

多目标普朗克极小值优化法的多光谱真温反演研究

张福才^{1,2}, 孙博君¹, 孙晓刚^{1*}, 梁美¹

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. 黑龙江科技大学电器与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022

摘要 光谱发射率是辐射体辐射能力的重要参数,通过光谱发射率可以建立辐射体与黑体的之间的桥梁,从而黑体辐射的相关理论就可以应用于辐射体。采用普朗克公式,光谱高温计的每一个光谱通道可以构成一个方程,这个方程中包含有真温、亮度温度和光谱发射率。对于 N 个光谱通道可以构成 N 个方程,这 N 个方程中也包含一个真温、 N 个亮度温度和 N 个光谱发射率,其中亮度温度是已知量,真温和光谱发射率是未知量。由于方程组是欠定的,理论上存在着大量的解。为了求解这个方程组常需要假设光谱发射率与波长和温度之间的数学模型,使方程组未知数的个数降为 N 个,实现真温的求解。当光谱发射率与波长或温度之间的规律被正确获得后,多光谱辐射测温法才能反演出正确的真温。通过对上述较为常用两种光谱发射率模型的分析可知,这两种方法的基本思想都是试图找到光谱发射率与波长或温度之间的函数关系,确立光谱发射率与波长或温度之间数学模型。用含有波长或温度的表达式代替光谱发射率,实现方程的求解。由于光谱发射率具有一定的不确定性,假设的光谱发射率模型与实际光谱发射率的变化之间存在一定的差异,有可能导致真温反演产生较大的误差。光谱发射率与波长或温度之间的数学模型是需要通过大量的实验和经验才能获得的,而且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。为了解决多光谱高温计在实际测量中存在的问题,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。为此,将优化的思想引入到了多光谱求解过程中,将多光谱真温的求解问题转化为多目标普朗克极小值优化(MMP)问题,从而不再需要建立光谱发射率与波长或温度之间的数学模型,降低了系统的复杂性与难度。该方法以普朗克公式和光谱发射率之间的等式约束条件为基础,构造了六个目标函数,实现了真温的求解。新方法在反演精度上得到了较大幅度的提高,仿真数据的误差都小于1%。借助于以往的真实测量数据,利用多目标普朗克极小值优化法实现了真温的反演。

关键词 发射率;多光谱;真温;优化

中图分类号: TH865 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)06-1834-06

引言

应用多光谱技术对辐射温度与温度场测量研究真正始于20世纪70年代,经过近半个世纪的发展,在理论上逐步完善,在应用上也取得了长足的进步,特别是在真温测量方面,取得了一系列的成果^[1-4]。目前,在真温求解中主要的难点是如何反演出可靠的光谱发射率的数值。为了反演光谱发射率,一种方法是光谱发射率与波长建立函数关系,用含有波长的表达式代替光谱发射率从而使未知数的个数减少一

个,采用解方程的方式最终实现真温的求解;另一种方法是光谱发射率与温度建立函数关系,用含有温度和某一温度的光谱发射率的表达式代替未知的的光谱发射率,采用迭代的方式最终实现真温的求解^[5]。

上述两种方法中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,则会造成较大的真温反演误差。而在实际的辐射测温过程中,光谱发射率的变化在不同时刻、不同测量位置往往是不相同的,所以光谱发射率与波长或温度之间函数关系是不容易获得的,其次是这种数学关系通用性较差,尤其是待测辐射体发生改变时,这种关系也就失去存

收稿日期:2018-05-06,修订日期:2018-10-30

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

作者简介:张福才,1978年生,哈尔滨工业大学博士 e-mail:510132156@qq.com

* 通讯联系人 e-mail:qingtengzfc@yeah.net

在价值^[6]。优化是一种数学规划方法，其主要在无约束和有约束条件下如何寻找最优解的一类方法的统称。本文引入了多目标非线性多约束极小值优化法实现了欠定方程组的求解，新方法采用优化的思想，构建了三类目标函数，以推导的光谱发射率之间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，充分将物理上的实际问题与数学上的优化算法相结合实现了真温的求解，同时也获得每个波长下的光谱发射率。该方法降低了真温求解过程的复杂性和技术难度且具有较高的反演精度，为相对精度较高的多光谱真温求解提供了新的方向和可行性^[7-8]。

