

doi: 10.12052/gdutxb.180181

滑移式线性菲涅尔太阳能集热器的设计及实验研究

卢梓健¹, 黄金^{1,2}, 胡艳鑫¹, 王海¹, 陈友鹏¹

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 肇庆学院 环境与化学工程学院, 广东 肇庆 526061)

摘要: 介绍了一种滑移式线性菲涅尔太阳能集热器的设计方法及其工作原理. 当真太阳时为10:00~14:00时, 在TracePro中对此集热器进行光路模拟, 得出一天中光斑的变化情况, 并与实验结果进行对比, 最后进行全年光斑模拟分析. 模拟及实验结果表明: 两曲线规律基本一致, 均呈现先增大后减少的抛物线对称分布规律; 集热器有滑移时一天中的平均集热效率为22.90%, 模拟等效平均集热效率为24.45%, 无滑移时平均集热效率为6.40%.

关键词: 太阳能; 滑移式; 菲涅尔; 集热器; 集热效率

中图分类号: TK519

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2019)05-0086-08

Design and Experimental Study of Sliding Linear Fresnel Solar Collector

Lu Zi-jian¹, Huang Jin^{1,2}, Hu Yan-xin¹, Wang Hai¹, Chen You-peng¹

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. School of Environmental and Chemical Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China)

Abstract: The design method and its working principle of a sliding linear Fresnel solar collector are presented. When the true sun was from 10:00 to 14:00, the optical path simulation of the collector was performed in TracePro, so the change of the spot in one day was obtained and compared with the experimental results, and finally the annual spot simulation analysis was performed. The simulation and experimental results show that the two curves are basically the same, and they both show the parabolic symmetry law of increasing first and then decreasing. The average collector efficiency of one day is 22.90%, and the simulated equivalent average heat collection efficiency 24.45%, the average heat collection efficiency without slip 6.40%.

Key words: solar energy; slip type; Fresnel; collector; collector efficiency

太阳能因其绿色环保、取之不尽用之不竭的特点, 而成为世界各国争相开发利用的可再生能源之一^[1-3]. 为了满足用户对中高温太阳能集热利用的需求, 多种类型的聚光性集热器被设计、研究. 其中, 线性集热器因其聚光光斑均匀度好、聚光效果好等优点而得到广泛应用. 目前使用较为广泛的太阳能线性集热器有抛物槽式集热器、反射式菲涅尔集热器、透射式菲涅尔集热器等.

对于抛物槽式集热器, 常泽辉等^[4]提出一种槽式复合多曲面太阳能聚光集热器, 并对其进行了光学仿真计算和实验测试研究, 当跟踪误差为5°时, 其光线

接受率达到82.26%, 当跟踪误差为10°且集热器中导热油流速为100 kg/h时, 装置集热效率最高可达65.04%; 王志敏等^[5]以倒梯形腔体接收器为集热器的双轴槽式太阳能聚光集热系统为研究对象, 通过实验测试和归一化温差的方法, 对该系统不同接收位置下的集热性能以及不同流量工况下的瞬时集热效率进行测试, 得到600, 700, 800, 900 L/h 4种流量工况下对应最大集热效率分别为53.3%, 67.6%, 72.0%, 81.7%.

对于反射式菲涅尔集热器, 赵晓凯等^[6]提出基于线性菲涅尔反射镜的二次反射塔式太阳集热器的

收稿日期: 2018-12-26

基金项目: 广州市科技计划产学研协同创新重大专项资助项目(201704030009); 中国博士后科学基金资助项目(2018M633014); 广东工业大学研究生创新项目(2017YJSCX026)

作者简介: 卢梓健(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为太阳能的光热利用.

通信作者: 黄金(1975-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为新型能源材料与储能技术、太阳能热利用及转换技术. E-mail: huangjinger@126.com

设计原理,搭建基于线性菲涅尔反射镜的二次反射塔式集热系统实验台,当工质入口温度为110℃时,集热效率为51.6%;周凌宇等^[7]通过理论与实验的方法,对一种采用方形腔体吸收器的反射式线性菲涅尔太阳能集热器的集热性能进行研究,得出该集热器的光学效率为78.6%,最高集热温度为180℃,在集热温度80~150℃的范围内,集热效率从52.3%变化到36.2%。

上述抛物槽式集热器及反射式菲涅尔集热器的成本较高、聚光效果不明显,而透射式菲涅尔集热器具有成本低、聚光效果良好等优点,因而被更多地应用研究。郑宏飞等^[8]介绍了一种利用圆柱面菲涅尔耳镜组成的太阳能集热系统,实验测试结果表明,在集热温度小于100℃,中午10:00~14:00时间段时,该系统的集热效率可以达到近60%,午后14:00~15:00时段,效率可以达到近38%。Xie等^[9]研究和比较了使用不同腔体接收器的线聚焦菲涅尔透镜太阳能集热器,经过优化后,三角形空腔接收器的热迁移因子分别增加到0.879(使用矩形管道作为吸收板)和0.873(使用管束作为吸收板)。

