

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

颜健*, 聂笃忠, 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 利用光学凹面透镜中功能曲面对太阳光线传输的重新分配能力, 提出在腔体接收器前端安装凹型石英窗(凹透镜)以改善能流均匀性。为此, 采用一种联合光线跟踪方法和遗传算法的优化设计方法优化凹透镜的几何尺寸和安装位置, 改善碟式系统的能流均匀性。对于 4 种典型的二次曲面和三种曲面布置方式组合的 12 种凹透镜, 详细分析凹透镜改善碟式系统能流均匀性的有益效果和特点, 并验证所提方法的有效性。结果表明, 在碟式系统中增加优化的凹透镜不仅能够显著改善腔体接收器的能流均匀性以及降低局部能流的峰值, 还能够获得优异的光学效率和直接有用能率, 优化的双圆锥透镜可将非均匀因子从 0.59 显著减小到 0.11。

关键词 光学设计; 太阳能碟式聚光系统; 能流均匀化; 凹型石英窗; 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/AOS202141.1022001

Optimal Design of Concave Lens for Flux Homogenization of Solar Dish/Cavity Collector System

Yan Jian*, Nie Duzhong, Tian Yong, Liu Yongxiang, Peng Youduo

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

Abstract A concave quartz window (concave lens) is installed at the front end of a cavity receiver to improve the uniformity of energy flow and gain advantage of the redistribution ability of the functional curved surface of an optical concave lens to the transmission of solar light. A combined ray-tracing method and genetic algorithm optimization design method are used to optimize the geometric size and installation position of the concave lens and improve the uniformity of the energy flow of the dish system. Twelve types of concave lenses are combined with four distinct quadric surfaces and three curved surfaces. The benefits and characteristics of concave lenses in improving the uniformity of energy flow of the dish system are analyzed in detail, and the effectiveness of the proposed method is verified. The results show that adding an optimized concave lens to the dish system can significantly improve the energy flow uniformity of the cavity receiver, reduce the local energy flow peak, and obtain excellent optical and energy efficiency. The optimized double cone lens shows a significant reduction of the non-uniformity factor from 0.59 to 0.11.

Key words optical design; solar dish concentrator system; flux homogenization; concave quartz window; optical performance; ray tracing method

OCIS codes 220.2740; 350.6050; 350.4600

1 引言

太阳能是清洁环保、供应充足和分布广泛的可

再生能源之一, 开发和利用太阳能资源是解决化石能源短缺和环境污染问题的有效途径之一。抛物碟式太阳能聚光系统具有高聚光比和高光学效率的优

收稿日期: 2020-11-06; 修回日期: 2020-12-03; 录用日期: 2020-12-15

基金项目: 湖南省自然科学基金(2020JJ5189, 2019JJ40085)、湖南省教育厅项目(19C0794)

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

点,是高品质太阳能光热发电系统所利用的重要基础装置之一,如碟式斯特林太阳能热发电系统^[1-2]。在太阳能发电系统中,通常采用腔体接收器(吸热器安装在腔体内侧)来接收聚光器所聚集的高密度太阳光能,并将太阳光能转换为具有流体工质的热能,热能通过热机后输出为电能。抛物碟式聚光器是一个典型的点聚焦光学装置,其会在吸热器的表面形成极不均匀且具有高峰值的太阳辐射能流分布^[1]。太阳辐射能流分布不仅会降低腔体接收器的工作效率和可靠性,更为严重的还会使吸热器产生高温热斑或较大的温度梯度,最终导致显著的热应力和热变形,从而影响接收器的安全性和工作寿命^[3]。然而非均匀能流分布会给太阳能碟式/腔体接收器(SDC)系统的安全高效运行带来更严峻的挑战,为此提升 SDC 系统的能流均匀性尤为重要^[4-5]。

近年来,一些学者关注了 SDC 系统聚焦辐射能流分布均匀化的问题,从设计新型接收器和新型碟式聚光器等方面提出了若干个解决措施。Shuai 等^[6]采用蒙特卡洛光线跟踪方法研究了 SDC 系统中圆柱型、球型和圆锥型等 6 种常规腔体接收器的非均匀能流分布特征,并提出了一种具有均匀能流分布的新颖倒置梨型腔接收器。在新型碟式聚光器方面,主要有多平面镜所组成的聚光器^[7-8]、多个点聚焦镜面所组成的聚光器^[9]和新型反射镜曲面的聚光器^[10-14]。虽然在上述方面的研究颇为丰富,但大部分集中在简单的平面或管状接收器,对实现腔体接收器能流均匀化的研究较少。由于太阳光在腔体接收器内会被多次反射和吸收,则采用上述方法对腔体接收器能流均匀化的效果和适用性需进一步研究。本课题组先前提出了基于抛物碟式聚光器的一类改进设计方法(对各镜面单元进行重新优化布置)和一种非成像碟式聚光器(新型母线),理论研究结果表明新型聚光器能够有效改善腔体接收器和平面接收器的能流均匀性^[11-13]。总体而言,采用新型聚光器改善能流均匀性的具体实施过程中,需要开模具制造新型曲面镜或高精度地调整大量反射镜面单元,但这均会导致 SDC 系统的生产周期和建造成本大幅度增加。

事实上,实现 SDC 系统能流均匀化的本质是合理调控聚光器聚焦太阳光线的传输轨迹,使其均匀投射到吸热器表面并被吸收。然而光学曲面透镜就具有改变光线传输轨迹的能力,在腔体接收器前端安装凹型石英透镜以改善 SDC 系统的能流均匀性是一项有趣的尝试。在太阳能聚光集热利用领域,

通过在腔体接收器前端安装平面或曲面型石英窗来降低热损失,这是众所周知的现有手段之一,而且已被广泛应用^[5,14-15],但将石英窗作为光学元件并用于改善腔体接收器能流均匀性的系统研究较少,只有些初步的研究^[15-17]。例如 Shuai 等^[15]研究了带平凸透镜的 SDC 系统中半球型腔体接收器的能流分布特性,发现平凸透镜具有改善能流均匀性的有益效果,但并未对此均匀化问题进行专门深入的研究。本课题组先前采用 OptisWorks 光学软件初步探讨了凹透镜几何参数对 SDC 系统能流分布的影响,获得了一定的均匀化效果^[17]。

由于未系统建立透镜参数的优化模型,所以提升能流均匀性的效果还有待进一步探究。鉴于此,本文基于石英凹面透镜的功能曲面对光线传输的调控能力,建立一套联合光线跟踪方法和遗传算法的优化设计方法,用来优化凹透镜的几何尺寸和安装位置,从而改善 SDC 系统的能流均匀性。详细分析凹透镜改善 SDC 系统(采用典型的圆柱腔体接收器)能流均匀性的有益效果和特点,验证所提方法的有效性,充分挖掘石英窗在太阳能聚光集热利用领域的额外潜在价值。

2 物理模型

2.1 带凹透镜的太阳能碟式系统

带凹透镜的太阳能碟式接收器如图 1 所示,其中 p 为抛物反射镜面上的一点, N_p 为点 p 的法线矢量, I 为太阳入射光锥中任意光线矢量, H_c 为接收器的总高度, h 为接收器中非均匀优化区域的高度, S 为太阳入射光锥的中心光线矢量, σ_{absorber} 为吸热器表面的吸收率, ρ_{wall} 为接收器的反射率, R_{ca} 为圆柱接收器的半径, F 为聚光器的焦点, A 为凹形曲面的顶点, d_1 为凹透镜与碟式聚光器点 F 的距离。从图 1(a) 可以看到,太阳能碟式接收器由焦距为 f 的抛物碟式聚光器、圆柱腔体接收器和凹透镜组成,其中凹透镜固定在腔体接收器的前端,与碟式聚光器焦点 F 的距离为 d_1 。从图 1(b) 可以看到,腔体接收器的圆柱体侧面是安装吸热体的区域,称为吸热器表面,其吸收率为 σ_{absorber} ,腔体接收器的底面是普通壁面,其反射率为 ρ_{wall} 。吸热器表面中的区域 $z_1 \in [h, H_c]$ 是能流均匀化的目标区域,因为在产生光学拦截损失的情况下,吸热器表面区域 $z_1 \in [0, h]$ 的能流密度通常是非常小的,如果将此区域也包含在能流均匀化的目标区域内是不合理的,这在本课题组先前研究中有详细分析^[11-12]。实

