

光滑样片镜反射率谱建模

邹喜仁 白璐 吴振森

(西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 基于椭偏仪实验测量的材料表面镜反射率谱数据,分析和结合了多种常用的光滑样片模型的优点,提出了适用于光滑样片的镜反射率谱模型。分析了多种光滑样片在多个波段下的参数值和均方根误差,证明了该模型可以用于拟合光滑样片的镜反射率谱数据。比较了该模型与五参数双向反射分布函数(BRDF)模型,通过对该函数模型的上半空间积分,与实验测量的材料表面半球反射率比较,验证了该反射率模型的正确性。结果表明,该模型不仅能满足能量守恒定律和互易性,而且对光滑样片,该模型是 BRDF 模型的理想替代。

关键词 物理光学;双向反射分布函数;椭偏仪;光滑样片;反射率谱

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0612008

Mirror Reflectance Spectrum Modeling of Smooth Samples

Zou Xiren Bai Lu Wu Zhensen

(School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Based on the reflectance spectrum measured data obtained by ellipsometer, we analyse and combine the advantages of different models of smooth samples. A reflectance spectrum model for smooth samples is proposed. The different samples in various of bands are fitted, and the parameter values and the root mean square error correspondingly are analyzed. It proves that this model may fit the spectral data of smooth samples. To explore the correctness of the model, it is compared with the five-parameter bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model. The model integration in the upper half space is compared with the measured hemispheric anti-rate data of the samples. The results show that the model satisfies both reciprocity and energy conservation law, and it could ideally replace BRDF model for smooth samples.

Key words physical optics; bidirectional reflectance distribution function; ellipsometer; smooth samples; reflectance spectrum

OCIS codes 290.1483; 290.5825; 240.2130; 160.4760; 240.3695

1 引言

双向反射分布函数(BRDF)在地物遥感、计算机图像处理、目标识别和物质分类等领域都有广泛的应用^[1]。为了更精确地得到 BRDF 的实验测量值和了解影响材料 BRDF 值大小的因素。杨小虎等^[2]通过构建基于探测器的绝对辐射计,检验标准灯光谱辐照度值和标准漫反射板 BRDF 标准值变化,使 BRDF 的测量更趋于实际情况。刘子龙等^[3]提出了一种新型的 BRDF 绝对量值复现系统,该系统提高了测量的不确定度,适合做 BRDF 的绝对量

值复现,实现绝对测量。陈学等^[4]通过分析半透明介质层光谱散射特性,发现影响 BRDF 的数值大小主要是材料的介质层光谱光学厚度和基底反射率。但由于 BRDF 实验测量受到实验条件、测量速度等因素的限制很难获得任意入射和散射角度下的 BRDF 值,因此国内外针对不同的研究对象产生了大量的 BRDF 模型。Phong^[5]根据实测的材料表面反射特性数据库得到了一个没有物理意义的亮度模型,被广泛应用于计算机图形学。Torrance 等^[6]为了得到粗糙但不完全漫反射表面的 BRDF 值,提出

收稿日期: 2013-01-14; **收到修改稿日期**: 2013-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(60971065,61172031)和中央高校基本科研业务费专项资金(K5051207014)资助课题。

作者简介: 邹喜仁(1987—),男,硕士研究生,主要从事空间目标的紫外光探测与识别方面的研究。

E-mail: zouxiren2007@163.com

导师简介: 白璐(1973—),女,博士,教授,主要从事光在离散随机介质中的散射与传播、非视距紫外光的散射通信、空间目标的紫外光探测与识别等方面的研究。E-mail: blu@xidian.edu.cn

