

# 太阳能光伏聚光器光学设计类型研究进展

吕家祺, 张宁\*, 尹鹏, 徐熙平, 张恒溢

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130012

**摘要** 太阳能聚光器聚焦方法主要有三种,介绍了不同太阳能聚光器的结构设计和聚光原理,并对其聚光性能进行了分析。同时,对国内外最新研究现状进行了总结和论述。三种聚光器中,折射式聚光器常采用不同形状的非涅耳透镜作为主要光学元件,其设计自由度高,但透镜对光谱敏感容易产生色散;反射式聚光器结构简单,对太阳光谱有天然优势,但其聚光比普遍偏低,且占地面积较大,聚光效率与反射面上的镀层折射率等因素有关;混合式聚光器将不同原理的聚光器进行组合搭配,实现了太阳光能量的最大化利用,同时能在出口处得到均匀光斑。混合式太阳能聚光器中,平板型聚光器因其动态的聚光比和高聚光效率,越来越受到人们的广泛关注,但平板型太阳能聚光器仍需考虑制造和耦合误差的问题。太阳能聚光器是聚光光伏系统的重要组件之一,因此有关聚光器的研究具有重要的应用价值。聚光器的光学设计将向聚光效率更高、接收面聚焦光斑更均匀和系统结构更紧凑的方向发展,随着加工技术的不断成熟,聚光器将更加高效、轻量,其成本将进一步降低。

**关键词** 光学设计; 太阳能聚光器; 菲涅耳透镜; 反射器; 混合式聚光器

中图分类号 TK513

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.230002

## Research Progress on Optically Designed Solar Photovoltaic Concentrators

Lü Jiaqi, Zhang Ning\*, Yin Peng, Xu Xiping, Zhang Hengyi

*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130012, China*

**Abstract** The focusing methods of solar concentrators are mainly classified into three categories. This study introduces the structural designs and operating principles of various solar concentrators, analyses their focusing performance, and summaries the latest research status at home and abroad. First, we consider a refractive concentrator, which involves the usage of Fresnel lens with varying shapes as the main optical element and exhibits a high design freedom, but the lens is sensitive to the spectrum and easy to produce dispersion. Second, we consider a reflective concentrator, which exhibits a simple structure, has natural advantages with respect to the solar spectrum, and covers a larger area, but its concentration ratio is generally low and its concentration efficiency is related to the refractive index of the coating on the reflector and other factors. Finally, we consider a hybrid concentrator, which can be obtained by combining concentrators under different operating principles to achieve maximum utilization of the solar energy and generate a uniform spot at the exit. With respect to the hybrid concentrator, the planar concentrator has attracted increasing attention because of its dynamic concentration ratio and high concentration efficiency; however, the manufacturing and coupling errors associated with the planar concentrator still need to be considered. Regardless, the solar concentrator is one of the key components of a concentrating photovoltaic system, and its research demonstrates considerable futuristic applications. From the development perspective, the optical concentrator designs exhibit considerable potentials because of their high efficiency, uniformity with respect to the focusing spot on the receiving surface, and advanced compact system structure. With the continuous development of the processing technology, the concentrator will become increasingly efficient and lightweight, thereby reducing its cost.

**Key words** optical design; solar concentrator; Fresnel lens; reflector; hybrid concentrator

**OCIS codes** 220.1770; 220.2740; 220.4610

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-04-20; 录用日期: 2019-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61605016)

\* E-mail: custzn@126.com

## 1 引言

近年来,商业高效的多族太阳能电池取得了巨大成就,促使光伏发电模式发生转变。多族太阳能电池可实现高达40%的转换效率<sup>[1]</sup>,尽管比传统的光伏电池更昂贵,但是太阳能聚光器的光学设计能够将成百上千的太阳能光通量转化为高聚光效率,进而在高聚光系统中,电池所花费的成本变得非常低。因此,提供一个成本低廉、高效的光学系统变得至关重要。构建聚光光伏(CPV)系统时,系统不仅需要具有新型高光通量、结构紧凑、实用等特点,还需易于商用化<sup>[2]</sup>。迄今为止,已经开发出最先进的三族太阳能电池,其聚光效率可达40%~41%,聚光比为100~900倍,而目前已知最高的聚光效率为41.1%,聚光比为454倍<sup>[3]</sup>。这些新的多族电池可以更好地划分太阳能光谱,同时其较低的电流密度降低了电阻损耗,并且展示了实现高达45%~50%聚光效率的前景<sup>[4-5]</sup>,使CPV系统性能得到了很大的提升。

张庆健等<sup>[6]</sup>设计了一种带有V型槽式反射镜的聚光光伏系统,用于光催化处理污水。聚光光伏系统底部采用双轴跟踪对太阳光进行追踪,保证太阳光垂直入射到硅光电池上,同时聚光器为抛光铝反射镜,极大地减小了系统整体结构。丁超等<sup>[7]</sup>提出了一种双V型低倍聚光光伏系统,同样带有高度角和方位角的双向跟踪。四面反射镜组成的双V型聚光器由镀有高反射膜的铝板构成,不但降低了制造成本,而且系统结构更紧凑。为了节省成本,设计聚光器时应使用尽可能少的材料,同时制造足够的数量。此外,CPV系统有许多特性可以简化氢的生产过程。高效、可再生的氢气生产方法对环境友好,可有效减缓全球变暖并改善主要城市的空气质量。

CPV系统的耐用性和可靠性是主要的考虑因素。老化和油污显著影响光学材料,导致电力输出降低。Miller等<sup>[8]</sup>对用于聚光光伏设计的菲涅耳透镜的耐用性进行了分析,介绍了光学元件耐久性、变色、脱色、颗粒物积累方面的研究。Vivar等<sup>[9]</sup>研究了污物对CPV系统的影响,结果表明污物平均降低了聚光光伏发电系统4%的电力输出。在合理的经济优化下,适当的光学系统设计可有效减少对灰尘颗粒的捕获,使其清洁度符合应用要求,这对于改善电力生产至关重要。

## 2 太阳能聚光器和光学设计的类型

太阳能聚光器系统采用透镜或反射镜,或与跟踪系统相关联的两种类型进行组合,将大面积的太阳光聚焦在一个小光斑上。一些聚光器系统还采用二级甚至三级聚光器来提高太阳能聚光比,并且得到了接收器上均匀分布的光通量。这些光学设计按其聚光原理大致可分为折射式聚光器、反射式聚光器及混合式聚光器。以下对CPV系统不同太阳能聚光器的结构设计和光学原理进行介绍。

### 2.1 折射式聚光器

折射式聚光器常用菲涅耳透镜光学元件作为主要的聚光器,根据会聚后光斑形状的不同,折射式聚光器可细分为线聚焦和点聚焦,前者将光线会聚在光伏电池上形成一条焦线,适用于聚光倍数较低的情况,线聚焦通常结构简单、易于制造、成本低廉,且基本满足聚光均匀性的要求。

祝子夜等<sup>[10]</sup>利用聚碳酸酯(PC)材料,采用注塑成型的工艺加工了一种圆柱面线聚焦菲涅耳聚光器。该聚光器对跟踪精度要求低,避免了液压传动跟踪系统的高成本,并且光线垂直入射时具有良好的聚光效率。利用LightTools光学软件进行仿真,在太阳辐照宽度为654 mm、跟踪精度为0°时,接收器上的焦斑宽度为32 mm。因此,最大的几何聚光比为20.4倍。图1为圆柱面线聚焦菲涅耳透镜及其聚焦光斑。

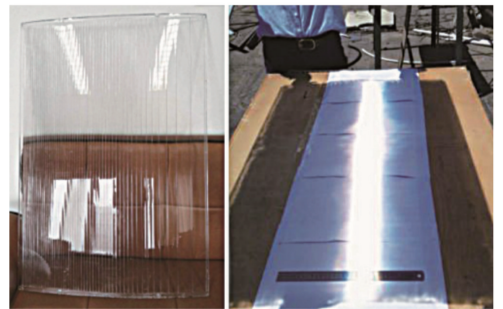


图1 圆柱面线聚焦菲涅耳透镜及其聚焦光斑  
Fig. 1 Cylindrical line-focused Fresnel lens and its focusing spot

由于圆柱面菲涅耳透镜相比平面菲涅耳透镜更难加工,且注塑成型会产生一定的精度误差,考虑到利用集热管吸收太阳能热量用于太阳能热水器的商业价值,王海莲<sup>[11]</sup>提出采用平面线聚焦菲涅耳透镜进行太阳能光热转换的太阳能热水器集热装置。平板太阳能聚光器由10个棱形的焦距为100 mm的

菲涅耳透镜构成,太阳光垂直入射到透镜上表面,会聚成 10 条线性光线,最后被下方涂有光热转换材料的导热管吸收。接收太阳能的面积为  $2 \text{ m}^2$  ( $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ),聚光器厚度为  $100 \text{ mm}$ ,即光线正好会聚在导热管上,具有实际的应用价值。图 2 为多行线性聚焦的菲涅耳聚光器结构示意图。

