

一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型

杨玉峰 吴振森 曹运华

(西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 通过对五参数半经验双向反射分布函数(BRDF)模型进行修改,并吸收其它模型的优点,提出了一个六参数BRDF模型,该模型形式更简单,拟合效果更好,并且模型满足了能量守恒和互易性,使该模型更趋于实用化。利用模拟退火算法对多种不同样片的BRDF进行了拟合建模,获得了相应模型的参数值和偏差,结果证明了该模型的正确性,尤其适合对散射特性较弱样片BRDF的拟合建模。对于散射特性较弱的样片,与常用的五参数模型进行了比较,该模型的漫反射部分拟合效果更好,总体精度还略有提高。最后,为了更直观地表示目标样片的BRDF,分别给出了各个角度BRDF的三维拟合图。

关键词 光学器件;散射;双向反射分布函数;互易性;能量守恒;五参数模型

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0229001

Practical Six-Parameter Bidirectional Reflectance Distribution Function Model for Rough Surface

Yang Yufeng Wu Zhensen Cao Yunhua

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

Abstract By modifying five-parameter semiempirical model of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) and absorbing the advantages of other models, a six-parameter model of BRDF is proposed. The model, with simpler expression and better fitting effect, satisfies both reciprocity and energy conservation properties of BRDF, which enables the model to be practical. Simulated annealing algorithm is carried out on the statistical modeling of the BRDF of different samples, the corresponding model parameter values and deviation are obtained, the results verify the correctness of the model. According to the samples with weak scattering, which is especially suitable for this model, the diffuse component of the model has better fitting effect than that of the five-parameter model, and its total accuracy is slightly higher than that of the five-parameter model. Finally, to show the BRDF of the target samples visually, three-dimensional BRDF maps at differently incident angles are given.

Key words optical devices; scattering; bidirectional reflectance distribution function; reciprocity; energy conservation; five-parameter model

OCIS codes 290.1483; 290.5820; 290.5825; 240.3695

1 引言

双向反射分布函数(BRDF)的概念最早由 Nicodemus^[1,2]提出,反映了材料的一个基本光学特性,表示某一方向的入射波在表面上半球空间的反射能量分布。它取决于表面粗糙度、介电常数、辐射波长和偏振等因素^[3~6]。最初的理论是从光辐射角度定义并得到发展的,现已广泛应用于激光、红外和微

波段的散射和辐射问题,并进一步延拓到遥感方面^[7~9]。

五参数BRDF已广泛地用于地物、植被遥感,大气辐射传输以及粗糙目标的激光或光谱散射与辐射。由于BRDF实验测量受到实验条件、测量速度等的限制,很难获得任意入射和散射条件下的BRDF,因此国内外针对不同的研究对象,产生了大

收稿日期: 2011-06-24; **收到修改稿日期:** 2011-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(61172031)资助课题。

作者简介: 杨玉峰(1980—),男,博士研究生,主要从事目标光散射特性和图像处理等方面的研究。

E-mail: yfyang@mail.xidian.edu.cn

导师简介: 吴振森(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事目标与环境的光电特性与计算机仿真等方面的研究。

E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

量的 BRDF 模型。利用有限的实验数据,通过最优化算法获得 BRDF 模型,就可以计算出任意入射和接收条件下的目标表面 BRDF 值^[7]。BRDF 模型分为数值模型和解析模型,数值模型是指使用射线跟踪或者蒙特卡罗方法数值仿真得到的表面 BRDF;而解析模型是指具有一定数量参数的解析表达式,按解析表达式的构成方式,解析模型又可以分为物理模型和经验模型。物理模型的解析式是基于一定的物理原理获得的,通常在精度方面有一定的限制;而经验模型是根据大量的实验数据总结出来的数学表达式,其参数一般没有物理含义(有一些模型具有一定的物理含义,又包含经验参数,被称为半经验模型),该方法由于形象、直观、公式简单而被广泛使用。

