

高灵敏红外测温仪用于双园筒法 测量比辐射率

张才根

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

用完整的热成像系统灵敏度方程, 研究了高灵敏红外测温仪(红外辐射计)用于双园筒法测量物体比辐射率时, 其噪声等效反射率差 $NE\Delta\rho$ 与噪声等效温差 $NETD$ 的关系. 对«风云一号»气象卫星辐射致冷器辐射定标用的蜂窝平面黑体源的比辐射率 ε 进行了测试, 其结果与用 Gouffe 公式及能量选加原理对蜂窝面源平均比辐射率的计算值吻合得很好. 指出了提高蜂窝面源比辐射率的有效方法.

关键词: 红外测温仪, 比辐射率, 双园筒法.

双园筒法是测定常温物体比辐射率的一种较好的方法, 要提高测量灵敏度和精度, 红外测温仪(作红外辐射计用)的性能(灵敏度和稳定性等)是至关重要的. 在参考文献[1]中, 我们考虑了相邻象元对应的目标温差, 比辐射率差及它们所受环境辐射温差对热成像系统灵敏度方程的影响, 从而获得了完整的热成像系统灵敏度方程, 由此从理论上证明了可以用改变环境辐射温度的方法测量物体的比辐射率. 因此, 我们研究了红外测温仪用于双园筒法测比辐射率时, 系统噪声等效反射率差 $NE\Delta\rho$ 与其噪声等效温差 $NETD$ 的关系, 并对“风云一号”气象卫星辐射致冷器地面定标用的蜂窝平面黑体源的比辐射率进行了测试, 其结果与用 Gouffe 公式和能量选加原理计算值吻合得很好. 研究发现, 只要有效地减小窝元表面的线宽度, 就可提高蜂窝面源的平均比辐射率.

1 噪声等效反射率差与噪声等效温差的关系

完整的热成像系统灵敏度方程^[1]为:

$$\varepsilon \Delta T + \frac{y_T - y_{T0}}{x_T} \Delta \varepsilon + \rho \frac{x_{T0}}{x_T} \Delta T_b = NETD; \quad (1)$$

式中系统噪声等效温差 $NETD(k)$ 为

$$NETD = \frac{4F \sqrt{\Delta f}}{\delta \tau_a \tau_0 D_0 D^* \sqrt{W} x_T}. \quad (2)$$

而 $x_T, x_{T_b}, y_T, y_{T_b}$ 为

$$x_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial W(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda, y_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T) d\lambda, \quad (3)$$

$$x_{T_b} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial W(\lambda, T_b)}{\partial T_b} d\lambda, y_{T_b} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_b) d\lambda, \quad (4)$$

其中, T 为物体温度(K), T_b 为物体受周围环境辐照的环境辐射温度(K); ε, ρ 分别为物体的比辐射率和反射率; $W(\lambda, T)$ 和 $W(\lambda, T_b)$ 分别表示温度为 T 和 T_b 时的黑体光谱辐射出射度 ($\text{Wcm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$); $\partial W(\lambda, T)/\partial T$ 和 $\partial W(\lambda, T_b)/\partial T_b$ 为相应的光谱微分辐射出射度 ($\text{Wcm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$); F, D_0 为光学系统的 F 数及入瞳; τ_a 和 τ_0 分别为大气和光学系统在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 光谱区平均透过率; ω 为视场立体角; δ 为信号过程因子; D^* 为探测器的探测率 ($\text{cm Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$); Δf 为系统噪声带宽(Hz). 设两个物体的温度为 T , 它们的比辐射率差为 $\Delta\varepsilon$, 而且环境辐射温度 T_b 没有变化, 由于此时 $\Delta T = 0, \Delta T_b = 0$, 且对于灰体有 $\rho = 1 - \varepsilon, \Delta\varepsilon = -\Delta\rho$, 则由式(1)可知, 系统的噪声等效反射率差为

