

DOI:10.16136/j.joel.2023.03.0290

积灰光伏板表面散射光强度分布实验研究

李忻哲, 高爱华*, 秦文罡, 王化超

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要:针对现有光伏板积灰程度检测方法中存在难以直接对光伏板透射率进行测量和环境光干扰大的问题,提出了一种基于散射光强度的光伏板积灰密度测量方法。该方法使用调制的主动光源,基于角分辨散射(angle-resolved scattering, ARS)测量原理,对积灰光伏板表面散射光强度空间分布进行研究。根据散射光强度的分布规律,建立特定立体角范围的散射光强度与光伏板积灰密度之间的关系。实验结果表明,当探测器放置在光源同侧时,系统线性度更好,散射光强度随着光伏板积灰密度的增加先线性增长,随后增长逐渐放缓,最终趋于一定值。本方法抗环境光干扰能力强,能直观地表征光伏板的积灰状态。

关键词:角分辨散射(ARS)测量;积灰密度;光伏板;调制光源

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2023)03-0284-07

Experimental study on intensity distribution of scattered light on the surface of dust accumulation photovoltaic panels

LI Xinzhe, GAO Aihua*, QIN Wengang, WANG Huachao

(School of Opto-electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: A method for measuring the density of dust accumulation on photovoltaic panels based on scattered light intensity is proposed to solve the problems of existing methods for detecting the degree of dust accumulation on photovoltaic panels, which have difficulties in directly measuring the transmittance of photovoltaic panels and high interference from ambient light. Modulated light is used in this method to investigate the spatial distribution of scattered light intensity on the surface of dust accumulation photovoltaic panels based on the principle of angle-resolved scattering (ARS) measurement. According to the distribution law of scattered light intensity, the relationship between scattered light intensity and dust density of photovoltaic panels in a specific stereo angle range is established. The experimental results show that the linearity of the system is better when the detector is placed on the same side of the light source. The scattered light intensity increases linearly with the increase of the dust accumulation density of the photovoltaic panel, and then the growth slows down gradually and finally tends to a certain value. This method has good resistance to ambient light interference and can reflect the dust accumulation state of photovoltaic panels intuitively.

Key words: angle-resolved scattering (ARS) measurement; dust density; photovoltaic panel; modulated light

0 引言

伴随着工业革命,人类对能源的需求与日俱增,大量燃烧化石能源所带来的副作用甚至对人类的生存产生了威胁^[1]。寻找、开发并利用新能

源解决能源危机成为了各国关注的焦点,其中光伏发电伴随着各国政策的激励迎来了飞速的发展^[2]。

但光伏板所处环境导致其表面极易沉积灰尘,使光伏板出现发电效率降低、寿命下降等问

* E-mail: freegah@126.com

收稿日期:2022-04-21 修订日期:2022-07-25

基金项目:陕西省重点研发计划(2019GY-063)资助项目

题。国内外学者针对光伏板表面灰尘沉积状态的检测进行了大量的研究。LI等^[3]基于 Lambert-Beer 定律,构建了积灰光伏板透射率衰减模型,模型表明沉积浓度和颗粒粒径与透射率衰减相关。OH^[4]同样基于 Lambert-Beer 定律建立了光伏板透射率衰减模型,通过蒙特卡洛模拟显示,对于大粒径颗粒,灰尘层透射率的衰减波动更大。但光伏板对太阳光的吸收率极高,难以从环境光中提取透射太阳光能量,导致模型难以应用于工程实际。王胜捷等^[5]将白玻璃放置在光伏板旁测量其光衰减,建立了太阳入射角与太阳总辐照度变化方向对透射衰减率的影响规律,但由于灰尘分布具有随机性,白玻璃的灰尘沉积无法准确反映光伏板表面的积灰状态。ABDERREZEK等^[6]同样使用白玻璃透射率衰减表征光伏板的积灰密度,无法直接表征光伏板的积灰状态。牛海明等^[7]对模拟积尘的光伏板输出功率衰减进行测量,并结合放置在光伏板旁的白玻璃透射率衰减,表征光伏板的积灰状态。但光伏板输出功率衰减及放置在旁的白玻璃透射率衰减,仅能体现整块光伏组件的积灰状态。文献[8—10]测量了不同自然积尘环境下光伏板输出功率随时间的变化,通过输出功率衰减表征光伏板的积灰状态。但通过光伏组件的功率衰减仅能表征整个组件的积尘状态,且测量结果易受环境光强度、温度、湿度等因素影响。

