

基于多目标极值优化法的多光谱真温反演

张福才^{1,2**}, 孙博君¹, 孙晓刚^{1*}

¹哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

²黑龙江科技大学电气与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022

摘要 为了求解多波长高温计多光谱通道的欠定方程组, 引入了优化的思想, 将多光谱真温的求解问题转化为多目标极值优化(MMO)问题, 无需假设光谱发射率与其他物理量之间的函数关系模型即可求解真温。所提方法的反演精度与二次测量(SMM)法的大体相同, 但反演速度大幅增大。借助火箭尾焰的真实测量数据, 利用 MMO 法实现了火箭尾焰真温和光谱发射率的反演。

关键词 测量; 发射率; 多光谱; 真温; 优化

中图分类号 O657.33

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0212008

Multispectral True Temperature Inversion Based on Multi-Objective Minimization Optimization Method

Zhang Fucui^{1,2**}, Sun Bojun¹, Sun Xiaogang^{1*}

¹School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

²Institute of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150022, China

Abstract In order to solve the underdetermined equation group of multiple spectral channels in a spectral pyrometer, the idea of optimization is introduced, and the problem of solving multispectral true temperature is transformed into a multi-objective minimization optimization (MMO) problem. The true temperature can be solved without assuming the function relationship model between spectral emissivity and other physical quantities. The inversion accuracy of the proposed method is equal to that of the second measurement method, and the inversion speed is greatly improved. With the aid of the actual measurement data of rocket exhaust plume, the MMO method is used to realize the inversion of the true temperature of the rocket exhaust plume.

Key words measurement; emissivity; multispectral; true temperature; optimization

OCIS codes 120.4640; 120.6780

1 引 言

应用多光谱技术对非接触热辐射温度与温度场的测量研究始于 20 世纪 70 年代末期, Svet^[1] 利用四波长测量理论实现了物体表面温度的测量, 开启了多光谱技术应用于辐射温度测量的新时代。Hiernaut 等^[2] 研制了具有亚毫秒响应速度的 6 个光谱波段的辐射高温计, 提高了多波长高温计的测量速度, 并且大幅度地扩展了温度测量范围。Sun 等^[3-4] 运用棱镜分光的方式研制出了多光谱辐射高温计, 实现了航天发动机尾焰的真温测量。对于辐射温度的测量, 发射率是必须求解的参数。关于发

射率的求解模型, 国内外众多学者进行了大量的研究工作, 目前主要包括以下 4 种模型。第 1 种是灰体假设模型, 即假设光谱发射率为一个常数, 如 Hossain 等^[5] 基于灰体假设模型, 利用 8 个摄像机从 8 个方向同时获得火焰的二维图像后, 利用灰体假设模型提出了一个可视化的温度场重建方法, 计算了火焰温度和发射率的三维分布关系。第 2 种是光谱发射率与波长之间的关系模型, 对于燃烧火焰的碳粒颗粒粒径介于 0.005 ~ 0.1 μm 的情况, Flower 等^[6-7] 建立了光谱发射率与波长之间的关系模型, 用波长之间的比值代替了光谱发射率的比值, 进行了相关实验研究, 实现了火焰温度和光谱发射

收稿日期: 2018-05-07; **修回日期:** 2018-08-24; **录用日期:** 2018-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61875046, 61405045)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ470767)

* **E-mail:** 510132156@qq.com; ** **E-mail:** qingtengzfc@yeah.net

率的计算。第3种是光谱发射率的空间假设模型,符泰然等^[8]分析了火焰在空间方向、温度与吸收系数的分布特性,提出了光谱发射率的空间假设模型,在完成模拟工作后对蜡烛与煤油火焰进行了温度与碳粒浓度的检测。第4种是孙晓刚等^[9-10]提出的光谱发射率-真温模型,即假设光谱发射率与真温在一定温度范围内存在某种函数关系,在此模型基础上,提出了二次测量(SMM)法的相关理论,完成了航天发动机尾焰真温的反演。

在实际的辐射测温过程中,光谱发射率存在瞬时多变性,即在不同时刻、不同测量位置、不同温度下光谱发射率的数值都是不相同的。若假设的光谱发射率模型与实际光谱发射率的变化规律不符,可能会产生较大的真温反演误差。光谱发射率与其他物理量(波长或温度等)之间的数学模型需要通过大量的实验才能获得,完成多光谱真温的反演具有一定的技术难度。另外,光谱发射率与其他物理量(波长或温度等)之间函数关系的数学模型通用性较差,尤其是当待测辐射体发生改变时,这种数学模型也就失去了应用价值。

