

doi:10.3788/gzxb20174606.0622003

# 离轴非旋转对称叠加方形光斑均匀聚光 菲涅尔透镜

王进军<sup>1</sup>, 王侠<sup>2</sup>, 宁铎<sup>1</sup>

(1 陕西科技大学 电气与信息工程学院, 西安 710021)

(2 西安科技大学 电气与控制工程学院, 西安 710054)

**摘 要:** 针对传统点聚焦菲涅尔透镜聚光分布均匀性差以及聚焦光斑形状与太阳能电池片不匹配的缺点, 采用离轴非旋转对称叠加方法进行了方形光斑均匀聚光菲涅尔透镜设计, 透镜采用方形非旋转对称结构, 设计过程中通过在透镜中心截取一方形小孔来降低聚焦光斑中心辐照度峰值, 改善接收面聚光分布, 以提高聚光均匀性. 采用光线追迹法模拟并分析了小孔边长、离轴偏移量、离轴聚焦距等参量对聚光性能的影响, 结果表明: 采用该方法设计的透镜聚焦光斑形状为方形, 聚光均匀度高达 90%.

**关键词:** 聚光光伏发电; 菲涅尔透镜; 离轴非旋转; 对称叠加; 均匀聚光; 方形光斑; 离轴焦距; 离轴偏移量  
**中图分类号:** O435; TN2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-4213(2017)06-0622003-11

## Off-axis Non-rotationally Symmetric Superposition Square Spot Uniform Concentration Fresnel Lens

WANG Jin-jun<sup>1</sup>, WANG Xia<sup>2</sup>, NING Duo<sup>1</sup>

(1 College of Electrical and Information Engineering, Shannxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

(2 College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Aiming at the defects of the poor uniformity of concentration distribution and the focused spotshape does not match with solar cells in the traditional point focus Fresnel lens, square spot uniformconcentration Fresnel lens was designed by using the method of off-axis non-rotationally Symmetric Superposition. The square non-rotating symmetry structure was adopted in the lens, a square hole was intercepted in the center of the lens when the lens was designed, which can reduce the center peak irradiance of the focal spot and improve the concentrated distribution on the receiving surface in order to improve the uniformity of the spot light. The ray tracing method has been used to simulate and analyze the influence on the condensing performance caused by structure parameter of lens such as off-axis offset, the length of hole and the off-axis focus length. The results show that the shape of the focus spot of the lens designed by this method is square, and the concentration uniformity is up to 90%.

**Key words:** Concentrating photovoltaic power generation; Fresnel lens; off-axis non-rotationally; Symmetric Superposition; Uniform Concentration; Square spot; Off-axis focal length; Off axis offset

**OCIS Codes:** 220.3620; 220.3630; 080.4225

## 0 引言

光伏发电是太阳能直接利用的一种主要形式, 菲涅尔透镜是聚光光伏发电系统的核心组件之一, 其性能

基金项目: 陕西省 2015 年科学技术研究与发展计划项目 (No. 2015GY081) 资助

第一作者: 王进军 (1980-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为聚光光伏发电. Email: wangjinjun6113@126.com

收稿日期: 2016-12-19; 录用日期: 2017-03-16

<http://www.photon.ac.cn>

的好坏直接影响着整个系统的性能<sup>[1-5]</sup>. 传统点聚光菲涅尔透镜由于聚焦光斑中心辐照度峰值过高, 导致聚焦光斑的能量分布不均匀<sup>[7-8]</sup>, 入射太阳光经聚光之后在电池表面形成局部热点, 局部热点的存在一方面会降低电池转换效率, 另一方面会损伤电池, 缩短电池使用寿命; 另外, 传统的点聚光菲涅尔透镜的聚焦光斑与太阳能电池片的形状不匹配, 也使得太阳能的利用效率普遍偏低. 针对传统点聚光菲涅尔透镜聚光分布不均的问题, 2012年哈尔滨工业大学刘永强、申作春等人<sup>[9-10]</sup>提出了一种离轴非旋转对称叠加菲涅尔透镜设计方法, 较好地实现了均匀聚光, 虽然聚光效率和辐照度均匀度均超过80%, 但由于接收面中心仍然存在辐照度峰值过高的问题, 导致辐照均匀度还不是很理想. 本文在离轴非旋转对称叠加设计方法的基础上, 通过在透镜中心截取一方形小孔来降低接收面中心辐照度, 从而使得辐照均匀度提高到了90%, 而且聚焦光斑为方形, 与太阳能电池片形状做到了匹配, 有效解决了传统点聚光菲涅尔透镜聚光均匀性差以及聚焦光斑与太阳能电池片形状的匹配问题.

## 1 透镜设计

### 1.1 设计原理

采用离轴非旋转对称叠加设计的方形光斑均匀聚光菲涅尔透镜如图1. 透镜采用方形外形结构, 边长为 $L$ , 透镜中心截取的方形小孔的边长为 $l$ , 透镜面由分布完全一致且对称的四个部分组成, 每一部分的环带采用离轴聚焦非旋转设计形成四个相互独立的聚焦光轴, 每条环带的旋转角度不尽相同.

入射至透镜表面四个不同部分的光线经透镜环带折射之后形成四个相互独立的聚焦光斑, 四个光斑在传输过程中通过相互叠加获得方形均匀聚焦光斑. 光斑所在位置并非环带离轴聚焦设计的焦平面, 其工作原理如图2.

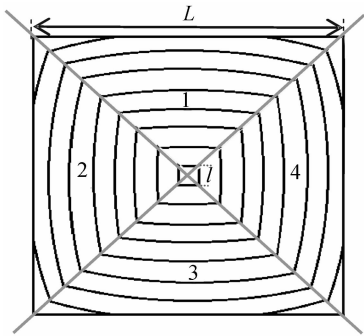


图1 离轴非旋转对称叠加菲涅尔透镜结构

Fig. 1 Structure diagram of off-axis non-rotationally superposition Fresnel lens

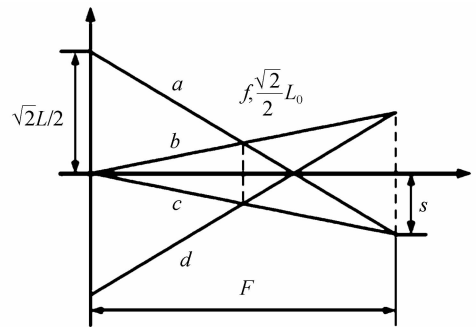


图2 离轴非旋转对称叠加法原理

Fig. 2 Schematic diagram of off-axis non-rotationally symmetric superposition

由于透镜面四个部分环带分布相互对称, 以图1中的第1、3部分为例进行说明, 光线 $a$ 、 $c$ 是入射光束经透镜第一部分对应的边缘光线, 光线 $b$ 、 $d$ 为透镜第三部分对应的边缘光线. 由边缘光学原理可知, 当光线 $a$ 、 $b$ (或者光线 $c$ 、 $d$ )相交时, 四个部分产生的光斑完全重叠, 从透镜面出来的光线全部通过边长为 $L_0$ 方形区域, 从而在该区域形成方形聚焦光斑, 由此即可确定光斑的输出位置 $f$ . 由几何光学知识可知, 在 $f$ 之前光斑尺寸逐渐减小, 在 $f$ 之后光斑尺寸逐渐增大, 在 $f$ 位置处光斑尺寸达到最小值, 为此定义 $f$ 为透镜焦距. 由图2中的几何关系得

