

表面损伤衍射双向反射分布函数模型建立及分析

陆敏 王治乐 张树青

Establishment and analysis of the diffraction bidirectional reflection distribution function model for surface defects

LU Min, WANG Zhi-le, ZHANG Shu-qing

引用本文:

陆敏, 王治乐, 张树青. 表面损伤衍射双向反射分布函数模型建立及分析[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 375-381. doi: 10.37188/CO.2020-0162

LU Min, WANG Zhi-le, ZHANG Shu-qing. Establishment and analysis of the diffraction bidirectional reflection distribution function model for surface defects[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 375-381. doi: 10.37188/CO.2020-0162

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0162>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紫铜粗糙表面的光谱双向反射分布函数测量研究

A study on the spectral BRDF measurement of red copper rough surfaces
中国光学. 2019, 12(6): 1385 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1385>

基于单次傅里叶变换的分段衍射算法

Step diffraction algorithm based on single fast Fourier transform algorithm
中国光学. 2018, 11(4): 568 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0568>

超表面上表面等离子激元波的光栅衍射行为研究

Grating diffractive behavior of surface plasmon wave on meta-surface
中国光学. 2018, 11(1): 60 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0060>

点衍射干涉检测技术

Point diffraction in interference detection technology
中国光学. 2017, 10(4): 391 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0391>

基于平行平晶的三步相干衍射成像系统

Three-step coherent diffraction imaging system based on parallel plates
中国光学. 2018, 11(6): 1032 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1032>

太阳辐射计的衍射效应修正

Diffraction effect correction of solar radiometer
中国光学. 2018, 11(5): 851 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0851>

文章编号 2095-1531(2021)02-0375-07

表面损伤衍射双向反射分布函数模型建立及分析

陆 敏*, 王治乐, 张树青

(哈尔滨工业大学 航天学院 空间光学工程研究中心, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要:建立了包括划痕和坑点在内的表面损伤的衍射双向反射分布函数(BRDF)模型,并分析了模型在各领域中的应用。通过使用非傍轴标量衍射理论,提出了采用相干窗口函数滤波的方法得到非相干光条件下的表面损伤衍射 BRDF 模型,得到了表面划痕和坑点的散射特性。该方法在表面损伤检测、表面损伤杂光分析以及图像渲染技术等领域都有重要的应用价值。

关键词:衍射;相干;双向反射分布函数;傅立叶光学;表面损伤

中图分类号:O436 文献标志码:A doi: 10.37188/CO.2020-0162

Establishment and analysis of the diffraction bidirectional reflection distribution function model for surface defects

LU Min*, WANG Zhi-le, ZHANG Shu-qing

(Research Center for Space Optical Engineering, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: 18243087454@163.com

Abstract: The purpose of this paper is to establish a diffraction Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF) model of surface defects including scratches and pits, and to analyze the model being applied in various fields. By using nonparaxial scalar diffraction theory, a coherent window function filtering method is proposed, which can obtain the BRDF model of surface defect diffraction under incoherent light conditions. The effectiveness of the model is verified in related work, and the scattering characteristics of surface scratches and pits are obtained. The method and the results obtained by the model have high value in surface defect detection, surface defect stray light analysis and image rendering technology.

Key words: diffraction; coherence; bidirectional reflection distribution function; Fourier optics; surface defects

收稿日期:2020-09-07; 修订日期:2020-09-23

基金项目:中国航空研究院航空科学基金(No. 20160177007)

Supported by Aviation Science Foundation of China Aviation Research Institute (No. 20160177007)

1 引言

光学系统设计人员在设计系统时必须考虑杂散光存在时的整体性能裕度。为了获得高的信噪比,必须控制外辐射源到达焦平面产生的散射量。在许多系统中,光学元件表面损伤的散射是场外杂散光传输到焦平面的重要路径。在实际工作中,对光学元件表面损伤进行检测以及提供合理的表面损伤检测标准是确保高功率激光装置、精密光学系统及红外光学探测系统等有效运行的基础和关键^[1]。现在光学元件表面损伤的非接触检测方法主要为人工目视检测法。此外,还有人采用暗场显微散射法、自适应滤波成像法、全内反射显微法、激光共聚焦显微检测法以及光切断法对光学元件的表面损伤进行检测^[2-3]。当前利用放大镜或显微镜对表面损伤进行目视检测仍是最为普遍的方法,这种方法对检测人员的实际经验要求较高、主观性强、费时费力、工作强度大。现有的检测方法也不能应对不同的检测标准,存在仪器指标开发过剩或不足的问题,无法实现生产过程中的自动化检测。此外,表面损伤检测标准也没有科学的依据,损伤标准与损伤产生的散射量没有用量化关系来描述。