了 Torrance-Sparrow 模型。在该模型的基础上,吴振森等^[7]提出了五参数半经验模型。冯巍巍等^[8]在依据微面元理论建立的偏振 BRDF 基础上,建立了一种混合偏振 BRDF 模型。巩蕾等^[9]应用一阶矢量衍射理论推导出基底极化双向反射分布函数(PBRDF)模型。杨玉峰等^[10]结合了 Minnaert 模型^[11]和五参数模型的优点,提出了适用于散射特性弱的样片的六参数半经验模型。黄成功等^[12]通过对材料表面 BRDF 数据的三维测量,以及对现有的材料表面 BRDF 模型参数的优化处理,提出了材料表面的三维 BRDF 模型。陈学等^[13]通过建立蜂窝结构的等效面各向异性反射模型,采用蒙特卡罗法模拟获得内壁等效面的双向反射分布函数。Bai 等^[14]基于 Renhorn 等^[15]提出的十四参数模型提出了七参数半经验模型。王付刚等^[16]基于结合卫星表面材料的性质及实测实验数据,改进 Sun 模型^[17],提出适用于光滑样片 BRDF 模型。

虽然根据上述模型和算法可以模拟任意角度下的 BRDF,但是对于光滑样片,其 BRDF 的测量集中在很小的角度范围,采用传统的按散射角度一度一步进的测量精度,难于反映材料的反射特性,给理论建模带来很大的困难。在实验测量的精度低的同时,花费也比较昂贵。Berger 等^[18]用椭偏仪测量出样片的衰减系数和相位变化,提出了用椭偏基本方程中的对应参量近似代替 BRDF 模型的方法,并比较了采用两种不同方法所得到的材料复折射率的不同,证明了这种替代的可行性。本文采用直接测量光滑样片反射强度的镜向反射率的谱分布,利用 Berger 等^[18]提出的近似代替 BRDF 方法,提出了光

滑样片的反射率谱的函数模型。该模型不仅形式简单,并且证明了在上半空间的模型积分结果与实验测量的半球反射率的结果一致,且在一定的条件下,该模型能满足能量守恒和互易性定理。

2 光滑样片反射率谱模型的建立

BRDF 能较全面地描述探测目标的空间散射分布特性,能表征某一方向的入射波在上半球空间的反射能量分布^[19]。其物理定义为沿 (θ_r, φ_r) 方向出射的辐射亮度 $dL(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 与沿 (θ_i, φ_i) 方向入射的辐照度 $dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)$ 之比为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} = \frac{dL_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}{L_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda) \cos \theta_i d\omega_i}, \quad (1)$$

其中 f_r 单位为 sr^{-1} , θ_i 和 φ_i 是入射天顶角和方位角, θ_r 和 φ_r 是散射天顶角和方位角, λ 是入射波波长, ω_i 为入射立体角。

在可见光区和近红外区中,除样片进行过镀膜或抛光处理外,大部分材料表面的粗糙度远大于入射波长($k\sigma > 1$, 其中 σ 为材料表面均方根粗糙度)。材料表面可近似看成是由许多小面元组成,每个面元的反射遵循菲涅耳反射定律,并且不考虑衍射和面元间的多次反射。

图 1 给出了 BRDF 定义的角度关系。 z 轴是随机粗糙面平均表面的法线, \mathbf{k}_i 是入射波矢, \mathbf{k}_r 是散射波矢。 α 是微观小面元 dA 的面法线方向 \mathbf{n} 与 z 轴之间的夹角, γ 是微观小面元上本地坐标系的入射角。在直角坐标系中 α 和 γ 的角度关系为

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \gamma} \\ \cos^2 \gamma = \frac{1}{2} [\cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_r - \varphi_i) + 1] \end{cases}. \quad (2)$$

吴振森等^[7]建立的 BRDF 五参数半经验模型为

$$f_r(\theta_i, \theta_r; \varphi_i, \varphi_r) = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \exp[b(1 - \cos \gamma)^a] \frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i}, \quad (3)$$

式中第一项是将粗糙表面的高度起伏分布和斜率分布推广到非高斯分布的一般情况,第二项为 $k_d/\cos \theta_i$, 主要反映多重散射和材料光学特性对漫射分量的贡献。 k_b, k_r, a, b 和 k_d 为待定的五个参数。 k_b 决定镜面反射分量的大小; k_r 为小面元分布函数的参数, 决定表面的斜率分布; k_d 决定漫反射分量的大小; $G(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r)$ 为遮蔽函数; $k_r^2 \cos \alpha / [1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha]$

