

文章编号:1672-8785(2015)01-0040-06

# 高空远距离目标红外辐射及 大气衰减模型研究

郑跃瑜<sup>1</sup> 张志龙<sup>2</sup> 郭 建<sup>1</sup>

(1. 湘潭大学物理与光电工程学院, 湖南湘潭 411105;

2. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 结合普朗克辐射定律, 采用双波段测温法分析了高空远距离目标的温度与红外辐射。提出了一种目标投影面积的计算方法。由于是远距离探测, 在考虑地球曲率的情况下提出了一种计算任意方向两点大气衰减的计算模型, 并分析了不同探测距离下 3~5 μm 和 8~12 μm 两个波段红外辐射的衰减情况。实验结果表明, 在 10 km 左右的高空中, 目标红外辐射测量的距离可以从低空的几十公里增加到几百公里, 这为进一步分析目标辐射特性提供了理论与技术上的支撑。

**关键词:** 红外探测; 红外辐射; 双波段; 大气透过率; 计算模型

中图分类号:TN215 文献标志码:A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.01.008

## Study of Infrared Radiation of Distant High-altitude Targets and Atmospheric Attenuation Model

ZHENG Yue-yu<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-long<sup>2</sup>, GUO Jian<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Optoelectronics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. ATR Key Laboratory, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In combination with Plank's radiation law, a dual-band temperature measurement method is used to analyze the temperature and infrared radiation of a distant high-altitude target. A method for calculating the projected area of the target is proposed. Because the target is detected at a long distance, a model for calculating the atmospheric attenuation in arbitrary direction of two sides taking the curvature of the earth into account is presented. It is used to analyze the attenuation of infrared radiation in both 3 to 5 μm and 8 to 12 μm bands at different distances. The experimental result shows that in the high altitude about 10 km away, the measuring distance of the infrared radiation from the target can be increased from a few tens of kilometers in low altitude to hundreds of kilometers. This provides a theoretical and technical support for the further analysis of the radiation characteristics of targets.

**Key words:** infrared detection; infrared radiation; dual-band; atmospheric transmittance; calculation model

---

收稿日期: 2014-11-21

作者简介: 郑跃瑜(1987-), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail: zhengyueyu2007@126.com

## 0 引言

近年来, 报道了很多利用红外手段对一定距离目标的温度、红外辐射等特征进行测量的研究。目标温度测量从接触测温发展到了非接触测量即辐射测温<sup>[1,2]</sup>。目前使用广泛、技术成熟且精度较高的辐射测温方法是双色测温法<sup>[3,4]</sup>。该测温方法不需要知道被测物体的发射率, 并且能在一定程度上消除外界环境如烟、雾等对测温系统的干扰<sup>[5,6]</sup>。比色测温法常选用单一的波长, 而测温系统的滤光片具有一定的带宽。目前, 比色测温主要应用于近距离高温测量。在具有一定距离并且温度不是很高(1000 K以下)的目标的温度测量中, 双色测温法无能为力。针对上述问题, 将双波段测温<sup>[7,8]</sup>方法应用在中远距离目标的温度测量中。由于被测目标和探测器一般处于10 km左右的高空, 所以探测器可以离被测目标很远。相对于低空测量, 探测距离可以提高一个数量级<sup>[9]</sup>。提出了一种计算目标面积的数学模型, 并分析了3~5 μm以及8~12 μm两个波段内目标红外辐射的衰减情况, 为进一步分析目标红外辐射特性提供了理论与技术上的支撑。

## 1 双波段测温原理及目标辐射计算

### 1.1 双波段测温原理

双波段测温就是测量目标在两个波段上的辐射积分, 并由其比值来确定目标的辐射温度。

根据普朗克辐射定律, 一个绝对温度为T(K)的黑体, 单位表面积在波长λ附近单位波长间隔内向整个半球空间发射的辐射功率(简称为光谱辐射度)  $M_0(\lambda, T)$  与波长λ、温度T满足下列关系:

$$M_\lambda(T) = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1} \quad (1)$$

式中,  $C_1$  为第一辐射常数,  $C_1 = 2\pi hc^2 = 3.741832 \times 10^8 \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\mu\text{m}$ ;  $C_2$  为第二辐射常数,  $C_2 = hc/k = 1.438786 \times 10^4 \text{ }\mu\text{m}\cdot\text{k}$ 。

