

可改善平面接收器能流均匀性的太阳能碟式聚光器设计

颜健^{1*}, 聂笃忠^{1,2}, 彭佑多¹, 王海³, 刘永祥¹, 田勇¹

¹ 湖南科技大学机电工程学院, 湖南 湘潭 411201;

² 湖南科技职业学院智能装备技术学院, 湖南 长沙 410004;

³ 肇庆学院机械与汽车工程学院, 广东 肇庆 526061

摘要 为了改善平面接收器的能流均匀性, 针对抛物碟式聚光器, 提出一种重新优化布置各镜面单元的改进方法, 并设计了一种新型非成像碟式聚光器。建立平面接收器目标区域内能流均匀化的优化模型, 联合运动累加光线跟踪方法和遗传算法优化碟式聚光器。研究优化的聚光器与抛物碟式聚光器的聚焦能量分布, 分析平面接收器上部聚光比、非均匀因子、峰值聚光比及拦截效率指标。最后讨论了新型聚光器的应用价值, 并展示了优化的新型碟式聚光器在平面型金属盘管接收器上的能流均匀化效果。结果表明, 非成像碟式聚光器的能流均匀化效果最优异, 能将非均匀因子从 3.62~4.22 显著减小到 0.18~0.25, 峰值聚光比从 24737~37245 降低到 1722~2055。研究结果不仅能为太阳能平面接收器能流均匀化提供一种新的方法, 还能为现有抛物碟式聚光器的改进提供新的思路。

关键词 光学设计; 太阳能; 碟式聚光器; 光学性能; 能流均匀化; 光线跟踪方法; 遗传算法

中图分类号 TK513.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0922002

Design of Solar Dish Concentrator for Improving Flux Uniformity on Planar Receiver

Yan Jian^{1*}, Nie Duzhong^{1,2}, Peng Youduo¹, Wang Hai³, Liu Yongxiang¹, Tian Yong¹

¹ School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;

² School of Intelligent Equipment Technology, Hunan Vocational College of Science and Technology, Changsha, Hunan 410004, China;

³ College of Mechanical and Automotive Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing, Guangdong 526061, China

Abstract To improve flux uniformity on a planar receiver, we propose an improved design method for a parabolic dish concentrator via the optimization of the rearrangement of each mirror unit. A new non-imaging dish concentrator is also designed. In this study, a flux homogenization optimization model is established for the target area of the planar receiver and the dish concentrator is optimized by the motion accumulation ray-tracing method combined with the genetic algorithm. Moreover, the focusing flux distribution on the optimized concentrator and parabolic dish concentrator is demonstrated, and the local concentration ratio, non-uniformity factor, peak concentration ratio, and interception efficiency on the planar receiver are investigated. Finally, the potential applications of the new concentrator are discussed and the effect of the optimized dish concentrator on the flux homogenization of the planar metal coil receiver is verified. Results show that the non-imaging dish concentrator has the best effect on flux homogenization. It can significantly reduce the non-uniformity factor from 3.62–4.22 to 0.18–0.25 and the peak concentration ratio from 24737–37245 to 1722–2055. This work provides an advanced solution for the flux homogenization of planar solar receivers and an innovative idea to improve the existing parabolic dish concentrators.

Key words optical design; solar energy; dish concentrator; optical performance; flux homogenization; ray tracing method; genetic algorithm

OCIS codes 220.2740; 350.6050; 350.4600

收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-01-06; 录用日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(51641504)、湖南省教育厅项目(19C0794)、湖南省自然科学基金(2019JJ40085, 2019JJ50202)

* E-mail: yanjian1988@hnust.edu.cn

1 引 言

太阳能是一种清洁环保的可再生能源,开发和利用太阳能资源是解决石化能源短缺和环境污染的重要途径之一^[1]。由于地球表面接收的太阳辐照密度低,太阳能聚光器是太阳能高品位利用系统中不可或缺的核心装置,能使较小面积的接收器获得高密度太阳辐射能,提升能源利用效率,降低建造成本^[2]。抛物碟式聚光器是一种典型的点聚焦光学装置,广泛应用于太阳能聚光光热系统^[3]和聚光光伏系统^[4]中。然而,抛物碟式聚光器在平面接收器(位于焦平面)上的聚焦光斑具有能量密度高且分布不均匀的缺点^[5],降低了接收器的工作效率,更为严重的可能会产生高温效应,进而影响接收器的安全性和服役寿命^[6-7]。

当前,主要是通过设计新型碟式聚光器来改善平面接收器的能流均匀性,包括多平面镜的聚光器、多点聚焦镜面的聚光器及新型反射镜曲面的聚光器。在多平面镜的碟式聚光器方面,Chong等^[8-9]设计了一种非成像平面聚光器,并提出其在平面接收器上获得均匀能流分布的设计方法;王云峰等^[10]也提出了一种新型多平面镜线性组合的太阳能碟式聚光器,并研制了一套450倍聚光比的多平面镜聚光器,证实了焦平面上的能流分布均匀性能达到预期设计效果。在多点聚焦镜面的碟式聚光器方面,虽然夏新林等^[11-12]都对十六碟聚光器进行了深入研究,但未涉及平面接收器能流均匀化的问题;Giannuzzi等^[13]提出了一种基于控制多块点聚焦镜面的静态像差方法来提升矩形平面接收器(太阳能电池)的聚焦能流均匀性,即将不利的镜面变形转换为有利因素,为接收器的能流均匀化服务。在新型反射镜曲面的碟式聚光器方面,Zhou等^[14]提出了两种非成像碟式聚光器设计方法,获得了焦平面的均匀能流分布;Meng等^[15]利用基于矢量的自由曲面方法进行反射式聚光器镜面设计,该设计显著提升了目标接收器(圆形或矩形平面接收器)的聚焦能流均匀性;此外,何雅玲等^[6-7]提出了系列的解决方法用于改善接收器的能流均匀性和温度均匀性,为改善太阳能聚光集热系统的可靠性提供了重要参考。由此可见,设计新型碟式聚光器来提升平面接收器的能流均匀性具有非常大的创新空间。

本文提出了一个关于抛物碟式聚光器的改进方法,即对抛物碟式聚光器中各镜面单元进行重新优化布置,并设计了一种新型非成像碟式聚光器,均可

改善平面接收器的能流均匀性。对比研究了上述聚光器与理想抛物聚光器的聚焦能量分布特性,探究了平面接收器的局部聚光比分布、非均匀因子及峰值聚光比等指标。最后讨论了新型聚光器的应用价值,并展示了优化后的新型碟式聚光器在平面型金属盘管接收器上的能流均匀化效果。

