

基于槽式太阳能系统的镜面积尘的影响及预测方法分析

王志敏^{1,2*}, 产文武¹, 杨畅¹, 田瑞^{1,2}, 韩晓飞¹, 宋力^{1,2}, 高崇纲³

¹内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

²内蒙古自治区可再生能源重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051;

³内蒙古尖锋科技有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010051

摘要 基于双轴跟踪槽式太阳能系统对比实验平台,通过理论分析和实验测试的方法研究了积尘对槽式太阳能系统光热性能的影响。引入积尘反射因子和采集因子修正系数来量化积尘对系统光热性能的影响程度。研究结果表明聚光器镜面积尘对焦点聚光特性有明显影响,积尘分布的不均匀性造成散射辐射较为严重,随着积尘量的增加,一定尺寸内的焦点获得的能量减少,焦点中心能流密度减小,小尺寸开口接收器对焦点可采集能量的变化更为敏感。若要保证实验中的槽式聚光镜采集因子修正系数大于0.90,积尘反射因子需小于4.3%;建立了一种积尘对槽式太阳能系统集热性能影响的预测模型,通过实验测试进行了验证,该模型预测值与实验值的相对误差小于5.07%,两者的吻合度较高。该预测方法具有较好的普适性,可为工程实际应用提供理论指导。

关键词 几何光学; 槽式太阳能系统; 积尘反射因子; 采集因子; 能流密度

中图分类号 TK513.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1808001

Effect and Prediction Method of Specular Dust Based on Trough Solar System

Wang Zhimin^{1,2*}, Chan Wenwu¹, Yang Chang¹, Tian Rui^{1,2},

Han Xiaofei¹, Song Li^{1,2}, Gao Chonggang³

¹College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

²Inner Mongolia Renewable Energy Key Laboratories, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

³Inner Mongolia Peak Technology Limited Company, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China

Abstract Based on the comparison test platform of the dual-axis tracking trough solar system, the effect of the dust accumulation on the photothermal performance of the trough solar energy system is studied through theoretical analysis and experimental tests. The dust reflection factor and correction coefficient of the acquisition factor are introduced to quantify the effect of dust accumulation on the photothermal performance of the system. The results show that the dust on the condenser has a significant effect on the concentrating characteristic of the focal plane. The uneven distribution of the dust causes more serious scattered radiation. As the amount of dust increases, the energy obtained by the focal plane within a certain size decreases. The energy flux density at the center of the focal plane is reduced, and the receiver with small aperture is more sensitive to the change of energy that can be collected on the focal plane. To ensure the correction coefficient of the acquisition factor of the trough concentrator is greater than 0.90, the dust reflection factor should be less than 4.3%. A prediction model of the effect of dust accumulation on the heat collection performance of the trough solar system is established and verified by the experimental test. The relative error between the predicted value of the model and the experimental value is less than 5.07%, and the good agreement between them is obtained. This prediction method has good universality and

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-05-15; 录用日期: 2020-06-03

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2020LH05016)、国家自然科学基金(51866011)、内蒙古自治区重大基础研究开放课题(2017)、内蒙古自治区科技创新引导项目(KC BJ2018015)、内蒙古工业大学科学研究项目(ZZ201907)、内蒙古工业大学博士基金(BS201932)、内蒙古工业大学大学生创新实验计划(2020034005)

* E-mail: wzm.imut@163.com

can provide theoretical guidance for practical engineering applications.

Key words geometric optics; trough solar system; dust reflection factor; acquisition factor; energy flux density

OCIS codes 080.2740; 080.2720; 220.4830

1 引 言

在太阳能光热转化应用中,槽式聚光集热技术相对最为成熟^[1-2]。在自然环境中聚光镜镜面积尘是槽式太阳能系统需要解决的一个问题,该问题会引起系统的光学聚焦损失,从而导致系统集热效率下降,因此研究积尘对槽式太阳能系统光热性能的影响有重要意义。

Heimsath 和 Nitz^[3]研究了暴露在沙漠中的镜子和实验室中人工布尘的镜子对镜面散射和反射能力的影响,发现积尘引起的小角度散射明显,并严重降低了镜面的反射率,当增加局部太阳入射角时,反射率显著下降。Zaihidee 等^[4]针对积尘对光伏组件性能的影响进行了研究,指出积尘会减小入射太阳辐照度、降低表面透过率、引入局部遮光效应并增加太阳能电池板的温度,从而降低光伏电池板的效率。Salari 和 Hakkaki-Fard^[5]通过数值模拟研究了积尘沉积密度对光伏组件和光伏光热系统性能的影响,提出了电输出和热输出减小与积尘沉积密度的关系。Siddiqui 和 Bajpai^[6]基于印度某地区一整年光伏组件上积尘累积的数据来开发预测方程,建立了光伏组件收集的积尘厚度与其效率之间的关系。Gholami 等^[7]研究了光伏组件积尘影响因素及其对透光系数的影响,发现安装倾角、方位角、主风向、样品放置时间等因素都对光伏组件表面积尘密度和玻璃盖板透射系数造成了影响,并推导了光伏组件表面积尘密度与玻璃盖板透射系数之间的关系。Deffenbaugh 等^[8]结合积尘堆积的因素计算积尘因子,用于研究自然环境条件下积尘对于槽式太阳能系统的影响,提高了已有的一种预测系统热性能的模型的准确性。王敏^[9]针对积尘导致的平板型太阳能集热器热性能的影响开展了理论和实验研究,建立了可分析积尘影响的传热模型以及环境因素作为影响因子的全年运行性能预测模型。

