

多光谱真温快速反演方法

孙博君, 孙晓刚*, 戴景民

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 材料的未知发射率是辐射测温的一大障碍,它导致了无法依靠单组测量数据获得材料的真实温度,人们只能通过假定材料发射率模型来计算出材料的亮度温度等非真实温度。基于这样的背景, Gardner J等科学家们提出了多光谱测温法并不断完善其理论,如今多光谱测温广泛应用于高温和超高温测量、高温目标的热性能测量、真实温度动态测量等。2005年,孙晓刚提出了二次测量法,二次测量法属于多光谱真温反演算法的一种,其通过两组测量数据之间的迭代运算解决了反演真温与反演各波长下材料发射率的难题,并且通过构建大量发射率模型来确保各波长下反演出的发射率的精度,但是其在数学运算和软件运行中需要构建数量庞大的发射率模型库、通过匹配库中所有发射率模型来得到真温最优解,这不仅需要大量计算时间而且占用大量软件资源。提出了新的多光谱真温快速反演方法,理论推导出了的材料辐射能量当量与发射率之间的不等式方程组,在二次测量法算法中增加了对发射率模型库优化筛选步骤,这一措施能够筛选掉发射率模型库中不合理的模型以缩小发射率模型库的规模,从而节省大量计算时间和软件资源。首先进行了0.400~1.100波段的仿真实验,实验中分别对六种发射率模型进行了多光谱真温快速反演方法和二次测量法的反演结果对比,结果表明,对于同一个被测目标在相同的温度初值和相同的发射率搜索范围内,真温快速反演方法不仅保证了反演精度,而且相比于二次测量法减少了29%~64%的发射率模型数和26%~57%的计算时间。进行了0.574~0.914波段的实测对比实验,实验结果表明对于相同条件下,真温快速反演方法在保证精度的前提下,相比于二次测量法减少了42%~48%的发射率模型数和35%~49%的计算时间。实验证明真温快速反演方法可行,对于大规模多光谱真温测量和在线多光谱真温测量有重要价值。

关键词 多光谱; 快速反演; 真温测量

中图分类号: O140.3025 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)05-1336-07

引言

多光谱辐射测温技术在高温测量和超高温测量领域有着广泛的应用^[1-3],被应用于测量高温目标热物性、真实温度测量、动态温度测量等方面。

Gardner于20世纪80年代提出了单模型构建法,构建模型为: $\ln \epsilon(\lambda, T) = a + b\lambda$,之后 Gardner等对钨等金属材料进行了仿真计算,并反演到了可靠的目标真温;2001年,孙晓刚提出了多模型——采用BP神经网络对多光谱测温法的数据进行处理^[4],该方法能够适用于大多数被测目标的真温测量;2005年,孙晓刚针对固体火箭发动机羽焰真温测量^[5]和爆炸火焰真温测量^[6]等动态测温场合提出了二次测量法。

以二次测量法为例的多光谱辐射测温方法在计算过程中会构建庞大的发射率模型库,较大程度地增加了计算时间,在如今设备与资源大规模智能化和网络在线整合化的趋势下,计算速度慢也会严重限制二次测量法的实际应用价值。为了减少二次测量法的计算时间,邢健等提出了针对目标函数和数组约束^[7-9]等改进方法,但是这些改进方法在减少计算时间的同时却降低了计算结果的精度。

本文理论推导出了辐射能量当量与发射率之间的不等式方程组,并提出了多光谱真温快速反演方法,针对六种经典发射率模型进行了仿真和实测对比试验。实验结果表明相对于二次测量法,快速反演方法能在保证精度不降低的前提下减少计算时间。

收稿日期: 2020-05-20, 修订日期: 2020-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61875046)资助

作者简介: 孙博君, 1996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: sunbjhit@163.com

