比辐射率的非封闭测定法初步探讨

张 仁 华

（中国科学院地理研究所）

一、问题的提出

比辐射率是红外遥感中十分重要的参数。用红外遥感进行农作物估产、水资源勘探、地质探矿、环境污染及进行气象、水文等方面的研究，首先就应求得地物的比辐射率。我们[1]在1978年对比辐射率的测量提出了一个采用两个黑体罩的封闭测量方法。这个方法比较方便，而且实用。然而该法只能在地面作点的测量，为了求得比辐射率的大面积分布情况，必须一个点一个点地测定。能否从飞机上甚至卫星上直接把地物的比辐射率的大面积分布测出来？这就是我们要探索的课题。本文用主动红外和被动红外相结合方法，提出一个非封闭测定比辐射率的方法与实验结果，旨在为用航空或航天方法测定比辐射率铺平道路。

二、非封闭法的推导

为了与封闭法相对应，本法称为非封闭法。也就是说不用封闭的黑体罩进行测量。

根据红外系统原理[2]，任何红外辐射计（包括红外扫描辐射计）在任一光谱区间，所测得信号电压为：（目标物充满瞬时视场）

$$V_s = \frac{D_0^2 D^* \sqrt{\omega}}{4F_n \sqrt{\Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\varepsilon_{\lambda\omega} L_{\lambda\omega} + (1 - \varepsilon_{\lambda\omega}) \frac{E}{\pi} \right] \tau_a \tau_o d\lambda, \tag{1}$$

式中 D_o 为光学系统的入射孔直径，F 为光学系统等效焦距，D^* 为探测器响应度，Δf 为等效噪声带宽，n 为信噪比，ω 为辐射计的瞬时视场角，τ_a 为大气透过系数，τ_o 为透镜透过系数，$L_{\lambda\omega}$ 为在辐射计视场角方向与地物同温的黑体辐射亮度，E 为环境辐射照度，$\varepsilon_{\lambda\omega}$ 为指向辐射计方向的定向比辐射率。

环境辐射照度是由下式积分表达

$$E_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \varepsilon_s L_s(\theta, \phi, \lambda) \sin\theta d\theta d\phi, \tag{2}$$

式中 L_s 是与环境同温的黑体辐射亮度，ε_s 是环境的比辐射率，φ 是方位角，θ 是天顶角。

设 $\varepsilon_{\lambda\omega}$ 在 λ_1 到 λ_2 波段内变化不大，在（1）式中用其平均值 $\bar{\varepsilon}_\omega$ 来取代，并从积分号中提出，即得

$$V_s = \frac{D_0^2 D^* \sqrt{\omega}}{4Fn \sqrt{\Delta f}} \left[\bar{\varepsilon}_\omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda\omega} \tau_a \tau_o d\lambda + (1 - \bar{\varepsilon}_\omega) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E}{\pi} \tau_a \tau_o d\lambda \right], \tag{3}$$

本文1981年4月10日收到。

也就是说，在辐射计接收到的能量中，有两部分组成，一部分是被测物本身的辐射，另一部分是反射环境辐射照度的辐射．如果被测物是黑体，$\varepsilon_\omega = 1$ 辐射计的对应输出应电压为 V_L，

$$V_L = \frac{D_0^2 D^* \sqrt{\omega}}{4Fn\sqrt{\Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda\omega}\tau_a\tau_o d\lambda. \tag{4}$$

如果被测物是白体，$\varepsilon_\omega = 0$，则辐射计的对应输出电压为 V_E，即仅接收到环境辐射，

$$V_E = \frac{D_0^2 D^* \sqrt{\omega}}{4Fn\sqrt{\Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E}{\pi} \tau_a\tau_o d\lambda, \tag{5}$$