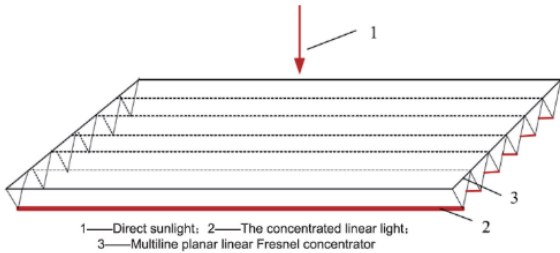


图 2 多行线聚焦菲涅耳聚光器结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of multi-line-focused Fresnel concentrator

传统的菲涅耳透镜均基于共焦法制造,缺点是能量会聚到一个焦点上,导致局部过热产生热斑现象,极易损坏光伏电池。李望等<sup>[12]</sup>基于散焦法设计了一种分布式焦点的线性菲涅耳聚光器,解决了这一问题,如图 3 所示。LightTools 模拟仿真发现,基于散焦法设计的线聚焦菲涅耳聚光器与共焦点法设计的聚光器相比,辐照度峰值下降了  $72.1\%$ 。

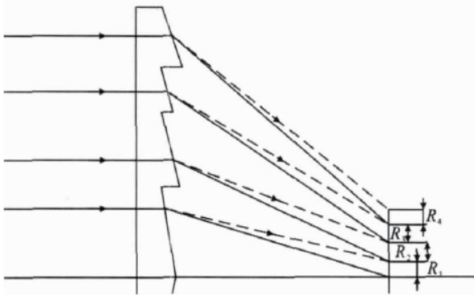


图 3 基于散焦法设计线聚焦菲涅耳聚光器原理图

Fig. 3 Principle of line-focused Fresnel concentrator designed by defocusing method

菲涅耳透镜除了圆柱面型和平面型,还有柱状菲涅耳透镜、圆形菲涅耳透镜及菲涅耳棱镜等。为了对比分析不同形状透射式聚光器的聚光性能,冯朝卿等<sup>[13]</sup>建立了圆形、椭圆形和抛物线形的透射式菲涅耳聚光器模型。为保证三者的聚光比相同,圆形菲涅耳聚光器的半径为  $0.5 \text{ m}$ ,椭圆形菲涅耳聚光器的长轴和短轴分别为  $0.75 \text{ m}$  和  $0.5 \text{ m}$ ,抛物线形菲涅耳聚光器焦距为  $1 \text{ m}$ 。光线追迹分析发现,在聚光比相同、光线轴向入射角不同的情况下,圆形菲涅耳聚光器的综合性能最好。

尽管透射式聚光器的光学损失低于反射式聚光

器,线性菲涅耳聚光器仍需考虑材料对光的吸收和折射产生的损失。Hongn 等<sup>[14]</sup>采用最小二乘法分析了不同纬度和不同形状下线性菲涅耳聚光器(LFC)的光学损失,提出了一种简单的最小二乘法表达式,以此来评估年均非照明长度和任意纬度下的损耗因子。经验证理论值与实际值吻合较好,平均均方根误差为  $6\%$ 。

非成像中若要求聚光倍数较高,线聚焦通常难以满足要求,即当系统高宽比相同时,若线聚焦的聚光比达到  $C$ ,采用点聚焦通常能达到  $C^2$  的聚光比。因此,于春岩等<sup>[15]</sup>设计了一种透射式双面菲涅耳聚光镜,如图 4 所示,并与传统的菲涅耳聚光镜进行了对比。根据设计要求确定菲涅耳前表面的结构参数,经推导和计算确定后表面的结构参数。在聚光口径  $200 \text{ mm}$ 、焦距  $120 \text{ mm}$  条件下,在可见光波段双面菲涅耳聚光镜的最大聚光效率为  $85\%$ ,而传统菲涅耳聚光镜的最大聚光效率为  $63.9\%$ ,聚光效率提高了  $21.1\%$ 。

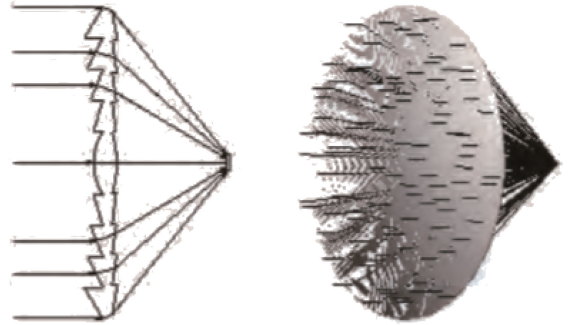


图 4 双面菲涅耳聚光镜结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of two-sided Fresnel concentrator

为了解决传统菲涅耳透镜在接收器上光斑分布不均的问题,罗春华等<sup>[16]</sup>基于菲涅耳环带设计方法提出了一种环带式菲涅耳聚光器,如图 5 所示。光线经过不同的菲涅耳表面环带后,分别进入相应的接收环带,实现了均匀的光强分布,保证了聚光效率。当

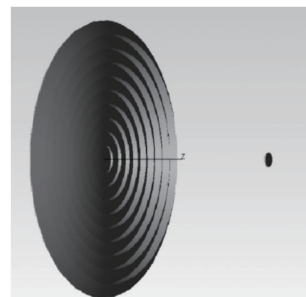


图 5 环带式菲涅耳透镜

Fig. 5 Annular belt-type Fresnel lens

接收面积相同时,相比于传统的菲涅耳聚光镜,该设计的聚焦光斑均匀性可达75%。为改善方形菲涅耳聚光镜中心聚焦光斑的均匀性,朱亚萌等<sup>[17]</sup>基于共轴聚焦设计原理,提出了分区域聚焦法和修正分区域聚焦法。随着环带宽度的减小,50 mm×100 mm的长方形菲涅耳聚光镜的聚光均匀性得到提高。同时可以证明,修正分区域聚焦法可在聚光效率保持不变的情况下,进一步增大光斑分布的均匀性。

为了提高聚光比,可增加二级或者三级聚光器。Araki等<sup>[18]</sup>设计了一种聚焦太阳能光伏装置,包括用于聚焦太阳光的主要光学元件即圆柱面菲涅耳透镜、用于二次聚焦的柱状光学元件、透明树脂材料和太阳能电池。如图6所示,以柱状光学元件或均质器作为次级聚光器,引导经过主要光学元件的太阳光聚焦到太阳能电池上。Winston等<sup>[19]</sup>申请了一项光学专利,如图7所示,该设计由一种主要的菲涅耳透镜和二级非成像光学装置组成,为多族太阳能电池提供了高太阳能辐射通量,以产生高效的电能输出。主要菲涅耳透镜的 $F$ 数大于1,用于将光源从远处聚焦到二次聚光器的入口孔径上,太阳能电池位于二次聚光器的出口孔径上。该光学设计的效率为80%~85%,带有125 mm×125 mm的入口孔径,可为5.5 mm×5.5 mm多族电池提供500倍的几何聚光比,为10 mm×10 mm硅电池提供150倍的几何聚光比。

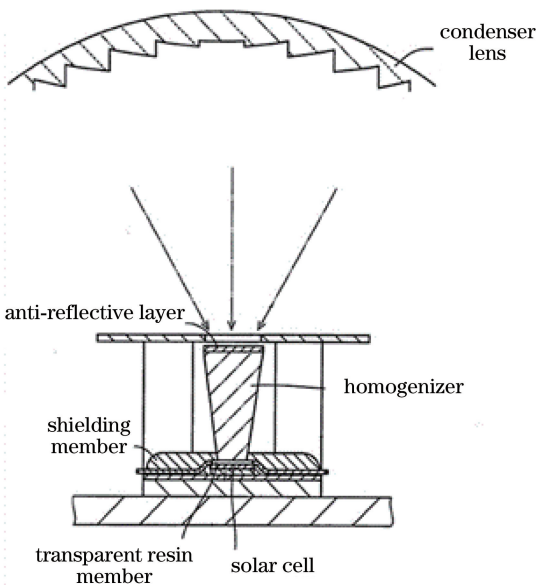


图6 太阳能光伏模块装置的截面图

Fig. 6 Cross-section of solar photovoltaic module device

尽管光伏电池背面装有散热装置,但当聚光倍数过大时局部温度升高仍会损坏电池。为了使

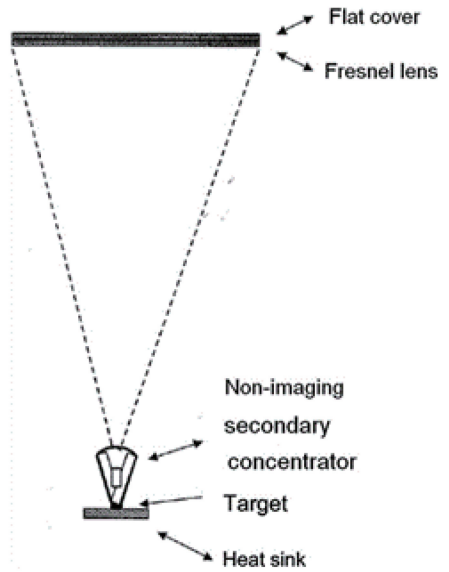


图7 利用菲涅耳透镜和非成像二次光学系统来聚焦的光伏系统

Fig. 7 Concentrating photovoltaic system using Fresnel lens and non-imaging secondary optic system