上述透射式菲涅尔集热器虽然集热效率较高,但跟踪方式复杂,维护成本较高。因此,结合上述聚光集热器的优缺点,本文设计了一种结构简单、易于调节、安全可靠的透射滑移式线性菲涅尔太阳能集热器。本文对此集热器进行了结构设计,对其工作原理进行阐述,并对此集热器进行聚光光斑模拟及实验分析。

1 滑移式线性菲涅尔集热器的设计及工作原理

本文选取线聚焦菲涅尔透镜应用于滑移式线性菲涅尔集热器中。线聚焦菲涅尔透镜具有制造方便、重量轻、成本低、厚度薄、聚光效果好等优点,广泛应用于各种领域,尤其是太阳能聚光热利用^[10]。

图1为线聚焦菲涅尔透镜的光学原理图。从剖面看,其表面由一系列锯齿型凹槽组成,中心部分是椭圆型弧线。每个凹槽都与相邻凹槽之间角度不同,但都将光线集中一处,形成中心焦线,即线聚焦菲涅尔透镜的焦线^[8]。但是在实际太阳光照射聚光过程中,并非形成理想情况的线,而是在线聚焦菲涅尔透镜焦线位置处形成具有一定宽度的线带光斑。要明晰太阳全年运行规律,其中既包含日运行的太阳时角变化规律,也包含全年的太阳赤纬角变化规律^[11-16]。

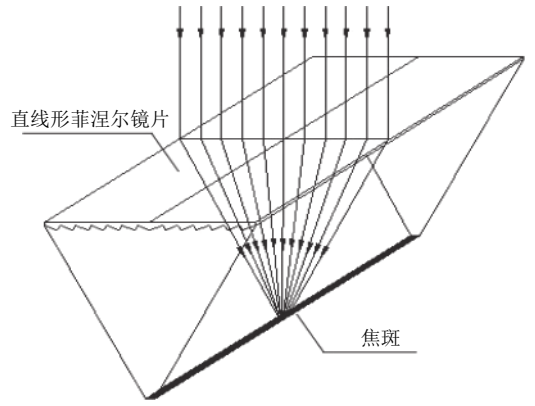


图1 线聚焦菲涅尔透镜的光学原理图

Fig.1 Optical schematic diagram of line-focused Fresnel lens

图2为复合抛物面集热器(compound parabolic collector, CPC)的结构设计示意图。复合抛物面集热器是一种理想非成像集热器,它根据边缘光线原理设计,对接收角范围内的入射光线具有光陷阱作用。此复合抛物面集热器根据以下步骤绘制:

(1) 以真空集热管的玻璃内径为基圆,基圆中心为 O ,以CPC水平方向为 X 轴,竖直方向为 Y 轴,构建二维 X - Y 直角坐标系;

(2) 根据式(1)绘制基圆的渐开线 l :

$$\begin{cases} x = -r(\sin t - t \cos t), \\ y = r(\cos t + t \sin t). \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, r 为基圆半径, t 为参数, $t = 0 \sim 2\pi$ 。

(3) 将渐开线 A 绕圆心 O 顺时针旋转角度 θ :

$$\theta = \pi + \frac{\pi\theta_{\max}}{2}, \quad (2)$$

其中, θ_{\max} 为复合抛物面集热器的最大接收角。

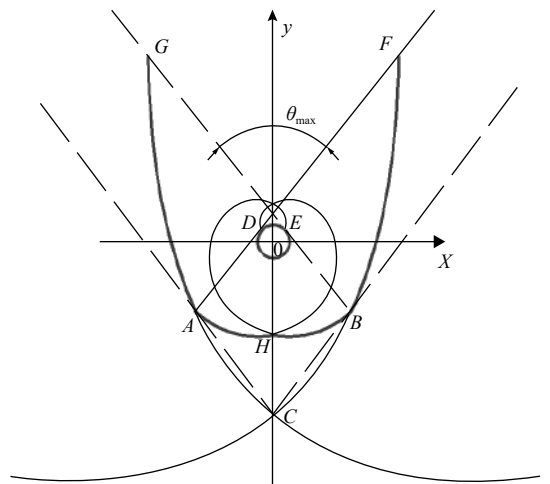


图2 复合抛物面集热器结构设计示意图

Fig.2 Structural design sketch of compound parabolic collector

(4) 沿CPC对称轴绘制另一渐开线 B ,令渐开线 A 末端点为点 A ,渐开线 B 末端点为点 B ,渐开线 A 与渐

开线 B 相交于点 H . 作基圆切线 AD , 使线段 AD 与基圆相切于点 D . 作对称轴 AC 与CPC对称轴交于点 C , 使以 AC 为对称轴、 A 为焦点、 C 为顶点作抛物线 A , 且使抛物线 A 恰好交渐开线 B 于点 B , 且与线段 AD 的延长线交于点 F . 同理, 作基圆切线 BE , 使线段 BE 与基圆相切于点 E . 作对称轴 BC 与CPC对称轴交于点 C , 使以 BC 为对称轴、 B 为焦点、 C 为顶点作抛物线 B , 且使抛物线 B 恰好交渐开线 A 与点 A , 且与线段 BE 延长线交于点 G .

(5) 截取弧线 $GAHBF$ 即为CPC反光面曲线.

