

一种测量常温物体发射率方法的实验研究

朱学锋* 张才根

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——提出一种测量常温物体发射率的方法, 引入了一个描述物体反射特性的参量, 从理论上分析了该方法的可行性, 并进行了实验测量, 给出了初步实验结果。

一、引 言

红外测温技术具有响应速度快、分辨率高、非接触等优点, 广泛用于科学研究以及工业生产过程中的温度测量和产品质量检验。然而, 物体发出的辐射能量不仅由其自身温度 T 决定, 而且受物体发射率 ϵ 的影响。为了消除 ϵ 对测量真实表面温度的影响, 除用比色测温计或加全反射半球前置反射器的测温计外, 全辐射测温仪或部分能量测温仪都需进行发射率校正。目前测量物体发射率的方法大致可分为三类, 即反射率法、辐射计法和卡计法^[1,2]。本文提出一种测量常温物体发射率的方法, 进行了理论分析和实验测量, 给出了初步的实验结果, 并引入一个参数来描述物体的反射特性。

二、测 量 原 理

我们在研究环境辐射对目标热辐射特性测试的影响时曾指出^[3]: 当用红外测温仪对准被测目标进行温度测量时, 进入红外测温仪视场的辐射能量不只是目标本身发射的辐射, 而且还有目标对周围环境物体辐射(简称环境辐射)的反射辐射。曾在文献[3]中提出了描述环境辐射的方法, 即把落到目标上的总的环境辐照度等效成温度为 T_b 的黑体辐射, 称 T_b 为环境辐射温度。红外测温仪接收到的辐射功率为

$$P = \frac{D_0^2}{4} \omega \tau_0 \tau_a \left[\epsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \overline{W}(\lambda, T) d\lambda + \rho \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \overline{W}(\lambda, T_b) d\lambda \right], \quad (1)$$

式中 T 、 ϵ 和 ρ 分别为物体的温度、发射率和反射率; D_0 和 ω 分别为测温仪的入射孔径和视

本文 1985 年 12 月 27 日收到。最后修改稿 1987 年 2 月 26 日收到。

* 华中工学院光学系 85 届毕业生, 现为上海电子光学研究所研究生。

场角; τ_0 和 τ_a 分别为测温仪和大气在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 光谱区内的平均透过率。对于不透明灰体, 有 $\varepsilon + \rho = 1$ 。当 $T_b = T$ 时, 式(1)可改写成

$$P = \frac{1}{4} D_0^2 \omega \tau_a \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \overline{W}(\lambda, T) d\lambda, \quad (2)$$

即 P 与被测物体的表面发射率无关。实验测量表明, 在室内常温环境下, 环境辐射温度 T_b 与被测常温物体温度相近, 这时, 用红外测温仪测量发射率各不相同的常温物体的温度时,

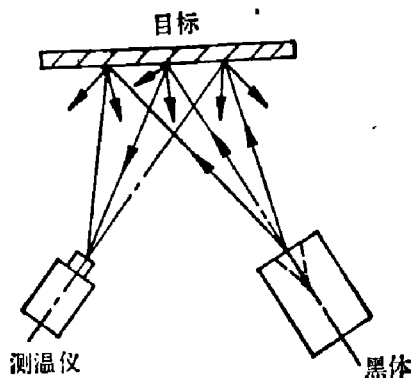


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up.

测得的温度相差不大。但在室外, 由于天空背景的温度低(一般在 -30°C 以下), 用红外测温仪测量温度相同而发射率不同的物体时, 测得的辐射温度就会不同, 发射率低的, 测得的温度亦低。

测量物体的发射率常常是通过测量其反射率来实现的。我们在研究环境辐射的改变对热成像系统灵敏度方程的影响时, 从理论上证明了用改变环境辐射的办法可测定目标的反射率, 进而得到物体的发射率^[8]。本文的方法依此为原理, 在室内采用主动式辐射源测定物体的反射率。实验装置如图1所示, 这里用黑体源作为外加主动式辐射源。

