

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0769-05

双向反射分布函数模型参量的优化及计算*

李 铁¹⁾²⁾ 阎 炜²⁾ 吴振森¹⁾

(1), 西安电子科技大学物理系, 西安 710068)
(2), 西安机电信息研究所, 西安 710065)

摘要: 从涂层材料双向反射分布函数的参量理论出发, 通过参量迭代和优化, 建立了几种典型漆层样片双向反射分布函数的参量模型。其参量优化计算结果和实验测量结果吻合得很好。该方法描述的粗糙表面双向反射分布函数形式简洁, 更适于工程应用。

关键词: 双向反射分布函数; 粗糙面散射; 优化理论; 迭代法; 微扰法; 物理光学法

中图分类号: O436.2 文献标识码: A

1 引 言

双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)用来描述目标材料粗糙表面的空间光散射特性^[1], 在光波段和微波段的散射、辐射以及遥感等领域得到了广泛的应用^[2,3], 并已扩展到了计算机视觉(Computer Vision, CV)等新兴的研究领域^[4,5]。1976年 Hsia 等^[6]在美国国家标准局建成了一台高分辨率激光双向反射测量仪, 1980年亚利桑那光学中心建成了从可见光到近红外波段双向反射分布函数测量系统^[7]。理论方面, 通常可应用基尔霍夫近似或微扰法以及相应的混合方法研究粗糙度表面的光散射^[8]。众多学者从理论和实验两方面均对双向反射分布函数进行了大量研究, 评估了多种材料表面的双向反射分布函数特性^[9~12]。通过研究, 也得到了目标材料表面双向反射分布函数和单位面积雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的关系^[13]。双向反射分布函数的理论计算需要确定粗糙表面材料的光学参量和粗糙度统计参量, 但在实际应用中要想准确获得上述参量是较困难的, 且在数值积分和统计建模中占有大量的计算机时。实验研究不但要耗费较多的物力和人力, 更重要的是只能获取典型状态时的有限值, 很难全面获取材料的双向反射分布函数特性。

本文研究了涂层材料粗糙表面的参量理论, 从典型漆层样片有限的双向反射分布函数实验结果通

过参量迭代和优化, 建立了各样片材料双向反射分布函数的参量模型, 并给出了典型状态下双向反射分布函数优化特征曲线并与实验结果进行了比较。和单纯的理论分析计算相比, 参量模型描述粗糙表面双向反射分布函数形式更加简洁, 计算更加快速方便, 而且弥补了实验测量不能得到在任意入射和观测方向上双向反射分布函数的不足。

2 粗糙表面的光散射统计模型

如图 1 坐标系 $oxyz$ 的 oz 轴和粗糙表面目标的表面法线重合, 入射波束平面在 $yoze$ 上。对于粗糙度为随机起伏的粗糙表面, 面元 dS 在 (θ, φ) 方向上立体角 $d\omega_R$ 内的反射通量可以看成是具有统计分布的微观面元镜面反射分量和漫射分量之和, 表示如下^[14]

$$d\Phi_R = G(\psi, \theta, \varphi) f(\alpha) \cos\gamma R(\gamma) d\omega_N \frac{d\Phi_i}{\cos\psi} + \frac{d\Phi_i}{\pi} k_D \cos\theta d\omega_R, \quad (1)$$

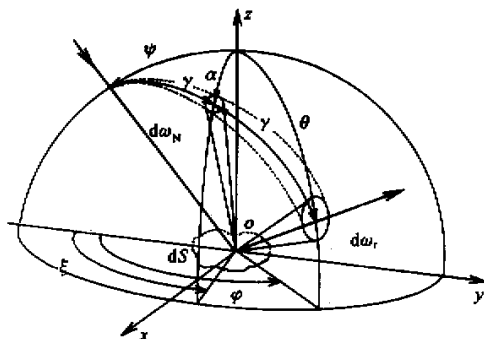


Fig. 1 Coordinate system of light scattering from rough surface

* 国家自然科学基金(60081002)资助课题。

E-mail: litiel166@sina.com

收稿日期: 2001-05-22; 收到修改稿日期: 2001-08-24

其中 $d\Phi_i$ 为在 ψ 方向上入射到 dS 上的光通量 $d\omega_N$ 为向立体角 $d\omega_R$ 内产生镜面反射的所有微观面元的法线所在的立体角 $f(\alpha)$ 为微观面元法线处于倾角 α 内的分布函数 γ 为微观面元上的入射角 $R(\gamma)$ 为反射系数 $G(\psi, \theta, \varphi)$ 为遮蔽函数 k_D 为漫射因子。