当前已经发展出一些基于实验直接测量的表面损伤散射研究,但是基于模型的研究方法较少, Germer T A 利用几何光学理论和菲涅耳方程计算了在瑞利极限下反射面内外(表面脏污和表面损伤)一定距离的小粒子散射光的角度依赖性和偏振度^[4]。Peterson 将划痕或坑点所散射的光分成两部分:划痕或坑点内表面的几何折射或反射,以及穿过划痕或坑点周围的光的衍射。他直接应用标量衍射理论和理想化的形状、入射方向,研究了划痕和坑点的不同量级对表面散射的影响^[5]。虽然到目前为止已经有学者对表面损伤的散射理论进行了研究,但是没有采用相应散射理论来研究多参数条件下的损伤散射情况,并且也没有充足的模型数据分析用于研究当前损伤检测标准的适用范围与表面损伤的最佳探测条件、方法。

本文提出了表面损伤的衍射 BRDF 模型,能够仿真表面损伤产生的无法用几何光学解释的波

动效应,分析中考虑了光源的相干性,更加接近物理现实,提出的模型能够应用于表面损伤散射的相关研究中。本文提出的表面损伤散射模型能够简单、准确地模拟仿真损伤产生的散射特性,为设计检测方法、制定特定应用条件下的检测标准提供理论依据。

2 表面损伤的衍射 BRDF 模型

2.1 非相干光的衍射 BRDF 模型

微观尺度的表面散射需要考虑光的波动效应影响,无法直接使用几何光学模型进行解释。双向反射分布函数 (BRDF) 是表征材料表面散射特性的最常用方法。BRDF 描述了在入射方向 (θ, φ) 和给定波长 λ 条件下由表面材料反射,在反射方向 (θ_r, φ_r) 的辐射强度的变化。本文使用波动光学中的非傍轴标量衍射理论分析表面损伤的 BRDF 模型,标量衍射理论中平面波分量用方向余弦表示,其传播矢量与常规球坐标中角度变量的关系为:

$$\omega = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{pmatrix} . \quad (1)$$

用特定波长下的反射辐亮度 $L_r(\omega_r)$ 与入射辐照度 $E_i(\omega_i)$ 的比值表示衍射 BRDF:

$$f_r(\omega_i, \omega_r) = \frac{dL_r(\omega_r)}{dE_i(\omega_i)} . \quad (2)$$

使用远场衍射的角谱理论, $\hat{\alpha} = \frac{\alpha}{\lambda}$, $\hat{\beta} = \frac{\beta}{\lambda}$, $\hat{\gamma} = \frac{\gamma}{\lambda}$ 为平面光波传播的空间频率,根据 Harvey 提出的非傍轴标量衍射理论可以得到反射光的辐射亮度^[6]:

$$L(\omega_r, \alpha_i, \beta_i) = \gamma_i \frac{\lambda^2}{A_s} \left| \mathcal{F} \left\{ U_o(x, y) e^{2\pi i(\hat{\beta}_i y + \hat{\alpha}_i x)} \right\} \right|_{\hat{\alpha}_r, \hat{\beta}_r}^2 , \quad (3)$$

