

文章编号: 0253-2239(2008)02-0290-05

涂层表面偏振双向反射分布函数的模型研究*

冯巍巍^{1,2} 魏庆农^{1,2} 汪世美^{1,2} 吴云智^{1,2} 刘世胜^{1,2} 伍德侠^{1,2} 刘增东^{1,2} 王东方^{1,2}

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

² 安徽省环境光学重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 为了表征复杂涂层表面的光学散射特性,基于微面元理论的偏振双向反射分布函数模型,利用遗传算法从实验数据中反演出模型的关键参量。采用 C++ 语言对偏振双向反射分布函数模型进行了数值模拟,分析了模型参量对偏振双向反射分布函数的影响。数值模拟结果与实验数据的对比表明,该模型算法有较高的模拟精度,可以为后续的目标特征提取与识别工作提供参考。

关键词 散射; 偏振; 双向反射分布函数(BRDF); 遗传算法; 数值模拟

中图分类号 O432.1 文献标识码 A

Study of Polarized Bidirectional Reflectance Distribution Function Model for Painted Surfaces

Feng Weiwei^{1,2} Wei Qingnong^{1,2} Wang Shimei^{1,2} Wu Yunzhi^{1,2} Liu Shisheng^{1,2}

Wu Dexia^{1,2} Liu Zengdong^{1,2} Wang Dongfang^{1,2}

(¹ Key Lab of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

² Key Lab of Environmental Optics of Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract In order to represent optical scattering properties of the complex painted surfaces, based on microfacet theory for polarized bidirectional reflectance distribution function (BRDF), genetic algorithm is used to get the key parameters in the model. Numerical simulation is done using C++ language and the impact of the model parameters is analyzed. The comparison between numerical simulation results and experimental data indicate: this model has the higher precision for simulation, and can be used as a reference for target feature extraction and recognition in the future.

Key words scattering; polarization; bidirectional reflectance distribution function (BRDF); genetic algorithm; numerical simulation

1 引言

在目标隐身和伪装中,目标表面一般都涂以不同的涂层,这些涂层往往具有不同的折射率、颜色等光学特性,使目标表面光散射特性变得越来越复杂。传统的方法是采用双向反射分布函数^[1]表征目标的空间光学散射特性的^[2~4],研究发现^[2,5],不同涂层目标的偏振特性的差异可以为目标识别提供另一维的重要信息。然而,传统双向反射分布函数的表征方法并

不能有效描述目标的偏振散射特性。在目标的偏振识别系统中,目标的偏振特征建模的关键是获取目标的偏振双向反射分布函数^[6]。根据微小面元理论^[7,8]建立的偏振双向反射分布函数模型,针对某典型涂层样品,采用遗传算法从实验数据中反演出偏振双向反射分布函数模型的关键参量,分析了模型参量对偏振双向反射分布函数的影响,可以为后续的涂层目标光散射特征提取和识别工作提供参考。

收稿日期: 2007-06-04; 收到修改稿日期: 2007-08-16

基金项目: 国家 973 计划重大安全基础研究项目(61341020201-1)资助课题。

作者简介: 冯巍巍(1980—),男,山东烟台人,博士研究生,主要从事光电信息获取与处理技术等方面的研究。

E-mail: wwfeng@aiofm.ac.cn

导师简介: 魏庆农(1961—),男,安徽合肥人,研究员,博士生导师,主要从事大气环境光学监测新方法方面的研究。

E-mail: qnwei@aiofm.ac.cn

2 偏振双向反射分布函数理论

2.1 双向反射分布函数的几何坐标定义

在样品表面建立坐标系,样品法线方向定义为 Z 方向, X 和 Y 方向分别与 Z 垂直,图 1 中给出了双向反射分布函数(BRDF)坐标的几何角度关系^[1]。其中 θ, ϕ 分别代表天顶角和方位角,下标 i 和 r 分别表示入射方向和探测方向分量。双向反射分布函数的物理意义是给定方向入射(θ_i, ϕ_i)到样品表面上的辐照度 $H(\theta_i, \phi_i)$ (W/m^2),经样品表面反射在某一方向(θ_r, ϕ_r)产生的辐亮度 $L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$]。它与入射天顶角、入射方位角、探测方位角、探测天顶角以及波长等因素有关。定义公式如下:

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{dH_i(\theta_i, \phi_i)}, \quad (\text{sr}^{-1}) \quad (1)$$

式中,出射的辐亮度 $L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ 定义为沿出射方向,单位面积、单位立体角的辐射通量

$$L_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{d\Phi_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{dA d\omega_r \cos \theta_r}, \quad (2)$$

入射辐照度 $H_i(\theta_i, \phi_i)$ 定义为单位入射面积的辐射通量

$$H_i(\theta_i, \phi_i) = d\Phi_i(\theta_i, \phi_i)/(dA), \quad (3)$$

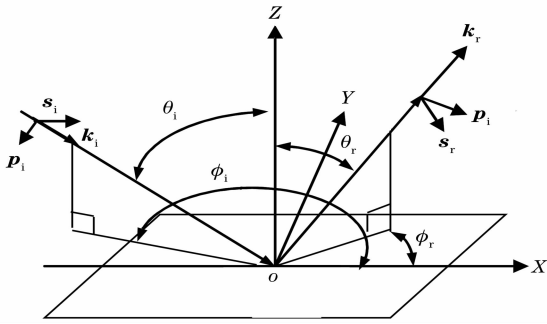


图 1 偏振双向反射分布函数坐标系统

Fig. 1 Coordinate system of polarized bidirectional reflectance distribution function (BRDF)

2.2 双向反射分布函数的偏振坐标定义

k_i 和 k_r 分别代表入射方向和探测方向的单位矢量, s 和 p 分别代表垂直和平行入射面(入射方向和法线构成的平面)或探测面(探测方向和法线组成的平面)的单位电磁分量。满足以下矢量关系:

$$p_i = k_i \times s_i, \quad p_r = k_r \times s_r. \quad (4)$$

3 微面元偏振模型的导出

微面元双向反射分布函数模型是从几何光学中推导出来的。当目标的表面粗糙度的均方根高度与入射波长可相比或远大于波长时,目标的表面可视

为由一系列的微小面元组成^[7],标量微面元双向反射分布函数模型可以表示为

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2 \cos^4 \theta} \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta}{\sigma^2}\right) \frac{G(\theta_i, \theta_r)}{\cos \theta_r \cos \theta_i} F(\beta), \quad (5)$$

式中 σ^2 表示表面粗糙度的斜度方差^[6,9], $G(\theta_i, \theta_r)$ 表示遮蔽和掩饰因子^[7], $F(\beta)$ 表示反射系数。 θ 表示微面元法线与样品表面法线之间的夹角, β 表示入射方向(探测方向)与微面元法线之间的夹角,如图 2 所示。虚点线表示样品的表面法线,点划线表示小面元法线, $\theta, \beta, \theta_i, \theta_r, \phi_i, \phi_r$ 之间满足一定的关系:

$$\cos(2\beta) = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\phi_r - \phi_i), \quad (6)$$

$$\cos \theta = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \beta}, \quad (7)$$

偏振双向反射分布函数是从电磁场理论推导出来的,散射光与入射光之间可以通过一个散射矩阵(琼斯矩阵)建立联系^[6],用(8)式表示

$$\begin{bmatrix} E_p^{\text{scat}} \\ E_s^{\text{scat}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{pp} & S_{sp} \\ S_{ps} & S_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p^{\text{inc}} \\ E_s^{\text{inc}} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中下标 s 表示电场分量垂直于入射面(探测面), p 表示电场分量平行于入射面(探测面),上标 inc 表示入射分量, scat 表示散射分量。由于散射矩阵分量的定义是与参考面相联系的,针对上述的微小面元模型,引入四个参考平面分别为:入射方向与样品表面法线组成的平面、微面元法线与入射方向组成的平面、探测方向与样品表面法线组成的平面、探测方向与微面元法线组成的平面。引入两个辅助角 α_i, α_r 。 α_i 表示第一个平面与第二个平面之间的夹角, α_r 表示第三个平面与第四个平面之间的夹角。(8)式的入射光和散射光可以用(9)式来表示:

$$\begin{bmatrix} E_p^{\text{scat}} \\ E_s^{\text{scat}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_r & \sin \alpha_r \\ -\sin \alpha_r & \cos \alpha_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p^{\text{inc}} \\ E_s^{\text{inc}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

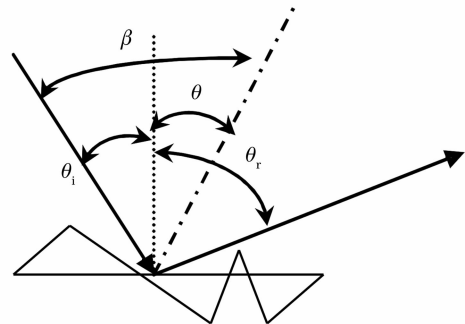


图 2 微面元模型的角度关系

Fig. 2 Angle relation in the microfacet model

其中

$$\cos \alpha_i = \frac{(\cos \theta_i + \cos \theta_r)/(2\cos \beta) - \cos \theta_i \cos \beta}{\sin \theta_i \sin \beta},$$

$$\cos \alpha_r = \frac{(\cos \theta_i + \cos \theta_r)/(2\cos \beta) - \cos \theta_i \cos \beta}{\sin \theta_i \sin \beta}, \quad (10)$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)},$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} = \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}, \quad (11)$$

r_p, r_s 为振幅反射率, θ_i 为折射角, n_1 为空气的折射率, n_2 为样片的折射率, 根据折射律定义公式^[10], (11)式可以写为

$$f_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{G(\theta_i, \theta_r)}{\cos^4 \theta} \frac{\exp[-\tan^2 \theta / (2\sigma^2)]}{\cos \theta_r \cos \theta_i} M_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i), \quad (15)$$

j 和 k 的范围为 $0 \sim 3$ 。在实际测量中, 涂层表面往往含有很强的漫射分量, 考虑到漫射分量的影响增加了镜向系数 k_s 和漫射系数 k_d 对(15)式进行调整:

$$f_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i) = k_s \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{G(\theta_i, \theta_r)}{\cos^4 \theta} \frac{\exp[-\tan^2 \theta / (2\sigma^2)]}{\cos \theta_r \cos \theta_i} M_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i) + \frac{k_d}{\cos \theta_i}, \quad (16)$$

这样, 只需确定了 n, k (n 和 k 参量含在 $M_{j,k}(\theta_i, \theta_r, \phi_r - \phi_i)$ 的表达式中)、 k_s, k_d, σ 这几个参量, 就可以确定空间的偏振双向反射分布函数。

4 模型参量的确定

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法^[12]。实际应用中, 复杂涂层表面的光学常数 n, k 及粗糙度参量 σ 很难给予精确测量^[13], 而工程统计的方法获取模型参量具有直观、计算简单的优点。根据上述的偏振双向反射分布函数模型, 采用了遗传算法从大量实验数据中反演出偏振双向反射分布函数模型的参量。相对于利用椭圆偏仪及表面粗糙度仪等进行测量来获取光学常数及粗糙度参量的途径, 这种方法显得更为简洁和有效。模型参量确定的标准是必须采用一个合适的评价函数, 才能求得模型的最优解, 评价函数采用下面的公式:

$$\Delta_{\min} = \frac{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} g(\theta_r) [f_{00}(\theta_r, \theta_i) - f_r(\theta_r, \theta_i)]^2}{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} g(\theta_r) [f_r(\theta_r, \theta_i)]^2}, \quad (17)$$

