

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.11.017

高效大尺寸短焦距菲涅尔透镜设计

杨茂华¹, 田兆硕², 尹田田², 付石友²

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 150001 哈尔滨;

2. 哈尔滨工业大学(威海) 信息光电子研究所, 264209 山东 威海)

摘要: 为减少聚光太阳能系统中太阳能电池面积和聚光系统体积, 缩短系统纵向尺寸和降低系统成本, 采用分区方法设计大口径、短焦距、高聚光比的菲涅尔透镜。把圆形或方形菲涅尔透镜分成中心区、折射区及全反射区, 推导了分区法计算公式。用该方法设计了一个焦距比为 0.75、聚光比为 1000 的高聚光比菲涅尔透镜, 用 TracePro 软件对设计的菲涅尔透镜进行了光学仿真, 聚光效率可达 88.75%。该菲涅尔透镜具有焦距短、高聚光比、高效率、易加工等优点, 可降低系统的体积及成本。

关键词: 菲涅尔透镜; 太阳能; 分区; 光学设计

中图分类号: O439

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)11-0098-04

Design of Fresnel lens with high efficiency short focal length and large size

YANG Maohua¹, TIAN Zhaoshuo², YIN Tiantian², FU Shiyu²

(1. Research Institute of Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. Institute of Information Optoelectronics, Harbin Institute of Technology Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China)

Abstract: In order to reduce the area of solar cell, minimize the size and cut down the cost of the concentrator solar system, the partitioning method is adopted to design a Fresnel lens with high efficiency, short focal length and high concentrator ratio. The large round or square size Fresnel lens is separated into three parts: the central area, refractive area and total refractive area, and the computational equations of partitioning method are derived. A Fresnel lens is designed through this method, whose focal length and diameter ratio is 0.75 and concentration ratio is high up to 1000. TracePro simulation shows that the light concentrating efficiency of the designed Fresnel lens can be up to 88.75%. The Fresnel lens designed through partitioning method possesses the advantages of high optical efficiency, high concentration ratio and short focal length, and the cost and weight of concentrator solar cells system can be reduced.

Keywords: Fresnel lens; solar; partitioning methods; optical design

菲涅尔透镜是聚光太阳能系统中重要的光学部件, 已经广泛应用于聚光光伏系统中, 是国际上研究的热点^[1-5]。根据光学原理, 采用传统光折射原理设计的菲涅尔透镜, 在焦距一定时距离透镜中心越远, 锯齿角度越大, 反射损耗也随之增加^[6-11]。大尺寸菲涅尔透镜为减小反射损耗, 需要增加焦距, 使聚光太阳能系统整体尺寸变大, 因此增加了控制难度和系统成本。从菲涅尔透镜应用角度考虑, 平基面的菲涅尔透镜使用一般设计方法, 在透镜的焦距比大于 1.1 时才有较高的光学效率(85%左右), 尤其是平面朝外的透镜^[7]。这样针对大口径透镜, 其焦距、系统纵向尺寸就会随之增大, 因此设计高光学效率、短焦

距、高聚光比的大尺寸菲涅尔透镜具有重要意义。虽然弧形基面螺纹透镜适合尺寸较大而焦距较小的透镜, 但加工难度较大^[7]。

本文采用分区方法设计了高效、短焦距、高聚光比的菲涅尔透镜, 把大尺寸圆形或方形菲涅尔透镜分成中心区、折射区及全反射区。其中中心区为平凸透镜; 折射区为应用光折射原理的圆环锯齿; 全反射区为应用全反射原理的圆环锯齿。设计的菲涅尔透镜在缩小焦距的同时具有高聚光比、高聚光效率、厚度薄、加工容易等优点, 同时提高了聚光太阳能电池效率并降低了系统成本。

1 透镜设计

分区菲涅尔透镜结构如图 1 所示, 设计要求主要有高光学效率、高聚光比、焦距短和厚度薄。由于菲涅尔透镜在加工过程中锯齿角部分不可能达到理

收稿日期: 2014-10-14.

