

DOI:10.16136/j.joel.2023.12.0502

基于亮度温度模型的多光谱真温反演算法研究

邬佳宇^{1,2}, 张福才^{1*}, 冯引安¹, 马 昽¹

(1. 陕西科技大学 电气与控制工程学院 陕西 西安 710021; 2. 国家能源集团神东煤炭集团, 陕西 榆林 719300)

摘要:针对传统的非接触式真温反演算法存在反演速度慢和精度低等问题,提出新的基于亮度温度模型的约束真温反演算法(constrained true temperature inversion algorithm, CTTIA)。在建模过程中,发现发射率和亮度温度存在内在联系:由亮度温度到发射率的普适规律和由发射率到亮度温度的普适规律。通过仿真实验发现当发射率的样本数量巨大时,CTTIA不但可以为实验提供理论指导,还可大大提升发射率样本的选取效率。在1800 °C和2000 °C两个温度点下建立9个波长通道对被测目标进行测量计算。结果表明,CTTIA与二次测量算法(second measurement method, SMM)相比,精度基本相同,反演时间最高节约了82%。说明该方法的研究是非常关键且重要的,是很有研究价值的。

关键词:多光谱; 发射率; 波长; 亮度温度

中图分类号: TH865 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2023)12-1331-06

Multispectral true temperature inversion algorithm based on brightness temperature model

WU Jiayu^{1,2}, ZHANG Fucai^{1*}, FENG Yinan¹, MA Yun¹

(1. School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 2. National Energy Group Shendong Coal Group, Yulin, Shaanxi 719300, China)

Abstract: Aim at traditional contactless true temperature inversion algorithm has the problems of slow inversion speed and low accuracy, a new constrained true temperature inversion algorithm (CTTIA) based on luminance temperature model is proposed. In the whole modeling process, it is found that emissivity and luminance temperature have internal relations; the universal law from luminance temperature to emissivity or from emissivity to luminance temperature. The simulation results show that when the number of emissivity samples is huge, the CTTIA can not only provide theoretical guidance for the experiment, but also greatly improve the selection efficiency of emissivity samples. Nine wavelength channels are built to measure and calculate the measured objectives at 1800 °C and 2000 °C. The results show that the accuracy of the CTTIA is almost the same as that of the second measurement method (SMM), and the inversion time is reduced to 82%. It illustrates that the research of this method is very critical and important, has great research value.

Key words: multispectrum; emissivity; wavelength; brightness temperature

0 引言

长期以来,航空航天、军事国防、民用工业及医学研究等诸多领域中存在着一个极其重要的物理量——温度,其不但可以为研究人员或科研工作人员提供有效参考和信息反馈,还可以促进科

研工作和工程进程。常见的温度测量主要是通过温度传感器收集光谱信息来反演辐射体真温值的,日常生活中各式各样的温度传感器数不胜数,其中光纤干涉型温度传感器有全光纤干涉型温度传感器和光纤光栅型温度传感器^[1,2]等类型。

辐射测温法作为非接触测温领域中最重要的

* E-mail:wjy16061562@163.com

收稿日期:2022-07-05 修订日期:2022-10-19

基金项目:国家自然科学基金(61875046)和陕西科技大学2023年本科教育教学改革研究项目(23Y059)资助项目

一种方法,经过几十年来不断完善与发展,生成了许多辐射测温仪,如:亮度、比色、多波长、全波长以及红外温度计^[3]。

二次测量法(second measurement method, SMM)作为一种全局搜索的方法,存在寻优过程缓慢,反演时间过长等缺陷。针对这一缺陷,哈尔滨工业大学张福才博士提出了单目标极小值算法^[4]和多目标极小值算法^[5],梁美博士提出了基于最优化函数的真温反演算法^[6],以上3种算法均是基于优化原理的真温反演算法,相对于SMM,在运行速度方面均能够提高50%左右。

