

PV/T 太阳能光伏光热系统关键参数影响特性研究

安丽芳¹, 景金龙²

(1. 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:利用 PV/T 太阳能光伏光热系统实验平台针对空气质量流量、太阳辐照强度、环境温度和大气降尘 4 种影响系统性能的关键工况参数进行了实验研究。结果表明:在实验设定的流量范围内, PV/T 系统的光热和光电效率都随着空气质量流量增大而稳步上升; 太阳辐照强度增大时, 系统输出电功率随之增大, 光热效率变化较小, 光电效率有一定程度的降低; 环境温度在一定范围内时, 系统的输出电功率和集热效率都随着环境温度的增大而增大, 而当环境温度超过一定值后, 系统的光伏模块受面板温度升高的影响光电转换效率呈下降趋势; 随着积尘密度的增大, 玻璃盖板的透射率减小, 一个月的积尘量会导致系统光电效率和输出电功率分别下降 17.84% 和 18.25%, 若以光电效率衰减 20% 为界限, 清洁周期为 5 周左右。

关键词: PV/T 太阳能光伏光热系统; 质量流量; 太阳辐照强度; 环境温度; 大气降尘

中图分类号: TK513A 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.11.021

[引用本文格式] 安丽芳, 景金龙. PV/T 太阳能光伏光热系统关键参数影响特性研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(11): 147-153. AN Li-fang, JING Jin-long. Research on effect characteristic of key parameters of PV/T solar photovoltaic photothermal system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 147-153.

Research on Effect Characteristic of Key Parameters of PV/T Solar Photovoltaic Photothermal System

AN Li-fang¹, JING Jin-long²

(1. Gansu Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Lanzhou, China, Post Code: 730000; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China, Post Code: 730050)

Abstract: The PV/T solar photovoltaic photothermal system platform was used to conduct the experimental research for four kinds of key working condition parameters that affected system performance, including air mass flow, solar radiation intensity, ambient temperature and atmospheric dust. The results show that in the experimental set flow range, the photothermal and photovoltaic efficiencies of PV/T system increase with the increase of air mass flow steadily. When the solar radiation intensity increases, the output electric power of the system increases, the photothermal efficiency changes less, and the photoelectric efficiency reduces in a certain degree. When the ambient temperature is within a certain range, the output electric power and heat collection efficiency of the system both increase with the increase of ambient temperature. However, after the ambient temperature exceeds a certain value, the photovoltaic module of the system will be affected by the increase of the panel temperature, and the photovoltaic conversion efficiency will decrease. As the dust density increases, the transmittance of glass cover decrease, and the photoelectric efficiency and output power of system will be respectively reduced by 17.84% and 18.25% caused by one-

收稿日期: 2021-02-19; 修订日期: 2021-04-10

基金项目: 甘肃省自然科学基金(18JR3RA141); 甘肃省白银市景泰县“十三五”41.377 兆瓦光伏扶贫项目(2019-620423-44-01-010078)

Fund-supported Project: Natural Science Foundation of Gansu Province(18JR3RA141); 41.377 MW PV Poverty Alleviation Project in Jingtai County, Baiyin City, Gansu Province during the 13th Five-Year Plan Period(2019-620423-44-01-010078)

作者简介: 安丽芳(1970-), 女, 天津人, 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司高级工程师。

month dust deposition. If the photovoltaic efficiency attenuation of 20% is the limit, the cleaning cycle should be about 5 weeks.

Key words: PV/T solar photovoltaic photothermal system, mass flow rate, solar radiation intensity, ambient temperature, atmospheric dust

引 言

太阳能利用可减少化石能源消耗,降低 CO₂ 排放,有利于解决我国的空气污染问题,改善能源结构,实现可持续发展^[1]。太阳能利用主要包括光热、光电和光化学 3 种形式^[2],其中以光热和光电转换利用最广。就光电转换利用市场而言,近十年其全球光伏组件的安装率超过了 50%^[3-5]。研究表明,普通的 PV 光伏组件只能将入射太阳辐射的 4%~17% 转换为电能,剩下超过 50% 的太阳辐射会转换成集热器表面的热能^[6-7],光伏系统表面温度过高不仅会降低系统的发电效率,而且会对光伏模块造成不可逆的损害^[8-9]。近年来 PV/T 系统的应用越来越广,该系统在进行光伏发电的同时还能将系统表面的热能加以利用,有效地解决了 PV 系统存在的面板温度过高的问题,也提高了太阳能的利用效率^[10]。

