

## 单目标极小值优化法的多波长真温反演研究

张福才<sup>1,2</sup>, 孙博君<sup>1</sup>, 孙晓刚<sup>1\*</sup>

- (1. 哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院, 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:** 在多波长温度测量系统中, 光谱发射率假设为波长或温度模型来实现真温的求解。由于模型假设存在一定的不确定性, 光谱发射率模型与实际光谱发射率的变化规律可能不符, 会造成较大的真温反演误差。另外, 光谱发射率与波长或温度之间的函数关系通用性较差, 尤其是待测辐射体发生改变时, 这种关系自然也就不复存在了。为了获得正确的真温, 首次将优化思想引入到方法中, 建立了单目标极小值优化法(Single Objective Minimization Optimization Method, SMO)完成真温反演。新方法无需建立光谱发射率和波长或温度之间的模型, 降低了真温求解方法的复杂性和技术难度。与原有的光谱发射率与温度之间的模型(也称二次测量法, Second Measurement Method, SMM 法)相比, 在相同的初始条件下, 新方法二次测量法相比, 反演速度提高了 95% 以上。

**关键词:** 多波长; 真温; 发射率; 反演

**中图分类号:** TH865 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0226002

## Multi wavelength true temperature inversion of single objective minimization method

Zhang Fucui<sup>1,2</sup>, Sun Bojun<sup>1</sup>, Sun Xiaogang<sup>1\*</sup>

- (1. School of Instrument Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. School of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

**Abstract:** In the multi-wavelength temperature measurement system, the spectral emissivity is assumed to be a wavelength or temperature model to solve the true temperature. Because of the uncertainty of the model assumption, spectral emissivity model is inconsistent with the variation rule of the actual spectral emissivity, which will cause larger inversion error. In addition, the poor universality of the mathematical relationship between the emissivity and wavelength or temperature, especially the measured radiator is changed, the relationship will cease to exist. In order to obtain the true temperature, the optimization idea is introduced into the method for the first time, and a single objective minimization optimization method (SMO) was established to complete the inversion of true temperature. The new method does not need to establish a model between spectral emissivity and wavelength or temperature, and has a certain universality. Compared with the second measurement method (SMM), the inversion speed of the proposed method was increased over 95% in the same initial conditions.

**Key words:** multi-wavelength; true temperature; emissivity; inversion

收稿日期: 2018-09-15; 修订日期: 2018-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(61875046, 61405045); 2014 年国家重大科学仪器设备开发专项项目(2013YQ470767)

作者简介: 张福才(1978-), 男, 博士生, 主要从事多波长真温反演方法的研究。Email: 510132156@qq.com

通讯作者: 孙晓刚(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 从事多波长辐射理论与方法的研究。Email: qingtengzfc@yeah.net

## 0 引言

应用多波长技术对辐射体的温度进行测量真正始于 20 世纪 70 年代, Svet, D.Y 等人首次利用四波长实现了物体表面温度的测量, 开启了多波长温度测量的先河<sup>[1]</sup>。由辐射测温的基本理论可知, 对于多波长高温计的  $n$  个光谱通道来讲, 可以构成  $n$  个方程, 却包含  $n+1$  个未知数(目标真温  $T$  和  $n$  个光谱发射率  $\varepsilon_i$ ), 为求解这种欠定方程组的问题, 国内外众多学者做了大量的研究工作, 目前比较有代表性的主要有两类模型。一种是假设光谱发射率与波长之间存在一定的函数关系, 这方面如国外的 W.L. Flower 和 Huang Y 等和国内哈尔滨工业大学的戴景民教授等人基于此种模型假设, 分别在各自课题组开展了广泛的实验与应用研究, 取得了一系列的科研成果<sup>[2-4]</sup>。另一种模型假设是建立光谱发射率与真温之间在某一条件下具有函数关系, 如哈尔滨工业大学的孙晓刚教授以此为基础在 1999 年实现了航天发动机尾焰的真温测量<sup>[5-6]</sup>。上述两种方法中模型假设的基础是光谱发射率的变化与波长或温度之间要满足一定的关系。而在实际的辐射测温过程中, 光谱发射率与波长或温度之间的函数关系是不容易获得的, 其次是这种函数关系通用性较差, 尤其是当测辐射体发生改变时, 这种关系自然也就不存在了<sup>[7-8]</sup>。