$\cos \alpha]$ 表示小面元分布函数; $\exp[b(1 - \cos \gamma)^a]$ 表示菲涅耳反射函数的近似描述。

椭偏仪是一种利用光的偏振特性进行材料光学特性测量的精密仪器,它可得到材料的膜厚,复折射率,镜反射率分布等信息。椭偏基本方程为^[20]

$$\rho = \tan \psi \exp(i\Delta) = \frac{r_p}{r_s}, \quad (4)$$

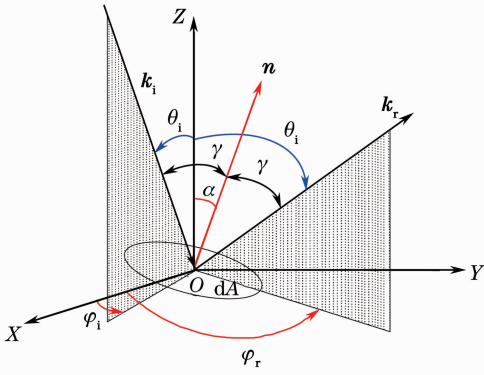


图1 BRDF角度定义

Fig.1 Angle definition of BRDF

式中 r_p 和 r_s 分别表示反射光电矢量平行和垂直于入射面的分量, ψ 表示衰减系数, Δ 表示相位变化。

Berger 等^[18] 利用椭偏仪测量出样片的 ψ 和 Δ , 提出可利用 $|\rho|^2 \approx |F_{r\parallel}/F_{r\perp}|^2$ 建立能用于计算样片表面的 BRDF 值的模型, 文献根据考虑菲涅耳反射系数:

$$F_{\parallel} = F_{\perp} \frac{(k' - \sin \gamma)^2 + k''^2}{(k' + \sin \gamma \tan \gamma)^2 + k''^2}, \quad (5)$$

式中

$$\begin{cases} k'^2 = \frac{1}{2}(\sqrt{n^2 - k^2 - \sin^2 \gamma + 4n^2 k^2} + \\ (n^2 - k^2 - \sin^2 \gamma), \\ k''^2 = \frac{1}{2}(\sqrt{n^2 - k^2 - \sin^2 \gamma + 4n^2 k^2} - \\ (n^2 - k^2 - \sin^2 \gamma), \end{cases} \quad (6)$$

式中 F_{\parallel} 和 F_{\perp} 分别表示菲涅耳反射系数项的平行分量和垂直分量。 n, k 分别表示复折射率的实部及虚部。由(4)~(6)式可知, 通过椭偏仪测量出材料的 ψ 和 Δ , 利用 Berger 等^[18] 的 BRDF 估算方法, 可以得到材料的复折射率 n 和 k 值, 将利用此方法得到的复折射率的值与其他方法得到的 n 和 k 值进行了对比, 证明了这种利用 $|\rho|^2$ 估算 BRDF 值方法的正确性。但是这种证明并不严格, 通过直接测量散射强度的镜向反射强度会使得反射率谱的建模及拟合结果更为准确。

根据 Berger 等^[18] 提出的方法和实验测量得到的光滑样片的反射率谱数据的曲线形状, 结合王付刚等^[16] 所提出的适用于光滑样片的 BRDF 模型以及陈超等^[1] 基于遗传算法拟合所用模型的优点, 提出光滑样片的反射率模型为

$$R_r(\theta_i, \theta_r, \lambda) = \frac{k_1}{8 \cos \theta_i \cos \theta_r} \exp\left[-\frac{(\theta_i - \theta_r - k_2)^2}{k_3^2}\right], \quad (7)$$