其中 A_s 为入射光源覆盖的阴影面积,如图 1 所示。其中 $U_o(x, y)$ 为 $z = 0$ 平面上 $p(x, y)$ 处的表面衍射光波。

如图 1(a) 所示,衍射的出射波平面由入射波平面受划痕表面传递函数调制后得到,可以表示为:

$$U_o(p) = U_i(p) \cdot T(p) . \quad (4)$$

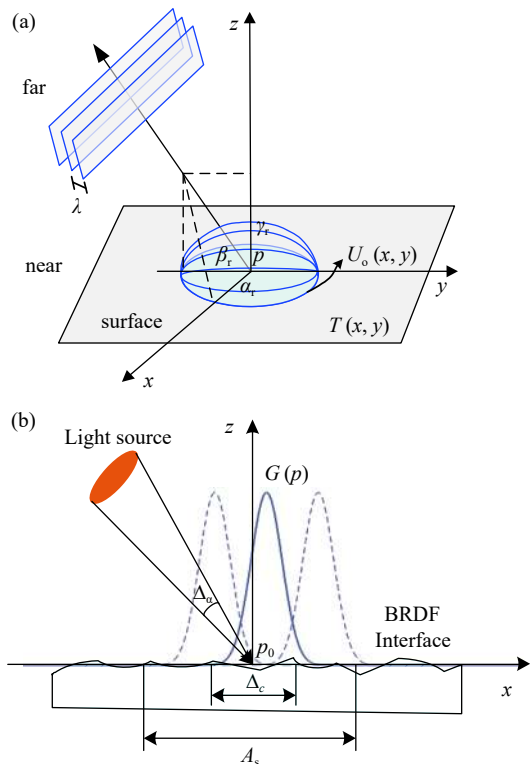


图 1 非相干辐射原理

Fig. 1 Incoherent illumination theory

划痕表面的传递函数表示的是材料高度变化引起的振幅和相位的改变, 组成为:

$$T(\mathbf{p}) = A(\mathbf{p}) \cdot e^{i\phi(\mathbf{p})}, \quad (5)$$

其中, $A(\mathbf{p})$ 是表面划痕的振幅因子, $\phi(\mathbf{p}) = -2\pi i (\hat{\gamma}_r + \hat{\gamma}_i) h(\mathbf{p})$ 是由微结构的高度变化引起的相位。由于光波传播光程取决于相对表面法线的入射角和出射角, 因此, 光程差(以及因此的相位改变)取决于观测和入射光的方向余弦 $\hat{\gamma}_r$ 和 $\hat{\gamma}_i$ 。

在傅立叶变换的背景下, 为方便表达, 在推导过程中使用傅立叶变换中的平移不变定理, 令 $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3) = (\hat{\alpha}_r - \hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_r - \hat{\beta}_i, \hat{\gamma}_r - \hat{\gamma}_i)$, 根据式 (3)~式 (5) 能够得到理想相干光源条件下, 划痕的表面 BRDF 模型:

$$f_r = \gamma_i \frac{\lambda^2}{A_s} \left| \mathcal{F}\{T(\mathbf{p})\}_{u_{1,2}} \right|^2. \quad (6)$$

现实环境中, 光在空间上是不相干的, 因为光源不限于一个点, 而是具有一个区域, 并且可以被视为由多个独立的点光源组成。到达表面的照明来自光源区域的一个小的对边角 Δ_o 。van Cittert-Zernike 定理通过傅立叶变换将光源照明表面的角度扩展与表面空间滤波器联系起来^[7]。非相干

反射是通过在 $\Delta_c = \lambda/\Delta_o$ 尺寸的相干窗口上应用相干反射原理(Fourier 变换), 对区域 A_s 内所有相干区域的反射率进行平均, 形成非相干反射光。

Werner 等人使用标量基尔霍夫理论预测特定光刻结构表面的 BRDF。他们首先引入了相干窗口, 并考虑了光源空间相干的影响^[7-9]。本文将相干函数定义为高斯空间核 $G(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)$, 它用于控制待测表面上的点相对于面上光线的交点 \mathbf{p}_0 的相对权重。类似于短时傅立叶变换, 高斯核 $G(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)$ 提供执行此选择的窗口函数。本文使用高斯空间核:

$$G(\mathbf{p}) = e^{-\frac{1}{2}|\mathbf{p} - \mathbf{p}_0|^2/\sigma^2}, \quad (7)$$

其中 σ 为高斯滤波核大小, $\sigma = \Delta_c/4$ 。这个相干函数定义了相应的空间权重, 得到非相干光的衍射 BRDF 模型为

$$f_r = \gamma_i \frac{\lambda^2}{A_s} \left| \mathcal{F}\{T(\mathbf{p}) \cdot G(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)\}_{u_{1,2}} \right|^2. \quad (8)$$