红外测温仪中探测器的输出信号电压与接收到辐射功率成正比, 为此, 我们用电压信号 V 代表接收到的辐射功率。当黑体源对准被测目标时(黑体源、测温仪与目标法向夹角很小), 测温仪的输出信号电压为

$$V(T_{e1}) = \varepsilon V(T) + \rho V(T_b) + \rho V(T'_b), \quad (3)$$

式中 $V(T)$ 、 $V(T_b)$ 、 $V(T'_b)$ 各为红外测温仪对准温度为 T 、 T_b 、 T'_b 的黑体源时的输出信号电压, 而 T'_b 是外加黑体源辐射到目标上的辐照度的等效黑体温度。去掉黑体时, 红外测温仪的输出信号电压为

$$V(T_{e2}) = \varepsilon V(T) + \rho V(T_b). \quad (4)$$

由式(3)减去式(4), 得

$$\rho = \frac{V(T_{e1}) - V(T_{e2})}{V(T'_b)}. \quad (5)$$

为测量 $V(T'_b)$, 在目标处放一块反射特性与被测目标相近的参考板, 且参考板的发射率 ε_0 是已知的, 按上述相同方法进行测量, 设有黑体源时测温仪输出信号为 $V(T'_{e1})$, 无黑体源时为 $V(T'_{e2})$, 则得

$$V(T'_b) = \frac{V(T'_{e1}) - V(T'_{e2})}{1 - \varepsilon_0}. \quad (6)$$

三、理论分析

在 $V(T'_b)$ 的测量过程中, 要求两次测量的材料的反射特性数据相近。所谓反射特性就是物体的反射能量在反射半球空间的分布特性。为便于描述我们引入一个参量 β , 定义为

$$\beta = P_\theta / P_z, \quad (7)$$

这里 P_z 是在物体表面整个半球空间内的反射能量, P_θ 是在某一方向上单位立体角内的反

射能量。并有

$$P_z = \int_{\text{半球空间}} P_\theta d\Omega. \quad (8)$$

β 表征了反射能量的分布, 对理想的漫反射体, 由于其表面是一个朗伯表面, 因而它的 β 值可由理论推出, 如图 2 所示: 由于 $P_\theta = P_0 \cos \theta$, 所以 $P_z = P_0 \int_{\text{半球空间}} \cos \theta d\Omega$ 。又由于 $d\Omega = \sin \theta \cdot d\theta d\psi$, 故有

$$\beta = P_\theta / P_z = P_0 \cos \theta / P_0 \int_{\text{半球空间}} \cos \theta d\Omega = \frac{1}{\pi} \cos \theta,$$

所以

$$|d\beta/d\theta| = \frac{1}{\pi} \sin \theta,$$

得

$$\beta_{\max} = \frac{1}{\pi}.$$

对实际物体来说, 很难用一个确切的表达式来表达 β 值, 也没有必要, 因为在多数场合我们更关心反射能量随取向角 θ 变化的大小。为了测量方便和归一化, 我们用 $\alpha = \beta_\theta / \beta_{\max}$ 来代表这种变化。 β_θ 是与 β_{\max} 成 θ 角方向的 β 值。代入式 (7), 得

$$\alpha = P_\theta / P_{\max} = V_\theta / V_{\max}, \quad (9)$$

式中 V_{\max} 是按式 (3) 测得的最大的 $V_1(T_\theta)$ 值, V_θ 是在此基础上将样品转动 θ 角后测得的 $V_1(T_\theta)$ 值。这样, 就可以测得一个表征物体反射能量分布变化的参量 α 。该 α 值可定性描述物体的反射特性。因为 $0 \leq \alpha \leq 1$, 所以我们可以把 $[0, 1]$ 分成几个区域, 并认为 α 值在同一区域的物体都具有相近的反射特性。我们测试了几种样品的 α 值, 示于表 1, 该结果是在 $\theta = 20^\circ$ 的条件下得到的。

根据表 1, 可以认为铜板和铝板具有相近的反射特性, 而辐射参考板、氧化铁板、灰塑料和白漆的反射特性也相近。

根据以上讨论, 可证明式 (6) 中的 $V(T_b)$ 只与被测材料的 ρ 、 β 及黑体温度 T_b 有关。在推导中, 我们设 $M(T_{bb})$ 表示黑体温度为 T_{bb} 的物体在测温仪工作波段内的积分辐射度。如图 3 所示, 将黑体源当作面积为 S_1 、发射率为 1 的小面源。这样, 由黑体发出的垂直于黑体表面的辐射功率为

