

文章编号:0254-0096(2019)03-0782-09

# 极轴式定焦点菲涅尔聚光器设计及焦斑位置偏差研究

王海<sup>1</sup>, 黄金<sup>1</sup>, 胡艳鑫<sup>1</sup>, 卢梓健<sup>1</sup>, 何擎斌<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学材料与能源学院, 广州 510006; 2. 广州祈信金属制品有限公司, 广州 511458)

**摘要:** 基于菲涅尔透镜的聚光特性和极轴跟踪原理, 提出一种能实现定焦点聚光的太阳能聚光器, 详细分析聚光器的定焦点聚光原理, 并搭建实验平台对其聚光焦斑位置偏差进行红外热成像分析。实验结果表明, 全天聚光焦斑相对位置偏差最大值为5.72%, 且焦斑基本分布于以基板中心为圆心、半径50 mm的圆环区域内, 即实现定焦点聚光。同时利用TracePro对其聚光焦斑位置偏差情况进行模拟分析, 结果表明全天聚光焦斑相对位置偏差最大值为3.56%, 且焦斑分布情况与实验基本一致。结合全年太阳赤纬角的变化, 对真太阳时为08:00~16:00的聚光焦斑位置偏差情况进行模拟分析, 结果表明该聚光器的全年聚光焦斑相对位置偏差最大值为4.84%, 进一步验证了聚光器能实现全年定焦点聚光。

**关键词:** 太阳能聚光器; 光学特性; 跟踪; 焦点; 聚光焦斑

**中图分类号:** TK51

**文献标识码:** A

## 0 引言

在太阳能开发利用过程中, 人们提出多种类型的太阳能聚光器, 而随着当前制造技术的提高, 透射式菲涅尔聚光器因其加工简便、重量轻、成本低、口径大、厚度薄、聚光效果好等优点而得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>。胡连印等<sup>[3]</sup>通过分割菲涅尔透镜的方法设计出一种塑料透射式太阳能聚光器, 该聚光器通过经向和纬向跟踪轴调节实现太阳位置跟踪, 并将热能转换装置安装于聚光器尾端以实现集热、释热一体化; Valmiki等<sup>[4]</sup>则利用菲涅尔透镜设计出一种太阳能灶, 其通过手动调节灶台和透镜旋转臂的转动角度来实现太阳位置跟踪以及聚光焦斑位置的固定, 在实际运行过程中炉灶释热端温度能够维持在300℃左右; 鉴于菲涅尔透镜聚光焦斑的高温特性, Kayser等<sup>[5]</sup>设计出一台能够将沙子作为原料烧制成各种玻璃制品的3D太阳能打印装置, 该装置通过控制透镜旋转臂和装置平台的自动转动来实现太阳位置跟踪和聚光焦斑固定; 代彦军等<sup>[6]</sup>采

用上述双轴跟踪原理搭建菲涅尔点聚焦实验平台, 将其用于不同形状集热腔的集热性能研究, 不同的是该实验平台中集热腔和聚光器之间采用固定连接。

但传统双轴跟踪也在一定程度上限制了菲涅尔透镜的应用, 同时也带来诸多问题。例如在太阳位置跟踪过程中需要同时驱动双轴转动来调整对应的高度角和方位角, 导致系统能耗增加, 跟踪结构复杂; 为实现聚光焦斑的固定, 在调整方位角的过程中往往采取装置(或平台)的整体转动, 进一步增加了系统能耗; 聚光器和接收器不能实现自由分离, 造成接收器的安装、移动和维护困难等。

而极轴跟踪与传统双轴跟踪相比, 其成本低, 结构简单, 尤为突出的是在太阳位置跟踪过程中, 只需跟踪太阳时角的变化, 而赤纬角在一天乃至更长的一段时间内变化甚微, 仅作定期调整即可。极轴跟踪目前主要应用于槽式、碟式等反射式聚光器中。张迎胜等<sup>[7]</sup>设计出一种极轴式自动跟踪装置, 该装置通过设置定位入轨程序, 能实现一次准确定

收稿日期: 2016-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(51476038); 广州市科技计划产学研协同创新重大专项(2016201604030020); 广东省前沿与关键技术创新专项资金(2016A050503042); 南沙区科技计划产学研合作项目(2015CX009); 广东工业大学研究生创新项目(2016YJSCX030)

通信作者: 黄金(1975—), 男, 博士、教授, 主要从事新型能源材料与储能技术、太阳能热利用及转换技术方面的研究。

huangjinger@126.com

位入轨;Ludlow等<sup>[8]</sup>设计了一种与建筑物结合的反射式聚光器,该聚光器中的凹面镜被安装在极轴上并根据太阳位置变化绕极轴转动,接收器被安装在凹面镜焦点处;为解决传统定日镜跟踪结构复杂、成本高等问题,魏秀东等<sup>[9]</sup>设计了一种极轴跟踪式定日镜,该定日镜被装定在极轴上并绕其转动以跟踪太阳时角,使太阳光在定日镜上的入射角保持不变;Chong等<sup>[10]</sup>则针对极轴跟踪方式提出一种更为通用的太阳位置跟踪公式,该公式不仅可提供更为一般的数学解,而且更重要的是,它可通过解决接收器的安装误差来提高太阳位置跟踪的精确度。

