

涂层表面激光散射特性的实验测量及优化建模

王安祥¹, 张晓军¹, 张涵璐², 冯 健³

(1. 西安工程大学理学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071; 3. 中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107)

摘 要:运用双向反射分布函数测量系统在特定激光波长下(1.06 μm)对涂层目标样片进行实验测量,根据样片的BRDF实验数据,将遗传模拟退火算法应用于目标表面BRDF统计模型的参数反演中,获取样片的BRDF模型参数,并在此基础上获得上述样片BRDF的三维分布。同时比较了模型中考虑遮蔽因素与不考虑遮蔽情况下进行参数反演所得到的均方误差,反映了遮蔽效应对涂层目标表面光散射特性的影响。

关键词:双向反射分布函数;遗传模拟退火算法;光散射;遮蔽效应;优化

中图分类号: O432.1 **文献标识码:** A

Experiment Measurements and Optimization Modeling of Scattering Characteristic of Coated Surfaces

WANG An-xiang¹, ZHANG Xiao-jun¹, ZHANG Han-lu², FENG Jian³

(1. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. School of Science, Xidian University, Xi'an 710072, China; 3. China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract: Experiments were conducted to measure sample properties of coat target at the laser wavelength(1.06 μm). By using the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) data of the samples, the parameters of BRDF model were obtained when the genetic simulated annealing algorithm was applied to retrieve the parameters of the BRDF statistic model of the object surface. As a result, the 3-D BRDF distribution of the object samples is structured, and the mean square errors of BRDF experimental data are compared with the optimization data under the conditions of shadowing effect and without shadowing effect, respectively. The results show that the mean square errors for the shadowing effect are small as compared to the latter, indicating that shadowing effect has an effect on the light scattering characteristic of the coated surfaces.

Key words: bidirectional reflectance distribution function (BRDF); genetic simulated annealing algorithm (GSAA); light scattering; shadowing effect; optimization

1 引 言

双向反射分布函数(BRDF)的定义是由 Nicodemus 于 1970 年正式提出的^[1],最早是从光辐射角度定义并得到发展。现已在国防、遥感和商业等领域得到了广泛的应用^[2-3],特别是在武器研制、目标隐身以及进行理论建模的研究中,了解目标材料和涂层的反射特性具有重要意义^[4-8]。国际上在材料的散射特性研究中普遍采用了双向反射分布函数来表

征材料表面的方向散射特性。本文通过对涂层目标样片进行双向反射分布函数的测量实验,获得涂层目标样片的 BRDF 数据,然后将遗传模拟退火算法

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 40474061)资助。

作者简介:王安祥(1974-),男,讲师,理学硕士,现主要从事目标光散射特性的研究及大学物理和大学物理实验的教学与科研工作。E-mail: waxiang0921@126.com

收稿日期:2007-12-12;修订日期:2008-04-30

应用于目标表面 BRDF 统计模型的参数反演中, 获取了不同样片的 BRDF 模型参数。这对光电武器系统的研制, 目标特性的提取、控制和识别, 目标隐身与反隐身技术的深入研究具有一定的参考价值。

2 双向反射分布函数定义

美国学者 Nicodemus 给出双向反射分布函数的定义式如下:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

式中, (θ, φ) 分别是球坐标下的天顶角和方位角; 下标 i, r 分别代表入射量和反射量; $dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为 (θ_r, φ_r) 方向上的反射亮度; $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为 (θ_i, φ_i) 方向上的入射照度, 则双向反射分布函数定义为沿 (θ_r, φ_r) 方向出射的辐射亮度 $dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 与沿 (θ_i, φ_i) 方向入射到被测表面的辐照度 $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 之比。图 1 是描述光束和目标表面关系的 BRDF 几何图。

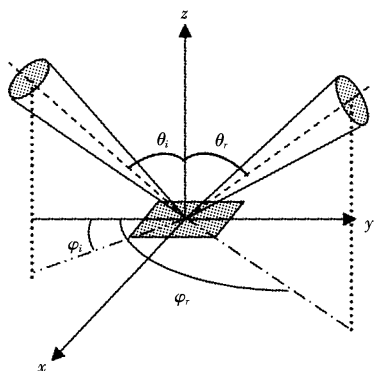


图 1 BRDF 几何示意图

Fig. 1 geometry of the bidirectional reflectance distribution function

3 实验测量

3.1 实验装置

在实验中, 本文采用中国科学院安徽光机所 BRDF 的实验测量系统, 如图 2 所示, 测量系统主要由双向反射分布函数测定仪及光电接收器及电子学部分组成。双向反射分布函数测定仪是由 A, B, C 三个电机带动样品在空间转动, 改变样品的姿态。测量时光电接收器放置在固定的平面上, 不随电机转动, 探测方向保持不变; 光源及扩束器随电机 C 转动, 光源的入射方向始终与 B 电机的轴一致, 并在水平面中旋转。通过转动三个电机改变样品法线在空间的方向, 可以达到在上半球空间变化入射和接收方向的目的。

