

激光与光电子学进展

涂漆金属 1550 nm 波长双向反射分布函数优化建模

王萌, 严伟, 李振华*, 来建成**, 王春勇***, 纪运景

南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

摘要 利用双向反射分布函数描述目标表面的散射特性是最成熟和常用的方法,其关键在于如何快速准确地获取双向反射分布函数中的各特征参量。基于 Cook-Torrance 模型对目标表面散射进行建模,使用 1550 nm 激光对黑漆涂层金属进行探测,将测量数据用遗传-禁忌搜索混合算法进行反演,来获得模型中的未知参量。对比遗传算法和遗传-模拟退火混合算法可知,该算法优化了迭代次数,减小了计算误差,得到与实验值吻合的理论计算值。该研究提供了一种快速准确得到双向反射分布函数中未知参量的计算方法。

关键词 散射; 双向反射分布函数; 遗传算法; 禁忌搜索算法; 涂漆金属

中图分类号 O432.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2129001

An Optimal Modeling of Bidirectional Reflectance Distribution Function for Coating Metals in 1550 nm

Wang Meng, Yan Wei, Li Zhenhua*, Lai Jiancheng**, Wang Chunyong***, Ji Yunjing

School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China

Abstract The most mature and widely used method for describing the scattering characteristics of a target surface is to use the bidirectional reflection distribution function (BRDF). However, the key is how to quickly and accurately obtain BRDF characteristic parameters. In this study, the Cook-Torrance model is employed to model the scattering from a target surface, the black coating metal is detected using a 1550 nm laser, and the measured data are inverted using a genetic tabu search algorithm to obtain the unknown parameters in the model. Compared with the genetic algorithm and genetic simulated annealing algorithm, the algorithm optimizes the number of iterations, reduces the computation error, and obtains a theoretical value that matches the experimental value. This study offers a quick and accurate approach to calculating the unknown parameters in BRDF.

Key words scattering; bidirectional reflectance distribution function; genetic algorithm; tabu search algorithm; coated metals

1 引言

早在 20 世纪 60 年代,科学家就对各类人造和自然目标的散射特性展开了研究,飞机、汽车等涂漆金属表面作为典型的人造目标,其散射特性一直是人们非常关注的研究对象,对识别背景环境中的人造目标具有重要意义。1550 nm 波长激光处于人眼安全波段,可以进行高功率探测,近年来随着该波段激光器件性能的迅速提升,其已逐渐成为激光测距、指示、成像等应用中的主流发展方向。本文采用在遥感观测地面植被^[1]、三维测量加工零件^[2]、军事目标探测^[3]、医学研

究^[4]等领域已得到广泛应用的双向反射分布函数 (BRDF),针对涂漆金属在 1550 nm 波段的激光散射特性开展研究。

BRDF 可以通过实验和理论建模来得到。通过实验测量直接获取 BRDF,测量点数量庞大,操作复杂且耗时,研究人员主要采用单次测量获得多个角度散射的实验方法来增大测量速度^[5]。另外,建立 BRDF 模型来减少实验数据测量也是一种有效方法,基于微面元理论^[6],Cook-Torrance 模型^[7]考虑了目标表面的形态分布,并且兼顾目标的镜面反射和漫反射,是如今广泛使用的一种 BRDF 模型。国内学者吴振森等^[8]提出

收稿日期: 2021-10-05; 修回日期: 2021-11-09; 录用日期: 2021-11-11

基金项目: 科工局项目 (JCKY2016606B001)

通信作者: *lizhenhua@njjust.edu.cn; **laijiancheng@mail.njust.edu.cn; ***wangcyong@mail.njust.edu.cn

