

平板菲涅尔透镜设计及组合优化方法

杨光辉^{1,2}, 卫明¹, 陈丙振¹, 郭丽敏¹, 沈度¹, 王智勇¹

(1. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124; 2. 第二炮兵装备研究院 第二研究所, 北京 100085)

摘要: 为了解决传统的球面菲涅尔透镜模具加工工艺难度大、精度低、制作成本高等问题, 提出一种中心透镜为球面、外侧环带为倾斜面的平板菲涅尔透镜的设计方法, 并进行了基于多平面拟合和基于多焦点的组合优化设计, 给出了具体设计实例, 进行了光学仿真. 结果表明: 优化后菲涅尔透镜聚光效率达 93%, 聚焦光斑能量均匀性 4.9, 满足设计要求.

关键词: 菲涅尔透镜; 焦斑; 高倍聚光光伏

中图分类号: O 435

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2014)10-1465-07

Flat Plate Type Fresnel Lens Design and Its Combinatorial Optimization

YANG Guang-hui^{1,2}, WEI Ming¹, CHEN Bing-zhen¹, GUO Li-min¹, SHEN Du¹, WANG Zhi-yong¹

(1. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. The Second Research Institute, the Second Artillery Equipment Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: To solve the problem that the traditional spherical Fresnel lens mold processing was difficult, low precision and high cost, a Fresnel lens design was presented to gain higher optical efficiency. In this design, spherical surface for center lens and inclined plane for outer rings based on the result of multi-plane fitting and multi-focal combinatorial optimization were employed. A design case was given as well as its optical simulation. Results show that, after optimization, the Fresnel lens concentrator efficiency up to 93%, the focused beam energy uniformity 4.9, meet the design requirements.

Key words: Fresnel lens; focal spot; high concentrating photovoltaic

近年来,在新能源领域,高倍聚光光伏技术(high concentrating photovoltaic, HCPV)备受关注.透射式菲涅尔透镜被广泛地应用于 HCPV 模组,成为研究热点,其作用是将较大面积的太阳光聚焦到小面积的光伏电池上.哈尔滨工业大学的刘永强等^[1]、武汉理工大学的李鹏等^[2]、吉林大学的姜磊^[3]、长春理工大学的李望^[4]、西安交通大学的崔福庆等^[5]、长春理工大学的朴聪等^[6]都开展了这方面的研究;国外研究菲涅尔透镜的主要有德国的 Fraunhofer 太阳能系统研究所和 Concentrix Solar 公司^[7-9]、西班牙马德里理工大学的 D. Vázquez-Moliní

等^[10]和日本东京农工大学的 R. Leutz 等^[11]和 A. Akisawa 等^[12-13]. 这些研究大部分是基于中低倍聚光条件下或曲面菲涅尔透镜. 本文提出一种混合型平板菲涅尔透镜设计方法,并进行了组合优化. 理论上来说,菲涅尔透镜的工作面应该和与它具有等效聚光效果的凸透镜的表面(球面或非球面)一致,考虑到加工工艺,一般用选用球面,但是工作面为球面的平板菲涅尔透镜模具加工难度仍较大,制作成本仍很高,尤其是当菲涅尔透镜的环带数量设置得比较多,每个环带的宽度较窄时,因此,为了减小加工难度、降低工艺成本,菲涅尔透镜除第 1 环采用球

收稿日期: 2013-06-16

基金项目: 教育部新世纪优秀人才计划资助项目(39101999201101)

作者简介: 杨光辉(1976—),男,博士研究生,主要从事应用光学、聚光太阳能技术方面的研究, E-mail: yang3881@emails.bjut.edu.cn

面外,其他每个环带的工作面近似采用倾斜面代替。

1 平板菲涅尔透镜设计

为方便描述,本文将菲涅尔透镜的中心透镜称为第1环,从中心往外依次为第2,3,⋯,N环,将 r_1 定义为菲涅尔透镜的中心透镜的实际半径。

1.1 第1环球面透镜设计

图1为平行光通过菲涅尔透镜的中心球面透镜的光路图,由于太阳光近似于平行光,平行于透镜的光轴的人射光在中心球面透镜的第1个平面上无折射,设入射在中心透镜上边缘的光线在球面上的入射角为 i_1 ,折射角为 i'_1 ,中心球面透镜的上边缘入射光的像方孔径角为 u'_1 ,中心球面透镜的半径为 r_1 ,图中 O 点为菲涅尔透镜中心, O_1 点为中心球面透镜的曲率中心, F 点为该菲涅尔透镜的实际焦点, A_0 为中心球面透镜的上边缘入射光与菲涅尔透镜焦平面的交点, F_0 为入射光与光轴的交点,透镜材料的折射率为 n ,透镜焦距为 f 。