* 通讯作者 e-mail: sxg@hit.edu.cn

1 理论原理推导

如果多光谱高温计有 n 个通道, 则高温计的第 i 个通道的输出信号 V_i 如式(1)所示

$$V_i = A_{\lambda_i} \epsilon(\lambda_i, T) \left[\frac{1}{\lambda_i^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda_i T}} - 1)} \right] \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式(1)中, A_{λ_i} 为只与波长有关而与温度无关的检定常数, 它与该波长下的探测器光谱响应率、光学元件透过率、几何尺寸、以及第一辐射常数有关; λ_i 为第 i 个通道的有效波长; $\epsilon(\lambda_i, T)$ 为温度 T 时目标光谱发射率; c_2 为第二热辐射常数, 为 $14\,388\ \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

利用维恩近似公式替代普朗克定律(即 $e^{\frac{c_2}{\lambda_i T}} - 1 \approx e^{\frac{c_2}{\lambda_i T}}$)处理式(1)得

$$V_i = A_{\lambda_i} \epsilon(\lambda_i, T) \lambda_i^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_i T}} \quad (2)$$

在定点黑体参考温度 T' 下第 i 个通道的输出信号 V'_i 如式(3)所示

$$V'_i = A_{\lambda_i} \lambda_i^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda_i T'}} \quad (3)$$

[黑体的发射率 $\epsilon(\lambda_i, T')$ 为 1.0, 所以此处省略]

由式(2)和式(3)得

$$\frac{V_i}{V'_i} = \epsilon(\lambda_i, T) e^{-\frac{c_2}{\lambda_i T} + \frac{c_2}{\lambda_i T'}} \quad (4)$$

式(4)中, $\frac{V_i}{V'_i}$ 被称为第 i 个通道的辐射能量当量。

整理式(4)得

$$\ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right) - \frac{c_2}{\lambda_i T'} = -\frac{c_2}{\lambda_i T} + \ln\epsilon(\lambda_i, T) \quad (5)$$

由式(5)得到式(6)和式(7)

$$\ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right) - \frac{c_2}{\lambda_i T'} + \frac{c_2}{\lambda_i T} = \ln\epsilon(\lambda_i, T) \quad (6)$$

$$\ln\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right) - \frac{c_2}{\lambda_{i+1} T'} + \frac{c_2}{\lambda_{i+1} T} = \ln\epsilon(\lambda_{i+1}, T) \quad (7)$$

已知 $0 < \epsilon(\lambda_i, T) < 1$, $0 < \epsilon(\lambda_{i+1}, T) < 1$, 取 $0 < \lambda_i < \lambda_{i+1}$

有 $\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_{i+1}} > 0$, 则 $\lambda_i(6) - \lambda_{i+1}(7)$ 得

$$\lambda_i \ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right) - \lambda_{i+1} \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right) = \lambda_i \ln\epsilon(\lambda_i, T) - \lambda_{i+1} \ln\epsilon(\lambda_{i+1}, T) \quad (8)$$

式(8)两边同加 $(\lambda_{i+1} - \lambda_i) \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)$ 得

$$\lambda_i \left[\ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right) - \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right) \right] = \lambda_i \ln\epsilon(\lambda_i, T) - \lambda_{i+1} \ln\epsilon(\lambda_{i+1}, T) + (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right) \quad (9)$$

式(8)两边同加 $(\lambda_{i+1} - \lambda_i) \ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right)$ 得

$$\lambda_{i+1} \left[\ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right) - \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right) \right] = \lambda_i \ln\epsilon(\lambda_i, T) - \lambda_{i+1} \ln\epsilon(\lambda_{i+1}, T) + (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right) \quad (10)$$

下面按 $\frac{V_i}{V'_i} < \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}$, $\frac{V_i}{V'_i} = \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}$, $\frac{V_i}{V'_i} > \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}$ 三种情况讨论。

$$\textcircled{1} \frac{V_i}{V'_i} < \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}$$

式(9)左侧 < 0 , 所以式(9)右侧 < 0 , 即 $\lambda_i \ln\epsilon(\lambda_i, T) - \lambda_{i+1} \ln\epsilon(\lambda_{i+1}, T) + (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right) < 0$

$$\text{解得: } \epsilon(\lambda_i, T) < \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \frac{\lambda_{i+1}^{\lambda_i}}{\lambda_i^{\lambda_{i+1}}} \left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$$