优化是一种数学方法,它主要研究的是在无约束和有约束条件下寻找最优解(最优方案)。本文引入了优化的思想,无需假设光谱发射率与其他物理量(波长或温度等)之间函数关系的数学模型,减小了多光谱真温反演的技术难度,提高了真温反演方法的通用性。为了利用优化思想实现真温反演问题的转化,充分挖掘了辐射测温中实际问题与优化理论之间的内在联系,构建了多个目标函数;以光谱发射率之间的函数关系为等式约束条件,以光谱发射率本身的取值范围为不等式约束条件,实现了真温和光谱发射率的反演。与SMM法相比,所提方法不但具有同等的计算精度,而且反演速度有了较大的提升,为更快速的多光谱真温求解提供了新的方向和可能性。

2 MMO法真温反演原理

对于含有烟黑、炭粒或固体颗粒(如 Al_2O_3)的火焰,其辐射光谱是主要位于可见光和近红外波段的连续光谱^[11-12]。要将多光谱真温求解问题转化为多目标函数极值优化问题,首先需要借助辐射测温的基本理论建立多极值函数、非线性多变量等式约束条件和线性多变量不等式约束条件。

2.1 多目标函数

根据维恩公式,多波长高温计的第*i*个通道的亮度温度 T_i 和真温 T_{zi} 满足

$$\frac{1}{T_{zi}} - \frac{1}{T_i} = \frac{\lambda_i}{c_2} \ln \epsilon_i \quad (i=1,2,\dots,N), \quad (1)$$

式中: λ_i 为第*i*通道的有效波长; ϵ_i 为有效波长为 λ_i 时的光谱发射率; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; N 为高温计的通道数量。根据(1)式,第*i*通道的真温表达式为

$$T_{zi} = \frac{T_i}{1 + \frac{\lambda_i \cdot T_i}{c_2} \ln \epsilon_i} \quad (i=1,2,\dots,N)。 \quad (2)$$

每一个光谱通道都可以由(2)式表示真温,但在实际测量中,每一个光谱通道表示的真温值并不完全相等,存在一定的误差。假设光谱通道有8个,则每两个光谱通道的真温差 F_j ($j=1,2,3,4$)可以构成一个方程,从而可以构成4个目标函数,即

$$\begin{cases} \min(F_1) = T_{z1} - T_{z2} \\ \min(F_2) = T_{z3} - T_{z4} \\ \min(F_3) = T_{z5} - T_{z6} \\ \min(F_4) = T_{z7} - T_{z8} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $\min()$ 代表求最小值; $T_{z1}, T_{z2}, T_{z3}, T_{z4}, T_{z5}, T_{z6}, T_{z7}$ 和 T_{z8} 分别为第1,2,3,4,5,6,7,8个测量通道的真温。由前4个通道真温和的平均值与后4个通道真温的平均值之差的平方最小值也可以构成一个目标函数,即

$$\min(F_5) = \left(\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 T_{zi} - \frac{1}{4} \sum_{i=5}^8 T_{zi} \right)^2。 \quad (4)$$

相邻两个通道真温差的和的最小值也可以构成一个目标函数,即

$$\min(F_6) = (T_{z1} - T_{z2}) + (T_{z3} - T_{z4}) + (T_{z5} - T_{z6}) + (T_{z7} - T_{z8})。 \quad (5)$$

通过8个通道的平方差最小值也可以构成一个目标函数,即

$$\min(F_7) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \left(\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 T_{zi} - T_{zi} \right)^2。 \quad (6)$$

2.2 非线性多变量等式约束条件

为了构造非线性多变量等式的约束条件,对(1)式中相邻两个光谱通道做减法并整理,得

$$\begin{cases} \lambda_1 \ln \epsilon_1 - \lambda_2 \ln \epsilon_2 = c_2 \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \\ \lambda_3 \ln \epsilon_3 - \lambda_4 \ln \epsilon_4 = c_2 \left(\frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_3} \right) \\ \lambda_5 \ln \epsilon_5 - \lambda_6 \ln \epsilon_6 = c_2 \left(\frac{1}{T_6} - \frac{1}{T_5} \right) \\ \lambda_7 \ln \epsilon_7 - \lambda_8 \ln \epsilon_8 = c_2 \left(\frac{1}{T_8} - \frac{1}{T_7} \right) \end{cases}。 \quad (7)$$