自 BRDF 的概念被提出以来,出现了大量的 BRDF 模型。Renhorn 等^[10]于 2008 年提出了一种有 14 个参数的 BRDF 模型,该模型将粗糙面表面的 BRDF 分为表面散射、体散射和后向散射三部分,同时考虑到入射和散射角、有效折射率、粗糙面表面自协方差函数和相关长度的影响。该模型的优点在于:可以较好地模拟在大角度时的前向散射以及在大粗糙度时的后向散射。Minnaert 模型可以模拟反射系数随角度缓慢变化的情况,还可以用来模拟植被、土壤等环境的投影情况,并可以转化为 Lambert 模型,模型符合互易性原理^[11],但不能模拟具有较强的前向或后向散射的情况。Phong^[12]根

据实验测量的表面反射特性得到了一个没有物理意义的亮度模型,被计算机图形学广泛使用,但是它能量不守恒,不具有互易性。Torrance 等^[13,14]导出了不是完全漫反射的粗糙表面 BRDF 模型,模型假设表面由法线方向呈高斯分布的小面元组成,且小面元反射遵循菲涅耳关系,模型中含有遮蔽和掩饰因子。曹运华等^[7,9]将上述模型进行了修正,给出了 BRDF 的五参数半经验模型,该模型应用于光谱 BRDF 的拟合,效果不错,但不满足能量守恒和互易性。

如果不满足互易性,就意味着光路不可逆。能量守恒是反映材料散射特性的标志,所以一个比较理想的 BRDF 模型首先应该满足能量守恒和互易性。本文提出的新模型吸收了五参数模型和 Minnaert 模型的优点,针对散射特性较弱的材料样片的进行了建模,尤为重要是该模型满足了能量守恒和互易性。

2 BRDF 统计模型

在可见光和近红外区域,除镀膜、抛光样片外,大多数粗糙表面的高度起伏均方根 σ 都大于入射波长 ($k\sigma > 1$)。Torrance 等^[13,14]导出了粗糙但不是完全漫反射表面的 BRDF。在此基础上,曹运华等^[7,9]对该模型进行了修改得到了 BRDF 的五参数半经验模型为

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

式中

$$\cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \gamma}, \quad \cos^2 \gamma = \frac{1}{2} (\cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \varphi_r + 1),$$

该模型分为两项,第一项代表镜反射分量,第二项代表漫反射分量。其中 θ_i 为入射角, θ_r 为散射角, α 为微观小平面对法线方向 \hat{n} 与 z 轴之间的夹角, γ 为微观平面上本地坐标系的入射角,而 k_b, k_r, b, a, k_d, c 为待定参数。

很明显该模型不满足互易性和能量守恒,而且该模型第一项的分母中含有 $\cos \theta_i \cos \theta_r$,使用时不太方便。并且该模型的漫反射项过于简单,对漫反射部分拟合效果不好。

Minnaert 模型^[11]为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{\rho_0}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^{k-1}, \quad (2)$$

($0 < k < 1$)

该模型可以模拟反射系数随角度缓慢变化而变化的植被、土壤等环境情况,但不能模拟具有较强的前向或后向散射的情况。并且当 $k=1$ 时该模型可以转化为 Lambert 模型。该模型非常适合模拟近似朗伯面,并且满足互易性原理。

为了更好地表示漫反射特性并满足互易性,用 Minnaert 模型来代替五参数模型的第二项。在粗糙表面入射(散射)角度越大,被遮挡的就越多,散射部分就越小。为了满足这一散射特性,遮蔽函数应随着入射(散射)角的增大而减小。但是五参数半经验模型中的遮蔽函数 G 过于复杂且不满足互异性,所以用函数 $\ln(1 + \cos \theta_i \cos \theta_r)$ 进行了代替,该函数

形式简单并且满足了互异性和遮蔽函数特性。另外,还删去了影响遮蔽函数特性的部分 $\frac{1}{\cos \theta_i \cos \theta_r}$ (该函数随着入射或散射角度的增大而增大,与遮蔽函数趋势相反)。

$$f_r = \frac{k_b}{\pi \ln 2} \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \times \exp[-|b| \cdot (1 - \cos \gamma)^a] \times \ln(1 + \cos \theta_i \cos \theta_r) + \frac{k_d}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^c. \quad (3)$$