图3为滑移式线性菲涅尔集热器结构图. 该滑移式线性菲涅尔集热器包括线聚焦菲涅尔透镜、导杆支座、导杆、导杆滑套、真空集热管、真空集热管支架、复合抛物面集热器、型铝铝材、反光镜、导杆底座和扇形连接板等等. 该滑移式线性菲涅尔集热器在其长度方向上按照东西方向摆放, 线聚焦菲涅尔透镜朝向南北方向, 安装倾角按照当地的纬度位置决定:

$$\alpha = \phi \quad (3)$$

其中, α 为线聚焦菲涅尔透镜的安装倾角; ϕ 为当地的纬度.

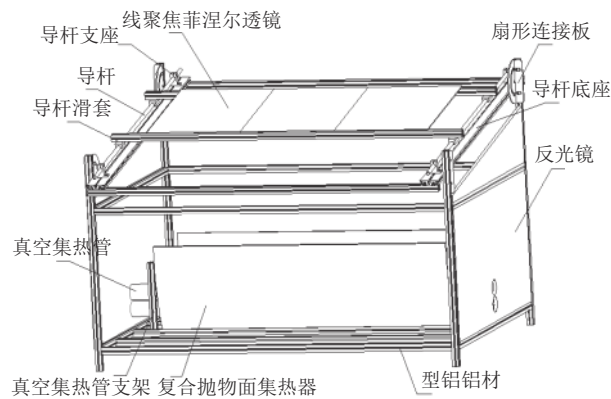


图3 滑移式线性菲涅尔集热器结构图

Fig.3 Structural diagram of slip linear Fresnel collector

其工作原理为: 当太阳按照一天变化时, 光线通过线聚焦菲涅尔透镜折射成焦线, 焦线光斑主要向东西方向偏移, 偏移出真空集热管的一部分光线照射在反光镜上, 通过反光镜和CPC反射回真空集热管上; 当太阳随纬度发生季节性变化时, 焦线向南北方向偏移, 当偏移出CPC的开口大小时, 通过导杆和导杆滑套进行手动滑移, 调整线聚焦菲涅尔透镜的位置, 使焦线光斑照射在CPC内, 通过CPC反射回真空集热管上. 滑移调节时间按照当地具体的地理位置、CPC的最大接收角及开口大小确定.

2 实验结果及分析

2.1 集热器实验平台介绍

为了验证滑移式线性菲涅尔太阳能聚光集热器的可靠性, 在坐标(113°17'E, 23°08'N)搭建了聚光实验平台, 如图4所示. 实验平台包括线性菲涅尔集热器、低温恒温水槽、安捷伦测温数据采集仪、数据采集系统和太阳直射辐照仪等. 该集热器采用3块400 mm×320 mm×2 mm、焦距为600 mm的线聚焦菲涅尔透镜及长度为1 200 mm, 外径47 mm, 内径37 mm的真空集热管等组成, 且真空集热管中心位于线聚焦菲涅尔透镜的焦距上. 将真空集热管的内径代入式(1)中, 根据模拟角度设定CPC最大接收角为 $\theta_{\max} = 100^\circ$, 设计并制造出CPC的开口大小为261 mm, 高度为265 mm, 长度为1 100 mm, 并在其内侧表面处贴上反射率为0.85的反光膜. 反光镜采用反射率为0.85的镜面铝板, 安装在集热器两侧. 根据式(3)可得该集热器的安装倾角 α 为23.13°, 通过扇形连接板调整导杆的安装倾角, 即可调整线聚焦菲涅尔透镜的安装倾角, 且透镜方向朝向南方.

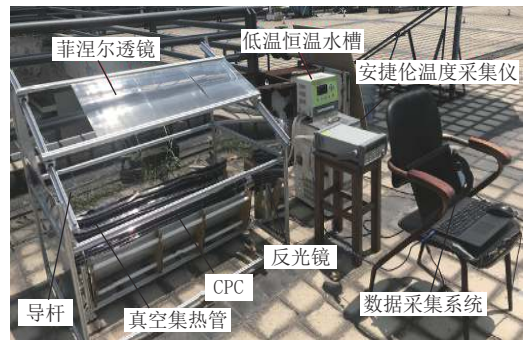


图4 滑移式线性菲涅尔集热器实验平台

Fig.4 Experimental platform of slip linear Fresnel collector

2.2 集热器实验结果及分析

为了凸显有无滑移装置的集热器的集热效率差别, 实验中以菲涅尔透镜处于导杆正中位置作为基准位置. 在实验日期为2018年11月29日和30日(太阳赤纬角 -21°), 真太阳时10:00~14:00进行聚光集热实验, 实验地点为广州大学城. 将集热器按东西方向放置, 进行有滑移(根据焦线光斑位置变化滑移菲涅尔透镜的位置)和无滑移(菲涅尔透镜仍位于基准位置)时, 集热器的集热性能研究. 实验通过太阳直射辐照仪测量实验过程中太阳光直射辐照度的变化情况. 集热系统的传热工质为水, 设置低温恒温水槽的温度, 使集热器真空集热管的入口温度为 25°C , 采用

T型热电偶测量真空集热管入口温度和出口温度,并通过安捷伦Agilent34970A型数据采集仪进行数据采集,采集时间间隔为5 min. 调节连接在管道上转子

流量计的流量读数,使流过真空集热管的水流量恒为60 L/h. 太阳直射辐照度、真空集热管的进口温度及出口温度随时间的变化情况如图5所示.