1 多目标普朗克极小值优化法真温求解原理

对于光谱位于近红外波段且具有连续辐射光谱的辐射体而言，为了将多光谱真温反演问题转化为多目标函数的优化问题需要借助于辐射测温的基本理论完成多目标函数、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的建立等三方面的准备工作。

1.1 多目标函数

在近红外波段，假设被测目标的真实温度为 T ，根据普朗克公式与亮度温度的基本定义，设多光谱高温计的第 i 个通道在有效波长为 λ_i 、真温 T 时的光谱辐射亮度为 $L_{\lambda_i}(T)$ ，与该光谱辐射亮度在某一温度 T_i 时的黑体光谱辐射亮度 $L_{\lambda_i,b}(T_i)$ 相等时，满足式(1)

$$L_{\lambda_i}(T) = L_{\lambda_i,b}(T_i) \tag{1}$$

其中

$$L_{\lambda_i}(T) = \frac{\epsilon_{\lambda_i}}{\pi \lambda_i^5} \frac{c_1}{\exp(c_2/(\lambda_i T)) - 1} \tag{2}$$

$$L_{\lambda_i,b}(T) = \frac{1}{\pi \lambda_i^5} \frac{c_1}{\exp(c_2/(\lambda_i T_i)) - 1} \tag{3}$$

式(2)和式(3)中： λ_i 为波长 (μm)； ϵ_{λ_i} 为波长为 λ_i 时的光谱发射率； T 为物体的真实温度 (K)； c_1 和 c_2 分别为第一、第二辐射常数； i 为测量通道数量， $i=1, 2, \dots, N$ 。

设

$$WP = c_2/(\lambda T) \tag{4}$$

式(4)中： WP 为维恩条件； λ_{\max} 为波长的最大值 (μm)； T 为物体的真实温度 (K)。

当式(1)满足 $WP \gg 1$ 时，可以适用维恩公式代替普朗克公式进行简化计算，否则将式(2)和式(3)代入式(1)并整理，得

$$e^{c_2/\lambda_i T} - 1 = (e^{c_2/\lambda_i T_i} - 1)\epsilon_{\lambda_i} \tag{5}$$

根据式(5)，第 i 个测量通道的真温可以表示为

$$T_{zi} = \frac{c_2}{\lambda_i \ln[(e^{c_2/\lambda_i T_i} - 1)\epsilon_{\lambda_i} + 1]} \tag{6}$$

式(6)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， $c_2 = 14\ 388\ \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ， $i=1, 2, \dots, N$ 为高温计的通道数量。对于每一个光谱通道都可以利用式(6)表示真温。但在实际测量中，由于测量误差的存在导致每一个光谱通道表示的真温值并不完全相等，假设光

谱测量通道数 $N=8$ ，则每相邻两个光谱通道的真温差可以构成一个方程，从而可以构成四个目标函数，见式(7)

$$\begin{aligned} \min F_1 = & (T_{z1} - T_{z2}) + (T_{z3} - T_{z4}) + \\ & (T_{z5} - T_{z6}) + (T_{z7} - T_{z8}) \end{aligned} \tag{7}$$

其次，由前四个通道真温和与后四个通道真温和之差的平方最小值也可以构成一个目标函数，见式(8)

$$\min F_2 = \left(\sum_{i=1}^4 T_{zi} - \sum_{i=5}^8 T_{zi} \right)^2 \tag{8}$$

最后，通过八个通道的平方差最小值也可以构成一个目标函数，见式(9)

$$\min F_3 = \sum_{i=1}^8 \left(\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 T_{zi} - T_{zi} \right)^2 \tag{9}$$

由式(7)，式(8)和式(9)构成了三类目标函数，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，当求得的温度 T 为目标函数的近似解或弱有效解时，将这个温度 T 视为被测目标的真温^[9-10]。

1.2 非线性多变量等式约束条件

根据式(6)， N 个光谱通道表示的真温平均值 T 为

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{c_2}{\lambda_i \ln[(e^{c_2/\lambda_i T_i} - 1)\epsilon_{\lambda_i} + 1]} \tag{10}$$

