

# 粗糙表面双向反射分布函数优化建模与验证

袁艳, 金鼎, 苏丽娟\*

北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191

**摘要** 目标表面双向反射分布函数(BRDF)可用于描述目标的散射特性,被广泛应用于目标探测识别、特征分析提取等领域。基于五参量 BRDF 模型,针对目标表面材质特点建立了两类材料的简化五参量模型(半光面材料 BRDF 模型和毛面材料 BRDF 模型)。在此基础上,优化了模型参量拟合法,在粒子群优化算法(PSO)中引入模拟退火算法(SA),提高了算法的局部搜索能力和效率。实验测量了不同粗糙度的 2024 铝合金样片和三种大粗糙度样片的 BRDF 数据,分析了目标样片 BRDF 随散射角的变化趋势以及其与表面粗糙度的关系。利用模拟退火粒子群优化算法(SAPSO)、遗传算法(GA)、粒子群算法对实验数据进行拟合,模型计算结果与实验结果的对比显示,模拟退火粒子群算法拟合误差更小,更适用于 BRDF 优化建模,证明了该算法的有效性。

**关键词** 散射; 双向反射分布函数; 建模优化; 模拟退火粒子群优化算法; 粗糙表面

中图分类号 O432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.052901

## Optimization Modeling and Verification of Bidirectional Reflectance Distribution Function for Rough Surfaces

Yuan Yan, Jin Ding, Su Lijuan

*Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China*

**Abstract** The bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of target surface can be used to describe the scattering characteristics of targets, which has been widely used in the applications such as target detection and identification, feature analysis and extraction. In this paper, based on five parameter BRDF model, two simplified five parameter models (BRDF model of semi glossy material and BRDF model of rough surface material) are presented according to the characteristics of different target surface material attributes. Furthermore, the model parameter fitting algorithm is optimized. The simulated annealing algorithm (SA) is adopted in the particle swarm optimization algorithm (PSO) to enhance the local search ability of the algorithm and improve the efficiency of the algorithm. The BRDF data of 2024 aluminum alloy samples with different roughnesses and three kinds of large roughness samples are experimentally measured. The trend of the BRDF variation of target sample with scattering angle, the relationship between the BRDF of target sample and surface roughness, are analyzed. Simulated annealing particle swarm optimization algorithm (SAPSO), genetic algorithm (GA) and particle swarm algorithm are used to fit the experimental data. The comparison between the model calculation results and the experimental results shows that the simulated annealing particle swarm algorithm has a smaller fitting error and is more suitable for BRDF optimization modeling, which proves the effectiveness of the algorithm.

**Key words** scattering; bidirectional reflectance distribution function; modeling optimization; simulated annealing-particle swarm optimization algorithm; rough surface

**OCIS codes** 290.1483; 290.5820; 290.5880

收稿日期: 2017-11-07; 收到修改稿日期: 2017-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(61635002)、北京市自然科学基金(4172038)

作者简介: 袁艳(1967—),女,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感探测技术、新型光谱成像技术、光场成像技术等方面的研究。E-mail: yuanyan@buaa.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: sulijuan@buaa.edu.cn

