文章编号: 0253-2239(2008)04-0792-07

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

曹运华1 吴振森1 张涵璐1 魏庆农2 汪世美2

(1 西安电子科技大学理学院,陕西西安 710071;2 中国科学院安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥,230031)

摘要 实验测量了紫红色和白色涂漆板在 400~780 nm 内的光谱双向反射分布函数(光谱 BRDF),分析了光谱双 向反射分布函数随波长及散射角的变化趋势与目标样片光学特性的关系。应用改进的粒子群算法,结合双向反射 分布函数五参量模型,获得了测量光谱范围内各波长(间隔 1 nm)对应的共 381 组五参量值。利用五参量模型计算 了目标样片的光谱双向反射分布函数及其方向半球反射率(DHR),并与实验测量数据相比较,两者吻合良好,表明 目标光谱双向反射分布函数建模方法与结果的可行性和可靠性。目标样片的光谱双向反射分布函数可以用来研 究目标的光谱散射特性,对目标的探测、跟踪、识别和特征提取等具有重要的应用价值。

关键词 光谱双向反射分布函数;方向半球反射率;改进粒子群算法;目标光散射

中图分类号 O433.1 文献标识码 A

Experimental Measurement and Statistical Modeling of Spectral Bidirectional Reflectance Distribution Function of Rough Target Samples

Cao Yunhua¹ Wu Zhensen¹ Zhang Hanlu¹ Wei Qingnong² Wang Shimei²

¹ School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

² Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The spectral bidirectional reflectance distribution function (spectral BRDF) of mauve and white painted plate are measured in the visible spectrum ($400 \sim 780$ nm). The relationship between variation of spectral BRDF with wavelength and scattering angle and optical characteristics of the measured samples is discussed. With five-parameter model of BRDF and the modified particle swarm optimization (PSO) algorithm, the optimum parameters of the model at each wavelength in the measured spectrum are retrieved at intervals of 1 nm. Spectral BRDF and directional hemisphere reflectance (DHR) of samples calculated with the model are in good agreement with the measured data, which indicates that the means and result of spectral BRDF modeling are doable and reliable. Spectral BRDF of target samples can be used in the research of spectral scattering of objects, which is of great value to the detection, tracking and identification of objects.

Key words spectral bidirectional reflectance distribution function (BRDF); directional hemisphere reflectance (DHR); modified particle swarm optimization (PSO) algorithm; light scattering of object

1 引 言

双向反射分布函数(BRDF)能够描述各种不同 表面的空间反射分布特性,在目标光散射特性^[1]、地 物遥感^[2]、计算机图像处理^[3]等领域都有广泛的应用。目前国内外对粗糙目标样片双向反射分布函数 的测量^{[4][5]}和建模^{[6][7]}研究大都集中于单波长的激

作者简介:曹运华(1983-),男,安徽临泉人,博士研究生,主要从事复杂环境中目标光散射、激光成像等方面的研究。 E-mail: yhcao@mail. xidian. edu, cn

导师简介:吴振森(1946-),男,湖北沙市人,教授,博士生导师,主要从事复杂目标与环境光电散射、随机介质中的波传播与散射特性等方面的研究。E-mail: wuzhs@mail. xidian. edu. cn

收稿日期: 2007-06-05; 收到修改稿日期: 2007-11-05

基金项目:国家自然科学基金(60771038)资助课题。

光,对光谱双向反射分布函数的研究主要着眼于地物地表的遥感探测^[2],对粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的测量和建模研究还比较少见。贾辉等^[8]实验测量了铝漫反射板 200~300 nm 内的双向反射分布函数,但缺少光谱双向反射分布函数的测量 建模研究。目标样片光谱双向反射分布函数的测量 与建模,可以用来研究目标的空间散射特性和光谱 特征,对目标的探测、跟踪、识别、特征提取和隐身技 术等领域具有重要的应用价值。

