

圆形吸收体复合抛物聚光器面形模型研究及仿真验证

段鹏飞^{1,2}, 桂特特^{1,2}, 陈 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 固定光口聚光太阳能系统具有宽带集热温度、无需跟踪装置、无机械运动、易于集成构建、运行状态稳定等优点,因此针对圆形吸收体太阳能复合抛物聚光器(CPC)关键部件面形结构进行了研究。理论构建了圆形吸收体 CPC 面形结构模型,并获得其解析解。运用光学设计软件 TracePro 验证所构建理论模型的光学特性。利用圆形吸收体 CPC 面形光学特性,构建了 CPC 耦合太阳能集热系统,并建立其光学特性计算方法。针对所构建系统的光学特性进行了数值计算,结果表明所构建系统的采光量较真空管太阳能集热系统有所提高,平均提高比例为 34.57%。

关键词 光学设计; 复合抛物聚光器; 圆形吸收体; 太阳能; 面形

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0622002

Surface Shape Model Research for Compound Parabolic Concentrators with Circular Absorber and Its Simulation Verification

Duan Pengfei^{1,2}, Gui Tete^{1,2}, Chen Fei^{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*Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China*

Abstract The fixed solar concentrating system exhibits such advantages as wide heat-collecting temperature band, no tracking device, no mechanical movement, easy integration, and stable operation. Therefore, we study the critical component surface shape structure of the solar compound parabolic concentrators (CPC) with circular absorber. A theoretical model of surface shape structure of CPC with circular absorber is established and the analytic solution of the model is obtained. The optical characteristics of the theoretical model is validated by the optical design software TracePro. Meanwhile, a novel solar collector system with CPC is designed, and the calculation method for optical characteristics is established by the optical characteristics of surface shape of CPC with circular absorber. The numerical calculation is conducted by the optical characteristics of the designed system. The results show that the solar radiation collected by the solar collector with CPC is higher than that of the solar collector with evacuated tubes, and the average ratio is 34.57%.

Key words optical design; compound parabolic concentrator; circular absorber; solar energy; surface shape

OCIS codes 220.4830; 080.2740; 260.2160

1 引 言

随着社会的快速发展,人类对能源的需求不断增加,能源危机日益严重,太阳能以其清洁、能量巨大、可再生等特点备受青睐^[1-2]。由于太阳能的辐照密度较低,直接利用难以获得较高的集热温度,因此太阳能聚光利用引起了广泛关注^[3-4]。

聚光太阳能应用系统按其工作模式主要可分为主动跟踪型和固定光口型两类。固定光口型系统具有集

收稿日期: 2017-01-17; **收到修改稿日期:** 2017-02-15

基金项目: 昆明理工大学引进人才科研启动基金(KKSY201505054)、国家自然科学基金(61364002)

作者简介: 段鹏飞(1991—),男,硕士研究生,主要从事太阳能光热利用方面的研究。E-mail: kraftduan@163.com

导师简介: 陈 飞(1987—),男,博士,讲师,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)

