

常温物体表面真实温度的亮度法测量

张 才 根

(中国科学院上海技术物理研究所)

1981 年 10 月 15 日收到

提 要

本文给出了用红外测温仪直接测定常温物体表面真实温度的方法和实验结果,并对直接用红外测温仪的温度读数来计算环境辐射等效黑体温度 T_B 及目标的比辐射率 ϵ 进一步加以说明。

一、引 言

在红外遥感应用中,如对红外遥感图象的判读,用热惯量方法进行地质岩性与土壤分类等,都涉及目标的表面真实温度(以下简称表面真温)。因此,测量常温物体的表面真温是个很重要的问题。

国内外不少人研究了环境物体发射的辐射(以下简称环境辐射)对热成象和辐射温度测量的影响^[1-3],指出对于常温灰体目标(灰体的比辐射率不随波长变化),当目标温度与环境物体温度相近时,应同时考虑目标自身发射的辐射以及目标对环境辐射的反射。例如,两物体的表面真温相同,但比辐射率及所受到的环境辐射不同,它们在同一张红外热图象上的象元可能具有不同的亮度,用红外测温仪也可测得不同的等效辐射温度。在常温下,温度相同的物体 ($T = 300\text{K}$),比辐射率相差 0.01,其全辐射能量之差相当于温差 0.75°C 左右。然而由于存在环境辐射,实际上能测得的温差要小得多。环境物体温度越接近被测物体温度,能测得的温差就越小。所以用亮度法测量常温物体的表面真温时,必须同时考虑目标的比辐射率修正及目标受到的环境辐射的修正。

在文献[4]中,我们把落到目标上总的环境辐射等效成一个温度为 T_B 的黑体辐射,并给出了用红外测温仪和辐射参考板测量目标比辐射率 ϵ 及其受到的环境辐射等效黑体温度 T_B 的方法。但在那里没有对直接用红外测温仪的摄氏温度读数来计算 ϵ 和 T_B 加以说明,也没有给出如何用红外测温仪直接测量物体表面真温的方法。本文进一步说明这些问题,并用改进的 HD 红外低温测温仪(光谱区 8—14 微米,测温范围 -10 — $+50^\circ\text{C}$, $NETD < 0.05^\circ\text{C}$,能同时进行 ϵ 和 T_B 修正)对常温物体的表面真温作了实验测量,所得测量结果是令人满意的。

二、测量原理

用亮度法(即部分能量法)测量目标温度时,在 λ_1 — λ_2 光谱区内,来自目标的总入射能量包括目标自身发射的辐射及其反射的环境辐射. 设目标为朗伯体,比辐射率为 ε , 反射率 $\rho = 1 - \varepsilon$, 表面真温为 T ;测温仪斩波器的温度为 T_0 , 其比辐射率 $\varepsilon_0 = 1$. 并设环境物体有 N 个,它们在被测目标上的光谱辐照度分别为 $E_{B1}, E_{B2}, \dots, E_{BN}$. 红外探测器接收到的净能量是来自目标的总入射能量与斩波器入射能量之差. 探测器输出信号为

$$\begin{aligned} \tilde{V}_t = & \frac{1}{4} \delta D_0^2 \omega \tau_0 \tau_a R_v \left[\varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T) d\lambda \right. \\ & + (1 - \varepsilon) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (E_{B1} + E_{B2} + \dots + E_{BN}) d\lambda \\ & \left. - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_0) d\lambda \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

上式中 D_0 为光学系统入瞳直径(厘米), ω 为视场立体角(sr), τ_a, τ_0, R_v 各为 λ_1 — λ_2 光谱区内的平均大气透过率,光学系统的平均透过率,探测器的平均响应率(伏/瓦), δ 为信号过程因子. $W(\lambda, T), W(\lambda, T_0)$ 是温度为 T, T_0 的黑体光谱发射量(瓦·厘米⁻²·微米⁻¹).

