

基于漫反射优化的金属表面偏振双向反射分布函数

汪方斌^{1,2,4*}, 伊龙^{1,2}, 王峰³, 朱达荣^{1,2,4}, 雷经发^{1,2,4}, 栾庆磊^{1,2}, 刘艳丽^{1,2}

¹安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230601;

²安徽建筑大学建筑机械故障诊断与预警重点实验室, 安徽 合肥 230601;

³偏振光成像探测技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;

⁴工程机械智能制造重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要 为了研究金属表面的偏振特性, 分析光与物体相互作用的物理机理。首先, 根据微面元散射特性, 将目标表面的反射分为镜面反射、漫反射和体散射, 并建立了三分量偏振双向反射分布函数模型。然后, 利用非线性最小二乘法对模型参数进行优化。基于开源数据的仿真实验结果表明, 相比其他函数, 该函数拟合的曲线与实测结果更吻合; 且描述不同金属表面偏振特性时的精度更高, 能准确反映金属材料表面的反射信息, 为研究金属表面的偏振特性提供了新思路。

关键词 材料; 金属表面; 偏振; 体散射; 双向反射分布函数

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1129002

Polarization Bidirectional Reflection Distribution Function of Metal Surfaces Based on Diffuse Reflection Optimization

Wang Fangbin^{1,2,4*}, Yi Long^{1,2}, Wang Feng³, Zhu Darong^{1,2,4}, Lei Jingfa^{1,2,4},
Luan Qinglei^{1,2}, Liu Yanli^{1,2}

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;

²Key Laboratory of Construction Machinery Fault Diagnosis and Early Warning Technology,
Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China;

³Key Laboratory of Polarization Imaging Detection Technology in Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China;

⁴Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Construction Machinery, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract To study the polarization characteristics of metal surfaces, we analyze the physical mechanism of the interaction between light and object. First, the reflection on a target surface is divided into specular reflection, diffuse reflection, and volume scattering according to the scattering characteristics of microfacets, through which a three-component polarization bidirectional reflection distribution function model is built in this paper. Then, the model parameters are optimized by the nonlinear least square method. The simulation results based on open-source data show that in comparison with other functions, the curves fitted by the function are more consistent with the measured results and the polarization characteristics of different metal surfaces can be exactly described; moreover, the reflection information on the surface of metal materials can be accurately disclosed. This study provides new ideas for investigating the polarization properties of metal surfaces.

Key words materials; metal surface; polarization; volume scattering; bidirectional reflection distribution function

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2020-12-30; 录用日期: 2021-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(61871002)、偏振光成像探测技术安徽省重点实验室开放基金(2018-KFJJ-03)、安徽省自然科学基金(2008085UD09, 1808085ME125)、安徽省教育厅高校自然科学重点项目(KJ2020A0487, KJ2019A0795)、安徽省重点研发计划(1804a09020009)、安徽省高校优秀青年人才支持计划(gxyqzd2018058, gxyq2017025)

* E-mail: wangfb@ahjzu.edu.cn

1 引言

双向反射分布函数(BRDF)能很好地表征目标表面的散射特性^[1],目前,目标表面偏振反射特性的研究已经应用于目标识别^[2]、工业生产^[3]、遥感探测^[4]、海面场景识别^[5]等领域,而金属材料是工业生产中最常见的材料,因此,对其表面偏振特性的研究具有重要意义^[6-10]。

BRDF 通常分为经验型 BRDF 和分析型 BRDF 两种类型,经验型 BRDF 简洁高效,但精度较低;而从几何光学角度出发的分析型 BRDF 在数学形式上更简单有效,如目前应用最广的基于微面元理论的分析型 BRDF^[11-12]。Thilak 等^[13]基于微面元偏振 BRDF(pBRDF)模型推导了入射平面反射偏振度的表达式,并利用非线性最小二乘法拟合偏振测量值,反演目标复折射率,验证了模型的准确性。但该模型忽略了目标表面漫反射带来的影响,在表征粗糙表面时误差较大。Hyde 等^[11]引入方向半球反射率表征金属粗糙表面的散射效应,但计算方法复杂,且只适用于理想电导体表面。Wang 等^[14]假设金属表面的反射分为镜面反射、定向漫反射和理想漫反射三个分量,并提出了一种金属材料 pBRDF 模型,有效解决了恒定漫反射导致的误差较大问题。但该模型在表征体散射时过于简单,没有考虑金属表面入射角度与出射角度的影响。朱达荣等^[15]综合考虑了目标遮蔽效应和漫反射,利用 Minnaert 模型对漫反射分量建立了一种六参量模型,并对材料的复折射率进行反演,验证了该模型的准确性。但该模型仍将多次散射与漫反射统一表征为漫反射,存在一定误差。