2012年,张志林等^[7,8]在SMM的基础上,提出了一种改进的可见近红外多光谱真温反演模型,减少了参与迭代的数据数量,提高了反演的速度。2017年,顾伟宏等^[9]基于SMM,提出了发射率偏差约束的真温反演方法,缩小了模型的搜索范围,因而提高了真温的反演速度。同一年,梁美博士^[10,11]针对SMM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,根据亮度温度和有效波长等信息,使发射率假设模型的有效数据得到了简化,提出了一种基于模型约束条件的SMM,剔除了一定量的冗余数据,从计算结果可知,这种模型约束条件的SMM速度最高提高了43.45%。在此基础上,2018年,王昌辉等^[12]基于SMM,采用对数函数模型完成了高温计的标定,扩展了高温计测量的下限,实现了温度1173 K以下的真温测量,最后通过对火箭羽焰的3个目标点的真温反演,验证了模型约束条件的SMM的有效性。

2011年,KHATAMI^[13]等对多波长高温计中影响温度测量的光电探测器以及滤光片进行了理论分析。2013年,RODIET^[14]等提出了一种基于普通最小二乘的方法,优化了多光谱温度计的波长选择,提出了两种波长选择的方法,顺序方法和全局方法。

为了解决真温获取时由于发射率样本选择无据可依而导致的计算复杂和计算速度慢的问题,本文提出了一种基于亮度温度模型的约束真温反演算法(constrained true temperature inversion algorithm, CTTIA)。该算法不仅满足真温反演时的精度要求,还能大大提升反演速度,因此,在多光谱测温领域可以起到很好的借鉴作用,有着重要的研究意义和广阔的应用前景。

1 基于亮度温度模型的真温反演算法

根据3个不同波长处的亮度温度值之间的大小关系,进行理论推导:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\lambda_i}} &= \frac{\lambda_i}{C_2} \ln \epsilon(\lambda_i, T) \\ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\lambda_j}} &= \frac{\lambda_j}{C_2} \ln \epsilon(\lambda_j, T), (1 \leq i \leq j \leq k) \\ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\lambda_k}} &= \frac{\lambda_k}{C_2} \ln \epsilon(\lambda_k, T), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, T 为真实温度(K), $\epsilon_{\lambda_{i,j,k}}$ 为光谱发射率, $\lambda_{i,j,k}$ 为有效波长, $T_{\lambda_{i,j,k}}$ 为亮度温度值。

1.1 亮度温度与发射率的内在函数关系

T_{λ_i} 、 T_{λ_j} 和 T_{λ_k} 是 λ_i 、 λ_j 和 λ_k 波长下的亮度温度值,对二者进行详细的理论推导。

由于常见的非黑体辐射物体本身的发射率 $\epsilon_\lambda > 0$ 和波长 $C_2 > 0$,而发射率的范围则在 0—1 间,当真实温度温值大于亮度温度值时,即:

$$\begin{cases} 0 < T_{\lambda_i} < T, \\ 0 < T_{\lambda_j} < T, \\ 0 < T_{\lambda_k} < T \end{cases} \begin{cases} 0 < \epsilon_{\lambda_i} < 1 \\ 0 < \epsilon_{\lambda_j} < 1 \\ 0 < \epsilon_{\lambda_k} < 1 \end{cases}. \quad (2)$$

当 $0 < \lambda_i < \lambda_j < \lambda_k$ 时,由式(1)转化得:

$$\begin{aligned} 2 \frac{\lambda_i}{C_2} \ln \epsilon(\lambda_i, T) - \frac{\lambda_j}{C_2} \ln \epsilon(\lambda_j, T) - \frac{\lambda_k}{C_2} \ln \epsilon(\lambda_k, T) = \\ 2\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\lambda_i}}\right) - \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\lambda_j}}\right) - \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\lambda_k}}\right) = \\ \frac{1}{T_{\lambda_j}} + \frac{1}{T_{\lambda_k}} - \frac{2}{T_{\lambda_i}}. \end{aligned} \quad (3)$$

假设 $\frac{1}{T_{\lambda_j}} + \frac{1}{T_{\lambda_k}} - \frac{2}{T_{\lambda_i}} > 0$ 成立,可知式(3)左侧

大于零,可以得到以下结论: $\frac{\epsilon_{\lambda_i}^{2\lambda_i}}{\epsilon_{\lambda_j}^{\lambda_j} \epsilon_{\lambda_k}^{\lambda_k}} > 1$ 。

假设 $\frac{1}{T_{\lambda_j}} + \frac{1}{T_{\lambda_k}} - \frac{2}{T_{\lambda_i}} < 0$ 成立,可知式(3)左侧