如何提升太阳能利用系统的性能一直是该领域研究的重点和热点。目前研究人员主要从设计因素、部件因素和环境因素 3 方面来提升系统的性能^[11]。设计因素包括系统的蓄热形式和工作介质形式等,如根据不同的工作介质可将集热器分为水集热式和空气集热式;部件因素包括各部件的尺寸和材料、吸热板的形状和板芯的吸收率等,如当系统板芯涂有发射率为 0.1 的典型选择性涂层时,其光热转化效率大大提高^[12];环境因素包括大气降尘、太阳辐照强度和环境温度等,研究表明,在伊朗地区太阳辐照强度从 200 W/m² 上升到 1 000 W/m² 时,系统集热效率升高了 10.7%,光伏模块温度升高了 9.25℃,光电效率降低了 0.62%^[13]。此外,由于大气降尘难以预测和控制,也会较大程度上限制太阳能利用系统的性能。相关研究表明,系统表面积尘密度达到 6.09 g/m² 时系统的输出电功率会降低 21.47%^[14]。

太阳能利用系统设计完成后结构和部件参数往往不能进行更改,所以多变的环境条件成为影响系统性能的决定因素。目前对于太阳能利用系统性能的研究主要集中于单一的部件因素或设计因素,经常忽略系统在实际运行过程中环境因素的影响,尤其是在积尘条件下对系统性能的研究较少。本文利用某高校构建的 PV/T 太阳能集热器实验平台,针对影响系统性能的多个关键因素进行了实验研究,并重点评估了在积尘条件下系统的光电性能,根据评估结果制定了适宜的清洁策略,这对于提高太阳能利用系统的效率和运行维护有积极的指导意义。

1 实验测试平台及系统性能评价指标

1.1 实验测试平台

图 1 给出 PV/T 太阳能光伏光热系统实验测试原理图。该系统主要由 3 块串联的 PV/T 太阳能光伏光热模块、管道风机、旋进涡漩式流量计、数据采集仪、温度传感器、蓄电池和逆变器等组成。表 1 给出主要仪器的型号、测量范围和精度。

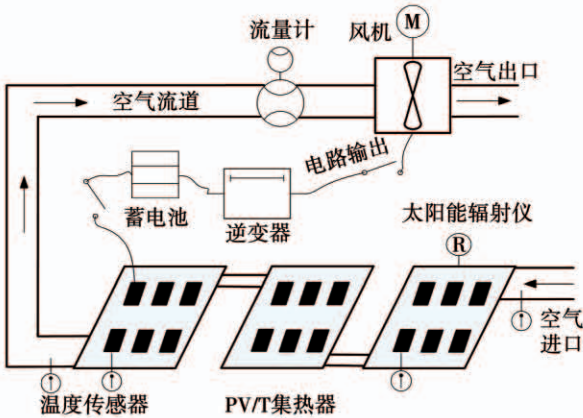


图 1 PV/T 太阳能系统实验测试原理图

Fig. 1 Schematic diagram of PV/T solar energy system experimental test

实验测试平台的单块 PV/T 板长为 0.96 m,宽

为 1.96 m,单块面积为 1.88 m²,总面积为 5.64 m²,光伏模块面积为 2.63 m²。系统的光伏模块通过 MPPT 控制器与蓄电池相接。实验测试平台朝正南方向安装,由于 30°~45° 纬度范围内系统存在最佳功率输出,所以安装倾角选择为 34°^[15]。

表 1 实验测试仪器及精度范围

Tab.1 Experimental test instruments and accuracy ranges

仪器名称	型号	测量范围	精度
旋进漩涡流量计	JY-LUGB	30~600 m ³ /h	1.5 级
温度传感器	K 型热电偶	0~400 ℃	B 级,±0.75% t ℃
太阳能辐射仪	TBQ-2	0~2 000 W/m ²	7~14 μV/W·m ²
电流传感器	WB I342U01-S	0~10 A	0.2 级
温度变送器	PKTH300G-BZ1	温度: -20~+70 ℃	温度: ±0.5 ℃

