

文章编号 : 0253-2239(2002)08-0897-05

粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法^{*}

吴振森¹⁾ 谢东辉¹⁾* * 谢品华²⁾ 魏庆农²⁾

(1), 西安电子科技大学理学院, 西安 710071
(2), 中科院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 首先利用简单几何光学与概率统计的原理, 根据粗糙面激光散射特性, 对双向反射分布函数进行了简化和数学统计建模。然后通过遗传算法对实验测量数据的拟合, 获得更多的物体粗糙表面的光散射信息。最后提出了几种简化的数学统计模型, 对实验数据进行优化拟合, 均取得了良好的效果。

关键词: 双向反射分布函数; 光散射; 粗糙表面; 粗糙度; 遗传算法

中图分类号: O432.1 文献标识码: A

1 引 言

粗糙表面的双向反射分布函数(BRDF)不仅能描述其表面的光辐射特性, 而且也能描述方向散射特性^[1]。目前已将双向反射分布函数用于微波波段的粗糙表面散射^[2]。它在材料诊断、目标光辐射与散射特性、地物遥感等领域都有广泛的应用。对粗糙面双向反射分布函数的研究通常有解析理论和工程统计两种不同的方法。在解析方法中常用的有粗糙面电磁散射微扰法、基尔霍夫法和相位微扰法等。它们的适用范围有所不同, 且需要准确地获得目标表面的光学常数、粗糙度统计参量。考虑到实际表面大多不是由单一材料构成, 或是金属合金、或具有涂层, 甚至涂层中含有随机分布的各类粒子, 很难对它们的粗糙度统计参量和光学参量给以精确的测量。同时由于多重散射、遮蔽效应和体散射的影响, 导致在应用随机粗糙面电磁散射理论研究样品表面的激光散射特性时, 存在较大的困难。另一种比较适用的方法就是根据表面光散射的实验特征曲线, 建立统计工程模型。这种方法的优点是直观、计算简单, 不需要测量样品的光学参量和粗糙度统计参量。统计模型是根据粗糙面多角散射分布实验数据, 通过优化理论将双向反射分布函数看成是关于角度和某几个参量为变量的数学函数。这种描述目标表面或典型地物的双向反射分布函数的统计模型是根据粗糙表面的不同分类, 结合各参量因子的物

理含义, 概括、提炼而出, 使用起来简洁、有效, 被广泛应用于遥感和军事上, 特别在图像分析和处理等方面, 具有更广泛的工程使用价值, 如 Cook-Torrance 模型^[3], 修正的 Phong 模型^[4], Ward 模型^[5]以及其它经验模型。

本文利用自行设计的双向反射分布函数自动测量系统^[6], 测量了水泥、几种金属和涂层样片的双向反射分布函数的空间分布, 在 Torrance-Sparrow 模型^[7]的基础上提出一种五参量的统计模型, 最后利用遗传算法计算了水泥板、锻钢样片双向反射分布函数的模型参量, 计算结果与实验数据吻合得很好。

2 双向反射分布函数数据采集

在散射测量中, 一般有两种形式: 一种是测量双向反射分布函数 f_r , 测量要求照射面积不随入射角度的变化而变化; 另一种是测量单位面积散射截面 σ^0 (正比于散射功率)。两者的相互关系为^[6]:

$$\sigma^0 = 4\pi f_r \cos\theta_i \cos\theta_r. \quad (1)$$

我们采用比较测量法^[6]来测量样品表面的双向反射率空间分布。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 ρ_0/π , ρ_0 为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。在相同的入射和接收姿态下, 参考板的输出电压为 $V_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$, 样品的输出电压为 $V_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$, 则

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{V_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \rho_0}{V_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \pi}, \quad (2)$$

