

## 高倍聚光光伏可拆卸型二次反射镜设计与研究

郭丽敏, 卫明, 杨光辉, 代明崇, 王智勇

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要:** 高倍聚光光伏技术是将垂直入射于菲涅耳透镜上的太阳光聚焦到电池片上, 通过光电转换产生电能, 但实际应用时, 由于跟踪器跟踪精度低、支架受风会抖动等因素存在, 无法保证太阳光始终垂直入射于菲涅耳透镜。针对该问题, 在菲涅耳透镜和太阳能电池之间增加一个可拆卸的倒置的去掉顶部的棱锥形二次反射镜来提高聚光光伏的接收角, 给出了具体的设计实例, 并应用 Solidworks 软件和 Tracepro 软件对设计实例进行了计算机光学模拟。结果证实该二次反射镜能很好地提高聚光光伏的接收角, 并改善菲涅耳透镜聚焦光斑的能量均匀性。

**关键词:** 菲涅耳透镜; 高倍聚光光伏; 二次反射镜; 光学设计

**中图分类号:** O435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3338-04

## Design and research of removable secondary mirror in high concentrated photovoltaic technology

Guo Limin, Wei Ming, Yang Guanghui, Dai Mingchong, Wang Zhiyong

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The direct fraction of sun irradiation is used to focus on Fresnel lens in High Concentrated Photovoltaic technology, electric energy is produced through photoelectric inversion. However, because of many factors in practice like the low tracking accuracy of tracker, structure vibration by winds and atmospheric scattering, the direct normal irradiation to the Fresnel lens can not be guaranteed. To solve this problem, a removable secondary mirror whose shape was a reverse cone with no top was added between the Fresnel lens and solar cells to increase the acceptance angle of the solar module. A design example was given, and analyzed by optical simulation with the software of Solidworks and Tracepro. The conclusion indicates the removable secondary mirror can increase the acceptance angle and improve the irradiance uniformity of the focus spot.

**Key words:** Fresnel lens; high concentrated photovoltaic; secondary mirror; optical design

收稿日期: 2014-02-10; 修订日期: 2014-03-15

作者简介: 郭丽敏(1982-), 女, 工程师, 博士生, 主要从事高倍聚光太阳能技术方面的研究。Email: b201206014@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王智勇(1970-), 男, 研究员, 主要从事高倍聚光太阳能、大功率半导体激光器方面的研究。Email: zywang@bjut.edu.cn

## 0 引言

近年来,在新能源领域,高倍聚光光伏技术(HCPV)因其转化效率高、土地占用面积小的优势而日益受到关注,并表现出替代传统晶硅太阳能的趋势。高倍聚光光伏技术是将直射到菲涅耳透镜较大面积的太阳光聚焦到小面积的太阳能电池上,通过采用较为便宜的光学材料降低昂贵的太阳能电池面积<sup>[1-3]</sup>。这就要求配备高精度的双轴跟踪系统,但是目前由于双轴跟踪系统误差较大,受风存在抖动等诸多不利因素,无法保证太阳光能始终垂直于菲涅耳透镜入射。所以设计二次聚光镜,提高聚光光伏的接收角,具有重要的实际意义<sup>[4-5]</sup>。

世界上很多研发机构都在考虑把二次反射镜引入聚光系统。西班牙的 Pablo Zamora 等对加利福尼亚的 LPI 早前研发的两种二级聚光系统进行了光学效率、接收角以及焦斑能量均匀性的对比研究<sup>[6]</sup>,提出这种聚光系统结构可能成为未来 CPV 市场上的有效聚光器。长春理工大学的李望等人设计了一种二级菲涅耳透镜聚光系统<sup>[7]</sup>,仿真所得该系统焦斑峰值辐照度和平均辐照度比值小于 1.5,二次聚光接收角  $0.7^\circ$ ,但聚光效果不佳。

传统的棱锥形二次反射镜的上底面(入射面)和菲涅耳透镜的焦平面重合,下底面(出射面)紧贴着太阳能电池设置,且出射面的形状和大小完全和太阳能电池的接收面一致<sup>[8-9]</sup>。这样设计出来的二次反射镜一般高度都较高,最终组合而成的聚光光伏模组实际高度肯定要长于设计要求中的菲涅耳透镜焦距,不利于装置小型化。另一方面,如果保证设计要求中的聚光光伏模组高度,则需要在设计时减短菲涅耳透镜焦距,而在菲涅耳透镜口径不变时,焦距更短的透镜不好设计,增加了设计难度;而且,如果需要去掉已经装配好的这种聚光光伏模组中的二次反射镜,则菲涅耳透镜和太阳能电池之间还需要重新对焦,操作也不方便。