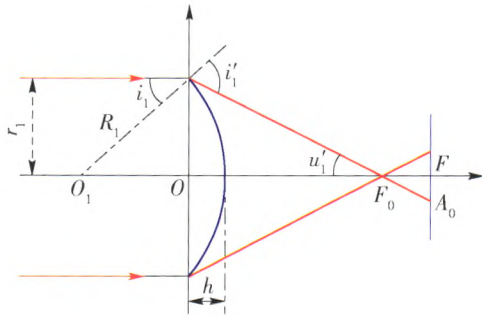


图1 中心球面透镜成像光路

Fig. 1 Optical path of the center spherical len

由几何光学知识推导、整理后可得,平行光经该中心球面透镜折射后在菲涅尔透镜焦平面上形成的焦斑半径 x_1 为

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

对于口径固定的菲涅尔透镜而言,聚焦光斑越小,该透镜的聚光比越大,显然,由式(1)可知:当 n 、 h 、 f 都已知时, x_1 是 r_1 的函数,因此,可根据 x_1 和 r_1 的函数关系求出能使 x_1 最小的 r_1 的取值。

1.2 外侧环带透镜设计

对从第2环开始以后各环的设计方法进行说明。图2为工作面为倾斜面的等厚型平板菲涅尔透镜成像光路。太阳光近似看作平行光。设菲涅尔透镜的材料折射率为 n ,则经空气入射至菲涅尔透镜

第 N 环(N 取值为自然数)平面侧中间点 P 的光线在菲涅尔透镜第 N 环的平面侧不产生折射,随后折射光线在菲涅尔透镜中直线传播一段距离后达到菲涅尔透镜第 N 环的倾斜面处的 Q 点,该光线再次在 Q 点处发生折射后最终被聚焦于光轴上的 F' 点, u'_N 为像方孔径角。

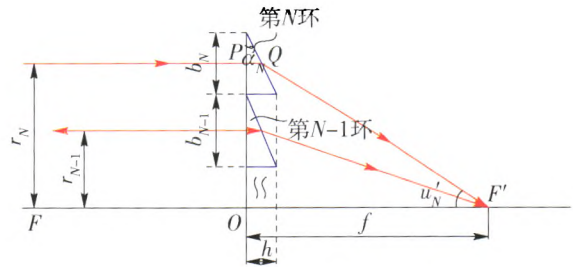


图2 等厚型菲涅尔透镜成像光路

Fig. 2 Optical path of isopach fresnel lens

由几何光学知识推导得,工作面为倾斜面的菲涅尔透镜设计公式为

$$\tan \alpha_N = \frac{\sin u'_N}{n - \cos u'_N} = \frac{r_N}{n \sqrt{(f - h/2)^2 + r_N^2} - (f - h/2)} \quad (2)$$

式中: α_N 为第 N 环的工作面倾角; r_N 为第 N 环的中心半径(即从菲涅尔透镜的中心到第 N 环的半宽度处的长度); h 为第 N 环的最高点厚度。

设图2中,第 N 环的宽度为 b_N ,第 $N-1$ 环的宽度为 b_{N-1} ,第 N 环相对于第 $N-1$ 环的半径增值为 Δr_N ,则由几何关系,并结合式(2)推导整理,得第 N 环参数满足

$$\frac{r_{N-1} + \Delta r_N}{n \sqrt{(f - h/2)^2 + r_N^2} - (f - h/2)} = \frac{h}{2\Delta r_N - b_{N-1}} \quad (3)$$

式中透镜材料折射率 n 已知, f 、 h 由设计要求给出,因此,当知道第 $N-1$ 环的参数 r_{N-1} 和 b_{N-1} 时即可计算出 Δr_N 的实数解,从而确定出第 N 环的参数 r_N 和 b_N 。

