第16卷 第10期 光 学 学 报 Vol. 16, No. 10
1996年10月 ACTA OPTICA SINICA October, 1996

双向反射分布函数的绝对测量方法*

魏庆农 刘建国 江荣熙
(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要 在光谱光度计的校准中, 需要在特定的入射和接收的几何条件下进行。在一些情况, 校准的几何条件和光谱区受到了限制, 因此有必要建立一种可适用于任意几何条件下和更宽光谱区的校准方法。本文介绍了一种校准光谱双向反射的方法, 可适用于各种入射和接收的几何条件。从400~ 2500 nm 的光谱范围内, 确定烧结的聚四氟乙烯标准样品的绝对双向反射系数, 参考标准是通过国家计量院传递的方向—半球反射系数。测量用的双向反射分布函数(BRDF) 测定仪可以全自动地测量几乎所有可能的几何条件下的绝对双向反射系数。

关键词 双向反射分布函数, 参考标准, 双向反射系数。

1 引 言

在商业、国防和遥感的应用中, 对各种不同材料的空间反射分布特性和光谱特性的了解显得越来越重要, 而描述其空间反射分布特性和光谱特性的是所谓双向反射分布函数。由于最初涉及的都是反射表面的可见特征, 如色彩、纹理、光泽等, 尔后在更宽的光谱区(特别是在红外区内) 积累了大量物体的反射率数据, 它们大部分都是同热辐射[1] 分析联系着的。近来人们对反射能量的光谱分析显示了更大的兴趣, 尤其是对用于地球遥感[2, 3] 和其它行星及卫星表面的反射数据。然而试图将这些数据应用到特定的情况时, 往往遇到很大的困难, 其主要因素之一是对几何参数没有注意。

虽然双向反射分布函数能够准确地反映目标的反射特性, 但在应用领域中遇到的主要问题是校准困难, 尤其是没有可用的双向反射分布函数参考标准, 而计量部门也只能给出一些典型的入射和接收几何条件下的数据, 但实际应用中的几何条件往往与计量门部给出数据的几何条件并不完全一致。为此曾作过理想朗伯体的假设, 即假设在所有方向上的反射系数与在0°入射/ 45°接收(以下简写为0°/ 45°) 方向上的反射系数相同, 这个方法会带来很大的误差[4, 5]。用镜面全反射特性来校准的方法是不行的, 因为镜面的方向性极强, 镜子所放位置的极小偏差都将产生严重的后果[6]。采用在实验室中测量的标准方法虽然较精确但也十分困难。本文的研究通过由计量部门传递的方向–半球反射率, 根据在双向反射分布函数测定仪上测得的数据, 可以给出所测样品的绝对双向反射系数。

* 国家自然基金资助项目。
收稿日期: 1995年4月17日; 收到修改稿日期: 1995年11月21日

2 原 理

物体的空间反射特性主要取决于辐射光源的性质、物体的反射特性及光源-物体-接收器间的相对位置。若一束光均匀辐射到足够大的均匀各向同性表面上(图1)，描述表面反射特性的量是双向反射分布函数 f_r[7]:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \mathrm{d}L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) / \mathrm{d}E_i(\theta_i, \varphi_i)$$
$$= dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) / [\mathrm{d}L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos\theta_i \mathrm{d}\omega] \quad (1)$$