五参量半经验 BRDF 模型,使模型中的一些参数可以通过遗传算法(GA)反演得到,简化了测量模型参数的步骤。Chen 等^[9]通过粒子群算法反演得到 BRDF 未知参数。但是,遗传算法和粒子群算法都容易陷入局部最优值。张涵璐等^[10]采用遗传-模拟退火混合算法(GSAA),帮助遗传算法尽快跳出局部最优值,以此在同一迭代次数内得到全局最小值,提高遗传算法的反演精度。袁艳等^[11]采用模拟退火粒子群优化算法来提升粒子群算法的局部搜索能力。通过混合算法,提高了单一算法的反演精度,但是迭代次数并没有显著减小。本文采用遗传-禁忌搜索算法,弥补了遗传算法过早收敛的缺点,对比遗传-模拟退火混合算法,优化了算法的精度和迭代次数,并且对比实验数据验证了该算法的可靠性。

2 理论基础

2.1 BRDF 定义

Nicodemus^[12]在 1970 年提出双向反射分布函数,它能描述物体表面被照射后的散射分布特性。其函数形式为

$$f(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{dL(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{dE(\theta_i, \varphi_i; \lambda)}, \quad (1)$$

式中: $dL(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$ 是反射的辐射亮度; $dE(\theta_i, \varphi_i; \lambda)$ 是入射的辐照度; θ_i 和 θ_r 为入射天顶角和反射天顶角; φ_i 和 φ_r 为入射方位角和反射方位角; λ 为波长。

图 1 为 BRDF 的几何关系示意图, z 为宏观表面法线, s 为微面元法线, α 是微面元法线与目标表面法线的夹角, β 是微面元法线与入射光、反射光之间的夹角。入射方位角和反射方位角的差值为 $\Delta\varphi$ 。

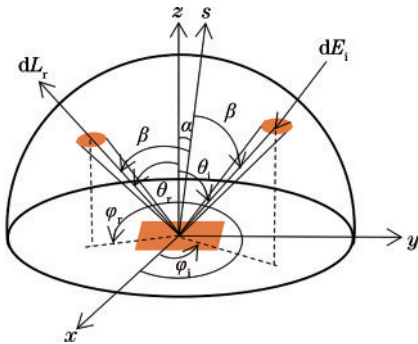


图 1 BRDF 的几何关系

Fig. 1 Geometric relation of BRDF

α 角、 β 角与其他各角度之间的关系^[13]表示为

$$\begin{cases} \alpha = \arccos\left(\frac{\cos\theta_i + \cos\theta_r}{2\cos\beta}\right) \\ \beta = \frac{\arccos(\cos\theta_i \cos\theta_r + \sin\theta_i \sin\theta_r \cos\Delta\varphi)}{2} \end{cases}. \quad (2)$$

2.2 Cook-Torrance 模型

Cook-Torrance 模型是基于微面元的 BRDF 模型,分为镜面反射部分和漫反射部分,表示为

$$f_{c-t} = k_s \frac{D \cdot G \cdot F}{4 \cos\theta_i \cos\theta_r} + \frac{k_d}{\pi}, \quad (3)$$

式中: k_s 和 k_d 分别表示镜面反射系数和漫反射系数; D 、 G 、 F 代表 3 个函数, D 为法线分布函数^[14], G 为遮蔽函数^[15], F 为非涅耳反射比。漫反射部分可视为理想的朗伯漫反射。

D 和 G 的函数形式分别表示为

$$D(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi, \sigma) = \frac{\exp\left(-\frac{\tan^2\alpha}{\sigma^2}\right)}{\pi\sigma^2 \cos^4\alpha}, \quad (4)$$

$$G(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi, \sigma) = \min\left(1, \frac{2\cos\alpha \cos\theta_r}{\cos\beta}, \frac{2\cos\alpha \cos\theta_i}{\cos\beta}\right), \quad (5)$$