式中 k_1, k_2 和 k_3 为待定的参数, $R_r(\theta_i, \theta_r, \lambda)$ 表示是光谱反射率, 也可用于估算光滑样片的 BRDF 值。其中 k_1 的大小与菲涅耳反射因子 $\bar{F}(\alpha, \lambda)$ 有关; 参数 k_2 用于调节入射角度与反射角度之间的误差, 即镜反射的瓣膜宽度; 参数 k_3 是与材料表面均方根粗糙度 σ 有关的参数。使用椭偏仪测量光滑样片的反射率时, 入射光与反射光处在同一主平面内, 入射和散射方位角的差值为 0, 即: $\varphi_r - \varphi_i = 0$ 。从该模型的数学形式, 可以看出对入射角及散射角存在对称性关系, 入射角与散射角对换不影响计算结果, 故该模型满足互易性定理的要求。易于验证, 对于模型进行上半空间的体积分, 有

$$\rho(\theta_i, \theta_r, \lambda) = \iint_{2\pi} R_r(\theta_i, \theta_r, \lambda) d\Omega \leq \frac{2\pi a}{8}, \quad (8)$$

式中 Ω 为空间立体角, (8) 式即当且仅当参数 $a \leq 4/\pi$ 时, 该模型在上半空间的半球反射率的积分值满足能量守恒定律。

3 模型验证

采用椭偏仪测量了光滑样片光学太阳反射镜(OSR)片和镜子的镜反射率谱数据。其中反射率强度的实验测量使用的是 J. A. Woollam 公司生产的椭偏仪, WVASE32 型。散射角的步进精度为 0.2° 。散射强度采用相对测量方法测量, 排除了背景基线的影响。为了验证上述模型的正确性和适用范围, 在拟合过程使用均方根误差(RMSE)对曲线的拟合结果进行评价, 并使用瑞利判据^[21] 对样片的粗糙度进行判定。该过程使用 Matlab 工具箱进行拟合^[22]。所测量的波长范围是 240~1000 nm。实验所测量的入射角度分别为 $30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 。在镜向反射角度的附近 $\pm 2^\circ$ 范围内进行了反射强度的测量。

图 2 给出了光滑的 OSR 样片在波长为 360、500、550、860 nm 时, 在不同的入射角下反射强度随散射角的分布情况。其中光滑的实线表示按照模型拟合得到的结果, 离散的正方形点、上三角形和下三角形分别代表入射角度为 $30^\circ, 45^\circ$ 和 60° 时实验测量得到的数据值。

表 1 给出了 OSR 样片的模型拟合结果和 RMSE 值。由表 1 可知, 该模型可以用于模拟 OSR 样片, 所产生的 RMSE 较小(小于 5%), 可满足一般工程的要求。