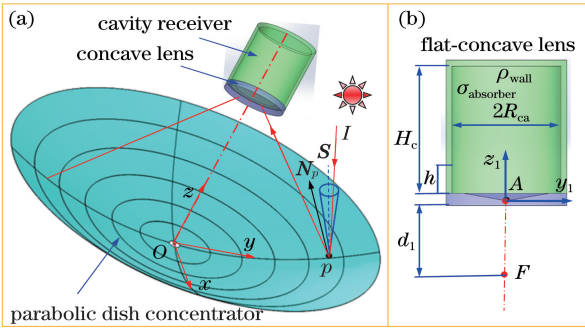


图 1 带凹透镜的太阳能碟式接收器。(a) 光线传输与几何参数；
(b) 带平-凹透镜的圆柱腔体接收器

Fig. 1 Solar dish receiver with concave lens. (a) Light transmission and geometric parameters;
(b) cylindrical cavity receiver with flat-concave lens

验研究 4 种典型的二次曲面和三种曲面布置方式组合的 $4 \times 3 = 12$ 种凹透镜, 其中凹型二次曲面包括圆锥曲面、抛物曲面、球曲面和椭球曲面对于透镜中凹型曲面的三种布置方式, 包含平-凹透镜、凹-平透镜和凹-凹透镜(双凹透镜)。例如, 平-凹透镜由一侧是平面, 另一侧是凹型曲面组成, 如图 1(b) 所示。通过联合光线跟踪方法和遗传算法来优化这些透镜的几何参数和安装位置(距离 d_1), 可以实现吸热器表面目标区域内能流密度分布的均匀化, 并能够获

得优异的光学效率。

为了避免聚光器聚集在透镜前端表面上的光斑尺寸过大而导致光学拦截损失, 可以先确定接收器与碟式聚光器焦平面之间的距离 d_1 的取值范围。设定理想光学下碟式聚光器在透镜表面上的最大聚焦光斑半径为 R_t , 且满足 $R_t < R_{ca}$, 用于避免实际运行过程中由光学误差造成聚焦光斑尺寸增大而导致光学拦截损失。确定距离 d_1 的取值范围的步骤如下。

1) 在 $O-yz$ 平面内对聚光器最外端的点 P 进行几何光学分析, 点 P 的位置矢量 $\mathbf{P} = [0 \ -R \ R^2/4f]$, 其中 R 为碟式聚光器的半径。

2) 根据镜面反射定律, 计算太阳入射光锥 ($\mathbf{S} = [0 \ 0 \ -1]$) 的两个边缘光线 $\mathbf{S}_1 = [0 \ \sin \delta \ -\cos \delta]$ 和 $\mathbf{S}_2 = [0 \ -\sin \delta \ -\cos \delta]$ 在点 P 处的反射光线, 其中 δ 为太阳入射光锥的半顶角, $\delta = 4.65 \text{ mrad}$ 。

3) 计算这两个反射光线与透镜前端平面(方程为 $z = f + d_1$) 的交点, 这些交点与点 F 的最大距离就是聚焦光斑的半径。

4) 当聚焦光斑的半径等于 R_t 时, 可以得到 d_1 的上下边界值, 即 $d_1 \in [d_{\min}, d_{\max}]$, $d_{\min} < 0$ 表示透镜沿 z 轴的负方向移动。

根据步骤 1)~4), d_{\max} 和 d_{\min} 的表达式分别为

$$d_{\max} = T_1 - \{(R + R_t)[\cos \delta - T_3(2T_3 \cdot \cos \delta - 2T_2 \cdot \sin \delta)]\} \div [\sin \delta + T_2(2T_3 \cdot \cos \delta - 2T_2 \cdot \sin \delta)] - f, \quad (1)$$

$$d_{\min} = f - T_1 - \{(R - R_t)[\cos \delta - T_3(2T_3 \cdot \cos \delta + 2T_2 \cdot \sin \delta)]\} \div [\sin \delta - T_2(2T_3 \cdot \cos \delta + 2T_2 \cdot \sin \delta)], \quad (2)$$

式中: T_1 、 T_2 和 T_3 均为中间变量, 即 $T_1 = R^2/(4f)$, $T_2 = R^2/\sqrt{R^2 + 4f^2}$, $T_3 = 2f/\sqrt{R^2 + 4f^2}$ 。因此, 在透镜参数的优化过程中, 设定 R_t 后就可以确定优化变量 d_1 的取值范围。

2.2 平-凹透镜的参数

平-凹透镜的几何参数如图 2 所示。平-凹透镜是指透镜面在聚光器的一侧为平面, 另外一侧为凹型曲面的透镜。凹型曲面包括圆锥曲面、抛物曲面、球曲面和椭球曲面, 分别简称为平面-圆锥透镜、平面-抛物透镜、平面-球面透镜和平面-椭球透镜。为了方便描述凹型曲面的几何参数, 一个局部坐标系 $A-x_1y_1z_1$ 被建立在这些凹型曲面的顶点 A 处, 且与全局坐标系 $O-xyz$ 平行。透镜的前端平面 1 的方程为 $z = -d_2$, 其中 d_2 为透镜中心的厚度, 实验设为 3.0 mm ; 透镜的后端平面 3 的方程为 $z = H_w - d_2$, 其中 H_w 为透镜的厚度, 也是腔体接收器

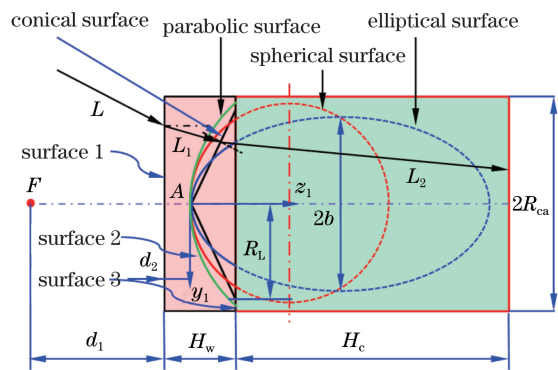


图 2 平-凹透镜的几何参数

Fig. 2 Geometric parameters of planar-concave lens 的接收窗与透镜中平面 1 的距离, 其为透镜的优化变量之一, 取值范围设为 $H_w \in [H_{\min}, H_{\max}]$ 。值得注意的是, 透镜中的平面 1 和平面 3 对聚光器聚集后的太阳光线重新分配的能力非常小, 而且很难改善吸热器表面的能流均匀性, 而凹型曲面 2 才是改

变太阳光线的传输方向,用于实现能流均匀化的主要功能表面。因此,可设定凹型曲面 2 的最小有效作用半径为 R_1 ,凹型曲面 2 被平面 3 所截取的圆环半径为 R_L ,且满足 $R_L \geq R_1$ 。基于此条件,可以为确定凹型曲面相关变量的取值范围提供依据,使透镜参数的优化更加节省时间。

平面-圆锥透镜中圆锥曲面 2 的方程为

$$z^2 = k^2(x^2 + y^2),$$

$$k \in \left(0, \frac{H_{\max} - d_2}{R_1}\right] \text{ and } z > 0, \quad (3)$$