本文在传统 pBRDF 的基础上,分析了光与金属目标表面相互作用的机理。首先,将漫反射分为体散射和漫反射两部分,建立基于镜面反射、漫反射和体散射三分量的金属表面 pBRDF 模型。然后,将常用于表征微面元分布的高斯分布替换为双参数超柯西分布^[16],用 Minnaert 模型表征金属表面的漫反射特性。最后,以典型金属材料(铜、铝、钢)为对象,利用开源数据进行仿真实验,获取偏振度信息,并利用非线性最小二乘法反演参数,以验证模型的准确性和可靠性。

2 偏振双向反射函数模型

BRDF 能表征材料的散射与反射特性,反映入

射方向光波经过目标反射后的能量在上半球空间的分布情况,可用出射方向的辐亮度与入射到目标表面辐照度的比值 f_r 表示为

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

式中, λ 为入射光的波长, $dL_r(\theta_i, \theta_r; \varphi_i, \varphi_r; \lambda)$ 为出射方向 (θ_r, φ_r) 的微分辐亮度, $dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)$ 为表面上来自入射方向 (θ_i, φ_i) 的微分辐照度, θ_i, φ_i 分别为入射光的天顶角和方位角, θ_r, φ_r 分别为出射光的天顶角和方位角。图 1 为用微面元模型表示的 BRDF 各角度之间的关系,其中,每个微面元都满足菲涅耳反射定律, α 为微面元法线 s 与观测表面法线 n 之间的夹角, β 为相对微面元法线 s 的入射角, $\alpha, \beta, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$ 满足

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \beta} \\ \cos(2\beta) = \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\varphi_r - \varphi_i) \end{cases} \quad (2)$$

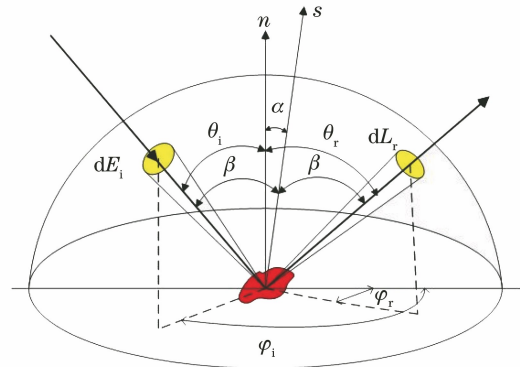


图 1 BRDF 的几何关系

Fig. 1 Geometrical relationship of the BRDF

2.1 金属表面偏振双向反射分布函数

金属表面通过加工、切割等生产工艺,形成了具有一定随机分布规律的表面微细结构,因此,金属表面在一定角度方向会产生较强的波瓣形散射^[17],如图 2 所示。其中,波瓣的宽度取决于微细结构的纹理特征与粗糙程度。

建模时,一般认为波瓣形散射包含镜面反射和漫反射两个部分,镜面反射可通过具有一定随机分布规律的微面元理想反射模型表征。通常认为漫反射服从 Lambert 定律,但在某些情况下这种假设与实际并不相符^[10,18-19]。根据光散射理论可知,一束光照射到金属微面元表面时,部分入射能量被微面元反射回来,形成镜面反射,且表面越光滑,镜面反

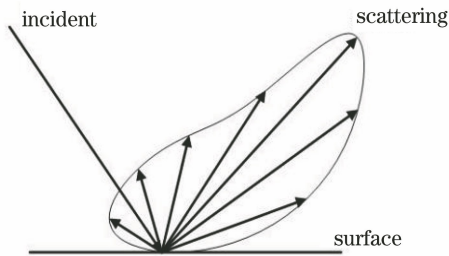


图 2 金属表面的光反射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the light reflection on metal surface

