

平板吸收体非对称复合抛物聚光器结构及特性研究

章 波^{1,2}, 陈 飞^{1,2}, 段鹏飞^{1,2}, 杨春曦², 别 玉^{1,2}

¹昆明理工大学太阳能工程研究所, 云南 昆明 650500;

²昆明理工大学化学工程学院, 云南 昆明 650500

摘要 针对平板吸收体非对称复合抛物聚光器(PACPC)的结构及特性进行了研究。构建了平板吸收体复合抛物聚光器(CPC)面形结构模型,在其基础上进一步建立了 PACPC 结构方程,并获得解析解。采用光学设计软件 TracePro 对所构建的 PACPC 面形结构的光学特性进行了光学模拟,探究其光学特性,发现随着光线入射角的变化,吸收体表面接收到的辐射能分布不均匀。根据太阳能直散辐射理论,分别计算了 PACPC 在全年中的直散辐射量的采集,结果表明 PACPC 系统的年采光量较相同面积的平板吸收体系统得到了显著提高,平均年采光量提高了 15.28%。

关键词 几何光学; 太阳能; 复合抛物聚光器; 非对称

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1208002

Research on Structure and Characteristics of Asymmetrical Compound Parabolic Concentrator with Plane Absorber

Zhang Bo^{1,2}, Chen Fei^{1,2}, Duan Pengfei^{1,2}, Yang Chunxi², Bie Yu^{1,2}

¹*Institute of Solar Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;*

²*School of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China*

Abstract The structure and characteristics of asymmetrical compound parabolic concentrators with plane absorber (PACPC) is researched. The surface structure model of compound parabolic concentrators (CPC) with plane absorber is established, and the structural equation of PACPC is further established on the basis of CPC, and the analytic solution is obtained. The optics characteristic of the established PACPC surface structure model is simulated by the optical design software TracePro, and the optical characteristics are investigated. It is found that, with the change of incident angle of light, the radiant energy at the absorber surface is distributed unevenly. According to the solar direct and dispersion radiation theory, the acquisition of direct and scattered radiation in the course of the year is calculated by numerical calculation. The results show that the average annual lighting quantity obtained by the system of PACPC is obviously more than that of the plane absorber system with same area, and the increment is 15.28%.

Key words geometric optics; solar energy; compound parabolic concentrators; asymmetry

OCIS codes 080.2740; 220.4830; 000.6850; 260.2160

1 引 言

常规能源的广泛使用,推动了社会不断进步,同时也带来了温室效应、环境污染、生态破坏等负面效应,

收稿日期: 2017-06-12; **收到修改稿日期:** 2017-08-04

基金项目: 昆明理工大学引进人才科研启动基金(KKSY201505054)、云南省科技计划项目(2017FB092)、国家自然科学基金项目(61364002)

作者简介: 章 波(1993—),男,硕士研究生,主要从事太阳能光热利用方面的研究。E-mail: zh1516qian@163.com

导师简介: 陈 飞(1987—),男,博士,硕士生导师,主要从事新能源科学与工程方面的研究。E-mail: solarcf@163.com (通信联系人)

因此诸多国家着力开发清洁型的可再生能源。太阳能作为可再生能源,有无污染、储量大、分布广等优势,具有较大的发展潜力^[1-2]。

太阳能资源在常规利用时,辐照密度较低,为获得高密度的光能,需对太阳光线进行聚光处理。在对聚光系统的长期研究中,主要有主动跟踪型和固定光口型两种模式,其中固定光口型以无需跟踪装置、运行稳定、聚光高效等优点,引起了国内外学者的广泛关注^[3-4]。Winston^[5]对复合抛物聚光器(CPC)的聚光性能进行了分析研究,在不较大影响 CPC 光学性能的前提下对面形进行了截短,为 CPC 的发展提供了研究方向。Rabl^[6]对 CPC 的聚光原理及光学性能进行了分析研究,为太阳能聚光系统的发展提供了理论基础。Yu 等^[7]在不同方向下对不同出射角 CPC 的年采光量进行了研究,构建了太阳能光伏系统,结果表明东西向系统采光量随着出射角增大而增大,光电转换效率随着出射角增大而降低。Jiang 等^[8]在太阳能集热系统中以矿物油作为传热介质,发现在 200 °C 中温条件下,CPC 的内外复合系统集热效率分别为 42% 和 50%。Antonelli 等^[9]运用计算流体动力学(CFD)模拟技术探究了平板吸收体 CPC 和圆形吸收体 CPC 的传热性能,研究发现平板系统吸收的太阳辐射能只占选择性表面的一半,而圆形系统吸收的辐射能较多。Tang 等^[10]采用多个平面镜取代抛物面构成平面聚光器,研究结果表明复合平面聚光器的接收半角随着镜面数增加逐渐趋于 CPC 的接收半角,且与复合平面聚光器采光量相同。Xie 等^[11]在对平板光伏/光热系统的研究中,对不同类型的 CPC 进行了性能对比,研究发现几何聚光比为 4 的 CPC 聚光均匀性比全 CPC 高 20%,采光量提高了 2%,效率提高了 71%。随后,Xie 等^[12]在不影响 CPC 光学效率的前提下,对 CPC 进行截短研究,发现低比率截短和高比率截短 CPC 的光学性能基本相同,但低比率截短耗材却只有高比率截短的一半,对 CPC 的生产应用提供了方向。Ustaoglu 等^[13]基于吸收体辐射均匀性的研究,对 CPC 进行不同比例的截短,研究结果表明随着截短比率增大,辐射能缓慢降低,直到截短比达到 0.5 时,最大辐射能降至一半。冯志康等^[14]基于真空管和三角形腔体两种不同接收器对光线的吸收效率研究,优化了腔体吸收光线最佳的临界安装位置。Yu 等^[15]采用理论数值计算的方法得到 CPC 的光学聚光比对漫反射影响较小,年平均采光量随着漫反射率的增大而减小。杨光辉等^[16]设计一种用于聚光光伏模组的全反射式二次光学元件来提高太阳能电池接收的入射光能量和聚光焦斑均匀性。

