

# 基于相同参数抛物镜面旋转阵列的太阳能槽式聚光器聚焦特性研究

颜健\*, 田勇, 刘永祥, 彭佑多

湖南科技大学机电工程学院, 湖南 湘潭 411201

**摘要** 提出了一种基于相同抛物镜面单元旋转阵列的低成本新型槽式聚光器。采用光线跟踪方法建立了该聚光器的光学分析模型,并详细研究了镜面焦距( $f$ )、镜面宽度、平面接收器位置、旋转阵列半径( $R_1$ )和旋转阵列数量( $N$ )等关键参数对其聚光性能的影响规律,为其设计与应用提供了重要依据。研究结果表明:新型槽式聚光器能很好地汇聚太阳光能,并且它不同于传统抛物槽式聚光器将平行光汇聚于某点,而是有所“分散”地进行汇聚,具备实现平面接收器上均匀聚焦能流分布的潜力;聚焦光斑的合理接收位置会随旋转阵列半径的改变而变化,通常接收器位于旋转阵列半径的一半位置是合适的,但要获得最小聚焦光斑则需将其下移 150~200 mm;聚焦光斑宽度随镜面编号呈指数增大关系,特别是当镜面宽度较大且旋转阵列半径较小时;旋转阵列半径越大或镜面宽度越小,聚焦能流分布越集中且峰值聚光比越大(算例中已达到 50),此时聚焦能流基本呈高斯分布特征。此外,采用较小旋转阵列半径可降低接收器的安装高度并改善能流均匀性。在算例中,当  $f=8000$  mm、 $R_1=4000$  mm、 $N=5$  且接收器位于 1830 mm 位置时,聚焦光斑能量分布非常均匀,大部分区域聚光比稳定在 7.3,此时的聚光器非常适用于聚光光伏/光热应用领域。

**关键词** 光学设计; 抛物镜面; 新型太阳能槽式聚光器; 均匀能流分布; 光学性能; 光线跟踪方法

中图分类号 TK513.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0522002

## Focusing Characteristics of Solar Trough Concentrator Based on Parabolic Mirror Rotating Array with Same Parameters

Yan Jian\*, Tian Yong, Liu Yongxiang, Peng Youduo

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

**Abstract** A novel low-cost trough concentrator based on the same parabolic mirror unit rotating array is proposed. The optical analysis model of the concentrator is established by ray tracing method, and the influence of key parameters such as mirror focal length ( $f$ ), mirror width, position of plane receiver, radius of rotating array ( $R_1$ ) and number of rotating arraies ( $N$ ) on its concentrating performance is studied in detail, which provides an important basis for the design and application of this concentrator. The results show that the novel trough concentrator can concentrate solar energy well, and it is different from the traditional parabolic trough concentrator, which concentrates parallel light at a certain point, but concentrates light “dispersedly”, and it has the potential to realize uniform focusing energy flux distribution on the plane receiver. The reasonable receiving position of the focusing spot will change with the change of radius of the rotating array. Generally, it is appropriate for the receiver to be located at half of the radius of the rotating array, but to obtain the minimum focusing spot, it needs to be moved down by 150–200 mm. The width of focusing spot increases exponentially with the mirror number, especially when the mirror width is large and the mirror rotating array radius is small. The larger the radius of rotating array or the smaller the mirror width is, the more concentrated the focusing energy flux distribution is and

收稿日期: 2021-08-24; 修回日期: 2021-09-09; 录用日期: 2021-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(52105097)、湖南省自然科学基金(2020JJ5189)、湖南省教育厅项目(19C0794)

通信作者: \*yanjian1988@hnust.edu.cn

the larger the peak concentrator ratio is (50 in the calculated example). In this case, the focusing energy flux basically shows the characteristic of Gaussian distribution. In addition, the installation height of the receiver can be reduced and the energy flux uniformity can be improved by using a smaller radius of rotating array. In an calculated example, when  $f=8000$  mm,  $R_1=4000$  mm,  $N=5$  and the receiver is located at 1830 mm, the energy distribution of focusing spot is very uniform and the concentration ratio in most areas is stable at 7.3, the concentrator is very suitable for concentrated photovoltaic/photothermal applications.

**Key words** optical design; parabolic mirror; novel solar trough concentrator; uniform energy flux distribution; optical performance; ray tracing method

## 1 引言

太阳能是清洁环保、供应充足和分布广泛的可再生能源。开发和利用太阳能资源在我国应对气候变化、绿色低碳发展中不可或缺,是实现我国未来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]</sup>。当前,太阳能利用的主要途径是光伏发电和光热利用,但地表接收到的太阳能量密度较低,故采用太阳能聚光器汇集得到较高太阳辐射密度是改善光能转换效率和系统经济性的重要方式<sup>[2-4]</sup>。聚光光伏/光热(CPVT)太阳能综合利用系统有机整合了聚光、光伏发电和太阳能光热利用技术,已成为各国清洁能源开发与应用的焦点。按聚光形式可分为高倍点聚光 CPVT 系统和低倍线聚光 CPVT 系统,前者通常采用旋转抛物碟式聚光器或塔式定日镜等点聚焦聚光器获得高倍能流密度,并以光电转化效率高的多结电池来实现光-电能量转换<sup>[5]</sup>,如砷化镓多结光伏电池,其光电转化效率可达 46.0%。然而,该系统有“三高”需求,即高聚光精度、高转换效率电池和高效散热,故其技术复杂度高且经济性有待提升。低倍线聚光 CPVT 系统一般采用抛物槽式聚光器、复合抛物槽式聚光器和线性菲涅耳聚光器等槽型聚光器将太阳光能聚焦到低成本的常规光伏电池(如单晶硅光伏电池)上以实现能量转换,该系统经济性较好,非常适合广阔乡镇地域“减碳”应用<sup>[6-7]</sup>。

太阳能聚光器作为 CPVT 系统中汇聚太阳光能的核心光学装置,其主要设计目标是改善光伏电池(接收器)表面聚焦能流分布的均匀性以提升光-电转换效率和降低制造成本<sup>[2,4,8-10]</sup>。近年来,诸多学者从设计新型接收器和新型聚光器角度研究了线聚光 CPVT 系统的能流均匀化问题,Zhang 等<sup>[11]</sup>系统研究了复合抛物聚光器中截断位置消除多次反射对聚焦能流分布的影响,表明设计合理的截断位置可获得优异的均匀聚焦能流分布。在线性反射式菲涅耳聚光器方面,典型工作是 Wang 等<sup>[12]</sup>提出的一种折平板等

