

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2016.01.021

环面焦斑全内反射菲涅尔透镜设计及分析

殷丹艳¹, 王淮生¹, 倪艳芬²

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 浙江万事达建设工程有限公司, 浙江 舟山 316000)

摘要: 为了减小由热斑效应带来的损失, 增加太阳能转换效率, 克服二次镜带来的菲涅尔损失, 以及由大口径和几何聚光比带来的焦斑不均匀的问题, 设计了环面焦斑全内反射菲涅尔透镜. 环面焦斑全内反射菲涅尔透镜由两部分组成, 里面是环面焦斑太阳能透镜, 外面是二次全反射棱镜. 用 Tracepro 模拟和比较具有相同通光面积的普通菲涅尔透镜和环面焦斑全内反射菲涅尔透镜的光照度, 结果表明, 环面焦斑全内反射菲涅尔透镜具有较高的光能利用率和均匀性.

关键词: 菲涅尔透镜; 光学效率; 环面焦斑; 全内反射透镜

中图分类号: TK513; TH74

文献标志码: A

文章编号: 1006-4729(2016)01-0097-05

Design and Analysis of Ring-Shaped-Focus and Double Total Internal Reflection Lens Fresnel Concentrator

YIN Danyan¹, WANG Huaisheng¹, NI Yanfen²

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Zhejiang MasterCard Construction Engineering Management Co., Ltd., Zhoushan 316000, China)

Abstract: In order to reduce the damage caused by the heat effect, increase the solar conversion efficiency and overcome the Fresnel losses brought by the secondary mirror, a novel hybrid Fresnel concentrator without using secondary optical element is presented which also overcomes the non-uniform illumination distribution brought by large diameter and geometric concentrating ratio. The designed Fresnel lens consists of two parts: the inner part and the outer the former being the ring-shaped-focus Fresnel lens, while the outer part is double total internal reflection lens (DTIR). Taking a common Fresnel and a Ring-Shaped-Focus Fresnel with the same light area as an example, a conclusion can be drawn that the Ring-Shaped-Focus Fresnel has higher light utilization and illumination uniformity by Tracepro software.

Key words: Fresnel lens; optical efficiency; ring-shaped-focus; total internal reflection lens

随着人类对能源需求量的不断增长, 常规能源难以满足人类社会长期发展的需求, 各国已着眼于开发和利用各种新能源作为解决途径. 太阳

能是利用最广泛的新能源之一, 具有分布广泛、储量巨大等特点. 一旦将太阳能充分有效地运用起来, 将极大地缓解人类的能源危机. 由于太阳能具

收稿日期: 2015-06-11

通讯作者简介: 殷丹艳 (1990-), 女, 在读硕士, 浙江舟山人. 主要研究方向为太阳能光伏技术. E-mail: xiaoyin@qq.com.

有能流密度低,分布不均匀和有间歇性等特点,因此提高太阳能发电效率,降低发电成本迫在眉睫.

太阳能聚光系统是大幅度提高系统整体转换率的有效途径之一,聚光系统能够减少太阳能电池的使用面积、增加聚光太阳能电池的能流密度,从而降低了发电成本.然而目前聚光光伏系统还存在很多问题,如在电池表面形成的聚光辐照度不均匀,聚光系统接收角偏小,需要更高精度的跟踪器等,这些问题都将导致太阳能光伏系统转化效率降低^[1].在聚光系统中要提高太阳能电池的转化效率,高性能的聚光器——菲涅尔透镜是必不可少的.

本文设计了不使用二次镜的高均匀性菲涅尔透镜,即环面焦斑全内反射菲涅尔透镜.不使用二次镜能够降低聚光系统的成本,且降低了安装难度,减少了线路损失.它具有高聚光比和高均匀性,高聚光比能够降低费用,高均匀度能够提高太阳能电池的转化效率^[2].

1 环面焦斑全内反射菲涅尔透镜的设计方法

1.1 环面焦斑全内反射菲涅尔透镜的原理

本文设计的环面焦斑全内反射菲涅尔透镜由两部分组成,里面是环面焦斑太阳能透镜,外面是二次全反射棱镜,如图 1 所示.与环面焦斑菲涅尔透镜相比,环面焦斑全内反射菲涅尔透镜能够有效克服大口径和几何聚光比带来的焦斑非均匀性问题.

