

# 双面菲涅耳聚光镜设计

于春岩 崔庆丰 朱浩 张博

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 为了减小光伏发电聚光系统的轴向尺寸,使聚光系统的厚度更薄、质量更轻,讨论设计了一种透射式双面菲涅耳聚光镜。通过设计,使光线在通过双面菲涅耳聚光镜的前表面环带后进入相应的后表面环带,减少了光能损失,使太阳能电池获得的能量密度更高。推导并给出了双面菲涅耳透镜的后表面环带设计公式。用光学设计软件LightTools模拟了双面菲涅耳聚光镜的光学能力,并对模拟结果进行了分析评价。给出了一个口径为200 mm,焦距为120 mm, $F$ 数为0.6的双面菲涅耳聚光镜设计实例,在波段为380~760 nm,太阳张角为 $0.55^\circ$ 时,聚光系统的聚光效率达到85%,与相同口径相同焦距的传统菲涅耳透镜相比,聚光效率提高了21.1%。

**关键词** 光学设计;菲涅耳透镜;聚光光伏;太阳能

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0122008

## Optical Design of a Double-Side Fresnel Lens for Concentrator

Yu Chunyan Cui Qingfeng Zhu Hao Zhang Bo

*School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** A double-side Fresnel lens for a solar energy collector has been designed with the characteristics of lighter weight and smaller axial dimension. Rays going through the front surface ring and entering the corresponding rear surface ring, which reduces the energy loss. The energy of the solar cell obtained by the double-side Fresnel lens is with higher energy density. The design formula for the rear surface Fresnel structure is derived. The optical condenser performance of a double-side Fresnel lens is simulated with an optical design software LightTools. A double-side Fresnel lens with diameter of 200 mm, focal length of 120 mm and  $F$  number of 0.6 is designed as an example. The applied illumination is from 380 nm to 760 nm wavelength and with a solar angular subtense of  $0.55^\circ$ . Design results show that theoretical improvement in collection efficiency is 21.1% compared with that of a similar conventional Fresnel lens.

**Key words** optical design; Fresnel lens; concentrating photovoltaic; solar energy

**OCIS codes** 220.4298; 080.2740; 350.6050

## 1 引言

近年来,太阳能发电技术发展得越来越快,如何提高太阳能的利用率及降低成本是该技术面临的主要问题。为此,人们提出了由聚光器、聚光电池、跟踪装置和散热装置等组成的聚光光伏系统:利用聚光器提高太阳能电池表面入射能流密度,减少给定功率所需太阳能电池用量,获得高效率输出,降低了系统成本<sup>[1-2]</sup>。菲涅耳透镜质量轻、厚度薄、价格低廉,其在太阳能聚光系统中的应用已成为研究的热点<sup>[3-5]</sup>。传统菲涅耳聚光镜的设计主要基于成像原理,聚光效果并不十分理想,并且存在系统高宽比即轴向尺寸过大等问题。而采用两个聚光透镜会增加成本。为了使聚光系统更薄更轻,本文提出了双面菲涅耳透镜的结构。传统菲涅耳

收稿日期:2014-07-21;收到修改稿日期:2014-08-18

作者简介:于春岩(1987—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: yucy1212@163.com

导师简介:崔庆丰(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事光学设计和衍射光学等方面的研究。E-mail: qf\_cui@163.com  
(通信联系人)

透镜只有一个面为锯齿形结构,另一个面为平面,而双面菲涅耳透镜前后表面都是锯齿形结构。与传统菲涅耳透镜相比,双面菲涅耳透镜减少了无效区域的面积,提高了聚光效率。

## 2 双面菲涅耳透镜的设计

折射式菲涅耳透镜是由一系列相邻的、在透镜区域内提供不同偏向角的微小棱镜构成的。这些微小棱镜的准确设计可使入射光线聚焦或者准直。最常见的菲涅耳透镜是由一系列复制在光学塑料上的同心锯齿状结构构成的。菲涅耳透镜一面为锯齿面,另一面为平面<sup>[6]</sup>。图1为传统菲涅耳透镜示意图,其设计方法在文献[7]中已有讨论。

