

## 聚光光伏系统菲涅耳聚光器性能分析与仿真

张明军<sup>1</sup>, 高文英<sup>1,2</sup>, 牛泉云<sup>1</sup>, 袁兴起<sup>1</sup>

- (1. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000;
2. 河南城建学院 数理学院, 河南 平顶山 467036)

**摘要:** 对太阳能聚光光伏发电技术中的聚光系统进行了研究, 分析了菲涅耳透镜应用于太阳能聚光器的优点、聚光特性以及光学效率, 推导并获得了平面向外、菲涅耳面向太阳电池的点聚焦菲涅耳透镜的设计公式。在 ZEMAX 软件的非序列模式中实现了基于非成像光学理论的光线追迹仿真, 对某一尺寸的菲涅耳透镜的焦平面上光斑能量分布情况进行了分析与模拟。研究表明, 利用通常的菲涅耳透镜实现聚光作用的聚焦光斑的光能量主要集中在太阳电池的中心部位, 呈现为从中心往外围能量越来越弱的同心圆环。要使太阳电池接收到的光能量尽可能均匀, 则需要增加二次聚光元件。

**关键词:** 聚光器; 菲涅耳透镜; 光学效率; 仿真

**中图分类号:** TK513.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2411-06

## Characteristics analysis and simulation of Fresnel concentrator in concentrated photovoltaic system

Zhang Mingjun<sup>1</sup>, Gao Wenying<sup>1,2</sup>, Niu Quanyun<sup>1</sup>, Yuan Xingqi<sup>1</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
2. School of Mathematics and Physics, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

**Abstract:** The concentrator in solar concentrated photovoltaic system was studied. The advantages of Fresnel lens for solar concentrator and its focusing characteristics and optical efficiency were analyzed, and the designing formula of point focus Fresnel lens with flat surface outward and Fresnel surface facing to the solar cell was obtained. Based on the theory of non-imaging optics, the ray trace simulation was realized in the non sequence model of ZEMAX software, and the solar energy distribution on focal plane of Fresnel lens for a certain size was analyzed and simulated. The simulation results show that, the solar energy of focused facula generated by usual Fresnel lens mainly focuses on the centre of the solar cell, and as the distance from the centre increases, the energy density of the concentric rings decreases. To make the solar energy distribution of the solar cell even, the second concentrator in concentrated Photovoltaic should be added.

**Key words:** concentrator; Fresnel lens; optical efficiency; simulation

收稿日期: 2014-12-07; 修订日期: 2015-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(51005071); 河南省重点学科基金(509916)

作者简介: 张明军(1976-), 男, 讲师, 博士生, 主要从事光电信息处理、自动控制、模式识别方面的研究。Email: zmj@hpu.edu.cn

通讯作者: 袁兴起(1972-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电信息处理、测控技术与仪器方面的研究。Email: yuanxingqi@hpu.edu.cn

## 0 引言

太阳能作为分布最广泛、取用最方便、储量最丰富的可再生能源,它的有效利用能极大地缓解能源危机。太阳能能流密度小、光照方向与强度不断变化,聚光型光伏技术把大面积太阳光聚焦到较小面积的太阳电池上,增加了太阳电池上的光辐照强度,与固定安装的常规平板太阳能电池组件的系统相比,在减少系统中太阳电池使用量的同时还可以提高系统的光电转换效率<sup>[1]</sup>。

但是,目前聚光型光伏系统还存在不少问题,如聚焦光斑的光能量强度分布不均匀、光斑的形状跟太阳电池不匹配和对日跟踪系统的跟踪精度不高。太阳能聚光器按其聚光的方式分可以分为透射式聚光器和反射式聚光器,而这两种聚光器又在各自的领域有着不同的应用,目前应用于高倍聚焦太阳能发电的聚光器一般为透射式聚光器,在透射式聚光器中又以菲涅耳聚光器应用最为广泛。近年来,对光伏发电系统特别是聚光器的研究已逐渐成为一个研究热点<sup>[2-7]</sup>。文中旨在解决聚光比在几百倍、光斑直径在 10 mm 左右的条件下什么类型的聚光器和什么形状的太阳电池匹配可以使聚焦光斑更均匀、光能利用率更高和接受角更大的问题,从而可以使聚光光伏系统在提高系统光电转换效率的同时降低系统对跟踪装置的要求,进而降低电能的成本价格。