显然,修改后的模型遵循亥姆霍兹(Helmholtz)互易性,待定参数为 k_b, k_r, b, a, k_d, c ,与五参数模型相比该模型中主要反映漫反射分量的部分多了参数 c ,使得该模型能够更好地反映材料的漫反射特性。 $\cos \alpha$ 和 $\cos \gamma$ 没有变化,如(1)式。由于该模型的第一项含

有 $\ln(1 + \cos \theta_i \cos \theta_r)$,第二项含有 $(\cos \theta_i \cos \theta_r)^c$,所以当 $c \neq 0$ 时,当入射天顶角 θ_i 或散射天顶角 θ_r 达到 90° 时,散射部分完全被遮挡, f_r 等于 0,这与实际情况也相符。

令

$$f_n(\alpha) R_0(\alpha) = \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos^2 \alpha} \times \exp[-|b| (1 - \cos \gamma)^a]. \quad (4)$$

如图 1 所示, $f_n(\alpha)$ 为微小面元的法线在倾斜角 α 内的分布函数,在球坐标中,此函数是一个旋转椭球体,系数 k_r 等于其水平轴与垂直轴之比, $R_0(\alpha)$ 代表面元局部菲涅耳反射系数,这里用指数函数近似模拟。

$$\rho_{2\pi}(\theta_i, \varphi_i) = \int_{2\pi} f_r \cos \theta_r d\omega_r = \int_{2\pi} \left[\frac{k_b}{\pi \ln 2} f_n(\alpha) R_0(\alpha) \ln(1 + \cos \theta_i \cos \theta_r) + \frac{k_d}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^c \right] \cos \theta_r d\omega_r \leq \int_{2\pi} \left[\frac{k_b}{\pi \ln 2} \ln 2 + \frac{k_d}{\pi} \right] \cos \theta_r d\omega_r = k_b + k_d. \quad (5)$$

当且仅当 $k_b + k_d \leq 1$ 时, BRDF 满足能量守恒的条件。

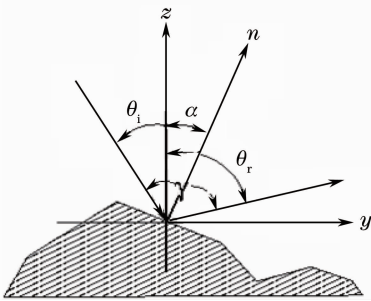


图 1 微观几何结构的 BRDF 模型

Fig. 1 Diagram showing the microgeometric model of BRDF

3 BRDF 模型验证

为了确定该模型的正确性和局限性,采用了多种材料样片的实验数据进行了验证,并与原来的五参数模型进行了比较。为了方便比较两个模型的优劣性,两个模型都采用了模拟退火算法。

以下利用土黄色漆板、黄色漆板和白色漆板三种材料样片的 BRDF 实验数据进行建模,结果如图 2 所示。

图 2 给出了土黄色漆板的实验数据和模型的计算结果,入射角度分别为 $0^\circ, 10^\circ, 30^\circ$ 。由图可知,该

模型的拟合效果良好,6 个参数的取值分别为 $k_b = 0.2545, k_r = 21.8031, b = -27.5721, a = 0.6705, k_d = 0.3676, c = 1.2000$ 。由于 $k_b + k_d < 1$,所以该模型满足了非常重要的能量守恒条件。为了进一步确定该模型的拟合效果,与常用五参数模型进行了比较。

两个模型同时对三组实验数据进行了拟合,从图 2(a), (b) 可以看出,由于该模型在漫反射部分增加了一个参数,使得漫反射部分具有更佳的拟合效果,比五参数模型更加贴近实验数据,效果明显好于五参数模型。由于采用了三组数据进行拟合,在拟合过程中参数选取上更加贴近了前两组数据,所以图 2(c) 看起来拟合效果稍差一些,但这并不影响该模型的总体拟合效果,该模型的总体拟合偏差为 0.0115,比五参数模型的偏差 0.0121 更小一些。为了更直观地表现该模型的效果,图 2(d), (e), (f) 分别给出了该模型的三维(3D) BRDF,可以清楚地看出该样片随着入射角的增大,镜反射部分在总体反射中所占的比重有变小的趋势。