本文针对光伏板透射率难以直接测量,放置在旁的白玻璃无法直接表征待测光伏板的积灰状态,输出功率衰减受环境干扰较大的问题,提出了一种基于散射光测量光伏板表面积灰密度的检测方法。该方法使用调制的主动光源照射光伏板,采集特定角度的散射光强度,并在后续信号处理中去除背景光及探测器电路产生的噪声,建立特定立体角范围散射光强度与光伏板表面积灰密度间的关系,直接准确表征待测光伏板的积灰情况。将多点探测的统计结果作为光伏板集灰量的衡量标准。为辅助决策光伏板清洗周期的制定,提供快速、准确的判断依据。

1 测量原理与理论模型

1.1 双向分布函数与角分辨散射

双向分布函数(bidirectional reflectance distribution function, $BRDF$)可以用于描述被测物体表面的光辐射特性和方向散射特性^[11]。其定义为目标在散射方向 (θ_s, φ_s) 上的亮度 dL_s 与入射方向 (θ_i, φ_i) 照度 dE_i 的比值。但 dL_s 和 dE_i 均为无穷小数值,对应探测器则需要无穷小视角。而在实际测量中,探

测器对应的视角为固定值,所以 $BRDF$ 可以表示为如式(1)所示^[12]:

$$BRDF(\theta_s) \approx \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{\Delta p_s}{p_i \times \Delta \Omega_s \times \cos \theta_s}, \quad (1)$$

式中,下标 i 和 s 分别为入射方向和散射方向, $\Delta \Omega_s$ 为单位散射立体角, Δp_s 和 p_i 分别为散射光与入射光的光功率, θ_i 为入射天顶角, θ_s 为散射天顶角, φ_i 为入射方位角, φ_s 为散射方位角,其位置关系如图1所示。

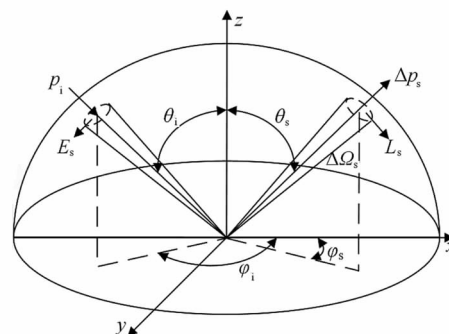


图1 双向分布函数参数示意图

Fig. 1 The schematic of $BRDF$ parameters

角分辨散射(angle-resolved scattering, ARS)定义为某特定散射角 $\Delta \Omega_s$ 的范围,散射光光功率 Δp_s 与入射光光功率 p_i 的比值,如式(2)所示:

$$ARS(\theta_s) = \frac{\Delta p_s}{\Delta \Omega_s \times p_i}. \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以得到 $BRDF$ 与 ARS 之间的关系,如式(3)所示:

$$BRDF(\theta_s) = \frac{ARS(\theta_s)}{\cos \theta_s}. \quad (3)$$

由于 $BRDF$ 可以表征被测物质表面存在的特征信息,而通过 ARS 的测量值可以表征被测物体表面 $BRDF$ 值。所以本系统依据此关系,测量光伏板表面散射光分布,表征光伏板表面的散射特性。