# 1 引言

双向反射分布函数(BRDF)能够描述不同材料表面的空间反射辐射特性,其主要由材质表面的粗糙度、介电常数、入射光波长及偏振等因素决定<sup>[1]</sup>。BRDF 相关研究成果已被广泛应用于航空航天<sup>[2]</sup>、遥感观测<sup>[3]</sup>、材料工艺<sup>[4]</sup>、计算机图形学<sup>[5]</sup>等众多领域。在 BRDF 研究中,主要应用到的模型有经验模型、物理光学模型和工程统计模型等。近年来,国内外针对特定材料,依据物理光学或几何光学原理构建了多类 BRDF 模型,如 Raymond 等<sup>[6]</sup>提出了一种适用于表面划伤材料的 BRDF 模型,刘宏等<sup>[4]</sup>提出了一种适用于热涂层表面的 BRDF 三参量模型。相关模型在特定材料表面 BRDF 优化建模方面取得了较好的效果,但模型复杂,适用面窄,在工程应用中适用性较差。工程统计模型由几何光学原理与经验参量相结合的方法构建而成,具有适用范围广、拟合精度高等优点,相关模型有 Torrance-Sparrow 模型<sup>[7]</sup>、Cook-Torrance 模型<sup>[8]</sup>和五参量模型<sup>[9]</sup>等。但上述模型较复杂,参量较多,计算耗时较长,在实际应用中可针对目标材料特性对模型进行简化。目前基于工程统计模型的建模研究多针对不同材质的材料开展,如文献<sup>[10]</sup>中的实验材料为两类空间目标包覆材料,文献<sup>[11]</sup>中的实验材料为三类喷漆材料。目前对于同类材料在不同粗糙度条件下的 BRDF 特性研究较少。在 BRDF 模型参量拟合优化中,常用的优化算法有遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)<sup>[12]</sup>等。遗传算法全局搜索能力强,粒子群算法原理简单、收敛速度快,但上述算法均存在局部搜索能力弱、易陷入局部最优等问题。模拟退火(SA)算法具有较强的跳出局部最优的能力,在优化算法中引入模拟退火算法可以加强局部搜索能力,提高优化建模效果。

本文依据不同材质特点,在五参量模型基础上简化得到半光面材料 BRDF 模型与毛面材料 BRDF 模型,减少了模型参量,简化了计算过程;通过在粒子群算法中引入模拟退火算法,提升了算法的局部搜索能力,改善了算法效果;利用相对测量方法,实验测量了不同粗糙度的 2024 铝合金样片及三类大粗糙度毛面材料的 BRDF 数据;利用模拟退火粒子群算法(SAPSO)对简化五参量模型参量进行迭代优化,建立了多类粗糙目标样片的 BRDF 模型公式。由 BRDF 模型可以获得任意入射角和散射角下目标样片的 BRDF 信息,模型计算结果与实验数

据吻合良好,验证了粗糙目标表面 BRDF 优化建模方法的可行性和可靠性。

## 2 粗糙表面 BRDF 建模

### 2.1 BRDF 概念

BRDF 定义为光辐射的反射辐亮度与入射辐照度的比值<sup>[13]</sup>,反映了对于某一特定入射方向的辐射所对应的在被照物体表面上半球空间内的反射能量分布。其数学表达式为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{E_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}, \quad (1)$$

式中  $\theta_i, \varphi_i$  为入射天顶角和方位角;  $\theta_r, \varphi_r$  为反射天顶角和方位角;  $\lambda$  为波长;  $E_i$  和  $L_r$  分别为入射辐照度和反射辐亮度。

对材料 BRDF 的测量可采用绝对测量法和相对测量法。绝对测量在不使用任何参考标准的情况下进行,而相对测量则是利用已知反射比的参考标准与被测试样片进行比较测量<sup>[14]</sup>。本研究选用相对测量法测量样片表面 BRDF,这种方法可以有效减小由于光源和探测器不稳定等因素造成的误差<sup>[15]</sup>。利用聚四氟乙烯粉压制的白板的反射特性接近朗伯体,可作为参考标准,其 BRDF 为  $\rho(\lambda)/\pi$ , 其中  $\rho$  为参考白板的半球反射率。实验中选用的参考白板的  $\rho = 96\%$  是已知的。样片 BRDF 测量公式为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{L_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cdot \cos 30^\circ}{L_b(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cdot \cos \theta_i} \cdot \frac{\rho(\lambda)}{\pi}, \quad (2)$$

式中  $f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$  是目标样片在波长为  $\lambda$  时的 BRDF,  $L_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$  是样片的出射辐亮度,  $L_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$  是参考白板的出射辐亮度。实验中采用单一比较测量方法,利用 REFLECT 散射测量仪对参考白板在入射角为  $30^\circ$  时测量一组数据,即可利用待测样片的测量数据通过(2)式得到其在不同角度下的 BRDF。