$$\frac{f}{F} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}L_0}{s} \quad (1)$$

$$\frac{F-f}{2F} = \frac{L_0}{L-l} \quad (2)$$

式中: $L$ 为方形透镜边长; $l$ 为方形小孔边长; $F$ 为透镜离轴聚焦焦距; $s$ 为透镜光轴坐标偏移量. 由式(1)、(2)可以求得透镜聚焦光斑的边长 $L_0$ 、焦距 $f$ 为

$$L_0 = \frac{2Ls}{4s + \sqrt{2}L} \quad (3)$$

$$f = \frac{\sqrt{2}F(L-l)}{4s + \sqrt{2}(L-l)} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可以看出透镜聚焦光斑的边长  $L_0$  与透镜离轴聚焦焦距  $F$  无关,随离轴量  $s$  和透镜边长  $L$  的增加而增加;透镜焦距  $f$  随透镜离轴聚焦焦距  $F$ 、透镜边长  $L$  的增加而增加,而随轴量  $s$  的增加减小. 透过调整  $L$ 、 $s$ 、 $F$  以及透镜环带参量可以改善聚焦光斑能量的空间分布,实现均匀聚光.

## 1.2 透镜参量设计

透镜设计时先根据应用需求确定聚焦光斑边长的  $L_0$ 、焦距  $f$  和离轴量  $s$ ;再根据式(1)、(2)求解透镜边长  $L$  和离轴聚焦焦距  $F$ ;然后确定透镜环带齿宽  $w$ ,根据  $w$  和透镜材料折射率  $n$  (透镜材料选用聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA,其折射率  $n=1.49$ ) 计算环带数  $N$ 、环带曲率半径  $r_j$ 、环带倾角  $\alpha_j$  (透镜拔模角都取  $90^\circ$ ) 以及各环带高度  $d_j$  等结构参量<sup>[11]</sup> 为

$$N = \frac{\sqrt{2}L}{w} \quad (5)$$

$$r_j = \sqrt{2}s + jw \quad j=1,2,3,\dots,N \quad (6)$$

$$n \sin \alpha_j = \sin \left[ \alpha_j + \arctan \frac{r_j}{F} \right] \quad j=1,2,3,\dots,N \quad (7)$$

$$d_j = w \cdot \tan \alpha_j \quad j=1,2,3,\dots,N \quad (8)$$

最后确定透镜各环带的起点坐标  $(x_{1j}, y_{1j})$ 、终点坐标  $(x_{2j}, y_{2j})$  以及旋转角度  $\theta_j$ ,生成实体透镜.

$$(x_{1j}, y_{1j}) = \begin{cases} (0, \sqrt{r_j^2 - s^2} - s) & \sqrt{r_j^2 - s^2} - s < \frac{\sqrt{2}}{2}L \\ \left( \sqrt{r_j^2 - s^2} - s, \frac{\sqrt{2}}{2}L \right) & \sqrt{r_j^2 - s^2} - s \geq \frac{\sqrt{2}}{2}L \end{cases} \quad (9)$$

$$(x_{2j}, y_{2j}) = \begin{cases} (\sqrt{r_j^2 - s^2} - s, 0) & \sqrt{r_j^2 - s^2} - s < \frac{\sqrt{2}}{2}L \\ \left( \frac{\sqrt{2}}{2}L, \sqrt{r_j^2 - s^2} - s \right) & \sqrt{r_j^2 - s^2} - s \geq \frac{\sqrt{2}}{2}L \end{cases} \quad (10)$$

$$\theta_j = \arccos \left[ \frac{2r_j^2 - (x_{2j} - x_{1j})^2 - (y_{2j} - y_{1j})^2}{2r_j^2} \right] \quad (11)$$

根据式(1)~(11)利用 Matlab 编程求解透镜参量,然后根据透镜参量在 AUTOCAD 软件中对透镜建模.

## 2 透镜聚光性能光学模拟

利用 Trancepro 光学仿真软件采用光线追迹法对不同透镜结构参量下接收面辐照度分布进行模拟仿真,以接收面辐照均匀度和聚光效率为主要参量对透镜聚光性能进行表征.

根据 IEC60904-9-2007 国际标准规定<sup>[12]</sup>,接收面辐照不均匀度  $c$  定义为接收面辐照度最大值  $E_{\max}$  与辐照度最小值  $E_{\min}$  之差除以辐照度最大值  $E_{\max}$  与辐照度最小值  $E_{\min}$  之和的商,即

$$c = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \quad (12)$$

接收面辐照均匀度  $\Delta E$  可以表示为

$$\Delta E = 1 - c = \left( 1 - \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right) \times 100\% \quad (13)$$

考虑到接收面实际照度最小值  $E_{\min}$  最小值一般比较小,实际操作过程中可以用平均值  $E_{\text{ave}}$  代替最小值  $E_{\min}$  来计算辐照度均匀度<sup>[13]</sup>,即

$$\Delta E = \left( 1 - \frac{E_{\max} - E_{\text{ave}}}{E_{\max} + E_{\text{ave}}} \right) \times 100\% \quad (14)$$

聚光效率,输出面与输入面辐通量之比,即

$$\eta = \frac{\phi_{\text{out}}}{\phi_{\text{in}}} \times 100\% \quad (15)$$

式中  $\phi_{in}$  表示入射到菲涅尔透镜表面太阳光的总能量,  $\phi_{out}$  表示透过菲涅尔透镜太阳光的总能量.