通常 CPC 采光系统在运行过程中,为达到最大采光量,须将聚光器与地面成一定倾角摆放,这样就降低了系统稳定性,增大了对光场的需求,并且增加了耗材,提高了成本^[17-19]。因此本文研究了平板吸收体非对称 CPC(PACPC)的面形结构以及在不同入射角光线的光学特性,并应用其光学特性构建了 PACPC 系统,探究其采光性能,研究结果为聚光器的多样化设计提供了参考。

2 面形理论建模

2.1 平板吸收体 CPC 面形结构

平板吸收体 CPC 结构见图 1,图中 NO 段和 AM 段分别为 CPC 南北面面形结构。OA 段为平板吸收体,以吸收体左端点 O 点为原点建立 xOy 坐标系, L 为平板吸收体长度, θ_a 为接收半角^[20]。

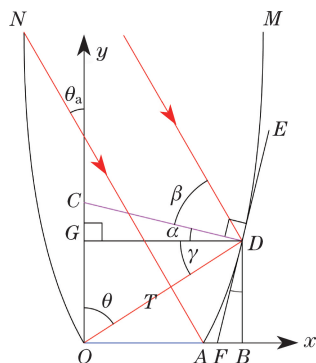


图 1 平板吸收体 CPC 结构图

Fig. 1 Structure of CPC with plane-absorber

根据边缘光线原理,过 N 点以 θ_a 角度进入 CPC 的太阳光线 NA 恰好落在 AM 段的最底端,光线经反射到达吸收体最左端 O 点,当其他以 θ_a 角度进入 CPC 的入射光线(平行于 NA 光线)落在 AM 段面形上,经反射会聚仍然到吸收体的最左端 O 点。由反射定律可知,当任意入射光线进入角度小于 θ_a 并落在 AM 段面形上,被 AM 段面形反射后,最终都能达到吸收体 OA 表面。在图 1 中,由 AM 段可知, D 为 AM 上的动点, OD 的距离为 T , EF 段为 D 点的切线,与 x 轴相交于 F 点。过 D 点分别作 EF 段的垂线 DC 、 y 轴的垂线 DG 以及 DO 连线, DO 连线与 y 轴成夹角 θ ,设 D 点坐标为 (x, y) ,根据几何关系得:

$$\begin{cases} x = T \sin \theta \\ y = T \cos \theta \end{cases}, \theta_a < \theta < \frac{\pi}{2}, \quad (1)$$

D 点切线与 x 轴相交得 F 点,对 D 点微分得关系式:

$$\frac{T' \cos \theta - T \sin \theta}{T' \sin \theta + T \cos \theta} = \cot \frac{\theta - \theta_a}{2}, \quad (2)$$

式中 T' 为 D 点结合(1)式微分得到的 T 的导数,以面形 AM 与吸收体 OA 的连接公共点 A 为临界点,求解微分方程有:

$$T = \frac{L(1 + \sin \theta_a)}{1 - \cos(\theta + \theta_a)}, \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式得到 AM 的参数方程。同理得到 ON 段面形参数方程,联立左右面形得到整个平板吸收体 CPC 面形结构。

2.2 PACPC 面形结构

根据聚光器设计原理,设计一种 PACPC 面形结构。聚光器东西向放置,因太阳在南北回归线之间移动,为满足聚光器对光线的全年捕获,将夏至和冬至作为临界点设计面形结构,以聚光器放置于北半球为例。

夏至时,太阳直射点位于北回归线,此时赤纬角 δ 有^[21]:

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos A + 0.070257 \sin A - 0.006758 \cos 2A + 0.000907 \sin 2A - 0.002697 \cos 3A + 0.00148 \sin 3A, \quad (4)$$

式中

$$A = 356(N - 1) \frac{360}{365} \frac{\pi}{180}, \quad (5)$$

式中 N 为日子数,将此时的太阳光线投影到南北横截面上可得:

$$n_{z1} = \cos \delta \sin \varphi \cos \omega - \sin \delta \cos \varphi, \quad (6)$$

$$n_{x1} = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi, \quad (7)$$

$$\theta_{a1} = \frac{180}{\pi} \arctan \frac{n_{z1}}{n_{x1}}, \quad (8)$$

式中 n_{z1} 为太阳光线在南北横截面的投影的纵向分量, n_{x1} 为太阳光线在南北横截面的投影的横向分量, φ 为当地纬度, ω 为时角。同理,冬至时,太阳直射点位于南回归线,得:

$$\theta_{a2} = \frac{180}{\pi} \arctan \frac{n_{z2}}{n_{x2}}, \quad (9)$$

将 θ_{a1} 和 θ_{a2} 分别代入(2)式中,得南面、北面形解析式分别为:

$$\begin{cases} x = \frac{L \sin \alpha_2 (1 + \sin \theta_{a1})}{1 - \cos(\theta_{a1} + \alpha_2)} - \frac{L}{2} \\ y = \frac{L \cos \alpha_2 (1 + \sin \theta_{a1})}{1 - \cos(\theta_{a1} + \alpha_2)} \end{cases}, \theta_{a1} < \alpha_2 < \frac{\pi}{2}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} x = \frac{L \sin \alpha_1 (1 + \sin \theta_{a2})}{1 - \cos(\theta_{a2} + \alpha_1)} - \frac{L}{2} \\ y = \frac{L \cos \alpha_1 (1 + \sin \theta_{a2})}{1 - \cos(\theta_{a2} + \alpha_1)} \end{cases}, \theta_{a2} < \alpha_1 < \frac{\pi}{2}. \quad (11)$$