$$NE\Delta\rho = \frac{x_T}{y_{T_b} - y_T} NETD. \quad (5)$$

显然, 当用红外测温仪来测量物体的比辐射率时, 仪器的噪声等效温差 $NETD$ 越小, 则其噪声等效反射率差 $NE\Delta\rho$ 也越小, 即测定反射率的灵敏度越高. 此外, 由式(5)可见, 在被测物体温度保持不变的条件下, T_b 与 T 的温差越大, $NE\Delta\rho$ 也越小. 例如, 当物体温度 $T = 293\text{K}$ 时, 在 $7 \sim 14\mu\text{m}$ 光谱区, $x_T = 2.97 \times 10^{-4} \text{Wcm}^{-2}\text{K}^{-1}, y_T = 1.7727 \times 10^{-2} \text{Wcm}^{-2}$; 当 T_b 为 $304\text{K}, 314\text{K}$ 时, y_{T_b} 为 $2.1184 \times 10^{-2} \text{Wcm}^{-2}, 2.467 \times 10^{-2} \text{Wcm}^{-2}$. 这时, 采用 $NETD$ 为 0.1°C 和 0.01°C 的红外测温仪所达到的 $NE\Delta\rho$ 值见表 1.

表 1 $NE\Delta\rho$ 的计算结果 ($T = 293\text{K}$)

Table 1 Calculated results of $NE\Delta\rho$ ($T = 293\text{K}$)

$NETD(\text{K})$	$T_b(\text{K})$	$NE\Delta\rho$
0.1	304	0.0086
	314	0.0043
0.01	304	0.00086
	314	0.00043

2 双园筒法测定比辐射率的原理

由式(1)可见, 在被测目标温度保持不变的条件下, 如果能改变环境辐射温度 T_b , 就能求得非透明体的反辐射率 ρ .

$$\rho = \frac{NETD}{(x_{T_b}/x_T) \Delta T_b}; \quad (6)$$

而 $\varepsilon = 1 - \rho$. 这是用双园筒法测定物体比辐射率的理论依据. 其具体做法是: 做两只相同的园筒形空腔, 一只夹层充室温水, 内壁温度为 T_1 ; 另一只夹层充热水, 内壁温度为 T_2 . 园筒上端开一直径约 25mm 的孔, 可插入红外测温仪探头, 下端大开口或留一个比充满红外测温仪视场所需目标尺寸大的孔. 设被测目标温度为 T , 比辐射率为 ε ; 两园筒内壁的比辐

射率为 ε_0 (认为 T_1, T_2 时 ε_0 不变), 而且目标与筒内壁均为不透明灰体. 则当圆筒 1 罩在目标上, 红外测温仪从圆筒上端对准目标时, 考虑到目标与筒内壁之间的多次反射, 仪器的输出信号为

$$V_{\bullet}(T) = \varepsilon V(T) + \varepsilon V(T) \rho_0 \rho + \varepsilon V(T) (\rho_0 \rho)^2 + \dots + \varepsilon_0 V(T_1) \rho + \varepsilon_0 V(T_1) \rho (\rho_0 \rho) + \varepsilon_0 V(T_1) \rho (\rho_0 \rho)^2 + \dots = [\varepsilon V(T) + \varepsilon_0 V(T_1) \rho] / (1 - \rho_0 \rho). \quad (7)$$

然后, 移动红外测温仪探头对准圆筒内壁, 此时仪器的输出信号为

$$V_{\bullet}(T_1) = [\varepsilon_0 V(T_1) + \varepsilon V(T) \rho_0] / (1 - \rho_0 \rho). \quad (8)$$

同理, 把圆筒 2 罩在目标上时, 当红外测温仪对准目标时, 仪器的输出信号为

$$V'_e(T) = [\varepsilon V(T) + \varepsilon_0 V(T_2) \rho] / (1 - \rho_0 \rho). \quad (9)$$

再移动仪器对准圆筒内壁时, 输出信号为

$$V_{\bullet}(T_2) = [\varepsilon_0 V(T_2) + \varepsilon V(T) \rho_0] / (1 - \rho_0 \rho) \quad (10)$$

在式(7)~式(10)中, $V(T)$ 、 $V(T_1)$ 和 $V(T_2)$ 的表达式与文献[1]相同. 由式(7)和(9)得:

$$V_{\bullet}(T) - V'_e(T) = \varepsilon_0 \rho [V(T_1) - V(T_2)] / (1 - \rho_0 \rho); \quad (11)$$

由式(8)和(10)得:

$$V_{\bullet}(T_1) - V_{\bullet}(T_2) = \varepsilon_0 [V(T_1) - V(T_2)] / (1 - \rho_0 \rho); \quad (12)$$