因此只要知道聚四氟乙烯标准板的半球反射率, 通

* 国家自然科学基金(60081002)资助课题。

** E-mail: xiedonghui@263.net

收稿日期 2001-06-18; 收到修改稿日期 2001-10-22

过测量,由上式计算便得到样品的双向反射率。

3 修正粗糙表面双向反射分布函数模型

在可见光区和近红外区中,除镀膜、抛光样片外,大多数粗糙表面的高度起伏均方根 σ 比入射波长大多 ($k\sigma > 1$)。粗糙表面可以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。如图 1 所示,设坐标轴 oz 与随机粗糙面平均表面的法线重合, k_i 为入射波矢, k_r 为散射波矢。 (θ_i, φ_i) 为入射角, (θ_r, φ_r) 为散射角, α 为微观小平面的法线方向 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。 α 和 γ 与直角坐标系中的角度关系为(设 $\varphi_i = 0$):

$$\left. \begin{aligned} \cos\alpha &= \frac{\cos\theta_i + \cos\theta_r}{2\cos\gamma}, \\ \cos^2\gamma &= \frac{1}{2}(\cos\theta_i\cos\theta_r + \sin\theta_i\sin\theta_r\cos\varphi_r + 1). \end{aligned} \right\} (3)$$

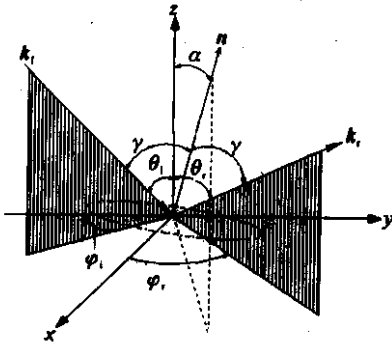


Fig.1 Diagram showing the geometric relation of BRDF in cartesian coordinate

在此基础上, Torrance 和 Sparrow 导出了粗糙但不是完全漫反射表面的双向反射分布函数模型^[7]。模型假设表面由小面元组成,小面元的法线方向呈高斯分布,并且小面元反射遵循菲涅耳关系。模型暗含条件为:均方高度远远大于波长。模型中含有遮蔽和掩饰因子。双向反射分布函数给出如下:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = gR(\gamma, n) \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos\theta_r} \times \exp(-C^2\alpha^2) + \frac{\rho_0}{\pi}\cos\theta_i, \quad (4)$$

式中,第一项为粗糙表面的相干分量(俗称镜反射),第二项为朗伯分量(漫反射分量)。待定参量 g 为镜反射系数; $R(\gamma, n)$ 为菲涅耳反射函数;

$G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为遮蔽函数,指数项为表征粗糙度统计特性的特征函数,其中 C 为待定常数。当反射角度小于 85° 时,这个模型能够很好地符合金属和电介质粗糙表面的测量数据,并很好地预测了非镜向峰值现象。特别是对于各向同性的表面,可以设 $\varphi_i = 0, \varphi = \varphi_r - \varphi_i = \varphi_r$, 则双向反射分布函数可以降为关于 $\theta_i, \theta_r, \varphi_r$ 的函数 $f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 。

本文将上述模型进行了修正。根据双向反射分布函数定义,要求单位面积的入射功率(照度)不随入射角度变化,但是在实验中不能保证照度不变。因此当以一定功率的光入射时,由于照射面积变化,使照度相差 $\cos\theta_i$ 倍。另外,因为朗伯面假设其双向反射分布函数不随角度的变化而变化,即在任意方向上它都是一个常数,它包含了多重散射、体散射以及材料光学特性对漫射分量的贡献。因测量原因,需将(4)式中两项乘以 $1/\cos\theta_i$ 因子。如果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,则将(4)式第一项中菲涅耳反射系数和指数部分改为

$$\chi_n(\alpha)R_0(\gamma) = \frac{k_r^2\cos\alpha}{1 + (k_r^2 - 1)\cos^2\alpha} \exp[b(1 - \cos\gamma)^a], \quad (5)$$

$\chi_n(\alpha)$ 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,镜向峰值越突出,其值就越小;反之,则接近于 1。 $R_0(\gamma)$ 为面元局部相对菲涅耳反射系数,

$$R_0(\gamma) = R(\gamma)R(0),$$

这里用指数函数近似模拟,可以提高定向散射分量的增长速度,更精确地近似实验数据。式中 a, b 为待定参量,与介质的折射率有关。因为当

$$R_0(\pi/2) = \frac{R(\pi/2)}{R(0)} = \exp(b) = \frac{(n+1)^2}{(n-1)^2},$$

b 的初始近似参量可取为

$$b = \ln[(n+1)(n-1)^2],$$

其中 n 为介质折射率。 a 的初值要根据其它参量的情况来确定。

遮蔽函数 $G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 由各相邻面元反射的遮蔽和掩饰概率决定。为了得到简单的公式,引入平面微观几何模型,即取微观法线平面的投影,如图 2 所示。