## 1 菲涅耳透镜的特性分析

### 1.1 菲涅耳透镜的优点

菲涅耳透镜是由平凸透镜经过演变而来的,与传统的光学玻璃透镜相比,菲涅耳透镜用于太阳能聚光器的优点是:体积小,质量轻,价格便宜,现在一般采用树脂材料;便于加工,不易断裂;透光率高,除去反射损失和制造缺陷的影响仍然可达到 0.85 以上;适当设计齿的角度便可使电池上的光强分布更加合理,这是其它聚光镜难以做到的;透镜作为电池外罩的一部分,对电池起到保护作用;采用菲涅耳透镜的聚光系统,其散热器位于电池外罩的阴影里,不会接受太阳直射,有较好的散热效果;有一定的强韧性,能经得起砂石等硬物的击打<sup>[8]</sup>。

### 1.2 菲涅耳透镜的设计公式

对于平面接收阳光,菲涅耳面正对太阳电池的

菲涅耳透镜,当光线正入射时菲涅耳透镜的截面光路如图 1 所示。对于入射到整个菲涅耳透镜上的光

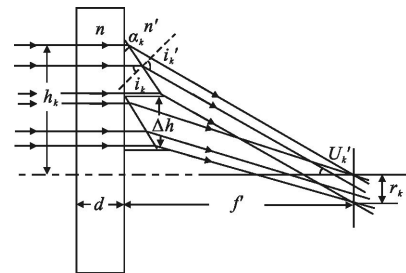


图 1 光线正入射 Fresnel 透镜截面光路图

Fig.1 Optical path of ray normal incidence Fresnel lens

线则在焦平面上形成一个以焦点到焦平面上某点长度为半径的均匀圆斑。当平行光入射到菲涅耳透镜基面时,光线不发生折射现象,直到光线到达锯齿面,发生折射并射出。入射高度为  $h_k$  ( $h_k$  表示从透镜中心到第  $k$  环的高度) 的光线从锯齿面出射时入射角为  $i_k$ , 出射角为  $i_k'$ , 通过透镜后的像方汇聚角为  $U_k'$ 。则有以下公式:

$$h_k = k * \Delta h; \sin i_k' = \frac{n}{n'} \sin i_k; \tan U_k' = \frac{h_k}{f'} \quad (1)$$

式中:  $\Delta h$  为相连环带之间的距离;  $n$  为透镜材料折射率;  $n'$  为空气折射率 1, 所以  $\sin i_k' = n \sin i_k$ 。

又有几何关系式:

$$90^\circ - i_k = U_k' + 90^\circ - i_k'; \alpha_k = i_k \quad (2)$$

式中:  $\alpha_k$  为第  $k$  齿的工作侧面角, 得:

$$\alpha_k = \arctan \left[ \frac{\sin U_k'}{n - \cos U_k'} \right] \quad (3)$$

该公式与郭孝武菲涅耳透镜统一设计方法<sup>[9]</sup>中平行光垂直入射在透镜的平面一侧时的情况是一致的。

联立公式(1)、(2)、(3)组, 得工作侧面角  $\alpha$ :

$$\tan \alpha_k = \frac{k * \Delta h}{n \sqrt{f'^2 + (k * \Delta h)^2} - f'} \quad (4)$$

对于一定焦距的菲涅耳透镜, 选用的材料和  $\alpha_k$  值确定后该棱镜的位置也就确定了。并且, 由  $\alpha_k = i_k$ ,  $\sin i_k' = n \sin i_k$ ,  $i_k < 90^\circ$  得最大工作侧面角为:

$$\alpha_{\max} = \arcsin \frac{1}{n} \quad (5)$$

因此, 确定了最大工作侧面角便可以得到透镜的最大口径。

菲涅耳透镜的最外环工作侧面角最大, 所以最外环微棱镜(因单个锯齿像安在平板上的一个小棱镜而如此命名, 因此  $\Delta h$  也可以称为棱长)的棱高最大, 折射角度也最大, 当单色光入射时, 在像平面上