微观面元法线分布函数按下式确定：

$$f(\alpha, \xi) = \frac{1}{S_0} \frac{dS_N}{d\omega_N},$$

式中 S_0 为反射表面面积 $d\omega_N$ 即 (α, ξ) 方向的立体角 dS_N 为法线在立体角 $d\omega_N$ 内的微观面元面积。

为了更直观地描述粗糙表面光散射 给出了一维微观表面光散射示意图(图2)其中 θ_p 、 ψ_p 、 γ_p 对应于

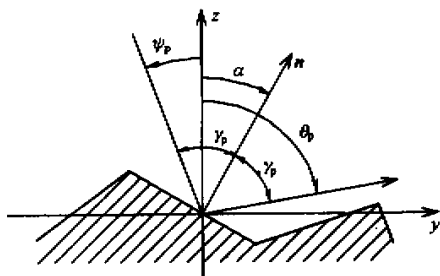


Fig.2 Scattering geometry for a one-dimensionally rough surface

二维表面(图1)中的 θ 、 ψ 、 γ 。

对于高度起伏各向同性的粗糙表面 $f(\alpha, \xi)$ 具有反射表面法线方向的对称性,即 $f(\alpha, \xi) = f(\alpha)$, 根据概率理论并经实验验证 $f(\alpha, \xi)$ 表示如下:

$$f(\alpha, \xi) = f(\alpha) = f(0) \frac{k_1^2 \cos \alpha}{1 + (k_1^2 - 1) \cos^2 \alpha}. \quad (2)$$

假设入射到面元 dS 上的光通量 $d\Phi_i = 1$ 根据球面三角公式,由(1)式有

$$K(\psi, \theta, \varphi) = \frac{k_2}{\pi} \frac{k_1^2 \cos \alpha}{1 + (k_1^2 - 1) \cos^2 \alpha} R_0(\gamma) \times \frac{G(\psi, \theta, \varphi)}{\cos \psi} + \frac{k_D}{\pi} \cos \theta, \quad (3)$$

其中 $K(\psi, \theta, \varphi)$ 为观察方向 (ψ, θ, φ) 上的散射辐射强度 k_1 为满足(2)式而引入的参量。

$$k_2 = \frac{\pi}{4} f(0) R(0), \quad R_0(\gamma) = \frac{R(\gamma)}{R(0)},$$

$R(0)$ 为法向入射时微观面元的菲涅耳反射系数。

3 采用三参量模型描述双向反射分布函数的方法

根据双向反射分布函数定义,由(1)式~(3)式得

$$f_r(\psi, \theta, \varphi) = \frac{K(\psi, \theta, \varphi)}{d\Phi_i \cos \theta} = \frac{k_2}{\pi} \frac{k_1^2 \cos \alpha}{1 + (k_1^2 - 1) \cos^2 \alpha} R_0(\gamma) \frac{G(\psi, \theta, \varphi)}{\cos \psi \cos \theta} + \frac{k_D}{\pi}. \quad (4)$$

对某材料来讲 k_2 、 k_D 、 k_1 是确定的参量。采用这三个参量就可以描述该材料的双向反射分布函数。 k_2 、 k_D 、 k_1 的值必须满足在任意入射和接收方向上该材料的双向反射分布函数,因此,参量值应该根据有限的实验结果并以最优化判据来选取。表示如下:

$$E(k_2, k_D, k_1) = \frac{\sum_k \sum_j g_1(\psi_k) g_2(\theta) [f_r(\psi_k, \theta_j) \cos \theta_j - f_r(\psi_k, \theta_j, 0) \cos \theta_j]}{\sum_k \sum_j g_1(\psi_k) g_2(\theta_j) [f_r(\psi_k, \theta_j) \cos \theta_j]},$$

式中 E 为采用 (k_2, k_D, k_1) 建立的双向反射分布函数参量模型 $f_r(\psi, \theta, \varphi) \cos \theta$ 与实验测量值的均方差, $g_1(\psi)$ 、 $g_2(\theta)$ 为权重函数 $f_r(\psi_k, \theta_j)$ 为第 k 种入射角和第 j 种观察角时双向反射分布函数的实验值。