温度为T、发射率为ε(λ)的目标在探测器面上的光谱辐射照度为

$$E_T(\lambda) = \frac{1}{4} \varepsilon(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_0(\lambda) M_0(\lambda, T) \left[ \frac{D}{f'} \right]^2 \quad (2)$$

式中, D 和  $f'$  分别为探测器的通光孔径和焦距;  $\tau_a(\lambda)$  和  $\tau_0(\lambda)$  为大气及探测器的光谱透过率。

于是, 在  $\Delta\lambda_i \in [\lambda_{i\min}, \lambda_{i\max}]$  波段, 探测器的输出电压为

$$U_i(T) = \frac{1}{4} A \left[ \frac{D}{f'} \right]^2 \cdot \int_{\Delta\lambda_1} R_v(\lambda) \varepsilon(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_0(\lambda) M_0(\lambda, T) d\lambda \\ M_0(\lambda, T) d\lambda \quad (3)$$

式中,  $R_v(\lambda)$  为探测器的光谱响应函数, A 为探测阵列的面积。则探测器在两个波段接收到的电压比值为

$$Q_T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\int_{\Delta\lambda_1} R_v(\lambda) \varepsilon(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_0(\lambda) M_0(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda_2} R_v(\lambda) \varepsilon(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_0(\lambda) M_0(\lambda, T) d\lambda} \quad (4)$$

对于在高空中运动的目标, 由于大气稀薄, 目标的温度比较低, 红外辐射功率小, 且红外系统选择的两个工作波段比较靠近, 所以可近似认为红外双波段的辐射率基本相同。假设目标为灰体, 有  $\varepsilon(\lambda) = \lambda_0$ (常数), 则上式变为

$$Q_T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\int_{\Delta\lambda_1} R_v(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_0(\lambda) M_0(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda_2} R_v(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_0(\lambda) M_0(\lambda, T) d\lambda} \quad (5)$$

假设测试距离有限, 红外波段大气透过率的影响可忽略, 进一步利用光学系统在波段  $\Delta\lambda_i$  内的平均透过率  $\bar{\tau}_i$ , 则(5)式可改写为

$$Q_T = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\bar{\tau}_1 \int_{\Delta\lambda_1} R_v(\lambda) M_0(\lambda, T) d\lambda}{\bar{\tau}_2 \int_{\Delta\lambda_2} R_v(\lambda) M_0(\lambda, T) d\lambda} \quad (6)$$

根据测温的距离不同, 选择式(5)或者式(6)进行计算, 即可根据比值反推出温度。

### 1.2 目标红外辐射的计算

由于被测目标处于10 km左右的高空, 可忽略目标与大气摩擦产生的热量。通常将目标当作具有一定发射率的灰体来处理, 所以可认为目标是一种均匀漫反射的物体, 其光谱辐射亮度与其观察方向无关。因此有

$$L_S(\lambda, T) = \frac{\varepsilon M(\lambda, T)}{\pi} \quad (7)$$

式中,  $L_s(\lambda, T)$  为光谱辐射亮度;  $\varepsilon$  为被测目标的发射率。

再由关系式:

$$I_S = L_S A_S \quad (8)$$

可以得到目标的光谱辐射强度, 其中  $A_S$  为被测目标在观察方向上的投影面积。所以目标在波段  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  内的红外辐射强度可由以下积分得到:

$$I_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_S d\lambda \quad (9)$$

根据式(8)和式(9), 要得到被测目标的红外辐射强度, 还需要知道目标在观察方向上的投影面积  $A_S$ 。由于实际中经常需要探测导弹弹头目标, 假设被测目标是一个圆锥体, 其模型图 1 所示。其中圆锥的底面半径为  $R$ , 高度为  $L$ , 中垂线与母线的夹角为  $\alpha$ 。定义中垂线与视线方向

$$A_S = \begin{cases} \frac{\pi}{2} [R^2 + (R \cos \theta)^2] & 0 \leq \theta < \alpha \text{ 或 } 180^\circ - \alpha \leq \theta < 180^\circ \\ \frac{\pi}{4} [R^2 + (R \cos \theta)^2] + LR \sin \theta & \alpha \leq \theta < 180^\circ - \alpha \end{cases}$$