光强反射聚光器,优异地实现了平面接收器的聚焦能流均匀化。对于线聚焦透射式菲涅耳聚光器而言,由于其光学设计自由度高,故诸多创新设计方法(如散焦法)被用于实现均匀聚光,但太阳光谱经透镜材料产生的固有色散问题仍有待解决<sup>[13-14]</sup>。抛物槽式聚光器已在光热发电领域中被成功商业化,基于成熟的抛物槽式聚光器的 CPVT 系统的研究颇多<sup>[3,15]</sup>。然而,传统抛物槽式聚光器聚焦在平面接收器的能流密度分布极不均匀<sup>[16-17]</sup>,这会对光伏电池的发电效率和服役寿命带来影响。诸多创新光学方案被提出以改善能流均匀性,例如:在抛物槽式聚光器焦线附件安装二次反射装置,将光能再次反射至聚光器中心底部实现能流均匀化;聚光分频结合二次反射聚光实现光伏电池接收器的聚焦能流均匀化;孟宪龙等<sup>[18]</sup>提出了一种内抛物镜+外侧自由曲面镜的新型槽式聚光器,该聚光器在倾斜的平面接收器上获得了优异的均匀聚光能流分布。彭先德等<sup>[19]</sup>发明了一种基于相同抛物镜面单元旋转阵列的新型槽式聚光器,它只需一种规格的抛物反射镜面单元,具有模具/生产线单一、制造成本低廉的显著优点。然而,文献<sup>[19]</sup>只以平行入射光线简单示例了该聚光器的聚焦能流分布,认为其定能获得均匀聚光效果。事实上,实际的太阳入射光具有一定锥角,而这在太阳能聚光分析中是必须考虑的,故该聚光器的聚光性能和是否能均匀聚光均有待进一步详细研究。

本文针对此种基于相同抛物镜面单元旋转阵列的新型槽式聚光器,采用几何光学和光线跟踪模拟方法,建立了该新型槽式聚光器的光学分析模型,详细研究了镜面焦距、镜面宽度、平面接收器位置、旋转阵列半径和旋转阵列数量等关键参数对其聚光性能和能流分布的影响规律,为该新型聚光器的设计与应用提供依据。

## 2 模型与方法

### 2.1 新型槽式聚光器的物理模型

新型槽式聚光器的母线截面如图 1 所示,它是采

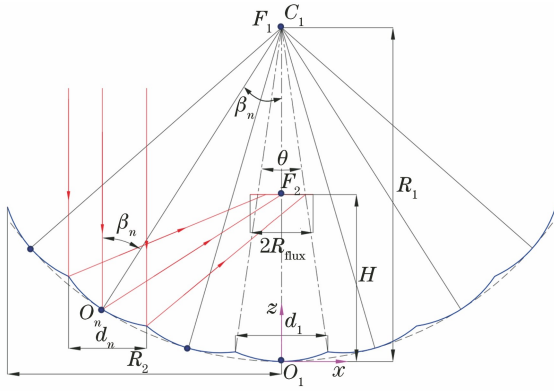


图 1 基于相同抛物镜面旋转阵列的新型槽式聚光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of novel trough concentrator based on same parabolic mirror rotating array

用完全相同的抛物反射镜面单元旋转阵列拼接而成,故整个聚光器仅需加工制造一种型号的反光镜面,具有制造成本低的优势。图 1 中  $O_n$  为第  $n$  个镜面单元的中心点,  $R_{\text{flux}}$  为聚焦光斑宽度。新型槽式聚光器的具体形成方法如下:

1) 在坐标系  $O_1-xyz$  中以原点  $O_1$  为顶点,建立焦距为  $f$  的抛物槽式反射镜面,其抛物母线方程为  $x^2=4fz$ ,焦点位于  $F_1$  位置。将该抛物反射镜面沿  $z$  轴左右对称地截取宽度  $d_1$  并作为镜面单元 1。

2) 以位于  $z$  轴并与原点  $O_1$  距离为  $R_1$  的点  $C_1$  为圆心,将镜面单元 1 绕点  $C_1$  分别对阵列的  $N$  个镜面单元(总镜面数量为  $2N-1$ )进行左右旋转,相当于各镜面单元的抛物曲面顶点相切于一个半径为  $R_1$  的圆柱面进行布置。此时,各镜面单元的焦轴线均指向圆心点  $C_1$  位置,且旋转阵列后各镜面单元的首尾恰好相接。镜面单元 1 的两端点对圆心点  $C_1$  的张角为  $\theta=2\arcsin(d_1/2R_1)$ ,且相邻两镜面单元的焦轴线夹角也为  $\theta$ ,镜面单元  $n$  的焦轴线与  $z$  轴的夹角  $\beta_n$  则满足  $\beta_n=(n-1)\theta$ 。文献[19]中要求圆心  $C_1$  与焦点  $F_1$  重合,即参数满足约束  $R_1=f$ ,但本文研究发现两者并非要相等。

3) 平面接收器(如光伏电池组件或热接收器等)位于  $z=H$  位置来吸收聚光器聚集的太阳辐射能量,文献[19]指出接收器的位置参数满足  $H=R_1/2$ ,这也是半径为  $R_1$  的球面反射镜面的焦平面位置。

从几何光学结构来看,当新型槽式聚光器准确跟踪太阳位姿时,即太阳入射光锥的中心光线平行于  $z$  轴时,除中心位置的镜面单元 1 外,其余任意镜面单元  $n$  的焦轴线均与入射光锥的中心线存在夹角  $\beta_n$ ,这就有些类似于以往传统抛物槽式聚光器在跟踪误

差下的聚光问题,只是本文中的  $\beta_n$  数值非常大。此时,镜面单元  $n$  不会再将太阳光汇聚在原来位于点  $F_1$  的焦平面位置处,而是汇聚在过点  $F_2$  的新焦平面位置处。当然,新型槽式聚光器优异且均匀的聚光性能会受到镜面单元的焦距  $f$ 、宽度  $d_1$  和阵列数量  $N$  等关键参数的影响,本文目的就是详细探究相关影响规律并为新型槽式聚光器设计提供依据。

## 2.2 聚光器的基本光学性能指标

聚光器的功能是将太阳光能合理有效地聚集在平面接收器上,并将太阳光能转换为电能或工质热能。在聚光器顶层光学设计阶段,非常关注其聚焦光斑半径和平均聚光比指标,因为它们决定着平面接收器的设计。本节以任意镜面单元  $n$  为对象,建立上述基本光学性能指标的计算模型。

