

# 相同尺寸抛物/球面镜单元旋转阵列的碟式太阳能聚光器聚焦特性研究

颜健\*, 刘永祥, 胡耀松, 彭佑多

湖南科技大学机电工程学院, 湖南湘潭 411201

**摘要** 提出一种相同尺寸曲面镜单元旋转阵列的新型碟式聚光器, 包括抛物镜和球面镜阵列两种, 具有制造简单、成本低和镜面单元间无遮挡可紧凑布置等优点。采用光线跟踪方法, 以典型口径聚光器(宽度为  $D=10$  m)为例, 以聚光器的焦距  $f_1=R_1/2$  与其宽度  $D$  的比值  $f_1/D$ 、抛物镜焦距  $f_m$  与旋转阵列半径  $R_1$  的比值  $f_m/R_1$  和球面镜半径  $R_m$  与  $R_1$  的比值  $R_m/R_1$  为无量纲参数, 详细分析了镜面宽度  $d$  和上述无量纲参数对聚光器光学性能的影响, 充分展示了新型聚光器在聚光光热(高聚光比需求)和聚光光伏领域(高能流均匀性需求)中的应用价值, 并为其设计提供了依据。研究结果表明: 新型碟式聚光器中平面接收器应位于  $z=f_1$  之下的合理位置处才能使聚焦光斑达到最小; 采用抛物镜时聚焦光斑的拦截宽度在  $f_m/R_1=0.6$  处达到最小值, 而采用球面镜时通常在  $R_m/R_1=1.0$  处达到最小。平均聚光比和峰值聚光比随聚光器几何参数的变化规律与拦截宽度相反: 采用抛物镜时它们分别可高达 2846.8 和 7107.0, 对应的拦截宽度仅有 88.3 mm; 采用球面镜时二者分别可高达 3000.0 和 7800.0, 对应的拦截宽度只有 87.5 mm, 非常适用于高温聚光光热领域。聚光器取合理几何参数时总能获得能流分布非常均匀的正方形聚焦光斑, 其平均聚光比可达 420, 非常适用于高倍聚光光伏领域。

**关键词** 光学设计; 太阳能碟式聚光器; 旋转阵列布置; 抛物镜单元; 球面镜单元; 光学性能; 均匀能流分布

中图分类号 TK513

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1522002

## Focusing Characteristics of Dish Solar Concentrator Formed by Rotating Array of Parabolic/Spherical Mirrors with Same Size

Yan Jian\*, Liu YongXiang, Hu YaoSong, Peng YouDuo

School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China

**Abstract** A novel dish concentrator formed by a rotating array of curved mirror units with same size is proposed, and the mirrors in the array can be either parabolic or spherical. This concentrator has the advantages of simple manufacturing, low cost, and readiness for compact arrangement owing to the obstruction-free state between mirror units. Taking a concentrator with the typical aperture (width is  $D=10$  m) as an example, the influences of mirror width  $d$  and dimensionless parameters on the optical performance of the concentrator in detail are analyzed by the ray tracing method. The dimensionless parameters include the ratio of the concentrator's focal length  $f_1=R_1/2$  to its width  $D$  (i. e.,  $f_1/D$ ), the ratio of the parabolic mirror's focal length  $f_m$  to the radius  $R_1$  of the rotating array (i. e.,  $f_m/R_1$ ), and the ratio of the spherical mirror's radius  $R_m$  to  $R_1$  (i. e.,  $R_m/R_1$ ). The results demonstrate the application value of the new concentrator in concentrating thermal systems (high concentration ratio requirement) and concentrating photovoltaic systems (high flux uniformity requirement), and provide a basis for its design. The following observations can be made from the results. The plane receiver in the novel dish concentrator should be located at a reasonable position below  $z=f_1$  to minimize the focal spot. Interception width of the focused spot reaches the minimum value at  $f_m/R_1=0.6$  when parabolic mirrors are used, whereas it usually reaches its minimum value at  $R_m/R_1=1.0$  when the mirrors utilized are spherical. The variation laws of the average local concentration ratio and the peak concentration ratio with the concentrator's geometric parameters are opposite to those of interception width. When parabolic mirrors are used, the average local concentration ratio and the peak concentration ratio can be as high as 2846.8 and 7107.0 respectively, whereas the corresponding interception width is only 88.3 mm. In the case of spherical mirrors, they can reach 3000.0 and 7800.0 respectively, while the corresponding

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-02-27; 录用日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(52105097)、湖南省自然科学基金(2020JJ5189)

通信作者: \*yanjian1988@hnust.edu.cn

interception width is as small as 87.5 mm. Therefore, the proposed concentrator is readily applicable to high-temperature concentrating thermal systems. When reasonable geometric parameters are chosen for the concentrator, it can always obtain a square focal spot with a highly uniform flux distribution, and its average local concentration ratio can reach 420, indicating that it also works well in high-power concentrating photovoltaic systems.

**Key words** optical design; dish solar concentrator; rotating array arrangement; parabolic mirror unit; spherical mirror unit; optical performance; uniform flux distribution

## 1 引言

太阳能是清洁环保和分布广泛的可再生能源,开发利用太阳能资源是我国实现能源结构升级并助力“碳达峰、碳中和”目标的重要途径之一<sup>[1-3]</sup>。聚光器是太阳能聚光高品位利用中不可或缺的光学装置,它可将低密度太阳光能聚集到较小面积的接收器上形成高密度能量,从而提升系统能量转换效率<sup>[1,3]</sup>。广义的碟式聚光器是指具有点聚焦特征的一类聚光装置,它具有布置灵活、模块化程度高和聚光比高等优点,在聚光热发电和聚光光伏发电领域中应用广泛。例如,采用传统抛物碟式聚光器的碟式/斯特林热发电系统<sup>[4]</sup>和高倍聚光光伏系统<sup>[5]</sup>。值得注意的是,聚光光伏和聚光光热两种太阳能利用方式中接收器所需的聚焦能流分布存在明显差异,前者需聚光器在光伏电池表面形成均匀能流分布,提升其光-电转换效率和服役寿命,但传统抛物碟式聚光器自身很难实现均匀能流分布<sup>[6-8]</sup>。另外,太阳能聚光利用系统中聚光器的建造成本通常会占系统总建造成本的 50% 左右<sup>[3]</sup>,创新碟式聚光器的镜面形式来降低其制造成本是商业工程应用中一直追求的。

近年来,诸多学者提出采用相同几何参数的镜面单元组成碟式聚光器,用于减少反射镜面的生产、安装和管理成本,从而降低聚光器的总建造成本。根据采用镜面单元的曲面形式可分为两类,其一是采用平面镜,其二是采用曲面镜。采用多个平面镜组成碟式聚光器通常是为了实现平面接收器的均匀能流分布<sup>[9-11]</sup>。Chong 等<sup>[9]</sup>提出了一种由平面镜组成的非成像聚光器,实现了平面接收器的均匀能流分布,但为了避免各平面镜之间的遮挡而留有较大间隙,故镜面布置无法紧凑。为了解决该问题,Tan 等<sup>[10]</sup>又提出了一种新的镜面布置优化方法,实现了既能获得均匀能流分布(聚光比可达 435),又能近似实现各镜面无缝拼接,镜面布置非常紧凑。王云峰等<sup>[11]</sup>也提出了一种新型多平面镜线性组合碟式聚光器,并研制了一套聚光比为 450 的聚光器,证实了焦平面能流分布均匀性可达到预期效果。采用曲面镜组成碟式聚光器通常是为高温聚光光热系统寻求低成本的聚光器替代方案。Xia 等<sup>[12]</sup>和 Mao 等<sup>[13]</sup>对由 16 个抛物镜单元组成的碟式聚光器的光学性能进行了深入研究,该聚光器适用于聚光光热利用。Riveros-Rosas 等<sup>[14]</sup>提出了一种将相同尺寸球面反射镜线性阵列布置在一个抛物曲面框架上的新型碟式聚光器,即以抛物曲面为基底来布置球面反射镜,研究了几个参数和光学误差对该聚光器光学性能的影响。