为了解决上述问题,文中提供一种无需改变已设计好的菲涅耳透镜焦距以及菲涅耳透镜和太阳能电池之间的距离的可拆卸型二次反射镜,可以根据具体的使用需求随意选择是否采用该二次反射镜。下文详细说明该二次反射镜。

## 1 可拆卸型二次反射镜设计

文中采用倒置的去掉顶部的棱锥形反射镜配合所设计的菲涅耳透镜使用的二次反射镜。图 1 为平板菲涅耳透镜和可拆卸型二次反射镜的聚光光路图。图中太阳能电池位于菲涅耳透镜的焦平面上,可拆卸型二次反射镜的出射面和太阳能电池表面重合,且出射面的形状和大小完全和太阳能电池的接收面一致。

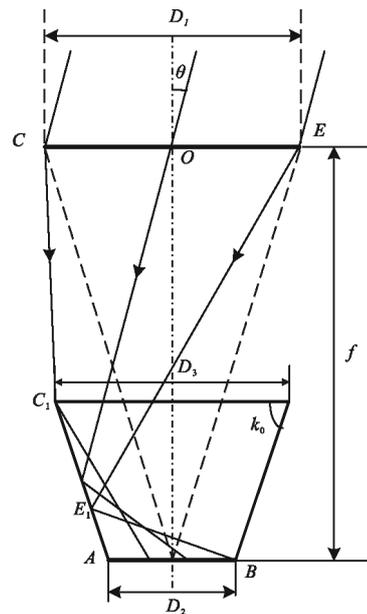


图 1 菲涅耳透镜和二次反射镜的聚光光路图

Fig.1 Optical path of Fresnel lens and the secondary mirror

由于光线在实际的反射面上反射时总是会有一些光能损失,因此为了尽量减少入射到二次反射镜内的光线在该二次反射镜内表面上的反射次数,此处将“所有入射到二次反射镜内的光线只在二次反射镜内表面上反射一次即可达到其出射口”作为所需要的可拆卸型二次反射镜的基本设计原则。

设图 1 中菲涅耳透镜的轴外平行光入射角为  $\theta$ ,圆形点聚焦菲涅耳透镜的口径为  $D_1$ ,菲涅耳透镜焦距为  $f$ ,太阳能电池的有效接收区域为一个直径为  $D_2$  的圆形,二次反射镜的入射面口径为  $D_3$ ,二次反射镜的高为  $H$ ,二次反射镜的反射面倾角为  $k_0$ 。则由几何关系得  $D_2$ 、 $D_3$ 、 $H$  和  $k_0$  满足关系:

$$\tan k_0 = \frac{2H}{D_3 - D_2} \quad (1)$$

对于图中所示的情况,若要所有菲涅耳透镜的出射光线都入射到该可拆卸型二次反射镜开口内,则需要满足以下条件:

$$\tan\theta + H \left( \frac{\sqrt{2} D_1}{2f} - \tan\theta \right) \leq \frac{D_3}{2} \leq \frac{\sqrt{2} D_1}{2f} \quad (2)$$

若要光线  $EE_1$  能在  $E_1$  点处产生反射,则由几何关系可推导得出需要满足以下条件:

$$k_0 > 90^\circ - \arctan \frac{\sqrt{2} D_1}{2f} - \tan\theta \quad (3)$$

显然,由于边缘光线  $CC_1$  在二次反射镜内表面上的入射角大于边缘光线  $DD_1$  在同一表面上的入射角,因此只要边缘光线  $EE_1$  能够在二次反射镜内表面上产生反射,边缘光线  $CC_1$  也能在点  $C_1$  处产生反射。

此外,只要边缘光线  $EE_1$  在二次反射镜内表面上反射一次即可达到其出射口,则入射到菲涅耳透镜径内的全部光线都可满足在二次反射镜内表面上反射一次即可达到二次反射镜出射口的条件。由几何关系可推导得出边缘光线  $EE_1$  在二次反射镜内表面上反射一次即可达到二次反射镜出射口的条件为:

$$\frac{\sin \left[ \arctan \left( \tan\theta + \frac{\sqrt{2} D_1}{2f} \right) \right] \cdot \left( f \cdot \tan\theta - \frac{D_2}{2} \right)}{\sin \left[ 2k_0 + \arctan \left( \tan\theta + \frac{\sqrt{2} D_1}{2f} \right) - 180^\circ \right]} \quad (4)$$