综上所述,当前国内外针对积尘对光伏组件输出性能的影响以及相关预测模型的研究较多,但槽式太阳能系统与光伏组件的运行方式以及结构组成具有较大差别,且积尘主要通过改变聚光镜反射率以及增加反射光线的散射来影响槽式太阳能系统的输出性能,而目前针对积尘对槽式太阳能系统输出

性能的影响及其预测模型的研究较少,因此本文建立了积尘对槽式太阳能系统输出性能影响的预测模型,通过双轴跟踪槽式聚光测试平台进行实验验证。该工作可为槽式系统规模应用中除尘频次以及除尘装置的设计提供理论参考。

2 模型方法

2.1 积尘影响机理

由光的传播定律可知,入射到聚光器的太阳光线遇到灰尘颗粒会产生反射、吸收和透射的现象,灰尘非透明固体的属性,使其会对聚光器表面产生一定的遮蔽,且不同粒径的灰尘对于光线传播路径的影响不同(图 1),同时灰尘也对光线有一定的吸收作用,从而使得反射到聚光焦面的能量减小。

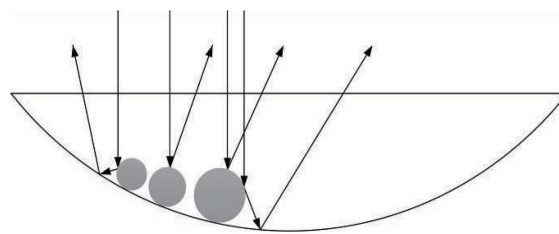


图 1 聚光器表面积尘对光线传播路径的影响
Fig. 1 Effect of dust of concentrator surface on ray propagation path

由图 1 可知,一部分光线照射到聚光器表面积尘上,积尘粒径、种类各不相同,使得聚光器表面凹凸不平,因此光线会发生散射现象。根据能量守恒定律,入射到聚光器表面的太阳辐射可以体现为三部分:一部分被积尘后的镜面吸收,将光能转化为其他形式的能量;一部分被积尘后的镜面反射,有的落在可收集的聚焦平面上,有的光线散射到环境中损失掉;其余部分为透射的辐射能。因此有

$$\alpha G + \rho G + \tau G = G, \quad (1)$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \quad (2)$$

式中: α 、 ρ 、 τ 分别为聚光器表面吸收率、反射率及透射率; G 为入射的辐射能。

如果具有酸碱性的积尘长期附着在聚光器表面,积尘中的酸碱物质会与聚光器材料发生一定的化学反应,腐蚀接触的聚光镜表面,导致聚光镜表面粗糙度增大,这时即使将表面积尘擦拭干净,反射光线的光学路径也会发生明显改变,如图 2 所示。

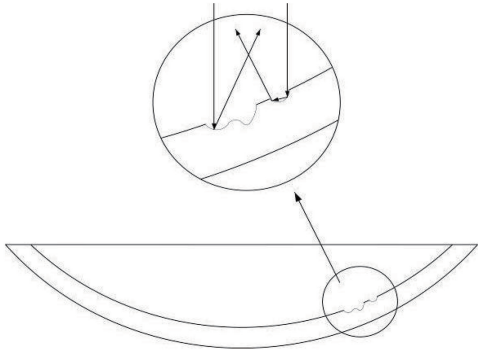


图 2 聚光器表面腐蚀对光线传播路径的影响
Fig. 2 Effect of surface corrosion of concentrator on ray propagation path

以上分析中,对于反射式聚光装置,可利用的能量是落在一定宽度焦平面上的反射能量,其他均可视为能量的光学损失。由于地理位置和气候环境的差异,自然状态下积尘的物理和化学属性各不相同,无法定量测量积尘吸收的能量,而透射的能量在整个聚光装置中所占比例很小,可以忽略。投射在光洁度不理想的聚光器表面的平行光束经反射后,其反射角会发生改变,该角分散将导致设计焦面处的能量减小和焦斑尺寸增大,分析其原因为聚光镜面反射率的减小和散射的增强^[10]。

为了量化积尘引起的表面光洁度对聚光特性的影响,引入积尘反射因子和采集因子修正系数的概念^[11]。积尘反射因子 ζ 定义为相同辐照度下清洁镜面反射率与积尘镜面反射率的差值,可表示为

$$\zeta = \rho_o - \rho_d, \quad (3)$$

式中: ρ_o 为清洁镜面的反射率; ρ_d 为积尘镜面的反射率。

积尘反射因子 ζ 是评价积尘对聚光器表面光洁度影响程度的指标,当聚光器表面出现不同程度的积尘时,积尘反射因子 ζ 随之发生改变,从而导致采

集因子修正系数 $F(\zeta)$ 发生改变,当积尘引起焦面处能量降低时,槽式太阳能系统的集热效率会下降。因此可通过采集因子修正系数 $F(\zeta)$ 预测槽式太阳能系统的热力学性能,该预测模型的方程为^[11]

$$\eta_c = U\eta_0 = U\tau\alpha\rho\gamma F(\zeta) f_\theta [(1 - \alpha_\theta \tan \theta) \cos \theta], \quad (4)$$