Chang<sup>[15]</sup>提出了一种由相同孔径和相同曲率半径的球面镜环形阵列在一个虚拟抛物曲面框架上组成的碟式聚光器,研究了聚光器口径和焦距等几何参数对其聚光性能的影响,认为该聚光器能作为抛物碟式聚光器的一种低成本替代方案。

总体而言,以往研究对反射镜曲面及其布置方式的探讨仍不够全面,这些方案均将球面镜布置在传统抛物曲面框架上,且均未能实现均匀能流分布。本文提出了一种采用相同尺寸曲面镜旋转阵列布置的新型碟式聚光器,它将几何参数相同的抛物镜或球面镜绕一个点以相同的半径进行旋转阵列布置,相当于在一个球面基底上合理布置镜面单元,这不同于以往采用相同镜面单元组成碟式聚光器的镜面布置方法。本文将采用光线跟踪方法<sup>[16-17]</sup>,以工程应用中典型口径碟式聚光器为例,详细分析旋转阵列半径和镜面单元几何参数(球面镜半径、抛物镜焦距和镜面宽度)对该新型聚光器光学性能的影响规律,展示该新型聚光器在太阳能聚光光热(高聚光比需求)和聚光光伏领域(能流分布高均匀性需求)中的应用价值,并为其设计提供基础。

## 2 模型与方法

### 2.1 新型聚光器物理模型

图 1(a)为采用相同参数抛物或球面反射镜单元旋转阵列的新型碟式聚光器示意图,整个聚光器只需加工制造一种型号的反射镜单元,具有制造成本低和物料管理简单的显著优点。该聚光器中反射镜单元的布置方法和步骤如下。

1)在抛物或球面反射镜曲面的顶点  $O$  处建立坐标系  $O-xyz$ ,再用以  $O$  点为中心、边长为  $d$  的正方形去截取反射镜面,得到一个外形呈正方形的镜面单元(记为镜面单元 1)。坐标系的  $x$  轴和  $y$  轴分别与镜面单元的两个直角边平行。当采用抛物反射镜单元时,抛物曲面的焦距为  $f_m$ 。当采用球面镜单元时,球面镜的曲面半径为  $R_m$ 。

2)以沿  $z$  轴方向且与点  $O$  距离为  $R_1$  的点  $C_1$  为圆心,将镜面单元 1 绕点  $C_1$  分别以  $+y$  和  $-y$  为旋转轴方向对阵列进行旋转,阵列数量为  $M$  且阵列角间距为  $\theta$  (相邻镜面单元中心法线的夹角),则镜面单元总数量为  $N=2M-1$ 。如图 1(b)所示,阵列角间距为  $\theta=2\arcsin\left[\frac{(d+t)}{2R_1}\right]$ ,也等于镜面单元两边缘与圆心  $C_1$  构成的张角。其中,  $t$  为相邻两个镜面单元之间的空隙,为方便镜面的安装而设置,本文中设定其值为 5 mm,  $R_1$  为旋转阵列半径。

3) 将上述  $N$  个镜面单元, 再次绕点  $C_1$  分别以  $+x$  和  $-x$  为旋转轴方向对阵列进行旋转, 阵列数量为  $M$  (满足  $N=2M-1$ ), 且旋转阵列的角度间距也为  $\theta$ , 最

终获得镜面单元布置行列数为  $N \times N$  的新型碟式聚光器, 如图 1(a) 所示。

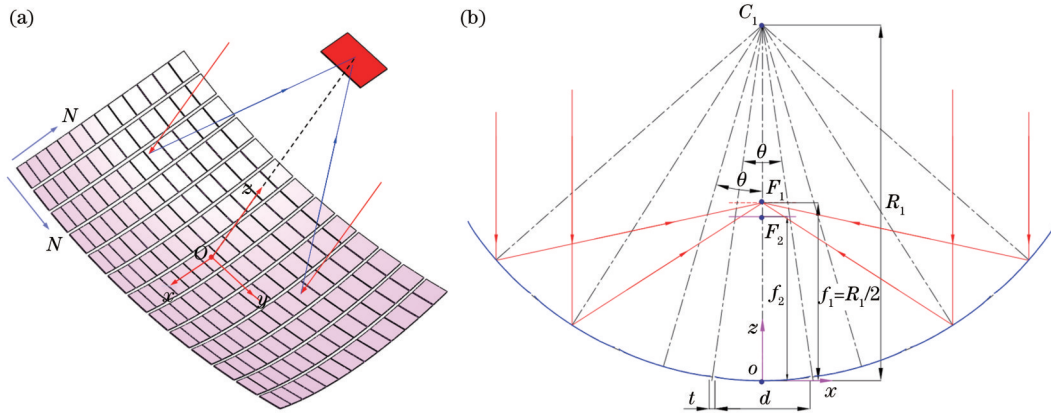


图 1 由相同镜面单元旋转阵列构成的新型碟式聚光器。(a) 三维结构示意图; (b) 二维截面内光路传输示意图

Fig. 1 Novel dish concentrator formed by rotating array with same mirror unit. (a) Schematic diagram of three-dimensional structure; (b) schematic diagram of optical path transmission in two-dimensional cross-section

平面接收器(如光伏电池组件)或腔体吸热器的接收窗一般可位于  $z=f_1=R_1/2$  位置 ( $f_1$  为该聚光器的理论焦距) 处, 此位置也是半径为  $R_1$  的球面反射镜的理论焦平面所在的位置。为了获得更小尺寸的聚焦光斑, 需要合理地将平面接收器偏离  $z=f_1$  位置, 本文将通过光线跟踪方法来确定合理安装位置(最佳位于  $z=f_2$  位置) 以实现聚焦光斑尺寸最小, 具体见第 3.1 节。

该新型聚光器的聚焦光斑大小和能流分布等光学性能受旋转阵列半径  $R_1$  (焦距  $f_1$ )、镜面宽度  $d$ 、镜面单元的曲面参数(抛物焦距  $f_m$  和球面半径  $R_m$ )、旋转阵列数量  $N$  (聚光器宽度  $D=N \times d$ ) 等关键几何参数影响。为了更好地进行对比分析, 本文以工程应用中典型口径碟式聚光器(取聚光器宽度为  $D=10$  m) 为例, 以  $f_1/D$ 、 $f_m/R_1$ 、 $R_m/R_1$  为关键无量纲参数, 重点分析镜面宽度  $d$  和上述无量纲参数对该新型聚光器光学性能的影响规律, 展示该新型聚光器在太阳能聚光光热和聚光光伏领域中的应用价值, 并为其设计提供基础。