作者简介: 杨茂华(1963—), 男, 副教授.

通信作者: 杨茂华, yangmh_9@163.com.

论上的尖锐, 存在工艺性损耗, 为减小工艺性损耗需要减少锯齿数量即增加锯齿宽度, 另外中心区的平凸透镜直径尽量大也有助于提高光学效率. 在距离中心较远的位置采用全反射原理的圆环锯齿, 不仅可以降低光学损耗, 而且可以在透镜尺寸较大时缩短焦距. 为实现透镜重量轻、材料少及加工方便, 有必要尽量减小透镜厚度, 因此透镜的一个表面为平面, 另外一个表面的锯齿高度尽量小. 总之透镜的锯齿数量、高度、宽度互相制约, 需要合理选择以实现优化设计.

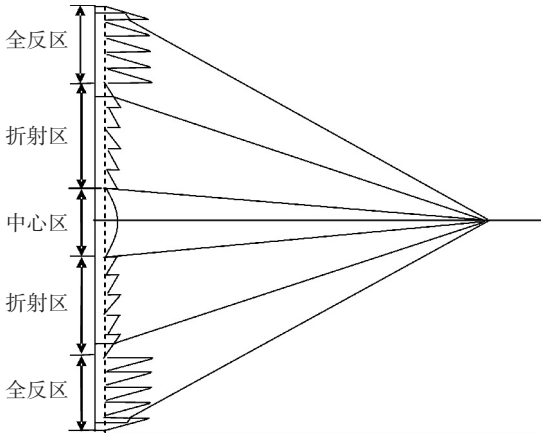


图 1 分区菲涅尔透镜结构图

1.1 中心区设计

中心区为平凸透镜, 由于没有锯齿而不存在工艺性损耗, 口径应尽可能大, 但是要求平凸透镜厚度尽量不超过锯齿高度. 实际上透镜厚度限制了中心区的直径, 由光学原理透镜公式得

$$\frac{n_1 - n_2}{R_1} + \frac{n_1 - n_2}{R_2} = \frac{1}{f}.$$

式中: R_1 与 R_2 分别为透镜两个表面半径, n_1 与 n_2 分别为透镜材料及空气折射率, f 为透镜焦距.

1.2 折射区设计

折射区应用光折射原理, 为减小反射光损耗, 要求锯齿角度小, 在齿宽一定时, 离中心越远则锯齿角度越大, 损耗也越大, 由此限制了锯齿数量. 其光路如图 2 所示, 图中 d_i 为距透镜中心第 i 个锯齿的底边宽度, D_i 为第 i 个锯齿中心距透镜中心的距离, Δd_i 为第 i 个锯齿出射光线的宽度, α_i 为第 i 个锯齿的角度, β_i 为第 i 个锯齿的入射光线偏向角, θ_i 为第 i 个锯齿出射光线与光轴的夹角, f 为透镜的焦距.

由图 2 可知

$$D_i = \frac{d_0}{2} + d_1 + d_2 + \cdots + d_{i-1} + \frac{d_i}{2}, \quad (1)$$

$$n_1 \sin \alpha_i = n_2 \sin \beta_i, \quad (2)$$

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{D_i}{f}\right), \quad (3)$$

$$\theta_i = \beta_i - \alpha_i, \quad (4)$$

$$\Delta d_i = \frac{d_i}{\cos(\alpha_i)} \sin(90^\circ - \beta_i). \quad (5)$$

由此得到

$$\tan(\beta_i - \alpha_i) = \frac{D_i}{f}, \quad (6)$$

$$\frac{\sin \beta_i \cos \alpha_i - \cos \beta_i \sin \alpha_i}{\cos \beta_i \cos \alpha_i + \sin \beta_i \sin \alpha_i} = \frac{D_i}{f}. \quad (7)$$

