

# 基于平板型导光板的太阳能聚光系统

郝雯雯 余桂英 胡兴

(中国计量学院计量测试工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 针对传统线性聚光系统聚光光斑辐照度不均匀的问题,提出了一种由曲面线聚焦菲涅耳聚光器阵列及平板型导光板所组成的、系统高度小于 40 mm 的小体积聚光系统方案,建立了曲面线聚焦菲涅耳透镜的一般方程,给出导光板 V 形槽设计公式,并采用正交试验法和光学仿真实验对聚光器系统的各项结构参数进行优化设计,同时分析了曲面线聚焦菲涅耳的加工误差及导光板安装偏角误差的影响。结果表明:优化后系统在采光面积  $500\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 、聚光比 50 倍时,聚光效率可达 75%,聚焦光斑均匀性优于 88%,且入射太阳光偏角在  $\pm 7^\circ$  内聚光效率大于 50%。通过拼接可获得不同聚光倍数系统,由仿真实验得出在 160 倍聚光比内,效率高于 50%,均匀性优于 85%。

**关键词** 光学设计;聚光器系统;正交试验;菲涅耳透镜;平板型导光板

**中图分类号** O435 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP49.082202

## Sollar Concentrating System Based on Planar Waveguide

Hao Wenwen Yu Guiying Hu Xing

(College of Metrology and Measurement, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A solar concentrating system is designed to solve the nonuniform illumination distribution problem of the flares through traditional concentrating systems with line focus. This concentrator system consists of curved cylindrical Fresnel lens array and a planar waveguide. A general formula of curved Fresnel with line focus and the design formula of the V-groove of the waveguide are presented. The system is in a small volume, with the total height less than 40 mm. Through orthogonal test and optical simulation, structure parameters of the system are optimized. Meanwhile, the influences of the machining error of the curved line focus Fresnel lenses and the installation error of the waveguide are discussed. It turns out that the optical efficiency of the optimized system with a lighting area of  $500\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  in the condition of  $50 \times$  geometric concentration is about 75% and the illumination uniformity is above 88%. Simultaneously the optical efficiency is over 50% within  $\pm 7^\circ$  declination angle of the incident light. Different concentration can be reached by splicing and it is proved by simulation that the optical efficiency is above 50% and the uniformity is more than 85% within  $160 \times$  concentration.

**Key words** optical design; concentrator system; orthogonal test; Fresnel lens; planar waveguide

**OCIS codes** 220.1770; 220.4298; 230.7390

## 1 引言

随着太阳能利用的不断推进,可提高太阳能利用率的聚光技术也得到更多重视<sup>[1~4]</sup>。光伏(PV)电池所接收的聚焦光斑辐照度不均匀,不仅使得光伏电池内部产生电流降低了光电转换效率,而且其发热现象直接导致了系统提前老化,因此应用于光伏发电系统的聚光器,不仅需考虑聚光比和聚光效率,更应考虑聚光均匀性<sup>[5~7]</sup>。

针对聚光均匀性问题,国内外有许多设计方案,如 Ryu 等<sup>[11]</sup>设计了一种可使辐射强度均匀化的多焦点拼接式菲涅耳透镜,利用该透镜,在接收面上聚光光斑的均匀性可达 20%,在中低倍(0~50 倍)聚光条件下

收稿日期:2012-04-27;收到修改稿日期:2012-05-03;网络出版日期:2012-06-07

基金项目:浙江省科技计划项目(2008C21158)和浙江省重大科技专项(2011C12025)资助课题。

作者简介:郝雯雯(1988—),女,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: love.fullhouse@163.com

导师简介:余桂英(1965—),女,硕士,教授,主要从事照明和测量等方面的研究。E-mail: yuguiying11@163.com

传输效率达70%以上。Gonzalez<sup>[12]</sup>利用非成像原理,采用同步多表面(SMS)设计方法设计并研究了一种线聚焦菲涅耳透镜,均匀性约为94.7%,但在多个透镜拼接过程中将产生多个接收位置,不易安装,且光伏电池安装定位精度要求高。Chong等<sup>[13]</sup>利用不同角度的平面镜组设计了一种平面聚光器,将太阳光反射并在接收面上重叠,从而达到光分布均匀的效果,但每块平面镜都需精密跟踪太阳光,导致成本提高。Whang等<sup>[14]</sup>研制了一种多级棱镜组型聚光器,实现了聚光装置的小型化,可用于屋顶大面积静态聚光,但效率低于40%;Karp等<sup>[15]</sup>提出了一种微透镜阵列与导光板组合形式的、总体厚度小于10 mm的聚光器,聚光均匀性60%左右,但系统导光板底面为凸起的棱镜结构,易磨损。