国内外在长期对双向反射分布函数模型的研究 过程中,形成了很多工程统计模型,如 Cook-Torrance 模型^[3]、沃耳夫(Wolf)模型^[9]、复合反射 模型(Complex reflectance model)^[10]和五参量模 型^[6]等。这些统计模型能够模拟出单波长激光入射 时,不同粗糙样片表面双向反射分布函数的空间分 布。本文利用粒子群算法[11],结合五参量模型,建 立了样片 400~780nm 的光谱双向反射分布函数模 型,并给出了两种样片的建模结果,获得了各波长对 应的共 381 组五参量值。由样片光谱双向反射分布 函数模型,不仅可以获得对应波长双向反射分布函 数的空间分布,还可以获得任意入射角和散射角的 光谱双向反射分布函数随波长的变化规律。在优化 建模时,结合相邻波长双向反射分布函数五参量模 型的最优参量值渐变的特点,对粒子群算法初值的 选取作了优化,大大提高了建模速度。为了检验双 向反射分布函数优化统计建模的正确性和精度,利 用五参量模型计算了没有参与优化建模的 30°入射 时目标样片的光谱双向反射分布函数,并与对应的 实验测量数据相比较,两者吻合良好;同时也计算了 30°入射时,目标样片的方向半球反射率,获得了与 用分光光度计加积分球附件测得的数据相吻合的结 果。表明了目标样片光谱双向反射分布函数建模方 法与结果的可行性和可靠性。

2 样片光谱双向反射分布函数的测量

2.1 测量原理

采用比较测量法^[6,8]测量样片表面的双向反射 分布函数。以聚四氟乙烯粉压制的标准白板作为参 考板,其双向反射分布函数为 $\rho(\lambda)/\pi$ 。 $\rho(\lambda)$ 是标准 白板的半球反射率,可通过计量定标或者用分光光 度计加积分球附件测量获得。实验采用的标准板是 经过中国计量院标定的,其标定曲线为图 1 中带圆 圈的线。从图 1 中可以看出,在 400~780 nm 内,标 准板的半球反射率在 0.95 左右。样片双向反射分 布函数测量公式为

$$f_{r}(\theta_{i},\phi_{i},\theta_{r},\phi_{r},\lambda) = \frac{L_{s}(\theta_{i},\phi_{i},\theta_{r},\phi_{r},\lambda)\cos 30^{\circ}}{L_{b}(30^{\circ},\phi_{i},\theta_{r},\phi_{r},\lambda)\cos \theta_{i}} \cdot \frac{\rho(\lambda)}{\pi}, \qquad (1)$$

式中 $f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ 是波长为 λ 时目标样片的双 向反射分布函数, $L_s(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ 是光线沿(θ_i, ϕ_i) 方向入射到待测样片上, 沿(θ_r, ϕ_r) 方向出射的谱辐 射亮度, $L_b(30^\circ, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ 是光线沿($30^\circ, \phi_i$) 方向 入射到标准白板上, 沿(θ_r, ϕ_r) 方向出射的谱辐射亮 度, $\theta_i, \theta_r, \phi_i$ 和 ϕ_r 分别是入射角、散射角、入射方位角和 散射方位角。目标样片都是各向同性的, 双向反射分 布函数可以表示为 $f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$, 其中 $\varphi_r = \phi_i - \phi_r$ 。



图 1 卤钨灯发射光谱和标准白板的半球反射率 Fig. 1 Spectrum of tungsten-halogen lamp and DHR of standard white plate

2.2 实验装置

实验装置示意图如图 2 所示,主要由双向反射 分布函数测量仪和测量光路构成。双向反射分布函 数测量仪主要由电机 A、B、C 和计算机组成。电机 A、B、C 在计算机的控制下带动样片转动,以获得 不同的入射角、散射角和方位角。测量光路由光源、 凸透镜、平面镜、狭缝和辐射仪组成。



图 2 光谱双向反射分布函数测量装置示意图 Fig. 2 Sketch of measurement system of spectral bidirectional reflectance distribution function