式中: σ 表示目标表面的均方根高度,即粗糙度。

s 偏振光和 p 偏振光入射下的非涅耳反射比表示为

$$\begin{cases} r_p = \frac{\epsilon^2 \cos\theta_i - \sqrt{\epsilon^2 - \sin^2\theta_i}}{\epsilon^2 \cos\theta_i + \sqrt{\epsilon^2 - \sin^2\theta_i}} \\ r_s = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\epsilon^2 - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\epsilon^2 - \sin^2\theta_i}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\epsilon = n + ik$ 表示样品的复折射率。当入射光为自然光时,非涅耳反射比为

$$F(\epsilon, \theta_i) = \frac{r_s^2 + r_p^2}{2}. \quad (7)$$

结合(3)、(4)、(5)和(7)式可得,未知参数为物体表面粗糙度 σ 、复折射率实部 n 、复折射率虚部 k 、镜面反射系数 k_s 以及漫反射系数 k_d 。这些未知参数可以通过实验数据进行算法反演得到,并采用如下函数^[8]来评价理论值与实验值之间的误差。

$\Delta_{\min}(\sigma, n, k, k_s, k_d) =$

$$\frac{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} g(\theta_r) [f_c(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi) - f_r(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)]^2}{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} g(\theta_r) [f_c(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)]^2}, \quad (8)$$

式中: $g(\theta_r)$ 表示由于不等间隔测量设置的加权系数,本实验采用等间隔测量, $g(\theta_r)$ 取 1; $f_c(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)$ 为理论计算值; $f_r(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)$ 为实验测量值。

3 遗传-禁忌搜索混合算法

遗传算法适合用来反演 BRDF 模型中的未知参数,但是这种全局搜索算法容易陷入局部最优解。禁忌搜索算法^[16]的原理是对人类智力过程的一种模拟,通过设立禁忌表,搜索过的局部最优值将被禁止进入下一代种群,避免重复搜索。本文采用遗传-禁忌搜索混合算法(GTSA),使算法在全局搜索时不会过早收敛。

混合算法将禁忌搜索算法作为遗传算法的变异算

子 TSM (Tabu Search Mutation) 嵌入遗传算法中^[17], 大致流程如图 2 所示, 具体运算步骤如下:

- 1) 设置种群大小为 200, 迭代次数为 50, 并设置 σ, n, k, k_s, k_d 这 5 个参数的取值范围。对参数进行二进制编码形成染色体, 一条染色体代表 BRDF 模型的一个可行解;
- 2) 使用式 (8) 的评价函数来计算适应度值, 记录适应度最优值;
- 3) 选择适应度值较优个体形成父代种群, 即可行解集;
- 4) 对父代种群进行单点交叉运算, 交叉概率为 0.5;
- 5) 设定变异概率为 0.05。对每个染色体, 产生一

个 $[0, 1]$ 区间内的随机数 r , 如果 r 小于设定的变异概率, 则该染色体进入 TSM 流程, 否则, 直接进入子代种群;

6) 嵌入的 TSM 流程如图 2 所示, 对染色体逐条进行改善, 每个个体通过随机变异产生 10 个邻域候选解集, 设置内循环代数为 10, 禁忌表长度为 5, 当禁忌表中的染色体任期大于 5 时解禁, 通过适应度值选出全局最优解 x_{best} 、当前最优解 x_{now} 和最优候选解 x_c ;