2 平板菲涅尔透镜实例

假设等厚型平板菲涅尔透镜设计参数要求为:菲涅尔透镜为方形口径,透镜焦距 $f = 93.5 \text{ mm}$,透镜厚度 $h = 0.4 \text{ mm}$,聚光倍数不低于 500 倍,透镜的聚光效率不低于 85%,配合使用的太阳能电池接收区最大为 $\phi 2.5 \text{ mm}$ 的圆形,透镜使用硅酮材料(折射率 $n = 1.4111$)。

首先,由几何聚光比定义,将菲涅尔透镜的口径确定为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。

根据式(1)计算出能使焦斑半径 x_1 最小的中心球面透镜的半径 $r_1 = 5.5 \text{ mm}$, 曲率半径为 $R_1 = 38.0125 \text{ mm}$. 根据式(3), 采用 Matlab 软件编程, 确定透镜口径范围内第 2 ~ 37 各环带参数, 部分参数见表 1.

表 1 菲涅尔透镜环带参数

Table 1 Parameter of 2-10 rings of Fresnel lens

环数	环带宽度/mm	环数	环带宽度/mm
2	2.322 7	7	1.120 7
3	1.786 2	8	1.047 6
4	1.511 2	9	0.988 2
5	1.336 7	10	0.938 7
6	1.213 5		

3 聚焦光斑分析

当菲涅尔透镜各环带的工作面为倾斜平面时, 入射到每个环带上的光束经该环带透镜后在非涅尔透镜焦平面上所成的像为一个弥散斑, 各弥散斑叠加后形成整个菲涅尔透镜在其焦平面的聚焦光斑. 若光斑面积大于接收面上的太阳能电池面积则会造成能量损失, 降低聚光效率; 反之, 则可能造成能量过于集中, 降低电池的光电转换效率. 因此, 理想情况是聚焦光斑面积和电池面积基本相当.

在第 2 节实例中, 由式(1)可得第 1 环中心透镜聚焦光斑尺寸. 以下仅对第 2 环以后各环带透镜的聚焦光斑进行分析. 图 3 为太阳光经工作面为倾斜平面的菲涅尔透镜的成像光路. 设 B 点为图中第 N 个环带透镜的平面侧中点, A 点为图中第 N 个环带透镜的工作面中点. 太阳光线 N' 以倾角 $\theta_0 = \gamma_0/2 = 16^\circ$ 入射至 B 点, 光线 N' 在第 N 个环带透镜的平面上的折射角为 θ_N , 在第 N 环透镜的工作面上的入射角为 θ'_N , 折射角为 θ''_N , 在第 N 个环带透镜的工作面上的交点为 A_2 , 出射光线在非涅尔焦平面上的交点为 B_2 , 菲涅尔透镜折射率为 n , 焦距为 f , 第 N 个环带透镜的工作面倾角为 α_N .

由几何光学知识推导、整理可得, 太阳光经菲涅尔透镜的第 N 环透镜后在非涅尔透镜的焦平面上所成的焦斑半径 x'_N 为

$$x'_N = \left(f - \frac{h}{2} \right) \times \tan(\theta''_N - \alpha_N) - \frac{b_N \cos i'_{N1}}{2 \cos \alpha_N \cos(i'_{N1} - \alpha_N)} \quad (4)$$

式中: $i'_{N1} = \arcsin(n \sin \alpha_N)$ $\theta''_N = \arcsin(n \sin(\alpha_N + \theta_N))$. f, h, α_N, r_N, b_N 在设计时已确定好.