1.2 系统性能评价指标

PV/T 系统输出电功率 P 定义为系统输出电流 I 和电压 U 的乘积,公式为:

$$P = UI \tag{1}$$

PV/T 系统的光热效率定义为系统的热量与太阳辐照强度的比值^[16],公式为:

$$\eta_{th} = \frac{mc_p(T_o - T_i)}{A_c G} \tag{2}$$

式中: η_{th} 一系统光热效率,% ; m 一系统流道内空气质量流量,kg/s; c_p 一空气比定压热容,J/(kg·℃); T_o 、 T_i 一系统的空气出口和进口温度,℃; A_c 一系统的总集热面积,m²; G 一到达系统表面的辐照强度,W/m²。

PV/T 系统的光电效率定义为系统的输出功率与接收到的太阳辐照强度的比值^[17],公式为:

$$\eta_{PV} = \frac{UI}{GA_{PV}} \tag{3}$$

式中: η_{PV} 一系统光电效率,% ; A_{PV} 一系统光伏模块总面积,m²。

2 空气质量流量和环境参数对系统性能的影响

2.1 空气质量流量

调节空气质量流量控制阀,设定 0.024,0.032,0.036 和 0.042 kg/s 4 种空气质量流量进行实验,测试天气均为晴天,全天辐照量分别为 12.10,12.12,11.98 和 12.14 MJ/m²,全天平均环境温度分

别为 0.17,0.16,0.06 和 -0.03 ℃。测试结果如图 2 所示。当空气质量流量从 0.024 kg/s 增加到 0.042 kg/s 时,光热效率从 14.28% 增加到 17.65%,光电效率基本维持在 13.60% 左右。这是因为当空气质量流量增大时,空气吸收了集热板表面更多的热量,降低了集热器板表面的温度,并减少了系统向外界的散热量,最终结果为系统集热效率升高。集热器板温度的降低在一定程度上也提高了光电效率。从图中可以看出,系统的光热效率与空气质量流量之间近似呈线性关系,这与文献^[16]的研究结果较为相近。

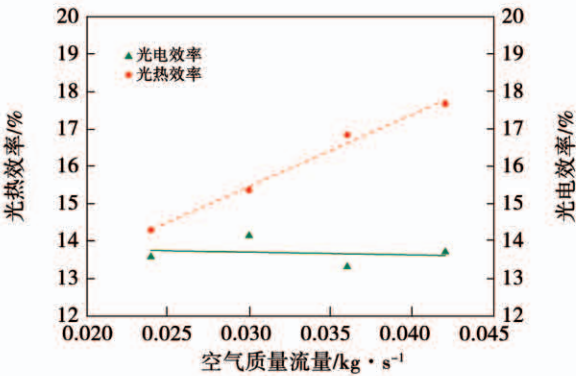


图 2 PV/T 系统的效率随空气质量流量变化
Fig.2 Variation of efficiency of PV/T system with air mass flow rate

2.2 太阳辐照强度

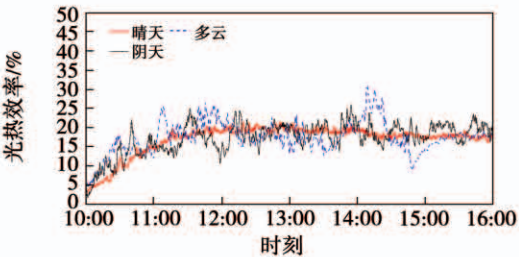
对于太阳能利用系统而言,充足的太阳辐照强度是保证其高效率运行的前提。为了研究不同辐照强度对系统性能的影响,在晴天、多云和阴天 3 种天气条件下进行实验。表 2 为不同天气条件下的测试结果,图 3 所示为不同天气条件下系统性能的变化。晴天、阴天和多云天气的日均辐照强度分别为 561.39,241.49 和 351.18 W/m²,从图 3(a) 可以看出,虽然,多云天气时系统的光热效率曲线波动较大,但 3 种工况的全天平均光热效率差异较小。在图 3(b) 中从 10:00~10:30 时刻的曲线位置可以看出,太阳辐照强度减小,系统光电效率增大,且在观察时段内存在一致的变化趋势,这是因为随着辐照强度减小光伏电池温度从 19.25 ℃ 降低到了 10.33 ℃。但从图 3(c) 全天的电功率图来看,太阳辐照强度越高,系统的电功率越大,3 种工况下的全天总输出电能分别为 1.22,0.84 和 0.71 kW·h,故