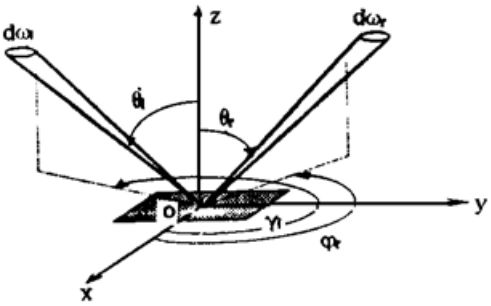

Fig. 1 Beam and samle geometry

上式 θ 是天顶角，φ 是方位角，所有同入射联系的量用下标 i 表示，同反射联系的量用下标 r 表示。$\mathrm{d}L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 是在方向 (θ_r, φ_r) 上的反射亮度($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)，$\mathrm{d}L_i(\theta_i, \varphi_i)$ 是在方向 (θ_i, φ_i) 上的入射亮度，$\mathrm{d}E_i(\theta_i, \varphi_i) = \mathrm{d}L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos\theta_i \mathrm{d}\omega$ 是入射照度($\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$)，$\mathrm{d}\omega$ 是入射亮度 $\mathrm{d}L_i(\theta_i, \varphi_i)$ 的辐射立体角。双向反射分布函数的值可在 0～ ∞ 之间变化。

尽管双向反射分布函数能够准确地反映物体的反射特性，但在一般情况下则显得非常复杂，尤其是精确测量物体表面的照度通常是很困难的，为此引入双向反射系数。其定义为样品表面反射能量与在同样入射和反射条件下的理想朗伯面的反射能量之比，即:

$$\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \mathrm{d}\Phi_r / \mathrm{d}\Phi_{r,\,\mathrm{ideal}} \qquad (\text{无量纲}) \quad (2)$$

$\mathrm{d}\Phi_r$ 是表面元 $\mathrm{d}A$ 反射至立体角 $\mathrm{d}\omega$ 中的能量，$\mathrm{d}\Phi_{r,\,\mathrm{ideal}}$ 是理想朗伯体的反射能量。

为书写方便，用 $\mathrm{d}\Omega$($\mathrm{d}\Omega \equiv \cos\theta \mathrm{d}\omega$) 来表示立体角 $\mathrm{d}\omega$ 同 $\cos\theta$ 的乘积，θ 是天顶角。$\mathrm{d}\Omega$ 通常称之为投影立体角。

$$\mathrm{d}\Phi_r = \mathrm{d}A \cdot L_r(\theta_r, \varphi_r) \cdot \mathrm{d}\Omega_r \quad (3)$$

假设在一个小的入射源立体角 $\mathrm{d}\omega$ 内，(1) 式的 $f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 在非0区域近似为常数，可以得到下式

$$L_r(\theta_r, \varphi_r) = f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \int L_i(\theta_i, \varphi_i) \mathrm{d}\Omega_i$$
$$= f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) E_i(\theta_i, \varphi_i) \quad (4)$$

将方程(4)代入方程(3)

$$\mathrm{d}\Phi_r = \mathrm{d}A f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) E_i(\theta_i, \varphi_i) \mathrm{d}\Omega_r \quad (5)$$

对理想朗伯表面，反射亮度 L_r 在整个上半球空间是相同的，面元 $\mathrm{d}A$ 反射进同样立体角 ω 的通量为:

$$\mathrm{d}\Phi_{r,\,\mathrm{ideal}} = \mathrm{d}A L_r(\theta_r, \varphi_r) \mathrm{d}\Omega_r = \frac{\mathrm{d}A}{\pi} E_i(\theta_i, \varphi_i) \mathrm{d}\Omega_r \quad (6)$$

方程(5)除以方程(6)，可得到双向反射系数和双向反射分布函数的关系

$$\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \pi f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \quad (7)$$

3 双向反射分布函数测定仪

图2给出双向反射分布函数测定仪的机械示意图，它是由中科院安徽光机所研制。图中A、B、C 是电机，三个电机的轴相交在样品面上。电机 C 带动光源、电机 B、电机 A 及样品在水平面内转动，电机 B 带动电机 A 和样品在垂直面内转动，而电机 A 带动样品转动。在转动过程中，电机 B 和电机 A 的转轴方向在空间是变化的。测量时探测器的观察方向不变，光

源方向始终与 B 轴一致，并能在水平面中转动。利用三个电机带动样品和光源转动来实现半球空间反射特性的测量原理可概括为：通过合理地选择一个三轴系统的数学坐标系，按一定的规律来旋转样品，可将复杂的三维空间的变角光度测量简化到二维平面上来实现。