仿真时光源采用格点光源, 辐照度为  $10\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ , 光源的外半径与初始菲涅尔透镜半径相同, 放置在菲涅尔透镜前  $50\ \text{mm}$  处, 光源模拟太阳光光谱, 波长从  $0.295\ \mu\text{m}$  到  $2.5\ \mu\text{m}$ , 各波长的权重以 NASA 太阳光谱与材料参量为标准<sup>[14-15]</sup>. 这主要是考虑到太阳辐射光谱大约 98% 能量集中在  $0.2\sim 3\ \mu\text{m}$  的波段之间, 而太阳光穿透大气过程中, 由于地球大气层中臭氧、水气和其他大气分子对小于  $0.295\ \mu\text{m}$  和大于  $2.5\ \mu\text{m}$  波长光线产生强烈吸收, 在地面上观测的太阳辐射的波段范围大约为  $0.295\sim 2.5\ \mu\text{m}$ .

### 2.1 小孔边长 $l$ 对聚光性能的影响

假定透镜透镜边长  $L=50\ \text{mm}$ , 离轴聚焦焦距  $F=250\ \text{mm}$ , 离轴偏移量  $s=5\ \text{mm}$ , 根据式(1)~(9)求解透镜环带参量, 建立透镜 matlab 仿真模型, 透镜中心小孔边长  $l$  分别为  $0.5\ \text{mm}$ 、 $1.0\ \text{mm}$ 、 $1.5\ \text{mm}$ 、 $2\ \text{mm}$  时接收面辐照度分布的模拟结果分别如图 3~6 所示, 焦距  $f$ 、聚光均匀度和聚光效率如表 1 所示.

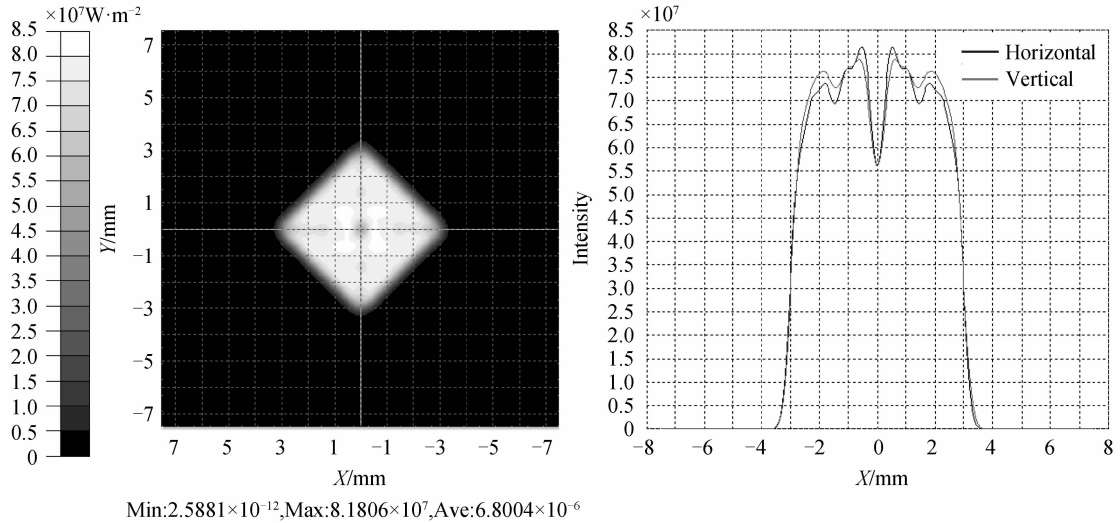


图 3 小孔边长  $l$  为  $0.5\ \text{mm}$  时接收平面辐照度分布

Fig. 3 Diagram of receiving plane irradiance distribution with the side length of the holes  $l=0.5\ \text{mm}$

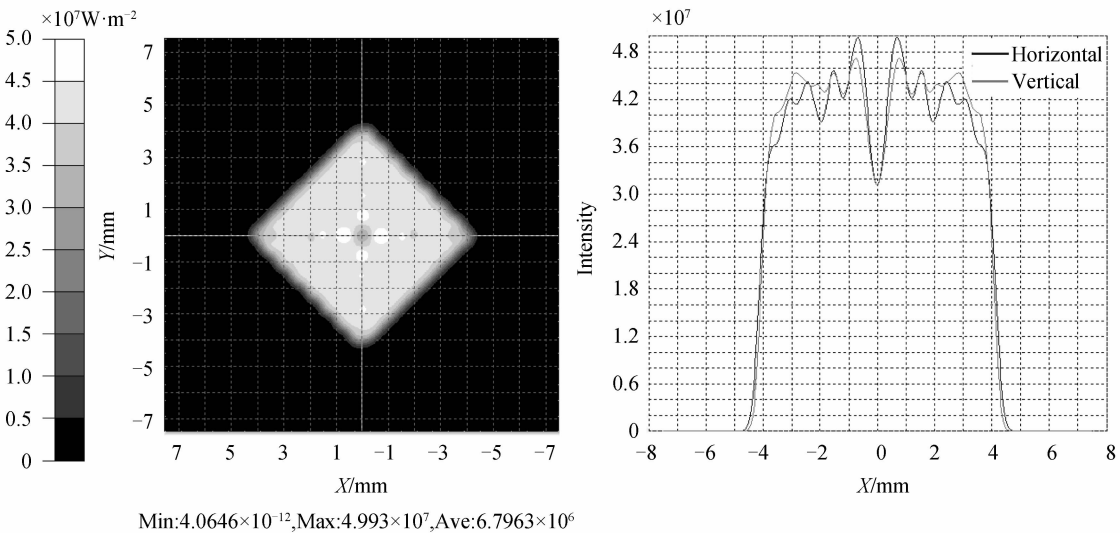


图 4 小孔边长  $l$  为  $1.0\ \text{mm}$  时接收平面辐照度分布

Fig. 4 Diagram of receiving plane irradiance distribution with the side length of the holes  $l=1.0\ \text{mm}$