光源是卤钨灯,功率1000W,能发射出连续稳定 的光谱,其光谱辐射亮度在 400~780 nm 内的分布如 图1中的实线所示。光源发出的光经过透镜准直后 由两块全反射平面镜反射至窄缝,经过窄缝入射到样 片上,最后由样片反射至接收器。接收器是美国 ASD 公司的 FieldSpec@Pro 型快速扫描光谱光度辐射仪, 测量范围是 350~2500 nm。只取其中的可见光部分 (400~780 nm)。辐射仪与计算机相连,计算机每控 制电机转动一个角度(角分辨力可达 0.1°),就会自动 记录下辐射仪采集到的样片反射的光谱辐射亮度,数 据记录完毕后,计算机才会控制电机再次转动。此次 实验分别测量了入射角为 10°、30°、45°和 60°时样片的 谱辐射亮度,在每个入射角分别测量了方位角为0°、 45°、90°和135°时的数据。在采集反射数据时每隔5° 采集一个点,在镜像点附近进行了加密处理,每隔1° 采集一次。因为反射光的强度在镜像点附近变化较 快,而在离镜像点较远处变化缓慢,所以这样做既能 保证测量精度又能加快实验速度。

2.3 测量结果

根据测量数据和(1)式,可以获得目标样片在 400~780 nm内的光谱双向反射分布函数。由于 (1)式中的 $L_s(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ 和 $L_b(30^\circ, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ 是在相同的实验条件下测得的,所以它们的比值就 消除了图1所示卤钨灯的发射光谱以及探测器光谱 响应等的影响。因此求得的光谱双向反射分布函数 与入射光源、探测器以及其它测量条件无关,只与待 测样片的折射率、粗糙度、纹理分布等特性和入射波 长有关,是待测样片光散射的固有特性。

测量了两种不同粗糙度的样片,其中紫红色涂 漆板的均方根高度为 0.2194 µm, 白色涂漆板的为 0.4755 μm。它们在入射角为 45°,方位角 0°时的光 谱双向反射分布函数分别如图 3,其中在一45°时由 于测量仪器的自身遮挡,其双向反射分布函数值失 真,在优化建模时要剔除掉。从图3可以看出,不同 样片表面的光谱双向反射分布函数随波长和散射角 的变化各不相同。光谱双向反射分布函数随波长的 变化,主要由材料对不同波长的反射率决定:紫红色 漆板在红色对应波长附近反射率较高,所以其光谱 双向反射分布函数也在此波段较高;白色漆板在可 见光范围内的反射率基本不变,所以其双向反射分 布函数随波长的变化不明显。光谱双向反射分布函 数随散射角的变化主要由样片表面的粗糙度决定: 紫红色漆板的粗糙度较低,双向反射分布函数由相 干散射分量(镜反射分量)和非相干散射分量(漫反 射分量)组成,其相干散射分量比较明显;而白色漆 板的粗糙度较大,所以其主要表现为非相干散射。





3 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数建模

样片表面的光谱双向反射分布函数是由样片本 身的特性决定的,是样片表面光谱折射率(色散曲 线)、粗糙度、纹理分布等特性及入射波长的复杂函 数,应用纯理论方法计算存在参量获取的实际困难 并且精度较低。本文根据样片光谱双向反射分布函 数的测量数据建立其光谱双向反射分布函数模型, 利用光谱双向反射分布函数模型来模拟样片表面的 光学特性。在光谱双向反射分布函数建模时,采用 五参量模型来模拟样片在某单波长时的双向反射分 布函数,对测量光谱范围内每个波长(间隔1nm)建 模,分别获得不同波长对应的最优五参量值。用不 同波长对应不同的五参量值来模拟样片光谱双向反 射分布函数随波长的变化。五参量模型的表达式如 (2)式所示^[6]。

$$f_{\rm r}(\theta_{\rm i},\theta_{\rm r},\varphi_{\rm r}) = k_{\rm b} \left\{ \frac{k_{\rm r}^2 \cos \alpha}{1 + (k_{\rm r}^2 - 1) \cos \alpha} \cdot \exp[b \cdot (1 - \cos \gamma)^a] \cdot \frac{G(\theta_{\rm i},\theta_{\rm r},\varphi_{\rm r})}{\cos \theta_{\rm i} \cos \theta_{\rm r}} \right\} + \frac{k_{\rm d}}{\cos \theta_{\rm i}},$$
(2)