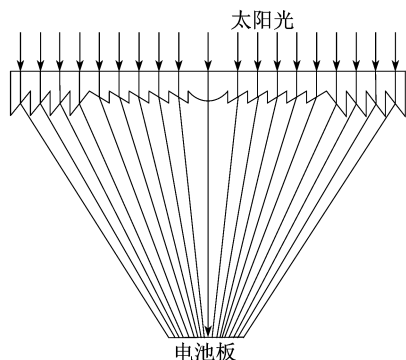


图1 环面焦斑全内反射透镜总体示意

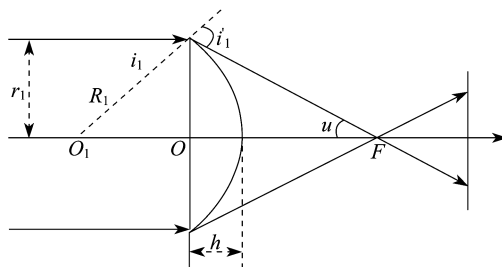
1.2 第一环球面透镜设计

图2 为菲涅尔透镜中心球面的光路图.由图2

可以看出,平行光透过中心球面,经该中心球面透镜折射后在菲涅尔透镜焦平面上形成焦斑半径 x_1 ^[3].

$$x_1 = f \cdot \tan \left[\arcsin \left(\frac{2nhr_1}{r_1^2 + h^2} \right) - \arcsin \left(\frac{2hr_1}{r_1^2 + h^2} \right) \right] - r_1 \quad (1)$$

由式(1)可知,在材料的折射率 n ,高度 h ,焦距 f 已知的情况下,当 x_1 取最小时,可以得出 r_1 的最小值.

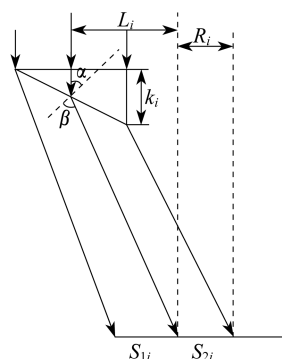


注: r_1 —中心球面透镜的半径; h —透镜的厚度; u —孔径角; i_1, i'_1 —入射角和出射角; F —入射光与光轴的交点; R_1 —半径.

图2 透镜的中心球面成像光路

1.3 环面焦斑透镜设计方法

对于环面焦斑透镜,能将入射光线在焦平面形成一个个环面焦斑,并且这些环面焦斑均匀分布.当平行光垂直入射在透镜一侧时,聚光器上 x_i 位置上的入射光线汇聚在焦平面上,如图3所示^[4].



注: L_i —入射光与其光轴的距离; k_i —棱镜高; R_i —内径; α —入射角; β —出射角.

图3 环面焦斑菲涅尔透镜的光路示意

由图3 可以得出如下公式:

$$n \sin \alpha = \sin \beta \quad (2)$$

$$\tan \omega = \frac{L_i}{f - \frac{k_i}{2}} \quad (3)$$

$$k_i = \Delta R \cdot \tan \alpha \quad (4)$$

$$\omega = \alpha - \beta \quad (5)$$

$$r_i = \frac{r\Delta R}{R}i \quad (6)$$

$$L_i = x_i - r_i \quad (7)$$

$$\theta = \arctan \frac{\sin \omega}{n - \cos \omega} \quad (8)$$

整理后可以得到:

$$\theta = \arctan \frac{x_i - \frac{r\Delta R}{R}i}{f - \frac{k_i}{2}} + \arcsin(n \cdot \sin \beta) \quad (9)$$

式中: n ——透镜的折射率;

θ ——棱高度角;

r ——焦斑半径;

ω ——出射面的孔径角;

f ——焦距;

i ——环序列号;

ΔR ——环面半径;

x_i ——第 i 环上入射光的位置;

r_i ——第 i 环透镜光轴与聚光器光轴之间的距离;

R ——聚光器口径;

这里的 α 数值上等于棱高度角 θ . 确定 θ 和棱长, 就可以确定全内反射透镜的侧面.

1.4 全反射棱镜设计方法

全反射棱镜是指入射光在棱上反射两次, 然后偏转到指定的位置, 其原理如图 4 所示^[5].

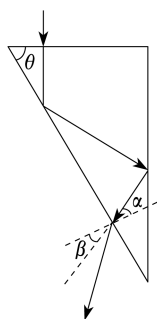


图 4 二次全内反射透镜的光线传播示意

全内反射透镜可以沿用与环面焦斑相同的公式, 但入射光必须满足全反射的条件^[5], 即: $n \sin \theta \geq 1$.

2 透镜的聚光均匀性和光学效率

2.1 聚光均匀性

由于太阳光入射透镜时存在色散现象, 每环透镜的环面焦斑宽度都不一样, 如图 3 所示. 其中, 环内侧考虑最短波长的光的折射, 环外侧考虑最长波长的光的折射, 这样就可得到每环的最大焦斑^[6].

