第32卷，第10期 光 谱 学 与 光 谱 分 析 Vol. 32，No. 10，pp2735-2738
2012年10月 Spectroscopy and Spectral Analysis October，2012

基于光谱响应定标的辐射测温方法

辛成运，程晓舫*，张忠政

中国科学技术大学热科学和能源工程系，安徽 合肥 230027

摘 要 辐射测温是通过测量物体发出的辐射来反演温度，辐射测量方程中含有与空间位置相关的非光谱参数，通常需通过辐射标定予以确认。而该研究将非光谱参数归入有限项级数形式的光谱发射率中，这既不会影响多通道测温方程组的封闭性，又不会影响真温求解，从而在无需测量数据归一化的条件下，实现了无需空间位置标定的辐射测温，该方法仅需要标定仪器的绝对光谱响应或相对光谱响应，但不能解得发射率。以两个特例分别对多波长测温方法和多谱段测温方法的求解特性进行了研究。结果表明：对于任意的测量矢量，有效波长不相同的多波长测温唯一解是存在的；而多谱段测温时，存在无解区域，双解直线，甚至可能存在三解直线。

关键词 多波长；多谱段；辐射测温；发射率；光谱响应

中图分类号：O432.1 **文献标识码**：A **DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2012)10-2735-04

引 言

辐射测温[1-4]通过测量物体发出的辐射来反演温度，必然涉及两个方面：一是被测目标向测量传感器的辐射传输，这种传输可在真空和有吸收性质的介质空间内进行；二是到达传感器的辐射向测量的物理转换，亦即光电传感。透镜成像条件下，辐射测量方程[5-7]可写为

$$V = \Pi\int_{\lambda_a}^{\lambda_b}\widetilde{F}(\lambda)\varepsilon(\lambda,T,\theta,\phi,\beta)I_b(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda \tag{1}$$

其中，$\widetilde{F}(\lambda)$为测温仪器的绝对光谱响应函数；$\varepsilon(\lambda,T,\theta,\phi,\beta)$为被测物体表面的光谱发射率；$\Pi$为非光谱参数，是空间几何位置的函数；$(\lambda_a,\lambda_b)$为光谱响应函数$\widetilde{F}(\lambda)$的上下限波长。

式(1)中，黑体光谱辐射强度[8]的函数表述为

$$I_b(\lambda,T) = \frac{C_1/\pi}{\lambda^5\{\exp[C_2/(\lambda T)]-1\}} \tag{2}$$

其中，C_1 和 C_2 分别为第一和第二辐射常数。

非光谱参数Π是空间几何位置的函数，程晓舫等指出当进行发射辐射的绝对测量时，需对Π进行标定，特别是温度场测量时，需对每个目标测量点逐一进行标定。

当$\lambda_a,\lambda_b\to\lambda$且$\lambda\in(\lambda_a,\lambda_b)$时，由式(1)可得单色辐射测量方程[2,9]

$$V_\lambda = \Pi\widetilde{F}(\lambda)I_e(\lambda,T,\theta,\phi,\beta) = A_\lambda\varepsilon(\lambda,T,\theta,\phi,\beta)I_b(\lambda,T) \tag{3}$$

戴景民等[9]详述了基于式(3)的多波长测温方法数学模型的建模方法。基于检定常数的数学模型需要对各通道的检定常数A_λ进行标定，而基于参考温度的数学模型，则是把测量式(3)和A_λ标定式进行联立求解，是间接对检定常数进行标定。由式(3)可见，A_λ是$\widetilde{F}(\lambda)$与Π和乘积，也是空间位置的函数，这就要求测温必须在标定条件下实施，并且温度场测量时，需对各目标测量点的A_λ逐一进行标定。

鉴于非光谱参数Π对辐射测温的影响，程晓舫和符泰然等[5-7,10,11]提出了三谱段的谱色测温法，该方法把测量信号进行归一化处理，避免了对非光谱参数Π的标定。本研究提出一种非归一化方法，直接将非光谱参数Π归入到伪发射率模型的待定系数中，从而实现了无需辐射标定的辐射温度测量，并分别描述了该方法在多波长和多谱段测温中的应用。