与平面线聚焦菲涅耳透镜相比,曲面线聚焦菲涅耳透镜弥散斑小,能量更为集中,系统聚光效率更高。因此,本文设计了一种由曲面线聚焦菲涅耳透镜阵列及平板型导光板组成的太阳能聚光系统。该聚光系统结构小巧,聚光光斑均匀性较好,可大面积拼接,且易于加工。

## 2 系统设计理论

### 2.1 系统聚光原理

太阳光经曲面线聚焦菲涅耳透镜会聚至底部导光板V形反射槽后偏折,在导光板中通过全反射传输并实现均匀化,最终在导光板左(或右)端面由光伏电池接收,如图1(a)所示。导光板底部采用关于系统中轴完全对称的位置不同的3个V形反射槽,当系统太阳光由菲涅耳透镜会聚至导光板底部左侧的3个V形反射槽,如图1(b)所示,经反射耦合入导光板,最终在左侧面输出。右侧情况类似,如图1(c)所示,从而将多个线聚焦输出位置转化为两个输出位置并且使输出均匀化,以改善电池暗区现象,提升电池光伏转换效率。

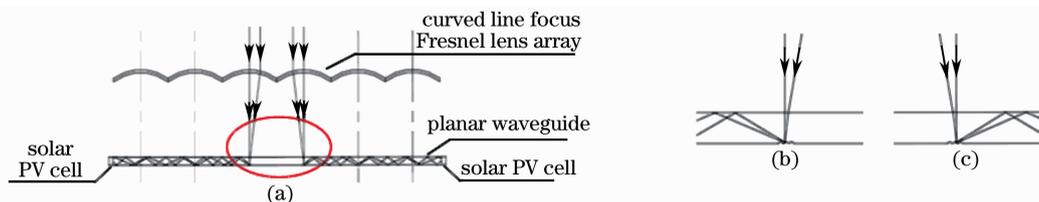


图1 导光板工作原理示意及局部放大图。(a)导光板工作原理示意图;(b)导光板左侧放大图;(c)导光板右侧放大图

Fig. 1 Working principle diagram and partial enlarged drawing of the waveguide. (a) Working principle diagram of the waveguide; (b) left side of the waveguide; (c) right side of the waveguide

### 2.2 曲面线性菲涅耳聚光透镜等齿宽设计方法

曲面线性菲涅耳透镜聚光原理如图2所示,假设太阳光沿y轴入射,经菲涅耳透镜聚焦于点F,其中第i楞棱镜元横截面工作原理如图3所示。光束由第i楞棱镜元的上表面点A入射,经下表面点B出射,最终聚焦于点F。图中点O、O'分别为透镜的横截面中心及曲基面圆心,对应半径分别为R、r;H、f分别为透镜弓高及

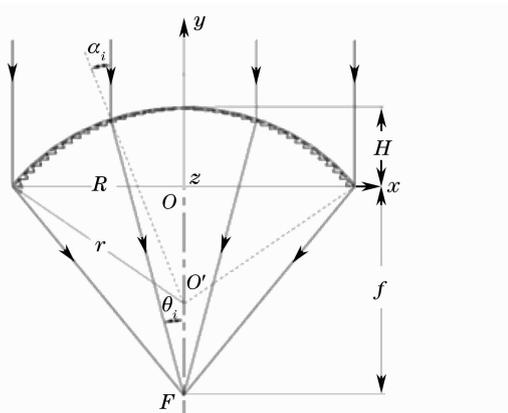


图2 曲面菲涅耳透镜原理图

Fig. 2 Principle of the curved Fresnel lens

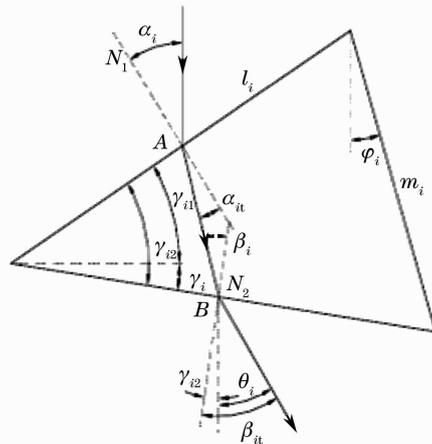


图3 第i楞棱镜元示意图

Fig. 3 Schematic of the *i*-th prism element

透镜焦点距光轴上点  $O$  的距离; 对于第  $i$  楞透镜元,  $\alpha_i, \alpha_{ri}, \beta_i, \beta_{ri}$  分别为透镜元的上表面入射、折射角及下表面的入射、折射角;  $\theta_i$  为下表面折射光与光轴的夹角。对于太阳能用曲面菲涅耳透镜, 光从空气入射至透镜中, 设透镜的折射率为  $n$ , 则根据斯涅耳定律及几何关系可推导出确定透镜元结构所需的下表面水平偏角  $\gamma_i$  及侧面水平偏角  $\varphi_i$  的计算公式:

$$\begin{cases} \gamma_i = \alpha_i + \arctan \frac{\sin \alpha_i \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_i} - \cos \alpha_i \sin \alpha_i - \sin \theta_i}{\cos \theta_i - \cos \alpha_i \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_i} - \sin^2 \alpha_i} \\ \varphi_i = \alpha_i - \arcsin \frac{\sin \alpha_i}{n} \end{cases} \quad (1)$$

采用等齿宽设计方法, 设每个齿的宽度  $l_i$  相同, 从而对应的圆心角相同, 并且采用楞中心位置入射的光近似计算整个棱镜元的光路, 因此对于菲涅耳环带数为  $p$  的第  $i$  楞透镜元有

$$\alpha_i = \left( i - \frac{1}{2} \right) \frac{\arctan \frac{r - H}{R}}{p}, \quad (2)$$

$$r = \sqrt{\frac{H(2R - H)}{R^2}}, \quad (3)$$

$$\theta_i = \arctan \frac{r \sin \alpha_i - m_i \sin(\alpha_i - \alpha'_i)}{r \cos \alpha_i - (r - H) + f}, \quad (4)$$

$$\frac{l}{2 \cos(\alpha'_i - \gamma_i)} = \frac{m_i}{\sin \gamma_i}, \quad (5)$$

$$l = 2r \sin(\theta_p / 2p). \quad (6)$$

若已知透镜的参数  $R, H, f, p$  及  $n$ , 由 (1) ~ (6) 式即可求得曲面菲涅耳各棱镜元角  $\gamma_i$  及  $\varphi_i$ , 从而得到透镜的二维 (2D) 结构, 经过机械软件 Rhinoceros 将二维曲线拉伸即可得到线性菲涅耳聚光透镜的三维 (3D) 模型。焦距为 30 mm、弓高曲率半径比为 0.15 的菲涅耳透镜的二维结构图及三维模型图分别如图 4、5 所示。

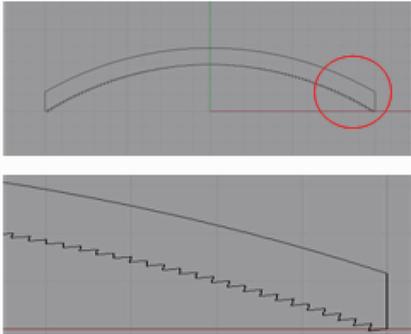


图 4 菲涅耳透镜二维结构及局部放大图

Fig. 4 2D structure and the enlarged drawing of Fresnel lens

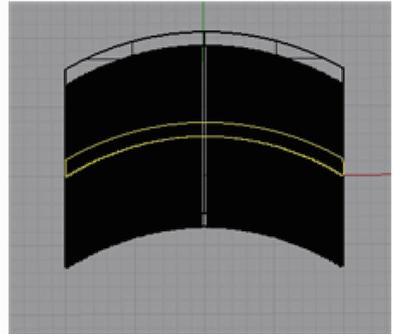


图 5 曲面线性菲涅耳聚光透镜三维模型

Fig. 5 3D model of curved Fresnel lens

### 2.3 平板型导光板设计方法

系统采用具有 3 个 V 形反射槽的导光板, 其工作原理如图 6 所示。太阳光经过柱面菲涅耳透镜后形成的孔径角为  $\theta$  的光线, 经过折射率为  $n$  的导光板上表面折射后光线孔径角变为  $\theta_i$ , 再经过顶角为  $2\theta_d$  的反射镜反射后, 投射至导光板上表面, 中央和两边缘光线对应的入射角分别为  $\theta_{mi}, \theta_{li}, \theta_{ri}$ 。若要光束在导光板内全反射, 则需使  $\theta_{ri}$  大于临界角  $\theta_c = \arcsin(1/n)$ , 根据斯涅耳定律及几何关系可推导出