式中: η_c 为接收器的集热效率; η_0 为接收器的光学效率; U 为系统光热耦合因子,即系统得到的有用热量与落在接收器上的聚光器反射能量之比; γ 为采集因子; $F(\zeta)$ 为采集因子修正系数,即相同外界环境以及聚光镜运行条件下,积尘聚光镜焦面能量与清洁聚光镜焦面能量的比值; θ 为入射角; f_θ 为聚光镜上除支架遮挡面积外可有效利用的面积百分数; $\alpha_\theta \tan \theta$ 为当入射角为 θ 时聚光器上无法利用的面积百分比; $\cos \theta$ 为入射系数。

2.2 镜面积尘情况量化方法

本文采用利用聚光镜布置样片的方法收集积尘,采用直接测量法测试样片反射率的变化,利用能流密度计同时测量清洁和积尘镜面下焦面能流分布,以定量考察积尘对槽式聚光特性的影响,该方法可避免通过毛刷等工具收集积尘时出现的收集误差以及破坏积尘原始形态。

积尘过程的具体实施为:为了保证实验研究的准确性和可靠性,同时真实还原聚光镜积尘过程及结果,选用与聚光镜同种材质即镀银玻璃作为样片,裁出 32 块尺寸为 35 mm×25 mm×3 mm 的测试样片,将样片清洁后,沿着抛物型槽将其布置在已彻底清洁过的聚光镜表面,为了避免后期测试中存在人为影响因素以及偶然性,采用平均分布法布置样片^[12],如图 3 所示,从而确保实验结果具有较高的可信度。几天后查看聚光镜表面的积尘累积情况,选取不同积尘的工况并采用相同的方法进行研究。

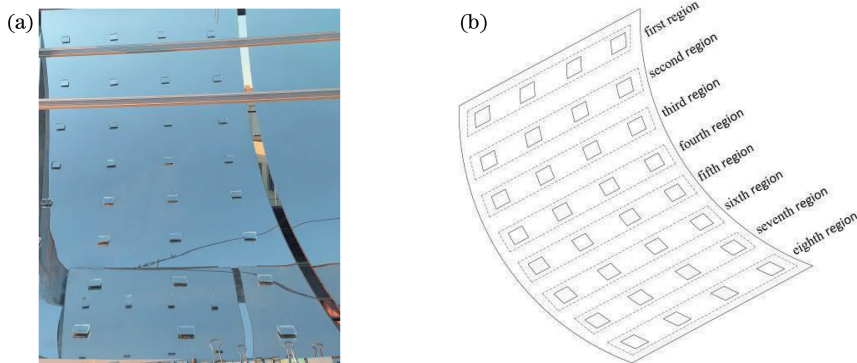


图 3 积尘样片布置图。(a)测试装置;(b)设计图
Fig. 3 Layouts of dust samples. (a) Test device; (b) design diagram

每一块积尘样片的积尘反射因子可用 $\Delta\zeta_i$ 表示,则聚光镜的整个积尘反射因子可表示为

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^{32} \Delta\zeta_i}{32} \quad (5)$$

3 实验及结果分析

3.1 实验测试平台

本文采取了对比测试平台,同步进行积尘对系统聚光和集热性能的实验研究,实验降低了实验过程受时空环境因素影响的敏感性,减小了实验误差,实验平台为安装于楼顶的双轴跟踪槽式太阳能系统台架(图4),在双轴跟踪槽式太阳能系统台架左边聚光镜平台上进行光学效率实验测试,利用 MEDTHERM 公司生产的能流密度计自行设计聚光焦面能流密度测试装置,对聚光焦面能流密度直接进行测量,滑动

导轨为 1500 mm×300 mm 的矩形边框,该装置可实现能流密度计模块在三维方向上的自由移动和准确定位;在双轴跟踪槽式太阳能系统台架右边聚光镜平台上进行热力学性能实验测试,测试流程见图5,所选接收器为一种倒梯形腔体接收器^[13],具体结构见图6和表1。具体实施方法为:基于槽式双轴跟踪对比平台,在平台左边进行光学效率实验测试,一面镜子是积尘镜面,另一面镜子是完全擦拭干净的清洁镜面,使用两套相同的能流密度测量工具,同时对槽式聚光焦面进行能流密度的测量,整个过程可保证外界环境参数完全一致,因此该实验是对聚光镜表面光洁度的光学效率单因素变量的研究;在平台右边同时进行集热效率实验测试,通过数据记录仪和 K 型热电偶记录相关温度数据,实验中的太阳直射辐射值以及其他环境气象参数由 BSRN3000 气象数据采集系统提供。实验中使用的主要仪器及精度见表2。