## 2.2 光学性能指标

采用光线跟踪方法, 在本团队前期太阳能聚光器光学建模工作<sup>[16]</sup>的基础上, 开发了新型碟式聚光系统的光学模拟计算代码。考虑太阳入射光锥的半顶角为  $4.65$  mrad。正方形平面接收器的离散示意图如图 2 所示, 假定平面接收器的吸收率为  $100\%$ , 且聚光器镜面的反射率为  $100\%$ , 即不考虑任何光学损失, 故本文重点关注聚焦能流分布特性。考虑聚焦能流分布模拟精度和计算耗时, 本文光学模拟时设定单个太阳光锥离散光线数量为  $829$ , 镜面单元离散尺寸为  $4$  mm, 网格约  $1.88 \times 10^7$  个, 总跟踪光线数量约为  $1.55 \times 10^9$ 。采用光线跟踪方法可计算得到平面接收器上各离散网格的聚焦能流密度, 并将其转化为方便对比的无量纲参数(局部聚光比), 它是接收器表面的能流密度值与太阳辐照强度的比值。平面接收器离散后网格  $i$  的局

部聚光比  $C_i$  可表示为

$$C_i = \frac{E_i}{A_i W_0}, \quad (1)$$

式中:  $A_i$  是网格  $i$  的表面积;  $E_i$  是网格  $i$  吸收的太阳辐射能量;  $W_0$  是太阳直射辐照值, 单位为  $W/m^2$ 。

聚光器的功能是将太阳光能有效地聚集在接收器上, 用于后续的光-电转换或光-热转换, 通常需要重点关注其聚焦光斑大小、平均聚光比、峰值聚光比(局部聚光比的最大值)和聚焦能量分布均匀性等光学性能指标, 因为它们决定着光伏或光热接收器的工作性能<sup>[9,14]</sup>。需要注意的是, 平均聚光比和聚焦能量分布均匀性指标均与聚焦光斑大小的确定有关, 而聚焦光斑大小又受聚光器几何参数显著影响, 由于聚焦光斑的边缘能流密度很低, 故会导致上述性能指标评价不合理, 失去其代表性和可比性。因此, 本文采用拦截效率为  $90\%$  的正方形拦截区域的半峰全宽  $w$  来表征聚焦光斑大小, 如图 2 所示, 灰度区域内拦截的能量是聚光器反射总能量  $E_{total}$  的  $90\%$ , 这种以拦截效率所确定的拦截区域来表征聚焦光斑大小的方式是一种常用做法, 它可避免聚焦光斑边缘低密度能流的影响<sup>[14]</sup>。图 2 所示的总宽度为  $2w$  的灰度拦截区域内的平均聚光比  $M_{CR}$  可表示为

$$M_{CR} = \frac{0.9E_{total}}{(2w)^2 W_0}, \quad (2)$$

式中:  $E_{total} = A_{total} \cdot W_0$ , 其中  $A_{total}$  为聚光器的有效采光面积, 它在镜面宽度  $d$  和旋转阵列数量  $N$  相同但旋转阵列半径  $R_1$  不同时, 会略有差异。拦截宽度  $w$  可以在聚焦能量分布结果的基础上计算得到, 本文中计算聚焦能量分布时考虑了平面接收器对聚光器产生的阴影, 设该阴影区域为一个  $500$  mm  $\times$   $500$  mm 的正方形区域。拦截宽度  $w$  的计算方法为采用光线跟踪方法模拟得到平面接收器的聚焦能流分布, 再以接收器中

心点  $F_2$  为中心建立正方形区域(相应边分别平行于  $x$  轴与  $y$  轴),统计落在该正方形区域内的聚焦能量在总聚焦能量中的占比,如果占比小于 90%,则将正方形区域的边长增加 1 mm 后再次统计,直到找到能量占比首次不小于 90% 时的正方形尺寸。

平面接收器上聚焦光斑的能流密度分布(局部聚光比分布)的均匀性对太阳能聚光光伏的应用具有重大影响,它会显著影响光伏电池的光-电转换效率和服役寿命。以平面接收器表面的局部聚光比分布的非均匀因子  $f_{\text{non}}$  来评价其均匀性,它的值越小代表均匀性越好, $f_{\text{non}}$  的表达式<sup>[7-8]</sup>为

$$f_{\text{non}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_t} (C_i - M_{\text{CR}})^2 / (N_t - 1)}}{M_{\text{CR}}}, \quad (3)$$

式中: $N_t$  是平面接收器中拦截区域(总宽度为  $2w$  的正方形区域)内离散网格的数量; $C_i$  是在此拦截区域内的网格  $i$  的局部聚光比。

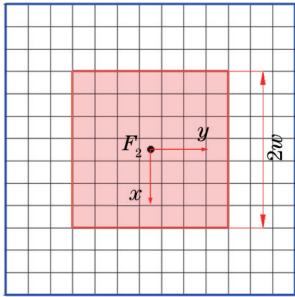


图 2 平面接收器的离散与矩形拦截区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of discrete and rectangular interception area of planar receiver

### 3 结果与讨论

本节以聚光器宽度为  $D=10$  m 为例,重点分析  $f_i/D$ 、 $f_m/R_1$ 、 $R_m/R_1$  和镜面宽度  $d$  对新型聚光器光学性能指标的影响规律。涉及的参数区间包括: $f_i/D$  在 0.6~1.4 之间,且递增间距为 0.2(共 5 组); $f_m/R_1$  和  $R_m/R_1$  均在 0.4~1.4 之间,且递增间距为 0.2(各 6 组);镜面宽度  $d$  分别为 150, 250, 350, 450, 550, 650 mm,根据聚光器宽度为  $D=10$  m 可计算得到相应的旋转阵列数  $M$ ,分别为 34, 21, 15, 12, 10, 8,它们近似满足  $D \approx (2M-1) \times d$ 。基于上述参数区间,分别对采用抛物镜面和球面镜单元的新型聚光器各计算了 180 组工况。为了更清晰地展示结果数据和对比参数影响规律,将镜面宽度  $d$ 、镜面单元反射镜曲面参数与旋转阵列半径  $R_1$  的比值( $f_m/R_1$  或  $R_m/R_1$ )两者进行组合,即得到 36 种组合工况,如表 1 所示。参数组合的方式是  $f_m/R_1$  或  $R_m/R_1$  每从 0.4~1.4 改变 6 次,镜面宽度  $d$  就改变一次(每增加 100 mm),即表 1 中工况组合序号( $n$ ) 1, 7, 13, 19, 25, 31 均是不同镜面宽度下的起始数据,这样可方便分析每种新型聚光器中三个变量的影响规律,即实现固定任意两个参数分析另一个参数的影响。以图 4

(b) 举例,当采用球面镜单元且  $f_i/D=0.6$  时:在工况组合序号为 1~6 之间,可分析镜面宽度  $d=150$  mm 时不同  $R_m/R_1$  的影响规律;在工况组合序号为 31~36 之间,可分析  $d=650$  mm 时不同  $R_m/R_1$  的影响规律。