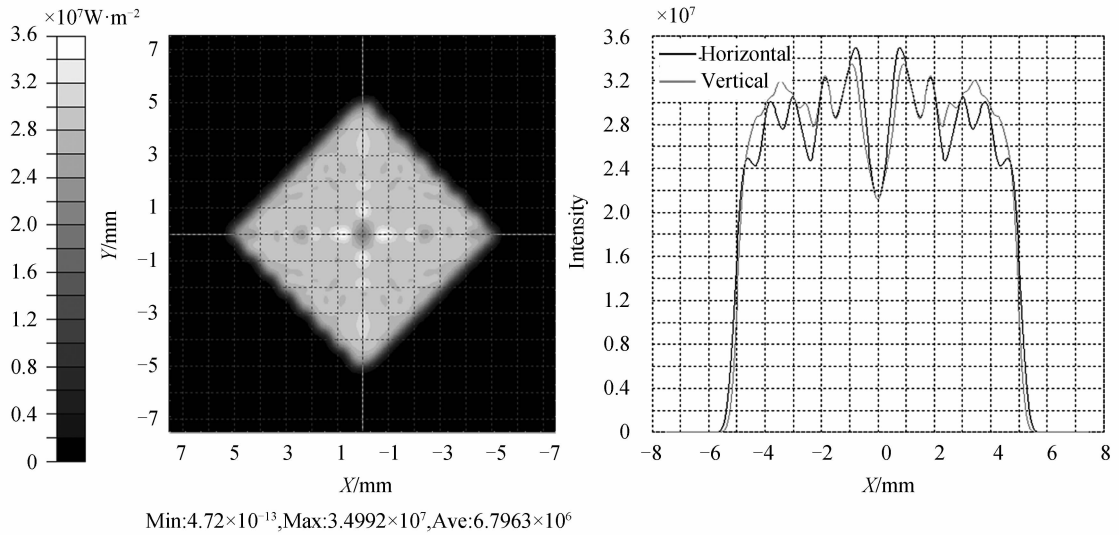


图5 小孔边长  $l$  为 1.5 mm 时接收平面辐照度分布

Fig. 5 Diagram of receiving plane irradiance distribution with the side length of the holes  $l=1.5$  mm

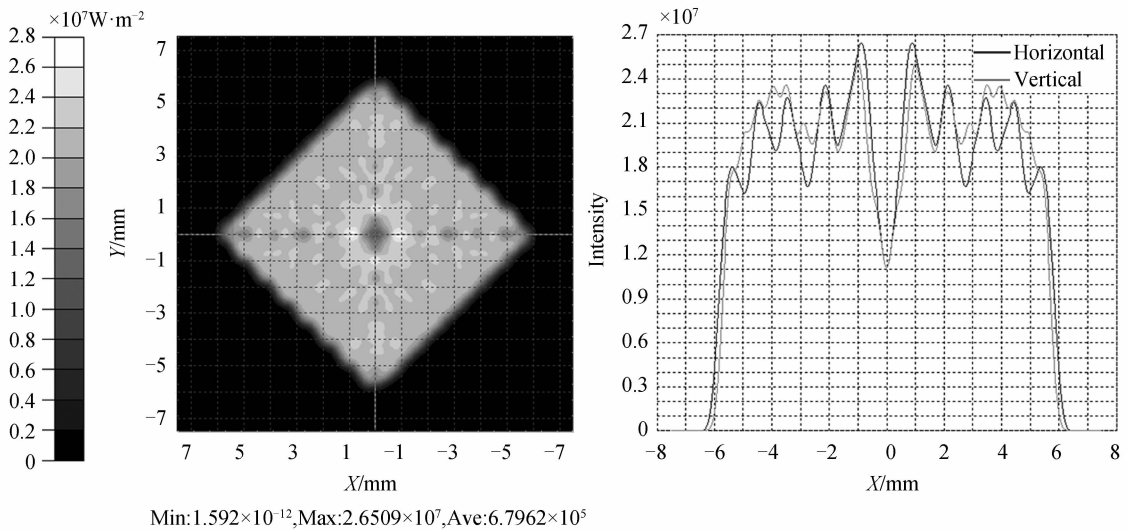


图6 小孔边长  $l$  为 2.0 mm 时接收平面辐照度分布

Fig. 6 Diagram of receiving plane irradiance distribution with the side length of the holes  $l=2.0$  mm

表1 透镜中心不同小孔边长接收平面辐照度分布数据

Table 1 Datas of receiving plane irradiance distribution with different side length of the holes in the center of the lens

$l/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$F/\text{mm}$	$s/\text{mm}$	$f/\text{mm}$	Irradiation uniformity/%	Concentration efficiency/%
0.5	50	250	5	194.9	81.7	89.4
1.0	50	250	5	194.9	78.0	87.8
1.5	50	250	5	194.9	75.0	84.6
2.0	50	250	5	194.9	58.6	80.2

从图3~6模拟结果可以看出,采用离轴非旋转对称叠加法设计的菲涅尔透镜接收面聚焦光斑为方形,透镜中心开方形小孔可以有效改善接收面中心辐照度的分布,并且随着透镜中心小孔边长  $l$  的增大,接收面中心辐照度的分布下降越多.另外,随着透镜中心小孔边长  $l$  的增大,接收面得到的方形光斑的尺寸(光斑的边长  $L_0$ )变得越来越大.但从式(3)可以看出,在透镜边长  $L$ 、离轴焦距  $F$  和离轴偏移量  $s$  一定的情况下,接收面上光斑的尺寸  $L_0$  应是固定的,这主要是因为,在透镜中心开孔后,透镜的有效聚光面积将减小,使得透镜聚集光线能力下降,光斑变大,同时也使得接收辐照均匀度和聚光效率也随着透镜中心小孔边长  $l$  的增大都再下降,这与表1给出的结果一致.可见,透镜中心开的小孔的尺寸对透镜聚光性能指标有着重要的影响,不能取得太大,必须优化选择.

## 2.2 离轴偏移量 $s$ 对聚光性能的影响

假定透镜边长  $L=50$  mm, 透镜离轴聚焦焦距  $F=250$  mm, 小孔边长  $l$  取 0.5 mm, 以离轴偏移量  $s$  为参变量根据式(1)~(9)求解透镜环带参量, 建立透镜 matlab 仿真模型,  $s$  分别为 1 mm、3 mm、5 mm、9 mm 时探测面辐照度分布的模拟结果分别如图 7~10 所示, 焦距  $f$ 、聚光均匀度和聚光效率如表 2 所示。

从图 7~10 模拟结果可以看出, 当透镜中心小孔的边长为 0.1 mm 时, 接收面中心的辐照度分布的均匀性有较大改善, 但辐照均匀度随着离轴偏移量  $s$  的增加而下降, 这是由于离轴偏移量  $s$  的增加, 透镜焦距  $f$  逐渐减小, 导致焦平面位置不断远离环带设计的离轴聚焦焦平面, 方形光斑四个顶点附近的光线聚焦能力不断减弱(见图 10), 致使焦斑辐照度分布均匀性下降。方形聚焦光斑的边长  $L_0$  随着透镜离轴偏移量  $s$  的增加而增大, 这与式(3)给出的结果一致。另外, 接收面辐照度随着离轴偏移量  $s$  的增加呈整体下降趋势, 这是由于透镜面大小  $L$  不变, 入射到透镜表面的总能量不变, 而聚集光斑面积随离轴偏移量  $s$  的增加而变大, 致使接收面辐照度随离轴偏移量  $s$  的增加整体下降。聚光效率随离轴偏移量  $s$  的变化不是很规律, 但均在 80% 以上。