对环境辐射的描述方法各有不同. 在文献[1]中, Wolfe 对温度均匀、形状规则的朗伯表面用总角度因子描述环境辐射对目标的影响. AGA 公司用环境空气温度 T_a 或用测温仪对周围物体扫描取平均温度来描述环境辐射. 实际上由于各个环境物体的几何形状,比辐射率、温度以及它们与目标间的距离等不尽相同,要分别计算和测量各环境物体辐射到目标上的光谱辐照度是很繁琐的. 为此,在文献[4]中我们把落到目标上的总环境辐射用温度为 T_B 的等效黑体辐射来表示. 于是(1)式可写成

$$\begin{aligned} \tilde{V}_t = & \frac{1}{4} \delta D_0^2 \omega \tau_0 \tau_a R_v \left[\varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T) d\lambda \right. \\ & \left. + (1 - \varepsilon) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_B) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_0) d\lambda \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

探测器输出信号经过前置放大器,选频放大器,相敏检波器及直流放大器等电信号处理过程,再经黑体分度标定后,输出的直流信号电压为

$$\begin{aligned} \bar{V}_t = & \frac{1}{4} K_0 \delta D_0^2 \omega \tau_0 \tau_a R_v \left[\varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T) d\lambda \right. \\ & \left. + (1 - \varepsilon) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_B) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_0) d\lambda \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

上式中 K_0 为上述电信号处理过程的总增益.

设

$$K = \frac{1}{4} K_0 \delta D_0^2 \omega \tau_0 \tau_a R_v, \quad (4)$$

$$V(T) = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T) d\lambda = K \eta_T \sigma T^4, \quad (5)$$

$$V(T_B) = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_B) d\lambda = K \eta_{T_B} \sigma T_B^4, \quad (6)$$

$$V(T_0) = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_0) d\lambda = K \eta_{T_0} \sigma T_0^4. \quad (7)$$

这里 σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数,

$$\eta_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T) d\lambda / \sigma T^4,$$

$$\eta_{T_B} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_B) d\lambda / \sigma T_B^4,$$

$$\eta_{T_0} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_0) d\lambda / \sigma T_0^4.$$

这样 (3) 式可写成

$$\bar{V}_s = \varepsilon V(T) + (1 - \varepsilon) V(T_B) - V(T_0) \quad (8a)$$

或者写成

$$\bar{V}_s = K [\varepsilon \eta_T \sigma T^4 + (1 - \varepsilon) \eta_{T_B} \sigma T_B^4 - \eta_{T_0} \sigma T_0^4]. \quad (8b)$$

令

$$V(T_e) = \varepsilon V(T) + (1 - \varepsilon) V(T_B) = K \eta_{T_e} \sigma T_e^4, \quad (9)$$

则

$$K \eta_{T_e} \sigma T_e^4 = \bar{V}_s + V(T_0). \quad (10)$$

这里 T_e 为通常的亮度法测温仪测得的包括目标自身发射的辐射及其反射的环境辐射在内的等效黑体温度, 也称为表观辐射温度, 亮度温度(简称亮温).

$$\eta_{T_e} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_e) d\lambda / \sigma T_e^4.$$

为了能直接用红外测温仪测出目标的表面真温 T , 而不是亮温 T_e , 将 (8) 式改写为

$$V(T) = \frac{\bar{V}_s + V(T_0) - V(T_B)}{\varepsilon} + V(T_B), \quad (11a)$$

$$K \eta_T \sigma T^4 = \frac{\bar{V}_s + K \eta_{T_0} \sigma T_0^4 - K \eta_{T_B} \sigma T_B^4}{\varepsilon} + K \eta_{T_B} \sigma T_B^4. \quad (11b)$$

从上式明显可见, 在用亮度法红外测温仪测定常温物体的表面真温时, 除对斩波器温度 T_0 进行补偿外, 还必须进行目标比辐射率 ε 修正和环境辐射等效黑体温度 T_B 的修正. 以往的测温仪由于只考虑目标比辐射率的修正, 不作环境辐射的修正, 从而产生信号电压误差. 从 (11) 式可见, 此误差电压为

$$\begin{aligned} \Delta V &= \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) V(T_B) \\ &= \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) K \eta_{T_B} \sigma T_B^4. \end{aligned} \quad (12)$$

显然, ε 越小, T_B 越大, 则 ΔV 也越大, 即温度测量误差就越大. 因此那种测量结果是不可靠的.

