发射率限定辐射测温原理

辛成运，杜雪平，郭飞强，申双林

中国矿业大学电气与动力工程学院，江苏 徐州　221116

摘　要　辐射测温技术随着辐射测量传感器技术的进步而不断进步，已经由单波长测温发展到多波长和多波段测温，由点温测量发展到二维甚至三维温度场测量。但是在辐射测温更精确反演方面，却很难克服因发射率未知性而引起的模型构建误差。发射率行为难以确定并极大地影响了测温精度，急需发展一种具有通用性，不受发射率具体行为限制，具有较高稳定性的辐射测温方法。双波长测温适用于发射率具有灰体行为的物体温度测量，一系列的发射率补偿算法和波长选择方法均未能很好地实现通用性测量，往往直接单色测量可能误差比比色法更小。多波长测温得到广泛应用，但并不是波长越多越好，发射率模型仍然具有较大局限性。提出了发射率直接限定算法和发射率松驰限定算法来反演温度。在发射率限定条件相同时，这两种方法是等价的。发射率松驰限定算法基于最小二乘算法和松驰因子进行真温求解。推导了松驰限定法的误差传递公式，发现在保证测量信号强度的前提下，λT 越小温度误差越小；发射率行为对温度相对误差具有重要影响，在相同的 λT 条件下，发射率随波长变化越大，在限定区间上覆盖越均匀，测量误差越小。但从直接限定算法可以看出所测波长数越多，测量误差越小。两种方法均可以看出，减少限定区间长度也可以显著地提高测量精度。

关键词　辐射测温；发射率限定；高温计；多波长

中图分类号：O432.1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0679-03

引　言

辐射测温技术随着辐射测量传感器技术的进步而不断进步，已经由单波长测温发展到多波长[1-4]和多波段测温[5-6]，由点温测量发展到二维[7-8]甚至三维温度场[9]测量。但是在辐射测温更精确反演方面，却很难克服因发射率未知性而引起的模型构建误差[10]。当发射率行为难以确定时，这极大地影响了测温精度，甚至出现荒谬的温度值[11]。发展一种具有通用性，不受发射率具体行为限制，具有较高稳定性的辐射测温方法，具有重要意义。在双波长测温中，在发射率具有灰体行为时测量误差很小[12]，而测量具有非灰特征时，一系列的发射率补偿算法[13]和波长选择方法[14]均未能很好地实现通用性测量，甚至 Khatibi 等[15]提出在非灰性较显著时，直接单色测量可能误差比比色法更小。在多波长测温中，Coat 等[11]研究发现并不是波长越多越好。Sun 等[1-2]提出了基于不同时刻建模的多波长反演算法，其中采用了发射率限定的思想，取得了较高的测量精度。本文提出了基于发射率限定的两种等价的辐射测温方法，并分析了测量误差的影响因素。

1　发射率限定算法

有效波长为 λ_i 时，辐射测量方程可以写为[11, 16-17]，

$$V_i=\frac{K_i\varepsilon_i C_1}{\lambda_i^5\exp(C_2/(\lambda_i T))},\ i=1,2,\cdots,n \tag{1}$$

其中，K_i 是仪器常数，与光谱响应和测量方位有关，ε_i 是光谱发射率，C_1 和 C_2 分别为第一和第二普朗克常数。经辐射方位定标后，光谱辐射强度可以方便测得，并可以表述为，

$$I_i=\frac{V_i}{K_i}=\frac{\varepsilon_i C_1}{\lambda_i^5\exp(C_2/(\lambda_i T))},\ i=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

1.1　直接限定法

假设待测物体表面的光谱发射率的限定区间为[$\varepsilon_{\min}$, $\varepsilon_{\max}$]，假设某次测量，波长 λ_1 下的真发射率取限定区间内的某一数值，所测辐射强度为 I_1，使用方程(2)可求得真温所在区间[T_{11}, T_{12}]。从概论角度，取其平均值，

$$T_{sm}=(T_{11}+T_{12})/2 \tag{3}$$

作为真温近似值，其最大误差为($T_{12}-T_{11}$)/2。如果 n 个测

收稿日期：2018-02-03，**修订日期**：2018-06-12

基金项目：国家自然科学基金项目(51406226)，江苏省自然科学基金项目(BK20150198)资助

作者简介：辛成运，1982年生，中国矿业大学电气与动力工程学院讲师　　e-mail：xchyun@cumt.edu.cn

量波长，每个波长均对应一个温度区间[T_{i1}，T_{i2}]，这 n 个测量区间的交集为，[max(T_{11}，…，T_{i1}，…，T_{n1})，min(T_{12}，…，T_{i2}，…，T_{n2})]，即[$T_{1\max}$，$T_{2\min}$]，取其平均值，可得，

$$T_{mm} = (T_{1\max} + T_{2\min})/2 \tag{4}$$

从式(4)可以看出，其最大误差为($T_{2\min} - T_{1\max}$)/2，增加测量波长数可能会减小测量误差。

1.2 松弛限定法

由方程(3)可得

$$\ln \frac{I_i \lambda_i^5}{C_1} = \ln\varepsilon_i - \frac{C_2}{\lambda_i T},\ i = 1,\ 2 \tag{5}$$

