

# 新型圆形吸收体太阳能复合抛物聚光器面形 构建及光学分析

陈飞<sup>1,2,\*</sup>, 高崇<sup>1,2</sup>, 杨春曦<sup>1</sup>, 李才对<sup>1</sup>, 别玉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>昆明理工大学化学工程学院, 云南 昆明 650500;

<sup>2</sup>昆明理工大学太阳能工程研究所, 云南 昆明 650500

**摘要** 针对圆形吸收体提出了一种几何聚光比和可接收角同步提高的新型太阳能复合抛物聚光器(CPC), 构建了新型 CPC 面形结构模型及数学解析解。对新型 CPC 的聚光性能进行了分析, 并与常规 CPC 的光学性能进行了比较, 结果表明: 对于切线角相同的圆形吸收体新型 CPC, 随着圆形吸收体的直径增大时, 面形起点的纵坐标值减小; 当圆形吸收体直径和切线角分别为 47 mm 和 5.56° 时, 面形起点的纵坐标为 -29 mm; 随着光口宽度角增大, 新型 CPC 聚光器的几何聚光比减小, 可接收角和平均光学效率随着光口宽度角的增大而增大; 当光口宽度角为 60° 时, 几何聚光比为 1.16, 可接收角为 74.39°, 平均光学效率为 86.77%; 新型 CPC 聚光器吸收体表面的能流分布较传统 CPC 更均匀。

**关键词** 几何光学; 太阳能; 复合抛物聚光器; 圆形吸收体; 面形

中图分类号 O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0608001

## Surface-Shape Construction and Optical Analysis of Novel Solar Compound Parabolic Concentrator with Circular Absorber

Chen Fei<sup>1,2,\*</sup>, Gao Chong<sup>1,2</sup>, Yang Chunxi<sup>1</sup>, Li Caidui<sup>1</sup>, Bie Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;

<sup>2</sup>Institute of Solar Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology,  
Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract** In this paper, a solar compound-parabolic concentrator (CPC), with the simultaneous enhancement of the geometric concentrator ratio and the receiving angle for a circular absorber, is presented. Herein, the surface-shape model of the novel CPC and its mathematical solution are constructed theoretically. The concentration performance of the proposed CPC is analyzed and compared with that of a traditional CPC. The results show that the ordinate value of the surface-shape starting point decreases when the diameter of the circular absorber increases at the same contingency angle of the proposed CPC with a circular absorber. The ordinate value of the surface-shape starting point is -29 mm when the diameter of the circular absorber is 47 mm and the contingency angle is 5.56°. Moreover, the geometric concentration ratio of this novel CPC decreases with increasing the aperture width angle. In contrast, the permissible receiving angle and the average optical efficiency increase with increasing the aperture width angle. When the aperture width angle is 60°, the geometric concentration ratio, the permissible receiving angle, and the average optical efficiency are 1.16, 74.39°, and 86.77%, respectively. Meanwhile, the energy-flow distribution on the absorber surface of the novel CPC is more uniform than that of the traditional CPC.

**Key words** geometric optics; solar energy; compound parabolic concentrator; circular absorber; surface-shape

**OCIS codes** 080.2740; 220.4298; 260.2160; 350.6050

## 1 引 言

太阳能的能流密度较低, 若直接利用, 难以获得

较高的集热温度。为提高吸收体单位面积上的能流密度, 人们很早就开展了太阳能聚光器及其应用的研究<sup>[1-3]</sup>。按照聚光方式, 可将太阳能聚光器分为反

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2019-02-09; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(51866005); 云南省科技计划(2017FB092)

\* E-mail: solarcf@163.com

射式、透射式和混合式。反射式太阳能聚光器通过将收集到的太阳光束直接或间接反射到接收器表面进行接收<sup>[4]</sup>。在反射式聚光器中,复合抛物聚光器(CPC)以其较大的接收角,且无需匹配跟踪装置的特征得到了快速发展<sup>[5]</sup>。Winston<sup>[6]</sup>和 Ortega 等<sup>[7]</sup>分别对二维(2-D)CPC 的原理和几何结构进行了描述,并研究了吸收体直径、选择性吸收涂层和接收半角等参数对 CPC 集热系统性能的影响。Benrejeb 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于 CPC 几何特征的模型,并给出了相应的剖面图,还从数学方程中推导出了一被截短的 CPC 面形。Xie 等<sup>[9-10]</sup>对平板光伏/光热系统进行研究后发现,在 CPC 光学效率不变的条件下进行截短,截短聚光比下的 CPC 耗材只有高聚光比下的一半,但两种 CPC 的光学性能却很接近。

有人针对多种聚光器及 CPC 集热管间隙问题进行了研究<sup>[11]</sup>,在不断提高 CPC 光学性能及可普及性的同时,不断降低成本。肖红升等<sup>[5]</sup>提出了一种无渐开线形凸起的新式 CPC,在该 CPC 中,用平滑线替代常规 CPC 尖状凸起,虽然光学效率有所降低,但其面形在生产制造和使用寿命上具有一定优势。段鹏飞等<sup>[12]</sup>构建了针对圆形吸收体太阳能 CPC 的面形模型,并对其光学性能进行了验证。Widyolar 等<sup>[13]</sup>和 Jiang 等<sup>[14]</sup>对 CPC 面形进行了分段研究,将面形进行平面化处理后发现,各板之间连接线的长度越短,效率越高,越接近 CPC 的效率。Tang 等<sup>[15]</sup>将多块平面镜连接组成复合平面聚光器,并用其取代 CPC,结果发现,当平面镜面数越多时,复合平面聚光器的接收半角越接近 CPC 的接收半角,其光学效率也就越趋近于 CPC 的光学效率。章波等<sup>[16]</sup>提出了一种非对称 CPC,它可有效解决常规 CPC 因需要调整集热器倾角而造成的集热系统不稳定的问题,且能满足聚光器每日工作时间不少于 6 h 的要求,同时还能提高聚光集热系统的采光量。