光伏电池在点聚焦时仍可保持较高的聚光均匀性, Schwartzman<sup>[20]</sup>设计了一种由棱镜阵列组成的太阳能聚光器,如图8所示。每个棱镜使入射的太阳光线发生偏转,最终共同照亮正方形的光伏电池。多个棱镜均匀照亮相同目标区域,在目标区域产生聚焦的均匀光强,大大延长了光伏电池的使用寿命。

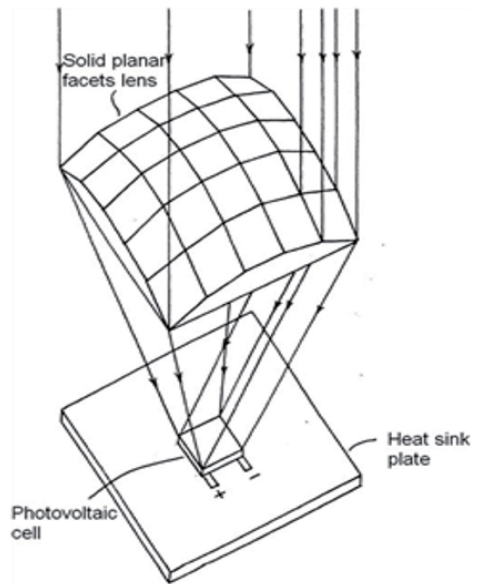


图8 棱镜阵列组成的聚光器透视图

Fig. 8 Perspective view of concentrator composed of prism array

Ryu 等<sup>[21]</sup>提出了一种基于平板型菲涅耳透镜的太阳能聚光器,在适当的聚光比下实现了接收器上均匀的光强分布。如图 9 所示,光线经菲涅耳透镜会聚,在接收器上均匀照明。经测试,该电池平面光通量分布约为 20%, $3\times 3$ 、 $5\times 5$ 、 $7\times 7$  的阵列转换效率超过 65%。

## 2.2 反射式聚光器

折射式聚光器通常存在一定的色散,得到的光斑能量中心高、边缘较低。反射式聚光器因结构简单也常被用作商业用途,其中槽式聚光器即典型的反射式聚光器。V 型槽式聚光器容易加工,常用于低倍聚光比的条件下。王金平等<sup>[22]</sup>在此基础上优化设计了一种四面双 V 型槽式低倍聚光器,如图 10 所示。聚光组件通过聚光支架与双轴跟踪系统相连接,可以实现对太阳光高度角和方位角的精确跟踪,跟踪精度在  $\pm 1.5^\circ$  以内。电池组件采用常规单晶硅电池,为了在一定程度上减少温度的升高,电池背部配有散热器,用于被动式

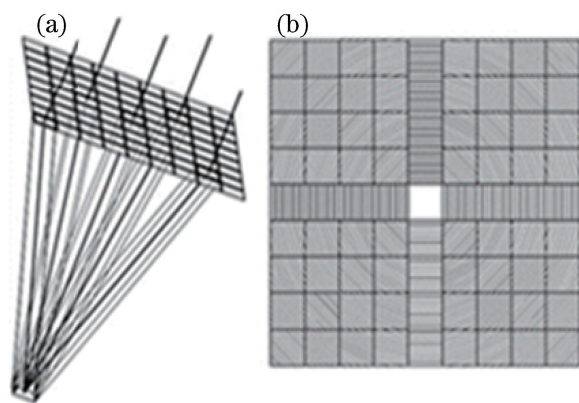


图 9 模块化菲涅耳透镜的光学设计用于收集太阳能。

(a) 光学聚光比;(b)平面上的菲涅耳透镜方向

Fig. 9 Optical design of modular Fresnel lens used for collecting solar energy. (a) Optical concentration ratio; (b) direction of Fresnel lens on plane

冷却。该聚光器可以在低倍聚光条件下使用,结构简单、易于制造,大大减少了发电成本,并提高了电池组件的发电效率。

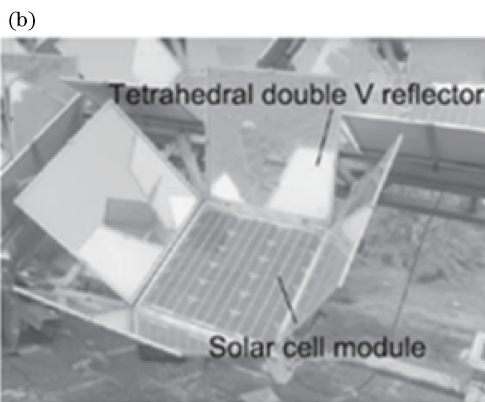
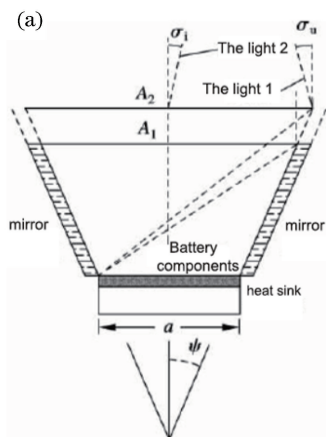


图 10 V 型槽式太阳能聚光器。(a)原理图;(b)结构图

Fig. 10 V-shaped trough solar concentrator. (a) Principle; (b) structural diagram

除了 V 型槽式聚光器以外,由抛物面反射镜和平面光伏电池组成的抛物面槽式聚光器也是一种重要的低倍聚光器,如图 11 所示。马保宏等<sup>[23]</sup>对平面光伏电池上的能流密度与抛物面几何参数之间的关系进行了研究,并对平面光伏电池板上的能流密度进行曲线拟合,结果表明,其能流密度分布表现为中间高、两侧呈指数衰减。闫素英等<sup>[24]</sup>进一步分析了空气中积尘对槽式聚光器光学性能和焦平面能流密度分布的影响,并提出了优化的槽式聚光器设计,如图 12 所示。在常规槽式聚光器上方增加一个二次均光反射镜,提高了金属管周向能流分布均匀性,减少了灰尘对聚光器光学性能的影响。Dähler

等<sup>[25]</sup>提出了一种碟式太阳能聚光系统,包含主要的碟式反射器、二级平面反射器及太阳能跟踪系统,如图 13 所示。该设计可以达到 2710 倍的聚光比,光学效率约为 60%。

槽式聚光器虽然容易制作,但需考虑风力对反射型槽式聚光器的影响。风荷载可使聚光器出现位移形变,从而破坏聚光性能。为解决该问题,李廉洁<sup>[26]</sup>采用有限元方法提出了一种优化的槽式聚光器,减小了聚光器自重和风力导致的结构形变。采用  $6\times 7$  的钢丝绳对槽式聚光器增加预拉力拉索,经风洞实验测试和有限元商业软件 MIDAS/GEN 仿真验证,该装置可显著减少风荷载作用下的位移形

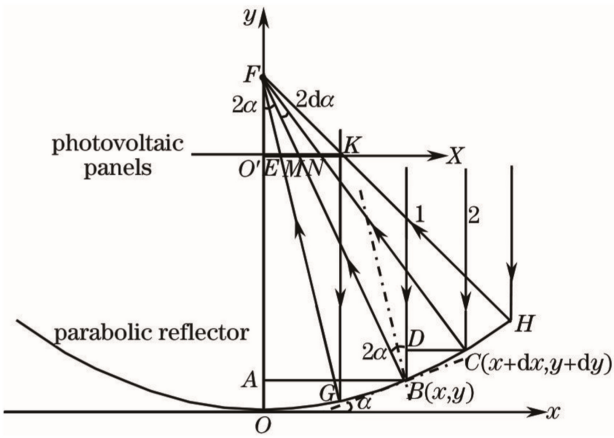


图 11 抛物面槽式聚光器的光路分析图  
Fig. 11 Optical path analysis of parabolic trough concentrator