### 2.2 简化五参量模型

在样片 BRDF 建模中,以五参量模型为基础,分别利用通过简化五参量模型得到的半光面材料 BRDF 模型和毛面材料 BRDF 模型对样片进行建模分析。五参量模型表达式为:

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi) = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \cdot \exp[b \cdot (1 - \cos \gamma)^a] \cdot \frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i}, \quad (3)$$

式中第一项表示反映样片表面镜反射情况的相干分量,第二项表示反映样片表面漫反射情况的非相干分量; $k_b, k_d, k_r, a, b$ 为待定的5个参量, $\varphi$ 为相对方位角, $k_r^2 \cos \alpha / [1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha]$ 为小面元法线分布函数, $\exp [b \cdot (1 - \cos \gamma)^a]$ 为近似的菲涅耳反射函数, $G(\theta_i, \theta_r, \varphi)$ 为遮蔽函数<sup>[9]</sup>;其他参量的物理意义可参考文献<sup>[9]</sup>中的详细说明。五参量模型参量较多,形式较复杂,为提高模型在针对特定材质属性、不同表面粗糙度范围的材料建模分析时的运算效率,本课题组对五参量模型进行简化,得到毛面材料 BRDF 模型、半光面材料 BRDF 模型。

水泥板等大粗糙度毛面材料的散射特性曲线与朗伯体近似,其散射主要由漫反射分量组成,可认为其镜反射分量近似为0,得到毛面材料 BRDF 模型为:

$$f_{rs}(\theta_i, \theta_r, \varphi) = \frac{a}{\pi} \cdot \left( \frac{\cos \theta_r}{\cos \theta_i} \right)^b. \quad (4)$$

对于半光面材料,可认为其表面不存在遮蔽现

象,令遮蔽函数  $G(\theta_i, \theta_r, \varphi)$  取 1, 得到半光面材料 BRDF 模型为:

$$f_{rs}(\theta_i, \theta_r, \varphi) = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \cdot \exp [b \cdot (1 - \cos \gamma)^a] \cdot \frac{1}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i}. \quad (5)$$

毛面材料 BRDF 模型主要适用于大粗糙度毛面材料(粗糙度  $Ra > 50 \mu\text{m}$ ),能够准确反映其近似朗伯体的散射特性。半光面材料 BRDF 模型主要适用于半光面材料( $1.6 \mu\text{m} < Ra < 6.3 \mu\text{m}$ ),而对于粗面材料( $6.3 \mu\text{m} < Ra < 50 \mu\text{m}$ ),随着其表面粗糙度增大,材料表面微观遮蔽现象增强,此时原五参量模型的实用性更强。

BRDF 建模是利用优化搜索算法求解 BRDF 模型最优参量值的过程,模型各参量的选择标准是使模拟实验数据的标准差最小。标准均方误差可按下式计算:

$$E(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} g_1(\theta_i) g_2(\theta_r) [f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi) \cos \theta_r - f_r^0(\theta_i, \theta_r, \varphi) \cos \theta_r]^2}{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} g_1(\theta_i) g_2(\theta_r) [f_r^0(\theta_i, \theta_r, \varphi) \cos \theta_r]^2}, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{x} = [k_b, k_d, k_r, a, b]^T$  为模型参量的列向量; $f_r$  为模型拟合数据, $f_r^0$  为 BRDF 实验测量数据; $g_1(\theta_i)$  和  $g_2(\theta_r)$  为加权函数,用以在实验测量间距不均匀时调整各项误差对总误差的影响,其取决于建模的目的和不等距测量的精度<sup>[10]</sup>。本实验中均为等距测量,故两个加权函数均取 1。