在(2)式中,第一项表示样片表面双向反射分布函数的相干散射分量(镜反射分量),第二项表示非相散射 干分量(漫反射分量)。 $k_r^2 \cos \alpha / [1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha]$ 是样片表面小面元法线的分布函数, exp[$b \cdot (1 - \cos \gamma)^a$] 是菲涅耳反射函数的近似描述, $G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 是遮蔽函数。 k_b, k_d, k_r, a, b 为待定参量: k_b 和 k_d 分别反映相干 和非相干散射分量的大小, 与样片表面的粗糙度和反射率有关。 k_r 反映样片表面的斜率分布, 与样片表面 的粗糙度和纹理分布有关; a和b反映样片表面的菲涅耳反射函数, 与样片的折射率有关。其他参量在文献 [6]中有详细说明。

光谱双向反射分布函数建模是应用最优化算法求解不同波长时五参量模型最优参量值的过程。模型参量选择的最佳标准是模拟实验数据的标准均方误差最小。此时,最小均方误差可按(3)式计算:

$$E(x) = \frac{\sum_{\theta_{i}} \sum_{\theta_{r}} g_{1}(\theta_{i}) g_{2}(\theta_{r}) [f_{r}(\theta_{i},\theta_{r},\varphi_{r})\cos\theta_{r} - f_{r}^{0}(\theta_{i},\theta_{r},\varphi_{r})\cos\theta_{r}]^{2}}{\sum_{\theta_{i}} \sum_{\theta_{r}} g_{1}(\theta_{i}) g_{2}(\theta_{r}) [f_{r}^{0}(\theta_{i},\theta_{r},\varphi_{r})\cos\theta_{r}]^{2}},$$
(3)

在(3)式中, $x = [k_b, k_d, k_r, a, b]^T$ 是模型参量的列向 量, f_r^a 是双向反射分布函数实验测量数据, $g_1(\theta_i)$ 和 $g_2(\theta_r)$ 是加权函数,在测量间距不均匀时调整各项 误差对总误差的影响,取决于建模的目的和不等距 测量的精度。选取合适的加权函数可以在重要的人 射或观测角区域获得更精确的参量值,这里将其取 为1。五参量模型函数复杂,且目标函数本身具有 函数沟壑和非线性性质,对其求解的计算量较大。

3.1 基本的粒子群算法

粒子群算法^[11]具有算法简单、易于编程实现、收 敛速度快等优点,已在各个领域得到了广泛应 用^[12~14]。粒子群算法初始化一组随机粒子,然后通 过迭代寻求最优解。粒子根据2个当前最优粒子来 更新自己:一个是单个粒子迄今找到的最优值,称为 个体极值(*p*_{best});另一个是整个粒子群迄今找到的最 优值,称为全局极值(*g*_{best})。粒子更新自己的公式为

$$x_{i} = x_{i-1} + v_{i}, \qquad (4)$$

$$v_{i} = wv_{i-1} + c_{1}r_{1}(p_{i} - x_{i}) +$$

$$c_2 r_2 (p_g - x_i), \qquad (5)$$

式中 v_i 表示当前粒子的移动速度, v_{i-1} 为前一代的 粒子移动速度, r_1 和 r_2 为0~1间均匀分布的随机 数, c_1 和 c_2 为学习因子,w为上一代粒子速度对当代 粒子速度的影响权重,称为惯性权值,由(6)式确 定:

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{i_{\max}} \times i_{\text{ter}}, \qquad (6)$$

