

# 基于参考温度的多目标极小值优化原理的多光谱真温反演

张福才<sup>1,2</sup>, 刘允刚<sup>1</sup>, 孙晓刚<sup>2\*</sup>

1. 陕西科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710021

2. 哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 多光谱辐射测温法是一种能够反演出辐射体真实温度(真温)的非接触式的温度测量方法,这种方法通过采集不同波长下被测目标的亮度温度信息,利用相关的算法反演被测目标的真温,多光谱高温计就是利用这种方法反演被测目标真温的最重要的测量工具之一。经过近半个世纪的不懈努力与探索,国内外众多学者在此领域取得了长足的进步。由于光谱发射率都小于1,因此采用辐射高温计不能直接测量得到被测目标的真温,只有通过处理多个光谱通道的波长和亮度温度,利用多光谱辐射测温数据的处理方法才可以获得被测目标的真温。在真温的反演的过程中,一般都需要找到光谱发射率与波长或温度等变量之间的函数关系,用含有波长或温度等变量的表达式代替光谱发射率,这类方法模型选取缺乏足够的理论支持,对于非专业人员,选择合适的光谱发射率模型存在一定的难度。由于光谱发射率具有瞬时多变性,假设的光谱发射率模型与实际光谱发射率的变化之间往往存在一定的差异,有可能导致真温反演产生较大的误差。另外,光谱发射率与波长或温度等变量之间的数学模型是需要通过大量的实验和经验才能确定,这种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意义。因此,找到一种无需假定光谱发射率与波长或温度之间数学模型而且又具有一定通用性的多光谱真温反演方法成为一种迫切的需要。对于多波长高温计的 $N$ 个光谱通道,每一个光谱通道的测量数据满足一个数学方程,对于 $N$ 个光谱通道可以构成一个欠定方程组。为了求解这个方程组,将优化的思想引入多光谱求解过程中,提出了一种基于参考温度的多目标极小值优化原理的多光谱真温反演方法,将多光谱真温的求解问题转化为多目标极值优化问题,实现了无需假设光谱发射率模型的真温和光谱发射率的反演。与传统的二次测量法相比,新方法在反演精度上与二次测量法大体相同,但在反演速度上得到了较大幅度的提高。借助于以往学者测量的真实数据,利用基于参考温度的多目标极小值优化原理的多光谱真温反演方法实现了真温和光谱发射率的反演。新方法在反演速度上得到了较大幅度的提高,借助于以往的固体火箭发动机羽焰温度真实的测量数据,利用基于参考温度的多目标极小值优化方法实现了真温的反演。

**关键词** 优化; 多光谱; 发射率; 真温

**中图分类号:** TH865 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)07-2122-06

## 引言

近些年来,多光谱光学高温计已经成为高温辐射领域中重要的测量工具<sup>[1]</sup>。如何准确可靠地求解出光谱发射率仍然是多光谱测温核心问题,关于光谱发射率的求解主要以下三种方案:波长假设模型,采用光谱发射率与波长之间建立模型来实现真温和光谱发射率反演的方法是国内外最常用的方法,1976年,Svet将光谱发射率和波长之间建立数学模

型,采用含有波长的多项式近似代替未知的光谱发射率,当方程组处于超定或正定状态时,可以实现对方程组的求解,此种方案可以反演出真温和光谱发射率<sup>[2]</sup>。经过几十年的发展,2013年,Rodiet等采用最小二乘法对多光谱辐射温度测量法中的波长的选取进行了优化,实验中波长采用近红外波段,波长范围为 $1.5\sim 5.5\mu\text{m}$ ,实现了 $573\sim 673\text{K}$ 温度的测量<sup>[3]</sup>。2015年,邵艳明等对炼钢过程进行了深入研究,采用最小二乘法,利用光谱仪测量得到的光谱信息对转炉炉口火焰温度进行了测量与分析<sup>[4]</sup>。同一年,Zhang采用维恩公式

收稿日期: 2019-03-01, 修订日期: 2019-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(61875046), 陕西科技大学博士科研启动基金项目(2019BJ-48)资助