因此,根据已知的  $\theta$ 、 $f$ 、 $D_1$  和  $D_2$  的值,根据公式(1)以及不等式(2)~(4)的条件即可确定出满足要求的可拆卸型二次反射镜的参数。

所选菲涅耳透镜口径为  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ,  $f=100\text{mm}$ , 其聚光倍数为  $500\times$ , 若需要为其添加可拆卸型二次反射镜使得平行入射光在菲涅耳透镜上的入射角为  $1^\circ$  时聚光器光学效率仍为  $100\%$ , 同时使得该菲涅耳透镜和太阳能电池之间的距离仍为  $100\text{mm}$ , 则采用已知条件:  $\theta=1^\circ$ ,  $f=100\text{mm}$ ,  $D_1=50\sqrt{2}\text{mm}$  和  $D_2=2.5\text{mm}$ , 结合公式(1)以及不等式(2)~(4)可求出  $k_0$  和  $H$  只需同时满足条件:  $H > 1.73\text{mm}$ ,  $k_0 \in [59.87^\circ, 90^\circ]$ , 则所有经菲涅耳透镜聚光后入射到该可拆卸型二次反射镜内的光线只在该二次反射镜内表面上反射一次即可达到太阳能电池的有效接收区域内。

取  $H=10\text{mm}$ ,  $D_3=14\text{mm}$  ( $k_0=61^\circ$ )。

## 2 可拆卸型二次反射镜建模及仿真

采用 Solidworks 软件对菲涅耳透镜和二次反射镜进行了实体建模, 实体模型如图 2 所示。采用 Tracepro 软件进行光学仿真, 得到图 3 所示的聚光效果图和图 4 所示的聚焦光斑辐照度图, 其中, 菲涅耳透镜材料定义为硅酮胶, 选定  $530\text{nm}$  为模拟光线的主波长(折射率为  $n_\lambda=530=1.4111$ ), 模拟光源采用太阳光垂直入射, 模拟太阳光源强度定义为一个标准太阳即  $1000\text{W}/\text{cm}^2$ , 为方便分析  $f=100\text{mm}$  处的太阳能电池接收面上的辐照度, 在 Tracepro 中离菲涅耳透镜  $f=100\text{mm}$  处定义一个接收面, 以进行光线追迹后分析该接收面上的聚焦光斑辐照度情况。

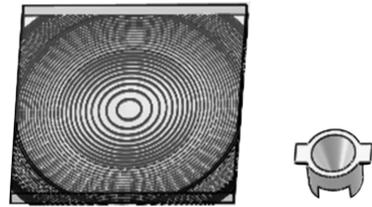


图 2 菲涅耳透镜和二次反射镜的实体模型

Fig. 2 Solid model of Fresnel lens and secondary mirror

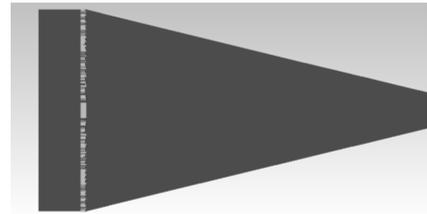


图 3 菲涅耳透镜和二次反射镜的聚光光路图

Fig. 3 Concentrating effect of Fresnel lens and secondary mirror

由图 4 可见增加可拆卸型二次反射镜后菲涅耳透镜的聚焦光斑最大辐照度和平均辐照度之比由原来的  $5.9$  降低至  $4.56$ , 入射到菲涅耳透镜上的  $426630$  条光线全部都被焦平面处有效尺寸为  $\Phi 2.5\text{mm}$  的太阳能电池所接收, 即菲涅耳透镜和该可拆卸型二次反射镜组成的聚光器的组合光学效率达到  $100\%$ 。

图 5 为图 3 所对应的聚光器的光学效率和跟踪误差关系图。由图 5 可看出, 增加上述二次反射镜后, 菲涅耳透镜的接收角可达到约  $\pm 1.2^\circ$ , 仿真得到当太阳入射角为  $1^\circ$  时, 该组合聚光器的光学效率为  $97.07\%$ , 而根据前面的理论推导可知此时若入射光

为平行光则该组合聚光器的光学效率应该为 100%，损失的光学效率是由于太阳张角的存在，使得部分入射的太阳光无法进入该二次反射镜入射口径内或者是进入以后没有被反射到二次反射镜的出射口。综上理论及仿真分析可知：增加二次反射镜可以使菲涅耳透镜的接收角大于  $1^\circ$ ，并使聚光器的光学效率大大提高，而且使最大辐照度和平均辐照度之比也有所降低。

