

注水型菲涅耳聚光器的设计和初步试验

肖君*, 曹云, 韩利峰

中国科学院上海应用物理研究所仪控工程部, 上海 201800

摘要 研发低成本的聚光器是大规模降低太阳能热利用成本的重要途径之一。为了降低材料成本, 提出注水型菲涅耳聚光器的设计新思路。注水型菲涅耳聚光器采用由薄平板玻璃组成的中空三角形棱柱, 通过在中空部分注入纯净水来减少透镜材料的使用, 从而降低成本。研究该聚光器的设计理论并建立相应的光学模型, 采用蒙特-卡罗光线追迹方法研究不同太阳入射角度下聚光器的光学性能, 并与传统菲涅耳聚光器进行对比。搭建试验样机并进行初步的聚光实验。研究结果表明, 相较于传统菲涅耳聚光器, 注水型菲涅耳聚光器虽然聚光效果有一定的损失, 聚光效率平均损失为 5.40%, 但试验样机具有明显的聚光效果, 光斑宽度与理论情况也较吻合, 具备工程应用的可行性。

关键词 光学设计; 太阳能热利用; 菲涅耳聚光器; 聚光器设计; 光学性能

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1422002

Design and Preliminary Test of Water-Injected Fresnel Concentrators

Xiao Jun*, Cao Yun, Han Lifeng

*Instrument & Control Engineering Department, Shanghai Institute of Applied Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

Abstract The development of low-cost concentrators is one of the important ways to reduce the cost of solar thermal utilization on a large scale. In order to reduce the material cost, a new design idea of water-injected Fresnel condenser is proposed. The water-injected Fresnel condenser adopts a hollow triangular prism composed of thin flat glass, and the use of lens materials is reduced by injecting pure water into the hollow part, thereby reducing the cost. The design theory of the concentrator is studied and the corresponding optical model is established. Monte Carlo ray tracing method is used to study the optical performance of the concentrator under different sun incident angles, and compared with the traditional Fresnel concentrator. Build a test prototype and conduct a preliminary light gathering experiment. The research results show that, compared with the traditional Fresnel concentrator, although the water-injected Fresnel concentrator has a certain loss of concentrating effect, the average loss of concentrating efficiency is 5.40%, but the experimental prototype has obvious concentrating effect, the light spot width is also in good agreement with the theoretical situation, and it is feasible for engineering applications.

Key words optical design; solar thermal application; Fresnel concentrators; concentrator design; optical performance

OCIS codes 220.4830; 220.1770; 350.6050; 080.4298

1 引言

太阳能热发电与低成本且大规模的蓄热技术的结合能够提供稳定的高品质电能^[1], 该方式是可再

生能源发电技术中最有前途的发电方式之一。然而现阶段相较于光伏发电实现平价上网^[2-3], 聚光成本的居高不下成为制约太阳能热发电商业化进程的关键技术障碍之一。太阳能聚光器是太阳能热发电站

收稿日期: 2020-12-24; 修回日期: 2021-02-07; 录用日期: 2021-02-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA21020202)

