

积灰对光伏电池板输出特性影响研究

牛海明¹, 崔青汝², 刘厚旭¹

(1.北京国电智深控制技术有限公司(北京市电站自动化工程技术研究中心), 北京 102211;

2.国电新能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

[摘要] 积灰对光伏电池板输出特性具有显著影响, 且因地域、实验环境等因素不同存在较大差异。为此, 本文分析了不同自然积灰的粒径分布特征, 分别利用黄土、红土和高岭土, 构造了我国不同地域自然积灰的模拟样本; 搭建了由光伏电池阵列、MPPT 控制器、上位机以及光强测量仪、温度测量模块等构成的实验平台, 开展了积灰对光伏电池板的伏安特性、温度、相对透光率以及输出功率影响的测量实验; 基于实验数据建立了相对透光率、相对发电效率与积灰密度关系的拟合模型。结果表明: 随着积灰密度的增加, 光伏电池板的温度、相对透光率和相对发电效率均逐渐降低, 且降低幅度与积灰类型有关; 应用算例表明, 所建模型可用于光伏发电功率预测以及光伏电池板积灰的清洗周期选取。

[关键词] 积灰; 光伏电池板; 温度; 透光率; 输出功率; 清洗周期

[中图分类号] TM615 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rifd.202004073

[引用本文格式] 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. NIU Haiming, CUI Qingru, LIU Houxu. Effect of ash accumulation on output performance of photovoltaic panels[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 110-117.

Effect of ash accumulation on output performance of photovoltaic panels

NIU Haiming¹, CUI Qingru², LIU Houxu¹

(1. Beijing Engineering Research Center of Power Station Automation, Beijing GuoDianZhiShen Co., Ltd., Beijing 102211, China;

2. Guodian New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Ash accumulation has significant impacts on output characteristics of photovoltaic panels, and the impacts are quite different due to the influence of region, experimental environment and other factors. In response to this matter, the particle size distribution characteristics of different naturally deposited ash were analyzed, and the simulation samples of natural ash accumulation in different regions of China were constructed by using loess, laterite and kaolin respectively. An experimental platform composed of photovoltaic cell array, MPPT controller, host computer, light intensity measuring instrument and temperature measurement module was built up, and the effects of ash deposition on the volt-ampere characteristics, temperature, relative light transmittance and output power of photovoltaic panels were measured. Moreover, based on the experimental data, the fitting model was established for the relationship between relative light transmittance, relative power generation efficiency and ash density. The results show that, the temperature, relative light transmittance and relative power generation efficiency of the photovoltaic panels decreased gradually with the increase of ash density, and the decrease was related to the type of ash deposition. The calculation results show that, the established fitting model can be used to predict the photovoltaic power under the condition of ash deposition and to determine the cleaning cycle of ash deposition on photovoltaic panels.

Key words: dust deposition, photovoltaic panel, temperature, light transmittance, output power, cleaning cycle

近年来, 随着社会的快速发展, 能源短缺与环境恶化问题日益突出。光伏发电作为一种重要的清洁能源, 获得了迅猛发展。积灰所产生的遮光效应以及温度效应, 对光伏电池板的输出特性具

有明显影响。国内外学者围绕该问题, 已经开展了相关研究工作并取得了初步研究结论。Ramli 等人^[1]在印度尼西亚的研究表明, 将光伏电池板在干旱的季节暴露 2 周, 自然积灰导致输出功率降低

修回日期: 2020-07-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1500800)

Supported by: National Key Research and Development Program(2018YFB1500800)

第一作者简介: 牛海明(1980), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为仿真建模技术, 12072301@chnenergy.com.cn.

10.8%；Wakim^[2]在科威特的研究表明，将光伏电池板在沙漠中暴露 6 天，自然积灰导致输出功率降低 17%；Kaldellis 等人^[3]在希腊雅典盆地的研究表明，将光伏电池板暴露在城市空气污染的环境下，当积灰密度为 1 g/m²时发电量降低 6.5%；M. Saidan 等^[4]在伊拉克的研究表明，将光伏电池板暴露在自然环境下，当积灰密度为 0.64 g/m²时输出功率降低 14.26%；H. Jiang 等人^[5]在室内模拟自然积灰，当积灰密度为 22 g/m²时，光伏电池板输出功率降低 26%；Basant 等人^[6]在尼泊尔加德满都进行的实验发现积灰密度为 9.67 g/m²时，光伏电池板的输出功率降低 29.76%。孙欢伟^[7]在大连进行的研究发现，自然积灰 2 天后与 10 天后光伏发电效率分别降低约为 1.5%与 6.4%；官燕玲等^[8]在西安搭建了实验平台，研究结果表明 8 天的自然积灰使光伏组件的透光率减小约 20%；李练兵等^[9]在天津进行的研究发现，当积灰密度由 1 g/m²增至 4 g/m²时，光伏电池板输出功率的降低幅度由 8%增至 12.5%；高德东等^[10]在青海省格尔木地区的研究结果表明，当电池板积灰密度为由 2 g/m²增至 8 g/m²时，光伏电池板输出功率的降低幅度由 5%增至 25%。