新型聚光器中镜面单元  $n$  的太阳光能聚集示意图如图 2 所示。镜面单元  $n$  的左右两个端点分别是  $q_n$  和  $p_n$ ,它们是通过镜面单元 1 绕圆心点  $C_1$  旋转角度  $\beta_n$  获得的,所以点  $q_n$  和  $p_n$  的位置矢量  $\mathbf{q}_n$  和  $\mathbf{p}_n$  可分别表示为

$$\mathbf{q}_n = (\mathbf{q}_1 - \mathbf{C}_1) \cdot \mathbf{M}_{\text{Rot}}(\mathbf{e}_y, \beta_n) + \mathbf{C}_1, \quad (1)$$

$$\mathbf{p}_n = (\mathbf{p}_1 - \mathbf{C}_1) \cdot \mathbf{M}_{\text{Rot}}(\mathbf{e}_y, \beta_n) + \mathbf{C}_1, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{C}_1 = [0 \ 0 \ R_1]$  是点  $C_1$  的位置矢量;  $\mathbf{q}_1 = [-d_1/2 \ 0 \ d_1^2/(16f)]$  是镜面单元 1 左端点  $q_1$  的位置矢量;  $\mathbf{p}_1 = [d_1/2 \ 0 \ d_1^2/(16f)]$  是镜面单元 1 右端点  $p_1$  的位置矢量;  $\mathbf{M}_{\text{Rot}}(\mathbf{e}_y, \beta_n)$  是绕  $+y$  轴单位矢量  $\mathbf{e}_y = [0 \ 1 \ 0]$  旋转角度  $\beta_n$  的旋转功能矩阵,其表达式为

$$\mathbf{M}_{\text{Rot}}(\mathbf{e}_y, \beta_n) = \begin{bmatrix} \cos \beta_n & 0 & -\sin \beta_n \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_n & 0 & \cos \beta_n \end{bmatrix}. \quad (3)$$

镜面单元  $n$  中点  $q_n$  和  $p_n$  位置的单位法线矢量分别为

$$\mathbf{N}_{q_n} = \mathbf{N}_{q_1} \cdot \mathbf{M}_{\text{Rot}}(\mathbf{e}_y, \beta_n), \quad (4)$$

$$\mathbf{N}_{p_n} = \mathbf{N}_{p_1} \cdot \mathbf{M}_{\text{Rot}}(\mathbf{e}_y, \beta_n), \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{N}_{q_1}$  是点  $q_1$  位置的单位法线矢量;  $\mathbf{N}_{q_1} = [d_1/2 \ 0 \ 2f]/\sqrt{(d_1/2)^2+4f^2}$ ;  $\mathbf{N}_{p_1}$  是点  $p_1$  位置的单位法线矢量,  $\mathbf{N}_{p_1} = [-d_1/2 \ 0 \ 2f]/\sqrt{(d_1/2)^2+4f^2}$ 。

镜面单元  $n$  聚集太阳光形成的聚焦光斑的单侧宽度为  $R_{\text{flux}}^n$ (考虑光学结构的左右对称性),其计算步骤如下:

1) 基于镜面单元  $n$  两端点  $q_n$  和  $p_n$  的位置矢量和单位法线矢量,根据镜面反射定律,分别计算太阳



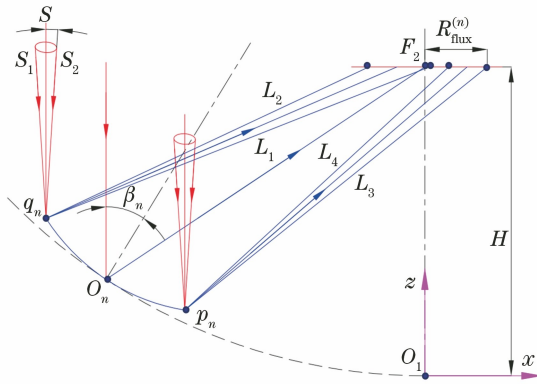


图 2 新型聚光器中镜面单元  $n$  的太阳光能聚集示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of solar energy concentration of mirror unit  $n$  in novel concentrator

入射光锥的左右边缘光线  $S_1$  和  $S_2$  在点  $q_n$  和  $p_n$  位置的反射光线  $L_1 \sim L_4$ 。其中,太阳入射光锥的中心光线  $S$  的方向矢量为  $\mathbf{S} = [0 \ 0 \ -1]$ ,将中心光线  $S$  分别绕  $y$  轴进行左右旋转即可确定边缘光线  $S_1$  和  $S_2$  的方向矢量,分别为  $\mathbf{S}_1 = [\sin \delta \ 0 \ -\cos \delta]$  和  $\mathbf{S}_2 = [-\sin \delta \ 0 \ -\cos \delta]$ , $\delta$  是太阳入射光锥的半顶角, $\delta = 4.65 \text{ mrad}$ 。

2) 分别计算反射光线  $L_1 \sim L_4$  与接收器所在平面(平面方程为  $z = H$ )交点的  $x$  坐标值,分别记为  $x_1^{(q_n)}$ 、 $x_2^{(q_n)}$ 、 $x_1^{(p_n)}$  和  $x_2^{(p_n)}$ ,其中  $x_1^{(q_n)}$  为光线  $S_1$  在点  $q_n$  的反射光线与平面接收器的交点的  $x$  坐标分量。

3) 提取 4 个交点中与平面接收器中心点  $F_2$  的最大距离,它就是镜面单元  $n$  形成的聚焦光斑的单侧宽度  $R_{\text{flux}}^{(n)}$ ,可表示为

$$R_{\text{flux}}^{(n)} = \max\{|x_1^{(q_n)}|, |x_2^{(q_n)}|, |x_1^{(p_n)}|, |x_2^{(p_n)}|\} \quad (6)$$

根据上述方法计算各镜面单元的聚焦光斑宽度,然后提取出最大数值即为整个新型槽式聚光器的聚焦光斑宽度  $R_{\text{flux}}$ ,可表示为

$$R_{\text{flux}} = \max\{R_{\text{flux}}^{(1)}, \dots, R_{\text{flux}}^{(n)}, \dots, R_{\text{flux}}^{(N)}\} \quad (7)$$

于是,可以确定接收器表面的平均聚光比  $M_{\text{average}}$ ,它是一个从整体上反映接收器表面聚焦能流密度的关键参数。考虑实际应用时聚光器上方会安装一个至少与聚焦光斑宽度相等的接收器用于吸收聚集的太阳光能并进行光-电能量转换,此时接收器会造成遮挡阴影的产生。于是,考虑遮挡效应的平均聚光比  $M_{\text{average}}$  为

$$M_{\text{average}} = \frac{R_2 - R_{\text{flux}}}{R_{\text{flux}}} = \frac{\left(\frac{d_1}{2} + \sum_{n=2}^N d_n\right) - R_{\text{flux}}}{R_{\text{flux}}} \quad (8)$$

式中: $R_2$  是整个槽式聚光器的采光半径; $d_n$  是镜面

单元  $n$  的采光宽度,就是镜面单元  $n$  两端点的  $x$  坐标差值或直线  $q_n p_n$  沿  $x$  轴的投影长度,满足  $d_n = d_1 \cos \beta_n$ 。

### 2.3 聚焦能流分布模拟方法

平均聚光比  $M_{\text{average}}$  只能从整体表征聚光器采光口径与聚焦光斑尺寸的比值关系,并不能反映聚焦光斑的能流分布情况。详细设计阶段主要关注的是具体的聚焦能流分布(如能流均匀性和高密度能量区域尺寸等),进而为光伏电池组件设计提供重要依据。本文假定新型槽式聚光器工作时无任何光学误差,即未包含镜面斜率误差、安装误差和跟踪误差等,此时新型槽式聚光器沿长度方向是等截面对称结构,且太阳入射光锥的中心光线与聚光器的  $z$  轴平行,于是可以采用文献[20]中的运动累加光线跟踪方法实现聚光器的快速光学模拟。新型槽式聚光器与传统抛物槽式聚光器的区别仅是母线方程不同,只需对文献[20]中的聚光器离散模型进行更改即可建立完整的光学分析模型,本文不再赘述公式推导过程,具体步骤如下。