式(10)左侧 < 0 , 所以式(10)右侧 < 0 , 即 $\lambda_i \ln\epsilon(\lambda_i, T) - \lambda_{i+1} \ln\epsilon(\lambda_{i+1}, T) + (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right) < 0$

$$\text{解得: } \epsilon(\lambda_i, T) < \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \frac{\lambda_{i+1}^{\lambda_i}}{\lambda_i^{\lambda_{i+1}}} \left(\frac{V_i}{V'_i}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$$

因为 $\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i} < 0$, $\frac{V_i}{V'_i} < \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}$, 且 $b < 0$ 时 a 越大 a^b 越

小, 所以 $\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}} < \left(\frac{V_i}{V'_i}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$

综上所述得: $\epsilon(\lambda_i, T) < \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \frac{\lambda_{i+1}^{\lambda_i}}{\lambda_i^{\lambda_{i+1}}} \left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$

$$\textcircled{2} \frac{V_i}{V'_i} = \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}$$

式(9)左侧 $= 0$, 所以式(9)右侧 $= 0$, 即 $\lambda_i \ln\epsilon(\lambda_i, T) - \lambda_{i+1} \ln\epsilon(\lambda_{i+1}, T) + (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right) = 0$

$$\text{解得: } \epsilon(\lambda_i, T) = \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \frac{\lambda_{i+1}^{\lambda_i}}{\lambda_i^{\lambda_{i+1}}} \left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$$

式(10)左侧 $= 0$, 所以式(10)右侧 $= 0$, 即 $\lambda_i \ln\epsilon(\lambda_i, T) - \lambda_{i+1} \ln\epsilon(\lambda_{i+1}, T) + (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right) = 0$

$$\text{解得: } \epsilon(\lambda_i, T) = \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \frac{\lambda_{i+1}^{\lambda_i}}{\lambda_i^{\lambda_{i+1}}} \left(\frac{V_i}{V'_i}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$$

由于 $\frac{V_i}{V'_i} = \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}$, 得 $\epsilon(\lambda_{i+1}, T) \frac{\lambda_{i+1}^{\lambda_i}}{\lambda_i^{\lambda_{i+1}}} \left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}} =$

$$\epsilon(\lambda_{i+1}, T) \frac{\lambda_{i+1}^{\lambda_i}}{\lambda_i^{\lambda_{i+1}}} \left(\frac{V_i}{V'_i}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$$

所以 $\epsilon(\lambda_i, T) = \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \frac{\lambda_{i+1}^{\lambda_i}}{\lambda_i^{\lambda_{i+1}}} \left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}} = \epsilon(\lambda_{i+1},$

$$T) \frac{\lambda_{i+1}^{\lambda_i}}{\lambda_i^{\lambda_{i+1}}} \left(\frac{V_i}{V'_i}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$$

$$\textcircled{3} \frac{V_i}{V'_i} > \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}$$

式(9)左侧 > 0 , 所以式(9)右侧 > 0 , 即 $\lambda_i \ln\epsilon(\lambda_i, T) - \lambda_{i+1} \ln\epsilon(\lambda_{i+1}, T) + (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \ln\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right) > 0$

$$\text{解得: } \epsilon(\lambda_i, T) > \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \frac{\lambda_{i+1}^{\lambda_i}}{\lambda_i^{\lambda_{i+1}}} \left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$$

式(10)左侧 > 0 , 所以式(10)右侧 > 0 , 即 $\lambda_i \ln\epsilon(\lambda_i, T) - \lambda_{i+1} \ln\epsilon(\lambda_{i+1}, T) + (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \ln\left(\frac{V_i}{V'_i}\right) > 0$

解得： $\epsilon(\lambda_i, T) > \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \left(\frac{V_i}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$

因为 $\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i} < 0, \frac{V_i}{V'_{i+1}} > \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}$ ，且 $b < 0$ 时 a 越大 a^b 越

小，所以 $\left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}} > \left(\frac{V_i}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$

