

· 光学设计与制造 ·

太阳能采集用 1 000 mm 口径菲涅耳透镜设计

余随浙^{1,2}, 吴晗平^{1,2}, 熊衍建^{1,2}, 吕照顺^{1,2}, 周 伟^{1,2}

(1. 武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205; 2. 湘潭大学材料与光电物理学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:针对太阳能利用率较低、光伏发电成本过高的问题,从聚光器的角度出发,采用菲涅耳透镜对太阳光进行聚焦.在分析菲涅耳透镜结构的基础上,提出了透镜主要性能指标,设计了一个满足要求的 1 000 mm 口径透镜,对聚光时透镜位置的放置进行了讨论.该设计具有一定的通用性,可以适用于其他大口径的菲涅耳透镜设计,对于促进太阳能采集发展具有重要意义.

关键词:太阳能;聚光器;菲涅耳透镜;设计

中图分类号:TK519

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2010)05-0035-04

Design of 1000mm Diameter Fresnel Lens For Collecting Solar Energy

YU Sui-xi^{1,2}, WU Han-ping^{1,2}, XIONG Yan-jian^{1,2}, LV Zhao-shun^{1,2}, ZHOU Wei^{1,2}

(1. Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Faculty of Material and Photo-electronic Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: Because of the low utilization of solar energy and the high cost of photovoltaic power, Fresnel lens were used to focus sunlight from the point of concentrator. On the basis of the analysis of the structure of Fresnel lens, the evaluation indexes of the lens were put forward and a 1 000 mm diameter Fresnel lens which can meet the demands was designed, the location of the lens when it concentrates light was also discussed. The design has a certain universal, which can be applied to other large diameter Fresnel lens design, it is important to promote the development of solar energy collection.

Key words: solar energy; concentrator; fresnel lens; design

太阳能光伏发电已有 50 多年历史,提高太阳能利用率、降低成本是目前主要研究方向.利用性价比高的聚光器对太阳光进行聚焦,减少了昂贵的太阳能电池使用,从而使太阳能光伏发电总成本大幅降低^[1].因此,聚光器的运用与设计显得尤为重要.

菲涅耳透镜一般是由一系列同心棱形槽构成,实则由平凸透镜演变而来,与普通透镜一样具有汇聚光线的功能,且光强分布较均匀^[2].为此设计一个由 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)材料压制而成的大口径的菲涅耳透镜,使其具有厚度薄、质量轻、孔径大等特点,是非常必要的.

1 菲涅耳透镜结构

19 世纪 20 年代,法国物理学家菲涅耳提出一个假设:连续光学表面的成像特性,主要取决于光学表面的曲率,而透镜轴向厚度是次要的因素,在大多数情况下,透镜厚度的增加是由于表面曲率或口径的要求所造成的.将透镜两个表面之间的厚度减少,光学元件仍能把光线聚焦到原来的厚透镜焦点上^[3].

如图 1 所示,图 1a 为平凸透镜,光线通过透镜后,在与空气的交界面处发生折射.对平凸透镜进行

收稿日期:2010-08-31

基金项目:技术基础项目子课题(2008-263)

作者简介:余随浙(1988-),男,湖北随州人,硕士研究生,主要研究方向为太阳能光学系统设计.吴晗平(1964-),男,湖南澧县人,工学博士,教授,博士生导师.主要研究方向为光电系统(装备)总体技术及设计.

不断的纵向分割,其中阴影部分并未对光线的传播造成影响,将其挖去,将剩余部分重新排列在共同基面上,如图 1b 所示,便可得到菲涅耳透镜.图 1b 所示的小棱镜(即锯齿)在三维空间便为同心棱形环带,每一环带都相当于一独立折射面,使入射光线汇聚到同一焦点上.

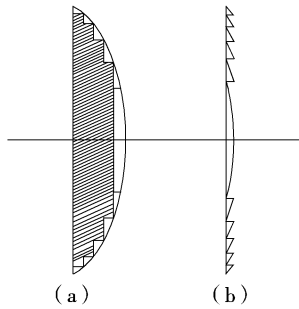


图 1 平凸透镜与菲涅耳透镜

2 透镜主要指标要求

- (1) 口径: $1\ 000 \pm 5\ \text{mm}$;
- (2) 材料透过率: $\geq 90\%$;
- (3) α 值: $\leq 50^\circ$;
- (4) k 值: $0.27 \sim 0.87$;
- (5) 槽宽: $0.05 \sim 2.5\ \text{mm}$.