#### 3.1 光线聚集特性与接收器最佳安装位置

在 MATLAB 软件中开发了三维光线追迹显示程序,用于展示平行光线在新型碟式聚光器中的传输与会聚轨迹,为了更清晰地展示最小聚焦光斑位置,将其投影到  $xO_1z$  平面。典型几何参数下聚光器内的光线会聚如图 3 所示,其中最顶端拦截光线的位置为  $z=f_i=R_1/2$ 。可以清晰地看到,采用相同抛物镜面或球面镜单元旋转阵列的新型聚光器能很好地会聚太阳光,它是通过一系列镜面单元将太阳光分散地反射到平面接收器上,与完整抛物曲面聚光器将平行光会聚于焦点位置不同。也正因此,新型聚光器具备在平面接收器上实现优异均匀能流分布的潜力,这在本文算例中得到证实(见第 3.4 节),非常适合为高倍聚光光伏系统的电池组件提供均匀分布的能量。另外,可以看到,接收器位于  $z=f_i$  位置时聚焦光斑仍较大,而将接收器向下移动一定距离可使聚焦光斑达到最小,主要原因是  $z=f_i$  定义的是旋转阵列虚拟球面的理论焦平面,它并非旋转阵列后各镜面单元的理论焦平面。为了确定最小化聚焦光斑的接收器安装位置,在三维光线追迹程序中将平面接收器从  $z=f_i$  位置逐步向下移动,并计算各位置的聚集光斑尺寸,最终找到聚焦光斑最小时对应的接收器安装位置,即  $z=f_2$  位置。

图 4 为接收器最佳安装位置  $z=f_2$  及其对应的聚焦光斑宽度随聚光器几何参数的变化。图 4 中聚焦光斑尺寸是采用平行光线追迹确定的,用于初步估计各几何参数下的聚焦能力,其尺寸必然要小于图 5 和图 6 中考虑太阳入射锥角的情况。从图 4 可以看到,聚光器采用不同几何参数下实现聚焦光斑最小的接收器最佳安装位置均有差异,其最佳偏移距离  $\Delta f=f_i-f_2$  是随着  $f_i/D$  的增大而逐渐减小的,这说明接收器的合理安装位置对减小聚焦光斑尺寸尤为重要。因此,后续光学分析时均将平面接收器固定在最佳的  $z=f_2$  位置来获得最小聚焦光斑。从聚焦光斑大小来看,聚焦光斑尺寸随着  $f_i/D$  的减小而增大,无论是采用抛物镜单元还是球面镜单元,在  $f_i/D=0.6$  时聚焦光斑宽度均已超过 300 mm(正方形聚焦光斑的总宽度超过 600 mm),而过大的聚焦光斑缺乏实际应用价值,故后续分析中剔除了聚焦光斑宽度超过 300 mm 的参数组合工况。

#### 3.2 拦截宽度和聚焦能流均匀性的变化

聚焦光斑的拦截宽度  $w$  和能流分布非均匀因子  $f_{\text{non}}$  随聚光器几何参数的变化如图 5 和图 6 所示,聚焦光斑的拦截宽度总是随着  $f_i/D$  的增加(旋转阵列半径  $R_1$  的增加)或镜面宽度  $d$  的减小而减小。对于抛物镜阵列的聚光器而言,当  $f_i/D \geq 0.8$  时,各组合工况下拦截宽度均小于 300 mm,这些较小的聚焦光斑均适合实际工程应用,如图 5(a) 所示。无论镜面宽度  $d$  和  $f_i/D$

表 1 聚光器中镜面单元的反射镜曲面参数与其宽度的组合

Table 1 Combination of mirror surface parameters and width of mirror unit in concentrator

| Combination number $n$ | Mirror width $d$ /mm | Dimensionless geometric parameter ( $f_m/R_1$ or $R_m/R_1$ ) | Combination number $n$ | Mirror width $d$ /mm | Dimensionless geometric parameter ( $f_m/R_1$ or $R_m/R_1$ ) |
|------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1                      | $d=150$              | 0.4                                                          | 19                     | $d=450$              | 0.4                                                          |
| 2                      |                      | 0.6                                                          | 20                     |                      | 0.6                                                          |
| 3                      |                      | 0.8                                                          | 21                     |                      | 0.8                                                          |
| 4                      |                      | 1.0                                                          | 22                     |                      | 1.0                                                          |
| 5                      |                      | 1.2                                                          | 23                     |                      | 1.2                                                          |
| 6                      |                      | 1.4                                                          | 24                     |                      | 1.4                                                          |
| 7                      | $d=250$              | 0.4                                                          | 25                     | $d=550$              | 0.4                                                          |
| 8                      |                      | 0.6                                                          | 26                     |                      | 0.6                                                          |
| 9                      |                      | 0.8                                                          | 27                     |                      | 0.8                                                          |
| 10                     |                      | 1.0                                                          | 28                     |                      | 1.0                                                          |
| 11                     |                      | 1.2                                                          | 29                     |                      | 1.2                                                          |
| 12                     |                      | 1.4                                                          | 30                     |                      | 1.4                                                          |
| 13                     | $d=350$              | 0.4                                                          | 31                     | $d=650$              | 0.4                                                          |
| 14                     |                      | 0.6                                                          | 32                     |                      | 0.6                                                          |
| 15                     |                      | 0.8                                                          | 33                     |                      | 0.8                                                          |
| 16                     |                      | 1.0                                                          | 34                     |                      | 1.0                                                          |
| 17                     |                      | 1.2                                                          | 35                     |                      | 1.2                                                          |
| 18                     |                      | 1.4                                                          | 36                     |                      | 1.4                                                          |