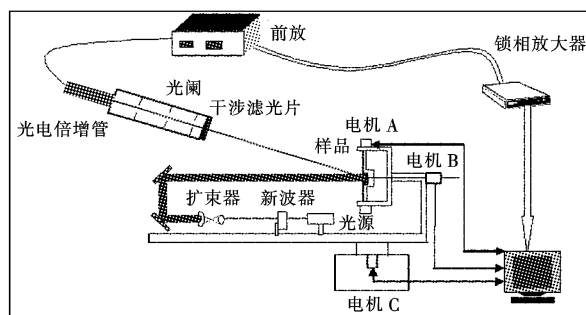


图 2 BRDF 测定装置框图

Fig. 2 block diagram of BRDF measuring system

光源采用半导体泵浦的 YAG 固体激光器 ($1.06\mu\text{m}$), 发出的激光束经斩波器 (EG&G PARC, MODEL 197) 斩波 (频率为 180Hz) 后进入扩束镜, 以孔径 $\phi 12\text{mm}$ 平行光照射至平面反射镜, 经第二块平面反射镜反射后照射至样品表面。使用凸透镜 ($\phi 100\text{mm}$, 焦距 $f = 270\text{mm}$) 接收来自样品表面的散射, 会聚后进入视场光阑, 经滤光片 (American Holographic 446.50/L, $1.06\mu\text{m}$ 干涉滤光片) 后进入光电倍增管, 光电倍增管 (R1767) 的输出信号经锁相放大器 (EG&G, LOCK-IN 5210) 放大后, 通过串口送往计算机。

3.2 测量和分析方法

BRDF 的测量可分为定义测量法、相对测量法及单一参考测量法^[9], 实验采用单一参考测量法来得到样品的双向反射分布函数, 实验选择以聚四氟乙烯粉 (F4) 压制的白板作为标准参考板, 其双向反射分布函数为 ρ/π , ρ 为标准参考板的半球反射率, 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。对 F4 标准板的测量, 其锁相放大器输出值为 $V_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 。同样对样品测量输出值为 $V_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$, 单一参考测量法只需对标准板测量一次, 实验中只测量标准板在入射角度为 30° 时的数据。下面给出 BRDF 测量的具体表达式:

$$f_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{V_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos 30^\circ}{V_b(30^\circ, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r} \frac{\rho}{\pi} \quad (2)$$

3.3 实验结果及分析

本文以金属蒙皮和涂漆钢板为例说明如下:

文献[10]中给出了目标表面 BRDF 统计模型为:

$$\frac{f_{rs}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_i} = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha}$$

$$\exp[b \cdot (1 - \cos\gamma)^a] \cdot \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos\theta_i \cos\theta_r} + \frac{k_d}{\cos\theta_i} \quad (3)$$

式中,第一项代表粗糙表面的相干镜反射分量;第二项表示漫反射分量; $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 表示遮蔽函数; k_b, k_d, k_r, a, b 为待定参数。

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,最小均方误差可按式计算^[11]:

$$\min E(x) = \frac{\sum_{\theta_i, \theta_r} g_1(\theta_i) g_2(\theta_r) [f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r - f_r^0(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r]^2}{\sum_{\theta_i, \theta_r} g_1(\theta_i) g_2(\theta_r) [f_r^0(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r]^2} \quad (4)$$

其中, x 是模型参量的列向量; f_r^0 是BRDF实验测量数据; f_r 为模型计算的BRDF数值; $g_1(\theta_i), g_2(\theta_r)$ 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。