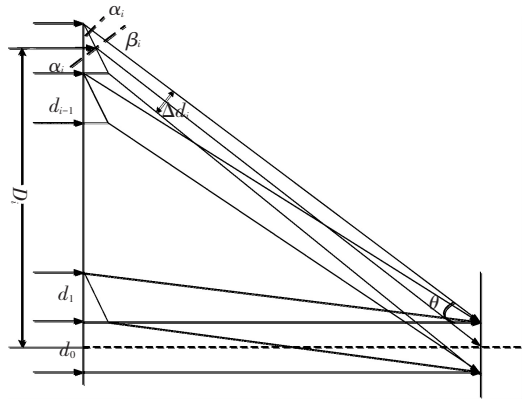


图 2 折射区菲涅尔透镜光路图 (光线垂直入射)

根据式 (1) ~ (7), 可以对给定透镜尺寸、焦距比的菲涅尔透镜进行设计, 以满足高倍聚光太阳能电池的需要.

1.3 全反射区设计

透镜焦距一定时, 在折射区距离透镜中心越远光损耗越大, 因此距离透镜中心一定尺寸时, 采用折射原理对光线进行汇聚会损失比较大的光能量, 可采用全反射原理解决这个问题. 当菲涅尔透镜的锯齿角度较大时, 垂直透镜的入射光将在透镜斜面发生全反射, 合理设计锯齿的宽度、高度及角度可使入射光汇聚到透镜焦点. 其光路原理如图 3 所示, 图中 d_i 为锯齿宽度, h 为锯齿高度, α 为锯齿邻近于底边的角度, δ_1 为入射光线经过斜面全反射后入射到锯齿垂直边的入射角, δ_2 为全反射光线从锯齿垂直边出射的输出角, r_i 为第 i 个全反射锯齿半径. 设太阳光垂直透镜底边入射, 根据几何光学原理, 可列出如下关系式:

$$\tan \delta_2 = \frac{f - h}{r_{i-1} + d_i}, \quad (8)$$

$$n_1 \sin \delta_1 = n_2 \sin \delta_2, \quad (9)$$

$$\delta_1 = 2\alpha_i - 90^\circ, \quad (10)$$

$$d_i = h \cdot \cot \alpha_i. \quad (11)$$

通过式 (8) ~ (11) 可以计算出全反区锯齿的齿宽、齿高、锯齿角度等基本参数. 但在实际应用中应注意, 由于全反区锯齿较高, 因此经过锯齿斜面全反射的光束具有一定宽度, 可能受到前一级锯齿的

阻挡. 为避免阻挡则要求从锯齿垂直面出射光束宽度 Δdh 应小于前一级锯齿宽度 d_i , 即 $\Delta dh < d_{i-1}$. 由 $h_i = d_i \tan \delta_1$ 可得出 $\Delta dh = (h - h_i) \cotan \delta_2$.

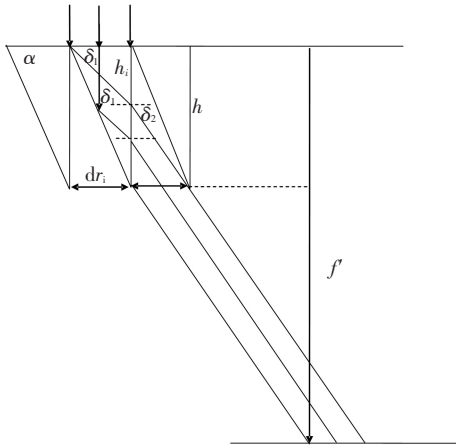


图 3 全反射区菲涅尔透镜光路图(光线垂直入射)