### 2.3 模拟退火粒子群算法

粒子群算法由 Kennedy 等<sup>[16]</sup>于 1995 年提出,是一种基于群体智能的全局优化搜索算法。该算法具有原理简单、易于编程实现和收敛速度快等优点。但与遗传算法等全局优化搜索算法相似,粒子群算法存在着易于陷入局部最优的问题。模拟退火算法<sup>[17]</sup>是通过模拟物理退火过程以解决组合优化问题的寻优算法,在模拟退火的过程中,不仅会接受好的解,还会以一定概率接受差的解,这种概率突跳能力可以有效避免搜索过程陷入局部最优解。本研究以具有速度压缩因子的粒子群算法为基础,在其中引入模拟退火机制,结合了粒子群算法具有的全局寻优能力和模拟退火算法具有的跳出局部最优解的能力,避免了粒子群算法易于陷入局部极值点的缺点,提高了优化算法的精度。

改进的基于模拟退火的粒子群算法步骤如下:

- 1) 以标准均方误差  $E(\mathbf{x})$  作为目标函数,初始化各项参量:粒子数目  $N$ ,学习因子  $c_1$  和  $c_2$ ,初始温度  $T_0$ ,退火常数  $q$ ,最大迭代次数  $M$ ;
- 2) 随机初始化种群中各个粒子的初始位置和速度  $(x_i, v_i)$ ;
- 3) 根据目标函数计算每个粒子的适应值,记第  $i$  个粒子截至目前搜索到的最优位置为  $p_i$ ,整个种群截至目前搜索到的最优位置为  $p_g$ ;
- 4) 计算当前温度下各粒子的  $p_i$  对应的退火概率  $\exp\{-[f(p_i) - f(p_g)]/T\}$ ,利用轮盘赌算法从所有  $p_i$  中确定新的全局最优  $p_g$ ;
- 5) 根据下式更新各粒子的位置和速度:
 
$$v_i(t+1) = \varphi \{v_i(t) + c_1 r_1 [p_i - x_i(t)] + c_2 r_2 [p_g - x_i(t)]\}, \quad (7)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), \quad (8)$$
 式中  $t$  为时间, $r_1, r_2$  为  $0 \sim 1$  之间的随机数, $\varphi$  为速度压缩因子, $\varphi = 2 / |2 - C - \sqrt{C^2 - 4C}|$ , $C = c_1 + c_2$ ;
- 6) 计算各粒子的适应值,更新  $p_i, p_g$  值;
- 7) 进行退火操作,令  $T_{k+1} = qT_k$ ;

8) 判断是否达到终止条件,若是则停止运算,输出模型参量及最小标准均方误差,否则返回步骤4)继续执行。

### 3 实验验证与模型优化

#### 3.1 实验数据

选用法国 Light Tec 公司研制的 REFLET 180S 散射测量仪开展样片 BRDF 测量实验。REFLET 测量仪是一款用于材料散射特性测试的紧凑式机械化光学系统,可以快速便捷地测量样片在半球空间内的散射特性,并通过配套软件计算出样片的 BRDF。REFLET 测量仪由光学工作台、暗室、光源盒、运动控制盒、计算机及配套软件组成。

REFLET 测量仪结构组成如图 1 所示,其中,光学工作台主要组件有:照明模块、探测模块和可调样品支架,照明模块包括光学部件和由电机驱动的角度计,可以控制照明光束的照明光斑尺寸、亮度及入射角( $0^\circ \leq \theta_i \leq 180^\circ$ );探测模块包括探测器、由电机驱动的角度计和光学部件,可在半球空间内探测样片的散射特性( $-90^\circ \leq \theta_r \leq 90^\circ$ ,  $-90^\circ \leq \varphi_r \leq 90^\circ$ );可调样品支架可将样片水平放置。照明系统和探测系统都观察样品的同一点,这一点也是角度计的旋转中心。光源盒内有波长范围为  $400 \sim 1800 \text{ nm}$ 、功率为  $100 \text{ W}$  的卤素灯和包含 R、G、B 三种颜色滤片和两个中性滤光片的色轮,可实现对光源的调节。



图 1 REFLET 散射测量仪。(a)整体结构;(b)光学工作台及暗室

Fig. 1 REFLET goniophotometer. (a) Integral structure; (b) optical table and darkroom