因此,本文结合菲涅尔透镜和极轴跟踪的各自优势,提出一种结构简单,调节方便,移动便捷,可实现定焦点向下聚光以及聚光器和接收器易分离的极轴式定焦点菲涅尔聚光器。

## 1 聚光器的工作原理与设计

本文所用菲涅尔透镜为单焦点菲涅尔透镜,菲涅尔透镜的光学原理图如图1所示。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,形成中心焦点,即透镜的焦点。而实际太阳光垂直照射聚光过程中,在菲涅尔透镜焦点位置处形成的是具有确定大小的圆形焦斑,而非理想情况中的点<sup>[11]</sup>。

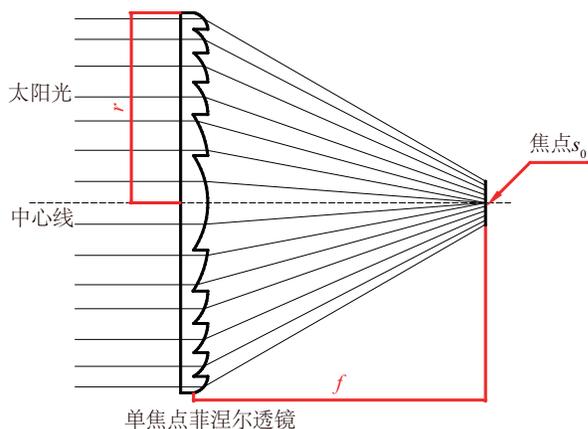


图1 菲涅尔透镜光学原理图

Fig. 1 Optical principle of Fresnel lens

从理论角度分析可知,由于太阳时刻都在运动,要实现定焦点聚光,则要求聚光器能始终保持与太阳光线垂直。因此必须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。

对于太阳而言,由于地球自转一周 $360^\circ$ ,对应的时间为24 h,即每小时相应的太阳时角为 $15^\circ$ <sup>[12,13]</sup>。其中规定正午太阳时角为 $0^\circ$ ,上午太阳时角为负值,下午太阳时角为正值。太阳赤纬角则以年为周期,全年变化范围为 $-23^\circ 27' \sim +23^\circ 27'$ 。其中每年夏至日太阳赤纬角达到最大值 $+23^\circ 27'$ ,于冬至日太阳赤纬角减至最小值 $-23^\circ 27'$ 。

在极轴跟踪中,太阳赤纬角 $\delta$ 与地理纬度 $\Phi$ 之间的变化关系如图2所示。当聚光器处于地理纬度为 $\Phi$ 的地区时,极轴方向与地平面的夹角为 $\Phi$ ,以保证极轴与地轴平行。同时聚光器法线方向与极轴垂平面夹角为 $\delta$ ,以实现太阳光垂直入射聚光器,即聚光器的全年太阳赤纬角调节范围为 $-23^\circ 27' \sim +23^\circ 27'$ 。

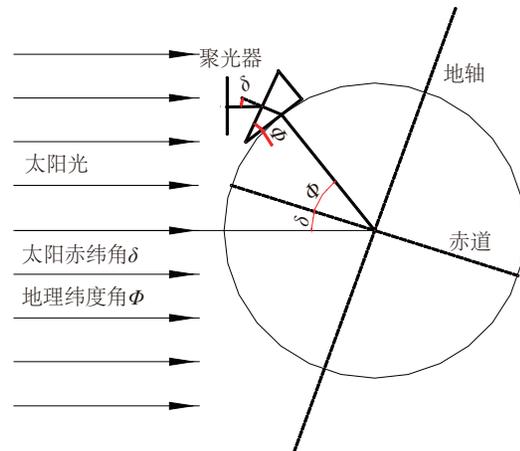


图2 极轴式跟踪原理图

Fig. 2 Schematic of polar tracking

基于上述菲涅尔透镜聚光特性和极轴跟踪原理,设计出一种极轴式定焦点菲涅尔聚光器。该聚光器包括极轴和赤纬轴,其中极轴与地轴平行,赤纬轴与极轴垂直,工作原理如图3所示。当聚光器进行固定焦点聚光跟踪时,聚光器先根据太阳赤纬角的大小,绕赤纬轴进行俯仰运动定轨,然后绕极轴自东向西跟踪太阳,跟踪角速度与地球自转角速度相同。即菲涅尔透镜与极轴呈现空间对称,并根据太阳赤纬角的变化在以赤纬轴为转动中心,透镜焦距 $f$ 为半径的圆弧轨迹上运动,当太阳光垂直照射菲涅尔透镜时,其聚光焦斑正好落在极轴与赤纬轴的交汇位置。另根据太阳赤纬角的全年变化规律可知,太阳赤纬角 $\delta$ 无时无刻不在变化,但在一天之内, $\delta$ 的最大变化不超过 $0.5^\circ$ 。因此,每天的太