生成的光斑大小由最外环微棱镜决定。如图 2 所示,在忽略棱高的条件下,光斑的大小与环距相当,即光斑半径大概为  $\Delta h$ 。而透镜的最外环微棱镜的棱高最大,折射角度也最大,所以色散程度也就最大。因而也可以把最外一环的光斑大小作为透镜的光斑大小。最外环光斑的计算公式为:

$$r_N = \frac{r(f_{N2} - f_{M1})}{f_{N2} + f_{M1}} \quad (6)$$

式中:  $f_{M1}$  和  $f_{N2}$  分别为太阳光中最短波长和最长波长透过最外环棱镜在光轴上的焦距;  $r_N$  为最外环光斑半径;  $r$  为透镜最外环半径。

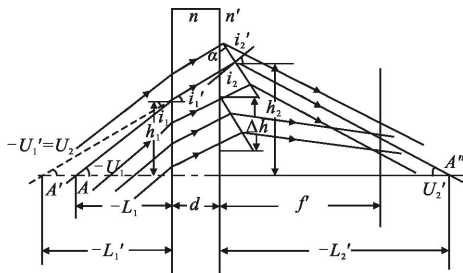


图 2 平行光斜入射到菲涅耳透镜截面光路图  
Fig.2 Optical path of ray inclined incidence Fresnel lens

当平行光线斜入射到菲涅耳透镜上时,光路如图 2 所示。以角度  $U_1$  入射的光线在透镜基面上发生折射,射到锯齿面上然后出射。射到同一锯齿面上的光线出射后仍然是平行的。现给出第  $k$  齿上的一条入射光线的计算光路。设该光线与光轴的交点为  $A$ ,与透镜基面的距离为  $l_1$ ,  $A'$  为入射到基面上的折射光线的反向延长线与光轴的交点,与透镜基面的距离为  $l_1'$ ,经透镜后成像在  $A''$  点,像距为  $l_2'$ ,像方汇聚角为  $U_2'$ 。入射光线在透镜基面上的入射角为  $i_1$ ,折射角为  $i_1'$ ,入射高度为  $h_1$ ,在锯齿面上的入射角为  $i_2$ ,折射角为  $i_2'$ ,入射高度为  $h_2$ 。透镜基面的厚度为  $d$ ,在透镜焦距  $f'$  和工作侧面角  $\alpha$  已知的情况下可以由公式组(7)算出  $l_1$ 、 $l_2'$  和光线在焦平面上的位置坐标,进而可以计算出光斑在焦平面上的偏移量。

$$\begin{cases} \tan U_1 = \frac{h_1}{l_1} \\ I_1 = -U_1 \\ \sin I_1' = \frac{1}{n} \sin I_1 \\ U_2 = U_1' = -I_1' \\ h_2 = h_1 - d \tan U_1' \\ \tan U_2' = \frac{h_2}{f'} \\ \alpha = \arctan \left[ \frac{\sin U_1 - \sin U_2'}{\sqrt{n^2 + \sin^2 U_1} - \cos U_2'} \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k$  为环带的环数;  $\Delta h$  为相连环带之间的距离即螺距;  $n$  为菲涅耳透镜材料的折射率。

### 1.3 菲涅耳透镜的光学效率

在太阳能聚光器中,透镜作为聚光器件,其光学效率是一个非常重要的评价因子。透镜的光学效率可以简单地定义为透镜中透射光的总能量与入射到透镜上的光能量之比,其值与透镜的光学损失紧密联系。导致菲涅耳透镜光学损失的决定因素有很多种,图 3 为透镜的光学损失分析示意图,从图中可以看出:透镜的光学损失基本可以分为反射损失、吸收损失、工艺性损失以及结构损失四种情况。其中反射损失和吸收损失主要与透镜的设计形状和设计相关要求,而工艺性损失是透镜成型时对透镜理想轮廓的客观修改而导致部分光线发散引起的能量损失,比如脱模锥度、圆角等。结构损失是由菲涅耳透镜采用棱镜元组成的不连续曲面取代一般透镜的连续球面而导致部分光线发散引起的能量损失<sup>[10]</sup>。