1) 将聚光器中心位置的镜面单元 1 沿宽度方向(即  $x$  轴)离散成  $K$  等份,得到镜面单元 1 上抛物母线离散点的位置矢量和单位法线矢量。

2) 将镜面单元 1 离散后的所有点绕  $y$  轴以半径  $R_1$  向左和向右分别旋转阵列  $N$  次,且相邻两镜面单元的阵列夹角为  $\theta$ ,即可得到整个新型槽式聚光器截面母线的离散点光学信息。

3) 将聚光器沿长度方向(即  $y$  轴)离散成  $M$  等份,设置平面接收器的尺寸和离散参数,采用运动累加光线跟踪方法快速计算新型槽式聚光器的聚焦能流分布结果,并转化为方便比较的无量纲参数——局部聚光比,它是接收器表面的能流密度值与太阳辐射强度的比值,可表示为

$$C_i = E_i / (A_i W_0) \quad (9)$$

式中: $C_i$  是平面接收器离散后网格  $i$  的局部聚光比; $A_i$  和  $E_i$  分别是网格  $i$  的表面积和吸收的太阳辐射能量; $W_0$  是太阳直射辐照强度值,单位是  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

## 3 结果与讨论

基于上述光学模型和模拟方法,在 Visual C++ 软件中编制了新型槽式聚光器的聚焦能流分布模拟程序,并在 MATLAB 软件中编制了新型槽式聚光器二维截面内的光线传输程序,用于充分展示其光能聚集特性和有益效果。新型槽式聚光器的聚光性能不仅受镜面单元的焦距  $f$ 、采光宽度  $d_1$  和阵列数量  $N$

等参数的影响,还受到镜面旋转阵列半径  $R_1$  和平面接收器安装位置的影响。本节将详细探究这些参数的影响规律,为新型槽式聚光器的设计提供指导。其中,  $f$  的范围为 2000~10000 mm,  $d_1$  的范围为 50~400 mm,  $N \leq 25$ 。

### 3.1 基本光学性能变化规律

基于镜面旋转阵列半径为  $R_1 = f$  且接收器安装位置为  $H = R_1/2$  的约束条件,聚光器中各镜面单元  $n$  形成的聚焦光斑宽度  $R_{\text{flux}}^n$  随镜面参数的变化如图 3 所示。可以看到,聚焦光斑宽度受镜面焦距  $f$  和宽度  $d_1$  的影响显著,越靠近聚光器边缘的镜面单元(镜面编号  $n$  越大)聚集光斑尺寸越大,且聚焦光斑尺寸随镜面编号  $n$  呈指数增大关系,尤其当镜面宽度  $d_1$  较大且焦距  $f$  较小时这种指数变化幅度更为明显。

当镜面焦距  $f$  一定时,聚焦光斑宽度随镜面宽度  $d_1$  的增加而显著增加,例如在  $d_1 = 400$  mm,  $f = 10000$  mm 情况下,  $N = 5$  时的聚焦光斑单侧宽度已接近 150 mm,但此时聚光器的总采光口径也接近 4000 mm,这在太阳能线聚焦领域已具有较好工程应用价值。当镜面宽度  $d_1$  一定时,聚焦光斑宽度随焦距  $f$  的增大而明显减小,更准确地说应该是随着镜面旋转阵列半径  $R_1$  的增加而减小,因为在 3.3 节的研究中发现镜面单元的旋转阵列半径  $R_1$  与其焦距  $f$  并不存在相等的约束关系。旋转阵列半径  $R_1$  增加也就意味着各镜面单元  $n$  的旋转角度  $\beta_n = 2(n-1)\arcsin(d_1/2R_1)$  在减小,这样会使得各镜面单元的焦轴线与太阳入射光线的夹角减小,即传统意义上各镜面单元的“跟踪误差”减小,此时聚焦光斑尺寸也会减小。

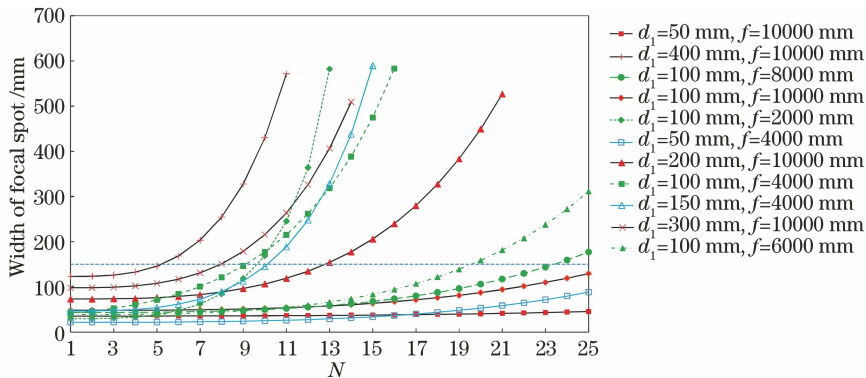


图 3 聚光器中各镜面单元的聚焦光斑宽度随  $N$  的变化

Fig. 3 Width of focal spot of each mirror unit in concentrator varying with  $N$

图 4 给出了新型槽式聚光器的平均聚光比随镜面参数和旋转阵列数量  $N$  的变化。可以看到,对于每个镜面焦距  $f$  和宽度  $d_1$  组合而言,总存在最佳的镜面阵列数量  $N$  使得平均聚光比  $M_{\text{average}}$  达到峰值。当镜面焦距一定时,对应峰值平均聚光比的镜面阵列数量  $N$  随着镜面宽度的增加而减小,这是聚光器采光半径的增加幅度显著小于聚焦光斑半径的

增加幅度造成的,这从图 3 中聚焦光斑半径的指数变化规律中可以发现。然而,当镜面宽度一定时,对应峰值平均聚光比的镜面阵列数量  $N$  随着镜面焦距(旋转阵列半径)的增加而增加,也就意味着这样做成更大的聚光器并获得更高的能流密度。例如,当镜面宽度为  $d_1 = 100$  mm, 旋转阵列半径为 10 m 时,在阵列数量为  $N = 16$  处可达到的峰值