再用式(6)中每一个通道方程分别减去式(10)并整理，得

$$\begin{aligned} \nu_i = & \frac{c_2}{\lambda_i \ln[(e^{c_2/\lambda_i T_i} - 1)\epsilon_{\lambda_i} + 1]} - \\ & \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \frac{c_2}{\lambda_i \ln[(e^{c_2/\lambda_i T_i} - 1)\epsilon_{\lambda_i} + 1]} \right) \end{aligned} \tag{11}$$

式(11)中， ν_i 称为各个通道测量的残余误差(残差)。理想情况下，各个通道测量残差为零，因此，式(11)可进一步整理，得

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\lambda_i \ln[(e^{c_2/\lambda_i T_1} - 1)\epsilon_{\lambda_i} + 1]} = \\ & \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\lambda_i \ln[(e^{c_2/\lambda_i T_i} - 1)\epsilon_{\lambda_i} + 1]} = \\ & \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\lambda_2 \ln[(e^{c_2/\lambda_2 T_2} - 1)\epsilon_{\lambda_2} + 1]} = \\ & \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\lambda_i \ln[(e^{c_2/\lambda_i T_i} - 1)\epsilon_{\lambda_i} + 1]} = \\ & \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\lambda_{N-1} \ln[(e^{c_2/\lambda_{N-1} T_{N-1}} - 1)\epsilon_{\lambda_{N-1}} + 1]} = \\ & \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\lambda_i \ln[(e^{c_2/\lambda_i T_i} - 1)\epsilon_{\lambda_i} + 1]} = \\ & \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\lambda_N \ln[(e^{c_2/\lambda_N T_N} - 1)\epsilon_{\lambda_N} + 1]} = \\ & \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\lambda_i \ln[(e^{c_2/\lambda_i T_i} - 1)\epsilon_{\lambda_i} + 1]} \end{aligned} \tag{12}$$

通过减法操作，消去了一个待求真温 T_{zi} ，由式(12)构成了多个等式方程。利用上述光谱发射率彼此之间存在约束的特性建立了非线性多变量等式约束条件。

1.3 多变量不等式约束条件

光谱发射率的变化范围都在 0 和 1 之间，如式(13)所

示, 实际的应用光谱发射率的估算值如表 1 中所示。

$$0 < \epsilon_i < 1 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (13)$$

这个关系限定了式(12)中非线性多变量等式约束条件取值范围, 提高了算法的反演速度。由式(13)的光谱发射率的变化范围构成了多变量不等式约束条件。

1.4 多目标普朗克极小值优化法的求解

通过对 1.1, 1.2 和 1.3 的分析, 建立了多目标非线性多约束极小值优化法的目标函数和约束条件。在求解目标函数值过程中采用了多目标优化方法(goal programming, GP), 这种方法是现代优化理论中的一部分, 是在解决多目标优化问题过程中产生的, 目前逐步走向成熟, 其基本的形式为

$$V - \min\{f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)\}, \quad X \in R^n$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} g_j(X) \leq 0 & j = 1, 2, \dots, m \\ h_k(X) = 0 & k = 1, 2, \dots, l \\ \rho \geq 2 \end{cases} \quad (13)$$

式(14)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 为向量中的自变量, $g_j(X) \leq 0$ 和 $h_k(X)$

$= 0$ 为不等式和等式约束条件。上述多目标的优化形式的实质可以简单理解为在 $\rho \geq 2$ 时求 $f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)$ 的极小值, 这也是极小值优化法命名的由来。通过分析可知, 所建立的多目标函数和等式、不等式约束条件与式(14)中的多目标优化方法的结构一致, 从而可以用多目标优化方法来求解, 实现了将真温求解问题转化为多目标非线性多约束极小值的优化问题。

2 新方法的仿真

2.1 仿真初始条件

为了检验多目标普朗克极小值优化法真温反演算法的有效性, 采用五种光谱发射率具有不同变化特征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单目标极小值优化法的求解结果进行比较。每一通道的有效波长分别为 3.00, 3.25, 3.50, 3.75, 4.00, 4.25, 4.50 和 4.75 μm , 亮度温度值如表 1 所示。