在平板吸收体中点处重新建立坐标系,结构见图 2, PACPC 系统工作时,水平放置于地平面,为了使系

统易于工业集成、方便安装调试及运行状态稳定,南北面面形结构采用同高度设计,以北面面形为基础,对南面面形进行截短,得到截短 PACPC 面形结构,如图 3 所示。

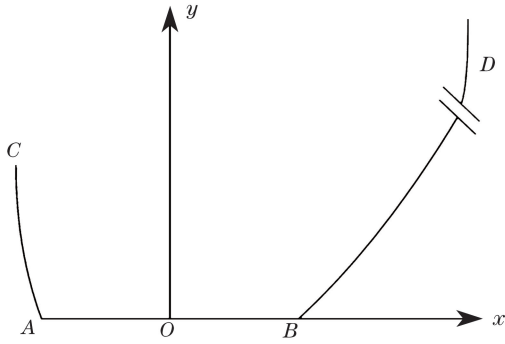


图 2 PACPC 结构图

Fig. 2 Structure of PACPC

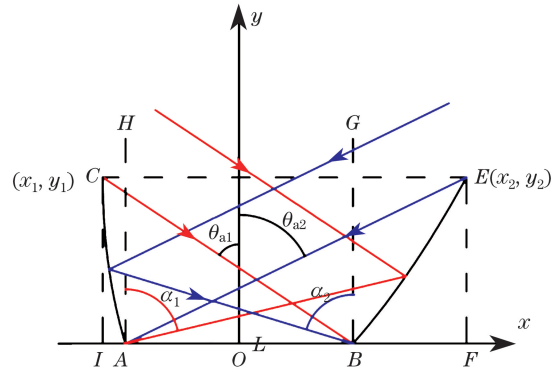


图 3 截短 PACPC 结构图

Fig. 3 Structure of the truncation PACPC

对 PACPC 进行等高截短,可得到:

$$y_1 = \frac{L \cos \alpha_2 (1 + \sin \theta_{a2})}{1 - \cos(\theta_{a2} + \alpha_2)}, \quad (12)$$

式中

$$\alpha_2 = \arctan \frac{D + \sqrt{D^2 - 4FD}}{2C}, \quad (13)$$

式中 C, D, F 分别为:

$$C = \left(\frac{y \sin \theta_{a2}}{L + L \cos \theta_{a2} + y \cos \theta_{a2}} \right)^2 + 1, \quad (14)$$

$$D = - \frac{2y^2 \sin \theta_{a2}}{(L + L \cos \theta_{a2} + y \cos \theta_{a2})^2}, \quad (15)$$

$$F = \left(\frac{y}{L + L \cos \theta_{a2} + y \cos \theta_{a2}} \right)^2 - 1, \quad (16)$$

将 α_2 值代入到(10)式中,得到 x_2 的值,确定 E 点的坐标,从而得到 PACPC 面形结构。

2.3 PACPC 光学性能计算

以当地典型气象年为日总辐射数据为依据^[22],采用太阳辐射直散分离理论,获得不同入射角光线在 PACPC 中各个时间段的采光量,再对采光量进行求和运算,获得系统年采光量。以大气层外的辐射量作为标准^[23],大气层外法向平面的太阳辐照度 G 为

$$G = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360^\circ N}{365} \right) (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega), \quad (17)$$

式中 G_{sc} 为太阳常数。将当地数据代入得:

$$G_0 = a(b + c \cos F + d \sin F + e \cos 2F + f \sin 2F), \quad (18)$$

式中 $a = 1353, b = 1.00011, c = 0.034221, d = 0.00128, e = 0.000179, f = 0.000077, F$ 的计算公式为:

$$F = (N - 1) \frac{360}{365} \frac{\pi}{180}, \quad (19)$$

对上式求和得大气层外一天内太阳的总辐射量 H_0 :

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360^\circ N}{365} \right) I, \quad (20)$$

式中

$$I = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega_{ss} + \frac{2\pi \omega_s}{360^\circ} \sin \varphi \sin \delta, \quad (21)$$

式中 ω_s 为日出时角, ω_{ss} 为日落时角。根据太阳直散分离理论, 可以得到太阳散辐射辐射量 H_d :

$$H_d = H_{av} \left[0.775 + 0.347 \left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{2} \right) - J \right], \quad (22)$$

式中 H_{av} 为月平均日太阳总辐射量, 可以从典型气象年数据获取, J 的表达式为:

$$J = \left[0.505 + 0.261 \left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cos \left[2 \left(\frac{H_{av}}{H_0} - 0.9 \right) \right]. \quad (23)$$

日落时角 ω_{ss} 为:

$$\omega_{ss} = \arccos(-\tan \delta \tan \varphi). \quad (24)$$

由太阳散辐射辐射量可以得到散辐射辐照度 I_{ds} 为:

$$I_{ds} = H_d \pi (\cos \omega - \cos \omega_{ss}) K, \quad (25)$$

式中

$$K = \frac{1}{1440 (\sin \omega_{ss} - \omega_{ss} \cos \omega_{ss})}. \quad (26)$$

