

金属红外辐射特性及其温度测量的智能化

陈 衡

(华北电力学院基础科学部, 河北, 保定)

摘要——本文分析了通用红外测温方法的弊病, 以纯铝和铜为例, 从理论上计算了金属材料的热辐射特性, 并在此基础上, 提出了测量金属目标真实温度的专用智能化红外测温仪的设计思想。

关键词——发射率, 测温误差, 智能化。

1. 引 言

目前通用的红外测温仪, 无论全辐射型测温仪还是亮度型测温仪, 都不能得到被测目标的真实温度 T , 而只能分别给出目标的辐射温度 T_r 或亮度温度 T_B 。即使是使用双波段测温仪, 当目标不是灰体时, 也只能测得不等于真实温度的色温 T_c ; 其根本原因是: 通常的红外测温方法都要受到目标发射率不等于 1 的限制。

根据红外测温仪的标定方法, 如果目标真实温度为 T , 它们的全发射率和在波长 λ 处的光谱发射率分别为 $\varepsilon(T)$ 和 $\varepsilon(\lambda, T)$, 则全辐射、亮度和双波段三种类型红外测温仪的测量结果, 与目标真实温度 T 的相对偏差分别为

$$\frac{\Delta T_r}{T} = \frac{T - T_r}{T} = 1 - \sqrt[4]{\varepsilon(T)}; \quad (1)$$

$$\frac{\Delta T_B}{T} = \frac{T - T_B}{T} = \frac{\lambda T \ln \varepsilon(\lambda, T)}{\lambda T \ln \varepsilon(\lambda, T) - C_2}; \quad (2)$$

$$\frac{\Delta T_c}{T} = \frac{T - T_c}{T} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} T \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} / \left(\frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} T \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} - C_2 \right); \quad (3)$$

式中, λ 和 λ_1 、 λ_2 分别是亮度测温仪和双波段测温仪选用的中心工作波长,

$$C_2 = 14387.9 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

是第二辐射常数。

式(1)表明: 对于发射率很低的铝和铜金属材料而言, 全辐射型测温方法将会产生很大的测量误差^[1]。Bish R.^[2]认为, 全辐射测温仪的误差是一个百分常数。显然, 这只有当物

体全发射率不随温度变化时才是正确的。但是,全发射率 $\varepsilon(T)$ 是温度 T 的函数。因此,这个百分误差也是随被测目标的温度变化而变化的。

式(2)表明,亮度测温方法虽然比全辐射型测温方法测量误差小,但是,对于象铝和铜这样的发射率极低的金属目标而言,其误差仍然是很可观的^[1]。有人提出,为了降低上述误差,工作波长应该尽量选用光谱发射率较高的短波长区(例如选用 $\lambda=0.5\mu\text{m}$ 或 $0.47\mu\text{m}\pm 0.01\mu\text{m}$)。这对于测量高温金属目标温度的测温仪也许是可行的;然而,对于象电力系统接点这样的中低温测量来讲,短波长处的辐射功率十分微弱,因此,仍然难以采用。

文献[2]认为,象铝这样的发射率很低的金属材料,只宜用比色测温仪。但是,对于铝和铜这样的金属材料,在短波长区并非灰体,即使选用两个十分靠近的中心工作波长,其光谱发射率的比值 $\varepsilon(\lambda_1, T)/\varepsilon(\lambda_2, T)$ 仍不等于 1,而且,这个比值还会随着目标温度 T 变化。因此,从式(3)看出,在这种情况下,双波段测温仪还是不能测得目标的真实温度。另外,当测量温度较低的目标时,因辐射信号微弱,仪器灵敏度低,使用困难。还有,双波段测温仪的结构复杂,造价昂贵,也不利于推广应用。

为了解决实际目标发射率不等于 1 所引起的困难,现有的通用红外测温仪在结构设计上,大多数通过调整电路放大倍数的方法来修正发射率值的影响。但是,由于发射率是目标温度的函数,所以,当测量未知温度的目标时,上述修正方法不可能收到一致性良好的效果。

本文根据对纯铝和纯铜样品红外发射率理论计算得到的规律,提出可以测量金属目标真实温度的新型专用红外测温仪的设计考虑。

2. 金属材料的热辐射特性

对于金属良导体而言,除了在波长很短的近红外区以外,材料的法向光谱发射率可以用 Hagen-Rubens 关系式计算^[3]

$$\varepsilon_n(\lambda, T) = 36.5 \left[\frac{\rho(T)}{\lambda} \right]^{1/2} - 666.7 \frac{\rho(T)}{\lambda} + \dots \quad (4)$$