式中: k 为圆锥曲面母线的斜率。

平面-抛物透镜中抛物曲面 2 的方程为

$$4f_1z = x^2 + y^2, f_1 \geq \frac{R_1^2}{4(H_{\max} - d_2)}, \quad (4)$$

式中: f_1 为抛物曲面的焦距。

平面-球面透镜中球面的方程为

$$x^2 + y^2 + (z - R_2)^2 = R_2^2, R_2 \geq H_{\max} - d_2 \text{ and}$$

$$R_1 \leq \sqrt{R_2^2 - (H_{\max} - d_2 - R_2)^2}, \quad (5)$$

式中: R_2 为球曲面 2 的半径。

平面-椭球面透镜中椭球曲面的方程为

$$\frac{x^2 + y^2}{b^2} + \frac{(z - a)^2}{a^2} = 1, a \geq H_{\max} - d_2 \text{ and}$$

$$R_1 \leq \sqrt{b^2 - \frac{(H_{\max} - d_2 - a)^2 b^2}{a^2}}, \quad (6)$$

式中: a 和 b 分别为椭球曲面中两个轴的半径。

2.3 凹-平透镜和双凹透镜的参数

凹-平透镜是指透镜面在聚光器的一侧为凹型曲面,另外一侧为平面的透镜,结构形式与几何参数如图 3 所示。双凹透镜的前、后表面均为凹型曲面,实验中设定前、后表面的曲面形式相同,但几何参数可以不同,如图 4 所示。例如双凹圆锥曲面透镜中两个圆锥曲面的母线斜率分别为 k_1 和 k_2 ,均为优化变量。考虑到凹-平透镜和双凹透镜中的凹型曲面方程均与平-凹透镜相同,这里不再重复给出。同样为了满足凹型曲面的最小有效作用半径达到 R_1 ,

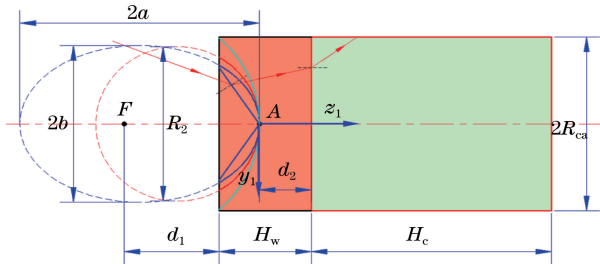


图 3 凹-平透镜的几何参数

Fig. 3 Geometric parameters of concave-planar lens

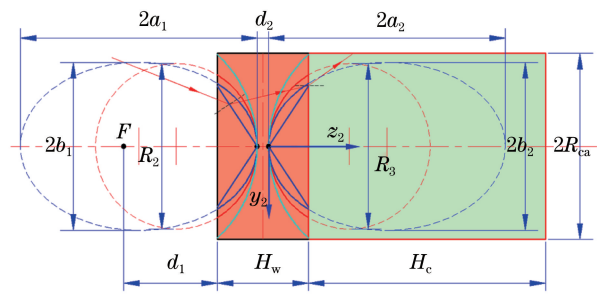


图 4 双凹透镜的几何参数

Fig. 4 Geometric parameters of concave-concave lens

在优化过程中各凹型曲面的参数取值范围与平-凹透镜相同。

3 光学分析与优化模型

光学分析与优化模型是基于以下条件假设的:

- 1) SDC 系统没有任何光学误差,即未包含镜面斜率误差、安装误差和跟踪误差等;
- 2) 太阳光线在腔体接收器内的传输过程符合镜面反射定律;
- 3) 透镜对不同光线的折射率均相同,即不考虑色散的问题。因为太阳光线经过透镜折射后传输很短距离就会与腔体接收器的内表面相交,而这么短的传输距离是不会引起明显的色散,所以色散对能流分布的影响非常小,这在第 4 节光学模型验证中得到证实。

3.1 包含透镜的理想光学模型

基于第 3 节假设,则太阳能碟式接收器关于焦轴(z 轴)旋转对称,于是可以充分利用该轴对称的特征,采用运动累加光线跟踪方法^[18]来建立碟式接收器的光学模型,从而实现快速的光学模拟,进而减少整个优化耗时。碟式接收器的聚光过程涉及太阳光线在聚光器镜面的反射、光线在透镜表面和内部的传输和吸收以及光线在腔体接收器内的传输和吸收。本课题组在先前已发表的论文中已详细推导了未包含透镜的碟式接收器的光学建模过程^[18],为此本文将在此光学模型的基础上增加凹型透镜对光线传输的作用,完善光学模型后用于本文碟式系统的快速光学模拟。下面仅推导碟式聚光器聚集的太阳光线经过透镜后的传递过程,包括在透镜入射表面的反射/折射、内部的吸收以及出射表面的反射/折射三个环节,最终使光线到达圆柱腔体接收器内部。

本文仅以平-凹透镜为例对光线传输的相关主要公式进行推导和描述,其他透镜可以参照如下步骤进行光学建模。从图 2(a)可以看到,设聚光器镜面上反射光线 L 的单位方向矢量为 N_L ,光线 L 携带的能量为 E_L 。首先,光线 L 与平-凹透镜的平面 1

(方程为 $z = -d_2$) 相交于点 C 。根据折射定律可确定折射光线 L_1 的单位方向矢量 \mathbf{N}_{L_1} 满足

$$n_1 \cdot \mathbf{N}_{L_1} = n \cdot \mathbf{N}_L + o \cdot \mathbf{N}_C, \quad (7)$$

式中: n_1 为折射光线所在介质的折射率, 此处光线是从空气传输到透镜中, 所以 n_1 是透镜的折射率; n 为入射光线所在介质的折射率, 此处为空气的折射率, 则 $n = 1$; \mathbf{N}_C 为平面 1 上点 C 的法线矢量, $\mathbf{N}_C = [0 \ 0 \ 1]$; $o = \sqrt{n_1^2 - n^2 + n^2 \cos^2 I_{C1}} - n \cos I_{C1}$, 其中 I_{C1} 为光线 L 的入射角, 即入射光线矢量 \mathbf{N}_L 与法线矢量 \mathbf{N}_C 所夹的锐角, 满足 $\mathbf{N}_L \cdot \mathbf{N}_C = |\mathbf{N}_L| \cdot |\mathbf{N}_C| \cdot \cos I_{C1}$ 。

太阳光线 L 在透镜表面 1 上既有折射也有反射, 且反射光线被返回到环境中会导致光学损失。根据菲涅耳公式可以确定入射光、反射光和折射光的能量关系, 折射光与入射光的能量之比定义为透射比。太阳光线 L 通过透镜表面 1 的透射比 τ_C 可以表示为

$$\tau_C = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(I_{C1} - I_{C2})}{\sin^2(I_{C1} + I_{C2})} + \frac{\tan^2(I_{C1} - I_{C2})}{\tan^2(I_{C1} + I_{C2})} \right], \quad (8)$$

式中: I_{C2} 为折射角, 根据折射定律满足 $n \sin I_{C1} = n_1 \sin I_{C2}$ 。

当碟式聚光器聚集的太阳光线入射到透镜表面时具有不同的入射角, 所以各光线经过透镜表面 1 后的透射比也均不相同。当入射角非常小或接近 0 (即垂直入射) 时, (8) 式可改写为

$$\tau_C = 1 - \left(\frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right)^2. \quad (9)$$

太阳能光热所利用的主要光谱范围为 $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$, 其已包含了整个太阳光能量的 97%。石英材料由于在此谱段具有很好的透过率, 为此成为太阳能腔体接收器窗口的首选材料^[4,15]。凹型石英透镜在 $0.3 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 之间的折射率 n_1 为 1.42, 在 $2.6 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 之间的折射率为 1.45^[15]。由(9)式可知, 即使入射光线均垂直于透镜前表面 1, 其光学反射损失率也会达到 4.0%, 再考虑光线从透镜后表面折射到腔体接收器内部约有 4% 的反射损失, 则太阳光线通过石英窗后 (无论是凹型透镜还是平面透镜) 至少会产生约为 8% 的光学损失。当然, 为了降低透镜表面的光学反射损失, 在透镜前表面 1 上镀一层减反射膜 (也称为增透膜) 是一种有效措施, 但这已超出本文的研究范围, 本文设定透镜上没有增透膜。