2.2 表面损伤的衍射 BRDF 模型

假设材料是由一种均匀的基底材料组成, 忽略其空间变化, 因此, 表面反射率是恒定的, 表面损伤引起的振幅改变仅取决于其表面形状。在此条件下, 假设高斯滤波器只影响空间相位。这使得可以分离每个表面损伤的振幅(仅受损伤表面形状影响)和相位(仅受表面深度影响)分量。最后, 得到单个损伤传递函数的傅立叶变换

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{T_{\text{defect}}(\mathbf{p})\}_{u_{1,2}} &= \mathcal{F}\{A_{\text{defect}}(\mathbf{p})\}_{u_{1,2}} \cdot \\ &\mathcal{F}\{e^{i\phi_D(\mathbf{p})} \cdot G(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)\}_{u_{1,2}}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 defect 表示表面损伤。

得到非相干条件下的表面损伤 BRDF 模型为:

$$\begin{aligned} BRDF_{\text{defect}} &= \gamma_i \frac{\lambda^2}{A_s} \left| \mathcal{F}\{A_{\text{defect}}(\mathbf{p})\}_{u_{1,2}} \cdot \right. \\ &\left. \mathcal{F}\{e^{i\phi_D(\mathbf{p})} \cdot G(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)\}_{u_{1,2}} \right|^2, \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\mathcal{F}\{G(x, y)\}_{u_{1,2}} = \sqrt{2\pi} \sigma e^{-2\pi^2 \sigma^2 (u_1^2 + u_2^2)}$, 深度相位 $\phi_D = -2\pi i (\hat{\gamma}_r + \hat{\gamma}_i) d$ 。

使用最简单的长为 l 宽为 w 的矩形描述划痕时, 划痕响应函数是

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{A_{\text{scratch}}^{\text{rect}}(x, y)\}_{u_{1,2}} &= \mathcal{F}\left\{F_{\text{scratch}} \text{rect}\left(\frac{x}{l}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{w}\right)\right\}_{u_{1,2}} \\ &= F_{\text{scratch}} l w \cdot \text{sinc}(l u_1) \cdot \text{sinc}(w u_2), \end{aligned} \quad (11)$$

其中 F_{scratch} 为非涅尔反射系数, 坑点的响应函数是

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{A_{\text{dig}}^{\text{cinc}}(x, y)\}_{u_{1,2}} &= \mathcal{F}\left\{A_{\text{dig}} \text{cinc}\left(\frac{r}{a}\right)\right\}_{u_{1,2}} \\ &= F_{\text{dig}} \frac{J_1(2a\pi\rho)}{\rho}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中 a 为坑点半径, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\rho = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$ 。

2.3 表面损伤的散射特性

图 2(彩图见期刊电子版)显示了在光源立体

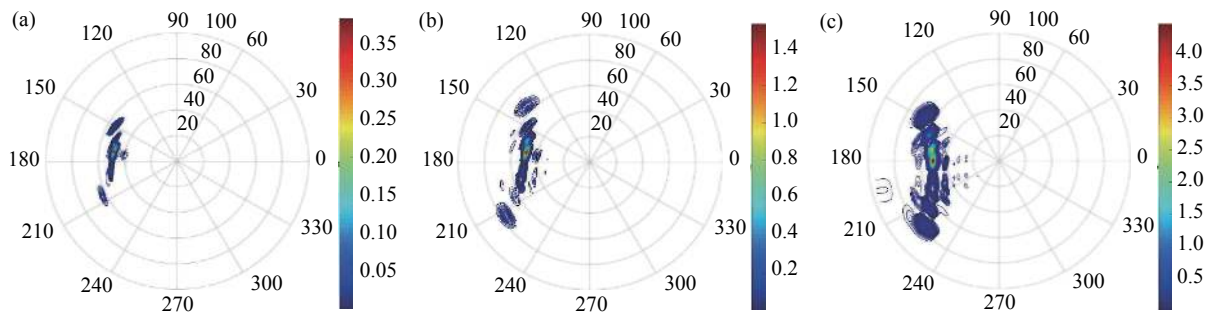


图 2 波长为(a) 0.3 μm , (b) 0.5 μm 及(c) 0.8 μm 的划痕仿真结果

Fig. 2 Simulation results of scratches with a wavelength of (a) 0.3 μm , (b) 0.5 μm and (c) 0.8 μm