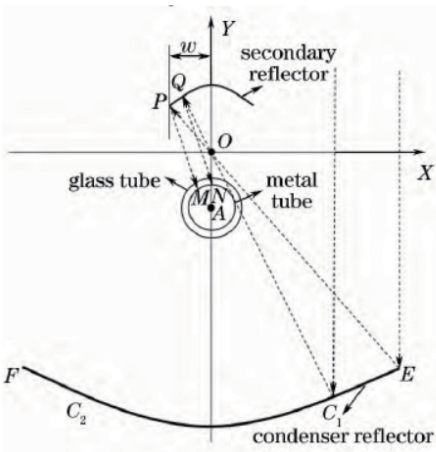


图 12 优化的槽式聚光器光路图  
Fig. 12 Optical path of optimized trough concentrator

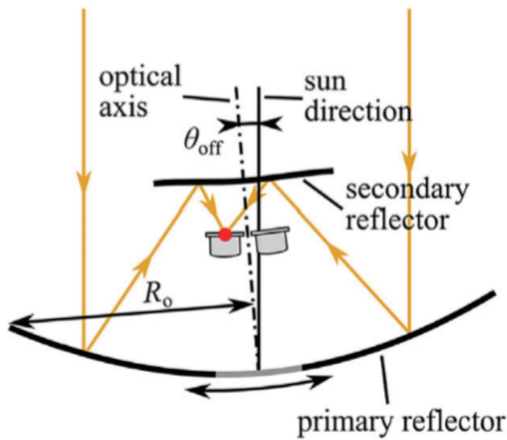


图 13 二次反射的碟式聚光器  
Fig. 13 Dish concentrator with secondary reflection

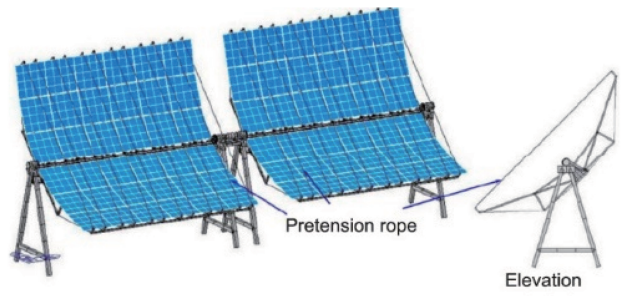


图 14 增加拉索后的槽式聚光器模型

Fig. 14 Model of trough concentrator after adding cable  
光器的优化太阳能聚光器,其剖面如图 15 所示,特点是结构简单、聚光效果好、无需安装跟踪系统,适用于聚光比不高的应用领域。吴德众等<sup>[27]</sup>研究分析了低截取比下 CPC 的光学性能,并利用 Tracepro 软件模拟计算了四季的光学效率。研究表明,与截取比 0.56 的 CPC 相比,截取比 0.16 的 CPC 不但降低了弧面材料成本,还减少了末端光线的泄露,进而提高了光学效率。肖丽仙等<sup>[28]</sup>分析了复合抛物面聚光器在光伏太阳能系统中的应用特性,实验证明,CPC 在光伏太阳能系统中的应用改善了系统的光电转换效率。

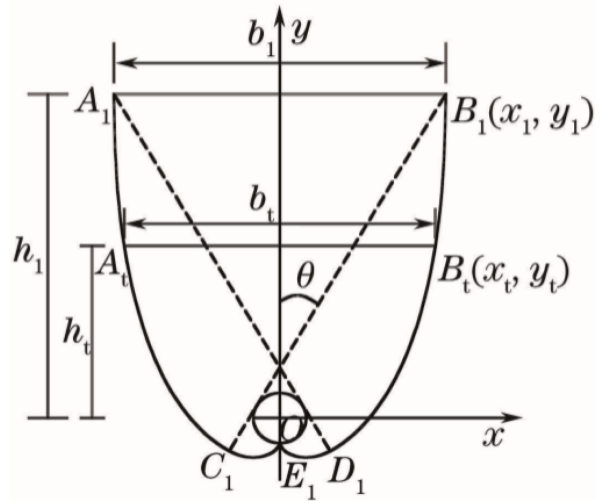


图 15 CPC 的剖面示意图

Fig. 15 Cross-sectional schematic of CPC

章波等<sup>[29]</sup>建立了平板吸收体非对称复合抛物面聚光器(PACPC)的结构模型,如图 16 所示。同时利用光线追迹软件分析了 PACPC 聚光系统全年辐射量的采集量,实验表明,其年均采光量较传统平板吸收体系统提高了 15.28%,其中春季和秋季的采光量分别增加了 23.40%和 23.87%。

反射式聚光器也可采用多重反射,以获得更高的聚光比。闫小三等<sup>[30]</sup>提出了一种四重槽式抛物

变,大大延长了槽式聚光器的使用寿命。图 14 为增加拉索后的槽式聚光器模型。

复合抛物面聚光器(CPC)是一种基于抛物面聚

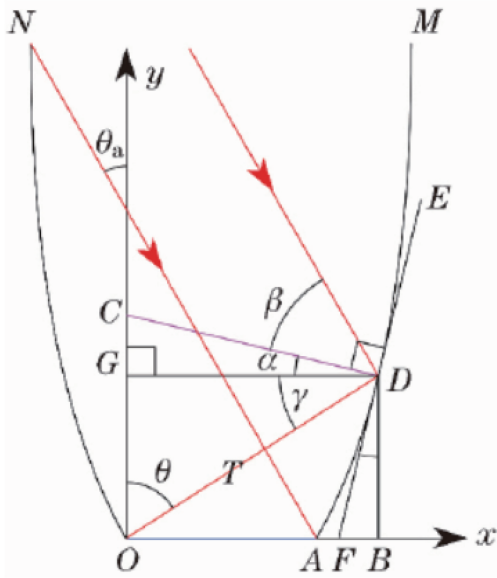


图 16 平板吸收体 CPC 结构图

Fig. 16 Structural diagram of CPC with plate absorber

面聚光器,如图 17 所示。太阳光垂直入射到抛物面 1 的凹面,经过反射线聚焦到抛物面 2 的凸面上,然后反射到抛物面 3 的凹面上,再反射到抛物面 4 的凸面上,最后沿着 z 轴负方向以更强的平行光照射到光伏电池上。

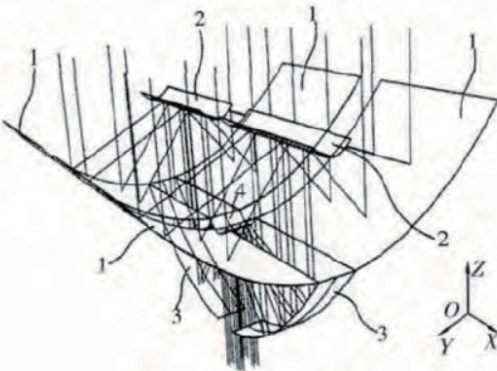


图 17 四重反射抛物面槽式聚光器原理图

Fig. 17 Principle of parabolic trough concentrator with quadruple reflector

线聚焦在实现高倍聚光比时,常需多个不同位置不同倾角的反射镜依次排列组成聚光器,张谦<sup>[31]</sup>通过向单侧或双侧排列放置若干个平面玻璃镜,设计了一种单侧平板接收器的线性菲涅耳太阳能聚光系统,如图 18 所示。为保证所有入射光线的反射光线均能照射到平板接收器上,每块反射镜面的宽度、角度及放置位置均不同。杜春旭等<sup>[32]</sup>设计了一种线性菲涅耳反射(LFR)系统,通过将大的连续反射镜分段离散化成小的镜面,达到聚光效果,相比于抛物型反射镜大大降低了成本,如图 19 所示。欧阳海玉

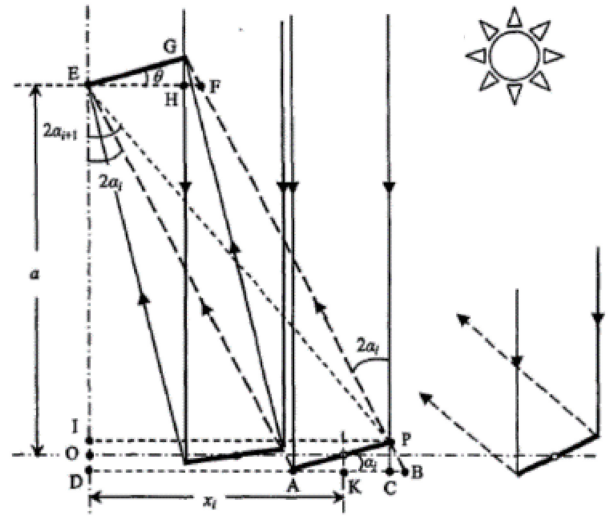


图 18 单侧平板接收器的线性菲涅耳太阳能反射聚光系统

Fig. 18 Linear Fresnel solar reflective concentrator system with single-side planar receivers

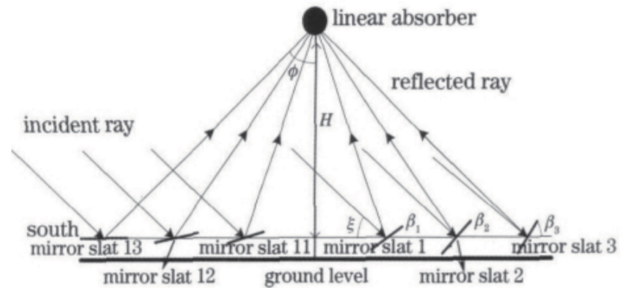


图 19 线性菲涅耳聚光系统的典型示意图

Fig. 19 Typical schematic of linear Fresnel concentrator system

等<sup>[33]</sup>提出了一种由微弧形菲涅耳反射镜构成的线性菲涅耳聚光器(LCR),如图 20 所示,太阳光经过微弧形菲涅耳反射镜反射到固定的三角形吸收器上。