综上所述得： $\epsilon(\lambda_i, T) > \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}}$
最终可以得到式(11)结论

$$\begin{cases} \epsilon(\lambda_i, T) < \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}} & \text{如 } \frac{V_i}{V'_{i+1}} < \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}} \\ \epsilon(\lambda_i, T) = \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}} & \text{如 } \frac{V_i}{V'_{i+1}} = \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}} \\ \epsilon(\lambda_i, T) > \epsilon(\lambda_{i+1}, T) \left(\frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}}\right)^{\frac{\lambda_i - \lambda_{i+1}}{\lambda_i}} & \text{如 } \frac{V_i}{V'_{i+1}} > \frac{V_{i+1}}{V'_{i+1}} \end{cases} \quad (11)$$

2 仿真实验

二次测量法的流程图如图 1(a)所示^[5]。快速反演方法以二次测量法为基础，将被测目标测量信息代入式(11)对发射率数据库进行严格的筛选，达到筛去不合理模型、节省计算时间、节约软件资源的目的，直接从必定合理的发射率模型中寻找最优解，快速反演方法的流程图如图 1(b)所示。[图 1(a)和(b)中所有发射率都被控制在 0~1 的范围内]。

为了证明多光谱真温快速反演方法相对于二次测量法能够在不降低精度的前提下减少计算时间，首先进行了仿真实验，并将快速反演方法和二次测量法的实验结果进行了比较。此次仿真实验采用单调上升、单调下降、 Δ 型、V型、N型和M型共六个经典发射率模型进行实验^[5]，实验采用 Visual Studio 2015 进行编程，使用的电脑配置为：Intel® Core(TM) i7-7700HQ@2.80GHz。

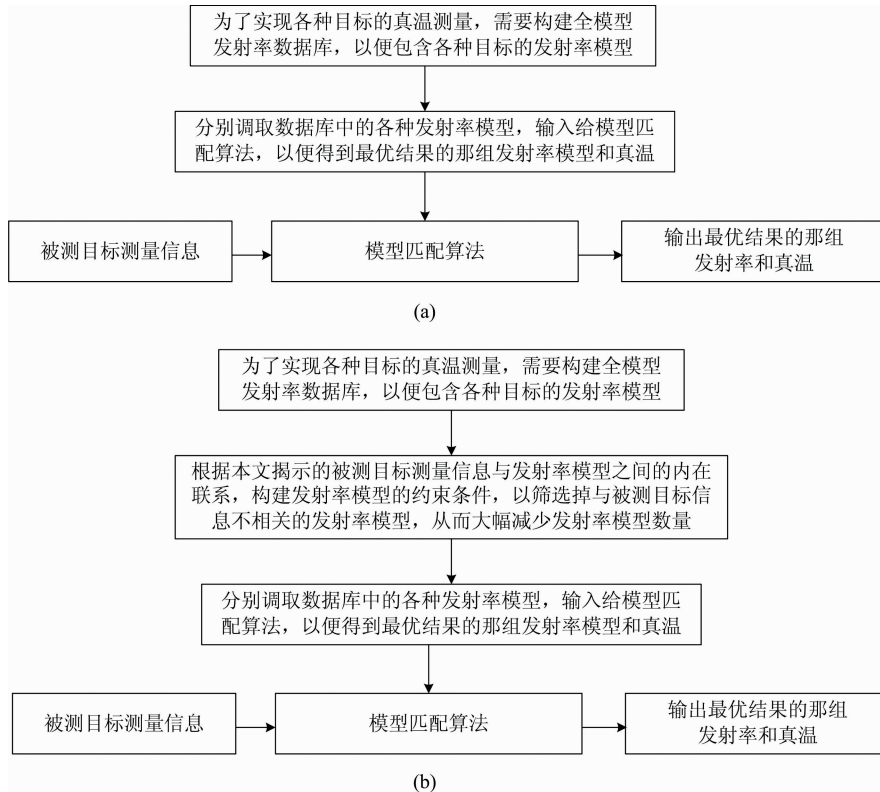


图 1 算法流程图

(a): 二次测量法; (b): 多光谱真温快速反演算法

Fig. 1 Flow chart of two methods

(a): Seconearny measurement method; (b): Fast multispectral true temperature inversion algorithm