1.2 理论模型

光线照射在光伏板表面的灰尘颗粒上,光被颗粒向各个方向进行散射,Mie 散射正是基于电磁波衍射和散射,对光的散射进行求解,且颗粒粒径适用范围较大^[13]。

根据 Mie 理论,若一束波长为 λ ,光强为 I_0 的光线照射在粒径为 d_k 微粒时,光会向各个方向散射,则与光线传播方向夹角为 θ ,距离为 r 处的散射光强,如式(4)所示:

$$I = \frac{\lambda^2 I_0}{8\pi^2 r^2} (i_1 + i_2), \quad (4)$$

式中, i_1 为平行于散射面的强度分量, i_2 为垂直于散射面的强度分量。

且沉积灰尘层作为由多种颗粒组成的粒子系, 若其中颗粒均满足如式(5)所示的独立散射条件时, 则可认定粒子系为独立散射^[14]。

$$\left(\frac{0.905}{f v^{1/3}} - 1 \right) \frac{d_k}{\lambda} \geq 0.5, \quad (5)$$

式中, $f v$ 为微粒体积分。

将灰尘的主要组成成分如 SiO_2 , CaO , Al_2O_3 等颗粒的体积分和粒径数据带入式(5), 计算可得其主要成分均满足独立散射条件。

所以对于沉积在光伏板表面的灰尘层, 其总散射光强度可以视为多个不同粒径颗粒的合作用^[15-16]。且实际灰尘层颗粒的粒径分布不可能完全相同, 认为其粒径分布服从 Rosin-Rammler 分布^[17], 分布函数如式(6)所示:

$$T_d = \exp\left[-\left(\frac{d}{\bar{x}}\right)^N\right], \quad (6)$$

式中, N 为粒子粒径分布的权重参数, 若粒径分布越复杂, 则其值越小, $\bar{x}$ 为粒子群的特征参量, 表征粒径小于 $\bar{x}$ 的粒子在总粒子数中的占比为 36.8%, T_d 表示粒子群中直径大于 d 的累计体积比例。

假设探测灰尘层的空间体积为 V_{space} , 而灰尘密度为 $A \text{ mg/cm}^2$, 灰尘颗粒对应的总体积为 V_{dust} , 则粒径为 d_k 的粒子个数 M_k 可表示为:

$$M_k = \frac{6V_{\text{dust}} \cdot \Delta d_k}{\pi d_k} = \frac{6V_{\text{space}} A \cdot \Delta d_k}{\pi \rho d_k}, \quad (7)$$

式中, Δd_k 为式(6)对 d_k 的求导, 表示粒径为 d_k 的颗粒在粒子系中的占比, ρ 为颗粒的质量密度。

综合式(4)与式(7)可以得到灰尘层散射光强度 I_s 与灰尘层密度 A 之间的关系如式(8)所示:

$$I_s = \frac{6V_{\text{space}} \cdot A}{\pi} \cdot \sum_k (i_1 + i_2) \cdot \frac{\Delta d_k}{d_k^3}. \quad (8)$$

记灰尘层在探测区域的覆盖率为 $\beta (0 < \beta < 1)$, 则探测区域的光伏板表面散射光主要由灰尘层对光的散射与未积尘的光伏板对光的反射两部分组成。所以当积灰密度较小时, 灰尘层覆盖率较低, 颗粒间存在较大间隙, 光伏板表面散射光强度与其表面的积灰密度呈线性关系。即可以通过测量特定范围的散射光强度, 表征光伏板表面的积灰密度。但随着光伏板表面灰尘的沉积, 颗粒间距减小, 当灰尘层厚度 δ 大于粒子系中颗粒的最大粒径和最小粒径之和时, 光线都需要经过灰尘层的吸收、反射和散射后才

能到达光伏板表面, 则认为该灰尘层为稠密粒子系统, 如图 2 所示。

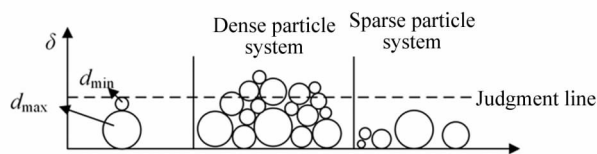


图2 粒子积聚系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of particle accumulation system