$f_{00}(\theta_r, \theta_i)$ 表示模型的理论计算值, $f_r(\theta_r, \theta_i)$ 是实验的测量数据。 $g(\theta_r)$ 表示由于不等间隔测量设置的加权系数。实验中, 选择的交叉概率为 0.5, 变异概率

$$r_p = \frac{\epsilon \cos \theta_i - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}}{\epsilon \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}}, \quad (12)$$

$$r_s = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}}, \quad (13)$$

其中 $\epsilon = n + ik$, 表示样品的复折射率, 它的实部 n 和虚部 k 通常被称为材料的光学常数。

根据(6)式, (9)式, (10)式, (12)式, (13)式可以求出入射光线和散射光线之间的电磁散射矩阵。在实际应用中, 由于米勒矩阵元素与散射矩阵元素之间存在着一定的关系^[11], 通常采用的是米勒矩阵的表征方法。通过一个 4×4 的矩阵, 可以将标量微面元模型的双向反射分布函数推广到偏振情况^[6]

为 0.05, 采用的比例选择的算法, 采用二进制编码。这样, 经过多次的迭代遗传操作, 当误差函数 Δ_{\min} 收敛到一定程度时, 我们就可以确定模型的最优参量或近似最优参量。

5 数值模拟结果与分析

5.1 参量反演结果

针对某种涂层材料, 取 $\phi_r = 0^\circ$ 时, θ_i 分别为 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$ 的 10 组 f_{00} 数据进行偏振模型参量反演。实验数据是由安徽光机所自行研制双向反射分布函数测量仪^[2] 测量获取的, 激光光源波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 。在靠近镜向 $\pm 5^\circ$ 的方向的范围内做了加密采集, 反演将其权重适当加大。当迭代次数达到 1000 次时, 误差 Δ_{\min} 收敛至 0.023515, $k_s = 0.95, k_d = 0.092414, n = 5.345064, k = 5.345064, \sigma = 0.123451$, 利用反演得到的参量, 可以根据模型计算出 f_{00} 的理论分布。图 3 给出了 f_{00} 在不同入射角度下数值模拟结果与实验测量结果的对比。图 3(a)~图 3(c) 三幅图是在 $\phi_r = 0^\circ$ 时, θ_i 分别于 $5^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ 入射, 实验数据与仿真结果的比较, 其中实线表示数值模拟结果, 点线表示实测数据。通过比较可知, 仿真结果能够与实验数据较好的吻合。图 4 给出了 θ_i 为 45° 时, f_{00} 仿真数据的三

维分布图。从三维分布图中我们可以看出,在不同的探测方位角时,其峰值均出现在天顶角 45° 附近,且在探测方位角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的范围内。随着方位角

的增大,光强整体呈现逐渐下降的趋势。数值模拟的结果与实际观测的现象是一致的。

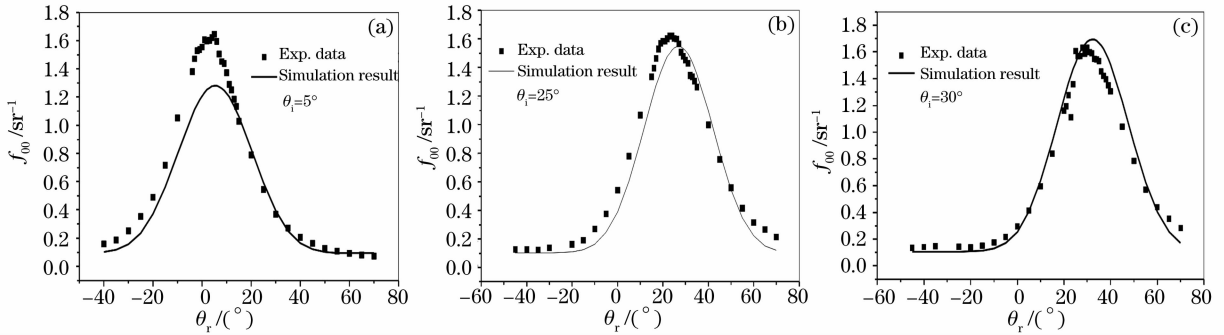


图3 不同入射角度下实验数据与模拟结果的比较

Fig. 3 Comparison between experimental data and simulation results with different incident angle