选取分别对应六个发射率模型的六个目标(A—F)。仿真过程和结果如下:

(1)设定两个真实温度，分别为 1 800 和 2 000 K，已知改变参考温度 T' 不会影响结果(详情请见孙晓刚 1998 年的论文“Study of the Theory and Experiment of the Multispectral Thermometry”)，这里假设参考黑体温度为 1 600 K。多

光谱高温计的八个通道的有效波长分别定为 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 和 1.1 μm 。各通道的发射率值随温度的变化以及六种发射率趋势如表 1 所示，其中 ϵ_{1800} 是目标在 1 800 K 温度下假定的发射率， ϵ_{2000} (2 000 K 时的发射率)由方程 $\epsilon_{2000} = b\epsilon_{1800} [1 + k(2000 - 1800)]$ 计算得到， b 和 k 为系数， b 取 1， k 取 0.000 04，关于 b 和 k 的选值方法在参考

文献[10]中有所论述。

(2) 六个目标在两个温度下的能量当量由下面的公式计算得到

$$\left(\frac{V_i}{V'_i}\right)_{T=1800} = \epsilon(\lambda_i, T)_{T=1800} e^{-\frac{c_2}{\lambda_i T} + \frac{c_2}{\lambda_i T}}$$

$$\left(\frac{V_i}{V'_i}\right)_{T=2000} = \epsilon(\lambda_i, T)_{T=2000} e^{-\frac{c_2}{\lambda_i T} + \frac{c_2}{\lambda_i T}}$$

结果如表 2 所示。

(3) 进行反演计算。因为理论上发射率范围限定得越小反演结果精度越高，这里设定 A—F 的发射率上下限为

0.4~0.9^[5]。

实验结果表明，快速反演方法的真实温度反演结果、发射率反演结果与二次测量法的结果完全一致。各通道真实温度反演结果及发射率值见表 3。

(4) 比较快速反演方法与原方法的发射率模型数和计算时间，结果见表 4。

由表 4 可知相对于二次测量法，快速反演方法在不降低精度的前提下减少了 29%~64% 的发射率模型数和 26%~57% 的计算时间。

表 1 发射率数值
Table 1 Emissivity value

发射率模型	温度 /K	各通道的发射率数值							
		各通道有效波长/ μm							
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
A(单调上升)	1 800	0.450	0.470	0.500	0.550	0.600	0.650	0.750	0.850
	2 000	0.452	0.472	0.502	0.552	0.602	0.653	0.753	0.854
B(单调下降)	1 800	0.850	0.840	0.830	0.810	0.800	0.790	0.770	0.760
	2 000	0.853	0.843	0.833	0.813	0.803	0.793	0.773	0.763
C(Δ 型)	1 800	0.710	0.740	0.770	0.830	0.860	0.830	0.780	0.730
	2 000	0.713	0.743	0.773	0.833	0.863	0.833	0.783	0.733
D(V型)	1 800	0.850	0.820	0.760	0.700	0.730	0.760	0.800	0.840
	2 000	0.853	0.823	0.763	0.703	0.733	0.763	0.803	0.843
E(N型)	1 800	0.620	0.650	0.780	0.710	0.740	0.760	0.770	0.780
	2 000	0.622	0.653	0.783	0.713	0.743	0.763	0.773	0.783
F(M型)	1 800	0.660	0.680	0.780	0.720	0.730	0.760	0.770	0.670
	2 000	0.663	0.683	0.783	0.723	0.733	0.763	0.773	0.673