2 聚光器的物理模型

抛物碟式聚光器的反射镜方程是 $x^2 + y^2 = 4fz$,其中 f 是抛物反射镜面的焦距,平面接收器通常位于焦平面位置。工程实践中,大型碟式聚光器通常是一个由许多镜面单元组成的完整的理想抛物反射镜面。令碟式聚光器的反射镜面沿径向等分为 K 个环,第 k 环的反射镜面又沿圆周方向等分为 M_k 份,为方便描述,定义 km 为第 k 环中沿圆周方向的第 m 块镜面单元,编号起止如图1(a)所示。

为了改善焦平面的能流分布均匀性,针对抛物碟式聚光器,提出镜面单元旋转和镜面单元沿焦点轴线方向移动这两种改进设计(分别称为镜面旋转策略和镜面平移策略)。以镜面单元 km 为例,镜面旋转策略是将理想碟式聚光器中任意镜面单元 km 绕点 $q_{km,2}$ 以轴线 \mathbf{n}_{km} 旋转角度 θ_k ,其中点 $q_{km,2}$ 是镜面单元 km 的内圆弧中点,直线 $oq_{km,2}$ 和 z 轴构成的平面是镜面单元 km 的对称平面,此平面的法线矢量为 \mathbf{n}_{km} 。图1(b)是镜面单元 km 对称平面的二维光线传输示意图。也就是说,镜面旋转策略使得相同环的镜面单元关于 z 轴圆周对称,且同环中各镜面单元的旋转角度相等。镜面平移策略是将理想碟式聚光器中各环反射镜面整体沿 z 轴方向移动,第 k 环的移动距离记为 T_k 。本文目标是通过优化抛物碟式聚光器中各镜面单元的旋转角度或平移距离来改善焦平面目标接收区域内能流密度分布的均匀性。图1中 R_{flux}^k 为聚光器第 k 环反射镜面聚焦光斑的半径, $\mathbf{N}_{km,1}$ 和 $\mathbf{N}_{km,2}$ 分别为点 $q_{km,1}$ 和点 $q_{km,2}$ 的法线矢量。

镜面旋转策略会破坏碟式聚光器的圆周对称性,导致聚焦光斑能量沿圆周方向不均匀分布。因此,在镜面旋转策略的基础上,进一步提出一种新颖的非成像碟式聚光器(新型母线)以改善焦平面能流均匀性,如图2所示,其中 F 为焦点。非成像碟式聚光器的反射镜面的形成过程为:将理想抛物母线沿径向等分成 K 份,然后将各段抛物母线绕其一端点旋转一定角度,最后将各母线绕 z 轴旋转一周形成一个非成像碟式聚光器。通过优化非成像碟式聚

光器中各段母线的旋转角度,可改善焦平面目标接收区域内能流密度分布的均匀性。图2中左侧表示非成像碟式聚光器反射镜面的母线,右侧表示理想抛

物碟式聚光器反射镜面的母线, R 是聚光器的采光半径, r_k 是第 k 环反射镜面的径向长度, R_1 是空域半径,即聚光器中心没有安装反射镜面区域的半径。

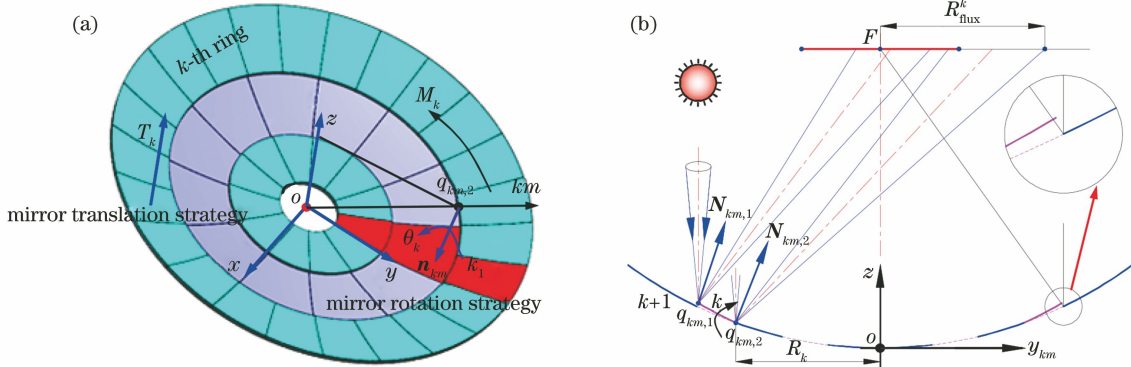


图1 抛物碟式聚光器的镜面重新布置示意图。(a) 镜面重新布置参数;(b) 镜面单元 km 对称平面内光线传输
Fig. 1 Schematic of mirror rearrangement of parabolic dish concentrator. (a) Mirror rearrangement parameters; (b) ray transmission in symmetrical plane of mirror unit km

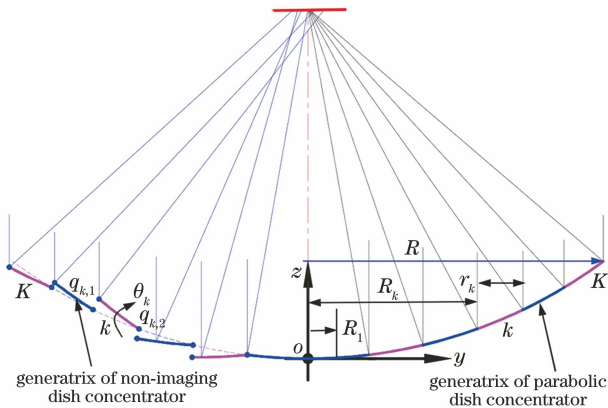


图2 非成像碟式聚光器的母线示意
Fig. 2 Schematic of generatrix of non-imaging dish concentrator

上述新型聚光器的各镜面单元间会存在光学遮挡问题,考虑到镜面单元的转动会引起聚焦光斑的显著变化^[16],所以镜面单元旋转角度是微小的,并不会造成明显的遮挡。基于几何光学原理,建立镜面单元重新布置参数和非成像碟式聚光器相关参数(聚焦光斑的半径和光学遮挡尺寸)的数学模型,并将该模型作为后续聚光器参数优化的约束模型。具体的聚焦光斑半径、光学遮挡尺寸与聚光器参数的关联数学模型详见文献^[17-18],文中不再赘述。

3 均匀化模型与优化方法

基于理想光学假设(即无安装误差、跟踪误差及面形误差等),以焦平面目标接收区域内能流分布的最小非均匀因子为目标,联合光线跟踪方法和遗传算法优化聚光器的相关设计参数。其中,光线跟踪