通信作者: *xiaojun@sinap.ac.cn

的关键部件之一,其成本占总成本的 40% 以上,因此开发低成本的太阳能聚光器是大规模降低太阳能热发电成本的重要途径之一。

目前,太阳能热利用领域中的聚光器一般为大型的玻璃反射镜,为了便于加工制作,一般采用拼接聚光型结构。由于太阳光的入射角度随时间不断变化,为此聚光器需配置一维或者二维的自动跟踪系统。目前,反射型聚光器的制备技术成熟,但经过多年优化后成本的下降空间有限。在太阳能热利用领域,关于透射型聚光器的研究却很少,目前使用最广的透射型太阳能聚光器为非涅耳透镜。非涅耳透镜由法国物理学家 Augustin 于 1822 年发明^[4],采用由多个同轴排列或平行排列的棱镜序列组成的不连续曲面取代了一般透镜的连续球面,通常由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等透明有机材料制成,具有透光率高、质量轻、易于量产、成本低和结构简单等独特优势。传统的平板型非涅耳透镜一般是基于成像光学原理设计的,近似平行的太阳光经过非涅耳透镜折射后会聚于焦点处。根据聚焦方式的不同,非涅耳透镜可分为线聚焦非涅耳透镜和点聚焦非涅耳透镜,其中线聚焦非涅耳透镜的聚光比能够达到 100 左右,而点聚焦非涅耳透镜的聚光比通常能够达到 300~1000,甚至更高。为了改善非涅耳透镜的聚光性能,科研人员又提出了基于非成像原理的非涅耳透镜^[5]和具有特殊面形的非涅耳透镜,如拱型非涅耳透镜^[6]和圆顶型非涅耳透镜^[7-8]。在实际应用过程中,基于单波长设计的非涅耳透镜存在色散以及焦平面处的光强分布不均匀等缺点,因此近年来国内外学者一直致力于研究实现均匀聚光的新型非涅耳聚光器。目前,优化和实现非涅耳透镜均匀聚光的方法主要有两种。一是通过增加二次聚光元件^[9-11],可以获得较为均匀的光强分布;二是优化和改进非涅耳透镜的结构,从而改善光强分布的均匀性,如多焦点设计^[12-14]和复合型设计等。由于非涅耳透镜具有聚光比高、结构简单和成本低廉的优点,因此广泛应用于聚光光伏(Concentrated Photovoltaics, CPV)领域^[15-16],但在光热利用领域却鲜有报道。光热利用领域中要求单个聚光器的尺寸更大,然而随着非涅耳聚光器口径的增大,透镜的纹距也会增大,单个透镜螺纹的厚度就会越大,则所用材料就会越多,最终导致成本增加,而更高的成本反过来限制了透射型非涅耳聚光器在太阳能光热利用领域中的大规模推广和应用,因此需要迫切开发大尺寸且低成本的非涅耳聚光器。

本文研究低成本的太阳能聚光器并提出注水型非涅耳聚光器的设计新思路,研究新型聚光器的设计理论以建立相应的光学模型,开发原理样机并进行初步试验,验证新型聚光器在实际工程应用中的可行性。本文的研究为太阳能热利用领域中低成本透射型聚光器的开发提供一种可能的探索。

2 设计理论

为了开发低成本的太阳能聚光器,在平板线性非涅耳聚光器^[17-18]和相关设计理论^[19]的基础上,本文提出一种注水型非涅耳聚光器。以纯净水作为透光介质来代替钢化玻璃或其他透明有机材料,从而极大地降低大尺寸透射型非涅耳聚光器的成本。注水型非涅耳聚光器的示意图如图 1 所示。聚光器由一系列的直角棱柱组成,直角棱柱由三块透明平板玻璃组成,中空部分注满纯净水,纯净水作为透光介质用来对太阳光进行折射聚焦。当太阳光沿着注水型非涅耳聚光器的光轴入射到聚光器上时,三角棱柱中的纯净水会使光线发生折射,而折射光线会聚到聚光器的焦线处的接受靶上。

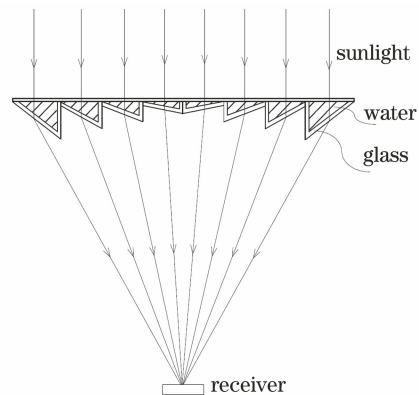


图 1 注水型非涅耳聚光器的示意图

Fig. 1 Schematic of water-injected Fresnel concentrator

注水型非涅耳聚光器中某一注水直角棱柱的光线如图 2 所示,其中 n_1 为水的折射率, n_2 为玻璃的折射率, n_3 为空气的折射率,虚线为界面法线。太阳光线在空气、玻璃和纯净水三种介质的表面经过多次折射后会聚于焦点处。

