

低截取比下复合抛物面聚光器的光热性能

吴德众^{1,2}, 李明^{1*}, 李国良¹, 王云峰¹, 冯志康¹, 周国富³

¹ 云南师范大学太阳能研究所, 云南 昆明 650500;

² 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500;

³ 华南师范大学华南先进光电子研究院, 广东 广州 510631

摘要 考虑复合抛物面聚光器(CPC)的经济性和光学性能,对 CPC 结构进行了优化设计。根据参数方程,分析了相同面积内的截取比对 CPC 总弧长和接收管数量的影响。研究表明,CPC 截取比取 0.15~0.25 时,可有效降低对 CPC 弧面材料的使用。基于 Tracepro 软件,实现了对 CPC 的二维光线追踪,提出了一种 CPC 直射光学效率的模拟计算方法。选择 1 月 1 日、4 月 1 日、7 月 1 日、10 月 1 日四个季节日期为模拟日期,模拟结果显示,截取比为 0.16 的 CPC 相较于截取比为 0.56 的 CPC,平均直射光学效率分别提高了 13.77%,15.24%,9.30%,11.54%。太阳高度角的增加和方位角的减小有利于降低 CPC 的末端光线损失。增加 CPC 的长度有利于减小末端光线损失对 CPC 光学效率的影响。实验测试验证了模拟的正确性,所提方法可应用于以提高光学性能为目标的 CPC 结构优化设计。

关键词 光学设计; 接收器; 光学效率; 复合抛物面聚光集热系统; 二维光线追踪

中图分类号 O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.082201

Photothermal Properties of Compound Parabolic Concentrator Under Low Interception Ratio

Wu Dezhong^{1,2}, Li Ming^{1*}, Li Guoliang¹, Wang Yunfeng¹, Feng Zhikang¹, Zhou Guofu³

¹ Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

² School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

³ South China Advanced Optoelectronics Research Institute, South China Normal University,

Guangzhou, Guangdong 510631, China

Abstract Aiming at the economic and optical performances of the compound parabolic concentrator (CPC), the CPC structural design is optimized. According to the parameter equation, the effect of the intercept ratio for the same area on the total CPC arc length and the number of receiving tubes is analyzed. The research results show that an intercept ratio value of 0.15-0.25 for CPC can effectively reduce the use of CPC arc surface material. Based on the Tracepro software, two-dimensional ray tracing of CPC is implemented, and a simulation and calculation method for the direct optical efficiency of CPC is proposed. Four seasonal dates, January 1, April 1, July 1, and October 1, are selected as the simulation dates. The simulation results show that the average direct optical efficiencies of CPC with an interception ratio of 0.16 are 13.77%, 15.24%, 9.30% and 11.54% higher than those of CPC with an interception ratio of 0.56, respectively. The increase of solar altitude angle and the decrease of azimuth angle are both helpful to reduce the end ray loss of CPC. The increase of the CPC length is helpful to reduce the effect of terminal light loss on CPC optical efficiency. The experimental results confirm the correctness of the simulation ones. The proposed method can be applied to the optimization design of a CPC structure for the improvement of optical performances.

Key words optical design; receiver; optical efficiency; compound parabolic concentrating heat collector system; two-dimensional ray tracing

OCIS codes 220.4830; 000.6850; 080.2740; 260.2160

收稿日期: 2018-10-12; 修回日期: 2018-10-25; 录用日期: 2018-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(51466017)、中国-老挝可再生能源联合实验室(2015DFA60120)、云南省周国富专家工作站项目

* E-mail: lmllldy@126.com

1 引言

化石燃料能源的过度使用不仅加剧了能源危机,也造成了环境的持续恶化;具有丰富、清洁、可再生特点的太阳能受到了极大的关注和重视。复合抛物面聚光器(CPC)因结构简单、无需跟踪、聚光效果良好,在中低温领域有较好的应用前景^[1-3]。