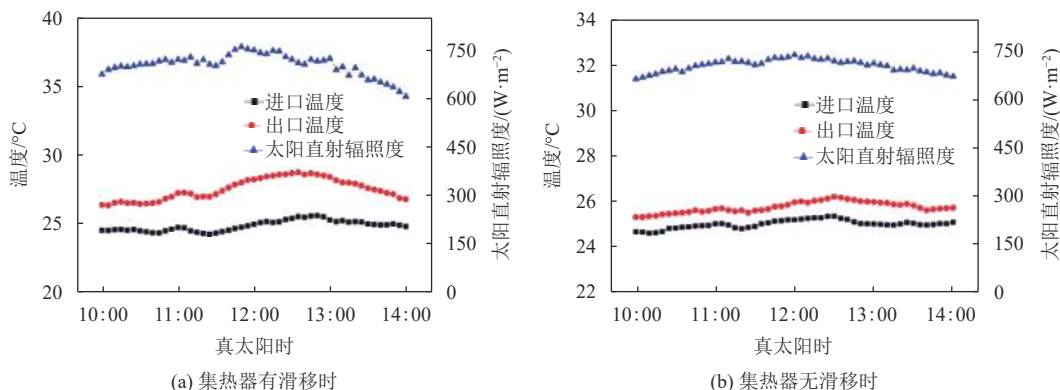


图5 太阳直射辐照度、进口温度及出口温度变化图

Fig.5 Changes of solar irradiance, inlet and outlet temperatures

从图5(a)中可以看出,在真太阳时10:00~13:00时,太阳直射辐照度基本维持在700~750 W/m²,在真太阳时13:00后稍有下降. 集热器进口温度基本维持在25 °C左右,出口温度先随真太阳时的变化逐渐升高,在12:30左右达到最大温度28.77 °C,然后逐渐下降. 从图5(b)中可以看出,在真太阳时10:00~14:00时,太阳直射辐照度基本维持在700 W/m²左右. 集热器进口温度基本维持在25 °C左右,出口温度先随真太阳时的变化稍微升高,然后逐渐下降,进出口温差变化不大.

成的焦线无法汇聚在CPC以及真空集热管上,因此集热效率低下. 集热器在有滑移时的平均集热效率为22.90%,而无滑移时的平均集热效率仅为6.40%,因此集热器在有滑移时展现出更为优异的集热效率,集热效果显著.

集热系统的集热效率计算式为

$$\eta = \frac{C_p \rho v (T_o - T_i)}{IS}, \quad (4)$$

式(4)中, C_p 为水的比热容, $C_p=4.2 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; ρ 为水的密度, $\rho=1 \text{ kg/L}$; v 为水的流量, $v=60 \text{ L/h}$; T_i 、 T_o 分别为集热器进、出口温度,°C; I 为太阳直射辐照度, W/m^2 ; S 为集热器采光面积, $S=0.384 \text{ m}^2$.

通过以上参数并结合式(4),可计算出集热系统的集热效率,如图6所示. 从图6中可以看出,有滑移时,集热器在系统稳定后,即在真太阳时10:30~12:00时,集热器的集热效率随着太阳入射倾角的减小及气温的上升而逐渐增大,最大集热效率为27.89%;在12:00后,由于太阳入射倾角的增加,太阳光经汇聚后能被真空管接收到的能量逐渐减少,导致工质得到的热能随之下降,结果表现为集热器进出口温差降低,集热效率降低. 集热器无滑移时,集热器的集热效率无明显变化,这是由于无滑移时,太阳赤纬角过大,光线入射角大,使透过菲涅尔透镜形

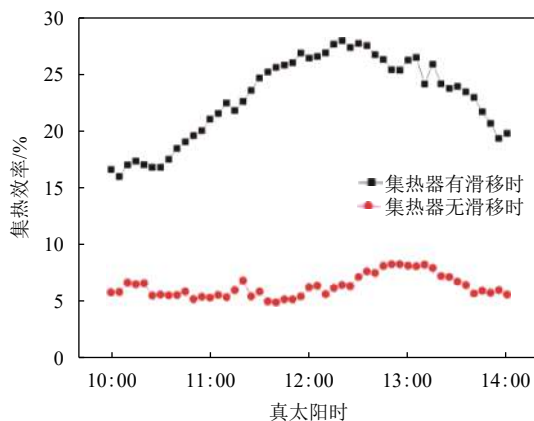


图6 集热器有无滑移装置的集热效率变化图

Fig.6 The heat collecting efficiency change diagram of the collector with or without the slip device

3 集热器光斑模拟分析

3.1 模拟软件及模拟方法

基于蒙特卡罗法的非序列光线追迹技术^[17], TracePro具有处理复杂几何问题的能力,可定义和追踪数百万条光线,它以实体对象来构建光路系统,并通过计算反射、折射、吸收和衍射等行为来模拟光线与实体表面的作用,能够对真实场景进行计算和显示.

