

文章编号 1004-924X(2016)11-2627-09

航天消光黑漆双向反射分布函数的测量与应用

赵 青^{1,2*}, 赵建科¹, 徐 亮¹, 刘 峰¹, 李朝辉^{1,2}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了了解经过消光黑漆(Z306)喷涂处理后航天相机遮光罩表面对杂散光的散射特性,对喷涂了 Z306 的铝板样品进行了双向反射分布函数(BRDF)测量和建模分析。通过测量获得了黑漆样片在 0.65 μm 波段的 BRDF 值。结合 Z306 黑漆测量数据的散射特征,选择了适合粗糙黑漆表面的 Microfacet-based 模型,并对模型进行了修正。使用修正的 Microfacet-based 模型对测量数据处理并建模,得到了样片整个半球空间的 BRDF 数据,弥补了测量数据量少和测量误差带来的缺陷。将黑漆的 BRDF 数据代入软件,分析并进行了光学系统杂散光测试验证。结果表明:采用修正的 Microfacet-based 模型处理黑漆的 BRDF 后,分析光学系统杂散光(点扩散函数, PST)得到的结果与实际测量的杂散光(PST)的一致性很高,实测值与分析值比值的对数精度优于 0.5。得到的结果证明了 BRDF 建模的必要性和数据处理的准确性,为光学系统的杂散光抑制提供了重要的保障。

关键词:航天相机;消光黑漆;双向反射分布函数;光学系统;杂散光;建模;误差分析

中图分类号: V447.3; V416.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162411.2627

BRDF measurement of matte coating and its application

ZHAO Qing^{1,2*}, ZHAO Jian-ke¹, XU Liang¹, LIU Feng¹, LI Zhao-hui^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaoping@opt.cn

Abstract: To explore the scattering characteristics of the stray light on hood surface of a camera, the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) of the matte coating (Z306) on a aluminium plate specimen was measured and modeled to suppress the stray light. The BRDF value of the specimen coated with matte coating Z306 at 0.65 μm was obtained. On the basis of the scattering characteristics of the specimen coated with matte coating Z306, the microfacet-based model suitable for roughness matte coating was selected and corrected. The corrected microfacet-based model was used to model and process the measurement data and to obtain the BRDF data of the specimen in the whole hemisphere space to make up the defects of the less data and measurement errors. The BRDF data of the matte coating was induced to the software to analyze the stray light of an optical system and to compare the performance with the results of the stray light measurement. It shows that after the measurement data are processed by the correction microfacet-based model, the analysis results of

收稿日期:2016-08-11;修订日期:2016-09-19.

基金项目:神光 III 大科学工程资助项目(No. 091Z512B0A)

the stray light have high consistency with the measurement results of the stray light, and the logarithm value of the ratio of tested value and analyzed value is less than 0.5. The results demonstrate that the BRDF model is necessary and the data processing is accurate, which provides an important method for stray light suppression in optical systems.

Key words: space camera; matte coating; Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF); optical system; stray light; modeling; error analysis

1 引言

随着航天事业的发展,人类文明逐渐向遥远的太空迈进,借助航天探测相机探索深空中弱小的未知目标是人类了解太空的主要手段。航天探测相机在进行弱目标探测时很容易受到视场外其它光源(如太阳、月亮、其他星体)的影响,严重时目标会被杂光淹没,从而导致相机无法探测到有用信息。为了抑制视场外杂散光的影响,提高系统的信噪比,需要对探测系统进行防杂光处理。目前,常采用遮光罩对视场外的光线进行遮挡,使视场外光线至少经过两次反射才能进入探测系统,从而减小杂散光对目标成像的影响^[1]。同时,遮光罩及相机表面要进行消光漆^[2]喷涂处理,以减小杂散光的散射。Z306 消光漆是一种广泛应用于航天领域的喷涂材料,为了掌握喷涂处理后遮光罩表面对杂光的抑制情况,需要了解经过 Z306 喷涂处理的遮光罩表面对杂光的散射特性。双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)用于描述入射光经过某个表面反射后在各个出射方向上的分布情况,是用于评价材料光学性能的一个综合指标,在气候研究、自然灾害监测、航天遥感等领域有着广泛的应用^[3]。因此,测量和分析材料表面的 BRDF,可以充分了解材料表面的散射特性。

1966 年, Torrance 和 Sparrow 对铝、二氧化镁陶瓷等材料表面的散射特性进行了实验测量并提出了基于粗糙表面的 Torrance-Sparrow 模型。随后国内外很多研究机构开始了关于材料表面 BRDF 测量和建模分析的研究。1982 年, Cook 和 Torrance 提出基于粗糙表面散射的 Cook-Torrance 模型。1997 年,美国休斯敦航空公司研制了测量粗糙表面散射强度的仪器。1980 年,美国亚利桑那州立大学 Bartell 等人详细介绍了