于是, 目标的反射率为

$$\rho = \frac{V_{\bullet}(T) - V'_e(T)}{V_{\bullet}(T_1) - V_{\bullet}(T_2)}; \quad (13)$$

而

$$\varepsilon = 1 - \rho. \quad (14)$$

3 实验结果及分析

根据上述方法, 我们用自行研制的 HDG 高灵敏红外测温仪 (测温范围 $-50^{\circ}\text{C} \sim +200^{\circ}\text{C}$, $NETD=0.01^{\circ}\text{C}$) 对喷涂相同涂料的平面辐射源和蜂窝平面黑体源的比辐射率分别进行了实验测试, 每个测试结果取 5 次测试的平均值列于表 2.

表 2 比辐射率的测试结果
Table 2 Measured results of emissivity

序号	平面辐射源 ε	蜂窝平面黑体源 ε
1	0.933	0.979
2	0.934	0.977

由表 2 可见, 本方法实验结果不仅灵敏度高, 而且重复性也好. 为了验证上述测试结果, 我们用 Gouffe 公式和能量选加原理对蜂窝平面黑体辐射源的平均比辐射率进行了计算.

根据 Gouffe 公式, 蜂窝元的有效比辐射率为

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 (1 + K), \quad (15)$$

式中

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon \left(1 - \frac{A}{S}\right) + \frac{A}{S}}, \quad K = (1 - \varepsilon) \left(\frac{A}{S} - \frac{A}{S_0}\right),$$

这里, $\varepsilon = 0.933$ 是蜂窝元壁的实测比辐射率, A 为蜂窝元开口面积, S 为包括开口面积在内的蜂窝元的总内表面面积, S_0 为直径等于腔深的等效球体表面积. 被测蜂窝元是边长为 4 mm 的正六边形, 深为 20 mm. 由于多次喷涂涂料, 在蜂窝平面上窝元壁的线宽度从 0.8 mm 增宽到 1 mm. 这时 $A = 30.33 \text{ mm}^2$, $S = 471.38 \text{ mm}^2$, $S_0 = 1256.6 \text{ mm}^2$, $K = 0.00269$, 于是 $\varepsilon_1 = 0.998$. 这说明空腔效应使单个蜂窝元的有效比辐射率从 0.933 提高到 0.998. 然而, 单个蜂窝元的有效比辐射率并不是蜂窝平面黑体源的比辐射率. 这是因为蜂窝平面黑体源的发射辐射除蜂窝元的开孔辐射外还包括蜂窝元面上线宽的面辐射. 对 1 mm 的线宽而言, 每个蜂窝元在蜂窝平面上的面积 $A' = 11.235 \text{ mm}^2$. 根据能量迭加原理, 蜂窝平面黑体源的平均比辐射率为

$$\bar{\varepsilon} = \frac{A \times \varepsilon_1 + A' \times \varepsilon}{A + A'}; \quad (16)$$

将上述数据代入式(16), 得 $\bar{\varepsilon} = 0.9805$, 这与我们的实验结果吻合得很好. 当线宽为 0.4 mm 时, 计算得 $\bar{\varepsilon} = 0.9904$; 当线宽减小到 0.1 mm 时, 求得 $\bar{\varepsilon} = 0.9955$. 此外还可以看到, 蜂窝平面黑体源的平均比辐射率要提高到 0.99 以上, 除选用比辐射率高的涂料外, 在喷涂中减小蜂窝元面上的线宽度是很关键的.

参 考 文 献

- 1 张才根, 张幼文. 物理学报, 1980; 30(7): 953
- 2 张幼文. 红外光学工程, 上海: 上海科学技术出版社, (1980), 496~497

HIGH SENSITIVITY IR THERMOMETER USED TO MEASURE EMISSIVITY BY TWO-COLUMN METHOD

ZHANG CAIGEN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 20008, China)

By using the total sensitivity equation of thermal imaging systems, this paper gives the relationship between noise equivalent reflectivity difference $NE\Delta P$ and noise equivalent temperature difference $NETD$ of infrared thermometers when used to measure the emissivity of targets by the two-column method. The emissivity ε of the honeycomb blackbody is measured for radiation calibration of the radiant cooler in the FY-1 Meteorological Satellite and the measurement results agree well with the calculated ones with Gouffe's formula.

Key words: infrared thermometer, emissivity, two-column method.