阳赤纬角可视为一个恒定不变的数值。在实际应用中,根据精度需求,可每隔一段相对合适的时间调整一次聚光器绕赤纬轴的转动角度;而调整周期是其所形成的聚光光斑偏移不超出常见集热器开口范围来确定。

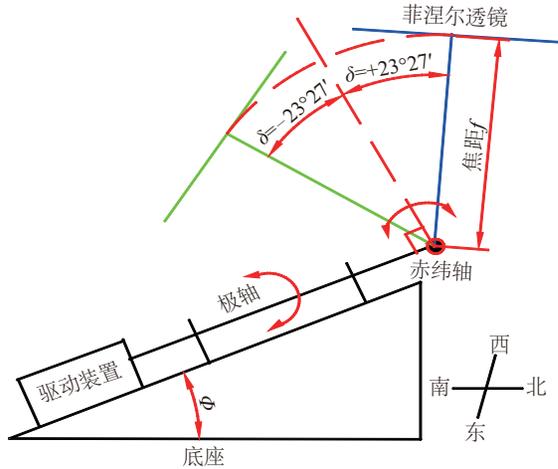


图3 极轴式定焦点菲涅尔聚光器工作原理图

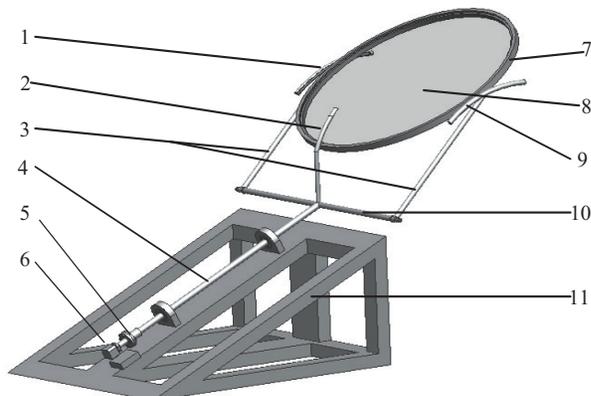
Fig. 3 Schematic of fixed-focus Fresnel lens solar concentrator using polar tracking

其中,太阳赤纬角的确定如按照式(1)所示。

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1)$$

式中,  $n$  ——一年中之天数,如春分  $n = 81$ ,  $\delta = 0$  [14]。

依据上述聚光器工作原理,设计出结构如图4所示的极轴式定焦点菲涅尔聚光器。聚光器部件包含导杆、支撑杆、极轴、联接器、驱动设备、镜框、菲涅尔透镜、横杆、底座等。



1. 第1导杆 2. 第2导杆 3. 支撑杆 4. 极轴
5. 联接器 6. 驱动设备 7. 镜框 8. 菲涅尔透镜
9. 第3导杆 10. 横杆 11. 底座

图4 极轴式定焦点菲涅尔聚光器模型图

Fig. 4 Model of fixed-focus Fresnel lens solar concentrator using polar tracking

## 2 聚光器聚光实验与模拟对比研究

### 2.1 聚光器聚光实验

为了验证极轴式定焦点菲涅尔聚光器的定焦点聚光的可靠性,选择广州地区(北纬  $23^{\circ}08'$ )作为研究对象,实际加工制作出聚光器,并以此为基础搭建出了定焦点聚光实验平台,如图5所示。实验平台包括极轴式定焦点菲涅尔聚光器、接收器、可调节平台、红外热像仪、数据采集系统等。其中聚光器所用菲涅尔透镜为  $1100 \text{ mm} \times 1100 \text{ mm}$  的矩形菲涅尔透镜,且聚光部分为直径  $1100 \text{ mm}$  的中心圆形区域,透镜焦距为  $1000 \text{ mm}$ ;聚光器的跟踪装置为光电式单轴太阳能自动跟踪器,其平均跟踪精度小于  $1^{\circ}$ ,一天内装置的跟踪精度误差在  $\pm 0.3\%$  内;聚光器的驱动设备运行速度为  $0.1^{\circ}/\text{s}$ ,符合目前太阳能跟踪机械设备的常规要求;聚光器的赤纬角跟踪则以手动调整实现,调整周期以其所形成的聚光光斑偏移不超出常见集热器开口范围来确定。接收器为规格  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的黑色陶瓷基板,并将其水平放置于菲涅尔透镜焦点位置处。利用该实验平台对聚光器的聚光焦斑位置偏差情况进行研究。

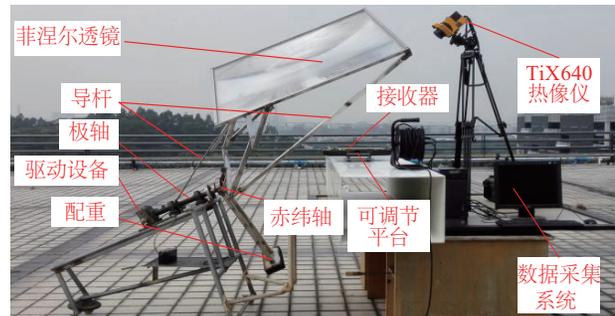


图5 定焦点聚光实验平台

Fig. 5 Experiment platform of fixed-focus Fresnel lens solar concentrator using polar tracking