文中首次引入了优化的思想, 建立了单目标函数极小值法的多波长真温模型, 从而将真温求解问题转化为函数的优化问题, 利用优化方法实现了模型的求解。该方法最大的优势在于不再需要建立光谱发射率与波长或温度之间的函数关系, 降低了真温求解过程的复杂程度和技术难度。与二次测量法相比, 该方法在反演速度上得到了较大幅度的提升, 为真温的快速在线求解提供了可能。

## 1 单目标极小值优化法多波长真温反演原理

将真温求解问题转化为函数的优化问题需要根据辐射测温的基本理论建立单目标函数和约束条件两方面的内容。

### 1.1 单目标函数

单目标函数方程是优化反演的核心, 对于多波

长高温计来讲, 其第  $i$  个通道的亮度温度  $T_i$  和真温  $T$  的关系满足:

$$c_2 = \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_i} \right) = \lambda_i \ln \varepsilon_i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

利用奇数通道真温和的平均值表示的真温为:

$$T_{\text{奇}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{2N-1} c_2 / \left( \frac{c_2}{T_i} + \lambda_i \ln \varepsilon_i \right) \quad (2)$$

利用偶数通道真温和的平均值表示的真温为:

$$T_{\text{偶}} = \frac{1}{N} \sum_{i=2}^{2N} c_2 / \left( \frac{c_2}{T_i} + \lambda_i \ln \varepsilon_i \right) \quad (3)$$

由辐射测温的基本理论常识可知, 对于同一点的同一次测量, 其真温必有  $T_{\text{奇}} = T_{\text{偶}}$ , 但由于测量误差的存在, 造成  $T_{\text{奇}} \neq T_{\text{偶}}$ , 将二者之间差的平方最小作为单目标函数方程, 即:

$$F(T) = \min(T_{\text{奇}} - T_{\text{偶}})^2 \quad (4)$$

公式(4)为单目标极小值优化法的单目标函数方程, 当  $\min F(T)$  取得最小值时对应温度  $T$  视作被测目标的真温, 这种真温的取值方式借鉴了二次测量法的取值方式<sup>[9-10]</sup>。

### 1.2 约束条件

约束条件主要包括两部分: 等式约束条件和不等式约束条件。

#### 1.2.1 等式约束条件

在单目标极小值优化法真温反演方法中, 为了构造等式约束条件, 首先对公式(1)的  $N$  个波长通道相加并取平均值得:

$$c_2 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{T_i} \right) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i \ln \varepsilon_i \quad (5)$$

再将公式(1)中第一个通道方程与公式(5)作减法并整理得到如下方程:

$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_1} \right) = c_2 \sum_{i=1}^N (\lambda_i \ln \varepsilon_1 - \lambda_i \ln \varepsilon_i) \quad (6)$$

公式(6)这个方程不含有待求的真温  $T$ , 只有光谱发射率  $\varepsilon_i$  是未知数, 其余的变量如波长  $\lambda_i$  和亮度温度  $T_i$  都是已知量, 构成了不同通道光谱发射率  $\varepsilon_i$  之间的等式约束条件。

#### 1.2.2 不等式约束条件

由辐射测温的基本理论可知, 光谱发射率范围都在 0 和 1 之间, 如公式(7)所示。

$$0 < \varepsilon_i < 1 \quad (i=1,2, \dots, N) \quad (7)$$

这种关系简单,但它限制了公式(6)中等式约束条件的取值范围,提高了单目标极小值优化法反演的速度,构成了不等式约束条件。

## 2 二次规划法

一个带有二次目标函数和线性约束或非线性约束的最优化问题称为二次规划(优化)法。通过上面 1 中叙述的原理建立单目标函数和约束条件后就要考虑如何求解目标函数的极小值。二次规划法(Quadratic Programming)对于非线性且存在非线性约束条件的问题是一种非常有效的解决方法,其基本结构形式如下:

$$\begin{cases} \min f(x) = \frac{1}{2} x^T H x + C^T x \\ Ax \leq b \\ \text{s.t. } Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (8)$$

式中: $H$  为  $n \times n$  对称正半定矩阵,  $b \in R^m$  且  $b \geq 0$ ;  $A$ ,

$Aeq$  是为矩阵向量,这方面的内容可以参阅参考文献[11]中的相关内容。

通过分析可知,建立的单目标函数和等式、不等式约束条件与公式(8)中的二次规划法的要求一致,可以借助二次规划法求解单目标函数的极小值,从而实现了将真温求解问题转化为单目标函数极小值的优化问题。