BRDF 和 BTDF 的概念,给出了 BRDF 的定量测量原理。1990 年, Cady 等人研制了用于测量 BRDF 的多通道三维散射仪。2006 年,张百顺等人提出典型目标的 BRDF 实验室测量方法。2002 年,吴振森等人提出 BRDF 的五参量模型^[4-9]。但这些研究中很少有关于消光漆 Z306 表面散射特性的研究。本文为了研究经过 Z306 喷涂处理后相机遮光罩表面对杂光的散射特性,对经过 Z306 喷涂的铝板样品进行了 BRDF 测量和建模分析,并将建模处理后的 BRDF 值应用于某光学系统的 PST 杂光建模分析中,通过对比分析结果和实测结果验证了建模的必要性和可靠性。

2 BRDF 的测量及误差分析

2.1 BRDF 的测量

BRDF 描述了反射表面对入射光的反射特性,定义为材料表面的反射辐照度与入射辐照度的比值。BRDF 是关于入射角、反射角及波长的函数,即有:

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

其中: i 对应入射光, r 对应反射光, θ 对应天顶角, φ 对应方位角。式(1)表示了不同入射条件下,材料表面在不同观测方向角上的反射特性。

双向反射比的测量可分为绝对测量和相对测量^[10-12]。由于绝对测量不使用任何参考标准,容易引入较大的测量误差,所以目前双向反射比的测量主要采用相对测量法,即利用已知双向反射比的标准朗伯板与待测样品进行比较,以得到待测样品的双向反射比。本文采用相对测量法,以聚四氟乙烯标准板作为参考标准,其双向反射比为 ρ/π , 其中 ρ 为半球反射率,可用分光分度计获得,则有:

$$f_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{\rho}{\pi} \quad (2)$$

测量过程中,首先测量标准板在特定角度下探测器探测到的电压值,取 $\theta_i = \theta_r = 30^\circ, \varphi_i = 0^\circ, \varphi_r = 180^\circ$ 。则标准板的双向反射比为:

$$f_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{V(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{V(30^\circ, 0^\circ, 30^\circ, 180^\circ)} \times \frac{\cos 30^\circ}{\cos \theta_i} \cdot \frac{\rho}{\pi} \quad (3)$$

得到标准板的 BRDF 后,将其与待测样品进行对比,可以得到待测样品的 BRDF,计算公式如下:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{V_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{V_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)} \times f_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (4)$$

实验测量装置原理如图 1 所示。待测样品为经过 Z306 喷涂处理的铝板,测量其在 $0.6 \mu\text{m}$ 波段的 BRDF,样品粗糙度满足 $\sigma/\lambda \geq 1.0$ 。当入射光天顶角固定后,取光源入射面的方位角为零,探测器从方位角为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 每间隔 10° 进行扫描;对于每个方位角,探测器从天顶角为 $-70^\circ \sim 70^\circ$ 每间隔 5° 进行扫描,从而得到半球空间的 BRDF 分布。

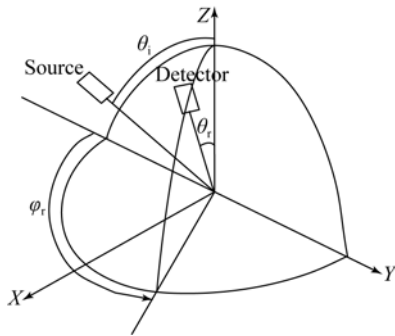
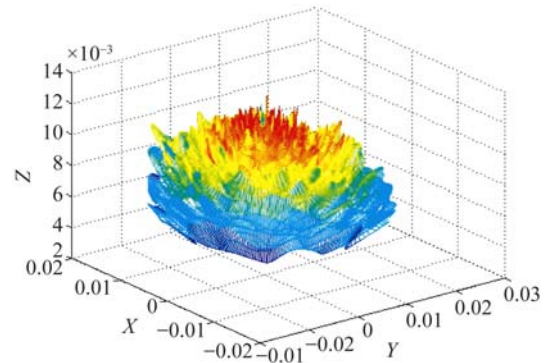


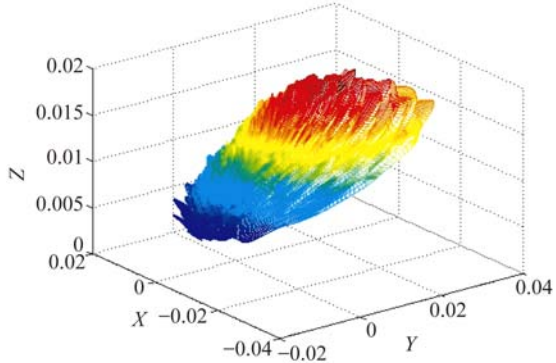
图 1 BRDF 测量装置原理图
Fig. 1 Sketch of BRDF measurement device