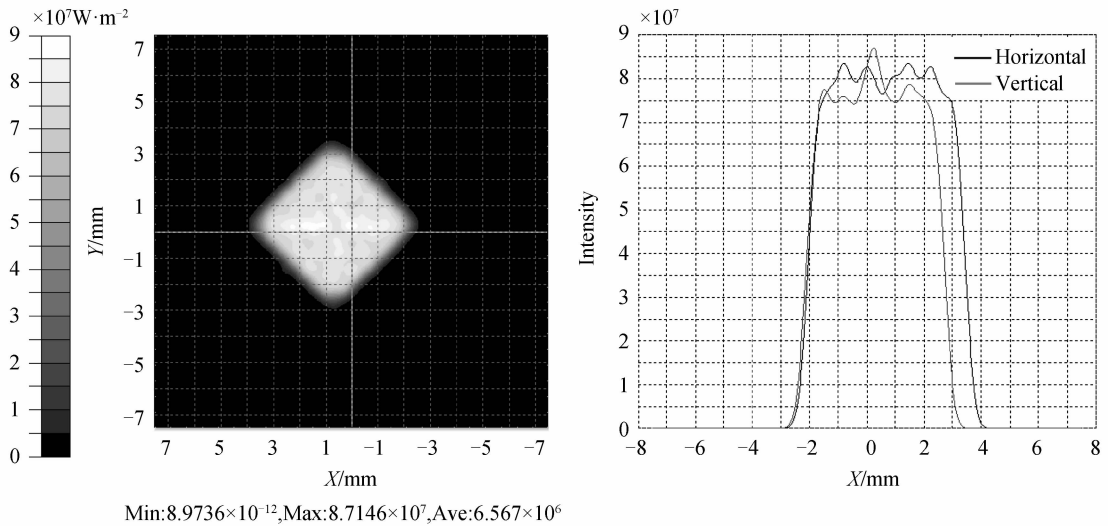


图 7 离轴偏移量  $s$  为 1 mm 时接收平面辐照度分布

Fig. 7 Diagram of receiving plane irradiance distribution with off-axis offset  $s=1$  mm

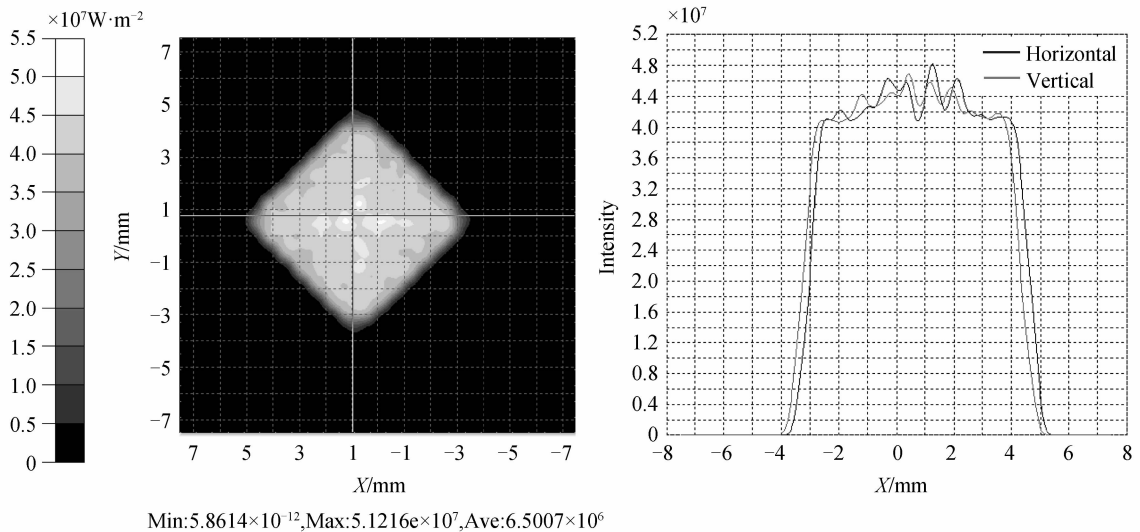


图 8 离轴偏移量  $s$  为 3 mm 时接收平面辐照度分布

Fig. 8 Diagram of receiving plane irradiance distribution with off-axis offset  $s=3$  mm

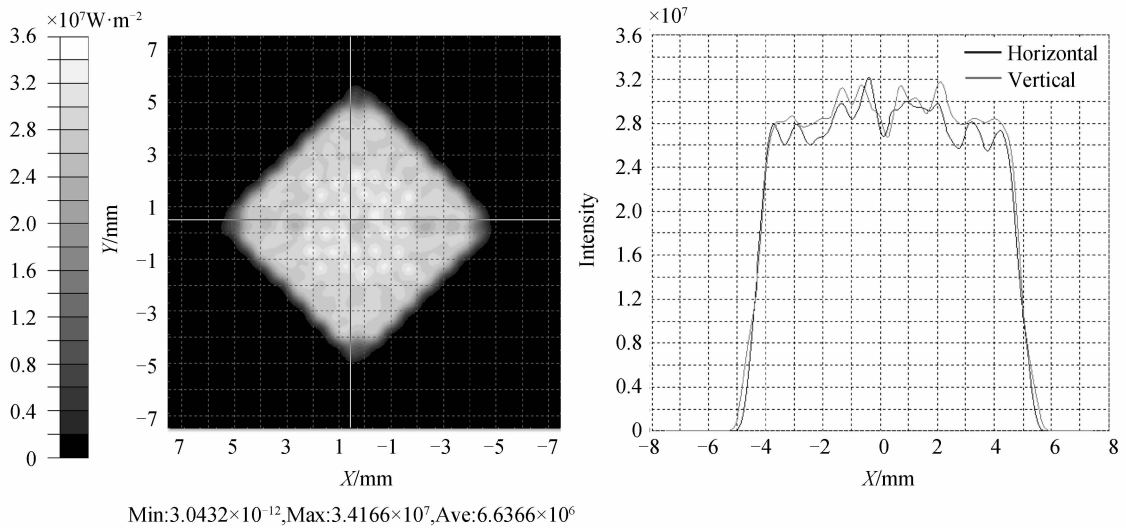


图9 离轴偏移量  $s$  为 5 mm 时接收平面辐照度分布

Fig. 9 Diagram of receiving plane irradiance distribution with off-axis offset  $s=5$  mm