7) 将 TSM 优化后的子代种群转到步骤 2 进行下一次迭代, 当算法达到全局最大迭代次数时停止, 解码染色体, 输出最优解。

将输出的 5 个参数值代入 Cook-Torrance 模型即可得到 BRDF 的计算值和误差最小值 Δ_{min} 。

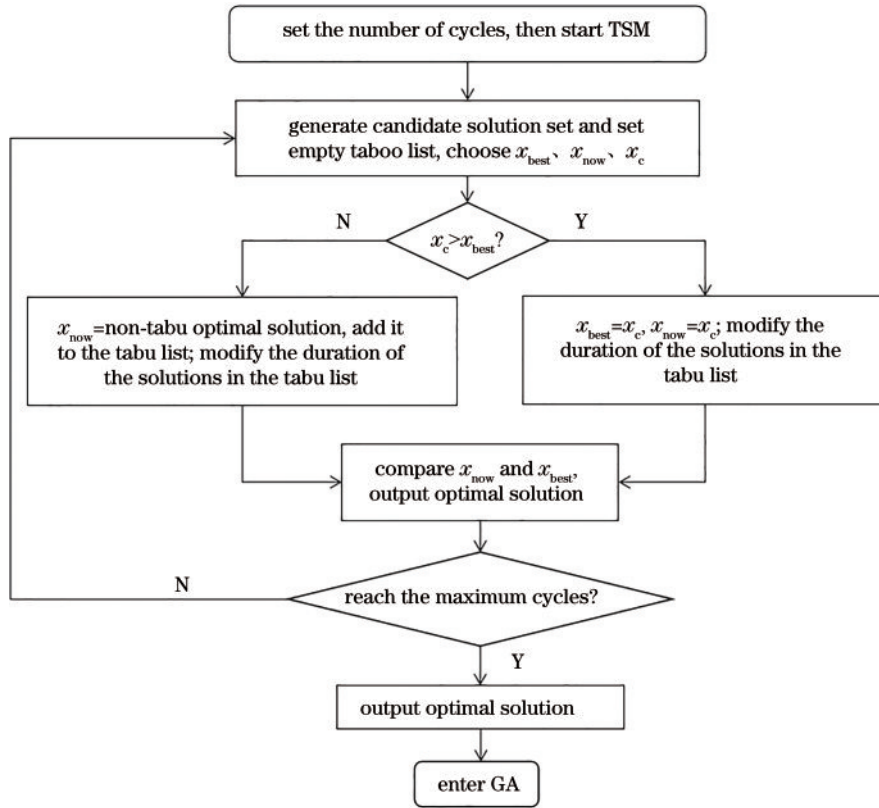


图 2 TSM 计算流程图

Fig. 2 TSM calculation flow chart

4 实验测量

本实验采用绝对测量来获得 BRDF 的实测数据。根据 BRDF 的定义, 其值为微分量的比值, 因此测量时入射光源和探测器的立体角应尽量小, 以使入射面积和探测面积尽可能小^[18]。这时可以将入射的辐照度和反射的辐亮度看作常量, 根据辐照度与辐亮度的关系, 可以推得,

$$f_r = \frac{dL_r}{dE_i} \approx \frac{L_r}{E_i} = \frac{L_r}{L_i \cdot \Omega_i} = \frac{R^2}{S \cos \theta_i} \cdot \frac{D_{DNr}}{D_{DNI}}, \quad (9)$$

式中: f_r 为 BRDF 值; R 表示入射光源到样品的直线距

离; S 为光源出射到目标表面的光斑大小; D_{DNr} 为探测器对反射辐亮度的响应值; D_{DNI} 为探测器对入射辐亮度的响应值。

实验使用辐射中心波长为 1550 nm 的钕玻璃激光器, 峰值功率可达 20 kW, 脉冲宽度为 5 ns, 发散角小于 10 mrad, 经过准直后入射在目标表面, 光斑大小约为 1 mm²。探测器使用北京敏光科技有限公司的 PIN 光电二极管, 响应范围为 800~1700 nm, 型号为 LSIPD-L3。在 1060 铝板上分别喷涂黑色、绿色、黄色的喷漆作为实验样品 (图 3), 使用堀扬精密量仪有限公司生产的表面粗糙度测量仪 TR100, 测得黑色、绿色、黄色铝