3 损伤衍射 BRDF 模型的应用

3.1 研究损伤对系统影响的杂光分析模型

对于成像光学系统, 元件表面的总散射是影响系统杂散抑制的一个更重要的衡量指标。可以使用本文提出的模型对表面损伤进行 TIS 数值仿真, 并在参考表面的“光滑”部分进行类似的仿真, 然后将直径为 20 mm 的检测标准的影响标准化为表面损伤散射影响的下限。

元件表面的 BRDF 确定后, 可以计算得到元件表面的角分辨散射 (Angle Resolution Scatter, ARS)

$$ARS(\theta_s) = BRDF(\theta_s) \cos \theta_s. \quad (13)$$

全积分散射 (Total Integral Scatter, TIS) 定义为半球空间内的总散射量, 能够表示物体表面的总反射率, 当入射光垂直入射时, TIS 定义为表面元件上散射到半球空间的功率 P_s 与入射功率 P_i 的比值, 即

$$TIS = \frac{P_s}{P_i} = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} ARS(\theta_s) d\theta_s, \quad (14)$$

式中 θ_s 为散射角。

表面的粗糙程度取决于两个参数 δ 和 l_c , δ 越大, l_c 越小, 则表面越粗糙; 反之则越光滑。表面粗

角 $\Delta_\alpha = 2.8$ 、入射角为 45° 的不同波长的光照射下的 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 划痕散射结果, 色阶表示 BRDF 数值。本文的仿真公式能够仿真更加接近实际情况的空间、角度和光谱变化, 表现出多尺度行为, 并且该模型能够再现划痕散射的整体外观以及在实际测量中观察到的散射特征细节效果。

糙度为 δ 、相关长度为 l_c 的干净镜面 BRDF 的经验公式表示为^[10]:

$$BRDF_{\text{rou}} = \frac{2}{\pi} \frac{k^4 \delta^2 l_c^2}{1 + [kl_c(\beta - \beta_0)]^2}, \quad (15)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢, $\beta = \sin \theta_s$, $\beta_0 = \sin \theta_0$ 。

当材料的表面粗糙度 δ 已知时, 可以直接使用 Harvey-Shack 理论得到表面粗糙度引起的总散射:

$$TIS_{\text{rou}} = 1 - \exp\left[-(4\pi\delta \cos \theta_i / \lambda)^2\right]. \quad (16)$$

3.1.1 光学零件表面疵病国家标准

根据国家标准 GBT1885-2006, 可用级数表示疵病的等级。级数 G 是以 mm 为单位且表征表面疵病大小的数值分级, 级数值为疵病面积的平方根, 也是该级表面疵病的最大值。

$$G = \sqrt{A}, \quad (17)$$

式中 A 为疵病面积。

表面疵病公差由基本级数 G 及其个数 N_n 组成, 一般将表面疵病公差表示为 $N_n \times G$ 。在疵病总面积不变的前提下, 表面疵病公差的基本级数可通过换算系数分解成若干个较小级数或折算成不同长宽比的短擦痕。

可以使用本文提出的表面损伤 BRDF 模型

来仿真分析表面疵病公差下的表面损伤总积分散射,通过模型确定特定应用下元件能够容限的总积分散射值,从而确定应用于加工生产中的检测公差标准。

3.1.2 检测标准理论依据

以任意一个表面疵病基本级数 $G=0.10$ mm 为例,可直接换算成一个直径为 0.11 mm 的麻点或一条尺寸分别为 0.16 mm×0.063 mm、0.25 mm×0.040 mm、0.40 mm×0.025 mm 的擦痕。根据黄聪在文献 [11] 中得到的,同一疵病级数下的散射特性与疵病类型、数量几乎无关,因此本文在分析中都使用表面疵病级数中代表的麻点尺寸来进行坑点散射模型仿真。