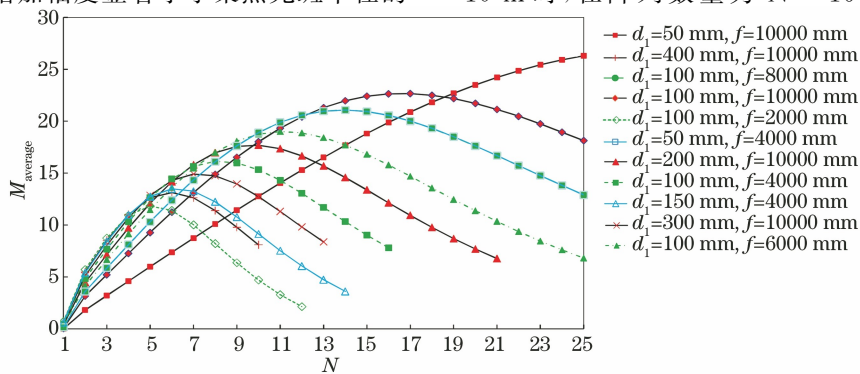


图 4 新型槽式聚光器的  $M_{\text{average}}$  随  $N$  的变化

Fig. 4  $M_{\text{average}}$  of novel trough concentrator varying with  $N$

$M_{\text{average}}$  为 22.6, 而当旋转阵列半径减小到 4 m 时, 在阵列数量为  $N = 8$  处达到的峰值  $M_{\text{average}}$  只有 16.0, 前者聚光器口径是后者的两倍。但需要注意, 平均聚光比并不能详细反映聚焦光斑核心能流区域的尺寸和密度值, 因为在通常情况下聚焦光斑边缘一定区域的能流密度很低, 不具备较好的利用价值。

### 3.2 镜面宽度和焦距对能流分布的影响

基于镜面旋转阵列半径为  $R_1 = f$  和接收器位置为  $H = R_1/2$  的条件, 不同镜面参数下聚光器在平面接收器上的聚焦光斑能流分布曲线如图 5 所示。新型槽式聚光器除两端有端部聚光损失外, 其余各位置的聚焦能流分布相同。为了缩短计算时间而将聚光器和接收器的长度均设为 400 mm, 在接收器长度方向的中心截面处提取能流分布曲线。可以看到, 当镜面宽度一定时, 镜面焦距越大, 峰值聚光比

越大且聚焦能流分布越集中, 基本呈高斯分布特征。例如, 当  $N = 25$ 、 $d_1 = 100$  mm 和  $f = 8000$  mm 时, 峰值聚光比可达到 50, 此时聚焦光斑半径只有 170 mm, 且能流分布不均匀。当镜面焦距一定时, 聚焦光斑的尺寸随镜面宽度的增加而增大, 其能流均匀性也可得到较好改善。例如, 当  $N = 5$ 、 $d_1 = 400$  mm 和  $f = 8000$  mm 时可获得较优异的均匀能流分布结果。在聚焦光斑中心宽度为 200 mm 的区域内聚光比稳定在 15.8, 这对聚光光伏利用而言尤为有价值。图 6 为平面接收器的聚焦能量分布云图。另外, 在确定镜面宽度和焦距后, 选取合适的镜面阵列数量对提升能流均匀性也很重要, 因为聚光器边缘的镜面单元聚焦能量主要贡献在聚焦光斑的边缘, 可以适当去除这些位置的低密度能量, 使整个聚焦光斑的能流分布更为均匀且尺寸更小。

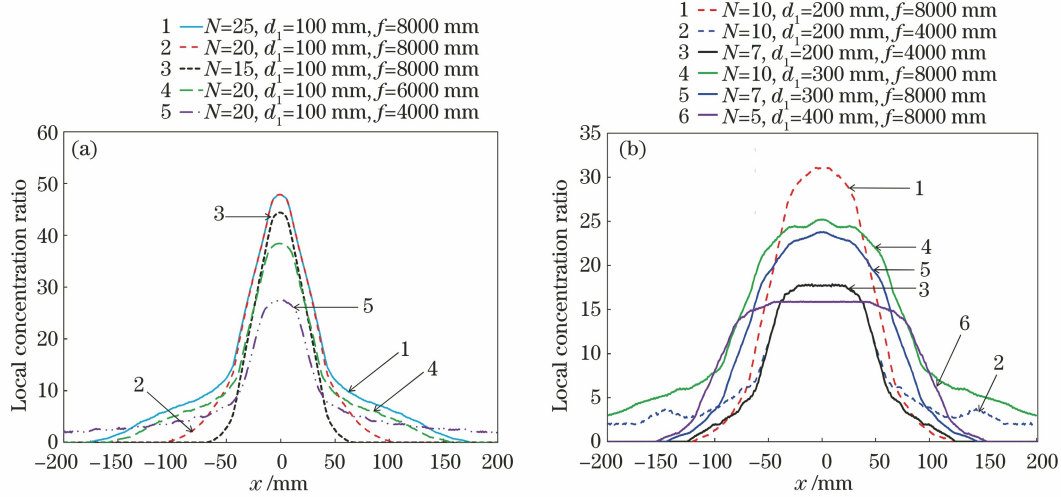


图 5 不同镜面参数下新型槽式聚光器的聚焦能流分布。(a)  $d_1 = 100$  mm; (b)  $d_1$  的变化范围为 200~400 mm

Fig. 5 Focusing energy flux distribution of novel trough concentrator under different mirror parameters.

(a)  $d_1 = 100$  mm; (b) range of  $d_1$  is from 200 mm to 400 nm

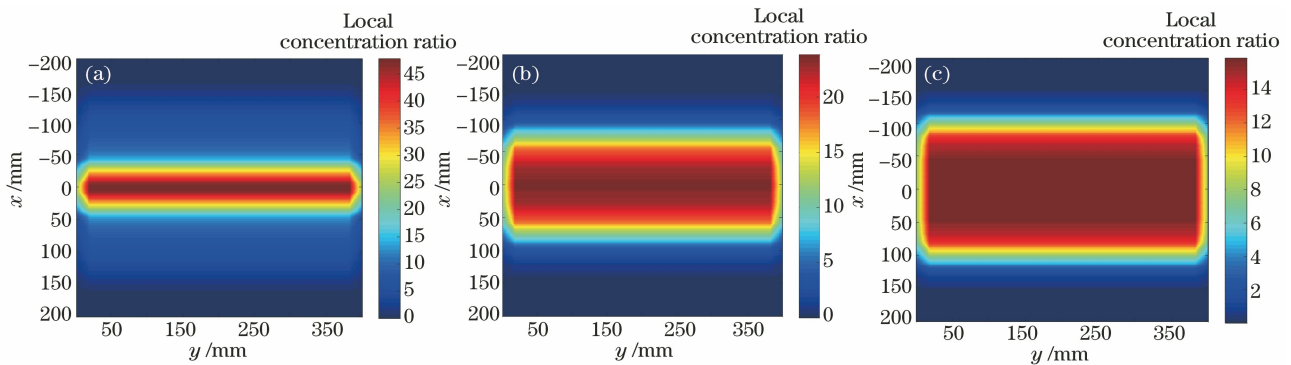


图 6 不同镜面参数下平面接收器表面的局部聚光比分布云图。(a)  $N = 25, d_1 = 100$  mm,  $f = 8000$  mm;