其次, 计算光线 L_1 与平-凹透镜中曲面 2 的有

效交点 D ; 再根据折射定律计算光线 L_1 在曲面 2 上点 D 的透射比 τ_D 和折射光线 L_2 的方向矢量。需要注意的是, 此时光线 L_1 是从光密介质 (石英透镜) 传输到空气中, 在曲面 2 上可能会发生全反射。发生全反射的临界角 β 满足 $\sin \beta = n/n'$ 。当光线 L_1 的入射角大于临界角 β 时发生全反射, 则采用镜面反射定律计算反射光线矢量; 如果未发生全反射, 则根据(7)式和(8)式计算折射光线 L_2 的折射矢量和透射比 τ_D 。此时, 光线 L_2 携带的太阳辐射能量 E_{L_2} 可表示为

$$E_{L_2} = E_L \cdot \tau_C \cdot \tau_D \cdot \exp(-k_3 l), \quad (10)$$

式中: $\exp(-k_3 l)$ 为用于描述石英透镜材料对光线能量的透射能力; $\exp(-k_3)$ 为太阳光透过单位厚度为 1 cm 石英介质后的出射光线能量与入射光线能量之比, 通常称为介质的透明率, 在本文中 k_3 设为 $0.014^{[15-16]}$; l 为太阳光线在透镜内部的传输距离, 单位为 cm。

然后, 再计算光线 L_2 在腔体接收器内部的传输和吸收过程, 这部分的光学建模可详见文献[18]。最终, 通过计算聚光器所有反射光线在透镜和腔体接收器的传输率和吸收率, 可以得到腔体接收器的光学效率和吸热器表面能流密度分布等结果。

3.2 光学性能指标

众所周知, 吸热器表面接收的太阳辐射能量越多就越有利于太阳能转换为具有换热工质的热能, 本文将这部分能量称为直接有用能 E_{absorber} , 并定义直接有用能与聚光器接收的总太阳辐射能量 E_{total} 之比为直接有用能比率 $\eta_{\text{absorber}}^{[11-12]}$ 。其中 $E_{\text{total}} = \pi(R^2 - R_{\text{ca}}^2) \cdot W_0$, 其考虑了腔体接收器对聚光器的遮挡面积 πR_{ca}^2 , W_0 为太阳直射辐照的强度, 单位为 W/m^2 。SDC 系统的总光学效率 η_{SDC} , 其为腔体接收器内部所有表面吸收的太阳辐射能量 E_{cavity} 与 E_{total} 的比值。吸热器表面的目标区域 $z_F \in [h, H]$ 的能流密度分布的非均匀因子 f_{non} 可以写为

$$f_{\text{non}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_t} (C_i - C_{\text{average}})^2 / (N_t - 1)}}{C_{\text{average}}}, \quad (11)$$

式中: N_t 为吸热器表面目标区域内离散网格的数量; C_i 为目标网格单元 i 的局部聚光比 (LCR), $C_i = E_i / (A_i W_0)$, E_i 和 A_i 分别为目标网格单元 i 吸收的太阳辐射能量和表面积; C_{average} 为目标区域

局部聚光比的平均值, $C_{\text{average}} = \sum_{i=1}^{N_t} C_i / N_t$ 。

3.3 面向能流均匀化的透镜优化问题

本文通过联合光线跟踪方法和遗传算法来优化凹透镜的几何参数和安装位置,用于改善碟式接收器系统中吸热器表面目标区域内能流密度分布的均匀性,同时希望吸热器表面能够接收更多的太阳辐射能量,则优化目标是非均匀因子 f_{non} 值越小且直接有用能比率 η_{absorber} 值越大,本质上是一个双目标优化的问题。但为了减少优化耗时和问题的复杂度,本文将直接有用能比率 η_{absorber} 作为一个约束条件,从而转换为最小化非均匀因子 f_{non} 的单目标优化问题,其可以描述为

$$\min F(\mathbf{X}) = f_{\text{non}}, \text{ s. t. } \eta_{\text{absorber}} > \eta_{\text{min}},$$

$$\mathbf{X} \in [\mathbf{X}_{\text{min}}, \mathbf{X}_{\text{max}}], \quad (12)$$

式中: \mathbf{X} 为优化变量矩阵,包括离焦距离 d_1 、透镜的厚度 H_w 和透镜中曲面的参数(圆锥曲面的斜率和抛物曲面的焦距等); η_{min} 为设定的最小直接有用能比率; \mathbf{X}_{min} 和 \mathbf{X}_{max} 分别为优化变量矩阵 \mathbf{X} 的上下区间矩阵,透镜几何优化的参数设定见第 5 节。平面-圆锥透镜或圆锥-平面透镜的优化变量矩阵 $\mathbf{X} = [d_1 \ H_w \ k]$, 圆锥-圆锥双凹透镜的优化变量矩阵 $\mathbf{X} = [d_1 \ H_w \ k_1 \ k_2]$ 。遗传算法的详细计算流程可在文献[12-13]中找到,本文不再阐述。优化过程中,种群的大小设为 40,最大进化代数设为 100,交叉率设为 0.92,变异率设为 0.10。

4 光学模型与自编程程序代码验证

基于上述建立的碟式接收器光学模型,在 Visual

C++ 6.0 软件中编制了相应的光学模拟代码。为了验证光学模型和自编光学模拟代码的正确性,采用光学模拟软件 OptisWorks 2012 进行对比验证。这是因为现有文献很少关注曲面透镜对带圆柱腔体接收器中碟式系统光学性能的影响,也缺少相关实验数据。采用带平-凹圆锥透镜和双凹圆锥透镜的碟式接收器系统进行对比验证,其中两种透镜的几何参数如表 1 所示,碟式聚光器和圆柱腔体接收器的光学参数如表 2 所示。吸热器表面的局部聚光比分布结果如图 5 所示。从图 5 可以看到,采用本文自编光学跟踪代码的模拟结果与 OptisWorks 2012 软件的结果非常吻合(折射率为 1.42,吸热器表面的吸收率为 100%),带平-凹圆锥透镜和双凹透镜 LCR 的平均相对误差分别只有 3.90% 和 1.13%,这是非常小的,从而验证了光学模型和自编光学模拟代码的正确性,可用于后续的光学分析。同时,从图 5 也初步看到凹型透镜对能流分布均匀性的改善作用,即沿吸热器高度 75~225 mm 区域内的能流均匀性被提升。采用厚度为 25 mm 的平面透镜(离焦距离 $d_1=0$)并未改善吸热器表面的能流分布均匀性,此模型将用于后续研究的对比,以此反映凹型透镜参数优化所带来的能流均匀化等有益效果。

另外,本文讨论了透镜折射率和吸热器表面吸收率对 LCR 分布和光性能指标的影响,用于验证透镜几何参数优化相关假设的正确性。从图 5 可以看到,当平-凹圆锥透镜的折射率由 1.42 变为 1.45 时,LCR 值在 100~200 mm 之间有轻微减小,其他