图 3 给出了另一种黄色漆板的实验数据和模型的计算结果,入射角度为 $0^\circ, 10^\circ$ 时的实验数据如图 3(a), (b)。由图 2 可知,该模型的拟合效果也非常好,6 个参数的取值分别为 $k_b = 0.1932, k_r =$

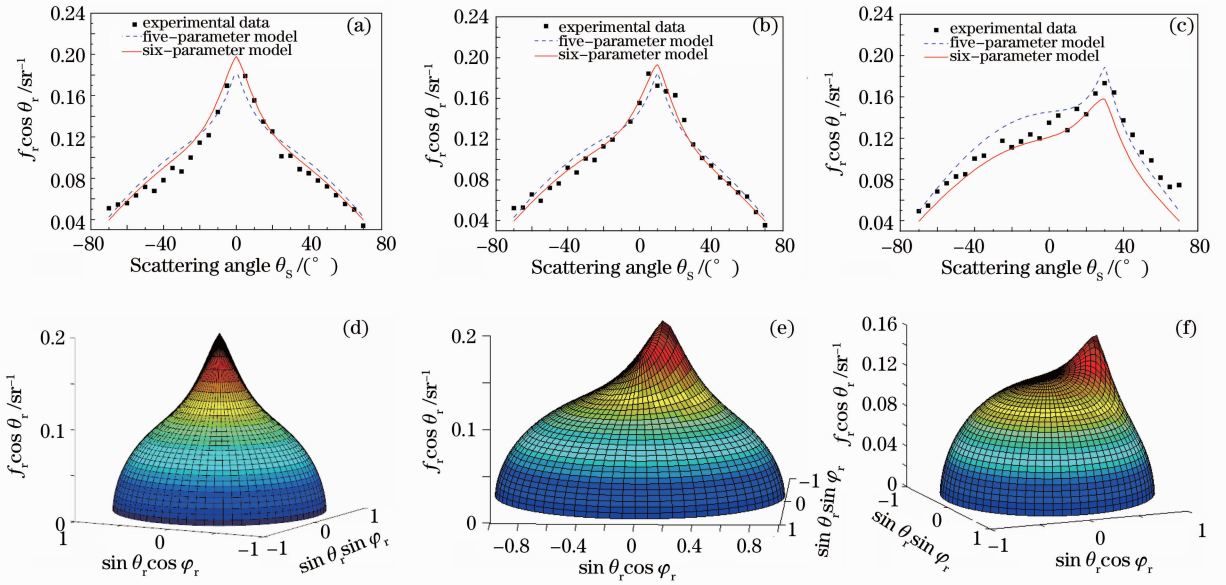


图 2 土黄色漆板的 BRDF 实验测量数据和模型的计算结果。(a) 0° 入射角的拟合曲线；(b) 10° 入射角的拟合曲线；(c) 30° 入射角的拟合曲线；(d) 0° 入射角的三维 BRDF 图；(e) 10° 入射角的三维拟合图；(f) 30° 入射角的三维拟合图
 Fig.2 BRDF experimental data and fitting result of khaki painted plate. (a) Fitting curve at the incident angle of 0° ; (b) fitting curve at the incident angle of 10° ; (c) fitting curve at the incident angle of 30° ; (d) 3D BRDF map at the incident angle of 0° ; (e) 3D BRDF map at the incident angle of 10° ; (f) 3D BRDF map at the incident angle of 30°