PACPC 所接收的直散辐射量为面形上的各部分所得直散辐射量之和, 经过理论分析可得, 面形对直散辐射量的分段情况分别如图 4、图 5 所示。

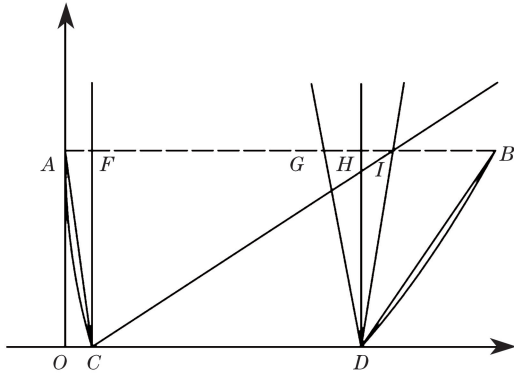


图 4 散辐射分段结构图

Fig. 4 Segmented structure of scattered radiation

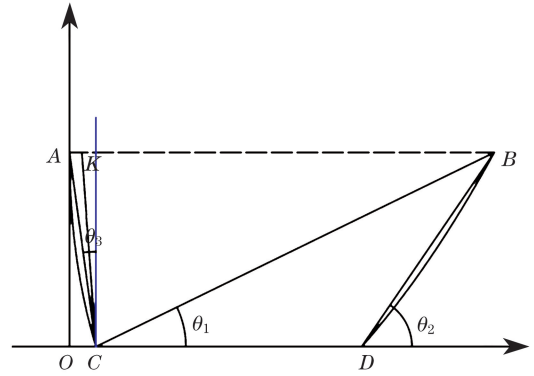


图 5 直辐射分段结构图

Fig. 5 Segmented structure of direct radiation

散辐射辐射量 E_{ds} 计算公式 (具体见附录 1) 为:

$$E_{ds} = \sum_{k=1}^n \int d\varphi \int I_{dsk} \sin \theta \cos \theta d\theta, \quad (27)$$

式中 I_{dsk} 为不同时刻的光场强度, 而水平面获得的总辐照度 I_z 由散辐射辐照度 I_{ds} 与直辐射辐照度 I_b 组成, 计算公式为:

$$I_z = I_b + I_{ds} = (M + Q \cos \omega) [H_{av} \pi (\cos \omega - \cos \omega_{ss})] K, \quad (28)$$

式中 M 和 Q 的表达式为:

$$M = 0.4090 + 0.5016 \sin \left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{3} \right), \quad (29)$$

$$Q = 0.6609 - 0.4767 \sin \left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{3} \right). \quad (30)$$

直辐射辐射能 E_b 计算公式 (具体见附录 2) 为:

$$E_b = \sum_{k=1}^n I_b S_k, \quad (31)$$

式中 S_k 为不同时刻的采光面积, 水平面的总太阳辐射能 E_{zt} 包括直辐射辐射能、散辐射辐射能两个部分, 因此有计算公式:

$$E_{zt} = E_b + E_{ds}. \quad (32)$$

3 结果与讨论

3.1 PACPC 光学性能

根据昆明当地纬度,理论分析得到 PACPC 面形数学模型,采用光学软件 TracePro 对面形模型进行光学验证,利用光线跟踪技术反映 PACPC 对太阳光线的会聚特性。在进行光学特性研究时,为了较为直观地体现 PACPC 面形对入射光线的会聚特性,在光学软件 TracePro 模拟实验中,对 PACPC 系统的面形参数采用极端化设置,吸收体为绝对黑体(吸收体完全吸收光线,避免有反射光线影响),反射面为镜体(实现反射面完全反射入射光线,且无漫反射),具体参数见表 1。

表 1 PACPC 参数

Table 1 Parameters of PACPC

Number	Item	Symbol	Value
1	Absorptivity	α_{abs}	1
2	Reflectivity of PACPC	ρ_{CPC}	1
3	Acceptance half-angle of south	θ_{a1}	56.4978°
4	Acceptance half-angle of north	θ_{a2}	6.5339°

随着太阳移动,光线入射角不断变化,由于面形结构的非对称设计,聚光器对不同入射角的光线表现出不同的会聚能力。以太阳垂直入射进入聚光器为 0° ,南面入射光线为正,北面入射光线为负,对太阳光线在聚光器中的会聚情况进行了分析,具体光学验证结果见图 6 和图 7。

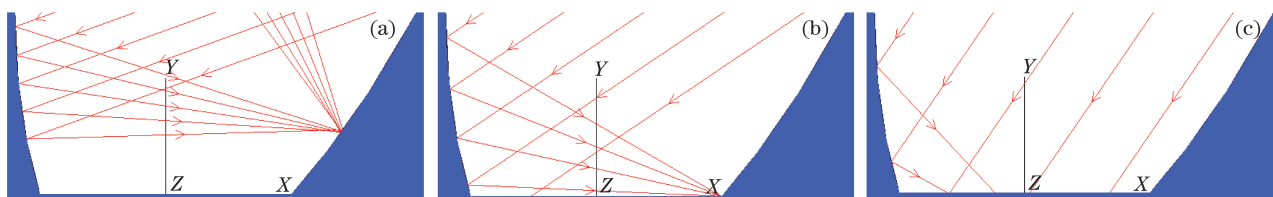
图 6 PACPC 对南面光线的会聚。(a)光线入射角为 70° ;(b)光线入射角为 56.4978° ;(c)光线入射角为 35°

Fig. 6 Concentrating rays from south of PACPC. (a) Incident angle of light is 70° ;
(b) incident angle of light is 56.4978° ; (c) incident angle of light is 35°

