

# 单波段红外测温方程的建立及其分析\*

刘健\*\* 包学诚

(上海交通大学应用物理系, 上海, 200030)

张才根

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘要:** 讨论了在被测目标为非朗伯体和测量环境中存在独立辐射源的情况下, 反向反射分布函数 (BRDF) 的引入和单波段红外测温方程的建立, 并对此作了初步分析.

**关键词:** 温度测量, 辐射温度, 红外测温.

## 引言

由于被测目标一般都不是黑体, 而且总是在一定的环境里进行测试, 所以被测目标特性和环境辐射都将对仪器的测温精度产生影响<sup>[1~8]</sup>. 本文就此普遍情况对单波段红外测温技术进行讨论, 导出相应的能量方程式, 并作出初步的分析.

## 1 理论分析

利用单波段红外测温仪测量目标温度时, 其所处环境和目标特性是多种多样的, 为了讨论方便, 引入两个表征目标辐射特性和反射特性的函数, 一个为辐射率因子  $K(\theta', \varphi')$ , 另一个为双向反射分布函数 (BRDF), 定义如下<sup>[9,10]</sup>:

辐射率因子  $K(\theta', \varphi')$  为物体在某一方向的光谱辐射功率  $L(\theta', \varphi')$  与半球空间光谱辐射功率之比, 即

$$K(\theta', \varphi') = \frac{L(\theta', \varphi')}{\int_{hs} L(\theta', \varphi') \cos\theta' d\omega'} \quad (1)$$

显然, 对于理想的漫辐射表面,

本文 1991 年 2 月 25 日收到, 修改稿 1992 年 7 月 16 日收到.

\*国家自然科学基金和上海市自然科学基金资助项目.

\*\*现在青岛市山东纺织工学院物理教研室工作.

$$K = \frac{1}{\pi} \quad (2)$$

双向反射分布函数  $f(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$  为反射的光谱辐射功率  $L'(\theta', \varphi')$  与入射的辐照度  $E(\theta, \varphi)$  之比, 即

$$\begin{aligned} f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') &= L'(\theta', \varphi') / E(\theta, \varphi) \\ &= \frac{\int_{\Omega_s} L(\theta', \varphi') \cos \theta' d\omega'}{E(\theta, \varphi)} \cdot \frac{L'(\theta', \varphi')}{\int_{\Omega_s} L(\theta', \varphi') \cos \theta' d\omega'} \\ &= \rho_0 K'(\theta, \varphi; \theta', \varphi'), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\rho_0$  为物体的半球反射率,  $K'(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$  为方向反射率因子. 各符号不加撇 (') 表示入射方向, 加撇 (') 表示反射 (辐射) 方向 (见图 1).

考虑到红外测温环境中可能存在各种辐射, 为了便于讨论, 将它们分为均匀环境辐射和含独立辐射源的非均匀环境辐射两部分. 对于均匀环境辐射, 例如空气辐射, 可以等效为比辐射率  $\varepsilon$  为 1, 温度为  $T_a$  的黑体, 其光谱辐射出射度为  $W(\lambda, T_a)$ ; 对于非均匀环境辐射, 则可以等效为比辐射率为  $\varepsilon_s$ , 面积为  $A_s$ , 温度为  $T_s$  的面源, 其光谱辐射出射度为  $\varepsilon_s W(\lambda, T_s)$ . 假设红外测温仪的光谱辐射范围为  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ , 斩波器的比辐射率  $\varepsilon_c = 1$ , 温度为  $T_c$ , 对应的光谱辐射出射度即为  $W(\lambda, T_c)$ ; 而目标的比辐射率为  $\varepsilon_0$ , 其表面真实温度为  $T_0$ , 则其光谱辐射出射度为  $\varepsilon_0 W(\lambda, T_0)$ .