表 1 仿真目标的初始数据
Table 1 Simulation of initial data

编号	真温 /K	亮度温度 @3.00 μm /K	亮度温度 @3.25 μm /K	亮度温度 @3.50 μm /K	亮度温度 @3.75 μm /K	亮度温度 @4.00 μm /K	亮度温度 @4.25 μm /K	亮度温度 @4.50 μm /K	亮度温度 @4.75 μm /K
1	1 500.0	1 420.3	1 409.7	1 404.3	1 393.3	1 388.1	1 376.8	1 365.2	1 360.3
2	1 800.0	1 689.4	1 675.4	1 668.5	1 654.2	1 647.8	1 633.1	1 618.2	1 612.3
3	2 100.0	1 955.4	1 937.9	1 929.7	1 912.0	1 904.5	1 886.5	1 868.3	1 838.2
4	2 400.0	2 219.0	2 197.9	2 188.6	2 167.4	2 158.9	2 137.7	2 116.1	2 108.6
5	2 700.0	2 480.6	2 456.0	2 445.6	2 421.0	2 411.7	2 387.1	2 362.3	2 354.0
6	3 000.0	2 740.5	2 712.5	2 701.1	2 673.1	2 663.0	2 635.1	2 607.1	2 598.2

2.2 真温仿真结果

将 $\lambda_{\max} = 4.75 \mu\text{m}$, $T_{\min} = 1 500 \text{ K}$ 代入式(4), 得

$$WP = c_2 / (\lambda_{\max} T_{\min}) = 14 388 / 4.75 / 1 500 \approx 2.02 \quad (15)$$

此时维恩条件 $WP \gg 1$ 不满足要求, 因此, 表 1 中数据不能使用维恩公式进行简化计算。为了对比, 仍然使用以前

提出的维恩公式多目标极小值优化法(multi objective minimization optimization method, MMO)和基于普朗克公式的多目标极小值优化(multi objective minimization optimization based on planck, MMP)法两种真温反演方法对真温进行反演, 将反演的结果进行比较, 如表 2 所示。

表 2 两种方法求解真温的比较
Table 2 Comparisons of two methods of iterative time

数据编号	发射率 ϵ 范围	真温/K	MMO 法反演的真温/K	MMO 法反演的误差/%	MMP 法反演的真温/K	MMP 法反演的误差/%
1	0.75~0.85	1 500.0	1 551.9	3.46	1 504.7	0.31
2	0.75~0.85	1 800.0	1 879.9	4.44	1 813.5	0.75
3	0.75~0.85	2 100.0	2 214.2	5.44	2 105.6	0.27
4	0.75~0.85	2 400.0	2 559.7	6.65	2 411.4	0.48
5	0.75~0.85	2 700.0	2 914.2	7.93	2 713.9	0.51
6	0.75~0.85	3 000.0	3 279.6	9.32	3 016.5	0.55

从表 2 可知, 基于维恩公式的多目标函数优化法反演误差相对较大并且这种误差随温度的升高而增大, 最大相对误差已经达到了 9.32%, 因此, 使用这种方法反演真温已不再

合适; 而基于普朗克公式的多目标函数优化法反演误差相对较小, 所有误差都在 1% 以内, 说明基于普朗克公式的多目标极小值优化法是一种有效的真温反演算法。

3 新方法的应用

为了验证普朗克原理的多目标函数极小值优化法真温反演算法的有效性,采用了张磊的博士论文《基于光谱识别的多光谱测温技术研究》中的六个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原文中的光谱识别法(spectrum recognition method, SRM)的求解结果进行比较。亮度温度如表 3 所示,表 3 是每一测量通道的有效波长分别为 2.481 0, 2.828 5, 3.249 2, 3.657 9, 4.051 9, 4.433 7,

4.801 5和 4.998 2 $\mu\text{m}^{[10-11]}$ 。

将 $\lambda_{\max}=4.998\ 2\ \mu\text{m}$, $T_{\min}=773.0\ \text{K}$ 代入式(4), 得式(16)

$$WP = c_2 / (\lambda_{\max} T_{\min}) = 14\ 388 / 4.998\ 2 / 773 \approx 3.72 \quad (16)$$