实验时间为2016年12月1日(太阳赤纬角  $-21^{\circ}48'$ ),实验地点为广州大学城,由图2和图3可知,将聚光器南北放置,东西跟踪,根据当天太阳赤纬角调节聚光器绕赤纬轴的转动角度。选取真太阳时分别为10:00、12:00、14:00时刻进行聚光实验,FZ-A辐照计测得实验过程中太阳光直射辐照值基本维持在  $(460 \pm 5) \text{ W}/\text{m}^2$  范围,利用Fluke公司制造的TiX640热像仪对接收器上聚光焦斑温度成像

情况进行拍摄,并采用不同颜色标识聚光焦斑的温度,其测温精度误差在±1.5%内。

### 2.2 实验结果与模拟对比分析

极轴式定焦点菲涅尔聚光器的定焦点聚光实验结果如图 6 所示。由于点聚焦太阳能集热器开口直径一般约为 100 mm,为了直观地观察焦斑偏移情况,在聚光实验焦斑温度成像图中,标定以坐标中心为圆心,半径为 50 mm 的白色圆环,并将其作为集热器的开口边界<sup>[15]</sup>。从图 6 中可看出,聚光焦斑基本分布于白色圆环的区域内,且随着太阳时角的不同与坐标轴呈现不同的夹角。而为了进一步验证本文所设计聚光器的定焦点聚光的可靠性,利用 TracePro 光学模拟软件对聚光器的聚光焦斑位置偏差情况进行光学模拟对比研究。其中光源

模拟太阳光光谱,波长 0.74~1.642 μm,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 460 W/m<sup>2</sup>,太阳赤纬角设定为-21°48'。与聚光实验一致,选取真太阳时分别为 10:00、12:00、14:00 时刻进行聚光模拟,采用不同颜色标识聚光焦斑的能流密度值。模拟忽略因聚光器的面型误差、材料折射率不均匀性误差等因素造成的光学误差,即所得模拟结果为理想条件下的理论值。在模拟结果中所显示的焦斑是根据 TracePro 软件默认的光通量计算阈值 0.05 所得。即光线与物件接触时,会发生反射、透过、吸收、散射等,而产生许多的光线,而只有光线能量大于 5%入射能量时,才会显示焦斑;但当新产生的光线能量小于 5%时,则不显示焦斑。所得聚光模拟焦斑能流密度分布如图 7 所示。