量级分析经常会有 $C_2/\lambda_i T \gg \ln\varepsilon$，从而方程(5)可写为，

$$\ln \frac{Ii\lambda_i^5}{C_1} = -\frac{C_2}{\lambda_i T_{bt}},\ i = 1,\ 2 \tag{6}$$

其中，T_{bt} 可由方程(6)进行最小二乘解得。很明显，T_{bt} 是真温区间的最小值。

基于 T_{bt} 的发射率会偏大，可以表述为，

$$\varepsilon_{bti} = I_i\lambda_i^5(\exp(C_2/(\lambda_i T_{bt})) - 1)/C_1 \tag{7}$$

引入发射率松弛因子

$$\varepsilon_i = R\varepsilon_{bti} \tag{8}$$

将方程(8)代入方程(5)可得，

$$\ln \frac{I_i\lambda_i^5}{C_1} - \ln(R\varepsilon_{bti}) = -\frac{C_2}{\lambda_i T_{bat}},\ i = 1,\ 2, \tag{9}$$

其中，T_{bat} 是基于松弛因子的真温逼近值，可以由式(9)通过最小二乘方法解得，根据最小二乘原理可以推得其测量误差方程为，

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{bat}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i^{-1} \ln(\varepsilon_i/R)}{C_2 \sum_{i=1}^{n} \lambda_i^{-2}} \tag{10}$$

令方程(10)左端等于 0，可得最优松弛因子为

$$R_b = \prod_{i=1}^{n} \varepsilon_i^{\frac{1}{\lambda_i M}},\ M = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\lambda_j} \tag{11}$$

令发射率限定区间为[$\varepsilon_{\min}$，$\varepsilon_{\max}$]，则

$$\varepsilon_{\min} < R_b < \varepsilon_{\max} \tag{12}$$

2 结果与讨论

定义相对误差为

$$E = \frac{|T_{\text{true}} - T|}{T_{\text{true}}} \times 100\% \tag{13}$$

2.1 等价性

两种方法看似差别很大，但其本质都是进行发射率限定，直接限定法很难看出影响精度的因素，而松弛限定法则非常容易看出影响测温精度的因素。但这两种方法本质上来说是等价的。松弛限定法的松弛因子取限定区间下限之上的某个值时，可以得到一个近似温度值和一组发射率分布，该组中的发射率都正好在发射率限定区间内时，可以得温度下限，反之可得温度上限，该温度区间与[$T_{1\max}$，$T_{2\min}$]是相同的。

2.2 影响因素分析

由式(10)和式(13)可得，

$$E = \frac{T_{\text{bat}}\lambda_m \left| \sum_{i=1}^{n} \lambda_i^{-1} \ln(\varepsilon_i/R) \right|}{C_2 \sum_{i=1}^{n} \lambda_i^{-1} \frac{\lambda_i}{\lambda_m}} \tag{14}$$

其中，λ_m 是平均波长，λ_i/λ_m 的量级为 1。由式(14)可以看出，当松弛因子相同，发射率相同时，$T_{\text{bat}}\lambda_m$ 越大相对误差越大。$T_{\text{bat}}\lambda_m$ 的值也不能太小，必须确保测量信号的信噪比满足测量要求。

在式(14)中，$\left| \sum_{i=0}^{n} \lambda_i^{-1} \ln(\varepsilon_i/R) \right|$ 的值表征了发射率行为对相对误差的影响。当松弛因子取限定区间中值时，发射率分布在中值两侧时相对误差较小。该方法与比色法形成了鲜明的对比：当发射率行为近似灰体时采用比色法可以取得很高的测量精度，然而当发射率随波长变化较大时采用发射率限定方法可以取得较高的温度反演精度。因此，发射率的行为识别可能为温度反演方法的自适应选取提供参考，从而进一步提高辐射测温精度。同时还可以看出，减小限定区间长度可以显著地提高测量精度。直接限定法是取各波长下温度有效区间的交集，因此波长数越多，交集会越小，测量误差会越小。