要获得高聚光度首先要保证投射到菲涅耳透镜上的光线尽可能多的通过,减少反射损失、吸收和散射损失,因而要保证透镜材料具有一定的透过率.

α 为小棱镜顶角值. α 值将决定光线偏离原来方向的角度,受到口径与焦距比值的影响.

k 为透镜相对口径值的一半,光线从光密介质进入光疏介质时,入射角大于临界角时,会发生全反射,根据光学计算 k 值就必须小于 $\sqrt{n_D^2 - 1}$, n_D 为材料折射率.

槽宽越小,透镜聚光性能越好,但受加工的限制,齿距不宜太小.一般为每毫米 2 到 8 个槽,精密加工可达每毫米 20 个槽左右^[4].

3 菲涅耳透镜设计及结果分析

设计前提出了设计指标,在指标所约束的范围内进行后续工作.消球差是菲涅耳透镜的固有特点,因此,设计部分未对成像质量进行评价^[5],而是计算透镜结构等参数,包括口径、 k 值、槽宽、 α 值.

3.1 口径

通过实际制造工艺和加工技术来确保菲涅耳透镜口径达到 $1\ 000 \pm 5\ \text{mm}$.

3.2 材料选择

可用于制作菲涅耳透镜的光学材料主要有光学玻璃、光学塑料和透明橡胶三类.基于需要高透过率的材料来制作透镜,文中选取 PMMA,它是热塑性的光学材料,具有优良的耐气候性,能在热带气候下暴晒多年;透明度和色泽变化很小;能耐酸、碱、酯的侵蚀,绝缘性好.最大缺点是热变形大,表面硬度较差,易于擦伤.PMMA 的各项参数^[6]如表 1 所示.

表 1 PMMA 技术参数

折射率 $n_D(589.3\ \text{nm})$	1.491
折射率 $n_C(656.3\ \text{nm})$	1.488
折射率 $n_F(486.1\ \text{nm})$	1.496
色散系数 γ_d	57.2
最高长期工作温度/ $(^\circ\text{C})$	92
热导率/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	0.21
透过率/ $(\%)$	92

4 棱镜顶角计算

当平行光线垂直入射到菲涅耳透镜平面时,其光路如图 2 所示.对于小棱镜,结合几何关系与 Snell 定律,可知光线偏向角 β_i 为^[7]

$$\beta_i = \arcsin(n \sin \alpha_i) - \alpha_i \quad (1)$$

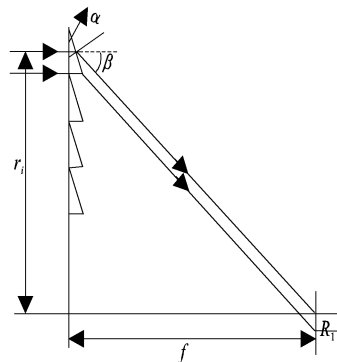


图 2 光线垂直入射时菲涅耳透镜光路图

由图 2,在环带间距相等,并忽略小棱镜的高度情况下,可得出光线偏向角 β_i 还具有如下关系

$$\tan \beta_i = \frac{r_i}{f_i} = k_i \quad (2)$$

整理式(1)和式(2),则可得出棱镜顶角计算公

式^[8]

$$\alpha_i = \tan^{-1} \frac{r_i}{n \sqrt{f^2 + r_i^2} - f} = \tan^{-1} \frac{k_i}{n \sqrt{k_i^2 + 1} - 1} \quad (3)$$

式中, α_i 为第 i 个小棱镜的顶角值; r_i 为第 i 个小棱镜中心距透镜中心距离; n 为材料折射率; f 为菲涅耳透镜焦距; k_i 为第 i 个小棱镜的 k 值。

由式(3)则可计算出每个小棱镜的顶角, 在 $n = 1.491, k = 0.5$ (由下文所得) 时, 计算出最外层小棱镜的顶角为 36.86° 。利用 MATLAB 即可计算出其他小棱镜顶角。