根据上述分析, 红外测温仪接收到的总辐射功率应该包括目标发射的辐射功率和环境辐射被目标反射的辐射功率, 经电子线路处理后, 相应的输出电压信号应为<sup>[1]</sup>:

$$\begin{aligned} V &= \varepsilon_0 D_1(\theta', \varphi') V(T_0) + \rho_0 D_2(\theta', \varphi', 2\pi) V(T_a) \\ &\quad + \varepsilon_s D_s(\theta, \varphi) f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') V(T_s) - V(T_c), \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) 中除了各种辐射功率的相应电压信号外, 还引入了一组描述辐射方向的特性因子. 由图

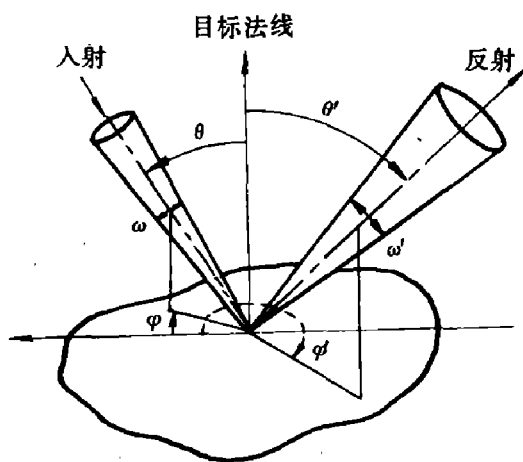


图 1 表面反射特性的几何参数  
Fig. 1 Geometrical parameter of surface reflective characteristic

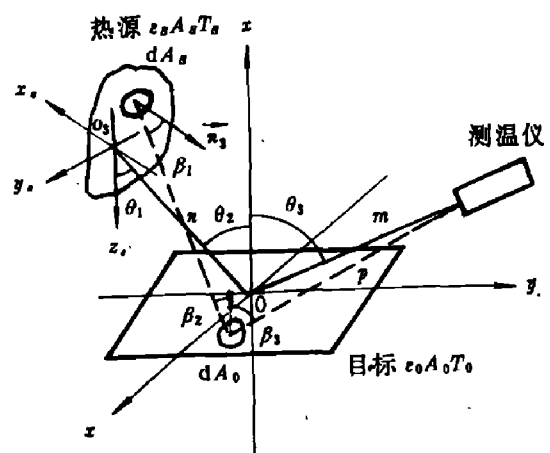


图 2 红外测温的几何关系  
Fig. 2 Geometrical configuration of infrared thermometry

2可以得到:

$$D_1(\theta', \varphi') = \frac{\pi}{\omega} \int_{A_0} K(\theta', \varphi') \frac{\cos\beta_3 \cos\beta_4}{p^2} dA_0, \quad (5)$$

$$D_2(\theta', \varphi', 2\pi) = \frac{\pi}{\omega} \int_{A_0} K(\theta', \varphi', 2\pi) \frac{\cos\beta_3 \cos\beta_4}{p^2} dA_0, \quad (6)$$

$$D_s(\theta, \varphi) = \int_{A_s} K(\theta, \varphi; \beta_1) \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{n^2} dA_0, \quad (7)$$

$$f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = \frac{\pi}{\omega} \frac{1}{D_s(\theta, \varphi)} \int_{A_0} D_s(\theta, \varphi) K(\theta, \varphi; \theta', \varphi', \beta_3) \left( \frac{\cos\beta_3 \cos\beta_4}{p^2} \right) dA_0, \quad (8)$$

式中  $K(\ )$  均为辐射率因子. 目标辐射温度的电压信号可以表示为:

$$V(T_e) = \varepsilon_0 D_1(\theta', \varphi') V(T_0) + \rho_0 D_2(\theta', \varphi', 2\pi) V(T_a) + \varepsilon_s \rho_0 D_s(\theta, \varphi) f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') V(T_s). \quad (9)$$