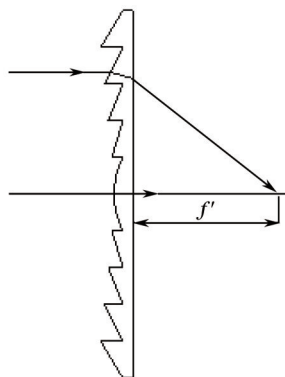


图1 传统菲涅耳透镜示意图

Fig.1 Conventional Fresnel lenses diagram

双面菲涅耳透镜基于折射原理和前后表面光焦度均等分配的原则进行设计。菲涅耳透镜的无效区域面积随着  $F$  数的增加而减小,即菲涅耳透镜聚光效率随着  $F$  数的增加而增大。在相同  $F$  数下,与传统单面菲涅耳透镜相比,采用前后表面光焦度均等分配的双面菲涅耳透镜前表面  $F$  数明显大于传统单面菲涅耳透镜的前表面  $F$  数,即双面菲涅耳透镜减少了无效区域的面积,提高了聚光效率。

首先考虑双面菲涅耳透镜前表面的环带情况,按照传统菲涅耳透镜的设计方法,设计第一个面为菲涅耳面,第二个面为平面的单面菲涅耳透镜。在图2中来自无穷远光源的平行光束垂直于菲涅耳透镜入射。与光轴重合的光线1和轴外任意光线2为例进行分析。光线1不发生偏折,光线2经过透镜某一环带  $A$  点折射后,经过透镜到达  $B$  点,再经由后表面折射后交光轴于  $F'$  点处。图中  $i, i', I$  和  $I'$  分别为光线在  $A$  点和  $B$  点的入射角和折射角,通过任意环带的像方孔径角为  $u$ 。菲涅耳透镜材料折射率为  $n$ ,空气折射率为1。

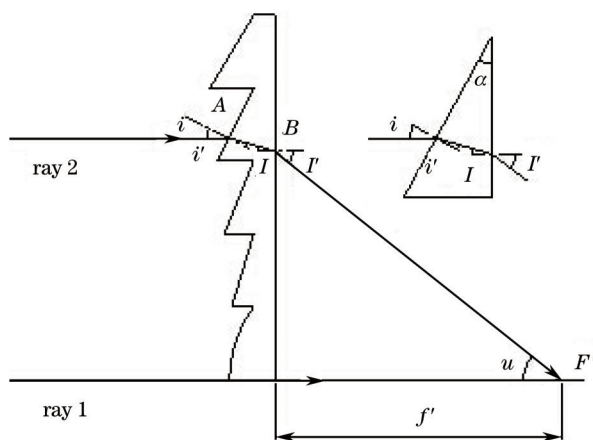


图2 双面菲涅耳透镜前表面结构设计示意图

Fig.2 Front surface design of double-side Fresnel lenses diagram

根据光的折射定律:

$$\sin i = n \sin i', \tag{1}$$

$$n \sin I = \sin I', \quad (2)$$

如图2所示,由几何关系得到:

$$i = \alpha, \quad \alpha = i' + I, \quad I' = u, \quad (3)$$

式中 $\alpha$ 为菲涅耳透镜每个环带中的斜面和底面的夹角。

由上述角度关系可得菲涅耳透镜设计公式<sup>[7]</sup>:

$$\tan \alpha = \frac{\sin u}{\sqrt{n^2 - \sin^2 u} - 1}, \quad (4)$$

前表面的环带齿形由此可以确定。

当前表面环带齿形确定后,前表面的出射光线为后表面的入射光线。根据折射定律从边缘环带开始根据前表面每个环带的齿形逐一求得后表面每个对应环带的齿形。各环带位置及角度关系如图3所示,双面菲涅耳透镜基底厚度即前后表面环带齿根基面距离为 $h$ 。从边缘环带开始 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 依次为前表面第一环带、第二环带……第 $n$ 环带的齿宽。 $\Delta i_1, \Delta i_2, \Delta i_3, \dots, \Delta i_n$ 依次为前表面第一环带、第二环带、第三环带……第 $n$ 环带入射光线与出射光线的夹角。 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ 依次为后表面第一环带、第二环带、第三环带……第 $n$ 环带法线与水平方向的夹角(即后表面各环带倾角)。 $x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_n$ 依次为后表面第一环带、第二环带、第三环带……第 $n$ 环带齿宽。 $y'_1, y'_2, y'_3, \dots, y'_n$ 依次为后表面第一环带、第二环带、第三环带……第 $n$ 环带齿高。