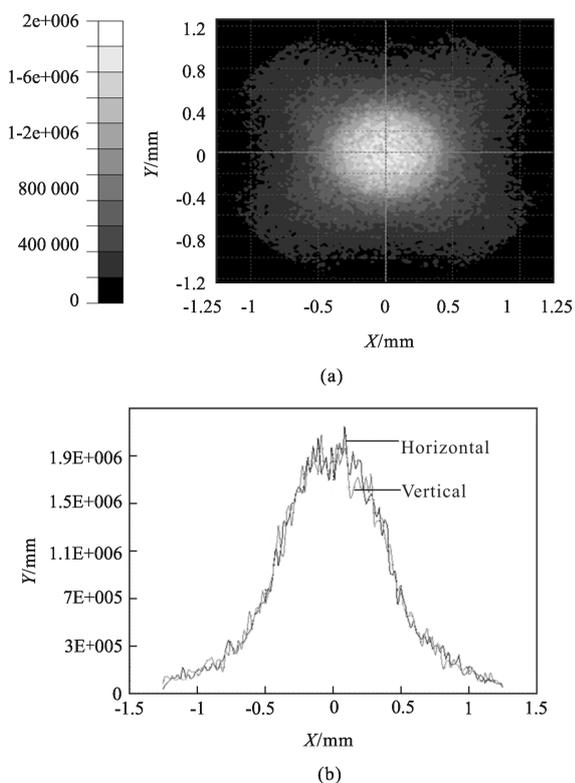


图 4 二次反射镜优化后焦平面辐照度图(入射角  $\theta=0^\circ$ )

Fig.4 Irradiance map of focal plane of Fresnel lens with secondary mirror (angle of incidence  $\theta=0^\circ$ )

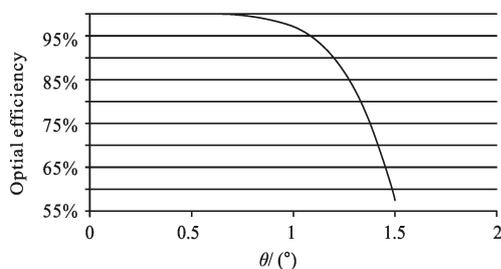


图 5 菲涅耳透镜和二次镜的组合聚光器光学效率和跟踪误差关系图(聚光比  $500\times$ )

Fig.5 Relationship between combination concentrator' optical efficiency and tracking error(concentration ratio is  $500\times$ )

### 3 结论

采用 Solidworks 和 Tracepro 软件对设计的可拆卸型二次反射镜进行建模和光学仿真，结果表明该可拆卸型二次反射镜可以显著提高菲涅耳透镜的接收角，而且可以大大提高聚光器的光学效率，同时在太阳跟踪系统的追踪误差较小时，增加二次反射镜可以显著改善菲涅耳透镜聚焦光斑的能量均匀性，为高倍聚光太阳能菲涅耳透镜的应用提供了参考。

#### 参考文献：

- [1] Stan M. Design and performance of high efficiency III-V space solar cells with monolithic bypass diode architecture [C]// The 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2006: 1865-1868.
- [2] Dimroth F. High-efficiency solar cells from III-V compound semiconductors[J]. *Phys Stat Sol*, 2006(3): 373-377.
- [3] Strobl G F X. European roadmap of multijunction solar cells and qualification status [C]//The 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2006: 1793-1796.
- [4] Araki K, Kondo M, Uourni H, et al. Experimental proof and theoretical analysis on effectiveness of passive homogenizers to 3J concentrator solar cells [C]//3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 1: 853-856.
- [5] Leutz R, Suzuki A. Noimaging Fresnel lenses -Design and Performance of Solar Concentrators [M]. Germany: Springer, 2001.
- [6] Pablo Zamora, Pablo Benítez, Rubén Mohedano, et al Experimental characterization of Fresnel-Köhler concentrators [J]. *Journal of Photonics for Energy*, 2012, 2(1): 021806.
- [7] Li Wang. Study on concentration optics system of concentration photovoltaic system [D]. Changchun: Changchun University Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] Ji Yunfeng, Xie Yong-jie, Duan Liuhua, et al. Laser irradiating distribution measurement based on diffuse reflectance and calorimetry technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 86-89. (in Chinese)
- [9] 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)