当太阳光垂直入射时,在空气和玻璃以及玻璃和水的界面处的入射角为 0° ,因此光线不发生折射。随后光线在水和玻璃的界面处发生折射,根据折射定律可知

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

同理,在玻璃和空气的界面处,根据折射定律可知

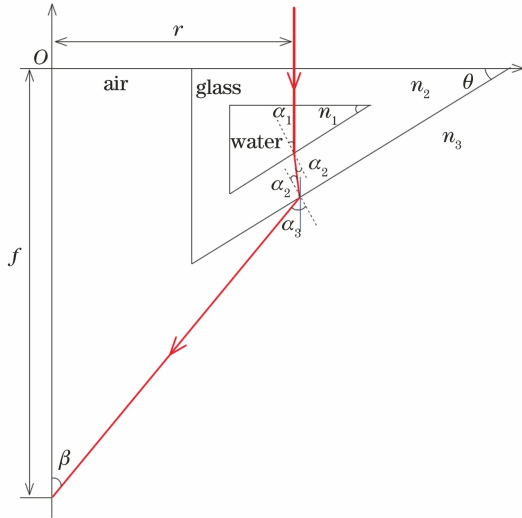


图 2 注水直角棱柱中的光线示意图
Fig. 2 Diagram of light in water-injected rectangular prism

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_3} = \frac{n_3}{n_2} \quad (2)$$

联立(1)式和(2)式,可得

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_3} = \frac{n_3}{n_1} \quad (3)$$

根据图 2 的几何关系,可得

$$\begin{cases} \alpha_1 = \theta \\ \alpha_3 = \alpha_1 + \beta \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ 为注水型菲涅耳聚光器中某一小棱柱的斜边与水平面的倾角; β 为出射光线与聚光器光轴的夹角。将(4)式代入(3)式,可得

$$n_1 \sin \theta = n_3 \sin(\theta + \beta) \quad (5)$$

将(5)式整理后,可得

$$\tan \theta = \frac{n_3 \sin \beta}{n_1 - n_3 \cos \beta} \quad (6)$$

依据图 2 的几何关系,可得

$$\sin \beta = \frac{r}{\sqrt{r^2 + f^2}} \quad (7)$$

$$\cos \beta = \frac{f}{\sqrt{r^2 + f^2}} \quad (8)$$

式中: r 为聚光器中某一小棱柱的斜边中心与聚光器中心光轴之间的距离; f 为聚光器的焦距。由于聚光器中锯齿的厚度相对于 f 来说是小量,因此在计算过程中忽略不计。将(7)式和(8)式代入(6)式并进行简化,可得

$$\tan \theta = \frac{n_3 r}{n_1 \sqrt{r^2 + h^2} - n_3 h} \quad (9)$$

式中: h 为某一注水小棱柱的斜边中心与聚光器焦

平面之间的距离,满足

$$h = f - \frac{w_i}{2} \quad (10)$$

式中: w_i 为某一注水小棱柱 i 的高度,计算过程中可以近似等于前一个小棱柱的高度。综上,得到了注水型菲涅耳聚光器中 θ 与 r 、 h 、 n_1 和 n_3 之间的关系。选定合适的小棱柱的宽度和平板玻璃的厚度,即可对注水型线性菲涅耳聚光器进行建模。由(9)式可知,小棱柱的倾角随着 r 值的增加不断增大。由于太阳光在小棱柱的最后一个面发生折射的过程是从光密介质到光疏介质,因此可能会出现全反射的现象,全反射的临界角 θ_c 可表示为

$$\theta_c = \arcsin(1/n_2) \quad (11)$$

由图 2 的几何关系可知 $f/r > \tan \theta_c$,则对于菲涅耳聚光器,系统的 F 数(聚光器的焦距与口径的比值)的取值范围为

$$F > \tan \theta_c / 2 \quad (12)$$

假设平板玻璃的折射率 $n_2 = 1.47$,则 $F > 0.46$,即当菲涅耳聚光器的焦距一定时,则聚光器的口径不能无限大,在设计聚光器的过程中需注意到这种限制。

3 光学模拟

3.1 注水型菲涅耳聚光器的模拟分析

基于设计理论设计焦距为 2000 mm 的注水型平板菲涅耳聚光器。聚光器的结构模型以及局部放大图如图 3 所示,其中平板玻璃的厚度为 1.5 mm,齿宽为 50 mm,齿数为 40,水的折射率为 1.33,玻璃的折射率为 1.47,聚光器的尺寸为 2060 mm × 1000 mm,接受靶的尺寸为 100 mm × 1000 mm,太阳光垂直于透镜平面入射,发散角为 9.3 mrad。使用光学仿真软件 TracePro 对注水型平板菲涅耳聚光器进行光学建模,并采用蒙特-卡罗光线追迹法对焦平面上的光斑能流分布进行模拟。聚光器的详细设计参数和光学模拟参数如表 1 所示。