表 2 能量当量数值
Table 2 Equivalent value

发射率模型	温度 /K	能量当量数值							
		各通道有效波长/ μm							
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
A(单调上升)	1 800	5.471	3.467	2.644	2.292	2.092	1.973	2.037	2.108
	2 000	40.518	17.218	10.058	7.210	5.705	4.814	4.549	4.377
B(单调下降)	1 800	10.334	6.196	4.388	3.376	2.789	2.398	2.091	1.885
	2 000	76.533	30.773	16.696	10.618	7.606	5.851	4.670	3.914
C(Δ 型)	1 800	8.632	5.459	4.071	3.459	2.999	2.519	2.118	1.811
	2 000	63.928	27.110	15.489	10.880	8.177	6.147	4.731	3.759
D(V型)	1 800	10.133	6.049	4.018	2.917	2.545	2.307	2.173	2.083
	2 000	76.290	30.040	15.288	9.176	6.941	5.629	4.852	4.326
E(N型)	1 800	7.537	4.795	4.124	2.959	2.580	2.307	2.091	1.935
	2 000	55.824	23.812	15.690	9.307	7.036	5.629	4.670	4.017
F(M型)	1 800	8.024	5.016	4.124	3.001	2.545	2.307	2.091	1.662
	2 000	59.426	24.912	15.690	9.438	6.941	5.629	4.670	3.450

3 实测实验

这里使用孙晓刚 2005 年文章中的固体火箭发动机尾喷

管羽焰真实温度的实测数据进行实测实验^[5]。高温计各通道的有效波长 λ_i 及在参考温度 $T'(T'=2\,252.0\text{ K})$ 下的输出值 V_{ir} 如表 5 所示，12 个测量时刻下测得的实测数据如表 6 所示。

表 3 仿真实验的反演结果
Table 3 Inversion results for simulation experiment

发射率模型	温度 /K	反演发射率数值							
		各通道的有效波长/ μm							
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
A(单调上升)	1 791.7	0.499	0.509	0.534	0.581	0.628	0.676	0.776	0.876
	1 986.6	0.509	0.519	0.544	0.592	0.640	0.689	0.791	0.893
B(单调下降)	1 798.1	0.878	0.860	0.844	0.821	0.808	0.796	0.774	0.763
	1 994.4	0.895	0.877	0.861	0.837	0.824	0.812	0.789	0.778
C(Δ 型)	1 796.1	0.750	0.771	0.795	0.852	0.878	0.845	0.791	0.739
	1 992.0	0.764	0.786	0.811	0.868	0.895	0.861	0.807	0.753
D(V型)	1 798.1	0.878	0.839	0.773	0.709	0.737	0.766	0.804	0.843
	1 994.4	0.895	0.856	0.788	0.723	0.752	0.781	0.820	0.860
E(N型)	1 800.1	0.626	0.654	0.782	0.710	0.739	0.758	0.767	0.777
	1 996.9	0.638	0.666	0.797	0.724	0.754	0.773	0.782	0.792
F(M型)	1 800.1	0.667	0.684	0.782	0.720	0.729	0.758	0.767	0.667
	1 996.9	0.680	0.697	0.797	0.734	0.743	0.773	0.782	0.680

表 4 仿真实验快速反演方法与原反演方法对比表

Table 4 Comparison of sample number and calculation time before and after constraints

发射率模型	原方法 模型数(s_1)	快速方法 模型数(s_2)	$(s_1 - s_2)/s_1$ /%	原方法计算 时间 t_1 /ms	快速方法计算 时间(t_2)/ms	$(t_1 - t_2)/t_1$ /%
A(单调上升)	23 431	8 321	64	9.892	4.232	57
B(单调下降)	68 687	48 687	29	25.617	18.885	26
C(Δ 型)	47 760	27 760	42	17.922	11.756	34
D(V型)	50 339	28 089	44	19.748	11.622	41
E(N型)	27 495	12 495	55	11.926	6.131	49
F(M型)	30 132	20 132	33	12.776	8.955	30

表 5 高温计各通道的有效波长及在参考温度 T' 下的输出值 ($T' = 2\,252.0\text{ K}$)

Table 5 Effective wavelengths of the pyrometer and outputs at the reference temperature ($T' = 2\,252.0\text{ K}$)