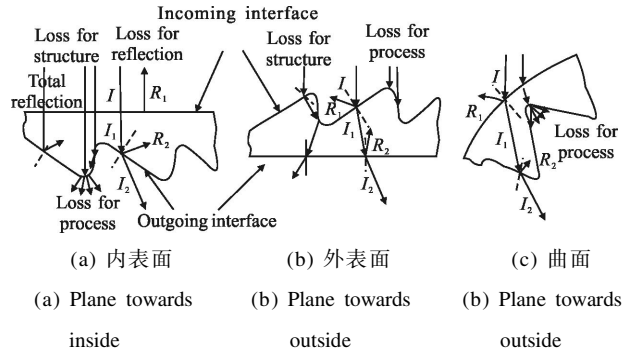


图 3 能量损失示意图

Fig.3 Schematic of energy loss

## 2 菲涅耳透镜在 ZEMAX 中的仿真实现

文中对材料为 PMMA,口径为 280 mm,焦距为 260 mm,环距为 0.5 mm 的菲涅耳透镜进行实例分析。PMMA 折射率为  $n=1.491756$ ,取 1.49,则该菲涅耳透镜最大工作侧面角由公式(5)得:

$$\alpha_{\max} = \arcsin \frac{1}{n} = \arcsin \frac{1}{1.49} = 42.1^\circ$$

把  $\alpha_{\max}$  代入公式  $\tan \alpha_k = \frac{k * \Delta h}{n \sqrt{f'^2 + (k * \Delta h)^2} - f'}$  得到  $k=493$ ,即  $k$  的最大值为 493,进而得到这种条件下菲涅耳透镜的最大口径:

$$D_{\max} = 2k * \Delta h = 493 \text{ mm}$$

使用 Zemax 软件平台,输入表 1<sup>[11]</sup>中的太阳光

谱数据,主波长选择  $0.550\ \mu\text{m}$ 。得到系统立体模型图4, 可以看到菲涅耳透镜聚集光线的效果非常显著,但在径向方向上存在线聚焦情况,这是因为在实际聚焦时,由于每个齿都有一定的宽度,而在固定宽度范围内仅有一条光线严格满足点聚焦,而并不是该范围内的所有光线都是严格的点聚焦,所以在焦点附近是一个有一定宽度的线聚焦。然后进行光线追迹,得到如图5所示的光斑。测得中心亮点半径大概为  $0.5\ \text{mm}$ ,跟理论值相同。但在  $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$  的探测器上只获得  $98.7\%$  的能量,说明实际光斑半径要略大于  $5\ \text{mm}$ <sup>[12]</sup>。

表 1 NASA 太阳光谱与材料参数

Tab.1 Solar spectrum and material parameters of NASA

Wavelength increment ( $\Delta\lambda$ )	Center wavelength $\lambda_c$	Weighting factor $\omega_i$	Refraction rate of acrylic plastic $n_i$	Transmission factor of acrylic plastic(T)
0.295-0.40	0.374	0.026 7	1.5250 (Estimate value)	0.962
0.40-0.43	0.416	0.027 5	1.5155	1
0.43-0.45	0.441	0.024 4	1.5018	1
0.45-0.47	0.460	0.029 1	1.4999	1
0.47-0.49	0.480	0.032 0	1.4982	1
0.49-0.51	0.500	0.032 7	1.4968	1
0.51-0.53	0.520	0.032 3	1.4954	1
0.53-0.55	0.540	0.032 2	1.4942	1
0.55-0.57	0.560	0.031 9	1.4930	1
0.57-0.60	0.585	0.047 3	1.4918	1
0.60-0.63	0.615	0.047 3	1.4906	1
0.63-0.66	0.645	0.047 5	1.4895	1
0.66-0.69	0.675	0.045 6	1.4886	1
0.69-0.73	0.709	0.053 7	1.4876	1
0.73-0.78	0.753	0.059 1	1.4865	1
0.78-0.83	0.804	0.056 2	1.4854	1
0.83-0.89	0.857	0.062 3	1.4845	1
0.89-0.99	0.953	0.060 6	1.4832	1
0.99-1.06	1.024	0.056 5	1.4826	1
1.06-1.21	1.129	0.062 1	1.4818	0.948
1.21-1.52	1.274	0.064 9	1.4812 (Estimate value)	0.912
1.52-2.2	1.642	0.068 1	1.4808 (Estimate value)	0.570