热温位宽阔、无需跟踪装置、无机械运动、易于集成构建、运行状态稳定等优点,因此国内外学者对其开展了诸多研究工作。Winston^[5]对复合抛物聚光器(CPC)的结构特性进行了研究,并获得了CPC光学基础理论,为CPC理论设计提供了参考。Rabl^[6]研究了CPC的热力学特性,获得了CPC内部热转换的主要方式,并给出了相应的计算方法。Ortabasi等^[7]通过对CPC传热过程进行分析,建立了集热器总热损系数和效率的数学模型,并实验验证了所构建的模型。Ronnelid等^[8]分析了CPC系统中聚光器、透明热绝缘体的光学和热学特性以及几何布置对性能的影响。Liu等^[9]研究了一种新型CPC管状流太阳能蒸发器,研究发现下午3:00和接近6:00的时候集热温度超过150℃时能够有效且不间断地产生饱和水蒸气。Antonelli等^[10]采用了一种计算流体动力学(CFD)方法分析了不同CPC的传热性能,模拟研究了圆形和扁平吸收体的传热性能,研究结果表明圆形吸收体在热量传递方面性能更好,且圆形吸收器传热不受倾角影响。Tang等^[11]研究了CPC-A系统的性能,研究发现CPC-A面向东西方向,角度维持在CPC-A有效接收半角 θ_{en} 范围内接受辐射7h,定期调整倾角所接收的太阳辐射量与CPC相当。Wang等^[12]通过光线追踪和几何光学的方法提出了一种新型V型CPC,并建立了V型CPC光学效率分析模型,通过改变平均吸收率、平均反射系数以及平均透光率提高CPC的效率。王云峰等^[13]应用几何分析法计算影响聚光器光学效率的几何参数因子,提出一种新型多平面镜线性组合太阳能聚光器的聚光光伏系统。杨光辉等^[14]设计了一种用于聚光光伏模组的全反射式二次光线元件,增加太阳能电池接收到的入射光能量。李臻等^[15]建立了4个CPC模型,对比了不同条件下吸热体上的光能分布,结果发现反射面的镜面反射比越高,吸收体上光能越强,集热器的光学效率越高。

CPC系统的面形结构决定了其几何聚光特性,进而影响整个CPC系统的采光性能^[11,16],研究者已针对平板吸收体CPC系统的采光量进行了模拟研究,获得了系统多种调整模型下的采光特性^[16]。基于此,本文研究了圆形吸收体CPC面形结构及光学特性,并应用于太阳能集热系统,对所构建的CPC耦合的太阳能集热系统采光特性进行了研究,研究结果可为复杂CPC太阳能系统设计提供参考。

2 CPC面形理论建模

2.1 CPC面形 *abd* 段原理

圆形吸收体CPC结构如图1所示,图中 α 为接收半角^[17],曲线 $abde$ 为圆形吸收体CPC面形的右半部分,线段 sm 相切于圆形吸收体。为实现CPC对临界光线以内所有光线会聚的特性,由反射定律可知, sm 光线到达CPC面形的 d 点后,反射光线最优路径为 dms ,因此CPC面形 abd 段有

$$\frac{dy}{dx} = -\cot \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \alpha, \quad (1)$$

式中 θ 为相切于圆形吸收体光线所对应的半径与 y 轴负半轴的夹角, xoy 坐标系原点位于圆形吸收体中心位置。

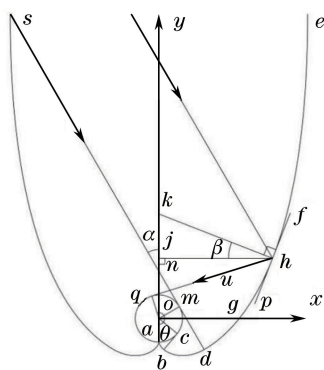


图1 圆形吸收体CPC

Fig. 1 CPC with circular absorber

由图1中几何关系可知,相切于圆形吸收体的光线必垂直于圆形吸收体切点所对应的半径,可得

$$y \cos \theta + r = x \sin \theta, \quad (2)$$

式中 θ 的取值范围同(1)式, r 为圆形吸收体的半径。当 θ 取值为 0 时, y 的值为 $-r$, 由于 CPC 面形满足起点亦为圆形吸收体上的点这一条件, 因此 $(0, -r)$ 必满足 CPC 面形方程。联立(1)、(2)式, 解得满足微分方程(1)式边界条件的解析解为

$$\begin{cases} x = r(\sin \theta - \theta \cos \theta) \\ y = -r(\theta \sin \theta + \cos \theta) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 θ 的取值范围同(1)式, (3)式亦为圆的渐开线参数方程。