通过减法操作,消去了真温 T_{zi} 。(7)式构成了

多个等式方程,其余的变量如波长 λ_i 和亮度温度 T_i 都是已知量。利用光谱发射率彼此之间的约束特性构成了非线性多变量等式的约束条件。

2.3 线性多变量不等式约束条件

由辐射测温的基本理论可知,光谱发射率的变化范围都在 0 和 1 之间,即

$$0 < \epsilon_i < 1 \quad (i=1,2,\dots,N). \quad (8)$$

实际的应用光谱发射率的估算值如表 1 所示。(8)式限定了(7)式中非线性多变量等式约束条件的取值范围,减少了冗余数据,提高了算法的反演速度。光谱发射率的变化范围构成了线性多变量不等式的约束条件。

(3)~(6)式构成了 7 个极值函数,在非线性多变量等式约束条件和不等式约束条件的约束下,编写 MMO 法的反演程序,当求得的温度 T 为 7 个极值函数的近似有效解或弱有效解时,将这个温度 T 视为被测目标的真温,这一点与 SMM 法的原理相同。另外,当多目标函数的数量和形式不同时,结果也会受到一定的影响。

2.4 MMO 法的求解

通过上述分析,建立了 MMO 法的目标函数和约束条件,接下来对目标函数进行求解。在求解目标函数极小值的过程中采用了极值优化理论,其基

本的数学模型为

$$\begin{aligned} & \max \text{ or } \min [F_1(x), F_2(x), \dots, F_p(x)], \quad x \in R^n \\ & \text{s.t.} \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ c_{\text{eq}}(x) = 0 \\ Ax \leq b \\ A_{\text{eq}} \cdot x = d \\ l \leq x \leq h \\ p \geq 2 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: p 为目标函数个数; x, b, d, l 和 h 为向量; A 和 A_{eq} 为矩阵; $c(x)$ 和 $c_{\text{eq}}(x)$ 为函数返回向量,为线性或非线性函数; R^n 为 n 维欧式空间。通过分析可知,建立的多极值函数和等式、不等式约束条件与(9)式中的多目标优化方法的结构一致,故可以用优化方法来求解 MMO 法,实现了将真温求解问题转化为极值的优化问题这一目的,相关理论可以参阅文献[13-14]中的相关内容。

3 新方法的仿真

3.1 仿真初始条件

采用具有不同变化特征的 5 种光谱发射率且已知真温和亮度温度的被测目标进行验证,并将求解的结果与 SMM 法的求解结果进行比较,具体检验条件如表 1 所示^[10,15-16]。

表 1 被测目标的仿真数据

Table 1 Simulation data of measured target

No.	Range of emissivity	True temperature /K	Brightness temperature (0.4 μm) /K	Brightness temperature (0.5 μm) /K	Brightness temperature (0.6 μm) /K
A	0.45-0.95	1800.0	1785.5	1768.2	1747.5
		2000.0	1982.1	1962.6	1935.4
B	0.50-0.90	1800.0	1739.7	1735.1	1733.5
		2000.0	1925.8	1920.2	1918.3
C	0.70-0.90	1800.0	1786.5	1777.9	1763.7
		2000.0	1983.4	1972.8	1955.2
D	0.65-0.85	1800.0	1768.4	1763.8	1760.2
		2000.0	1961.1	1955.4	1953.1
E	0.65-0.75	1800.0	1765.9	1763.8	1762.0
		2000.0	1958.0	1955.4	1953.1

No.	Range of emissivity	Brightness temperature (0.7 μm) /K	Brightness temperature (0.8 μm) /K	Brightness temperature (0.9 μm) /K	Brightness temperature (1.0 μm) /K	Brightness temperature (1.1 μm) /K
A	0.45-0.95	1722.9	1698.4	1669.7	1648.6	1621.8
		1908.2	1878.9	1840.4	1814.8	1782.4
B	0.50-0.90	1734.6	1738.0	1743.5	1751.1	1760.6
		1919.5	1923.7	1930.5	1939.8	1951.5
C	0.70-0.90	1747.6	1738.0	1746.0	1751.1	1760.6
		1935.5	1923.7	1933.6	1939.8	1951.5
D	0.65-0.85	1757.8	1756.3	1746.0	1734.7	1722.1
		1952.8	1962.0	1933.6	1919.7	1900.5
E	0.65-0.75	1749.7	1738.0	1738.4	1734.7	1722.1
		1938.1	1923.7	1924.2	1919.7	1904.3