(b)  $N = 7, d_1 = 300$  mm,  $f = 8000$  mm; (c)  $N = 5, d_1 = 400$  mm,  $f = 8000$  mm

Fig. 6 Nephograms of local concentration ratio distribution on surface of planar receiver under different mirror parameters. (a)  $N = 25, d_1 = 100$  mm,  $f = 8000$  mm; (b)  $N = 7, d_1 = 300$  mm,  $f = 8000$  mm; (c)  $N = 5, d_1 = 400$  mm,  $f = 8000$  mm



图 7 给出了部分参数下新型槽式聚光器二维截面内的光线传输轨迹。可以清晰看到,采用相同镜面单元旋转阵列的新型槽式聚光器确实能很好地汇聚太阳光能。但是,它不同于传统抛物槽式聚光器将平行光会聚到一个点位置<sup>[16-17]</sup>,而是有所分散地进行会聚,也正是这种“分散”的聚光特性,为灵活增

加聚焦光斑尺寸并获得优异的均匀聚焦能流分布提供了可能。另外,从这些光路传输轨迹可以看到,平面接收器位于  $H = R_1/2$  位置并不能获得最小的聚焦光斑,而应放置在其下面一定距离处,也就是说可以通过合理调节接收器的位置来减小聚焦光斑尺寸和改善能流分布。

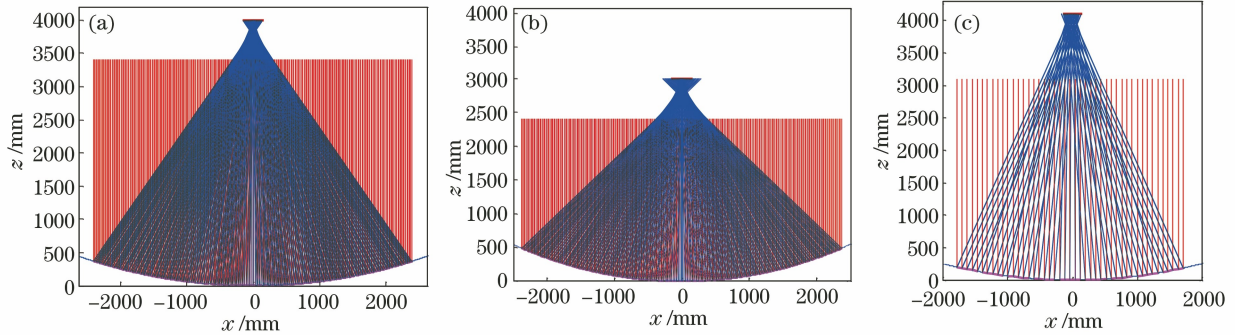


图 7 不同镜面参数下太阳光线在新型槽式聚光器内的传输轨迹。(a)  $N=25$ ,  $d_1=100$  mm,  $f=8000$  mm; (b)  $N=25$ ,  $d_1=100$  mm,  $f=6000$  mm; (c)  $N=5$ ,  $d_1=400$  mm,  $f=8000$  mm

Fig. 7 Transmission trajectories of solar rays in novel trough concentrator under different mirror parameters. (a)  $N=25$ ,  $d_1=100$  mm,  $f=8000$  mm; (b)  $N=25$ ,  $d_1=100$  mm,  $f=6000$  mm; (c)  $N=5$ ,  $d_1=400$  mm,  $f=8000$  mm

### 3.3 镜面阵列旋转半径和接收器位置对能流分布的影响

图 8 给出了不同镜面旋转阵列半径  $R_1$  下聚光器内光路传输轨迹,在左侧图中将顶部宽度为 300 mm 的水平线作为示意接收器位置。可以看到,随着旋转阵列半径  $R_1$  的减小,其聚焦光斑的半径在增大,但聚光器仍具备汇聚太阳光能的功能,这也充分说明镜面单元的旋转阵列半径  $R_1$  与其焦距  $f$  并非要相等,这使聚光器的设计更加灵活。另外,聚焦光斑的合理接收位置会随着旋转阵列半径  $R_1$  的改变而变化,它与镜面单元的焦距  $f$  没有关系。一般而言,接收器位于镜面单元旋转阵列半径  $R_1$  的一半位置是合适的,即  $H = R_1/2$ ,这也是半径为  $R_1$  的凹球面反射镜的焦平面位置。然而,若要获得最小的聚焦光斑尺寸,则需将接收器下移 150 ~ 200 mm,这也是图 7 和图 8 等所示的大量光线的跟踪结果所确定的规律。总体而言,若要采用较宽的镜面单元设计大口径聚光器(镜面阵列数量较大),就需要适当增加旋转阵列半径来避免聚焦光斑尺寸过大,但这样造成的不利问题是接收器悬臂安装距离太远,聚光系统整体不紧凑。

图 9 给出了不同镜面旋转阵列半径和平面接收器位置下新型槽式聚光器的聚焦能流分布曲线。可以发现,旋转阵列半径越大,聚焦光斑越小,即光能更为集中。例如,镜面宽度为  $d_1=400$  mm、焦距为

$f=8000$  mm,阵列数量为  $N=8$  且旋转阵列半径为 7000 mm 时,在 400 mm 宽度的平面接收器上能接收聚光器总反射光能的 97.3%,且聚焦光斑的能流分布较为均匀,这是非常优异的效果。此时,整个聚光器的采光口径为 6 m,已超过了目前商业化抛物槽式电站中欧洲槽(ET)的采光口径(5.77 m)和美国 Luz 公司 LS-2 型聚光器的采光口径(5 m)。当然,采用较小的镜面旋转阵列半径可有效降低接收器的安装高度,这对实际工程应用而言是非常有利的。从图 9 中可以发现,当焦距为  $f=8000$  mm,阵列数量为  $N=5$ ,旋转阵列半径  $R_1=4000$  mm 且接收器位于 1830 mm 位置时,聚焦光斑能量分布非常均匀,尤其是在聚焦光斑的  $-100 \sim 100$  mm 区域内聚光比稳定在 7.3,此区域非常适合布置聚光光伏电池组件,相应的能流分布云图如图 10 所示。

总体而言,基于相同参数抛物镜面单元旋转阵列的新型槽式聚光器具备实现均匀聚焦能流分布的潜力,但也并非文献<sup>[19]</sup>所称的定能获得优异的均匀能流分布,因为他们给出的两个示例均只采用了平行光线进行能流分布模拟,所以获得了非常均匀的能流分布。然而,实际的太阳入射光带有一定锥角,这在聚光分析中是必须考虑的。也正因如此,要实现平面接收器表面能流分布均匀化并非易事,需要合理地匹配或优化镜面宽度、镜面焦距、镜面整理数量、旋转阵列半径和接收器