4 双向反射分布函数参量模型的优化方法

根据(5)式确定 f_r 的均方差最小值,从而得到参量 k_2 、 k_D 、 k_1 的计算相当复杂,且需要相当的实验数据支持。

参量 k_2 、 k_D 、 k_1 最佳值的优化可采用两个步骤:预优化和全局优化。

预优化:在入射角下大于 60° 的范围内用 f_r 的模型(4)式对实验数据进行逼近,得到预优化参量 k_2^p 、 k_D^p 、 k_1^p ,在我们研究的几种样片中,预优化参量描述的双向反射分布函数均方差(相对实验数据)一般在 $1\% \sim 2\%$ 之间。

全局优化:寻求能保证在所有入射角和观察角的范围内有最小均方差(5)式的 k_2 、 k_D 、 k_1 参量,对我们研究的典型样片,全局优化能保证均方差小于 7% 。

迭代法是我们进行优化的一种有效方法,但是,

采用迭代算法寻求无条件极值(5)式对初始值的正确选取要求很高,不合适的初值选择将不能保证有效的收敛。

k_2, k_D, k_1 初值的选取方法如下:

1) 对(4)式的分析可知,在镜面方向上(即 $\theta = -\psi, \alpha = 0, \gamma = \psi$)用 $f_r(0, 0, 0)$ 归一的相对值 $F_r(\psi, -\psi, 0) = \frac{f_r(\psi, -\psi, 0)}{f_r(0, 0, 0)}$ 仅与参量 k_D/k_2 有关,此时 $\varphi = 0, \alpha = 0$ 。根据在此条件下的实验数据得到 k_D/k_2 的初值;

2) 正入射时,由(4)式可得: $\pi f_r(0, 0, \varphi) = k_2 + k_D$ 根据 k_D/k_2 的初值可以选定 k_2^0, k_D^0 作为 k_2, k_D 的初始值;

3) 对 k_1 的分析表明(2)式表示一旋转椭球

体,系数 k_1 等于椭球长短半轴之比,其物理意义为在入射平面内的镜面方向反射图的展宽程度。

从实验结果寻找满足 $f_r(\psi, \theta, 0) = f_r(\psi, -\psi, 0)/2$ 的 θ ,这样就可以通过 k_2^0, k_D^0 从方程 $f_r(\psi, \theta, 0) = f_r(\psi, -\psi, 0)/2$ 确定 k_1 的初值 k_1^0 。

合适的参量初值 k_2^0, k_D^0, k_1^0 选取之后,就可以采用参量迭代方法并按照前述的预优化和全局优化两个步骤寻求最优化参量 k_2, k_D, k_1 。

5 计算结果

采用上述方法对几种漆层样片分别建立了各自的双向反射分布函数参量模型。 k_2, k_D, k_1 的优化参量如表 1。

Table 1 Optimized results of BRDF parameters for variant samples

coating material	based material	wavelength $\lambda/\mu\text{m}$	refraction coefficient n_λ	k_2	k_D	k_1	error $E/\%$
lacquer in dark gray No. 001	aluminum metal	0.44	1.699	1.137	0	0.130	6.20
		0.91	1.60	1.211	0.521	0.071	6.47
lacquer in sand yellow No. 002	aluminum metal	0.62	1.62	0.225	0.246	0.900	4.02
	steel	1.04	1.56	0.156	0.584	1.338	3.10
0.91		1.44	0.186	0.065	0.177	2.10	
1.04		1.43	0.190	0.059	0.166	1.73	

根据表 1 中的参量优化结果,对三种涂漆层样片在不同波段的双向反射分布函数角分布进行了理论计算。部分计算结果见图 3~图 10。图 3 为铝合金基底材料深灰色漆层 001 号样品在 $0.91 \mu\text{m}$ 波段正入射时双向反射分布函数角分布的优化参量计算结果和实验数据的比较。

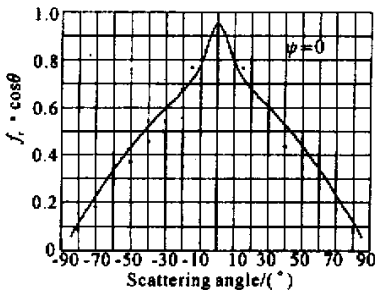


Fig. 3 Calculated and experimental results of BRDF for sample 001. $\lambda = 0.91 \mu\text{m}$ — theor. · exp.

