

DOI:10.16136/j. joel. 2023. 11. 0532

太阳能电池板表面偏振双向反射分布函数

朱达荣^{1,2,3*}, 杨 岗^{1,2}, 汪方斌^{1,2,3}, 王端标^{1,2}, 龚 雪¹

(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. 安徽省偏振成像检测技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 太阳能电池片是光伏发电系统的核心部件, 其光学反射特性对光伏组件的发电效率和缺陷检测的研究有着重要的理论意义, 但实际应用中难以对其直接观察与测量。本文依据菲涅尔定律与多层介质模型研究了光伏组件的光学传输过程。首先基于微面元理论建立太阳能电池片表面的双向反射传输模型; 然后借助多层介质模型推导了太阳能电池板偏振双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF), 通过偏振相机搭建光伏组件光学偏振特性观测平台并开展偏振实验。在此基础上, 利用遗传算法从实验测量数据中反演模型的参量数值, 并得出偏振度信息随观测角变化的仿真曲线。通过实验表明, 本文提出的光学传输模型仿真值与实验观测数据能够较好的吻合。该模型为太阳能电池板表面缺陷检测提供新的理论参考。

关键词: 双向反射分布函数(BRDF); 偏振; 太阳能电池板; 散射

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)11-1193-08

Polarization bidirectional reflection distribution function of solar panel surface

ZHU Darong^{1,2,3*}, YANG Gang^{1,2}, WANG Fangbin^{1,2,3}, WANG Duanbiao^{1,2}, GONG Xue¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China; 2. Key Laboratory of Construction Machinery Fault Diagnosis and Early Warning Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China; 3. Key Laboratory of Polarization Imaging Detection Technology in Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: Solar cell is the core component of photovoltaic power generation system, their optical reflection characteristics have an important theoretical significance for the research of power generation efficiency and defect detection of PV module, but it is difficult to observe and measure them directly in practical applications. In this paper, the optical transmission process of PV module is studied based on Fresnel's law and multilayer media model. Firstly, the bidirectional reflection transmission model of solar cell surface is established based on the microfacet theory. Then the polarization bidirectional reflection distribution function (BRDF) of the solar panel is derived with the help of multilayer media model, the optical polarization characteristics observation platform of PV module is built by polarization camera and polarization experiments are carried out. Based on the above mentioned model, the genetic algorithm is used to invert the model parameter from the experimental measurement data and the simulation curve of polarization information with the observation angle is derived. The results show that the experimental observation data of the optical transmission model proposed in this paper can be in good agreement with the simulated values, which provides a new theoretical reference for studying the defect detection of solar panel surfaces.

Key words: bidirectional reflectance distribution function (BRDF); polarization; solar panel; scattering

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

收稿日期: 2022-11-10 修订日期: 2022-12-14

基金项目: 安徽省自然科学基金(2008085UD09)、安徽省教育厅高校自然科学重点项目(KJ2020A0487)、安徽省教育厅高校研究生科学研究项目(YJS20210512)和安徽省教育厅高校协同创新项目(GXXT-2021-010)

0 引言

近年来,随着“双碳”战略的实施,我国新能源领域发展迅速,光伏电站的建设规模得到了迅猛增长。光伏电站发电的核心设备是光伏组件,长期安装在户外,所处环境相对恶劣,且在运输安装过程中可能发生的损伤也会在使用中显现出来,产生碎片、隐裂等缺陷,使光伏组件性能劣化而影响光伏电站的发电效率,因此,在实际运行维护过程中,需要及时对光伏组件的性能进行检测,以便对光伏电站进行实时维护,保障光伏电站的稳定高效运行。

传统方法主要是通过对光伏组件工作时的电流、电压等电特性进行分析,判断是否存在缺陷,但无法准确对缺陷进行定位^[1]。机器视觉检测方法是通过对相机获取光伏组件图像,再利用机器视觉的算法检测并识别缺陷,目前常用的方法有可见光成像、电致发光成像、光致发光成像、红外热成像。如 LIN 等^[2]提出了一种新颖的太阳能电池缺陷自动检测与分类框架,通过电致发光成像技术得到光伏组件上的裂纹、缺角等缺陷的图像,并提取特征进行训练后得到了较高的识别与分类精度。PENG 等^[3]基于光致发光成像技术,结合形态学和图像处理的方法,根据裂纹、划痕的不同特征进行区分、检测,提高了电池片的检测精度与时间。CHRIS 等^[4]提出了一种基于无人机的自主解决方案,在无人机上安装可见光相机和热红外相机,自动检测电站中数百或数千个光伏组件中故障光伏组件并精确地定位。

