221-225

第 17 卷第 3 期 1998 年 6 月
红外与毫米波学报
J. Infrared Millim. Waves
Vol. 17, No. 3 June, 1998

O551.2

多光谱辐射测温的理论研究
——发射率模型的自动判别*

孙晓刚 戴景民 丛大成 褚载祥
(哈尔滨工业大学精密仪器系，黑龙江，哈尔滨，150001)

摘要 在多光谱辐射温度计的数据处理中常假设发射率的对数与波长成线性关系，本文提出一种自动判别发射率和波长数学模型的新方法，着重分析了应用此方法时各种测量误差对真温及发射率的影响. 计算机仿真结果与理想假设值符合得很好，是一种较好的获知真温及发射率的方法.

关键词 多光谱测温，发射率，曲线拟合.

测温学 辐射测温

引言

由于用辐射方法测得的是物体的热辐射通量，它取决于目标的温度和材料发射率，所以要想获知物体的真实温度(真温)，还必须同时知道物体的材料发射率. 多光谱辐射测温法是利用目标多个光谱下的辐射测量信息，经过数据处理得到目标的真温和材料发射率. 在多光谱辐射测温的数据处理中，必须假设发射率与波长的数学模型，在大多数情况下，可假设发射率的对数与波长成线性关系[1~7].

我们认为发射率与波长之间的函数关系客观存在，对于不同表面光洁度的材料，简单地应用某一种假设模型是不现实的，应该针对不同的目标，采用不同的发射率与波长的假设模型. 困难是对于某种未知材料，事先并不知道应该采用哪种发射率与波长的假设模型为好，我们提出的发射率和波长数学模型的自动判别方法能较好地解决此问题. 本文着重分析了应用该方法时各种测量误差对目标真实温度及发射率的影响.

1 数学模型的建立

如果多光谱温度计有 n 个通道，则第 i 个通道的输出信号 V_i 可以表示为

$$V_i = A_{\lambda_i} \cdot \epsilon(\lambda_i, T) \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \exp(-C_2/\lambda_i/T), \qquad (i = 1, 2, \ldots, n) \tag{1}$$

其中 A_{λ_i} 是只与波长有关而与温度无关的检定常数，它与该波长下探测器的光谱响应率、光学元件透过率、几何尺寸以及第一辐射常数有关；$\epsilon(\lambda_i, T)$ 为温度 T 的目标光谱发射率；C_2 为第二辐射常数；λ_i 为该通道的有效波长；T 为目标真温. 在定点黑体参考温度 T' 下，第 i 个通道的输出信号 V_i' 为

* 国家自然科学基金(编号 69247001)和哈尔滨工业大学基金(编号 960151-019)资助项目
稿件收到日期 1997-10-10，修改稿收到日期 1997-12-18

$$V_i' = A_{\lambda_i} \cdot \lambda_i^{-5} \cdot \exp(-C_2/\lambda_i/T'), \qquad (\varepsilon(\lambda_i,T) = 1.0) \tag{2}$$

若设 $$\ln\varepsilon(\lambda_i,T) = b_1\lambda_i + b_2\lambda_i^2 + \cdots + b_{n-2}\lambda_i^{n-2} + b_{n-1} \tag{3}$$

(其中 $b_1,b_2,\cdots b_{n-1}$ 是温度的函数),由式(1)～(3)可得

$$\ln(V_i/V_i') - \frac{C_2}{\lambda_i T'} = -\frac{C_2}{\lambda_i T} + b_1\lambda_i + b_2\lambda_i^2 + \cdots + b_{n-2}\lambda_i^{n-2} + b_{n-1}, \tag{4}$$

记 $Y_i=\ln(V_i/V_i')-\frac{C_2}{\lambda_i T'}, b_0=-\frac{C_2}{T}, X_{0i}=\frac{1}{\lambda_i}, X_{1i}=\lambda_i,\cdots,X_{n-2,i}=\lambda_i^{n-2}$,则式(4)变为

$$Y_i = b_0X_{0i} + b_1X_{1i} + \cdots + b_{n-2}X_{n-2,i} + b_{n-1}. \quad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{5}$$

由此可用逐步回归法求得各项系数 $b_0,b_1,\cdots,b_{n-2},b_{n-1}$,进而可求得目标真温 T 和各光谱发射率 $\varepsilon(\lambda_i,T)$.