作者简介: 张福才, 1978年生, 哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院博士研究生 e-mail: 510132156@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail: qingtengzfc@yeah.net

代替普朗克公式,假设某一温度下光谱发射率与波长之间存在线性或非线性关系,提出光谱识别法的多光谱真温反演算法,实现了中红外波段真温的反演<sup>[5]</sup>。2018年,杨艺帆等针对辐射测温中未知数大于方程个数的这一客观事实,假设测量对象的光谱发射率具有缓变的特性,因此相邻波长处的光谱发射率近似相等,从而减少了未知数的个数,实现了真温和光谱发射率的反演<sup>[6]</sup>。这类模型真温反演的结果与光谱发射率假设模型关系密切,而假设模型又有多种类型,如何选择一种假设模型更为恰当缺乏足够的理论依据,如果光谱发射率的假设模型选取不合理,将可能导致较大的真温反演误差。另外是神经网络假设模型,1998年,孙晓刚等首次将神经网络应用于多光谱真温反演的过程中,结果表明,大多数情况下,神经网络法无需建立光谱发射率与波长之间的关系,是一种有效的多光谱真温反演方法<sup>[7]</sup>。2001年,孙晓刚等先后利用BP神经网络算法和RBF神经网络算法对多光谱测温数据进行了处理,提出了一种新的多光谱温度测量数据处理的思路,全面将神经网络算法引入到了多光谱温度测量领域,得到了良好的测量效果<sup>[7]</sup>。这类模型神经网络的多光谱真温反演方法是一种重要的真温反演方法,但这种方法的Matlab反演程序最为复杂,而且神经网络都需要事先进行学习,学习的过程不但需要大量正确、可靠的数据而且学习本身就on需要花费大量的时间,因此这种方法真温反演的速度也最慢。有报道真温假设模型于2001年孙晓刚假设光谱发射率与真温之间在一定温度范围内存在某种线性函数关系,在此模型基础上,初步提出了二次测量法的理论模型,完成了相关理论的仿真实验<sup>[8]</sup>。2003年后,孙晓刚完善了光谱发射率和真温的假设模型,通过迭代的方法可以求解出真温和光谱发射率<sup>[9]</sup>。2017年,Liang针对二次测量法反演速度较慢的问题,增加了发射率模型的非线性约束条件,提出了一种基于模型约束条件的二次测量法,这种模型约束条件的二次测量法速度最高提高了43.45%<sup>[10]</sup>。这类模型将光谱发射率与真温之间建立模型来实现真温和光谱发射率反演的这种方法是一种独特的真温反演方法,其真温反演精度较高且具有较好的鲁棒性;由于采用了迭代的求解方式,其真温的反演速度并不高,因此,如何提高真温和光谱发射率的反演速度以更好地满足实际需要是这种方法亟待解决的问题之一。

在实际的辐射测温过程中,当一个发射率随波长变化规律是已知的,采用多光谱测温得到的测温数据相对是合理可靠的,然而,绝大多数情况二者之间的关系是不明确的,甚至是没有任何规律的,因而会对测量结果的准确性造成较大的影响,上述多光谱测量方法还是存在一定局限性的。本研究提出一种基于定点黑体炉参考温度的多目标极小值优化原理的多光谱真温反演方法,不再考虑光谱发射率与波长、光谱发射率与真温之间的关系,也不需要预先建立光谱发射率与波长、光谱发射率与真温之间的数学模型,是一种可行的多波长高温计的数据处理方法。

## 1 基于参考温度的多目标函数极值真温反演原理

从多光谱高温计的测量理论可知,对于参考黑体在参考温度 $T$ 的输出电压 $V_i$ 可表示为

$$V_i = A_{\lambda_i} \epsilon_{\lambda_i} \lambda_i^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_i T}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式(1)中, $A_{\lambda_i}$ 是只与波长有关的仪器常数,它与该波长下探测器的光谱响应率、光学元件透过率、几何尺寸及第一辐射常量有关,称为检定常数,通过标定可以确定。 $\epsilon_{\lambda_i}$ 是温度 $T$ 时的目标光谱发射率, $\lambda_i$ 是相应通道的波长, $C_2$ 是第二辐射常数。在定点黑体参考温度 $T_{ref}$ 下,第 $i$ 个通道的输出的电压 $V_{\lambda_i,b}$ 为

$$V_{\lambda_i,b} = A_{\lambda_i} \epsilon_{\lambda_i,b} \lambda_i^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_i T}} \quad (2)$$