太阳能 CPC 的光学性能主要体现在对太阳辐射能的会聚能力,而接收半角<sup>[17]</sup>与聚光比是决定 CPC 光学性能的重要参数。传统的 CPC 聚光器为了延长有效工作时间,常要求增大其接收半角,而这会导致其聚光比减小,不能实现有效聚光,吸收体表面难以获得较高的能流密度;反之,若提升聚光比,又将导致其接收半角减小,有效工作时间缩短。针对这一问题,本文构建了一种能够实现接收半角与聚光比同步增大的太阳能 CPC,并对其几何面形的光学性能进行了研究。

## 2 圆形吸收体 CPC 的面形模型

圆形吸收体 CPC 的对称面形结构如图 1 所示,其右半部分包括 CDB 和 BPE 两部分, $\theta$  为相切于圆形吸收体入射光线的切点对应的圆半径与  $y$  轴负半轴的夹角。过 GA 和 AC 两部分的公共点 A 做圆形吸收体的切线,其与  $x$  轴正方向的夹角为  $\beta$ ,称之为切线角。

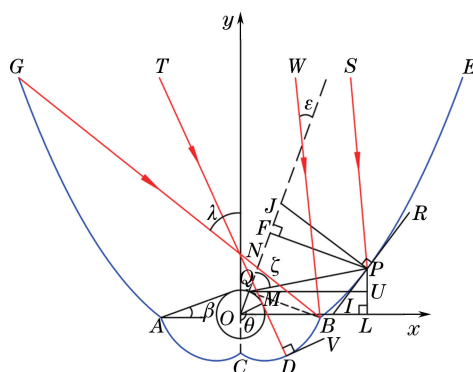


图 1 新型 CPC 的面形结构

Fig. 1 Surface-shape structure of novel CPC

图 1 中的新型 CPC 要求通过采光口 GE 的太阳光线或被面形 BE 和 AG 反射的太阳光线到达面形 ACB 之后,都能够被面形 ACB 反射到达圆形吸收体表面或从吸收体下方通过。由 CPC 面形的边缘光线原理及反射定理可知,对于 CDB 段上的的任意一点有

$$\frac{dy}{dx} = -\cot(\theta - \beta), \quad 0 < \theta_1 \leq \theta \leq \pi, \quad (1)$$

$$[x - r\sin(\theta - \beta)]^2 + [y + r\cos(\theta - \beta)]^2 = (r\theta)^2, \quad (2)$$

式中: $r$  为圆形吸收体的半径; $\theta_1$  为 C 点对应的  $\theta$  值。

依据全微分的几何意义有

$$\frac{y + r\cos(\theta - \beta)}{x - r\sin(\theta - \beta)} \cdot \frac{\cos(\theta - \beta)}{\sin(\theta - \beta)} = 1. \quad (3)$$

联立(1)~(3)式可得

$$\begin{cases} x = r[\sin(\theta - \beta) - \theta\cos(\theta - \beta)] \\ y = -r[\theta\sin(\theta - \beta) + \cos(\theta - \beta)] \end{cases}, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \pi, \quad (4)$$

式中  $\theta_1$  的表达式为

$$\theta_1 = \tan(\theta_1 - \beta). \quad (5)$$

对于面形中的 BPE 段(或 AG 段),要求从新型 CPC 采光口 GE 通过的光线(光线与 BQ 的夹角不大于光口宽度角  $\epsilon$ )到达其表面被反射后都能到达吸收体或面形 ACB 上。依据几何关系,对于

CPC 面形  $BPE$  段上的任意一点  $P$  有

$$\begin{cases} x = r \sin \beta + K \sin(\xi + \beta) \\ y = r \cos \beta + K \cos(\xi + \beta) \end{cases}, \epsilon \leq \xi \leq \frac{\pi}{2}, \quad (6)$$

式中:  $K$  为任意点  $P$  到点  $Q$  的线段长度。基于新型 CPC 的广义边缘光线原理及  $BPE$  段的光线性能, 可得微分方程

$$\frac{K' \cos(\xi + \beta) - K \sin(\xi + \beta)}{K' \sin(\xi + \beta) + K \cos(\xi + \beta)} = \cot\left(\frac{\xi - \epsilon + 2\beta}{2}\right), \quad (7)$$

式中:  $K'$  为线段长度  $K$  的参数方程关于  $\theta$  的一阶导数。光口宽度角  $\epsilon$  确定了有效光线的临界角, 由反射定律可知, 任意光线入射角小于等于  $\epsilon$  时可全部到达吸收体表面; 经任意点  $P$  的反射光线与线段  $JQ$  的夹角为  $\xi$ 。由边界连续性条件  $\xi = 0.5\pi$  时,  $K = r\pi$ , 可解得

$$K = \frac{r\pi(1 + \sin \epsilon)}{1 - \cos(\xi + \epsilon)}. \quad (8)$$

由(6)~(8)式可得, 新型 CPC 面型结构的几何聚光比  $C_{gg}$  为

$$C_{gg} = \frac{\sin \beta}{\pi} + \frac{\sin(\epsilon + \beta) \cdot (1 + \sin \epsilon)}{2 \sin^2 \epsilon}. \quad (9)$$