已有研究表明，积灰对光伏电池板输出特性的影响，因所在地域、实验环境等因素不同存在较大差异。为此，本文分析了不同自然积灰的粒径分布特征，分别利用黄土、红土和高岭土构造了我国不同地域自然积灰的模拟样本，搭建实验平台，开展了积灰条件下光伏电池板的伏安特性、温度、透光率以及输出功率的测量实验，分析了积灰对光伏发电输出特性的影响，建立了拟合模型并将其应用于光伏发电功率预测以及光伏电池板积灰的清洗周期选取。

1 积灰对光伏电池板的多重效应

光伏电池的输出功率主要受太阳辐射强度和工作温度影响。不考虑积灰因素时，其光电转换模型为

$$P = \eta_{pv} SE [1 + \alpha_p (T_C - T_{STC})] \quad (1)$$

式中： P 为光伏电池板输出功率； η_{pv} 为光伏电池的转换效率； S 为光伏电池板的有效面积； E 为光伏电池板接收的太阳辐射强度； α_p 为光伏电池板的温度系数； T_C 为光伏电池工作温度； T_{STC} 为标准测试条件温度。

积灰对光伏电池板具有多重效应：一是削光效应，积灰可通过直接吸收、反射太阳光线，削弱光伏电池板透光率，降低光伏电池接收的太阳辐射强度；二是温度效应，积灰附着于光伏电池板，可视

作引入了等效热阻，通过改变系统的热平衡，可影响光伏电池板的工作温度；此外，积灰长期附着于电池板，将会腐蚀其表面，通过增大漫反射，进一步影响其透光率。在上述多重效应作用下，积灰可影响光伏电池板的输出功率。当积灰的成分、粒径分布发生变化时，上述效应也会随之变化，因此，不同地域的积灰对电池板的影响存在差异。在积灰严重的地区，积灰对电池板输出功率具有明显的衰减作用，在开展光伏发电的功率预测工作与运维工作时需要予以考虑。

2 实验内容

2.1 实验用积灰粒径分析

本文收集河北省保定市某光伏电站的电池板表面积灰，利用 MASTERSIZER 2000 激光粒度分析仪（测量范围 0.02~2 000 μm ）对其进行分析，经 3 次测量求取平均值为最终结果，结果见表 1。由表 1 可知，积灰粒径分布于 0.356~282.507 μm 之间，其中粒径小于 11.246 μm 的占总颗粒数的 29.31%，粒径小于 112.468 μm 的占总颗粒数的 99%。

表 1 MASTERSIZER 2000 激光粒度分析仪分析结果
Tab.1 The analysis results of MASTERSIZER 2000 laser particle size analyzer

粒径/ μm	频率分布/%	频率累积/%	粒径/ μm	频率分布/%	频率累积/%
<0.355	0	0	14.158	8.905	38.126
0.447	0.222	0.223	17.825	10.614	48.634
0.563	0.650	0.876	22.440	11.443	59.971
0.709	0.929	1.810	28.250	11.055	70.936
0.893	1.069	2.882	35.565	9.512	80.386
1.124	1.101	3.986	44.774	7.272	87.624
1.782	1.123	5.112	56.367	4.956	92.567
2.244	1.228	6.344	70.962	3.061	95.625
2.825	1.428	7.777	89.336	1.783	97.406
3.556	1.688	9.469	112.468	1.030	98.443
4.477	2.037	11.505	141.589	0.587	99.059
5.636	2.598	14.091	178.250	0.284	99.424
7.096	3.539	17.601	224.403	0.039	99.633
8.933	4.975	22.527	282.507	0	100.000
11.246	6.859	29.314			

将本文测量结果与张豪测量的西安积灰^[11]、H.Jiang 等测量的模拟积灰^[5]、Anjian Pan 等^[12]实验所选取积灰以及高德东^[10]测量的青海省格尔木地区积灰的粒径分布曲线进行对比，结果如图 1 所示。由图 1 可知，几种积灰的粒径均主要分布于 0 μm 与~120 μm 之间，且分布曲线整体上较为接近。

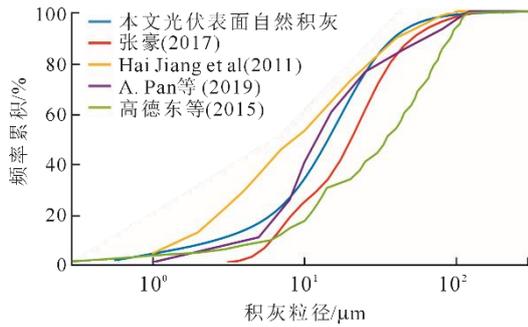


图1 不同积灰粒径分布

Fig.1 The particle size distribution of different natural dusts

本文分别选取黄土（主要分布在我国西北和华北地区）、红土（主要分布在我国长江以南地区）、高岭土（主要分布于我国矿产资源丰富地区）3种土壤（图2），首先利用孔径125 μm的筛网筛出细颗粒尘土，再利用孔径11 μm的筛网进行二次筛分，然后将筛下尘土与筛上剩余尘土按照3:7的比例进行配比，用来模拟不同地域的自然积灰。



图2 实验用3种土壤

Fig.2 Three kinds of soil used in the experiment

2.2 实验平台

本文搭建了由光伏电池阵列、MPPT 控制器、上位机以及光强测量仪、温度测量模块等构成的实验平台，结构示意图如图3所示，光伏电池板规格参数见表2。从光伏电池阵列中挑选出5块输出特性高度一致的电池板，设置编号为PV1—PV5。