如图 6 所示,光线从聚光器的南面照射进来,图 6(a)中光线入射角大于北面反射面的接收半角,部分光线被南面反射面阻挡,不能进入聚光器,而高出南面反射面的部分光线照射在北面反射面,根据光线反射原理,北面反射面将接收的光线从聚光器中反射出去,光线不能到达吸收体上。随着光线入射角减小到北面反射面的接收半角时,见图 6(b),光线通过采光口进入到聚光器,其中部分光线直接照射在吸收体表面上,其余光线照射在北面反射面上,经过反射,全部会聚到吸收体的右端点,南面反射面由于面形阻挡,没有光线进入到反射面上。从图 6(c)可以看出,当光线入射角小于北面反射面的接收半角时,仍没有光线进入到南面反射面,小部分光线照射到北面反射面,经过反射面反射,全部会聚到吸收体上,大部分光线直接照射在吸收体表面上,此时吸收体上既有直射光线,也有反射光线。

由图 6 分析可知,当太阳光线从南面进入聚光器时,PACPC 对光线的会聚以北面反射面的接收半角为临界点;光线入射角减小到北面反射面的接收半角,聚光器开始工作,北面反射面将光线会聚到吸收体上,随着光线入射角的减小,反射到吸收体的光线从吸收体右端点往左端点移动,而南面反射面受到面形影响,无光线照射进入,直接照射在吸收体上的光线随着光线入射角减小而逐渐增多。

如图 7 所示,当光线从聚光器的北面照射进来时,图 7(a)中光线入射角小于南面反射面的接收半角,进入聚光器的部分光线经过反射进入吸收体,其余光线直接照射在吸收体表面上。随着光线入射角增大到南面反射面的接收半角时,见图 7(b),通过采光口进入到反射面的光线经过南面反射面反射,全部会聚到吸收体右端点,而直接照射在吸收体上的光线范围不变。当光线入射角大于南面反射面的接收半角时,如图 7(c)所示,无光线照射在北面反射面,到达南面反射面的部分光线,经过反射面反射到北面反射面,再经过反射从采光口逃逸,无光线会聚到吸收体上。

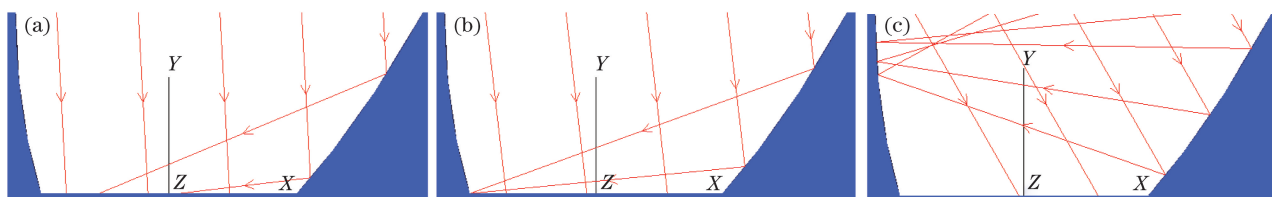


图 7 PACPC 对北面光线的会聚。(a)光线入射角为 1° ;(b)光线入射角为 -6.5339° ;(c)光线入射角为 -30°

Fig. 7 Concentrating rays from north of PACPC. (a) Incident angle of light is 1° ;
(b) incident angle of light is -6.5339° ; (c) incident angle of light is -30°

由图 7 分析可知,当太阳光线从聚光器北面照射进来时,PACPC 对光线的会聚以南面反射面的接收半角为临界点,光线入射角小于南面反射面接收半角时,光线经过南北反射面反射,都能到达吸收体,无光线逃逸;当光线入射角大于南面反射面接收半角时,南面反射面不能将光线反射到吸收体上,反射的光线全部逃逸。

从聚光器对不同入射角光线的会聚情况可以看出,不同入射角光线进入到聚光器中,表现的光学特性不同。吸收体所会聚的光线,既有直接照射到吸收体上的,也有经过反射面反射到吸收体上的。然而光线在反射过程中存在损失,不同反射率对光学效率的影响如图 8 所示,从图中可以看出,当光线入射角在聚光器接收半角内时,光线经过反射面反射进入到吸收体,反射面反射率为 1 时,光学效率达到最高,实现光线的完全会聚,光学效率随着反射率减小而降低,当反射率 $r=0.8$ 时,聚光器光学效率为 0.92;而当光线入射角大于接收半角时,吸收体上无反射光线,接收到的都是直射光线,光学效率不受反射面的反射率影响,保持不变。

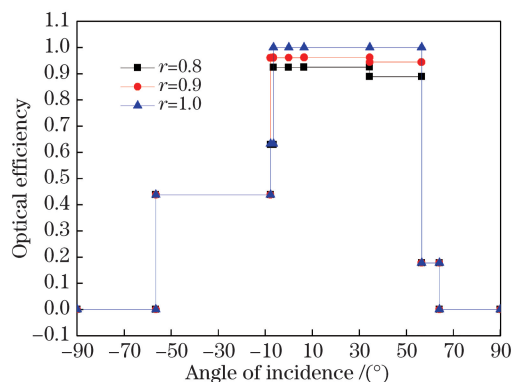


图 8 不同反射率的 PACPC 的光学效率

Fig. 8 Optical efficiency of PACPC with different reflectivities

传统 CPC 系统运行时,为捕获足够多的太阳光线,实现高效聚光,聚光器须与地面成一定倾角摆放,且倾角随着摆放地理位置的纬度变化而变化,大大降低了系统稳定性。而所构建的 PACPC 系统摆脱了传统 CPC 系统的倾角限制,实现高效聚光的同时,也可以在地面上平躺放置,提高了系统运行稳定性,增大了系统对太阳光线的捕获能力。