方法用于快速计算焦平面的聚焦能流分布,遗传算法用于优化抛物碟式聚光器的镜面重新布置参数、非成像碟式聚光器的母线旋转参数。

3.1 光学模拟方法

理想光学条件下,非成像碟式聚光器和采用镜面平移策略改进后的抛物碟式聚光器均关于 z 轴完全对称,采用镜面旋转策略改进后的抛物碟式聚光器也关于 z 轴对称,即同一环的各镜面单元关于 z 轴对称。充分利用几何对称性,采用运动累加光线跟踪方法^[5]对三种碟式聚光系统进行快速光学模拟,获得平面接收器表面的能流分布结果。在光学模拟中,太阳入射光锥角为 4.65 mrad ,太阳直射辐照强度(DNI)为 W_0 (单位是 W/m^2),太阳入射光锥模型详见文献^[5]。位于焦平面位置的平面接收器为一个边长为 L 的正方形,将其离散成许多等面积的正方形网格单元,离散参数 $H=U$,如图3所示。其中,半径 R_{target} 以内的圆形区域是能流均匀化的目标区域; $R_{\text{constraint}}$ 是聚焦光斑的最大接收半径,要求聚光器的聚焦光斑在此区域内;半径 R_{target} 到 $R_{\text{constraint}}$ 之间的环形区域是能流分布的过渡区域。采用运动累加光线跟踪方法可以快速获得焦平面各离散网格吸收的太阳辐射能量 $E_{\text{plane}}(h, u)$,从而进一步确定任意离散网格的局部聚光比(LCR)。局部聚光比定义为局部能流密度与太阳直射辐照强度之比,可表示为

$$C_{hu} = \frac{E_{\text{plane}}(h, u)}{(L/H)^2 \cdot W_0} = \frac{f(h, u)}{W_0}, \quad (1)$$

式中: $f(h, u)$ 是平面接收器中第 h 行第 u 列离散网格的能流密度; $(L/H)^2$ 是离散网格的表面积。

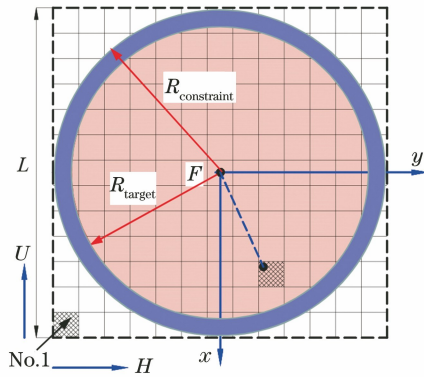


图 3 平面接收器的光学离散

Fig. 3 Optical discretization of plane receiver

3.2 能流均匀优化问题

通过优化抛物碟式聚光器的镜面重新布置参数、非成像碟式聚光器的母线旋转参数,实现焦平面目标接收区域内(半径为 R_{target})的能流分布均匀化,其优化的数学模型可表示为

$$\text{Find } \mathbf{X} = [\mathbf{T} \text{ or } \mathbf{G}_1 \text{ or } \mathbf{G}_2]$$

$$\text{Minimize } F(\mathbf{X}) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_t} (C_i - C_{\text{average}})^2 / (N_t - 1)}}{C_{\text{average}}}$$

$$\text{s.t. } R_{\text{flux}}^k \leq R_{\text{constraint}}, k = 1, 2, \dots, K, \quad (2)$$

$$C_{\text{average}} = \sum_{i=1}^{N_t} C_i / N_t, \quad (3)$$

式中: \mathbf{X} 是决策变量矩阵,对应不同类型聚光器的设计变量; \mathbf{T} 是采用镜面平移策略改进的抛物碟式聚光器各环境面单元的移动距离变量矩阵, $\mathbf{T} = [T_1, T_2, \dots, T_k, \dots, T_K]$; \mathbf{G}_1 是采用镜面旋转策略改进的抛物碟式聚光器各环境面单元的旋转角度变量矩阵, $\mathbf{G}_1 = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k, \dots, \theta_K]$; \mathbf{G}_2 是非成像碟式聚光器各环境面单元母线的旋转角度变量矩阵, $\mathbf{G}_2 = [\theta'_1, \theta'_2, \dots, \theta'_k, \dots, \theta'_K]$; $F(\mathbf{X})$ 是目标函数,即目标接收区域内能流分布的非均匀因子; N_t 是平面接收器中离散网格的中心点在半径为 R_{target} 的圆以内的网格数量,满足此条件的网格也称为目标网格单元; C_i 是目标网格单元 i 的局部聚光比,由(1)式确定; C_{average} 是目标区域内局部聚光比的平均值。根据 $R_{\text{flux}}^k \leq R_{\text{constraint}}$,可以在优化前确定镜面重新布置参数 T_K 和 θ_K 的取值区间(即优化区间),也能确定非成像碟式聚光器各环境面单元母线的旋转角取值区间。

3.3 联合优化方法

通过遗传算法用于优化问题的求解,是一种基于生物界进化规律的随机搜索方法。遗传算法由于

直接对个体的染色体进行操作,并不需要目标函数的梯度信息,适合优化抛物碟式聚光器的镜面重新布置参数和非成像碟式聚光器的母线旋转参数,进而改善焦平面目标区域内的能流分布均匀性。其优化流程如图 4 所示, ρ_m 为聚光器镜面的反射率。其中,决策变量依次被编码成一串二进制字符,并依次连接成为一个个体的染色体;选择操作采用轮盘赌选择方法;交叉操作采用两点交叉方法,即在个体的染色体中随机产生两个交叉点,并交换这两个区域的基因来产生两个新的个体;变异操作是对个体的二进制字符串中某个位置的值进行翻转,即将 1 变为 0 或将 0 变成 1。种群大小 W 设置为 50,最大进化代数 G 设置为 120;交叉率 p_c 设置为 0.92;变异率 p_m 设置为 0.12。设置的聚光器分区参数为: $\mathbf{M} = [M_1, M_2, \dots, M_k, \dots, M_K]$; $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_K]$, $r_k = (R - R_1) / K$,即各环的径向长度相等。以目标函数 $F(\mathbf{X})$ 值最小为优化目标,所以在遗传算法中个体 j 的适应度函数为

$$F_j = \begin{cases} C_m - F(\mathbf{X}_j), & F(\mathbf{X}_j) < C_m \\ 0, & F(\mathbf{X}_j) \geq C_m \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $F(\mathbf{X}_j)$ 是种群中个体 j 对应的聚焦能流分布的非均匀因子; C_m 是目标函数值的最大估计值,设置为 2.0。