1 基于发射率构建的多通道测温方法

考虑具有连续辐射的物体，光谱发射率通常根据函数逼近理论写成波长的有限级数项来实现温度的封闭求解，

$$\varepsilon(\lambda,T,\theta,\phi,\beta) = a_0(T,\theta,\phi,\beta)+a_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda+\cdots+a_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda^{m-1} \tag{4}$$

$$\ln\varepsilon(\lambda,T,\theta,\phi,\beta) = a_0(T,\theta,\phi,\beta)+a_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda+\cdots+a_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda^{m-1} \tag{5}$$

式(4)和式(5)是待定系数法构建的发射率模型，其中待

收稿日期：2012-04-17，**修订日期**：2012-07-18

基金项目：国家自然科学基金项目(50976112)资助

作者简介：辛成运，1982年生，中国科学技术大学热科学和能源工程系博士研究生 e-mail：xchyun@mail.ustc.edu.cn

*通讯联系人 e-mail：xfcheng@ustc.edu.cn

定系数 $a_0, a_1, \cdots, a_{m-1}$ 与温度 T 均为待求解量，即测温方程共有 $m+1$ 个未知量，必须建立 $m+1$ 个测温方程，需采用 $m+1$ 个通道进行测温。

由式(1)可得多谱段测温时第 i 个通道的辐射测量方程为

$$V_i = \Pi\int_{\Delta\lambda}\widetilde{F}_i(\lambda)\varepsilon(\lambda,T,\theta,\phi,\beta)I_b(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda,\quad i=1,2,\cdots,m+1 \tag{6}$$

由式(3)可得多波长测温时第 i 个通道的辐射测量方程

$$V_{\lambda i} = A_{\lambda i}\varepsilon(\lambda_i,T,\theta,\phi,\beta)I_b(\lambda_i,T),\quad i=1,2,\cdots,m+1 \tag{7}$$

式(6)和式(7)提供的测量方程组结合待定系数法构建出的发射率模型可实现被测物体温度和光谱发射率的同时求解，但必须已知非光谱参数 Π 或各通道的 $A_{\lambda i}$ 才能实现方程的封闭求解，这就要求进行辐射标定，尤其是温度场测量时需对各目标点逐一进行标定。以下将对多通道测温方程的发射率封闭方法进行改进，来避免测温时对空间几何位置的标定。

2 基于光谱响应标定的辐射测温法

定义伪发射率 $E(\lambda,T,\theta,\phi,\beta)$ 是光谱发射率 $\varepsilon(\lambda,T,\theta,\phi,\beta)$ 的非零常数倍数，即

$$E(\lambda,T,\theta,\phi,\beta) = k\varepsilon(\lambda,T,\theta,\phi,\beta),\ k\neq 0 \tag{8}$$

将非光谱参数 Π 归入由式(4)和式(5)确定的发射率模型的待定系数中，可得伪发射率模型为

$$\begin{aligned}E(\lambda,T,\theta,\phi,\beta) &= \Pi\varepsilon(\lambda,T,\theta,\phi,\beta) = \Pi a_0(T,\theta,\phi,\beta) + \\ &\Pi a_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda+\cdots+\Pi a_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda^{m-1} = b_0(T,\theta,\phi,\beta) \\ &+ b_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda+\cdots+b_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda^{m-1}\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}E(\lambda,T,\theta,\phi,\beta) &= \Pi\varepsilon(\lambda,T,\theta,\phi,\beta) = \Pi\exp\{a_0(T,\theta,\phi,\beta) \\ &+ a_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda+\cdots+a_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda^{m-1}\} \\ &= \exp\{\ln\Pi + a_0(T,\theta,\phi,\beta)+a_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda+\cdots+ \\ &a_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda^{m-1}\} = \exp\{b_0(T,\theta,\phi,\beta)+ \\ &b_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda+\cdots+b_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda^{m-1}\}\end{aligned} \tag{10}$$

由式(9)与式(10)可以看出，伪发射率模型在既不改变多通道测温方程组封闭性，又考虑到发射率模型影响的条件下，消除了非光谱参数 Π 对温度求解的影响。

由式(6)和式(9)可得

$$\begin{aligned}V_i = \int_{\Delta\lambda}&\widetilde{F}_i(\lambda)(b_0(T,\theta,\phi,\beta)+b_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda+\cdots+ \\ &b_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda^{m-1})I_b(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda\end{aligned} \tag{11}$$