下面对 (11) 式作一简单讨论.

1) 当 $\varepsilon = 1$ 时, $V(T) = \bar{V}_s + V(T_0)$. 通常亮度法红外测温仪便是依此式对黑体进行分度标定的.

2) 当 $\varepsilon < 1$, $T_B = T_0$ 时, $V(T) = (\bar{V}_s/\varepsilon) + V(T_B)$. 此时只须进行目标比辐射率修正, 就能测得目标表面真温 T .

3) 当 $\varepsilon < 1$, $T_B \neq T_0$ 时, 必须同时进行 ε 修正和 T_B 修正, 才能测得真温 T . 修正原理如图 1 所示, 图中 IC_1 , IC_2 均为反相器结构.

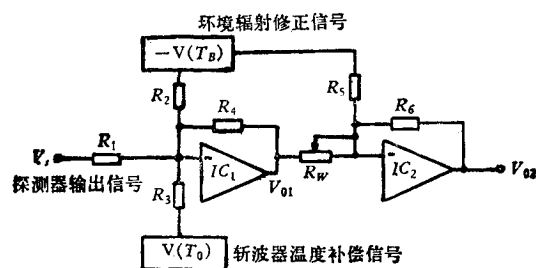


图 1

在图 1 中, IC_1 的输出 V_{01} 为

$$V_{01} = -[\bar{V}_s + V(T_0) - V(T_B)].$$

上式中 $\bar{V}_s$ 用 (8a) 式代入, 则

$$V_{01} = -\varepsilon[V(T) - V(T_B)]. \quad (13)$$

IC_2 的输出 V_{02} 为

$$V_{02} = -\left[\frac{V_{01}}{\varepsilon} - V(T_B)\right] = V(T). \quad (14)$$

上式说明, 测温仪按图 1 的方法进行 ε , T_B 修正后, 输出信号是 T 的单一函数, 即此时测得的温度读数是目标的表面真温 T , 而不是亮温 T_s .

三、测量方法

从上述原理可知, 在用亮度法测量常温物体的表面真温时, 应先测得目标比辐射率 ε 及目标受到的环境辐射等效黑体温度 T_B . 现将测量方法分述如下:

1. T_B 的测量

用两块温度相同, 比辐射率分别为 ε_1 和 ε_2 的参考板, 或一块两面比辐射率各为 ε_1 和 ε_2 的参考板, 放在被测目标处, 用红外测温仪分别测出 ε_1 面和 ε_2 面的亮温 T_{a1} 和 T_{a2} , 再从测温仪的 V (电压)- T (温度) 分度定标曲线上求得对应于 T_{a1} 和 T_{a2} 的电压 $V(T_{a1})$, $V(T_{a2})$. 根据 (9) 式可得

$$V(T_B) = \frac{V(T_{a2}) - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} V(T_{a1})}{1 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}. \quad (15)$$

求得 $V(T_B)$ 后, 就可以从 V - T 分度定标曲线上求得 T_B .

下面进一步说明在什么情况下可用测温仪测得的亮温 T_{e1} 和 T_{e2} 直接计算 T_B . 根据(6),(9)式,并注意到热力学温标,(15)式变为

$$\eta_{T_B} T_B^4(K) = \frac{\eta_{T_{e2}} T_{e2}^4(K) - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \eta_{T_{e1}} T_{e1}^4(K)}{1 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}. \quad (16)$$

对于常温物体,测温仪读数为摄氏温标($^{\circ}\text{C}$),因此将热力学温标换成摄氏温标,并作以下近似计算:

$$\begin{aligned} T_B^4(K) &= [273 + T_B(^{\circ}\text{C})]^4 \\ &\approx 273^4 + 4 \times 273^3 \times T_B(^{\circ}\text{C}). \end{aligned} \quad (17)$$