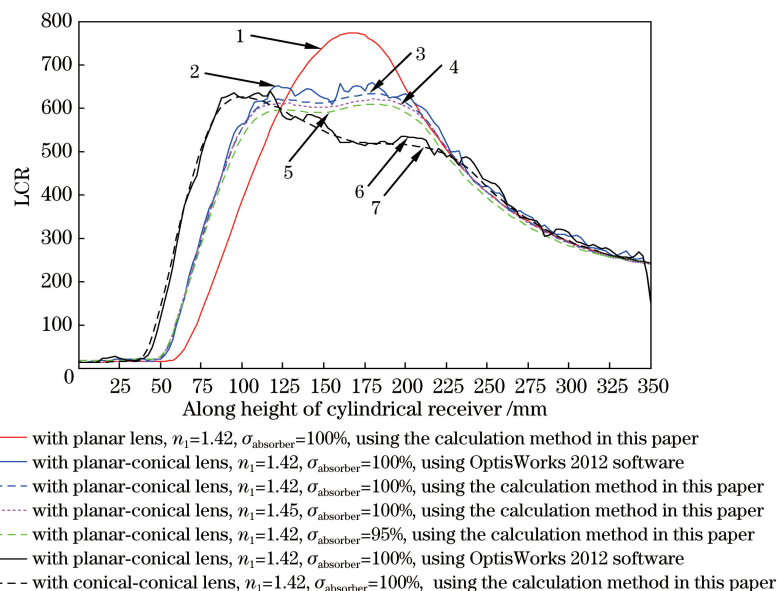


图 5 本文方法和 OptisWorks 2012 软件模拟结果的对比

Fig. 5 Comparison of simulation results between proposed method and OptisWorks 2012 software

表 1 光学模型验证过程中凹面透镜的相关参数
Table 1 Relevant parameters of concave lens in process of optical model verification

Type of lens	Geometric parameter				
	d_1/mm	d_2/mm	H_w/mm	k_1	k_2
Planar-conical lens	0	15.50	25.00	—	0.088
Conical-conical lens	0	3.00	25.00	0.088	0.088

表 2 SDC 系统的几何参数和光学参数
Table 2 Geometric and optical parameters of SDC system

Parameter	Value
Aperture radius of dish concentrator (R) /m	7
Focal length of dish concentrator (f) /m	8.45
Reflectivity of dish concentrator mirror (ρ_{mirror})	0.93
Height of cavity receiver (H_c) /mm	350
Radius of cavity receiver (R_{ca}) /mm	140
Absorptivity of absorber surface (σ_{absorber})	1
Reflectivity of ordinary surface (ρ_{wall})	0.6
Central thickness of lens (d_2) /mm	3.0
Target area of absorber surface (z_F) /mm	[30,350]

区域基本不变;当透镜折射率为 1.42 时,直接有用能率为 75.15%,总光学效率为 81.78%,非均匀因子为 0.4947;当透镜折射率为 1.45 时,直接有用能率为 74.55%,总光学效率为 81.14%,非均匀因子为 0.489。相应性能指标的数值变化非常小,这说明太阳光采用单色光谱(固定折射率为 1.42)的假设是合理的,即不考虑色散的问题。

对于带平-凹圆锥透镜(折射率 $n=1.42$)的碟式系统,当吸热器表面的吸收率分别设为理想的 100%和典型应用中的 95%^[12]时,后者的 LCR 值在 100~225 mm 之间有微小的减小。其他光学性能指标如下:当吸收率为 100%时,直接有用能率为 75.15%,总光学效率为 81.78%,非均匀因子为 0.4947;当吸收率为 95%时,直接有用能率为 72.88%,总光学效率为 80.85%,非均匀因子为 0.4855;两者相对误差分别为 3.0%、1.1%和 1.8%,这是非常小的,说明在透镜优化的过程中,假定吸热器表面的吸收率为 100%是合理的,这样可以减少光线入射到腔体接收器内部后的反射次数,从而减少优化过程中光学模拟的耗时。因此,透镜参数的优化过程中,透镜的折射率固定为 1.42,吸热器表面的吸收率固定为 100%。

5 优化结果与分析

本节优化 12 种凹面透镜(4 种典型的二次功能

曲面和三种曲面布置的组合)的几何参数,用来改善吸热器表面目标区域的能流均匀性,并对带优化的凹面透镜和平面石英窗的 SDC 系统的能流分布和光学性能指标,展示凹面透镜改善能流均匀性的有益效果和特点,对比确定最佳的透镜类型。SDC 系统的几何和光学参数如表 2 所示,与先前文献[11-12]相同,这可以方便对比不同解决途径实现能流均匀化的效果和益处。透镜优化过程中的一些变量取值如下:作为约束值的最小直接有用能比率 η_{min} 设为 70.00%,透镜中心厚度 d_2 为 3.00 mm,透镜表面 1 上最大聚焦光斑的半径 $R_1=115$ mm,根据(1)式和(2)式确定的离焦距离 d_1 在 -50.00~50.00 mm 之间,透镜厚度 H_w 在 10.00~50.00 mm 之间,因为值过小无法保证凹曲面的作用半径,取值过大会使介质的吸收光能增加。聚光器在焦平面的理想聚焦光斑半径为 65.4 mm,凹型曲面的最小有效作用半径 $R_1=55$ mm,结合(3)~(6)式设置透镜中凹型功能曲面的几何参数取值范围如下:圆锥曲面的母线斜率在 0.02~1.00 之间,抛物曲面的焦距在 50.00~360.00 mm 之间,球型曲面的半径在 50.00~360.00 mm 之间,椭圆曲面的长轴和短轴的半径均在 50.00~360.00 mm 之间。

5.1 带平-凹透镜的 SDC 系统

图 6 为平-凹透镜优化后 SDC 系统中吸热器表面的 LCR 分布和光学性能指标。从图 6 可以看到,4 种优化的平-凹透镜均能有效提升能流均匀性并降低 LCR 的峰值,而且还能保持较优异的光学效率和直接有用能率。未带平-凹透镜的几何优化结果如表 3 所示,其中 \mathbf{X} 中前两个数值分别为 d_1 和 H_w ,后面为二次曲面特征参数。从 LCR 分布和表 3 的光学性能数据来看,带抛物曲面、球面和椭球曲面的平-凹透镜优化后,指标基本相近,但平面-圆锥透镜更优异。例如,优化的平面-圆锥透镜可以将非均匀因子从 0.59 显著减小到 0.20,而直接有用能率和总光学效率分别达到了 74.14%和 80.57%,与带平面石英窗的 SDC 系统相比分别只降低了 0.24 个百分点和 0.55 个百分点,该结果是非常优异的。对于需要增加石英窗的腔体接收器而言(例如容积式接收器需增加石英窗来实现密封^[16],常规腔体接收器增加石英窗可降低热损失^[15]),采用本文方法优化的凹面透镜不仅能够满足上述基本功能,还具备改善吸热器表面能流均匀性和降低峰值 LCR 的额外有益效果,从而提升吸热器的工作寿命和可靠性,这扩大了石英窗的应用价值。

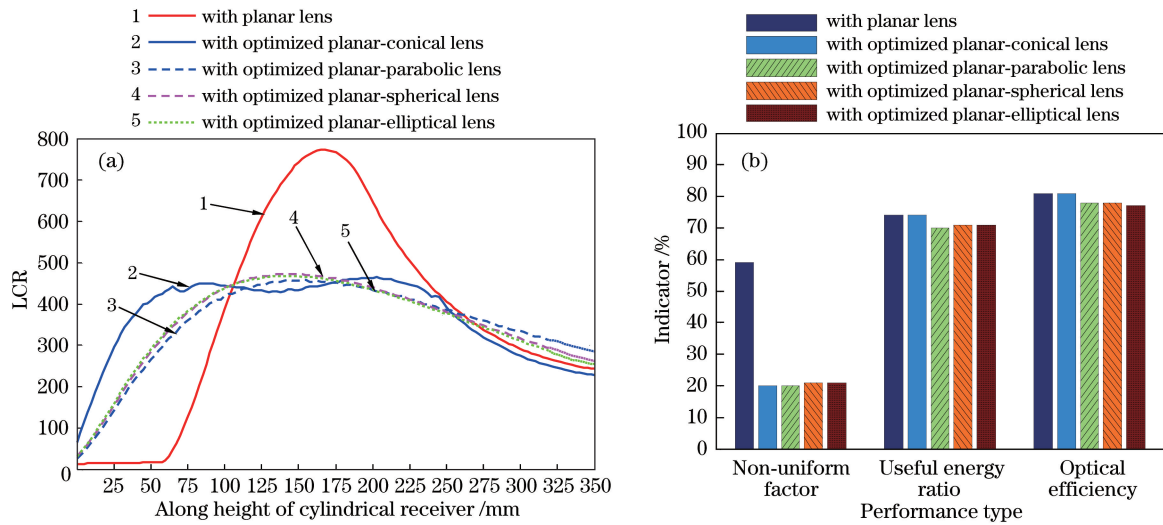


图 6 带优化平面-凹型透镜的 SDC 系统的性能结果。(a)吸热器表面 LCR 分布;(b)光学性能指标

Fig. 6 Performance results of SDC system with optimized plane-concave lens.