其中，$\Pi a_j(T,\theta,\phi,\beta) = b_j(T,\theta,\phi,\beta), j=0,1,\cdots,m-1$。

由式(1)和式(10)可得

$$\begin{aligned}V_i = \int_{\Delta\lambda}&\widetilde{F}_i(\lambda)\exp(b_0(T,\theta,\phi,\beta)+b_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda+\cdots+ \\ &b_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda^{m-1})I_b(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda\end{aligned} \tag{12}$$

其中，$a_j(T,\theta,\phi,\beta) = b_j(T,\theta,\phi,\beta), j=1,\cdots,m-1$；$\ln\Pi + a_0(T,\theta,\phi,\beta) = b_0(T,\theta,\phi,\beta)$。

由式(11)或式(12)进行辐射测温，只要标定辐射测量仪器的绝对光谱响应 $\widetilde{F}(\lambda)$，当通道数等于 $m+1$ 时，就可建立关于 $b_0, b_1, \cdots, b_{m-1}$ 和 T 的封闭方程组，实现温度求解。

以上均是基于绝对光谱响应 $\widetilde{F}(\lambda)$ 的分析，而对于相对光谱响应 $F(\lambda)$ 有

$$F(\lambda) = \widetilde{F}(\lambda)/\widetilde{F}_m(\lambda) \tag{13}$$

其中，$\widetilde{F}_m(\lambda)$ 是指 $\widetilde{F}(\lambda)$ 的最大值或某一波长下的值。

注意到相对光谱响应的标定比绝对光谱响应的标定易于实现，改写式(13)

$$\widetilde{F}(\lambda) = F(\lambda)\widetilde{F}_m(\lambda) \tag{14}$$

式中，$\widetilde{F}_m(\lambda)$ 为一常数，可以和非光谱参数一起并入发射率模型的待定系数中去，而不会影响温度求解。因此，本方法可以在仅标定各通道相对光谱响应的条件下，实现温度封闭求解。

从以上分析还可以看出，此方法不能解得发射率，在绝对光谱响应标定条件下仅能解得 $\Pi\varepsilon$，而在相对光谱响应标定条件下则仅能得到 $\widetilde{F}_m(\lambda)\Pi\varepsilon$。虽然 ε 的范围为(0，1]，而 $\Pi\varepsilon$ 和 $\widetilde{F}_m(\lambda)\Pi\varepsilon$ 却不一定在 0 与 1 之间。

3 应用实例

基于以上处理方法，结合常用的发射率模型，分别描述了该方法在多波长测温和多谱段测温中的应用。

3.1 在多波长测温中的应用

在一定条件下，多波长测温通常采用维恩定律来近似替代 Planck 定律，为便于计算通常采用指数发射率模型，于是可得多波长测温方程

$$\begin{aligned}V_{\lambda i} = \widetilde{F}_i(\lambda_i)&\exp(b_0(T,\theta,\phi,\beta)+b_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda_i \\ &+\cdots+b_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda_i^{m-1})\frac{C_1/\pi}{\lambda_i^5\exp[C_2/(\lambda_i T)]}\end{aligned} \tag{15}$$

即，

$$\begin{aligned}\ln\left(\frac{\pi V_{\lambda i}\lambda_i^5}{C_1\widetilde{F}_i(\lambda_i)}\right) &= (b_0(T,\theta,\phi,\beta)+b_1(T,\theta,\phi,\beta)\lambda+\cdots+ \\ &b_{m-1}(T,\theta,\phi,\beta)\lambda^{m-1}) - \frac{C_2}{\lambda_i T}\end{aligned} \tag{16}$$

由式(16)变形可得

$$Y_i = b_{-1}X_{-1}+b_0X_0+b_1X_1+\cdots+b_{m-1}X_{m-1},\quad i=1,2,\cdots,n;\ m\leqslant n-1) \tag{17}$$

其中，$Y_i = \ln\left(\frac{\pi V_{\lambda i}\lambda_i^5}{C_1\widetilde{F}_i(\lambda_i)}\right)$，$X_g = \lambda_i^g$，$g=-1,0,\cdots,m-1$，$b_{-1} = -C_2/T$。