$$\pi - (\theta_c + \theta_i) \geq 2\theta_d. \quad (7)$$

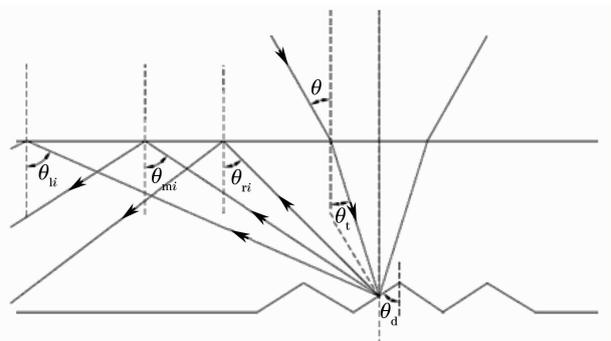


图 6 导光板工作原理示意图

Fig. 6 Working principle of the waveguide





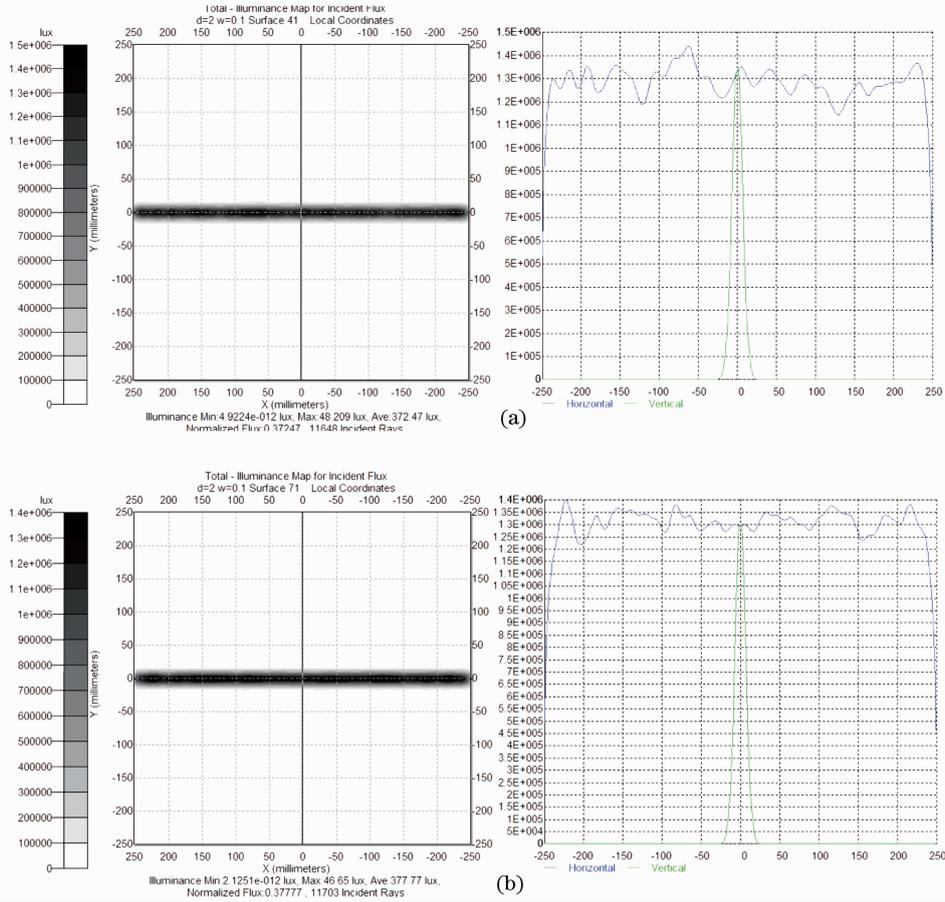


图 11 接收面的照度及照度曲线图。(a)左侧接收面;(b)右侧接收面

Fig. 11 Illuminance map and illumination contours of the receiving surfaces. (a) The left side; (b) the right side

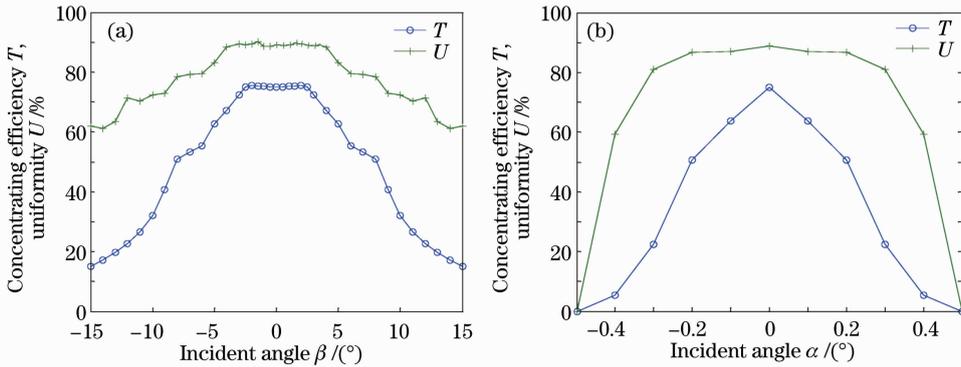


图 12 入射光偏角与聚光系统效率、均匀性关系曲线。(a)光源绕  $z$  轴转动;(b)光源绕  $x$  轴转动

Fig. 12 Influences of declination angle of the incident ray on the efficiency and uniformity. (a) Light source turns around  $z$ -axis; (b) light source turns around  $x$ -axis