图 4 为注水型菲涅耳聚光器的光学模拟情况,其中图 4(a)为光线图,图 4(b)为模拟得到接受靶上的光斑能流分布情况。从图 4(a)可以看到,太阳光经过注水的直角三棱柱折射后会聚于接受靶上。从图 4(b)可以看到,对于注水型菲涅耳聚光器,模拟得到焦平面处接受靶上的光斑总功率为 1704.1 W,能流峰值为 36286 W/m²,聚光效率为 85.20%,局部聚光比达到 36.3。从光学模拟结果来看,注水型菲涅耳聚光器具有较好的聚光性能。

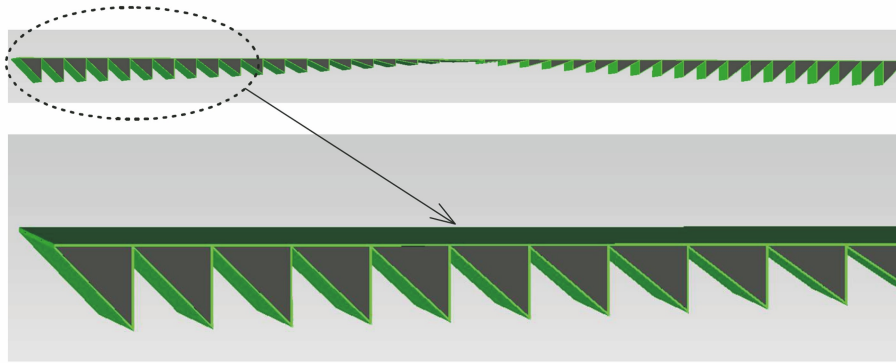


图 3 注水型菲涅耳聚光器的结构模型和局部放大图

Fig. 3 Structural model and partial enlargement of water-injected Fresnel concentrator

表 1 注水型菲涅耳聚光器的结构参数和模拟参数

Table 1 Structure parameters and simulation parameters of water-injected Fresnel concentrator

Parameter	Value
Focal length of concentrator /mm	2000
Aperture (or length) of concentrator /mm	2060
Width of concentrator /mm	1000
Tooth width of Fresnel concentrator /mm	50
Number of teeth of Fresnel concentrator	40
Thickness of flat plate /mm	1.5
Refractive index of glass	1.47
Refractive index of water	1.33
Refractive index of air	1.0
Width of receive target /mm	100
Length of receive target in focal line direction /mm	1000
Initial sunlight incident angle /($^{\circ}$)	0
Sunlight divergence angle /mrad	9.3
Direct normal irradiance of sunlight /($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	1000

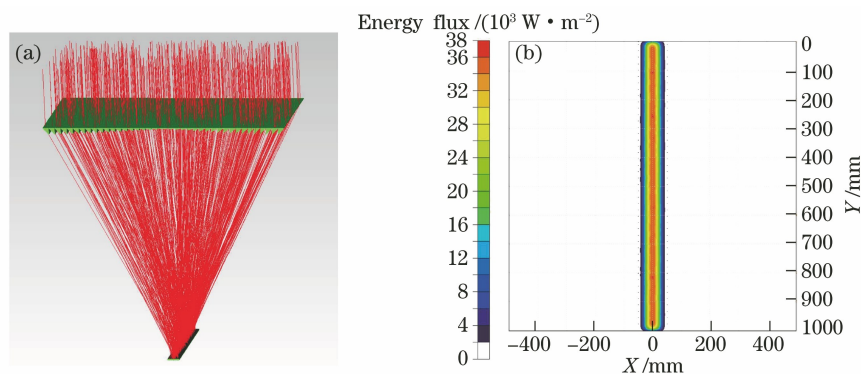


图 4 注水型菲涅耳聚光器的光学模拟结果。(a)模拟光线;(b)接受靶上的光斑能流分布

Fig. 4 Optical simulation results of water-injected Fresnel concentrator. (a) Simulating light;

