

# 辐射测温区域的界定分析

符泰然<sup>1</sup>, 程晓舫<sup>2</sup>, 钟茂华<sup>3</sup>

(1. 清华大学热能工程系热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230027; 3. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029)

[摘要] 文章讨论了谱色测温系统研究中, 基于测温坐标系的辐射测温区域的界定问题。以线性发射率模型以及改进的单调发射率模型为基础, 通过测温坐标系标尺的考察, 分析了不同光谱发射率模型下的辐射测温坐标系所限定的辐射测温有效区域的规律特征; 以实际应用中特定的谱色测温仪器为例, 给出该仪器适用的辐射测温的理论区域, 并用黑体实验进行了验证。

[关键词] 温度发射率; 辐射测温; 测温坐标系

[中图分类号] TK311 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)07-0073-04

## 1 前言

普朗克定律揭示了黑体辐射与其温度之间的定量数学关系, 是非接触辐射测温的基本原理定律之一。在测量应用中, 实际物体发射率函数的复杂性与温度场测量所引发的标定问题成为了辐射测温理论与技术研究的关键点, 并由此产生出许多辐射测温方法<sup>[1-9]</sup>。针对于上述关键点, 笔者也已提出基于波段测量、窄波段内线性发射率模型及归一化处理的谱色测温法<sup>[10]</sup>, 实现了无须发射率及空间几何标定的二维真实温度场, 建立了由温度和发射率两个标尺构成的辐射测温坐标系<sup>[11]</sup>, 这是谱色测温法有别于其他辐射测温法的重要理论与应用特征。文献[12]探讨了可见光波段内物体辐射区域的划分与界定, 在基于测温坐标系的谱色测温系统研究中, 同样也关心测温坐标系中的辐射测量区域的界定问题, 因此, 基于已有研究, 文章将针对不同发射率模型下的辐射测温坐标系所限定的辐射测量有效区域进行分析研究, 明确物体可测量的物理区域范围, 为谱色测温理论研究的深化和技术应用的实现提供必要的基础。

## 2 谱色测温原理

谱色测温法的辐射测量方程如下:

$$V_i = \Psi \cdot \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F_i(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot I_b(\lambda, T) d\lambda,$$

$$\text{测量通道 } i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

其中,  $V_i$  是测量信号的强度, 又称作谱色值;  $\Psi$  是空间几何因子;  $\lambda$  是波长;  $(\lambda_a, \lambda_b)$  是仪器传感器的光谱响应范围,  $\lambda_a$  代表波长下限,  $\lambda_b$  代表波长上限;  $F_i(\lambda)$  是仪器传感器的光谱响应特性函数, 又称作谱色函数;  $\varepsilon(\lambda, T)$  是光谱发射率函数;  $I_b(\lambda, T)$  是黑体辐射强度分布。在窄波段的测量区间内, 光谱发射率函数表述为<sup>[13]</sup>,

$$\varepsilon(\lambda, T) = a(T) \cdot (1 + m(T) \cdot \Lambda) \quad (2)$$

其中,  $\Lambda$  为无量纲波长,  $\Lambda = (\lambda - \lambda_a) / (\lambda_b - \lambda_a)$ ;  $\varepsilon(\lambda, T)$  满足  $\alpha(T) > 0, m(T) \in [-1, \infty)$ 。将  $\varepsilon(\lambda, T)$  带入式(1), 并归一化谱色值 ( $V_1, V_2, V_3$ ) 为 ( $x, y$ ), 可得

$$x = \frac{V_1}{V_1 + V_2 + V_3} =$$

[收稿日期] 2007-03-16

[资助项目] 国家自然科学基金项目(50606033); 国家“八六三”高技术研究发展计划课题(2007AA04Z178)资助

[作者简介] 符泰然(1978-), 男, 内蒙古通辽市人, 助理研究员, 博士, 主要从事辐射测温、热物性测量、辐射传热研究工作

$$\frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F_1(\lambda) \cdot (1 + m\Lambda) \cdot I_b(\lambda, T) d\lambda}{\sum_{i=1}^3 \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F_i(\lambda) \cdot (1 + m\Lambda) \cdot I_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (3)$$

$$y = \frac{V_2}{V_1 + V_2 + V_3} = \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F_2(\lambda) \cdot (1 + m\Lambda) \cdot I_b(\lambda, T) d\lambda}{\sum_{i=1}^3 \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F_i(\lambda) \cdot (1 + m\Lambda) \cdot I_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (4)$$

式(3)、式(4)明确了归一化谱色值(谱色坐标)与温度、发射率参数之间的数学对应关系 $(x, y) \Leftrightarrow (m, T)$ 。上述分析即为谱色测温法的基本原理。谱色测温法的适用对象为在测量窄波段内具有上述发射率表征的连续辐射的物体。