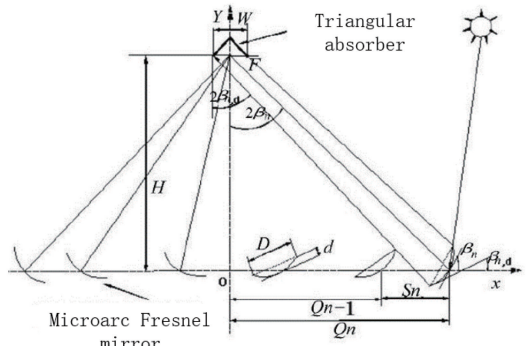


图 20 微弧线聚焦菲涅耳反射镜结构图

Fig. 20 Structural diagram of microarc line-focused Fresnel reflector

在反射式点聚焦聚光器的研究中,Terao 等<sup>[34]</sup>申请了一种适用于光伏电池的微型聚光器,该聚光

器由抛物面反射器组成,每行每列的反射器都将辐射引导到太阳能电池上。在紧凑的光伏电池排列中,每个电池均被相邻反射器遮挡,如图 21 所示,太阳光经抛物面反射器会聚到光伏电池上,图中两个相邻抛物面反射镜为 30-1&30-2。

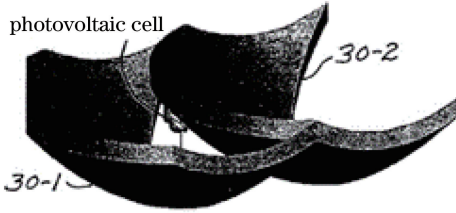


图 21 两个相邻的抛物面反射器和一个光伏电池  
Fig. 21 Two adjacent parabolic reflectors and one photovoltaic cell

除了将光伏电池固定在抛物面焦点上,还可采用二次反射实现点聚焦。基于圆锥曲面的光学性质,庄立强<sup>[35]</sup>提出了两种可以对碟式镜反射光线进行二次聚光的曲面,并从理论上计算出了两种曲面的位置和方程。同时利用光学软件仿真发现,理论计算的二次镜开口半径越大,聚焦光斑越小但遮光比越大,综合考虑两种因素最终选用了开口半径为 300 mm 的二次镜。图 22 为两种二次反射镜的侧面图,其中图 22(a)中二次反射镜为旋转双曲面反射镜,图 22(b)中二次反射镜为椭圆球面反射镜。

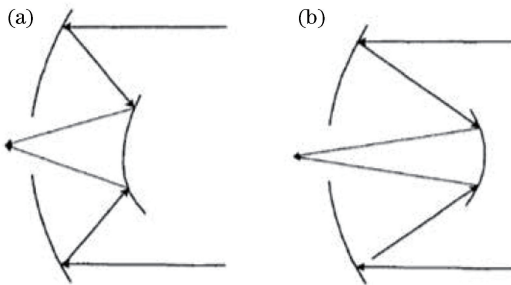


图 22 带有二次镜的聚光器。(a)旋转双曲面二次反射镜;  
(b)椭圆球面二次反射镜

Fig. 22 Concentrator with secondary mirror.  
(a) Rotating hyperboloid secondary reflector;  
(b) elliptic spherical secondary reflector

为了使聚光光伏系统结构更加紧凑,卡塞格林反射式聚光器也被广泛应用。Benitez 等<sup>[36]</sup>研发了一种卡塞格林双镜面的高聚光比非成像光学仪器,其拥有目前双镜成像聚光器的优点,并克服了主要限制,如实现了接收角度与辐照度均匀性之间的平衡。如图 23 所示,该设计可在接收半角 15 mrad 下,实现超过 800 倍(局部聚光比低于 2000 倍)的平均聚光比。Fork 等<sup>[37]</sup>设计了卡塞格林类型的太阳

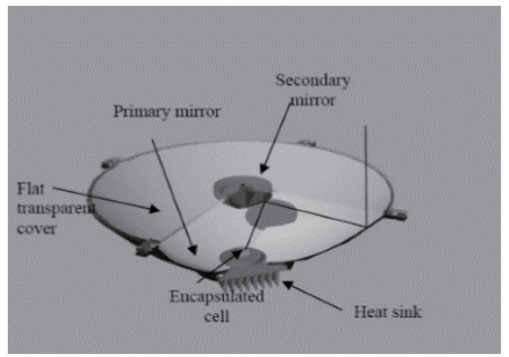


图 23 CAD 模态的原型设计

Fig. 23 CAD-modal prototype design

能聚光器,包括主反射镜和二级反射镜,分别放置在透光性光学元件的凸面和凹面上。如图 24 所示,光线进入二级反射镜周围的孔径并射向主反射镜,经过主反射镜被反射到二级反射镜,然后被反射到中心区域由凸面包围的光伏电池上。

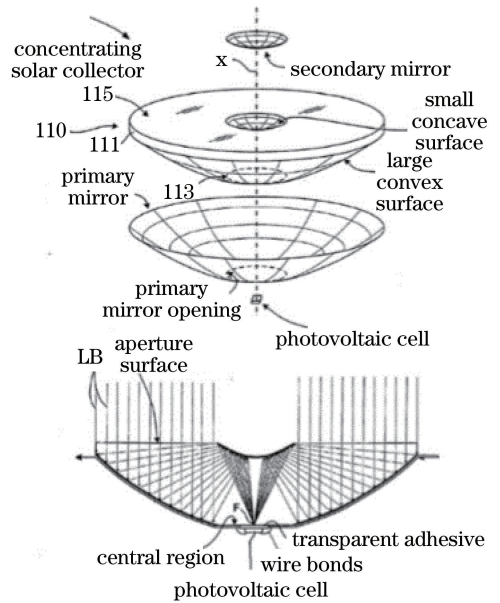


图 24 卡塞格林聚光器爆炸透视图

Fig. 24 Exploded perspective view of Cassegrain-type concentrator

图 24 显示,卡塞格林太阳能聚光器由光学元件(110)、位于中心区域的光伏电池、开口的主反射镜和二级反射镜组成。光学元件为透明结构,包括上层(111)、位于上层下表面相对大的凸面(113)、大幅平面孔径(115)(又被定义为孔径面),以及位于上层上表面相对小的凹面。

优化后的卡塞格林反射式聚光器可以提高接收器上的聚光均匀性,李霜<sup>[38]</sup>提出了一种带有叠加式方形菲涅耳波带片的卡塞格林式聚光器,菲涅耳波带片位于主镜的开口位置,如图 25 所示。假设近



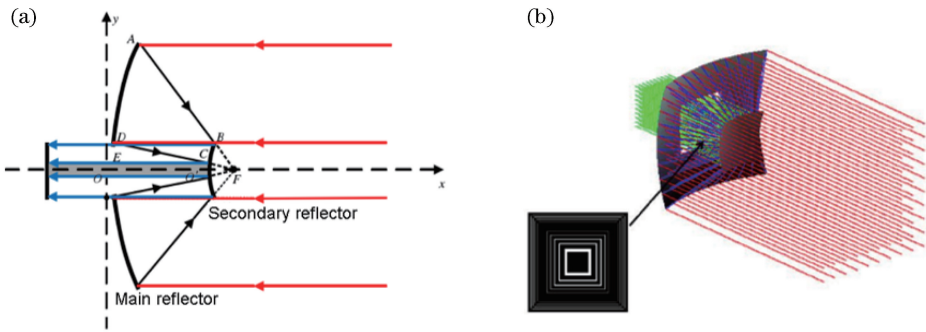


图 25 新型卡塞格林聚光反射系统。(a) 聚光器原理图; (b) 三维光路图

Fig. 25 New Cassegrain-type concentrating reflective system. (a) Principle of concentrator; (b) three-dimensional optical path

似平行的太阳光沿  $x$  轴向负方向射入, 经过主镜凹面反射会聚到次镜的凸面, 再经次镜的凸面得到  $x$  轴负方向出射的平行光, 最终被接收器上的光伏电池吸收。为得到光强更大的出射平行光, 应使主镜和次镜的焦点相同, 且主镜的焦距大于次镜的焦距。聚光器采用 PMMA 材料制造, 经过 Trace Pro 软件仿真可知, 接收器上的光斑均匀度约为 74%。

为了使点聚焦满足高倍聚光比的设计要求, 常将反射镜阵列化, 并在中心焦点处放置接收器。Chong 等<sup>[39-40]</sup>提出了非成像平面聚光器, 其由众多的方形平面镜组成, 能够产生均匀照明, 并且有相当高的聚光比。来自平面镜叠加的光线均匀聚焦到目标点, 如图 26 所示, 平面聚光器横截面图显示了单面镜将光线定向到目标的途径。系统由 360 个平面镜组成, 每个反射镜尺寸为 40 cm × 40 cm, 且焦距为 78 cm, 实现了 298 倍的聚光比。