4 案例分析与讨论

通过案例验证新型碟式聚光器改善焦平面能流均匀性的有效性。太阳能聚光系统的几何参数和光学参数如表 1 所示,它能在 DNI 为 800 W/m^2 时为接收器提供约 114.40 kW 的太阳辐射能。考虑到理想抛物碟式聚光器的边缘角为 45° 时聚焦光斑半径最小,选取较小接收区域来减小热损失。基于此,确定抛物碟式聚光器的焦距 f 为 8450 mm ,理想聚焦半径为 65.4 mm ;此外还考虑了不同焦距下的均匀化效果,取 f 为 6000 mm ,理想聚焦半径为 76.6 mm 。聚光器优化前后的光学性能指标包括焦平面上的局部聚光比、非均匀因子、峰值聚光比及拦截效率等,最后还讨论了优化的碟式聚光系统在平面型金属盘管接收器上的能流均匀化效果。

4.1 利用镜面平移策略改进的抛物碟式聚光器

采用镜面平移策略改进抛物碟式聚光器,不仅能显著提升焦平面的能流均匀性,还能显著降低能流密度峰值。如表 2 所示,抛物碟式聚光系统($f = 6000 \text{ mm}$,光斑半径为 76.60 mm)聚焦光斑的峰值聚光比 C_{max} 高达 37245.26 ,很容易形成局部高温热

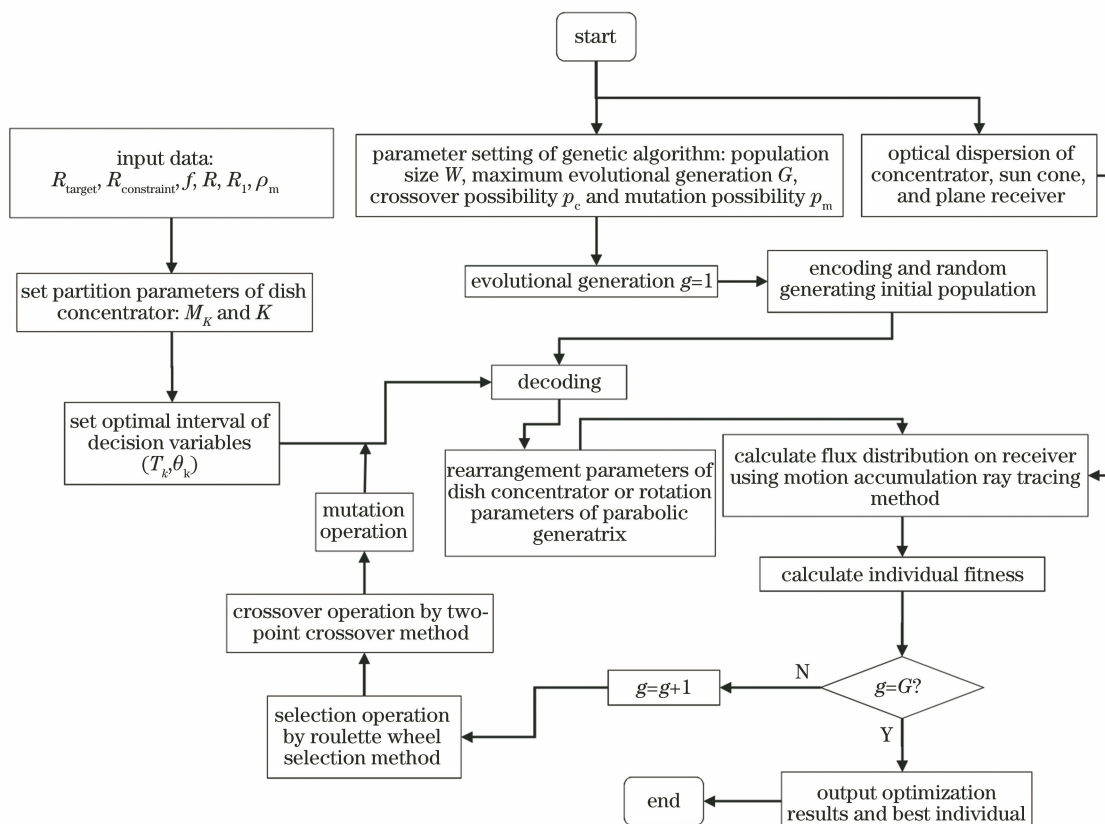


图 4 太阳能碟式聚光器/平面接收系统的优化设计流程

Fig. 4 Optimized design flow chart of solar dish concentrator/plane receiver system

表 1 太阳能聚光系统的几何参数和光学参数

Table 1 Geometric parameter and optical parameter of solar concentrator system

Parameter	Value
R /mm	7000
f /mm	8450, 6000
K	6, 10
M_K	[12, 12, 12, 24, 24, 24] when $K=6$
R_1 /mm	[12, 12, 12, 12, 12, 24, 24, 24, 24, 24] when $K=10$
ρ_m	0.93
$W_0 / (W \cdot m^{-2})$	800
Solar half angle δ /mrad	4.65
Absorptivity of plane receiver ρ_{wall}	1.0
$R_{constraint}$ /mm	200
R_{target} /mm	180

斑,从而降低接收器的服役寿命和安全性。然而,采用镜面平移策略改进抛物碟式聚光器后,其聚焦光斑半径可扩大到 180 mm 左右,峰值聚光比也减小到 1763.81(当 $K=10$);其目标接收区域内(接收半径为 180 mm)的非均匀因子也由 4.22 显著降低到

0.31,有效地改善了平面接收器表面能流均匀性。

图 5 是优化前后焦平面的能流分布曲线,可以看到,镜面平移策略对聚焦能流分布均匀性的改进效果非常明显,聚焦光斑尺寸按优化设计要求进行相应增加,目标接收区域内聚焦能量分布的均匀性

相对理想抛物聚光系统得到显著改善,不过改善后的聚焦能量分布不可避免地存在一些小波动,如图 5(b)所示。聚焦光斑半径的增加可以使接收器更多的面积受热,从而改善接收器的光-热转换性能,且避免了局部高温热损伤。图 6 为碟式聚光系统优化后非均匀因子和光学拦截效率随接收半径的

变化,可以看到,对聚光器设置不同焦距和分区环数的结果均基本一致,都能在设定的目标接收区域内获得较优异的拦截效率和能流均匀性。在 $K=10$, $f=8450$ mm,接收半径为 180 mm 情况下,拦截效率可达 95%,非均匀因子可由理想抛物聚光系统的 3.62 降低到 0.30。

表 2 采用镜面平移策略改进抛物碟式聚光系统的优化结果

Table 2 Optimization results of improved parabolic dish concentrator system using mirror translation strategy