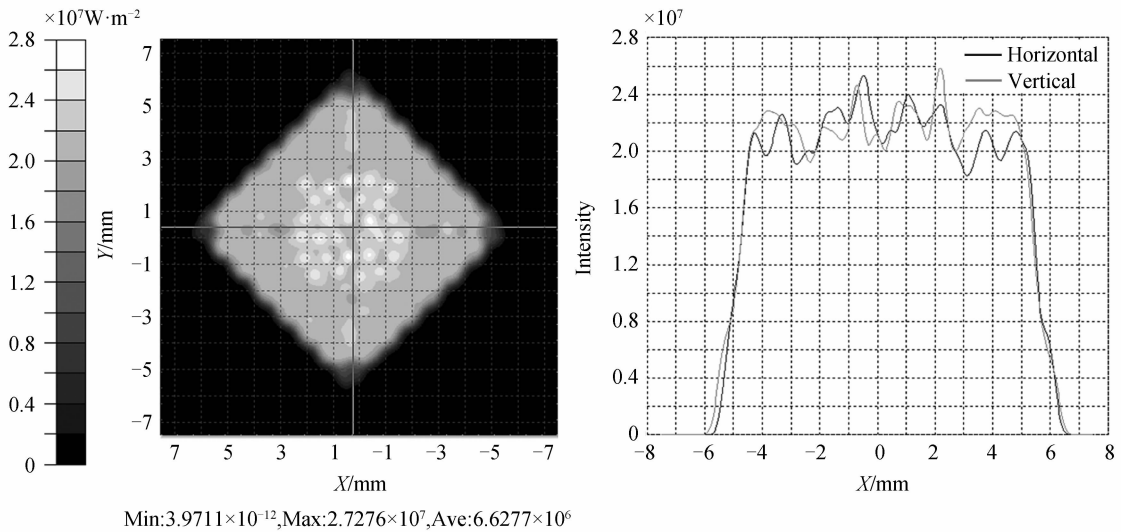


图10 离轴偏移量  $s$  为 9 mm 时接收平面辐照度分布

Fig. 10 Diagram of receiving plane irradiance distribution with off-axis offset  $s=9$  mm

表2 不同离轴量接收平面辐照度分布数据

Table 2 Datas of receiving plane irradiance distribution with different off-axis offset

$l/mm$	$L/mm$	$F/mm$	$s/mm$	$f/mm$	Irradiation uniformity/%	Concentration efficiency/%
0.5	50	250	1	236.6	93.0	89.2
0.5	50	250	3	213.7	92.2	84.1
0.5	50	250	5	194.9	89.6	85.7
0.5	50	250	7	179.1	86.9	87.0

### 2.3 透镜离轴聚焦焦距 $F$ 对聚光性能的影响

假定透镜边长  $L=50$  mm,离轴偏移量  $s=3$  mm,小孔边长  $l$  取 0.5 mm,以透镜离轴聚焦焦距  $F$  为参变量根据式(1)~(9)求解透镜环带参量,建立透镜 matlab 仿真模型, $F$  分别为 200 mm、250 mm、300 mm、350 mm 时探测面辐照度分布的模拟结果分别如图 11~14 所示,焦距  $f$ 、聚光均匀度和聚光效率如表 3 所示.

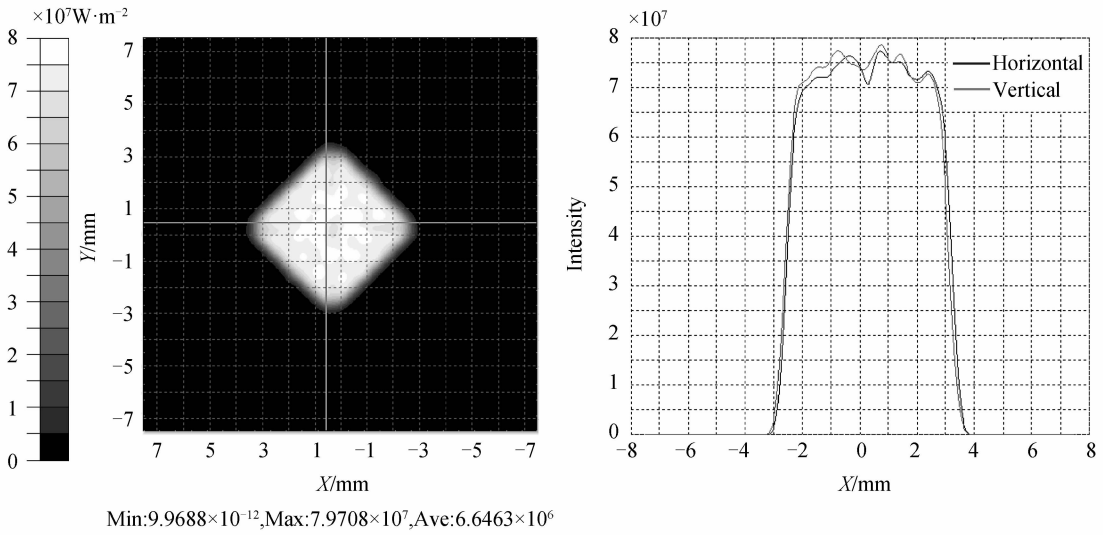


图 11 离轴聚焦焦距  $F=200$  mm 时接收平面辐照度分布

Fig. 11 Diagram of receiving plane irradiance distribution with the off-axis focus length  $F=200$  mm

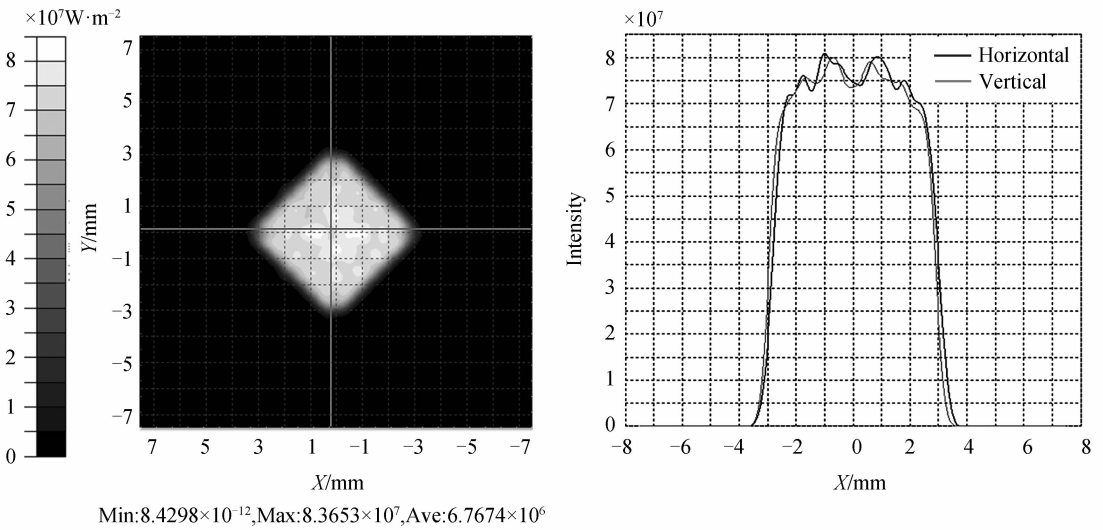


图 12 离轴聚焦焦距  $F=250$  mm 时接收平面辐照度分布

Fig. 12 Diagram of receiving plane irradiance distribution with the off-axis focus length  $F=250$  mm