图 4 为该样品在不同入射角时双向反射分布函数角分布的优化参量计算结果。

图 5 给出了 001 号样片在 $0.44 \mu\text{m}$ 波段大入射

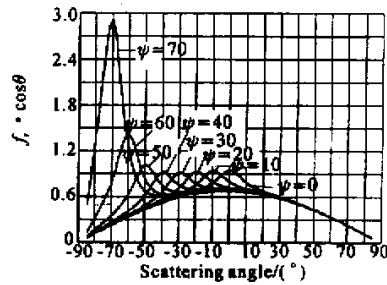


Fig. 4 Calculated results of BRDF with variant incident angle for sample 001. $\lambda = 0.91 \mu\text{m}$ 角(70°)情况下的计算和实验结果对比。

图 6 则是此波段下不同入射角的双向反射分布函数角分布计算结果曲线。

图 7 和图 8 是对同种基底材料喷涂砂黄色漆层(样品编号 002)后双向反射分布函数的优化参量计算和实验结果。通过和 001 号样品的结果比较,砂黄色漆比深灰色漆层有更宽的散射图,这和表 1 中各自 k_1 值的不同相吻合,因为前面已经分析了 k_1

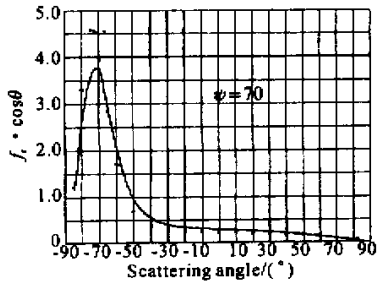


Fig. 5 Calculated and experimental results of BRDF for sample 001. $\lambda = 0.44 \mu\text{m}$, — : theor., · : exp.

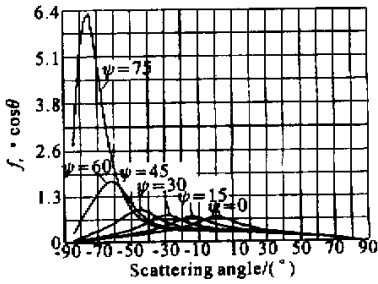


Fig. 6 Calculated results of BRDF with variant incident angle for sample 001. $\lambda = 0.44 \mu\text{m}$

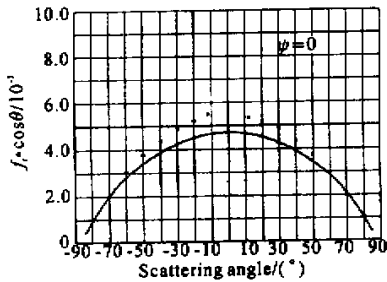


Fig. 7 Calculated and experimental results of BRDF for sample 002. $\lambda = 0.62 \mu\text{m}$, — : theor., · : exp.

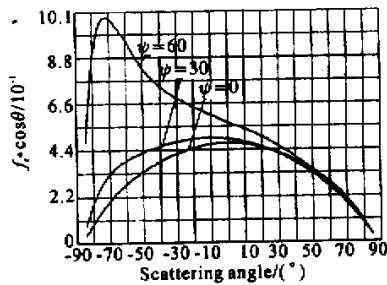


Fig. 8 Calculated results of BRDF with variant incident angle for sample 002. $\lambda = 0.62 \mu\text{m}$

的物理意义就是决定在入射平面内的镜面方向反射图的展宽程度。

图 9 和图 10 是基底为钢材料的绿色漆层 003 号样片双向反射分布函数计算和实验结果, 图中分别给出了典型的小角度和大角度入射时的情况。从图 3~图 10 可以看出, 优化参量计算的结果和实验结果吻合得很好。

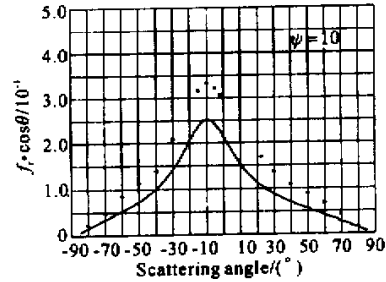


Fig. 9 Calculated and experimental results of BRDF with $\psi = 10^\circ$ for sample 003. $\lambda = 1.04 \mu\text{m}$, — : theor., · : exp.