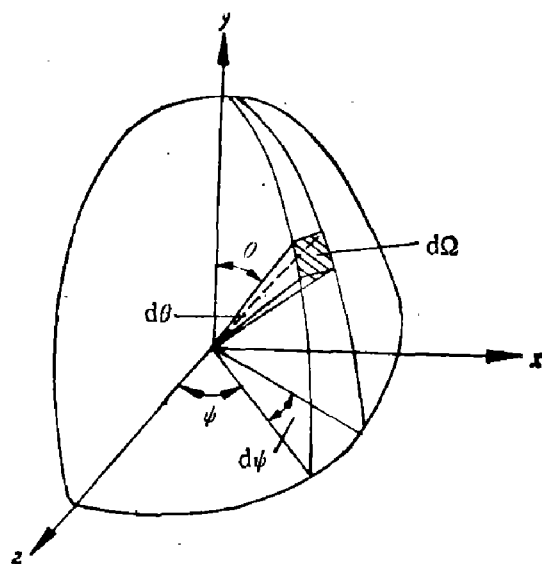


图 2 立体角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solid angle.

表 1 不同样品的 α 值

Table 1 α values of various samples.

样品名称	铜板	铝板	辐射参考板	氧化铁板	灰塑料	白漆	无光黑漆
α	0.035	0.02	0.5	0.48	0.53	0.6	0.84

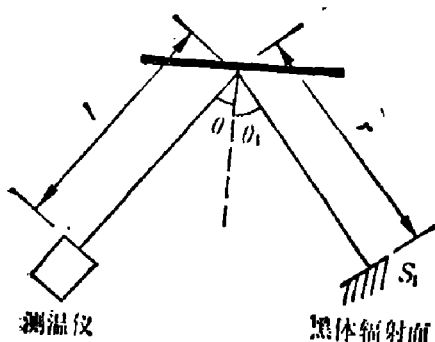


图3 测试位置
Fig 3 Configuration
of measurement

$$P_1 = M(T_{bb})S_1/\pi. \quad (10)$$

目标接收到的黑体辐射功率为

$$P_2 = \Delta\Omega M(T_{bb})S_1 \cos \theta_1 / \pi, \quad (11)$$

式中 $\Delta\Omega$ 为测温仪视场范围内的目标面积 S_2 对黑体所张的立体角, 一般可以取 $\Delta\Omega = S_2/\gamma^2$, 所以有

$$P_2 = M(T_{bb})S_1S_2 \cos \theta_1 / \pi\gamma^2. \quad (12)$$

测温仪所接收到的总功率为目标自身辐射功率 P_3 、反射的环境辐射功率 P_4 和黑体辐射在目标上的反射功率的和, 应为

$$P = P_3 + P_4 + \rho\beta(\theta) M(T_{bb})S_1S_2 \cos \theta_1 / \pi\gamma^2. \quad (13)$$

如果被测物体的温度、位置不变, 挡掉黑体辐射后接收到的总功率为

$$P' = P_3 + P_4. \quad (14)$$

由式(13)减去式(14), 得

$$P - P' = \rho\beta(\theta) M(T_{bb})S_1S_2 \cos \theta_1 / \pi\gamma^2. \quad (15)$$

取 $l = \gamma$, 则 $\gamma = S_2/\gamma^2 = S_2/l^2$ 是测温仪的立体视场角, 是一个常数。 $M(T_{bb})$ 只是黑体温度 T_{bb} 和测温仪工作波段的函数, 所以, 当位置固定以后, $P - P'$ 的值就只与 β 、 ρ 及 T_b 有关。由式(5)可知

$$V(T'_b) = C\rho(\theta) M(T_{bb})S_1S_2 \cos \theta_1 / \pi\gamma^2, \quad (16)$$