## 2 大气衰减模型

根据式(3), 探测器接收到的目标红外辐射受几个因素的影响: 目标自身的发射率、大气的衰减以及探测器的衰减。对于目标的发射率, 在测量中已予以考虑。对于探测器的衰减, 由于使用的是双波段测温法, 该影响在式(6)中表现为一个常数。所以测量被测目标的红外辐射时主要考虑大气的衰减因素。

被测目标红外辐射在大气中的衰减主要与三个因素有关: 大气中气体分子的吸收, 气体分子、微粒及尘埃等的散射和气象条件(如雨、雪等天气)的衰减。设  $\tau_1(\lambda)$ 、 $\tau_2(\lambda)$  和  $\tau_3(\lambda)$  分别为吸收、散射和因大气衰减等作用的光谱透过率, 则总的大气光谱透过率为

$$\tau(\lambda) = \tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda) \quad (11)$$

### 2.1 大气中气体分子的吸收

的夹角为视角  $\theta$ , 且迎头探测时为  $0^\circ$ 。考虑其对称性, 则被测目标沿着视线方向的投影分为图 1 所示的几种情况: 正前视、前视、侧视以及正侧视。

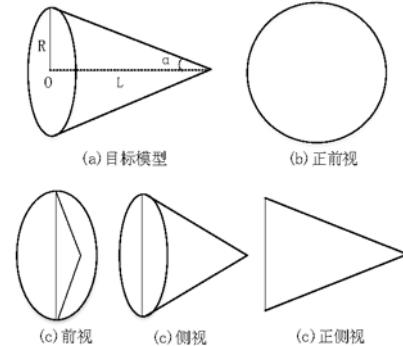


图 1 目标投影面积的计算模型

不同视角时弹头目标的投影面积  $A_S$  与视角  $\theta$  的关系可以表示为

$$0 \leq \theta < \alpha \text{ 或 } 180^\circ - \alpha \leq \theta < 180^\circ \quad (10)$$

$$\alpha \leq \theta < 180^\circ - \alpha$$

大气中起吸收作用的气体主要是水蒸气和  $\text{CO}_2$ 。由于  $\text{CO}_2$  在大气中的含量比较稳定, 因此由  $\text{CO}_2$  导致的红外辐射的衰减可认为与气象条件无关, 主要和辐射传输的距离有关, 所以使用等效距离来表示。水蒸气的含量容易受气象条件和海拔变化的影响, 在低海拔大气中水蒸气的含量较高, 可以使用可降水分来表示。总的吸收透过率为

$$\tau_1(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda)\tau_{CO_2}(\lambda) \quad (12)$$

采用可降水分  $\omega$  表示水蒸气的吸收:

$$\omega = \omega_0 D H_r \quad (13)$$

式中,  $\omega_0$  表示一定温度下相对湿度为 100% 时水平路程上每千米大气中的可降水分, 可通过给定的温度查表得到;  $D$  为传输的水平距离;  $H_r$  为相对湿度。

当考虑高度的修正时, 将情况分为水平传输和倾斜传输两种。对于水蒸气, 水平传输时的可降水分位

$$\omega_e = \omega_0 D H_r e^{-\alpha H} \quad (14)$$

而当倾斜传输时, 可降水分位

$$\omega_e = \omega_0 H_r \frac{e^{-\alpha H_2} - e^{-\alpha H_1}}{\alpha \cos \gamma} \quad (15)$$

式中,  $\omega_e$  为修正之后可降水分的表达式;  $\alpha$  为常数;  $H_1$  为探测器(被测目标)的高度;  $H_2$  为被测目标(探测器)的高度;  $\gamma$  是天顶角。根据可降水分的数值查海平面水平路程上水蒸气光谱透过率表<sup>[10]</sup>, 就能得到不同波长所对应辐射的透过率。若表中没有相关数据, 则可以通过外推法或内插法计算得到。

对于 CO<sub>2</sub>, 水平传输时的等效距离为

$$D_e = D e^{-\beta H} \quad (16)$$

而当倾斜传输时, 等效距离为

$$D_e = \frac{e^{-\beta H_2} - e^{-\beta H_1}}{\beta \cos \gamma} \quad (17)$$

式中,  $D_e$  为修正后的等效距离;  $\beta$  为常数。与水蒸气相类似, CO<sub>2</sub> 的吸收透过率可以根据等效距离查表得到<sup>[10]</sup>。