从(9)式中可以看出, 新型 CPC 的几何聚光比  $C_{gg}$  是一个多元函数, 由切线角和可接收角共同决定, 而常规圆形吸收体 CPC 的几何聚光比直接由接收半角  $\alpha$  决定(见图 2), 其几何聚光比  $C_g$  为<sup>[18]</sup>

$$C_g = \frac{1}{\sin \alpha}. \quad (10)$$

在图 2 中, 到达聚光器采光口的太阳光线以接收半角  $\alpha$  为临界点, 当太阳光线的入射角小于、等于、大于接收半角  $\alpha$  时, 经 CPC 面形反射后的光线分别到达吸收体、相切于吸收体、不能到达吸收体。

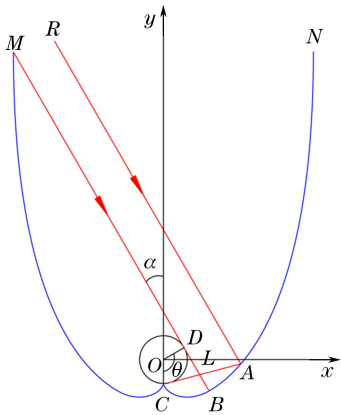


图 2 常规 CPC 的几何面形

Fig. 2 Geometric surface-shape of traditional CPC

在图 1 中, 通过点  $G$  且达到吸收体的临界光线与  $y$  轴的夹角为可接收角  $\lambda$ , 依据几何关系有如下表达式

$$\lambda = \begin{cases} \max(\lambda_1, \lambda_2), & y_E < r \\ 0.5\pi, & y_E \geq r \end{cases}, \quad (11)$$

式中:  $y_E$  为面形右端点  $E$  点的纵坐标值;  $\lambda_1$  为过聚光器面形右端点  $E$  进入聚光器到达左侧面形点  $A$  的光线的入射角;  $\lambda_2$  为过聚光器面形右端点  $E$  进入聚光器与圆形吸收体相切的光线的入射角。

$\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的表达式如下:

$$\lambda_1 = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{y_E - y_A}{x_E - x_A}\right), \quad (12)$$

$$\lambda_2 = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{x_E y_E - r \cdot \sqrt{x_E^2 + y_E^2 - r^2}}{x_E^2 - r^2}, \quad (13)$$

式中:  $x_E$  为面形右端点  $E$  点的横坐标值;  $x_A$  与  $y_A$  为面形  $A$  点的横纵坐标值。

### 3 所构建的 CPC 面形结构的几何特征

常规 CPC 的几何面形见图 2, CPC 的几何面形的起点与吸收体相接触<sup>[12]</sup>。由图 1 中的新型圆形吸收体 CPC 的面形可以看出, 其起点  $C$  不与吸收体相连接, 反射面形和圆形吸收体之间没有公共部分。当 CPC 几何聚光面形将太阳辐射能会聚到吸收体表面时, 吸收体表面的选择性吸收涂层将太阳辐射能转化为热能; 受热胀冷缩的影响, 吸收体体积会膨胀, 导致吸收体与面形之间产生热应力, 这种热应力会随着整个系统集热温度的升高而增大, 易导致吸收体及 CPC 的反射面产生形变, 甚至损坏, 从而缩短了 CPC 系统的使用寿命。新型 CPC 几何面形结构的这一特征更有利于满足其实际聚光运行时的工作需要, 消除了热应力的影响。此外, 新型 CPC 的面形与吸收体互不接触, 反射面形与吸收体之间没有力的作用, 亦有利于整个 CPC 集热系统的安装、调试及维护。

通常, 圆形吸收体 CPC 系统中使用的吸收体为真空管, 常见的太阳能真空管的几何参数见表 1, 其中,  $r_{in}$  为太阳能真空管内管的半径,  $r_{out}$  为太阳能真空管外管的半径。由(5)式可以看出, 切线角  $\beta$  直接决定了新型 CPC 面形起点  $C$ (图 1)的位置, 且  $\beta$  的值只能改变  $C$  的纵坐标值, 起点  $C$  的横坐标值恒为零。常见的太阳能真空管为圆形吸收体的新型 CPC 面形起点位置的纵坐标随切线角  $\beta$  的变化如图 3 所示。

表 1 太阳能真空管的几何参数

Table 1 Geometric parameters of solar vacuum tube

Number	$r_{in}/mm$	$r_{out}/mm$
1	23.5	18.5
2	29.0	23.5
3	35.0	29.0

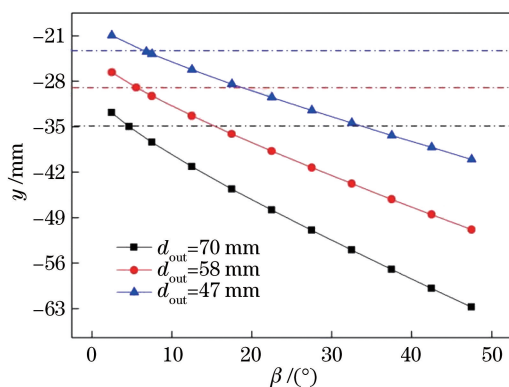


图 3 新型 CPC 面形起点的纵坐标与  $\beta$  的关系

Fig. 3 Ordinate value of novel CPC surface-shape starting point versus  $\beta$

由图 3 可以看出:在切线角相同的条件下,随着太阳能真空管直径的增大,面形起点位置的纵坐标减小;当太阳能真空管内管直径分别为 47, 58, 70 mm,切线角分别为  $6.82^\circ$ 、 $5.56^\circ$ 、 $4.65^\circ$ 时,新型面形起点的纵坐标分别为  $-23.5$ 、 $-29.0$ 、 $-35.0$  mm,反射面形起点 C 恰好与太阳能真空管外管的外壁连接。太阳能真空管的选择性吸收涂层和真空夹层有效降低了太阳能真空管外管的外壁温度,当集热温度不超过中温范围时,真空管外管的外壁温度甚至与环