实验采用 REFLET 测量仪分别测量了如图 2 所示的不同粗糙度的样片在入射相对方位角为  $0^\circ$

时的 BRDF 数据。反射数据采集过程中,每间隔  $1^\circ$  采集一次。其中,对于镜反射为主的样片,测量入射

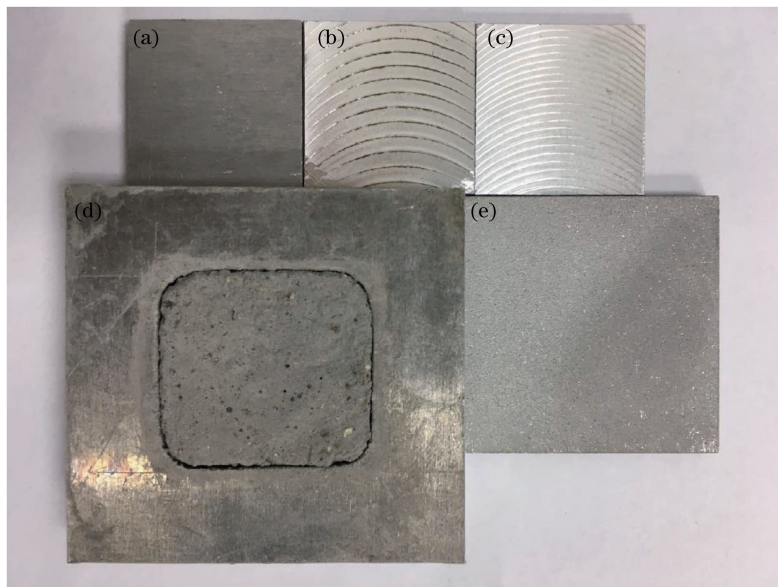


图 2 实验样片。(a) 2024 铝合金,  $R=0.8 \mu\text{m}$ ; (b) 2024 铝合金,  $R=6.3 \mu\text{m}$ ;

(c) 2024 铝合金,  $R=50 \mu\text{m}$ ; (d) 水泥板; (e) 棕刚玉喷砂铝板

Fig. 2 Test samples. (a) 2024 aluminum alloy,  $R=0.8 \mu\text{m}$ ; (b) 2024 aluminum alloy,  $R=6.3 \mu\text{m}$ ; (c) 2024 aluminum alloy,  $R=50 \mu\text{m}$ ; (d) cement plate; (e) aluminum plate blasted with brown corundum

角为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ , 对于漫反射为主的材料, 测量入射角为  $0^\circ, 45^\circ$ 。由于受 REFLECT 测量仪自身机械结构的限制, 当探测器对光源产生遮挡时, 将会对相应探测角度上的数据造成损失。实验测量的不同粗