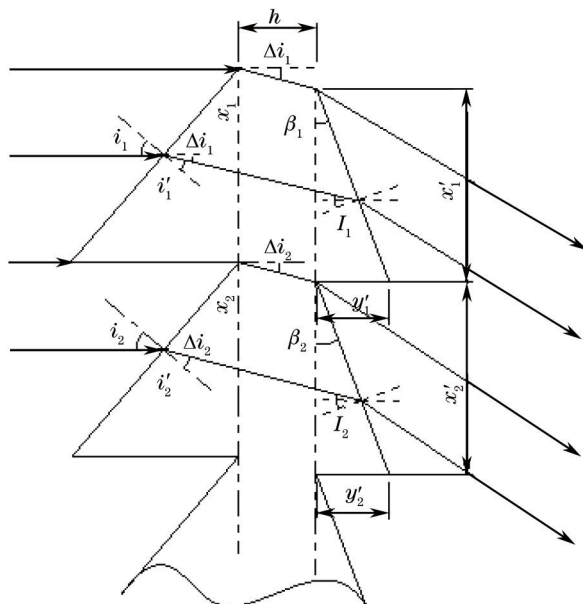


图3 双面菲涅耳透镜后表设计

Fig.3 Rear surface design of double-side Fresnel lenses

由图3可知后表面第一环带各角度关系为

$$\Delta i_1 = i_1 - i'_1, \quad \beta_1 = I_1 - \Delta i_1, \quad (5)$$

由几何关系得后表面第一环带齿宽为

$$x'_1 = x_1 + h(\tan \Delta i_2 - \tan \Delta i_1), \quad (6)$$

后表面第一环带齿高为

$$y'_1 = x'_1 \tan \beta_1, \quad (7)$$

即

$$y'_1 = [x_1 + h(\tan \Delta i_2 - \tan \Delta i_1)] \tan(I_1 - \Delta i_1), \quad (8)$$

同理逐一求出后表面各环带参数,第 $n-1$ 环带与第 $n$ 环带参数为

$$\beta_{n-1} = I_{n-1} - \Delta i_{n-1}, \quad \beta_n = I_n - \Delta i_n, \quad (9)$$

$$x'_{n-1} = x_{n-1} + h(\tan i_n - \tan i_{n-1}), \quad x'_n = x_n, \quad (10)$$

$$y'_{n-1} = [x_{n-1} + h(\tan \Delta i_n - \tan \Delta i_{n-1})] \tan(I_{n-1} - \Delta i_{n-1}), \quad y'_n = x_n \tan(I_n - \Delta i_n), \quad (11)$$

求出后表面各环带的齿高、齿宽及倾角,从而确定后表面各环带的大小及位置。

根据设计要求的透镜尺寸、焦距及前表面齿宽确定前表面各环带倾角、齿高等参数,再根据前表面的结构参数确定后表面的结构参数。菲涅耳透镜的中心区域可看作凸透镜结构,可根据近轴光线光路计算公式来确定其曲率半径。经过以上的计算和设计,最终可得到完整的双面菲涅耳透镜结构。