此时灰尘层对光线的作用主要由灰尘层对光的吸收和散射共同作用所导致^[18]。由 Lambert-Beer 定律可知, 光强为 I_0 的光线透过灰尘层后的光线强度 I_1 可表示为:

$$I_1 = I_0 \cdot \exp[(-\alpha + \tau) \cdot \delta], \quad (9)$$

式中, α 为灰尘层的吸收系数, τ 为灰尘层的散射系数。

随着光伏板表面积灰密度不断增加, 当积灰程度较低时, 灰尘层可视为稀疏粒子系统, 此时散射光强度与积灰密度呈线性关系; 而当积灰密度不断增加, 灰尘层由稀疏粒子系统转向稠密粒子系统, 此时散射光强度的增长则逐渐放缓, 最终趋于稳定。

2 测试系统与实验方案

2.1 积灰光伏板表面散射光检测装置

本文基于 ARS 检测原理, 搭建积灰光伏板表面散射光强度分布测量装置, 如图 3 所示。

激光器经计算机驱动输出调制光信号, 光线经扩束准直后照射至光伏板表面, 反射镜对应的立体角范围内的散射光被光电探测器收集, 传输至锁相放大器与计算机输出的调制信号进行相关检测运算, 获得高信噪比的目标信号。通过运动控制器驱动旋转台带动光电探测器及其偏转光路进行旋转, 得到光伏板表面散射光强度的空间分布。

为了进一步提高测量精度, 将反射率已知的中性衰减片放置在装置上, 采集其镜反射方向的探测器输出值作为系统的参考量, 采用比值测量法, 消除了装置的系统误差。装置测量值与参考值之间的关系如式(10)所示:

$$\frac{R'}{S'} = \frac{U_0}{U_1} = \frac{G \cdot S(\lambda) \cdot \Phi_0}{G \cdot S(\lambda) \cdot \Phi_1}, \quad (10)$$

式中, R' 为标准衰减片反射率, S' 为测量范围的散射率, U_0 和 U_1 分别为装置输出标定值和测量值, G 为探测器的增益, $S(\lambda)$ 为探测器的灵敏度, Φ_0 和 Φ_1 分别为标定阶段和测量阶段探测器接收的光通量。

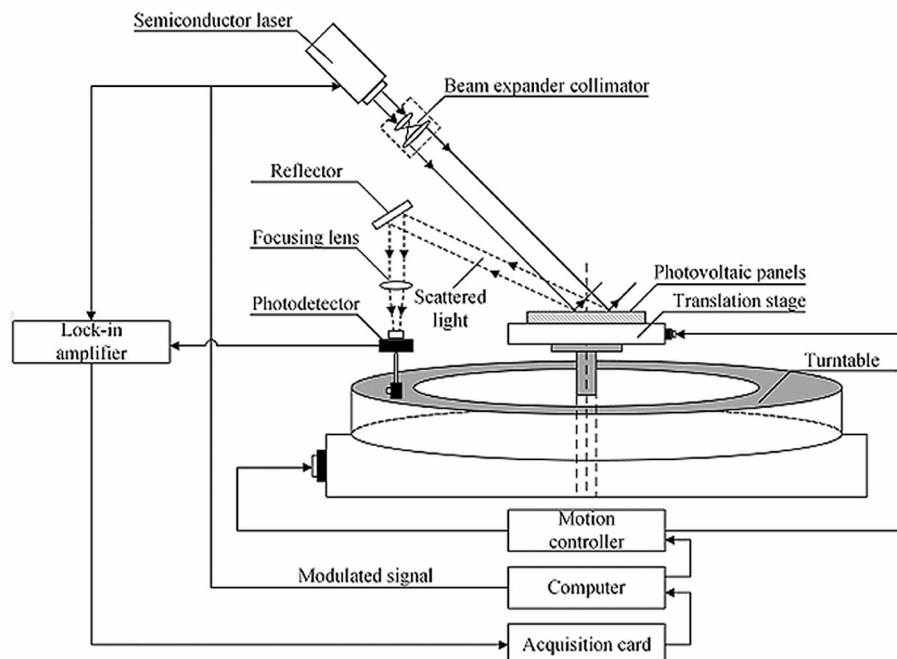


图3 散射光检测装置原理图

Fig.3 Schematic diagram of scattered light detection device

2.2 系统动态范围与信噪比改善

在光电探测系统的设计中,测量信号的频率会对探测器噪声均方电流值大小产生影响,其对应关系如图4所示。在实际应用的过程中,应使系统的调制频率分布在区域Ⅲ并靠近区域Ⅱ,此时散粒噪声和热噪声占主导地位,其他的噪声影响较小^[19]。