图 4 Fresnel 透镜及探测器立体模型图

Fig.4 Three-dimensional model of Fresnel lens and detector

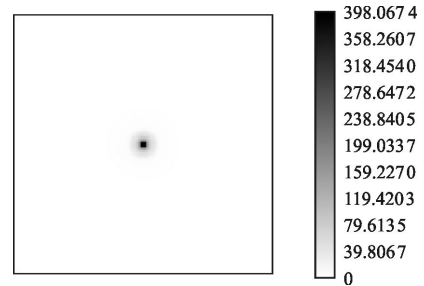


图 5 全光谱光线追迹光斑能量分布图

Fig.5 Energy distribution diagram of full spectrum ray tracing

只勾选最短波长,在 Analysis 下拉菜单中选 layout-NSC 3D Layout,会弹出 NSC 3D Layout 图如图6所示。把鼠标放在焦点处,光轴坐标  $z$  数据会自动显示。得到的数据减去菲涅耳透镜位置的  $z$  坐标数据,便得到最短波长的光线在此透镜光轴上的焦距为  $241\ \text{mm}$ 。同样勾选最长波长,得到最长波长在此透镜光轴上的焦距为  $267\ \text{mm}$ 。代入最外环光斑计算公式(6)得到光斑半径为  $7.2\ \text{mm}$ 。该结果与模拟数据中光斑大于  $5\ \text{mm}$  是一致的。充分证明 ZEMAX 软件平台模拟结果可信。

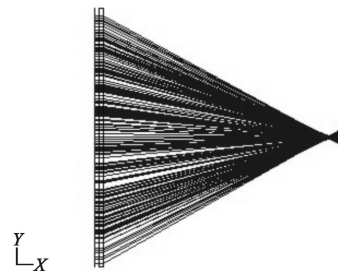


图 6 最短波长时 3D 图

Fig.6 3-D diagram using the shortest wavelength ray

当平行光线斜入射到菲涅耳透镜上时,由于该计算量很大,又认为 ZEMAX 软件得出的数据可信,因此,直接在 ZEMAX 软件平台上模拟光路,以得到

光斑的偏移量和电池接收到的阳光总能量。修改 Non-Sequential Component Editor 中光源的参数,使光源发出的平行光线与  $z$  轴有一定的夹角。鉴于太阳赤纬角在一天中的变化量很小,而方位角有近  $180^\circ$  的变化,所以只计算了太阳方位角的变化对接收器上光斑偏移量的影响。只改变了光源在  $y$  轴上的参数,其他参数不变。而太阳电池接收到的光能量为光线垂直入射时太阳电池接收到的光能量的 90% 时的光线偏转角度,即接收角,应该大于太阳跟踪器的跟踪精度。目前为止,双轴跟踪的对日跟踪装置的跟踪精度能达到  $0.5^\circ$  的接收角。在平行光与菲涅耳透镜法线方向的夹角为  $0.5^\circ$  时进行光线追迹,探测器上的光斑显示在图 7 上。此时接收到的光能量是阳光垂直入射时的 92.2%。该数据大于 90%,所以对于太阳跟踪精度在  $0.5^\circ$  的聚光光伏系统,该菲涅耳透镜是适用的。但很明显,垂直通过该菲涅耳透镜的平行光线汇聚后光能量主要集中在太阳电池的中心部位,呈现为从中心往外围能量越来越弱的同心圆环,如图 5 所示。 $0.5^\circ$  斜入射的光线经过该菲涅耳透镜后汇聚点偏离太阳电池的中心部位,并出现弥散现象,而其他部位接收到的能量也很少,如图 7 所示。需要增加二次聚光元件使太阳电池接收到的光能量尽可能均匀。