3 结 论

提出了两种发射率限定辐射测温算法，这两种方法形式不一样，但本质上是等价的。采用第二种方法可以很方便地进行误差分析，可以得出以下结论：

在保证测量信号强度的前提下，λT 越小误差越小；相同的 λT 条件下，所测波长下发射率变化越大，在限定区间上覆盖越均匀，测量误差越小。从直接限定方法可以轻松看出所测波长数越多，测量误差越小。该方法与比色法形成了鲜明的对比：当发射率行为近似灰体时采用比色法可以取得很高的测量精度，然而当发射率随波长变化较大时采用发射率限定方法可以取得较高的温度反演精度。因此，发射率的行为识别可能为温度反演方法的自适应选取提供参考，进一步提高辐射测温精度，从而提高测温方法的通用性。

References

[1] Sun X G, Yuan G B, Dai J M, et al. International Journal of Thermophysics, 2005, 26(4): 1255.
[2] Xing J, Rana R S, Gu W. Optics Express, 2016, 24(17): 19185.
[3] Daniel K, Feng C, Gao S. Measurement, 2016, 92: 218.
[4] Gao S, Wang L X, Feng C, et al. Optical Review, 2015, 22(4): 605.

[5] Fu T R, Zhao H A, Zeng J, et al. Applied Optics, 2010, 49(31): 5997.
[6] Fu T R, Cheng X F, Fan X L, et al. Metrologia, 2004, 41(4): 305.
[7] Hunter G B, Allemand C D, Eagar T W. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1985, 520: 40.
[8] Zhang X Y, Cheng Q A, Lou C, et al. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33: 2755.
[9] Li, W H, Lou C, Sun Y P, et al. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(2): 416.
[10] ZHU Ze-zhong, SHEN Hua, WANG Nian, et al(朱泽忠，沈　华，王　念，等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(2): 333.
[11] Coates P B. Metrologia, 1981, 17(3): 103.
[12] Moore A S, Benstead J, Ahmed M F, et al. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(11): 11E313.
[13] Madura H, Piatkowski T. Infrared Physics & Technology, 2004, 46(1-2): 185.
[14] Tapetado A, Díazálvarez J, Miguélez M H, et al. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1380.
[15] Khatibi P D, Henein H. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2014, 45(8): 736.
[16] Muller B, Renz U. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(8): 3366.
[17] Thevenet J, Siroux M, Desmet B. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(6): 753.

Radiation Thermometry Algorithms with Emissivity Constraint

XIN Cheng-yun, DU Xue-ping, GUO Fei-qiang, SHEN Shuang-lin
School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou　221116, China

Abstract　Radiation thermometry techniques have been developed from monochrome thermometry for single-point temperature measurement to multi-spectral thermometry for 2D or 3D temperature field measurement in the past few years with the development of radiation measurement sensors, but it is difficult to overcome the temperature deter error resulting from the modeling of emissivity. Determining emissivity behaviors is difficult and important for decreasing temperature errors and a general method is required to avoid the influence of emissivity behaviors. Dual-wavelength thermometry techniques have been developed to determine the temperature on a gray-body surface, and a series of compensation algorithms and wavelength choosing algorithms have been proposed to decrease the temperature error in dual-wavelength thermometry but they still have been affected dramatically by emissivity behaviors. Sometimes the error of dual-wavelength thermometry using the ratio method is greater than that of monochrome thermometry. Multi-wavelength thermometry has been widely used, but the number of measurement channels and emissivity behaviors still have important influences on temperature errors. The direct emissivity constraint algorithm and the emissivity constraint algorithm using a relaxing factor for radiation thermometry have been developed in this paper to determine the true temperature approximately. There is equivalence between the two algorithms as the emissivity constraint is the same. The emissivity constraint algorithm using a relaxing factor utilizes the least square algorithm instead of the ratio method to determine the true temperature. The error equation of the radiation thermometry algorithm with emissivity constraint using a relaxing factor has been deduced. It can be found that decreasing the value of λT can decrease the relative error of temperature as the signal-to noise ratio for each channel is big enough to keep accurate signals. Emissivity behaviors have an important influence on temperature errors, and the obvious emissivity variation with wavelength within the constraint interval can make temperature errors decrease. The direct emissivity constraint algorithm shows that increasing the number of channels may decrease temperature errors. It is obvious from the two methods that decreasing the length of the shrunk range of emissivity can decrease temperature errors dramatically.

Keywords　Radiation thermometry; Shrunk range of emissivity; Pyrometer; Multi-wavelength

(Received Feb. 3, 2018; accepted Jun. 12, 2018)