表 2 聚光器面形模型的几何参数

Table 2 Geometric parameters of concentrator surface-shape model

Number	Item	Symbol	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4
1	Contingence angle	$\beta /(^{\circ})$			5.56	
2	Aperture width angle	$\epsilon /(^{\circ})$	30.00	40.00	50.00	60.00
3	Permissible receiving angle	$\Delta /(^{\circ})$	47.83	58.99	67.61	74.39
4	Acceptance half angle	$\alpha /(^{\circ})$	34.28	43.59	51.84	59.27

两种 CPC 面形的聚光特性基于蒙特卡罗光线追迹法进行光学性能仿真验证,并进行如下设置:视太阳光线到达 CPC 的采光口为理想的平行光线(虽然地球上接收的太阳光线具有  $0.53^\circ$  的张角,但其对 CPC 聚光性能的影响可忽略<sup>[19]</sup>);在同一入射角下,CPC 无量纲的聚光性能参数不受太阳辐照度的影响,因此将 CPC 采光口处(图 1 中的 GE)的总能量

境温度相当,真空管外管的外壁几乎没有热应力产生,这有利于提升新型 CPC 系统的实际工作效率。

切线角  $\beta$  与  $\theta_1$  的关系见图 4,随着切线角  $\beta$  增大, $\theta_1$  不断增大,这是由正切函数的单调性决定的。将这一规律采用(4)式计算可以发现,随着切线角  $\beta$  增大,太阳能真空管新型 CPC 面形起点的纵坐标值越来越小,CPC 面形的起点到原点的距离逐渐增大,这与图 3 是吻合的。

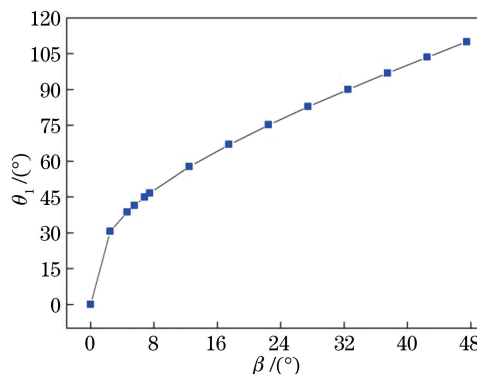


图 4 新型 CPC 面形的  $\theta_1$  与  $\beta$  的关系

Fig. 4  $\theta_1$  of novel CPC surface shape versus  $\beta$

#### 4 新型 CPC 面形聚光性能的实验验证

为获得新型 CPC 面形的聚光特性,将新型 CPC 与常规 CPC 进行对比,其参数设置见表 2。进一步,为方便比较新型 CPC 与常规 CPC 的聚光特性,两种 CPC 以常见的直径  $\phi$  为 58 mm 的太阳能真空管为吸收体,并使其具有相同的光口宽度,且采用新型 CPC 面形起点与太阳能真空管外管外壁相连接的模式。

设为定值,光线全部采用均匀分布的方式;在对比实验中,固定采光口处的光波面,改变采光口处的光线入射角,以模拟太阳光线入射角的变化;吸收体、CPC 反射面为理想状态,忽略光线透过真空管时的折射现象<sup>[12]</sup>;不考虑散射辐射对 CPC 聚光器聚光性能的提升。

为进一步验证所构建的 CPC 系统的实际聚光

特性,采用 3D 打印技术打印了以  $\varphi 58\text{ mm}$  太阳能真空管为吸收体且切线角  $\beta$  为  $5.56^\circ$ 、光口宽度角  $\epsilon$

为  $30^\circ$  的 CPC 模型,所用的 3D 打印机见图 5,其性能参数见表 3。

表 3 3D 打印机的主要参数

Table 3 Main parameters of 3D printer

Number	Parameter	Value
1	Specification of machine / (cm×cm×cm)	40×40×40
2	Printing size / (mm×mm×mm)	215×215×165
3	Nozzle diameter /mm	0.4
4	Printing accuracy /mm	0.35
5	Molding speed / (mm · s <sup>-1</sup> )	30
6	Printing temperature /°C	215
7	Hot bed temperature /°C	55

3D 打印 CPC 的聚光性能验证实验平台见图 6。在图 6 中,水平尺用于标定水平面的水平状态;激光器固定安装在角度仪(角度仪用来调节激光器发出光线的角度)上,并随角度仪的转动壁同步转动;升降台用于调节安装有激光器的角度仪的空间位置,并在角度仪水平尺的引导下,确保升降台平面及角度仪固定壁为水平状态;3D 打印的 CPC 模型放置在水平面上,并在反射面上紧贴有太阳能高亮反射膜,用于反射激光器发出的可见光,同时在 CPC 模型的反射面和圆形吸收体表面紧贴有刻度线,分别用于指示可见入射激光到达反射面和圆形吸收体的位置。