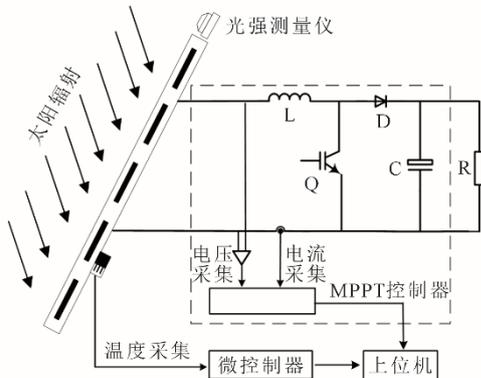


图3 光伏实验平台结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the photovoltaic experimental platform

表2 光伏电池板规格参数
Tab.2 Specifications of the photovoltaic (PV) panels

规格参数	数值
额定功率/W	50
电池板尺寸(长×宽×厚)/mm	630×540×25
电池板效率/%	13.4
最大功率点电压 V_{mpp}/V	18.1
最大功率点电流 I_{mpp}/A	2.85
开路电压 V_{oc}/V	21.7
短路电流 I_{sc}/A	3.11
电池板温度系数/(% · $^{\circ}C^{-1}$)	0.41

MPPT 控制器由电压传感器、电流传感器、BOOST 电路和 XS128 微控制器构成，采用电导增量法对光伏电池板进行最大功率跟踪控制，并通过 RS-232 串口协议将采集的数据实时发送给上位机。温度测量模块包括 RW18b20 温度传感器以及 STM32 微控制器，测量精度为 $\pm 0.1^{\circ}C$ ，通过 RS485 串口协议将采集的数据实时发送给上位机软件。本实验平台共布置 18 只 RW18b20 温度传感器(图4)：PV1—PV5 每块光伏电池板背面，沿对角线均匀布置 3 只 RW18b20 温度传感器，编号为 1—15；此外，悬空放置 3 只 RW18b20 温度传感器用于测量环境温度，编号为 16—18。光强测量仪的型号为泰仕 TS-1333R，测量仪的量程为 0~2 000 W/m^2 ，精度为 $\pm 10 W/m^2$ 。

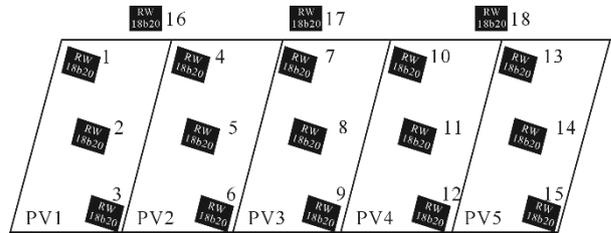


图4 RW18b20 编号和安装分布

Fig.4 The number and installation distribution of RW18b20

2.3 实验方法

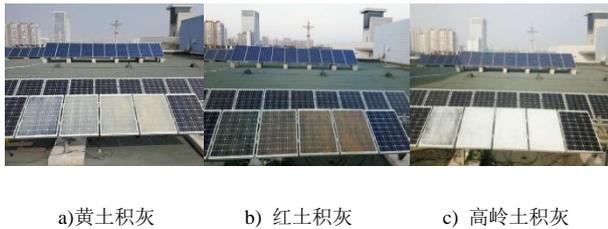
分析积灰对光伏电池板的伏安特性、温度、输出功率的影响时，对 PV1—PV4 光伏电池板分别均匀涂抹 1.437、2.875、4.313、5.750 g 积灰，使得其积灰密度分别为 5、10、15、20 g/m^2 ，PV5 光伏电池板则清洗洁净。图5为分别涂抹黄土、红土和高岭土后的光伏电池板。

分析积灰对光伏电池板透光率的影响时，选择与光伏电池板玻璃盖板同材质的 2 块玻璃板，长宽为 140 mm×175 mm。一块玻璃板分别涂抹 0.123、0.245、0.368、0.490 g 的积灰，使得积灰密度分别

为 5、10、15、20 g/m²；另一块玻璃板则清洗洁净。在 2 块玻璃板下面各布置 1 个光强测量仪，记录一段时间的平均辐射强度数据，即可通过下式计算不同密度积灰下的相对透光率：