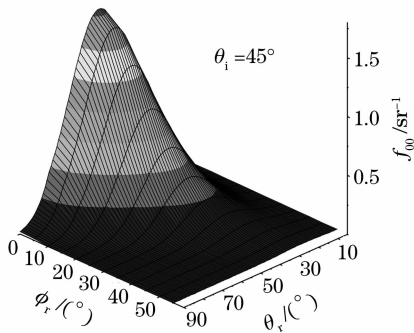


图4 f_{00} 的三维分布图

Fig. 4 3D distribution of f_{00}

5.2 模型参量对模拟结果的影响

在微面元模型中,表面粗糙度参量以及光学常数对数值模拟结果影响很大。图 5(a)、图 5(b)给出了入射天顶角 $\theta_i = 45^\circ$,模型参量 $n=1.3, k=7.5, k_s=1, k_d=0$ 时,粗糙度参量 σ 取不同值时 f_{00} 随探测天顶角变化的曲线。从数值模拟结果中可以看出,表面粗糙度参量取值越大, f_{00} 镜向峰越尖锐,反之镜向峰越平坦。当糙度参量 σ 大到一定程度时,会出现峰值偏离镜向的方向情况。这个模拟结果与相关的实验^[7]和模型研究结果^[9]是一致的。图 5(c)、图 5(d)给出了当粗糙度参量一定时, f_{00} 随光学常数变化的

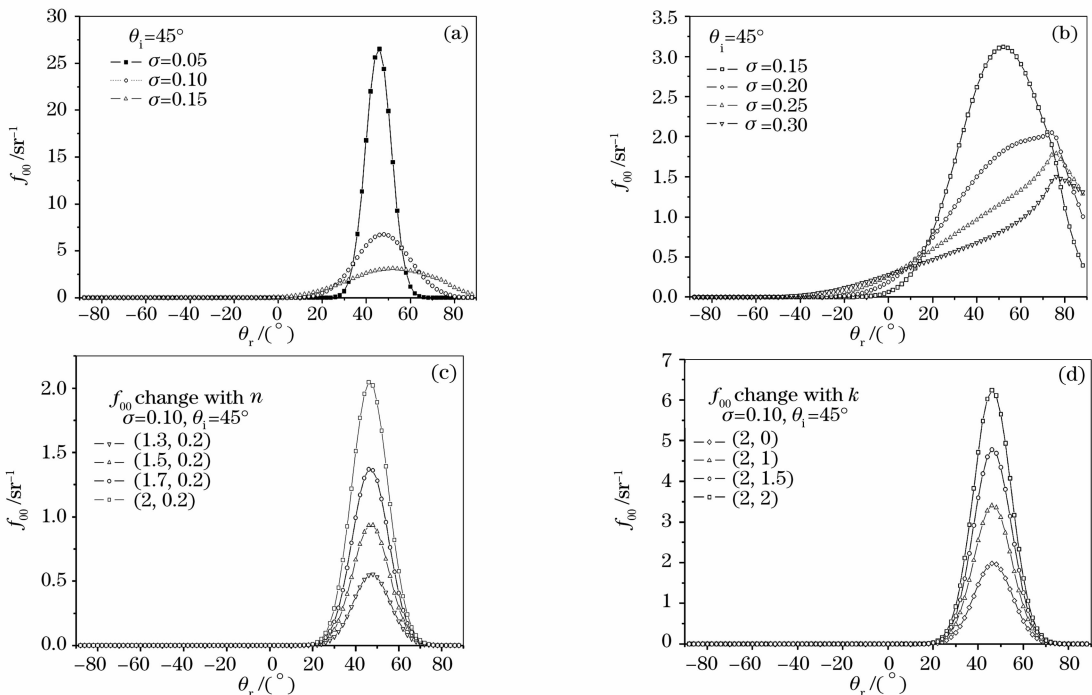


图5 f_{00} 随不同粗糙度参量(a),(b)和光学常数(c),(d)变化曲线

Fig. 5 f_{00} change with different roughness parameter. (a), (b) and different optical constant parameter (c), (d)