射就越突出;反之,当表面粗糙时,镜面反射分量减

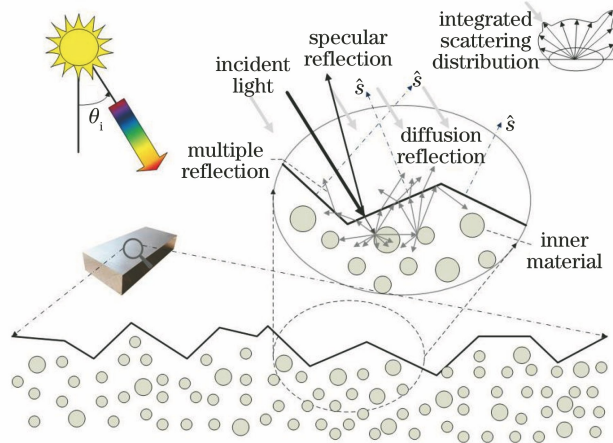


图 3 金属表面的光反射模型

Fig. 3 Light reflection model of the metal surface

基于上述分析,将漫反射与体散射分开进行处理,将金属表面的散射 F 分为镜面反射 F^s 、漫反射 F^d 和体散射 F^v 三部分,可表示为

$$F = k_s F^s + k_d F^d + k_v F^v, \quad (3)$$

式中, k_s 为镜面反射系数, k_d 为漫反射系数, k_v 为体散射系数。

镜面反射是入射光在金属表面进行单次反射形成的,包含金属表面反射光的偏振信息。由于金属表面各点的法线方向不一致,体散射反射光线在不同微面元之间产生多次无规则反射,不具有偏振特性。漫反射是光子在浅层层被弹开并经过多个金属表面路径返回空气形成的散射,由于金属内部电子和微面元分布的随机性,漫反射也不具有偏振特性。

2.2 镜面反射

根据微面元模型,散射光的镜面成份通常采用 Torrance-Sporrow(T-S)模型表征^[22-24],标量 BRDF 的 T-S 模型 f_{BRDF} 可表示为^[5,11,13-15]

$$f_{BRDF}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{P(\alpha)}{4 \cos \alpha \cos \theta_i \cos \theta_r} G(\theta_i, \theta_r, \varphi) F(\lambda), \quad (4)$$

小,如图 3 所示。其中, \hat{s} 为体散射中出射光线的方向,其方向与金属表面微面元的倾斜角度有关。其余能量则透射到金属材料浅层介质,一部分被浅层介质自由电子选择性吸收,另一部分被浅层介质散射回去并穿过分界面回到上层空气介质中。浅层介质金属材料的折射率实部总是大于上层介质空气的折射率,根据菲涅耳折射定律可知,返回上层的光束折射角总是大于其临界角,部分光子被临近微面元多次反射形成体散射,未与临近微面元发生反射的情况被称为漫反射^[20-21]。显然,体散射与漫反射都与金属表面的纹理特征和粗糙程度有关。

式中, $P(\alpha)$ 为微面元的分布情况,可表示为

$$P(\alpha) = \frac{1}{2\pi\sigma^2 \cos^3 \alpha} \exp\left(\frac{-\tan^2 \alpha}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

式中, σ 为金属表面粗糙度的斜度方差, $F(\lambda)$ 为菲涅耳反射系数, $G(\theta_i, \theta_r, \varphi)$ 为遮蔽因子,表示粗糙度表面相邻微面元之间的遮蔽掩饰作用。T-S 模型认为相邻微面元之间呈 V 字形结构,遮蔽效应模型可表示为^[11]

$$G(\theta_i, \theta_r, \varphi) = \min\left(1.0, \frac{2 \cos \alpha \cos \theta_r}{\cos \beta}, \frac{2 \cos \alpha \cos \theta_i}{\cos \beta}\right). \quad (6)$$