式(2)中, $\epsilon_{\lambda_i,b}$ 黑体炉在参考温度 $T_{ref} = 2\,252\text{ K}$ 时的光谱发射率,实际计算中取 $\epsilon_{\lambda_i,b} = 0.99$ 。将式(1)和式(2)相除,得

$$\frac{V_{\lambda_i}}{V_{\lambda_i,b}} = \frac{\epsilon_{\lambda_i}}{\epsilon_{\lambda_i,b}} e^{-\frac{C_2}{\lambda_i T} + \frac{C_2}{\lambda_i T_{ref}}} \quad (3)$$

应用式(3),对于 $n$ 个通道的多光谱测温系统,可以得到 $n$ 个测量方程的同时也得到 $n+1$ 未知数( $n$ 个 $\epsilon_{\lambda_i}$ 和一个 $T$ )。从理论上讲,对应无穷多个解,因此,必须找到一种方法解决这个问题。以往的研究方法主要是假设 $\epsilon_{\lambda_i}$ 和 $\lambda_i$ 存在某种数学关系,用含有 $\lambda_i$ ( $\lambda_i$ 的值一般由通道的滤波片决定,故为已知量)的表达式代替 $\epsilon_{\lambda_i}$ ,使方程的未知数降为 $n$ 个后得以求解。但这种假设关系一旦不存在将对测量结果带来较大的误差。基于这种原因,寻找一种合适的不依赖于光谱发射率和波长之间关系假设且具有通用性的数据方法变得日益迫切。

由式(3),第 $i$ 个测量通道表示的真温为 $T_i$ 为

$$T_i = 1 / \left( \ln \left( \frac{\epsilon_{\lambda_i} V_{\lambda_i,b}}{\epsilon_{\lambda_i,b} V_{\lambda_i}} \right) \frac{\lambda_i}{C_2} + \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (4)$$

式(4)中, $\epsilon_{\lambda_i,b}$ 黑体炉在参考温度时的光谱发射率,实际计算中取 $\epsilon_{\lambda_i,b} = 0.99$ , $\epsilon_{\lambda_i}$ 是温度 $T$ 时的目标光谱发射率, $\lambda_i$ 是相应通道的波长, $C_2$ 是第二辐射常数, $V_{\lambda_i,b}$ 为第 $i$ 个通道的输出的电压, $V_{\lambda_i}$ 对于待测目标温度为 $T$ 的输出电压,通过式(4),可以被测目标的真温。

### 1.1 多目标函数

对于含有烟黑、炭粒或固体颗粒( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )的火焰,其辐射光谱主要位于可见光和近红外波段的连续光谱,每一个光谱通道都可以利用式(4)表示真温。其中,光谱发射率是未知数,由辐射测温的基本可知,光谱发射率随着波长的变化具有渐变的特征,相邻两个通道表示的真温差不会相差很大,因此,取相邻两个通道表示的真温差最小构成一个目标函数,即式(5)

$$\begin{aligned} F_1 &= \min(T_{21} - T_{22}) \\ F_2 &= \min(T_{23} - T_{24}) \\ F_3 &= \min(T_{25} - T_{26}) \\ F_4 &= \min(T_{27} - T_{28}) \end{aligned} \quad (5)$$

由辐射测温的基本理论常识可知,对于同一点、同一时

刻的测量,真温具有唯一性,由不同通道表示的真温分别为  $T_{zi}$  和  $T_{z(i+1)}$ ,由于测量中随机误差的存在,造成  $T_{zi} \neq T_{z(i+1)}$ ,由于误差的基本可知,由不同通道表示的真温标准差越小表示测量的可靠性就越大,测量精度也相对较高,另外,由于测量真温是待求的未知量,因此这里采用贝塞尔(Bessel)公式表示的标准差的平方最小作为一个目标函数,即

$$F_5 = \min \left( \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{zi} - \bar{T})^2 / (N-1)} \right) \quad (6)$$