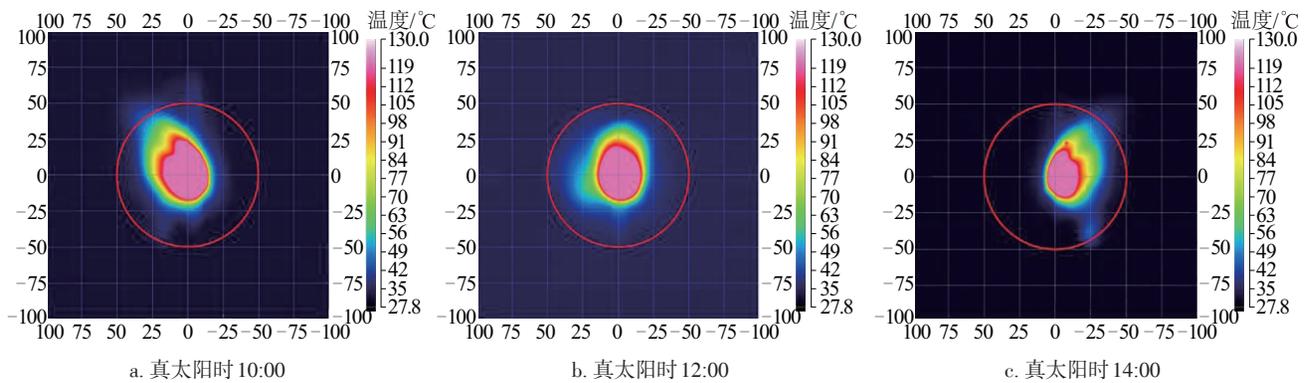


图6 聚光实验焦斑温度分布图

Fig. 6 Imaging of temperature distribution of focal spot in experiment

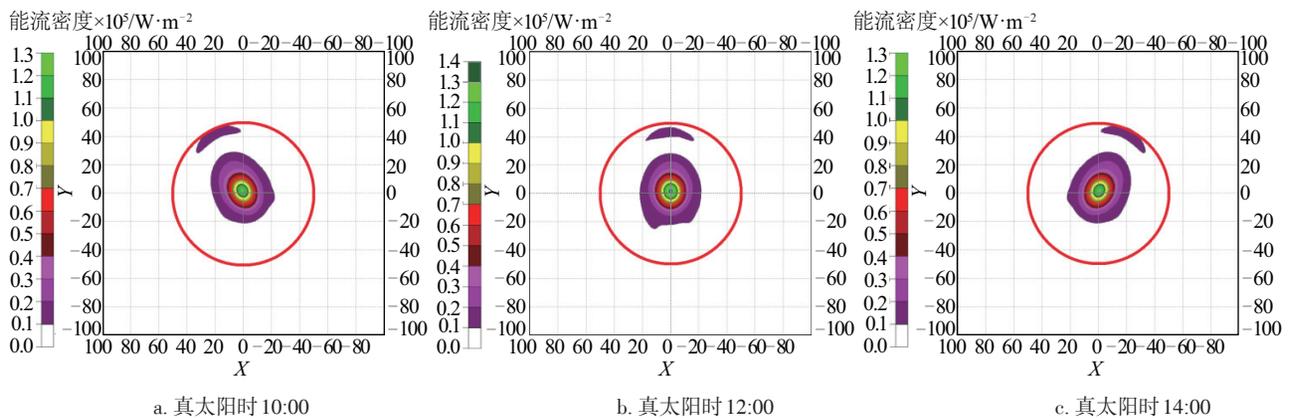


图7 聚光模拟焦斑能流密度分布图

Fig. 7 Imaging of flux density distribution of focal spot in simulation

在聚光模拟焦斑能流密度分布图中,同样标定以坐标中心为圆心,半径为 50 mm 的深色圆环,并将其作为集热器的开口边界。由图 7 可知,聚光焦

斑基本分布在半径为 50 mm 深色圆环区域内,且随着太阳时角的不同与坐标轴呈现不同的夹角。

为了更客观地描述焦斑位置偏移情况,将焦斑

区域最高温度(聚光焦斑能流密度最大值)的位置作为聚光焦斑位移中心,当位移中心偏离半径为50 mm圆环边界时,则表明聚光器无法实现定焦点聚光。对实验与模拟所得的焦斑图进行测量,可得到聚光焦斑中心与基板几何中心的位置偏差值,并计算该位置偏差值与圆环半径(50 mm)的百分比值,即可得到相对位置偏差情况。为了减小实验误差对实验结果的影响,通过对接收器上聚光焦斑温度成像情况进行3次以上拍摄,并取其位置偏差平

均值作为相应的实验结果。聚光实验与聚光模拟结果如表1所示。

实验结果中焦斑相对位置偏差最大值为5.72%,模拟结果中焦斑位置偏差最大值为3.56%,且焦斑均基本分布在半径为50 mm圆环区域内,表明实验与模拟都能实现定焦点聚光,且两者的聚光焦斑分布情况基本一致,表明模拟方法可靠,可利用光学模拟手段在理论上验证该聚光器定焦点聚光的可靠性。

表1 聚光实验与聚光模拟结果

Table 1 Experiment and simulation results of focal spot

项目	真太阳时			
	10:00	12:00	14:00	
实验结果	最高温度/℃	125	128	122
	几何中心温度/℃	121	126	118
	位置偏差/mm	2.52	1.67	2.86
	相对位置偏差值/%	5.04	3.34	5.72
模拟结果	最大能流密度 $\times 10^5/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	1.216	1.320	1.216
	几何中心能流密度 $\times 10^5/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	1.19	1.30	1.19
	位置偏差/mm	1.78	1.34	1.78
	相对位置偏差值/%	3.56	2.68	3.56

### 3 聚光器全年聚光模拟分析

#### 3.1 太阳时角变化的影响

为了更全面地验证聚光器的定焦点聚光的可靠性,并确定接收器平面上的焦斑位置偏差范围,本文选取聚光器在全年运行过程中的极端位置进行光学模拟分析。继续以广州地区作为研究对象,选取太阳赤纬角分别 $-23^{\circ}27'$ 、 $0^{\circ}$ 、 $+23^{\circ}27'$ 时,对应

真太阳时为08:00~16:00范围内,时间间隔为2 h的聚光焦斑变化情况进行模拟研究。

如图8所示,图8a~图8c分别对应当太阳赤纬角为 $0^{\circ}$ ,真太阳时为08:00、12:00、16:00的聚光模拟焦斑能流密度分布图,其中X轴表示东西方向,朝西为正,朝东为负;Y轴表示南北方向,朝北为正,朝南为负;此外以不同颜色标识聚光焦斑的能流密度值。