PACPC 面形会聚太阳光线到达吸收体表面,具有普适性,不受光线辐射功率强度的影响,吸收体表面直射辐射归一化能流密度分布随光线入射角变化的特性见图 9。从图 9 中可以看出,当光线入射角小于北面面形临界角的负值(图 9 中的 -60° 和 -90°),和大于 64.0993° 时(图 9 中的 90°),PACPC 面形的任何位置辐照度恒为零,这一点与图 6 和图 7 的直观图形相一致。另一方面,随着光线入射角度的增加($-90^\circ \sim 90^\circ$),吸收体表面开始时不能采集到辐射能,然后逐渐能够采集到辐射能,最后又不能采集辐射能。吸收体表面采集到的辐射能随着光线入射角增大逐渐增加,到达峰值后又逐渐减少,PACPC 的会聚能力呈现出先增后减的趋势,同时,吸收体表面采集到的辐射能峰值焦斑位置从右到左移动。能流密封均匀性方面,随着光线入射角度的增加,均匀性呈现出先变差后变好的趋势,吸收体表面接收到的辐射能非均匀分布,在光线入射角分别为 -30° 、 0° 、 30° 、 60° 时,吸收体表面归一化因子的方差分别为 0.0038、0.0178、0.0247、0.0031。

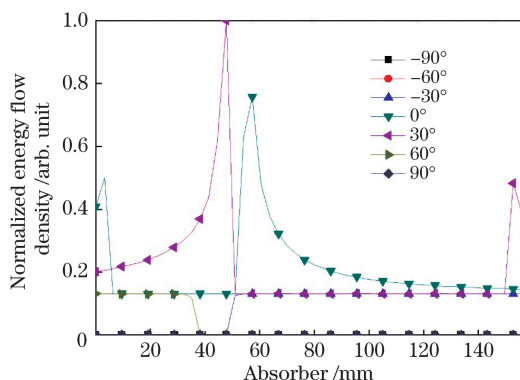


图 9 吸收体表面归一化能流密度分布图

Fig. 9 Normalized energy flow density distribution on absorber surface

3.2 PACPC 采光性能

基于太阳能系统采光性能计算理论,构建了 PACPC 系统和相同面积的平板吸收体系统,其几何参数见表 2。利用编程计算的方法,分别得到两者对直散辐射能的采集量,如图 10 和图 11 所示。

表 2 PACPC 系统几何参数

Table 2 Geometrical parameters of PACPC system

Number	Item	Symbol	Value /mm
1	Width of plane absorber	W	156
2	Aperture of PACPC	M	249.3836
3	Height of plane absorber	H	113.5496
4	Length of plane absorber	L	1560

从图 10 可以看出,在全年时间段内,PACPC 系统采集的直射辐射能普遍较高,平均每月高出 1.32 MJ,这是因为平板吸收体系统采集直接照射在吸收体上的辐射能,而 PACPC 系统配有非对称 CPC,增大了有效采光面积,提高了对直射的采集。从图 11 可以看出,平板吸收体系统采集的散辐射能普遍较高,PACPC 系统采集的散辐射能比平板吸收体系统全年低 9.10 MJ,且每月平均值保持稳定,这是因为平板吸收体系统接收半球空间的全部散辐射能,而 PACPC 系统在采集散辐射能时,受到南北面形阻挡,有效采光口减小,采集的散辐射量相对有限。

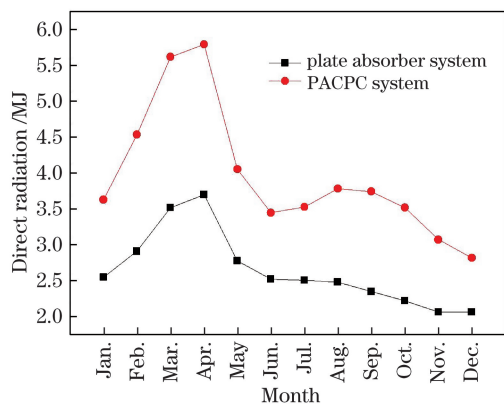


图 10 直射辐射能的采集

Fig. 10 Collection of direct radiation energy

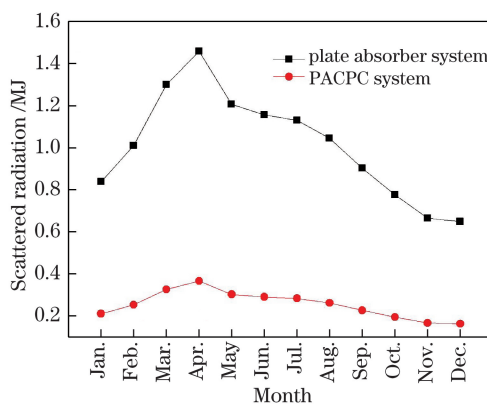


图 11 散辐射能的采集

Fig. 11 Collection of scattered radiation energy

然而系统接收到的散辐射能远远小于直射辐射能,对总辐射能影响较小,PACPC 系统与同面积平板吸收体系统在全年段月平均采光量如图 12 所示,可以看出 PACPC 系统月平均采光量普遍高于平板吸收体系统的月平均采光量。在春分和秋分时,系统采光量相差较大,聚光器作用明显,而在夏至和冬至时,系统采光量相差较小,甚至在 6 月份,两系统采光量相当。PACPC 系统较平板吸收体系统采光量提高情况见图 13,从