式(6)中,  $T_{zi}$  为第  $i$  通道的亮度温度(K);  $\bar{T}$  为各通道表示真温的平均值(K);  $N$  为测量通道的数量。

式(5)和式(6)构成了五个目标函数,由约束优化理论可知,很难求得真温一个  $T$  使五个目标函数同时达到极小值,因此,只能将满足五个目标函数的近似解或弱有效解时的  $T$  视为被测目标的真温。

### 1.2 非线性多变量等式约束条件

为了构造非线性多变量等式约束条件,首先对式(4)的  $N$  个光谱通道相加取平均值后再减去式(4)中的第一个通道方程并整理,得

$$\lambda_1 \ln \epsilon(\lambda_1, T) - \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (\lambda_i \ln \epsilon(\lambda_i, T)) = -\lambda_1 \ln \frac{V_{\lambda_1 b}}{V_{\lambda_1}} + \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \left( \epsilon_i \ln \frac{V_{\lambda_i b}}{V_{\lambda_i}} \right) \quad (7)$$

通过减法操作,消去了真温  $T_i$ ,由式(7)构成了一个等式方程,其余的变量如波长  $\lambda_i$  和亮度温度  $T_i$  都是已知量。

### 1.3 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,另外,根据相关文献,相邻通道的光谱发射率满足

$$\begin{cases} \epsilon_{\lambda_i} < \epsilon_{\lambda_{i+1}} & \text{当 } T_i \leq T_{i+1} \text{ 时} \\ \epsilon_{\lambda_i} > \epsilon_{\lambda_{i+1}}^{\lambda_i/\lambda_{i+1}} & \text{当 } T_i > T_{i+1} \text{ 时} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)限定了式(7)中非线性多变量等式约束条件变化范

围,减少了冗余数据而且提高了算法的反演速度。求得的真温  $T_z$  并不是约束条件解的交集而是近似有效解或弱有效解,将这个温度  $T_z$  视为被测目标的真温,这一点与二次测量法的原理相同。另外,当多目标函数数量和形式的不同时,也会对结果产生一定的影响。

## 2 基于参考温度的多目标函数极值真温反演方法的求解

通过上述原理分析可知,建立了基于参考温度的多目标函数极值真温反演方法的多目标函数和约束条件。这种结构与多目标优化结构近似,多目标优化结构基本的形式为

$$\begin{aligned} V = \min \{ & f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X) \}, X \in R^n \\ \text{s. t. } & \begin{cases} g_j(X) \leq 0 & j = 1, 2, \dots, m \\ h_k(X) = 0 & k = 1, 2, \dots, l \\ p \geq 2 \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中,  $f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)$  为目标函数表达式,  $R^n$  为一个向量,  $X$  为自变量,  $g_j(X) \leq 0$  和  $h_k(X) = 0$  为不等式和等式约束条件。因此,可以使用 Matlab 工具箱中的 `fgoalattain` 函数实现多目标函数的求解,在求解目标函数极值的过程中实现真温和光谱发射率的反演。

## 3 实验验证

调节黑体炉到某一固定温度,待其稳定后,使用单波长高温计测量得到黑体炉的温度为 2 252.0 K,表 1 为在定点黑体参考温度  $T_{nb} = 2 252.0$  K 处多光谱高温计有效波长及在参考温度处的电压信号输出,对于黑体炉而言,黑体参考温度与亮度温度相等,对于一般待测目标而言,其真温都大于亮度温度,表 2 为实际测量时各个测量通道的电压,是本计算的原始数据<sup>[12]</sup>。

表 1 参考温度下的各个测量通道的电压

Table 1 Voltage of each measurement channel at reference temperature

	1 通道波长	2 通道波长	3 通道波长	4 通道波长	5 通道波长	6 通道波长	7 通道波长	8 通道波长
有效波长/ $\mu\text{m}$	0.574	0.592	0.623	0.654	0.698	0.748	0.826	0.914
输出电压/mV	39.4	139.7	117.5	363.7	345.0	493.9	320.7	406.7