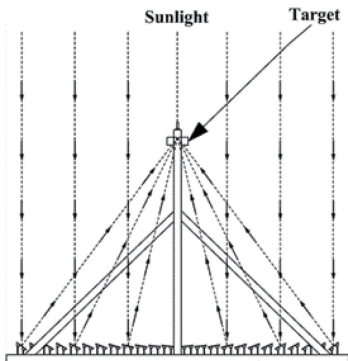


图 26 非成像平面聚光器的总体布局设计

Fig. 26 General layout design of non-imaging planar concentrator

Tsadka 等<sup>[41]</sup>发明了一种新型聚光器的光学设计, 其采用多重反射器, 可直接反射太阳光到接收器或 CPV 面板上, 用于发电或发热, 如图 27 所示。大量的反射镜被布置在支撑面上, 每个反射器都经过

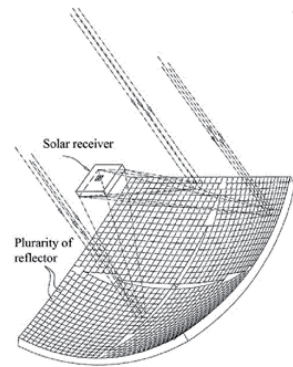


图 27 太阳能聚光器的光路图

Fig. 27 Optical path of solar concentrator

对准和排列, 可高度均匀地反射太阳能到接收器上。光线被镜面反射器反射到太阳能转换组件的接收器部分。中国科学技术大学于 2013 年底研制了带有双轴跟踪器的多平面高倍聚光器<sup>[42]</sup>, 如图 28 所示。聚光器采用 140 mm × 140 mm 的普通商业镀银反射镜作为子反射镜, 每个子反射镜通过下方对应的万向节调整角度。万向节安装在固定的直线型支撑结构上, 比传统的抛物面型支撑结构更简单。450 个子反射镜组成多平面线性组合太阳能聚光模块, 最终使太阳光会聚在 100 mm × 100 mm 的

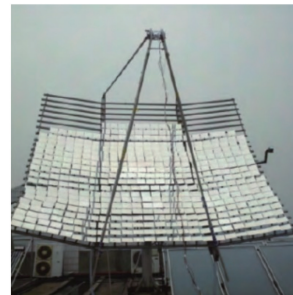


图 28 多平面线性组合太阳能聚光器运行现场  
Fig. 28 On-site operation of multi-planar linear combination solar concentrator

中心区域。安装调试后测试,结果显示,该聚光器的聚光比可达 450 倍,同时满足聚光均匀性的设计要求。

### 2.3 混合式聚光器

除了折射式聚光器和反射式聚光器之外,混合式聚光器因结构紧凑、聚光效率高、能够提供动态的聚光比等特点,近年来得到广泛推广。混合式聚光器一般结合折射、反射和全内反射等多种聚焦方法。基于透射和反射原理,荆雷<sup>[43]</sup>设计了紧凑型的 Fresnel 聚光镜,如图 29 所示。该设计由透射面、反射面 1 和反射面 2 组成,其中透射面的球形锯齿依次对应反射面 1 的锯齿表面。远场太阳光入射到透射前表面时,被球面锯齿收缩,经反射面 1 反射到反射面 2,最终会聚到聚光器底部中心的光伏电池上。为提高聚焦光斑的均匀性,庄振锋等<sup>[44]</sup>基于生物复眼原理提出了优化的紧凑型复眼聚光器,采用 PMMA 注塑加工而成。近似平行的太阳光经过有曲率的折射表面分束会聚到相应的反射表面,反射表面继续会聚光线到自由反射曲面,最后经过曲面二次反射,均匀地照射在平面透射表面下方的光伏电池上,图 30 为复眼型聚光器的光路图,图中不同颜色代表不同的光线束。

由于镜面反射产生的光学损失不可忽略,为减少混合式聚光器的光学损失,实现更高的聚光比,常采用全内反射和折射相结合的聚焦方法。赵清亮

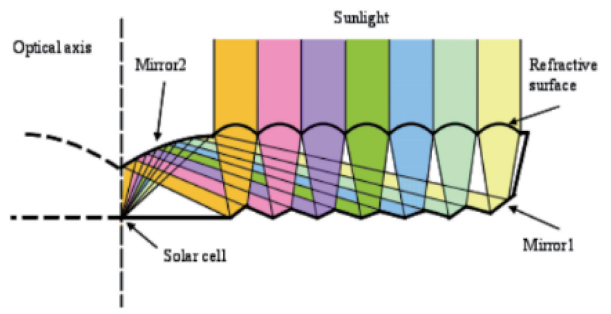


图 29 紧凑型 Fresnel 聚光器示意图

Fig. 29 Schematic of compact Fresnel concentrator

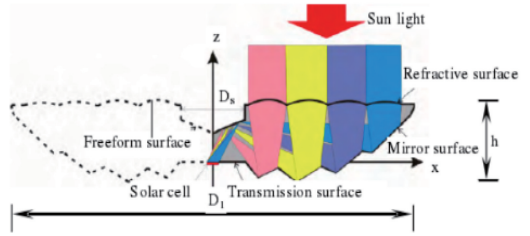


图 30 复眼型聚光器

Fig. 30 Compound-eye concentrator

等<sup>[45]</sup>基于多表面同步法(SMS)设计了聚光比可达 1000 倍的光伏聚光器,如图 31 所示。光线先在主聚光器中发生全反射和折射,然后经二次透镜会聚到下方的光伏电池上。利用 LightTools 软件仿真可知,该聚光器的高宽比为 0.39,结构紧凑且聚光效率高达 85.75%,由于该系统未引入反射镜,光学损失仅由材料的吸收和散射引起。

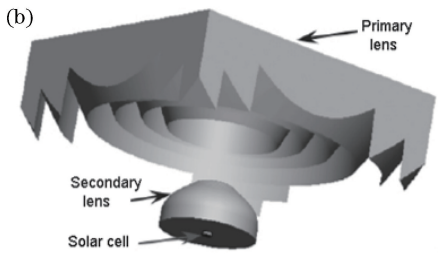
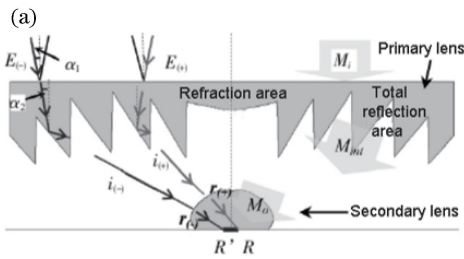


图 31 高倍太阳能聚光器。(a)光线传输图;(b)三维结构图

Fig. 31 High-power solar concentrator. (a) Light transmission; (b) three-dimensional structure

平板型聚光器通常包括三部分:透镜阵列组成的主要光学元件、二次光学元件和导光板。光线被透镜阵列会聚收缩到一定程度后,经二次光学元件进入导光板,最后以全内反射的形式传输到末端的光伏电池上。Karp 等<sup>[46]</sup>提出了带有面状微结构的平板型聚光器,如图 32 所示。其中微型结构作为二次光学元件,导光板内的光线被引导传播到边缘处的光伏电池上。这种设计相比于传统的梯度厚度导光板聚光比更大,但光线在导光板中传输时可能会发生解耦导致聚光效率降低。为进一步减少光线损

耗,同时提高微结构导光板型聚光器的聚光比上限,Unger 等<sup>[47]</sup>在导光板中增加了空气楔结构,如图 33 所示。该结构可有效地将收集到的太阳光引导到导光板出口处的光伏电池上,然而光线在空气楔上的入射角度随反射次数的增加而增大,为了不破坏全内反射条件,导光板的长度将受到一定限制。

同样在导光板中采用空气楔结构,Wu 等<sup>[48]</sup>设计了无漏光锯齿形平面导光板聚光器,如图 34 所示。该聚光器可在高倍聚光比的条件下,保持较高的聚光效率。实验结果表明,锯齿形导光板平面聚

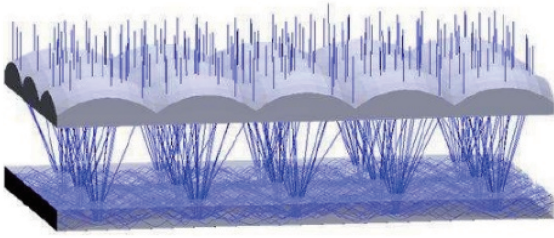


图 32 平面微光学聚光器光路图

Fig. 32 Optical path of planar micro-optic solar concentrator

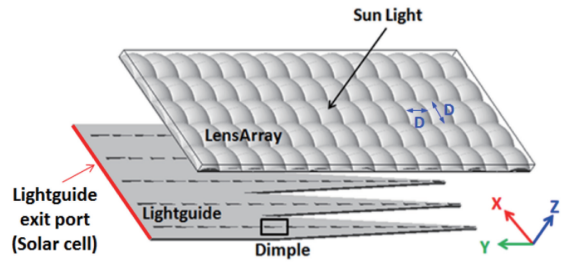


图 34 无漏光锯齿形平面导光板太阳能聚光器

Fig. 34 Sawtooth-shaped planar lightguide solar concentrator without light leakage