电机 A 可从0°~ 90°之间变化，电机 B 和 C 都是从- 180°~ 180°，本系统的后向遮拦角小于2°。全套系统由计算机控制，图3是控制框图。电机的转动精度由码盘确定，码盘的精度为0. 1°。样品架直径15 cm，可以前后调节，以保证样品面在旋转面之上，从而确保在离轴观测时看到样品面的面积。

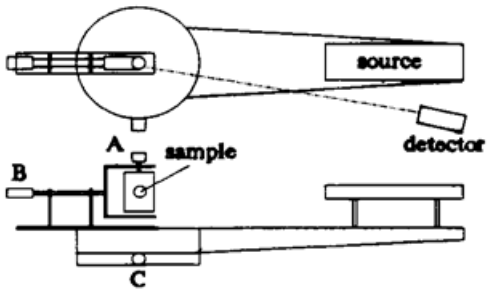

Fig. 2 BRDF measurement instrument schematic

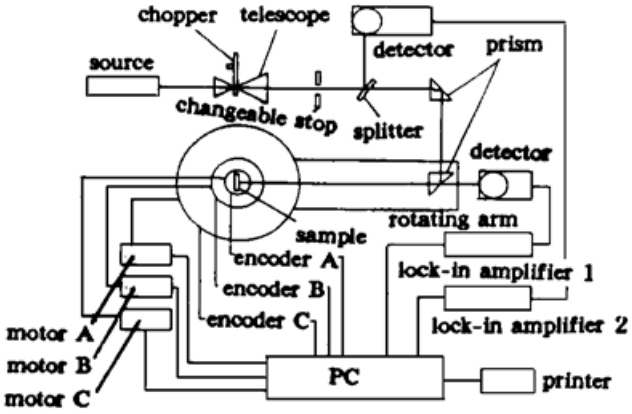

Fig. 3 BRDF measurement instrument computer-control diagram

电机 A、B 和 C 的转角与光源-样品-接收器的空间位置的关系如下，其详细内容见参考文献[8]

$$
\begin{cases}
\theta_r = a \\
\varphi_r = 90^\circ - \varphi_0' \\
\cos \varphi_0' = \dfrac{\sin b \sin c}{\sin \theta_r} \\
\cos \theta_r = \cos a \cos c - \sin a \cos b \sin c \\
\varphi_r = \varphi_0' - \varphi_0
\end{cases}
$$

式中 φ_0 为 A 轴正向与样品标志线的夹角，一旦样品装上之后就保持不变。只有在考虑各向异性的样品时，才需考虑它的大小。

光源为0. 633 μm 的 He-Ne 激光，光束经扩束器、斩波器和可变光栏之后，经一分束片分出一路光给监测光路，透射的平行光经全反射棱镜后照射至样品上。接收器件为光电倍增管，为了消除倍增管的空间效应，在它之前加上积分球作为平均器使用，接收立体角0. 0012 Sr。接收的信号通过锁相放大器，经 IEEE-488 GPIB 接口进入计算机。

由于双向反射分布函数的测量非常耗时，对一个入射角，接收天顶角 θ_r = 0°~ 80°，$\Delta\theta_r$ = 5°，接收方位角 φ_r = 0°~ 355°，$\Delta\varphi_r$ = 5°，全部测量一遍大约需8 h，所以接收系统的稳定性就显得尤为重要。图4是在10 h 内对系统稳定性的检验，其均方差为0. 15%。

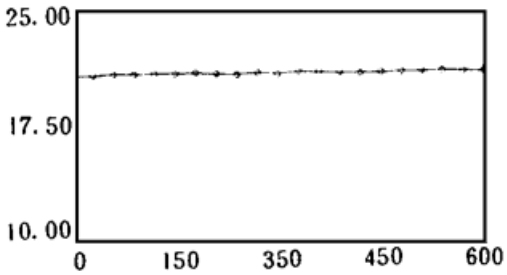

Fig. 4 BRDF measurement instrument output over 10 hour period

4 双向反射分布函数的绝对测量

为了得到绝对的双向反射分布函数，必须用能够测量的量来表达它，为此做如下的数学推导。

将(7)式代入(5)式得:

$$d\Phi_r = dA\ \pi^{-1}\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)\ E_i(\theta_i, \varphi_i)\ d\Omega_r \tag{9}$$