糙度样片 BRDF 处理结果如图 3 所示, 其中 PTFE 表示聚四氟乙烯参考白板, CEMENT 表示水泥板, BROWN 表示棕刚玉喷砂铝板。

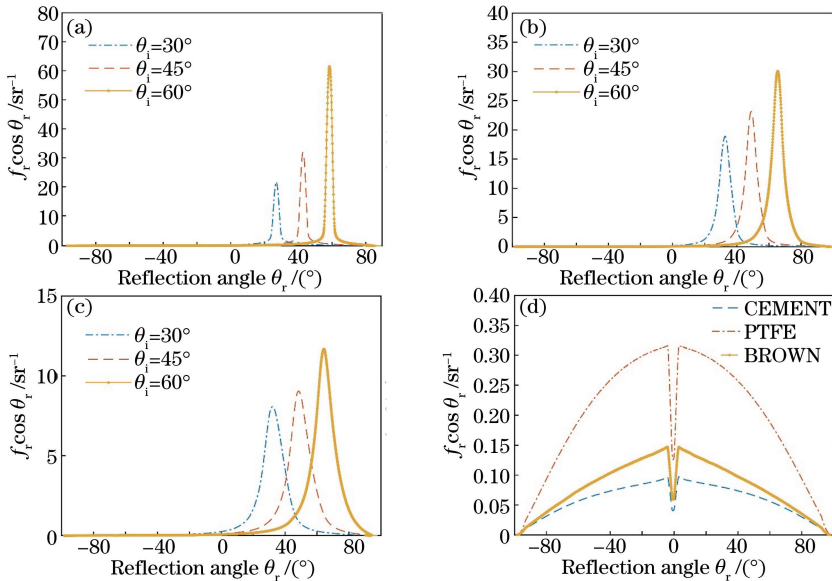


图 3 样片 BRDF 测量结果。(a) 2024 铝合金,  $R = 0.8 \mu\text{m}$ ; (b) 2024 铝合金,  $R = 6.3 \mu\text{m}$ ; (c) 2024 铝合金,  $R = 50 \mu\text{m}$ ; (d) 水泥板、PTFE、棕刚玉喷砂铝板 ( $\theta_i = 0^\circ$ )

Fig. 3 Measurement results of the BRDF of samples. (a) 2024 aluminum alloy,  $R = 0.8 \mu\text{m}$ ;

(b) 2024 aluminum alloy,  $R = 6.3 \mu\text{m}$ ; (c) 2024 aluminum alloy,  $R = 50 \mu\text{m}$ ; (d) cement plate, PTFE, aluminum plate blasted with brown corundum ( $\theta_i = 0^\circ$ )

由图 3 的实验结果可以看出, 对于 2024 铝合金样片, 曲线极值均在镜反射方向附近, 其散射主要由镜反射分量构成, 离开镜反射方向后, BRDF 值迅速衰减到 0 附近。铝合金样片表面粗糙度越小, 散射的镜向极值现象越明显, 离开镜反射方向后 BRDF 值衰减得越快。对于 PTFE、水泥板、棕刚玉喷砂铝板样片, 其散射主要由漫反射分量构成, 曲线没有明显的镜向反射峰, 其散射特征近似于朗伯体。

### 3.2 模型参量优化拟合

选用入射角为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  时的实验数据, 利用模拟退火粒子群算法对不同粗糙度的 2024 铝合金样片数据进行处理, 得到结果如表 1 所示。半光面材料 BRDF 模型在处理散射特性以镜反射为主的较光滑材料(如半光面铝合金样片)时, 具有较高的拟合精度, 能够简便准确地反映半光面材料的 BRDF 特性。但在处理光滑材料时, 随着表面粗糙度的降低, 材料反射镜向峰值现象增强, 拟合误差有所增大。

表 1 不同粗糙度 2024 铝合金样片建模结果

Table 1 Modeling results of 2024 aluminum alloy sample with different roughnesses

2024 aluminum alloys ample	$k_b$	$k_d$	$k_r$	$a$	$b$	$E(x) / \%$
$R = 0.8 \mu\text{m}$	20.066	0.075	1.376	0.479	-64.439	6.08
$R = 6.3 \mu\text{m}$	17.695	0.003	2.704	0.537	-46.122	2.38
$R = 50 \mu\text{m}$	7.526	0.155	1.229	0.689	-58.648	3.19

为检验模型参量拟合结果能否正确反映样片表面 BRDF, 利用  $R = 6.3 \mu\text{m}$  的 2024 铝合金样片在三个入射角下的实验数据 (MEA) 与模型计算结果 (MOD) 进行比较, 如图 4 所示, 其中  $45^\circ$  入射角数据留做模型检验用, 未参与优化拟合。由比较结果可以看出, BRDF 模型拟合结果与实验测量数据符合

良好。

利用毛面材料 BRDF 模型, 对 PTFE、水泥板、棕刚玉喷砂铝板实验数据进行处理, 得到的参量拟合结果如表 2 所示, 其中  $a, b$  为模型待定参量, 误差  $E(x)$  在  $1.16\% \sim 1.43\%$  之间, 拟合精度高。未参与参量拟合的  $0^\circ$  入射角数据模型计算结果与测量