### 3 设计例及聚焦能力分析

在焦距为 120 mm、聚光口径为 200 mm 的条件下,分别设计了双面菲涅耳透镜和传统单面菲涅耳透镜,并进行对比。传统单面菲涅耳透镜根据参考文献[7]中的设计方法进行设计。双面菲涅耳透镜前表面设计分为等齿宽和等齿高两种情况,但经过设计对比,前表面等齿高双面菲涅耳透镜靠近中心区域环带齿宽过大,即环带斜面尺寸过大,使聚焦光斑直径增大,太阳能电池表面能量密度降低,所以双面菲涅耳透镜前表面采用等齿宽设计。双面菲涅耳透镜前表面环带采用等齿宽 1 mm,透镜中心区域 8 mm 内采用凸透镜结构进行设计。由上述公式计算得到前表面环带齿高及后表面环带齿高、齿宽及环带倾角,数据如表 1 和表 2 所示。

表 1 双面菲涅耳透镜前后表面环带结构参数

Table 1 Structure parameters of double-side Fresnel lens surface around rings

Rings	Front surface		Rear surface		Rings tilt angle / rad	Shift distance of edge rays through front rings to rear rings /mm
	Groove width / mm	Groove height / mm	Groove width / mm	Groove height / mm		
1	1	0.8678	0.9964	0.3757	0.3606	0.3997
2	1	0.8587	0.9963	0.3761	0.3610	0.3961
3	1	0.8496	0.9964	0.3766	0.3614	0.3924
4	1	0.8405	0.9963	0.3771	0.3618	0.3888
5	1	0.8314	0.9963	0.3774	0.3621	0.3851
6	1	0.8224	0.9963	0.3777	0.3624	0.3814
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
93	1	0.0675	0.9958	0.0662	0.0664	0.0335
94	1	0.0591	0.9958	0.0580	0.0582	0.0293
95	1	0.0507	0.9958	0.0498	0.0500	0.0251
96	1	0.0422	1	0.0417	0.0417	0.0209

表 2 双面菲涅耳透镜前后表面中心区域结构参数

Table 2 Structural parameters of double-side Fresnel lens center area

Center area	Front surface diameter / mm	Front surface radius of curvature /mm	Rear surface diameter / mm	Rear surface radius of curvature /mm
	8.0000	118.1690	7.9582	-118.1690

用三维制图软件建立双面菲涅耳聚光镜的模型并导入光学软件 LightTools<sup>[8]</sup>中,模拟分析双面菲涅耳聚光镜的聚光能力。双面菲涅耳透镜结构示意图如图 4 所示。

透镜的材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),透镜材料对不同波长的透射率曲线如图 5 所示,选取光源光谱范围为 380~760 nm,光源的辐射功率取为归化值 1,太阳张角为 0.55°。在波长为 550 nm 时材料折射率为 1.4936。模拟分析时需要考虑的能量损失包括反射损失、材料的吸收损失和散射损失<sup>[9-13]</sup>。光线追迹后双面菲涅耳透镜与传统单面菲涅耳透镜在直径 4 mm 的接收器上的辐照度分布情况如图 6 所示。双面菲涅耳透镜所产生的辐照度峰值明显高于传统菲涅耳透镜。图 7 为图 6 中不同直径环形区域内能量效率分析图,从图中可以看出,当接收器直径为 3.2mm 时双面菲涅耳透镜的聚光效率达到最大值 85%,相同直径接收器下传统菲涅耳透镜的聚光效率为 63.9%,可见双面菲涅耳透镜的聚光效率提高了 21.1%。