小于零,可以得到以下结论: $0 < \frac{\epsilon_{\lambda_i}^{2\lambda_i}}{\epsilon_{\lambda_j}^{\lambda_j} \epsilon_{\lambda_k}^{\lambda_k}} < 1$ 。

假设 $\frac{1}{T_{\lambda_j}} + \frac{1}{T_{\lambda_k}} - \frac{2}{T_{\lambda_i}} = 0$ 成立,可知式(3)左侧

等于零,可以得到以下结论: $\frac{\epsilon_{\lambda_i}^{2\lambda_i}}{\epsilon_{\lambda_j}^{\lambda_j} \epsilon_{\lambda_k}^{\lambda_k}} = 1$ 。

经整理后:

$$\begin{cases} \frac{\epsilon_{\lambda_i}^{2\lambda_i}}{\epsilon_{\lambda_j}^{\lambda_j} \epsilon_{\lambda_k}^{\lambda_k}} > 1 \\ 0 < \frac{\epsilon_{\lambda_i}^{2\lambda_i}}{\epsilon_{\lambda_j}^{\lambda_j} \epsilon_{\lambda_k}^{\lambda_k}} < 1, st \\ \frac{\epsilon_{\lambda_i}^{2\lambda_i}}{\epsilon_{\lambda_j}^{\lambda_j} \epsilon_{\lambda_k}^{\lambda_k}} = 1 \end{cases} \begin{cases} \frac{1}{T_{\lambda_j}} + \frac{1}{T_{\lambda_k}} - \frac{2}{T_{\lambda_i}} > 0 \\ \frac{1}{T_{\lambda_j}} + \frac{1}{T_{\lambda_k}} - \frac{2}{T_{\lambda_i}} < 0. \\ \frac{1}{T_{\lambda_j}} + \frac{1}{T_{\lambda_k}} - \frac{2}{T_{\lambda_i}} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

综上,通过上述公式推导可以发现,由波长和发射率的函数能够得出亮度温度之间的内在规律。

1.2 发射率与亮度温度的内在函数关系

根据3种不同波长处的发射率 ϵ_{λ_i} 、 ϵ_{λ_j} 、 ϵ_{λ_k} 之间的

大小关系, 进行详细的理论推导, 发现:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\lambda_i} &= e^{\frac{c_2}{\lambda_i}(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\lambda_i}})}, \\ \varepsilon_{\lambda_j} &= e^{\frac{c_2}{\lambda_j}(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\lambda_j}})}, \\ (1 \leqslant \dots \leqslant i < j \leqslant k \dots \leqslant N) \quad & \\ \varepsilon_{\lambda_k} &= e^{\frac{c_2}{\lambda_k}(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\lambda_k}})},\end{aligned}\quad (5)$$

由上式可得:

$$\frac{2\varepsilon_{\lambda_i}}{\varepsilon_{\lambda_j}\varepsilon_{\lambda_k}} = e^{c_2[\frac{2}{\lambda_i}(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\lambda_i}})-\frac{1}{\lambda_j}(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\lambda_j}})-\frac{1}{\lambda_k}(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\lambda_k}})]}, \quad (6)$$

对式(6)右边进一步化简:

$$\begin{aligned}\frac{2}{\lambda_i}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\lambda_i}}\right)-\frac{1}{\lambda_j}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\lambda_j}}\right)-\frac{1}{\lambda_k}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\lambda_k}}\right) &= \frac{2}{T\lambda_i}-\frac{1}{T\lambda_j}-\frac{1}{T\lambda_k}+\frac{1}{\lambda_j T_{\lambda_j}}+ \\ &\quad \frac{1}{\lambda_k T_{\lambda_k}}-\frac{2}{\lambda_i T_{\lambda_i}}.\end{aligned}\quad (7)$$

1) 情况 1 当 $\frac{2\varepsilon_{\lambda_i}}{\varepsilon_{\lambda_j}\varepsilon_{\lambda_k}} = 1$ 时, 又 $C_2 > 0$, 由式(7)