式中 w_{max}和 w_{min}分别为开始时和结束时的权重, i_{max}为最大迭代次数, i_{ter}为当前迭代次数。

3.2 改进的粒子群算法

光谱双向反射分布函数建模时,需要对 400~

780 nm内 381 个波长进行建模,计算量很大,且粒 子群算法有时会陷入局部极小值点。粒子群算法陷 入局部极小是一个小概率事件,采取多次运行然后 取最优解的办法可以解决这个问题,但是,如果对 381 个波长都采取多次运行的话,其计算时间太长, 效率偏低。因此,结合光谱双向反射分布函数建模 的特点,对粒子群算法作了改进。相邻波长双向反 射分布函数数据的变化很小,其模型的参量值变化 也应该很小,建模结果也验证了这一点。因此在对 波长λ_i处的双向反射分布函数建模时,可以用波长 λ_{i-1}处获得的最优解初始化粒子群中的一个粒子, 这样很快就能得到波长λ_i处的最优参量值,大大节 省了求解时间。

取波长为400 nm,重复运行基本的粒子群算法 20次,每次随机初始化 50 个粒子,这样能有效地避 免算法陷入局部极小值。根据相邻波长双向反射分 布函数模型参量值变化很小的特点,对其它波长,先 以前一波长的最优解初始化一个粒子,再随机初始 化其它 49 个粒子,然后运行基本的粒子群算法,就 可以快速得到此波长的最优解。使用 1.8 GHz 的 CPU,应用此算法对一块样片 381 个波长建模仅需 要不到 60 s 的时间。建模时,只使用 10°、45°和 60° 入射时的光谱双向反射分布函数实验测量数据,30° 入射时的数据不参与优化,用来检验建模效果。选 取波长为 780 nm,重复上述优化建模过程,也获得 了相近的结果。

表 1 所示的为紫红色涂漆板的建模结果,其中 k_b, k_r, b, a, k_d 是五参量模型的五个参量,E(x)是 (3)式表示的误差,其值在 0.36%和 2.62%之间,建 模精度高。从表 1 还可以看出,相邻波长的参量值 变化很小,波长λ;处的参量值可以在波长λ_{i-1}处的 参量值附近找到,这正是对粒子群算法改进的基础。 根据表1所示的五参量模型数据,由(2)式可以计算 不同波长时样片的双向反射分布函数。

表1 紫红色涂漆板建模结果数据格式

Table 1	Format c	of the	modeling	result o	of the	mauve	painted	plate
---------	----------	--------	----------	----------	--------	-------	---------	-------

λ /nm	$k_{ m b}$	$k_{ m r}$	b	а	$k_{ m d}$	E(x)
400	0.18103	1.41336	-184.3744	1.03104	0.01771	0.00542
401	0.18220	1.40539	-195.1766	1.04001	0.01688	0.00532
••••	••••	•••••	•••••	••••	••••	••••
779	0.15894	52.1847	-346.3011	1.07138	0.09711	0.02555
780	0.15763	53.3651	-348.1652	1.07108	0.09768	0.02624

4 光谱双向反射分布函数模型的验证

4.1 与实验测量数据的比较

为了检验建模结果是否能正确模拟样片的光谱 双向反射分布函数,分别给出了没有参与优化的 30°入射(方位角0°)时紫红色和白色涂漆板光谱双 向反射分布函数的实验测量数据(图4)和利用获得 的模型计算的光谱双向反射分布函数(图5)。模型 计算结果与实验测量数据吻合良好。为了更清楚地 比较模型计算的光谱双向反射分布函数与实验测量 数据的吻合度,以30°入射时的紫红色漆板为例,分 别给出了散射角一定时光谱双向反射分布函数随波 长的变化[图 6(a)],和波长一定时双向反射分布函 数随散射角的变化[图 6(b)]。





Fig. 4 Measured spectral bidirectional reflectance distribution function of mauve painted plate (a), white painted plate (b) at the incident angle of 30°