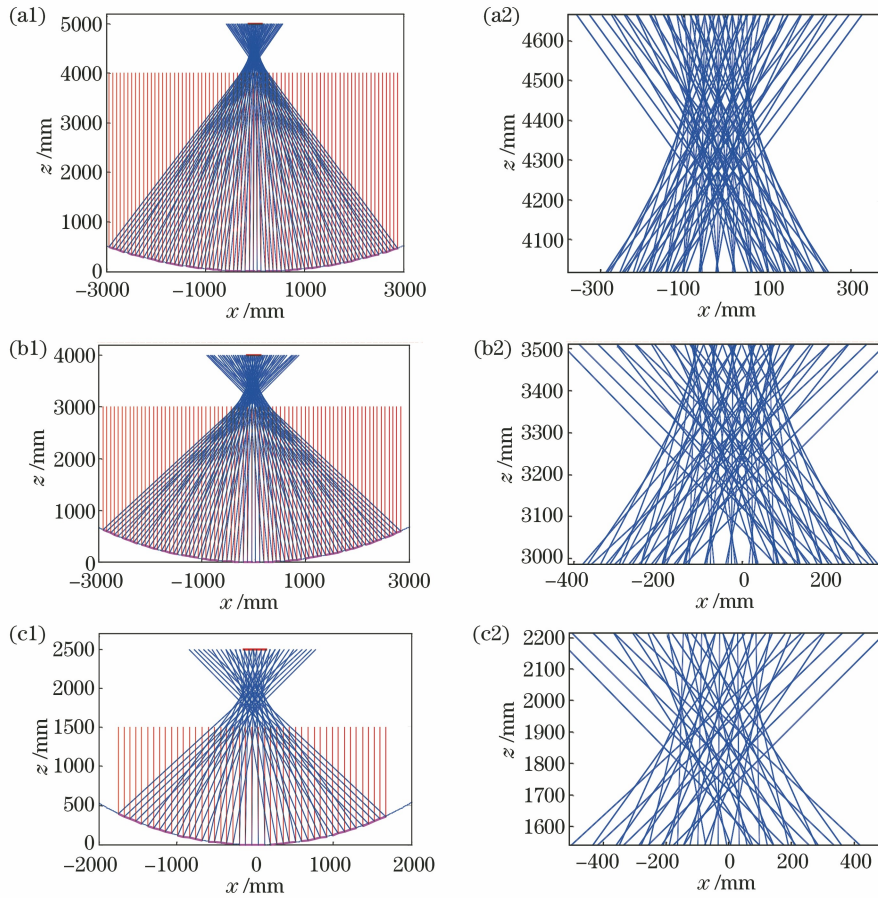


图 8 当镜面阵列旋转半径与镜面焦距不相等时,不同镜面参数下太阳光线在新型槽式聚光器内的传输轨迹。(a1)(a2)  $N=8, d_1=400 \text{ mm}, f=8000 \text{ mm}, R_1=9000 \text{ mm}$ ; (b1)(b2)  $N=8, d_1=400 \text{ mm}, f=8000 \text{ mm}, R_1=7000 \text{ mm}$ ; (c1)(c2)  $N=5, d_1=400 \text{ mm}, f=8000 \text{ mm}, R_1=4000 \text{ mm}$

Fig. 8 Transmission trajectories of solar rays in novel trough concentrator under different mirror parameters when rotation radius of mirror array is not equal to focal length of mirror. (a1)(a2)  $N=8, d_1=400 \text{ mm}, f=8000 \text{ mm}, R_1=9000 \text{ mm}$ ; (b1)(b2)  $N=8, d_1=400 \text{ mm}, f=8000 \text{ mm}, R_1=7000 \text{ mm}$ ; (c1)(c2)  $N=5, d_1=400 \text{ mm}, f=8000 \text{ mm}, R_1=4000 \text{ mm}$

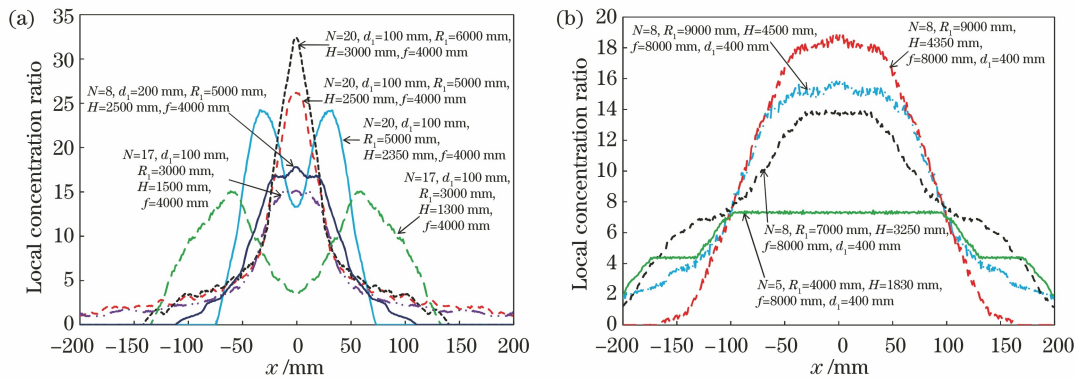


图 9 不同镜面旋转半径和接收器位置下新型槽式聚光器的聚焦能流分布。(a)  $d_1$  为 100 mm 和 200 mm; (b)  $d_1$  为 400 mm  
Fig. 9 Focusing energy flux distribution of new trough concentrator with different mirror rotation radii and receiver positions. (a)  $d_1$  is 100 mm and 200 mm; (b)  $d_1$  is 400 mm

安装位置等诸多参数,这可参考文献[9]给出的光线跟踪方法和遗传优化算法结合的优化方法来实

现均匀化目标,这也是本团队的后续将进行的一项工作。



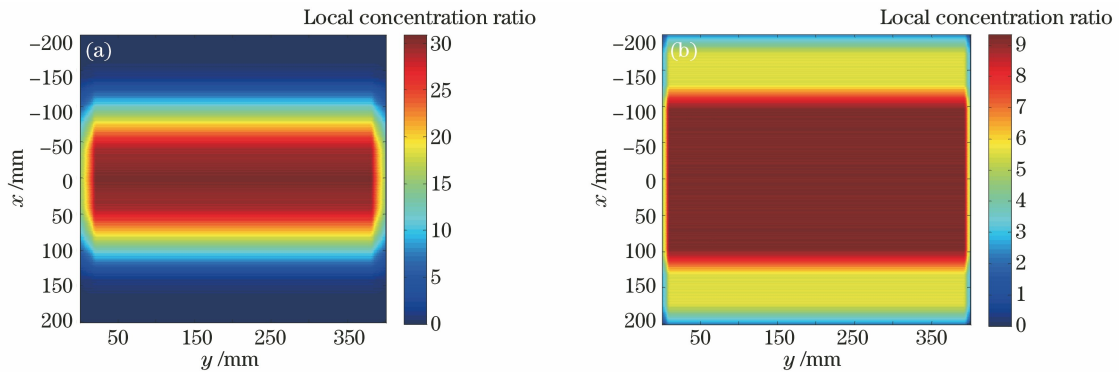


图 10 更改镜面旋转半径和接收器位置后的局部聚光比分布云图。(a)  $N=8$ ,  $d_1=400$  mm,  $f=8000$  nm,

$R_1=7000$  mm,  $H=4350$  mm; (b)  $N=5$ ,  $d_1=400$  mm,  $f=8000$  nm,  $R_1=4000$  mm,  $H=1830$  mm