等于 0, 得出, $\frac{2}{T\lambda_i}-\frac{1}{T\lambda_j}-\frac{1}{T\lambda_k}+\frac{1}{\lambda_j T_{\lambda_j}}+\frac{1}{\lambda_k T_{\lambda_k}}-\frac{2}{\lambda_i T_{\lambda_i}}=0$ 。

2) 情况 2 当 $\frac{2\varepsilon_{\lambda_i}}{\varepsilon_{\lambda_j}\varepsilon_{\lambda_k}} < 1$ 时, 又 $C_2 > 0$, 由式(7)

等于 0, 得出, $\frac{2}{T\lambda_i}-\frac{1}{T\lambda_j}-\frac{1}{T\lambda_k}+\frac{1}{\lambda_j T_{\lambda_j}}+\frac{1}{\lambda_k T_{\lambda_k}}-\frac{2}{\lambda_i T_{\lambda_i}}<0$ 。

3) 情况 3 当 $\frac{2\varepsilon_{\lambda_i}}{\varepsilon_{\lambda_j}\varepsilon_{\lambda_k}} > 1$ 时, 又 $C_2 > 0$, 由式(7)

等于 0, 得出, $\frac{2}{T\lambda_i}-\frac{1}{T\lambda_j}-\frac{1}{T\lambda_k}+\frac{1}{\lambda_j T_{\lambda_j}}+\frac{1}{\lambda_k T_{\lambda_k}}-\frac{2}{\lambda_i T_{\lambda_i}}>0$ 。

对以上 3 种情况的分析可得到以下结论:

$$\begin{cases} \frac{2}{T\lambda_i}-\frac{1}{T\lambda_j}-\frac{1}{T\lambda_k}+\frac{1}{\lambda_j T_{\lambda_j}}+\frac{1}{\lambda_k T_{\lambda_k}}-\frac{2}{\lambda_i T_{\lambda_i}}=0 \\ \frac{2}{T\lambda_i}-\frac{1}{T\lambda_j}-\frac{1}{T\lambda_k}+\frac{1}{\lambda_j T_{\lambda_j}}+\frac{1}{\lambda_k T_{\lambda_k}}-\frac{2}{\lambda_i T_{\lambda_i}}<0 \\ \frac{2}{T\lambda_i}-\frac{1}{T\lambda_j}-\frac{1}{T\lambda_k}+\frac{1}{\lambda_j T_{\lambda_j}}+\frac{1}{\lambda_k T_{\lambda_k}}-\frac{2}{\lambda_i T_{\lambda_i}}>0,\end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{2\varepsilon_{\lambda_i}}{\varepsilon_{\lambda_j}\varepsilon_{\lambda_k}}=1 \\ \frac{2\varepsilon_{\lambda_i}}{\varepsilon_{\lambda_j}\varepsilon_{\lambda_k}}<1 \\ \frac{2\varepsilon_{\lambda_i}}{\varepsilon_{\lambda_j}\varepsilon_{\lambda_k}}>1\end{cases}.$$

通过上述公式推导可以发现, 由波长和亮度温度的函数能够判断出发射率之间的内在规律。

将真温求解公式转化为最小二乘算法:

$$\frac{1}{T}-\frac{1}{T_i}=\frac{\lambda_i}{c_2}(a_1\lambda_i+a_2\lambda_i^2+\dots+a_m\lambda_i^m+a_0), \quad (8)$$

对式(8)进一步整理得:

$$-\frac{c_2}{\lambda_i T_i}=-\frac{c_2}{\lambda_i T}+a_1\lambda_i+a_2\lambda_i^2+\dots+a_m\lambda_i^m+a_0, \quad (9)$$

令 $Y_i=-\frac{c_2}{\lambda_i T_i}$, $a_{m+1}=-\frac{c_2}{T}$, $X_{m+1,i}=\frac{1}{\lambda_i}$, $X_{1,i}=\lambda_i$, $\dots, X_{m,i}=\lambda_i^m$, 式(9)进一步转化为:

$$Y_i=a_0+a_1X_{1,i}+\dots+a_mX_{m,i}+a_{m+1}X_{m+1,i}. \quad (10)$$

由上述可知, 当 $\lambda_i \approx 0$, 亮度温度 T_i 等于真实温度 T 时, 用最小二乘算法对第一个波长通道下的亮度温度值进行拟合计算, 当波长 $\lambda_i \rightarrow 0$, 可以得到 T_0 (初始值)。