由图 3 可知:

$$S_{1i} = \frac{r\Delta R}{R}i - \left[\frac{r\Delta R}{R}(i-2) - (f - k_i)(\tan \beta_1 - \tan \beta) \right] \quad (10)$$

$$S_{2i} = \frac{r\Delta R}{R} \left(i + \frac{1}{2} \right) + f(\tan \beta - \tan \beta_2) - \frac{r\Delta R}{R}i \quad (11)$$

$$S = S_{1i} + S_{2i} \quad (12)$$

式中: S ——每环的焦斑宽度;

β_1, β_2 ——最短和最长波长光线的出射角.

由上述公式, 可以得到每环焦斑宽度 S 与环序列 i 的关系, 见表 1.

表 1 焦斑宽度与环序列的关系

焦斑宽度 S/mm	环序列 i	焦斑宽度 S/mm	环序列 i
1.967	0	10.096	100
2.455	20	12.432	120
3.745	40	17.053	140
6.234	60	21.098	160
8.012	80	28.166	180

当 f 为定值时, 环面焦斑的宽度和环序列不是呈线性关系, 其斜率随环半径的增大而增大, 由此可以推出焦斑均匀性将逐渐降低. 对于环面焦斑菲涅尔透镜, 几何聚光比是限制光斑均匀度的关键因素^[6].

由于普通透镜的环面焦斑内径不宜太大, 因此在外环加上二次全内反射透镜. 二次全内反射透镜与内环透镜一样, 可以将太阳光聚集起来, 并在光伏电池板上形成一环环的焦斑.

取内径为 80 mm, 外径为 180 mm 的二次全内反射透镜为例, 焦斑宽度与环序列的关系见表 2.

表 2 内外径确定时焦斑宽度与环序列的关系

S_{1i}	S_{2i}	序列 i	S_{1i}	S_{2i}	序列 i
mm			mm		
1.967		0	8.455		100
2.455		20	8.902		120
3.745		40	9.326		140
6.234		60	10.788		180
8.012		80			

2.2 光学效率

光学效率是非涅尔透镜的一个重要指标,即透镜中透射光的总能量与入射到透镜上的光能量之比.导致非涅尔透镜光学损失的原因很多,有反射损失、吸收损失、工艺性损失以及结构损失等.在这些损失因素中,太阳光在入射界面和出射界面上的反射损失是最重要的.不同形状的非涅尔透镜,太阳光在其入射界面和出射界面上的入射角、折射角、出射角都不一样.其理想的非涅尔透镜透射率是只考虑反射损失和材料吸收损失^[7].

传统的非涅尔透镜和二次全内反射透镜的孔径角 ω 和棱高度角 θ 之间的关系,可以分别表示为^[8]:

$$n \sin \theta = \sin(\theta + \omega) \quad (13)$$

$$n \sin(3\theta - 180^\circ) = \sin(\theta - \omega) \quad (14)$$

其中,环面焦斑非涅尔透镜的入射角 $\alpha = \theta$,出射角 $\beta = \theta + \omega$,全反射棱镜的入射角 $\alpha = 3\theta - 180^\circ$,出射角 $\beta = 90^\circ - \omega$.由于光在透镜中传播时会有损失,叫做非涅尔损失,我们用光透过率来衡量这一参数.非涅尔透镜光透率为:

$$T = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} + \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)} \right] \quad (15)$$

则可以得到:

$$T = 1 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2 \omega}{\sin^2 \left[2 \arctan \left(\frac{\sin \omega}{n - \cos \omega} \right) + \omega \right]} + \frac{\tan^2 \omega}{\tan^2 \left[2 \arctan \left(\frac{\sin \omega}{n - \cos \omega} \right) + \omega \right]} \right\} \quad (16)$$

$$T = 1 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\cos^2 \left[\arcsin \left(\frac{1}{n} \cos \omega \right) + \omega \right]}{\cos^2 \left[\arcsin \left(\frac{1}{n} \cos \omega \right) - \omega \right]} + \right.$$

$$\left. \frac{\cot^2 \left[\arcsin \left(\frac{1}{n} \cos \omega \right) + \omega \right]}{\cot^2 \left[\arcsin \left(\frac{1}{n} \cos \omega \right) - \omega \right]} \right\} \quad (17)$$

由式(16)和式(17)就可以得到光透过率 T 和初射面的孔径角 ω 之间的关系.全反射棱镜的光透过率 T 随着孔径角 ω 的增大而不断增大,而环面焦斑的光透过率 T 随着孔径角 ω 的增大而迅速下降^[4].设计内环最大孔径角 ω 为 20° ,其孔径角 ω 和透过率 T 的关系见表 3.