## 2.2 大气的散射

可以用米氏理论解释分子和微粒散射的影响。如果分子或微粒的尺寸小于红外辐射的波长, 则遵守瑞利散射; 而尺寸比波长大的分子或微粒可认为是非选择散射。大气散射所造成的大气衰减可以用式(18)来描述<sup>[11]</sup>:

$$\tau_2(\lambda) = \exp \left[ \frac{-3.192}{D_v} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q D \right] \quad (18)$$

式中,  $D_v$  表示气象能见度;  $\lambda_0$  表示探测气象能见度时所用的波长, 一般可取 0.55 μm;  $q$  为 1.6(高空探测, 能见度较高)。

## 2.3 气象条件的衰减

对于气象条件, 本文主要考虑雨雪天气的影响。因为雨和雪的尺寸比红外辐射的波长大

很多, 根据上文的描述, 雨、雪粒子会导致非选择散射<sup>[11]</sup>:

$$\tau_3(\lambda) = \exp \left[ -D \left( 0.66 J_1^{0.66} + 6.5 J_2^{0.7} \right) \right] \quad (19)$$

式中,  $J_1$  和  $J_2$  分别表示降雨强度和降雪强度。

最后, 得到大气衰减后弹头目标的红外辐射强度为

$$I_a = \tau(\lambda) I_S \quad (20)$$

## 2.4 空间任意两点之间大气吸收透过率的计算方法

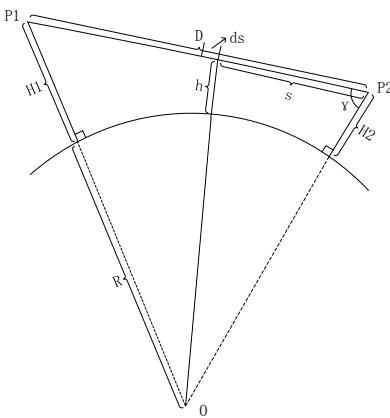


图 2 大气衰减计算模型

在实际中, 探测器和被测目标可能处于空中任意一点。建立 WGS-84 坐标系, 以坐标原点  $O(0, 0, 0)$  为地心坐标, 假设探测器和被测目标的坐标分别为  $P1(x_1, y_1, z_1)$  和  $P2(x_2, y_2, z_2)$ , 大气衰减的模型如图 2 所示。图中  $R$  表示地球半径;  $H1$  和  $H2$  分别表示  $P1$  和  $P2$  的海拔高度;  $D$  表示点  $P1$  和  $P2$  之间的距离。

对水蒸气和 CO<sub>2</sub> 的吸收本领随高度的变化需要进行相应的修正。根据式(14), 考虑水蒸气的高度修正, 有

$$\omega_e = \omega_0 D H_r e^{-0.0654 H} \quad (21)$$

又考虑水蒸气量随高度的变化, 有

$$\omega_H = \omega_0 D H_r e^{-0.45 H} \quad (22)$$

综合考虑水蒸气的吸收本领和水蒸气量随高度的变化, 结合式(21)和式(22), 得到距海平

面上高度为  $H$  的辐射沿水平传输路程中可降水分的有效厚度的公式:

$$\begin{aligned}\omega_H &= \omega_0 D H_r e^{-0.45H} \cdot e^{-0.0654H} \\ &= \omega_0 D H_r e^{-0.515H}\end{aligned}\quad (23)$$

当考虑地球的曲率，并且在倾斜路径上进行探测时，应根据图 2 进行建模，根据式 (23)，位于高度  $h$  处的大气层  $ds$  中的可降水分的有效厚度为

$$d\omega_e = \omega_0 H_r e^{-0.515h} ds \quad (24)$$

式中， $h = \sqrt{|\overrightarrow{P_1O}|^2 + s^2 - 2 \cdot |\overrightarrow{P_1O}| s \cos \gamma}$ ,  $\cos \gamma = \frac{\overrightarrow{P_1O} \cdot \overrightarrow{P_1P_2}}{|\overrightarrow{P_1O}| \cdot |\overrightarrow{P_1P_2}|}$ ,  $R$  地球半径，计算整个路程上的可降水分时需对式 (24) 进行积分， $s$  的积分区间为  $[0, |\overrightarrow{P_1P_2}|]$ 。