### 3 辐射测温坐标系

在依据式(3)、式(4)形成的 $x-y$ 测量平面中,辐射测温坐标系<sup>[11]</sup>具备温度和发射率2个特征标尺。

在隐式求解方程式(3)、式(4)中,温度 $T$ 可表示为

$$T = \zeta(x, y, m) \quad (5)$$

温度 $T$ 与测量的谱色坐标 $(x, y)$ 、发射率参数 $m$ 隐式相关。当参数 $m$ 取某一定值 $m_*$ 时,式(3)、式(4)所形成的谱色轨迹仅与温度相关,其轨迹构成了辐射测量坐标系的温度标尺 $\vec{T}$ 轴,有 $\vec{T} = \zeta(x, y, m)$ 。

同样,发射率参数 $m$ 可表示为

$$m = \zeta(x, y, T) \quad (6)$$

发射率参数 $m$ 与测量的谱色坐标 $(x, y)$ 、温度 $T$ 隐式相关。当变量温度 $T$ 取某一定值 $T_*$ 时,式(6)所形成的谱色轨迹仅与发射率参数相关,其轨迹构成了辐射测量坐标系的发射率标尺 $\vec{m}$ 轴,可得 $\vec{m} = \zeta(x, y, T_*)$ 。

谱色函数是谱色测温法研究中必不可少的,采用 Gauss 函数来模拟谱色函数,可得

$$F(\lambda; a, c, \omega) = c \cdot \exp[-4 \ln 2 \cdot ((\lambda - \alpha)/\omega)^2] \quad (7)$$

式中,参数 $\alpha$ 为曲线的中心波长; $\omega$ 为半宽度; $c$ 为中心波长处曲线的高度。假定谱色测量的波段 $(\lambda_a, \lambda_b) = (380 \text{ nm}, 780 \text{ nm})$ , Gauss 分布的参数 $c_1 = c_2 = c_3 = 1, a_1 = 480 \text{ nm}, a_2 = 580 \text{ nm}, a_3 = 680 \text{ nm}$ ,

$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 70 \text{ nm}$ , 谱色函数的曲线分布如图 1 所示。图中, $F_1, F_2, F_3$  分别表示 3 个谱色函数。

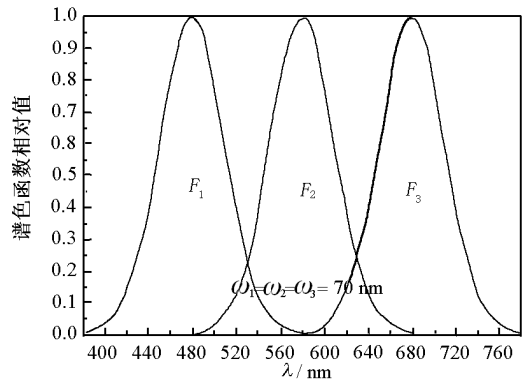


图 1 Gauss 分布的谱色函数曲线图

Fig. 1 Spectral response functions

在不同的响应波长下,将 3 个非相关谱色函数作归一化处理,可得

$$\frac{F_1(\lambda)}{F_1(\lambda) + F_2(\lambda) + F_3(\lambda)}, \frac{F_2(\lambda)}{F_1(\lambda) + F_2(\lambda) + F_3(\lambda)} \quad (8)$$

归一化谱色函数在在 $x-y$ 测量坐标系中所形成的轨迹见图 2(斜线区),式(3)、式(4)表述的测量点均限定在图 2 斜线区。

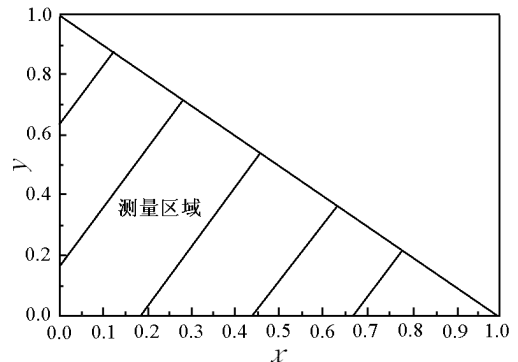


图 2 谱色函数所限定的测量区域图

Fig. 2 The measurement area restricted by spectral response functions

### 4 辐射测温区域

在 $x-y$ 坐标系中,温度标尺、发射率标尺在图 2 所示的测量区域中遵循着特定的分布规律<sup>[11]</sup>,它们所形成的辐射测温坐标系并未充满整个测量区域,即意味着并非测量区域中的任一点都是与温度相对应的测量点。因此,如何依据不同光谱发射率模型下的辐射测温坐标系分布范围充分界定辐射测温的有效区域,对于进行辐射测温的反演计算与误差分析有重要的指导意义。