当 $i=1, T_i$ 为第一温度时, 由上可知, 需在第 i 个通道(波长为 λ_i)下, 创建一个发射率的估计值 ($\varepsilon_{\lambda_i}^0$) 公式^[15]:

$$\varepsilon_{\lambda_i}^0=\exp\left[\frac{c_2}{\lambda_i}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T_{\lambda_i,1}}\right)\right], \quad (11)$$

式中, $T_{\lambda_i,1}$ 为第 i 个通道的亮度温度值。

当 $i=2, T_i$ 为第二温度值时, 为了更好地处理发射率样本, 需要创建一个基于发射率的模型公式:

$$\varepsilon_{\lambda_i}=\varepsilon_{\lambda_i}^1[1+k(T-T_0)], \quad (12)$$

式中的变量存在以下关系: $\varepsilon_{\lambda_i}^1 \in (\varepsilon_{\lambda_i}^0 - \varepsilon, \varepsilon_{\lambda_i}^0 + \varepsilon)$, $\varepsilon > 0$; $T \in (T_0 - M, T_0 + M)$, $M > 0$; $k \in (-\eta, \eta)$, $\eta > 0$ 。

由式(1)和式(12)得到的温度值为:

$$T_{i,2}=\frac{1}{\frac{1}{T_{\lambda_i,2}}+\frac{\lambda_i}{c_2}\ln(\varepsilon_{\lambda_i}^1[1+k(T_{i,2}-T_0)])}, \quad (13)$$

式中, $T_{\lambda_i,2}$ 为第 i 个通道下的亮度温度值。

通过迭代法对上述公式进行计算, 可得到 $T_{i,p}$ 的方差极小值。

2 实验验证

为了验证约束真温反演算法的有效性, 本文将建立 A、B、C、D、E 5 种模型(这 5 种模型表示被测目标在波长 $0.42 \mu\text{m}$ 、 $0.53 \mu\text{m}$ 、 $0.62 \mu\text{m}$ 、 $0.73 \mu\text{m}$ 、 $0.82 \mu\text{m}$ 、 $0.93 \mu\text{m}$ 、 $1.02 \mu\text{m}$ 、 $1.13 \mu\text{m}$ 和 $1.22 \mu\text{m}$ 下的实验数据), 选取 1800 K 和 2000 K 两个温度点用作被测目标的真实温度, 实验结果如表 1 所示。

表 1 仿真实验的反演结果

Tab. 1 Inversion results for simulation experiment

Model	True temperature/K	Calculating temperature/K Wavelength/ μm								
		1.13	1.22	0.42	0.53	0.62	0.73	0.82	0.93	1.02
A	1800	1785.5	1769.6	1747.5	1725.3	1700.2	1668.9	1649.1	1622.2	1614.9
	2000	1981.9	1963.1	1936.0	1907.9	1879.2	1841.8	1815.2	1782.3	1764.6
B	1800	1743.0	1735.1	1737.6	1734.6	1740.3	1743.5	1756.4	1760.6	1776.4
	2000	1929.8	1921.8	1922.8	1920.0	1926.5	1931.4	1945.9	1952.2	1964.2
C	1800	1785.8	1778.2	1764.0	1748.3	1739.1	1745.8	1752.0	1761.2	1771.0
	2000	1984.2	1973.2	1956.0	1936.2	1924.2	1934.0	1940.2	1952.2	1958.2
D	1800	1768.4	1763.8	1762.0	1761.7	1769.1	1746.0	1734.7	1719.0	1705.2
	2000	1962.9	1956.0	1952.9	1953.2	1963.3	1934.0	1920.2	1901.3	1895.2
E	1800	1766.2	1764.2	1761.8	1750.5	1738.5	1739.2	1735.2	1721.8	1715.2
	2000	1957.9	1955.3	1952.9	1939.5	1924.0	1923.8	1920.2	1904.1	1901.4

随机选取 337 910 个发射率样本,用逐渐逼近算法对基于亮度温度模型的有机燃料多光谱火焰温度进行测量。首先,对 T_0 (初始值)进行估值,选取 $M = 200$, T 的步长为 2, $\eta = 0.001$, k 的步长为 0.000 005 作为计算参数值。