2.2 CPC 面形 *dhe* 段原理

由圆形吸收体 CPC 面形的 *abd* 段可知, 图 1 中边缘光线入射到 CPC 面形上, 被反射的入射光线相切于圆形吸收体, u 为 CPC 面形 *abd* 段上的动点 h 与其对应的切点 q 之间的距离, pf 为动点 h 的切线, hk 垂直于 pf 交 y 轴与 k 点, hj 垂直于 y 轴交 y 轴于点 j , hj 与 hk 之间的夹角为 β , 可得

$$2\beta + \alpha + \theta = 1.5\pi, \quad (4)$$

动点 h 的坐标方程为

$$\begin{cases} x = r \sin \theta - u \cos \theta \\ y = -r \cos \theta - u \sin \theta \end{cases}, \quad (5)$$

式中 θ 的取值范围为 $0.5\pi + \alpha \leq \theta \leq 1.5\pi - \alpha$ 。结合(4)式, 可得

$$\cot \frac{1.5\pi - (\alpha + \theta)}{2} = \frac{dy}{dx}. \quad (6)$$

联合(5)、(6)式可得

$$\frac{r \sin \theta - u' \sin \theta - u \cos \theta}{r \cos \theta - u' \cos \theta + u \sin \theta} + \cot \left[\frac{1}{2} \left(\alpha + \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right] = 0. \quad (7)$$

整理(7)式可得

$$\frac{du}{d\theta} - u \tan \left[\frac{1}{2} \left(\theta - \frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right] - r = 0. \quad (8)$$

在 *dhe* 段面形与 *abd* 段面形的连接公共点 d 处, 由渐开线特性可得 $\theta = 0.5\pi + \alpha$ 时, $u = r(0.5\pi + \alpha)$ 。所以(8)式的解析解为

$$u = \frac{r[(\theta + \alpha + 0.5\pi) - \cos(\theta - \alpha)]}{1 + \sin(\theta - \alpha)}, \quad (9)$$

式中 θ 的取值范围同(5)式, 将(9)式代入(5)式可得到 CPC 面形 *dhe* 段面形的参数方程。整个 CPC 面形的右半部分由(3)式和(5)式构成。将(3)式和(5)式中的 x 取负, 再将(3)式和(5)式联立即可获得全部圆形吸收体 CPC 面形。

3 圆形吸收体 CPC 耦合太阳能系统

3.1 CPC 耦合太阳能集热系统构建

传统太阳能集热系统结构如图 2 所示, 真空管的真空夹层导致从夹层中间穿越的太阳辐射能损失, 不能被内管的选择性吸收涂层吸收; 同时由于系统制造工艺的限制, 难以做到真空管之间没有间隙, 从而导致太

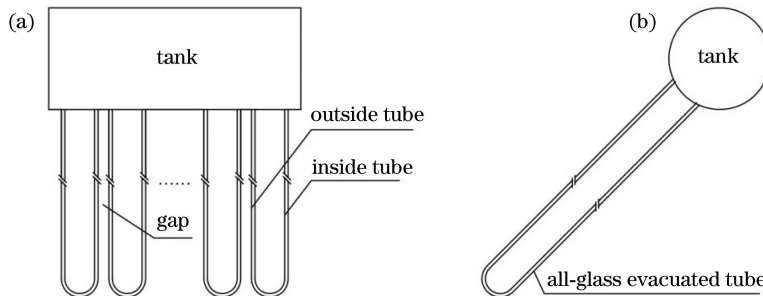


图 2 传统真空管太阳能集热系统。(a)正视图;(b)侧视图

Fig. 2 Traditional solar collector system with evacuated tubes. (a) Front view; (b) side view

阳辐射能的损失。

为有效收集损失的太阳辐射能,可采用 CPC 耦合太阳能集热系统,如图 3 所示,图 3(a)中在真空管之间安装圆形吸收体 CPC,并置于真空管底部,可将损失的太阳辐射能反射,被反射的太阳辐射能到达真空管内管表面的选择性吸收涂层并被其吸收。