可以发现,(4)式以粗糙度为常数的高斯分布表征金属表面微面元分布。当观测方向在镜面反射角附近时,高斯分布能很好地描述微面元分布。但当观测方向远离镜面反射角时,该模型的精度有所降低,尤其是表面粗糙度比较大,没有足够的灵活性描述非镜面的广角反射时。因此,采用带双参数的柯西分布表征金属表面的微面元分布,可表示为^[16]

$$P(\sigma, q) = \frac{(q-1)(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2}}{\pi \cos^3 \alpha [\tan^2 \alpha + (\sqrt{2}\sigma)^2]^q}, \quad (7)$$

式中, q 为与材质特性有关的常量, 有助于确定广角散射, q 越大, 表明散射的包容性越强。

由电磁场理论可知, 光电场矢量垂直分量和平行分量之间的差异可以表征光矢量的偏振传输特性, 即 pBRDF 是从标量 BRDF 模型中演变而来的, 且出射光电场矢量和入射光电场矢量之间可以通过一个散射 Jones 矩阵建立联系^[11], 即

$$\begin{bmatrix} E_s^r \\ E_p^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta_r & \sin \eta_r \\ -\sin \eta_r & \cos \eta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \eta_i & -\sin \eta_i \\ \sin \eta_i & \cos \eta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^i \\ E_p^i \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中,

$$\begin{cases} \cos \eta_i = \frac{\cos \alpha - \cos \theta_i \cos \beta}{\sin \theta_i \sin \beta} \\ \cos \eta_r = \frac{\cos \alpha - \cos \theta_r \cos \beta}{\sin \theta_r \sin \beta} \end{cases}, \quad (9)$$

式中, E_s^i, E_p^i 分别为入射电场的垂直和平行分量, E_s^r, E_p^r 分别为出射电场的垂直和平行分量, η_i 为入射平面与目标表面法线、微面元法线构成平面之间的夹角, η_r 为出射平面与目标表面法线、微面元法线构成平面之间的夹角, r_s, r_p 为菲涅耳反射系数。

实际应用中, 通常用 Mueller 矩阵表征出射光与入射光之间的关系, 因此, 需将 Jones 矩阵转换成 Mueller 矩阵元素^[18], 得到 pBRDF 镜面反射分量 $F_{j,k}^s$ 为

$$F_{j,k}^s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = \frac{1}{4\pi \cos^4 \alpha} \frac{(q-1)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \frac{(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2}}{[\tan^2 \alpha + (\sqrt{2}\sigma)^2]^q} \cdot G(\theta_i, \theta_r, \varphi) \cdot \mathbf{M}_{j,k}^s, \quad (10)$$

式中, $\mathbf{M}_{j,k}^s$ 为 4×4 的 Mueller 矩阵, j, k 为矩阵的行列。

2.3 漫反射

一方面, 金属表面的光具有可逆性, 漫反射分量不仅与出射角有关, 还与入射角有关; 另一方面, Minnaert 模型能反映反射系数随角度的缓慢变化, 可用来表征 BRDF 漫反射分量, 且满足互易性。因此, 用 Minnaert 模型将漫反射表示为^[15]

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{1}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^{o-1}, \quad (11)$$

式中, o 为待定常数, 取值范围为 $(0, 1)$, 当 $o = 1$ 时, 该模型可转化为 Lambert 模型。

Minnaert 模型中包含的 $(\cos \theta_i \cos \theta_r)^{o-1}$ 项能很好地反映漫反射强度随角度的变化情况, 同时满足互易性。虽然微面元 Minnaert 模型的漫反射分量不能体现偏振特性, 但对反射总能量是有贡献的, 因此, 在 Minnaert 模型中加入偏振特性, 则 pBRDF 中的漫反射分量可表示为

$$\mathbf{F}_{j,k}^d = \frac{1}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^c \mathbf{M}_{j,k}^d, \quad (12)$$

式中, $\mathbf{M}_{j,k}^d$ 为漫反射的退偏矩阵, 仅参数 $M_{1,1}^d = 1$, 其余元素均为 0, c 为待定常数, 取值范围为 $(-1, 0)$ 。

2.4 体散射

体散射类似于漫反射, 由于实际中金属表面的沟槽较多, 漫反射与表面粗糙度相关度较大, 所占散射能量的成分随着粗糙度的增大而增大, 而镜面反射占比较小。原因是反射光在离开金属表面之前与相邻微面元发生碰撞的次数增加, 多次反射效应更显著, 如图 4 所示。