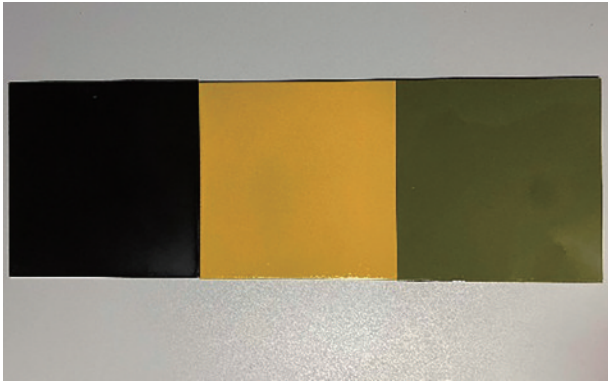


图 3 实验样品

Fig. 3 Experimental sample

板粗糙度分别为 $0.12 \mu\text{m}$ 、 $0.13 \mu\text{m}$ 、 $0.12 \mu\text{m}$ 。

对样品进行反射角为 $0^\circ \sim 70^\circ$ 的探测, 间隔为 5° , 入

射角为 30° , 相对方位角为 180° , 激光器距样品 10 cm , 探测器距样品 1 m 。测量装置参照参考文献 [19] 设计, 如图 4 和图 5(a)、(b) 所示, 令转台带动转臂, 使得探测器和激光器沿同一球心旋转。

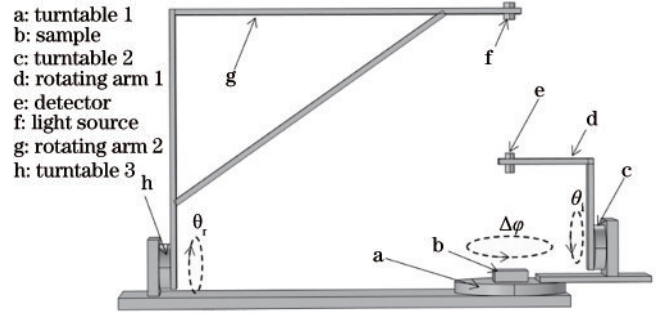


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of experimental device

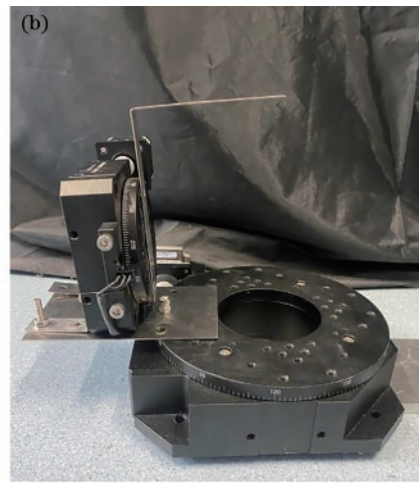
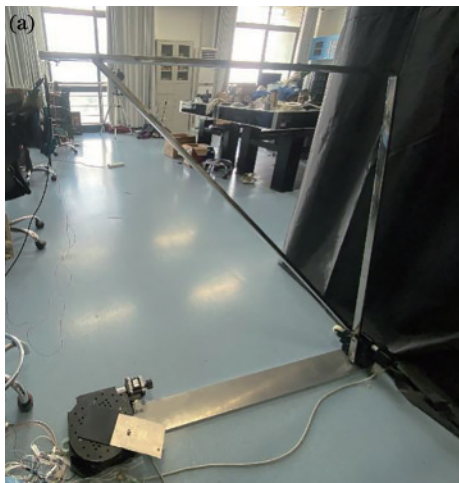


图 5 实验装置。(a) 探测器部分; (b) 光源部分

Fig. 5 Experimental device. (a) Detector part; (b) light source part

5 参数反演结果与分析

以黑漆涂层入射角 30° 为例, 选择探测角为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° , 采用绝对测量测得的入射和反射响应值代入式 (9), 计算得到 BRDF 值作为反演的实验数据, 设置迭代次数为 50。表 1 为 6 次测量取平均的实验值及方差。表 2 为 3 种算法的计算结果。

从表 2 与图 6 中 GA、GSAA 与 GTSA 的计算结果可以看出, GTSA 算法能更快跳出局部最小值, 且在迭代次数相同的情况下, GTSA 能得出误差更小的计算值。经过多次计算验证 GTSA 都在 30 次迭代内收敛