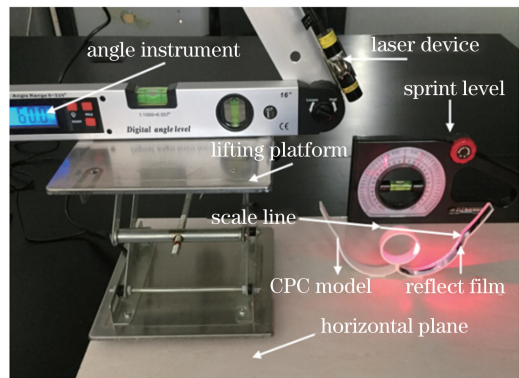


图 6 CPC 聚光性能实验验证平台

Fig. 6 Platform for verifying concentrating performance of CPC

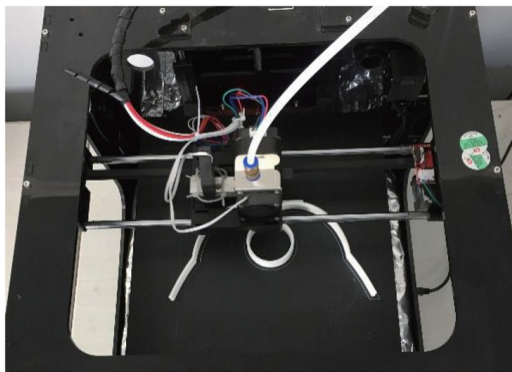


图 5 3D 打印机打印 CPC 模型

Fig. 5 CPC model printed by 3D printer

所构建的新型 CPC 面形的聚光性能实验和仿真结果如图 7 所示,可以看出:在不同入射光线条件下,实验和仿真得到的 CPC 反射面光线直接到达圆形吸收体表面的位置,或 CPC 反射面会聚光线到达圆形吸收体表面的位置,具有较好的一致性,光线到达圆形吸收体表面位置的实验结果与仿真结果的最大误差不超过 0.7 mm。这主要是因为 CPC 打印

模型具有一定的成形误差,CPC 表面的高亮太阳能反射膜具有 0.1 mm 的厚度,激光器输出的可见光亦是具有张角的“平行光”。因此,采用仿真实验可有效获取新型 CPC 对光线的会聚特性,且具有快速性、完整性和直观性。

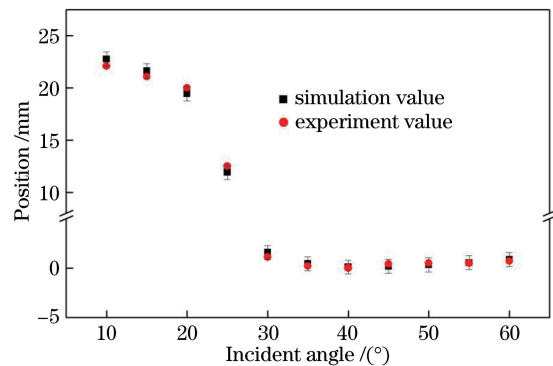


图 7 CPC 面形聚光性能的实验结果和仿真结果

Fig. 7 Experimental and simulated results of concentrating performance for CPC surface-shape

## 5 新型 CPC 面形聚光特性的仿真与分析

新型 CPC 与常规 CPC 聚光特性的对比见图 8, 可以看出:随着光口宽度角  $\epsilon$  增大, 新型 CPC 聚光器的几何聚光比  $C_{gg}$  减小, 光口宽度角  $\epsilon$  分别为  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$  时, 其几何聚光比  $C_{gg}$  分别为 1.78、1.45、1.27、1.16。这是因为随着新型 CPC 聚光器光口宽度角  $\epsilon$  增大,  $\xi$  的取值范围减小, 从而使得新型 CPC 面形端点(图 1 中的 E 或 G 点)处横坐标的绝对值减小, 进而导致几何聚光比减小。

从图 8 中还可以看到, 随着光口宽度角  $\epsilon$  值增

大, 新型 CPC 聚光器的可接收角  $\lambda$  值逐渐增大, 当光口宽度角  $\epsilon$  分别为  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$  时, 可接收角  $\lambda$  分别为  $47.86^\circ$ 、 $58.99^\circ$ 、 $67.62^\circ$ 、 $74.39^\circ$ 。新型 CPC 可在较大角度范围内接收太阳辐射能, 并将其会聚到吸收体表面, 供吸收体进行光热转换, 这对于新型 CPC 的实际应用是有益的。在实际天气条件下, 难以实现太阳辐照度在正午及正午前后较短的时间内是全天内最强的, 往往会出现中午太阳辐照度一般, 而下午太阳辐照度较强的情况。常规的 CPC 太阳能聚光器要求在中午时段, 即太阳辐照度较强的时段, 有效收集太阳辐射能, 具有显著的时间“选择性”。