## 3 新方法的仿真

为了检验单目标极小值优化法的有效性,采用四种已知真温、波长和亮度温度(某一波长的光谱亮度与同一波长黑体辐射亮度相等时的黑体温度,真温大于亮度温度)值的被测目标进行验证并将求解的结果与二次测量法的求解结果进行比较<sup>[12-13]</sup>。仿真波长从 0.4~1.1  $\mu\text{m}$ ,实际使用的是 0.6~1.1  $\mu\text{m}$ ,仿真波长涵盖了实验中使用的波长范围,这样才能保证测量的可靠性。具体验证条件如表 1 所示。验证在同一台电脑上完成,主要配置为:Core 2.0G CPU, 2G 内存,软件为 MATLAB(2016a)。

表 1 原始数据

Tab.1 Initial data

Number	Brightness temperature/K	Brightness temperature/K	Brightness temperature/K	Brightness temperature/K	Brightness temperature/K	Brightness temperature/K	Brightness temperature/K	Brightness temperature/K
A	1 785.5	1 768.2	1 747.5	1 722.9	1 698.4	1 669.7	1 648.6	1 621.8
	1 982.1	1 962.6	1 935.4	1 908.2	1 878.9	1 840.4	1 814.8	1 782.4
B	1 739.7	1 735.1	1 733.5	1 734.6	1 738.0	1 743.5	1 751.1	1 760.6
	1 925.8	1 920.2	1 918.3	1 919.5	1 923.7	1 930.5	1 939.8	1 951.5
C	1 786.5	1 777.9	1 763.7	1 747.6	1 738.0	1 746.0	1 751.1	1 760.6
	1 983.4	1 972.8	1 955.2	1 935.5	1 923.7	1 933.6	1 939.8	1 951.5
D	1 768.4	1 763.8	1 760.2	1 757.8	1 756.3	1 746.0	1 734.7	1 722.1
	1 961.1	1 955.4	1 953.1	1 952.8	1 962.0	1 933.6	1 919.7	1 900.5

## 4 仿真的结果

### 4.1 真温的求解

分别使用二次测量法和单目标极小值优化法对真温进行求解,分别将求解的精度和求解的时间进行比较,比较的结果如表 2 所示。

从表 2 中两种方法反演的结果可以看到,二次测量法的测量误差都在 1%以内,单目标极小值优化法的个别仿真误差超过了 1%,说明单目标极小值优化法的精度略低于二次测量法;在反演速度上,单目标极小值优化法在完全相同的初始条件下反演速度都有了较大幅度的提升,普遍提升速度在 95%以上,最高的提速比例达到了 99.0%。

表 2 两种方法求解真温的比较

Tab.2 Comparison of two methods for solving true temperature

Number	True temperature/K	SMM method/K	Error of SMM method	Time of SMM method/s	SMO method/K	Error of SMO method	Time of SMO method/s	Percent of speed
A	1 800.0	1 793.3	-0.37%	85.345 4	1 792.6	-0.41%	0.824 9	99.0%
	2 000.0	1 998.8	-0.06%	80.669 2	1 991.8	-0.41%	0.805 8	99.0%
B	1 800.0	1 791.5	-0.31%	75.899 0	1 777.5	-1.25%	0.829 1	98.9%
	2 000.0	1 988.7	-0.57%	78.354 1	1 981.6	-0.92%	0.851 5	98.9%
C	1 800.0	1 798.7	-0.07%	70.640 4	1 797.5	-0.14%	0.860 4	98.8%
	2 000.0	1 996.2	-0.19%	80.630 6	1 995.6	-0.22%	0.853 9	98.9%
D	1 800.0	1 802.2	0.12%	71.025 9	1 785.2	-0.82%	0.727 0	99.0%
	2 000.0	2 009.2	0.46%	81.306 8	1 990.6	-0.47%	0.862 9	98.9%

4.2 光谱发射率曲线

单目标极小值优化法反演了真温为 1 800 K 时各个波长下的光谱发射率,如图 1 所示。图中雪花形所在曲线代表理论上各个模型的光谱发射率变化曲线,方形所在曲线代表利用二次测量法在真温 1 800 K 时反演的光谱发射率随波长变化的曲线,圆形所在曲线代表利用单目标极小值优化法在真温 1 800 K 时反演的光谱发射率随波长变化的曲线。从图中可以看出,两种方法反演的光谱发射率随波长变化的趋势完全一致,说明这两种方法在应用于光谱发射率的求解是可行的。另外,由于两种方法都存在一定的误差,导致三者之间曲线不重合。