但上述研究主要是通过图像处理、神经网络等方法处理采集到的图像,没有解释光伏组件缺陷的成像机理,也并未提出提高缺陷成像质量的方法。光伏组件的损坏一般都伴随着形貌的改变,例如裂纹、缺角、断栅、腐蚀等。从光学成像角度看,物体表面微观形貌的变化会改变光线在此处的反射及散射,特别是在光线入射到缺陷表面时因漫反射和体散射而存在退偏效应^[5],影响相机获取的目标图像信息。根据物理学知识,光的反射偏振特性能够反映目标表面粗糙度、纹理等几何信息与应力、双折射等物理信息。因此,通过偏振成像能够增强光伏组件的缺陷特征,提高目标区域的对比度。近年来,随着偏振光学与偏振成像技术的发展,利用偏振光开展物理表面缺陷检测的实验研究越来越多^[6],其中利用双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)进行研究的居多。BRDF 可以有效地描述目标表面所在半球空间的反射分布特性^[7],

例如, WANG 等^[8]根据 BRDF 定义,建立并完善了多光谱 BRDF 测量平台,对空间目标材料微观特征进行分析,构建符合高斯分布的微面元模型,对太阳能电池进行了光谱 BRDF 测量;陈宏毅等^[9]基于微面元模型建立并分析了太阳能电池板等材料的红外偏振特性,认为偏振度(degree of polarization, DOP)可以有效凸显太阳能电池板表面的细节信息。但在实际应用中,太阳能电池板除了太阳能电池片外,还有正面的封装玻璃、乙烯-醋酸乙烯酯(ethylene-vinyl acetate, EVA)胶组成表面支撑结构,其光学反射特性均与太阳能电池片存在一定的差异^[10],太阳能电池板 BRDF 测量的准确性难以保证。刘燕^[11]等通过偏振 BRDF 模型研究不同材料空间目标物在不同条件下 DOP 的变化,并将该结论应用于材料的识别与分类,取得了较好的效果,但同时也提出,材料的 DOP 受人射角、方位角以及复折射率影响。

综上所述,利用偏振成像能够提高太阳能电池板目标的对比度、增强缺陷的识别能力,鉴于目前光伏组件表面的偏振特性研究相对较少,本文针对太阳能电池板表面可见光波段偏振光学特性展开研究。首先,通过微面元理论与多层介质模型,构建太阳能电池板光学偏振模型;然后,以微观结构复杂的电池片和太阳能电池板为研究对象,搭建实验平台,获取不同角度入射光照射情况下多角度观测数据并解析;再利用遗传算法对 DOP 进行拟合,并对太阳能电池板表面的偏振特性进行分析。

1 偏振 BRDF

1.1 光伏组件结构和辐射传输模型

太阳能电池片通常由硅片和特殊金属组成,且太阳能电池板结构从上到下包括覆盖玻璃、EVA 胶、带电极的硅太阳能电池和背面玻璃,如图 1 所示。

其他类型的太阳能电池板的材料可能与这类太阳能电池板不同,但它们表面结构形式大致相同。

光在达到电池片前需先透过两层结构(EVA、玻璃),发生折射、散射的特性差异很大,因此单一电池片的散射特性不能反映整个太阳能电池板的散射特性^[10]。基于此,本文建立如图 2 所示辐射传输模型^[12]。鉴于目前光伏组件的封装玻璃大多以压花玻璃为主,全向透射率能达到 96%,因此不考虑空气-玻璃界面反射光 $S_{r,01}$ 所带来的强度信息;另一方面,压花玻璃表面呈六边形凹坑,其表面散射的退偏特性较强,因此本文未单独考虑其散射偏振特性;另外,对于封装玻璃与 EVA 层之间的反射光偏振特性 $S_{r,12}$,由于二者折射率相差非常小,本文忽略不计^[13]。