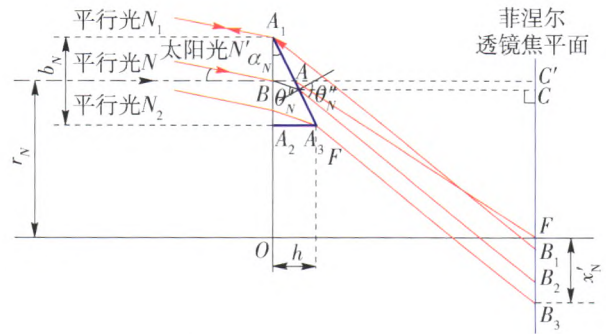


图 3 太阳光入射时外侧棱镜成像光路

Fig. 3 Optical path of the outer prism when the incident light is sunlight

根据式(4)采用 Matlab 编程, 对第 2 节中设计实例的焦斑大小进行分析. 图 4 为焦斑半径随环数 N 的变化图. 由图 4 可知: 由于第 1 环聚焦光斑远小于其他工作面的聚焦光斑; 从第 2 ~ 37 环, 聚焦光斑大小呈先大幅减小随后又缓缓增大的趋势. 第 2 ~ 4 环透镜的焦斑大小分别为: $x_2 = 1.5894 \text{ mm}$, $x_3 = 1.3232 \text{ mm}$, $x_4 = 1.1886 \text{ mm}$, 而设计要求中需要将光聚焦到 $\phi 2.5$ 的太阳能电池上, 因此, 该菲涅尔透镜的第 2, 3 环有待于进一步优化.

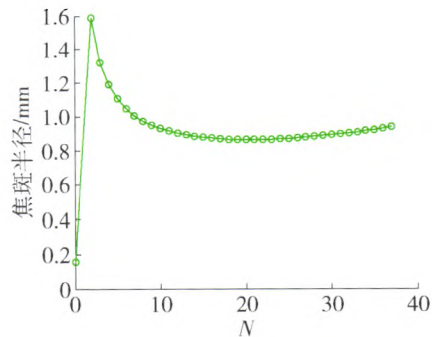


图 4 各环焦斑半径随环数变化

Fig. 4 Variation of the ring's focal spot radius while the number of rings increasing

4 平板菲涅尔透镜组合优化方法

由聚焦光斑分析可知, 第 1 环中心透镜光斑很小, 能量过于集中; 第 2, 3 环焦斑半径大于太阳能电池半径, 有能量损失; 从第 4 环起焦斑半径又逐渐减小. 本文组合优化的思路是将接收平面上尺寸较小的焦斑放大, 同时将尺寸较大的焦斑缩小, 使其与太阳能电池有效面积匹配, 达到匀化焦斑能量的目的. 具体方法是, 将第 1 ~ 4 透镜内侧环带采用基于多平面拟合的方法进行优化, 对从第 5 环起外侧透镜环带采用基于多焦点的优化设计.

4.1 基于多平面拟合的优化设计

结合图5说明基于多平面拟合的优化设计方法.

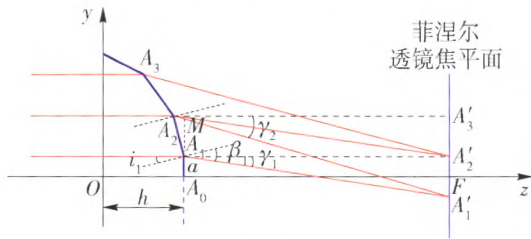


图5 多个倾斜平面拟合曲面的菲涅尔透镜设计

Fig. 5 Multiple inclined plane fitting curved surface of the Fresnel lens

图5为用多个倾斜平面拟合而成的第1环透镜设计原理图,为方便说明,图中以菲涅尔透镜光轴为z轴,并以其平面侧为y轴建立yOz坐标系.为使透过该环透镜的光线在焦平面上的能量尽量均匀,将该环透镜顶部设计为一个平行于菲涅尔透镜平面侧的小平面,即如图中A₀A₁所示,由于该菲涅尔透镜厚度为h,设第1环顶部小平面的口径为a,则点A₁的坐标为:(y₁, z₁) = (a, h),设图中该环透镜的工作面由折线A₀A₁, A₁A₂, …构成(即由菲涅尔透镜光轴沿其径向往外侧,该环透镜的工作面折线上的转折点依次为A₀, A₁, …),该环透镜工作面上每个倾斜平面的设计思想都是使得垂直于菲涅尔透镜平面侧入射到每个倾斜平面上两侧边缘的光线刚好能被折射至太阳能电池有效接收平面的边缘.例如图5中入射到倾斜平面A₁A₂边缘点A₁的光线最终落在菲涅尔透镜焦平面上的点A'₁,入射到倾斜平面A₁A₂边缘点A₂的光线最终落在菲涅尔透镜焦平面上的点A'₂,而A'₁A'₂是太阳能电池的有效接收平面.

