

文章编号:0254-0096(2020)04-0073-06

# 非跟踪非对称复合平面型太阳能聚光器设计与光学性能模拟

王哲, 端木琳, 李祥立, 舒海文

(大连理工大学建设工程学部, 大连 116024)

**摘要:** 提出一种新型的非跟踪非对称复合平面型反射聚光器, 给出设计方法, 利用基于蒙特卡罗光线追迹法的光学仿真软件, 分析光学效率及吸收器上的能流分布。结果表明, 增大平面镜数量  $n$  和设计角  $\theta_0$  均可增大聚光器的几何聚光比  $CR$ 。 $CR$  相同的聚光器在入射角大于  $\theta_0$  时具有相同的光学效率, 聚光均匀性较好, 且减小  $n$  值有利于获得更均匀的光强分布。

**关键词:** 太阳能聚光器; 能量转换效率; 光学性能; 光学仿真模型; 非跟踪; 非对称

**中图分类号:** TK52

**文献标志码:** A

## 0 引言

中国已将可再生能源装置与建筑一体化应用技术作为重点支持的高新技术领域之一。在各种可再生能源中, 综合考虑资源的丰富性、普遍性、技术的成熟性、与建筑集成的可行性, 太阳能技术无疑是最有前途的技术之一。因太阳能能流密度较低, 采用聚光方式可提高太阳辐射照度及减少昂贵的吸收器面积, 降低成本。

复合抛物面聚光器(CPC)在太阳能光热和光电利用方面受到广泛关注<sup>[1-3]</sup>。因CPC可接收的太阳入射角较小, 且无法匹配全年的吸热量, Welford等<sup>[4]</sup>设计出非对称复合抛物面聚光器(asymmetric CPC, ACPC)并与光伏组件结合, 将其应用到垂直建筑幕墙; Karlsson等<sup>[5]</sup>设计无需跟踪系统的可独立安装在地面或者与建筑一体化安装的ACPC; Ratismith等<sup>[6]</sup>设计开发大接收角的抛物面聚光器用于集热系统显示了其无需跟踪的优越性。鉴于抛物面的加工需要较高的精度, 王科<sup>[7]</sup>设计并制造了一种由8组镀银平面镜组成的聚光器, 几何聚光比为3.48。王刚等<sup>[8]</sup>在半抛物聚光器基础上提出双轴跟踪式折平面等光强反射聚光器, 实验测得聚光比为5.2, 聚光效率为0.53。肖红升等<sup>[9]</sup>采用过渡平滑线替代常规CPC的尖状凸起, 以降低加工精度。太阳能建筑

一体化中要求聚光器能作为建筑构件或能固定安装, 降低成本的同时减少维护费用, 且具有合适的聚光比, 产生较高温度的热水, 同时具有较均匀的聚光能流分布, 增加光伏电池发电效率。以CPC为原型进行再设计的聚光器, 可吸收的太阳入射角较小, 且需要较高的加工精度, 无法摆脱对抛物线型曲面加工的依赖。采用非对称设计能在非跟踪情况下增大可接收的入射角, 平面镜的设计极大降低了加工精度, 降低成本。

本文提出由平面镜接合而成的非跟踪型聚光器, 具有广泛的接收角, 固定安装时能保证较高的光学效率, 且平面镜块数较少, 加工方便。然后给出了设计方法, 并针对特定聚光器, 利用基于蒙特卡罗算法的TracePro软件分析其光学性能, 讨论了不同情况下吸收器上的能流分布和聚光器的光学效率。

## 1 聚光器设计

图1所示为聚光系统原理图和三维示意图, 图1a中 $R_1P_1 \sim R_3P_3$ 代表入射的太阳光线。其反射面由连续相接的平面 $AP_1$ 、 $P_1P_2$ 、 $P_2P_3 \dots$ 组成, 假定太阳光为平行入射,  $\beta_i$ 为第 $i$ 块平面镜的倾角, 光线以 $\theta_0$ 角(设计角)入射, 在第 $i$ 块平面镜的末端点 $P_i$ 经反射后达到吸收器 $OA$ 的上端点 $O$ , 那么对于入射角大于 $\theta_0$ 的光线均能照射到 $OA$ 上, 从而在 $YOZ$ 平面上形成光斑。设