在发射率范围和温度初值相同的情况下,分别用 CTTIA 和 SMM 两种算法进行求解,分析对比,

温度点为 1800 K 和 2000 K 的真温计算值的相对误差(relative error, RE)结果如表 2 所示。

通过对被测目标的测量计算发现,基于约束条件的真温反演算法与 SMM 相比,添加约束条件前后的发射率样本缩减量最高可达 86.8%,时间最高可节约 82%,两种方法的发射率的样本数量和其所需要的计算时间如表 3 所示。

表 2 两种算法对比结果

Tab. 2 The compared results of the two algorithms

Model	Range of firing rate	Initial temperature value/K	True temperature/K	Experimental temperature/K	Relative error/%
A	0.452—0.949	1786.3	1800	1793.5	0.36
			2000	1990.0	0.50
B	0.502—0.952	1819.2	1800	1789.4	0.59
			2000	1984.0	0.80
C	0.721—0.910	1821.5	1800	1798.5	0.01
			2000	1996.2	0.19
D	0.665—0.845	1817.8	1800	1799.5	0.01
			2000	1997.5	0.13
E	0.632—0.842	1752.5	1800	1778.6	0.12
			2000	1995.4	0.23

表 3 添加约束条件前后的发射率样本数量和时间变化

Tab. 3 The number and time of emissivity samples before and after adding constraints

Target	Number of emissivity samples before and after constraints			Time before and after constraints		
	M_1	M_2	$(M_1 - M_2)/M_1 \times \%$	S_1/ms	S_2/ms	$(S_1 - S_2)/S_1 \times \%$
A	25 610	24 329	5.0	118.5	102.3	13.7
B	8 149	1 075	86.8	30.5	5.0	82
C	140	68	51.4	1.5	0.4	73.3
D	355	185	47.9	2.3	1.3	43.5
E	1 915	1 680	12.3	10.4	7.3	29.8

如图 1 所示,在 0.4—1.2 μm 的波长段内被测目标的亮度温度的变化趋势。如图 2 所示,在 5 种典型的变化趋势下,其中每个被测目标都代表着一种发射率的变化趋势。

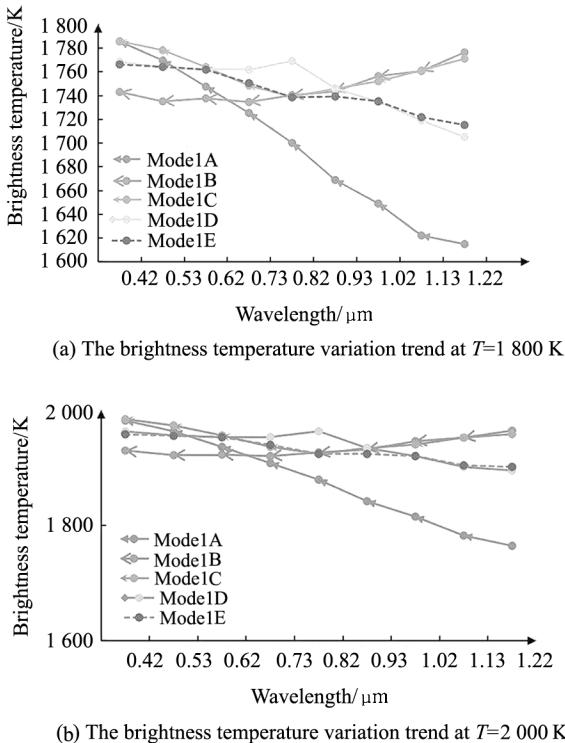


图 1 亮度温度变化趋势

Fig. 1 The temperature change trend of brightness temperature

从图 2 可以明显地看出:模型 A(图 2(a))的发射率呈单调递减的变化趋势,其在某段特定的波长范围内从 0.95 下降到 0.4;模型 B(图 2(b))的发射率随波长增大而增大;模型 C(图 2(c))的发射率呈现先下降后上升的变化趋势;模型 D(图 2(d))的发射率呈现先增加后降低的变化趋势;模型 E(图 2(e))的发射率随着波长的变大而随机变化。通过模拟仿真实验不但精准计算了辐射体的真实温度和发射率,还可以发现二者之间的变换趋势。