为了验证本文所设计的滑移式线性菲涅尔集热器的可靠性,以下采用TracePro光学模拟软件对集热器进行聚光光斑模拟分析。

根据上述滑移式线性菲涅尔集热器结构设计三维模型,选取集热器在太阳一年运行过程中的典型位置进行光路模拟,确定位于真空集热管玻璃表面处的光斑变化情况。其中,光源模拟太阳光光谱,波长从 $0.74\sim 1.642\ \mu\text{m}$,各波长的权重以NASA太阳光谱与材料参数为标准,辐射值设定为 $700\ \text{W}/\text{m}^2$ 。设置菲涅尔透镜面积为 $0.384\ \text{m}^2$,安装倾角为 23.13° ,反射镜及CPC材料的反射率为 0.85 。太阳典型位置对应一天

真太阳时为 $10:00$ 至 $14:00$,间隔为半小时的聚光光斑情况进行光路模拟。

3.2 一天模拟结果及分析

集热器无滑移时规律不明显,因此仅对有滑移时进行模拟分析。按照上述步骤,在有滑移时,集热器的真空集热管表面处的光斑变化情况部分辐照图如图7所示,太阳赤纬角为 -21° 。其中 X 轴表示东西方向,朝东为负,朝西为正, Y 轴表示南北方向,朝南为正,朝北为负,且以不同颜色标识聚光光斑的能流密度值。

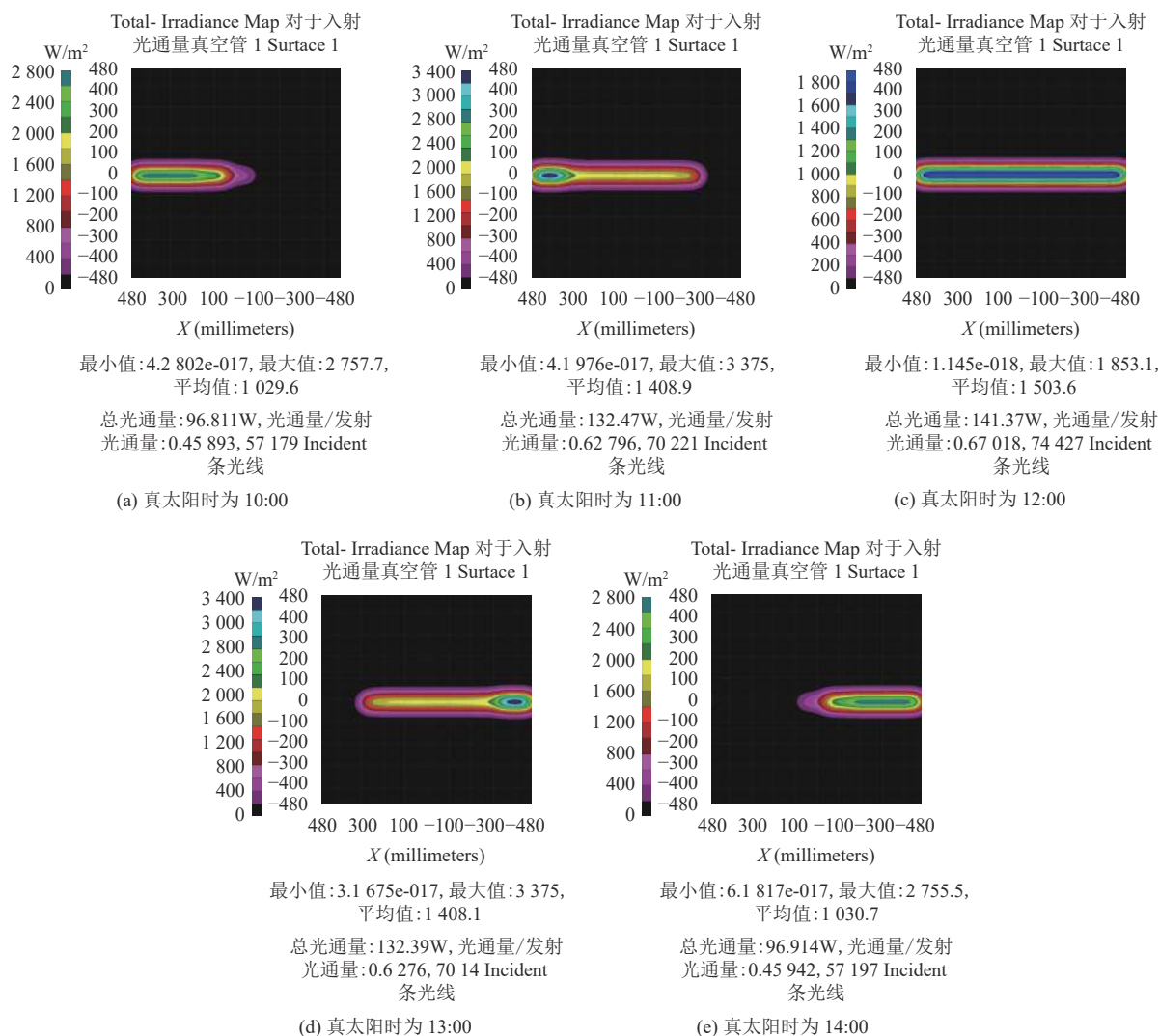


图7 太阳赤纬角为 -21° 时聚光光斑分布辐照图

Fig.7 Irradiation diagram of concentrated spot distribution when the solar declination angle is -21°