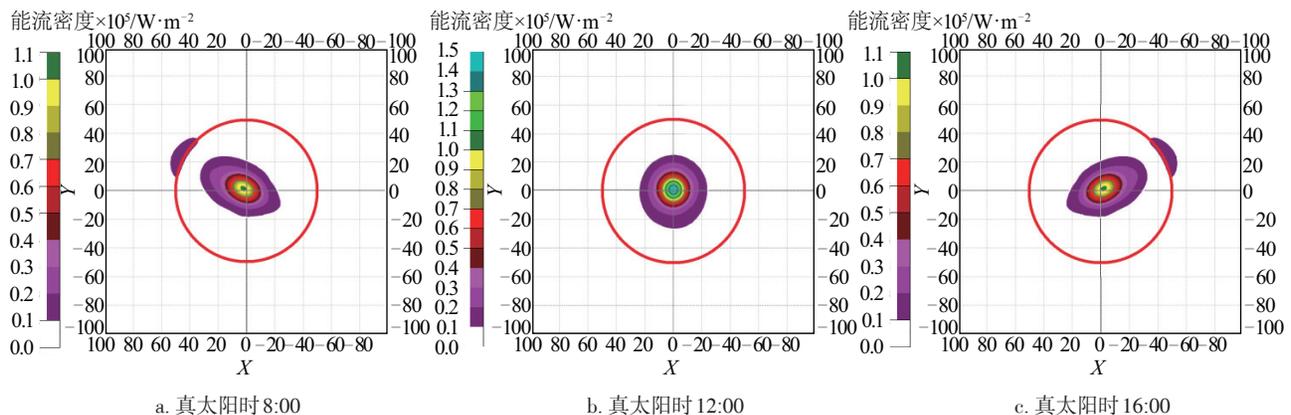


图8 太阳赤纬角为 $0^{\circ}$ 时聚光模拟焦斑能流密度分布图

Fig. 8 Imaging of flux density distribution of focal spot in simulation when sun declination angle is  $0^{\circ}$

由上述模拟图可知,聚光模拟焦斑基本分布在半径为 50 mm 深色圆环区域内。当真太阳时为 08:00,太阳位置处于东南方向,太阳光由东南向西北照射,聚光焦斑整体呈现向西北偏移,形态主要呈现为椭圆形,其中焦斑能量主要集中在椭圆形区域内。

当真太阳时为 12:00,太阳位置处于正南方向,太阳光处置向北照射,聚光焦斑整体呈现基本无偏移,形态呈现类椭圆形,且以 Y 轴对称,其中焦斑能量集中在类椭圆形区域内。

当真太阳时为 16:00,太阳位置处于西南方向,太阳光由西南向东北照射,聚光焦斑整体呈现向东北偏移,形态主要呈现为椭圆形,其中焦斑能量主要集中在椭圆形区域内。

### 3.2 太阳赤纬角变化的影响

如图 9 所示,图 9a~图 9c 分别对应当真太阳

时为 12:00(即正午时),太阳赤纬角分别为 $-23^{\circ}27'$ 、 $0^{\circ}$ 、 $+23^{\circ}27'$ 时的聚光模拟焦斑能流密度分布图。

由上述模拟图可知,聚光模拟焦斑基本分布在半径为 50 mm 深色圆环区域内。当太阳赤纬角为 $-23^{\circ}27'$ 时,太阳位置处于正南方向,太阳光由南向北照射,聚光焦斑整体呈现向北偏移,形态主要呈现为类椭圆形,其中焦斑能量主要集中在类椭圆形区域内。

当太阳赤纬角为 $0^{\circ}$ 时,太阳位置仍处于正南方向,太阳光由南向北照射,聚光焦斑整体呈现向北略偏移,形态呈现为类椭圆形,且以 Y 轴对称,其中焦斑能量集中在类椭圆形区域。

当太阳赤纬角为 $+23^{\circ}27'$ 时,太阳位置处于偏北方向,太阳光由北向南照射,聚光焦斑整体呈现向南略偏移,形态呈现为圆形,且以 Y 轴对称,其中焦斑能量集中在圆形区域内。

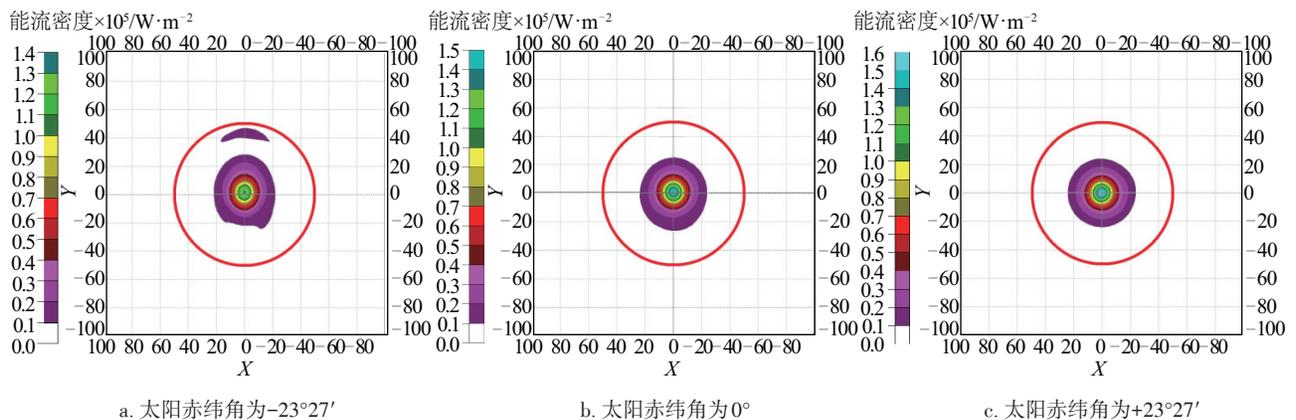


图9 真太阳时为 12:00 时聚光模拟焦斑能流密度分布图

Fig. 9 Imaging of flux density distribution of focal spot in simulation at solar time 12:00