表 2 实际测量时各个测量通道的电压

Table 2 Voltage of each measuring channel in actual measurement

通道编号	1 通道电压 /mV	2 通道电压 /mV	3 通道电压 /mV	4 通道电压 /mV	5 通道电压 /mV	6 通道电压 /mV	7 通道电压 /mV	8 通道电压 /mV
1	46.3	254.1	165.3	481.5	367.8	495.0	273.7	323.5
2	46.3	254.1	170.2	476.6	372.7	500.0	278.6	328.4
3	46.3	244.2	165.3	471.6	362.8	495.0	268.7	323.5
4	46.3	249.1	170.2	481.5	372.7	509.9	283.6	333.4
5	46.3	249.1	160.3	471.6	362.8	490.1	268.7	318.5
6	46.3	244.2	160.3	461.7	352.9	480.2	253.9	303.7
7	41.3	234.3	155.4	456.8	343.0	465.3	248.9	293.8
8	46.3	244.2	160.3	461.7	352.9	475.2	253.9	298.7
9	41.3	239.2	155.4	461.7	343.0	470.3	253.9	303.7
10	41.3	239.2	155.4	456.8	343.0	470.3	248.9	298.7
11	41.3	234.3	155.4	451.8	333.1	460.4	239.0	293.8
12	41.3	239.2	155.4	456.8	343.0	470.3	248.9	298.7

在黑体炉和微型光谱仪之间分别插入已知光谱特性的 JB9, QB18 和 LB6 三种型号的衰减片模拟真实辐射目标, 由多光谱高温计采集的多光谱电压数据通过 USB 接口传送至计算机。分别利用二次测量法(second measurement method, SMM)和基于参考温度的多目标极小值优化原理的多光谱真

温反演方法(true temperature inversion method for minimum of multi-objective function based on reference temperature, IMR)反演真温并记录了反演时间, 如表 3 所示; 反演的光谱发射率如表 4 所示。

表 3 真温反演结果

Table 3 Inversion results of true temperature

测量编号	SMM 法反演结果/K	SMM 法反演时间/s	IMR 法反演结果/K	IMR 法反演时间/s	速度提高比例/%
1	2 504.1	55.187 1	2 501.4	2.435 6	95.59
2	2 506.8	59.674 9	2 487.3	2.598 6	95.65
3	2 498.4	55.682 1	2 476.8	2.876 1	94.83
4	2 505.0	56.445 0	2 482.3	2.684 2	95.24
5	2 499.9	65.348 7	2 484.3	2.986 2	95.43
6	2 493.3	60.966 1	2 479.3	2.502 3	95.90
7	2 482.3	55.897 6	2 471.3	2.636 4	95.28
8	2 490.1	58.387 5	2 476.8	2.702 7	95.37
9	2 485.3	60.672 9	2 471.7	2.535 6	95.82
10	2 483.8	60.895 3	2 471.9	2.788 1	95.42
11	2 481.3	63.985 4	2 466.6	2.643 2	95.87
12	2 485.8	58.982 1	2 471.9	2.739 6	95.36

表 4 光谱发射率反演结果

Table 4 Inversion results of spectral emissivity

测量编号	1 通道发射率	2 通道发射率	3 通道发射率	4 通道发射率	5 通道发射率	6 通道发射率	7 通道发射率	8 通道发射率
1	0.383 5	0.613 9	0.500 9	0.494 8	0.423 7	0.423 4	0.390 7	0.392 2
2	0.406 0	0.648 8	0.543 6	0.514 9	0.450 0	0.446 8	0.413 8	0.412 7
3	0.423 7	0.649 9	0.549 2	0.529 0	0.453 7	0.457 1	0.411 1	0.417 6
4	0.414 2	0.648 6	0.553 8	0.529 5	0.457 5	0.462 7	0.427 2	0.424 3
5	0.410 9	0.643 6	0.517 7	0.515 0	0.442 4	0.442 0	0.402 5	0.403 3
6	0.419 6	0.643 8	0.527 8	0.513 5	0.437 8	0.440 1	0.385 9	0.389 6
7	0.386 5	0.637 3	0.527 1	0.522 6	0.436 9	0.437 1	0.386 8	0.384 6
8	0.423 7	0.649 9	0.532 5	0.517 9	0.441 3	0.438 8	0.388 5	0.385 6
9	0.385 9	0.649 6	0.526 3	0.527 5	0.436 3	0.441 3	0.394 2	0.397 2
10	0.385 5	0.648 9	0.525 8	0.521 4	0.436 0	0.440 9	0.386 1	0.390 4
11	0.394 1	0.649 3	0.536 5	0.525 7	0.431 1	0.439 0	0.376 4	0.389 3
12	0.385 5	0.648 9	0.525 8	0.521 4	0.436 0	0.440 9	0.386 1	0.390 4