5 焦斑半径计算

当平行光线斜入射到菲涅耳透镜平面时, 将会造成光斑扩展, 其光路图如图 3 所示, R_1 为光线垂直入射时光斑半径, R_2 为光线斜入射时附加光斑尺寸。对于跟踪系统, 其最大跟踪误差为 $32'$ (即太阳平均视角), 并不能消除, 这对于聚焦光斑的影响至关重要。光线在平面和倾斜面分别发生折射, 入射角 $\alpha' = 16'$, 由 Snell 定律可得出射光线的折射角为

$$\theta_{i1} = \sin^{-1} [n \sin(\alpha_i + \sin^{-1} \frac{\sin \alpha'}{n})] \quad (4)$$

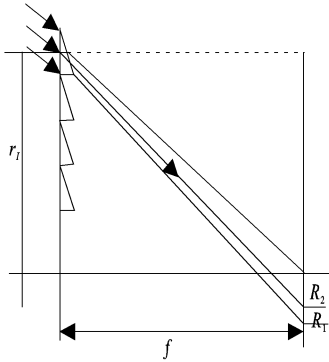


图 3 光线斜入射时菲涅耳透镜光路图

由图 3 中的几何关系可推得

$$R_1 = \frac{b \cos \theta_{i1}}{2 \cos \alpha_i \cos(\theta_{i1} - \alpha_i)} \quad (5)$$

$$R_2 = (f - \frac{b}{2} \tan \alpha_i) [\tan(\theta_{i1} - \alpha_i) - \tan(\theta_i - \alpha_i)] \quad (6)$$

则有焦斑半径 $R = R_1 + R_2$, 对于菲涅耳透镜有最边缘的棱镜所形成的焦斑尺寸最大, 因此焦斑尺寸为

$$R = \frac{b \cos \theta_1}{2 \cos \alpha \cos(\theta_1 - \alpha)} + (f - \frac{b}{2} \tan \alpha) [\tan(\theta_1 - \alpha) - \tan(\theta - \alpha)] \quad (7)$$

$$\alpha) - \tan(\theta - \alpha)] \quad (7)$$

式中, $\theta_1 = \sin^{-1} [n \sin(\alpha + \sin^{-1} \frac{\sin \alpha'}{n})]$, $\alpha' = 16'$;

$$\alpha = \tan^{-1} [k / (n \sqrt{k^2 + 1} - 1)];$$

$$\theta = \sin^{-1} (n \sin^{-1} \alpha).$$

由式(7)即可计算非垂直入射焦斑半径。在 $n = 1.491, b = 0.2 \text{ mm}, k = 0.5$ (由下文所得) 时计算得焦斑半径为 10.6 mm 。

6 k 值确定

菲涅耳透镜的几何聚光比 X 为菲涅耳透镜面积 S_i 与光斑面积 S_o 之比, 如式(8)所示

$$X = S_i / S_o \quad (8)$$

对于 k 值, 从菲涅耳透镜几何聚光比的角度进行优化, 选取材料折射率 $n = 1.491$, 槽宽 $b = 0.2 \text{ mm}$, 透镜口径 $D = 1\ 000 \text{ mm}$, 由于 $k < \sqrt{n_D^2 - 1}$, 通过计算确定优化范围为 $0.27 \sim 0.87$ 。根据式(7)、式(8), 由 MATLAB 绘出几何聚光比与 k 值关系如图 4 下端曲线。改变透镜口径, 使其分别为 $1\ 500 \text{ mm}$ 和 $2\ 000 \text{ mm}$, 得到关系如图 4 中间曲线和上端曲线。分析可知, 口径大小变化对透镜的最优 k 值 (即最佳几何聚光比所对应的 k 值) 产生的影响并不是很明显。几何聚光比是从理论上进行模拟, 由于透镜的反射损失、吸收损失、散射损失的存在^[9], 与实验的聚光比会有一些的出入, 因此最佳 k 值的取值区域将会发生偏移, 在此设定 k 值为 0.5 , 则焦距为 $1\ 000 \text{ mm}$ 。

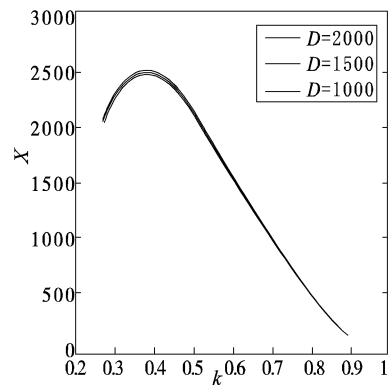


图 4 几何聚光比与 k 值关系 (口径不同)

7 槽宽确定

当选取材料折射率 $n = 1.491$, 透镜口径 $D = 1\ 000 \text{ mm}$, 槽宽分别为 $0.1, 0.2, 0.5 \text{ mm}$, k 值的优化范围为

0.27~0.87,根据式(7)、式(8),由 MATLAB 绘出几何聚光比与 k 值关系如图 5 上端曲线、中间曲线、下端曲线.分析可知,槽宽越小,几何聚光比越大.槽宽的变化,对于最优 k 值而言,受影响程度不是很明显.综上可得,对于不同的口径、槽宽,最优 k 值却都相同.根据实际情况定 b 值为 0.2 mm.