通道 i	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lambda_i/\mu\text{m}$	0.574	0.592	0.623	0.654	0.698	0.748	0.826	0.914
V_{IR}/mV	39.4	139.7	117.5	363.7	345.0	493.9	320.7	406.7

表 6 实测数据

Table 6 Actual measured data

测量时刻/s	实测数据 V_i/mV							
	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4	通道 5	通道 6	通道 7	通道 8
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	244.2	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	456.3	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

根据文献[5], 初始温度 T_0 取 2 200.0 K, 发射率上下限取 0.1~0.65, 将两个时刻的实测数据编为一组利用二次测量法进行计算。实验结果表明, 快速反演方法与二次测量法的真实温度结果与发射率结果完全一致, 相关数据见表 7。将两种方法的发射率模型数和操作时间进行比较, 比较结果见表 8。

真实温度为 2 490.0 K, 由表 7 得真温反演的最大误差数值为 0.8%, 真温反演结果准确。表 8 显示, 相对于二次测量法, 多光谱真温快速反演方法能在保证精度不降低的前期下更快地计算出发动机火焰的真实温度和各波长下发射率, 发射率模型数减少了 42%~48%, 计算时间减少了 35%~49%。

固体火箭发动机设计人员给出的尾喷管附近羽焰的理论

表 7 实测实验反演结果
Table 7 Inversion results for actual experiment

组号	测量时刻 /s	真温 /K	各通道的发射率							
			通道 1	通道 2	通道 3	通道 4	通道 5	通道 6	通道 7	通道 8
I	1	2 508.5	0.397	0.648	0.517	0.501	0.419	0.408	0.365	0.356
	2	2 511.0	0.397	0.649	0.518	0.502	0.420	0.409	0.366	0.357
II	3	2 497.5	0.410	0.644	0.536	0.509	0.428	0.424	0.372	0.370
	4	2 503.7	0.412	0.647	0.539	0.511	0.431	0.426	0.374	0.372
III	5	2 500.7	0.405	0.649	0.514	0.503	0.424	0.415	0.368	0.361
	6	2 494.1	0.403	0.646	0.511	0.500	0.422	0.413	0.367	0.359
IV	7	2 485.3	0.380	0.643	0.524	0.513	0.422	0.407	0.359	0.350
	8	2 493.4	0.383	0.648	0.528	0.517	0.425	0.410	0.362	0.353
V	9	2 489.1	0.376	0.648	0.517	0.512	0.416	0.414	0.362	0.357
	10	2 487.4	0.375	0.647	0.517	0.511	0.416	0.414	0.361	0.357
VI	11	2 485.8	0.384	0.647	0.526	0.508	0.409	0.408	0.346	0.342
	12	2 490.2	0.386	0.649	0.528	0.510	0.410	0.409	0.347	0.343

表 8 实测实验快速反演方法与原反演方法对比表
Table 8 Comparison of sample number and calculation time between two methods

组号	原方法模型数(s_3)	快速方法模型数(s_4)	$(s_3 - s_4) / s_3$ /%	原方法计算时间 t_3 /ms	快速方法计算时间(t_4)/ms	$(t_3 - t_4) / t_3$ /%
I	11 286	5 869	48	9.924	5.035	49
II	13 462	7 380	45	12.458	6.808	45
III	12 323	6 651	46	10.638	5.727	46
IV	16 032	9 211	43	13.155	8.511	35
V	14 792	8 385	43	12.181	7.716	37
VI	16 090	9 269	42	13.978	8.793	37

4 结 论

提出了多光谱真温快速反演方法, 通过推导出辐射能量当量与发射率之间的不等式方程组对发射率模型库进行约

束, 从而减少计算时间。通过仿真实验和实测实验进行了快速反演方法与二次测量法效果对比分析, 实验结果表明, 快速反演方法在保证精度不降低的前提下, 仿真实验的计算时间减少了 26%~57%, 实测实验的计算时间减少了 35%~49%。