收稿日期: 2017-09-21

基金项目: 科技部“十三五”国家重点研发计划(2017YFC0702605-01)

通信作者: 端木琳(1959—), 女, 博士、教授, 主要从事建筑环境特征与热泵技术方面的研究。duanmulin@sina.com

$|\overline{OA}|=r$  ( $r$  代表吸收器  $OA$  的宽度)。则光线的在该镜面上的入射角为  $\theta_0 + \beta_i$ 。

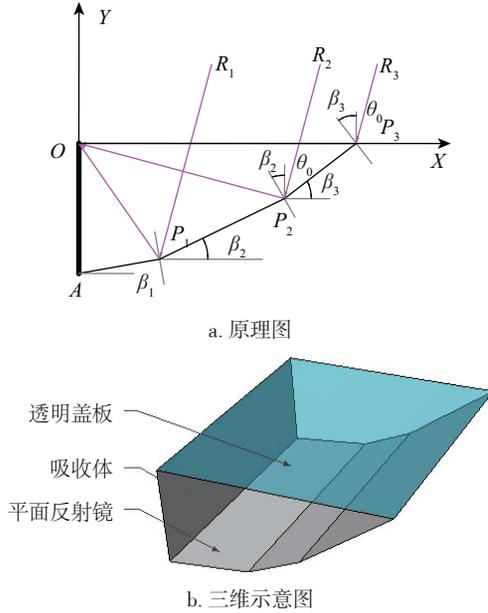


图1 非跟踪型聚光器的原理图和三维示意图

Fig. 1 Schematic diagram of non-tracking concentrator and 3D sketch

平面反射镜  $P_{i-1}P_i$  所在直线方程为:

$$y = \tan \beta_i (x - x_{P_{i-1}}) + y_{P_{i-1}} \quad (1)$$

根据光的反射原理,可知反射光线  $P_iO$  所在直线方程为:

$$y = m_i x \quad (2)$$

$$m_i = \frac{-\cos \theta_0 + 2 \cos(\theta_0 + \beta_i) \cos \beta_i}{-\sin \theta_0 - 2 \cos(\theta_0 + \beta_i) \sin \beta_i} \quad (3)$$

其中,  $i$  的取值范围为  $1 \sim n$ ,  $n$  表示平面镜块数;特别地,  $i=n$  时,第  $n$  块平面镜末端点纵坐标为  $y_{P_n} = m_n x_{P_n} = 0$ , 其中  $x_{P_n}$  为第  $n$  块平面镜末端点横坐标;

则第  $n$  块平面镜的倾角  $\beta_n = \frac{\pi}{4} - \frac{\theta_0}{2}$ 。

联立求解可得  $P_i$  点坐标为:

$$\begin{cases} x_{P_1} = \frac{1}{\tan \beta_1 - m_1} r, y_{P_1} = m_1 x_{P_1}, i=1 \\ x_{P_i} = \frac{\tan \beta_i - m_{i-1}}{\tan \beta_i - m_i} x_{P_{i-1}}, y_{P_i} = m_i x_{P_i}, 2 \leq i \leq n-1 \\ x_{P_n} = \frac{\tan \beta_n - m_{n-1}}{\tan \beta_n} x_{P_{n-1}}, y_{P_n} = 0, i=n \end{cases} \quad (4)$$

几何聚光比  $CR$  为聚光器开口面积与吸收器面积的比:

$$CR = \frac{x_{P_n}}{r} = f(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n-1}) \quad (5)$$

对该结构来说,在改变其宽度时,高度并未改变,因此  $CR$  也反映了其高宽比,即  $CR$  越大说明聚光器结构越扁平。

第  $i$  块平面镜的宽度为:

$$|P_{i-1}P_i| = \frac{x_{P_i} - x_{P_{i-1}}}{\cos \beta_i} \quad (6)$$

$\theta_0$  指的是设计入射角(可在  $0^\circ \sim 90^\circ$  任意取值),只要是  $\theta_0 \sim 90^\circ$  范围内的太阳入射光均能被反射到吸收体上,且无需跟踪系统。在此约束条件下,若同时给定  $n$  值,则可求出一个最大聚光比  $CR$ ;随着设计角  $\theta_0$  增大,  $CR$  也会相应的增大。图 2 是当取不同入射角  $\theta_0$  设计时聚光器的最大几何聚光比  $CR$  随平面镜数量  $n$  的变化情况,当  $n$  趋近于无穷大时,可认为  $AP_n$  段为抛物线,此时理论几何聚光比为  $C$ ,理论计算可求出:

$$C = 2 \sec \theta (\tan \theta + \sec \theta) \quad (7)$$

式中,  $\theta$  —— 太阳入射角,定义为入射光线与盖板的夹角, ( $^\circ$ )。

由图 2 可知以某一确定  $\theta_0$  进行设计,  $CR$  随着  $n$  增大而增大,且增长趋势逐渐减缓,当  $n \geq 5$  时,  $CR$  的增量在 0.1 以下,  $C$  值为对应  $\theta_0$  下  $CR$  曲线的渐近线。平面反射镜型的聚光器虽然依据边缘反射原理设计,但并非理想聚光器,理想聚光器还要求每条光线具有相同的光线路径<sup>[10-11]</sup>。

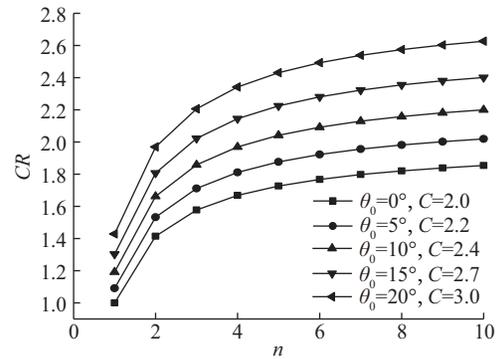


图2 不同  $\theta_0$  设计时聚光器的  $CR$  随  $n$  的变化

Fig. 2 Variation of  $CR$  with  $n$  in design of different  $\theta_0$

## 2 方 法

对于多平面镜光学性能的理论计算极其复杂,因此通常采用基于光线追迹技术的软件模拟求解<sup>[12]</sup>。光线追迹分析在聚光光学性能评价与分析中发挥着重要作用。TracePro 用普适光线追迹技术来追迹光线,这种技术允许引入光线到一个模型,运用蒙特·卡罗 (Monte-Carlo) 算法来模拟光线的散射和衍射。认为进入系统

的太阳光是由大量光束组成,发射点位置在某一平面随机产生,太阳光的入射参数确定每一束光携带的能量,计算时跟踪记录所有光线的传播过程,从而得到吸收面上的能流分布和聚光器的光学效率<sup>[13]</sup>。对反射型聚光器来说,光线追迹过程遵循光的反射:

$$\vec{r}_{\text{refl}} = \vec{r}_{\text{inc}} - 2(\vec{n} \cdot \vec{r}_{\text{inc}})\vec{n} \quad (8)$$

式中,  $\vec{n}$  ——入射面法向量;  $\vec{r}_{\text{inc}}$ 、 $\vec{r}_{\text{refl}}$  ——入射光线、反射光线的方向向量。

光学效率定义为考虑所有光学损失后吸收器吸收的辐射能量与入射到聚光器开口能量之比<sup>[14]</sup>。按式(9)计算<sup>[15]</sup>:

$$\eta_{\text{op}}(\theta) = \sum_{i=1}^m \frac{I_i(\gamma\tau\alpha)\rho^j}{I_b} \quad (9)$$

式中,  $\eta_{\text{op}}(\theta)$  ——光学效率,%;  $I_i$  ——每条光线照射到吸收器的能量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $I_b$  ——光线入射到光孔的能量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\tau$  ——盖板的透射率;  $\alpha$  ——吸收体的吸收率;  $\rho$  ——平面镜的反射率;  $\gamma$  ——截获因子,低聚光比非跟踪聚光器的  $\gamma$  可以达到 1;  $j$  ——反射次数;  $m$  ——光线数量。

### 2.1 聚光器仿真模型

在 TracePro 软件中建立三维光学分析模型,取吸收器  $OA$  长度  $r = 100 \text{ mm}$ ,其厚度  $d = 1 \text{ mm}$ ,聚光器的长度  $l = 1000 \text{ mm}$ ,设定入射光线的能流密度设置为  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ 。光线密度表示单位面积的发光体所发出的光线数量,在 TracePro 软件中直接反应的是对光源的设置,对于  $1000 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  的矩形格点光源,2 个方向分别设置不同的发光点数,以  $n = 3$ ,  $\theta_0 = 15^\circ$  的聚光器的为例,当入射角分别为  $45^\circ$  和  $60^\circ$  时,不同光线密度下的光学效率计算结果如图 3 所示,当光线密度大于  $2 \text{ mm}^{-2}$  时,结果变化很小,因此设定发光点为  $1000 \times 800$ ,即光线数量为  $8 \times 10^5$ 。