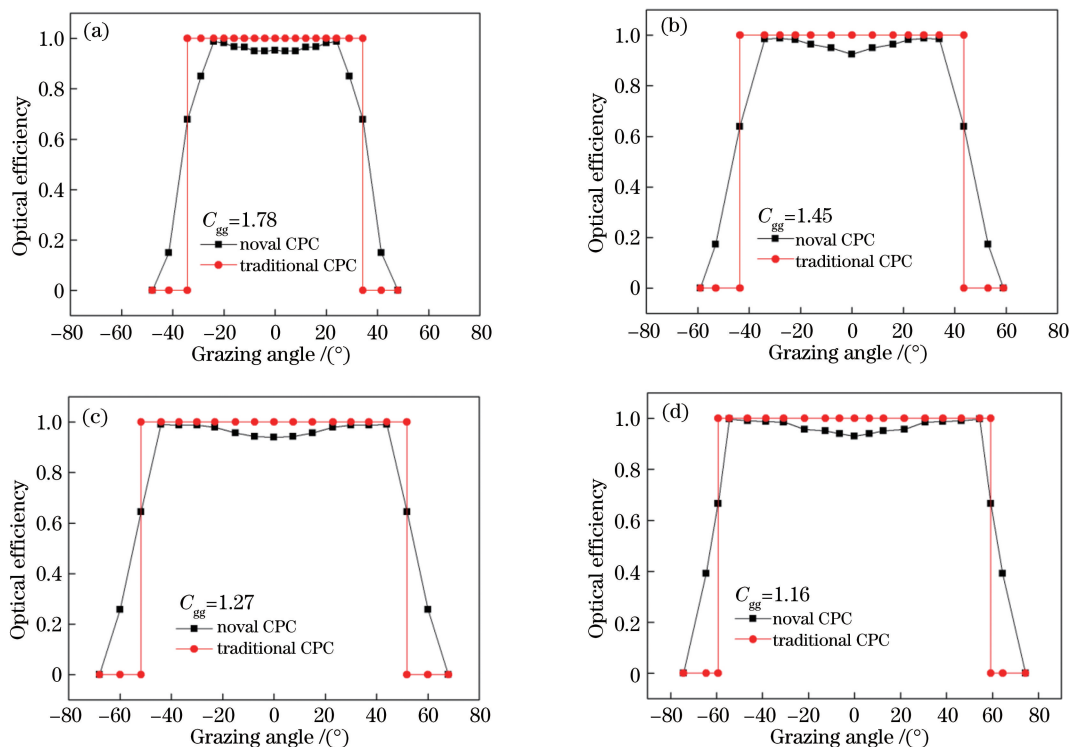


图 8 不同光口宽度角下新型 CPC 与常规 CPC 的聚光特性对比。(a)光口宽度角为  $30^\circ$ ; (b)光口宽度角为  $40^\circ$ ; (c)光口宽度角为  $50^\circ$ ; (d)光口宽度角为  $60^\circ$

Fig. 8 Comparison of concentration performances of novel and traditional CPCs . (a) Aperture width angle is  $30^\circ$ ; (b) aperture width angle is  $40^\circ$ ; (c) aperture width angle is  $50^\circ$ ; (d) aperture width angle is  $60^\circ$

常规 CPC 系统的光学效率在不大于其接收半角以内时为 1, 其余情况下为 0, 具有突变性。而新型 CPC 系统收集的太阳辐射能是连续性的, 当光口宽度角  $\epsilon$  为  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$  时, 在整个可接收角范围内, 其平均光学效率分别为 82.20%、82.50%、82.71%、86.77%, 这有利于太阳能真空管选择性吸收涂层的热能及时被其内部的工质带走, 有利于降低吸收体表面选择性吸收涂层进行光热转换时的集热温度, 从而有效缓解了太阳能真空管选择性吸收

涂层的衰减, 延长了太阳能真空管的使用寿命, 同时也有效保障了系统工作的稳定性。

在图 8 中, 当光口宽度角  $\epsilon$  分别为  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$  时, 新型 CPC 收集的总太阳辐射能相对于常规 CPC 的系数  $k$  分别为 1.02594、1.03495、1.03858、1.03865, 这说明在图 8 所示的条件下, 新型 CPC 在其可接收角范围内收集的太阳辐射能大于常规 CPC 系统, 这有利于提高 CPC 系统的工作效率, 特别是有利于对太阳散射、辐射的收集。

新型 CPC 面形参数中的切线角  $\beta$  会直接影响其聚光性能,新型 CPC 的切线角  $\beta$  对其几何聚光比的影响见图 9~10。从图 9 中(光口宽度角  $\epsilon$  为定值  $50^\circ$ )可以看出,切线角  $\beta$  的增大有利于新型 CPC 几何聚光比  $C_{gg}$  的增大,但几何聚光比  $C_{gg}$  不随切线角  $\beta$  增大而单调递增,当切线角  $\beta$  为  $48.12^\circ$  时,几何聚光比  $C_{gg}$  达到极大值 1.73,这是(9)式所示函数的性质决定的。