2.2 测量结果及误差分析

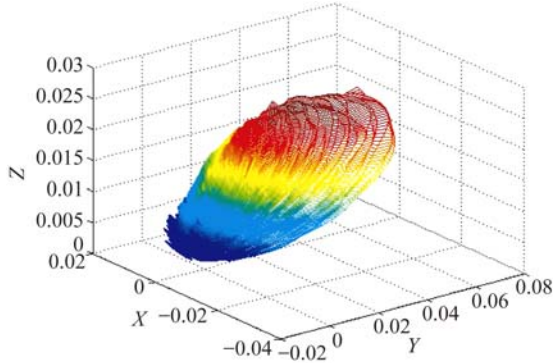
对待测样品测量得到了方位角从 $0^\circ \sim 180^\circ$, 天顶角为 $-70^\circ \sim 70^\circ$ 的 BRDF。将原始数据进行坐标变化,得到直角坐标下 BRDF 的空间分布,如图 2 所示,物体为粗糙表面,没有明显的镜像反射峰。如图 2(a) 所示,光源 0° 入射时可近似为朗伯体散射;如图 2(b)、2(c) 和 2(d) 所示,Z306 黑漆的 BRDF 表现出较强的前向散射特性,即在大角度(前向散射)处存在峰值。



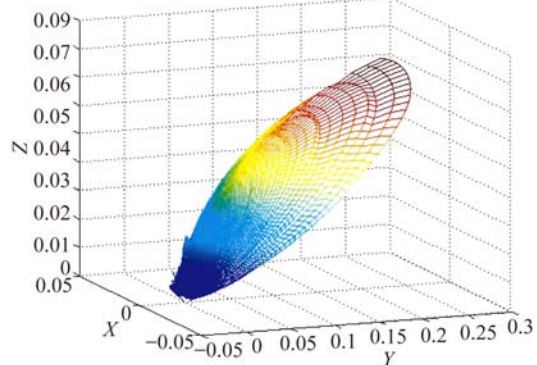
(a)光源 0° 入射
(a)Zenith angle of incident beam is 0°



(b)光源 30° 入射
(b)Zenith angle of incident beam is 30°



(c)光源 45° 入射
(c)Zenith angle of incident beam is 45°



(d)光源 70° 入射
(d)Zenith angle of incident beam is 70°

图 2 样品 BRDF 的测量结果

Fig. 2 Space distributions of BRDF of specimen

测量系统的误差会影响测量精度。由于测量误差的来源是多方面的,在各误差分量独立不相关的条件下,测量误差为:

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 + \dots + \epsilon_n^2}. \quad (5)$$

样片测量的主要误差源有:(1)探测器靠近光源时对光源的阻挡引起的测试误差;(2)探测器线性度引起的测量误差;(3)导轨定位精度引起的测量误差;(4)用标准朗伯板对设备标定引起的测量误差;(5)样片表面不均匀引起的测量误差。

实际测量设备采用硅二极管作为探测器件,按照 BRDF 的测量结果,其动态范围至少在 10^4 量级。根据同型号硅二极管的标定结果, 10^4 量级动态范围时其全局非线性度为 5%。测量时探测器通过弧形导轨定位对同一位置进行多次测量,得到测量重复误差为 6%。样片 BRDF 相对测量前需要通过标准朗伯板对设备进行定标,朗伯板定标引起的测量不确定度约为 3%。测量样片为喷涂 Z306 的铝板,铝板表面不均匀引起的测量不确定度为 1%。

综上所述,样片 BRDF 的测量误差为:

$$\epsilon_{\text{BRDF}} = \sqrt{(5\%)^2 + (6\%)^2 + (3\%)^2 + (1\%)^2} = 8.4\%. \quad (6)$$

3 BRDF 的数据建模及处理

BRDF 作为描述材料表面散射特性的一个重要参数,是杂光分析仿真中必不可少的参数。Z306 黑漆的 BRDF 测量的一个重要目的是掌握经过黑漆喷涂处理后材料表面的散射特性,以将其表面特性应用于光学系统的杂散光分析中。BRDF 建模的作用如下:(1)获得完备的 BRDF 测量数据,因为 BRDF 实测受测量设备的探测器遮挡、扫描范围等限制。(2)修正设备测量精度对 BRDF 测量数据的影响,以满足实际需求。(3)BRDF 测量需耗费大量的时间和费用,若能对某一类型材料建立通用模型,则将大幅度节约成本。