太阳辐照强度增大时,系统的输出功率稳定增大。

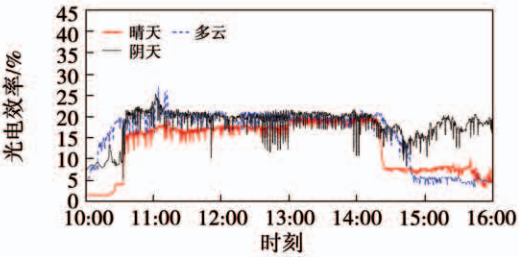
表 2 不同天气条件下系统性能测试结果

Tab.2 System performance test results under different weather conditions

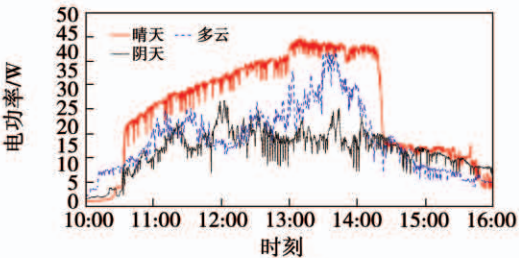
天气	全天平均集热效率/%	全天平均光电效率/%	全天平均环境温度/℃	全天总输出电能/kW·h	全天总得热量/kW·h	光伏电池平均温度/℃	平均太阳辐照强度/W·m ⁻²
晴天	16.98	13.30	0.06	1.22	3.25	19.25	561.39
多云	17.72	16.22	-0.30	0.84	1.99	12.62	351.18
阴天	17.28	18.12	0.22	0.71	1.40	10.33	241.49



(a) 光热效率



(b) 光电效率



(c) 电功率

图 3 不同天气条件下系统的性能变化

Fig.3 Performance variation of the system under different weather conditions

2.3 环境温度

环境温度对 PV/T 系统性能的影响如图 4 所示。环境温度从 25℃ 上升到 35℃ 时,系统的电功率从 232.27 W 增加到 290.68 W,依据系统电功率的定义,环境温度增大时系统的输出电压和电流也增大,故输出电功率升高;但从图中可以看出环境温度高于 31℃ 时,系统输出电功率的增长率受温度的影响开始下降。当环境温度升高时吸热板吸收的热

量增加,最终使系统的光热效率从 15.22% 提高到了 18.42%。从图中可以看出当环境温度在 25~29℃ 区间内时,系统的光电效率从 14.57% 提高到了 17.09%,增长率为 14.75%;而当环境温度在 29~34℃ 区间时光电效率的增长率仅为 7.1%,增长率出现了一定程度的降低;当环境温度为 34℃ 时,系统的光电效率开始降低。这是因为在晴朗天气的夜晚大气温度比环境温度低,集热器通过与环境的红外辐射散热导致系统的整体温度偏低,所以在实验开始阶段,虽然环境温度升高,但光伏组件的温度较低,所以一开始系统性能随着环境温度升高有所提高。而当环境温度超过 31℃ 以后光伏模块的温度开始上升,此刻系统的光电转化效率增长率出现明显下降,当环境温度超过 34℃ 时光伏组件的性能受到温度的限制,光电转换效率开始降低。目前大部分的光伏组件材料为单晶硅,当其表面温度过高时一方面会影响其光电转换效率,另一方面对其寿命也会产生不可逆的影响^[8-9]。