根据式(17)，在仅标定绝对光谱响应的条件下，可直接进行求解或采用最小二乘多元线性回归法求得各项系数，进而可求得目标真温 T 和伪发射率。对于方程组(17)，当 $m=n-1$ 时，如果 n 个通道的有效波长各不相同，其系数矩阵的行列式值恒不为零，即方程组(17)必有唯一解；当 $m<n-1$ 时，方程组的解不一定存在，但必然存在最小二乘解。

3.2 在多谱段测温中的应用

谱色测温法[6,7]是基于测量数据归一化和线性发射率模型的三谱段测温方法。本文也以基于线性发射率模型的三谱段测温法进行讨论。

记 $M_{ij} = \int_{\Delta\lambda}\widetilde{F}_i(\lambda)\lambda^j I_b(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda$，则对于式(11) 取 $m=2$

可得线性发射率模型下的三通道谱段测温方程组为

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{10} & M_{11} \\ M_{20} & M_{21} \\ M_{30} & M_{31} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \end{pmatrix} \tag{18}$$

由式(18)可解得温度的求解方程

$$\begin{vmatrix} M_{10} & M_{11} & V_1 \\ M_{20} & M_{21} & V_2 \\ M_{30} & M_{31} & V_2 \end{vmatrix} = 0$$

即

$$V_1 \begin{vmatrix} M_{20} & M_{21} \\ M_{30} & M_{31} \end{vmatrix} + V_2 \begin{vmatrix} M_{30} & M_{31} \\ M_{10} & M_{11} \end{vmatrix} + V_3 \begin{vmatrix} M_{10} & M_{11} \\ M_{20} & M_{21} \end{vmatrix} = 0 \tag{19}$$

式(19)为关于测量值的等温面方程，其法向量为

$$\vec{r} = \left(\begin{vmatrix} M_{20} & M_{21} \\ M_{30} & M_{31} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} M_{30} & M_{31} \\ M_{10} & M_{11} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} M_{10} & M_{11} \\ M_{20} & M_{21} \end{vmatrix} \right)$$

根据式(19)，可以在标定绝对光谱响应的条件下，进行温度求解。有关基于线性发射率模型的三通道谱段测温法的特征，谱色测温法对其进行了深入研究，指出存在温度的双解区域[12]和无解区[13]，需进行真温的甄别。

由(19)式可以看出，所有等温面必过 $O(0,0,0)$点。法向量 $\vec{r}$ 仅是温度的函数，不同温度条件下的法向量一般不同，此时两个等温面必然会相交于一条直线 l，l 即为双温度直线，此时需进行温度真解的甄别。当直线 l 与另一个等温面相交时，若此交点非 $O(0,0,0)$点则 l 是三个等温面的公共交线，即 l 是三温度线，此时真解的甄别就会更复杂。因此，测量区域内存在双温度解直线，并可能存在三温度解直线。

由于 M_{ij} 是温度的增函数，式(19)的解可以看作两个关于温度的增函数，即

$$f_1(T) = V_1 M_{20} M_{31} + V_2 M_{30} M_{11} + V_3 M_{10} M_{21} \tag{20}$$

与 $f_2(T) = V_1 M_{30} M_{21} + V_2 M_{10} M_{31} + V_3 M_{20} M_{11}$ (21)

的交点，由 $f_1(T)$ 与 $f_2(T)$ 的相互关系，可以明显地看出其解有四种情况，即无解、单解、两解和大于等于三解。

由(19)式还可以看出，测量信号矢量 (V_1, V_2, V_3) 的方向决定温度的解，而它的模对测温并没有影响。因此，可以根据式(19)建立测量信号方向矢量与温度的映射关系。

4 结 论

辐射测温是通过测量物体发射的辐射来反演温度，而辐射测量方程中发射率可以根据函数逼近理论写成波长的有限级数项形式，非光谱参数 Π 是空间位置的函数，可以通过标定或测量数据的归一化来实现温度的封闭求解。归一化方法，比如谱色测温法避免了空间位置的标定，更便于温度场测量，本文提出了一种非归一化方法，实现了无需空间位置标定的辐射测温，并以两个实例，分析了其在多波长测温或多谱段测温中的应用。结果表明：