光板上,使平板型聚光器更容易制造,提高了聚光器在大区域面积内使用的可行性。

根据折反射定律、微分几何原理和能量守恒定律,尹鹏等<sup>[50]</sup>基于椭圆型 Monge-Ampere 方程对太阳能聚光器的自由曲面进行设计,设计的聚光器结构如图 35 所示。利用 TracePro 软件对光线进行追迹,结果表明,当太阳光的发散半角为  $0.27^\circ$  时,长度为 1 m 的自由曲面聚光器可达 500 倍的几何聚光比和 77.5% 的聚光效率。该方法设计的自由曲面有较高的设计自由度,为以后满足不同聚光需求的太阳能聚光器光学设计提供了可能性。

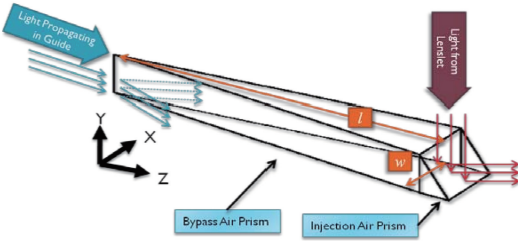


图 33 空气楔结构示意图

Fig. 33 Structural diagram of air wedge

光器可达 2300 倍的聚光比,且光线在导光板中传输时无任何泄露。Teng 等<sup>[49]</sup>提出了平板型太阳能聚光器,该聚光器具有免对准的全内反射(TIR)聚光模块和新型复合追踪器。免对准聚光模块安装在导

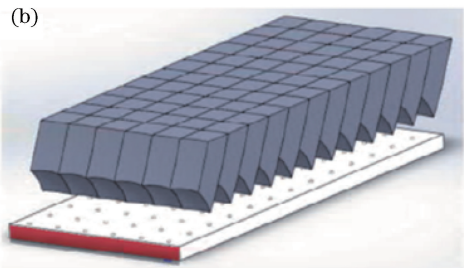
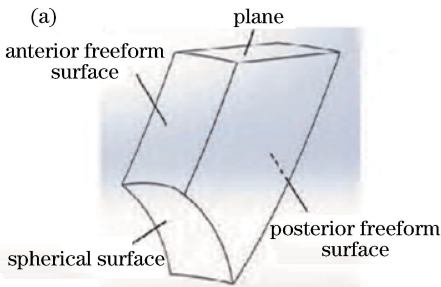


图 35 无漏光平面导光板型聚光器。(a) 单独的双抛物面形聚光模块;(b) 聚光器整体结构示意图

Fig. 35 Planar lightguide solar concentrator without light leakage. (a) Separate dual-parabolic concentrating module; (b) overall structural diagram of concentrator

此后,尹鹏等<sup>[51]</sup>提出了无漏光圆盘形聚光器,如

图36所示。不同于平板型聚光器,聚光模块阵列后被

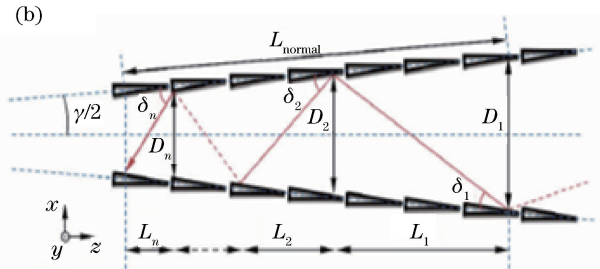
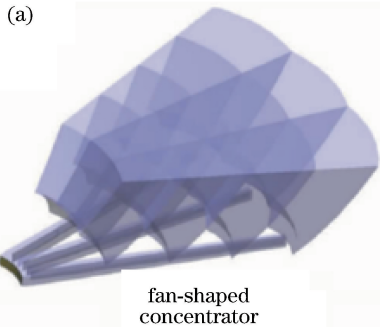


图 36 扇形无漏光导光板型太阳聚光器。(a) 聚光器结构示意图;(b) 光线在扇形导光板中的传播路径

Fig. 36 Fan-shaped lightguide solar concentrator without light leakage. (a) Structural diagram of concentrator; (b) propagation path of light in fan-shaped lightguide

修剪为扇形,导致光线在导光板中的传输距离更短,光线传输到导光板另一端出口处的光伏电池上时聚光效率更高。经测试,当抛物线系数分别为 0.019 和 0.032 时,扇形无漏光导光板的聚光效率分别是相同条件下普通导光板聚光效率的 2.61 倍和 1.11 倍。

### 3 结束语

本文对不同太阳能聚光器的光学设计和专利进行了综述,根据它们的聚光原理将太阳能聚光器分为折射式、反射式和混合式三类。其中折射式太阳能聚光器的设计自由度高且制造成本低,但对多光谱组成的太阳光敏感,容易产生色散进而降低聚光性能;反射式太阳能聚光器虽然不会因为光线的色散而出现聚光效率下降的现象,但其反射器上涂层的反射率与聚光性能有关,同时易受外界环境的影响;混合式太阳能聚光器结合了折射、反射以及全内反射的聚光方法,拥有更小的高宽比,聚光系统更加紧凑,同时提供动态聚光比,可满足不同设计要求。尽管有许多太阳能聚光器的光学设计,无论规模大小,其最终目标都是为聚光光伏系统提供低成本、严谨、操作简单和高效的解决方案。导光板型聚光器作为混合式聚光器的主要代表,仍然需要考虑光线传输过程中的泄漏以及系统的对准误差等问题。新能源的开发和利用是当今全球性的重大研究课题之一,因此,聚光光伏技术有广阔的研究前景,未来必将得到更多的重视和更深入的发展。

### 参 考 文 献

- [1] Song M H. Design, fabrication and reliability study of concentrator multi-junction solar cells [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 2-7.  
宋明辉. 聚光多结太阳能电池的设计、制备及可靠性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 2-7.
- [2] Chen Y, Jin B H, Xia X Y, *et al.* Application and construction of solar photovoltaic power generation in modern commercial buildings[J]. Building Technique Development, 2013, 40(7): 64-67.  
陈宇, 金宝合, 夏学禹, 等. 太阳能光伏发电在现代商业建筑中的应用及施工[J]. 建筑技术开发, 2013, 40(7): 64-67.
- [3] Guter W, Schöne J, Philipps S P, *et al.* Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(22): 223504.

- [4] Law D C, King R R, Yoon H, *et al.* Future technology pathways of terrestrial III-V multijunction solar cells for concentrator photovoltaic systems[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(8): 1314-1318.
- [5] Rumyantsev V D. Terrestrial concentrator PV systems [M] // Luque A L, Andreev V M. Concentrator photovoltaics. Springer series in optical sciences. Berlin Heidelberg: Springer, 2007, 130: 51-74.
- [6] Zhang Q J, Wang Y P, Huang Q W, *et al.* Experimental study on V-trough photovoltaic-photocatalytic hybrid water purification system[J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(11): 73-77.  
张庆健, 王一平, 黄群武, 等. V型聚光光伏-光催化水处理系统实验研究[J]. 现代化工, 2016, 36(11): 73-77.
- [7] Ding C, Guo T Z, Zou Y, *et al.* Design and economical analysis for double V low-power concentrated PV [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(5): 102-106.  
丁超, 郭铁铮, 邹颖, 等. 双V型低倍聚光光伏设计及经济性分析[J]. 机电工程技术, 2018, 47(5): 102-106.
- [8] Miller D C, Kurtz S R. Durability of Fresnel lenses: a review specific to the concentrating photovoltaic application[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(8): 2037-2068.
- [9] Vivar M, Herrero R, Antón I, *et al.* Effect of soiling in CPV systems[J]. Solar Energy, 2010, 84(7): 1327-1335.
- [10] Zhu Z Y, Tang Z F, Ma Y Q, *et al.* Study on the solar energy medium temperature collector system with cylindrical line focusing Fresnel type[J]. Solar Energy, 2017(2): 33-37.  
祝子夜, 唐智锋, 马雨晴, 等. 一种圆柱面线聚焦菲涅尔式太阳能中温集热系统的研究[J]. 太阳能, 2017(2): 33-37.
- [11] Wang H L. Design and analysis of a linear solar concentrator [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2014: 44-47.  
王海莲. 一种太阳能线形聚光器的设计与分析[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2014: 44-47.
- [12] Li W, Xu X P, Song H L, *et al.* Design and analysis of the line focus Fresnel concentrator based on the diffused focal points method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 721-726.  
李望, 徐熙平, 宋贺伦, 等. 分布式焦点法线聚焦菲