2 设计结果

目前高倍聚光菲涅尔透镜设计的焦径比极限一般为 1.2 左右, 焦距越小透镜距离电池接收面距离越短, 则可以降低机械部分承载重量并可以降低成本, 但是太小的焦径比会增加光损耗. 采用分区设计的高倍聚光透镜焦径比可达 0.75, 光损耗控制在 10% 以内. 设计基本要求为: 聚光比 1 000 倍、透镜尺寸 325 mm×325 mm、焦距 245 mm. 设计中分为中心区、折射区、全反射区. 为减少锯齿加工损耗, 中心区不采用锯齿结构, 而采用平凸透镜结构, 要求直径越大越好, 但是透镜厚度最大为全反区锯齿高度, 因此限制了透镜尺寸; 折射区设计重点考虑在有限锯齿高度情况下尽量增加锯齿宽度, 以减小锯齿数量, 从而减小工艺性损耗, 因此固定锯齿宽度, 但锯齿高度会发生变化; 全反射区锯齿高度较高, 因此设计中重点考虑限制锯齿高度并且前一级锯齿不应阻挡后一级输出光束. 根据以上设计思路, 设计结果部分参数如表 1 表示.

表 1 分区高倍聚光透镜设计结果

个数		锯齿顶角		锯齿高度	
折射区	全反射区	折射区	全反射区	折射区	全反射区
1	1	12.190	65.477	0.432 1	1.368 6
5	20	16.234	64.412	0.582 3	1.436 6
10	40	20.850	63.298	0.761 7	1.509 0
15	60	24.930	62.197	0.929 6	1.581 9
20	70	28.467	61.519	1.084 4	1.627 6
30	80	34.046	60.967	1.351 4	1.665 2
40	86	37.973	60.483	1.561 1	1.698 5

注: 中心区透镜直径 40 mm, 曲率半径 100.450 mm; 折射区固定锯齿宽度 2 mm; 全反射区固定高度 3 mm.

3 设计结果仿真

利用分区设计方法得到高聚光比菲涅尔透镜的分区结构参数, 运用 SolidWorks 软件三维建模, 将其导入光学软件中进行光线追迹仿真. 之后采用 TracePro 软件进行仿真, 仿真系统结构图如图 4 所示. 在菲涅尔透镜前 10 mm 处设置表面光源, 模拟太阳光. 入射光的发散角设为 32', 太阳表面温度设为 6 000 K. 表面光源波段数为 15 个, 分别为 400、450、500、550、600、650、700、750、800、850、900、950、1 000、1 050、1 100 nm, 追迹光线条数为 35 万根, 太阳发出的总光通量为 144.29 W.

菲涅尔透镜的材质已经设置为 PMMA 材质, 表面光源与菲涅尔透镜的尺寸均为 325 mm×325 mm, 厚度均为 2 mm. 接收面即光伏电池在距菲涅尔透镜 245 mm 处, 光线从第一个绿面板的右侧面发出, 经过菲涅尔透镜, 然后会聚在光伏电池的接收面上. 电池接收面的光线分布情况如图 5 所示, 图中接收面上光照度最小值为 0, 最大值为 1.3178e+007 W/m², 平均值为 1.2807e+006 W/m². 可计算出光斑均匀度为 17.7%, 总光通量为 128.07 W, 光通量/发射光通量为 0.887 58, 入射光线为 323 247 条. 可以看出, 采用分区设计的菲涅尔透镜将入射光线会聚到接收面中心区域, 对入射光线的会聚效果明显增强, 光学效率可达到 88.8%. 因为按点聚焦设计菲涅尔透镜, 所以入射光线汇聚后比较集中, 光斑均匀度较差, 实际应用时需要设计二次聚光镜改善光斑的均匀性.