联立 (3)、(4)、(5) 方程，仍可得

$$V_s = \varepsilon_\omega V_L + (1 - \varepsilon_\omega)V_E, \tag{6}$$

在 (6) 式中除 V_s 这一辐射计实际测得的信号电压是已知数外，V_L、V_E 及 ε_ω 都是未知数．为了解出ε_ω，让我们来创造两次环境辐照度，也就是变化两次环境辐射亮度．第一次环境辐照度的数学表达式是 (2) 式． 第二次是在第一次的基础上，在 2π 立体角里某一天顶角和方位角，叠加一个红外辐射源，如果该红外辐射源的横截面积很小，而且出辐射度较大，第一次环境辐射的被遮挡部分可以忽略，则第二次环境辐射照度为：

$$E_2 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \varepsilon_s L_s(\theta, \phi, \lambda) \sin\theta d\theta d\varphi + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \varepsilon_s' L_s'(\theta, \varphi, \lambda) \sin\theta d\theta d\varphi, \tag{7}$$

式中 L_s' 为叠加的黑体辐射亮度，ε_s' 为其比辐射率．根据 (5) 式，第一次环境辐射所对应的电压为 V_{E1}，第二次环境辐射所对应的输出电压为 V_{E2}． 同理，新叠加的红外辐射源也有一对应的输出电压 V_p，显然有

$$V_{E2} - V_{E1} = \frac{D_0^2 D^* \sqrt{\omega}}{4Fn\sqrt{\Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\pi}(E_2 - E_1)\tau_a\tau_o d\lambda = V_p. \tag{8}$$

又根据 (6) 式，在第一次环境辐射度下，辐射计所对应输出电压为

$$V_{s1} = \varepsilon_\omega V_{L1} + (1 - \varepsilon_\omega)V_{E1}, \tag{9}$$

在第二次环境辐射照度下，

$$V_{s2} = \varepsilon_\omega V_{L2} + (1 - \varepsilon_\omega)V_{E2}. \tag{10}$$

当第一次和第二次之间的时间间隔很短，有理由认为 $V_{L1} = V_{L2}$，则解 (9)、(10) 式、可得

$$\varepsilon_\omega = \frac{(V_{s1} - V_{s2}) + (V_{E2} - V_{E1})}{V_{E2} - V_{E1}} = \frac{(V_{s1} - V_{s2}) + V_p}{V_p}, \tag{11}$$

从 (11) 式可知，测量出在两次环境辐照度下，辐射计对准被测物所对应的输出电压值，以及两次环境辐照度所对应的电压值之差，即可求得比辐射率．

三、实 验 结 果

试验是这样进行的，第一次环境辐射就是实验室内的墙壁与天花板所发射的红外辐射，其

出辐射度分布也许是不均匀的，但这无关紧要，因为从式(11)中可知，第一次环境辐射和第二次环境辐射中的相同部分所抵消，也就是说，第二次环境辐射是在第一次环境辐射的基础上叠加一个红外辐射源。本次实验采用碳化硅辐射源。其结构为带有螺纹槽的锥形碳化硅灯罩。当电热丝通电加热，碳化硅灯罩也随之升温，十多分钟后，碳化硅灯罩变成暗红色，这是光谱的边缘部分，其主峰在 8—9μ 之间，灯后用镀铬的凹面镜聚焦反射。这样的面辐射源的照度标定是首要问题。我们采用经过铬酸处理过的无镜面反射铝板作为标定比辐射率板。它的比辐射率值仍用封闭法进行多次重复测定而得。

把标定的已知比辐射率的铝板作为被测物，在两次辐射照度下，即一次把红外碳化硅灯以双层薄木板挡住(双层之间有一层空隙，使得朝着被测物的一个面不受辐射源的加热)。第二次不挡双层薄木板，红外辐射计对准标定比辐射率板，分别获得 V'_{s1} 及 V'_{s2} 两个信号电压。利用(11)式进行逆运算，可求得叠加的红外辐射源所对应的电压值。即：