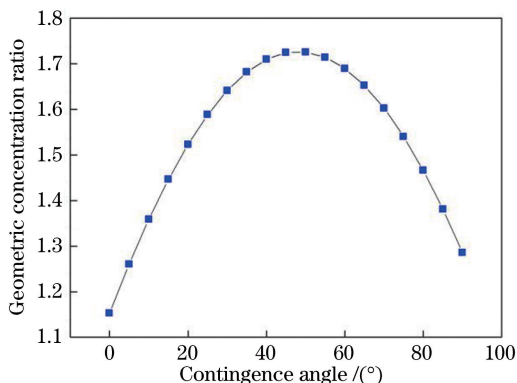


图 9 切线角对几何聚光比的影响

Fig. 9 Influence of contingency angle on geometric concentration ratio

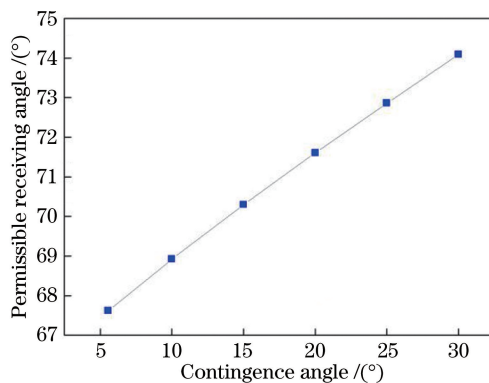


图 10 可接收角与切线角之间的关系

Fig. 10 Relation between permissible receiving angle and contingency angle

从图 10 中可以看出,随着切线角  $\beta$  增大,新型 CPC 的可接收角同步增大(采用蒙特卡罗光线追迹法仿真的部分结果见图 11),这有利于提升新型 CPC 系统对全天太阳辐射能的捕获能力。当切线角分别为  $5.56^\circ$ 、 $10.00^\circ$ [如图 11(a)所示]、 $15.00^\circ$ 、 $20.00^\circ$ [如图 11(b)所示]、 $25.00^\circ$ 、 $30.00^\circ$ [如图 11(c)所示]时,可接收角  $\lambda$  分别为  $67.62^\circ$ 、 $68.92^\circ$ 、 $70.30^\circ$ 、 $71.60^\circ$ 、 $76.62^\circ$ 、 $82.51^\circ$ ,这一结果与(11)式相吻合。

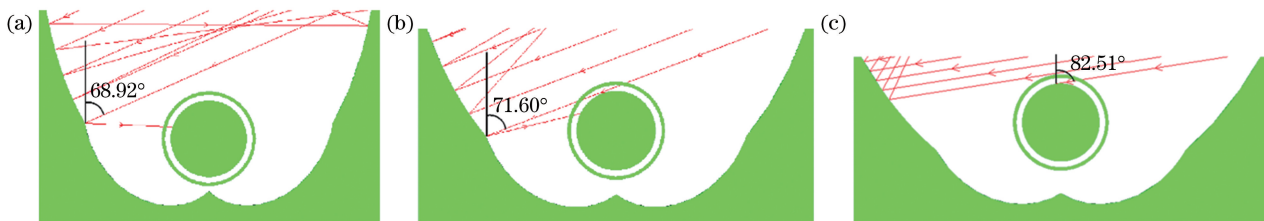


图 11 不同切线角下新型 CPC 临界光线的仿真结果。(a)  $10.00^\circ$ ; (b)  $20.00^\circ$ ; (c)  $30.00^\circ$

Fig. 11 Simulation results of critical light for novel CPC under different contingency angles.

(a)  $10.00^\circ$ ; (b)  $20.00^\circ$ ; (c)  $30.00^\circ$

CPC 吸收体表面的能流分布会直接影响光热转换效率。光口宽度角  $\epsilon$  为  $30^\circ$  时,新型 CPC 与常规 CPC 在圆形吸收体表面的能流分布情况如图 12 所示,可以看出:在  $30^\circ$  的光线入射角条件下,到达新型 CPC 和传统 CPC 左半圆吸收体表面(分别见图 1 和图 2)的光线能力比到达右半圆吸收体表面的光线能量少,但就整个圆形吸收体表面能量分布的均匀性而言,传统 CPC 较新型 CPC 差;当光线入射角为  $35^\circ$  时,传统 CPC 的吸收体表面已经不能获得光线,而新型 CPC 依然能够获得光线,且右半圆吸收面仍然具有较为均匀的能流分布特性。

## 6 结 论

本课题组针对圆形吸收体的一种新型 CPC 太阳能聚光器开展了理论建模、数值计算、聚光仿真、实验验证研究,得到如下结论:所构建 CPC 面形的起点不与吸收体相连接,且随圆形吸收体直径增大,切线角相同的新型 CPC 面形起点的纵坐标值减小;随着光口宽度角增大,新型 CPC 的几何聚光比减小,可接收角和平均光学效率增大;新型 CPC 聚光器吸收体表面的能流分布较传统 CPC 更均匀。

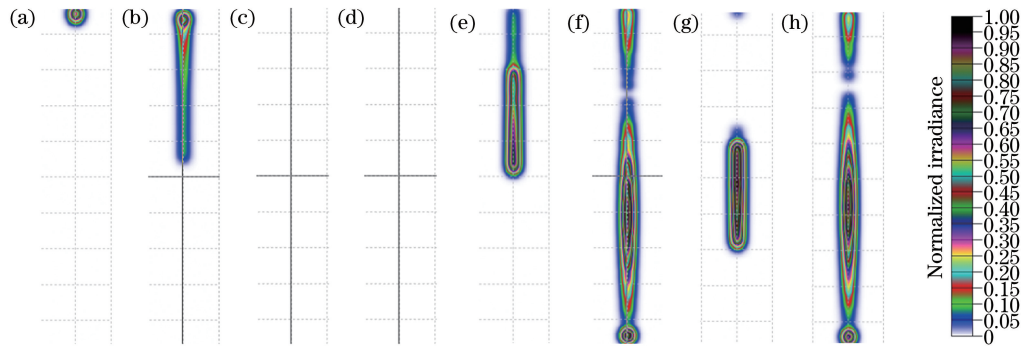


图 12 不同入射角下新型 CPC 与常规 CPC 吸收体表面的能流分布。(a)传统 CPC,光线入射角为  $30^\circ$ ,左半圆吸收体;(b)传统 CPC,光线入射角为  $30^\circ$ ,右半圆吸收体;(c)传统 CPC,光线入射角为  $35^\circ$ ,左半圆吸收体;(d)传统 CPC,光线入射角为  $35^\circ$ ,右半圆吸收体;(e)新型 CPC,光线入射角为  $30^\circ$ ,左半圆吸收体;(f)新型 CPC,光线入射角为  $30^\circ$ ,右半圆吸收体;(g)新型 CPC,光线入射角为  $35^\circ$ ,左半圆吸收体;(h)新型 CPC,光线入射角为  $35^\circ$ ,右半圆吸收体