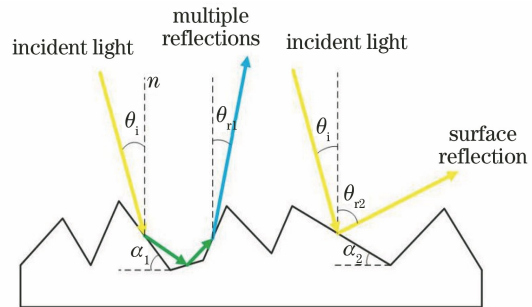


图 4 目标表面多次反射示意图

Fig. 4 Schematic diagram of multiple reflections on the target surface

为了简化体散射分量的计算, 通常用 Lambert 模型近似表征体散射, 但该模型的精确度较低。考虑到金属表面的加工与形成过程, 即体散射与出射角有关, 金属材料的体散射在反射角为 0° 附近达到峰值; 且反射角越大, 体散射值越小。对于金属材料来说, 多次反射光的空间分布是不均匀的, 其大小与反射角有关, 服从正态分布^[14], 因此, 可将体散射分量表示为

$$F_{j,k}^v = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp(-\theta_r^2/2\sigma_v^2) \mathbf{M}_{j,k}^v, \quad (13)$$

式中, $\mathbf{M}_{j,k}^v$ 为体散射的退偏矩阵, 其中, 仅 $M_{1,1}^v = 1$, 其余元素均为 0, σ_v 为待定系数。

2.5 优化模型

联立(10)式、(12)式、(13)式, 得到基于上述漫反射优化后的 pBRDF 模型为

$$\mathbf{F}_{j,k} = k_s \frac{1}{4\pi \cos^4 \alpha} \frac{(q-1)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \times \frac{(\sqrt{2}\sigma)^{2q-2}}{[\tan^2 \alpha + (\sqrt{2}\sigma)^2]^q} G(\theta_i, \theta_r, \varphi) \cdot \mathbf{M}_{j,k}^s + \frac{k_d}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^c \mathbf{M}_{j,k}^d + \frac{k_v}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp(-\theta_r^2/2\sigma_v^2) \mathbf{M}_{j,k}^v \quad (14)$$

假设入射光源为非偏振的自然光,用斯托克斯矢量表示为 $\mathbf{E}_i = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$,则散射光的斯托克斯矢量 \mathbf{L}_i 为

$$\mathbf{L}_r = \mathbf{F}_{j,k} \cdot \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} F_{00} \\ F_{10} \\ F_{20} \\ F_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{00}^s + F_{00}^v + F_{00}^d \\ F_{10}^s \\ F_{20}^s \\ F_{30}^s \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中, $F_{00}, F_{10}, F_{20}, F_{30}$ 为 pBRDF Mueller 矩阵中的元素。忽略圆偏振分量^[15],对 pBRDF 进行降维处理,得到

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} F_{00} \\ F_{10} \\ F_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{00}^s + F_{00}^v + F_{00}^d \\ F_{10}^s \\ F_{20}^s \end{bmatrix}. \quad (16)$$

根据偏振度定义,得到散射光的线偏振度 (DoLP) 为

$$d_{\text{DoLP}} = \frac{\sqrt{F_{10}^s{}^2 + F_{20}^s{}^2}}{k_s F_{00}^s + k_v F_{00}^v + k_d F_{00}^d}. \quad (17)$$

3 模型参数反演与分析

3.1 参数反演

为了验证优化后 pBRDF 模型的有效性,选用铜和铝进行参数反演,并将结果与文献[13]的参考模型及开源数据进行对比。模型参数采用非线性最小二乘(L-M)法求解。用模型仿真值与实验测量值

的最小标准方差作为模型参数选择的最佳标准,构建的优化目标函数为

$$\min \Delta E(n, k_m, \sigma, k_s, k_d, k_v, q, c, \sigma_v) = \frac{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} [X_{\text{DoLP}}(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi) - X_{\text{DoLP}}^m(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)]^2}{\sum_{\theta_i} \sum_{\theta_r} [X_{\text{DoLP}}^m(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)]^2}, \quad (18)$$