设入射到倾斜平面A₁A₂上的光线在该倾斜平面上的人射角为i₁,折射角为β₁,折射光线和菲涅尔透镜光轴的夹角为γ₁,则

$$\begin{cases} n \sin i_1 = \sin \beta_1 \\ \gamma_1 = \beta_1 - i_1 \\ \gamma_1 = \tan \frac{a + y_1}{f - z_1} \end{cases} \quad (5)$$

可解得i₁和β₁,其中n为菲涅尔透镜材料折射率.

由图5中的几何关系可求得点A_M的坐标(y_M, z_M)为

$$\begin{cases} y_M = y_{M-1} + \frac{2a \cdot \cos i_{M-1} \cos(i_{M-1} - \beta_{M-1})}{\cos \beta_{M-1}} \\ z_M = z_{M-1} - \frac{2a \cdot \sin i_{M-1} \cdot \cos(i_{M-1} - \beta_{M-1})}{\cos \beta_{M-1}} \end{cases} \quad (6)$$

若根据已知条件计算出的z₂ ≤ 0,则停止该环透镜的曲面拟合过程,并将线段A₁A₂和y轴的交点作为该环透镜的外侧边缘点;若z₂ > 0,则继续顺序确定下一倾斜平面A₂A₃的外侧点A₃的坐标(y₃, z₃), (y₄, z₄), …,下一倾斜平面A_MA_{M+1}的外侧点A_{M+1}的坐标(y_{M+1}, z_{M+1}),直至满足条件z_{M+1} ≤ 0时停止该环透镜的曲面拟合.

采用上述方法将第3节中透镜实例的前几环透镜进行优化.太阳能电池的有效接收面积为φ2.5的圆,考虑到太阳半张角的影响,初步将第1环透镜的第1个平面口径值设为a = 1.2 mm(即y₁ = 1.2 mm),此外, n = 1.411 1, f = 93.5 mm, z₁ = h = 0.4 mm,则由式(5)(6)可计算出该菲涅尔透镜的第1~4环透镜工作面的多个倾斜平面拟合数据.

4.2 基于多焦点的优化设计

多焦点优化方法是将聚焦光斑较小的透镜环带的焦距拉长,使其在接收电池面上光斑半径加大,从而使光斑面积与电池有效面积相当,以达到匀化光斑能量的目的.下面以两焦点优化为例进行说明,多焦点优化同理.

图6为两焦点平板菲涅尔透镜光路.图中,该菲涅尔透镜的预定焦距为f,而第N环透镜的焦距为f₁,显然,当f₁大于预定焦距f一定值时,平行光经过该环带透镜后在该菲涅尔透镜的焦平面上所成的像为一个圆环形光斑.

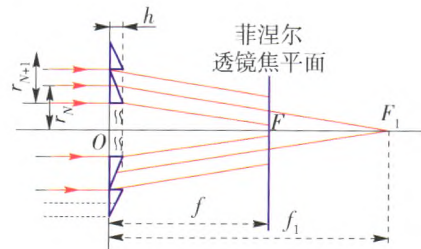


图6 多焦点菲涅尔透镜光路

Fig. 6 Optical path of multifocal Fresnel lens

由图6可看出,为了进一步使菲涅尔透镜的聚焦光斑均匀化,可将其工作面为倾斜平面的外环透镜焦点设置得比预定焦距大,以将这个环带透镜原聚焦到菲涅尔透镜焦平面中心的光斑变为圆环形光斑,从而可减小菲涅尔透镜聚焦光斑中央的能量同时提高外侧能量.

5 平板菲涅尔透镜建模及仿真

5.1 模拟1

根据第2节中设计的菲涅尔透镜实例数据,在

Solidworks 中建模, 再将模型导入 Tracepro 中. 采用某型硅酮胶作为菲涅尔透镜材料. 选定 530 nm 为模拟光线的主波长(材料折射率 $n_{\lambda=530} = 1.4111$), 模拟光源采用太阳光垂直入射, 模拟太阳光源强度定义为标准光强 1 kW/cm^2 , 在 Tracepro 中距离菲涅尔

透镜 $f = 93.5 \text{ mm}$ 处定义一个接收面, 进行光线追迹后分析该接收面上的聚焦光斑辐照度情况.

在 Tracepro 中设定太阳光源发出的光线数为 426 630 条, 在 $f = 93.5 \text{ mm}$ 处 $\phi 2.5$ 接收平面上模拟照度图如图 7 所示.