K	f /mm	T	$C_{average}$	$F(X)$	C_{max}
	8450	Ideal parabolic dish concentrator	1402.00	3.62	24737.01
	6000	Ideal parabolic dish concentrator	1402.00	4.22	37245.26
6	8450	[292.35, 231.96, 336.69, -236.19, 180.59, -131.88]	1264.95	0.34	1820.83
	6000	[-157.84, 146.86, 242.00, 158.88, 108.55, -66.92]	1321.14	0.37	1935.91
10	8450	[-292.35, -100.19, -264.90, 179.80, 336.69, -261.18, -208.04, -185.48, -154.95, 122.24]	1327.35	0.30	1821.69
	6000	[-188.04, -259.41, 146.86, -299.16, 242.00, 183.05, -145.26, 107.86, 89.62, -48.52]	1257.55	0.31	1763.81

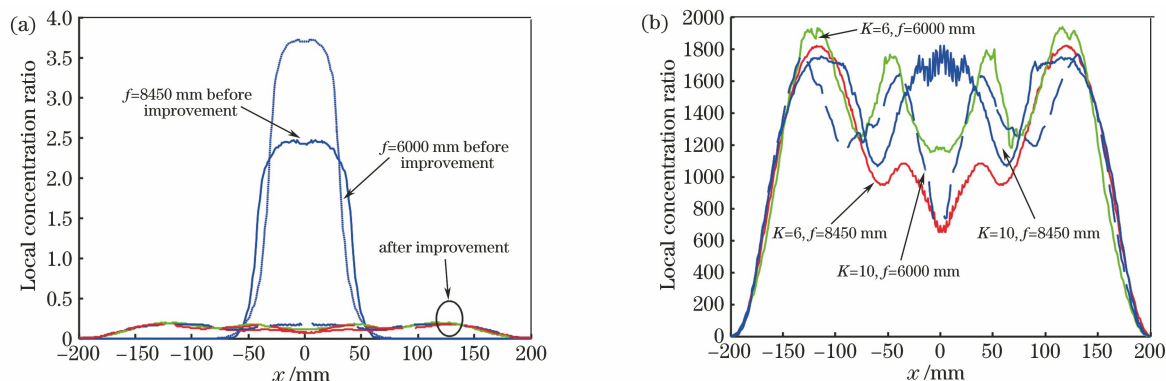


图 5 镜面平移策略改进抛物碟式聚光系统后的焦平面能流分布。(a)改进前后能流分布对比;(b)不同参数下优化结果对比
Fig. 5 Flux distribution in focal plane of improved parabolic dish concentrator system using mirror translation strategy. (a) Comparison of flux distributions before and after improvement; (b) comparison of optimization results under different parameters

4.2 利用镜面旋转策略改进的抛物碟式聚光器

采用镜面旋转策略改进抛物碟式聚光系统也能显著提升焦平面的能流分布均匀性,降低能流密度峰值,非均匀因子从 3.62~4.22 显著降低到 0.36~0.51,峰值聚光比由 24737~37245 显著降低到 2306~2909,如表 3 所示。镜面旋转策略由于破坏了抛物碟式聚光系统的圆周完全对称性,因此优化后获得的能流分布也出现明显的圆周非对称现象,如图 7 所示,其均匀性效果不及镜面平移策略。优化后聚光系统沿 x 轴截面的能流分布如图 8(a)所示,除 $K=10$, $f=6000$ 工况中心区域出现能量低谷外,其余的目标区域内能流分布波动比镜面平移

策略小。可以试想,如果聚焦光斑沿圆周方向的非对称问题不存在,那么此时的能流分布均匀性会明显优于镜面平移策略,这也是文中非成像碟式聚光器提出的初衷。另外,由图 8(b)可以看到,接收半径在 160 mm 内时非均匀因子可降低到 0.20,拦截效率高达 92% 以上。在聚光光伏应用中,可根据能流分布均匀性需求来选取接收半径,其他区域可布置热接收器用于光-热转换。

4.3 非成像碟式聚光器

相对上述镜面重新布置策略,优化后的非成像碟式聚光器能流均匀化效果是最优异的,能将非均匀因子从 3.62~4.22 显著降低到 0.18~0.25,峰值

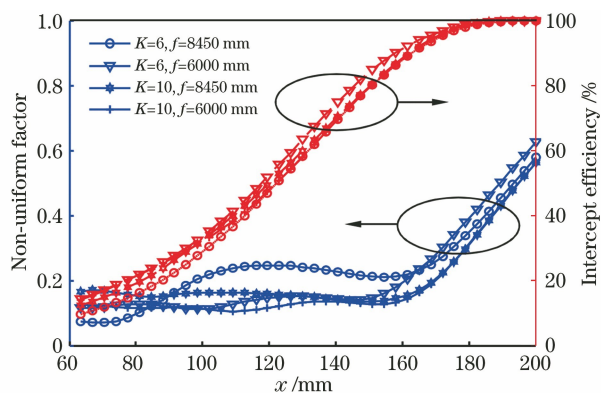


图 6 镜面平移策略改进抛物碟式聚光系统后的非均匀因子和光学拦截效率

Fig. 6 Non-uniform factor and optical intercept efficiency of improved parabolic dish concentrator system using mirror translation strategy

聚光比由 24737~37245 显著降低到 1722~2055, 如表 4 所示。理论而言,聚光器划分镜面环数 K 越大,优化得到的聚焦能流分布应该越均匀。但由于聚光系统能流均匀优化本身的复杂性,及采用的是具有一定随机性的遗传优化算法,优化结果并非真正意义的全局最优解,因此 K 越大并不一定能获得越优异的均匀性。如图 9 所示,优化后获得的能流分布曲线与镜面旋转策略中沿 x 轴截面的能流分布较为类似,除当 $K=6$ 时聚焦光斑中心区域出现能量低谷外,其余的能量分布波动较小,各优化工况的聚焦能流分布云图如图 10 所示。此外,由图 9(b) 可以看到,接收半径在 160 mm 以内时非均匀因子可降低到 0.11~0.16,这是非常优异的,非成像碟式聚光器适用于对聚焦光斑均匀性要求非常高的聚光光伏光热系统。

表 3 采用镜面旋转策略改进抛物碟式聚光系统的优化结果

Table 3 Optimization results of improved parabolic dish concentrator system using mirror rotation strategy

K	f / mm	G_1	C_{average}	$F(\mathbf{X})$	C_{max}
6	8450	$[-9.199, -4.233, 8.009, 7.032, 6.105, 2.848]$	1380.41	0.36	2399.40
	6000	$[8.212, 11.627, 10.799, 8.534, 5.776, 3.204]$	1395.90	0.51	2909.45
10	8450	$[-7.556, 7.986, 2.508, 8.066, 7.752, 6.952, 2.346, -5.712, 5.254, 4.154]$	1396.80	0.42	2709.23
	6000	$[9.278, 13.176, 4.202, 11.345, -9.955, 9.328, 7.449, 6.148, 3.840, 3.701]$	1393.65	0.47	2306.62