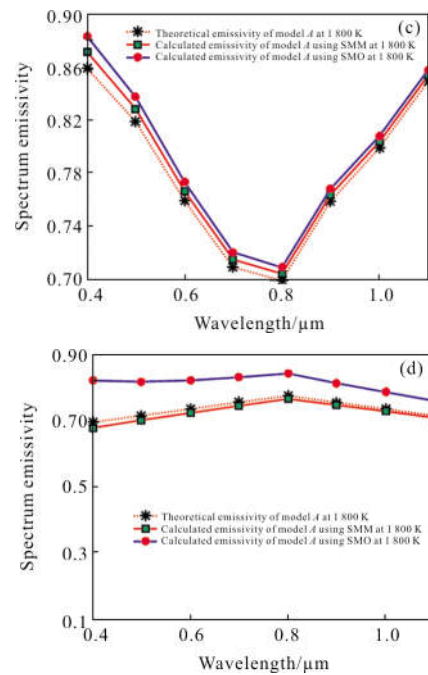
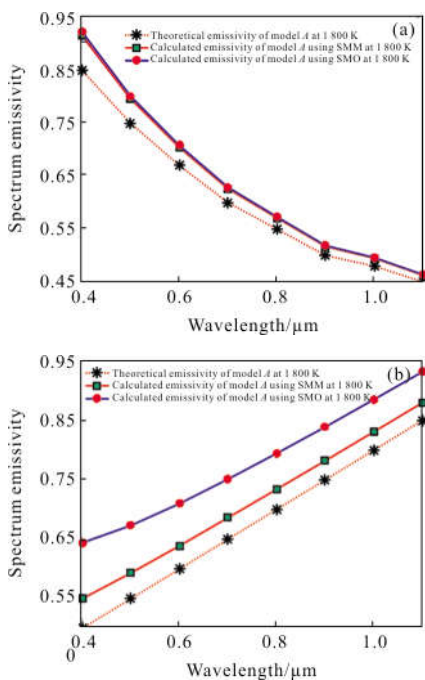


图 1 光谱发射率随波长的变化曲线

Fig.1 Variation of spectral emissivity with the wavelength

5 实验

文中针对火箭推进剂中的  $Al_2O_3$  颗粒的辐射进行了实验测试<sup>[14-15]</sup>。在火箭发动机地面试验中,采用高温计采集了火箭尾焰三个不同位置处(如图 2 中所示)的不同波长下的亮度温度。

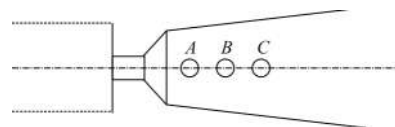


图 2 三个测量目标点的位置

Fig.2 Location of the three measurement targets

根据亮度温度和有效波长,利用文中提出的单目标极小值优化法反演了火箭尾焰的真温。图 3 中给出了真温变化的曲线,这些温度曲线的变化规律与参考文献[16]基本一致。

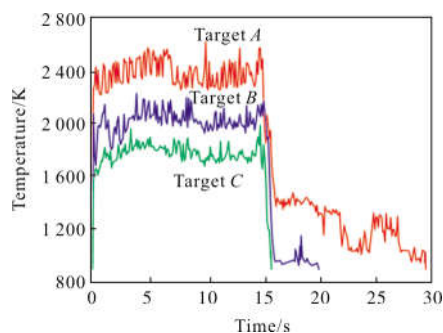


图 3 三个目标的真实温度曲线

Fig.3 True temperature curves of the three targets

在图 4 中,根据单目标极小值优化法给出了不同的位置处在点火第 6 s 时刻的波长与光谱发射率之间变化的曲线,从中可以看到光谱发射率在波长 0.65~1.10  $\mu\text{m}$  范围内随波长的增加整体上都呈现逐步减小的趋势,这一点也与参考文献[16]基本一致。从图 3 和图 4 可以看出,采用单目标极小值优化法对火箭尾焰真温的反演取得了满意的结果。

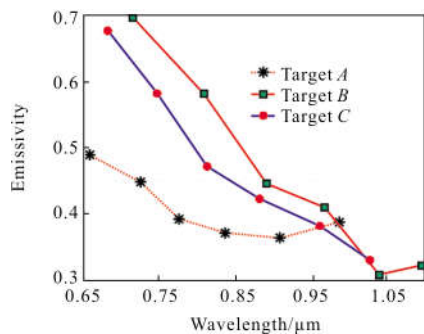


图 4 三个目标点在 6 s 时的发射率曲线

Fig.4 Emissivity curves of the three targets at 6 s

## 6 结论

通过建立单目标函数和相关的约束条件实现了多波长辐射真温的求解,其具有以下四点的特征:

(1) 将真温的求解问题转化为有约束条件的优化问题,是一种新的求解真温的思路;

(2) 优化思想求解真温时不需要建立光谱发射率和其他物理量(如波长或温度)之间关系模型,降低了系统的复杂性和技术难度;

(3) 借用了已发表文献中火箭尾焰的真实测量数据,采用单目标极小值优化法进行了真温和光谱发射率的反演,单目标极小值优化法在真温反演速度普遍提高 95% 以上,但在反演精度上总体低于二次测量法,这是文中方法的不足之处,也是未来改进的方向;

(4) 单目标极小值优化法更适合对反演速度要求高的应用场合,但单目标极小值优化法对火焰真温的反演仍然属于离线式的真温反演方法。

总的来讲,单目标极小值优化法为真温的快速求解和二维真温温度场的快速重建提供了新的方向与可能性。

## 参考文献:

- [1] Svet D Y, Sayapina V J, Levchuk V V. Optimal photoelectronic pyrometer for measuring the true temperature of metals by radiation[J]. *High Temp-High Pressures*, 1979, 11: 117-118.
- [2] Flower W L. Optical measurement of soot formation in premixed flames [J]. *Combustion Science of Technology*, 1983, 33(1-4): 17-33.
- [3] 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.
- [4] Dai Jingmin, Xin Chunsuo, He Xiaowa. Measurement of thermal expansion coefficient of nonuniform temperature specimen [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(9): 669-672.
- [5] Sun Xiaogang, Yuan Guibin, Dai Jingmin. Multi-spectral thermometry based on GA-BP algorithm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(2): 213-216. (in Chinese)
- 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.
- [6] Zhang Fucai, Sun Xiaogang, Xing Jian, et al. Research on reconstruction algorithm of two dimensional radiation temperature field using infrared multi-spectral line [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0704003. (in Chinese)
- 张福才, 孙晓刚, 邢健, 等. 红外多谱线二维辐射温度场重建算法的研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0704003.
- [7] Xie Bing, Duan Zhemin, Ma Pengge, et al. SR

- reconstruction algorithm of infrared image based on dynamic pyramid model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0126001. (in Chinese)
- 谢冰, 段哲民, 马鹏阁, 等. 动态金字塔模型的红外图像SR重建[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0126001.
- [8] Zhan Xiangkong, Li Zhengyong, Zhang Yi, et al. Radially polarized beam restructuring based on Stokes-vector measurement and interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0427002. (in Chinese)
- [9] Yuan Linguang, Xue Zhanli, Li Hongguang, et al. Measurement of normal emissivity materials at low temperature[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(1): 59-64. (in Chinese)
- 袁林光, 薛战理, 李宏光, 等. 低温状态下的材料法向发射率测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 59-64.
- [10] Wang Xiangjun, Cao Yu, Zhou Kai. Methods of monocular pose measurement based on planar objects [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 274-280. (in Chinese)
- 王向军, 曹雨, 周凯. 二维合作目标的单相机空间位姿测量方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 274-280.
- [11] Zhang Kecun, Li Huanqin. Engineering Optimization Method and Its Application [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007. (in Chinese)
- 张可村, 李换琴. 工程优化方法及其应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [12] Xie Fenghou, Shao Chongyun, Lou Fengguang, et al. Effect of power scale of 974 and 633 nm lasers on the induced loss at 633 nm of Yb<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> co-doped silica fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(1): 20-24.
- [13] Wang Ziming, Su Kang, Feng Bo, et al. Coupling length variation and multi-wavelength demultiplexing in photonic crystal waveguides [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(1): 52-56.
- [14] Levendis Y A, Estrada K R, Hottel H C. Development of multicolor pyrometers to monitor the transient response of burning carbonaceous particles [J]. *Rev Sci Instrum*, 1992, 63(7): 3608-3622.
- [15] Coppa P, Jinmin D, Ruffino G. The transient regime of a multiwavelength pyrometer[J]. *International Journal of Thermophysics*, 1993, 14(3): 599607.
- [16] Liang Mei, Sun Bojun, Sun Xiaogang, 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.