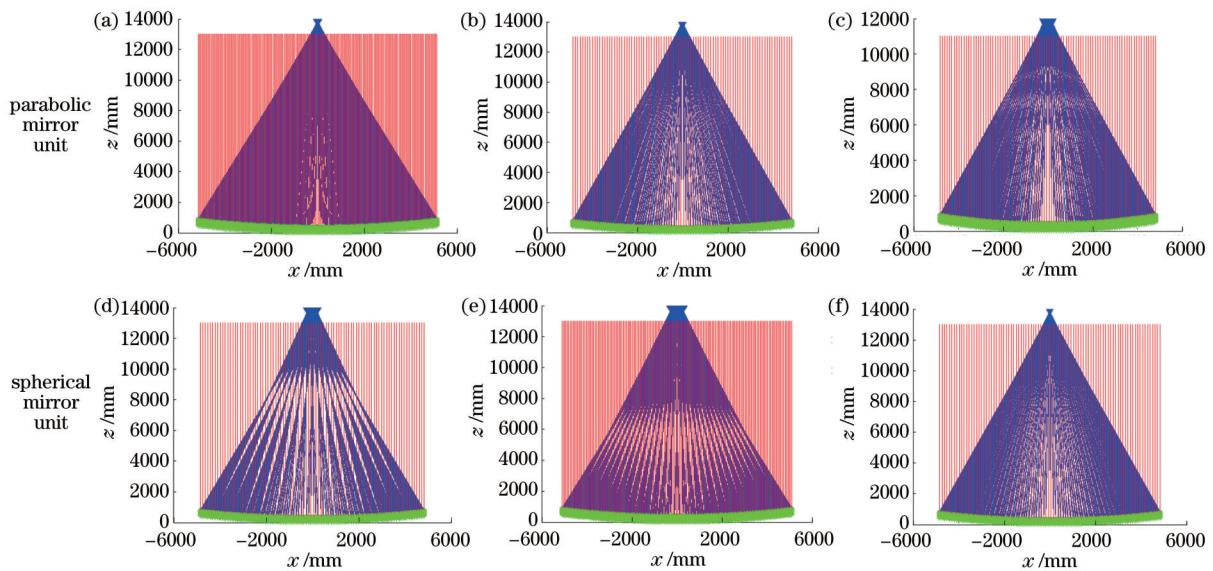


图 3 不同参数组合下平行光在新型碟式聚光器内的传输轨迹。(a)  $f_1/D = 1.4, d = 150 \text{ mm}, f_m/R_1 = 0.6$ ; (b)  $f_1/D = 1.4, d = 650 \text{ mm}, f_m/R_1 = 0.6$ ; (c)  $f_1/D = 1.2, d = 650 \text{ mm}, f_m/R_1 = 1.4$ ; (d)  $f_1/D = 1.4, d = 650 \text{ mm}, R_m/R_1 = 0.6$ ; (e)  $f_1/D = 1.4, d = 350 \text{ mm}, R_m/R_1 = 0.4$ ; (f)  $f_1/D = 1.4, d = 650 \text{ mm}, R_m/R_1 = 1.0$

Fig. 3 Transmission path of parallel incident rays in novel dish concentrator under different parameter combinations. (a)  $f_1/D = 1.4, d = 150 \text{ mm}, f_m/R_1 = 0.6$ ; (b)  $f_1/D = 1.4, d = 650 \text{ mm}, f_m/R_1 = 0.6$ ; (c)  $f_1/D = 1.2, d = 650 \text{ mm}, f_m/R_1 = 1.4$ ; (d)  $f_1/D = 1.4, d = 650 \text{ mm}, R_m/R_1 = 0.6$ ; (e)  $f_1/D = 1.4, d = 350 \text{ mm}, R_m/R_1 = 0.4$ ; (f)  $f_1/D = 1.4, d = 650 \text{ mm}, R_m/R_1 = 1.0$

如何组合, 拦截宽度  $w$  随无量纲参数  $f_m/R_1$  的变化规律总是先减小后增大, 且均在  $f_m/R_1 = 0.6$  时拦截宽度达到最小值。例如, 当  $f_1/D = 1.4$  和  $d = 650 \text{ mm}$  时, 拦截宽度仅有  $96.0 \text{ mm}$ , 此时聚光器会聚太阳光的能力非

常优异。另外, 随着镜面宽度的增大,  $f_1/D$  对拦截宽度的影响有所减弱, 但受  $f_m/R_1$  的影响会更为明显, 表现为拦截宽度波动范围变大。对于球面镜阵列的聚光器而言, 拦截宽度  $w$  也是随着无量纲参数  $R_m/R_1$  的变化

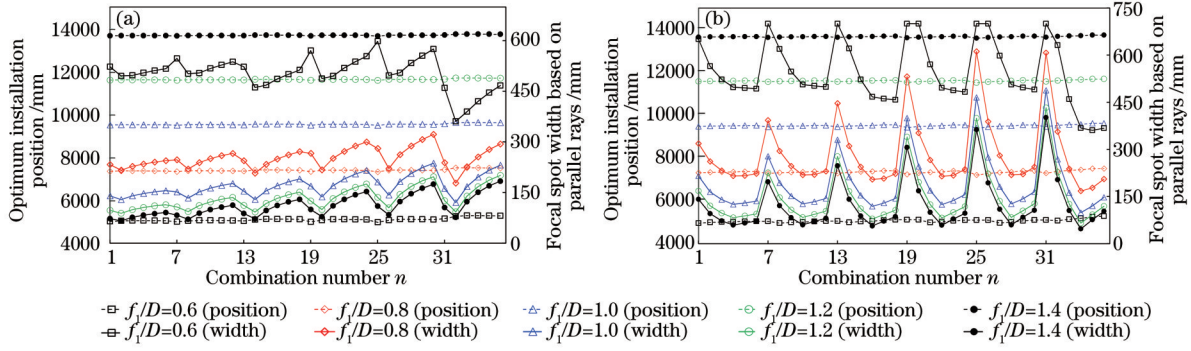


图 4 不同镜面单元下最佳接收器安装位置和聚焦光斑宽度随聚光器几何参数的变化。(a) 抛物线镜面单元; (b) 球面镜单元  
Fig. 4 Optimum receiver installation position and focal spot width varying with geometric parameters of concentrator under different mirror units. (a) Parabolic mirror unit; (b) spherical mirror unit

先减小后增大,但通常在  $R_m/R_1=1.0$  时,拦截宽度达到最小值,如图 6(a) 所示。例如,当  $f_i/D=1.4$  和  $d=650$  mm 时,拦截宽度可减小到 78.4 mm。事实上,  $R_m/R_1=1.0$  时球面镜曲面半径与旋转半径重合,即旋转阵列构成一个半径为  $R_1$  的球面镜聚光器,其会聚光线的的能力必然得到提升,进而聚焦光斑显著减小。总体而言,当采用较大的镜面宽度时,选择较大的  $f_i/D$  和合理的反射镜曲面参数对减小聚焦光斑尺寸尤为重要。此外,当聚光器采用球面镜时,拦截宽度受其反射镜曲面参数的影响更为敏感。

在聚焦光斑的能流分布均匀性方面,非均匀因子随聚光器几何参数的变化呈现出非线性的复杂变化规律,当采用球面镜时更为明显,但均存在一些非均匀因

子很小的参数组合工况,如图 5(b) 和图 6(b) 所示。对于采用抛物镜的聚光器,非均匀因子整体上是随着  $f_m/R_1$  的增加而有所减小,即能流均匀性得到了提高。考虑到镜面宽度  $d$  越大时所需的镜面单元数量和安装次数均在减小,这是有利于工程实践的,故当选择较优异的组合参数 ( $f_i/D=1.4$ 、 $d=650$  mm 且  $f_m/R_1=1.4$ ) 时,非均匀因子只有 0.26。对于采用球面镜而言,当  $f_i/D=1.4$  时,  $d=650$  mm 且  $R_m/R_1=0.6$  和  $d=350$  mm 且  $R_m/R_1=0.4$  这两组均能获得优异的能流均匀性,相应的非均匀因子分别只有 0.29 和 0.27,这些能流分布非常均匀的聚焦光斑非常适合应用于高倍聚光光伏领域。