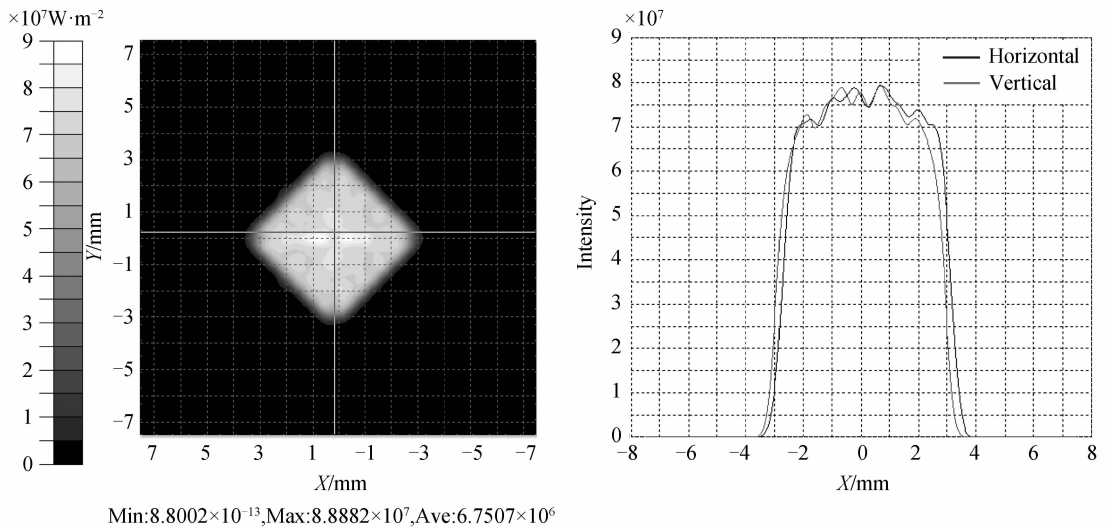


图 13 离轴聚焦焦距  $F=300$  mm 时接收平面辐照度分布

Fig. 13 Diagram of receiving plane irradiance distribution with the off-axis focus length  $F=300$  mm



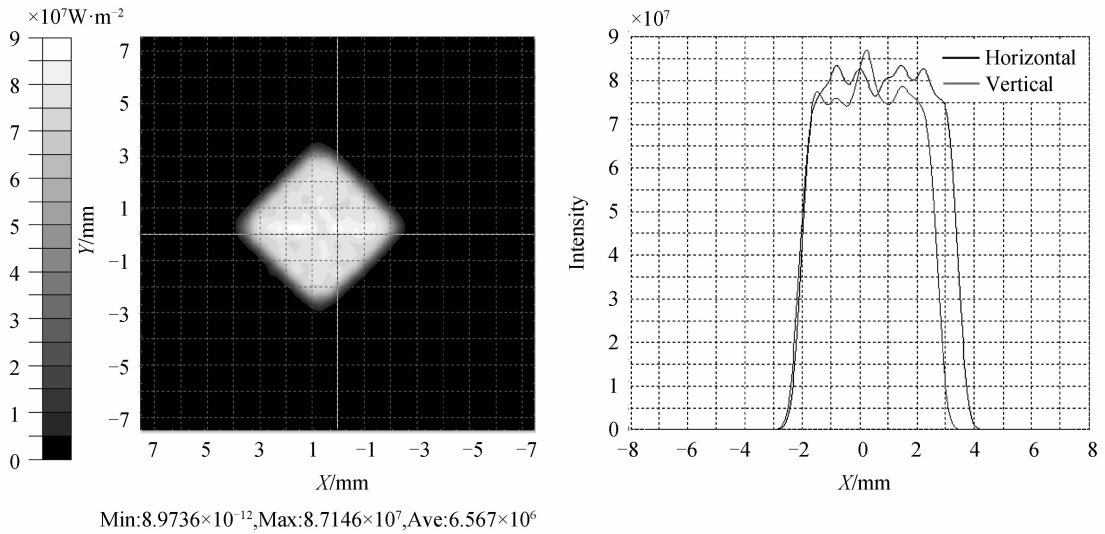


图 14 离轴聚焦焦距  $F=350$  mm 时接收平面辐照度分布

Fig. 14 Diagram of receiving plane irradiance distribution with the off-axis focus length  $F=350$  mm

表 3 不同离轴聚焦焦距接收平面辐照度分布数据

Table 3 Datas of receiving plane irradiance distribution with different off-axis focus length

$l/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$s/\text{mm}$	$F/\text{mm}$	$f/\text{mm}$	Irradiation uniformity/%	Concentration efficiency/%
0.5	50	5	200	155.9	94.6	87.6
0.5	50	5	250	194.9	93.4	87.8
0.5	50	5	300	233.8	93.3	87.7
0.5	50	5	350	272.8	93.1	87.8

从图 11~14 模拟结果和表 3 可以看出,透镜焦距  $f$  随着离轴聚焦焦距  $F$  的增大而增大,透镜聚焦光斑大小  $L$ 。几乎不随离轴聚焦焦距  $F$  变化,这与式(3)、(4)给出的结果一致.不同离轴聚焦焦距  $F$  下透镜辐照均匀度均在 90% 以上,聚光均匀度随着镜离轴聚焦焦距  $F$  的增加稍有所下降,这是由于透镜离轴聚焦焦距  $F$  的增加,透镜焦距  $f$  逐渐增大,焦平面位置不断向环带设计的离轴聚焦焦平面靠近,方形光斑边缘附近的光线聚焦能力不断增强,致使焦斑辐照度分布均匀性下降.由于透镜面积和光斑面积不变,接收面辐照度变化不大,因此聚光效率随着离轴聚焦焦距  $F$  的增加变化不大.

### 3 透镜优化设计

为了同时兼顾聚光辐照度和聚光均匀度,通过对离轴偏移量  $s$ 、离轴聚焦焦距  $F$ 、小孔边长  $l$  三个结构参量进行优化,最终确立的透镜最佳参量组合为:离轴偏移量  $s=4.5$  mm,离轴聚焦焦距  $F=300$  mm,小孔边长  $l=0.3$  mm,透镜边长  $L=5$  mm,其结构如图 15 所示.对应的接收平面辐照度分布如图 16 所示,在  $(-2, 2)$  mm 范围内,辐照度平均值  $8.6 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup>,聚光均匀度高达 93.2%,聚光效率高达 89.5%.