$$V_p = \frac{V'_{s2} - V'_{s1}}{1 - \varepsilon'_\omega}, \tag{12}$$

式中 ε'_ω 为标定铝板在 λ_1 到 λ_2 波段，在辐射计方向的平均比辐射率。

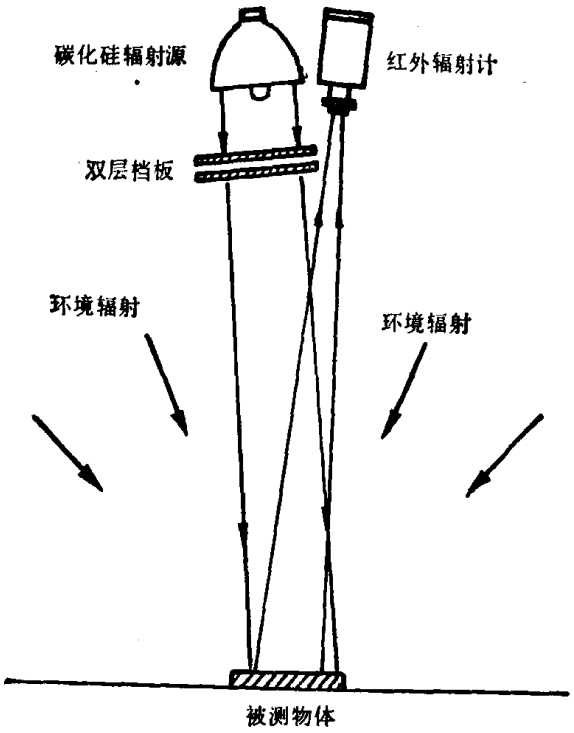

图 1　非封闭测量示意图

叠加的红外辐射源所对应的辐射计输出电压求得后，把标定铝板拿开，放上被测物，再与前述相同程序，把双层挡板挡上和不挡上分别获得 V_{s1} 和 V_{s2} 两个信号电压，连同 V_p 值一起代入(11)式即可求得被测物的比辐射率。

表 1　非封闭法与封闭法所测比辐射率对比

测量方法	铝板(有光泽)	铁板	砂纸	纤维板	木板	土砖	搪瓷(有光泽)	水
封闭法	0.28	0.47	0.79	0.88	0.90	0.95	0.88	0.98
非封闭法	0.22	0.45	0.79	0.91	0.88	0.96	0.66	0.99

表 1 所列数据表明，封闭法与非封闭法所测得结果基本一致. 另外，也可看出，表面光泽较高的铝板与搪瓷，用两种方法所得结果相差稍大些. 其原因是铝板和搪瓷有镜面反射. 要求被测物，红外辐射源和辐射计光轴的测量角比较严格. 而无镜面反射的被测物，测量角度无需很严格. 由于入射角度不垂直所引起的辐射源的削弱都是一样的，只要在标定辐射源时，三者的角度保持不变即可.

四、结　　语

非封闭法的意义在于能作远距离测定，关键是红外辐射源，若在飞机上测定，只要有一束红外辐射源，透过大气到达地面能保持足够的强度，使得在红外辐射计(或扫描辐射计)测量视场角里的地面所受辐射照度发生变化，就可获得地表被测物的比辐射的信息. 经测定表明，野外地物所受辐射照度来源是大气层. 在 8—14μ 的窗口里，大气层的辐射照度一般有 10—20mw/厘米^2，而太阳只有 0.1mw/厘米^2. 为了改变地面辐射照度，在辐射计的灵敏度范围内有明显感应，红外辐射源达地面的照度应有大气逆辐射相当量级. 若采用碳化硅面辐射源，必须加大反射镜的直径及增多辐射源的个数. 我们曾采用另一种辐射源——二氧化碳激光器，作了较远距离测定. 结果是满意的，因为它的测量与计算方法与上述不同，所以另文再叙. 激光辐射源具有远距离传输的优点，体积小，功率大，它将给在飞机上测量比辐射率带来广阔前景.

参　考　文　献

[1] 张仁华、田国良，科学通报，**26** (1981), 5: 297—300.
[2] Hundso, R. D., *Infrared System Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1969, 16—253.