#### 4.1 基于线性发射率 $\varepsilon = a_0 + a_1 \Lambda$ 的辐射测温区域

辐射测温坐标系中的参数范围选择: 温度区间  $[1\ 000, \infty)$ , 发射率参数  $m$  区间  $[-1, \infty)$ 。图 3 的实线轨迹即是基于线性发射率的辐射测温区域边界, 表 1 是图 3 中曲线的说明。

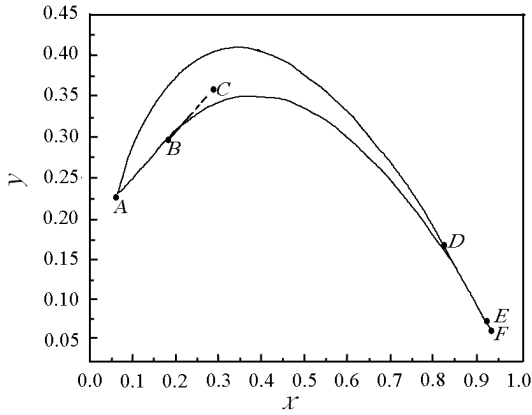


图 3 基于线性发射率的辐射测温区域

Fig. 3 Radiation temperature measurement area based on linear emissivity

表 1 图 3 中的轨迹

Table 1 The description of the locus in Fig. 3

轨迹	类型	参数	线型
ABC	发射率标尺	$T = \infty$	直线段
DEF	发射率标尺	$T = 1\ 000\ \text{K}$	直线段
AD	温度标尺	$m = -1.0$	曲线段
BE	发射率标尺簇的包络线		曲线段

#### 4.2 基于单调发射率 $\varepsilon = a_0 + a_1 \Lambda^n$ 的辐射测温区域

针对固定的波段区间  $(\lambda_a, \lambda_b)$ , 式(2)中的线性发射率模型的适用性往往是有限的, 因此引入弯曲度指数  $n$  来改造式(2)中的发射率模型, 可得

$$\varepsilon(\lambda, T) = a(T) \cdot (1 + m(T) \cdot \Lambda^n) \quad (9)$$

其中无量纲波长  $\Lambda = (\lambda - \lambda_a) / (\lambda_b - \lambda_a)$ 。对于实际可能会出现的单调发射率情形, 同样也会存在类似于线性发射率模型下的发射率标尺(即等温线)、温度标尺(即等  $m$  线)。文献[13]的发射率实验拟合结果表明: 窄波段内, 大部分具有单调特性实际物体的光谱发射率的弯曲度指数  $n \in [0.5 \sim 2.0]$ 。图 4 给出了基于单调光谱发射率函数的特定区间内的辐射测温区域示意, 其轨迹曲线与图 3 中的相类似, 见表 1 的描述。与  $n=1$  时的图 3 相比, 图 3 与图 4 中测温区域范围之间有重叠, 这表示同一谱色值  $(x, y)$  将会因  $n$  的不同而有不同的温度数值, 由此引发的温度偏差称为模型误差。温度的模型误差可以通过调整  $n$  予以定量估计。

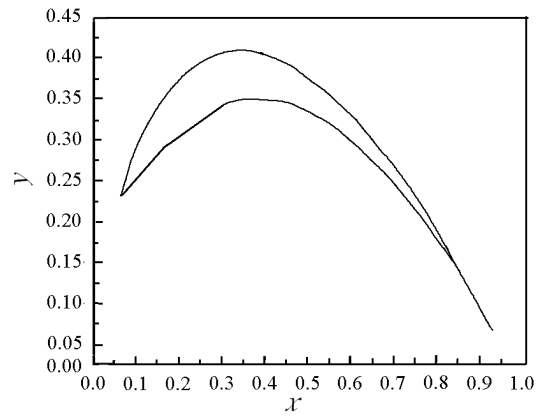


图 4 基于单调发射率的辐射测温区域

$(n \in [0.5 \sim 2.0])$

Fig. 4 Radiation temperature measurement area based on monotonic emissivity

$(n \in [0.5 \sim 2.0])$

#### 4.3 应用实例

笔者开发了基于特定 CCD 的三通道谱色测温仪器, 并对其综合谱色函数进行了标定。根据上述理论分析, 笔者给出了该仪器适用的辐射测温区域的分布(见图 5)。利用该谱色测温仪器对不同温度下的黑体炉测量靶进行成像, 温度范围为  $(1\ 600, 2\ 200)$ , 温度测量误差仅在 1% 之间。高温黑体的测量坐标点均分布在所计算的测温区域之内(图 5 中的圆圈), 靠近区域边缘。