(1)对于多项式发射率模型和指数多项多发射率模型，辐射测量方程中的非光谱参数 Π 可以归入发射率的待定系数中，而不影响温度的求解。

(2)归入化方法消除了非光谱参数对测温的影响，从而无需对空间位置进行标定，仅需标定仪器的绝对光谱响应或相对光谱响应，这方便了温度场测量。

(3)归入化方法可以用于多波长测温，在维恩定律可近似替代 Planck 定律的条件下，如果选用指数多项式模型，可以方便地实现温度的多元线性回归求解，此时如果多通道有效波长各不相等，则温度解总是唯一存在。

(4)归入化方法可以用于多谱段测温，以基于线性发射率模型的三谱段测温为例，经研究发现：测温区域内存在双温度线，并可能存在三温度线；温度仅是信号方向矢量方向的函数，与其模没关系，根据测温方程可以建立信号方向矢量与温度的映射关系。

归入化方法是基于特定的发射率模型的数据处理方法，可用于多波长或多谱段测温，而仅需标定仪器的光谱响应。

References

[1] Magunov A N. Instruments and Experimental Techniques, 2009, 52(4): 451.
[2] SUN Xiao-gang, DAI Jing-min, CONG Da-cheng, et al(孙晓刚，戴景民，丛大成，等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 1998, 17(3): 221.
[3] Gardner J L, Jones T P. Journal of Physics E-Scientific Instruments, 1980, 13(3): 306.
[4] Coates P B. Metrologia, 1981, 17(3): 103.
[5] Fu Tairan, Cheng Xiaofang, Zhong Maohua. Science in China Series G-Physics Mechanics & Astronomy, 2007, 50(6): 753.
[6] Cheng Xiaofang, Fu Tairan, Fan Xueliang. Science in China Series G-Physics Mechanics & Astronomy, 2005, 48(2): 142.
[7] Fu Tairan, Cheng Xiaofang, Fan Xueliang, et al. Metrologia, 2004, 41(4): 305.
[8] GE Xin-shi, YE Hong-yi(葛新石，叶宏译). Fundamentals of Heat and Mass Transfer(Sixth Edition)(传热和传质基本原理). Beijing: Chemical Industry Press(北京：化学工业出版社), 2007. 451.
[9] DAI Jing-min(戴景民). 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. 10.
[10] Fu Tairan, Cheng Xiaofang, Wu Bo, et al.. Measurement Science & Technology, 2006. 17(2): 379.
[11] Fu Tairan, Cheng Xiaofang, Wu Bo, et al.. Measurement Science & Technology, 2006. 17(10): 2751.
[12] WANG An-quan, CHENG Xiao-fang, WANG Ru(王安全，程晓舫，王 铷). Journal of University of Science and Technology of China(中国科学技术大学学报), 2002, 32(4): 498.
[13] FU Tai-ran, CHENG Xiao-fang, ZHONG Mao-hua(符泰然，程晓舫，钟茂华). Engineering Science(中国工程科学), 2008, 10(7): 73.

Radiation Thermometry Based on Calibration of Spectral Responsivity

XIN Cheng-yun, CHENG Xiao-fang*, ZHANG Zhong-zheng

Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Abstract True surface temperatures can be determined by measurements of radiation emitted by the object. The non-spectral parameter in the radiation measurement equation is the function of the relative position between the target and the lens, so calibration of space position is necessary for temperature measurement, when emissivity and temperature are measured simultaneously. In the present paper, the non-spectral parameter was included into the undetermined coefficients of emissivity modeled by finite series, which will not affect the solution of true surface temperature. Therefore, radiation thermometry can be accomplished without calibration of space position and normalization of measurement data. And not the true spectral emissivity but the trend of it can be measured. Two special examples were investigated, respectively. The results indicate that when the effective wavelength of each channel is different, multi-wavelength radiation thermometry equations have the unique solution, while the number of the multiband ones may be zero, one, two or even three.

Keywords Multi-wavelength; Multiband; Radiation thermometry; Emissivity; Spectral responsivity

(Received Apr. 17, 2012; accepted Jul. 18, 2012)

* Corresponding author