图 5 模型计算的 30°入射时紫红色漆板(a), 白色漆板(b)的光谱双向反射分布函数

Fig. 5 Spectral bidirectional reflectance distribution function of mauve painted plate (a), white painted plate (b) calculated by the model at the incident angle of 30°



图 6 模型计算的和实验测量的光谱双向反射分布函数随波长(a),散射角(b)变化的比较 Fig. 6 Comparison of variation of spectral BRDF calculated with the BRDF model and of the measured ones with wavelength (a), scattering angle (b)

(7)式所示[2]:

的反射通量与总入射通量的比值。朗伯面的双向反

射分布函数是常数,故 $\rho_r(\lambda) = \pi f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)^{[15]}$ 。

对非朗伯面, $\rho_r(\lambda)$ 与双向反射分布函数的关系如

 $\rho_{\rm r}(\lambda) = \int_{2\pi} f_{\rm r}(\theta_{\rm i}, \theta_{\rm r}, \varphi_{\rm r}, \lambda) \cos \theta_{\rm r} d\Omega_{\rm r} = \int_{2\pi}^{2\pi} \int_{\pi}^{\pi/2} f_{\rm r}(\theta_{\rm i}, \theta_{\rm r}, \varphi_{\rm r}, \lambda) \sin \theta_{\rm r} \cos \theta_{\rm r} d\theta_{\rm r} d\varphi_{\rm r}, (7)$

用 Jasco V-570 型分光光度计加积分球附件测量了

紫红色和白色涂漆板的方向半球反射率,如图7中 的星号点所示。从图7可以看出,不同材料的方向

半球反射率随波长变化的差异很大。紫红色漆板的

方向半球反射率比白色漆板的低,且在红色对应波

段内的值高于其它波段内的值。而白色漆板在

400~780 nm范围内的半球反射率变化不大,这正

是其表现为白色的原因。为了进一步验证建模结

果,将五参量模型和获得的参量值代入(2)式和

(7)式,计算得到了紫红色和白色涂漆样片的方向半

图 6 中的实线表示模型计算的结果,离散点表 示实验测量数据。图 6(a)中给出了散射角分别为 -10°、10°、30°和45°时光谱双向反射分布函数随波 长的变化。由图中可以看出,400~650 nm 范围内 模型计算值和实验测量值吻合良好,而 650~ 780 nm内模型计算值与实验测量值的误差略有增 加。图 6(b)中分别给出了,波长为 500 nm、600 nm 和 700 nm 时,双向反射分布函数随散射角的变化。 从图中可以看出,在散射角-20°~70°时,模型计算 的结果和实验测量数据吻合得很好,在-20°~ -70°存在一定的误差。这可能是由于模型本身的 限制(即漫反射部分较简单),还不能很好地反映粗 糙样片的背向散射,这也是我们正在进一步研究的 问题之一。综合来看,模型计算结果和实验测量数 据吻合良好,并已经用于目标可见光谱散射特性 建模。

4.2 模型计算的方向半球反射率与实验测量数据 的比较

方向半球反射率 ρ_r(λ)定义为样片在上半球空间



图 7 用模型计算得到的方向半球反射率与实验测量的值的比较

Fig. 7 Comparison of directional hemisphere reflectance calculated with the bidirectional reflectance

distribution function model and the measured ones

球反射率,如图 7 中的实线所示。可以看出,光谱双 向反射分布函数积分得到的方向半球反射率和实验 测量数据基本吻合。两者间存在差别的主要原因在 于:目标样片光谱双向反射分布函数的测量、光谱双 向反射分布函数模型的获得和方向半球反射率的测 量均存在一定的误差。通过模型计算的光谱双向反 射分布函数和方向半球反射率与实验测量数据的比 较,表明了光谱双向反射分布函数建模方法的可行 性和建模结果的可靠性。