同理

$$T_{e1}^4(K) \approx 273^4 + 4 \times 273^3 \times T_{e1}(^{\circ}\text{C}), \quad (18)$$

$$T_{e2}^4(K) \approx 273^4 + 4 \times 273^3 \times T_{e2}(^{\circ}\text{C}). \quad (19)$$

当 $T_B(^{\circ}\text{C})$, $T_{e1}(^{\circ}\text{C})$, $T_{e2}(^{\circ}\text{C})$ 相差不大时, $\eta_{T_B} \approx \eta_{T_{e1}} \approx \eta_{T_{e2}}$, 于是(16)式简化成

$$T_B(^{\circ}\text{C}) \approx \frac{T_{e2}(^{\circ}\text{C}) - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} T_{e1}(^{\circ}\text{C})}{1 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}. \quad (20)$$

这就是文献[4]中的(17)式.

2. ε 的测量

用一块比辐射率为 ε_0 的参考板放在被测目标处,用红外测温仪分别测出目标和参考板的亮温 $T_{\text{目}}$ 和 $T_{\text{参}}$,再从 V - T 分度定标曲线求得相应的电压 $V(T_{\text{目}})$ 和 $V(T_{\text{参}})$. 然后改变环境辐射,例如外加一辐射源,或在室外时用雨伞挡一下天空背景,再测出目标和参考板的亮温 $T'_{\text{目}}$ 及 $T'_{\text{参}}$,同样从 V - T 分度定标曲线求得相应的电压 $V(T'_{\text{目}})$ 及 $V(T'_{\text{参}})$. 利用(9)式,可求得目标的反射率 ρ

$$\rho = (1 - \varepsilon_0) \frac{V(T'_{\text{目}}) - V(T_{\text{目}})}{V(T'_{\text{参}}) - V(T_{\text{参}})}. \quad (21)$$

根据上述同样的理由,当 $T_{\text{目}}(^{\circ}\text{C})$, $T'_{\text{目}}(^{\circ}\text{C})$, $T_{\text{参}}(^{\circ}\text{C})$ 及 $T'_{\text{参}}(^{\circ}\text{C})$ 相近时,(21)式可简化为

$$\rho \approx (1 - \varepsilon_0) \frac{T'_{\text{目}}(^{\circ}\text{C}) - T_{\text{目}}(^{\circ}\text{C})}{T'_{\text{参}}(^{\circ}\text{C}) - T_{\text{参}}(^{\circ}\text{C})}. \quad (22)$$

这就是文献[4]中的(25)式. 求得 ρ 后,由 $\varepsilon = 1 - \rho$ 求得 ε .

3. 真温 T 的测量

用测得的 T_B 和 ε 值进行修正,将红外测温仪对准目标,此时测温仪的读数即目标的表面真温 T .

四、测量结果

我们对一块长 220 毫米、宽 150 毫米、厚 8 毫米,两面比辐射率各为 $\varepsilon_1 = 0.46$, $\varepsilon_2 = 0.92$ 的铝合金板(此比辐射率值是用文献[3]中的圆筒法测量的),分别在室内外的不同情况下对 ε_1 面与 ε_2 面的真温作了实验测量。表 1 是在室外阳台上,在不同时间及天气情况(包括阴天,晴天)下的测量结果。表 2 是在实验室内,用一平板黑体放在被测物旁,通过改变平板黑体的温度来改变环境辐射等效黑体温度 T_B 进行测量的结果。图 2 是根据表 2 作的实验曲线。

表 1 不同时间在室外对 ε_1 面、 ε_2 面表面真温的测量结果

温 度(°C) \ 时 间	6月11日 晨6:30	6月12日 晚6:20	6月12日 晚9:30	6月16日 晚8:00
ε_1 面亮温 T_{e1}	22.4	20.2	19.5	19.3
ε_2 面亮温 T_{e2}	23.5	22.0	21.2	24.4
T_B	21.3	18.4	17.8	14.2
ε_1 面真温 T_1	23.6	22.4	21.4	25.1
ε_2 面真温 T_2	23.6	22.3	21.5	25.3
天 气 情 况	阴	阴	阴	晴