$\theta_{\text{sph}}^i, \theta + r_{\text{sph}}, \gamma_{\text{sph}}$ 分别为 $\theta_i, \theta_r, \gamma$ 的球面投影。在此基础上遮蔽函数使用逼近公式:

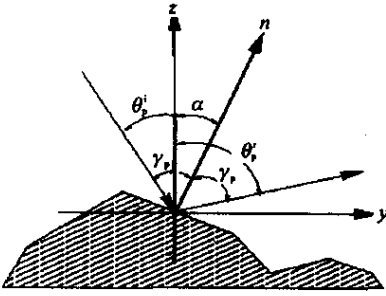


Fig.2 Diagram showing the microgeometric model of BRDF in two-dimension coordination

$$G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{1 + w_{sph} |\tan\theta_{sph}^i \tan\theta_{sph}^r| (1 + \sigma_r \tan\gamma_{sph})}{(1 + w_{sph} \tan^2\theta_{sph}^i) (1 + w_{sph} \tan^2\theta_{sph}^r)}, \quad (6)$$

其中,

$$w_{sph}(\alpha) = \sigma_{sph} \left(1 + \frac{u_{sph} \sin\alpha}{\sin\alpha + v_{sph} \cos\alpha} \right),$$

式中 $\sigma_r, \sigma_{sph}, u_{sph}, v_{sph}$ 为经验参量, 一般情况下它们可通过大量实验统计获取。本文近似取为 $\sigma_{sph} = 0.0136, \sigma_r = 0.0136, u_{sph} = 9.0, v_{sph} = 1.0$, 此时函数可计算出通量衰减的近似几何系数。根据球面三

角学公式 $\theta_{sph}^i, \theta_{sph}^r, \gamma_{sph}$ 的三角函数公式如下所示

$$\left. \begin{aligned} \tan\theta_{sph}^i &= \tan\theta_i \frac{\sin\theta_i + \sin\theta_r \cos\varphi_r}{2\sin\alpha \cos\gamma} \\ \tan\theta_{sph}^r &= \tan\theta_r \frac{\sin\theta_r + \sin\theta_i \cos\varphi_r}{2\sin\alpha \cos\gamma} \\ \tan\gamma_{sph} &= \frac{|\cos\theta_i - \cos\gamma|}{2\sin\alpha \cos\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由此给出了双向反射分布函数的五参量半经验统计模型为

$$\frac{f_i(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos\theta_i} = k_b \frac{k_r^2 \cos\alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos\alpha} \times \exp[b(1 - \cos\gamma)^a] \frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos\theta_i \cos\theta_r} + \frac{k_d}{\cos\theta_i}, \quad (8)$$

式中 k_b, k_d, k_r, a, b 为待定参量。 k_b 为镜反射系数, k_d 为漫反射系数。根据能量守恒定律, $k_b + k_d \leq 1.0$ 。 $G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 由(6)式给出。

4 获取模型参量的遗传计算

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, 最小均方误差可按下式计算:

$$E(x)_{\min} = \frac{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} g_1(\theta_i) g_2(\theta_r) [f_i(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r - f_i^0(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r]^2}{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} g_1(\theta_i) g_2(\theta_r) [f_i^0(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r]^2}, \quad (9)$$

对于(9)式, $x = [k_b, k_d, k_r, a, b]^T$ 为模型参量的列向量, f_i^0 为双向反射分布函数实验数据。 $g_1(\theta_i), g_2(\theta_r)$ 为加权函数, 在不均匀的测量间距时调整各项误差对总误差的影响, 它取决建模的目的和不等距测量的精度。通过选取加权函数可以在重要的辐射角或观测角区域获得更精确的经验参量。我们处理的实验数据都是等间距测量的, 所以加权函数取为 1。

根据(8)式所建立的双向反射分布函数模型较为复杂, 目标函数本身具有函数沟壑和非线性性质, 这就使得一般的优化方法难以快速求解, 造成计算复杂而庞大, 耗时消耗严重。因此最重要的是根据样片的几何和物理性质建立合理的近似统计模型函数以及确定出参量的初始值, 以便找出函数的最优解。采用遗传算法时, 首先根据参量的初始值设定一个较大的参量范围, 当得到一组较优解后, 再以这一组解为中心, 缩小原来定的参量范围。如此反复计算 2 ~ 3 次, 基本上就可以确定出参量的最优解或近似