- 涅耳聚光器设计及性能分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 721-726.
- [13] Feng C Q, Wang R, Zheng H F. Performance analysis of solar PV/T system with transmissive Fresnel concentrator [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(12): 3137-3142.  
冯朝卿, 王瑞, 郑宏飞. 基于透射式菲涅尔聚光器的 PV/T 系统性能研究 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(12): 3137-3142.
- [14] Hongn M, Larsen S F, Gea M, *et al.* Least square based method for the estimation of the optical end loss of linear Fresnel concentrators[J]. Solar Energy, 2015, 111: 264-276.
- [15] Yu C Y, Cui Q F, Zhu H, *et al.* Optical design of a double-side Fresnel lens for concentrator [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122008.  
于春岩, 崔庆丰, 朱浩, 等. 双面菲涅耳聚光镜设计 [J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122008.
- [16] Luo C H, Zhang H, Li Y H. Design of belt-type Fresnel lens with image surface of uniform illuminance[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(1): 7-11.  
罗春华, 张贺, 李艳红. 像面照度均匀的环带式菲涅尔透镜设计 [J]. 应用光学, 2018, 39(1): 7-11.
- [17] Zhu Y M, Yang L L, Gao B, *et al.* Design of rectangle uniform spot for Fresnel concentrator [J]. Optoelectronic Technology, 2018, 38(1): 58-62.  
朱亚萌, 杨亮亮, 高贝, 等. 长方形均匀光斑菲涅尔聚光镜的设计 [J]. 光子电子技术, 2018, 38(1): 58-62.
- [18] Araki K, Yano T, Uozumi H. Concentrator solar photovoltaic power generating apparatus: US20080087323 [P/OL]. 2008-04-17 [2019-05-22]. <https://patents.glgoo.top/patent/US20080087323A1/en>.
- [19] Winston R, Ritschel A. Concentrating photovoltaic system using a Fresnel lens and non-imaging secondary optics: US20080245401 [P/OL]. 2008-10-09 [2019-05-22]. <https://patents.glgoo.top/patent/US20080245401A1/en>.
- [20] Schwartzman Z. Solar concentrator device for photovoltaic energy generation: US20080041441 [P/OL]. 2008-02-21 [2019-05-22]. <https://patents.glgoo.top/patent/US20080041441A1/en>.
- [21] Ryu K, Rhee J G, Park K M, *et al.* Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system [J]. Solar Energy, 2006, 80(12): 1580-1587.
- [22] Wang J P, Sun L G, Xu Y, *et al.* Experimental investigation of double V-trough low concentrator PV system [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(4): 696-700.  
王金平, 孙利国, 徐寅, 等. 双 V 型槽式低倍聚光光伏系统实验研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2012, 42(4): 696-700.
- [23] Ma B H, Ge S H, Li S Y. Investigation of energy-flux-density distribution of parabolic trough solar concentrators [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080801.  
马保宏, 葛素红, 李守义. 槽式抛物面聚光器能流密度分布的理论研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080801.
- [24] Yan S Y, Chang Z, Wang F, *et al.* Effect of dust accumulation on focal energy flux density distribution of trough solar concentrator and concentration optimization [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0722002.  
闫素英, 常征, 王峰, 等. 积尘对槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的影响及聚光优化 [J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0722002.
- [25] Dähler F, Wild M, Schäppi R, *et al.* Optical design and experimental characterization of a solar concentrating dish system for fuel production via thermochemical redox cycles [J]. Solar Energy, 2018, 170: 568-575.
- [26] Li L J. Research on the structural analysis and optimization of groove type condenser [D]. Changsha: Hunan University, 2015: 21-38.  
李廉洁. 槽式聚光器结构的分析与优化 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015: 21-38.
- [27] Wu D Z, Li M, Li G L, *et al.* Photothermal properties of compound parabolic concentrator under low interception ratio [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 082201.  
吴德众, 李明, 李国良, 等. 低截取比下复合抛物面聚光器的光热性能 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 082201.
- [28] Xiao L X, He Y T. Application and experiment of compound parabolic concentrator (CPC) in photovoltaic/thermal solar system [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(9): 2536-2543.  
肖丽仙, 何永泰. 复合抛物面聚光器 (CPC) 在光伏/热太阳能系统中的应用及实验 [J]. 太阳能学报, 2018, 39(9): 2536-2543.
- [29] Zhang B, Chen F, Duan P F, *et al.* Research on structure and characteristics of asymmetrical

- compound parabolic concentrator with plane absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1208002.
- 章波, 陈飞, 段鹏飞, 等. 平板吸收体非对称复合抛物聚光器结构及特性研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1208002.
- [30] Yan X S, Sun Y N, Zhang D S, *et al.* Design of the quadruple parabolic trough concentrator [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2015(7): 215-218.
- 闫小三, 孙耀宁, 张德胜, 等. 四重槽式抛物面聚光器的设计[J]. *机械设计与制造*, 2015(7): 215-218.
- [31] Zhang Q. Theoretical analysis and experimental study of linear Fresnel reflector solar concentrator [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 15-20.
- 张谦. 线性菲涅耳反射太阳能聚光器的理论分析与实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 15-20.
- [32] Du C X, Wang P, Wu Y T, *et al.* Concentration ratio analysis of linear Fresnel reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0808001.
- 杜春旭, 王普, 吴玉庭, 等. 线性菲涅耳聚光装置的聚光比分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0808001.
- [33] Ouyang H Y, Niu Y G, Wang H L, *et al.* Design of a micro arc linear Fresnel solar heat collector [J]. *Electrical Automation*, 2015, 37(4): 41-44.
- 欧阳海玉, 牛玉刚, 王浩林, 等. 微弧线性菲涅耳太阳能集热器的设计[J]. *电气自动化*, 2015, 37(4): 41-44.
- [34] Terao A, Krippendorf R. Compact micro-concentrator for photovoltaic cells: US7297865 [P/OL]. 2007-11-20 [2019-05-22]. <https://patents.glgoo.top/patent/US7297865B2/en>.
- [35] Zhuang L Q. Performance investigation of dish solar concentrator with two reflection mirror [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 22-30.
- 庄立强. 碟式太阳能聚光器二次反射性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 22-30.
- [36] Benitez P, Cvetkovic A, Winston R, *et al.* High-concentration mirror-based Kohler integrating system for tandem solar cells [C] // 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, May 7-12, 2006, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE, 2006: 690-693.
- [37] Fork D K, Maeda P Y. Concentrating solar collector with solid optical element: US7906722 [P/OL]. 2011-03-15 [2019-05-22]. <https://patents.glgoo.top/patent/US7906722B2/en>.
- [38] Li S. New Fresnel concentrator structural optimization design [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 46-50.
- 李霜. 新型菲涅耳聚光器结构优化设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 46-50.
- [39] Chong K K, Siaw F L, Wong C W, *et al.* Design and construction of non-imaging planar concentrator for concentrator photovoltaic system [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(5): 1364-1370.
- [40] Chong K K, Wong C W, Siaw F L, *et al.* Optical characterization of nonimaging planar concentrator for the application in concentrator photovoltaic system [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2010, 132(1): 011011.
- [41] Tsadka S, Segev R, Migalovich P, *et al.* Solar electricity generation system: US20090065045 [P/OL]. 2009-03-12 [2019-05-22]. <https://patents.glgoo.top/patent/US20090065045A1/en>.
- [42] Wang Y F. Investigation on a paraboloidal dish concentrating photovoltaic/thermal system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 24-36.
- 王云峰. 太阳能碟式聚光发电供热综合利用系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 24-36.
- [43] Jing L. Study on design of novel Fresnel concentrator in concentrated photovoltaic [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 49-65.
- 荆雷. 新型 Fresnel 光伏聚光镜的设计研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2012: 49-65.
- [44] Zhuang Z F, Tao X, Yu F H. A compact flyeye concentrator with high uniformity irradiance on the solar cell [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(7): 7-12.
- 庄振锋, 陶晓, 余飞鸿. 复眼原理设计的紧凑式高均匀性光伏聚光器[J]. *光电工程*, 2014, 41(7): 7-12.
- [45] Zhao Q L, Chen J Y, Wu X G, *et al.* Nonimaging design of a high efficient photovoltaic concentrator with  $1000 \times$  concentration [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(5): 61-64, 70.
- 赵清亮, 陈俊云, 吴晓光, 等. 1000 倍聚光的光伏聚光器的非成像设计[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(5): 61-64, 70.
- [46] Karp J H, Tremblay E J, Ford J E. Planar micro-optic solar concentrator [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1122-1133.
- [47] Unger B L, Schmidt G R, Moore D T. Dimpled planar lightguide solar concentrators [C] //

- International Optical Design Conference and Optical Fabrication and Testing, June 13-17, 2010, Jackson Hole, WY, United States. Washington, D.C.: OSA, 2010: ITuE5P.
- [48] Wu H Y, Chu S C. Ray-leakage-free sawtooth-shaped planar lightguide solar concentrators [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20073-20089.
- [49] Teng T C, Lai W C. Planar solar concentrator featuring alignment-free total-internal-reflection collectors and an innovative compound tracker [J]. *Optics Express*, 2014, 22(S7): A1818-A1834.
- [50] Yin P, Xu X P, Jiang Z G, *et al.* Design method of solar concentrator based on elliptic type Monge-Ampère equations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0922002.
- 尹鹏, 徐熙平, 姜肇国, 等. 基于椭圆型 Monge-Ampère 方程的太阳能聚光器设计方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0922002.
- [51] Yin P, Xu X P, Jiang Z G, *et al.* Design method of fan-shaped ray-leakage-free solar concentrator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0208002.
- 尹鹏, 徐熙平, 姜肇国, 等. 扇形无漏光太阳能聚光器的设计方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0208002.