当图 2 中的点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  和  $P_2(x_2, y_2, z_2)$  均已知时，可求出空中任意两点的可降水分。根据可降水分，可通过查表的方式得到任意两点之间的大气透过率。

$\text{CO}_2$  透过率的计算方法也类似，将式 (24) 中大气元层  $ds$  中的可降水分变为传输路径的有效长度，再对其积分，即

$$D_e = \int_0^{|\overrightarrow{P_1P_2}|} e^{-0.313h} ds \quad (25)$$

式中， $h$  的表达式和水蒸气的一样，再通过查表便可求出其透过率。

### 3 实验结果

实验中，考虑的测量波段为  $3\sim5 \mu\text{m}$  中波波段和  $8\sim12 \mu\text{m}$  长波波段。假设目标的投影面积为  $1 \text{ m}^2$ ，得到被测目标的温度与双波段信号比值的关系曲线如图 3 所示。图 3 中，从上到下分别是探测距离为  $0 \text{ km}$ 、 $10 \text{ km}$ 、 $20 \text{ km}$ 、 $50 \text{ km}$ 、 $100 \text{ km}$ 、 $200 \text{ km}$  和  $500 \text{ km}$  时所对应的温度比值曲线。

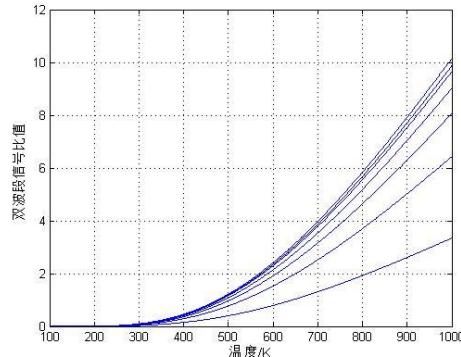


图 3 不同探测距离下温度与双波段信号比值的关系曲线

从图 3 可以看出，不同探测距离下，双波段信号比值均是温度的单调递增函数，说明通过信号比值可得到单一温度值。得到被测目标的温度后，根据式 (7)、式 (8) 和式 (9)，结合普朗克辐射定律和被测目标投影计算模型，可计算出被测目标的辐射。

对于温度在常温附近或者低温的目标（低于  $300 \text{ K}$ ），由于目标在  $3\sim5 \mu\text{m}$  波段范围内的红外辐射强度较低，因此双波段红外信号比值以及比值曲线的斜率均很小。考虑到信号动态范围以及 A/D 转换位数等的限制，双波段测温的灵敏度较低，较难取得好的测量结果。但是，对于高温目标，双波段测温具有较高的灵敏度。

在  $10 \text{ km}$  左右的高空中，气象能见度有极大提升。结合实际情况，假设气象参数如下：气象能见度  $D_V$  为  $50 \text{ km}$ ；地面相对湿度为  $50\%$ 。分别给出  $3\sim5 \mu\text{m}$  和  $8\sim12 \mu\text{m}$  两个波段的大气透过率及透过率之比随探测距离的变化规律，如图 4 和图 5 所示。

根据图 4，当探测距离达到  $500 \text{ km}$  时， $3\sim5 \mu\text{m}$  波段内的大气透过率将下降到 0.1 以下；而在  $8\sim12 \mu\text{m}$  波段，当探测距离达到  $1000 \text{ km}$  时，大气透过率还在 0.15 左右。由图 5 可以看出，当探测距离在  $800 \text{ km}$  以内时，两个波段的大气透过率之比基本都在 0.1 以上。由此可以看出，可以在几百公里的距离范围内对高空远距离目标的红外辐射进行有效的探测。