根据金属蒙皮在入射天顶角度为 $0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$,相对方位角都是 0° 的条件下的实验数据,结合遗传模拟退火算法分别得到了优化参数后的模型,模型的各个参数和误差分别为: $k_b = 0.117, k_r = 0.321, b = -24.589, a = 0.905, k_d = 0.051, E = 2.397\%$ 。根据涂漆钢板在入射天顶角度为 $0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ$,相对方位角都是 0° 的条件下的实验数据,结合遗传模拟退火算法分别得到了优化参数后的模型,模型的各个参数和误差分别为: $k_b = 0.153, k_r = 0.456, b = -26.998, a = 0.677, k_d = 0.015, E = 2.859\%$ 。可以看到,实验数据和优化参数后模型计算值之间的均方误差较小。图3、图4分别是金属蒙皮和涂漆钢板的BRDF实验数

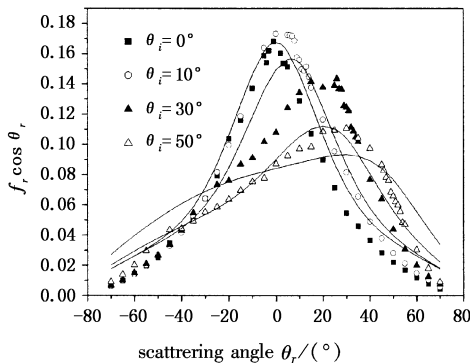


图3 金属蒙皮 BRDF 实验数据和拟合值

Fig. 3 experimental data and simulative value of the BRDF for the skin of the metal (points represent experimental datum and lines represent the fitted results)

据和拟合曲线,其中离散点表示BRDF实验测量数据,曲线则是由遗传模拟退火算法计算得到的拟合值。而且从图中可以看出,涂层目标片表面的BRDF值非常小,说明涂层目标的光散射能力非常弱,有利于其隐身。

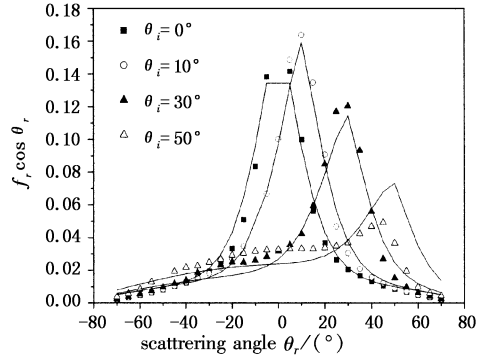


图4 涂漆钢板 BRDF 实验数据和拟合值

Fig. 4 experimental data and simulative value of BRDF for painted armor plate (points represent experimental datum and lines represent the fitted results)

依据优化出来的模型表达式,可以获得上述样片的三维BRDF分布,如图5、图6所示。

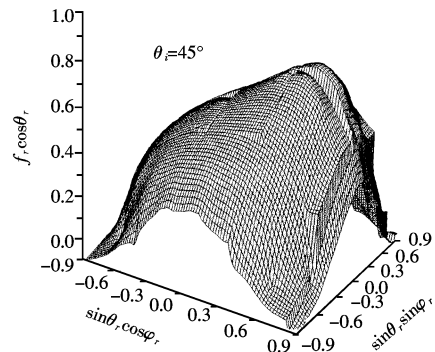


图5 金属蒙皮表面 BRDF 三维分布图

Fig. 5 three-dimension BRDF distribution of the skin of the metal

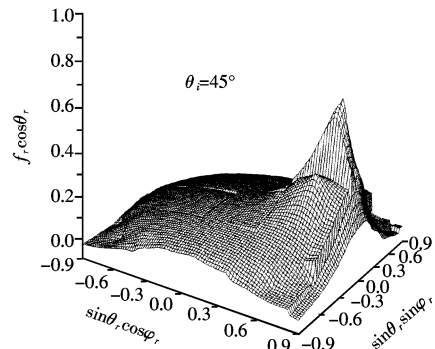


图6 涂漆钢板表面 BRDF 三维分布图

Fig. 6 three-dimension BRDF distribution of the painted armor plate

在研究随机粗糙表面时,随着粗糙度的增加,遮蔽效应就会发生,这种效应会对物体表面的散射产生影响。模型中 $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 就是考虑遮蔽和掩饰对散射带来的影响,其物理意义是观测方向上未被遮蔽和未被掩饰的面积与总面积的比值。若 BRDF 五参数半经验统计模型中不考虑遮蔽和掩饰对散射带来的影响,则遮蔽函数 $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 取为 1,简化如下:

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

根据上面简化模型,结合遗传模拟退火算法得到了金属蒙皮优化参数后的模型,模型的各个参数和误差分别为: $k_b = 0.116, k_r = 0.392, b = -11.428, a = 0.708, k_d = 0.0495, E = 2.628\%$ 。同理,结合遗传模拟退火算法得到了涂漆钢板优化参数后的模型,模型的各个参数和误差分别为: $k_b = 0.162, k_r = 0.437, b = -28.317, a = 0.675, k_d = 0.015, E = 3.23\%$ 。可以看出,模型中不考虑遮蔽和掩饰时的均方误差与考虑遮蔽和掩饰时相比要大,因此在建立 BRDF 模型时必须把遮蔽和掩饰因素考虑进去。图 7、图 8 分别是在不考虑遮蔽与掩饰情况下金属蒙皮的 BRDF 实验数据和拟合曲线。图 9、图 10 就是给出了涂漆钢板在入射角 $\theta_i = 0^\circ, 50^\circ$ 时 BRDF 实验测量值与优化值之间的差异曲线,其中 $F = |f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r - f_r^0(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos\theta_r|$ 。可以看出,在入射角为 0° 时,两种情况下的实验测量值与优化值之间的差异曲线比较接近,说明垂直入射时,几乎不存在遮蔽与掩饰;而在入射角为 50° 时,

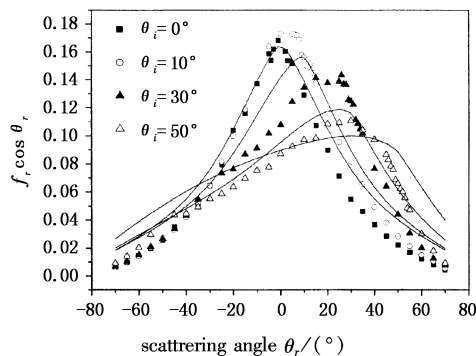


图 7 金属蒙皮 BRDF 实验数据和拟合值

Fig. 7 experimental data and simulative value of the BRDF for the skin of the metal (points represent experimental datum and lines represent the fitted results)

不考虑遮蔽与掩饰情况下实验测量值与优化值之间的差异要比考虑遮蔽和掩饰情况下要大,主要体现在大观测角情况下,说明在大入射角和大观测角时,遮蔽效应比较明显。

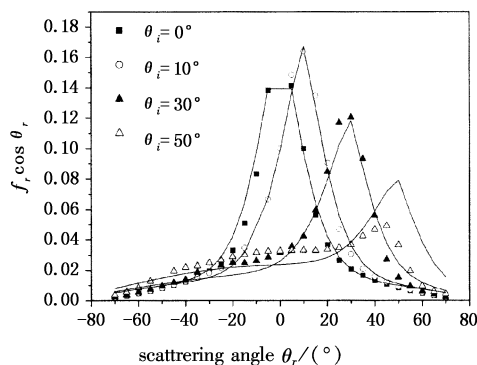


图 8 涂漆钢板 BRDF 实验数据和拟合值

Fig. 8 experimental data and simulative value of BRDF for painted armor plate (points represent experimental datum and lines represent the fitted results)

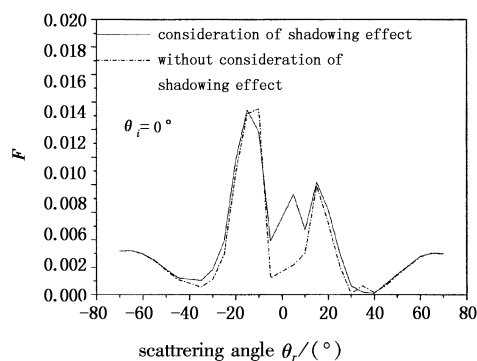


图 9 涂漆钢板的 BRDF 实验值和采用遗传模拟退火算法参数反演的优化值之间的差异曲线

Fig. 9 the difference of the painted armor plate's BRDF experimental data and fitted results using GSAA

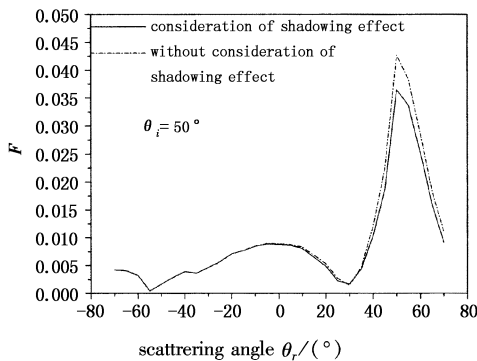


图 10 涂漆钢板的 BRDF 实验值和采用遗传模拟退火算法参数反演的优化值之间的差异曲线

Fig. 10 the difference of the painted armor plate's BRDF experimental data and fitted results using GSAA