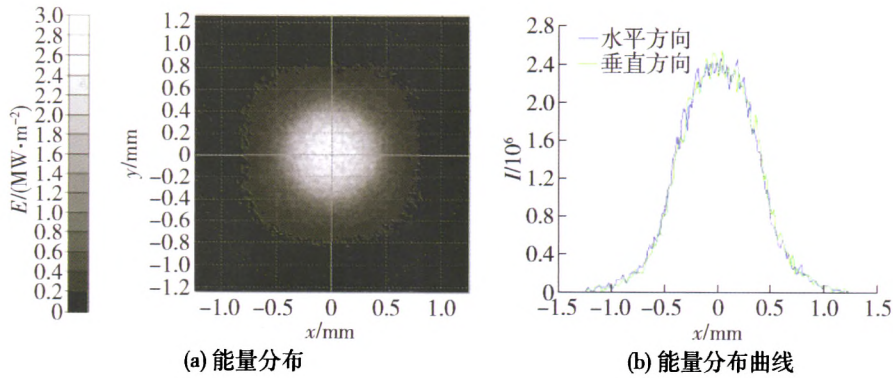


图 7 焦平面上 $\phi 2.5$ 范围内辐照度

Fig. 7 Irradiance map of focal plane of Fresnel lens (receiving area is $\phi 2.5$)

由图 7 的光学仿真可知: 经过该菲涅尔透镜聚焦后, 在 $f = 93.5 \text{ mm}$ 处的 $\phi 2.5$ 范围内接收到了 387 601 条光线, 该菲涅尔透镜的聚光效率为: $\eta_1 = 387\ 601/426\ 630 \times 100\% = 90.9\%$. 由图 7(b) 可看出, 在距离菲涅尔透镜 $f = 93.5 \text{ mm}$ 处的接收平面上, $\phi 1$ 范围内聚焦光斑的能量均匀性较好, 但是在整个 $\phi 2.5$ 的接收平面内聚焦光斑能量均匀性为: $U = 2\ 981\ 400/425\ 210 = 7$, 即: $f = 93.5 \text{ mm}$ 处的

$\phi 2.5$ 的接收平面内焦斑的最大辐照度约为平均辐照度的 7 倍.

5.2 模拟 2

将前几个环带透镜的工作面按照 4.1 节中的方法进行优化, 用多个倾斜平面拟合曲面, 采用 Tracepro 进行光学仿真, 条件设定与模拟 1 相同. 菲涅尔透镜焦平面的能量分布如图 8 所示.

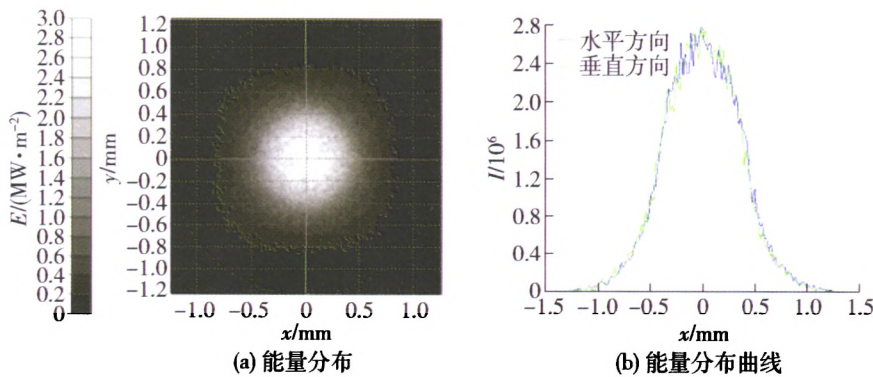


图 8 首次优化后焦平面辐照度(聚光比 $500 \times$)

Fig. 8 Irradiance map of Focal plane of Fresnel lens after the first optimization (concentration ratio is $500 \times$)

由图 8 可见, 此时入射的 426 630 条太阳光经菲涅尔透镜聚焦后有 421 487 条光线入射到 $f = 93.5 \text{ mm}$ 处焦平面的 $\phi 2.5$ 范围内, 菲涅尔透镜的聚光效率为

$$\eta_1 = 421\ 487/426\ 630 \times 100\% = 98.8\%$$

$\phi 2.5$ 的接收平面内焦斑的最大辐照度是平均辐照

度的 6.38 倍.