$$\gamma = \frac{I_g}{I_{gb}} \quad (2)$$

式中， I_g 为透过洁净玻璃板的平均辐射强度， I_{gb} 为透过积灰玻璃板的平均辐射强度。



a) 黄土积灰 b) 红土积灰 c) 高岭土积灰

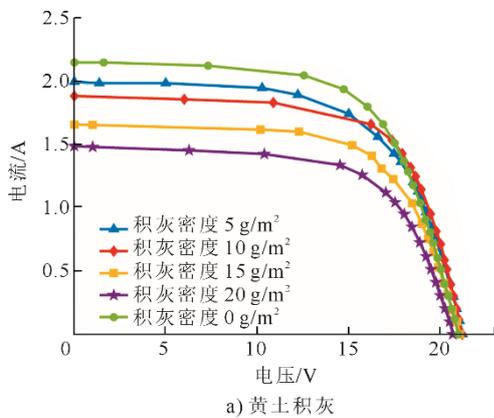
图 5 涂抹积灰后光伏电池板

Fig.5 The photovoltaic panels coated with accumulated ash

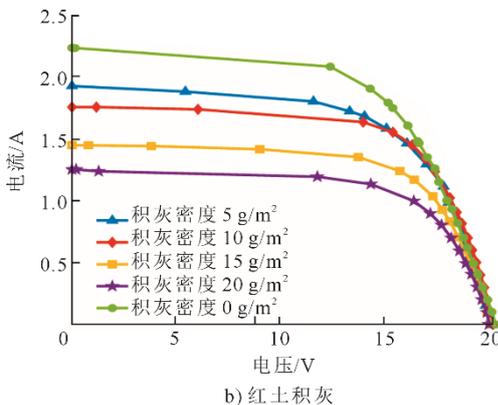
3 实验数据分析

3.1 积灰对光伏电池板伏安特性的影响

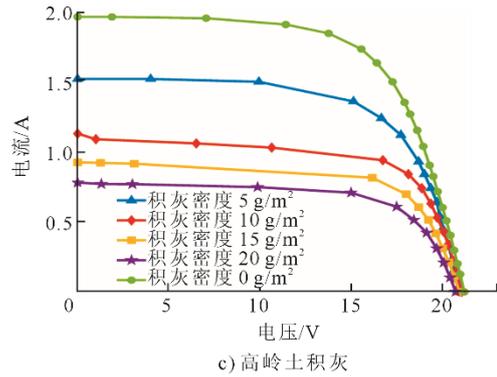
在一天中辐射较强且波动较小的正午时刻，测量黄土、红土和高岭土 3 种积灰条件下光伏电池板的伏安特性曲线，结果如图 6 所示。



a) 黄土积灰



b) 红土积灰



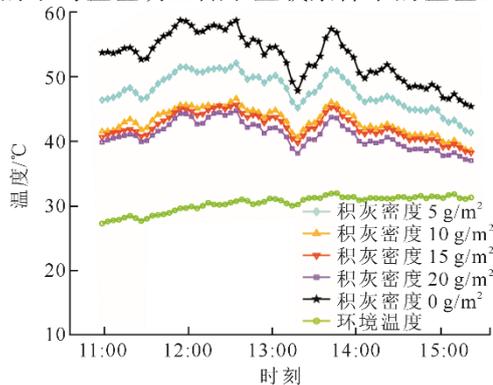
c) 高岭土积灰

图 6 光伏电池板不同积灰密度下伏安特性曲线
Fig.6 The volt-ampere characteristics of the photovoltaic panels with different ash deposition densities

由图 6 可以发现：3 种积灰均对 PV 电池板开路电压的影响较小，对短路电流的影响十分明显，随着积灰密度的增加，光伏电池板的短路电流逐渐减小；高岭土积灰对光伏电池板短路电流的衰减效应最强，当积灰密度由 5 g/m² 增至 20 g/m² 时，光伏电池板短路电流衰减率由 22.61% 增至 60.28%；黄土积灰次之，红土积灰对光伏电池板短路电流的衰减效应最弱。

3.2 积灰对光伏电池板温度影响

以高岭土积灰为例，分别在空载与负载条件下，开展光伏电池板的温度测量实验，将光伏电池板背面加装的 3 只 RW18b20 温度传感器的温度值取平均做为该时刻光伏电池板的温度值。本文于 2019 年 9 月 24 日 10:00 到 15:30，在空载条件下测量电池板温度变化曲线，如图 7a) 所示；于 2019 年 9 月 25 日，在负载条件下测量电池板温度变化曲线，结果如图 7b) 所示。统计积灰电池板与洁净电池板的平均温差见表 3。由图 7 可知，随着积灰密度的增加，电池板的温度逐渐降低，说明积灰使得电池板热阻增大，影响了光伏电池板的热平衡，光伏电池板温度下降。由式(1)可知，该温度效应有利于光电转化过程。此外，由图 7 和表 3 还可见，负载条件下的平均温差明显低于空载条件下的温差。



a) 电池板空载条件

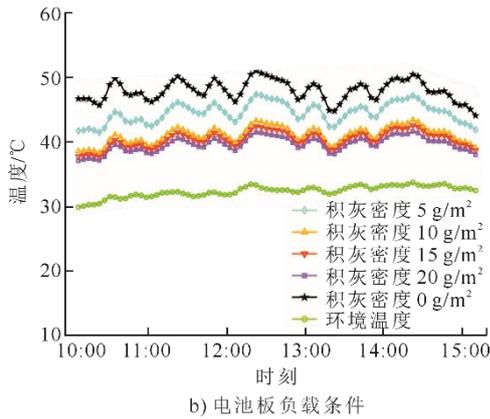


图7 光伏电池板温度变化曲线

Fig.7 The temperature change curves of photovoltaic panel

表3 积灰电池板与洁净电池板平均温差

Tab.3 The average temperature difference between dusty panel and clean panel

积灰密度 $R/(g \cdot m^{-2})$	空载条件/ $^{\circ}C$	负载条件/ $^{\circ}C$
5	6.57	3.15
10	11.87	6.69
15	12.74	7.40
20	13.70	8.19

3.3 积灰对光伏电池板相对透光率的影响

开展透光率测量实验时，每隔 5 s 记录 1 次透过积灰玻璃板与洁净玻璃板的辐射强度，连续记录 120 个点，计算透过玻璃板的平均辐射强度，进而按照式(2)计算相对透光率，实验结果如图 8 所示。