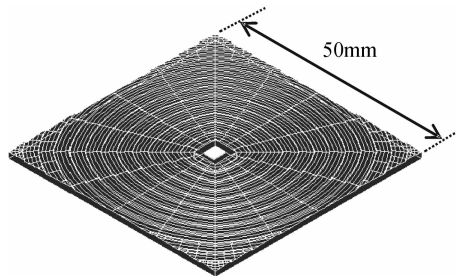


图 15 菲涅尔透镜优化结构图

Fig. 15 Structure diagram of the optimized Fresnel lens

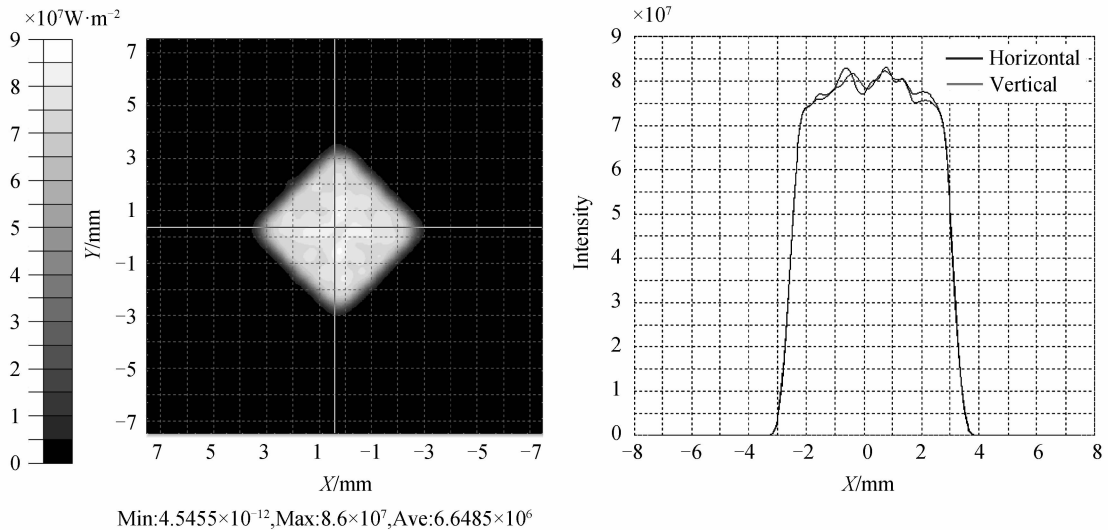


图 16 优化后的菲涅尔透镜接收平面辐照度分布

Fig. 16 Receiving plane irradiance distribution Diagram of the optimized Fresnel lens

## 4 结论

针对传统点聚焦菲涅尔透镜聚光分布均匀性很差以及聚焦光斑性质与太阳能电池片不匹配的缺点,采用离轴非旋转对称叠加方法进行了方形光斑均匀聚光菲涅尔透镜设计,详细介绍了透镜的设计过程,设计过程中通过在透镜中心截取一方形小孔来降低聚焦光斑中心辐照度峰值,提高了聚光均匀性,有效地解决了传统点聚光菲涅尔透镜聚光均匀性差以及聚集光斑与太阳能电池片形状的匹配的问题.通过 AutoCAD 软件三维建模,采用 Tracepro 软件利用光线追迹法对透镜的聚光性能进行了光学模拟,模拟并分析了离轴偏移量、小孔边长、离轴聚焦焦距等结构参量对聚焦光性能的影响,所设计透镜可应用于聚光光伏发电系统,以便提高电池寿命和发电效率.

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] KATZ E A, GORDON J M, FEUERMAN D. Effects of ultra-high flux and intensity distribution in multi-junction solar cells[J]. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2006, **14**(4): 297-303.
- [3] HERRERO R, VICTORIA M, DOMINGUEZ C, *et al.* Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multi-junction solar cells[J]. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2012, **20**(4): 423-430.
- [4] BRAUN A, HIRSCH B, KATZ E A, *et al.* Localized radiation effects on tunnel diode transitions in multi-junction concentrator solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, **93**(9): 1692-1695.
- [5] XIE W T, DAI Y J, WANG R Z, *et al.* Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(6): 2588-2606.
- [6] RYU K, RHEE J G, PARK K M, *et al.* Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system[J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(12): 1580-1587.
- [7] ZHUANG Z, YU F. Optimization design of hybrid Fresnel-based concentrator for generating uniformity irradiance with the broad solar spectrum[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, **60**(5): 27-33.
- [8] LI Peng, WU He-li, YANG Pei-huan, *et al.* General design method and optical efficiency of the solar concentrator by Fresnel lens[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, **32**(6): 62-66.  
李鹏, 吴贺利, 杨培环, 等. 菲涅尔聚光透镜的一般设计方法及效率分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, **32**(6): 62-66.
- [9] LIU Yong-qiang, SHEN Zuo-chun, LU Yu, *et al.* Design and performance research of uniform concentrating fresnel lens[J]. *Optoelectronic Technology*, 2012, **32**(4): 263-266.  
刘永强, 申作春, 芦宇, 等. 均匀会聚菲涅尔透镜设计及性能研究[J]. 光电子技术, 2012, **32**(4): 263-266.
- [10] LIU Yong-qiang. Design and performance research of uniform concentrating fresnel lens[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2012.  
刘永强. 均匀聚光菲涅尔透镜设计及性能研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [11] PAN Jui-wen, HUANG Jun-yang, WANG Chi-ming, *et al.* High concentration and homogenized Fresnel lens without

- secondary optics element[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(19): 4283-4288.
- [12] International Electrical Commission. IEC60904-9-2007. Photovoltaic devices-part 9: solar simulator performance requirement[S].
- [13] ZHANG Li, CHEN Zhi-ming, DONG Qian-min, *et al* . Design and analysis of ring-shaped-focus fresnel concentrator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(9): 150-155.  
张丽, 陈志明, 董前民, 等. 一种环面焦斑菲涅耳聚光器的设计与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(9): 150-155.
- [14] LIN M, SUMATHY K, Dai Y J, *et al* . Performance investigation on a linear Fresnel lens solar collector using cavity receiver[J]. *Solar Energy*, 2014, **107**(9): 50-62.
- [15] YEH N, YEH P. Analysis of point-focused, non-imaging Fresnel lenses' concentration profile and manufacture parameters[J]. *Renewable Energy*, 2015, **85**(2016): 514-523.