由于事先无法确定发射率和波长的数学模型曲线次数选择多少为好,我们直观想法是曲线次数选择要有利于降低残余误差平方和.一般来说,曲线次数选择越大,残余误差平方和越小.但曲线次数选择过大时拐点太多,未必符合实际情况,所以合理地选择曲线次数至关重要.有时还出现这种情况:即 $\ln\varepsilon(\lambda_i,T)=b_2\lambda_i^2+b_3$ 更能准确地反映发射率和波长之间的函数关系,此时并不包含一次项 $b_1\lambda_i$,而二次项比一次项更重要.因此,在更广义的情况下,应该对多项式中的任何项都要检验,选择主要项,舍去次要项.

逐步回归的数学模型与多元线性回归的数学模型一样,其基本思想是:将变量一个一个引入,引入变量的条件是其偏回归平方和经检验是显著的,同时每引入一个新变量后,对已选入的变量要进行逐个检验,将不显著的变量剔除,保证最后所得的子集中的所有变量都是显著的.这样经过若干步便得到"最优"变量子集[8].

2 光谱发射率模型的自动判别

逐步回归方法的建立,巧妙地运用了无回代过程解正规方程的特性.为不失一般性,设 y 可以表达成 m 个变量的函数,即设

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_mx_m, \tag{6}$$

并设残余误差方程为

$$y_k = a_0 + a_1x_{1k} + \cdots + a_mx_{mk} + V_k, \quad (k = 1,2,\cdots n) \tag{7}$$

则等效残余误差方程为

$$y_k - \bar{y} = a_1(x_{1k} - \bar{x}_1) + \cdots + a_m(x_{mk} - \bar{x}_m) + V_k. \tag{8}$$

组成正规方程组

$$\left.\begin{array}{l} S_{11}a_1 + \cdots + S_{1m}a_m = S_{1y}, \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots, \\ S_{m1}a_1 + \cdots + S_{mm}a_m = S_{my}, \\ S_{y1}a_1 + \cdots + S_{ym}a_m + Q = S_{yy}. \end{array}\right\} \tag{9}$$

式中 $S_{ij}=\sum_{k=1}^{n}(x_{ik}-\bar{x}_i)(x_{jk}-\bar{x}_j), S_{iy}=\sum_{k=1}^{n}(x_{ik}-\bar{x}_i)(y_k-\bar{y}), S_{yy}=\sum_{k=1}^{n}(y_k-\bar{y})^2, \bar{x}_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}x_{ik}, \bar{y}_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}y_{ik}$,而

$$a_0 = \bar{y} - a_1\bar{x}_1 - \cdots - a_m\bar{x}_m, \tag{10}$$

此时残余误差平方和为[8]

$$Q = S_{yy}^{(m)} = S_{yy} - \sum_{i=1}^{m}\{(S_{iy}^{(i)})^2/S_{ii}^{(i)}\}. \tag{11}$$

设回归平方和为

$$U = \sum_{i=1}^{m} a_i S_{iy}. \tag{12}$$

如果回归方程中已引入 $t-1$ 个变量 $x_1,\cdots x_t$，其中没有 x_k；若在第 t 次约化时引入变量 x_k，此时由于引入 x_k 所增加的平方和称为偏回归平方和，记为[9]

$$V_k^{(t)} = U^{(t)} - U^{(t-1)} = \sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{t}(a_i^{(t)} - a_i^{(t-1)})S_{iy} + a_k^{(t)}S_{ky} = (S_{ky}^{(t)})^2/S_{kk}^{(t)}. \tag{13}$$

由以上分析可见，若当前已有 t 个变量（包括 x_k）选入方程，则 x_k 贡献的回归平方和为 $V_k^{(t)}$，此时考虑第 k 个变量可能剔除的情况，则

$$F_t(n - t - 1)|V_k^{(t)}|/Q^{(t)}. \tag{14}$$

式中 $V_k^{(t)}$ 是已选入的 t 个变量中回归平方和（指绝对值）贡献最小的那个值. 如果 $F_t \leqslant F_{\alpha 2}(1, n-t-1)$，则剔除变量 x_k. 在 x_k 尚未选入的情况下，在第 $t+1$ 次约化时考虑选入，则此时 x_k 的贡献为

$$V_k^{(t+1)} = (S_{ky}^{(t+1)})^2/S_{kk}^{(t+1)} = (S_{ky}^{(t)}/S_{kk}^{(t)})^2/(1/S_{kk}^{(t)}) = (S_{ky}^{(t)})^2/S_{kk}^{(t)} = V_k^{(t)}. \tag{15}$$