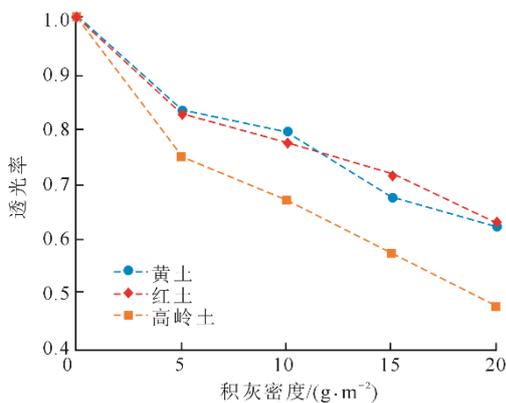


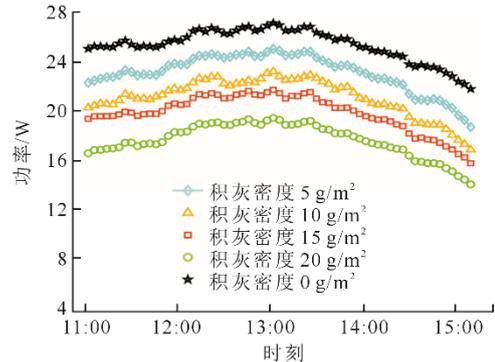
图8 相对透光率变化曲线

Fig.8 Change curves of the relative light transmittance

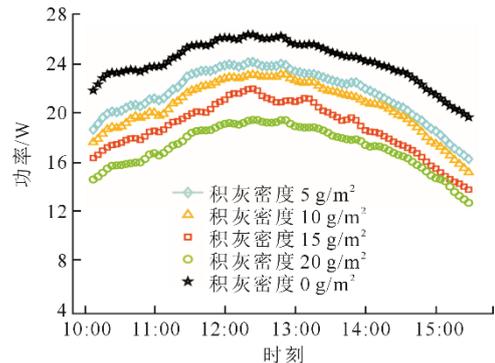
由图 8 可知：对于 3 种积灰，随着积灰密度的增加，相对透光率均明显下降，说明积灰具有明显的削光效应，将造成光伏发电输出功率降低；高岭土积灰的相对透光率明显低于黄土积灰与红土积灰的透光率。这是由于高岭土的颜色为白色，对太阳辐射的反射作用较强。

3.4 积灰对光伏电池板输出功率的影响

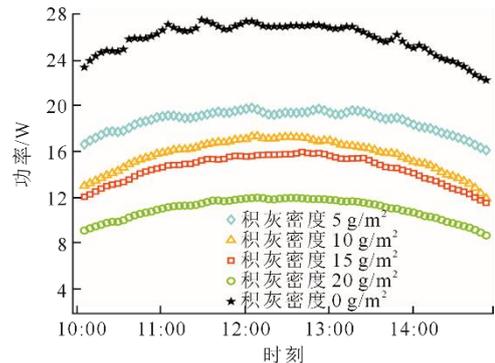
选取晴空天气，针对 3 种积灰，测量不同密度下的光伏电池板输出功率曲线，结果如图 9 所示。由图 9 可知，对于 3 种积灰，不同积灰密度下的光伏电池板输出功率曲线的变化趋势一致，随着积灰密度的增加，输出功率逐渐下降。这说明积灰的削光效应对输出功率的影响要高于温度效应，其中高岭土积灰对输出功率的影响最为明显。



a) 黄土积灰



b) 红土积灰



c) 高岭土积灰

图9 光伏电池板不同积灰密度下输出功率曲线

Fig.9 The change curves of output power of photovoltaic panels at different ash deposition densities