表 2 不同 T_B 下, ε_1 面与 ε_2 面表面真温的测量结果

序 号 温度(°C)	1	2	3	4	5
T_B	17.8	22.5	26.7	29.9	34.0
ε_1 面亮温 T_{e1}	21.7	24.2	26.5	28.3	30.5
ε_2 面亮温 T_{e2}	25.6	25.9	26.3	26.7	27.0
ε_1 面真温 T_1	26.2	26.2	26.4	26.4	26.2
ε_2 面真温 T_2	26.3	26.1	26.2	26.4	26.2

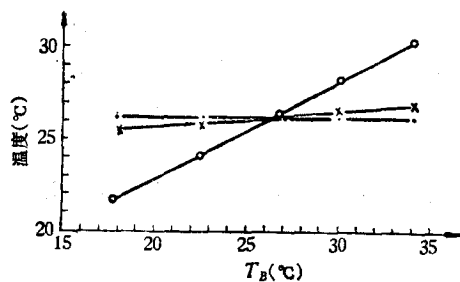


图 2 物体的真温 T 、亮温 T_e 与 T_B 关系的测量曲线
 - - - 为板的真温 T ; $\circ$ — $\circ$ —为 ε_1 面的亮温 T_{e1} ;
 — $\times$ — $\times$ —为 ε_2 面的亮温 T_{e2}

表 1 说明,在物体温度及环境辐射等效黑体温度都不同的情况下,亮度法测温仪只要对 ε 和 T_B 同时进行修正,那么对同一块测试板的 ε_1 面及 ε_2 面所测得的表面真温基本相同. 表 2 的测量结果说明,在物体温度不变,但受到的环境辐射等效黑体温度 T_B 变化时,尽管 ε_1 面、 ε_2 面的亮温随着 T_B 而变化,但进行 ε, T_B 修正后,测得 ε_1 面和 ε_2 面的表面真温不变. 这一结果令人信服地说明上述测量方法是切实可行的.

由图 2 还可得到一个重要结果. 因为 $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$, 当 $T_B < T$ 时, $T_{e1} < T_{e2} < T$; 当 $T_B > T$ 时, $T_{e1} > T_{e2} > T$; 当 $T_B = T$ 时, $T_{e1} = T_{e2} = T$. 即温度 T 相同,但比辐射率不同的物体,它们的亮温 T_e 随环境辐射 T_B 变化的曲线,在 $T_B < T$ 时, T_e 均小于 T , 且比辐射率越小, T_e 也越小. 相反, $T_B > T$ 时, T_e 均大于 T , 且比辐射率小的, T_e 要大. 但这些曲线相交于 $T_B = T$ 这点,此时不论 ε 大小如何,测得的亮温相同且等于真温. 这是因为此时各物体的自身发射加上对环境辐射的反射后,总能量相等. 这与文献 [3] 的实验结果和理论解释是一致的.

本文经匡定波、王鸿禧、陈祖培同志以及上海交通大学张幼文同志审阅,并提出了宝贵意见,谨致谢忱.

参 考 文 献

- [1] W. L. Wolfe, *Infrared imaging Systems Technology*, 226 (1980), 133.
- [2] 张幼文,物理学报, 29 (1980), 813.
- [3] 张幼文、张才根,物理学报, 29 (1980), 829.
- [4] 张才根、张幼文,物理学报, 30 (1981), 953.

THE MEASUREMENT OF THE TRUE SURFACE TEMPERATURE VIA THE BRIGHTNESS METHOD

ZHANG CAI-GEN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this paper, we present the method and the experimental results of direct measuring of the true surface temperature for a body in the environment using the IR thermometer.

The calculation of the equivalent blackbody temperature T_e of the environmental radiation and the emissivity ε of the target on the basis of the temperature data of the IR thermometer is discussed.