实际 TIS 测量中,均匀光照下的表面散射是基底区域和较小部分损伤区域的散射之和,通过实验测量得到的 BRDF 是散射的辐射除以撞击表面的辐照度 [11]。考虑一个分为两部分的表面,区域 A_{defect} (损伤区域) 和 $A - A_{\text{defect}}$ (照明区域减去损伤区域) 的总照明辐照度 E_i 均匀照射在表面上

$$E_{i_{\text{defect}}} = \frac{A_{\text{defect}}}{A} \cdot E_i, E_{i_{\text{base}}} = \left(1 - \frac{A_{\text{defect}}}{A}\right) \cdot E_i, \quad (18)$$

从 $A - A_{\text{defect}}$ 中散射的光是:

$$L_{o_{\text{base}}} = E_{i_{\text{base}}} \cdot BRDF_{\text{base}}, \quad (19)$$

其中下标表示除划痕外的底面。从区域散射的光类似于:

$$L_{o_{\text{defect}}} = E_{i_{\text{defect}}} \cdot BRDF_{\text{defect}}, \quad (20)$$

式中 i 和 o 分别表示光的入射和发射。

直接测量得到的带损伤表面的 BRDF 是:

$$BRDF_{\text{meas}} = \frac{A_{\text{defect}}}{A} \cdot BRDF_{\text{defect}} + \left(1 - \frac{A_{\text{defect}}}{A}\right) \cdot BRDF_{\text{base}}. \quad (21)$$

仿真使用无划痕的参考表面粗糙度为 $\delta=0.6$ nm, $l_c = 10$ μm , 表面粗糙程度是相对于入射波长的一个值,根据参考文献 [12-13], $g = \delta/\lambda$, $g \gg 1$ 为非常粗糙表面, $g \approx 1$ 为中度粗糙表面, $g \ll 1$ 为略粗糙表面。为证明本文提出模型的实际应用价值,选择仿真波段从 0.5 μm 到 0.9 μm 的 TIS 结果以证明不同等级表面损伤对不同粗糙度表面的影响。TIS_{rou} 使用公式 (16) 计算,假设 TIS 测量的光源直径为 1 mm,光源立体角 $\Delta_\omega = 2.8$,根据以上

公式推导得到带有不同等级损伤的表面 TIS 仿真结果如图 3 所示。

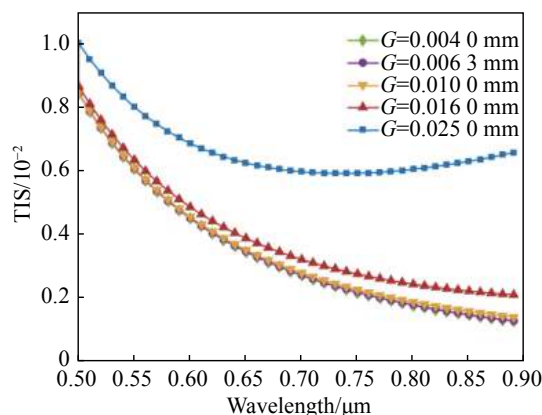


图3 不同级数表面损伤的 TIS

Fig. 3 TIS with different defect grade numbers

根据图 3(彩图见期刊电子版)的仿真结果曲线可知,不同等级表面损伤对不同粗糙表面的影响不同,表面损伤对相对波长更粗糙表面的影响较小,相对波长越光滑,损伤产生的影响越严重,并且损伤等级越大,损伤面积越大,损伤产生的散射越大。可以根据本文的仿真结果,或者针对不同使用条件下的元件表面进行仿真,设定表面散射阈值,从而可以确定符合某特定系统要求的表面损伤检测标准。

3.2 检测方法理论依据

现有的检测方法也不能适用于不同的检测标准,存在仪器指标开发过剩或不足的问题,无法实现生产过程中的自动化检测。针对不同的材料,以及不同的表面损伤检测标准来制定相应的检测方法能够解决以上问题。检测方法的提出是为了区分基底背景下的表面损伤,因此本文使用公式 (15) 仿真基底材料散射(在图中用 BRDF_B 表示),结合式 (10) 和式 (15) 使用公式 (21) 对比分析了表面损伤材料的散射。在光源立体角 $\Delta_\omega = 2.8$ 、入射角为 45°、波长为 0.65 μm 条件下,仿真了长×深为 20 μm ×0.3 μm ,宽度分别为 10 μm 和 100 μm 的划痕在粗糙材料表面 ($\delta = 0.6$ nm, $l_c = 1$ μm) 和光滑材料表面 ($\delta = 0.6$ nm, $l_c = 10$ μm) 的理论 BRDF 测量结果,在图中用 BRDF₁₀ 和 BRDF₁₀₀ 表示。