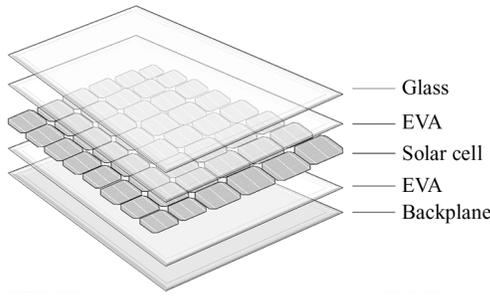


图 1 太阳能电池板截面图

Fig. 1 The cross-section of the solar panel

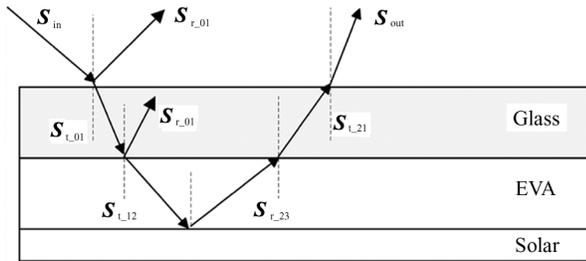


图 2 光在太阳能电池板表面的传输过程

Fig. 2 The process of light transmission on the surface of solar panel

物理上,当光传输到物体表面并发生作用时,光的相位、幅值等偏振特性会发生改变。对于偏振光来说,通常使用一个四阶的穆勒矩阵 M 来表示光与物体表面发生的作用,其定义为:

$$M = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

假设入射光的斯托克斯矢量为 S_{in} , 则出射光的斯托克斯矢量 S_{out} 可以表示为^[14]:

$$S_{out} = M \times S_{in} \quad (2)$$

在图 2 中,入射光照射到太阳能电池板表面,在 01 介面发生折射,产生折射光 $S_{t,01}$ 。 $S_{t,01}$ 在第一层介质中继续向下传播,然后在玻璃与 EVA 的介面(12 介面)发生折射,产生折射光 $S_{t,12}$ 。而由于第三层电池片为非透明粗糙介质, $S_{t,12}$ 在 23 界面处仅发生反射过程,产生反射光 $S_{r,23}$ 。并再依次在 12 介面、01 介面发生折射产生折射光 $S_{t,21}$ 、 S_{out} , 构成了太阳能电池板表面的反射偏振光。因此,太阳能电池板的光传输方程可以表示为:

$$\begin{cases} S_{t,01} = M_{01} \times S_{in} \\ S_{t,12} = M_{12} \times S_{t,01} \\ S_{r,23} = M_{23} \times S_{t,12} \\ S_{t,21} = M_{21} \times S_{r,23} \\ S_{out} = M_{10} \times S_{t,21} \end{cases} \quad (3)$$

式中, M_{01} 表示光从介质 0 到介质 1 发生折射时的穆勒矩阵, M_{12} 表示光从介质 1 到介质 2 发生折射时的穆勒矩阵, M_{21} 表示光从介质 2 到介质 1 发生折射时的穆勒矩阵, M_{10} 表示光从介质 1 到介质 0 发生折射时的穆勒矩阵,而 M_{23} 表示光在电池片(23 介面)发生镜面反射时的穆勒矩阵。

1.2 电池片表面 BRDF

BRDF 描述光源从某一方向入射时,观测目标半球内各方向的光学反射特性,用出射方向的辐亮度与入射到目标表面辐照度的比值 f 表示^[15]:

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad (4)$$

式中,下标 r 代表出射,i 代表入射, φ_r 表示出射的方位角, θ_r 表示出射方向的天顶角, φ_i 表示入射的方位角, θ_i 表示入射的天顶角, $dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 表示来自出射方向 (θ_r, φ_r) 的微分辐亮度, $dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)$ 是表示来自入射方向 (θ_i, φ_i) 的微分辐照度, λ 表示入射光的波长。如图 3 所示,对于粗糙表面通常用微面元模型表示,微面元满足菲涅尔反射定律。

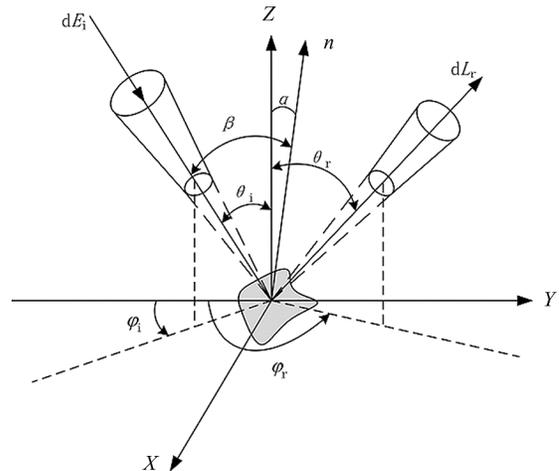


图 3 微面元模型角度关系

Fig. 3 Angle relation of microfacet model

图中, α 是微面元法线 n 与主坐标系 Z 轴间夹角, β 表示微面元法线 n 所在平面的光源入射角。其中, $\alpha, \beta, \theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$ 满足式(5):

$$\begin{cases} \cos\alpha = \frac{\cos\theta_i + \cos\theta_r}{2\cos\beta} \\ \cos(2\beta) = \cos\theta_i\cos\theta_r + \sin\theta_i\sin\theta_r\cos(\varphi_r - \varphi_i) \end{cases} \quad (5)$$