(a) LCR distribution on surface of heat absorber; (b) optical performance indicators

表 3 带平面-凹型透镜的 SDC 系统的优化结果

Table 3 Optimization results of SDC system with planar-concave lens

Type of lens	Optimization result			
	Geometric parameter of lens	Non-uniform factor	Useful energy ratio / %	Optical efficiency / %
Planar lens	$d_1 = 0 \text{ mm}, H_w = 25.0 \text{ mm}$	0.59	74.32	81.02
Planar-conical lens	$\mathbf{X} = [-6.76 \quad 50.00 \quad 0.27]$	0.20	74.14	80.57
Planar-parabolic lens	$\mathbf{X} = [-11.41 \quad 49.53 \quad 53.65]$	0.20	70.11	77.51
Planar-spherical lens	$\mathbf{X} = [-8.53 \quad 50.00 \quad 123.53]$	0.22	70.85	77.86
Planar-elliptical lens	$\mathbf{X} = [-7.35 \quad 50.00 \quad 312.94 \quad 191.76]$	0.21	70.41	77.27

从表 3 可以看到,透镜的厚度均接近或达到了优化设定的最大值,即 50.00 mm,这是因为增加透镜的厚度能够增大其二次功能曲面的作用区域,这样才能更好地发挥透镜重新分配光线以改善能流均匀性的能力。图 7 为平面-圆锥透镜在不同几何参数组合下 SDC 系统的光学性能分布。从图 7 可以看到,增加透镜厚度有利于降低非均匀因子,而光学效率和直接有用能率均变化较小。但需要注意的是,过大的透镜厚度会增加透镜介质对太阳光能的吸收,从而减小到达吸热器表面的能量。例如优化的平面-圆锥透镜的吸收能量达到了 2.16 kW,不过小于透镜前后表面的光学反射损失。另外,非均匀因子的极小值在一个椭圆等高线的中心,位于离焦距距离 $d_1 = 0$ 的附近(即焦平面附近),且在此区域还能获得较优异的光学效率和直接有用能率。平面-圆锥透镜的优化结果中 $d_1 = -6.76 \text{ mm}$ 和圆锥面母线的斜率为 0.27,与图 7 的极小值变化趋势吻合,说明了透镜优化方法的有效性。

5.2 带凹-平透镜的 SDC 系统

带优化的凹面-平面透镜的 SDC 系统的性能结果如图 8 所示,优化结果如表 4 所示。对比图 8 和图 6 可以看到,采用优化后的凹面-平面透镜的 SDC 系统的非均匀因子可从 0.59 减小到 0.30,但其能流分布改善效果比优化的平面-凹透镜差。从表 4 可以看到,对于光学效率和直接有用能率,某些情况下带优化的凹面-平面透镜的 SDC 系统高于带平面石英窗的 SDC 系统,带优化的抛物-平面透镜的直接有用能率和光学系数分别为 82.62% 和 75.74%,分别增加了 1.60 个百分点和 1.42 个百分点,这是因为透镜前表面的抛物曲面将聚光器聚集的太阳光线被重新分配,使更多的光线直接投射到高吸收率的吸热器表面上。这意味着,凹面-平面透镜不仅具有改善能流均匀性的效果,还能通过专门优化后来提升腔体接收器的光学效率,以此增加 SDC 系统的光-热转换效率,这与现在的增加平面石英窗来减小腔体接收器热损失的方法相比,又进一步发挥了腔

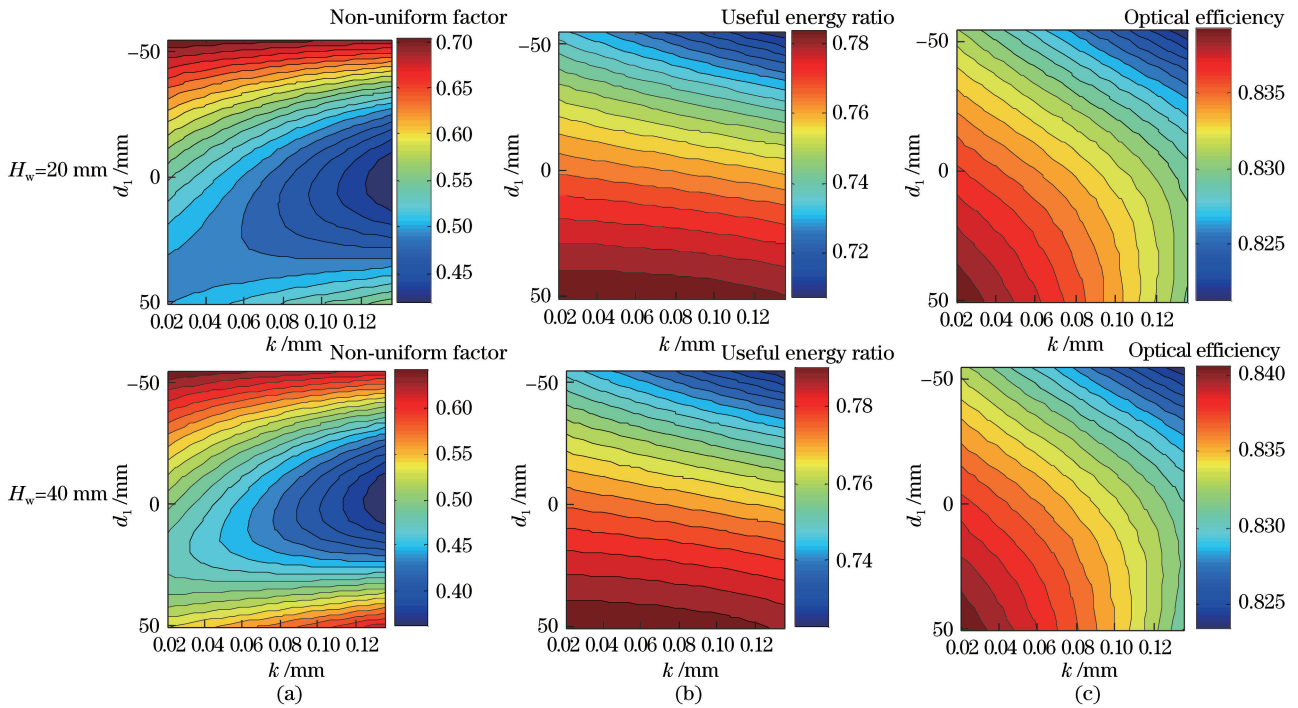


图 7 带平面-圆锥透镜的 SDC 系统的光学性能指标。(a)非均匀因子;(b)直接有用能率;(c)光学效率
Fig. 7 Optical performance indicators for SDC systems with plane-conical lens. (a) Non-uniform factor;
(b) useful energy ratio; (c) optical efficiency