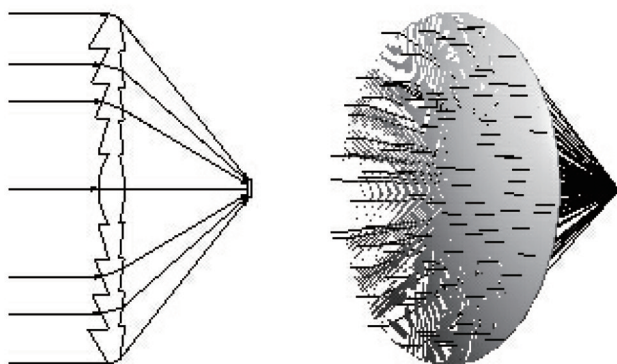


图4 双面菲涅耳结构示意图

Fig.4 Structure of double-side Fresnel lenses

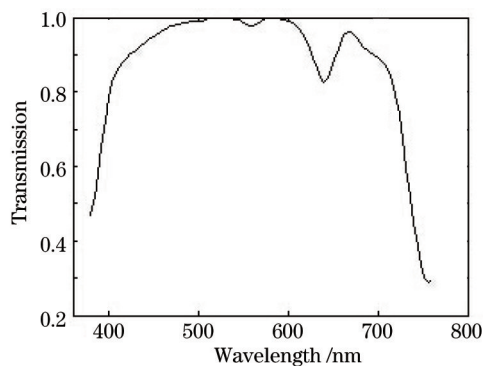


图5 PMMA 对不同波长的透射率曲线

Fig.5 PMMA transmittance curves of different wavelengths

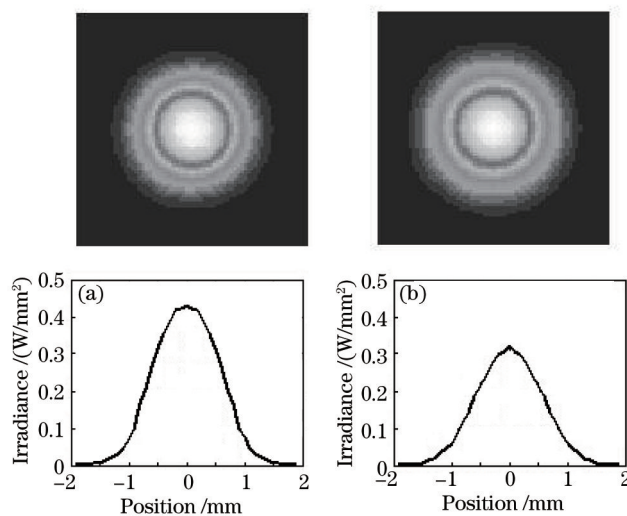


图6 (a)双面菲涅耳透镜和(b)传统菲涅耳透镜辐照度分布图

Fig.6 Irradiance distribution of (a) double-side Fresnel lens and (b) conventional Fresnel lens

用 LightTools 软件模拟出口径为 200mm 的双面菲涅耳透镜和传统单面菲涅耳透镜在不同  $F$  数下的聚光效率, 曲线如图 8 所示。当  $F$  数为 0.6 的双面菲涅耳透镜聚光系统聚光效率达到最大值 85% 时, 传统单面菲涅耳透镜聚光系统聚光效率曲线所对应的  $F$  数是 1.4, 即系统的焦距为 280 mm。双面菲涅耳透镜聚光系统的焦距为 120 mm, 即聚光系统的轴向尺寸减小了 160 mm。

## 4 结 论

基于折射原理, 提出了一种具有高聚光效率的双面菲涅耳聚光透镜结构, 研究给出了双面菲涅耳透镜

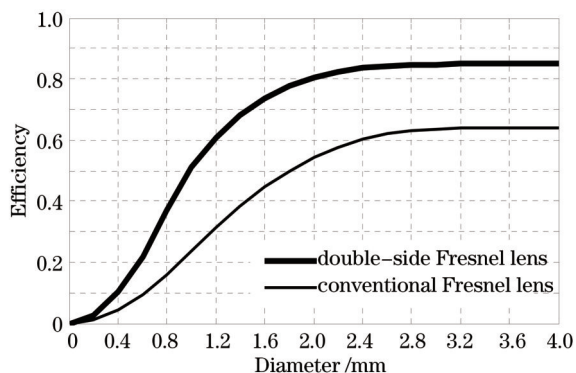
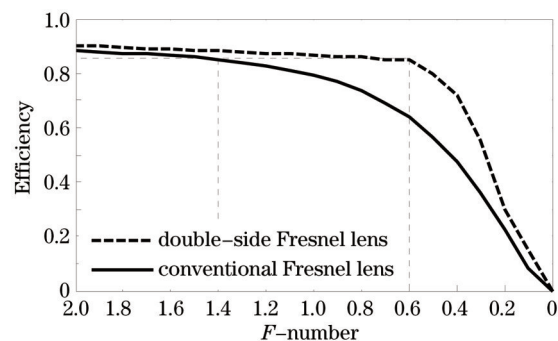