图 13 中可以看出,系统采光量提高比随着月份的增加呈现出“M”型分布,且在两分季节月平均采光量提高比较明显,最高达至 23.40%,两至季节提高较为平缓,最低只提高 1.51%。这是因为夏季时,太阳直射点位于北回归线附近,太阳平均高度角较大,吸收体上接收的辐射能较多,南北反射面由于面形阻挡以及接收半角较小,对光线的反射都受到限制,不能会聚光线。至正午时分,光线入射角较小,南北反射面能将光线会聚到吸收体上,但正午时分,太阳高度角变化快,南北反射面工作时间短,反射到吸收体上的光线少,系统采光量提高比小。而在春季和秋季时,太阳直射点位于赤道附近,太阳平均高度角相对夏季较低,日出日落时刻,太阳高度角小,聚光器不工作;随着太阳高度角增大,北面反射面开始会聚光线到吸收体上,而南面反射面仍不工作;当太阳接近中午时刻,南北反射面都能会聚光线,且南北反射面工作时间达到最长时,聚光效果最强。

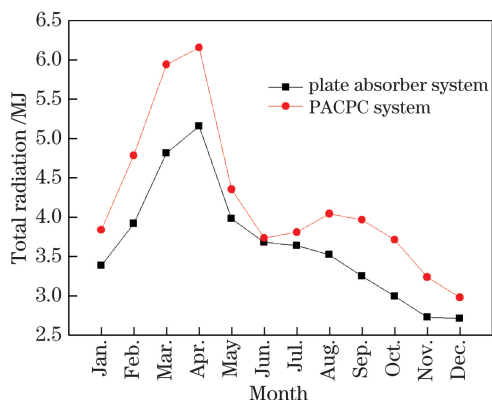


图 12 两种聚光系统采光量

Fig. 12 Lighting quantity of two condensing systems

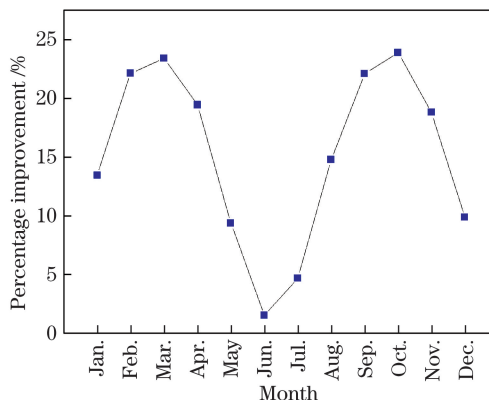


图 13 系统采光量提高比

Fig. 13 Improvement ratio of lighting quantity of the system

冬季时,太阳直射点位于南回归线附近,日出日落时刻,太阳高度角小,光线被南面反射面阻挡,无光线进入到北面反射面,北面反射面不工作。随着太阳高度角增大,北面反射面将光线会聚到吸收体上,相对于夏季,反射面工作时间较长,会聚光线较多,采光量提高比较大。从全年来看,平板聚光器采光量在 4 月最高,达到 5.15 MJ,12 月最低,只有 2.71 MJ,而配置上 PACPC 面形后,系统采光量月平均提高 15.28%,在春季和秋季提高较为明显,分别达到 23.40%和 23.87%。

4 结 论

针对 PACPC 面形结构及所构建的 PACPC 系统进行了理论建模、模拟仿真、数值计算研究,得到以下结论:

- 1) 构建了 PACPC 面形结构的理论模型,并获得其解析解,采用光学设计软件 TracePro 验证了所构建理论模型的正确性及光学性能。
- 2) 应用 PACPC 面形结构光学特性,构建了 PACPC 系统,理论模型数值计算结果表明所构建的系统较相同面积平板吸收体系统有效提高了采光量,平均每月提高 15.28%,在春季和秋季分别提高 23.40%和 23.87%。
- 3) 下一步工作将基于理论所构建的模型,搭建实验平台,进行实验验证,并将实验验证所得到的结果与理论所得的结果进行分析对比,进一步优化实验方案。

附 录

附录 1

$$E_{ds} = E_{ds_1} + E_{ds_2} + E_{ds_3} + E_{ds_4} + E_{ds_5},$$

$$E_{ds_1} = \frac{1}{2} \pi I_{ds} \left[\rho \sin^2 \theta_{a2} (x_F - x_A) + (\rho - 1) \left(x_F - x_A + y \arctan \frac{x_C - x_F}{y} - y \arctan \frac{x_C}{y} \right) + \left(x_F - x_A + y \arctan \frac{x_d - x_F}{y} - y \arctan \frac{x_D}{y} \right) \right] \omega \tau,$$

$$E_{ds_2} = \frac{1}{2} \pi I_{ds} \left[\rho \sin^2 \theta_{a2} (x_G - x_C) + \left(x_G - x_F + y \arctan \frac{x_D - x_G}{y} - y \arctan \frac{x_D - x_F}{y} \right) + \right. \\ \left. (1 - \rho) \left(x_G - x_F - y \arctan \frac{x_G - x_C}{y} + y \arctan \frac{x_F - x_C}{y} \right) \right] \omega \tau,$$

$$E_{ds_3} = \frac{1}{2} \pi I_{ds} \left[\rho (\sin^2 \theta_{a2} + \sin^2 \theta_{a1}) (x_H - x_G) + (1 - \rho) \left(x_H - x_G + y \arctan \frac{x_D - x_H}{y} - \right. \right. \\ \left. \left. y \arctan \frac{x_D - x_G}{y} + x_H - x_G - y \arctan \frac{x_H - x_C}{y} + y \arctan \frac{x_G - x_C}{y} \right) \right] \omega \tau,$$

$$E_{ds_4} = \frac{1}{2} \pi I_{ds} \left[\rho (\sin^2 \theta_{a1} + \sin^2 \theta_{a2}) (x_I - x_H) + (\rho - 1) \left(x_I - x_H - y \arctan \frac{x_I - x_D}{y} + y \arctan \frac{x_H - x_D}{y} \right) + \right. \\ \left. (1 - \rho) \left(x_I - x_H - y \arctan \frac{x_I - x_C}{y} + y \arctan \frac{x_H - x_C}{y} \right) \right] \omega \tau,$$

$$E_{ds_5} = \frac{1}{2} \pi I_{ds} \left[\rho (\sin^2 \theta_{a1}) (x_B - x_I) + (\rho - 1) \left(x_B - x_I - y \arctan \frac{x_B - x_D}{y} + y \arctan \frac{x_I - x_D}{y} \right) + \right. \\ \left. \left(x_B - x_I - y \arctan \frac{x_B - x_C}{y} + y \arctan \frac{x_I - x_C}{y} \right) \right] \omega \tau.$$