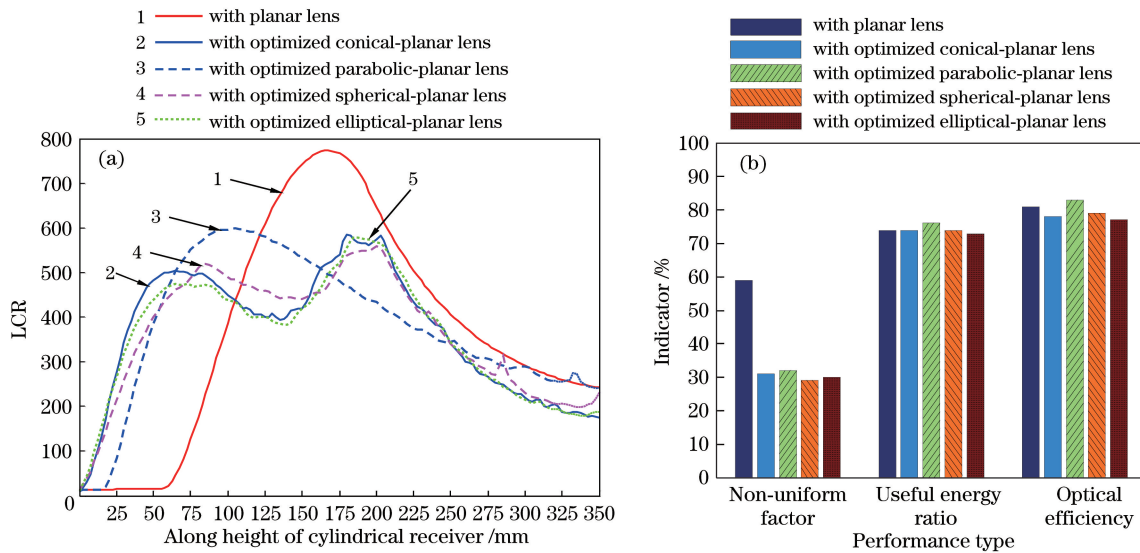


图 8 带优化凹面-平面透镜的 SDC 系统的性能结果。(a)吸热器表面 LCR 分布;(b)光学性能指标
Fig. 8 Performance results of SDC system with optimized concave-plane lens.
(a) LCR distribution on surface of heat absorber; (b) optical performance indicators

体接收器安装石英窗来增加光学效率的应用价值。

5.3 带双凹透镜的 SDC 系统

带优化的双凹透镜 SDC 系统的 LCR 分布和光学性能指标如图 9 所示,优化结果如表 5 所示。从图 9 可以看到,采用优化的双凹透镜能够有效改善吸热器表面的能流分布均匀性,其中优化的双圆锥透镜是本文中能流均匀化效果最好的透镜,其非均

匀因子只有 0.11,这是非常优异的结果。本课题组先前提出的镜面重新布置策略^[12]和新型分立式碟式聚光器^[11]可将非均匀因子分别减小到 0.13 和 0.10,但是前者需要高精度地调节反射镜面单元,后者又需要加工制造新型曲面的反射镜,这均会增加 SDC 系统的建造成本。相对而言,本文优化的双凹透镜具有更好的操作性和经济性,因为只需制造一

表 4 带凹型-平面透镜的 SDC 系统的优化结果

Table 4 Optimization results of SDC system with concave-planar lens

Type of lens	Optimization result			
	Geometric parameters of lens	Non-uniform factor	Useful energy ratio / %	Optical efficiency / %
Planar lens	$d_1 = 0$ mm and $H_w = 25.0$ mm	0.59	74.32	81.02
Conical-planar lens	$\mathbf{X} = [-25.00 \quad 38.61 \quad 0.98]$	0.31	74.03	78.17
Parabolic-planar lens	$\mathbf{X} = [-4.22 \quad 28.45 \quad 50.00]$	0.32	75.74	82.62
Spherical-planar lens	$\mathbf{X} = [-16.35 \quad 27.35 \quad 50.00]$	0.29	74.53	78.87
Elliptical-planar lens	$\mathbf{X} = [-25.67 \quad 33.84 \quad 347.84 \quad 88.90]$	0.30	72.52	76.51

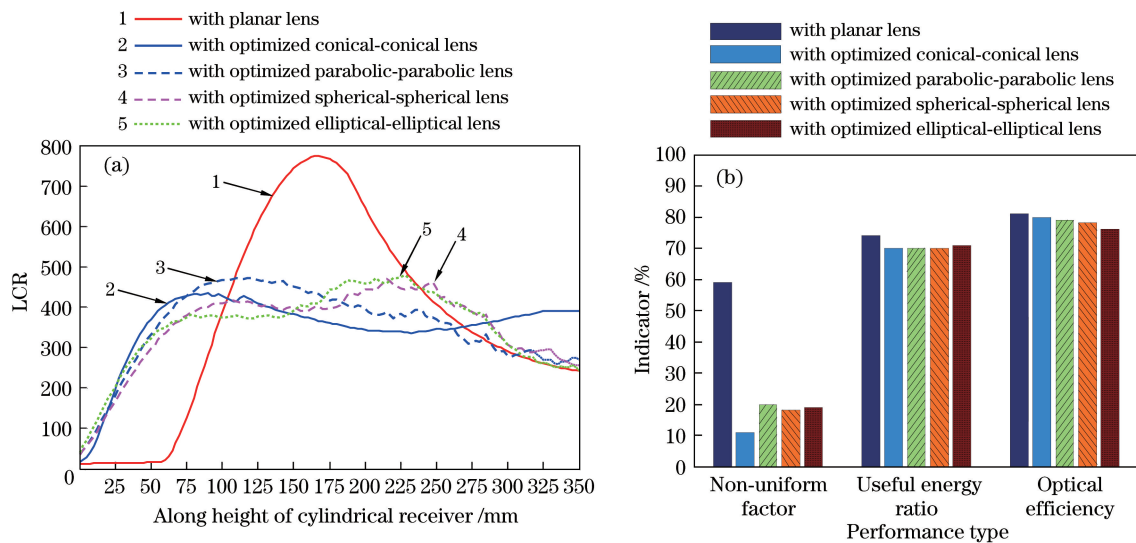


图 9 带优化双凹透镜的 SDC 系统的性能结果。(a)吸热器表面 LCR 分布剖面;(b)光学性能指标

Fig. 9 Performance results of SDC system with optimized biconcave lens.

(a) LCR profile on surface of heat absorber; (b) optical performance indicators

表 5 带双凹透镜的 SDC 系统的优化结果

Table 5 Optimization results of SDC system with concave-concave lens

Type of lens	Optimization result			
	Geometric parameters of lens	Non-uniform factor	Useful energy ratio / %	Optical efficiency / %
Planar lens	$d_1 = 0$ mm and $H_w = 25.0$ mm	0.59	74.32	81.02
Conical-conical lens	$\mathbf{X} = [-29.06 \quad 49.37 \quad 0.26 \quad 0.16]$	0.11	70.03	79.84
Parabolic-parabolic lens	$\mathbf{X} = [-24.31 \quad 49.22 \quad 56.08 \quad 172.78]$	0.20	70.15	79.49
Spherical-spherical lens	$\mathbf{X} = [-32.25 \quad 49.37 \quad 71.88 \quad 319.88]$	0.19	70.15	77.91
Elliptical-elliptical lens	$\mathbf{X} = [-33.63 \quad 50.00 \quad 231.14 \quad 96.20 \quad 245.73 \quad 284.36]$	0.19	70.46	76.34

个双凹面的石英透镜并安装在腔体接收器的前端,这对能流分布均匀性要求高的太阳能高温化学利用领域(例如制氢)^[15],提供了一个具有实施简单且非常经济的能流均匀化解决方案,能够有效避免局部催化剂或物料的烧结等不利问题。

虽然优化的双凹透镜能够有效改善吸热器表面的能流分布均匀性,但美中不足的是会导致 SDC 系

统的光学效率和直接有用能率均有小幅度的下降。例如采用优化的双圆锥透镜后,直接有用能率从 74.32%减小到 70.03%。因此,实际应用过程中需综合考虑能流分布均匀性、光学效率和经济性能等指标,通过确定合理的约束值 η_{\min} 来获取最佳参数(本文 η_{\min} 设为 70.00%)。