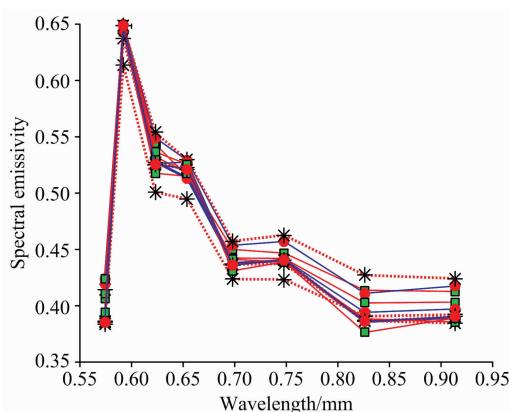


图 1 光谱发射率随波长的变化曲线

Fig. 1 Variation of spectral emissivity with the wavelength

由表 3 中两种方法反演的结果的对比可知, 两种方法的求解结果基本相同, 都在理论值约 2 490.0 K; 在反演时间上, 二次测量法的反演时间都在 60 s 左右, 而基于参考温度的多目标极小值优化原理的多光谱真温反演方法的反演时间都小于 3 s, 反演时间提高的比例均超过 95%。

图 1 为根据光谱发射率绘制的光谱发射率随波长变化的曲线图, 从图中可以看出, 虽然反演的真温值不同, 但每一个真温下光谱发射率随波长先增加后减小的趋势基本相同。

### 4 结 论

提出了一种基于参考温度的多目标极小值优化原理的多光谱真温反演方法, 可以得到以下结论: (1) 该方法无需对光谱发射率与波长之间的函数关系、光谱发射率与温度之间

的函数关系不做任何限制,理论上简化了真温反演的原理;  
(2) 火箭发动机尾焰理论真温约为 2 490.0 K, 研究中提出了一种基于参考温度的多目标极小值优化原理的多光谱真温反演方法反演的真温与理论值之差都在  $\pm 20$  K 以内, 在相同条件下, 神经网络法和镜像延拓法的真温反演误差在  $\pm 100$  K 以内, 本研究提出的反演方法在精度上有了较大的提高;  
(3) 在反演时间上, 与二次测量法相比, 基于参考温度的多

目标极小值优化原理的多光谱真温反演方法的反演时间都小于 3 s, 反演速度提高的比例都在 95% 以上。

本研究提出的基于定点黑体炉参考温度的多目标极小值优化原理的多光谱真温反演方法是一种可行的真温反演的方法, 采用优化思想的真温反演方法很可能成为多光谱真温反演研究的新方向。