Fig. 12 Energy flow distributions on absorber surfaces of novel and traditional CPCs under different incident angles. (a) Traditional CPC, incident angle of  $30^\circ$ , and left semicircular absorber; (b) traditional CPC, incident angle of  $30^\circ$ , and right semicircular absorber; (c) traditional CPC, incident angle of  $35^\circ$ , and left semicircular absorber; (d) traditional CPC, incident angle of  $35^\circ$ , and right semicircular absorber; (e) novel CPC, incident angle of  $30^\circ$ , and left semicircular absorber; (f) novel CPC, incident angle of  $30^\circ$ , and right semicircular absorber; (g) novel CPC, incident angle of  $35^\circ$ , and left semicircular absorber; (h) novel CPC, incident angle of  $35^\circ$ , and right semicircular absorber

## 参 考 文 献

- [1] Al-Sulaiman F A. Exergy analysis of parabolic trough solar collectors integrated with combined steam and organic Rankine cycles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 77: 441-449.
- [2] Yan Y F, Zhang Z E, Zhang L, *et al.* Application and utilization technology of solar energy [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(S1): 47-56.  
闫云飞, 张智恩, 张力, 等. 太阳能利用技术及其应用 [J]. *太阳能学报*, 2012, 33(S1): 47-56.
- [3] Zhao B, Hu Y Q, Yang S, *et al.* Solar energy review [J]. *Chemical Equipment Technology*, 2012, 33(1): 57-64.  
赵斌, 胡益锴, 杨森, 等. 太阳能综述 [J]. *化工装备技术*, 2012, 33(1): 57-64.
- [4] Yin P, Xu X P, Jiang Z G, *et al.* Design method of solar concentrator based on Monge-Ampère equations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0922002.  
尹鹏, 徐熙平, 姜肇国, 等. 基于椭圆型 Monge-Ampère 方程的太阳能聚光器设计 [J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0922002.
- [5] Xiao H S, Xia N, Yan D C, *et al.* Design and performance research of a simple non-involute convex CPC condenser [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(1): 167-172.  
肖红升, 夏宁, 严冬春, 等. 一种无渐开线形凸起的简易 CPC 聚光器的设计与性能研究 [J]. *太阳能学报*, 2015, 36(1): 167-172.
- [6] Winston R. Thermodynamically efficient solar concentrators [J]. *Journal of Photonics for Energy*, 2012, 2(1): 025501.
- [7] Ortega N, García-Valladares O, Best R, *et al.* Two-phase flow modelling of a solar concentrator applied as ammonia vapor generator in an absorption refrigerator [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(9): 2064-2076.
- [8] Benrejeb R, Helal O, Chaouachi B. Study of the effect of truncation on the optical and thermal performances of an ICS solar water heater system [J]. *Solar Energy*, 2016, 132: 84-95.
- [9] Xie H L, Wei J J, Wang Z X, *et al.* Design and performance research on eliminating multiple reflections of solar radiation within compound parabolic concentrator (CPC) in hybrid CPV/T system [J]. *Solar Energy*, 2016, 129: 126-146.
- [10] Xie H L, Wei J J, Wang Z X, *et al.* Design and performance study of truncated CPC by eliminating multiple reflections of solar radiation in hybrid CPV/T system: highest and lowest truncation position [J]. *Solar Energy*, 2016, 136: 217-225.
- [11] Zheng F, Li A D. A new type of CPC concentrator [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2004, 25(5): 663-665.  
郑飞, 李安定. 一种新型复合抛物面聚光器 [J]. *太阳能学报*, 2004, 25(5): 663-665.
- [12] Duan P F, Gui T T, Chen F, *et al.* Surface shape



- model research for compound parabolic concentrators with circular absorber and its simulation verification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0622002.
- 段鹏飞, 桂特, 陈飞, 等. 圆形吸收体复合抛物物聚光器面形模型研究及仿真验证[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0622002.
- [13] Widyolar B, Jiang L, Winston R. Thermodynamics and the segmented compound parabolic concentrator [J]. *Journal of Photonics for Energy*, 2017, 7(2): 028002.
- [14] Jiang L, Widyolar B, Winston R. Characterization of novel mid-temperature CPC solar thermal collectors [J]. *Energy Procedia*, 2015, 70: 65-70.
- [15] Tang F, Li G H, Tang R S. Design and optical performance of CPC based compound plane concentrators [J]. *Renewable Energy*, 2016, 95: 140-151.
- [16] Zhang B, Chen F, Duan P F, *et al.* Research on structure and characteristics of asymmetrical compound parabolic concentrator with plane absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1208002.
- 章波, 陈飞, 段鹏飞, 等. 平板吸收体非对称复合抛物物聚光器结构及特性研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1208002.
- [17] Zhu R, Lu Z W, Liu H, *et al.* The solar concentrator design method based on nonimaging optics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2251-2255.
- 朱瑞, 卢振武, 刘华, 等. 基于非成像原理设计的太阳能聚光镜 [J]. *光子学报*, 2009, 38(9): 2251-2255.
- [18] Yu Y M. Studies on performance of CPCs with a restricted exit angle[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2015: 11-25.
- 余亚梅. 出射角受制约的复合抛物面聚光系统性能研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2015: 11-25.
- [19] Duffie J A, Beckman W A. *Solar engineering of thermal processes*[M]. 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013: 3-41.