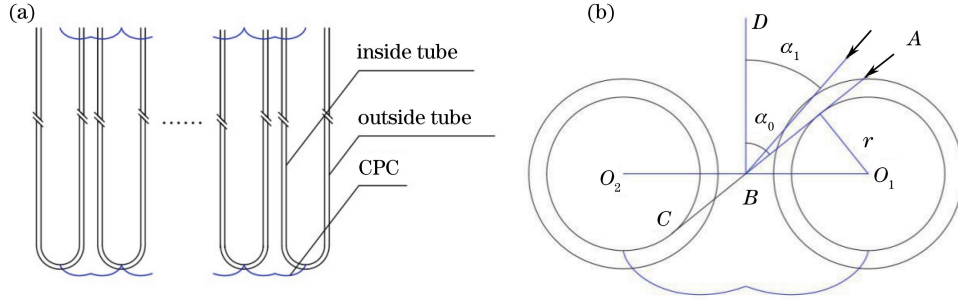


图 3 (a) CPC 耦合太阳能集热系统;(b)系统临界光线

Fig. 3 (a) Solar collector system with CPC; (b) critical light of the system

所设置的圆形吸收体 CPC 接收半角如图 3(b)所示,图中 O_1, O_2 分别为相邻真空管圆心, O_1, O_2 间距离为 L , B 为 O_1O_2 的中点, BD 垂直于 O_1O_2 , 光线 ABC 相切于圆 O_1, O_2 , AB 与 BD 的夹角为 α_0 。假设 AB 与 BD 的夹角大于 α_1 , 相邻真空管之间不存在光线损失, 反之则造成太阳辐射能从真空管间隙中损失, 因此有圆形吸收体 CPC 的临界角为 α_0 , 其值为

$$\alpha_0 = \arccos \frac{2r}{L} \quad (10)$$

在图 3(b)中, 正南放置倾角为 β 的太阳能集热系统, 太阳光线在其倾斜面入射角东西方向的投影角 α_1 为

$$\tan \alpha_1 = \frac{-\cos \delta \sin \omega}{\cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega + \sin \delta \sin(\varphi - \beta)}, \quad (11)$$

式中 φ 为当地纬度角, ω 为太阳时角, δ 为太阳赤纬角, 计算公式为^[18]

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos C + 0.070257 \sin C - 0.006758 \cos 2C + 0.000907 \sin 2C - 0.002697 \cos 3C + 0.001480 \sin 3C, \quad (12)$$

式中

$$C = (n - 1) \frac{360}{365} \frac{\pi}{180}, \quad (13)$$

式中 n 为日子数。

3.2 CPC 太阳能集热系统光学性能计算

以当地典型气象年日总辐射数据为依据^[19], 采用太阳辐射直散分离理论及倾斜面太阳辐射转换方法, 获得正南放置的传统太阳能系统和 CPC 耦合太阳能集热系统逐个时间段的采光量, 并将每个时间区间内的采光量进行求和运算, 可获得太阳能集热系统的年采光性能^[18, 20-23]。

倾斜面获得的总太阳辐射能包括直射辐射、天空散射辐射、地面反射辐射三个部分, 因此有

$$E_{zt} = S \left[I_b R_{bt} + I_{ds} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho (I_b + I_{ds}) \frac{1 - \cos \beta}{2} \right], \quad (14)$$

式中

$$R_{bt} = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta d\omega}{(\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \cos \varphi \cos \delta + (\omega_2 - \omega_1) \sin \delta \sin \varphi}, \quad (15)$$

式中 E_{zt} 为逐时段太阳能系统所获得的辐射能, S 为太阳能系统采光面积, I 为逐时段太阳辐射能, ρ 为地面反射率, R_{bt} 为逐时段修正因子。直射辐射 I_b 和天空散射辐射 I_{ds} 的关系为

$$I_z = I_b + I_{ds}, \quad (16)$$

式中 I_z 为水平面获得的总辐照度, 计算公式为

$$I_z = (A + B \cos \omega) \frac{H_{av} \pi (\cos \omega - \cos \omega_{ss})}{1440 (\sin \omega_{ss} - \omega_{ss} \cos \omega_{ss})}, \quad (17)$$