式中, n, k_m 为材料表面的复折射率, $X_{\text{DoLP}}(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)$ 为模型仿真值, $X_{\text{DoLP}}^m(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi)$ 为实验测量值。由(18)式可知,模型参数有 9 个,各参数均在定义范围内取值作为反演起点^[13,15-16],经过多次迭代,当目标函数收敛到一定程度时,就可以确定模型最优参量或近似最优参量。表 1 是波长为 650 nm 时,铜、铝表面复折射率的真实值 (Truth value)^[13,25]、参考模型反演值 (Reference value)^[13]、优化模型反演值 (Estimated value)。图 5 分别为铜和铝表面的开源实测数据、参考模型^[13]、本模型的计算结果,可以发现,参考模型得到的计算结果与开源实测数据基本一致,但铜、铝表面复折射率反演结果却不理想,误差较大。相比参考模型,本模型与开源实测数据的吻合度更高,且铜、铝表面复折射率的精度也较高。这表明优化模型加入体散射成分并考虑入射和观测角对漫反射影响是必要的,采用优化模型计算相关数据时,能得到表征金属表面更准确的偏振信息。

表 1 不同模型的参数反演结果

Table 1 Parameter inversion results of different models

| Sample | Truth value | | Reference value | | Ours | |
|----------|-------------|-------|-----------------|-------|------|-------|
| | n | k_m | n | k_m | n | k_m |
| Copper | 0.40 | 2.95 | 0.54 | 3.19 | 0.41 | 2.86 |
| Aluminum | 1.24 | 6.60 | 1.37 | 3.97 | 1.25 | 6.58 |

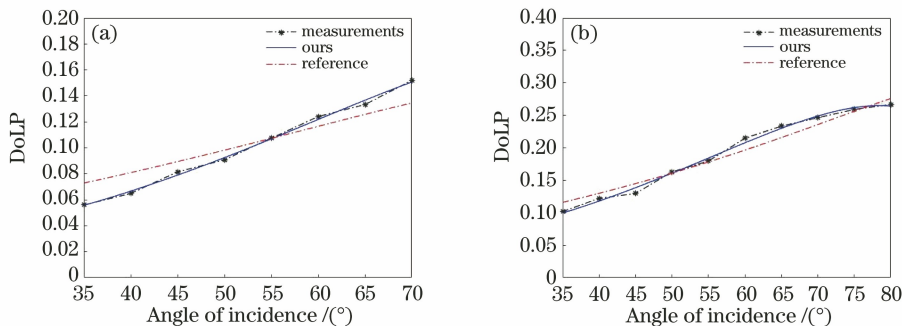


图 5 不同金属的 DoLP 曲线。(a)铜;(b)铝

Fig. 5 DoLP curves of different metals. (a) Copper; (b) aluminum

3.2 实验验证

为了验证优化模型在实际应用中的有效性, 选用 45 # 钢进行实验, 采用 Bossa Nova Technologies 公司的 SALSAs 液晶偏振相机进行偏振信息探测实验。将实测的 45 # 钢表面偏振度信息用优化模型的拟合, 并对结果进行分析验证。用 KEYENCE 公司的 VR-3000 型三维轮廓仪进行观测, 得到材料表面的粗糙度 $\sigma = 0.67 \mu\text{m}$; 45 # 钢表面复折射率 $n = 2.07$, $k_m = 2.90$ ^[25]。实验装置原理如图 6 所示, 主要包括光源、转动装置、探测器等。为保证实验不受环境中杂乱散光干扰, 实验在暗室内进行。

实验过程中, 相机曝光时间为 5 ms, 增益为 0 dB, 测量装置相对方位角 $\Delta\varphi = \varphi_r - \varphi_i = 180^\circ$, 波长为 546 nm, 入射角分别为 $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$, 观测角为 $20^\circ \sim 60^\circ$, 每隔 5° 取多次测量结果的平均值作为观测值。分别用本模型和文献[13]中的模型进行拟合, 结果如图 7 所示。对 45 # 钢的复折射率和粗糙