在第 $t+1$ 次约化时，从未选入 t 个变量的其他变量中，考虑第 k 个变量可能选入的情况，则

$$F_{t+1} = (n - (t + 1) - 1)V_k^{(t+1)}/Q^{(t+1)} = (n - t - 2)V_k^{(t)}/(Q^{(t)} - V_k^{(t)}), \tag{16}$$

式中 $V_k^{(t)}$ 是未选入变量中回归平方和贡献最大的那个值，如果 $F_{t+1} > F_{\alpha 1}(1, n-t-2)$，则把变量 X_k 选入回归方程. 一般 α_1 和 α_2 可以有不同值，但 $\alpha_1 \leqslant \alpha_2$. 我们根据上述思想，对第一部分中建立的数学模型进行了仿真计算.

3　计算机仿真结果分析

假定目标真温 T＝1800K、定点黑体炉参考温度 T'＝1200K，采用六波长辐射温度计，其有效波长分别为 0.5、0.6、0.68、0.8、0.9、1.04μm，并且钨表面在 1800K 时的光谱发射率数据如表 1 所示[10].

表 1　钨表面光谱发射率

Table 1 The surface emissivities of tungsten

λ(μm)	0.5	0.6	0.68	0.8	0.9	1.04
$\varepsilon(\lambda)$	0.462	0.446	0.434	0.414	0.380	0.370

采用逐步回归法，模拟各种实际情况进行了大量计算机仿真实验，见表 2. 现对表 2 中各情形说明如下：(1) 情形 A 为各通道均无测量误差，且定点黑体炉参考温度 T'＝1200K；

(2) 情形 B 为各通道均无测量误差,且定点黑体炉参考温度 $T'=1700K$; (3) 情形 C1 为各通道均有 -0.5% 的噪声误差,且定点黑体炉参考温度 $T'=1200K$;(4) 情形 C2 为各通道均有 $+0.5\%$ 噪声误差,且定点黑体炉参考温度 $T'=1200K$;(5) 情形 D 为各通道的噪声分别为 -0.1%、-0.2%、0.1%、-0.2%、0.2%、0.1%,且定点黑体炉参考温度 $T'=1200K$;(6) 情形 E1 为各通道均无测量误差,但定点黑体炉参考温度 $T'=1200K$ 有 $+0.5\%$ 的测量误差,即 $+6K$;(7) 情形 E2 为各通道均无测量误差,但定点黑体炉参考温度 $T'=1200K$ 有 -0.5% 的测量误差,即 $-6K$;(8) 情形 F1 为各通道的噪声分别为 -0.1%、-0.2%、0.1%、-0.2%、0.2%、0.1%,且定点黑体炉参考温度 $T'=1200K$ 有 $+0.5\%$ 的测量误差,即 $+6K$; (9) 情形 F2 为各通道的噪声分别为 -0.1%、-0.2%、0.1%、-0.2%、0.2%、0.1%,且定点黑体炉参考温度 $T'=1200K$ 有 -0.5% 的测量误差,即 $-6K$; (10) 情形 G 为各通道的噪声分别为 -0.1%、-0.2%、0.1%、-0.2%、0.2%、0.1%,且定点黑体炉参考温度 $T'=1200K$ 在各通道测量时不稳定,分别有 1、2、3、4、5、6K 的偏差.

表 2 逐步回归法计算结果

Table 2 The calculated results for curve auto-regression

情形	拟合真温 T_c(K)	$\Delta T=T-T_c$ (K)	$\Delta\varepsilon_\lambda=\varepsilon_\lambda-\varepsilon_{\lambda c}$					
			λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
A	1784.69	15.31	−0.06755	−0.05523	−0.04567	−0.03505	−0.03125	0.02355
B			同 A					
C1	同 A		−0.06491	−0.05273	−0.04327	−0.03281	−0.02919	−0.02159
C2	同 A		−0.07020	−0.057734	−0.04807	−0.03730	−0.03330	−0.02552
D	1785.46	14.54	−0.06333	−0.05180	−0.04282	−0.03299	−0.03011	−0.02282
E1	1771.58	28.42	同 A					
E2	1798.13	1.87	同 A					
F1	1779.27	20.73	同 D					
F2	1806.05	−6.05	同 D					
G	1798.13	1.87	0.00229	0.00851	0.01350	0.01776	0.01394	0.01816