Fig. 10 Nephograms of local concentrator ratio distribution after changing mirror rotation radius and receiver position. (a)

$N=8$ ,  $d_1=400$  mm,  $f=8000$  nm,  $R_1=7000$  mm,  $H=4350$  mm; (b)  $N=5$ ,  $d_1=400$  mm,  $f=8000$  nm,  $R_1=4000$  mm,  $H=1830$  mm

## 4 结 论

提出了一种基于相同抛物镜面单元旋转阵列的新型槽式聚光器,建立了该聚光器的光学分析模型,详细分析了镜面焦距  $f$ 、镜面宽度  $d_1$ 、平面接收器位置、旋转阵列半径  $R_1$  和旋转阵列数量  $N$  等参数对其聚光性能的影响规律,为聚光器设计提供了依据。主要研究结论如下。

1) 新型槽式聚光器能很好地汇聚太阳光能,但它不同于传统抛物槽式聚光器将平行光汇聚于某点,而是有所“分散”地进行汇聚。其聚焦光斑的合理接收位置会随旋转阵列半径  $R_1$  的改变而变化,而与镜面单元的焦距  $f$  无关。虽然接收器位于镜面旋转阵列半径  $R_1$  的一半位置是合适的,但是要获得最小聚焦光斑则需将其下移 150~200 mm。另外,镜面单元的旋转阵列半径与其焦距并非要相等,可根据能流分布要求对两者进行灵活取值。

2) 聚焦光斑宽度随镜面编号  $n$  呈指数增大关系,尤其是当镜面宽度较大且旋转阵列半径较小时,指数变化幅度更为明显。给定镜面焦距  $f$  和宽度  $d_1$ ,总存在最佳的镜面阵列数量  $N$  使平均聚光比达到峰值。此外,随着镜面宽度的增大或旋转阵列半径的减小,对应峰值平均聚光比的镜面阵列数量  $N$  在减小。

3) 旋转阵列半径越大或镜面宽度越小,聚焦能流分布越集中且峰值聚光比越大(算例中达到了 50),此时聚焦能流基本呈高斯分布特征。采用较小的旋转阵列半径可降低接收器的安装高度并改善能流均匀性。在算例中,当  $f=8000$  mm、 $N=5$ 、 $R_1=$

4000 mm 且接收器位于 1830 mm 位置时,聚焦光斑能量分布非常均匀,大部分区域的聚光比稳定在 7.3,这些区域中非常适合安置光伏电池组件。

4) 新型槽式聚光器确实具备实现均匀聚焦能流分布的潜力,但也并非文献[19]所称的定能获得均匀能流分布。因为受太阳入射光锥角的影响,要在平面接收器上实现优异的均匀能流分布并非易事,这需要合理匹配镜面焦距、宽度和旋转阵列半径等诸多设计参数。

## 参 考 文 献

- [1] Li Z, Chen S Y, Dong W J, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4001.  
李政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4001.
- [2] 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.
- [3] Wang Y F, Li M, Lin W X, et al. Performance analysis on solar cell modules of flat-plate and trough concentrating photovoltaic system [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2287-2292.  
王云峰, 李明, 林文贤, 等. 平板式与槽式聚光太阳能电池组件性能分析 [J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2287-2292.
- [4] Lamnatou C, Vaillon R, Parola S, et al. Photovoltaic/thermal systems based on concentrating and non-concentrating technologies: working fluids at low, medium and high temperatures [J]. Renewable

- and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110625.
- [5] Han X, Zhao G K, Xu C, et al. Parametric analysis of a hybrid solar concentrating photovoltaic/concentrating solar power (CPV/CSP) system [J]. Applied Energy, 2017, 189: 520-533.
- [6] Guo S J, Liu X D, Jiang H F, et al. Performance study of a novel trough type compound parabolic concentration photovoltaic thermal device [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2021, 41 (1): 8-14.  
郭帅军, 刘雪东, 姜洪峰, 等. 槽式复合多曲面聚光光伏光热供能装置性能分析 [J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(1): 8-14.
- [7] Liu X Y, Zhang W H, Xiao X, et al. The up to date development of rural renewable energy in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(S1): 160-164.  
刘晓英, 张伟豪, 肖潇, 等. 中国农村可再生能源的发展现状分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21 (S1): 160-164.
- [8] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R. Optimization of a discrete dish concentrator for uniform flux distribution on the cavity receiver of solar concentrator system [J]. Renewable Energy, 2018, 129: 431-445.
- [9] 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.  
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.
- [10] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R. Optical characteristics of solar dish concentrator/triangular cavity receive system with uniform flux distribution [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(7): 202-213.  
颜健, 彭佑多, 程自然. 可实现均匀能流分布的太阳能碟式/三角形腔体接收系统的光学特性研究 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(7): 202-213.
- [11] Zhang G M, Wei J J, Zhang L, et al. A comprehensive study on the effects of truncation positions of the compound parabolic concentrator eliminating multiple reflections on the performances of concentrating photovoltaic and thermal system [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183: 116162.
- [12] Wang G, Chen Z S, Hu P. Design and experimental investigation of a multi-segment plate concentrated photovoltaic solar energy system [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 147-152.
- [13] 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.
- [14] Xiao J, Cao Y, Han L F. Design and preliminary test of water-injected Fresnel concentrators [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1422002.  
肖君, 曹云, 韩利峰. 注水型菲涅耳聚光器的设计和初步试验 [J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1422002.
- [15] Felsberger R, Buchroithner A, Gerl B, et al. Design and testing of concentrated photovoltaic arrays for retrofitting of solar thermal parabolic trough collectors [J]. Applied Energy, 2021, 300: 117427.
- [16] 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.
- [17] Chen F, Li M, Ji X, et al. Influence of glass thickness of reflector on the concentrating characteristics in the solar-energy trough system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1208002.  
陈飞, 李明, 季旭, 等. 太阳能槽式系统反射镜玻璃厚度对聚光特性的影响 [J]. 光学学报, 2012, 32 (12): 1208002.
- [18] Meng X L, Liu B, Duan C X, et al. Optical transmission characteristic of novel trough type CPV/T concentrator [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1522002.  
孟宪龙, 刘备, 段辰星, 等. 一种新型槽式太阳能 CPV/T 聚光器的光学传输特性 [J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1522002.
- [19] Peng X D, Peng Z X. A kind of slot type uniform condensing mirror system: CN107830644A [P]. 2018-03-23.  
彭先德, 彭忠祥. 一种槽式均匀聚光反射镜系统: CN107830644A [P]. 2018-03-23.
- [20] 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.  
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.