(b) energy flux distribution on receiving target

3.2 注水型和传统型菲涅耳聚光器的比较

为了全面评价注水型菲涅耳聚光器的光学性能,需要将其与传统的非注水型菲涅耳聚光器进行比较,同时需要研究不同的太阳入射角度下聚光器

的聚光效率。考虑到太阳高度角的变化范围小于方位角,则可对聚光器进行东西布置,即焦线沿东西方向。随着太阳高度角的变化,聚光器的焦线位置在焦平面上的偏离量 L 为

$$L = f \tan \theta_s, \quad (13)$$

式中: θ_s 为太阳的入射角度。对于高纬度地区,若纬度大于 40° , 则太阳高度角在一年中的变化范围较小。考虑到聚光器可以倾斜放置,所以在模拟计算的过程中只需要分析一年以内太阳高度角变化范

围的一半即可。当太阳入射角从 0° 变化到 25° 时,采用蒙特-卡罗光线追迹法来研究该注水型菲涅耳聚光器在接受靶上的聚光特性,并将其与焦距为 2000 mm 和齿数为 40 的传统非注水型菲涅耳聚光器进行对比,模拟结果如图 5 所示。

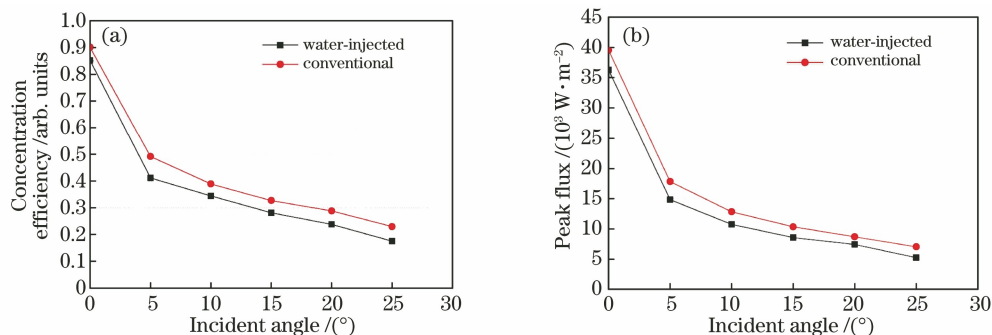


图 5 注水型菲涅耳聚光器和传统非注水型菲涅耳聚光器在不同太阳光入射角度下的聚光特性。(a)聚光效率;(b)能流峰值
Fig. 5 Concentrating characteristics of water-injected Fresnel concentrator and traditional non-water-injected Fresnel concentrator under different solar incident angles. (a) Concentration efficiency; (b) peak flux

从图 5 可以看到,相较于传统的非注水型菲涅耳聚光器,注水型菲涅耳聚光器的聚光效率和能流峰值都有一定的损失;随着太阳光入射角度的增大,二者之间的偏差并没有明显的波动规律;当太阳光的入射角度由 0° 增大到 25° 时,二者聚光效率的偏差较稳定,数值在 $4.47\% \sim 8.10\%$ 之间,平均偏差值为 5.40% ;当太阳光的入射角度由 0° 增大到 25° 时,二者能流峰值的偏差也较稳定,没有特别的波动规律,数值在 $1286.5 \sim 3247.0 \text{ W/m}^2$ 之间,平均偏差值为 2197.9 W/m^2 。

从模拟结果可以看到,在不同太阳光入射角度的情况下,注水型菲涅耳聚光器相较于传统的非注水型菲涅耳聚光器,平均聚光效率的损失值仅为 5.40% ,其具有较好的聚光效果,为此在工程应用中具有可行性。当然在实际应用过程中还有诸多问题需要解决,如低温下水结冰的问题和挥发补水的问题等。

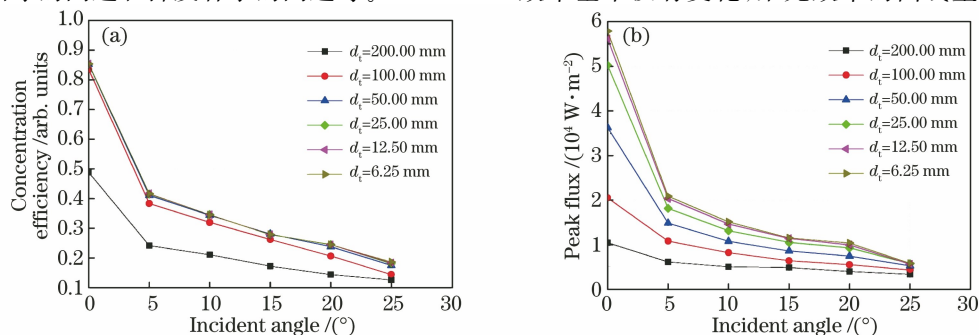


图 6 不同齿宽的注水型菲涅耳聚光器在不同太阳光入射角度下的聚光特性。(a)聚光效率;(b)能流峰值
Fig. 6 Concentrating characteristics of water-injected Fresnel concentrator with different tooth widths under different solar incident angles. (a) Concentration efficiency; (b) peak flux