式中, $\rho(T) = \rho_{273} [1 + \alpha(T - 273)]$ 是材料在温度 T (K) 时的电阻率; α 是材料的电阻率温度系数。对于纯铝和铜材料而言,我们取参数值如下:

$$\begin{aligned} \rho_{273}^{(\text{Al})} &= 2.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}; & \alpha^{(\text{Al})} &= 4.7 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}; \\ \rho_{273}^{(\text{Cu})} &= 1.6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}; & \alpha^{(\text{Cu})} &= 4.3 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}; \end{aligned}$$

计算出铝在 233~773 K 之间的法向光谱发射率,其中部分结果如图 1 所示。对于铜材料而言,除数值略低于铝的相应值以外,也有类似的变化规律。根据图 1 所示的法向光谱发射率,我们利用加权纵坐标法^[8]:

$$\varepsilon_n(T) = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_n(\lambda, T) L_{\lambda\text{bb}}(T) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{\lambda\text{bb}}(T) d\lambda}; \quad (5)$$

式中, $L_{\lambda\text{bb}}(T)$ 是黑体光谱辐亮度,计算了在每一种温度下包括 98% 以上的总辐射,从而得到了如图 2 所示的纯铝和纯铜材料的法向全发射率随温度变化的关系曲线,由该图可以看

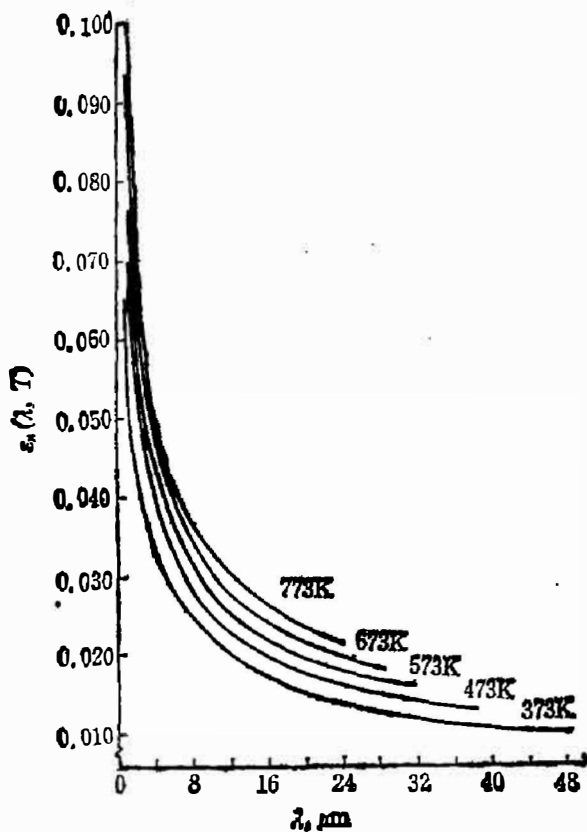


图1 纯铝在不同温度下法向光谱发射率的理论值

Fig. 1 Normal spectral emissivities of pure aluminium at different temperature (theoretical values).

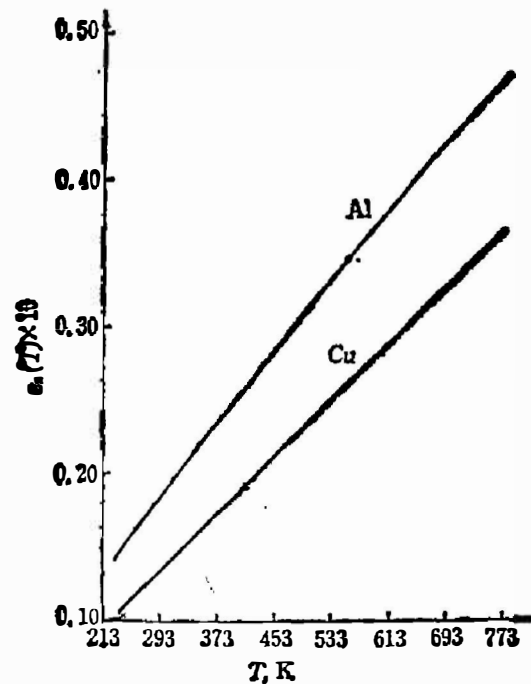


图2 纯铝和纯铜的法向全发射率随温度的变化 (其中纵坐标扩大了十倍)

Fig. 2 Normal total emissivities vs temperature for pure aluminium and copper (The ordinate is multiplied by 10 times).