为了定量分析积灰对光伏电池板输出功率的影响，引入无量纲的相对发电效率^[8]，即

$$\eta = \frac{P'}{P} \quad (3)$$

式中, η 为光伏电池板相对发电效率, P' 为积灰条件下的光伏电池板输出功率, P 为洁净光伏电池板的输出功率。

依据式(3)可计算出不同积灰条件下光伏电池板的相对发电效率以及平均相对发电效率, 结果如图 10 和表 4 所示。

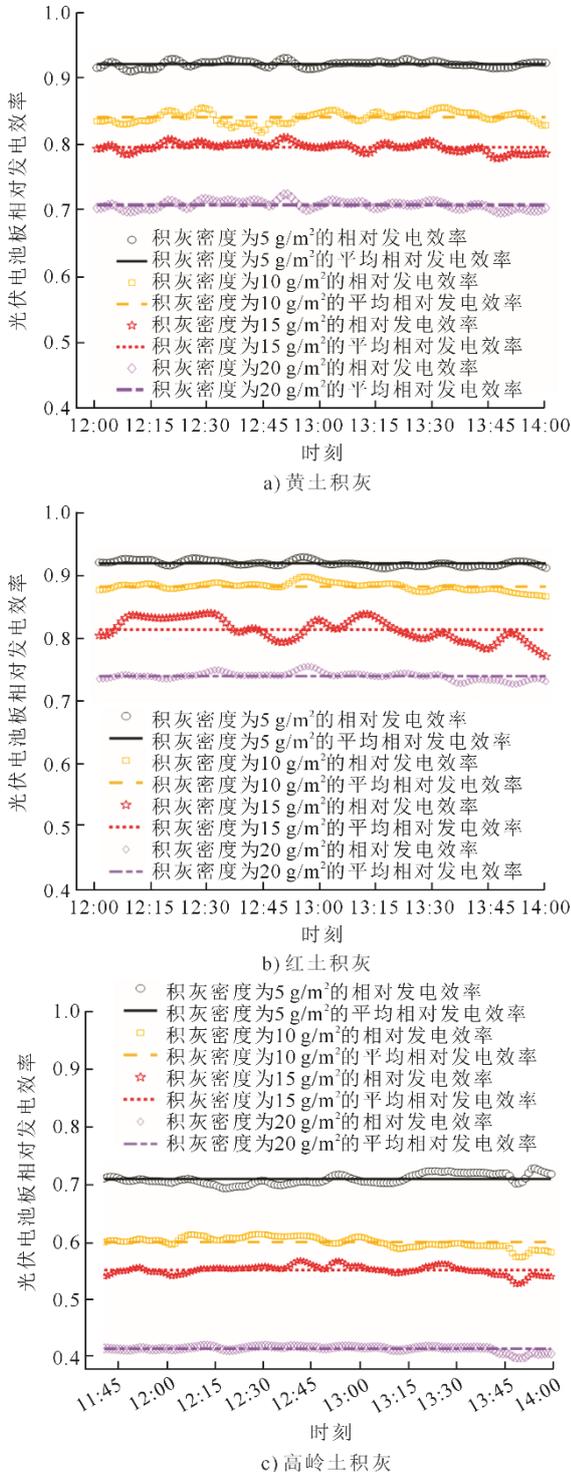


图 10 不同积灰密度下相对发电效率曲线
Fig.10 Change curves of the relative power generation efficiency at different ash densities

表 4 不同积灰密度下平均相对发电效率
Tab.4 The average relative power generation efficiencies at different ash densities

积灰类型	积灰密度 $R(\text{g m}^{-2})$	平均相对发电效率 η_{av}
黄土	5	0.923 8
	10	0.842 9
	15	0.797 1
	20	0.708 9
红土	5	0.920 1
	10	0.883 0
	15	0.814 5
	20	0.740 5
高岭土	5	0.712 3
	10	0.602 3
	15	0.553 4
	20	0.416 0

由图 10 可以发现: 不同类型积灰对太阳能电池板相对发电效率的影响趋势相同, 均随着积灰密度的增加, 光伏电池板的相对发电效率逐渐降低; 高岭土积灰对相对发电效率的影响最为显著, 当积灰密度由 5 g/m^2 增至 20 g/m^2 时, 光伏电池板平均相对发电效率由 71.23% 降至 41.61% ; 而黄土积灰与红土积灰对平均相对发电效率的影响较小, 且数值较为接近。

4 拟合模型及算例

4.1 积灰密度与相对透光率和相对发电效率拟合模型

通过上述分析可知, 积灰类型、积灰密度对光伏电池板的相对透光率以及相对发电效率具有明显影响。为此, 针对不同类型积灰, 本文建立了积灰密度与相对透光率、相对发电效率的拟合模型 (表 5)。拟合结果如图 11 所示。由图 11 可知, 对于不同类型积灰, 相对发电效率与积灰密度均呈线性关系, 而相对透光率与积灰密度均呈对数关系。

表 5 积灰密度与相对透光率和相对发电效率拟合模型
Tab.5 The fitting model of ash deposition density, relative light transmittance and relative power generation efficiency

积灰类型	相对透光率拟合模型	相对发电效率拟合模型
黄土	$\gamma=1.674 5-0.312 9 \times \ln(R+8.764 7)$	$\eta=-0.014 4 \times R+1$
红土	$\gamma=1.358 4-0.221 3 \times \ln(R+5.134 2)$	$\eta=-0.012 7 \times R+1$
高岭土	$\gamma=1.375 1-0.278 0 \times \ln(R+3.900 5)$	$\eta=-0.031 7 \times R+1$

本文参考文献[13], 给出基于空气中 PM_{10} 质量浓度与相对湿度的电池板积灰密度计算公式:

$$R = \frac{\alpha \cdot \text{PM}_{cum}}{1 + e^{-0.5(\text{RH}-0.7)}} \quad (4)$$

式中: R 为电池板积灰密度, PM_{cum} 为自电池板清洗

后的逐小时 PM₁₀ 平均质量浓度的累积值, RH 为平均相对湿度, α 为与电池板角度有关的标定系数。基于该公式, 可依据空气质量监测站点发布的 PM₁₀ 平均质量浓度, 计算任意时间断面的电池板积灰密度, 从而可将所建立的拟合模型用于光伏发电功率预测以及光伏电池板积灰的清洗周期选取。

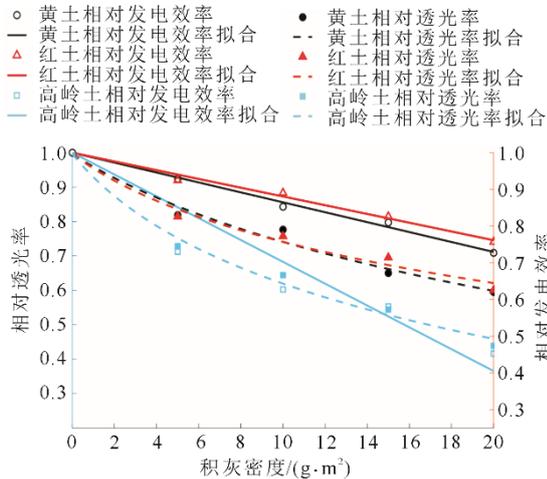


图 11 积灰密度与相对透光率和相对输出功率拟合曲线
Fig.11 Fitting curves of ash deposition density, relative light transmittance and relative output power