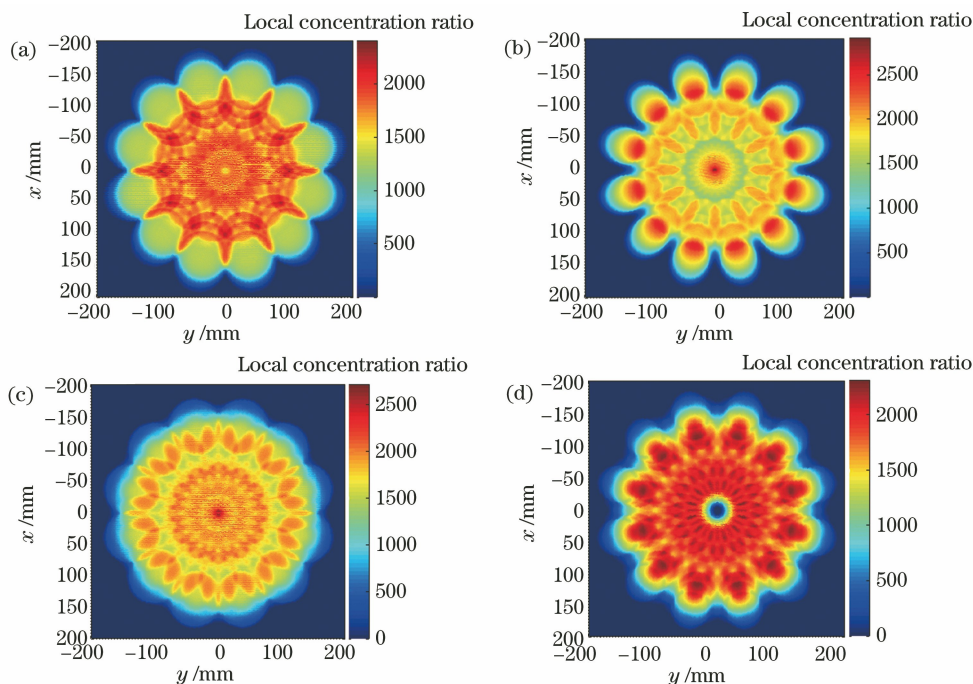


图 7 镜面旋转策略改进抛物碟式聚光系统的局部聚光比分布。(a) $K=6, f=8450 \text{ mm}$; (b) $K=6, f=6000 \text{ mm}$; (c) $K=10, f=8450 \text{ mm}$; (d) $K=10, f=6000 \text{ mm}$

Fig. 7 Local concentration ratio distribution of improved parabolic dish concentrator system using mirror rotation strategy. (a) $K=6, f=8450 \text{ mm}$; (b) $K=6, f=6000 \text{ mm}$; (c) $K=10, f=8450 \text{ mm}$; (d) $K=10, f=6000 \text{ mm}$

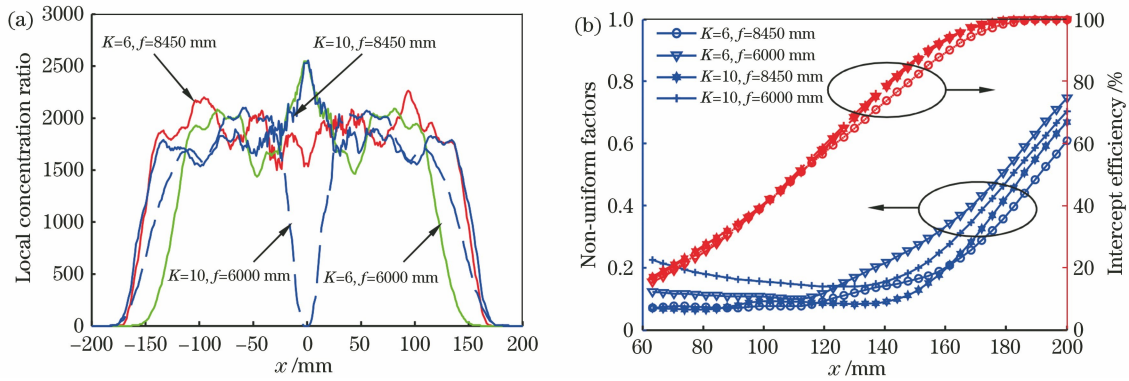


图 8 镜面旋转策略改进抛物碟式聚光系统的结果。(a)局部聚光比;(b)非均匀因子和拦截效率

Fig. 8 Results of improved parabolic dish concentrator system using mirror rotation strategy. (a) Local concentration ratio; (b) non-uniform factor and optical intercept efficiency

表 4 非成像碟式聚光系统参数优化结果

Table 4 Optimization results of parameters of non-imaging dish concentrator system

K	f / mm	G_2	C_{average}	$F(\mathbf{X})$	C_{max}
6	8450	[8.839, 8.800, 7.692, 2.745, 6.200, 4.885]	1324.67	0.18	1730.97
	6000	[-7.046, 11.530, 10.551, 8.271, 5.965, -2.638]	1351.14	0.20	1722.93
10	8450	[-1.511, 7.773, -5.589, 8.067, -3.153, 2.365, 6.567, 6.200, -5.314, 4.885]	1349.91	0.21	1798.43
	6000	[-3.898, 9.788, 12.405, -11.400, 7.990, 8.758, 7.755, -5.748, 2.280, -3.451]	1357.50	0.25	2055.24

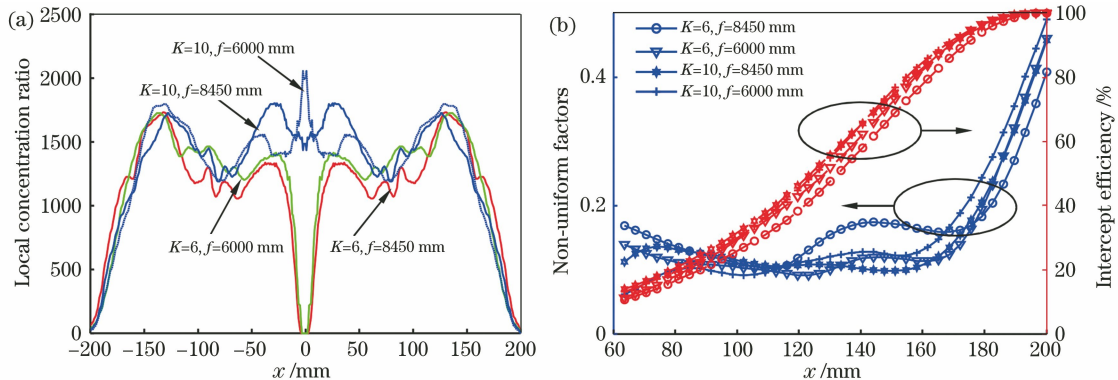


图 9 非成像碟式聚光系统的优化结果。(a)局部聚光比;(b)非均匀因子和拦截效率

Fig. 9 Optimization results of non-imaging dish concentrator system. (a) Local concentration ratio;