5.3 模拟 3

不改变透镜第 1~4 环的参数, 将第 5~37 环焦距全设为 f_1 进行设计, 对优化后得到的双焦点菲涅尔透镜采用 Tracepro 进行光学仿真. 条件设定同模拟 1.

当 $f_1 = 93.8 \text{ mm}$ 时, 仿真得到离菲涅尔透镜 $f = 93.5 \text{ mm}$ 处的 $\phi 2.5$ 接收平面上的能量分布如图 9 所示. 此时菲涅尔透镜的聚光效率为 98.2%, $\phi 2.5$ 的接收平面内焦斑的最大辐照度是平均辐照度的 5.9 倍. 对比图 8 的结果可见: 虽然该多焦点优化方

法牺牲了部分聚光效率, 但是经过该双焦点优化后菲涅尔透镜的聚焦光斑能量均匀性得到了提高.

当 $f_1 = 95 \text{ mm}$ 时, 仿真得到离菲涅尔透镜 $f = 93.5 \text{ mm}$ 处的 $\phi 2.5$ 接收平面上的能量分布如图 10 所示.

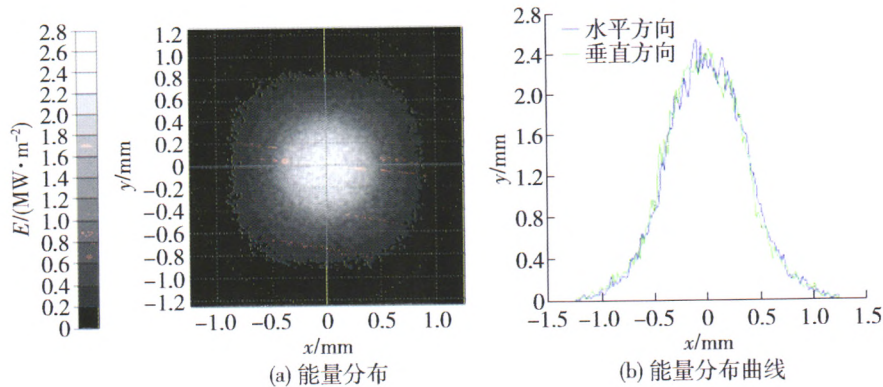


图 9 双焦点优化后焦平面辐照度 ($f_1 = 93.8 \text{ mm}$, 聚光比 $500 \times$)

Fig. 9 Irradiance map of Focal plane of Fresnel lens after the two focus optimization ($f_1 = 93.8 \text{ mm}$, concentration ratio is $500 \times$)

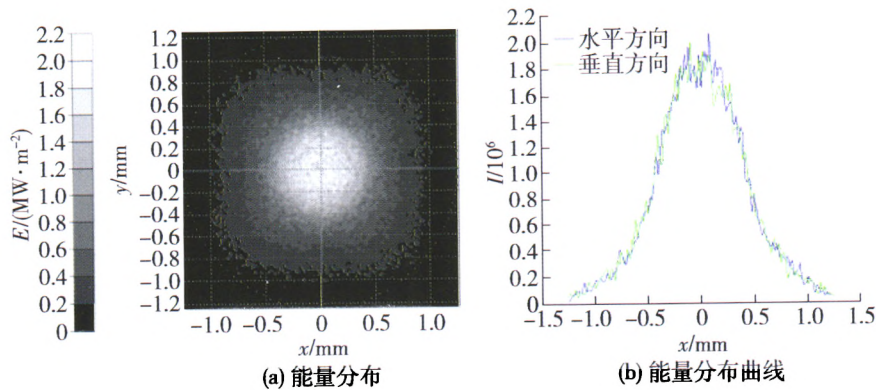


图 10 双焦点优化后焦平面辐照度 ($f_1 = 95 \text{ mm}$, 聚光比 $500 \times$)

Fig. 10 Irradiance map of Focal plane of Fresnel lens after the two focus optimization ($f_1 = 95 \text{ mm}$, concentration ratio is $500 \times$)

由图 10 可见, 此时该菲涅尔透镜的聚光效率为: $\eta_1 = 396\ 822/426\ 630 \times 100\% = 93\%$, $\phi 2.5$ 的接收平面内焦斑的最大辐照度是平均辐照度的 4.9 倍. 对比图 9 的结果可知: 当增加外侧环带透镜的焦距点值进行设计时, 菲涅尔透镜的聚焦光斑均匀性得到了明显提高.