4.2 应用算例

4.2.1 光伏发电功率预测

针对基于太阳辐射强度预测的光伏发电功率预测方法, 可通过在式(1)中引入相对透光率 γ , 体现积灰的削光效应对光伏发电功率的影响, 即预测公式为

$$P = \gamma \eta_{PV} SE [1 + \partial_p (T_c - T_{STC})] \quad (5)$$

利用保定某地布置的 1.2 kW 光伏发电系统, 基于黄土积灰对应的相对透光率拟合模型, 选取气象条件十分接近的 2016 年 12 月 14 日 (天气为“晴”, 空气质量指数 (air quality index, AQI) 等级为“优”, 电池板洁净) 与 12 月 23 日 (天气为“晴”, AQI 等级为“优”, 电池板自 12 月 17 日开始自然积灰), 开展超短期功率预测试验 (时间间隔为 15 min), 结果如图 12 所示。由图 12 可见, 与 12 月 14 日相比, 12 月 23 日光伏发电系统的实测平均输出功率降低了 14.36%, 说明积灰对于光伏发电功率具有明显的衰减作用。

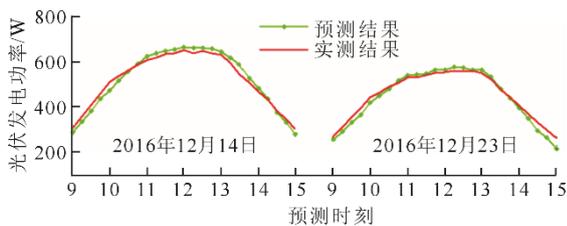


图 12 光伏发电功率预测结果
Fig.12 The forecasting results of photovoltaic power

由空气质量监测数据可知, 经过 6 个重霾日的自然积灰过程, PM₁₀ 平均质量浓度的累积值 PM_{cum} 为 0.058 2 g h/m³。依据式(4)与表 5 计算得出积灰造成的相对透光率 $\gamma=0.845$ 。预测的 12 月 14 日平均相对误差为 3.45%, 引入相对透光率修正后, 预测 12 月 23 日平均相对误差为 3.82%, 仍具有较高的预测精度, 说明相对透光率拟合模型的有效性。

4.2.2 光伏电池板清洗周期选取

本文选择光伏电池板的清洗周期时, 考虑了经济因素, 即积灰引起的光伏电站年发电量损失以及年清洗费用。年发电量损失 Q_{YL} 可按照下式计算:

$$Q_{YL} = 365 \cdot t_d \cdot L_{PV} \cdot C_{PV} \cdot (1 - \eta_y) \quad (6)$$

式中, L_{PV} 为光伏电站总装机容量, t_d 为日均峰值日照时数, C_{PV} 为光伏上网电价, η_y 为年均相对发电效率。其中, 假设清洗周期为 T_c 天, 则每个清洗周期内的平均积灰密度 R_{av} 为

$$R_{av} = \frac{N_h \cdot \alpha \cdot T_c \cdot PM_{av}}{2[1 + e^{-0.5(RHY - 0.7)}]} \quad (7)$$

式中, N_h 为日小时数, PM_{av} 为年均 PM₁₀ 质量浓度, RHY 为年均相对湿度。已知平均积灰密度 R_{av} 后, 依据所在地域积灰类型, 可由表 5 计算出年均相对发电效率 η_y 。

积灰引起的光伏电站年清洗费用 Q_{YC} 可按照下式计算^[14-15]:

$$Q_{YC} = \frac{365}{T_c} \cdot L_{PV} \cdot A \cdot C_{CL} \quad (8)$$

式中, A 为每千瓦光伏电池板面积, C_{CL} 为单位面积光伏电池板的清洗费用。

由式(6)一式(8)可知: 光伏电站的清洗周期 T_c 越长, 年发电量损失 Q_{YL} 越大, 而年清洗费用 Q_{YC} 越小; 反之, 清洗周期 T_c 越短, 年清洗费用 Q_{YC} 越大, 而年发电量损失 Q_{YL} 越小。设因积灰引起的年发电量损失 Q_{YL} 与年清洗费用 Q_{YC} 之和为 Q , 则使得 Q 最小的清洗周期即为最佳清洗周期。

$$Q = Q_{YL} + Q_{YC} \quad (9)$$

以保定某地光伏电站为测算对象, 其总装机容量 L_{PV} 为 10 MW, 上网电价 C_{PV} 为 0.95 元/(kW h), 日均峰值日照时数 $t_d=4.33$ h, 年均 PM₁₀ 质量浓度 PM_{av} 为 114 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 年均相对湿度 RHY 为 73%, 每千瓦光伏电池板面积 A 为 6.24 m², 光伏电池板的清洗费用 C_{CL} 为 0.5 元/m²。基于黄土积灰对应的相对发电效率拟合模型计算年均相对发电效率, 进而得出各项费用与清洗周期的关系曲线如图 13 所示。由