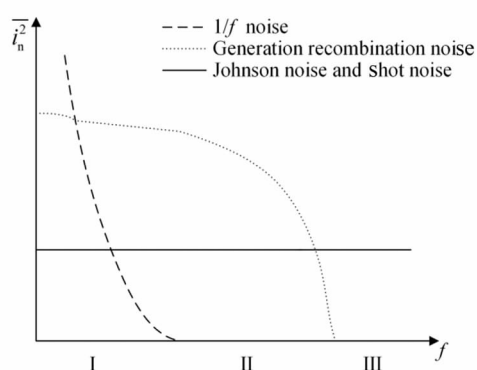


图4 光电探测器噪声功率谱综合示意图

Fig.4 Schematic diagram of noise power spectrum synthesis of photodetector

光电探测器的噪声电流均方值由热噪声和散粒噪声组成,如式(11)所示:

$$\overline{i_n^2} = \overline{i_{nr}^2} + \overline{i_{ns}^2} =$$

$$\frac{4kT\Delta f}{R} + 2eI_{PIN}\Delta f, \quad (11)$$

式中, $\overline{i_{nr}^2}$ 表示热噪声均方电流值, $\overline{i_{ns}^2}$ 为散粒噪声均方电流值, k 为玻耳兹曼常量, T 为热力学温度(K), R 为器件电阻值, Δf 为测量的带宽, e 为电子电荷, I_{PIN} 为器件输出平均电流。

当负载电阻较大时,可只考虑电流的散粒噪声,所以光电探测器的噪声均方电流值可表示为:

$$\overline{i_n^2} = 2eI_p\Delta f + 2eI_d\Delta f, \quad (12)$$

式中, I_p 为探测器光电流, I_d 为探测器暗电流。

当信噪比为1时,可以估算探测器的最小可探测光功率,即用探测器暗电流取代光电流进行计算。

$$NEP = \frac{\sqrt{\overline{i_n^2}}}{S_I(\lambda)} = \frac{\sqrt{u_n^2}}{S_U(\lambda)}. \quad (13)$$

将探测器参数代入式(13)可知其最小可探测光功率 $NEP = 2.44 \times 10^{-13} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 。并引入锁相放大器,对待测信号进行处理,达到从噪声背景中提取待测信号的目的^[20]。由于探测器的噪声电压值正比于噪声带宽的平方根^[21],所以锁相放大器的信噪改善比可表示为:

$$SNIR = \frac{SNR_o}{SNR_i} = \frac{\sqrt{\Delta f_i}}{\sqrt{\Delta f_e}}, \quad (14)$$

式中, SNR_o 和 SNR_i 分别为锁相放大器的输出和输入信噪比, Δf_e 和 Δf_i 分别为输出与输入的噪声

带宽。

锁相放大器采用一阶 RC 滤波器,当取时间常数为 100 ms 时,其等效噪声带宽 Δf_c 为 2.5 Hz,此时信噪比的改善为 134 倍。

3 实验结果与分析

本文对不同积灰密度的同一块光伏板进行实验,且本文装置引入比值测量法消去系统误差,对测量信号进行去噪处理,多次测量取平均的方式提高测量的准确性。装置的主要误差来自于激光器的功率漂移。

3.1 积灰光伏板表面散射光强度分布

依次将洁净光伏板、积尘密度分别为 1.276 0 mg/cm² 和 3.119 7 mg/cm² 的光伏板放置在平移台上,激光以入射角 $\theta_i = 45^\circ$ 照射在光伏板表面,旋转台带动探测器及其光路组件由方位角 $\varphi_s = -180^\circ$ 连续旋转一周至 $\varphi_s = 180^\circ$,采集探测器的输出信号,经相关检测运算后传输至计算机,完成数据采集。