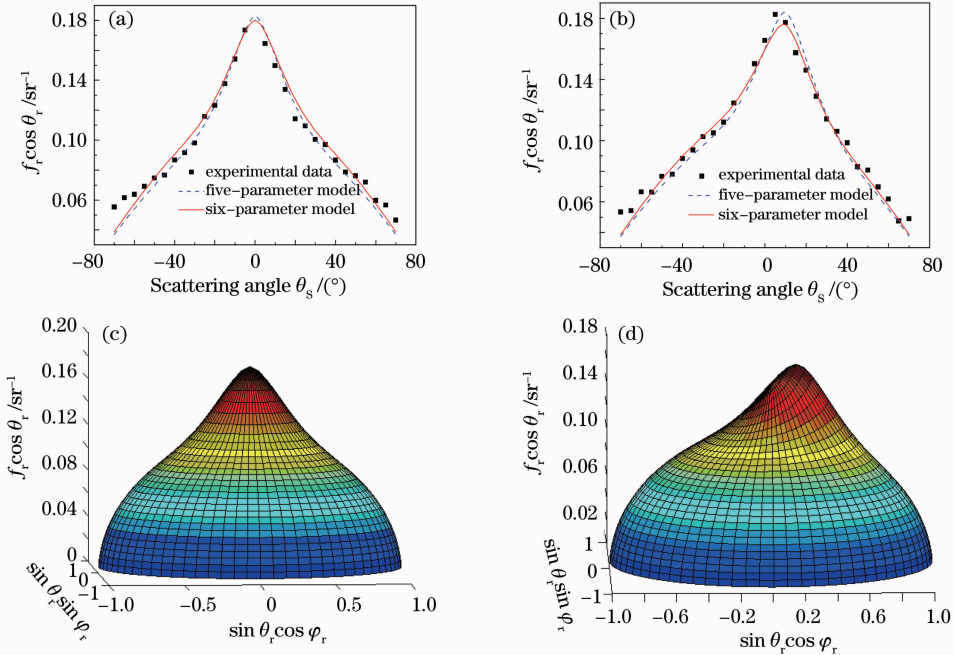


图 3 黄色漆板的 BRDF 实验测量数据和模型的计算结果。(a) 0° 入射角的拟合曲线；(b) 10° 入射角的拟合曲线；(c) 0° 入射角的三维 BRDF 图；(d) 10° 入射角的三维拟合图
 Fig.3 Experimental data and fitting result of yellow painted plate. (a) Fitting curve at the incident angle of 0° ; (b) fitting curve at the incident angle of 10° ; (c) 3D BRDF map at the incident angle of 0° ; (d) 3D BRDF map at the incident angle of 10°

11.8999, $b = -39.5679$, $a = 0.8295$, $k_d = 0.3723$, $c = 0.0420$. $k_b + k_d < 1$, 所以该模型也满足能量守恒条件。图 3(a), (b) 给出了两个模型的拟合效果,

由图可以看出, 两个模型的拟合效果都很好, 但在图 3(b) 中该模型的表现更好一些, 总体上该模型的拟合偏差为 0.0034, 而五参数模型的偏差为

0.0045。图 3(c), (d) 分别给出了该模型的三维 BRDF, 与图 2 相比该图的峰值要平缓一些, 说明该材料的镜反射部分要弱一些。

为了说明该模型的局限性, 以散射特性较强的白色漆板为例对模型进行了验证。图 4 给出了白色漆板的实验数据和模型的计算结果, 入射角度为 30° 。6 个参数的取值分别为 $k_b = 49.3261$, $k_r = 0.1020$, $b = -35.4609$, $a = 0.6465$, $k_d = 0.6268$, $c = 0.2415$, 拟合偏差为 0.067。由图可知, 该模型的拟合效果不好, 并且 $k_b + k_d > 1$, 模型也不再满足能量守恒条件。拟合效果不佳是模型本身的局限性造成的, 该模型仅适合散射特性较弱的材料样片。表 1 比较了两种模型的拟合效果, 由于六参数模型不适合拟合散射特性较强的白漆样片, 所以与五参