因此, 在采用此优化方法时, 不能无限制地增加外侧环带透镜的焦距, 需要根据具体设计要求选择一个最佳的优化解.

6 结论

1) 本文提出了一种中心透镜为球面、外侧环带

为倾斜面的平板菲涅尔透镜的设计方法, 并进行了组合优化, 采用 Solidworks 和 Tracepro 软件进行建模和光学仿真.

2) 结果表明优化后菲涅尔透镜聚光效率能达到设计要求, 且聚焦光斑能量具有较好的均匀性. 该设计及优化方法为高倍聚光太阳能菲涅尔透镜的应用提供了参考.

参考文献:

- [1] 刘永强, 申作春, 芦宇, 等. 均匀会聚菲涅尔透镜设计及性能研究[J]. 光电子技术, 2012, 32(4): 263-266.
LIU Yong-qiang, SHEN Zuo-chun, LU Yu, et al. Design and performance research of uniform concentrating Fresnel

- lens[J]. *Optoelectronic Technology*, 2012, 32(4): 263-266. (in Chinese)
- [2] 李鹏, 吴贺利, 杨培环, 等. 菲涅尔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, 32(6): 62-66.
LI Peng, WU He-li, YANG Pei-huan, et al. General design method and optical efficiency of the solar concentrator by Fresnel lens [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(6): 62-66. (in Chinese)
- [3] 姜磊. 菲涅尔透镜及复合抛物面聚光器的设计与研究[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2011.
JIANG Lei. Fresnel lens and compound parabolic concentrators design and research [D]. Changchun: Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [4] 李望. 基于聚光型光伏模组的光学系统结构设计[D]. 长春: 长春理工大学光电工程学院, 2010.
LI Wang. Study on concentration optics system of concentration photovoltaic system [D]. Changchun: College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [5] 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.
CUI Fu-qing, HE Ya-ling, TAO Yu-bing, et al. A new type linear Fresnel lens design and concentrating characteristic analysis [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(5): 733-736. (in Chinese)
- [6] 朴聪, 张国玉. 菲涅尔太阳能聚光镜的设计[J]. *应用光学*, 2011, 32(1): 23-26.
PIAO Cong, ZHANG Guo-yu. Design of Fresnel lens for solar concentrator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(1): 23-26. (in Chinese)
- [7] BETT A W, SIEFER G, BAUR C, et al. FLATCON® concentrator PV-technology ready for the market[C] // Proc of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Barcelona: WIP, 2005: 207-211.
- [8] LUTHER J, BETT A W, BURGER B, et al. High concentration photovoltaics based on III-V multijunction solar cells [C] // Proc of the 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Dresden: WIP, 2006: 156-160.
- [9] GERSTMAIER T, Van RIESEN S, GOMBERT A, et al. Software modeling of FLATCON® CPV systems [C] // The 6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-6). Freiburg: ICAIT, 2010: 183-186.
- [10] VÁZQUEZ-MOLINÍ D, FERNÁNDEZ-BALBUENA A Á, BERNABEU E, et al. New concentrator multifocal Fresnel lens for improved uniformity: design and characterization [C] // Proc SPIE 7407, High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications IV. San Diego: SPIE, 2009: 740701-1-740701-11.
- [11] LEUTZ R, SUZUKI A, AKISAWA A, et al. Shaped nonimaging fresnel lenses[J]. *Opt A: Pure Appl*, 2000, 41(2): 112-116.
- [12] AKISAWA A, SATO T, MIYAZAKI T, et al. High concentration non-imaging Fresnel lens design with flat upper surface [C] // Proc SPIE 6649, High and Low Concentration for Solar Electric Applications II. San Diego: SPIE, 2007: 257-262.
- [13] AKISAWA A, HIRAMATSU M, OZAKI K. Design of dome-shaped non-imaging Fresnel lenses taking chromatic aberration into account[J]. *Solar Energy*, 2012, 86(3): 877-885.

(责任编辑 吕小红)