图 13 可知,随着清洗周期的增加, Q 先减小后增大,最小值为 111.9 万元,该最小值所对应的清洗周期 20 天即为最佳清洗周期。

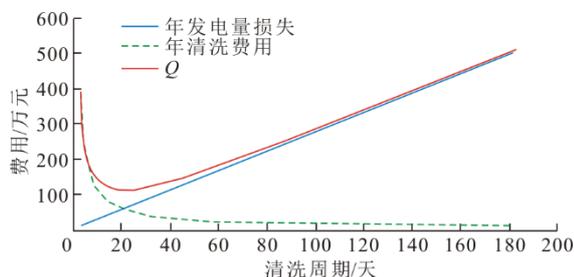


图 13 各项费用与清洗周期关系曲线

Fig.13 Relationship curves between each cost and the cleaning cycle

5 结 论

1) 积灰对光伏电池板的开路电压影响较小,对光伏电池板的短路电流影响较大。随着积灰密度的增加,光伏电池板的短路电流逐渐减小。

2) 在空载与负载条件下,随着积灰密度的增加,光伏电池板的温度均逐渐降低。说明积灰使得电池板热阻增大,通过影响其热平衡降低其温度。

3) 光伏电池板相对透光率与相对发电效率均随着积灰密度的增加而降低,说明积灰具有明显的削光效应,其对输出功率的影响高于温度效应。

4) 在相同的积灰密度下,与黄土积灰和红土积灰相比,高岭土积灰对光伏电池板相对透光率以及相对发电效率的影响最大。

5) 本文建立了拟合模型,通过实际算例表明,光伏电池板的相对发电效率与积灰密度呈线性关系,相对透光率与积灰密度呈对数关系。该模型可用于光伏发电功率预测以及光伏电池板积灰的清洗周期选取。

[参 考 文 献]

[1] RAMLI M A M, PRASETYONO E, WICAKSANA R W, et al. On the investigation of photovoltaic output power reduction due to dust accumulation and weather conditions[J]. *Renewable Energy*, 2016, 99: 836-844.

[2] WAKIM F. Introduction of PV power generation to Kuwait[R]. Kuwait: Kuwait Institute of Scientific Researchers, 1981: 440.

[3] KALDELLIS J K, KOKALA A. Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal[J]. *Energy*, 2010, 35(12): 4862-4869.

[4] SAIDAN M, ALBAALI A G, ALASIS E, et al. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment[J]. *Renewable Energy*, 2016, 92: 499-505.

[5] JIANG H, LU L, SUN K. Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(25): 4299-4304.

[6] PAUDYAL B R, SHAKYAS R. Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: a case study of Kathmandu[J]. *Solar Energy*, 2016, 135: 103-110.

[7] 孙欢伟. 积灰对光伏系统发电效率影响及改善[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 35-36.
SUN Huanwei. Influence of dust on the generating efficiency of photovoltaic system and improvement measures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015: 35-36.

[8] 官燕玲, 张豪, 闫旭洲, 等. 灰尘覆盖对光伏组件性能影响的原位实验研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(8): 1944-1950.
GUAN Yanling, ZHANG Hao, YAN Xuzhou, et al. Study of influence of dust cover on performance of PV module[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(8): 1944-1950.

[9] 李练兵, 王增喜, 刘斌, 等. 太阳能电池积灰对其发电性能影响的研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(6): 1418-1422.
LI Lianbing, WANG Zengxi, LIU Bin, et al. Influence study of dust on power generation performance of PV module[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2016, 37(6): 1418-1422.

[10] 高德东, 孟广双, 王珊, 等. 荒漠地区电池板表面灰尘特性分析[J]. *可再生能源*, 2015, 33(11): 1597-1602.
GAO Dedong, MENG Guangshuang, WANG Shan, et al. Characteristics of dust particle on solar panel surface in desert area[J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(11): 1597-1602.

[11] 张豪. 气象因素及积灰对太阳电池组件发电性能影响的实验研究[D]. 西安: 长安大学, 2017: 34-35.
ZHANG Hao. Experimental investigation of the effect of meteorological factors and dust deposition on the performance of solar cell modules[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017: 34-35.

[12] PAN A J, LU H, ZHANG L Z. Experimental investigation of dust deposition reduction on solar cell covering glass by different self-cleaning coatings[J]. *Energy*, 2019, 181: 645-653.

[13] FOUNTOUKIS C, FIGGIS B, ACKERMANN L, et al. Effects of atmospheric dust deposition on solar PV energy production in a desert environment[J]. *Solar Energy*, 2018, 164: 94-100.

[14] 赵波, 张姝伟, 曹生现, 等. 基于状态监测的电池板积灰清洗周期确定与费用评估[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(14): 4205-4212.
ZHAO Bo, ZHANG Shuwei, CAO Shengxian, et al. Cleaning cycle determination and cost estimation for photovoltaic modules based on dust accumulating condition monitoring[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(14): 4205-4212.

[15] 徐志明, 曲宏伟, 王靖雯, 等. 太阳能光伏板积灰的最佳清扫周期[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(6): 1738-1742.
XU Zhiming, QU Hongwei, WANG Jingwen, et al. Dusty PV modules optimal cleaning cycle[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(6): 1738-1742.

(责任编辑 杨嘉蕾)