定义：方向–半球反射系数 ρ_d 为样品在上半球空间的反射通量与总的入射通量之比

$$\rho_d = \Phi_r(\theta_i, \varphi_i)/\Phi_0 = \int d\Phi_r/\Phi_0 \tag{10}$$

ρ_d 是一个可以测量的量，在日立V–3400光谱光度计上测出该量，它是入射方向的函数。重新写出方程(10)

$$\Phi_r = \int d\Phi_r = \rho_d(\theta_i, \varphi_i)\ E_i(\theta_i, \varphi_i)\ dA \tag{11}$$

$$\frac{\Phi_r}{d\Phi_r} = \frac{dA\ E_i(\theta_i, \varphi_i)\rho_d}{dA\ \pi^{-1}\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)\ E_i(\theta_i, \varphi_i)\ d\Omega_r} = \frac{dA\int L_r(\theta_i, \varphi_i)\ d\Omega_r}{L_r(\theta_i, \varphi_i)\ d\Omega_r}$$

简化上式，可以得到

$$\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{\pi\rho_d(\theta_i, \varphi_i)\ L_r(\theta_i, \varphi_i)}{\int L_r(\theta_i, \varphi_i)\ d\Omega_r} \tag{12}$$

方程(12)中，ρ_d 是已知的，L_r 是样品的出射亮度，在本双向反射分布函数测定仪中，样品始终比照射光斑直径和探测器的视场要小，这种情况下，锁相放大器的输出电压 $V(\theta_r, \varphi_r)$ 与出射亮度的余弦成正比。设比例系数为 K

$$V(\theta_r, \varphi_r) = K\ L_r(\theta_r, \varphi_r)\ \cos\theta_r \tag{13}$$

将方程(13)代入方程(12)，最终得到

$$\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{\pi\rho_d(\theta_i, \varphi_i)\ V(\theta_r, \varphi_r)}{\cos\theta_r\int[V(\theta_r, \varphi_r)/\cos\theta_r]\ d\Omega_r} \tag{14}$$

在方程(14)中，右边所有的量都是可测量的量。将它写成离散的形式，$d\Omega_r = \cos\theta_r\, d\omega_r = \cos\theta_r\sin\theta_r\,\Delta\theta_r\,\Delta\varphi_r$，再将 π 以离散的方式写出，$\pi = \sum\cos\theta_r\sin\theta_r\,\Delta\theta_r\Delta\varphi_r$，方程(14)就变成如下形式

$$\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{\rho_d(\theta_i, \varphi_i)\ V(\theta_r, \varphi_r)\ \sum\cos\theta_r\sin\theta_r\,\Delta\theta_r\Delta\varphi_r}{\cos\theta_r\sum V(\theta_r, \varphi_r)\ \sin\theta_r\,\Delta\theta_r\Delta\varphi_r} \tag{15}$$

方程(15)得到的是在6°入射情况下，各个方向的双向反射分布函数，这是因为用日立的V–3400光谱光度计得到的 ρ_d 是在6°入射的情况下测量的。若是对于任意的入射角度，可以通过选择一个特定角度的反射系数作为参考标准来得到。例如将6°入射45°接收(简写为6/45)作为参考标准

$$\frac{\beta(6/45)}{\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)} = \frac{\pi L_r(6/45)/[E_0\cos 6°]}{\pi L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)/[E_0\cos\theta_r]}$$

$$\beta(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{V(\theta_r, \varphi_r)\ \cos 6°\cos 45°}{V(6/45)\ \cos\theta_i\cos\theta_r}\ \beta(6/45) \tag{16}$$