同样,此时不满足 $WP \gg 1$ 的维恩条件,不能使用维恩公式进行简化计算。但为了检验基于普朗克原理的多目标函数极小值优化法真温反演算法的有效性,分别使用光谱识别法(SRM)^[11]和基于普朗克原理的多目标函数极小值优化法(MMP)反演了真温,反演的真温如表 4 所示。

表 3 被测目标的亮度温度

Table 3 Brightness temperature and effective wavelength

数据类型	真温 /K	亮度温度 /K	亮度温度 /K	亮度温度 /K	亮度温度 /K	亮度温度 /K	亮度温度 /K	亮度温度 /K	亮度温度 /K
不锈钢	773.0	752.3	746.9	739.5	731.6	723.2	714.5	705.6	700.6
石墨	1 073.0	1 033.2	1 023.2	1 009.8	995.6	980.9	965.8	950.6	942.2
钛试样	1 073.0	974.1	928.7	875.2	832.0	804.9	795.7	803.2	813.5
试件 1	1 273.0	1 167.8	1 133.0	1 117.1	1 100.0	1 057.6	1 047.7	1 004.4	979.9
试件 2	1 073.0	1 019.2	989.1	962.2	932.0	899.6	875.0	847.5	836.6
试件 3	773.0	697.9	695.7	689.7	680.2	664.6	663.1	682.2	688.6

表 4 光谱识别法和基于普朗克原理的多目标函数极小值法反演真温的比较

Table 4 Comparison of true temperature with SRM and MMP method

数据类型	发射率 ϵ 范围	真温/K	SRM 法反演的真温/K	SRM 法反演的误差/%	MMP 法反演的真温/K	MMP 法反演的误差/%
不锈钢	0.65~0.85	773.0	778.4	0.70	768.6	-0.57
石墨	0.65~0.85	1 073.0	1 081.4	0.78	1 073.4	0.04
钛试样	0.20~0.60	1 073.0	1 083.3	0.96	1 085.7	1.18
试件 1	0.40~0.70	1 273.0	1 288.6	1.23	1 280.9	0.62
试件 2	0.30~0.80	1 073.0	1 078.2	0.48	1 068.6	-0.41
试件 3	0.40~0.70	773.0	780.2	0.93	764.8	-1.06

从表 4 中两种方法反演的结果的对比可知,光谱识别法和基于普朗克公式的多目标函数极小值优化法反演精度上大体相当,说明基于普朗克公式的多目标极小值优化法是一种有效的真温反演算法。在获得真温后,根据式(5),光谱发射率 ϵ_{λ_i} 可表示为

$$\epsilon_{\lambda_i} = \frac{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_i T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_i T_i}\right) - 1} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

式(17)中, ϵ_{λ_i} 为光谱发射率; λ_i 为有效波长(μm); T 为待测目标的真温(K); T_i 为第 i 通道的亮度温度(K); c_2 为第二辐射常数; N 为测量的光谱通道数。

根据式(17),分别将光谱识别法和普朗克公式的多目标函数极小值优化法计算各个波长下的光谱发射率,如图 1 所示^[12]。

从图 1 中可以看出,两种方法反演的光谱发射率都与理论上的光谱发射率变化趋势一致,说明基于普朗克公式的多目标极小值优化法是一种有效的光谱发射率求解方法。

4 结 论

针对当测量中不能用维恩公式代替普朗克公式时,提出了一种基于普朗克公式真温反演算法,该方法具有以下优势:

(1)提出的方法将真温的反演过程转化为多目标优化问题,不再需要建立光谱发射率和波长或温度之间的函数关系模型,降低了系统的复杂性和技术难度;

(2)不需要对亮度温度和波长做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,而且反演精度高于以前提出的基于维恩公式的多目标极小值法;