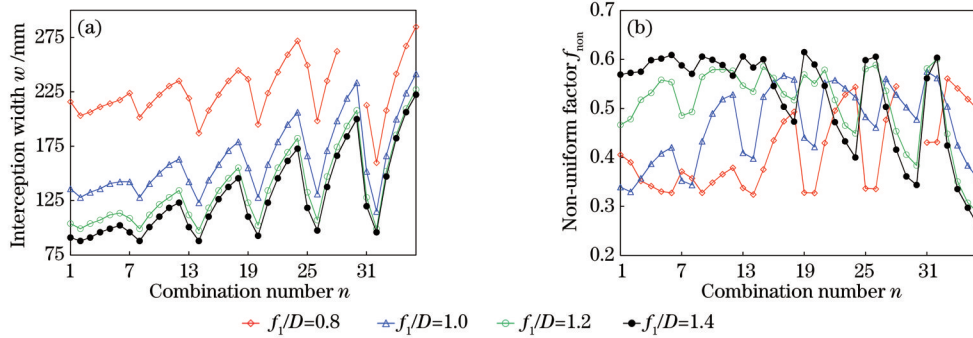


图 5 采用抛物线镜面单元时聚焦光斑的拦截宽度和能流分布非均匀因子随聚光器几何参数的变化。(a) 拦截宽度; (b) 非均匀因子  
Fig. 5 Interception width of focal spot and non-uniform factor of flux distribution varying with geometric parameters of concentrator using parabolic mirror unit. (a) Intercept width; (b) non-uniform factor

### 3.3 平均聚光比和峰值聚光比的变化

图 7 给出了平均聚光比和峰值聚光比随聚光器几何参数的变化,二者的变化规律基本一致,平均聚光比和峰值聚光比均随着  $f_i/D$  的增大而增加,随镜面宽度  $d$  的增大而减小,但这些变化规律正好与聚焦光斑拦截宽度相反(图 5 和图 6)。对于抛物镜阵列的聚光器而言,平均聚光比和峰值聚光比总是随无量纲参数  $f_m/R_1$  的变化先增大后减小,且均在  $f_m/R_1=0.6$  时达到峰值,此时的聚焦光斑最小。例如,当  $f_i/D=1.4$  和  $d=150$  mm 时,平均聚光比和峰值聚光比分别高达 2846.8 和 7107.0,即使在镜面宽度为  $d=650$  mm 的情

况下,平均聚光比和峰值聚光比也能达到 2249.2 和 5319.5。对于球面镜阵列的聚光器而言,当  $R_m/R_1=1.0$  时,聚焦光斑最小且聚光比最高,无论镜面宽度如何变化,其形成的聚光器均是一个半径为  $R_1$  的相同球面镜聚光器。然而,由于镜面宽度不同时旋转阵列数量和间隙采光损失会不同,故有效采光面积会略有差异,这会导致聚光比存在微小差异。当  $f_i/D=1.4$  时,平均聚光比和峰值聚光比分别可高达 3000.0 和 7800.0。如此高的平均聚光比和峰值聚光比非常适用于太阳能高温聚光光热领域。

另外,当平均聚光比与峰值聚光比越接近时,聚焦

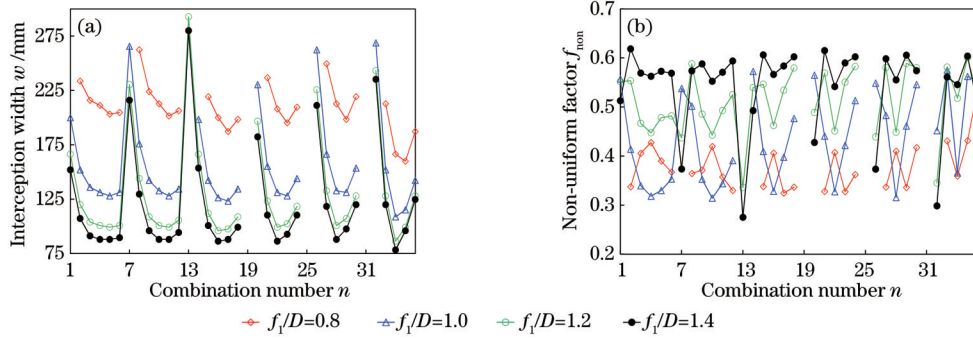


图 6 采用球面镜单元时聚焦光斑的拦截宽度和能流分布非均匀因子随聚光器几何参数的变化。(a)拦截宽度;(b)非均匀因子  
Fig. 6 Interception width of focal spot and non-uniform factor of flux distribution varying with geometric parameters of concentrator using spherical mirror unit. (a) Intercept width; (b) non-uniform factor

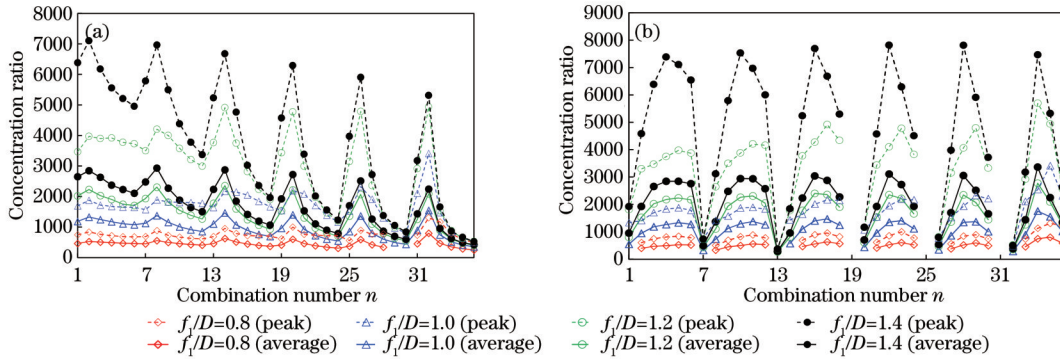


图 7 不同镜面单元下平均聚光比和峰值聚光比随聚光器几何参数的变化。(a)抛物镜面单元;(b)球面镜单元  
Fig. 7 Average concentration ratio and peak concentration ratio varying with geometric parameters of concentrator under different mirror units. (a) Parabolic mirror unit; (b) spherical mirror unit

光斑能流分布均匀性越优异:在采用抛物镜单元的最佳参数 ( $f_1/D=1.4, d=650\text{ mm}$  且  $f_m/R_1=1.4$ ) 时,平均聚光比和峰值聚光比分别达到了 422.8 和 529.0;采用球面镜单元的最佳参数 ( $f_1/D=1.4, d=650\text{ mm}$  且  $R_m/R_1=0.6$ ) 时,平均聚光比和峰值聚光比分别达到了 379.9 和 523.6,它们非常适用于高倍聚光光伏领域。

### 3.4 聚焦光斑的能量分布变化

图 8 展示了典型几何参数组合下新型聚光器在平面接收器表面聚集的能流分布剖面,图 9 展示了相应的聚焦能流分布云图。结合图 8(a)和图 9(a)~(c)可以看到,当聚焦光斑尺寸最小时,光斑近似呈现圆形且接近高斯能流分布特征,这些参数下的新型碟式聚光器能与现有的抛物碟式聚光器的聚光性能相媲美,非