表 1 黑漆涂层 30° 入射角实验值

Table 1 Experimental value of 30° incident angle of black coating

Detection angle / ($^\circ$)	f_r / sr^{-1}	Variance
0	0.08	2.8×10^{-4}
15	1.20	9.9×10^{-4}
30	4.04	5.3×10^{-4}
45	1.56	7.7×10^{-4}
60	0.14	4.5×10^{-4}

到最小值, 因此可以设置 GTSA 的迭代次数为 30, 以

表 2 GA、GSAA 和 GTSA 的计算结果

Table 2 Calculation results of GA, GSAA, and GTSA

Arithmetic	σ	n	k	k_s	k_d	$\Delta_{\min} / \%$	Calculation time in 50 iterations / s	Number of iterations that converge to the minimum
GA	0.1197	1.5437	3.0274	0.6643	0.2061	0.25	0.2907	38
GSAA	0.1164	1.6937	3.8844	0.6108	0.2096	0.17	1.8850	23
GTSA	0.1195	1.6600	3.6509	0.6542	0.1850	0.10	2.6876	15

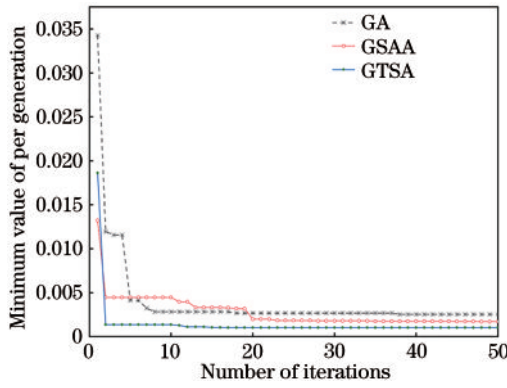


图 6 GA、GSAA 与 GTSA 每代最小值
Fig. 6 GA, GSAA, and GTSA minimum value of per generation

此减少计算时间,此时计算时间为 1.8108 s,计算结果 $\Delta_{\min}=0.10\%$ 。

通过迭代 30 次的遗传-禁忌搜索混合算法反演可得各未知参数的值为 $\sigma=0.1198$, $n=1.5855$, $k=3.6933$, $k_s=0.6183$, $k_d=0.1852$ 。将反演得到的值代入 Cook-Torrance 模型中,得到理论值曲线如图 7 所示,计算值和实验值吻合较好。

将入射角为 30° 时反演得出的参数代入模型,计算入射角为 45° 和 60° 时的 BRDF 值,并与同一黑漆涂层实验值进行对比,如图 8(a)、(b) 所示,通过式 (8) 可得

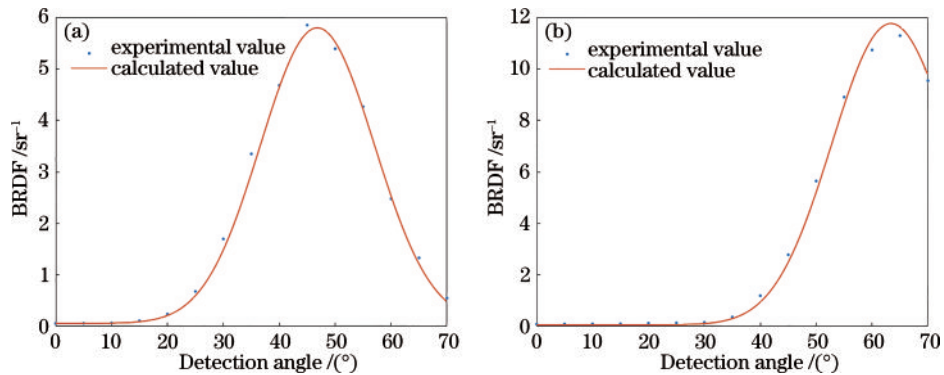


图 8 黑漆涂层实验与计算值比较。(a) 入射为 45° ; (b) 入射为 60°
Fig. 8 Comparison between experimental and calculated values of black coated. (a) Incidence is 45° ; (b) incidence is 60°