(3)通过与光谱识别法相比,基于普朗克原理的多目标极小值优化法与光谱识别法真温反演精度大体相同。

综合分析基于普朗克原理的多目标极小值优化法是一种可行的真温反演方法,为多光谱真温反演提供了新的方向和可行性。

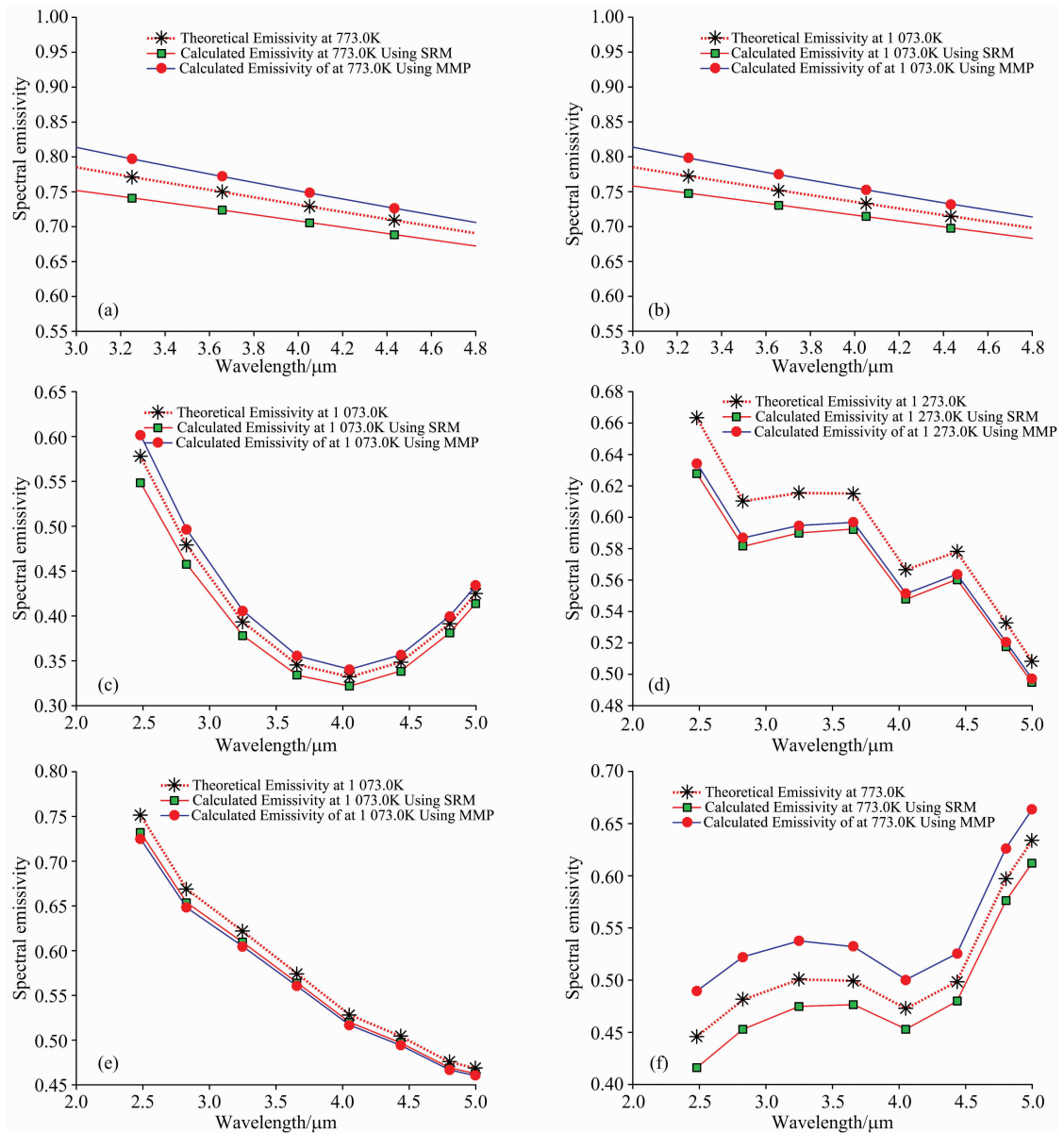


图 1 不同温度时发射率随波长变化的趋势

(a): 不锈钢光谱发射率随波长变化趋势; (b): 石墨光谱发射率随波长变化趋势; (c): 钛试样光谱发射率随波长变化趋势; (d): 试样 1 光谱发射率随波长变化趋势; (e): 试样 2 光谱发射率随波长变化趋势; (f): 试样 3 光谱发射率随波长变化趋势

Fig. 1 Variation of emissivity with wavelength at different temperatures

(a): Trend of emissivity of stainless steel with wavelength; (b): Trend of emissivity of graphite with wavelength; (c): Trend of emissivity of titanium sample with wavelength; (d): Trend of emissivity of sample 1 with wavelength; (e): Trend of emissivity of sample 2 with wavelength; (f): Trend of emissivity of sample 3 with wavelength