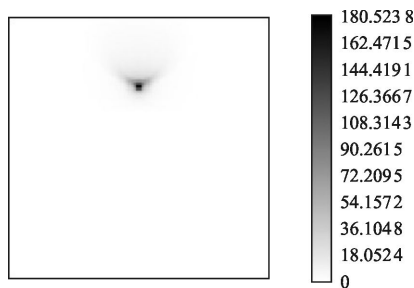


图 7 平行光以  $0.5^\circ$  斜入射时焦平面上光能量分布图

Fig.7 Solar energy distribution of parallel ray  $0.5^\circ$  inclined incidence

### 3 结论

一般说来,使用菲涅耳太阳能聚光器可以使聚焦光斑较均匀、光能利用率较高和接受角更大,从而使聚光光伏系统在提高系统光电转换效率的同时降低系统对跟踪装置的要求,进而降低电能的成本价格。菲涅耳透镜比传统玻璃球面镜所占体积更小而且透光率更好,因而更适合用于太阳能发电的

聚光技术。但其聚光倍数会随光强的衰减而变小,而且还会随太阳视场角的增大明显小。但通常的菲涅耳透镜实现聚光作用的聚焦光斑的光能量还是在太阳电池中心部位集中较多,呈现为从中心往外围能量越来越弱的同心圆环。要使太阳电池接收到的光能量尽可能均匀,则需要增加二次聚光元件。另外,如何将菲涅耳透镜应用到聚光太阳能系统,为使光线能垂直入射,跟踪技术一直是该领域的研究重点。

### 参考文献:

- [1] Wang Jun, Zhang Yaoming, Jin Baosheng, et al. Concentrator used in solar thermal power[J]. *Solar Energy*, 2007(9): 30-34. (in Chinese)  
王军, 张耀明, 金保升, 等. 太阳能热发电中的聚光器[J]. 太阳能, 2007(9): 30-34.
- [2] Ru Zhanqiang, An Zhiyong, Song Helun, et al. Design and performance analysis of total reflection-type secondary optics in concentrated photovoltaic module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 262-266. (in Chinese)  
茹占强, 安志勇, 宋贺伦, 等. 应用于聚光光伏模组的全反射式二次聚光器的设计与性能分析 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 262-266.
- [3] Li Wang, Xu Xiping, Song Helun, et al. Design and analysis of the line focus Fresnel concentrator based on the diffused focal points method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 721-726. (in Chinese)  
李望, 徐熙平, 宋贺伦, 等. 分布式焦点法线聚焦菲涅耳聚光器设计及性能分析 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 721-726.
- [4] Boji Milorad, Marjanovi Nenad, Mileti Ivan, et al. Comparison of optical performances of sea-shell trough solar concentrators[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 98(1): 144-150.
- [5] Oh Seung Jin, Burhan Muhammad, Ng Kim Choon, et al. Development and performance analysis of a two-axis solar tracker for concentrated photovoltaics [J]. *International Journal of Energy Research*, 2015, 39(7): 965-976.
- [6] Correia Sandra F H, Lima Patricia P, André Paulo S, et al. High-efficiency luminescent solar concentrators for flexible waveguiding photovoltaics [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 138(7): 51-57.
- [7] Xu Yishen, Gu Jihua, Tao Zhi, et al. Design of a broadband anti-reflection coating for solar cells [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 999-1002. (in Chinese)

- 许宜申, 顾济华, 陶智, 等. 宽波长太阳能电池抗反射层结构设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 999-1002.
- [8] Li Peng, Wu Heli, Yang Peihuan, et al. General design method and optical efficiency of the solar concentrator by fresnel lens [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010(6): 62-66. (in Chinese)
- 李鹏, 吴贺利, 杨培环, 等. 菲涅耳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(6): 62-66.
- [9] Guo Xiaowu. A general method for fresnel lens design [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1991, 12(4): 423-426. (in Chinese)
- 郭孝武. 菲涅耳透镜统一设计方法[J]. 太阳能学报, 1991, 12(4): 423-426.
- [10] Zhang Ming, Huang Liangfu, Luo Chongtai, et al. Study on design and optical efficiency of flat type fresnel lens for space application [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2001, 28(5): 18-21. (in Chinese)
- 张明, 黄良甫, 罗崇泰, 等. 空间用平板形菲涅耳透镜的设计和光学效率研究[J]. 光电工程, 2001, 28(5): 18-21.
- [11] Robert M Cosby. The linear fresnel lens solar concentrator: transverse tracking error effects, National Aeronautics and Space Administration 1977.
- [12] Zemax Manual. Optical Design Program User's Guide [M]. San Diego: Zemax Development Corporation, 2009: 331 - 446.