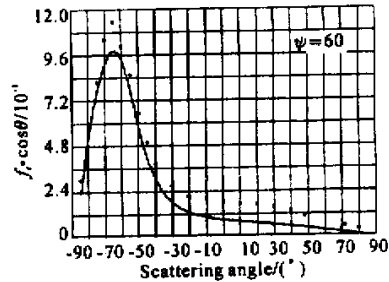


Fig. 10 Calculated and experimental results of BRDF with $\psi = 60^\circ$ for sample 003. $\lambda = 1.04 \mu\text{m}$, — : theor., · : exp.

结论 本文研究了涂层材料双向反射分布函数的参量理论, 得到了三参量描述双向反射分布函数的表达式。对几种典型漆层样片的双向反射分布函数实验结果通过参量迭代和优化, 建立了各自双向反射分布函数的参量模型。给出了典型条件下的计算结果和实验结果的对比。比较表明, 优化计算结果和实验结果吻合得很好。和单纯的理论分析计算比较, 参量模型描述粗糙表面双向反射分布函数形式更加简洁, 计算也更加方便, 而且弥补了实验测量不能得到在任意入射和观测方向上双向反射分布函数的不足。由于参量优化以实验结果为基础, 因此, 该方法更易保证计算结果的精度, 对工程应用来讲也

更加方便。

参 考 文 献

- [1] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(6): 1474~1475
- [2] Kimes D S. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(9):1364~1372
- [3] Strahler A H. Vegetation canopy reflectance-recent developments and a remote sensing perspective. *Remote Sensing Reviews*, 1997, **15**(2):179~194
- [4] Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Surface reflection: Physical and geometrical perspectives. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(7):611~634
- [5] Wolff L B. Generalizing Lambert's Law for Smooth Surface. In: Buxton B, Cipolla R. ed. *Proc. the European Conference on Computer Vision, ECCV '96* Berlin: Springer Verlag, 1996. 40~53
- [6] Hsia J J. Bidirectional reflectometry part I: A high bidirection reflectometry with results on several optical coatings. *J. R. NBS, Phys. Chem.*, 1976, **80A**(2): 189~205
- [7] Brooks L D, Wolfe W L. Microprocessor-based instrumentation for bidirectional reflectance distribution function(BRDF) measurement from visible to far infrared (IFR). *Proc. SPIE*, 1980, **257**:177~183
- [8] Ruck G, Barrick D E, Stuart W D *et al.*. *Radar Cross Section Handbook*. New York: Plenum, 1970, **2**:695~752
- [9] Hubbs J E, Brooks L D, Notziger M J *et al.*. Bidirectional reflectance distribution function of the infrared astronomical satellite solar-sail material. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(18): 3323~3325
- [10] Wu Zhensen, Han Xiang'e, Zhang Xiangdong *et al.*. Experimental study on bidirectional reflectance distribution function of laser scattering from various rough surfaces. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1996, **16**(3): 262~268 (in Chinese)
- [11] Han Xiang'e, Wu Zhensen, Zhang Xiangdong. Experiments study of laser scattering from very rough surfaces. *Laser Technology*(激光技术), 1997, **21**(3): 151~155 (in Chinese)
- [12] Ginneken B V, Stavridi M, Koenderink J J. Diffuse and specular reflectance from rough surfaces. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(1):130~139
- [13] Tomiyasu K. Relationship between and measurement of differential scattering coefficient (σ°) and bidirectional reflectance distribution function (BRDF). *IEEE*, 1998, **GE-26**(5):660~665
- [14] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(9):1105~1114

A Parametric Model of Bidirectional Reflectance Distribution Function

Li Tie¹⁾²⁾ Yan Wei²⁾ Wu Zhensen¹⁾

(1), Physics Department, Xidian University, Xi'an 710068

(2), Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065)

(Received 22 May 2001 ; revised 24 August 2001)

Abstract : The study of the parametric theory of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) for the coating material is presented. The 3-parameter formula of BRDF is obtained. By optimizing the parameters, the parametric models of BRDF for several typical coating samples are demonstrated. A comparison of this parametric model with the experimental results shows that both results are in agreement well. This method for calculating BRDF of rough surface is simple in form and practicable in the engineering applications.

Key words : BRDF ; scattering from rough surface ; optimization theory ; iterative arithmetic ; perturbation theory ; physical optics