图5给出入射角 $\theta_i = 6°$，$\varphi_i = 90°$ 时，测量波长 $\lambda = 0.633\ \mu m$，烧结的聚四氟乙烯标准板(安徽

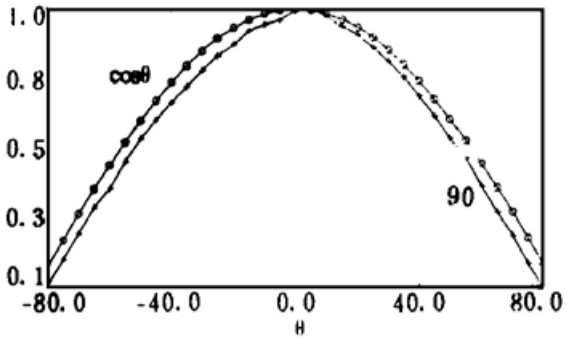

Fig. 5 PTFE sample reflectance results at 6° of illumination, ⊖ ideal cosine curve, + sample measurement results at φ_r = 90°

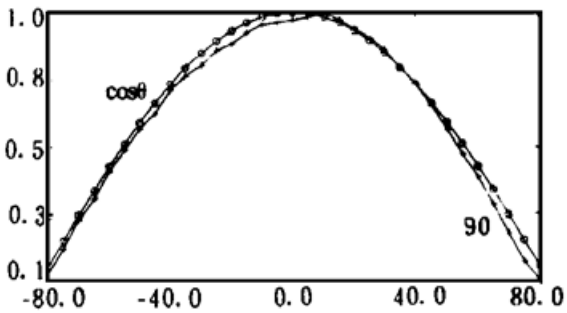

Fig. 6 PTFE sample reflectance results at 45° of illumination, ⊖ ideal cosine curve, + sample measurement results at φ_r = 90°

光机所遥感部研制) 的反射情况, 图6是在 θ_i = 45°, φ_r = 90° 时的测量结果。图中是归一化以后的结果。由图可以看出, 在小角度入射时, 聚四氟乙烯标准板与理想的漫射体还是有着较大的偏差, 在较大的角度入射时(40°~ 60°), 它的反射特性与理想的漫射体符合的比较好。图7是根据测量结果, 将各个测量的值按照方程(15) 计算出的绝对双向反射系数(双向反射分布函数 * π), 测量的方位角从 φ_r = 0 ~ 360°, $\Delta\varphi_r$ = 5°, θ_r = 0 ~ 80°, $\Delta\theta_r$ = 5°。θ_r = 85° 的值可通过 θ_r = 80° 的值外推得到, 当 θ_r 很大时, 标准器的反射很小, 所以这样做不会对最终结果带来多少的误差。对理想的漫射体, 双向反射系数(β) 的形状是高为 1 的圆柱体, 标准器的 β 形状与圆柱体符合得越好, 则该标准器的漫射性能越好。从图中可以看到 β 的最大值为1.13, 随着接收角的增大, 其值逐渐减小, θ_r = 80° 时, 它减小到0.6。美国Labsphere 公司生产的标准器的双向反射系数最大值是 1.05, θ_r = 75° 时, 减小到0.85[9]。