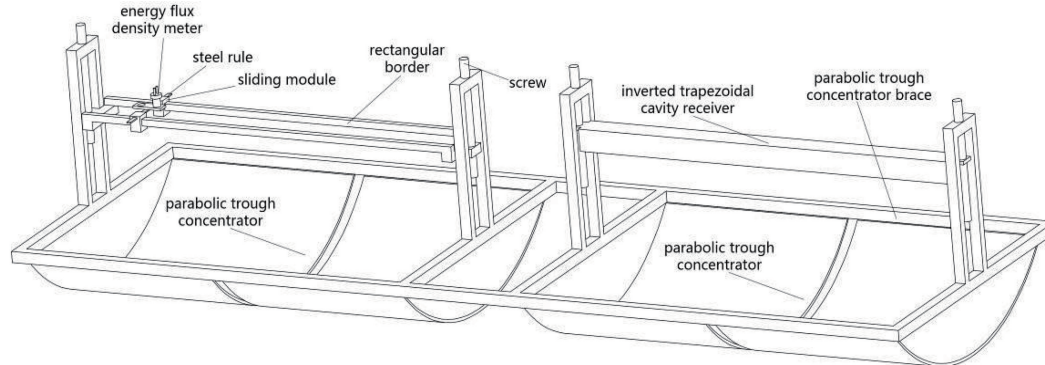


图4 双轴跟踪槽式太阳能系统对比测试平台

Fig. 4 Comparison test platform of dual-axis tracking trough solar system

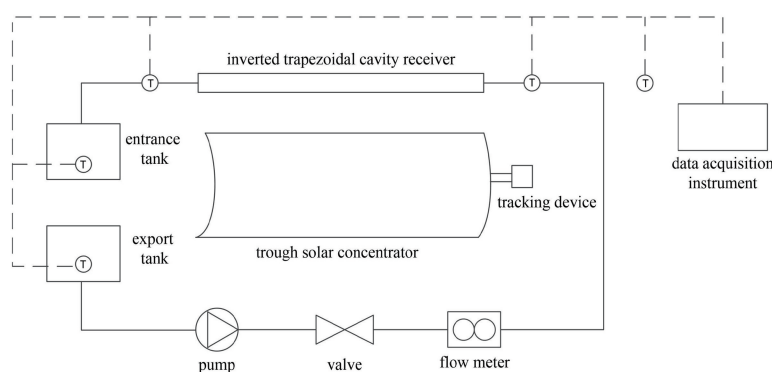


图5 槽式太阳能系统热力学性能测试流程图

Fig. 5 Flow chart of thermodynamic performance test based on trough solar system

3.2 实验方案

选取三组不同积尘工况展开实验研究,在三组积尘工况下进行自然积尘时,聚光镜面都与水平面呈 45°角并且按照东西方向安放,积尘积累过程以及能流实验当天的环境参数如下。

工况 1: 积尘过程开展于 2019 年 8 月,累计积尘 10 d,期间除一次小雨外其他时间晴朗,聚光镜表面积尘状况见图 7(a),焦面能流密度测试期间太阳直射辐照度为 876~915 W·m⁻²,环境温度基本稳定在 26~29 °C,环境风速为 0.6~1.5 m·s⁻¹。

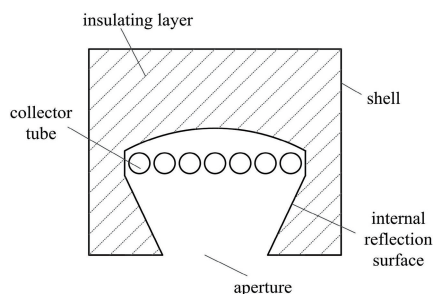


图 6 腔体接收器的剖面图
Fig. 6 Profile of cavity receiver

表 1 腔体接收器结构参数

Table 1 Structural parameters of cavity receiver

Type	Parameter	Value
Cavity receiver	Aperture width	50
	W_c /mm	
	Cavity width B /mm	120
	Cavity height H /mm	100
	Cavity length L_c /mm	1500
	Diameter of tube d /mm	10
	Number of tubes n	7

表 2 主要仪器仪表

Table 2 Main instruments

Name of instrument	Type	Accuracy
Float flowmeter	LZB-25	20 L/h
Magnetic circulating pump	MP-100R	
Thermocouple	K	0.75%
Data interceptor	TP700	0.2%
Radiation observation system	BSRN	5 W/m ²
Energy flow densitometer	Gardon Gage	3%
Ultraviolet spectrophotometer	UV-3600	

工况 2: 积尘过程开展于 2019 年 9 月, 累计积尘 15 d, 期间无降雨天气, 聚光镜表面积尘状况见图 7(b), 焦面能流密度测试期间太阳直射辐照度为 836~878 W·m⁻², 环境温度为 22~25 °C, 环境风速为 1.0~1.7 m·s⁻¹。

工况 3: 积尘过程开展于 2019 年 10 月下旬, 累计积尘 20 d, 期间天气晴朗, 聚光镜表面积尘状况见图 7(c), 焦面能流密度测试期间太阳直射辐照度为 775~824 W·m⁻², 环境温度为 7~10 °C, 环境风速为 0.8~1.9 m·s⁻¹。

