiaoqi, Tang Ying. Revised method of temperature measurements using two-color thermometry based on CCD image sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(1): 49-54.
- [8] Zhu Jianhua. Transient high-temperature measurement based on colorimetric temperature measurement technology for high-energy damage blast field [D]. Xi'an: North University of China, 2011.
- [9] Carlos Romero, Xianchang Li, Shahla Keyvan. Spectrometer-based combustion monitoring for flame stoichiometry and temperature control [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25: 659-676.
- [10] Feng Wenjing. Research on intermediate infrared colorimetric pyrometry system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] Cao Lihua. Correction-based dual-waveband color comparison thermometric method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(8): 1882-1888. (in Chinese)
- [12] Xing Jichuan, Liu Guangrong, Jin Weiqi, et al. Dual waveband colorimetric temperature measurement method and analysis [J]. *Infrared Technology*, 2013, 23(1): 71-75. (in Chinese)
- [13] Ren Y, Zhou X M. Survey of dual waveband colorimetric temperature measurement technology [C]//2014 26th Chinese Control and Decision Conference(CCDC), 2014: 5177-5181.
- [14] Li Yunhong, Ma Rong, Zhang Heng, et al. Dual waveband colorimetric temperature accurate measurement technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 27-35. (in Chinese)
- [15] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 23(1): 0712006-1-0712006-7. (in Chinese)
- [16] Luo Maojie, Zhou Jinmei, Fu Jingneng, et al. Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 36-40. (in Chinese)
- [17] Han Qijin, Zhang Xuewen, Qiao Zhiyuan, et al. Wide dynamic radiometric calibration of GF-1 PMS sensors using multi-test sites [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 127-133. (in Chinese)
- [18] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei, et al. Radiation calibration of infrared system by amendment of inner and outer calibrations [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 356-362. (in Chinese)