图 3 给出了普通镜子样片的反射率。其中的入射角及波长参数的选取与图 2 中一致, 可以看出实

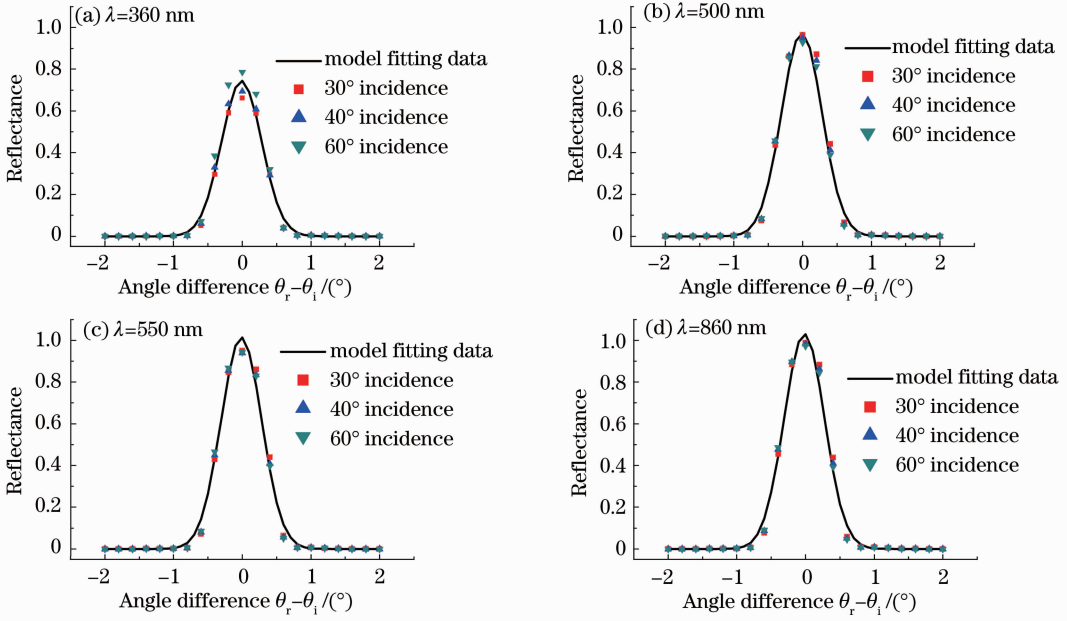


图 2 OSR 样片的反射率在入射角度为 30°、45° 和 60° 下不同波长的结果

Fig. 2 Reflectance of OSR sample with the incident angle of 30°, 45° and 60° for different wavelengths

表 1 OSR 样片的拟合参数值和 RMSE

Table 1 Fitting parameter values and RMSE of OSR sample

Wavelength / nm	k_1	k_2	k_3	RMSE / %
360	0.7443	-0.01156	0.4161	2.231
500	0.9740	-0.01506	0.4177	3.054
550	1.0150	-0.01660	0.4176	3.156
860	1.0310	-0.01968	0.4155	3.193

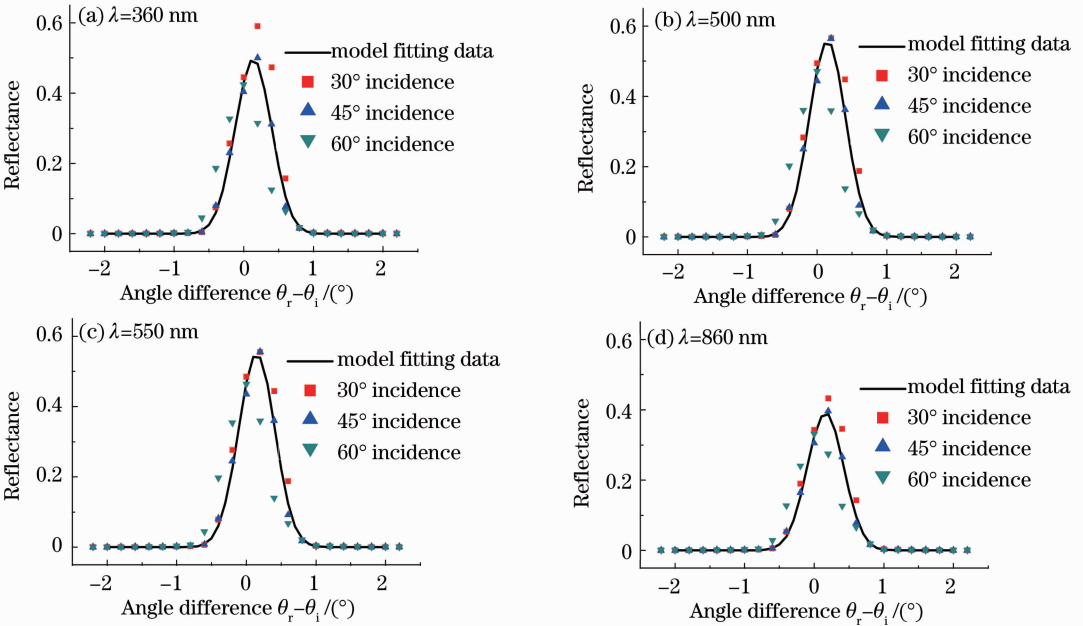


图 3 镜子样片的反射率在入射角度为 30°、45° 和 60° 下不同波长的结果

Fig. 3 Reflectance of mirror sample with the incident angle of 30°, 45° and 60° for different wavelengths