附录 2

$$E_b = E_{b_1} + E_{b_2} + E_{b_3} + E_{b_4} + E_{b_5} + E_{b_6} + E_{b_7},$$

$$-\frac{\pi}{2} < \theta_x < \frac{\pi}{2},$$

$$E_{b_1} = 0,$$

$$E_{b_2} = I_b (x_B - y \tan \theta_x) \omega \tau,$$

$$E_{b_3} = I_b [(y \tan \theta_x + x_A) \cdot \rho + x_D - (y \tan \theta_x + x_C)] \omega \tau,$$

$$E_{b_4} = I_b [L + \rho (x_B - L)] \omega \tau,$$

$$E_{b_5} = I_b \left[\rho y \left(\tan \frac{x_C}{y} - \tan \theta_x \right) + L \right] \omega \tau,$$

$$E_{b_6} = I_b (x_B - y \tan \theta_x - x_B + x_D) \omega \tau,$$

$$E_{b_7} = 0.$$

参 考 文 献

- [1] Yan Yunfei, Zhang Zhien, Zhang Li, *et al.* Application and utilization technology of solar energy[J]. Acta Energiæ 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.
- [2] Zhao Bin, Hu Yiqiang, Yang Sen, *et al.* Solar energy review[J]. Chemical Equipment Technology, 2012, 33(1): 57-64.
赵斌, 胡益铸, 杨森, 等. 太阳能综述[J]. 化工装备技术, 2012, 33(1): 57-64.
- [3] Li Guiqiang. Optimization analysis and experimental research of stationary solar concentrator[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
李桂强. 非跟踪型太阳能聚光器的优化分析和实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [4] Santos-González I, García-Valladares O, Ortega N, *et al.* Numerical modeling and experimental analysis of the thermal performance of a compound parabolic concentrator[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 1152-1160.
- [5] Winston R. Principles of solar concentrators of a novel design[J]. Solar Energy, 1974, 16(2): 89-95.
- [6] Rabl A. Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators[J]. Solar Energy, 1976, 18(6): 497-511.
- [7] Yu M J, Yu Y M, Tang R S. Angular distribution of annual collectible radiation on solar cells of CPC based photovoltaic systems[J]. Solar Energy, 2016, 135: 827-839.
- [8] Jiang L, Widjolar B, Winston R. Characterization of novel mid-temperature CPC solar thermal collectors[J]. Energy Procedia, 2015, 70(2): 65-70.
- [9] Antonelli M, Francesconi M, Di Marco P, *et al.* Analysis of heat transfer in different CPC solar collectors: a CFD approach[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101: 479-489.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Ustaoglu A, Alptekin M, Okajima J, *et al.* Evaluation of uniformity of solar illumination on the receiver of compound parabolic concentrator (CPC)[J]. *Solar Energy*, 2016, 132: 150-164.
- [14] Feng Zhikang, Li Ming, Wang Yunfeng, *et al.* Study on optical efficiency characteristics of receivers in a solar parabolic trough concentrator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0122002.
冯志康, 李明, 王云峰, 等. 太阳能槽式系统接收器光学效率的特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0122002.
- [15] Yu Y M, Tang R S. Diffuse reflections within CPCs and its effect on energy collection[J]. *Solar Energy*, 2015, 120: 44-54.
- [16] Yang Guanghui, Liu Youqiang, Yao Shun, *et al.* Optimized design and research of secondary optics in concentrating photovoltaic module[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0322006.
杨光辉, 刘友强, 尧舜, 等. 聚光模组二次光学元件优化设计与研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0322006.
- [17] Chen Fei, Li Ming, Xu Chengmu, *et al.* Influence of photo-thermal conversion characteristics by the position of cavity absorber in parabolic trough solar concentrator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0922003.
陈飞, 李明, 许成木, 等. 腔体吸收器位置对太阳能槽式系统光热转换性能的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0922003.
- [18] Abu-Bakar S H, Muhammad-Sukki F, Ramirez-Iniguez R, *et al.* Rotationally asymmetrical compound parabolic concentrator for concentrating photovoltaic applications[J]. *Applied Energy*, 2014, 136: 363-372.
- [19] Ma X L, Zheng H F, Chen Z L. An investigation on a compound cylindrical solar concentrator (CCSC)[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 120: 719-727.
- [20] Ortabasit U, Buehl W M. An internal cusp reflector for an evacuated tubular heat pipe solar thermal collector[J]. *Solar Energy*, 1980, 25(1): 67-68.
- [21] Duffie J A, Beckman W A. *Solar engineering of thermal process*[M]. New York: Wiley Interscience Publication, 1980.
- [22] Meteorological Library of China Meteorological Information Center, Department of Architectural Science and Technology of Tsinghua University. Special meteorological data for architectural environment analysis of China[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.
中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [23] Zhang Hefei. *Solar energy thermal utilization principle and computer simulation*[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004.
张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.