3.2 真温仿真结果

分别使用 SMM 法和 MMO 法求解真温, 比较求解的误差和时间, 结果如表 2 所示。

可以看出, MMO 法的真温反演精度与 SMM 法的基本相同, 都在 1% 以内; 在完全相同的初始条

件下, MMO 法较大幅度地提升了每一种假设模型的反演速度, 提升的幅度都在 97% 以上。

3.3 光谱发射率仿真结果

分别采用 SMM 法和 MMO 法反演了理论真温为 1800 K 时各个波长下的光谱发射率, 结果如图 1 所示。

表 2 两种方法求解真温的结果比较

Table 2 Result comparison of two iterative methods

Model No.	Range of emissivity	True temperature / K	Temperature by SMM method / K	Accuracy in SMM method / %	Time in SMM method / s	Temperature by MMO method / K	Accuracy in MMO method / %	Time in MMO method / s	Enhancement ratio of MMO method / %
A	0.45-0.95	1800.0	1793.3	-0.37	85.3454	1800.0	0.00	1.7891	97.90
		2000.0	1998.8	-0.06	80.6692	2000.0	0.00	1.9723	97.56
B	0.50-0.90	1800.0	1791.5	-0.31	75.8990	1785.9	-0.78	1.8732	97.53
		2000.0	1988.7	-0.57	78.3541	1982.7	-0.87	1.8793	97.60
C	0.70-0.90	1800.0	1798.7	-0.07	70.6404	1799.8	-0.01	1.9004	97.31
		2000.0	1996.2	-0.19	80.6306	2000.0	0.00	1.7861	97.78
D	0.65-0.85	1800.0	1802.2	0.12	71.0259	1806.7	0.37	1.8804	97.35
		2000.0	2009.2	0.46	81.3068	2008.3	0.42	1.8761	97.69
E	0.65-0.75	1800.0	1802.3	0.12	73.9736	1804.1	0.23	1.6582	97.76
		2000.0	2005.3	0.27	88.0254	2005.0	0.25	1.8432	97.91