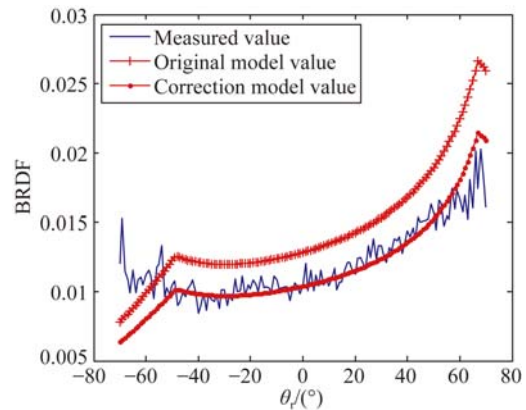
经过 Z306 喷涂处理的铝板样品属粗糙表面,其 BRDF 峰值处于对应前向散射的非镜像位置,因此,本文采用适合于粗糙表面非镜像反射的 Microfacet-based 模型。对该模型进行修正以得到适合于经过 Z306 喷涂处理的铝板样品的 BRDF 模型,用于建模分析。

根据 Microfacet-based 模型,BRDF 可以表示为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = g \cdot F \cdot \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_r} \times \exp(-c^2 \alpha^2) + k \cos \theta_i, \quad (7)$$

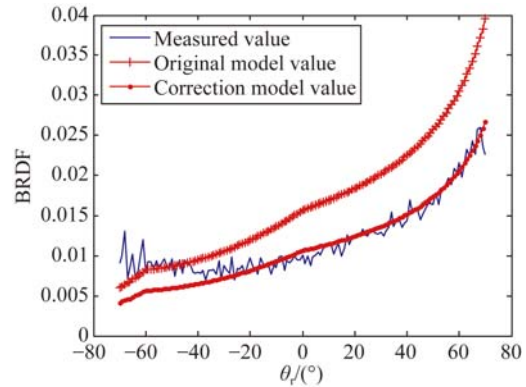
式中:第一项对应微面元镜像反射分量,第二项对应漫反射分量, $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为遮蔽因子, F 表示菲涅尔反射,指数项为表面特征函数, g 为微面元反射部分的比例因子, k 为漫反射部分的比例因子。

在 Microfacet-based 模型中,比例修正因子 g 为常数。用该模型对测试数据进行拟合时发现, g 为常数时仅能对部分角度的数据进行拟合,其它角度的拟合结果较差(如图 3 所示)。根据拟合结果, g 应是关于入射光天顶角 θ_i 和反射光方位角 φ_i 的函数,所以在对测试数据进行建模时需要确定该函数形式。



(a) θ_i 为 45° , φ_r 为 50° 时的拟合结果

(a) Fitting curves of BRDF with θ_i of 45° and φ_r of 50°



(b) θ_i 为 60° , φ_r 为 40° 时的拟合结果

(b) Fitting curves of BRDF with θ_i of 60° and φ_r of 40°

图 3 不同模型的 BRDF 拟合结果

Fig. 3 Fitting results of BRDF using different models

根据测试数据确定函数 $g(\theta_i, \varphi_r)$ 的形式, 结合多项式拟合得到:

$$g(\theta_i, \varphi_r) = \frac{h(\varphi_r) - g_0}{f(\theta_i)} + g_0, \quad (8)$$

其中: $g_0 = 0.01$, 为采用式(7)的原始模型拟合得到的 g 值。由多项式拟合得到:

$$f(\theta_i) = q_1 \cdot x^3 + q_2 \cdot x^2 + q_3 \cdot x + q_4, \quad (9)$$

$$h(\varphi_r) = p_1 \cdot x^6 + p_2 \cdot x^5 + p_3 \cdot x^4 + p_4 \cdot x^3 + p_5 \cdot x^2 + p_6 \cdot x + p_7. \quad (10)$$

则修正后的模型可以表示为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_r, \theta_r, \varphi_r) = g(\theta_i, \varphi_r) \cdot \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_r} \cdot F \times \exp(-c^2 \alpha^2) + k \cos \theta_i, \quad (11)$$

式(11)中各参数值见表 1。

表 1 修正模型参数

Tab. 1 Parameters of corrected BRDF model

参数	值	参数	值
q_1	-1.918×10^{-4}	p_1	1.158×10^{-6}
q_2	0.034 6	p_2	-2.87×10^{-5}
q_3	-2.113	p_3	-1.368×10^{-4}
q_4	45.11	p_4	0.017 35
p_1	-4.201×10^{-13}	F	1
p_2	1.425×10^{-10}	c	1
p_3	-1.871×10^{-8}	k	0.001