(b) non-uniform factor and optical intercept efficiency

4.4 新型聚光器的应用讨论

无论是抛物碟式聚光器的镜面重新布置优化,还是非成像碟式聚光器的优化设计,均能将太阳辐射能量聚集在设定区域内,并改善目标区域的能流分布均匀性,降低峰值能流密度,说明本文针对焦平面能流均匀化的太阳能碟式聚光器改进和创新设计方法是有效的。实际应用中,可结合应用对象(聚光光伏或光热利用)和生产条件合理选择聚光器。针对聚光光伏/光热应用,非成像碟式聚光器是优选,其次是镜面平移策略改进的抛物碟式聚光器,它们都能获得较优异的均匀性。而对于太阳能光热应

用,上述聚光器均可显著改善能流分布均匀性,降低峰值能流密度,从而提升接收器的服役寿命和可靠性。

工程应用时,镜面重新布置策略不仅能用于碟式聚光器的优化设计,还能指导现有碟式聚光器的改进(即镜面单元的重新布置)。镜面重新布置策略具有实施简单、成本低的优点,因为它只需通过调节镜面单元背部的支撑螺栓就能实现镜面重新布置,不需要增加额外的材料成本。如采用镜面单元新型支撑-调节结构和位姿调节方法^[19],还可快速实现镜面单元的重新布置。非成像碟式聚光器与理想抛

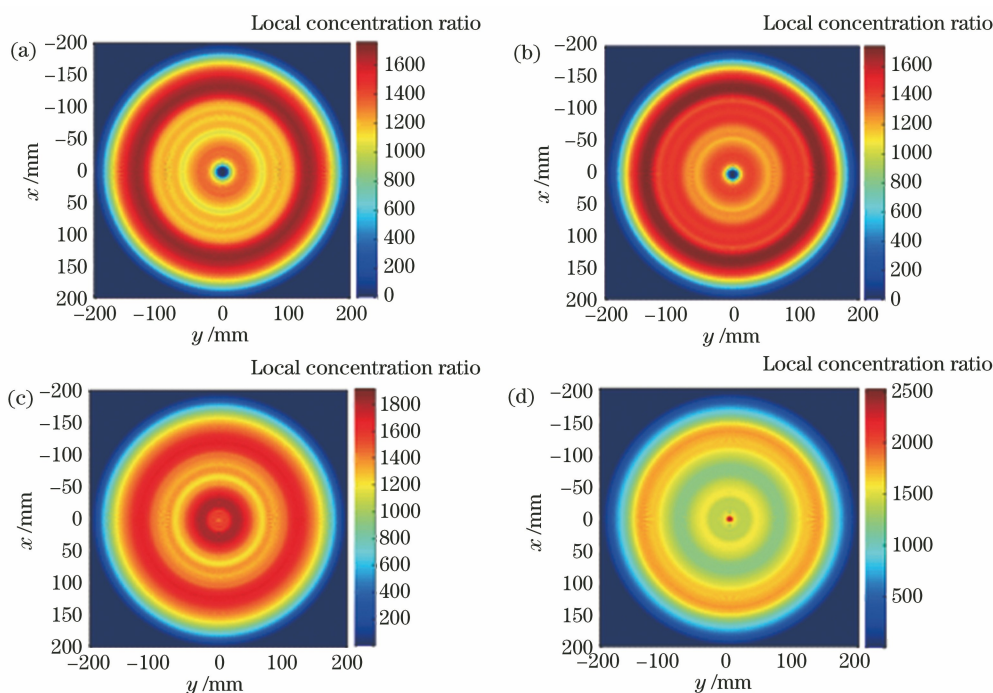


图 10 优化的非成像碟式聚光系统的局部聚光比分布。(a) $K=6$, $f=8450$ mm; (b) $K=6$, $f=6000$ mm;
(c) $K=10$, $f=8450$ mm; (d) $K=10$, $f=6000$ mm

Fig. 10 Local concentration ratio distribution of optimized non-imaging dish concentrator system.

(a) $K=6$, $f=8450$ mm; (b) $K=6$, $f=6000$ mm; (c) $K=10$, $f=8450$ mm; (d) $K=10$, $f=6000$ mm

物碟式聚光器的反射镜面在空间位置上相差非常小,这意味着非成像碟式聚光器的反射镜面可以直接安装在原有的抛物碟式聚光器的网架结构上,不需要重新开发新的聚光器网架结构。例如在 $f=6000$ mm 和 $K=6$ 条件下,优化的非成像碟式聚光器的抛物母线的最大旋转角度只有 11.530 mrad,即抛物母线的外端点产生的偏移小于 13 mm,这完全可通过连接螺栓支撑解决。针对反射镜面的制造成本,抛物反射镜面和提出的非成像反射镜面均是非球面和非几何平面,它们仅在母线处有一个旋转角度的差异,制造难度均是相当的。

另一方面,在工程应用上,选择具有较小焦距 f 和较小等分数量 K 的碟式聚光器是更有利的。原因如下:减小焦距 f ,也就意味着缩短了接收器与聚光器的空间距离,这样能减小用于固定接收器的支撑桁架的长度,从而有利于缓解支撑桁架的变形,减少对光学性能的影响;减小等分数量 K 可以减少镜面制造的模具数量,从而降低制造成本,因为每一环反射镜面都需要配置一套模具用于生产。因此,在 $f=6000$ mm 和 $K=6$ 条件下优化得到的非成像碟式聚光器是最佳的,非均匀因子可降低到 0.20 ,峰值聚光比也只有 1722.93 ,可用于金属盘管接收器的聚焦能量分布研究。

由于金属盘管壁面的聚焦能流分布模拟非常复杂,本文开发的光线跟踪程序暂时还不具备解决上述复杂问题的能力,因此采用功能强大的光学模拟软件 OptisWorks 解决上述问题,具体光学模拟流程详见前期工作^[20]。图 11 是在 OptisWorks 光学软件中建立的碟式聚光系统的光学模型,接收器位于抛物碟式聚光器的焦平面,金属管直径为 10 mm,表面吸收率为 93% 且为漫反射,同样考虑太阳入射光锥角 (4.65 mrad) 的影响,其他光学参数与表 1 相同。采用抛物碟式聚光器和优化的非成像碟式聚光器 ($f=6000$ mm 和 $K=6$ 条件) 得到的模拟结果如图 12 所示,可以看到,非成像碟式聚光器使太阳辐射能量充满整个目标区域,金属管表面的能流均匀性得到显著改善,能流密度峰值由 2.72×10^7 W/m² 降低到 2.20×10^6 W/m²,有效避免了局部高温烧蚀问题。后续将在本文优化结果的基础上,深入研究光-热转换和接收器温度分布特性,为安全高效的太阳能光热利用系统的设计与应用提供参考。