由于电池片是并不是光滑的,其表面存在随机分布的细微结构。本文参考相关研究成果,将粗糙表面散射 F 分为 3 部分,即镜面反射 F^s 、漫反射 F^d 、体散射 F^l [16],即:

$$F = k_s F^s + k_d F^d + k_l F^l, \quad (6)$$

式中, k_s 、 k_d 、 k_l 分别表示镜面反射系数、漫反射系数、体散射系数。镜面反射表示入射光在粗糙物体表面单次反射后平行地向一个方向反射形成,具有偏振特性。漫反射为光子由浅表层弹开并经过粗糙表面返回空气的散射,由于微面元分布不均匀,不具有偏振特性。体散射为光在相邻微面元间多次反射形成,同样不具有偏振特性。其中镜面反射使用 T-S 模型(Tottance-Sporrow)表征[17]:

$$f_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{P(\alpha)}{4 \cos \alpha \cos \theta_i \cos \theta_r} G(\theta_i, \theta_r, \varphi) F(\lambda), \quad (7)$$

式中, $F(\lambda)$ 为菲涅尔反射系数, $P(\alpha)$ 为粗糙电池片表面微面元的概率分布函数,本文利用高斯函数进行表征,可表示为:

$$P(\alpha) = \frac{1}{2\pi\sigma^2 \cos^3 \alpha} \exp\left(-\frac{\tan^2 \alpha}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

式中, σ 为电池片的表面粗糙度, $G(\theta_i, \theta_r, \varphi)$ 表示几何衰减因子。

由于晶体硅电池组件在生产过程中需要对其表面进行制绒工艺,形成如图 4 所示的绒面,降低太阳光的反射率,相邻微面元间呈 V 字结构,遮蔽函数可以表示为:

$$G(\theta_i, \theta_r, \lambda) = \min\left(1; \frac{\cos \alpha \cos \theta_r}{\cos \beta}; \frac{\cos \alpha \cos \theta_i}{\cos \beta}\right). \quad (9)$$

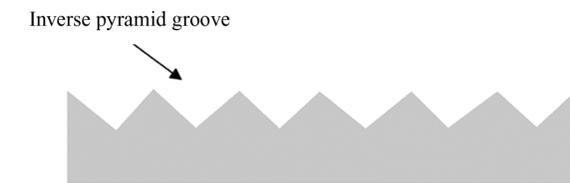


图 4 电池片绒面
Fig. 4 Cell texture

本文采用 Minnaert 模型表征漫反射部分[18],即:

$$f_d(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\rho_0}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^{k-1}, \quad (10)$$

式中, k 为未知系数,取值范围在(0,1)。

而体散射部分的反射光在空间的分布并不均匀,且大小与反射角相关,服从正太分布,本文将其

表示为[16]:

$$f_l(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{\theta_r^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad (11)$$

式中, σ_1 为待定系数。

1.3 太阳能电池板表面偏振 BRDF

偏振是光作为电磁横波的自然属性,其传输特性主要通过光矢量的平行振动分量和垂直振动分量的振幅和两者之间的相位差异来表示。因此有必要将标量的 BRDF 模型扩展成偏振 BRDF,将出射光矢量与入射光矢量通过琼斯矩阵建立联系[19],即:

$$\begin{bmatrix} E_s^r \\ E_p^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta_i & \sin \eta_i \\ -\sin \eta_r & \cos \eta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \eta_i & -\sin \eta_i \\ \sin \eta_i & \cos \eta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s^i \\ E_p^i \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中:

$$\begin{cases} \cos \eta_i = \frac{\cos \alpha - \cos \theta_i \cos \beta}{\sin \theta_i \sin \beta} \\ \cos \eta_r = \frac{\cos \alpha - \cos \theta_r \cos \beta}{\sin \theta_r \sin \beta} \end{cases}, \quad (13)$$

式中, s, p 表示垂直和水平, r_s 、 r_p 为菲涅尔反射系数, E_s^i 、 E_p^i 、 E_s^r 、 E_p^r 分别表示入射光中、出射光中的垂直偏振分量、水平偏振分量, η_i 、 η_r 分别表示微面元法线与主坐标系 Z 轴所确定的平面与入射平面间的夹角和与出射平面间的夹角。