利用修正模型对测量数据进行建模仿真, 得到不同入射角和方位角下的 BRDF 拟合曲线, 部分曲线如图 4~图 6 所示。

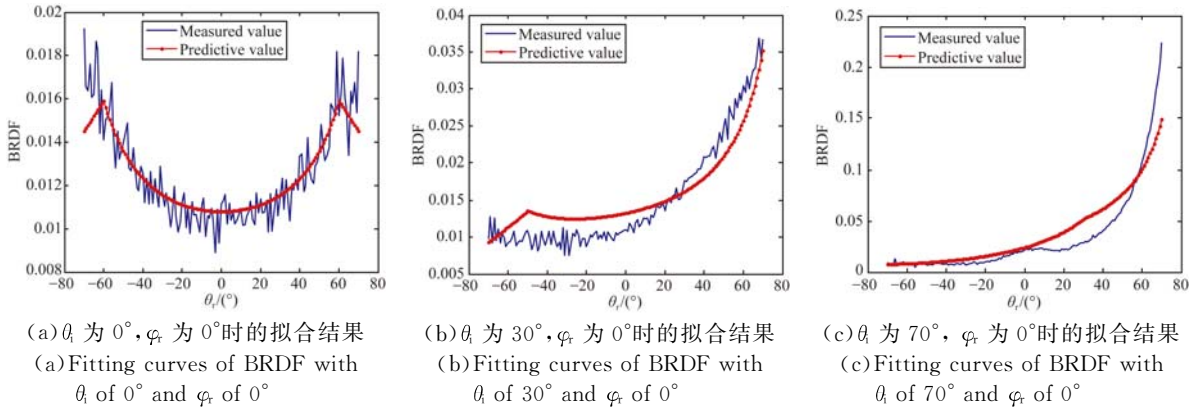


图 4 φ_r 为 0° 时 BRDF 实测值与模型拟合值对比

Fig. 4 Comparison between measured value and predictive value with φ_r of 0°

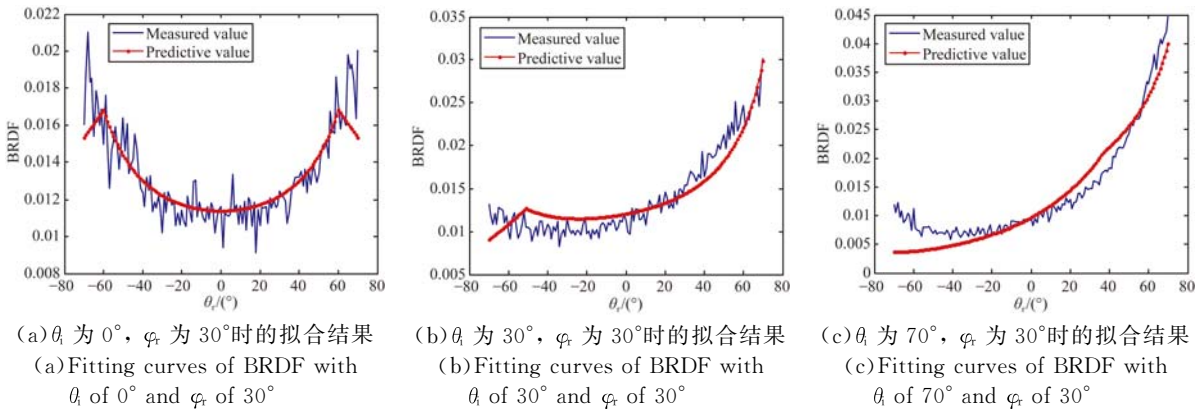


图 5 φ_r 为 30° 时 BRDF 实测值与模型拟合值对比

Fig. 5 Comparison between measured value and predictive value with φ_r of 30°

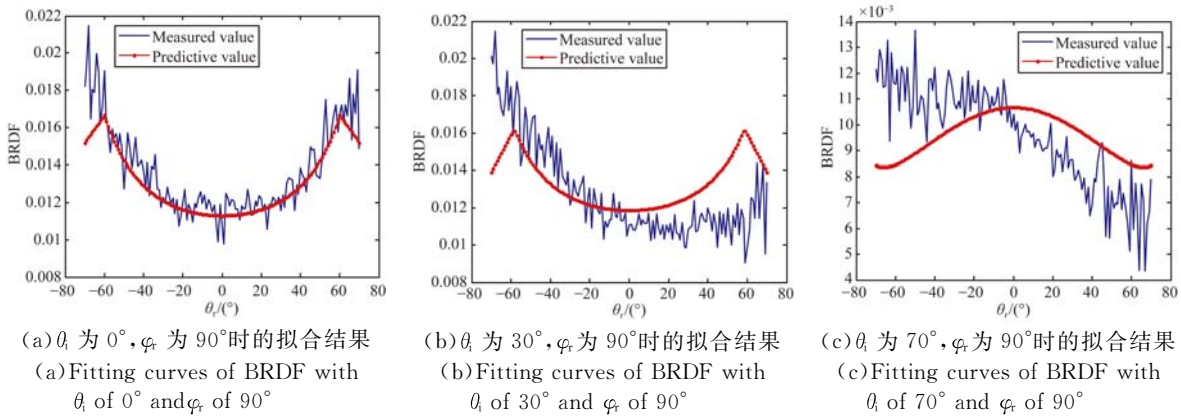


图 6 φ_r 为 90° 时 BRDF 实测值与模型拟合值对比

Fig. 6 Comparison between measured value and predictive value with φ_r of 90°

由图 4~图 6 可知,修正模型能拟合出 BRDF 的变化趋势,不过在大角度位置的拟合效果相对下降。这里采用均方差 (Mean Square Error, MSE) 对拟合曲线进行评价, MSE 定义为:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (12)$$

其中: y_i 为测量值, \hat{y}_i 为拟合值。分别对用原始模型和修正模型拟合得到的曲线进行评价, 其 MSE 如图 7~图 8 所示。