由图7可知,当真太阳时从 $10:00$ 至 $14:00$,太阳位置自东向西转动,因此聚光光斑整体自西向东移动。当真太阳时为 $10:00$ 时,聚光光斑位于真空集热管西侧,光线部分通过反光镜反射回来。当真太阳时

为 $11:00$ 时,聚光光斑整体略微偏西,由于小部分偏移的光线被反射回来,因此可以看出在西侧位置处存在能流密度较强的光斑。当真太阳时为 $12:00$ 时,太阳正对着线性菲涅尔透镜,太阳光垂直照射,聚光

光斑整体无偏移,成线性且均匀地照射在真空集热管上.同理,当真太阳时为13:00和14:00时,聚光光斑整体位于东侧,部分偏移光线被反射回来.根据太阳赤纬角为 -21° 时集热器光斑总光通量变化情况及计算后的光学效率变化数据,绘制成图8.

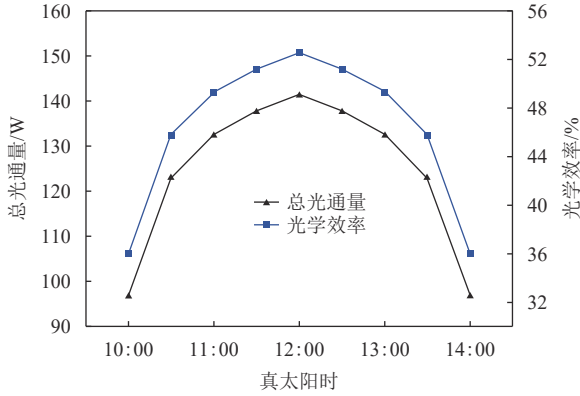


图8 太阳赤纬角为 -21° 时集热器总光通量及光学效率变化图

Fig.8 Variation of total luminous flux and optical efficiency of the collector when the solar declination angle is -21°

从图8中可以看出,在太阳赤纬角为 -21° 时,集热器光斑的总光通量随着真太阳时的变化,呈现先增大后减少的对称分布规律变化.集热器平均总光通量为124.56 W,其中,当真太阳时为12:00时,真空集热管表面处达到最大总光通量141.37 W.集热器的光学效率也呈现先增大后减少的对称分布规律变化,平均光学效率为46.34%.其中,当真太阳时为12:00时,最大光学效率达到52.59%.

造成上述现象的主要原因是随着真太阳时的变化,太阳光照射到菲涅尔透镜的入射角发生变化,透过线性菲涅尔透镜的光线的折射角也发生变化,导致聚光光斑发生规律性偏移,使得集热器的光学效率呈现近抛物线的对称分布变化规律.

真空管传热过程是从内玻璃管内壁面经内玻璃管、真空夹层、外玻璃管到达环境空气的过程,具体过程涉及到了导热、辐射、对流以及稀薄气体传热等各种形式,而且各种传热形式相互耦合^[18].因此,集热器的集热效率与集热器的光学效率之间可以用式(5)进行转换:

$$\eta = (u_1 u_2 u_3 u_4 u_5) \delta, \quad (5)$$

其中, η 集热器的集热效率; u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 分别为从水到玻璃、从内管内壁到内管外壁、从内管外壁到外管内壁、从外管内壁到外管外壁、从外管外壁到大气的光热损失系数; δ 为集热器的光学效率.

为验证模拟结果的准确性,根据式(5)作出集热

器系统的实验数据与模拟结果取不同光热损失系数时的等效集热效率对比图,如图9所示.从图9对比实验数据曲线和模拟结果曲线可以发现,两曲线基本呈现先增大后减少的抛物线对称分布的规律.但在真太阳时12:00前,早上的实际太阳辐照度略低于模拟采用的 700 W/m^2 ,且集热器系统处于从环境温度升温至实际工作温度的非稳态工况,因此实验数据略低于模拟结果;而在真太阳时12:00后,集热器工作稳定,实验数据与光热损失系数均取0.88时的模拟结果较为一致,由此表明模拟结果准确可靠.其中,当光热损失系数均取0.88时,平均等效集热效率为24.45%,最大等效集热效率为27.75%.