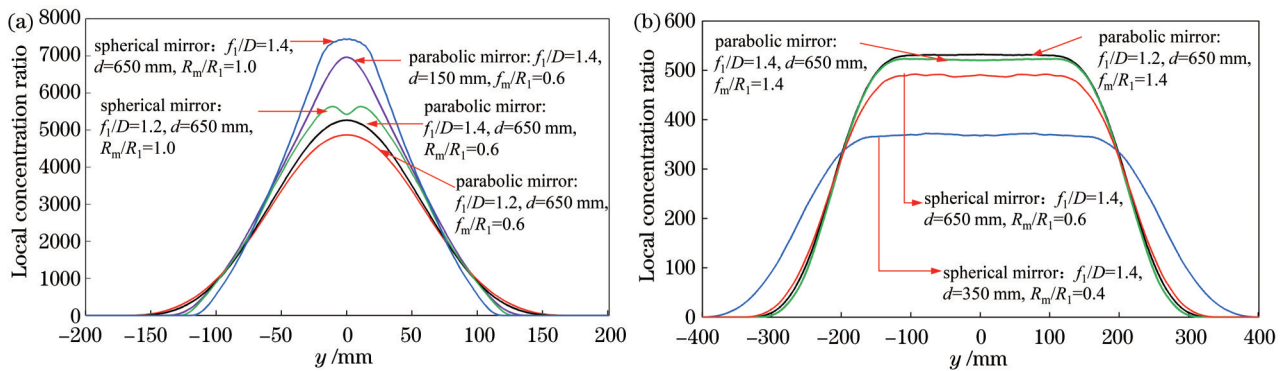


图 8 典型几何参数组合下新型碟式聚光器的局部聚光比分布。(a)适用于高温聚光光热系统的典型几何参数组合;(b)适用于高倍聚光光伏系统的典型几何参数组合  
Fig. 8 Local concentration ratio distribution of novel dish concentrator under different typical geometric parameter combinations. (a) Typical geometric parameter combinations suitable for high-temperature concentrating thermal system; (b) typical geometric parameter combinations suitable for high-power concentrating photovoltaic system

常适用于太阳能高温聚光光热领域,如为斯特林热机的吸热器提供高密度辐射能量<sup>[4]</sup>。从图 8(b)和图 9(d)~(f)可以看到,这些参数下聚光器都能获得正方形的均匀能流分布,尤其是聚焦光斑的中心区域处非常均匀,此处适合布置光伏电池组件<sup>[18]</sup>。另外,从图 8(b)可以看到,当采用抛物镜面单元时,仅将  $f_1/D$  从 1.4(最佳接收位置为  $z=f_2=13730$  mm)减小到 1.2(最佳接收位置为  $z=f_2=11682$  mm),其能流分布基

本不变,但接收器安装位置却显著减小了 2048 mm,这可以减小支撑接收器的悬臂梁的长度,非常有利于聚光系统的结构紧凑和承载。总体而言,通过合理地选取抛物镜或球面镜的几何参数、旋转阵列半径,可以使设计的新型聚光器应用于高倍聚光光伏或聚光光热这两种对聚焦能流分布有着明显不同需求的领域中,为高倍率聚光器低成本设计提供了一种新思路。

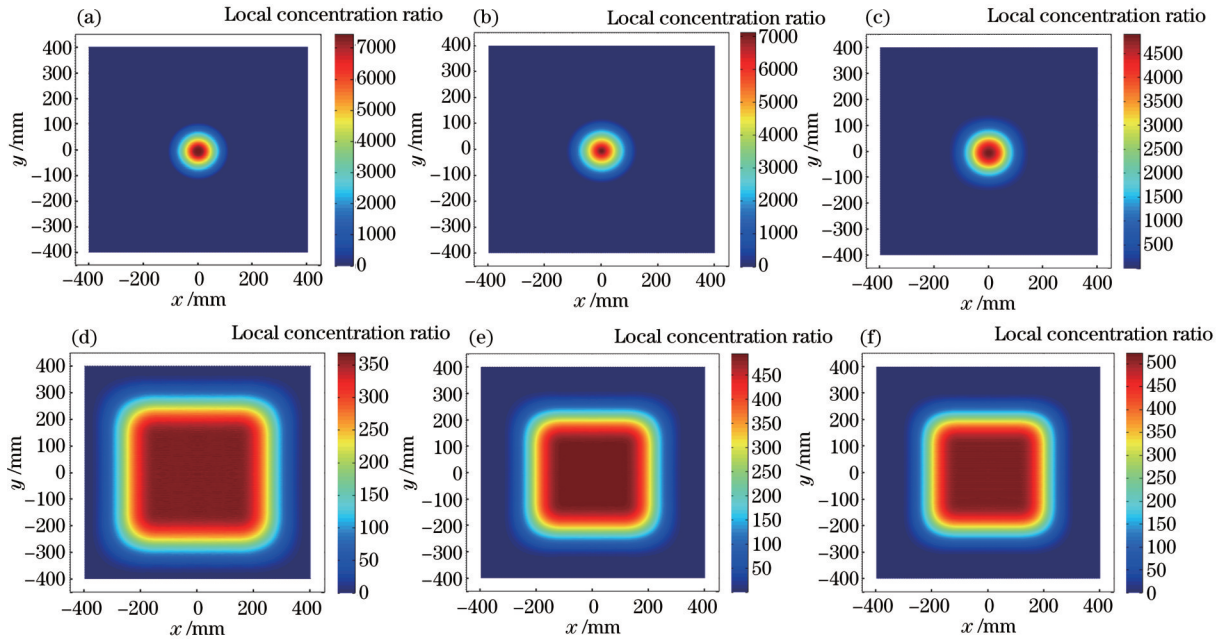


图 9 典型几何参数组合下新型碟式聚光器聚集在平面接收器表面的局部聚光比分布云图。(a)球面镜,  $f_1/D=1.4$ ,  $d=650$  mm,  $R_m/R_1=1.0$ ; (b)抛物镜,  $f_1/D=1.4$ ,  $d=150$  mm,  $f_m/R_1=0.6$ ; (c)抛物镜,  $f_1/D=1.2$ ,  $d=650$  mm,  $f_m/R_1=0.6$ ; (d)球面镜,  $f_1/D=1.4$ ,  $d=350$  mm,  $R_m/R_1=0.4$ ; (e)球面镜,  $f_1/D=1.4$ ,  $d=650$  mm,  $R_m/R_1=0.6$ ; (f)抛物镜,  $f_1/D=1.2$ ,  $d=650$  mm,  $f_m/R_1=1.4$

Fig. 9 Nephogram of local concentration ratio distribution on planar receiver under typical geometric parameter combinations of novel dish concentrator. (a) Spherical mirror,  $f_1/D=1.4$ ,  $d=650$  mm,  $R_m/R_1=1.0$ ; (b) parabolic mirror,  $f_1/D=1.4$ ,  $d=150$  mm,  $f_m/R_1=0.6$ ; (c) parabolic mirror,  $f_1/D=1.2$ ,  $d=650$  mm,  $f_m/R_1=0.6$ ; (d) spherical mirror,  $f_1/D=1.4$ ,  $d=350$  mm,  $R_m/R_1=0.4$ ; (e) spherical mirror,  $f_1/D=1.4$ ,  $d=650$  mm,  $R_m/R_1=0.6$ ; (f) parabolic mirror,  $f_1/D=1.2$ ,  $d=650$  mm,  $f_m/R_1=1.4$