由此可得到基于太阳能电池片表面的偏振 BRDF:

$$\begin{aligned} F &= k_s \frac{1}{8\pi\sigma^2 \cos^4 \alpha' \cos \theta_i' \cos \theta_r'} \times \\ &\exp\left(-\frac{\tan^2 \alpha'}{2\sigma^2}\right) G(\theta_i', \theta_r', \varphi) \mathbf{M}^s + \\ k_d &\frac{1}{\pi} (\cos \theta_i' \cos \theta_r')^c \mathbf{M}^d + k_l \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{\theta_r'^2}{2\sigma_1^2}\right) \mathbf{M}^l, \end{aligned} \quad (14)$$

式中, θ_i' 为入射光角度 θ_i 经过钢化玻璃层和 EVA 层产生的折射角,表示上述公式中光在粗糙电池片表面的入射角; θ_r 表示光在粗糙电池片表面产生的反射光角度,可由 θ_i 经斯涅耳定律求解,如式(16)所示; α' 为电池片上主坐标系 Z 轴与微面元法线之间的夹角,由式(2)求出; \mathbf{M}^s 即为电池片镜面反射分量的穆勒矩阵 \mathbf{M}_{23} ; \mathbf{M}^d 为电池片上漫反射分量的退偏矩阵,矩阵中仅 $\mathbf{M}_{00}^d = 1$,其他数值均为 0; c 的取值范围(-1,0),为待定系数; \mathbf{M}^l 为电池片上体散射分量的退偏矩阵,矩阵中仅 $\mathbf{M}_{00}^l = 1$,其他数值均为 0; σ_1 为待定系数。由于太阳能电池板的钢化玻璃层和

EVA 层透射率都为固定常数,可融入上述公式各反射系数中,故忽略。

则太阳能电池板表面的偏振光传输模型可表示为:

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M}_{10} \times \mathbf{M}_{21} \times \mathbf{F} \times \mathbf{M}_{12} \times \mathbf{M}_{01} \times \mathbf{S}_{in}, \quad (15)$$

假设入射光为非偏振态自然光时,入射光可用斯托克斯矢量表示为 $\mathbf{S}_{in} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$,而圆偏振分量在自然光中占比很少,因此可对 \mathbf{S}_{out} 进行降维,则可求得反射光的斯托克斯矢量:

$$\mathbf{S}_{out} = \begin{bmatrix} S_{out0} \\ S_{out1} \\ S_{out2} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

由 DOP 的定义可得反射光 DOP 为^[16]:

$$DOP = \frac{\sqrt{(S_{out1})^2 + (S_{out2})^2}}{S_{out0}}. \quad (17)$$

2 偏振双向反射函数模型验证与分析

2.1 实验验证

为验证假设模型在实际应用中的有效性,本文采用 Bossa Nova Technologies 公司的 SALSAs 偏振相机对太阳能电池板进行偏振信息的实验探究,将测得的太阳能电池板表面 DOP 信息与模型进行拟合,并对结果进行验证分析。为了不破坏实验探究所使用的太阳能电池板,本实验取与太阳能电池板内电池片相同材料的多晶太阳能电池片,使用 KEYENCE 公司的 VR-3000 型三维轮廓仪观测其表面形貌,测量得目标表面粗糙度 $\sigma = 0.12 \mu\text{m}$,作为实验研究的太阳能电池板内电池片粗糙度。当波长为 435 nm 时,太阳能电池片表面复折射率选取为 $n = 4.859, k = 0.183$;钢化玻璃层折射率取 1.51, EVA 层折射率为 1.49^[20]。实验设备原理如图 5 所示,实验设备实物图如 6 所示,主要包括 LED 光源、SALSAs 偏振相机、转动装置、探测器、光学实验平台、太阳能电池板等。为保证实验过程中不受杂光影响,实验需在搭建的暗室进行。

实验过程中,关闭偏振相机的增益设置,将曝光时间参数设置为 5 ms^[16],选取探测波长为 435 nm 进行实验,以 30°、45°、60°三个角度作为入射角,观测角从 10°—80°,每 5°测量一次 DOP 实验数据,取主平面进行实验探究,入射的方位角与出射方位角之差 $\Delta\varphi = |\varphi_r - \varphi_i| = 180^\circ$,计算 DOP 范围,取栅线围成的单个小方格(不包括栅线),为了减少实验数据的误差,每个角度的实验数据进行 5 次测量,取其平均值作为该测量角度的 DOP 数值。