### 3.3 定焦点聚光焦斑分析

该聚光器全年聚光焦斑情况模拟结果如表 2 所示。由表 2 中数据可知,聚光焦斑相对位置偏差最大值为 4.84%,对应太阳赤纬角 $-23^{\circ}27'$ ,真太阳时为 08:00 和 16:00 的位置。此刻太阳位置分别处于东南方和西南方,太阳赤纬角和太阳时角均处于最大值。

由于聚光焦斑相对位置偏差最大值为 4.84%,且焦斑基本分布在半径为 50 mm 圆环区域内,即在

实际应用中可实现聚光焦斑完全落入集热器开口范围内。因此可确定该聚光器能够实现全年定焦点聚光。另由表 2 中聚光器全年聚光焦斑相对位置偏差值可得如图 10 所示曲线。在每天聚光器的运行中,聚光焦斑相对位置偏差曲线呈现抛物线型,基本遵循在真太阳时 08:00 到 12:00 时逐渐减小,12:00 到 16:00 逐渐增大的趋势。在真太阳时相同的情况下,对应太阳赤纬角为 $-23^{\circ}27'$ 时,太阳入射光线与接收器法线方向夹角最大,因此聚光光斑相对位置偏差值最大。

表 2 全年聚光焦斑情况模拟结果

Table 2 Results of simulation focal spot for whole year

太阳赤纬角	项目	真太阳时				
		08:00	10:00	12:00	14:00	16:00
-23°27'	最大能流密度 $\times 10^5/W \cdot m^{-2}$	0.853	1.213	1.317	1.213	0.853
	几何中心能流密度 $\times 10^5/W \cdot m^{-2}$	0.817	1.180	1.290	1.180	0.817
	位置偏差/mm	2.42	1.98	1.82	1.98	2.42
	相对位置偏差值/%	4.84	3.96	3.64	3.96	4.84
0°	最大能流密度 $\times 10^5/W \cdot m^{-2}$	1.029	1.389	1.494	1.389	1.029
	几何中心能流密度 $\times 10^5/W \cdot m^{-2}$	1.000	1.370	1.480	1.370	1.000
	位置偏差/mm	1.95	1.22	0.92	1.22	1.95
	相对位置偏差值/%	3.90	2.44	1.84	2.44	3.90
+23°27'	最大能流密度 $\times 10^5/W \cdot m^{-2}$	1.082	1.448	1.546	1.448	1.082
	几何中心能流密度 $\times 10^5/W \cdot m^{-2}$	1.060	1.440	1.542	1.440	1.060
	位置偏差/mm	1.46	0.54	0.24	0.54	1.46
	相对位置偏差值/%	2.92	1.08	0.48	1.08	2.92

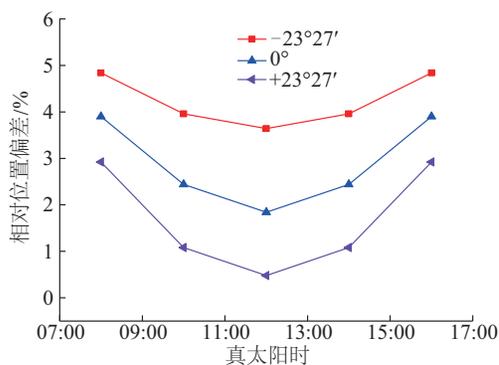


图 10 全年聚光焦斑相对位置偏差曲线图

Fig. 10 Curves of relative positional deviation of focal spot for whole year

## 4 结 论

本文针对菲涅尔极轴式固定焦点聚光器,作了定焦点聚光的原理分析,为验证该聚光器的定焦点聚光的可靠性,采用聚光实验和基于 TracePro 光学软件的聚光模拟结合,得到结论如下:

1) 提出极轴式定焦点菲涅尔聚光器设计原理。根据菲涅尔透镜聚光特性和极轴跟踪原理,在理论上实现定焦点聚光的功能,并设计出聚光器模

型,制作出实验用极轴式定焦点菲涅尔聚光器,能客观上验证聚光器的定焦点聚光的可行性。

2) 通过聚光实验与聚光模拟的对比研究可知,实验结果中焦斑相对位置偏差最大值为 5.72%,模拟结果中焦斑位置偏差最大值为 3.56%,且焦斑均基本分布在半径为 50 mm 圆环区域内,表明实验和模拟都能实现定焦点聚光。且两者的聚光焦斑分布情况基本一致,表明模拟方法可靠,可利用光学模拟手段在理论上验证该聚光器的定焦点聚光的可靠性。