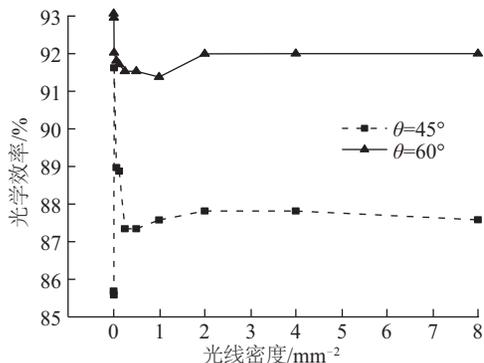


图3 光线密度对模拟结果的影响

Fig. 3 Effect of light density on simulation results

## 3 聚光器光学性能仿真结果与分析

### 3.1 光学效率

分别探讨结构参数设计角  $\theta_0$ 、平面镜数量  $n$  及材料反射率  $\beta$  对聚光器光学效率的影响,以不同参数设计的聚光器的聚光比  $CR$  如表 1 所示。

表1 不同参数设计的聚光器的聚光比  $CR$

Table 1 Concentration ratio( $CR$ )with different design parameters

$n$	$\theta_0 / (^\circ)$					
	0	5	10	15	20	30
2	—	—	—	1.81	1.97	—
3	—	1.71	—	2.02	—	2.65
5	—	—	2.04	2.22	—	—
$\infty$	2.00	—	—	—	—	—

#### 3.1.1 不同平面反射镜数量 $n$ 对光学效率的影响

在表 1 中取  $\theta_0 = 15^\circ$ ,  $n = 2, 3, 5$  的聚光器建立三维模型,设置盖板的透射率  $\tau = 0.94$ 、吸收体的吸收率  $\alpha = 1$ 、平面镜的反射率  $\rho = 0.9$ ,对不同太阳入射角下的光学性能进行模拟,结果如图 4 所示。光学效率随着  $\theta$  的增大而增大,这是因为平均反射次数逐渐减小。当入射角  $\theta < \theta_0 = 15^\circ$ ,聚光器并不能完全吸收入射的太阳光,有部分被反射逸出,随着平面镜块数的增加,逸出光线越多,光学效率越低;而当  $\theta > \theta_0 = 15^\circ$  时,可以看出  $n$  对光学效率影响不大,仅在入射角为  $\arctan(CR)$  附近会有一些影响,这主要是因为不同反射次数的光线的比例不一样造成的。在  $\theta < \arctan(CR)$  时,  $CR$  越大,平均光学效率越小;当  $\arctan(CR) \leq \theta \leq 90^\circ$ ,光线透过盖板直射吸收体,光学效率达到理论最大值 94%。

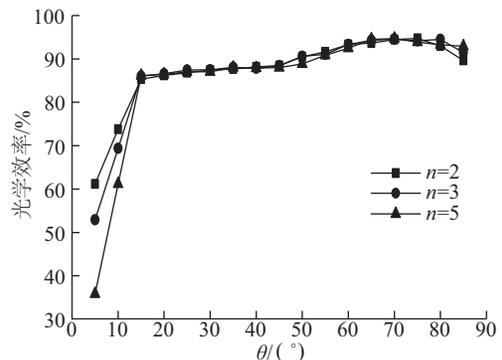


图4 不同平面反射镜数量  $n$  对光学效率的影响

Fig. 4 Effect of different  $n$  on optical efficiency

### 3.1.2 不同设计角 $\theta_0$ 对光学效率的影响

在表 1 中取  $\theta_0$  分别为  $5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ ， $n=3$  的聚光器建立三维模型，设置  $\tau=0.94$ 、 $\alpha=1$ 、 $\rho=0.9$ ，模拟结果如图 5 所示，前述分析可知在入射角达到  $\arctan(CR)$  时，聚光器的光学效率达到最高值，因此当  $\theta_0$  越大， $\theta < \arctan(CR)$  时的光学效率较小。