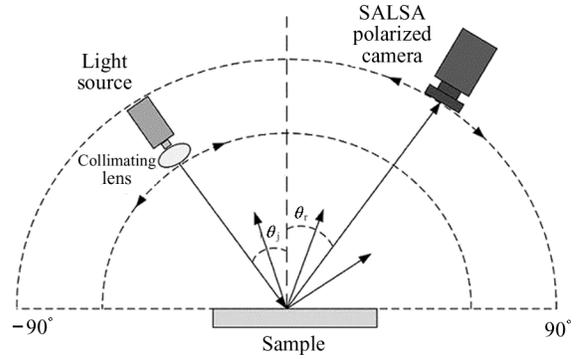


图 5 实验设备示意图

Fig. 5 Diagram of experimental device

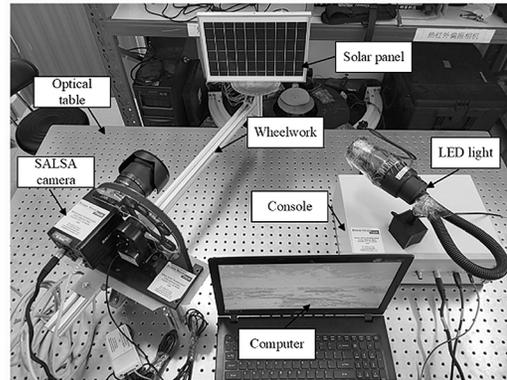


图 6 实验设备实物图

Fig. 6 Physical drawing of experimental device

2.2 太阳能电池板偏振特性分析

为了验证模型的准确性,本文模型参数采用遗传算法求解。选取标准均方差(root mean square, RMS)计算拟合误差,将仿真数值与实验测量数值的标准 RMS 作为模型参数选择的标准,表达式为:

$$R = \frac{\sum_{\theta_r} (P' - P)^2}{\sum_{\theta_r} P^2}, \quad (18)$$

式中, P' 为仿真偏振度值, P 为实验测得的偏振度值。由式(14)可知,模型参数有 5 个,给定参数限定的范围,经过多次迭代,确定模型的最优参量。

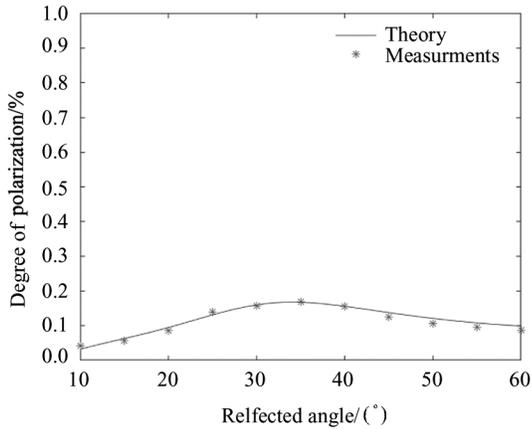
通过遗传算法分别对光源入射角为 30°、45°、60°下的实验数据进行参数反演,反演结果如表 1 所示,随着光源入射角的增大,反演各参数呈递增或递减变化,其中镜面反射系数和漫反射系数的绝对值逐渐减小,体散射系数绝对值逐渐增加,表明:由于入射角的增加,光在相邻微面元间反射次数增多。

再通过反演出的参数,对模型进行仿真,得到如图 7 所示光源入射角为 30°、45°、60°下的仿真与实测偏振度变化趋势。实验中,由于入射角与反射角差

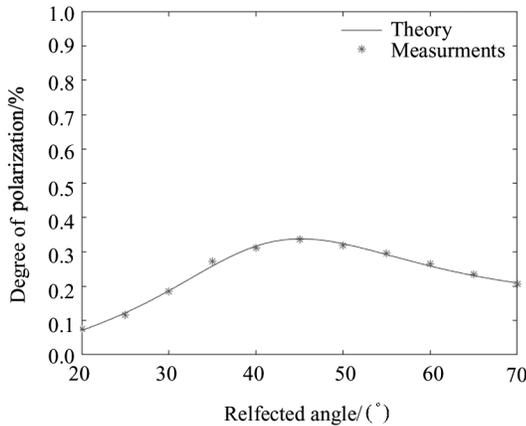
表 1 太阳能电池板表面的参数反演结果

Tab. 1 Parametric inversion results of solar panel surface

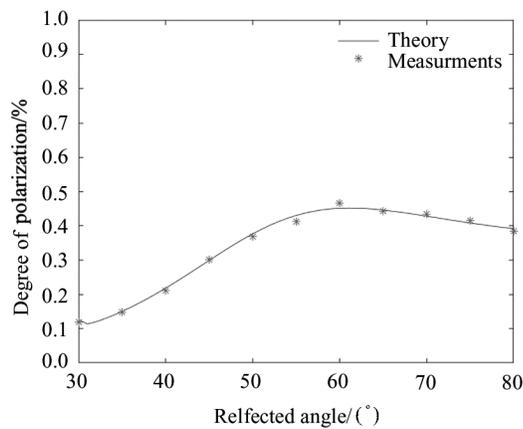
Material	Incident angle/(°)	k_s	k_d	c	k_1	σ_1
Solar panel	30	-3.673	15.087	-1	-1.002	0.138
	45	-3.194	14.004	-0.802	-2.388	0.220
	60	-1.764	10.739	-0.196	-3.387	0.293