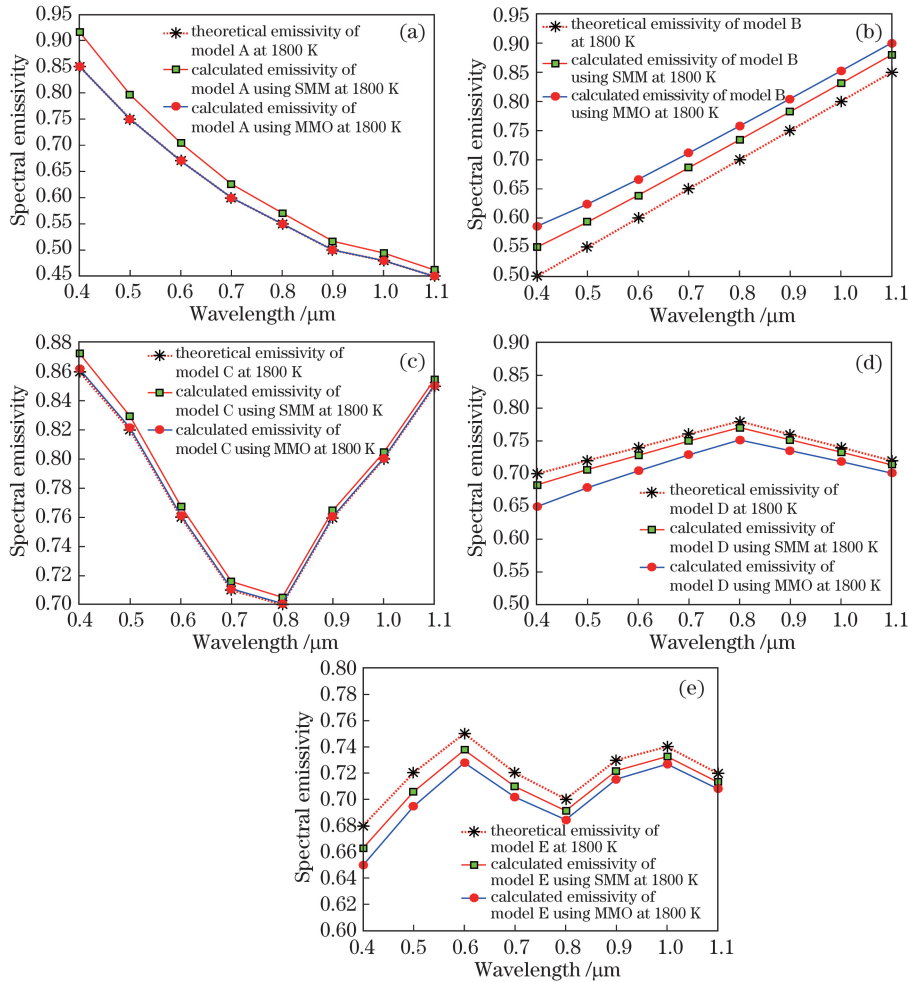


图 1 光谱发射率随波长的变化曲线。(a)模型 A; (b)模型 B; (c)模型 C; (d)模型 D; (e)模型 E

Fig. 1 Variation of spectral emissivity with wavelength. (a) Model A; (b) model B; (c) model C; (d) model D; (e) model E

可以看出,两种方法反演的光谱发射率随波长变化的趋势一致,而MMO法的反演速度明显高于SMM法的。当理论真温为2000 K时,采用上述两种方法得到的各个波长下的光谱发射率随波长变化的趋势与上述情况一致。

4 应 用

在火箭尾焰的燃烧过程中,燃尽的气体通常具有较小的光谱发射率,高温计往往无法准确测量其亮度温度。在这种情况下,高温计必须针对火箭尾焰中的一些特定的、未燃尽的颗粒产生的辐射进行测量,例如 Al_2O_3 颗粒。针对火箭尾焰地面实验中的 Al_2O_3 颗粒的辐射进行了测量,利用高温计获得了火箭尾焰轴向三个不同位置处(W1、W2和W3)的亮度温度,结果如图2所示。

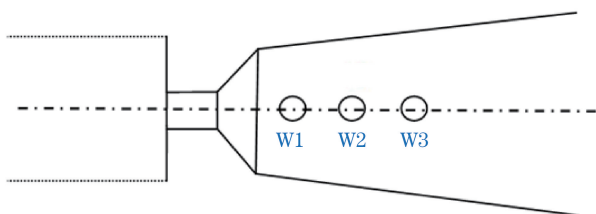


图2 三个测量目标点的位置
Fig. 2 Location of three measurement targets

根据亮度温度和各个通道的有效波长,利用所提MMO法反演了火箭尾焰的真温,图3所示为三个不同位置处30 s内的真温变化曲线,其变化规律与文献[10]的一致。

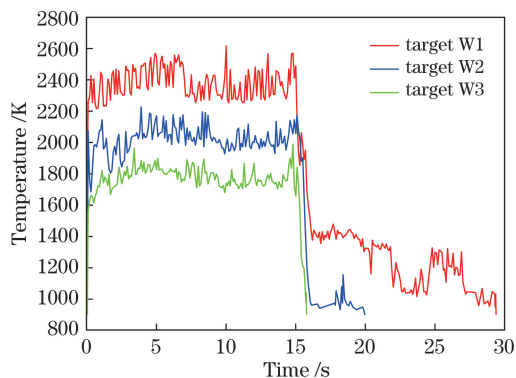


图3 三个目标点的真温曲线
Fig. 3 True temperature curves of three targets

根据MMO法给出了不同位置处在点火第6 s时刻的光谱发射率与波长之间的变化曲线,如图4所示,可以看出,光谱发射率在 $0.65 \sim 1.10 \mu m$ 范围内随波长的增大整体呈减小的趋势,这也与文献[10]描述的情形一致。通过对比可知,采用MMO法对火箭尾焰真温和光谱发射率的反演取得

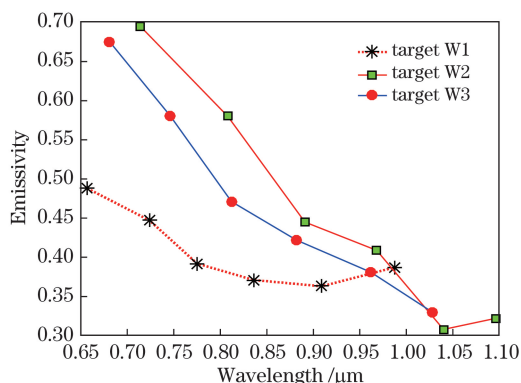


图4 光谱发射率与波长之间的变化曲线
Fig. 4 Curves between spectral emissivity and wavelength
了较好的结果。