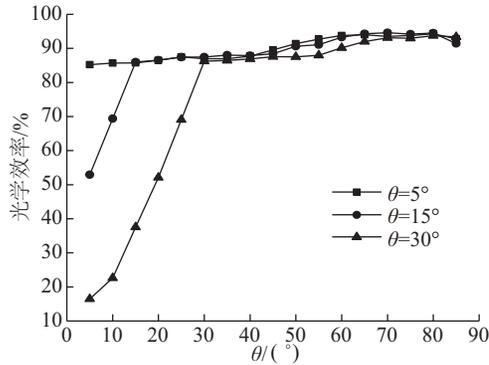


图 5 不同设计角  $\theta_0$  对光学效率的影响

Fig. 5 Effect of different  $\theta_0$  on optical efficiency

综上所述，不管是通过增大  $\theta_0$  还是增大  $n$  使聚光比  $CR$  增大的方式，均会在一定程度上降低  $\theta < \arctan(CR)$  时的平均光学效率。

### 3.1.3 聚光比相同时的光学效率

选取表中  $CR=2$  的 4 个聚光器，分别为  $\theta_0=20^\circ$ 、 $n=2$ ， $\theta_0=15^\circ$ 、 $n=3$ ， $\theta_0=10^\circ$ 、 $n=5$  以及  $\theta_0=0^\circ$ 、 $n=\infty$ （抛物面），模拟计算结果如图 6 所示，对不同组合的  $\theta_0$  和  $n$ ，只要聚光比相同，当  $\theta \geq \theta_0$  时，不同聚光器的光学效率均相同。 $\theta_0$  取决于当地的地理位置，因此调整平面镜块数  $n$  以满足  $CR$  的要求。

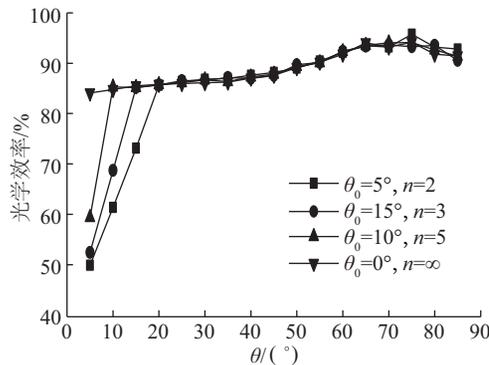


图 6 聚光比均为 2 的光学效率

Fig. 6 Optical efficiency with an identical  $CR$  is 2

### 3.1.4 反射率对光学效率的影响

同样设置  $\tau=0.94$ 、 $\alpha=1$ 、 $\rho$  分别取 0.80、0.85、0.90、0.95 和 1.00，图 7 为对  $\theta_0=15^\circ$ 、 $n=3$  的聚光器，不同  $\theta$  下，光学效率随反射率的变化情况，根据幂指数曲线拟

合情况可估算某一入射角  $\theta$  下的平均反射次数，并可得到形如  $\eta_{op}(\theta)=k \cdot \rho^b$  的光学效率表达式如表 2 所示，表征在某一入射角下光学效率与反射率的关系， $k$  为在理想吸收体下考虑了盖板透射率、遮挡损失、模型误差后的系数， $b$  为平均反射次数，根据计算结果，二者最大平均反射次数为  $\theta=\theta_0=15^\circ$  时的 0.8549 次。

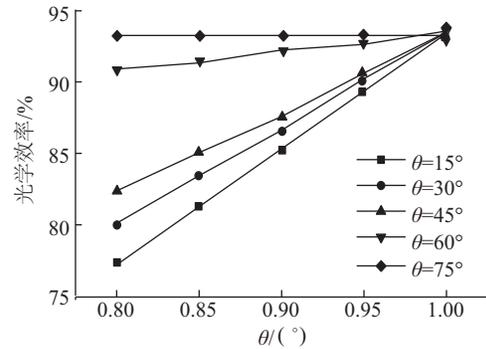


图 7 不同入射角  $\theta$  下光学效率随反射率的变化情况

Fig. 7 Change of optical efficiency with reflectivity in different solar incidence angle  $\theta$