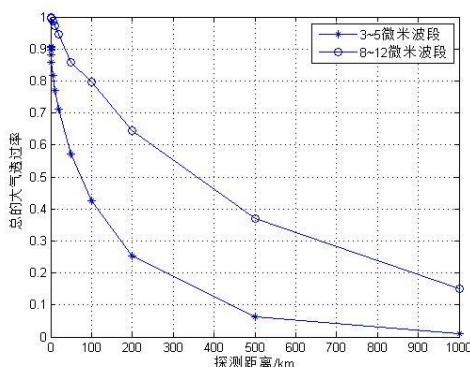


图4 两个波段的大气透过率随探测距离的变化规律

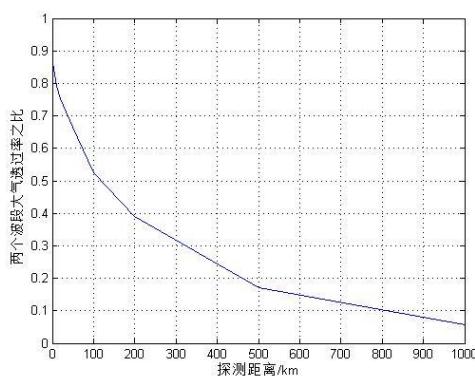


图5 两个波段透过率之比随探测距离的变化规律

## 4 结束语

使用双波段的原理分析了高空远距离目标的温度测量和辐射计算，并给出了远距离情况下两点大气衰减的计算模型。实验结果表明，该

(上接第34页)

对性、校正能力强和适用性强的预处理方法必将成为产生，从而将推动近红外技术的发展。

## 参考文献

- [1] 郝勇, 陈斌, 朱锐. 近红外光谱预处理中的几种小波消噪方法的分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(10):1838~1841.
- [2] 尼珍, 胡昌勤, 冯芳. 近红外光谱分析中光谱预处理方法的作用及其发展 [J]. 药物分析杂志, 2008, 28(5): 824~829.
- [3] Candolfi A, De Maesschalck R, Jouan-Rimbaud D, et al. The Influence of Data Preprocessing in the Pattern Recognition of Excipients near Infrared Spectra[J]. *J Pharm Biomed Anal*, 1999, 21(1):115~120.
- [4] Guo Q, Wu W, Massart D L. The Robust Normal Variate Transform for Pattern Recognition with Near Infrared Data[J]. *Anal Chim Acta*, 1999, 382(1~2):87~91.
- [5] 李素文, 谢品华, 李玉金等. 基于小波变换的差分吸收光谱数据处理方法 [J]. 光学学报, 2006, 26(11):1601~1604.
- [6] 张费, 宋万清. DB 小波与 RBP 神经网络的短期电力负责预测 [J]. 上海工程技术大学学报, 2009, 23(3):238~243.
- [7] Donoho D L. De-noising by Soft-thresholding[J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 1995, 41(3): 613~620.

大气衰减模型适用于高空远距离目标的红外探测。今后还需对高空远距离目标红外辐射的探测距离进行具体的分析，以得到更加量化的结果。

## 参考文献

- [1] 孙晓刚, 李云红. 红外热像仪测温技术发展综述 [J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 101~104.
- [2] 林武文, 徐锦, 徐世录. 红外探测技术的发展 [J]. 激光与红外, 2006, 36(9): 840~843.
- [3] 徐宝昌, 张丁元. 一种改进的比色测温方法研究 [J]. 光电工程, 2011, 38(4): 1~6.
- [4] 赵玉刚, 杨帆, 周维芳. 基于比色测温的温度场测量技术研究 [J]. 微计算机信息, 2008, 24(8): 298~299.
- [5] Adam M, Marcin G. Experimental Verification of Multiband System for Noncontact Temperature Measurements [C]. SPIE, 5258: 198~201.
- [6] Renta J H, Mansur D, Vaillancourt R, et al. Two-band Infrared Thermographer for Standoff Temperature Measurements [C]. SPIE, 6010: 1~8.
- [7] 邢冀川, 刘光荣, 金伟其, 等. 双波段比色测温方法及其分析 [J]. 红外技术, 2002, 24(6): 73~76.
- [8] 李云红, 王瑞华, 李禹萱. 双波段比色测温技术及实验测试 [J]. 激光与红外, 2013, 43(1): 71~75.
- [9] 王超哲, 童中翔, 芦艳龙, 等. 飞机红外辐射特性及其探测技术研究 [J]. 激光与红外, 2011, 41(9):996~1001.
- [10] Hudson R D. Infrared System Engineering [M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1969.
- [11] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究 [J]. 光学精密工程, 1998, 6(4): 120~125.