验中用到的反射率谱的模型,在不同的入射角度、不同的波长、针对不同的样片都能与实验测量得到的反射率的结果吻合得很好。

普通镜子的模型拟合结果的参数值及 RMSE 如表 2 所示。

表 2 镜子的拟合参数值和 RMSE

Table 2 Fitting parameter values and RMSE of mirror sample

Wavelength /nm	k_1	k_2	k_3	RMSE /%
360	0.4972	0.1379	0.3704	1.163
500	0.5580	0.1659	0.3693	1.351
550	0.5494	0.1682	0.3693	1.308
860	0.3909	0.1594	0.3710	0.791

由表 2 可以看出,拟合所产生的 RMSE 均在 2% 以内,对该材料该模型能更好地满足工程需求。根据表 1 和表 2 的拟合结果可以得到,该模型是能够提供光滑样片的满足工程实用的反射率谱模型。

根据 Zou 等^[23]对国内主要的 BRDF 半经验模型比较结论可知,对于光滑样片可以使用五参数 BRDF 模型和七参数 BRDF 模型拟合,且五参数 BRDF 模型耗时较少。为了节约时间和证明该模型可以用于近似替代 BRDF 模型,本文用反射率模型和五参数 BRDF 对同一样片的 BRDF 值进行拟合。图 4 给出了 OSR 样片的 BRDF 实测值与五参数

BRDF 模型拟合结果和该反射率模型之间的比较情况。其中离散的星形表示实验测量得到的 BRDF 实测数据值,带倒三角形虚线表示五参数的 BRDF 拟合结果,带方形实线表示反射率的模型。在使用五参数半经验 BRDF 模型时,采用人工免疫网络算法^[24,25]进行参数拟合。为了更快地得到拟合结果,仅选择 45° 角度入射时测量的 BRDF 数据,且归一化处理了 BRDF 的测量结果,再进行拟合。从图 4 可以看出,在不同的入射波长下,反射率的模型对光滑的 OSR 样片能起到很好的替代作用。

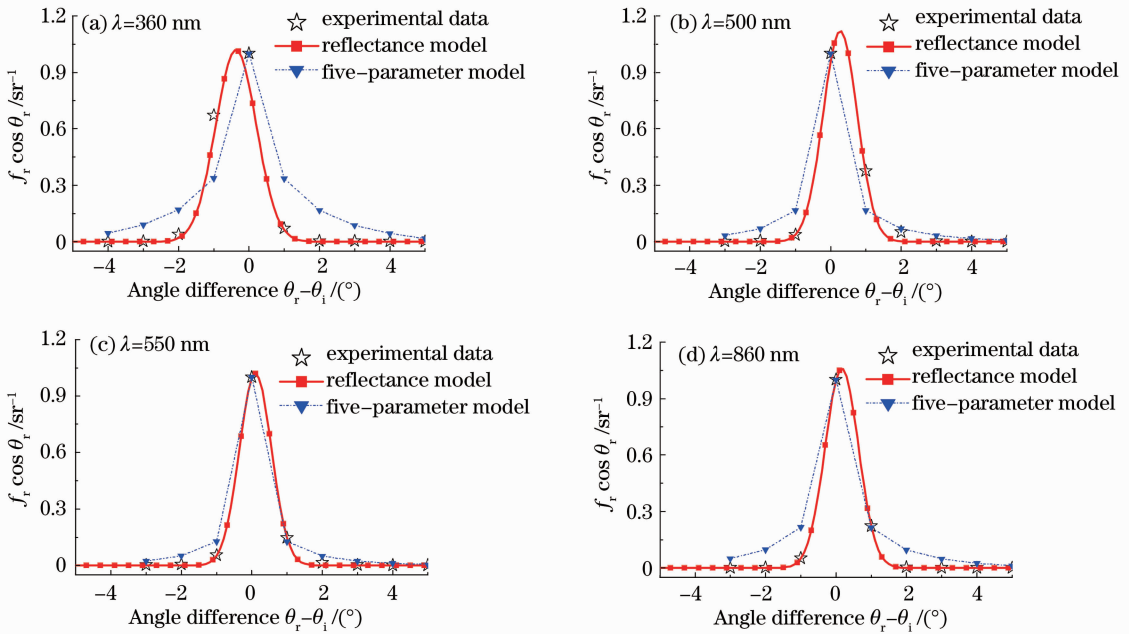


图 4 OSR 样片反射率模型与五参数模型在不同波长下的比较

Fig. 4 Comparison of reflectance model with five-parameter BRDF model of OSR sample for different wavelengths