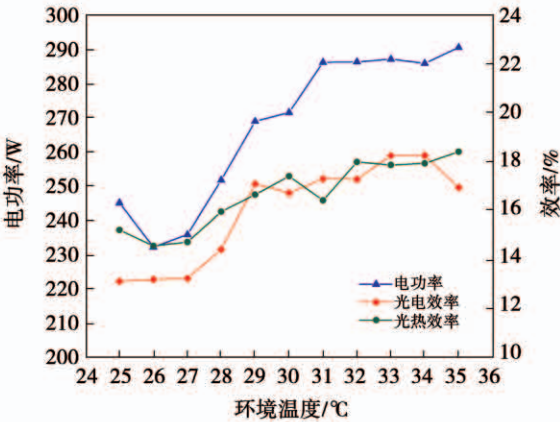


图 4 环境温度对系统性能影响

Fig.4 Effect of ambient temperature on system performance

3 自然积尘的影响

3.1 自然积尘特性

当大气中灰尘颗粒物较多时,部分灰尘颗粒会沉降在太阳能利用系统的表面,若不及时清洁会导致系统表面积尘密度不断增大,从而影响系统的正常运行。当灰尘沉积在系统表面时,其直接影响是降低了集热器玻璃盖板对太阳辐射的透过率,进而影响系统的各项性能。为了研究积尘对系统玻璃盖板透过率的影响大小,采用与系统玻璃盖板相同材料的超白布纹钢化玻璃作为样品进行实验研究,该样品尺寸为 20 cm×20 cm×0.3 cm,布置朝向为正南方向,盖板样品如图 5 所示。

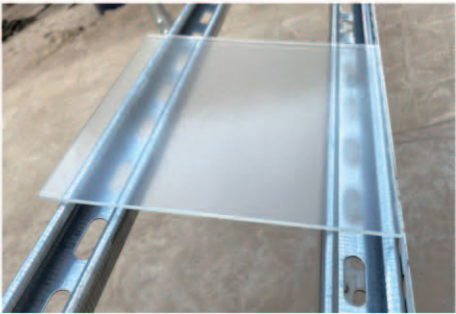


图 5 积尘对玻璃盖板透过率影响的实验装置
Fig.5 Experimental apparatus for transmittance of glass cover plate affected by dust deposition

玻璃盖板透过率实验于 2020 年 12 月 16 日~2021 年 1 月 9 日进行,实验期间没有大气降水。图 6 给出实验期间内盖板样品透过率、积尘密度和透过率下降率的变化曲线。15 d 实验期间内盖板样品透过率从 88.3% 降低到 82.8%,实验结束后积尘密度为 12.53 g/m²。按照构建的 PV/T 系统的面积来计算自然积尘量,一个月的积尘密度达到了 25.05 g/m²。盖板的透过率随着实验天数的增加而不断降低,这将严重减少太阳能利用系统吸收的太阳辐射,降低系统的输出性能。

3.2 不同积尘密度下光电性能评估

为了研究不同积尘密度对系统性能的影响,利用实测数据获得了无尘条件下输出功率随太阳辐照强度的变化关系,拟合出关联式(4);通过不同积尘密度实验获得玻璃盖板透过率随积尘密度的变化关系,如图 7 所示,其拟合关联式为式(5)。

$$P = 21.945 + 0.382G \tag{4}$$

$$\tau(\rho) = 87.617 - 0.404\rho \tag{5}$$

式中: P —无尘条件输出电功率,W; G —太阳辐照强度,W/m²; τ —透过率,%; ρ —积尘密度,g/m²。

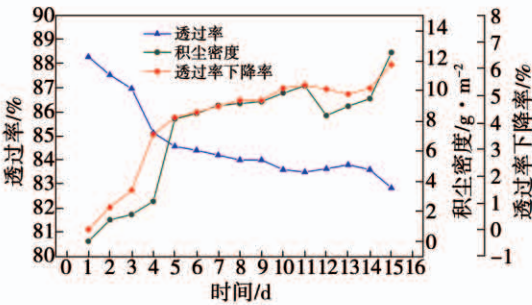


图 6 玻璃盖板透过率和积尘密度变化
Fig.6 Variations of transmittance of glass cover plate and dust density

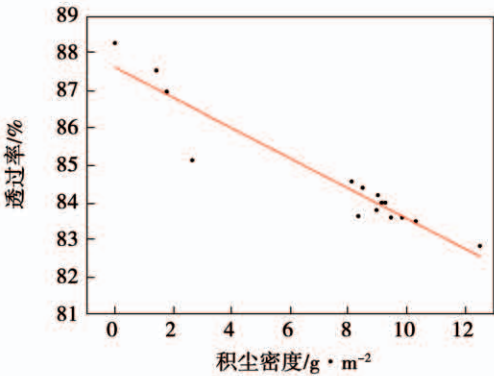


图 7 透过率随积尘密度的变化关系
Fig.7 Variation relationship of transmittance with dust density