3.3 齿宽对注水型菲涅耳聚光器聚光性能的影响

在平板注水型菲涅耳聚光器的建模过程中,研究透镜齿宽对注水型菲涅耳聚光器聚光性能的影响,为此设计 6 种不同齿宽的平板注水型菲涅耳聚光器,齿数分别为 10、20、40、80、160 和 320,对应的齿宽 d_t 分别为 200.00, 100.00, 50.00, 25.00, 12.50, 6.25 mm,其他设计参数和模拟参数与表 1 相同。6 种注水型菲涅耳聚光器在不同太阳光入射角度下的聚光特性如图 6 所示,其中图 6(a)为焦平面上聚光效率的变化情况,图 6(b)为焦平面上能流峰值的变化情况。

从图 6(a)可以看到,齿宽越小,聚光效率越高,但齿宽小于 100 mm 效果不明显,即齿宽小于接受靶的宽度后,齿宽对聚光效率的影响较小;齿宽小于 50 mm 后,即齿宽小于接受靶宽度的 $1/2$ 后,聚光效率基本没有变化,聚光效率的曲线重叠在一起,已

经不能区分出来。从图 6(b) 可以看到, 齿宽越小, 能流峰值越高, 即局部聚光比越大, 齿宽小于接受靶的宽度后, 这种效果还很明显。对于太阳光入射角度, 随着太阳光入射角度的增大, 齿宽对聚光效率和能流峰值的影响都在变小, 因此在注水型菲涅耳聚光器的设计过程中, 需要权衡聚光器结构的复杂度和聚光效率以及接受靶上的总功率来选择合适的齿宽。

4 样机试验

为了对注水型菲涅耳聚光器的聚光性能进行

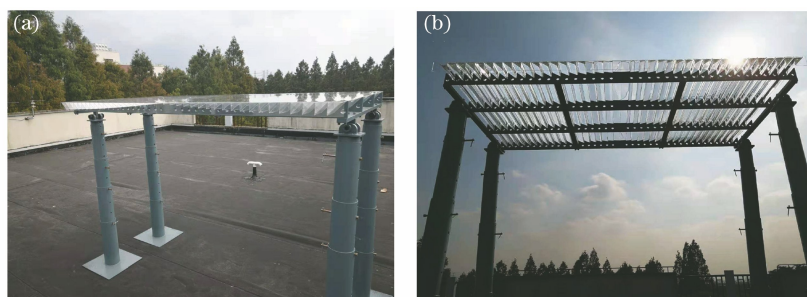


图 7 注水型菲涅耳聚光器的试验样机。(a) 平视图; (b) 仰视图

Fig. 7 Test prototype of water-injected type Fresnel concentrator. (a) Flat view; (b) bottom view

初步样机不具备实时跟踪太阳的功能, 因此将样机南北布置并将聚光器调整到水平状态, 在每一个由有机玻璃拼接成的直角棱柱中注满纯净水。当太阳处于正南方向时, 观察焦平面上的聚焦光斑情况。同时为了比较, 按照当地的经纬度和时间, 计算此时太阳的实际入射角度, 使用第 3 节的光学模型

验证, 依照表 1 的设计参数设计并加工焦距为 2000 mm、齿宽为 50 mm 和齿数为 40 的注水型平板菲涅耳聚光器。为了装配方便, 平板玻璃的材料选用有机玻璃 PMMA, 折射率为 1.49, 与普通玻璃有细微差别, 平板玻璃的厚度为 1.5 mm。试验样机安装在一幢楼的楼顶, 地点在中国上海市, 图 7 为样机实物, 其中图 7(a) 为平视图, 图 7(b) 为仰视图。注水直角棱柱的支撑结构由 4 根精密加工的锯齿状的钢梁组成, 钢梁的厚度均为 20 mm。