5 结 论

将真温的求解过程转化为多目标极小值的优化问题,不再需要建立发射率和其他物理量之间的函数关系模型,降低了系统的复杂性和技术难度;在采用MMO法求解真温时,不需要对亮度温度和波长进行任何处理就可以反演出真温,进一步也可以反演出光谱发射率,反演精度与SMM法大体相当;采用MMO法对真温和光谱发射率进行了反演,通过对比可知,MMO法的速度大于SMM法的。MMO法为快速应用场合的多光谱真温求解提供了新的方向和可能性。

参 考 文 献

- [1] Svet D Y. Determination of the emissivity of a substance from the spectrum of its thermal radiation and optimal methods of optical pyrometry[J]. High Temperatures High Pressures, 1976, 8(5): 493-498.
- [2] Hiernaut J P, Beukers R, Heinz W, et al. Submillisecond six-wavelength pyrometer for high-temperature measurements in the range 2000 to 5000 K[J]. High Temperatures High Pressures, 1986, 18: 617-625.
- [3] Sun X G, Dai J M, Cong D C, et al. Development of a special multi-wavelength pyrometer for temperature distribution measurements in rocket engines[J]. International Journal of Thermophysics, 2002, 23(5): 1293-1301.
- [4] Dai J M, Song Y, Wang Z W. Review of spectral emissivity measurement[J]. Infrared & Laser Engineering, 2009, 38(4): 710-715.
戴景民, 宋扬, 王宗伟. 光谱发射率测量技术[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 710-715.
- [5] Hossain M M, Lu G, Yan Y. Three-dimensional

- reconstruction of flame temperature and emissivity through tomographic imaging and pyrometric measurement[J]. 2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques Proceedings, 2012: 13-17.
- [6] Flower W L. Optical measurements of soot formation in premixed flames[J]. Combustion Science and Technology, 1983, 33(1/2/3/4): 17-33.
- [7] Huang Y, Yan Y, Riley G. Vision-based measurement of temperature distribution in a 500-kW model furnace using the two-colour method[J]. Measurement, 2000, 28(3): 175-183.
- [8] Fu T R, Yang Z J, Cheng X F. Calculation errors of flame temperature field measurements based on color CCD[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(2): 81-86.
符泰然, 杨臧健, 程晓航. 基于彩色 CCD 测量火焰温度场的算法误差分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(2): 81-86.
- [9] Sun X G, Yuan G B, Dai J M. Multi-spectral thermometry based on GA-BP algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(2): 213-216.
孙晓刚, 原桂彬, 戴景民. 基于遗传神经网络的多光谱辐射测温法[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(2): 213-216.
- [10] Liang M, Sun B J, Sun X G, *et al.* Development of a new fiber-optic multi-target multispectral pyrometer for achievable true temperature measurement of the solid rocket motor plume[J]. Measurement, 2017, 95: 239-245.
- [11] Ni M J, Zhang H D, Wang F, *et al.* Study on the detection of three-dimensional soot temperature and volume fraction fields of a laminar flame by multispectral imaging system[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96: 421-431.
- [12] Yan Z Q, Yang J C, Zhang Y, *et al.* Analysis of spectral channel bandwidth of monocular multispectral passive ranging system based on oxygen absorption[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0601003.
闫宗群, 杨建昌, 张瑜, 等. 单目多光谱氧气吸收被动测距系统光谱通道带宽分析[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0601003.
- [13] Dong L L, Zhao Y P, Liang L Q, *et al.* Review on theory and approach of mechanical optimization design[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(15): 114-119.
董立立, 赵益萍, 梁林泉, 等. 机械优化设计理论方法研究综述[J]. 机床与液压, 2010, 38(15): 114-119.
- [14] Yang X L, Wang F, Feng Y C. The review of simulation optimization theory and techniques[J]. Computer Simulation, 2000, 17(5): 1-5.
杨湘龙, 王飞, 冯允成. 仿真优化理论与方法综述[J]. 计算机仿真, 2000, 17(5): 1-5.
- [15] Liang M, Sun B J, Sun X G, *et al.* Rules of emissivity sample choice in multi-wavelength pyrometry[J]. International Journal of Thermophysics, 2017, 38(3): 35-44.
- [16] Wei W S, Peng Y K, Zheng X C, *et al.* Rapid determination of content of total volatile basic nitrogen in pork based on multispectral detection system with optimal wavelength[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1130003.
魏文松, 彭彦昆, 郑晓春, 等. 基于优选波长的多光谱检测系统快速检测猪肉中挥发性盐基氮的含量[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1130003.