表 2 不同入射角下拟合的  $k$  和  $b$

Table 2 Fitting  $k$  and  $b$  at different incidence angles  $\theta$

$\theta/(^\circ)$	$\theta_0=15^\circ, n=3$	
	$k$	$b$
15	0.9338	0.8549
30	0.9342	0.6943
45	0.9331	0.5678
60	0.9344	0.1289
75	0.9326	0.0000

## 3.2 吸收体上的能流分布

对比分析具有相同聚光比的聚光器的聚光效果，分别模拟表中  $CR=2$  的 4 个聚光器在入射角为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  时吸收体上的能流分布，设置  $\tau=0.94$ 、 $\alpha=1$ 、 $\rho=0.9$ ，结果如图 8 所示。聚光器具有类似的规律： $X$  轴的取值，在  $X \in [-100, -50]$  和  $X \in [-50, 0]$  这 2 段的分布具有明显的差异，当入射角增大，在  $[-100, -50]$  段，辐射照度波动明显，而在  $[-50, 0]$  段小幅波动趋于均匀分布。对于  $n$  较小的聚光器具有更好的匀光效果，将两段分开来看，在各自区间内均有着良好的均匀性，吸收体上的能流分布分为差别明显的 2 段，因此若用于光伏系统，推荐将光伏组件分别敷设。随着  $\theta$  增大，峰值位置向  $X$  负向移动，且峰值逐渐减小，最后趋于均匀分布。由图可知，减小  $n$  值有利于获得更均匀的能流分布。

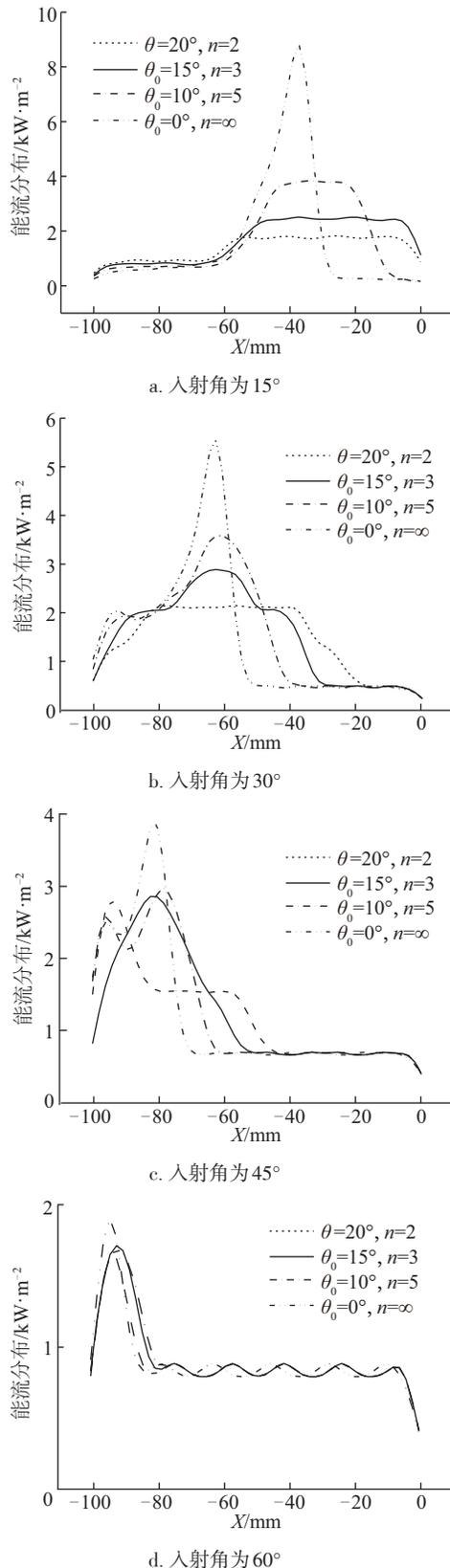


图8 不同入射角下吸收体能流分布

Fig. 8 Energy flux density on absorber at different incidence angles

## 4 结 论

本文提出一种新型的非对称非跟踪型低倍反射聚光器,以平面代替抛物面可极大简化加工工艺,且结构扁平,光学效率高。利用基于蒙特·卡罗(Monte Carlo)算法的光线追迹软件建立光学仿真模型,分析聚光器的能流分布和光学效率,得到如下结论:

1) 聚光器可完全接收的入射角范围为 $[\theta_0, 90^\circ)$ ,增大 $n$ 和 $\theta_0$ 均可以增大聚光器的聚光比。

2)  $\tau=0.94$ 、 $\alpha=1$ 、 $\rho=0.9$ 时,聚光器的光学效率在 $[\theta_0, 90^\circ)$ 的入射角范围内,达到85%以上,且随着入射角增大而增大;对不同组合的 $\theta_0$ 和 $n$ ,只要 $CR$ 相同,当 $\theta \geq \theta_0$ 时,不同聚光器的光学效率均相同。

3) 聚光均匀性较好,减小 $n$ 值有利于获得更均匀的能流分布。

### [参考文献]

- [1] SELLAMI N, MALLICK T K. Optical efficiency study of PV crossed compound parabolic concentrator[J]. Applied energy, 2013, 102: 868-876.
- [2] ATHEYAYA D, TIWARI A, TIWARI G N, et al. Analytical characteristic equation for partially covered photovoltaic thermal (PVT) compound parabolic concentrator (CPC)[J]. Solar energy, 2015, 111: 176-185.
- [3] TRIPATHI R, TIWARI G N, AL-HELAL I M. Thermal modelling of  $N$  partially covered photovoltaic thermal (PVT)-compound parabolic concentrator (CPC) collectors connected in series[J]. Solar energy, 2016, 123: 174-184.
- [4] WELFORD W T, WINSTON R. High collection nonimaging optics[M]. Academic Press, 2012.
- [5] KARLSSON B, WILSON G. MaReCo design for horizontal, vertical or tilted installation[C]// Proceedings of EuroSun 2000, Copenhagen, Denmark.
- [6] RATISMITH W, FAVRE Y, CANAFF M, et al. A non-tracking concentrating collector for solar thermal applications[J]. Applied energy, 2017, 200: 39-46.
- [7] 王科. 复合抛物面聚光型太阳能电热联用系统性能实验[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.  
WANG K. Experimental study of hybrid solar PV/T system with compound parabolic concentrator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [8] 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.
- [9] 肖红升, 夏宁, 严冬春. 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.
- XIAO H S, XIA N, YAN D C. Design and performance reasearch of a simple non- involute convex CPC condenser [J]. Acta energiae solaris sinica, 2015, 36 (1): 167-172.
- [10] RABL A. Active solar collectors and their applications [M]. Oxfor: Oxford University Press on Demand, 1985.
- [11] GORDON J M. Simple string construction method for tailored edge-ray concentrators in maximum-flux solar energy collectors[J]. Solar energy, 1996, 56(3): 279-284.
- [12] FRENIERE E R, GREGORY G G, HASSLER R A. Edge diffraction in Monte Carlo ray tracing [J]. Optical design and analysis software, 1999, 3780(1): 151-157.
- [13] DISNEY M I, LEWIS P, NORTH P R J. Monte Carlo ray tracing in optical canopy reflectance modelling [J]. Remote sensing reviews, 2000, 18(2-4): 163-196.
- [14] WINSTON R, WELFORD W T. Design of nonimaging concentrators as second stages in tandem with image-forming first-stage concentrators [J]. Applied optics, 1980, 19(3): 347-351.
- [15] DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar engineering of thermal processes[M]. New York: Wiley, 1980.

## DESIGN AND OPTICAL PERFORMANCE SIMULATION OF A NON-TRACKING ASYMMETRIC COMPOUND PLANE SOLAR CONCENTRATOR

Wang Zhe, Duanmu Lin, Li Xiangli, Shu Haiwen

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** This paper presents a new type of non-tracking asymmetric compound plane solar concentrator. The design method is presented. The energy distribution of the absorber and the optical efficiency are analyzed by using an optical simulation software based on Monte Carlo ray tracing method. The results show that the increase of the number of plane mirror ( $n$ ) and design angle ( $\theta_0$ ) can increase the geometric concentration ratio ( $CR$ ). The concentrators with same  $CR$  have the same optical efficiency when the incident angle is greater than  $\theta_0$ . Decreasing  $n$  value is beneficial to obtain more uniform light intensity distribution.

**Keywords:** solar concentrator; energy efficiency; optical property; optical simulation model; non-tracking; asymmetric