来模拟在此入射角度下聚光器焦平面上的理想光斑情况。图 8 为 2020 年 12 月 8 日 11 时 50 分焦平面上的光斑分布, 其中图 8(a) 为焦平面上的实际光斑情况, 图 8(b) 为在此时太阳光入射角度下模拟的理想光斑情况, 计算得到此时太阳光入射角度为 55.3° 。

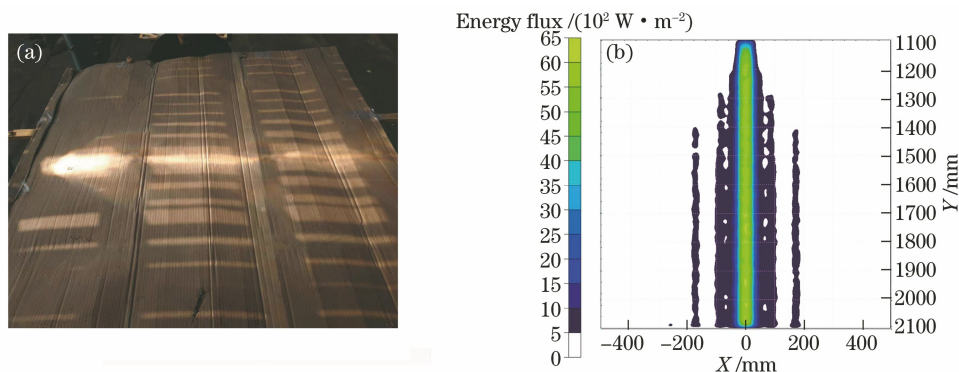


图 8 焦平面上的光斑分布。(a) 实际的光斑; (b) 模拟的理论光斑

Fig. 8 Distribution of light spots in focal plane. (a) Actual light spot; (b) simulated theoretical spot

从图 8(a) 可以看到, 实验样机具有明显的聚光效果, 不过光斑被分成了三段, 光强依次减弱, 最强光斑处的直径约为 100 mm。原因有两点: 一是当太阳高度角较小(约为 35.7°) 时, 由支撑钢梁的阴影挡光作用较大造成; 二是样机上的密封问题, 因样机没有封盖, 所以风的吹动会导致水面褶皱, 为

此影响聚光效果。从图 8(b) 可以看到, 模拟得到光斑的总功率为 327.3 W, 能流峰值为 6145.2 W/m^2 , 聚光效率为 16.4%, 局部聚光比为 6.1, 光斑宽度约为 100 mm。比较图 8(a) 和图 8(b) 可以看到, 除了光斑宽度比较吻合以外, 光斑形状差异较大, 造成的原因除了太阳光大角度入

射的过程中钢梁阴影和风的影响以外,主要因素还包括聚光器中间部分纯净水的深度很浅,在没有封盖的情况下,水的表面张力会导致水面并不是一个平面,为此影响聚光效果。同时图 8(a)和图 8(b)中均出现了一些杂散光的情况,主要是由直角棱柱侧表面的反射造成的。

由于试验条件受限,只进行初步的聚光试验,未能试验太阳光正入射和小角度入射的情况。综上所述可知,样机具有明显的聚光效果,光斑宽度与理论情况较吻合。后续对样机进行改造以解决样机的密封问题,使其能够追踪太阳,同时使用太阳能直射辐射测量设备和能流密度测量设备对聚焦光斑进行定量分析,进一步评估注水型菲涅耳聚光器的光学性能。