(下转第 530 页)

度量方法可分为实物试验、全数字仿真和半实物仿真。

实物试验又可分为静态度量和动态度量。静态度量是在一个平台上对强激光武器战技指标的静态测试,动态度量试验是需要通过向强激光武器系统提供真实的威胁目标,利用真实的制导武器和光学侦察设备开展有效性监测,是一项耗资巨大的外场试验。

开展全数字仿真,是一种经济有效的方法,对系统的攻击有效性能提供快速和经济有效的评估。全数字仿真需要以大量真实的战技参数为基础,建模并通过计算机完成。

另一种度量方法是半实物仿真,采用缩比装置在内场形成一个目标靶标,生成实战模拟场景,模拟来袭目标(例如飞机、光电制导武器等),模拟背景的红外辐射特性和运动特性,模拟大气光学特性,进而评价强激光武器系统的作战效果,这是一种较好的内场试验评估方法。

4 结束语

在强激光武器的作战效果评估过程中,依据强

激光大气传输特性数据库、激光损伤阈值库、强激光损伤效果评估准则和光电制导武器光学系统参数,确定评估模式,以保证评估的置信度。

参考文献:

- [1] 杨鸿儒. 新概念高能激光武器与强激光光学计量检测技术[J]. 应用光学, 2005, 26(1): 1-6.
- [2] 杜详琬. 高能激光与应用光学的几个问题[J]. 中国工程科学, 2001, 3(2): 21-24.
- [3] 杨菁. 高功率激光装置总体设计的综合评估方法[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(5): 660-664.
- [4] 龚知本. 激光大气传输研究若干问题进展[J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 114-133.
- [5] 任国光, 等. 美国高能激光武器的发展和面临的挑战[J]. 激光技术, 2001, (5): 321-327.
- [6] 王世勇, 等. 远场光电探测系统受激光干扰与损伤效果估计[J]. 光学技术, 2002, 28(1): 28-30.
- [7] Defense Science Board Task Force. High Energy Laser Weapon Systems Applications[R]. Washington D C, June 2001: 34.
- [8] GE-26(5): 660-665.
- [9] 齐超, 李文娟, 戴景民. 红外双向反射率测量应用及研究进展[J]. 激光与红外, 2005, 35(6): 391-393.
- [10] 李铁, 阎炜, 吴振森. 双向反射分布函数模型参数的优化及计算[J]. 光学学报, 2002, 22(7): 769-773.
- [11] 张百顺, 刘文清, 魏庆农, 等. 基于双向反射分布函数实验测量的目标散射特性的分析[J]. 光学技术, 2006, 32(2): 180-182.
- [12] 阎炜, 曲秀杰, 田梦君. 涂层目标光散射特性的遗传算法[J]. 探测与控制学报, 2001, 23(3): 28-32.
- [13] 吴振森, 韩香娥, 张向东. 不同表面激光双向反射分布函数的实验测量[J]. 光学学报, 1996, 16(3): 262-268.
- [14] 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(Suppl): 146-148.
- [15] 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.
- [16] 赵忠义, 汪子君, 戴景民. 遗传算法在双向反射分布函数模型参数优化中的应用[J]. 红外技术, 2006, 28(7): 391-394.

(上接第522页)

4 结论

本文完成了运用双向反射分布函数测量系统在特定激光波长下对涂层目标样片的测量,根据测量得到的样片BRDF实验数据,将遗传模拟退火算法应用于目标表面BRDF统计模型的参数反演中,获取样片的BRDF模型参数,并在此基础上获得上述样片BRDF的三维分布。同时比较了模型中考虑遮蔽因素与不考虑遮蔽情况下进行参数反演所得到的均方误差,反映了遮蔽效应对涂层目标表面光散射特性的影响。

参考文献:

- [1] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. Appl. Opt, 1970, 9(6): 1474-1475.
- [2] Gibbs D P, Betty C L, Fung A K, et al. Automated measurement of polarized bidirectional reflectance[J]. Remote Sense Environ, 1993, 43(2): 97-114.
- [3] Tomiyasu K. Relationship between and measurement of differential scattering coefficient and bidirectional reflectance distribution function (BRDF) [J]. IEEE, 1998,