式中 H_{av} 为月平均日太阳总辐照量, 可从典型气象年数据获得; A 和 B 的表达式为

$$\begin{cases} A = 0.4090 + 0.5016 \sin\left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{3}\right) \\ B = 0.6609 - 0.4767 \sin\left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (18)$$

ω_{ss} 计算公式为

$$\omega_{ss} = \arccos(-\tan \delta \tan \varphi). \quad (19)$$

天空散射辐射 I_{ds} 计算公式为

$$I_{ds} = \frac{H_d \pi (\cos \omega - \cos \omega_{ss})}{1440 (\sin \omega_{ss} - \omega_{ss} \cos \omega_{ss})}, \quad (20)$$

式中 H_d 为月平均日太阳散射辐照量, 其计算公式为^[24]

$$\frac{H_d}{H_{av}} = 0.775 + 0.347 \left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{2}\right) - \left[0.505 + 0.261 \left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{2}\right)\right] \cos \left[2 \left(\frac{H_{av}}{H_o} - 0.9\right) \frac{\pi}{180}\right], \quad (21)$$

式中 H_o 为大气层外月平均日太阳总辐照量, 可以表示为

$$H_o = 2 \frac{180}{\pi} \frac{3600}{15} \int_0^{\omega_{ss}} G \sin \alpha_2 d \omega, \quad (22)$$

$$G = 1353(1.00011 + 0.034221 \cos C + 0.00128 \sin C + 0.000719 \cos 2C + 0.000077 \sin 2C), \quad (23)$$

$$\sin \alpha_2 = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega, \quad (24)$$

式中 G 为大气层外法向平面的太阳能辐照度, α_2 为太阳高度角。

(14)~(24)式中下标字母 z 表示总量, t 表示倾斜面, b 表示直射辐射, d 表示散射辐射, s 表示天空, ss 表示日落, av 表示月平均每日。

4 结果与讨论

4.1 CPC 聚光系统光学特性

基于理论建模可获得圆形吸收体 CPC 面形数学模型, 采用光学设计软件 TracePro^[16,25-26] 对所构建的面形模型进行验证。为了直观反映 CPC 面形的聚光特性, 在进行光线跟踪时, 对 CPC 反射面形的反射率和吸收体的吸收率进行了极端化设置, 系统具体参数如表 1 所示, 光学验证结果如图 4 所示。

表 1 圆形吸收体 CPC 参数

Table 1 Parameters of CPC with circular absorber

| Item | Radius of circular absorber r / mm | Absorptivity α_{abs} | Reflectivity of CPC ρ_{CPC} | Acceptance half-angle α / (°) |
|-------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Value | 10 | 1 | 1 | 30 |

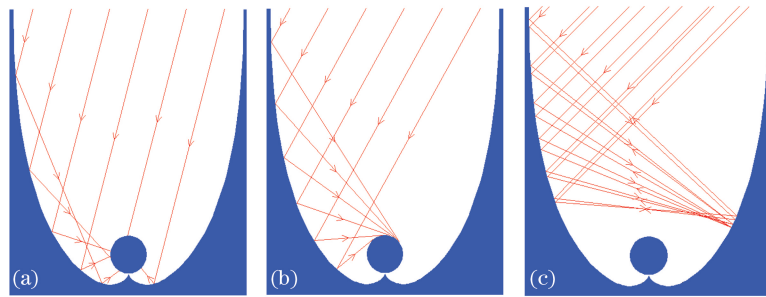


图 4 圆形吸收体 CPC 会聚光线。(a) 入射角为 15°; (b) 入射角为 30°; (c) 入射角为 45°

Fig. 4 Concentrating rays of CPC with circular absorber. (a) Angle of incidence is 15°;

(b) angle of incidence is 30°; (c) angle of incidence is 45°

当入射光线以小于接收半角的角度入射到 CPC 的反射面形表面时[图 4(a)],所有入射光线被聚光器反射面反射后,光线全部会聚到圆形吸收体表面,被圆形吸收体吸收,没有光线从聚光器的光口逃逸。因此所设计的圆形吸收体 CPC 能将所有入射角小于接收半角的入射光线会聚到吸收体表面。