5 结 论

为了研发低成本和大口径的太阳能聚光器,提出注水型菲涅耳聚光器的设计新思路,研究新型聚光器的设计理论并建立相应的光学模型,采用蒙特-卡罗光线追迹方法来研究不同太阳入射角度下该聚光器的光学性能并将其与传统菲涅耳聚光器进行对比,分析齿宽对新型聚光器聚光性能的影响,同时搭建试验样机并进行初步的聚光试验。研究结果表明,相较于传统非注水型菲涅耳聚光器,注水型菲涅耳聚光器的聚光效率和能流峰值都有一定的损失,当太阳光入射角度由 0° 增大到 25° 时,二者聚光效率的偏差在 $4.47\% \sim 8.10\%$ 之间,平均偏差为 5.40% ,而能流峰值的偏差在 $1286.5 \sim 3247.0 \text{ W/m}^2$ 之间,平均偏差为 2197.9 W/m^2 。注水型菲涅耳聚光器的齿宽越小,聚光效率越高,但齿宽小于接受靶的宽度后,齿宽对聚光效率的影响较小。试验样机具有明显的聚光效果,实际光斑的宽度约为 100 mm ,与理论情况较吻合。理论模拟结果和初步样机试验结果皆表明注水型菲涅耳聚光器具备工程应用的可行性,但需要在实际应用中解决纯净水的挥发和低温结冰的问题,后续对试验样机进行完善并对聚焦光斑进行定量分析。本文的研究结果为太阳能热利用领域中低成本透射型聚光器的研究提供新的思路和理论基础。

参 考 文 献

- [1] Islam M T, Huda N, Abdullah A B, et al. A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: current status and research trends[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91: 987-1018.
- [2] Singh G K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: a review [J]. *Energy*, 2013, 53: 1-13.
- [3] Zhou T, Lu X D, Zhang M, et al. Crystalline silicon solar-cell development status and trends[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 030002. 周涛, 陆晓东, 张明, 等. 晶硅太阳能电池发展状况及趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 030002.
- [4] Leutz R, Suzuki A. Nonimaging Fresnel lens design [M]//Nonimaging fresnel lenses. Springer series in OPTICAL SCIENCES. Berlin: Springer, 2001, 83: 77-99.
- [5] Qiu Y, He Y L, Cheng Z D. Optical performance investigation and optimization of a linear Fresnel reflector solar collector [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(12): 2551-2556. 邱羽, 何雅玲, 程泽东. 线性菲涅耳太阳能系统光学性能研究与优化 [J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(12): 2551-2556.
- [6] Leutz R, Suzuki A, Akisawa A, et al. Shaped nonimaging Fresnel lenses [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2000, 2(2): 112-116.
- [7] Yamaguchi M, Takamoto T, Araki K, et al. Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential [J]. *Solar Energy*, 2005, 79(1): 78-85.
- [8] Yamaguchi M, Takamoto T, Araki K. Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, 90(18/19): 3068-3077.
- [9] Benitez P, Miñano J C, Zamora P, et al. High performance Fresnel-based photovoltaic concentrator [J]. *Optics Express*, 2010, 18(101): A25-A40.
- [10] Hernández M, Vilaplana J, Mohedano R, et al. Maximizing the efficiency of a 4-cell FK module [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2014, 1616(1): 191-195.
- [11] Jing L, Liu H, Zhao H F, et al. Design of novel compound Fresnel lens for high-performance photovoltaic concentrator [J]. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 2012: 1-7.
- [12] Pan J W, Huang J Y, Wang C M, et al. High concentration and homogenized Fresnel lens without secondary optics element [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(19): 4283-4288.
- [13] Wang C M, Huang H I, Pan J W, et al. Single stage transmission type broadband solar concentrator [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): A118-A125.
- [14] Wang J J, Wang X, Ning D. Design of Fresnel lens with square spot uniform concentration of sub-region

- multi-focus superposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0322001.
- 王进军, 王侠, 宁铎. 分区域多焦点叠加方形光斑均匀聚光菲涅耳透镜设计 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0322001.
- [15] 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(6): 2588-2606.
- [16] Lü J Q, Zhang N, Yin P, et al. Research progress on optically designed solar photovoltaic concentrators [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(23): 230002.
- 吕家祺, 张宁, 尹鹏, 等. 太阳能光伏聚光器光学设计类型研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(23): 230002.
- [17] Fu R. Optimization design of Fresnel concentrator and application research in concentrator photovoltaic technology [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 22-36.
- 付蕊. Fresnel 聚光器的优化设计及其在聚光光伏中的应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 22-36.
- [18] Lin M, Sumathy K, Dai Y J, et al. Performance investigation on a linear Fresnel lens solar collector using cavity receiver [J]. *Solar Energy*, 2014, 107: 50-62.
- [19] Zheng H F, Feng C Q, Su Y H, et al. Design and experimental analysis of a cylindrical compound Fresnel solar concentrator [J]. *Solar Energy*, 2014, 107: 26-37.