对图 4(彩图见期刊电子版)进行分析,对比不同宽度划痕对散射造成的影响,损伤尺寸越大,对散射的影响越大,但是在粗糙表面,划痕主要影

响散射的主峰,光滑材料表面,划痕主要影响散射的旁瓣。因此对于光滑材料样品,最好采用间接成像原理,如暗场显微成像法。样品表面粗糙度较小时,直接成像时基底背景引起的强镜面反射会严重干扰表面的识别,使用暗场成像方法能够通过获得表面损伤的小衍射副瓣识别目标。对于粗糙材料样品,最好采用直接成像原理,直接接收表面损伤的最大衍射强度,滤除基体表面的漫射光。

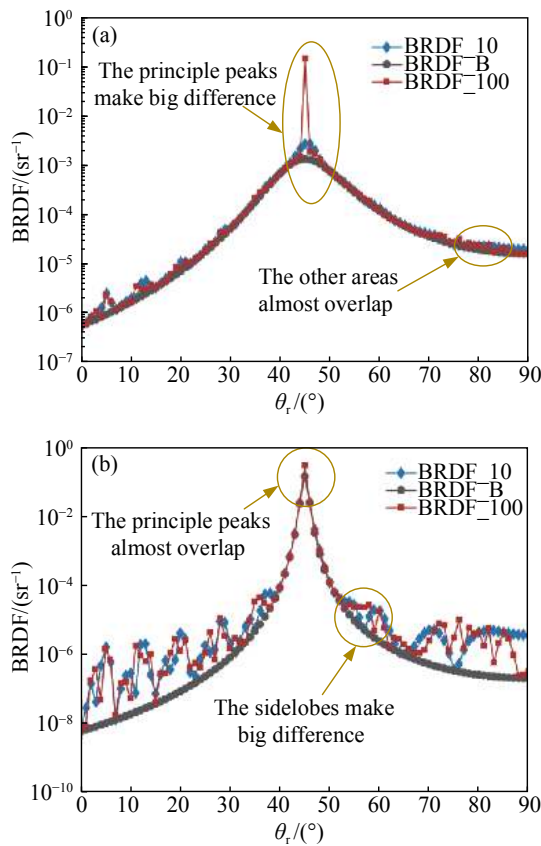


图 4 粗糙材料表面(a)和光滑材料表面(b)划痕的 BRDF 影响

Fig. 4 BRDF effect of a scratch on a rough material surface (a) and a smooth material surface (b)

本文提出的表面损伤衍射 BRDF 模型可以为制定不同标准表面损伤的检测方案提供理论依据。为了获得更好的观测数据,在间接成像方法中可以选择较大的波长进行实验,以使衍射更强,衍射旁瓣更容易探测;在直接成像方法中可以选

参考文献:

- [1] LU M, WANG ZH L, WANG H L, *et al.*. Defects scattering imaging system of 20 inch PMTs' glass shell suitable for

择较小的波长进行实验,以使衍射现象弱化,避免衍射旁瓣产生的成像干扰;也可以根据入射光源的价格、稳定性和最佳视角等因素结合 BRDF 模型进行合理的分析选择。在进一步的工作中,将使用文献 [14] 设计的 BRDF 测试仪进行模型的验证。

3.3 图像渲染技术理论依据

金属、玻璃和塑料物体的表面通常以制造或磨损引起的微观划痕为主。仔细观察这些划痕,会发现彩虹色,这与观看和照明条件有着复杂的关系。这一现象是由于入射光在光波长量级上受到表面特征的影响而引起的。例如光盘和类似材料的彩虹状外观这一类的图像渲染问题,一般用高度复杂的光波传输模拟来解释空间分辨划痕的外观。本文提出了一个基于非傍轴标量衍射理论的波光学 BRDF 模型,这种模型可以用来呈现这类效应。本文的模型可以对表面某个点进行单色 BRDF 模型分析,可以分析计算产生划痕段的各个差异模式,并进行相干叠加。这一方法提供了从局部闪烁的彩虹色到几何平滑的 BRDF 的自然过渡。这一模型的建立和分析方法能够重现真实世界中观察到的整体外观和特征细节效果。