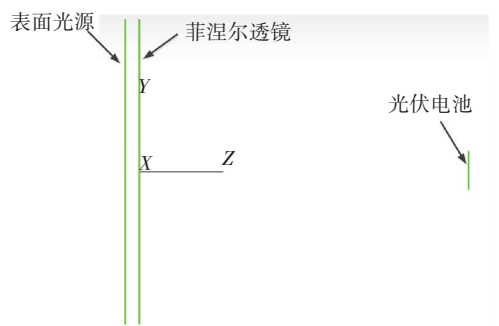
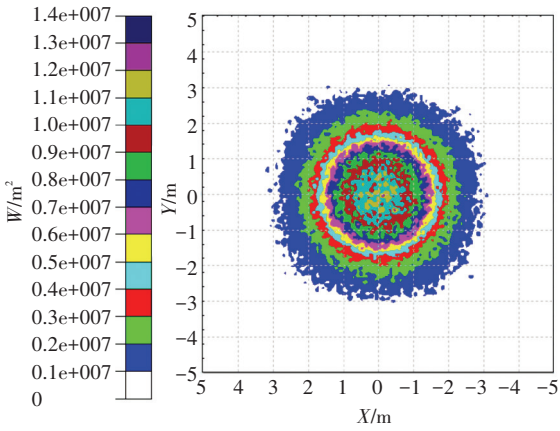


图 4 仿真系统结构

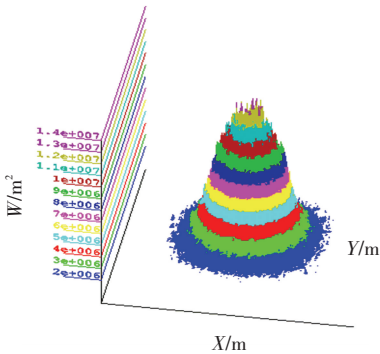
4 结 语

采用分区法设计了平基面焦径比为 0.75 的大口径短焦距菲涅尔透镜, 并利用 TracePro 进行了光线追迹仿真, 评析了聚光效果与光照均匀度. 该透镜对光线的汇聚效果好, 1 000 倍聚光比时聚光效率达到 88.75%. 与一般方法设计的菲涅尔透镜相比, 该透镜具有高聚光比、短焦距、薄厚度、易加工等优点, 可以降低聚光太阳能系统体积及成本.



最小值0,最大值:1.3178e+007
 平均值:1.2807e+006
 总光通量:128.07 W光通量
 发射光通量:0.88758, 323247 Incident 条光线

(a) 光照度分布平面图



最小值0,最大值:1.3178e+007
 平均值:1.2807e+006
 总光通量:128.07 W光通量
 发射光通量:0.88758, 323247 Incident 条光线

(b) 光照度分布立体图

图 5 接收面光照度分布图

参考文献

[1] MILLER D C, KURTZ S R. Durability of Fresnel lenses: a review specific to the concentrating photovoltaic application [J]. Solar Energy Materials&Solar Cells, 2011, 95 (8): 2037-2068.

[2] YEH N. Analysis of spectrum distribution and optical losses under Fresnel lenses [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 2926-2935.

[3] LLORENTE J, BALLESTRIN J, VAZQUEZ A J. A new solar concentrating system: description characterization [J]. Solar Energy, 2011, 85(5): 1000-1006.

[4] XIE W T, DAI Y J, WANG R Z, et al. Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 2588-2606.

[5] WU Y P, EAMES P, MALLICK T, et al. Experimental characterisation of a Fresnel lens photovoltaic concentrating system [J]. Solar Energy, 2012, 86(1): 430-440.

[6] 姚叙红, 朱林泉, 薛忠晋, 等. 菲涅尔透镜提高太阳能利用率的研究 [J]. 红外, 2009, 30(3): 30-34.

[7] 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.

[8] 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, 272.

[9] 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): 24-26.

[10] 汪韬, 赛小锋, 李晓婷, 等. 新型菲涅尔线聚焦聚光太阳能电池组件研究 [J]. 光子学报, 2003, 32(5): 625-627.

[11] 陈志明. 聚菲涅尔透镜聚光性能研究 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2013.

(编辑 王小唯)