出,在所考虑的温度范围内,铝和铜的法向全发射率与温度 T 近似成线性关系,平均斜率,铝约为 $6.08 \times 10^{-5}/\text{K}$,铜约为 $4.74 \times 10^{-5}/\text{K}$ 。

应该指出, Ramanathan^[4,5] 等人,利用 Davisson-Weeks 理论

$$\varepsilon_n(T) = 0.751(T\rho)^{1/2} - 0.632(T\rho) + 0.670(T\rho)^{3/2} - 0.607(T\rho)^2, \quad (6)$$

计算了铜和铝的半球全发射率,他们的结果与本文提供的结果相比,基本上满足 $\varepsilon_n(T)/\varepsilon_h(T) \approx 1.2$ 的关系^[6]。但是, Ramanathan 等人利用瞬态量热技术 (Transient colorimetric technique), 在 150~1100 K 的温度范围内,先后测量了非常纯的铝和铜电解抛光样品的半球全发射率,虽然也得到了 $\varepsilon_n(T) \sim T$ 的近似线性关系,但平均斜率普遍低于根据 Davisson-Weeks 理论预言的值,而且,这种理论与实验结果的偏差随着温度的升高而增加。然而, Parker 和 Abbott 曾指出^[7], 对于 $\rho T < 0.1$ 的良导体而言,在金属中传导电子具有零弛豫时间的特殊情况下, Davisson-Weeks 理论是适用的,而在具有有限非零弛豫时间的情况下,将使 $\varepsilon_n(T)$ 值在所有温度下都降低。这后一种情况,也许刚好导致 Ramanathan 等人所用的非常纯样品的实验结果。因此,可以预料,对于纯度较低的实用样品而言,其中传导电子的碰撞弛豫时间为零,所以,本文提供的计算结果以及 Davisson-Weeks 理论,均可认为与实际情况相符。

3. 专用智能化红外测温仪设计考虑

上述讨论表明,对于象铝和铜这样的金属材料而言,因为发射率很低,所以运用通常的红外测温方法,将会导致测温结果与真实温度有很大偏差。加上发射率又是波长和温度的函数,不能随意当作常数处理。因此,即使运用常规的调整电路放大倍数的方法来修正发射率值的影响,也不会收到很好的效果。

但是,本文提供的铝和铜材料发射率的理论计算结果表明,这类材料的光谱发射率和全发射率都有很好的变化规律,因而导致目标辐射温度及亮度温度与真实温度的偏差,也按一定规律变化^[1]。这样,就为我们设计智能化红外测温仪提供了理论基础。这种新型的智能化红外测温仪,借助现代微型计算机技术,不仅具有线性化处理功能(即把与温度成四次方关系的输出信号自动地完成线性化处理),而且还将具有发射率识别功能(或者叫测温误差识别与校正功能),从而,根据被测目标发射率变化规律,自动地完成对发射率值的修正,以便最终获得目标的真实温度。有关这类红外测温仪的实用结构细节,我们将另文报道。

4. 结 论

通过使用微型计算机来使红外测温仪达到智能化,它的理论依据是金属材料红外发射率及由此引起的测温误差的变化规律。如果使红外测温仪首先具备了对目标发射率的识别和处理功能,那末,自然也就容易做到对测温结果的合理修正。

与通常的双波段测温仪相比,无疑会大大简化仪器的结构,甚至在很多应用场合,完全可以取代双波段测温仪。与通用的全辐射型或亮度型测温仪相比,也会明显提高仪器的测量准确性和性能/价格比。但是,不同材料构成的被测目标,尤其在具有不同的表面状态的情况下,发射率的变化规律是不相同的。因此,这样的智能化红外测温仪,将会降低它的通用性,而适合于目标确定的专门测温场合使用,但是,这可以通过相应的程序设计来加以弥补。然而,为了向这类红外测温仪中的计算机提供可靠的软件,尤其要解决好识别功能中的信息反馈问题,使其达到实用化,还需要对各种各样的实际被测目标的红外辐射特性,进行广泛和深入的理论与实验研究。

参 考 文 献

- [1] 陈衡,华北电力学院学报,(待发表)。
- [2] Bish R. and Lecouteux M., *Pyrometric a Rayonnement selected papers on infrared radiation thermometry* 2(Oct. 1976), 24.
- [3] 陈衡编著,红外物理学,北京:国防工业出版社,1985.
- [4] Ramanathan K. G. and Yen S. H., *J. Opt. Soc. Am.*, **67**(1977), **32**.
- [5] Estalot E. A. and K. G. Ramathan, *J. Opt. Soc. Am.*, **67**(1977), **39**.
- [6] Kruse P. W. et al., *Elements of Infrared Technology: Generation Trans mission and Detection* Wiley, (1963).
- [7] Parker W J., and G. L. Abbott, «Symposium on Thermal Radiation of Solids», S. Katzoff edited, NASA Sp-55(1965), 11.

INFRARED RADIANT PROPERTIES OF METALS AND THEIR INTELLECTUALLIZED TEMPERATURE MEASUREMENT

CHEN HENG

(North China Institute of Electric Power, Department of Basic Science, Baoding, Hebei, P. R. C.)

ABSTRACT

Maladies of commonly-used infrared thermometric methods are analysed. Taking pure aluminum and copper as examples, the thermal radiant properties of the metals are calculated theoretically. An idea of design for a special-purposed intellectualized infrared thermometer used to measure the true temperature of the metal target is presented.