图7 图6中不同环形区域内的能量分析

Fig.7 Encircled energy analysis of plots in Fig. 6

图8 不同 $F$ 数下口径为200 mm的双面菲涅耳透镜和传统单面菲涅耳透镜的聚光效率曲线Fig.8 Collection efficiency curves of double-side Fresnel lens and conventional Fresnel lens with different  $F$  numbers in diameter of 200 mm

的设计方法。这种结构减小了聚光系统的轴向尺寸,使聚光系统的厚度更薄、质量更轻,聚光系统的聚光效率明显提高。设计了口径为200 mm, $F$ 数为0.6的双面菲涅耳透镜,利用LightTools软件对其聚光能力进行模拟分析,分析结果显示与相同口径相同 $F$ 数的传统菲涅耳透镜相比,聚光效率提高了21.1%。在聚光效率均为85%的条件下,双面菲涅耳透镜聚光系统的轴向尺寸与传统单面菲涅耳透镜聚光系统相比减小了160 mm。

## 参 考 文 献

- 1 Jose L Alvarez, Vicente Diaz, Jesus Alonso. Optics design key points for high gain photovoltaic solar energy concentrators [C]. SPIE, 2005, 5962: 596210.
- 2 Ralf Leutz, Hans Philipp Annen, Ling Fu. Optical design for reliability and efficiency in concentrating photovoltaics [C]. SPIE, 2010, 7773: 777304.
- 3 Zhao Jinlong, Li Lin, Cui Zhengjun, *et al.*. Calculation of flux density distribution on focal plane in linear Fresnel reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1208001.  
赵金龙, 李林, 崔正军, 等. 线性菲涅耳反射聚光器聚焦光斑能流密度分布的计算[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1208001.
- 4 Wang Wenbo, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Investigation of the output characteristics of GaAs solar cell based on Fresnel concentrating system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0716003.  
王文博, 李明, 季旭, 等. 菲涅耳聚光系统下砷化镓电池输出特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0716003.
- 5 Du Chunxu, Wang Pu, Wu Yuting, *et al.*. Concentration ratio analysis of linear Fresnel reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0808001.  
杜春旭, 王普, 吴玉庭, 等. 线性菲涅耳聚光装置的聚光比分析[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0808001.
- 6 Dennis F Vanderwerf. Applied Prismatic and Reflective Optics [M]. Washington: SPIE, 2010. 237-245.
- 7 Ralf Leutz, Akio Suzuki. Nonimaging Fresnel Lenses: Design and Performance of Solar Concentrators [M]. Heidelberg: Springer Verlag, 2001. 60-75.
- 8 Optical Research Associates. Electronic Document Library [EB/OL]. LightTools version 7.2.0, 2011.
- 9 Arthur Davis, Frank Kuhnlenz. Optical design using Fresnel lenses [J]. Optik & Photonik, 2007, 4: 52-55.
- 10 Pablo Benitez, Juan C Minano, Pablo Zamora, *et al.*. High performance Fresnel-based photovoltaic Concentrator [J]. Opt Express, 2010, 18(S1): A25-A33.
- 11 Juan C Minano, Pablo Benitez, Pablo Zamora, *et al.*. Free-form optics for Fresnel-lens-based photovoltaic concentrators [J]. Opt Express, 2013, 21(S3): A494-A502.
- 12 A Davis. Light Emitting Diode Source Modeling for Optical Design[EB/OL]. <http://display-optics.com/pdf/LensDesignForLedsWorkbookDavis3.pdf>, 2004, 45-50.
- 13 Ian Wallhead, Teresa Molina Jimenez, Jose Vicente Garcia Ortiz, *et al.*. Design of an efficient Fresnel-type lens utilizing double total internal reflection for solar energy collection [J]. Opt Express, 2012, 20(S6): A1005-1010.

栏目编辑: 韩峰