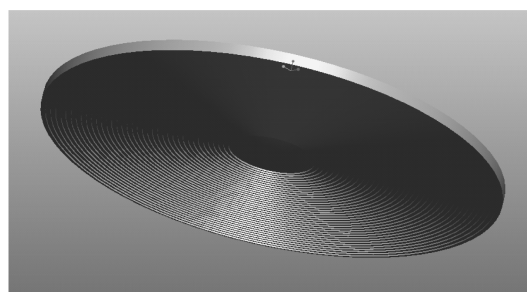
表 3 孔径角 ω 和光透过率 T 的关系

光透过率		孔径角	光透过率		孔径角
内环透镜	外环透镜	$\omega/(^\circ)$	内环透镜	外环透镜	$\omega/(^\circ)$
0.97		20	0.98		115
0.97		35	0.97		140
0.96		50	0.97		165
0.96		75	0.98		200
0.95	0.95	90			

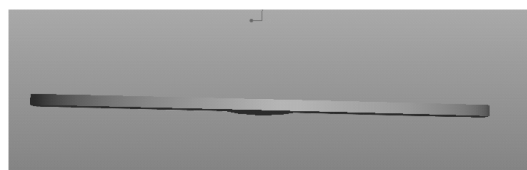
3 建模和仿真

3.1 新型非涅尔透镜的建模

根据上述公式计算出来的新型非涅尔透镜,确定其每一环的棱长,用 Pro/E 建立透镜的模型,模型图见图 4.



a 模型俯视示意



b 模型侧视示意

图 5 环面焦斑全内反射非涅尔透镜模型

3.2 仿真结果

Tracepro 软件能够对光线进行准确有效的分

析,能够处理复杂的几何数据.将在 Proe 中建立的模型导入到 Tracepro 中,设置好光学材质并定义好光源参数,对其进行光线追踪.光源辐射照度 E 设置为 $10\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,分别模拟相同通光面积下的普通菲涅尔透镜和环面焦斑全内反射菲涅尔透镜的光照度图,如图 5 所示.

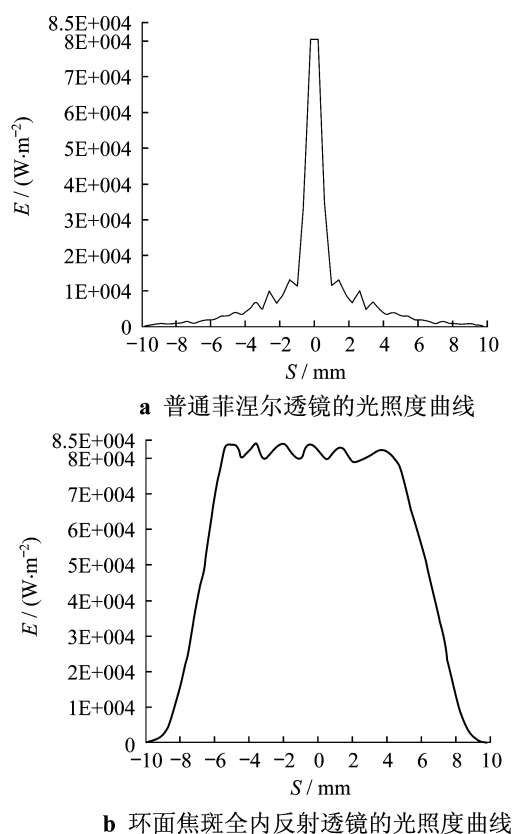


图6 光照度结果对比

4 结 语

聚光光学系统作为太阳能光伏的重要部件,提高其聚光均匀性和光学效率能够决定其光电转换效率.环面焦斑全内反射透镜是对太阳能聚光结构的进一步优化,能够形成均匀的光斑.环面焦斑全内反射透镜能够弥补环面焦斑透镜当 f 一定时,随着口径的增大,能量密度逐渐降低,均匀性也随之降低的缺点.另外,避免了使用二次镜,能够节约成本.

参考文献:

- [1] 高飞,谢冀江,张来明. 光伏聚光器的研究现状及发展趋势[J]. 太阳能,2012(7):11-16.
- [2] 陈志明. 菲涅尔透镜聚光性能研究[D]. 杭州:中国计量学院,2013.
- [3] 杨光辉,卫明,陈丙振. 平板菲涅尔透镜设计及组合优化方法[J]. 北京工业大学学报,2014(10):1 465-1 471.
- [4] 张丽,陈志明,董前民,等. 一种环面焦斑菲涅尔聚光器的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展,2012(9):154-159.
- [5] ZHUANG Zhenfeng, YU Feihong. Optimization design of hybrid Fresnel-based concentrator for generating uniformity irradiance with the broad solar spectrum[J]. Optics and Laser Technology,2014(60):27-33.
- [6] 张丽. 高均匀性菲涅尔聚光光学系统的设计[D]. 杭州:中国计量学院,2013.
- [7] 吴贺利. 菲涅尔太阳能聚光器研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
- [8] WANG C M, HUANG H I, PAN J W, et al. Single stage transmission type broadband solar concentrator[J]. Optics Express,2010(18):118-125.

(编辑 白林雪)