可以看到,修正模型相对原始模型拟合得到的曲线的 MSE 更小,拟合结果更好;而且入射角越大,方位角越小,这一优势越明显。说明修正模型相比原始模型更适合于样品的 BRDF 建模。但修正模型对实测数据的拟合仍存在一定的残余误差,因为任何模型均是对实际情况的理想假设,该模型中假设粗糙表面由无数个均匀有序分布的镜向反射面组成,每个微面元为对称 V 型孔。而实际中

因喷涂工艺等原因,材料表面的微结构不可能是均匀有序且对称的,因此分析值跟实际值仍存在一定程度的偏差。另外,测量时由于探测器遮挡等原因的限制,样品的 BRDF 值仅能测到 ±70° 的范围,通过修正模型可得到样品整个半球空间的 BRDF 预测值,提高了杂散光分析的准确性。

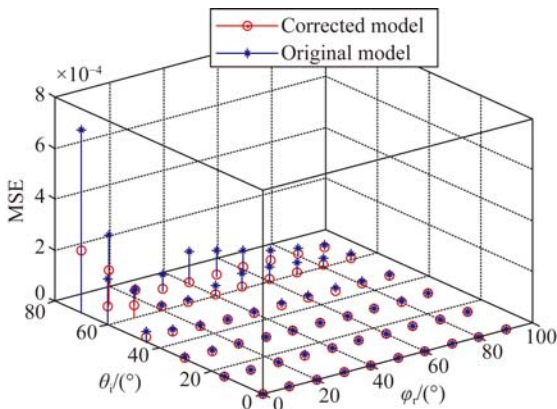
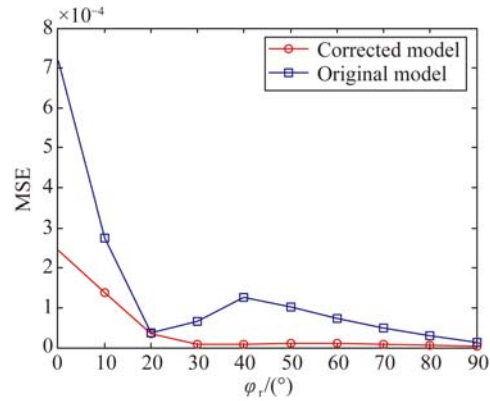
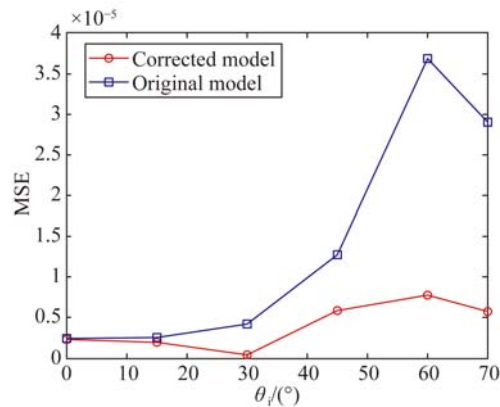


图 7 原始模型与修正模型的拟合结果对比

Fig. 7 Comparison of fitting results between original model and corrected model



(a) θ_i = 70°



(b) φ_r = 80°

图 8 原始模型与修正模型拟合结果对比

Fig. 8 Comparison of fitting results between original model and corrected model

4 BRDF 建模数据的实验验证

在杂散光分析中,点源透过率(Point Spread Function, PST)作为评价系统杂散光抑制能力的一个重要指标,得到了广泛应用^[13-16]。其定义为:光学系统视场外视场角为 θ 的点源目标辐射经过光学系统后,像面处的辐照度 $E_i(\theta)$ 与光学系统入瞳处的辐照度 $E_0(\theta)$ 的比值,即:

$$PST_i(\theta) = \frac{E_i(\theta)}{E_0(\theta)}. \quad (13)$$

为了验证 BRDF 建模数据的必要性和准确性,利用 Z306 的 BRDF 测量值及建模拟合值对某光学系统的杂散光 PST 进行分析,同时对该光学系统 PST 进行了实测。将分析结果与实测值进行对比以验证模型的准确性。实验中,光学系统的遮光罩和镜筒壁均进行了 Z306 黑漆喷涂处理。对该光学系统的 PST 进行实测,测试设备为本课题组研制的一套三波段 PST 测试系统^[17]。该系统主要由激光光源、斩波器、准直光管、双柱罐、标定装置、探测器和高精度转台组成。激光光源出射的均匀点源经过准直光管准直后,成为具有一定口径的平行光束。该光束通过双柱罐照亮被测光学系统形成强杂散光源。探测器安装在光学系统的后焦面上,结合高精度转台可测量不同离轴角的杂散光辐照度。测量光学系统入瞳处的辐照度,根据 PST 定义式(13),可计算得到光学系统在不同离轴角下的 PST。

对光学系统 PST 进行建模分析,在模型中定义表面属性,先使用未经处理的原始 BRDF 数据代入光学系统,仿真得到 PST 的理论分析曲线 PST1。再将经过建模处理并补全了未知 BRDF 的整个半球空间的 BRDF 数据代入光学系统,仿真得到 PST 的理论分析曲线 PST2。将 PST1 和 PST2 与实测的 PST 进行对比,结果如图 9 所示。可以看到,测试曲线和建模修正的分析曲线更相近。

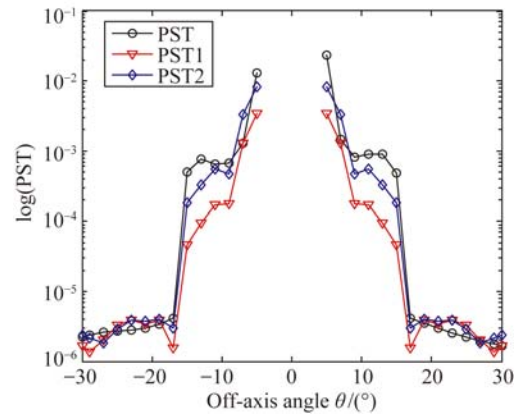


图 9 光学系统 PST 分析值与测试值对比

Fig. 9 Comparison between analytical and tested PSTs of optical system

在杂散光分析中,通常采用式(14)评价 PST 的仿真结果,即:

$$abs\left\{\lg\left|\frac{PST_1}{PST_s}\right|\right\} \leq 0.5. \quad (14)$$

采用式(14)计算分析值的误差,得到如图 10 所示的曲线。可以看到,分析值 2 的误差明显小于分析值 1,并且所有误差均小于 0.5,满足仿真要求。由此表明 BRDF 的建模数据是正确的,可以应用于光学系统的杂散光分析。

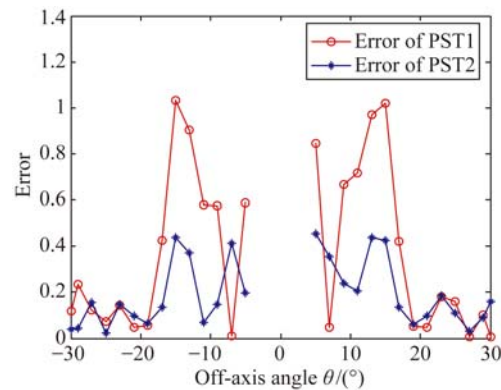


图 10 光学系统 PST 分析值的误差曲线

Fig. 10 Error curves of analytical PST of optical system

5 结 论

本文在对 Z306 消光黑漆表面特性进行实际测量的前提下,得到了 Z306 黑漆在 $0.65 \mu\text{m}$ 波段的 BRDF 属性,分析了测试误差源并给出了误差结果。通过分析测量装置的系统误差,结合 Z306 黑漆测量数据表现的散射特征,选择了适合

粗糙黑漆表面的 Microfacet-based 模型,并对模型进行修正。运用修正后的模型对测量数据进行了补充,最终获得样片表面整个半球空间的 BRDF,为材料空间散射特性的测量研究提供了参考。最后通过对某光学系统进行的 PST 杂光建模分析,给出了 BRDF 建模处理前后杂散光 PST 的分析结果,并将建模处理后的分析结果与

实测值进行对比。实测值与分析值比值的对数精度优于 0.5,验证了 BRDF 建模的正确性,也证明了 BRDF 建模的可行性及其用于杂散光分析的可靠性,为航天消光材料的 BRDF 测量与分析提供了一种思路。不过,文章只是对消光黑漆 Z306 进行了建模分析,未必适用于所有材料,该模型对于其它材料的适应性还有待进一步的验证。