在红外测温(单波段)普遍方程式(4)中, 第1项表示目标的自身辐射, 其中  $D_1(\theta', \varphi')$  为目标辐射的方向特性因子,  $A_0$  为测温仪接收到的目标辐射面积,  $\omega$  为相应的视场角; 第2项表示目标反射的均匀环境辐射, 其中  $D_2(\theta', \varphi', 2\pi)$  为目标的反射方向特性因子; 第3项表示目标反射的非均匀环境辐射, 其中  $D_s(\theta, \varphi)$  为等效源的方向辐射特性因子,  $f(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$  为对  $\rho_0$  归一化后的反向反射分布函数; 第4项为斩波器的辐射. 由普遍方程式可以看出, 红外测温仪接收到的辐射强度, 不仅与目标本身辐射有关, 而且与环境辐射的性质和目标本身的反射特性有关, 其中 BDRF 还与环境辐射的非均匀等效辐射源的方位和发射特性有关, 因此计算是非常复杂的, 难以用函数形式表达出来.

## 2 红外测温方程式的讨论

当目标为朗伯体(理想的漫辐射表面)时, 则相应的  $D_1$  和  $D_2$  都等于1, 如果只有均匀的环境辐射, 则式(4)便成为

$$V = \varepsilon_0 V(T_0) + (1 - \varepsilon_0) V(T_a) - V(T_c). \quad (10)$$

如果非均匀的环境辐射也等效于朗伯体辐射, 则  $D_s(\theta, \varphi) = \text{常数}$ , 而被测目标的  $f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \approx 1$ , 这时式(4)形式为

$$V = \varepsilon_0 V(T_0) + (1 - \varepsilon_0) V(T_a) + (1 - \varepsilon_0) \varepsilon_s D_s(\theta, \varphi) V(T_s) - V(T_c). \quad (11)$$

在这种情况下, 只要将  $V(T_a)$  和  $\varepsilon_s D_s(\theta, \varphi) V(T_s)$  两项等效为黑体温度  $T_b$  的电压信号  $V(T_b)$ , 即

$$V = \varepsilon_0 V(T_0) + (1 - \varepsilon_0) V(T_b) - V(T_c), \quad (12)$$

式中

$$V(T_e) = \varepsilon_0 V(T_0) + \rho_0 V(T_b), \quad (13)$$

即为目标的辐射温度. 此时, 只要对  $\varepsilon_0$  和  $T_b$  进行修正, 便可获得满意的结果<sup>[2,3]</sup>.

$$V(T_b) = \frac{\varepsilon_1 V(T_{e2}) - \varepsilon_2 V(T_{e1})}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}. \quad (14)$$

这里,  $V(T_{e1})$  和  $V(T_{e2})$  分别为漫射性很好的两参考板  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  的辐射温度的电压信号.

### 3 BRDF 值的实验测定

如果在红外测温仪的测试环境中存在有独立的非朗伯体的辐射源, 那么就必须考虑目标的反射特性, 即 BRDF, 由于它的理论计算极为困难, 通常可以采用实验方法进行修正.

为了求出  $f$  函数值, 可以选择一块  $f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \approx 1$  的理想漫射表面的参考板, 测出它的比辐射率  $\varepsilon_r$ , 然后分别测出在有独立辐射源和无独立辐射源情况下的辐射温度的电压信号, 即  $V'(T_{er})$  和  $V(T_{er})$ , 按照式 (9), 将它们相减并整理后可以得到

$$V'(T_{er}) - V(T_{er}) = \rho_r \varepsilon_s D_s(\theta, \varphi) V(T_s), \quad (15)$$

同理, 对于被测目标可以得到

$$V'(T_e) - V(T_e) = \rho_0 \varepsilon_s D_s(\theta, \varphi) f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') V(T_s). \quad (16)$$

将式 (15) 和 (16) 相除, 经过整理即可得到  $f$  函数值的表达式为

$$f(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = \frac{V'(T_e) - V(T_e)}{V'(T_{er}) - V(T_{er})} \cdot \frac{1 - \varepsilon_r}{1 - \varepsilon_0}, \quad (17)$$

式 (17) 中  $\varepsilon_r$  和  $\varepsilon_0$  为利用双圆筒法测得的比辐射率<sup>[12]</sup>.