## References

- [ 1 ] Araújo A. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 365.
- [ 2 ] Svet D Y. *High Temperatures High Pressures*, 1976, 8(5): 493.
- [ 3 ] Rodiet C, Rémy B, Degiovanni A, et al. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2013, 10(2): 222.
- [ 4 ] SHAO Yan-ming, ZHAO Shu-an, CHEN Yan-ru, et al(邵艳明, 赵书安, 陈延如, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2015, 35(11): 315.
- [ 5 ] Zhang L, Dai J M, Yin Z. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(6): 83.
- [ 6 ] YANG Yi-fan, CAI Hong-xing, WANG Zhao-xuan, et al(杨艺帆, 蔡红星, 王诏宣, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2018, 38(3): 702.
- [ 7 ] SUN Xiao-gang, HE Jin, DAI Jing-min(孙晓刚, 何 瑾, 戴景民, 等). *Journal of Harbin Institute of Technology(哈尔滨工业大学学报)*, 1998, 30(6): 1.
- [ 8 ] CONG Da-cheng, DAI Jing-min, SUN Xiao-gang, et al(丛大成, 戴景民, 孙晓刚, 等). *Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报)*, 2001, 20(2): 97.
- [ 9 ] Song Y, Sun X, Tang H. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(8): 457.
- [10] Mei Liang, Bojun Sun, Xiaogang Sun, et al. *International Journal of Thermophysics*, 2017, 38(3): 35.
- [11] SUN Xiao-gang, DAI Jing-min, CONG Da-cheng, et al(孙晓刚, 戴景民, 丛大成, 等). *Journal of Tsinghua University • Science and Technology(清华大学学报 • 自然科学版)*, 2003, 43(7): 916.
- [12] SUN Xiao-gang, DAI Jing-min, WANG Xue-feng, et al(孙晓刚, 戴景民, 王雪峰, 等). *Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报)*, 2003, 22(2): 141.

# Multispectral True Temperature Inversion Based on Multi-Objective Minimum Optimization Principle of Reference Temperature (IMR)

ZHANG Fu-cai<sup>1, 2</sup>, LIU Yun-gang<sup>1</sup>, SUN Xiao-gang<sup>2\*</sup>

1. School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China
2. School of Instrument Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

**Abstract** Multi-spectral radiation thermometry is a non-contact temperature measurement method which can retrieve the true temperature of the radiator. The method collects the brightness and temperature information of the target under different wavelengths and retrieves the true temperature of the target using related algorithms. Multi-spectral pyrometer is one of the most important measuring tools to retrieve the true temperature of the target by this method. After nearly half a century of unremitting efforts and exploration, many scholars at home and abroad have made considerable progress. Because the spectral emissivity is less than 1, the true temperature of the target can not be measured directly by using a radiation pyrometer. Only by processing the wavelength and brightness temperatures of multiple spectral channels and using the processing technology of multi-spectral radiation temperature measurement data can the true temperature of the target be obtained. In the process of true temperature inversion, it is generally necessary to find the functional relationship between spectral emissivity and wavelength or temperature variables, and replace spectral emissivity with expressions containing wavelength or temperature variables. This method lacks sufficient theoretical support for model selection. For non-professionals, it is difficult to select a suitable spectral emissivity model. The solution to the equation is realized. Because of the instantaneous variability of spectral emissivity, there are always some differences between the assumed spectral emissivity model and the actual spectral emissivity, which may lead to large errors in a true temperature inversion. In addition, the mathematical model between spectral emissivity and wavelength or temperature vari-

ables needs a lot of experiments and experience to determine. This mathematical model has poor generality, especially when the radiator to be measured changes; this mathematical model loses its significance. Therefore, it is an urgent need to find a universal multi-spectral true temperature inversion method without assuming a mathematical model between spectral emissivity and wavelength or temperature. For each spectral channel of a multi-wavelength pyrometer, the measured data of each spectral channel satisfies a mathematical equation, and for each spectral channel, an undetermined system of equations can be formed. In order to solve this system of equations, the idea of optimization is introduced into the process of multi-spectral solution. A multi-spectral true temperature inversion method based on multi-objective minimum optimization principle of reference temperature is proposed. The problem of solving multi-spectral true temperature is transformed into a multi-objective extreme value optimization problem, and the inversion of true temperature and spectral emissivity without assuming the spectral emissivity model is realized. Compared with the traditional quadratic measurement method, the new method has the same inversion accuracy as the quadratic measurement method, but inversion speed has been greatly improved. With the help of the true measurement data measured by previous scholars, the inversion of true temperature and spectral emissivity is realized by using the multi-spectral true temperature inversion method based on the multi-objective minimum optimization principle of reference temperature. The new method has greatly improved the inversion speed. With the help of the true measurement data of plume temperature of solid rocket motor in the past, the inversion of true temperature is realized by using a multi-objective minimum optimization method based on reference temperature.

**Keywords** Optimization; Multispectral; Emissivity; True temperature

(Received Mar. 1, 2019; accepted Jul. 14, 2019)

\* Corresponding author