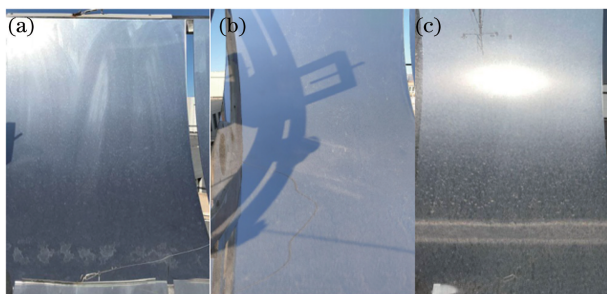


图 7 不同工况下聚光器积尘实物图。(a) 工况 1; (b) 工况 2; (c) 工况 3

Fig. 7 Pictures of concentrators with dust under different working conditions. (a) Working condition 1; (b) working condition 2; (c) working condition 3

实验中选择的三种工况较为典型, 抛物型槽式聚光系统的实验平台所在地区的 8 月多雨, 因此积尘不会存留太长时间, 工况 1 即为此种情况下的积尘, 积尘情况如图 7(a) 所示; 9 月秋高气爽, 天气晴朗, 将样片放置一定时间达到较大积尘量, 工况 2 即为此种情况下的积尘, 积尘情况如图 7(b) 所示; 10 月中旬进入当地供暖期, 考虑到 12 月之后气温较低, 实验操作难度加大, 且日辐照量较小, 能流密度计的测量误差会增大, 因此综合考虑各项因素选择在 11 月开展实验测试, 工况 3 即为此种情况下的积尘, 积尘情况如图 7(c) 所示。三个测试工况当天均选择天气晴朗、无云层遮挡的正午时刻进行, 以保证焦面能流的测试精度。能流测试过程中设置数据记录仪的通道每隔 10 s 输出一次数据, 处理数据时剔

除偶然出现的异常点后再取平均值。

3.3 实验结果分析

通过以下 6 组实验测定倒梯形腔体接收器的光热耦合因子, 选取 2019 年的 5~11 月中的 6 d, 环境温度分别为 5, 10, 15, 20, 25, 30 °C 左右, 且该 6 d 测试时间内环境风速都小于 1 m·s⁻¹, 进行清洁镜面集热效率测试。集热效率测试实验中流量为 500 L·h⁻¹, 入口温度为 50 °C, 每次测试时间为 2 h。

环境温度 t_a 与槽式太阳能系统光热耦合因子 U 的关系可表示为

$$U = 0.0107t_a - 1.3357 \times 10^{-4}t_a^2 + 0.5099. \quad (6)$$

图 8 中拟合曲线的拟合度为 0.985, 由图 8 可知, 槽式太阳能系统光热耦合因子受环境温度的影响较大, 在 5~30 °C 的范围内随环境温度的升高而

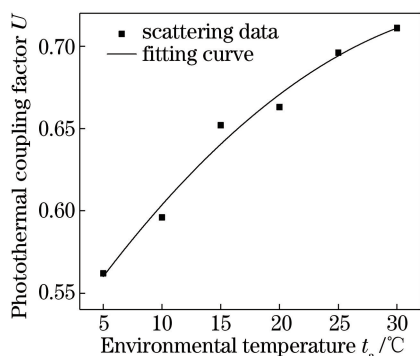


图 8 环境温度对槽式太阳能系统光热耦合因子的影响
Fig. 8 Effect of environmental temperature on photothermal coupling factor of trough solar system

增大,因实验中使用的倒梯形腔体接收器是根据黑腔原理设计制作的,开口处无玻璃盖板,但实验过程中风速较小,系统传热工质采用的是水并以中温运行,管内工质与环境之间的散热主要通过热辐射方式进行,因此受环境温度影响明显。

使用 UV-3600 测量三种工况下积尘样片的反射率,将 32 块积尘样片分为 8 个区域,如图 3(b)所示,对每个区域的反射率求平均值,得到图 9 所示的结果,可以看出,在该实验条件下进行积尘,聚光镜上的积尘分布是非均匀的,积尘情况从区域 1 到区域 8 逐渐严重。积尘后对三种工况下的积尘镜面和清洁镜面进行焦面能流密度测试,结果见图 10。

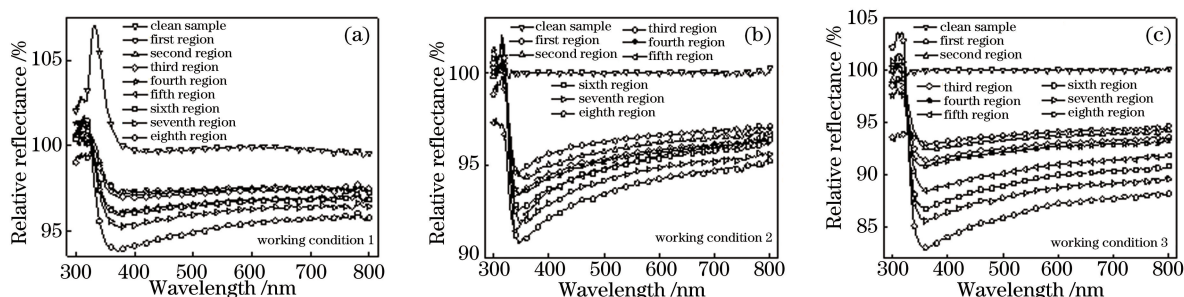


图 9 各测点相对反射率随波长的变化。(a)工况 1;(b)工况 2;(c)工况 3

Fig. 9 Relative reflectance varies with wavelength at each measurement point. (a) Working condition 1; (b) working condition 2; (c) working condition 3