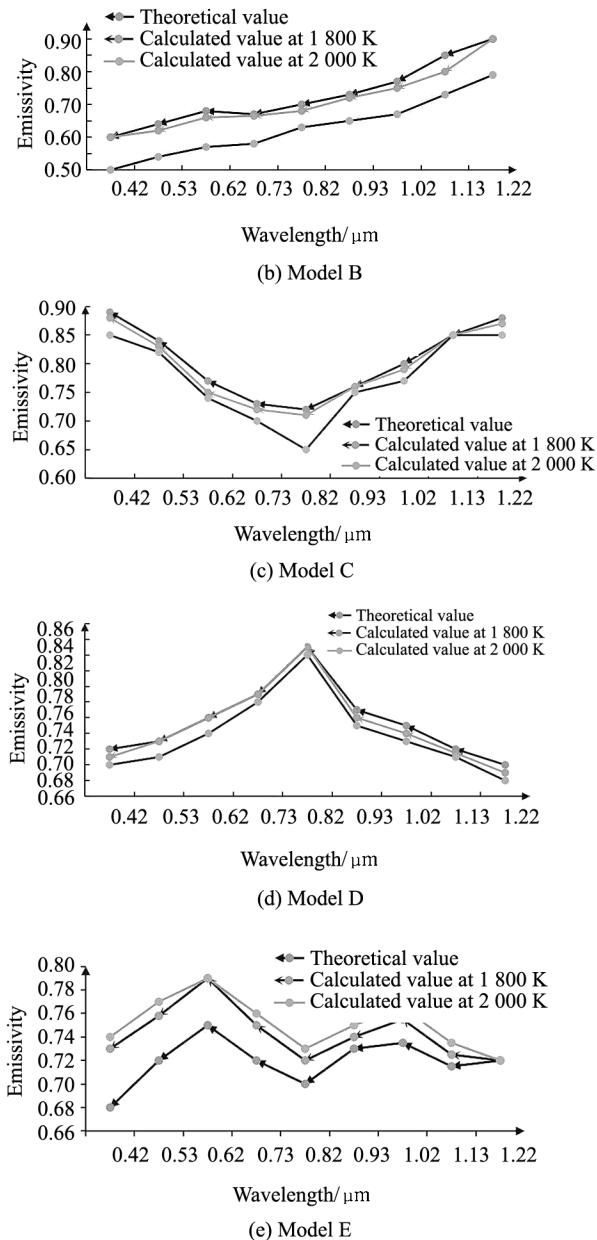
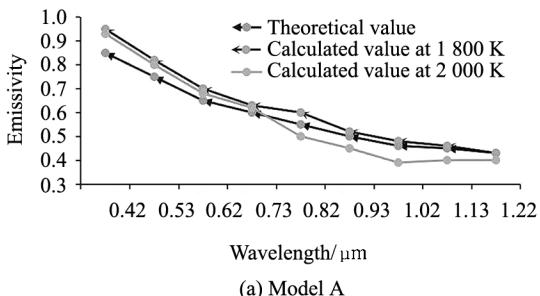


图 2 模型 A—E 中被测目标的发射率变化

Fig. 2 Emissivity change of the measured target in Model A—E

3 结 论

本文揭示了基于亮度温度模型下有机燃料火焰亮度温度、波长和发射率 3 个参数间存在的某种函数关系,且符合一定的规律变化,当发射率的样本数量巨大时,CTTIA 不但可以为后续工作提供理论指导,还可大大增加发射率样本的选取效率。在发射率范围和温度初值相同的情况下,分别选用 CTTIA 和 SMM 两种算法进行仿真实验。结果表明,新算法的发射率样本量减少率最高可达 86.8%,且真温反演的计算时间相较之前缩短了 82%,从而更加证明

了新算法的合理性和有效性。

基于亮度温度模型的 CTTIA 是一种基于优化原理的新型算法,必将成为多光谱真温反演研究道路上的新型算法。

参考文献:

- [1] WANG P,ZHAO H,LIU J,et al. Experimental study on temperature sensing characteristics of fiber Bragg grating packaged by copper capillary without strain[J]. Journal of Optoelectronics · Laser,2012,23(3):434-438.
王鹏,赵洪,刘杰,等.光纤光栅无应力毛细钢管封装及温度特性试验[J].光电子·激光,2012,23(3):434-438.
- [2] XIN Y,DONG X Y,YUAN J W,et al. Sensing characteristics of side-hole fiber long-period grating[J]. Journal of Optoelectronics · Laser,2013,24(11):2070-2074.
辛奕,董新永,袁俊伟,等.边孔光纤长周期光栅的传感特性研究[J].光电子·激光,2013,24(11):2070-2074.
- [3] DAI J M. Survey of radiation thermometry[J]. Techniques of Automation and Application, 2004,23(3):1-7.
戴景民.辐射测温的发展现状与展望[J].自动化技术与应用,2004,23(3):1-7.
- [4] ZHANG F C,SUN B J,SUN X G. Multi wavelength true temperature inversion by single object minimization method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48 (2): 0226002.
张福才,孙博君,孙晓刚.单目标极小值优化法的多波长真温反演研究[J].红外与激光工程,2019,48(2):0226002.
张福才,孙博君,孙晓刚.单目标极小值优化法的多波长真温反演研究[J].红外与激光工程,2019,48(2):0226002.
- [5] ZHANG F C,SUN B J,SUN X G. Multispectral true temperature inversion based on the multi-objective minimization optimization method[J]. Acta Optica Sinica,2019,39(2): 0212008.
张福才,孙博君,孙晓刚.基于多目标极值优化法的多光谱真温反演[J].光学学报,2019,39(2):0212008.
- [6] LIANG M,LIANG L. True temperature inversion algorithm of multi-wavelength pyrometer based on optimization function[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition),2019,32(1):68-73.
梁美,梁磊.基于最优化函数的多光谱高温计真温反演算法[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2019,32(1):68-73.
- [7] ZHANG Z L,SUN W M,SHI L,et al. Multi-wavelength pyrometry for temperature measurement in gas flames[C]// International Conference on Measurement, Information and Control, May 18-20, 2012, Harbin, China. New York: IEEE, 2012:198-201.
- [8] ZHANG Z L,SUN W M,XING J,et al. The reconstruction research of 3D temperature field of flame of the optical fiber taper machine based on the multispectral radiation [C]//International Conference on Measurement, Information and Control, August 16-18, 2013, Harbin, China. New York: IEEE, 2014:5-8.
- [9] GU W H, MA Z,XING J,et al. Multi spectral true temperature inversion algorithm based on emissivity deviation constraints [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017,37(8):2500-2504.
顾伟宏,马召,邢键,等.基于发射率偏差约束的多光谱真温反演算法[J].光谱学与光谱分析,2017,37(8):2500-2504.
- [10] LIANG M,SUN X G,LUAN M S. Multispectral radiation algorithm based on emissivity model constraints for true temperature measurement[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2015,35(10): 2675-2679.
梁美,孙晓刚,栾美生.基于发射率模型约束的多光谱辐射真温反演法[J].光谱学与光谱分析,2015,35(10):2675-2679.
- [11] 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.
- [12] WANG C H,LIANG M,LIANG L,et al. A wide-range multispectral pyrometer for true temperature measurement of solid rocket engine plume[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2018,38(9):2860-2865.
王昌辉,梁美,梁磊,等.用于固体火箭羽焰真温测量的宽量程多光谱高温计[J].光谱学与光谱分析,2018,38(9):2860-2865.
- [13] KHATAMI R,LEVENDIS Y A. On the deduction of single coal particle combustion temperature from three-color optical pyrometry[J]. Combustion and Flame, 2011, 158 (9):1822-1836.
- [14] Rodier C, Rémy B, Degiovanni A, et al. Optimisation of wavelengths selection used for the multi-spectral temperature measurement by ordinary least squares method of surfaces exhibiting non-uniform emissivity[J]. Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2013, 10 (2): 222-236.
- [15] LIANG M. Research on true temperature measurement technology of solid propellant rocket engine flame[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2017:47-48.
梁美.固体火箭发动机羽焰真温测量技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017:47-48.

作者简介:

张福才 (1978—),男,博士,讲师,主要从事红外温度场的重建理论与方法方面的研究。