## 4 结 论

提出一种相同尺寸曲面镜单元(抛物镜或球面镜)旋转阵列的低成本新型碟式聚光器,采用光线跟踪方法,以聚光器的焦距  $f_1=R_1/2$  与其采光宽度  $D$  的比值  $f_1/D$ 、抛物镜焦距  $f_m$  与旋转阵列半径  $R_1$  的比值  $f_m/R_1$ 、球面镜半径  $R_m$  与  $R_1$  的比值  $R_m/R_1$  为无量纲参数,重点分析了镜面宽度  $d$  和上述无量纲参数对聚光器光学性能的影响规律,充分展示了新型聚光器在聚光光热(高聚光比需求)和聚光光伏领域(能流分布高均匀性需求)中的应用价值,并为其设计提供了依据。主要结论如下。

1) 新型碟式聚光器通过一系列曲面镜将太阳光分散地会聚于平面接收器中,它具备实现优异均匀能流分布的潜力。平面接收器从  $z=f_1$  位置向下移动合理距离才能使聚焦光斑达到最小,并且聚光器采用不同几何参数时接收器最佳安装位置  $z=f_2$  均不同,其最

佳偏移距离  $\Delta f=f_1-f_2$  随  $f_1/D$  的增大而逐渐减小。

2) 聚焦光斑的拦截宽度随着  $f_1/D$  的增加或镜面宽度  $d$  的减小而减小。当采用抛物镜阵列时,无论镜面宽度  $d$  和  $f_1/D$  如何组合,拦截宽度总是随着  $f_m/R_1$  的变化呈现先减小后增大的变化规律,且均在  $f_m/R_1=0.6$  时达到最小值,当  $f_1/D=1.4$  和  $d=650$  mm 时,拦截宽度仅有 96.0 mm。当采用球面镜阵列时,拦截宽度也是随着  $R_m/R_1$  的变化先减小后增大,但通常在  $R_m/R_1=1.0$  时达到最小值,当  $f_1/D=1.4$  和  $d=650$  mm 时,拦截宽度只有 78.4 mm。这些小尺寸聚焦光斑呈现圆形的高斯能流分布特征。

3) 平均聚光比和峰值聚光比均随  $f_1/D$  的增大或镜面宽度  $d$  的减小而增加,且它们随镜面参数  $f_m/R_1$  或  $R_m/R_1$  的变化规律与拦截宽度相反。在采用抛物镜的情况下,当  $f_m/R_1=0.6$ ,  $f_1/D=1.4$  和  $d=150$  mm 时,平均聚光比和峰值聚光比分别高达 2846.8 和 7107.0,即使镜面宽度  $d$  增加到 650 mm,二者也能分别达到



2249.2 和 5319.5。在采用球面镜的情况下,当  $R_m/R_1=1.0$  和  $f_1/D=1.4$  时,聚焦光斑最小且聚光比最高,平均聚光比和峰值聚光比分别可高达 3000.0 和 7800.0,采用这些参数的聚光器非常适用于太阳能高温聚光光热领域。

4) 聚焦光斑能流分布的非均匀因子随聚光器几何参数呈现非线性的复杂变化规律,尤其是采用球面镜时更为明显,但都存在一些非均匀因子很小的参数组合,此时聚焦光斑呈现正方形的均匀能流分布特征。当  $f_1/D=1.4$ 、 $d=650$  mm 和  $f_m/R_1=1.4$  时,非均匀因子只有 0.26,平均聚光比和峰值聚光比分别达到了 422.8 和 529.0。当  $f_1/D=1.4$ 、 $d=650$  mm 和  $R_m/R_1=0.6$  时,非均匀因子只有 0.29,平均聚光比和峰值聚光比分别达到了 379.9 和 523.6。这些具有均匀能流分布的聚焦光斑非常适用于高倍聚光光伏领域。

#### 参 考 文 献

- [1] 王志峰,何雅玲,康重庆,等.明确太阳能热发电战略定位促进技术发展[J].华电技术,2021,43(11):1-4.  
Wang Z F, He Y L, Kang C Q, et al. Strategic positioning of solar thermal power generation to promote technological progress[J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 1-4.
- [2] 李美成,高中亮,王龙泽,等.“双碳”目标下我国太阳能利用技术的发展现状与展望[J].太阳能,2021(11):13-18.  
Li M C, Gao Z L, Wang L Z, et al. Development status and prospect of solar energy utilization technology in China under goal of emission peak and carbon neutrality [J]. Solar Energy, 2021(11): 13-18.
- [3] He Y L, Qiu Y, Wang K, et al. Perspective of concentrating solar power[J]. Energy, 2020, 198: 117373.
- [4] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R, et al. Design and implementation of a 38 kW dish-Stirling concentrated solar power system[J]. IOP Conference Series, 2017, 93: 012052.
- [5] Schmitz M, Wiik N, Ambrosetti G, et al. A 6-focus high-concentration photovoltaic-thermal dish system[J]. Solar Energy, 2017, 155: 445-463.
- [6] He Y L, Wang K, Qiu Y, et al. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: non-uniform features, challenges, and solutions[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 448-474.
- [7] 颜健,聂笃忠,田勇,等.基于凹面透镜优化的太阳能碟式/腔体接收器系统聚焦能流均匀化研究[J].光学学报,2021,41(10):1022001.  
Yan J, Nie D Z, Tian Y, et al. Optimal design of concave lens for flux homogenization of solar dish/cavity collector system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1022001.
- [8] 颜健,聂笃忠,彭佑多,等.可改善平面接收器能流均匀性的太阳能碟式聚光器设计[J].光学学报,2020,40(9):0922002.  
Yan J, Nie D Z, Peng Y D, et al. Design of solar dish concentrator for improving flux uniformity on planar receiver[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0922002.
- [9] 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.
- [10] Tan M H, Chong K K, Wong C W. Optical characterization of nonimaging dish concentrator for the application of dense-array concentrator photovoltaic system[J]. Applied Optics, 2014, 53(3): 475-486.
- [11] 王云峰,季杰,李明,等.多平面镜线性组合太阳能聚光器的设计和聚光特性[J].光学学报,2016,36(4):0422002.  
Wang Y F, Ji J, Li M, et al. Performance analysis and design of multi-plane mirrors linear combination solar concentrator[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0422002.
- [12] Xia X L, Dai G L, Shuai Y. Experimental and numerical investigation on solar concentrating characteristics of a sixteen-dish concentrator[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(24): 18694-18703.
- [13] Mao Q J, Shuai Y, Yuan Y. Study on radiation flux of the receiver with a parabolic solar concentrator system[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 84: 1-6.
- [14] Riveros-Rosas D, Sánchez-González M, Arancibia-Bulnes C A, et al. Influence of the size of facets on point focus solar concentrators[J]. Renewable Energy, 2011, 36(3): 966-970.
- [15] Chang Q H. Study on a concentrator of confocal configuration composed of spherical facets with identical aperture and identical radius of curvature[J]. Renewable Energy, 2017, 111: 655-658.
- [16] Yan J, Peng Y D, Wang H. Assessing the impact of non-ideal optical factors on optimized solar dish collector system with mirror rearrangement[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(11): 8799-8822.
- [17] 颜健,彭佑多,程自然,等.对称型太阳能聚光集热系统吸热器能流分布的运动累加计算方法[J].光学学报,2016,36(5):0508001.  
Yan J, Peng Y D, Cheng Z R, et al. Moving accumulative computation method for flux distribution of heat absorber in symmetry concentrating solar collector system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0508001.
- [18] 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.  
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.