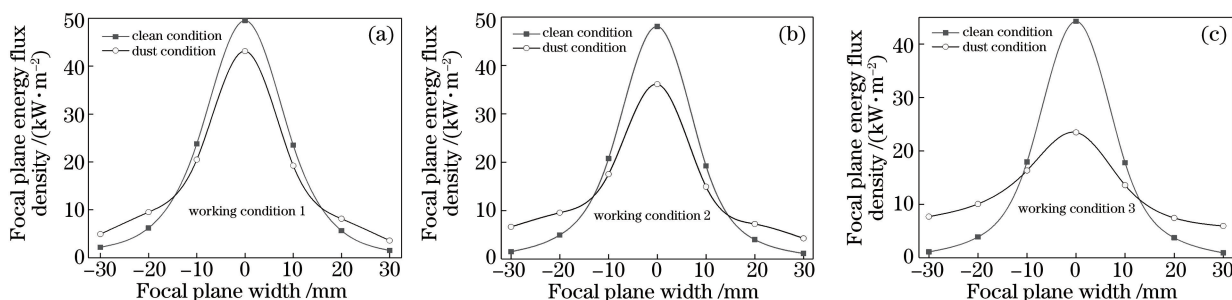


图 10 积尘和清洁镜面焦面能流密度分布图。(a)工况 1;(b)工况 2;(c)工况 3

Fig. 10 Focal plane energy flux density on dusty mirror and clean mirror. (a) Working condition 1; (b) working condition 2; (c) working condition 3

如图 10 所示,积尘后的聚光镜由于表面光洁度变差,积尘颗粒对光线的吸收作用以及镜面反射率的下降导致焦面中心点能流密度有较明显的下降趋势。当镜面有积尘时,靠近焦面中心位置的清洁镜面的能流密度大于积尘镜面的能流密度,并且随着积尘量的增大,焦面中心点能流密度的下降幅度增大,但在焦面远离中心点的某个位置会发生变化,即积尘镜面能流密度会大于清洁镜面能流密度,图 10(a)是工况 1 的能流分布情况,该变化点发生在 -14.6 mm 和 15.7 mm 附近的位置,图 10(b)是工况 2 的能流分布情况,该变化点发生在

-13.1 mm 和 14.5 mm 附近的位置,图 10(c)是工况 3 的能流分布情况,该变化点发生在 -11.1 mm 和 13.1 mm 附近的位置,可以看出随着积尘量的增多,焦面能流密度分布越趋于分散。其原因为积尘颗粒可局部强化光线的散射辐射能力,聚焦光斑宽度随积尘量的增大而增大。积尘过程中聚光镜静止在与地面约呈 45° 的方位,由于重力作用,积尘在抛物型槽式聚光镜的上下部分具有很明显的非均匀性,因此在焦面中心两侧的能流密度出现明显不同的变化幅度。上述分析表明焦面能流密度分布不仅与积尘本身的物理属性有关,还与聚光镜表面积尘

的分布均匀性有关。图 10 仅直观体现了实验测试焦面散点处的原始能流密度值,若要考察积尘对焦面光学特性的影响,仍需引入采集因子的概念,针对不同接收宽度进行积分,因有限的实验测试焦面散

点会增大计算误差,此处采用 origin 软件中插值和 外推的方法增加数据点^[14]。选取接收器开口宽度 为 20~80 mm,不同工况下接收器开口宽度与采集 因子的关系见图 11。

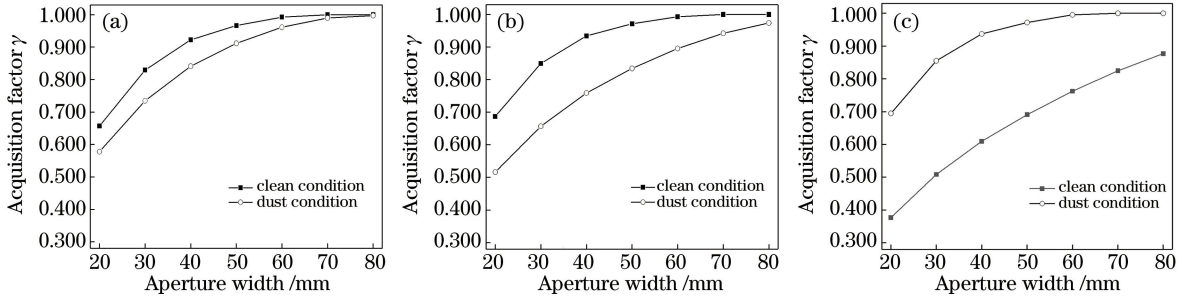


图 11 不同工况下采集因子随接收器开口宽度的变化趋势。(a)工况 1;(b)工况 2;(c)工况 3

Fig. 11 Acquisition factor varies with aperture width under different working conditions.