利用 PV/T 实验平台进行测试实验,实验期间太阳辐照强度选取为 600 W/m²,进行不同积尘密度下的光电效率和输出功率预测,如图 8 所示。积尘密度从 0 g/m² 增加到 40 g/m² 时,系统的光电效率从 15.29% 减小至 12.28%,系统的输出功率从 241.35 W 减小到 193.84 W,光电效率和输出功率降幅接近 20%。

图 9 为实测太阳辐照强度下不同积尘密度对系统性能的影响。从图中可以看出,实测光电效率和输出功率受环境因素的影响存在较大波动,其中实测的全天平均光电效率与 0 g/m² 积尘密度的拟合值相比平均光电效率误差为 6.4%,平均输出功率误差为 0.59%。当积尘密度由 0 g/m² 增大到 10,20,30 和 40 g/m² 时,系统日平均光电效率预测

值分别下降了 12%, 15.85%, 19.71% 和 26.28%, 日平均输出功率分别降低了 12.48%, 16.36%, 20.17% 和 26.69%。

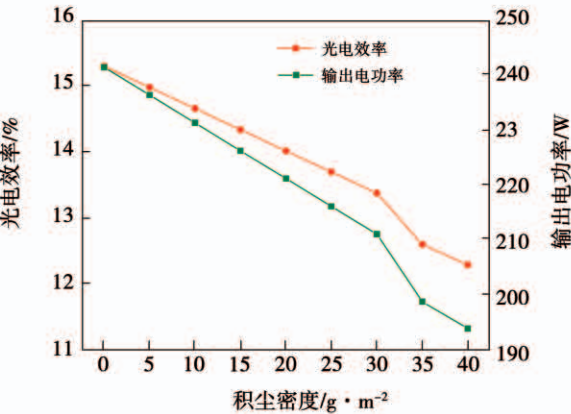
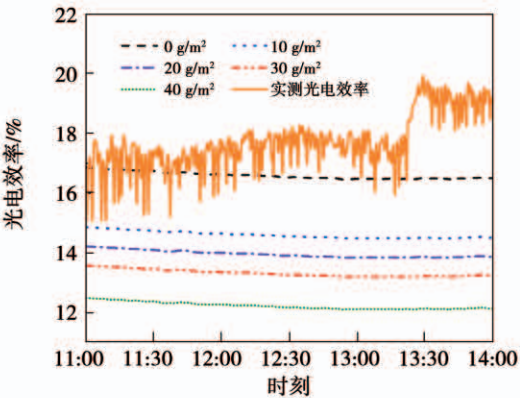
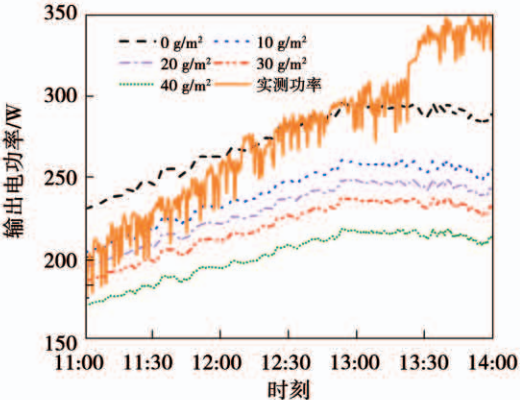


图 8 系统的输出功率和光电效率随积尘密度的变化关系

Fig. 8 The relationship between output power and photoelectric efficiency of system and dust deposition densities



(a) 光电效率



(b) 输出功率

图 9 不同积尘密度下系统光电效率和输出功率
Fig. 9 Photoelectric efficiency and output power of system under different dust deposition densities

由图 6 可知,在当前环境条件下,系统在一个月 内表面积尘密度可达 25.05 g/m^2 ,这将导致系统平 均光电效率和平均输出功率分别下降 17.84% 和 18.25%。结合式(4)、(5)和图 8、图 9 综合分析,若 以光电效率衰减 10% 和 20% 为界限,在西北地区当 前环境条件下,积尘清理的周期分别为 1 周和 5 周 左右。

4 结 论

(1) 利用 PV/T 太阳能光伏光热系统实验平台 研究了关键工况参数对系统性能的影响。其中,空 气质量流量、太阳辐照强度和环境温度在一定范围 内对系统输出功率有积极的影响,但玻璃盖板表 面积尘会造成系统性能衰减。通过监测实际降尘规 律,并结合实验测试与理论分析发现:当积尘密度达 到 40 g/m^2 时,光伏效率衰减达 26.28%。