为了进一步验证该模型的正确性,将反射率谱的模型与材料的半球反射率的实测结果进行比较。以研制其能够近似代替 BRDF 模型的正确性。

表 3 给出了 OSR 样片的反射率谱上半空间积

分的结果与实测的样片的上半空间半球反射率的数据比较,并给出了两种结果之间的相对误差。其中各个波长的上半空间半球反射率的实验测量数据采用的是分光光度计 V-670 型。

表3 OSR 样片反射率积分结果与上半空间半球
反射率测量结果的比较

Table 3 Comparison between the reflectance integration
results of OSR sample and measured data of upper half
space hemispherical reflectance

Wavelength / nm	Hemispherical reflectance / %	Integration result / %	Error / %
360	41.3988	42.91	3.650
500	56.3683	56.64	0.482
550	59.2698	59.01	0.438

结果显示,积分结果和半球反射率的测量结果之间的误差在允许的范围,这进一步证明了该模型可以近似代替 BRDF 模型的正确性。

4 结 论

提出了一个适用于拟合光滑样片的反射率谱的模型,该模型吸收了一些光滑样片 BRDF 模型的优点,借鉴了 Berger 等^[18]提出的 BRDF 模型与反射率模型的处理方法。给出了该模型满足能量定律的条件。并保证了该模型在形式上满足互易性定理的需求。对于不同样片的多个波长、不同入射角度下的镜反射率进行了基于椭圆偏的测量及模型的数据拟合,拟合结果所产生的 RMSE 均小于 5%,证明了该模型可用于模拟光滑样片的镜反射率谱数据。通过与五参数 BRDF 模型比较,研制了该模型对于光滑的样片,可以近似替代 BRDF 统计模型。并且通过将该函数模型进行上半空间的积分,与分光光度计的实测结果的对比,从理论上验证了这种近似替代的正确性与可行性。通过这种近似替代,不仅节省了大量的 BRDF 测量时间和测量所花费成本,尤其对光滑样片,提高 BRDF 模型建模的精度。为光滑材料的光谱建模的理论方法提供了有益的补充。

参 考 文 献

- Chen Chao, Zhao Yongqiang, Luo Li *et al.*. Model and analysis of spectropolarimetric BRDF of painted target based on GA-LM method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(3): 729~734
陈超,赵永强,罗丽等.基于遗传LM算法的涂层目标光谱偏振BRDF建模分析[J].*光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(3): 729~734
- Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu *et al.*. Wavelength dependence of the spectral irradiance of standard lamp and bi-reflection distribution function of diffuser based on standard detectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612008
杨小虎,王淑荣,黄煜等.基于标准探测器研究标准灯光谱辐照度和漫反射板双向反射分布函数随波长的变化[J].*光学学报*, 2011, **31**(6): 0612008