最优解了。

在应用遗传算法^[8-10]的过程中采用基本遗传算法: 使用二进制编码方法, 遗传算子中选择运算使用比例选择算子, 交叉运算使用单点交叉算子, 变异运算使用基本位变异算子。许多著作对遗传算法都进行了详细的论述, 这里就不赘述了。

5 计算结果

通过上述建模和遗传算法, 我们根据下述几种样片(锻钢涂漆样片, 粗糙水泥平板以及 G4 粗糙钢板等)在入射面内不同入射角的四组散射角分布的双向反射分布函数的实验数据(波长为 $1.06 \mu\text{m}$), 获得随机粗糙面激光散射的双向反射分布函数统计模型。现在逐一分述如下。

5.1 锻钢涂漆样片(土黄漆)

设方向反射系数

$R_s(\theta_i, \theta_r, \theta) = f_i(\theta_i, \theta_r, \theta) \cos\theta_i / \cos\theta_r$ 的统计模型为

$$R_s(\theta_i, \theta_r, \rho) = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \times \exp[k(1 - \cos \gamma)^a] \frac{G(\theta_i, \theta_r, \rho)}{\cos \theta_i} + \frac{k_d \cos \theta_r}{\cos \theta_i} \quad (10)$$

从实验数据,根据多参量优化的遗传算法获得的模型参量为

$$k_b = 0.0646, \quad k_d = 0.1081, \quad k_r = 0.1066, \\ a = 2.4863, \quad b = -24.74325, \quad E = 0.3\%$$

其中 E 为误差。模拟曲线如图 3 所示。可见,对于不同的入射角,上述数学模型与实验数据符合得很好。同时,我们还利用这一模型与基尔霍夫法计算所得的数据进行了拟合,也取得了较好的效果。这说明,对于其它相似情况的粗糙表面,这一模型均可适用。限于篇幅,就不一一详述了。但这种数学模型过于复杂,而遗传算法的计算极其耗时。所以,我们同时采用了下面两种模型进行拟合,以简化运算,并都能很好地对实验值进行模型化,更适于工程上统计建模的应用要求。

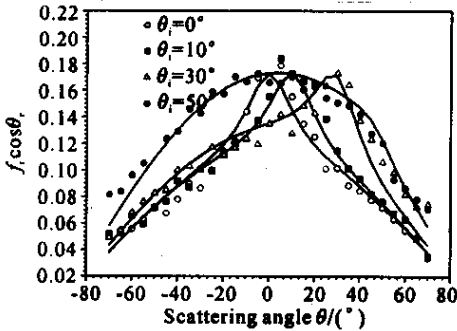


Fig.3 BRDF of armor plate with coating khaki paint (discret points represent experimental datum and lines represent the fitted results calculated by equation (10))

5.2 水泥平板

水泥板属于大粗糙度随机样片,其光散射特征接近于朗伯面,可以认为基本由漫射分量组成,镜向分量可近似为 0。因此,双向反射分布函数的数学模型可简化地设为

$$R_s(\theta_i, \theta_r, \rho) = a(\cos \theta_r / \cos \theta_i)^k \quad (11)$$

计算获得模型参量为 $a = 0.1397, k = 0.9372, E = 0.45\%$ 。模拟双向反射分布函数曲线如图 4 所示。

5.3 粗糙钢板 G4

对于粗糙钢板同样利用了一个比较简单的数学模型,如(12)式所示

$$R_s(\theta_i, \theta_r, \rho) = \frac{a \exp[-k(\theta_i - \theta_r)^2] + c \cos \theta_r}{\cos \theta_i} \quad (12)$$

式中,第一部分用一个指数函数来表示单次反射分

量,第二部分为多次反射分量。计算获得的模型参量为 $a = 0.0695, b = 4.2369, C = 0.0799, E = 1.15\%$ 。图 5 给出了双向反射分布函数的实验测量值和由(12)式计算的曲线。