从图 4(b)可以看出,当入射光线以接收半角的角度入射到 CPC 的反射面形表面时,所有入射光线被聚光器反射面反射后,光线全部相切于圆形吸收体。入射光线从左到右被反射后,与圆形吸收体相切对应的 θ 也从 $0.5\pi+\alpha$ 逐渐增加到 $1.5\pi-\alpha$ 。

图 4(c)为入射光线以大于接收半角的角度入射到 CPC 的反射面形表面的状态,可以看出所有入射光线被反射后,不能到达圆形吸收体表面。全部入射光线被反射后,均到达聚光器的另一反射面,经过多次反射后,入射光线全部从采光口逃逸出去。即所设计的圆形吸收体 CPC 不反射入射角度大于接收半角的所有入射光线,这些光线从采光口逃逸,无法到达圆形吸收体表面。

从图 4 中 TracePro 实验结果的分析可知,圆形吸收体 CPC 在会聚入射光线时,以其接收半角为临界角,入射角大于临界角的入射光线经聚光器反射后全部从光口逃逸;入射角小于临界角的入射光线经反射面形反射后都能到达圆形吸收体表面。实验结果与理论建模所获得的解析结果相吻合,因此理论构建的聚光器面形满足其工作特性。

4.2 CPC 耦合太阳能系统光学特性

针对理论所构建的 CPC 耦合太阳能集热系统参数如表 2 所示,采用光线跟踪的方法对其光学特性进行验证,系统光学特性结果如图 5 所示。图 5(a)中,太阳光线的入射角大于临界角时,由于真空管之间存在遮挡现象,因此真空管能够捕获所有入射光线,此时所构建的 CPC 耦合太阳能集热系统与传统太阳能系统的采光特性相同。

表 2 CPC 耦合太阳能集热系统参数

Table 2 Parameters of solar collector system with CPC

| Item | Inner radius of evacuated tube r_{in}/mm | Outer radius of evacuated tube r_{out}/mm | Separation distance L/mm | Critical angle $\alpha_0/(\text{°})$ | Angle of inclination $\beta/(\text{°})$ | Number of evacuated tube N |
|-------|--|---|-----------------------------------|---|--|------------------------------|
| Value | 23.5 | 29 | 75 | 51.1954 | 45 | 20 |

图 5(b)中,当太阳光线入射角等于临界角时,真空管恰好能够截获投射到采光平面的全部太阳辐射能;图 5(c)中,当太阳光线入射角小于临界角时,真空管吸收表面不能获得到达采光平面的全部太阳辐射能,部分太阳辐射能从真空管间隙之间逃逸到达 CPC 表面,被 CPC 表面发射后再次到达真空管吸收面,从而提高了系统的光学性能。

CPC 耦合太阳能集热系统的这一工作特性,对其整体性能提升具有积极作用。由典型气象年数据可

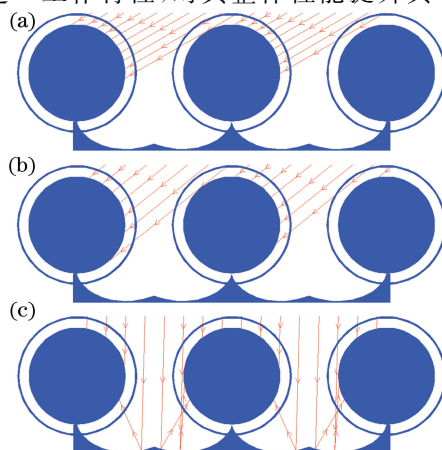


图 5 CPC 耦合太阳能集热系统光学特性。(a)入射角大于临界角;(b)入射角等于临界角;(c)入射角小于临界角

Fig. 5 Optical properties of solar collector system with CPC. (a) Angle of incidence is larger than critical angle;

(b) angle of incidence is equal to critical angle; (c) angle of incidence is smaller than critical angle