综上分析可知,在理想的光学条件下,带优化的

平面-圆锥和双圆锥透镜 SDC 系统的能流均匀性和光学性能最佳。太阳光线在 SDC 系统的传输轨迹如图 10 所示,其中聚光器聚集的太阳光被设置为不同颜色,是为了清楚地展示聚光器不同区域内聚集的光线在腔体接收器内的分布情况。带不同透镜的 SDC 系统的吸热器表面能流分布,如图 11 所示。

从图 10 和图 11 可以看到,平面石英窗对太阳光线的传输方向改变很小,而优化的平面-圆锥透镜和双圆锥透镜可以利用其凹型的功能曲面合理地改变太阳光线的传输方向,最终获得优异的能流均匀化效果,尤其是双凹圆锥透镜具有前、后两个功能表面,其作用效果更显著,能流分布也非常均匀[图 11(c)]。

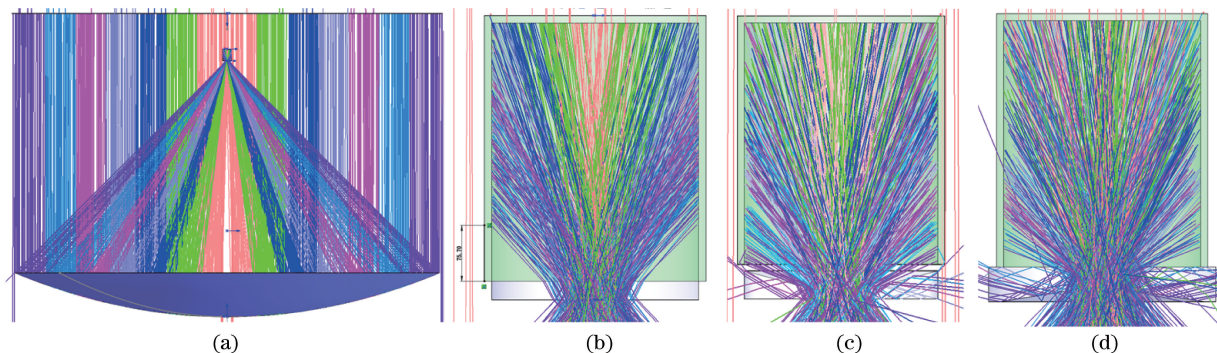


图 10 太阳光线在 SDC 系统的传输轨迹。(a)集中的太阳射线;(b)带平面透镜;
(c)带优化的平面圆锥透镜;(d)带优化的锥形透镜

Fig. 10 Transmission path of sun rays in SDC system. (a) Concentrated solar ray; (b) with planar lens;
(c) with optimized planar-conical lens; (d) with optimized conical-conical lens

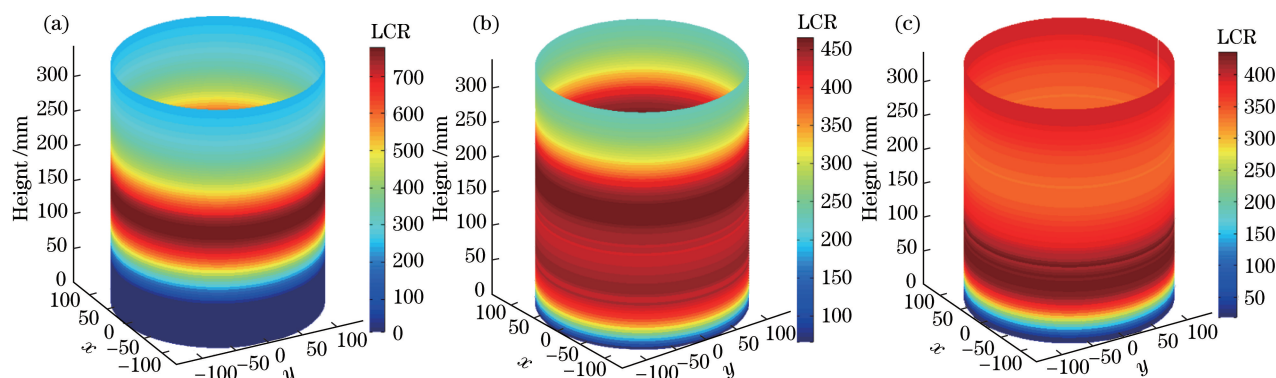


图 11 优化前后 SDC 系统圆柱吸热器表面的 LCR 分布。(a)带平面透镜;
(b)带优化的平-凹圆锥透镜;(c)带优化的双凹圆锥透镜

Fig. 11 LCR distribution on surface of cylindrical heat absorber of SDC system before and after optimization.
(a) With plane lens; (b) with optimized plano-concave conical lens; (c) with optimized biconcave conical lens

6 结 论

本课题组提出一种通过安装凹型石英窗(凹透镜)来改善 SDC 系统中腔体接收器能流均匀性的策略,建立一种通过联合光线跟踪方法和遗传算法优化凹透镜的几何参数和安装位置的设计方法,用于改善吸热器表面能流分布的均匀化,并获得优异的光学效率。基于此方法,4 种典型的二次曲面和三种曲面布置方式组合的 $4 \times 3 = 12$ 种凹透镜被研究,接着详细分析凹透镜改善 SDC 系统能流均匀性的有益效果和特点,最终理论证实本文方法的有效性。研究结果表明,采用优化的凹透镜能够显著改善

SDC 系统中腔体接收器的能流均匀性,并获得优异的光学效率和直接有用能率,改善效果由凹-平透镜、平-凹透镜和双凹透镜依次增强。在 12 种凹透镜中,优化的平面-圆锥透镜和双圆锥透镜可分别将非均匀因子从 0.59 显著减小到 0.20 和 0.11,而光学效率分别达到了 80.57% 和 79.84%,直接有用能率分别达到了 74.14% 和 70.03%,这两项指标与带平面石英窗 SDC 系统较为接近。另外,采用优化的凹-平透镜的 SDC 系统的非均匀因子可从 0.59 减小到 0.29,改善效果良好。但一个有趣的结果是带优化的抛物-平面透镜后 SDC 系统的光学效率和直接有用能率分别到达了 82.62% 和 75.74%,均高于

带平面石英窗的 SDC 系统。相比于传统的增加平面石英窗的 SDC 系统而言,采用优化的凹面透镜具备改善吸热器表面能流均匀性、降低峰值能流密度和增加光学效率的额外有益效果,扩大了石英窗的应用价值。相比于设计新型聚光器改善能流均匀性而言^[10-13],在腔体接收器的前端安装一个凹透镜也更具有操作性和经济性。

参 考 文 献

- [1] 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: Earth and Environmental Science, 2017, 93(1): 012052.
- [2] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R, et al. Design and develop for 17.70 m solar parabolic dish concentrated device[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(9): 2544-2552.
颜健, 彭佑多, 程自然, 等. 直径 17.70 m 抛物碟式聚光装置的设计与研制[J]. 太阳能学报, 2018, 39(9): 2544-2552.
- [3] Wang F Q, Shuai Y, Yuan Y, et al. Thermal stress analysis of eccentric tube receiver using concentrated solar radiation[J]. Solar Energy, 2010, 84(10): 1809-1815.
- [4] 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, 3289-3290.
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, 3289-3290.
- [5] 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.
- [6] Shuai Y, Xia X L, Tan H P, et al. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems[J]. Solar Energy, 2008, 82(1): 13-21.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R, et al. 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.
- [12] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R, et al. 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Shuai Y, Wang F Q, Xia X L, et al. Radiative properties of a solar cavity receiver/reactor with quartz window[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(19): 12148-12158.
- [16] Wang F Q, Tan J Y, Ma L X, et al. Thermal performance analysis of porous medium solar receiver with quartz window to minimize heat flux gradient [J]. Solar Energy, 2014, 108: 348-359.
- [17] Nie D Z, Peng Y D, Yan J, et al. Improvement in the flux uniformity of the solar dish concentrator system through a concave quartz window[J]. International Journal of Photoenergy, 2020, 2020: 1-16.
- [18] 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.