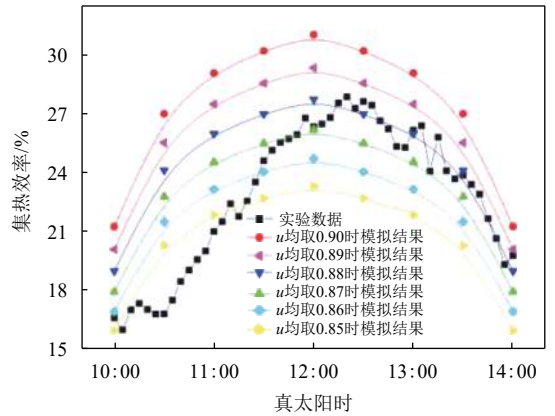


图9 集热器集热效率实验数据及模拟结果对比图

Fig.9 Comparison of experimental data and simulation results of collector heat collection efficiency

3.3 全年模拟结果及分析

基于上述结果进一步对上述滑移式线性菲涅尔集热器进行光斑模拟分析,对集热器在太阳1 a运行过程中的典型位置进行光路模拟,在相同条件下,分别模拟集热器在有滑移和无滑移时,集热器真空集热管表面处的光斑变化情况.太阳典型位置分别取太阳赤纬角为 $+23^\circ 26'$ 、 $+11^\circ 43'$ 、 0° 、 $-11^\circ 43'$ 、 $-23^\circ 26'$,对应1 d真太阳时为10:00至14:00,间隔为半小时的聚光光斑情况进行光路模拟.

3.3.1 有滑移时模拟结果分析

按照上述步骤,对有滑移时集热器全年光斑变化情况进行模拟,结果如图10所示.从图10中可以看出,集热器在有滑移时,全年的集热效率呈现先增大后减少的抛物线对称分布规律变化,集热器全年平均集热效率为27.11%.当太阳赤纬角为 0° 、真太阳时为12:00时,集热器达到最大集热效率37.20%.

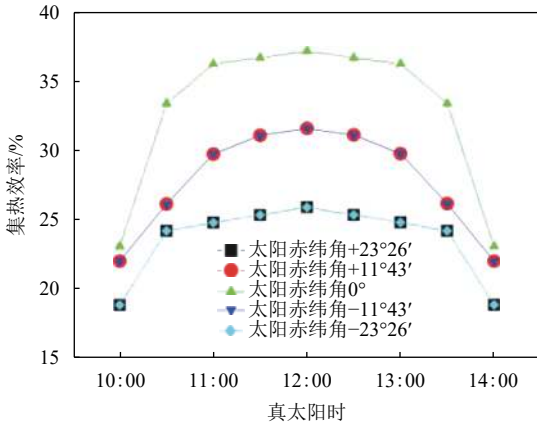


图10 有滑移时集热器全年集热效率变化情况

Fig.10 Change of heat collecting efficiency of the collector during the whole year with slip

3.3.2 无滑移时模拟结果分析

同理,对无滑移时集热器全年光斑变化情况进行模拟,结果如图11所示。从图11中可以看出,集热器太阳赤纬角为 0° 时,集热效率呈现先增大后减少的对称分布规律变化,但在其他太阳赤纬角位置时,集热效率较低且基本变化不大。其中,当太阳赤纬角为 0° 、真太阳时为12:00时,集热器达到最大集热效率37.20%。集热器全年平均集热效率为9.80%。

造成上述现象的主要原因是当太阳光入射角发生变化时,经过线性菲涅尔透镜的光线的折射角也发生变化,聚光光斑发生偏移。当入射角过大使光斑偏移超出CPC的最大开口位置及反光镜面时,光斑不能反射回真空集热管上,造成集热器的集热效率低下。

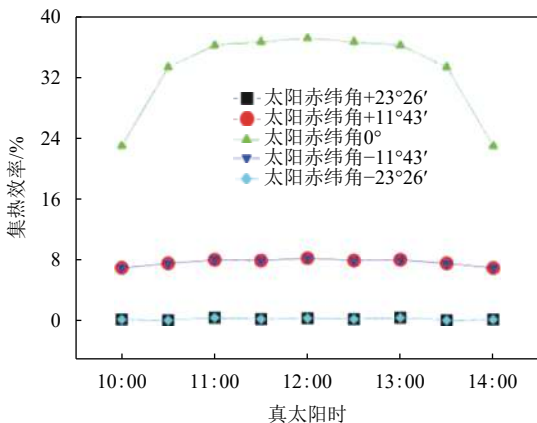


图11 无滑移时集热器全年集热效率变化情况

Fig.11 Change of heat collecting efficiency of the collector during the whole year without slip

从上述全年集热器集热效率变化情况图10、图11中可以看出,滑移式线性菲涅尔集热器在太阳赤纬角为 0° 时,有滑移和无滑移时的集热效率是一

致的。但随着太阳赤纬角及真太阳时的变化时,有滑移时集热器的全年平均集热效率明显高于无滑移时的全年平均集热效率。因此该滑移式线性菲涅尔集热器在有滑移时比无滑移时所收集到的太阳能效率更高,效果更好。

4 结论

本文针对线性菲涅尔集热器,作了工作原理分析,并设计出了滑移式线性菲涅尔太阳能集热器。为验证该集热器的可靠性,对集热器进行实验与模拟分析,得到结论如下:

(1) 对搭建的滑移式线性菲涅尔集热器进行实验研究,得出了滑移式线性菲涅尔集热器在有滑移时的平均集热效率为22.90%,而无滑移时的平均集热效率仅为6.40%,因此集热器在有滑移时集热效果显著。