结果如图 5 所示,可以看出毛面材料 BRDF 模型在处理水泥板等反射特性近似朗伯体的大粗糙度毛面材料时,具有较高的拟合精度,能够简便准确地反映大粗糙度毛面材料的 BRDF 特性。

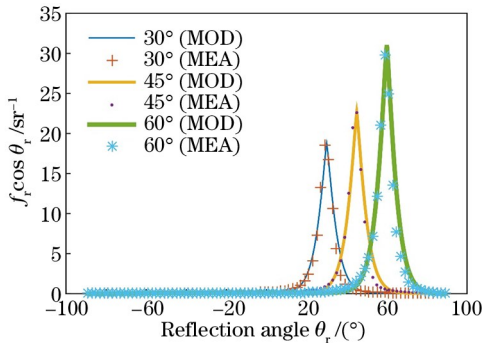


图 4  $R=6.3 \mu\text{m}$  的 2024 铝合金样片的 BRDF 模型拟合结果与实验测量结果

Fig. 4 BRDF model fitting results and experimental measurement results of 2024 aluminum alloy sample with  $R=6.3 \mu\text{m}$

表 2 毛面材料样片建模结果

Table 2 Modeling results of material samples with rough surface

Sample	$a$	$b$	$E(\mathbf{x}) / \%$
PTFE	0.982	1.004	1.43
CEMENT	0.282	0.985	1.16
BROWN	0.419	1.190	1.30

为检验优化算法改进效果,基于两类简化模型,分别利用遗传算法、粒子群算法、模拟退火粒子群算法对  $R=6.3 \mu\text{m}$  的 2024 铝合金和棕刚玉喷砂铝板实验数据进行模型参量拟合,在迭代运算次数均为

表 3 不同优化算法建模结果

Table 3 Modeling results of different optimization algorithms

Sample	Algorithm	$k_b$	$k_d$	$k_r$	$a$	$b$	$E(\mathbf{x}) / \%$	Time / s
2024 aluminum alloy ( $R=6.3 \mu\text{m}$ )	GA	18.951	0.143	1.532	0.630	-63.265	4.52	933
	PSO	15.958	0.611	5.894	0.557	-50.354	4.61	679
	SAPSO	17.695	0.003	2.704	0.537	-46.122	2.38	696
BROWN	GA	—	—	—	0.428	1.103	1.45	598
	PSO	—	—	—	0.435	1.211	1.51	404
	SAPSO	—	—	—	0.419	1.190	1.30	427

## 4 结 论

测量了不同粗糙度 2024 铝合金样片和三类大粗糙度毛面材料样片的 BRDF,分析了目标样片 BRDF 随散射角的变化趋势与其表面粗糙度的关系。利用简化的五参量模型进行建模分析,取得了良好的建模效果。通过在粒子群算法中引入模拟退火,提高了模

型参量优化效率,与遗传算法、粒子群算法两类单一算法相比,具有更小的优化建模误差。利用目标样片 BRDF 模型,将未参与建模的实验数据与模型计算结果比较,二者吻合良好,验证了模型的可靠性和可行性。随着对粗糙目标 BRDF 测量与建模研究的深入, BRDF 测试系统将在目标探测与识别、材料工艺、计算机真实感渲染等领域获得更广泛的应用。

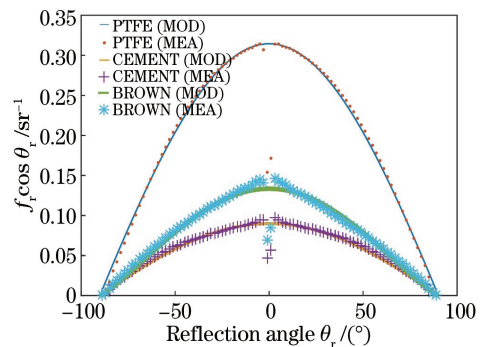


图 5 毛面材料样片 BRDF 模型拟合结果与实验测量结果

Fig. 5 BRDF model fitting results and experimental measurement results of material samples with rough surface