数值模拟结果。其中图 5(c)为入射天顶角 $\theta_i = 45^\circ$, $\sigma = 0.1, k_s = 1, k_d = 0, k = 0.2$ 时, f_{00} 在不同 n 值时随探测天顶角变化的曲线,图 5(d)为入射天顶角 $\theta_i = 45^\circ, \sigma = 0.1, k_s = 1, k_d = 0, n = 2$ 时 f_{00} 在不同 k 值时随探测天顶角变化的曲线。从图中的数值模拟可以看出,随着光学常数 n 和 k 增大, f_{00} 的峰值均出现增大的趋势,这与随粗糙度参量 σ 变化的趋势是相反的。

6 结 论

采用了基于微面元理论的偏振双向反射分布函数模型,对涂层材料的空间光散射偏振特性进行了数值模拟,采用遗传算法对偏振双向反射分布函数模型的参量进行反演,并给出了数值模拟的结果与实验数据的比较。数值模拟的结果和实验结果符合较好,这可以为后续涂层目标偏振特征提取与识别工作提供一定的参考。需要指出的是,此模型的参量的反演采用的是偏振模型的 f_{00} 数据,要获取更为精确的涂层统计模型,可以进一步增大参与反演数据量,这将是我们的后续工作。

参 考 文 献

- 1 F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia. *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance* [M]. Ernest Ambler: National Bureau of Standards, 1977. 6~9
- 2 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
- 3 Wu Zhensen, Han Xiang, Zhang Xiangdong *et al.*. Experimental study on bidirectional reflectance distribution function of laser scattering from various rough surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3): 262~268
吴振森,韩香娥,张向东等. 不同表面激光双向反射分布函数的实验研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(3): 262~268
- 4 Zhang Baishun, Liu Wenqing, Wei Qingnong *et al.*. Analysis of scattering characteristic of the sample based on BRDF experiment measurements[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(2): 180~182
张百顺,刘文清,魏庆农等. 基于 BRDF 实验测量分析目标的散射特性[J]. *光学技术*, 2006, **32**(2): 180~182
- 5 Cornell S. L. Chun, Firooz A. Sadjadi. Target recognition study using polarimetric laser radar[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5426**: 274~284
- 6 Richard G. Priest, Thomas A. Germer. Polarimetric BRDF in the microfacet model: theory and measurement [C]. *Naval Research Laboratory, Published in Proceedings of the 2000 Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors*, 2000, **1**: 169~181
- 7 K. E. Torrance, E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces [J]. *Optical Society of American*, 1967, **57**(9): 1105~1114
- 8 Robert L. Cook, Kenneth E. Torrance. A reflectance model for computer graphics[J]. *Computer Graphics*, 1981, **15**(3): 307~316
- 9 Jason P. Meyers, John R. Schott, Scott D. Brown. Incorporation of polarization into the DIRSIG synthetic image generation model[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4816**: 132~143
- 10 Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics* [M]. 7th Revised Edition, Cambridge University Press, 2003. 38~43
- 11 David S. Flynn, Cliff Alexander. Polarized surface scattering expressed in terms of a bidirectional reflectance distribution function matrix[J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1995, **34**(6): 1646~1650
- 12 Stephanie Forrest. Genetic algorithms: Principles of natural selection applied to computation[J]. *Science*, 1993, **261**(5123): 872~878
- 13 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