3) 通过光学模拟分析可知,聚光器全年运行过程中,聚光焦斑相对位置偏差最大值为 4.84%,且焦斑基本分布在半径为 50 mm 圆环区域内,即在实际应用中可实现聚光焦斑完全落入集热器开口范围内,从而实现全年定焦点聚光。

### [参考文献]

- [1] 杨光辉, 卫 明, 陈丙振, 等. 基于多平面拟合的菲涅尔透镜优化研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(8): 1895—1901.
- [1] Yang Guanghui, Wei Ming, Chen Bingzhen, et al. Optimization research of multi-plane fitting Fresnel lens

- [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2015, 36(8): 1895—1901.
- [2] 马兴龙, 郑宏飞. 菲涅尔透镜的透射率优化方法[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(3): 482—487.
- [2] Ma Xinglong, Zheng Hongfei. An optimization method on transmittance of Fresnel lens[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(3): 482—487.
- [3] 胡连印, 胡胜勇. 塑料透射式太阳能聚光器[P]. 中国: CN1595011, 2005-03-16.
- [3] Hu Lianyin, Hu Shengyong. Plastic transmission solar collector[P]. China: CN1595011, 2005-03-16.
- [4] Valmiki M M, Li P, Heyer J, et al. A novel application of a Fresnel lens for a solar stove and solar heating[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(5): 1614—1620.
- [5] Daly A. Regulating revolution: An introduction to 3D printing and the law[M]. *Socio-Legal Aspects of the 3D Printing Revolution*. Palgrave Macmillan UK, 2016: 1—17.
- [6] Xie W T, Dai Y J, Wang R Z. Theoretical and experimental analysis on efficiency factors and heat removal factors of Fresnel lens solar collector using different cavity receivers[J]. *Solar Energy*, 2012, 86(9): 2458—2471.
- [7] 张迎胜, 唐忆春, 杨波. 一种新型的极轴式自动跟踪装置[J]. *太阳能学报*, 1994, 25(4): 377—379.
- [7] Zhang Yindheng, Tang Yichun, Yang Bo. A new design of automatic tracker with polar axis[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1994, 25(4): 377—379.
- [8] Ludlow G T. Polar axis solar collector[P]. U. S.: Patent 5,275, 149, 1994-01-04.
- [9] 魏秀东, 卢振武, 刘华. 一种新型极轴跟踪式定日镜的研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(6): 573—576.
- [9] Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Liu Hua. The investigation of a new heliostat with polar axis[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007, 28(6): 573—576.
- [10] Chong K K, Wong C W. General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector[J]. *Solar Energy*, 2009, 83(3): 298—305.
- [11] 郭孝武. 菲涅尔透镜统一设计方法[J]. *太阳能学报*, 1991, 22(4): 423—426.
- [11] Guo Xiaowu. A general method for Fresnel lens design[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1991, 22(4): 423—426.
- [12] Skouri S, Ali A B H, Bouadila S, et al. Design and construction of sun tracking systems for solar parabolic concentrator displacement[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 1419—1429.
- [13] Sinha S, Chandel S S. Analysis of fixed tilt and sun tracking photovoltaic- micro wind based hybrid power systems[J]. *Energy Conversion & Management*, 2016, 115: 265—275.
- [14] 何梓年. 太阳能热利用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [14] He Zinian. *Solar energy utilization*[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009.
- [15] Xie W T, Dai Y J, Wang R Z. Numerical and experimental analysis of a point focus solar collector using high concentration imaging PMMA Fresnel lens[J]. *Energy Conversion & Management*, 2011, 52(6): 2417—2426.

## DESIGN OF FIXED-FOCUS FRESNEL LENS SOLAR CONCENTRATOR USING POLAR TRACKING AND STUDY ON FOCAL SPOT POSITION DEVIATION

Wang Hai<sup>1</sup>, Huang Jin<sup>1</sup>, Hu Yanxin<sup>1</sup>, Lu Zijian<sup>1</sup>, He Qingbin<sup>2</sup>

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

2. *Keesung Manufacturing Co., Guangzhou 511458, China*)

**Abstract:** A type of fixed-focus Fresnel lens solar concentrator using polar tracking is proposed and analyzed, which based on the optical properties of point-focus Fresnel lens and the principle of polar tracking. According to this principle, the experimental platform is built to carry out experiment and simulation study of focal spot. The result of experiment and simulation study indicates that the maximum relative positional deviation of the focal spot in one day are 5.72% and 3.56%, respectively. The distribution of the focal spots are basically similar and they are included in the annular region which is centered at the center of the substrate with the radius of 50 mm. In other words, the fixed focus can be achieved in theory and practice, and the simulation study can be used to verifies the fixed focus characteristic of the solar concentrator. Further, with the change of the sun declination angle, the focal spot is studied from solar time 08:00 to 16:00. The simulation results show that the maximum relative position deviation in Guangzhou is 4.84%, which means that the solar concentrator can achieve the fixed focus in the whole year.

**Keywords:** solar energy concentrators; optical properties; tracking; focus; focal spot