知,通常情况下,太阳辐射能在靠近早晨或傍晚时刻,太阳辐射能的值小于靠近中午时刻^[18]。对于传统的太阳能集热系统,在中午时刻由于太阳光线的入射角小于临界角,较多太阳辐射能从真空管之间逃逸,降低了系统的光学效率。本文构建的 CPC 耦合太阳能集热系统能够有效收集临近中午时刻从真空管之间逃逸的太阳辐射能。

传统的太阳能集热系统运行时,采光面接收的辐射能主要被真空管面对天空的上表面选择性吸收涂层进行光热转化,导致真空管内管表面温差增大,真空管内管的内部工质容易产生横向流动,从而降低了热虹吸力。CPC 耦合太阳能集热系统中,逃逸的太阳光线被反射后,多数回到真空管面对地面的下表面,然后被选择性吸收涂层进行光热转化,减小了真空管内管的环流效应,提高了系统的集热特性。

4.3 CPC 耦合太阳能系统采光性能

基于太阳能系统采光性能计算理论,采用编程计算的方法,针对 20 管的 CPC 耦合太阳能集热系统采光性能进行了数值计算,各月 CPC 耦合太阳能集热系统较真空管系统提高的比例如图 6 所示。从图中可以看出,传统的真空管太阳能系统采用 CPC 耦合之后,在任何月份 CPC 耦合太阳能集热系统采集的总辐射量均大于真空管太阳能集热系统,全年采光量平均提高 34.57%。

水平面、真空管太阳能集热系统、CPC 耦合太阳能集热系统各月每日平均采集的总辐射量关系如图 7 所示。从图中可以看出倾角为 45°的太阳能集热系统,在冬季采集的太阳辐射能大于水平面,在夏季小于水平面。这是因为夏季太阳直射点在北半球,导致太阳平均高度角较大,增大了太阳能集热系统的平均太阳入射角,从而降低了系统采光量。特别是在靠近中午时刻,太阳辐射度较大,太阳能高度角在每天的极值附近变化,太阳能集热系统的太阳入射角进一步增大,太阳能集热系统截获的辐射能减小。

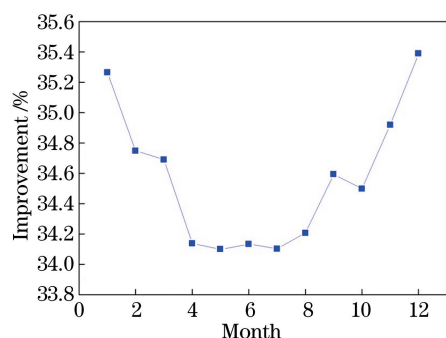


图 6 CPC 耦合太阳能集热系统较真空管太阳能集热系统采光量提高比例

Fig. 6 Improvement ratio of collected solar radiation for solar collector system with CPC compared to that of system with evacuated tubes

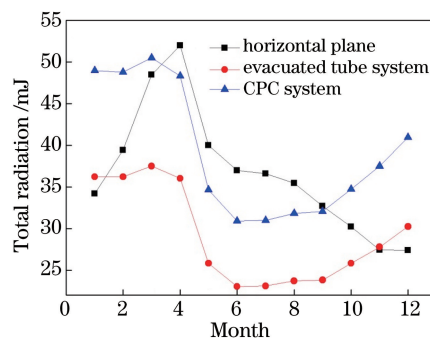


图 7 不同系统各月每日平均采集总辐射量对比
Fig. 7 Comparison of the monthly average total radiation by daily collecting in different systems

相反,冬季由于平均太阳高度角小,太阳能系统倾斜后会减小平均太阳入射角,从而提高了太阳能集热系统的采光量。太阳能集热系统的冬季采光量大于水平面,夏季采光量小于水平面。CPC 耦合太阳能集热系统全年采集的辐射能为 14278.26 mJ,真空管太阳能集热系统全年采集的辐射能为 10607.67 mJ,水平面全年采集的太阳辐射能为 13398.19 mJ。CPC 耦合太阳能集热系统年采光量仍然大于水平面,增加了 6.57%。真空管太阳能集热系统的采光量却小于水平面,减少了 20.83%。