由表 2 可以得到如下结论:(1) 在理想情况下,即各通道均无测量误差且定点黑体炉参考温度 T' 亦无测量误差时,由逐步回归法拟合的目标真温 T_c 和各通道下的光谱发射率 $\varepsilon_{\lambda c}$ 与理想值符合得很好; (2) 选择不同的定点黑体炉参考温度 T',不会影响目标真温 T_c 和各通道下的光谱发射率 $\varepsilon_{\lambda c}$ 的拟合结果; (3) 当定点黑体炉参考温度 T' 无测量误差时,若各通道有相同的噪声,则只会影响各通道下光谱发射率 $\varepsilon_{\lambda c}$ 的拟合结果,而不影响目标真温 T_c 的拟合结果;若各通道的噪声不同,则各通道下的光谱发射率 $\varepsilon_{\lambda c}$ 及目标真温 T_c 的拟合结果都将受到较小的影响; (4) 当各通道均无测量误差,但定点黑体炉参考温度 T' 有测量误差时,则只影响目标真温 T_c 的拟合结果,而不影响各通道下光谱发射率 $\varepsilon_{\lambda c}$ 的拟合结果; (5) 即使在最接近实际情况下,即各通道有不同的噪声且定点黑体参考温度 T' 在测量过程中不稳定时,其目标真温 T_c 和各通道下光谱发射率 $\varepsilon_{\lambda c}$ 的拟合结果也和理想值符合得较好.

总之,在实际测量时,只要尽量减少各通道下辐射能量的测量误差且参考温度点 T' 稳

定,其目标真温 T_t 和各通道下光谱发射率 ε_λ 的拟合结果与实际值会符合得很好.

上海计量技术研究所研制的实用型金属凝固点黑体炉,包括铜、铝及锌点已于 1994 年通过部级鉴定,将成为我国多光谱辐射温度计的高精度参考点.

相信在多光谱辐射测温领域采用逐步回归法将会很好地解决目标真温及光谱发射率的测量等问题.

REFERENCES

1 Svet D Ya. *Sov. Phys. Dokl.*, 1975, **20**: 214~215

2 Svet D Ya. *High Temp. High Press.*, 1976, **8**: 493~498

3 Quinn T J. *et al. Rep. Prog. Phys.*, 975, **38**: 151~239

4 Babelot J F. *Noch M Proceedings of the EPTC*, Umea, Sweden, July 1988

5 Coates P B. *Metrologia*, 1981, **17**: 103~109

6 Hiernaut J P, *et al. High Temp. High Press.*, 1986, **18**: 617~625

7 Khan M A, *et al. Rev. Sci. Instrument*, 1991, **62**(2): 403~409

8 Xiao M Y. *Error Theory and its Applications*, Beijing: Metrology Publisling House(肖明耀. **误差理论与应用**. 北京:计量出版社), 1985, 312~334

9 Fang K T, *et al. Practical Regression Analysis*, Beijing: Science Press(方开泰,等. **实用回归分析**. 北京: 科学出版社), 1988, 204~232

10 Dai J M. *Study of the Technique of Multi-spectral Radiation Thermometry*, Ph. D. Thesis, Harbin Institute of Technology(戴景民. **多光谱辐射测温技术研究**. 哈尔滨工业大学博士学位论文), 1995

THEORETICAL STUDY OF MULTI-WAVELENGTH RADIATION THERMOMETRY

——Autosearch for Emissivity Expression General *

SUN Xiao-Gang　DAI Jing-Min　CONG Da-Cheng　CHU Zai-Xiang

(Department of Precise Instrument, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, *China)*

Abstract　In general, the dependence of the logarithm of the emissivity upon wavelength is usually used in the data processing measured by multi-wavelength pyrometer. In this paper, a new method for automatically searching the mathematical model between emissivity and wavelength was proposed. The effects of measurement errors on the temperature and emissivity were emphatically analysed when the above-mentioned method was used. The results of computer simulation match extremely well with the assumed data. The theory developed here has been shown to be an effective method to calculate both temperature and emissivity.

Key words　multi-wavelength thermometry, emissivity, fitting.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and foundation of Harbin Institute of Technology

Received 1997-10-10, revised 1997-12-18