型参量优化效率,与遗传算法、粒子群算法两类单一算法相比,具有更小的优化建模误差。利用目标样片 BRDF 模型,将未参与建模的实验数据与模型计算结果比较,二者吻合良好,验证了模型的可靠性和可行性。随着对粗糙目标 BRDF 测量与建模研究的深入, BRDF 测试系统将在目标探测与识别、材料工艺、计算机真实感渲染等领域获得更广泛的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Liu C H, Li Z, Xu C, *et al.* BRDF model for commonly used materials of space targets based on deep neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1129001.  
刘程浩, 李智, 徐灿, 等. 基于深度神经网络的空间目标常用材质 BRDF 模型[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1129001.
- [2] Huang W X, Zhang L M, Si X L, *et al.* Theory and precision maintenance method of on-orbit reflectance calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0623001.  
黄文薪, 张黎明, 司孝龙, 等. 星上反射率定标原理及其精度保持方法研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0623001.
- [3] Huang X, Bai L, Wu Z S. BRDF model of bare surface over rugged terrain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0129001.  
黄珣, 白璐, 吴振森. 裸露起伏地表的 BRDF 模型[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0129001.
- [4] Liu H, Zhu J P, Wang K, *et al.* Three-component model for bidirectional reflection distribution function of thermal coating surfaces [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(6): 33-36.
- [5] Xu C, Zhang Y S, Li P, *et al.* Calculation of optical cross section areas of spatial objects based on OpenGL picking technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0720001.  
徐灿, 张雅声, 李鹏, 等. 基于 OpenGL 拾取技术的空间目标光学横截面积计算[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0720001.
- [6] Raymond B, Guennebaud G, Barla P. Multi-scale rendering of scratched materials using a structured SV-BRDF model [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(4): 57.
- [7] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1105-1114.
- [8] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1982, 1(1): 7-24.
- [9] Wu Z S, Xie D H, Xie P H, *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.
- [10] Yuan Y, Sun C M, Zhang X B. Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 2097-2103.  
袁艳, 孙成明, 张修宝. 空间目标表面材料光谱双向反射分布函数测量与建模[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 2097-2103.
- [11] Yang Y F, Wu Z S, Cao Y H. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0229001.  
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0229001.
- [12] Chen M, Zhang Q H, Zhou Y Y. Parameter extraction of physical BRDF model using particle swarm optimization algorithm [C]. *IEEE International Congress on Image and Signal Processing*, 2013: 1902-1905.
- [13] Xu R, Zhao F, Li H F, *et al.* Parallel measurement of spectral bidirectional reflectance distribution function of non-resolved space objects in laboratory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(2): 7-12.  
徐融, 赵飞, 李怀峰, 等. 非分辨空间目标光谱双向反射分布函数的实验室平行测量[J]. *光子学报*, 2016, 45(2): 7-12.
- [14] Qi C, Yang M H, Sun X G, *et al.* Analysis and experimental study of BRDF measuring[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(s1): 146-148.  
齐超, 杨茂华, 孙晓刚, 等. 双向反射分布函数的测试方法分析和实验研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(s1): 146-148.
- [15] Liu C H, Li Z, Xu C. A modified Phong model for Fresnel reflection phenomenon of commonly used materials for space targets [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 102901.  
刘程浩, 李智, 徐灿. 针对空间目标常用材质菲涅耳反射现象的改进 Phong 模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 102901.
- [16] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]. *IEEE International Conference on Neural Networks*, 2002, 4: 1942-1948.
- [17] Zhang H L, Wu Z S, Zhang C M, *et al.* Modeling and comparison of BRDF with GA and GSAA [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(7): 1529-1531.  
张涵璐, 吴振森, 张昌民, 等. BRDF 的遗传算法和遗传模拟退火算法建模及比较[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(7): 1529-1531.