性分别在 95.78%~45.87%和 85.52%~91.93%之间变化。当聚光比为 160 倍时,效率仍高于 50%且均匀性高于 91.90%。通过改变菲涅耳透镜个数,并选取相应导光板即可达到均匀性和聚光效率的不同要求。

### 4 最优结构聚光系统误差影响分析

#### 4.1 曲面线性菲涅耳加工误差影响

在加工过程中,机械误差及操作误差将对曲面线性菲涅耳的面型造成影响,并影响自然光会聚的效果,从而致使整个系统的聚光效率及均匀性造成影响。针对加工时刀具在  $x$  轴及  $y$  轴上  $\pm 0.05$ 、 $\pm 0.1$ 、



度的要求。此外,针对曲面线聚焦菲涅耳透镜的加工误差及导光板安装偏角误差影响进行了分析,为实际系统的制造及应用提供了理论依据。

### 参 考 文 献

- 1 Tian Wei, Wang Yiping, Han Lijun *et al.*. Technology development of photovoltaic concentrator system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2005, **26**(4): 597~603  
田 玮, 王一平, 韩立君 等. 聚光光伏系统的技术进展[J]. *太阳能学报*, 2005, **26**(4): 597~603
- 2 Jia-Hong Huang, Wun-Ciang Fei, Wei-Chi Hsu *et al.*. Solar concentrator construction with a circular prism array[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **49**(23): 4473~4478
- 3 Luque Antonio, Andreev Viacheslav (eds.). *Concentrator Photovoltaics*[M]. Berlin: Springer, 2007. 1~21
- 4 Wang Yunfeng, Ji Jie, He Wei *et al.*. Performance analysis and design of paraboloidal dish solar concentrators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 01220021  
王云峰, 季 杰, 何 伟 等. 抛物碟式太阳能聚光器的聚光特性分析与设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 01220021
- 5 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  
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
- 6 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on etendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297~2301  
余桂英, 金 骥, 倪晓武 等. 基于光学扩展量的LED均匀照明反射器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2297~2301
- 7 Cui Fuqing, He Yaling, Tao Yubing *et al.*. A new type linear Fresnel lens design and concentrating characteristic analysis [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2010, **31**(5): 733~736  
崔福庆, 何雅玲, 陶于兵 等. 新型线聚焦菲涅耳透镜设计及其聚光特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2010, **31**(5): 733~736
- 8 Ding Shushu, Yu Guiying, Hao Wenwen. A freeform surface lens for indoor uniform illumination [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 042201  
丁舒殊, 余桂英, 郝雯雯. 用于室内照明的自由曲面均匀配光透镜设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 042201
- 9 Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Lin Zi *et al.*. Design and optimization of heliostat field layout for solar tower power plant[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2652~2656  
魏秀东, 卢振武, 林 梓 等. 塔式太阳能热发电站镜场的优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2652~2656
- 10 Jiang Xianman, Xu Yongming, Yu Guiying. The design for lighting system on the microscope based on orthogonal experiment[J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(5): 691~694  
蒋贤满, 徐永明, 余桂英. 基于正交试验法的显微镜上照明设计[J]. *光学技术*, 2010, **36**(5): 691~694
- 11 Kwangsun Ryua, Jin-Geun Rhee. Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system[J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(12): 1580~1587
- 12 Juan C. Gonzalez. Design and analysis of a curve cylindrical Fresnel lens that produces high irradiance uniformity on the solar cell[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(11): 2127~2132
- 13 K. K. Chong, F. L. Siaw, C. W. Wong *et al.*. Design and construction of non-imaging planar concentrator for concentrator photovoltaic system[J]. *Renewable Energy*, 2009, **34**(5): 1364~1370
- 14 A. J. W. Whang, Y. Y. Chen, S. H. Yang *et al.*. Natural light illumination system[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(35): 6789~6801
- 15 Jason H. Karp, Eric J. Tremblay, Joseph E. Ford. Planar micro-optic solar concentrator[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 1122~1133