(a) $\theta_i=30^\circ$



(b) $\theta_i=45^\circ$



(c) $\theta_i=60^\circ$

图 7 不同入射角偏振度的测量值与仿真值对比
Fig. 7 DOP measurements at different incidence angles were compared with simulation

值较大时,所测量的偏振度数据有轻微波动,故在入射角为 30° 时,取观测角为 $10^\circ\text{--}60^\circ$ 实际测量偏振度值;在入射角为 45° 时,取观测角为 $20^\circ\text{--}70^\circ$ 实际测量偏振度值;在入射角为 60° 时,取观测角为 $30^\circ\text{--}80^\circ$ 实际测量偏振度值。

根据偏振 BRDF 的理论计算结果与实验的实测数据,模型在 30° 、 45° 、 60° 误差结果可以通过式(18)误差分析方法计算,如表 2 所示。

表 2 拟合误差结果

Tab. 2 Relative RMS error

Material	Incident angle/(°)	Relative RMS error R/%
Solar panel	30	0.64
	45	0.05
	60	0.06

从图 7 中可以看出,太阳能电池板表面的偏振度信息随观测天顶角度的增加先同步增加,在光源的入射天顶角度和观测天顶角度大致相等的情况下会达到最大值,而后逐渐减小,并且偏振度信息随着光源入射角的增加,峰值增大。由表 2 可知,入射角为 30° 、 45° 、 60° 时,反演的拟合误差均值都低于 1%,仿真的偏振度曲线与实测数据有较好的吻合。且是随着光源入射角的增加,反演参数呈现统一变化趋势,镜面反射与漫反射系数逐渐减小,体散射系数逐渐增加。总体看来,结合太阳能电池板多层结构的特点分析的偏振特性,更具有准确性。

由于探测波长的改变会改变太阳能电池片表面复折射率的选取,图 8 表示了当光源入射角为 60° 时不同探测波长下偏振度值随观测角度的变化情况,

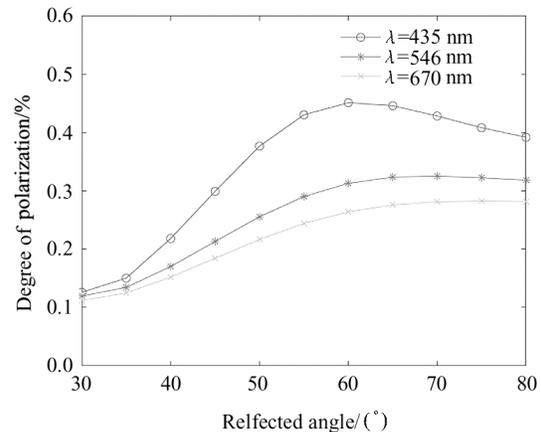


图 8 不同探测波长下偏振度对比曲线
Fig. 8 DOP contrast curves at different detection wavelengths

探测波长选取 435 nm、546 nm、670 nm,对应的复折射率分别是 $n = 4.859$, $k = 0.183$ 、 $n = 4.100$, $k = 0.043$ 、 $n = 3.622$, $k = 0.015$ 。由图可知,探测波长对光伏组件的反射光偏振度有影响,主要体现在不同波段下,太阳能电池片的复折射率有所改变,随波长的增加,复折射率的实数部分吸收性介质的折射率、虚数部分的吸收系数都会减少,光伏组件反射光的偏振度也会降低。

3 结 论

本文基于微面元理论,将太阳能电池板表面的光学反射分为镜面反射、漫反射、体散射 3 部分,建立了一种基于太阳能电池板表面多层结构的偏振 BRDF 模型。通过对太阳能电池板的偏振光学实验取得实验数据,利用遗传算法分别对光源入射角为 30° 、 45° 、 60° 时的偏振 BRDF 模型中待定参量进行反演,再将反演参量结果带入本文模型,进行验证,结果表明,各角度仿真的偏振度曲线与实测数据有良好的吻合,从而验证了本文模型的有效性。