### 4 非均匀环境辐射的修正

当测试环境中存在独立辐射源时, 测温仪的输出电压信号为:

$$V'(T_e) = \varepsilon_0 V(T_0) + \rho_0 V(T_b) + \rho' V(T_b'), \quad (18)$$

遮去该非均匀辐射源时, 则红外测温仪的输出电压信号为

$$V(T_e) = \varepsilon_0 V(T_0) + \rho_0 V(T_b), \quad (19)$$

将式 (18) 与式 (19) 相减, 即得

$$\rho' = \frac{V'(T_e) - V(T_e)}{V(T_b')}, \quad (20)$$

式 (20) 中  $T_b'$  为非均匀环境辐射源照射到目标上的辐照度的等效黑体温度. 为了测量  $V(T_b')$ , 可以在目标处放置一块反射特性与被测目标相似的参考板, 且参考板的比辐射率  $\varepsilon_r$  是已知的, 按上述同样方式进行测试, 可以得到

$$V(T_b') = \frac{V'(T_{er}) - V(T_{er})}{1 - \varepsilon_r}. \quad (21)$$

在具体测量时, 可以采用下列方法来消除环境辐射的影响, 即在目标处安置一致冷的同样材料的参考物体, 与被测目标一起接受相同的环境辐射照射, 这时红外测温仪瞄准两者, 其输出的电压信号分别为:

$$V(T_e) = \varepsilon_0 V(T_0) + \rho_0 V(T_b) + \rho' V(T_b'), \quad (22)$$

$$V(T_{er}) = \rho_0 V(T_b) + \rho' V(T_b'), \quad (23)$$

将式 (22) 与式 (23) 相减, 即得

$$V(T_0) = \frac{V(T_e) - V(T_{er})}{\varepsilon_0} \quad (24)$$

以上我们利用双向反射分布函数 (BRDF) 描述目标的反射特性, 导出了单波段红外测温仪的普遍方程式, 并对非均匀环境下目标温度的测试进行了分析和讨论, 这些讨论将有助于扩大红外测温仪的应用范围和提高它的测温精度.

### 参考文献

- 1 张幼文, 张才根. 物理学报, 1980,29:829
- 2 张才根, 张幼文. 物理学报, 1981,30:953
- 3 Zhang YW et al. *Appl. Opt.*, 1986,25:3683
- 4 Narphy R E et al. *SPIE*, 1984,430:129
- 5 Rudolf Guzzi et al. *Appl. Opt.*, 1987,26:3043
- 6 Francoise Nerry et al. *Appl. Opt.*, 1988,27:758
- 7 张才根, 刘健, 包学诚. 红外研究, 1989,8(6):435
- 8 包学诚, 刘健, 张幼文, 张才根. 计量学报, 1990,3(11):195
- 9 Swain P H, Davis S M. 遥感定量方法, 朱根福等译, 北京: 科学出版社, 1984
- 10 M J Kavaya et al. *Appl. Opt.*, 1983,22:2619
- 11 刘健. 上海交通大学硕士研究生论文, 1989.
- 12 张才根. 红外与毫米波学报, 1991,10(5):385

## GENERAL EQUATION OF IR-THERMOMETRY IN SINGLE WAVELENGTH BAND AND ITS ANALYSIS\*

Liu Jian, Bao Xuecheng

*(Department of Applied Physics, Shanghai Jiao-Tong University, Shanghai 200030, China)*

Zhang Caigen

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)*

**Abstract:** In this paper, the general equation of IR-thermometry in single wavelength band and its preliminary analysis are given based on the concept of the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) when the measured object is nonlambertian and there exists an independent radiant source in the measurement environment.

**Key words:** temperature measurement, radiation temperature, infrared thermometry.

---

\*The project supported both by the National Natural Science Foundation of China and by the Shanghai Natural Science Foundation.