数模型的比较已经没有意义。

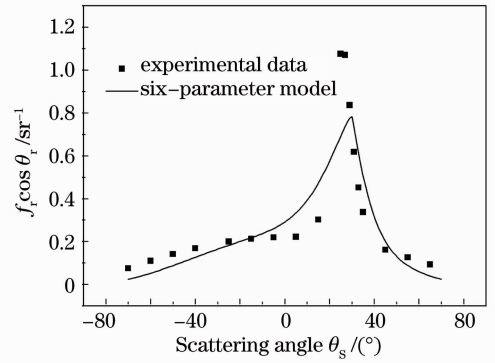


图 4 白色漆板的 BRDF 实验测量数据和模型的计算结果
Fig. 4 Experimental data and fitting result of white painted plate

表 1 六参数和五参数模型的拟合效果比较

Table 1 Comparison of six-parameter model and five-parameter model

Samples	k_b	k_r	b	a	k_d	c	Scattering	Error with six parameters	Error with five parameters
Khaki painted plate	0.2545	21.8031	-27.5721	0.6705	0.3676	1.2000	Weak	0.0115	0.0121
Yellow painted plate	0.1932	11.8999	-39.5679	0.8295	0.3723	0.0420	Weak	0.0034	0.0045
White painted plate	49.3261	0.1020	-35.4609	0.6465	0.6268	0.2415	Strong	Fit badly	—

4 结 论

吸收了各种模型的优点, 对五参数 BRDF 模型进行了修改, 提出了一个适用于散射特性较弱样片的六参数 BRDF 模型。该模型在漫反射部分增加了一个参变量, 使其在拟合样片 BRDF 时更加灵活。利用模拟退火算法对不同样片的 BRDF 进行了建模, 获得了相应模型的参数值和偏差, 与五参数 BRDF 模型相比, 该模型的精度还略有提高, 并且还满足了能量守恒和互易性, 使得该模型更实用更准确。

参 考 文 献

- 1 F. E. Nicodemus. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(7): 767~773
- 2 F. E. Nicodemus. Reflectance and directional reflectance and emissivity[J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(6): 1474~1475
- 3 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Optical constants deduction and scattering BRDF computation of alloy aluminum surface in near infrared waveband[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **32**(2): 0229001
- 杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 合金铝表面近红外波段光学常数的反演与 BRDF 的计算[J]. *光学学报*, 2011, **32**(2): 0229001

- 4 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
- 5 Ma Shuai, Bai Tingzhu, Cao Fengmei *et al.*. Infrared polarimetric scene simulation based on bidirectional reflectance distribution function model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3357~3361
- 马帅, 白廷柱, 曹峰梅等. 基于双向反射分布函数模型的红外偏振仿真[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3357~3361
- 6 Gong Lei, Wu Zhensen. Analysis of light scattering about slightly non-spherical nanoparticles on wafers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0110001
- 巩雷, 吴振森. 基片表面微球体纳米级缺陷的光散射分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0110001
- 7 Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu *et al.*. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target samples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 792~798
- 曹运华, 吴振森, 张涵璐等. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 792~798
- 8 Bai Lu, Tang Shuangqing, Wu Zhensen. Transmission characteristic of external mixture of aerosol from ultraviolet to visible light band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8):

2175~2179

白璐, 汤双庆, 吴振森. 紫外到可见波段外混合气溶胶的传输特性[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2175~2179

- 9 Zhang Hanlu, Wu Zhensen, Cao Yunhua *et al.*. Measurement and statistical modeling of BRDF of various samples[J]. *Optica Applicata*, 2010, **40**(1): 197~208
- 10 I. G. E. Renhorn, G. D. Boreman. Analytical fitting model for rough-surface BRDF [J]. *Opt. Express*, 2008, **16** (17): 12892~12898
- 11 M. Minnaert. The reciprocity principle in lunar photometry[J].

Astrophys. J., 1941, **93**: 403~410

- 12 B. T. Phong. Illumination for computer generated pictures[J]. *Commun. ACM*, 1975, **18**(8): 311~317
- 13 K. E. Torrance, E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(9): 1105~1114
- 14 K. E. Torrance, E. M. Sparrow. Off-specular peaks in the directional distribution of reflected thermal radiation[C]. *J. Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 1966, 223~230

栏目编辑: 李文喆