图7(b) 给出的是图7(a) 的等值线图。

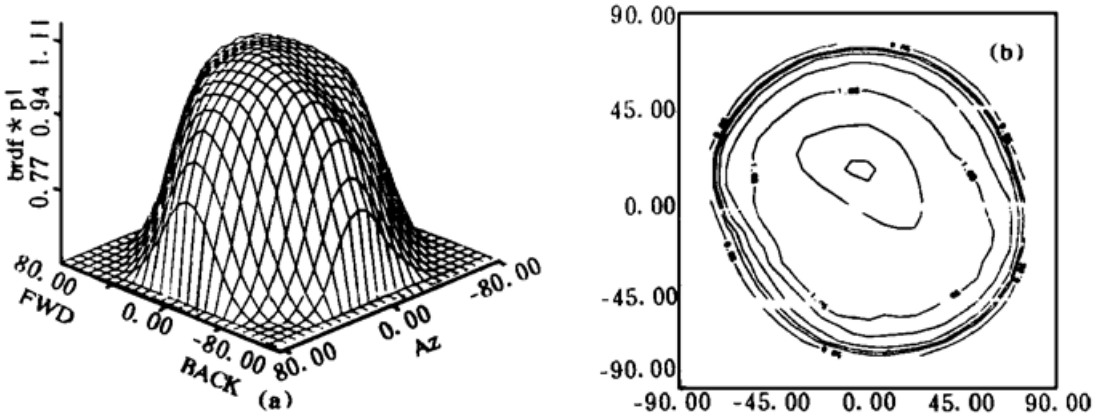

Fig. 7 Bidirectional reflectance factor of PTFE sample at 6° of illumination. FWD forward, Az azimuth. The ordinate of Fig. 7(a). is bidirectional reflectance factor (BRDF * π)

结　论　本文介绍了一种比较精确地测量双向反射分布函数的方法。通过计量院传递的方向-半球反射率, 利用双向反射分布函数测定仪可以测出在任意光源-样品-接收器几何状态条件下的绝对双向反射分布函数值, 只需更换光源波长, 即可得到光谱的双向反射分布函数。下一步将考虑反射的极化性质, 因为接收器对极化灵敏, 所有材料对入射辐射都不能完全去极化, 要想更精确地测量双向反射分布函数, 就必须考虑光源和接收器的极化效应。

参 考 文 献

[1] W. M. Brandenberg, J. T. Neu, Unidirectional reflectance of imperfectly diffuse surfaces. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(1) ·97~ 103

[2] B. Pinty, M. M. Verstraete, On the design and validation of surface bidirectional reflectance and albedo models. *Remote Sens. Environ.*, 1992, **41**(1) ·155~ 167

[3] 李小文, 地物的二向性反射和方向谱特征. 环境遥感, 1989, **4**(1) ·67~ 72

[4] M. D. Fairchild, D. J. O. Daoust, Goniospectro-photometric analysis of pressed PTFE powder for use as a primary transfer standard. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(16) ·3393~ 3396

[5] F. J. J. Clarke *et al.*, Goniophotometric and polarization properties of white reflection standard materials. *Light. Res. Technol.*, 1983, **15**(1) ·133~ 149

[6] W. Erb, High-accuracy gonioreflextance spectrometry at the PTB. *Adv. Stand. Method. Spectrophotom.*, 1987, **2**(1) ·87

[7] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond *et al.*, Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. *Natl. Bur. Stand. U.S. Monogr.*, 1977, 160

[8] 章立民, 魏庆农, 江荣熙, 一种新型的变角光度计. 光学仪器, 1988, **10**(4) ·27~ 35

[9] Xiaofan Feng, J. R. Schott, T. Gallagher, Comparison of methods for generation of absolute reflectance-factor values for bidirectional reflectance-distribution function studies. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(1) ·1234~ 1242

Measurement Method of Absolute Bidirectional Reflectance-Distribution Function

Wei Qingnong Liu Jianguo Jiang Rongxi

(*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Heifei* 230031)

(Received 17 April 1995; revised 21 November 1995)

Abstract A method for calibrating spectral bidirectional reflectance in any illumination and viewing geometrics is proposed. The absolute bidirectional reflectance factor of a standard sample made by sintered polyte-trafluoroethylene (PTFE) is determined in the range of 400~ 2500 nm. The reference standard is direction-hemisphere reflectance factor transferred by the National Institute of Measurement. The absolute bidirectional reflectance factor can be measured on the instrument of measuring bidirectional reflectance-distribution function at nearly all the illumination and viewing geometrics.

Key words bidirectional reflectance distribution function (BRDF), reference standard, bidirectional reflectance factor.