参考文献:

- [1] YUN P, LIU H, ZHANG Z X, et al. IV characteristic analysis and application research of c-Si PV modules[J]. *Power Technology*, 2019, 43(10): 1711-1714.
云平,刘恒,张志祥,等.晶硅光伏组件的 IV 特征分析及应用研究[J]. *电源技术*, 2019, 43(10): 1711-1714.
- [2] LIN H H, DANDAGE H K, LIN K, et al. Efficient cell segmentation from electroluminescent images of single-crystalline silicon photovoltaic modules and cell-based defect identification using deep learning with pseudo-colorization [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21(13): 1-22.
- [3] PENG X H, TIAN J P, HUANG H P. Research on solar cell defect detection method based on photoluminescence[J]. *World Scientific Research Journal*, 2021, 7(8): 202-209.
- [4] CHRIS H, SAHADEV P, SANG-WOONG L, et al. Automatic detection system of deteriorated PV modules using drone with thermal camera [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(11): 1-16.
- [5] LU R S, WU A, ZHANG T D, et al. Review on automatic optical (vision) inspection and its application in defect detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815002.
卢荣胜,吴昂,张腾达,等.自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815002.
- [6] HUANG G J, LIE Z H, WANG X Z, et al. Inspection of slight aesthetic defects in a polarizing film via polarization imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(5): 1636-1642.
- [7] ZHANG Y L, WANG Y M, HUANG A P, et al. Study on reflection characteristics of underwater target and laser echo power [J]. *Optoelectronics Letters*, 2020, 16(2): 137-142.
- [8] WANG H Y, WEI Z, DON A. Measurement and modeling of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) on material surface [J]. *Measurement*, 2013, 46(9): 3654-3661.
- [9] CHEN H Y, LI Y C. Analysis of near-infrared polarization characteristics of typical satellite surface materials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1929001.
陈宏毅,李英超.典型卫星表面材料近红外偏振特性分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1929001.
- [10] HOU Q Y, WANG Z L, SU J Y, et al. Measurement of equivalent BRDF on the surface of solar panel with periodic structure [J]. *Coatings*, 2019, 9(3): 1-13.
- [11] LIU Y, ZHANG J, ZOU X. Analysis on polarization characteristics of microscopic surface of target based on degree of polarization [J]. *Microprocessors*, 2019, 40(5): 43-47.
刘燕,张健,邹昕.基于偏振度的目标微观表面偏振特性分析 [J]. *微处理机*, 2019, 40(5): 43-47.
- [12] WANG C, GAO J, YAO T T, et al. Acquiring reflective polarization from arbitrary multi-layer surface based on Monte Carlo simulation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9397-9411.
- [13] CHEN Q S. Research on optical properties of silicon solar cells and modules [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020: 1-125.
陈全胜.硅基太阳能电池及组件的光学性能研究 [D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2020: 1-125.
- [14] CHEN Q, WANG Y M, ZHANG Y L. Analysis of the polarization characteristics of scattered light of underwater suspended particles based on Mie theory [J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, 17(4): 252-256.
- [15] BAI P T, SUN X W, HUANG Z X, et al. Analysis of rough surface polarization reflection characteristics based on improved micro-surface polarization BRDF model [J]. *Laser Journal*, 2022, 43(8): 24-29.
白鹏涛,孙兴伟,董祉序,等.基于改进的微面元偏振 BRDF 模型的粗糙表面偏振反射特性分析 [J]. *激光杂志*, 2022, 43(8): 24-29.

- [16] WANG F B, YI L, WANG F, et al. Polarization bidirectional reflection distribution function of metal surface based on diffuse reflection optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1129002.
汪方斌, 伊龙, 王峰, 等. 基于漫反射优化的金属表面偏振双向反射分布函数[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1129002.
- [17] YANG X D, GAO M. Study on properties of influence factors of polarization-based T-S BRDF model [J]. *Optik*, 2018, 172: 628-635.
- [18] ZHU D R, FENG K K, WANG F B, et al. Six-parameter polarization bidirectional reflection distribution function model for rough surfaces [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 1326002.
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): 1326002.
- [19] CHEN B G Q. Study on the polarization properties of optical system for space laser communication system [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2020: 1-136.
陈国庆. 空间激光通信光学系统偏振特性研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020: 1-136.
- [20] CHEN Z. The study of crystal silicon solar module power loss [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 1-68.
陈筑. 晶体硅太阳能组件功率损失研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 1-68.

作者简介:

朱达荣 (1968—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事图像处理、故障诊断与预警技术、智能仪器仪表等方面的研究。