(2) 在TracePro中,对设计出来的集热器进行光路模拟,对光斑分布辐照图进行了分析,得到了在太阳赤纬角为 -21° 、真太阳时10:00~14:00时集热器的平均等效集热效率为24.45%,最大等效集热效率为27.75%,并将实验数据进行了对比,两者较为吻合,从而验证了模拟的可靠性。

(3) 对集热器在有滑移时的全年光斑进行模拟,得到了集热器在有滑移时全年平均等效集热效率为27.11%,无滑移时全年平均等效集热效率为9.80%,滑移式线性菲涅尔太阳能集热器展现出更为优异的集热效率。

参考文献:

- [1] 吴成赫, 刘丽孺, 陈毅刚, 等. 旋转集热板式太阳能烟囱性能研究[J]. 广东工业大学学报, 2018, 35(5): 70-74.
WU C H, LIU L R, CHEN Y G, *et al.* A performance study of solar chimney with rotating collector [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2018, 35(5): 70-74.
- [2] 李久锋, 陈观生, 张国庆. 塑料太阳能平板集热器试验研究[J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(3): 137-140.
LI J F, CHEN G S, ZHANG G Q. The experimental study of plastic plate solar collector [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2015, 32(3): 137-140.
- [3] 王长宏, 林涛, 林明标, 等. 太阳能温差发电系统热电性能的分析[J]. 广东工业大学学报, 2011, 28(2): 47-50.
WANG C H, LIN T, LIN M B, *et al.* Analysis of thermoelectric properties of the solar thermal power system [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2011, 28(2): 47-50.
- [4] 常泽辉, 李文龙, 王帅, 等. 槽式复合多曲面太阳能聚光集热器光热性能研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(3): 729-

736.
CHEN Z H, LI W L, WANG S, *et al.* Investigation of thermal performance of a trough solar compound parabolic concentrator [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2018, 39(3): 729-736.
- [5] 王志敏, 田瑞, 韩晓飞, 等. 基于腔体的双轴槽式系统集热特性动态测试[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(3): 737-743.
WANG Z M, TIAN R, HAN X F, *et al.* Dynamic test of collecting characteristics of a two-axis trough system based on cavity [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2018, 39(3): 737-743.
- [6] 赵晓凯, 代彦军, 林蒙. 基于线性菲涅尔反射镜的二次反射塔式太阳集热器性能分析[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(8): 1909-1914.
ZHAO X K, DAI Y J, LIN M. Performance analysis of beam-down tower solar collector based on linear Fresnel reflector technique [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2015, 36(8): 1909-1914.
- [7] 周凌宇, 代彦军, 李显, 等. 一种采用腔体吸收器的线性菲涅尔太阳集热器性能分析与优化[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(3): 704-712.
ZHOU L Y, DAI Y J, LI X, *et al.* Performance study and optimization of a linear Fresnel reflector solar collector with cavity receiver [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2018, 39(3): 704-712.
- [8] 郑宏飞, 马兴龙, 陈嘉祥. 圆柱面菲涅耳镜太阳能集热系统研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(11): 2277-2281.
ZHENG H F, MA X L, CHEN J X. An investigation on a solar collecting system with cylindrical Fresnel lens [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(11): 2277-2281.
- [9] XIE W T, DAI Y J, WANG R Z. Thermal performance analysis of a line-focus Fresnel lens solar collector using different cavity receivers [J]. *Solar Energy*, 2013, 91(3): 242-255.
- [10] 陈志明. 菲涅尔透镜聚光性能研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2013.
- [11] 郭孝武. 菲涅尔透镜统一设计方法[J]. *太阳能学报*, 1991(4): 423-426.
GUO X W. A general method for Fresnel lens design [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1991(4): 423-426.
- [12] SINHA S, CHANDEL S S. Analysis of fixed tilt and sun tracking photovoltaic-micro wind based hybrid power systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 115: 265-275.
- [13] 张业强, 吴玉庭, 马重芳, 等. 槽式太阳能真空集热管的热损失测量[J]. *化工学报*, 2011(S1): 185-189.
ZHANG Y Q, WU Y T, MA Z F, *et al.* Trough receiver heat loss testing [J]. *CIESC Journal*, 2011(S1): 185-189.
- [14] MI Z, CHEN J, CHEN N, *et al.* Open-loop solar tracking strategy for high concentrating photovoltaic systems using variable tracking frequency [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 117: 142-149.
- [15] ZHANG Q F, GAO J, CHEN X. Influence of optical aspheric parameters on obtaining uniform rectangular illumination [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(11): 2577-2581.
- [16] 霍相茹, 侯力, 魏永峭, 等. 太阳能跟踪器装置结构与控制算法设计[J]. *机械传动*, 2017(12): 146-148.
HUO X R, HOU L, WEI Y Q, *et al.* Design of structure and control algorithm solar tracker [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2017(12): 146-148.
- [17] 张巧芬. 非成像光学系统的LED光源优化设计与分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- [18] 孟秀清, 苗建朋, 吕会敏, 等. 全玻璃真空集热管热损计算与分析[J]. *太阳能*, 2013(1): 13-17.
MENG X Q, MIAO J P, LYU H M, *et al.* Calculation and analysis of heat loss of all-glass vacuum collector tube [J]. *Solar Energy*, 2013(1): 13-17.