5 结 论

测量了紫红色和白色涂漆板在 400~780 nm 内的光谱双向反射分布函数。针对光谱双向反射分 布函数建模的特点,对粒子群算法作了改进,提高了 光谱双向反射分布函数优化建模速度。利用目标样 片的光谱双向反射分布函数模型,计算了没有参与 优化建模的 30°入射时目标样片的光谱双向反射分 布函数及其方向半球反射率,并与实验测量数据相 比较,两者吻合良好。表明目标光谱双向反射分布 函数建模方法与结果的可行性和可靠性。根据目标 样片的光谱双向反射分布函数模型,可以进一步研 究空间目标对可见光谱的散射特性,用于目标光学 特性的探测和影响因素的分析。

参考文献

- 1 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1250~1254
 - 吴振森,窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1250~1254
- 2 Laurent Bousquet, Sophie Lachérade, Stéphane Jacquemoud et al.. Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(2): 201~211
- 3 Robert L. Cook, Kenneth E. Torrance. A reflectance model for computer graphics [J]. ACM Transactions on Graphics, 1982, 1(1): 7~24
- 4 Wu Zhensen, Han Xiang'e, Zhang Xiangdong. Experimental study on bidirectional reflectance distribution functions of laser scattering from various rough surfaces[J]. Acta Optica Sinica,

1996, 16(3): 262~268

吴振森,韩香娥,张向东.不同表面激光双向分布函数的实验测 量[J].光学学报,1996,16(3):262~268

- 5 Wei Qingnong, Liu Jianguo, Jiang Rongxi. Measurement method of absolute bidirectional reflectance distribution function[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(10): 1425~1430
 魏庆农,刘建国,江荣熙. 双向反射分布函数的绝对测量方法 [J]. 光学学报, 1996, 16(10): 1425~1430
- 6 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及其算
- 法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 897~901
- 7 Zhang Baishun, Liu Wenqing, Wei Qingnong et al.. Experiment measurements and validating with the model of typical goal's BRDF[J]. Chin. J. Quant. Electron., 2006, 23(4): 533~536 张百顺,刘文清,魏庆农等. 典型目标的 BRDF 实验室测量与模 型验证[J]. 量子电子学报, 2006, 23(4): 553~536
- 8 Jia Hui, Li Futian. Bidirectional reflectance distribution function of aluminum diffuser at UV spectral band [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(2): 230~234
- 贾 辉,李福田. 铝漫反射板 200~300 nm 相对双向反射分布函数的实验研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 230~234
- 9 Lawrence B. Wolff. Diffuse reflectance model for smooth dielectric surfaces [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11(11): 2956~2968
- 10 Xiao D. He, Kenneth E. Torrance, Fraveois X. Sillion et al. A comprehensive physical model for light reflection[J]. Computer Graphics, 1991, 25(4): 175~186
- 11 James Kennedy, Russell C. Eberhart. Particle swarm optimization [C]. Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, 1995. 1942~1948
- 12 S. L. Ho, Shiyou Yang, Guangzheng Ni. A particle swarm optimization method with enhanced global search ability for design optimizations of electromagnetic devices [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(4): 1107~1110
- 13 Simone Genovesi, Raj Mittra, Agostino Monorchio et al.. Particle swarm optimization for the design of frequency selective surfaces[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2006, 5: 277~279
- 14 Zhang Jianzhong, Shen Yu, Zhou Guangtao et al.. Investigation of particle swarm optimization algorithm in adaptive polarization mode dispersion compensation [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(1): 1~6

张建忠,沈 昱,周光涛等. 粒子群优化算法在自适应偏振模色 散补偿中的性能研究[J]. 光学学报,2006, **26**(1):1~6

15 Liu Kexiang, Xu Rongguo, Wu Zhensen *et al.*. Measurement and analysis of outfield target's laser scattering characteristics [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, 33(2): 206~212 刘科祥,许容国,吴振森等. 外场目标激光散射特性测量及分 析[J]. 中国激光, 2006, 33(2): 206~212