(2) 对太阳能利用系统而言,除不可控气象参 数对其性能的影响之外,可控的系统运行参数和表 面积尘是需要重点关注的因素,光热系统工质流量 的提升可显著提高光热效率。光伏板表面应定期除 尘,光电效率衰减 20% 情况下,清洁周期以 5 周 为宜。

参考文献:

[1] 罗权权,李保国,朱传辉,等.蓄能型空气式太阳能集热器热效率研究[J].热能动力工程,2019,34(12):116-121.
LUO Quan-quan, LI Bao-guo, ZHU Chuan-hui, et al. Study on thermal efficiency of energy storage air solar collector[J]. Thermal Power Engineering, 2019, 34(12): 116-121.
[2] 罗运俊,何梓年,王长贵.太阳能利用技术.第2版[M].北京:化学工业出版社,2014.
LUO Yun-jun, HE Zi-nian, WANG Chang-gui. Solar energy utilization technology (2nd Edition) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
[3] CONNOLLY D, LUND H, MATHIESEN B V, et al. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems[J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1059-1082.
[4] YANG H, WEI Z, CHENG Z L. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system[J]. Applied Energy, 2009, 86(2): 163-169.
[5] 杨洪兴,吕琳,马涛.太阳能-风能互补发电技术及应用

- [M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- YANG Hong-xing, LYU Lin, MA Tao. Solar wind complementary power generation technology and application [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.
- [6] CHOW T T. A review on photovoltaic / thermal hybrid solar technology[J]. Applied Energy, 2010, 87(2): 365 – 379.
- [7] SARDARABADI M, HOSSEINZADEH M, KAZEMIAN A, et al. Experimental investigation of the effects of using metal-oxides/water nanofluids on a photovoltaic thermal system (PVT) from energy and exergy viewpoints[J]. Energy, 2017, 138: 682 – 695.
- [8] PARK S R, PANDEY A K, TYAGI V V, et al. Energy and exergy analysis of typical renewable energy systems [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 30(2): 105 – 123.
- [9] SARDARABADI M, PASSANDIDEH F M, ZEINALI H S. Experimental investigation of the effects of silica / water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units) [J]. Energy, 2014, 66: 264 – 272.
- [10] 董 丹, 秦 红, 刘重裕, 等. 太阳能光伏/热 (PV/T) 技术的研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(5): 1020 – 1024.
- DONG Dan, QIN Hong, LIU Chong-yu, et al. Research progress of solar photovoltaic/thermal (PV / T) technology [J]. Progress in Chemical Industry, 2013, 32(5): 1020 – 1024.
- [11] 王 敏. 环境因素对平板型太阳能集热器热性能的影响研究 [D]. 北京:清华大学, 2016.
- WANG Min. Influence of environmental factors on thermal performance of flat plate solar collectors [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [12] 张欣宇, 杨晓宏. 双面受热太阳能平板接收器热性能模拟研究 [J]. 热能动力工程, 2019, 34(10): 186 – 192.
- ZHANG Xin-yu, YANG Xiao-hong. Thermal performance simulation of solar flat panel receiver with double side heating [J]. Thermal Power Engineering, 2019, 34(10): 186 – 192.
- [13] HOSSEINZADEH M, SALARI A, SARDARABADI M, et al. Optimization and parametric analysis of a nanofluid based photovoltaic thermal system: 3D numerical model with experimental validation [J]. Energy Conversion & Management, 2018, 160(5): 93 – 108.
- [14] GHOLAMI, ASIAN, KHAZAEI, et al. Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance [J]. Solar Energy, 2018, 159: 356 – 352.
- [15] JUBAYER C M, HANGAN H. Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2014, 134: 56 – 64.
- [16] 郭 超. 多功能太阳能光伏光热集热器的理论和实验研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015.
- GUO Chao. Theoretical and experimental research on multifunctional solar photovoltaic solar thermal collector [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [17] AGUILAR J J A, HERNÁNDEZ C L, GÓMEZ V A, et al. Techno-economic analysis of hybrid PV / T systems under different climate scenarios and energy tariffs [J]. Solar Energy, 2020, 212: 191 – 202.

(孙嘉忆 编辑)