5 结 论

针对圆形吸收体 CPC 面形结构及所构建的 CPC 耦合太阳能集热系统进行了理论建模、模拟仿真、数值计算研究,可得到以下结论:

1) 理论构建了圆形吸收体 CPC 面形结构模型,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其光学性能;

2) 应用圆形吸收体 CPC 面形光学特性,构建了 CPC 耦合太阳能集热系统,所构建的系统较真空管太阳

能集热系统有效提高了采光量,理论模型数值计算增加比例的结果为 34.57%。

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 Management*, 2014, 77(1): 441-449.
- [2] Tripathi B, Yadav P, Rathod S, *et al.* Performance analysis and comparison of two silicon material based photovoltaic technologies under actual climatic conditions in Western India[J]. *Energy Conversion Management*, 2014, 80(4): 97-102.
- [3] Zhao Yulan, Zhang Hong, Zhan Dongdong, *et al.* Study on thermal efficiency of CPC heat pipe evacuated tubular collectors[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2007, 28(9): 1022-1025.
赵玉兰, 张 红, 战栋栋, 等. CPC 热管式真空管集热器的集热效率研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(9): 1022-1025.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [8] Ronnelid M, Karlsson B. Experimental investigation of heat losses from low-concentrating non-imaging concentrators [J]. *Solar Energy*, 1996, 57(8): 93-109.
- [9] Liu Z H, Tao G D, Lu L, *et al.* A novel all-glass evacuated tubular solar steam generator with simplified CPC[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86(10): 175-185.
- [10] 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(5): 479-489.
- [11] Tang F, Li G H, Tang R S. Design and optical performance of CPC based compound plane concentrators [J]. *Renewable Energy*, 2016, 95(9): 140-151.
- [12] Wang J, Yu L, Jiang C, *et al.* Optical analysis of solar collector with new V-shaped CPC[J]. *Solar Energy*, 2016, 135(10): 780-785.
- [13] Wang Yunfeng, Ji Jie, Li Ming, *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.
- [14] 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.
- [15] Li Zhen, Shi Yueyan, Wang Yuyan, *et al.* Optical analysis of compound parabolic concentrator[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2003, 24(1): 58-63.
李 臻, 史月艳, 王毓琰, 等. 具有镜面反射和漫反射的 CPC 光学分析[J]. *太阳能学报*, 2003, 24(1): 58-63.
- [16] Yu Yamei. Studies on performance of CPCs with a restricted exit angle[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2015: 11-13.
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: 11-13.
- [17] Zhu Rui, Lu Zhenwu, Liu Hua, *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] Duffie J A, Beckman W A. *Solar engineering of thermal process*[M]. 4th edition. Hoboken: Wiley, 2013.
- [19] 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.

- [20] 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.
- [21] Guo Tingwei, Liu Jianmin. Utilization of solar energy[M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1987.
郭廷玮, 刘鉴民. 太阳能的利用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1987.
- [22] Xiang Licheng, Zhao Yuwen, Luo Yunjun. Thermal utilization of solar energy[M]. Beijing: Aerospace Press. 1990.
项立成, 赵玉文, 罗运俊. 太阳能的热利用[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [23] Ge Xinshi, Gong Bao, Lu Weide, *et al.* Principle and application of solar energy engineering[M]. Beijing: Academic Journal Publishing Press, 1988.
葛新石, 龚 堡, 陆维德, 等. 太阳能工程原理和应用[M]. 北京: 学术期刊出版社, 1988.
- [24] Collares-Pereira M, Rabl A. The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values[J]. Solar Energy, 1979: 22(11): 155-164.
- [25] Zhai Hui. Theoretical and experimental investigation of linear concentrating solar collector with cavity absorber[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009: 34-62.
翟 辉. 采用腔体吸收器的线聚焦太阳能集热器的理论及实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 34-62.
- [26] He Y L, Xiao J, Cheng Z D, *et al.* A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector[J]. Renewable Energy, 2011, 36(3): 976-985.