参考文献:

- [1] 王龙, 简超, 郑玉权. CO₂ 探测仪星上定标铝漫反射板的制备与试验[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 591-599.
WANG L, LIN CH, ZHENG Y Q. Fabrication and experiment of aluminum diffuser for CO₂ detector calibration on orbit [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 591-599. (in Chinese)
- [2] 张建贤, 邹永军, 徐蕾, 等. 消光漆在光学系统的国内外应用[J]. 宇航材料工艺, 2014(6): 88-90.
ZHANG J X, ZOU Y J, XU L, *et al.*. Matte coating and its application in optical system [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2014 (6): 88-90. (in Chinese)
- [3] ERIC C F. *Stray Light Analysis and Control* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2013.
- [4] 齐光, 王书新, 李景林, 等. 离轴三反光学遥感器遮光罩的设计与试验验证[J]. 中国光学, 2016, 9(4): 472-482.
QI G, WANG SH X, LI J L, *et al.*. Design and test verification of baffle for off-axis three-mirror space optical remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 472-482. (in Chinese)
- [5] TORRANCE K, SPARROW E. Theory of off-specular reflection from roughened surfaces [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1101-1115.
- [6] 刘宏, 朱京平, 王凯. 基于随机表面微面元理论的双向反射分布函数几何衰减因子修正[J]. 物理学报, 2015, 64(18): 184213.
LIU H, ZHU J P, WANG K. Modification of geometrical attenuation factor of bidirectional reflection distribution function based on random surface microfacet theory [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(18): 184213. (in Chinese)
- [7] 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 ZH 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. (in Chinese)
- [8] SAMUEL D B, STEPHEN E N, MICHAEL A M. Experimental analysis of bidirectional reflectance distribution function cross section conversion term in direction cosine space [J]. *Optic Letters*, 2015, 40(11): 2445-2448.
- [9] PROKHOROV A, HANSEN L. Algorithmic model of microfacet BRDF for Monte Carlo calculation of optical radiation transfer [J]. *SPIE*, 2003, 5192: 141-157.
- [10] 李俊麟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于六轴串联机械手的双向反射分布函数测量装置[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2983-2989.
LI J L, ZHANG L M, SI X L, *et al.*. BRDF device based on six-axis robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2983-2989. (in Chinese)
- [11] 张百顺, 刘文清, 魏庆农, 等. 典型目标的 BRDF 实验室测量与模型验证[J]. 量子电子学报, 2006, 23(4): 533-536.
ZHANG B SH, LIU W Q, WEI Q N, *et al.*. Experiment measurements and validating with the model of typical goal's BRDF [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(4): 533-536. (in Chinese)
- [12] BUTLER S D, MARCINIAK M A. Robust categorization of microfacet BRDF models to enable flexible application-specific BRDF adaptation [J]. *SPIE*, 2014: 920506-920506-11.
- [13] 禹璐, 程德文, 周伟, 等. 硬性内窥镜光学系统的杂散光分析与抑制[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 526-532.
YU L, CHENG D W, ZHOU W, *et al.*. Stray light analysis and suppression of rigid endoscope system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3):

- 526-532. (in Chinese)
- [14] 岑兆丰,李晓彤,朱启华. 光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程,2007,36(3):300-304.
CEN ZH F, LI X T, ZHU Q H. Stray light analysis for optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 300-304. (in Chinese)
- [15] 巴音贺希格,李燕,吴娜,等. 紫外平面刻划光栅杂散光数值分析及测试[J]. 光学精密工程,2009,17(8):1783-1789.
BAYHXG, LI Y, WU N, *et al.*. Numerical analysis and measurement of stray light from UV ruled grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1783-1789. (in Chinese)
- [16] 梁静秋,梁中翥,吕金光,等. 空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪研究[J]. 中国光学,2015,8(2):277-298.
LIANG J Q, LIANG ZH Z, LÜ J G, *et al.*. Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 277-298. (in Chinese)
- [17] 李朝辉,赵建科,徐亮,等. 点源透过率测试系统精度标定与分析[J]. 物理学报,2016,65(11):114206.
LI ZH H, ZHAO J K, XU L, *et al.*. Analysis and calibration of precision for point source transmittance system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(11): 114206. (in Chinese)

作者简介:



赵 青(1992—),女,陕西临潼人,2014年于西北大学获得学士学位,主要从事光学设计、光学检测方面的研究。E-mail: zhaqing@opt. cn

导师简介:



赵建科(1975—),男,陕西宝鸡人,高级工程师,1999年于中国计量学院获得学士学位,2009年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事航天、航空相机及光学跟踪测量设备总体指标的测试工作。E-mail: zjk@opt. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)