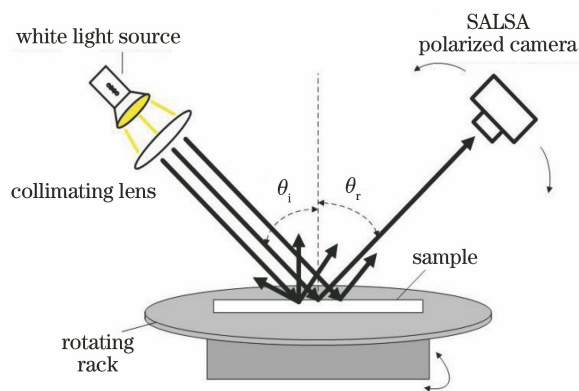


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Diagram of the experimental device

度进行反演, 并对比不同分布函数对反演结果的影响, 结果如表 2 所示。可以发现, 未考虑漫反射和体散射情况下, 金属表面的偏振度普遍偏高, 原因是漫反射和体散射具有退偏效应, 且对观测总能量是有贡献的。而考虑体散射及入射角、观测角对漫反射影响的优化模型更适用于描述金属表面的偏振特性。

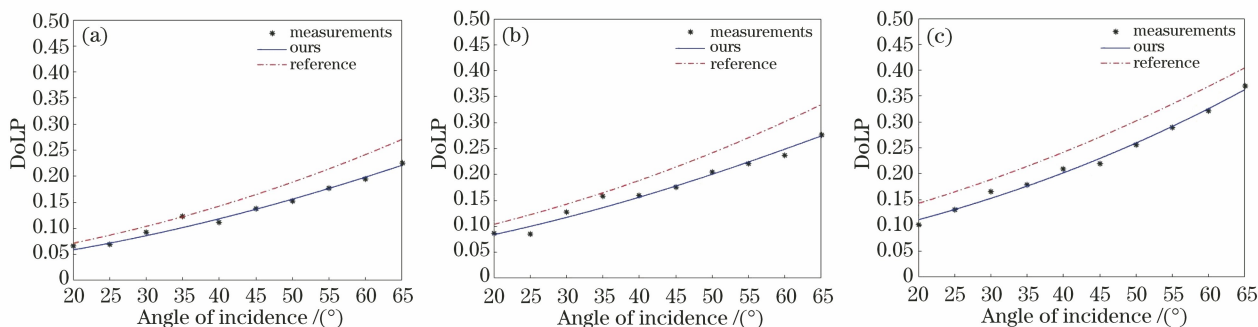


图 7 不同入射角 DoLP 的测量与仿真结果。(a) $\theta_i = 30^\circ$; (b) $\theta_i = 40^\circ$; (c) $\theta_i = 50^\circ$

Fig. 7 Measurement and simulation results of DoLP at different incident angles. (a) $\theta_i = 30^\circ$; (b) $\theta_i = 40^\circ$; (c) $\theta_i = 50^\circ$

表 2 不同模型反演的参数

Table 2 Inversion parameters of different models

| Parameter | Gauss | Cauchy | Reference |
|-----------|-------|--------|-----------|
| n | 1.86 | 2.28 | 2.07 |
| k_m | 2.45 | 2.76 | 2.90 |
| σ | 0.42 | 0.70 | 0.67 |

4 结 论

基于微面元散射特性, 将金属表面的反射分为镜面反射、漫反射和体散射三部分, 并对传统 pBRDF 模型进行优化, 提出了基于漫反射优化的金属表面 pBRDF 模型, 减小了仅考虑单一镜面反射带来的误差。利用开源数据和 45 # 钢进行金属表面偏振光学实验, 利用最小 L-M 法对 pBRDF 模型参量进行反演, 并将本模型与参考模型数值模拟结果、实验数据进行对比。实验结果表明, 由于优化模