以探测器方位角 φ_s 为横坐标,方位角由 -180° 旋转至 180° ,以系统输出的散射率指标作为纵坐标 (1 ppm = 10^{-6}),绘制 3 种积尘密度下光伏板散射率随探测角度变化的曲线,如图 5 所示。

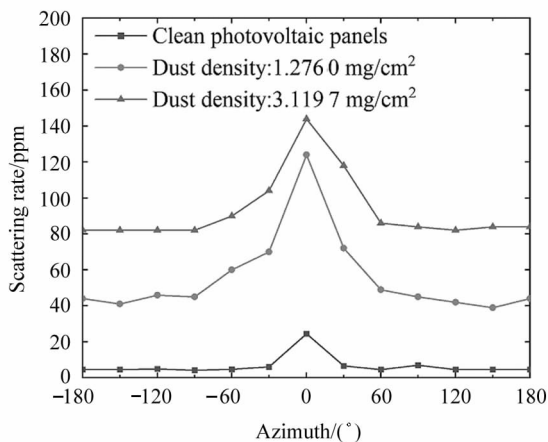


图 5 积灰光伏板散射光强度变化图
Fig. 5 Variation diagram of scattered light intensity on the surface of dust accumulation photovoltaic panel

可见当探测器放置在镜反射光附近 ($\varphi_s = 0^\circ$, $\theta_s = 50^\circ$) 时,探测器接收的总光强由光伏板洁净区域的反射光与灰尘层散射光两部分组成,其散射光强度较高,占比较大,但其增长衰减较为明显,测量线性度较差,探测器在此处探测会导致装置测量动态

范围较小;而当探测器放置在背向散射光附近 ($\varphi_s = 180^\circ$, $\theta_s = 50^\circ$) 时,此时散射光强度较小,测量受噪声影响较大,但线性度较好,装置的动态范围较大,且系统得到高信噪比的检测微弱信号,所以选择将探测器放置在 $\varphi_s = 180^\circ$, $\theta_s = 50^\circ$ 位置进行后续实验。

3.2 光伏板积灰密度与散射光强度间的关系

在得到积灰光伏板表面散射光分布后,可见虽然背向散射光强度弱于镜反射光强度,但装置的动态范围更大。且装置即使在较小散射光强度测量时,仍能保持较高的测量信噪比。将光电探测器放置于光源同侧并优化实验光路,缩短测量光程差,减小激光发散角对测量的影响。通过光电探测器采集背向散射光附近 ($\varphi_s = 180^\circ$, $\theta_s = 50^\circ$) 的不同积尘光伏板表面散射光强度,建立积尘密度与积尘光伏板表面散射光强间的关系。

由式(8)可知,当光伏板积灰程度较低时,特定立体角范围的散射光强度与光伏板表面积灰密度之间应为线性关系。选择积灰密度小于 2 mg/cm² 的所有测量数据,对其进行线性拟合,结果如图 6 所示。

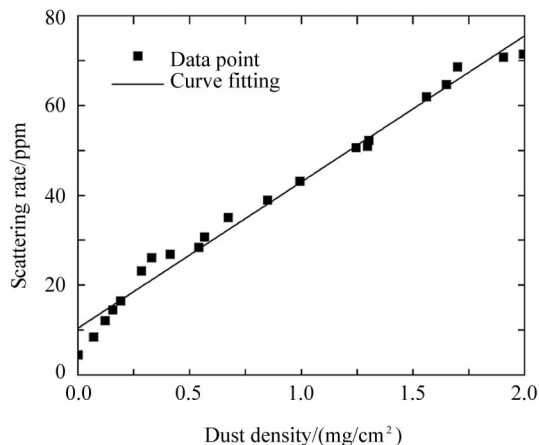


图 6 少量积灰情况下散射光强度随积灰密度变化

Fig. 6 The intensity of scattered light varies with the density of a small amount of ash deposition