References

[1] Vuelban E, Girard F, Battuello M. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(7): 1545.
 [2] Meng L, Deschaume O, Larbanoix L. Photoacoustics, 2019, 13: 33.
 [3] Hagqvist P, Sikström F, Lennartson B, et al. Measure. Sci. Technol., 2014, 25(2): 025011.
 [4] SUN Xiao-gang, DAI Jing-min(孙晓刚, 戴景民). Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2001, (2): 151.
 [5] SUN Xiao-gang, DAI Jing-min(孙晓刚, 戴景民). International Journal of Thermophysics, 2005, 26(4): 1255.
 [6] SUN Xiao-gang, DAI Jing-min(孙晓刚, 戴景民). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(6): 1719.
 [7] XING Jian, Rana R S(邢 健, Rana R S). Optics Express, 2016, 24(17): 19185.

- [8] XING Jian, GUO Xin, SONG Wei-lin, et al(邢 健, 郭 鑫, 宋伟林, 等). *Optics Express*, 2017, 25(24): 30560.
- [9] XING Jian, LIANG Jia-feng, SONG Wei-lin, et al(邢 健, 梁佳峰, 宋伟林, 等). *Optics Express*, 2018, 26(20): 25706.
- [10] DAI Jing-min, SUN Xiao-gang, et al(戴景民, 孙晓刚). *Theory and Practice of Multi-Spectral Thermometry(多光谱辐射测温理论与应用)*. Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2002. 23.

Fast Inversion Method of Multispectral True Temperature

SUN Bo-jun, SUN Xiao-gang*, DAI Jing-min

School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract The unknown emissivity of materials is a big obstacle to radiation true temperature measurement, which leads to the fact that the true temperature of materials cannot be obtained by a single group of measurement data. People can only calculate the non-true temperature, such as brightness temperature, by assuming the emissivity model of materials. Based on this background, Gardner J and other scientists put forward multispectral thermometry and constantly improve its theory. Nowadays, multispectral thermometry is widely used in high-temperature and ultra-high temperature measurement, high temperature target thermal performance measurement, true temperature dynamic measurement, etc. In 2005, Sun Xiaogang put forward the second measurement method. The secondary measurement method is a kind of multispectral true temperature inversion algorithm, which solves the problem of inversion of true temperature and material emissivity under each wavelength by the iterative operation between two groups of measurement data. It ensures the accuracy of the emissivity and true temperature results under each wavelength by building quantities of emissivity models. However, it needs to build a large number of emissivity models in the mathematical operation and software operation. By matching all emissivity models, the best solution of true temperature is obtained, which not only consumes a lot of time but also takes up a lot of software resources. In this paper, a new fast inversion method of true multispectral temperature is proposed. This paper first reveals the inequality equations between radiational signals and emissivity and then adds the steps of optimizing the emissivity model library in the algorithm of the secondary measurement method. This measure can screen out the unreasonable models in the emissivity model library to reduce the scale of the emissivity model library, saving a lot of calculation time and software resources. This paper carries out the simulation experiment of wavelength in $0.400\sim 1.100\ \mu\text{m}$, which contains six initial emissivity models. The results of the fast inversion method of true multispectral temperature and secondary measurement method are compared, and the results show that the fast inversion method of true multispectral temperature not only guarantees the inversion accuracy but also reduces calculation time compared with the second measurement method for the same target under the same initial temperature value and same emissivity search range. The fast inversion method of true multispectral temperature reduces $29\%\sim 64\%$ emissivity model number and $26\%\sim 57\%$ calculation time. After that, this paper carries out the actual experiment of wavelength in $0.574\sim 0.914\ \mu\text{m}$. The results show that under the same conditions, the fast inversion method of true multispectral temperature can reduce the emissivity model number by $42\%\sim 48\%$ and reduce the calculation time by $35\%\sim 49\%$ compared with the second measurement method on the premise of ensuring accuracy. The above experiments show that the fast inversion method of true multispectral temperature is feasible, and it has important value for large-scale multispectral true temperature measurement technology and online multispectral true temperature measurement technology.

Keywords Multispectral; Fast inversion; True temperature measurement

(Received May 20, 2020; accepted Aug. 30, 2020)

* Corresponding author