型考虑了体散射及入射角、观测角对漫反射的影响, 其拟合的 DoLP 曲线与实测数据的吻合度更高, 优化模型的精度也更高。

参 考 文 献

- [1] Pan J H, Chen Q, Qian W X, et al. Results of a new polarimetric BRDF simulation of metallic surfaces [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 72: 58-67.
- [2] Yang M, Xu W B, Sun Z Y, et al. Degree of polarization modeling based on modified microfacet pBRDF model for material surface [J]. Optics Communications, 2019, 453: 124390.
- [3] Fontanot T, Audenaert J, Hanselaer P, et al. BRDF characterization of Al-coated thermoplastic polymer surfaces [J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2020, 17(5): 1195-1205.
- [4] Zhang Y, Zhang Y, Zhao H J, et al. Improved

- atmospheric effects elimination method for pBRDF models of painted surfaces [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16458-16475.
- [5] Chu J K, Tian L B, Cheng H Y, et al. Simulation of polarization distribution model under wavy water surfaces dominated by skylight [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2001002.
褚金奎, 田连标, 成昊远, 等. 天空光主导的波浪水面下偏振分布模型仿真 [J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2001002.
- [6] Noble H, Lam W S, Chipman R A. Inferring the orientation of texture from polarization parameters [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7461: 746109.
- [7] Shi W C, Zheng J M, Li Y, et al. Measurement and modeling of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) on cutting surface based on the coaxial optical microscopic imaging [J]. *Optik*, 2018, 170: 278-286.
- [8] Liu Y L, Yu K, Liu Z L, et al. Polarized BRDF measurement of steel E235B in the near-infrared region: based on a self-designed instrument with absolute measuring method [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 91: 78-84.
- [9] Jin L H, Taguchi T, Kondoh E, et al. Polarization characteristics of diffraction scattering from metal rough surface [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 421: 565-570.
- [10] Wang F B, Sun F, Zhu D R, et al. Metal fatigue damage assessment based on polarized thermography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1412002.
汪方斌, 孙凡, 朱达荣, 等. 一种基于偏振热像的金属疲劳损伤评估方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1412002.
- [11] Hyde M W, Schmidt J D, Havrilla M J. A geometrical optics polarimetric bidirectional reflectance distribution function for dielectric and metallic surfaces [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 22138-22153.
- [12] Feng W W, Li J H, Wei Q N, et al. A hybrid model of polarized BRDF for rough surfaces [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53(5): 336-341.
- [13] Thilak V, Voelz D G, Creusere C D. Polarization-based index of refraction and reflection angle estimation for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(30): 7527-7536.
- [14] Wang K, Zhu J P, Liu H. Degree of polarization based on the three-component pBRDF model for metallic materials [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(2): 258-263.
- [15] 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.
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.
- [16] 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.
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.
- [17] Collin C, Pattanaik S, Likamwa P, et al. Discrete ordinate method for polarized light transport solution and subsurface BRDF computation [J]. *Computers & Graphics*, 2014, 45: 17-27.
- [18] Wang J J, Wang P, Wang F Y, et al. Modified model of polarized bidirectional reflectance distribution function on material surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(1): 0126001.
汪杰君, 王鹏, 王方原, 等. 材料表面偏振双向反射分布函数模型修正 [J]. *光子学报*, 2019, 48(1): 0126001.
- [19] Kalantari E, Molan Y E. Analytical BRDF model for rough surfaces [J]. *Optik*, 2016, 127(3): 1049-1055.
- [20] Zhu J P, Wang K, Liu H, et al. Modified model of polarized bidirectional reflectance distribution function for metallic surfaces [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 99: 160-166.
- [21] Kumar H, Ramkumar J, Venkatesh K S. Surface texture evaluation using 3D reconstruction from images by parametric anisotropic BRDF [J]. *Measurement*, 2018, 125: 612-633.
- [22] Prokhorov A V, Hanssen L M. Algorithmic model of microfacet BRDF for Monte Carlo calculation of optical radiation transfer [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5192: 141-157.
- [23] Priest R G, Gerner T A. Polarimetric BRDF in the microfacet model: theory and measurements [J]. *Proceedings of the 2000 Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors*, 2020, 1: 169-181.
- [24] Yang X D, Gao M. Study on properties of influence factors of polarization-based T-S BRDF model [J]. *Optik*, 2018, 172: 628-635.
- [25] Luxpop is the database for thin film and bulk index of refraction and photonics calculations [EB/OL]. (2020-03-15) [2020-11-10]. <http://www.luxpop.com/>.