拟合曲线的判定系数 $R^2 = 0.9724$, 可见在光伏板积灰程度较小时,积灰密度与其表面散射光强度之间线性度较好。随着积灰密度的增大,灰尘层由稀疏粒子系统转向稠密粒子系统,对散射光随光伏板积灰密度变化曲线进行拟合,如图 7 所示。可见随着光伏板表面积灰密度不断增加,其散射光强度增长逐渐放缓并最终趋于一稳定值。

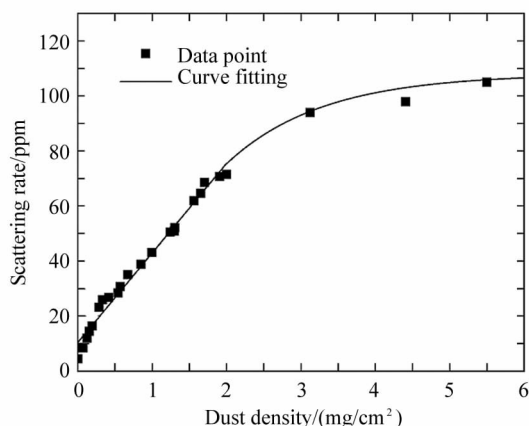


图7 散射光强度随积灰密度变化图

Fig. 7 The variation of scattered light intensity with the density of dust accumulation

4 结 论

本文基于前人所研究的灰尘介质层对光的作用,通过 ARS 检测装置,得到积灰光伏板表面的散射光强度分布。实验发现,当探测器采集背向散射方向附近的散射光时,其散射光强度较弱,但系统测量的动态范围较大;而探测器采集镜反射方向附近的散射光时,其散射光强度较大,但动态范围较小。所以根据散射光强度分布,选择将探测器放置在背向散射附近,进一步研究光伏板积灰密度与其表面特定立体角范围散射光强度间的关系。实验发现,随着光伏板积灰密度的增加,其散射光强度先线性增长,随着积灰密度不断增大,灰尘层由稀疏粒子系转向稠密粒子系,导致散射光强度增长趋势逐渐放缓最终趋于一定值。相比现有研究方案,本文所述的系统测量精度高,且直接测量光伏板灰尘层对光线的散射作用,测量结果更能反应光伏板本身的积灰状态;相比其他检测方法使用太阳光作为光源进行检测,本文所用的调制光信号的抗噪声干扰能力和环境适应能力都更强。

参考文献:

[1] JIN G H, TANG W, YANG S J. Study on comprehensive evaluation of photovoltaic panel ash cleaning scheme [J]. Science & Technology for Development, 2019, 15(7): 746-753.
金国辉, 汤伟, 杨世俊. 光伏板积灰清理方案综合评价研究[J]. 科技促进发展, 2019, 15(7): 746-753.

[2] XUE J L. Photovoltaic agriculture-new opportunity for photovoltaic applications in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 1-9.

[3] LI X C, NIU K. Effectively predict the solar radiation transmittance of dusty photovoltaic panels through Lambert-Beer law[J]. Renewable Energy, 2018, 123: 634-638.

[4] OH S. Analytic and Monte-Carlo studies of the effect of dust accumulation on photovoltaics [J]. Solar Energy, 2019, 188: 1243-1247.

[5] WANG S J, TIAN R, GUO X, et al. Dust accumulation characteristics and transmission attenuation law of photovoltaic modules [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 242-250.
王胜捷, 田瑞, 郭泉, 等. 光伏组件积灰特性及其透射衰减规律研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 242-250.

[6] ABDERREZEK M, FATHI M. Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield[J]. Solar Energy, 2017, 142: 308-320.

[7] NIU H M, CUI Q R, LIU H X. Effect of ash accumulation on output performance of photovoltaic panels [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 110-117.
牛海明, 崔青汝, 刘厚旭. 积灰对光伏电池板输出特性影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 110-117.