4 结 论

本文使用了一个高斯空间核函数滤波的方法定义了非相干光的衍射 BRDF 模型,并将其运用到了表面损伤 BRDF 建模分析上。本文提出的模型能够很好地模拟表面划痕和坑点损伤的散射特性。在模型的基础上,本文分析了模型的相关应用,模型能够为提出表面损伤方法提供理论依据。同时本文证明了该模型能够很好地分析损伤对系统的杂光影响,并为制定检测表面损伤标准提供理论依据。由于本模型能够仿真更加接近实际情况的空间、角度和光谱变化,表现出多尺度行为,并且该模型能够再现划痕散射的整体外观以及在实际测量中观察到的散射特征细节效果,在未来的应用中可以为图像渲染中更好的模拟现实环境提供仿真和分析的方法。

- digital image processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10847: 108470C.
- [2] 陆敏,王治乐,高萍萍,等.光学元件的疵病检测及现状[J].*光学仪器*, 2020, 42(3): 88-94.
LU M, WANG ZH L, GAO P P, *et al.*. Defect detection and current situation of optical components[J]. *Optical Instruments*, 2020, 42(3): 88-94. (in Chinese)
- [3] 王拯洲,段亚轩,王力,等.基于邻域向量内积局部对比度图像增强的光学元件损伤检测[J].*光学精密工程*, 2019, 27(12): 2668-2682.
WANG ZH ZH, DUAN Y X, WANG L, *et al.*. Detecting optical component damage based on neighborhood vector dot contrast image enhancement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2668-2682. (in Chinese)
- [4] GERMER T A. Angular dependence and polarization of out-of-plane optical scattering from particulate contamination, subsurface defects, and surface microroughness[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8798-8805.
- [5] PETERSON G L. A BRDF model for scratches and digs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8495: 84950G.
- [6] HARVEY J E, VERNOLD C L, KRYWONOS A, *et al.*. Diffracted radiance: a fundamental quantity in nonparaxial scalar diffraction theory[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6469-6481.
- [7] 夏志林,曾翔,刘世杰,等.基于波面面形的滤波计算[J].*光学精密工程*, 2016, 24(12): 3033-3040.
XIA ZH L, ZENG X, LIU SH J, *et al.*. Filter calculation based on wavefront figures[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 3033-3040. (in Chinese)
- [8] WERNER S, VELINOV Z, JAKOB W, *et al.*. Scratch iridescence: wave-optical rendering of diffractive surface structure[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 207.
- [9] 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.
- [10] WEIN S J. Small-angle scatter measurement[D]. Tucson: University of Arizona, 1989.
- [11] 黄聪,张科鹏,王翔,等.基于总散射测量的表面质量检测新方法[J].*光学学报*, 2019, 39(7): 0712005.
HUANG C, ZHANG K P, WANG X, *et al.*. Method for surface quality inspection based on total scattering measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0712005. (in Chinese)
- [12] KRYWONOS A. Predicting surface scatter using a linear systems formulation of non-paraxial scalar diffraction[D]. Central Florida: University of Central Florida, 2006.
- [13] 高春甫,邬敏.粗糙表面精度测量系统的研究[J].*光学精密工程*, 2005, 13(6): 697-702.
GAO CH P, WU M. Study of measurement system for rough surface accuracy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(6): 697-702. (in Chinese)
- [14] 陆敏,王治乐,高萍萍,等.用于快速BRDF测量的子孔径扫描傅立叶变换系统[J].*光学学报*, 2020, 40(13): 1329001.
LU M, WANG ZH 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. (in Chinese)

作者简介:



陆敏(1994—),女,吉林白山人,博士研究生,2015年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: 18243087454@163.com



王治乐(1975—),男,河南偃师人,博士,教授,主要从事光学检测技术和光电系统半实物仿真技术方面的研究。E-mail: wangzhile@hit.edu.cn