(a) Working condition 1; (b) working condition 2; (c) working condition 3

由图 11 可知,随着接收器开口宽度的增大,采集因子呈抛物线型上升趋势。清洁镜面对应的采集因子均大于积尘镜面对应的采集因子,这是因为清洁镜面聚焦后能量集中于较窄的光带,而镜面的积尘对光线的吸收和散射作用,使得焦面能量分散,且散射与多种因素相关,具有随机性。对于图 11(a),当接收器开口宽度为 50 mm 时,清洁和积尘镜面下的采集因子分别为 0.966 和 0.912,若要积尘镜面下的采集因子大于 90%,则接收器开口宽度需大于 50 mm;在图 11(b)中,接收器开口宽度在 20~60 mm 之间,两种不同光洁度镜面的采集因子相差较大,而开口宽度大于 60 mm 后该差距缩小并逐渐趋于一致;在图 11(c)中,接收开口宽度为 50 mm 时,清洁和积尘镜面下的采集因子分别为 0.976 和 0.691,当开口宽度从 50 mm 增大至 80 mm 时,两种镜面采集因子差由 0.281 缩小至 0.123。出现该现象的原因为焦面上能流密度分布是呈近正态分布的,如图 10 所示,聚光镜上存在的积尘会使光线发生散射,使得焦面宽度变大,焦面处能流密度变化趋于平缓,因此当接收器开口宽度较小时,积尘后较小接收器开口的光反射损失较清洁镜面时的更大。并且随着积尘量的增加,光线的散射会变大,焦面处能流密度变化会更加平缓,从而导致接收器开口宽度固定时,采集因子减小。

本文采用的倒梯形腔体接收器的开口宽度为 50 mm,将对应的以上三种工况下的实验数据整合为积尘反射因子 ζ 和采集因子修正系数 $F(\zeta)$ 之间的关系,见图 12。

如图 12 所示,拟合曲线的拟合度为 1,随着积

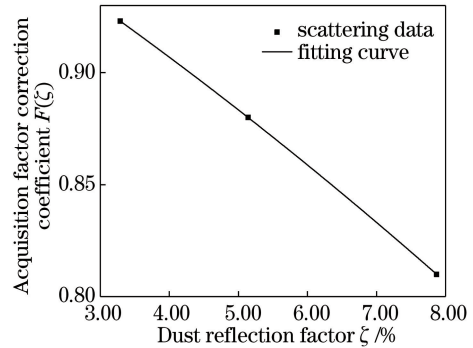


图 12 积尘反射因子引起采集因子修正系数的变化

Fig. 12 Change of acquisition factor correction coefficient caused by dust reflection factor

尘反射因子的增大,采集因子修正系数呈下降趋势,当积尘反射因子为 3.29% 时,采集因子修正系数为 0.92,而当积尘反射因子是 7.87% 时,采集因子修正系数降低到 0.81。在工程实际应用中聚光设备在室外放置,聚光表面积尘不可避免,何时除尘需综合考虑聚光比决定的焦面实际能流总量以及积尘反射率的下降与采集因子修正系数之间的关系。对于本文槽式聚光装置,要想使得采集因子修正系数不小于 0.90,聚光镜积尘反射因子不大于 4.30%。积尘反射因子与采集因子修正系数的关系可表示为

$$F(\zeta) = -0.0005\zeta^2 - 0.0191\zeta + 0.9912. \quad (7)$$

进行光学效率测定的同时,在双轴跟踪槽式太阳能台架右边进行集热效率测定实验;结合光学效率和光热耦合因子预测集热效率,将其与实验集热效率进行对比。图 13 为不同积尘工况下的集热效率实验值与预测值。

由图 13 可知,在本文选取的工况下实验值都低

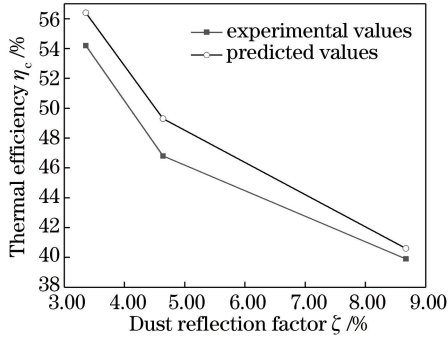


图 13 不同积尘工况下的集热效率实验值与预测值
Fig. 13 Experimental and predicted values of thermal efficiency under different dust conditions

于预测值,其原因为预测模型未考虑跟踪误差^[15],且实验值测试中的风速较测试光热耦合因子时的风速大,但两者差值较小,最大偏差为 5.07%,因此该预测模型可信度较高。当积尘反射因子下降约 5.31 个百分点时,集热效率的预测值和实验值都至少下降 14%。

在系统集热效率测定实验中,测量设备包括:测量工质温度的 K 型热电偶,定义其相对不确定度为 U_{r1} ;测量太阳辐照的 BSRN 装置,定义其相对不确定度为 U_{r2} ;测量工质流量的 LZB-25 浮子流量计,定义其相对不确定度为 U_{r3} 。三者相互独立,因此可求得实验系统的相对不确定度 U_{rz} 为^[16]

$$U_{rz} = \sqrt{U_{r1}^2 + U_{r2}^2 + U_{r3}^2} \quad (8)$$

仪器直接测量时的标准不确定度为

$$U_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} + \Delta^2} \quad (9)$$