[8] HACHICHA A A, AL-SAWAFTA I, SAID Z. Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under United Arab Emirates weather conditions [J]. Renewable Energy, 2019, 141: 287-297.

[9] ZHAO M Z, SUN H. An experimental study on the influence of dust settlement on the power output of photovoltaic modules [J]. Energy Conservation, 2018, 37(8): 110-114.
赵明智, 孙浩. 沙尘沉降对光伏组件功率输出影响的实验研究[J]. 节能, 2018, 37(8): 110-114.

[10] AHMED O K, MOHAMMED Z A. Dust effect on the performance of the hybrid PV/thermal collector [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2017, 3: 114-122.

[11] WANG W, LI T, HOU Y L. BRDF equivalent test method of typical stereo target [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 0403011.
王伟, 李铁, 侯亚丽. 典型立体目标等效 BRDF 测试方法 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 0403011.

[12] LI X, ZHENG X B, XUN L N, et al. Realization of field BRDF acquisition by multiangular measurement system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(1): 66-70.
李新, 郑小兵, 寻丽娜, 等. 多角度测量系统实现室外 BRDF 测量 [J]. 光电工程, 2008, 35(1): 66-70.

[13] SHAO H F, CHAI J, HUANG H. Research progress of particle size analysis and particle size standard reference materia [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2012, 21(2): 99-101.
邵鸿飞, 柴娟, 黄辉. 粒度分析及粒度标准物质研究进展 [J]. 化学分析计量, 2012, 21(2): 99-101.

- [14] LI Y M. Numerical simulation of radiation transmission characteristics of particle deposition photovoltaic panels [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2020: 7-10.
李岳铭. 颗粒沉积光伏板辐射传输特性的数值模拟 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2020: 7-10.
- [15] WANG P F, ZHANG Z, FAN X X. Research on dust concentration measurement based on Mie scattering theory [J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11 (33): 67-71.
王鹏飞, 张喆, 樊新学. 基于 Mie 散射理论的粉尘浓度测量研究 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11 (33): 67-71.
- [16] ZHAO Z. Detection technology of metal dust concentration based on MIE scattering method [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(5): 108-110+119.
赵政. 基于 MIE 散射法的金属粉尘浓度检测技术 [J]. 仪表技术与传感器, 2018(5): 108-110+119.
- [17] LIU Y Z, LIU D, MENG C, et al. Conversion between particle mass and number based on Rosin-Rammler distribution [J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2019(4): 6-10.
刘远卓, 刘东, 孟闯, 等. 基于 Rosin-Rammler 分布的颗粒物质量与数量换算 [J]. 洁净与空调技术, 2019(4): 6-10.
- [18] CHEN J M, CHEN H T. The development and application of laser in dust detection [J]. Applied Laser, 2018, 38(3): 496-501.
陈继民, 陈鹤天. 激光在粉尘检测领域的进展与应用 [J]. 应用激光, 2018, 38(3): 496-501.
- [19] HAN Z W, SONG K F, LIU Y, et al. Photodetector readout noise analysis method [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(19): 90-91.
韩振伟, 宋克非, 刘阳, 等. 光电探测器读出噪声分析方法 [J]. 电子技术与软件工程, 2019(19): 90-91.
- [20] ZHOU X, LIU X, WU L Y, et al. Research on carbon dioxide measurement technology based on photoacoustic spectroscopy [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2020, 31(12): 1306-1312.
周鑫, 刘新, 吴陆益, 等. 基于光声光谱的二氧化碳测量技术研究 [J]. 光电子 · 激光, 2020, 31(12): 1306-1312.
- [21] HOU J Y, GAO A H, YAN L R, et al. Laser transmittance measurement system with large dynamic range [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2020, 31(6): 569-574.
侯劲尧, 高爱华, 闫丽荣, 等. 大动态范围高精度激光透射率测量系统 [J]. 光电子 · 激光, 2020, 31(6): 569-574.

作者简介:

高爱华 (1967—), 女, 硕士, 西安工业大学教授, 硕士生导师, 主要从事光电测试技术方面的研究。