式中 C 是比例常数。对于理想平面反射镜 $\rho = 1$, 且 β 只在特定的方向等于 1, 在其余方向为 0。所以, 当我们用一面反射镜代替物体时, 测温仪所接收到的辐射为

$$P'' = P_4 + M(T_{bb})S_1S_2 \cos \theta_1 / \pi\gamma^2. \quad (17)$$

当黑体温度 T_b 比环境辐射温度 T_0 高得多时,

$$P'' \approx M(T_{bb})S_1S_2 \cos \theta_1 / \pi\gamma^2, \quad (18)$$

$$V'(T'_b) = CM(T_{bb})S_1S_2 \cos \theta_1 / \pi\gamma^2. \quad (19)$$

因此, 如果已知被测物体的 β 值, 用一平面反射镜测得 $V'(T'_b)$ 后, 物体的 $V(T'_b) = \beta V'(T'_b)$ 。而 β 值的确定可用 α 值估计, 即看它的 α 值在 $[0, 1]$ 范围中的哪一个区域, 选用该区域的典型 β 值进行计算。各区域中的典型 β 值可事先由实验测定, 采用式(9)估算 α 值是很方便的。

四、实验及结果

根据前述原理, 我们对几种不同材料的发射率进行了测量。首先对它们的 α 值进行估计, 发现黑涂料板、黑纸板、红砖等的 α 值均大于 0.8, 而辐射参考板和灰塑料的 α 值在 0.5 左右。将 α 大于 0.8 的材料归为一类, 把 α 在 0.5 左右的材料归为第二类, 并认为属于同一类的材料的反射特性是相近的。对具有相近的反射特性的材料, 在其它条件相同的情况下测得的 $V(T'_b)$ 是相同的。因此我们分别在两类材料中各选一种材料, 用其它方法测出它们的反射率, 按式(6)得到各自的 $V(T'_b)$, 再求出其余材料的发射率。表 2 将本文的实验结果与文献[3]的结果进行了对照。

表2 不同材料发射率测量结果

Table 2 Measured results of emissivity for various materials.

材 料	$V_1(T_b)$				$V_2(T_b)$			
	黑色涂板 1#	黑色涂板 2#	黑纸板	红 砖	辐射参考板 1#	辐射参考板 2#	辐射参考板 3#	灰塑料
本文方法	0.881	0.925	0.790	0.925	0.915	0.909	0.880	0.890
圆筒法	0.881	0.927	0.780	0.926	0.915	0.910	0.905	0.883

表3 本文与 PE983 测得的发射率结果的比较

Table 3 Comparison of emissivity measured by PE983 and the authors.

材 料	黑 漆	白 漆	铝 板
红外分光光度计	0.99	0.70	0.43
本 文 方 法	0.97	0.64	0.40

由表2可以看出,两种方法测得的结果是很吻合的。所得的结果与以往报道的结果也是一致的。为了进一步验证实验结果,我们又用无光黑漆板、白漆板和铝板,作为具有三种不同反射特性的材料进行测量,并将结果与用 PE983 红外分光光度计测得的结果作比较,列于表3。由于红外分光光度计测得的是光谱发射率(光谱反射率),而本文提出的方法测得的是积分发射率,所以表3中红外分光光度计的结果是光谱发射率在测温仪工作波段内的平均值,这里求得的是近似值。表3表明,两种方法的结果基本吻合。

由于高发射率材料的反射率很低,所以式(5)中 $(V_1 - V_2)$ 值是很小的。因此,测温仪必须具有较高的灵敏度才能保证测量结果有足够的有效数字。我们使用改进型 HD-1 红外测温仪,测温范围为 $0 \sim +50^\circ\text{C}$, $\text{NETD} \pm 0.02^\circ\text{C}$, 黑体温度为 400°C 。得到的结果可达到两位以上的有效数字,已能满足一般工程测温的要求。

本工作的结果是初步的,关于测量误差问题,尚待进一步分析研究。

参 考 文 献

- [1] Harmon H. Plumb, *Temperature, Its measurement and control in Science and Industry* Vol. 4, P. 1.
- [2] 奚同庚,无机材料热物性学,上海科学技术出版社,1982.
- [3] 张才根、张幼文,物理学报,30(1981), 953.
- [4] 张幼文、张才根,物理学报,29(1980), 829.
- [5] Zhang Y. W. et al., *Appl. Opt.*, 25(1986), 3683.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF MEASURING METHOD FOR EMISSION OF OBJECT AT AMBIENT TEMPERATURE

ZHU XUEFENG* ZHANG CHAIGEN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A method for measuring the emissivity of an object at ambient temperature is presented. A parameter describing the reflective characteristics of the object is introduced. The feasibility of this method is analysed theoretically. The primary experimental results which show the correctness of the method are given.

* Graduate student in Shanghai Institute of Electro-Optics