References

- [1] Zhang W, Sun Q, Hao S, et al. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 1297.
- [2] Girard F, Battuello M, Florio M. International Journal of Thermophysics, 2014, 35(6): 1401.
- [3] Mecklenburg M, Hubbard W A, White E R, et al. Science, 2015, 347(6222): 629.
- [4] Zhan X K, Li Z Y, Zhang Yi, et al. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 147.
- [5] Liang M, Sun B J, Sun X G, et al. International Journal of Thermophysics, 2017, 38(3): 35.
- [6] Liang M, Sun B J, Sun X G, et al. Measurement, 2017, 95: 239.
- [7] ZHANG Fu-cai, SUN Xiao-gang, XING Jian, et al(张福才, 孙晓刚, 邢 键, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程),

- 2015, 45(7): 39.
- [8] ZHANG Fu-cai, SUN Xiao-gang(张福才, 孙晓刚). *Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程)*, 2016, 44(9): 2598.
- [9] Ni M J, Zhang H D, Wang F, et al. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 96: 421.
- [10] LIANG Mei, SUN Bo-jun, SUN Xiao-gang, et al(梁 美, 孙博君, 孙晓刚, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(8): 2352.
- [11] Jia R, Xiong Q, Xu G, et al. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111: 961.
- [12] Zhang L, Dai J M, Yin Z. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(6): 83.

Multi Objective Planck's Minimization Optimization Method for Multispectral True Temperature Inversion

ZHANG Fu-cai^{1, 2}, SUN Bo-jun¹, SUN Xiao-gang^{1*}, LIANG Mei¹

1. School of Instrumentation 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 The spectral emissivity is an important parameter of the radiant capacity of the radiator. Through the spectral emissivity, the relationship between the radiator and the blackbody can be setup. Therefore, the theory of the blackbody radiation can be applied to the general radiator. By using the planck formula, each spectral channel of a spectral pyrometer can constitute an equation, which includes the true temperature, the brightness temperature and the spectral emissivity. There are N measurement channels, but $N+1$ are unknowns (N unknown emissivities ϵ_i and a temperature T). Because the equations are under determined, there are many solutions in theory. In order to solve this equation group, the assumption of mathematical model between the spectral emissivity and wavelength or temperature is required and the number of unknown numbers of the equation group is reduced to N , and then the true temperature can be solved. When the law of the spectral emissivity and wavelength or temperature is correctly obtained, the true temperature can be calculated by multispectral radiation thermometry. Through the analysis of the two commonly the spectral emissivity models, the basic idea of the two methods is to try to find the relationship between the spectral emissivity and the wavelength or the temperature and establish the mathematical model between the spectral emissivity and the wavelength or temperature. Because the spectral emissivity has certain uncertainty, the assumed spectral emissivity model is inconsistent with the variation rule of the actual the spectral emissivity, which will cause larger inversion error. The mathematical model between the spectral emissivity and the wavelength or temperature is needed a lot of experiments and experiences, and the mathematical model is poor in generality. Especially when the measured radiator is changed, the mathematical model is also meaningless. In order to solve the problem of multispectral pyrometer in actual measurement, it is an urgent need to find a multispectral true temperature inversion method which does not have to assume the mathematical model between the spectral emissivity and the wavelength or temperature. Therefore, the idea of optimization is introduced into the multispectral true temperature solution for the first time, and the problem of multispectral true temperature is transformed into a multi objective minimization optimization problem(MMP). The mathematical model between the spectral emissivity and wavelength or temperature is no longer needed, and the complexity and the difficulty of the system is reduced. Based on the planck formula and equality constrained conditions among spectral emissivities, the method constructs six objective functions and the solution of true temperature is realized. The inversion accuracy of new method is greatly improved, and the error of simulation data is less than 1%. With the aid of the actual measurement data in the past, the multi objective planck minimization optimization method is used to realize the inversion of the true temperature.

Keywords Emissivity; Multispectral; True temperature; Optimization

(Received May 6, 2018; accepted Oct. 30, 2018)

* Corresponding author