式中: U_r 为标准不确定度; X_i 为某次的被测量值; \bar{X} 为测量值的平均值; Δ 为仪器误差; n 为测量次数。通过仪器的标准不确定度可求得实验系统的相对不确定度为

$$U_{rz} = \frac{U_r}{y} \quad (10)$$

式中: y 为测量结果的算术平均值。通过对热电偶和浮子流量计进行实验分析,得到 K 型热电偶的相对不确定度 U_{r1} 为 2.23%,LZB-25 浮子流量计的相对不确定度 U_{r3} 为 3.46%,辐照观测系统使用的是 TBS-YG5 全自动跟踪太阳仪,其灵敏度为 7~14 $\mu\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^2)$,相对不确定度 U_{r2} 为 0.25%^[17]。因此可得集热效率实验测试系统的相对不确定度 U_{rz} 为 4.12%。

4 结 论

基于双轴跟踪槽式太阳能系统对比实验平台,对积尘影响下槽式太阳能系统光热性能的变化进行了理论分析和实验测试研究,并得出了以下结论:

1) 随着积尘量的增多,焦面光斑增大,焦面能流密度降低,焦面中心点能流密度降低较明显,并且除积尘自身物理属性外,聚光镜面积尘分布均匀性也是影响焦面聚光特性的因素之一,需针对此进行深入研究。

2) 引入积尘反射因子和采集因子修正系数的概念,以积尘导致的聚光镜面反射率的变化作为量化指标,对于本文使用的槽式聚光装置,聚光镜积尘反射因子小于 4.30%,可保证采集因子修正系数大于 0.90,该种量化方法可用于设定有效除尘的频次。

3) 建立通过积尘反射因子预测集热效率的模型,并通过实验进行验证,在本文积尘工况中,预测值与实验值的相对误差小于 5.07%,两者的吻合性较好。该预测模型的建立方法具有较好的普适性,进一步优化和完善该预测模型可为工程实际应用提供理论支持。

参 考 文 献

- [1] Fan M, Liang H B, You S J, et al. Applicability analysis of the solar heating system with parabolic trough solar collectors in different regions of China [J]. Applied Energy, 2018, 221: 100-111.
- [2] Farjana S H, Huda N, Mahmud M A P, et al. Solar process heat in industrial systems - A global review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 2270-2286.
- [3] Heimsath A, Nitz P. The effect of soiling on the reflectance of solar reflector materials - Model for prediction of incidence angle dependent reflectance and attenuation due to dust deposition [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 195: 258-268.
- [4] Zaihidee F M, Mekhilef S, Seyedmahmoudian M, et al. Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: why and how [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 1267-1278.
- [5] Salari A, Hakkaki-Fard A. A numerical study of dust deposition effects on photovoltaic modules and photovoltaic-thermal systems[J]. Renewable Energy, 2019, 135: 437-449.
- [6] Siddiqui R, Bajpai U. Correlation between

- thicknesses of dust collected on photovoltaic module and difference in efficiencies in composite climate[J]. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2012, 3: 26.
- [7] Gholami A, Saboonchi A, Alemrajabi A A. Experimental study of factors affecting dust accumulation and their effects on the transmission coefficient of glass for solar applications [J]. *Renewable Energy*, 2017, 112: 466-473.
- [8] Deffenbaugh D M, Green S T, Svedeman S J. The effect of dust accumulation on line-focus parabolic trough solar collector performance[J]. *Solar Energy*, 1986, 36(2): 139-146.
- [9] Wang M. Effect of environmental factors on thermal performance of flat plate solar collector[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
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.
- [10] Ma J. Study on the effect of the performance of flat plate solar collector by dust [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
马俊. 积尘对平板型太阳能集热器性能影响的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [11] He Z N. Solar thermal utilization [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
何梓年. 太阳能热利用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [12] Li Z X, Du S K. Experimental optimization design and statistical analysis [M]. Beijing: Science Press, 2010.
李志西, 杜双奎. 实验优化设计与统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [13] Wang Z M, Tian R, Qi J C, et al. Structural design and optical performance of inverted trapezoidal cavity receiver [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (12): 1222003.
王志敏, 田瑞, 齐井超, 等. 倒梯形腔体接收器的结构设计及光学性能 [J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1222003.
- [14] Ye W P. Origin 9.1 technical drawing and data analysis [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2015.
叶卫平. Origin 9.1 科技绘图及数据分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [15] Wang Z M, Chan W W, Yang C, et al. Focal-plane energy flux test and focusing characteristic of dual-axis tracking trough concentrator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0508001.
王志敏, 产文武, 杨畅, 等. 双轴槽式系统焦面能流测试与聚光特性分析 [J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0508001.
- [16] Wu Z F, Dai C H, Li L, et al. Evaluation of correlated color temperature uncertainty [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0212002.
吴志峰, 代彩虹, 李玲, 等. 相关色温测量不确定度分析 [J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0212002.
- [17] Geng G X, Yan S Y, Wang F, et al. Study of flux density distribution on focal plane of the trough solar concentrator system [J]. *Applied Science and Technology*, 2018, 45(6): 97-102.
耿广旭, 闫素英, 王峰, 等. 槽式聚光太阳能集热系统焦面能流密度分布研究 [J]. *应用科技*, 2018, 45(6): 97-102.