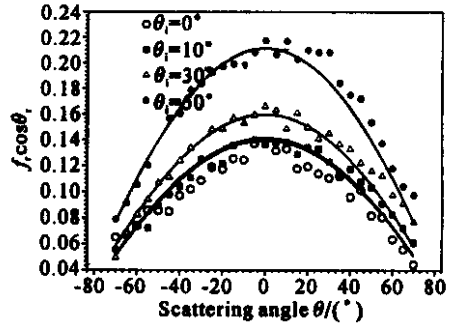


Fig.4 BRDF of floor slab (discret points represent experimental datum and lines represent the fitted results calculated by equation (11))

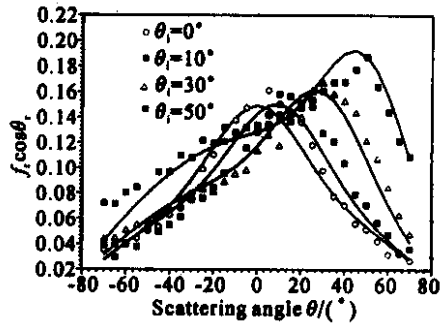


Fig.5 BRDF of rough armor plate (discret points represent experimental datum and lines represent the fitted results calculated by equation (12))

小结 本文根据粗糙样片散射角分布实验曲线,利用遗传算法获得粗糙面双向反射分布函数的统计模型。同时根据粗糙表面的几何特性和物理特性,以及样片的实验数据和散射特性,简化了数学模型,获得了目标表面光散射的较准确的统计模型。这种统计模型简化了实验测量,可避免解析理论中必须预先获取样片的粗糙度统计参量和光学常数的困难,便于粗糙面与涂层光散射特性的统计建模,适合在工程上对复杂目标光散射与辐射特性的研究与仿真。

参 考 文 献

[1] Tomiyasu K. Relationship between and measurement of differential scattering coefficient and bidirectional reflectance distribution function (BRDF). *IEEE*, 1988, **GE-26**(5): 660 ~ 665
 [2] Gibbs D P, Betty C L, Fung A K *et al.*. Automated measurement of polarized bidirectional reflectance. *Remote Sense Environ*, 1993, **43**(2): 97 ~ 114

- [3] Cook R L , Torrance K E. A reflectance model for computer graphics. *ACM Siggraph* , 1981 , **15**(3) : 307 ~ 316
- [4] Phong B T. Illumination for computer generated pictures. *Communications of ACM* , 1975 , **18**(6) : 311 ~ 317
- [5] Ward G J. Measuring and modeling anisotropic reflection. *Computer Graphics* , 1992 , **26**(2) : 265 ~ 272
- [6] Wu Zhensen , Han X E , Zhang X D *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)
- [7] Torrance K , Sparrow E. Theory of off-specular reflection from roughened surfaces. *J. Opt. Soc. America* , 1967 , **57**(9) : 1105 ~ 1115
- [8] Zhou Ming , Sun Shudong. *Genetic Algorithms Principle and Application* (遗传算法原理及应用). Beijing : Publishing House of National Defence Industry , 1999 (in Chinese)
- [9] Yang G , Reinstein L E , Pai S *et al.* . A new genetic algorithm technique in optimization of permanent 125-I prostate implants. *Medical Physics* , 1998 , **25**(12) : 2308 ~ 2315
- [10] Carroll D L. Chemical laser modeling with genetic algorithms. *AIAA J.* , 1996 , **34**(2) : 338 ~ 346

Modeling Reflectance Function from Rough Surface and Algorithms

Wu Zhensen¹⁾ Xie Donghui¹⁾ Xie Pinhua²⁾ Wei Qingnong²⁾

(1) , School of Sciences , Xidian University , Xi'an 710071

(2) , Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics Academia Sinica , Hefei 230031

(Received 18 June 2001 ; revised 22 October 2001)

Abstract : The bidirectional reflectance distribution function (BRDF) is simplified and modelled according to the principles of simple geometry optics and statistical modeling. The model is fitted with experimental datum by the optimization of genetic algorithms in order to gain more light scattering information of the object rough surface. Other models are put forward to fitting the experimental datum and the results are good.

Key word : bidirectional reflectance distribution function (BRDF) ; light scattering ; rough surface ; roughness ; genetic algorithms