5 结 论

提出的抛物碟式聚光器镜面重新布置改进方法(包括镜面平移策略和镜面旋转策略)和设计的新型非成像碟式聚光器均可显著改善平面接收器的能流

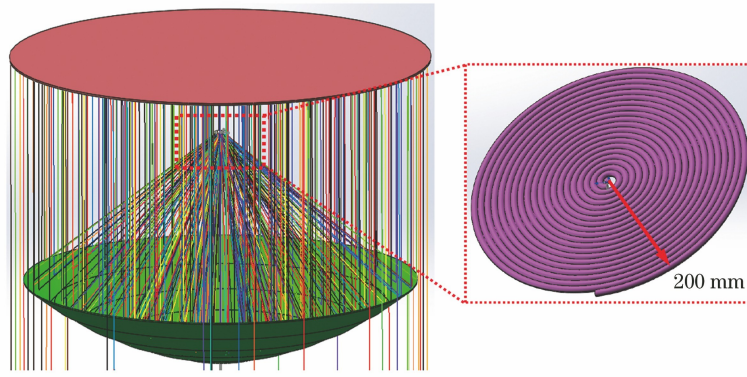


图 11 基于 OptisWorks 的非成像碟式聚光系统光学模型

Fig. 11 Optical model of non-imaging dish system based on OptisWorks software

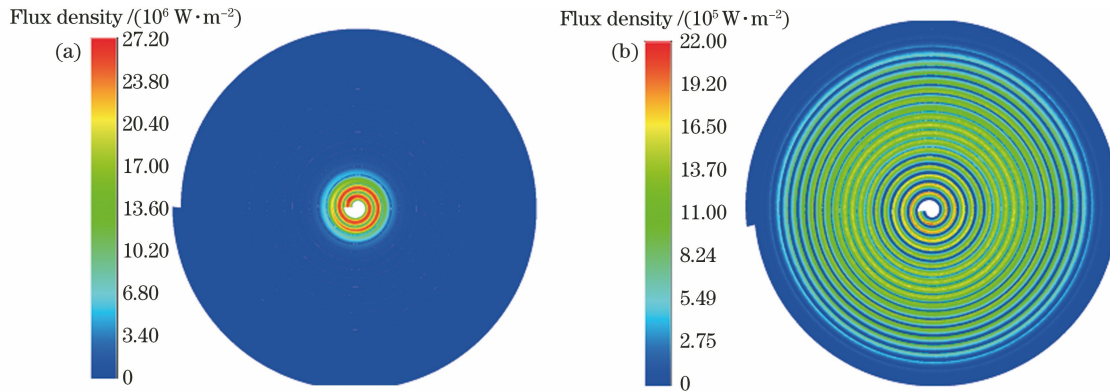


图 12 不同聚光器下金属盘管接收器的能流密度分布。(a)采用抛物碟式聚光器;(b)采用优化的非成像碟式聚光器

Fig. 12 Flux density distributions of metal coil receiver under different concentrators. (a) With parabolic dish concentrator; (b) with optimized non-imaging dish concentrator

均匀性,降低峰值能流密度。聚光器优化设计方法能使预定的目标接收区域获得优异的能流均匀性,且90%以上太阳辐射能量聚集于此区域。在均匀化效果上,非成像碟式聚光器、镜面平移策略改进的抛物碟式聚光器、镜面旋转策略改进的抛物碟式聚光器依次减弱。非成像碟式聚光器能将非均匀因子从3.62~4.22减小到0.18~0.25,峰值聚光比从24737~37245降低到1722~2055。考虑实际制造成本,在 $f=6000\text{ mm}$ 和 $K=6$ 条件下优化的非成像碟式聚光器是最佳的,其平面接收器的非均匀因子为0.20,峰值聚光比仅有1722.93,可将金属盘管接收器的峰值能流密度从 $2.72 \times 10^7\text{ W/m}^2$ 降低到 $2.20 \times 10^6\text{ W/m}^2$,有效避免了局部高温烧蚀问题。

参 考 文 献

[1] Guney M S. Solar power and application methods [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 776-785.
 [2] Hafez A Z, Soliman A, El-Metwally K A, et al. Design analysis factors and specifications of solar dish

technologies for different systems and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 1019-1036.

[3] Coventry J, Andraka C. Dish systems for CSP [J]. Solar Energy, 2017, 152: 140-170.
 [4] Daneshazarian R, Cuce E, Cuce P M, et al. Concentrating photovoltaic thermal (CPVT) collectors and systems: theory, performance assessment and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 473-492.
 [5] 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.
 [6] He Y L, Wang K, Du B C, et al. Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: a review [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(30): 3208-3237.

- 何雅玲, 王坤, 杜保存, 等. 聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(30): 3208-3237.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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] 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.
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.
- [11] Xia X L, Dai G L, Sun C. Numerical simulation on concentrating solar characteristic of multi-dish collector[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(9): 1524-1528.
夏新林, 戴贵龙, 孙创. 多碟聚光器聚集太阳能热流分布特性研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(9): 1524-1528.
- [12] 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.
- [13] Giannuzzi A, Diolaiti E, Lombini M, et al. Enhancing the efficiency of solar concentrators by controlled optical aberrations: method and photovoltaic application[J]. Applied Energy, 2015, 145: 211-222.
- [14] Zhou Z, Cheng Q, Li P P, et al. Non-imaging concentrating reflectors designed for solar concentration systems[J]. Solar Energy, 2014, 103: 494-501.
- [15] Meng X L, Xia X L, Dai G L, et al. A vector based freeform approach for reflecting concentrator of solar energy[J]. Solar Energy, 2017, 153: 691-699.
- [16] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R, et al. Correlative characteristics between focal spot of solar dish concentrator mirror unit and posture error [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1122003.
颜健, 彭佑多, 程自然, 等. 碟式聚光器镜面单元聚焦光斑与位姿误差的关联特性[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1122003.
- [17] 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.
- [18] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R. Mirror rearrangement optimization for uniform flux distribution on the cavity receiver of solar parabolic dish concentrator system [J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(11): 3588-3614.
- [19] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R, et al. Solar concentrator mirror unit supporting-adjusting structure and posture alignment [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0522001.
颜健, 彭佑多, 程自然, 等. 太阳能聚光器镜面单元的支撑-调节结构和位姿校准[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0522001.
- [20] Yan J, Cheng Z R, Peng Y D. Effects of geometrical parameters of a dish concentrator on the optical performance of a cavity receiver in a solar dish-stirling system [J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(6): 2152-2168.