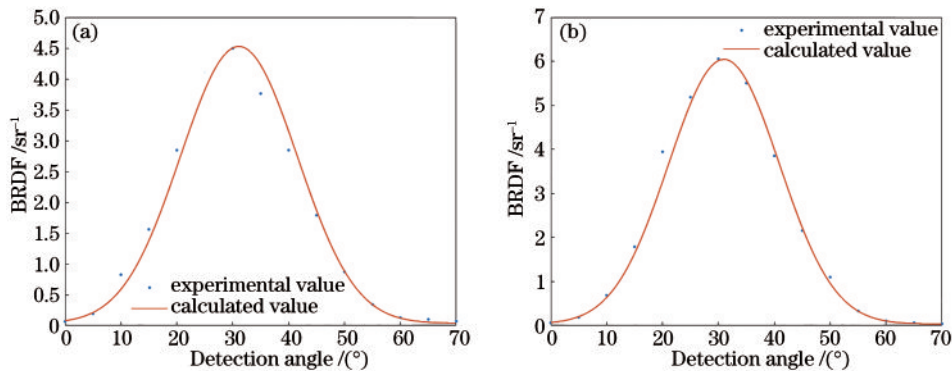


图 9 两个样品的计算值与实验值。(a) 绿漆涂层; (b) 黄漆涂层
Fig. 9 Calculated and experimental values of the two samples. (a) Green coated; (b) yellow coated

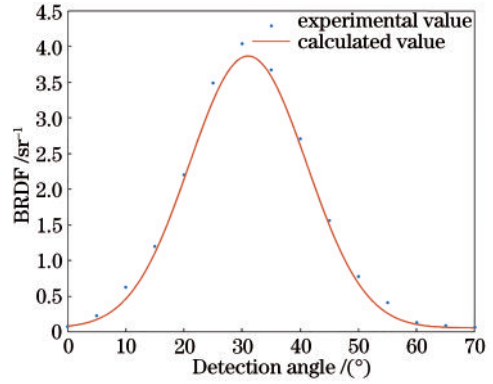


图 7 30° 入射黑漆涂层铝板实验与计算值比较
Fig. 7 Comparison of experimental and calculated values of black coated aluminum plate at 30° incidence

误差分别为 $\Delta_{\min 45^\circ}=0.17\%$, $\Delta_{\min 60^\circ}=0.22\%$ 。

同理,我们可以得到绿漆涂层和黄漆涂层使用 GTSA 优化的参数值和误差 Δ_{\min} 如表 3 所示,两个样品在 30° 入射角的 BRDF 理论计算值与实验值对比如图 9(a)、(b) 所示。

由上述结果可知, BRDF 的理论计算值与实验值拟合度高, Cook-Torrance 模型可以作为研究涂漆金属散射特性的参考。基于遗传-禁忌搜索混合算法, 我们可以通过测得少量实验数据得到 $0^\circ \sim 70^\circ$ 内所有角度的理论值, 大大简化了实验测量的工作。

表 3 绿漆涂层和黄漆涂层的计算结果

Table 3 Calculation results of green coated and yellow coated

Sample	σ	n	k	k_s	k_d	$\Delta_{\min}/\%$
Green coated	0.1239	1.6637	3.4927	0.7991	0.1202	0.28
Yellow coated	0.1181	1.7317	4.8388	0.8934	0.1116	0.19