- Liu Zilong, Lian Yusheng, Wang Jiajia *et al.*. System design absolute realization of bidirectional reflectance distribution function value [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100404
刘子龙,廉玉生,王佳佳等.双向反射分布函数绝对量值复现的系统设计[J].*光学学报*, 2011, **31**(s1): s100404
- Chen Xue, Sun Chuang, Xia Xinlin. Spectral scattering properties analysis of semitransparent medium layer with rough surface by microfacet slope method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1229001
陈学,孙创,夏新林.基于微面斜率法的粗糙表面半透明介质层光谱散射特性分析[J].*光学学报*, 2012, **32**(12): 1229001
- B. T. Phong. Illumination for computer generated pictures [J]. *Communications of the ACM*, 1975, **18**(6): 311~317
- K. E. Torrance, E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(9): 1105~1112
- Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua *et al.*. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 897~901
吴振森,谢东辉,谢品华等.粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J].*光学学报*, 2002, **22**(8): 897~901
- Feng Weiwei, Wei Qingnong, Wang Shimei *et al.*. A hybrid model of polarized BRDF for painted surfaces [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 962~966
冯巍巍,魏庆农,汪世美等.涂层表面偏振双向反射分布函数的多参量混合模型[J].*光子学报*, 2009, **38**(4): 962~966
- Gong Lei, Wu Zhensen. Different films influence on polarized light scattering of slightly rough substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1029001
巩雷,吴振森.不同涂层对微粗糙基底的极化光散射影响[J].*光学学报*, 2011, **31**(10): 1029001
- Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **32**(2): 0229001
杨玉峰,吴振森,曹运华.一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J].*光学学报*, 2011, **32**(2): 0229001
- M. Minnaert. The reciprocity principle in lunar photometry [J]. *The Astrophysical Journal*, 1941, **93**: 403~410
- Huang Chenggong, Wu Junhui, Zhao Linfeng *et al.*. A 3D measuring technique of laser scattering characteristic data for surface [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0708004
黄成功,吴军辉,赵琳峰等.一种表面激光散射特性数据三维测量方法[J].*中国激光*, 2012, **39**(7): 0708004
- Chen Xue, Sun Chuang, Xia Xinlin. Stray light suppression property of baffle with honeycombed wall [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0523004
陈学,孙创,夏新林.具有蜂窝内壁的遮光罩杂散光抑制特性分析[J].*光学学报*, 2012, **32**(5): 0523004
- L. Bai, Z. Wu, X. Zou *et al.*. Seven-parameter statistical model for BRDF in the UV band [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(11): 12085~12094
- I. G. E. Renhorn, G. D. Boreman. Analytical fitting model for rough-surface BRDF [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12892~12898
- Wang Fugang, Zhang Wei, Wang Hongyuan. Reflection characteristics of on-orbit satellite based on bidirectional reflectance distribution function [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(9): 6~12
- Y. Sun. Statistical ray method for deriving reflection models of rough surfaces [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(3): 724~744
- K. Berger, A. Weidlich, A. Wilkie *et al.*. Modeling and verifying the polarizing reflectance of real-world metallic surfaces [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2012, **32**(2): 24~33

- 19 F. E. Nicodemus. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(6): 1474~1475
- 20 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. Ellipsometry and Polarized Light [M]. Liang Minji et al.. Transl. Beijing: Science Press, 1986. 179~197
阿查姆, 巴夏拉. 椭圆偏振测量术和偏振光[M]. 梁民基等译. 北京: 科学出版社, 1986. 179~197
- 21 F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung. Microwave Remote Sensing: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory [M]. Huang Peikang et al.. Transl. Beijing: Science Press, 1987. 231~293
乌拉比, 穆尔, 冯健超. 微波遥感: 雷达遥感和面目标的散射、辐射理论 [M]. 黄培康等译. 北京: 科学出版社, 1987. 231~293
- 22 Su Jinpeng, Zhang Lianhua. Matlab Toolbox Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 498~509
苏金鹏, 张莲花. Matlab 工具箱应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 498~509
- 23 X. Zou, L. Bai, Z. Wu. Comparisons of multi-parameter bidirectional reflectance distributional function [C]. Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE), 2012 10th International Symposium on. (IEEE, 2012). 787~790
- 24 Li Tuo. Study on Spectrum Scattering Characteristic of Object in UV Band [D]. Xi'an: Xidian University, 2012
李拓. 目标紫外光谱散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012
- 25 Qi Yutao, Liu Fang, Jiao Licheng. A distributed artificial immune algorithm for numerical optimization [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, **37**(7): 1554~1561
戚玉涛, 刘芳, 焦李成. 基于分布式人工免疫算法的数值优化 [J]. 电子学报, 2009, **37**(7): 1554~1561

栏目编辑: 李文喆