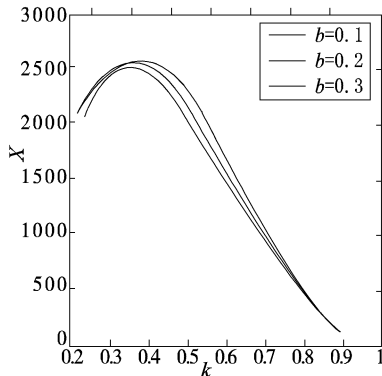


图 5 几何聚光比与 k 值关系(槽宽不同)

8 设计结果

综合菲涅耳透镜设计部分,归纳出透镜主要参数如表 2 所示.分析数据可知,满足设计时所提出的技术指标,具有可行性.

表 2 菲涅耳透镜设计结果

性能类别	指标要求值	设计值
口径/mm	$1\ 000 \pm 5$	$1\ 000 \pm 5$
材料透过率	$\geq 90\%$	92%
α 值	$\leq 50^\circ$	≤ 36.861
k 值	0.27~0.87	0.5
槽宽/mm	0.05~2.5	0.2

9 设计分析与讨论

光线垂直入射到菲涅耳透镜时,透镜有两种放置方式,即菲涅耳环带分别位于迎光面和背光面.对于第一种放置方式,光路图如图 6 所示,光线 1 通过小棱镜后在 AB 面上恰好能发生折射,最终汇聚到焦平面上.入射到 CD 面上的光线主要经过折射—反射—折射过程后,将会发散出去,这部分光线并未得到利用.对于第二种放置方式,将不会出现类似的传播光线,聚光效率相比而言会得到提高.

从界面反射损失的角度来讲:第一种放置方式,

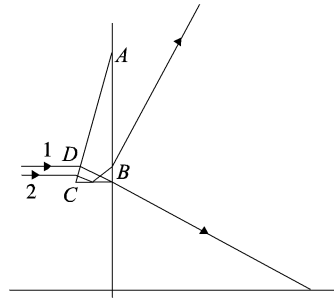


图 6 环带位于迎光面时光路图

两次折射时的入射角都为锐角;第二种放置方式两次折射时的入射角为零和锐角.利用菲涅耳公式理论推算可得,第二种放置方式的反射损失较小.

因此,比较而言,菲涅耳环带位于背光面时光学效率要高.

10 结 论

分析了菲涅耳透镜结构特点,提出设计主要指标,通过计算 α 值、焦斑半径、聚光比、 k 值、槽宽,设计出一个 1 000 mm 口径的菲涅耳透镜,且满足指标要求.从非聚焦光线和反射损失两因素,对透镜的放置位置进行了讨论.该设计过程同样适用于其他口径菲涅耳透镜的设计.

参考文献

- [1] 刘华,卢振武,朱瑞,等.聚光光伏系统的发展及未来趋势[J].中国光学与应用光学,2008,1(1):49-56.
- [2] Ryu K, Rhee JG, Park KM. Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system[J]. Solar Energy, 2006, 80(12):1580-1587.
- [3] 姚涵春.螺纹透镜聚光灯与菲涅耳原理[J].艺术科技, 2002.
- [4] 王之江,顾培森.实用光学技术手册[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [5] 吴晗平.光电系统设计基础[M].北京:科学出版社, 2010.
- [6] 舒朝谦,田爱玲,杭凌侠,等.现代光学制造技术[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [7] 孔繁建.用于聚光太阳能电池的菲涅耳透镜[J].太阳能学报,1986,7(4):407-412.
- [8] 郭孝武.菲涅耳透镜统一设计方法[J].太阳能学报, 1991,12(4):423-426.
- [9] 石顺祥.物理光学与应用光学[M].西安:西安电子科技大学出版社,2000.