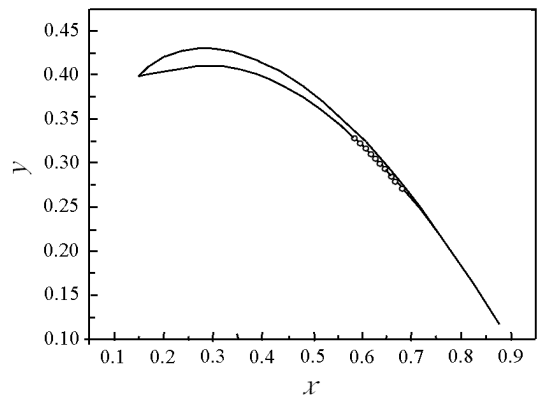


图 5 谱色测温仪器的测温区域(线性发射率)

Fig. 5 The temperature measurement area of the specific pyrometer (the linear emissivity)

#### 5 结语

温度和发射率 2 个标尺构成的辐射测温坐标系是谱色测温法的重要特征, 笔者在基于辐射测温坐标系的谱色测温系统研究中, 针对测温坐标系中辐射测量区域的界定问题进行了充分的理论探讨。以线性发射率模型  $\varepsilon = a_0 + a_1 \Lambda$  和改进的单调发射率

模型  $\varepsilon = a_0 + a_1 \Lambda^n$  为基础,考虑测温坐标系标尺的分布规律,讨论了不同光谱发射率模型下的辐射测温坐标系所限定的辐射测温有效域。分析表明辐射测温区域在  $x - y$  坐标系仅占据小部分,区域边界呈弧线状;线性发射率模型和改进的单调发射率模型所对应的辐射测温区域不同,但测温区域有部分重叠;以实际应用中特定的谱色测温仪器为例,给出该仪器适用的辐射测温的理论区域,并用黑体实验进行了验证。笔者所开展的辐射测温区域的界定研究将为谱色测温理论研究的深化和技术应用的实现提供必要的基础。

#### 参考文献

- [1] Coates PB. Multi - wavelength pyrometry[J]. Metrologia, 1981, 17:103 - 109
- [2] 孙晓刚,戴景民,丛大成,等. 多光谱辐射测温的理论研究——发射率模型的自动判别[J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(3): 221 - 225
- [3] Ng D, Fralick G. Use of a multi - wavelength pyrometer in several elevated temperature aerospace applications[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72 (2): 1522 - 1530
- [4] Jenkins TP, Hanson RK. Soot pyrometry using modulated absorption/emission[J]. Combustion and Flame, 2001, 126 (3): 1669 - 1679
- [5] Sabel T, Unterberger S, Hein KRG. Application of quotient pyrometry to industrial pulverised coal combustion[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26 (2 - 4): 283 - 289
- [6] Lu G, Yan Y, Riley G, et al. Concurrent measurement of temperature and soot concentration of pulverized coal flames[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5): 990 - 995
- [7] Mazikowski A, Chrzanowski A. Non - contact multiband method for emissivity measurement[J]. Infrared Physics and Technology, 2003, 44 (2): 91 - 99
- [8] Saunders P, White DR. Physical basis of interpolation equations for radiation thermometry[J]. Metrologia, 2003, 40 (4): 195 - 203
- [9] 符泰然,程晓舫,陆少松.三波长温度测量方法[J]. 计量学报, 2004, 25(2): 123 - 126
- [10] 程晓舫,符泰然,范学良. 谱色测温原理[J]. 中国科学 G 辑, 2004, 34(6): 639 - 647
- [11] Fu Tairan, Cheng Xiaofang, Wu Bo, et al. The measurement coordinates for multi - band pyrometry[J]. Measurement Science & Technology, 2006, 17: 379 - 383
- [12] 王安全,程晓舫,陆少松. 彩色测温方法中物体辐射色域的界定和划分[J]. 中国工程科学, 2002, 4(8): 54 - 58
- [13] 符泰然,程晓舫,钟茂华,等. 辐射测温中光谱发射率的表征描述[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1): 1 - 5

## The definition analyses of radiation temperature measurement area

Fu Tairan<sup>1</sup>, Cheng Xiaofang<sup>2</sup>, Zhong Maohua<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. China Academy of Safety Science & Technology, Beijing 100029, China)

[Abstract] In the research of primary spectrum pyrometry, this paper discussed the definition problem of radiation temperature measurement area based on the measurement coordinates. For the linear spectrum emissivity model and improved monotonic spectrum emissivity model, the characteristics of radiation temperature measurement area restricted by the measurement coordinates were theoretically analyzed, through the investigations of the temperature and emissivity coordinate axes. Choosing the specific primary spectrum pyrometer as an example in applications, the theoretical area of radiation temperature measurement of this pyrometer was given. And it was verified through blackbody experiments. The discussions of this paper will provide the necessary foundation for the theory research development of primary spectrum pyrometry and the realization of technical applications.

[Key words] emissivity; radiation temperature measurement; the measurement coordinates