6 结 论

本文采用 Cook-Torrance 模型对涂漆金属目标散射进行建模,使用遗传-禁忌搜索混合算法反演未知参数,将理论计算值与实验值进行对比,结果表明,理论计算值与实验值相匹配,因此该理论模型能作为一定参考,减少实验数据采集。通过对比遗传算法、遗传-模拟退火算法、遗传禁忌搜索混合算法的计算结果,验证了遗传-禁忌搜索算法收敛快、计算精度高的优点,为涂漆金属目标散射的理论计算提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 邱凤, 霍婧雯, 张乾, 等. 针叶林冠层热点及多角度无人机遥感观测及特征分析[J]. 遥感学报, 2021, 25(4): 1013-1024.
Qiu F, Huo J W, Zhang Q, et al. Observation and analysis of bidirectional and hotspot reflectance of conifer forest canopies with a multiangle hyperspectral UAV imaging platform[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(4): 1013-1024.
- [2] 张景瑜, 任杰骥, 李霁, 等. 基于双向反射分布函数模型的结构光投影自适应调制方法[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0912001.
Zhang J Y, Ren J J, Li F, et al. Adaptive structured light projection modulation method based on BRDF model[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0912001.
- [3] 李伟, 田博, 崔冬, 等. 装甲隐身涂层 940 nm 双向反射分布函数[J]. 探测与控制学报, 2011, 33(2): 9-14.
Li W, Tian B, Cui D, et al. BRDF of infrared camouflage armor coating on 940 nm band[J]. Journal of Detection & Control, 2011, 33(2): 9-14.
- [4] Blodgett D W, Webb S C. Optical BRDF and BSDF measurements of human incisors from visible to mid-infrared wavelengths[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4257: 448-454.
- [5] 陆敏, 王治乐, 高萍萍, 等. 用于快速 BRDF 测量的子孔径扫描傅里叶变换系统[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1329001.
Lu M, Wang Z L, Gao P P, et al. A sub-aperture scanning Fourier transform system for fast BRDF measurements [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1329001.
- [6] 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.
- [7] Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1981, 15(3): 307-316.
- [8] 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.
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.
- [9] Chen M, Zhang Q H, Zhou Y Y. Parameter extraction of physical BRDF model using particle swarm optimization algorithm[C]//2012 5th International Congress on Image and Signal Processing, October 16-18, 2012, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2012: 1902-1905.
- [10] 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.
Zhang H L, Wu Z S, Zhang C M, et al. Modeling and comparison of BRDF with GA and GSAA[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(7): 1529-1531.
- [11] 袁艳, 金鼎, 苏丽娟. 粗糙表面双向反射分布函数优化建模与验证[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 052901.
Yuan Y, Jin D, Su L J. Optimization modeling and verification of bidirectional reflectance distribution function for rough surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 052901.
- [12] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. Applied Optics, 1970, 9(6): 1474-1475.
- [13] 朱达荣, 冯康康, 汪方斌, 等. 粗糙表面六参量偏振双向反射分布函数模型[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 092901.
Zhu D R, Feng K K, Wang F B, et al. Six-parameter polarized bidirectional reflectance distribution function model for rough surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 092901.
- [14] Beckmann P, Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces[M]. London: Pergamon Press, 1963.
- [15] Blinn J F. Models of light reflection for computer synthesized pictures[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1977, 11(2): 192-198.
- [16] 丁祎男, 田科丰, 王淑一. 基于遗传禁忌混合算法的敏捷卫星任务规划[J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(6): 27-32.
Ding Y N, Tian K F, Wang S Y. Mission scheduling for agile earth observation satellites based on genetic-tabu hybrid algorithm[J]. Aerospace Control and Application, 2019, 45(6): 27-32.
- [17] 陈梅, 李炳辉, 潘旺洋. 城市环卫车调度系统建模与路径规划研究[J]. 控制工程, 2019, 26(9): 1751-1755.
Chen M, Li B H, Pan W Y. Research on modeling and path planning of urban sanitary vehicle dispatching system [J]. Control Engineering of China, 2019, 26(9): 1751-1755.
- [18] 李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528002.
Li J L, Zhang L M, Chen H Y, et al. Development of BRDF absolute measuring device[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528002.
- [19] 杨博文, 马王杰慧, 刘彦磊, 等. 紫铜粗糙表面的光谱双向反射分布函数测量研究[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1385-1394.
Yang B W, Ma W J H, Liu Y L, et al. A study on the spectral BRDF measurement of red copper rough surfaces [J]. Chinese Optics, 2019, 12(6): 1385-1394.