为拓展 CPC 的应用领域,国内外学者对 CPC 的结构优化做了一系列的研究工作。Abdullahi 等^[4]对 CPC 接收管为单管、双管水平、双管竖直放置的 CPC 进行光学效率模拟,发现双管水平放置的 CPC 光学效率最高,单管放置的 CPC 光学效率最低。刘灵芝等^[5]研究了 CPC 截取比对聚光比的影响,认为截取比不宜小于 0.5。张晓伟等^[6]设计了一种蛇形复合抛物面聚光器,该集热器可有效减小热损、节省空间、方便工程应用。余雷等^[7]对 CPC 建立了详细的光学效率模型,采用光学追迹、几何分析方法对光学参数进行了研究分析。冯志康等^[8]分析了腔体接收器和真空管接收器之间的光学效率特性差异。Tchinda 等^[9]从传热学方面模拟分析了流速以及进口温度对接收体为圆管的 CPC 热效率的影响。Waghmare 等^[10]根据接收器尺寸的不同,对接收器-收集器组合的各种几何可能性进行了光线追踪研究。Liu 等^[11]介绍了一种低成本全玻璃真空管式太阳能蒸汽发生器,可作为工业蒸汽供应器。Bellos 等^[12]设计了以真空管为接收体的 CPC,对比分析可得加压水相比典型导热油更适合作为传热工质。上述研究对 CPC 的结构进行了优化设计并研究分析了 CPC 的光热性能,但对截取比为 0.5 以下的低截取比 CPC 关注较少。另外,对 CPC 进行二维光线追踪的研究也相对较少,鲜有考虑 CPC 末端光线损失对 CPC 光学效率的影响。

本文将结合 CPC 的基本原理及设计特点,对低截取比下 CPC 的结构进行优化设计,根据 CPC 的参数方程,给出了相关量的计算表达式,计算分析截取比对 CPC 材料消耗的影响,结合弧面材料和接收管成本,可为 CPC 的优化设计提供依据;基于 Tracepro 软件对 CPC 进行二维光线追踪,模拟分析截取比对 CPC 光学效率的影响,模拟结果显示低截取比的 CPC 有利于提高 CPC 的光学效率。最后通过实验测试结果验证了模拟的正确性。

2 CPC 结构设计

CPC 是依据边缘光学原理设计而成的非成像聚光

器,当入射光线处在 CPC 接收角范围内时,可被 CPC 接收体吸收利用^[13]。由于 CPC 关于中心轴对称,下面给出圆管型 CPC 中心轴右半支的曲线参数方程。

渐开线参数方程为

$$x = r(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi), \quad (1)$$

$$y = -r(\cos \varphi + \varphi \sin \varphi), \quad (2)$$

式中: x, y 为 CPC 渐开线的横、纵坐标值; r 为接收管的半径; φ 为参数, $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} + \theta$, θ 为 CPC 的接收半角。

物线参数方程为

$$x = r(\sin \varphi - \varphi' \cos \varphi), \quad (3)$$

$$y = -r(\cos \varphi + \varphi' \sin \varphi), \quad (4)$$

式中: x, y 为 CPC 抛物线的横、纵坐标值; $\frac{\pi}{2} + \theta \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{2} - \theta$; φ' 为 CPC 抛物线的参数, $\varphi' = \frac{\pi/2 + \theta + \varphi - \cos(\varphi - \theta)}{1 + \sin(\varphi - \theta)}$ 。

据 CPC 的参数方程,绘制 CPC 的剖面结构图。如图 1 所示, C_1E_1 和 D_1E_1 为 CPC 的渐开线部分, A_1C_1 和 B_1D_1 为 CPC 的抛物线部分, A_1, B_1 为 CPC 的上端顶点, x_1, y_1 为 CPC 右顶点的横、纵坐标值, θ 为 CPC 的最大接收半角, b_1 为 CPC 的开口宽度, h_1 为 CPC 的高度(圆心到 CPC 上端面的距离)。由于抛物面上端近乎与 x 轴垂直,CPC 上端采光效果较差,对 CPC 进行适当截取,有利于降低 CPC 的材料消耗。对 CPC 进行适当截取,有利于降低 CPC 的材料消耗。 b_1, h_1 分别为截取后 CPC 的宽度和高度, A_1, B_1 为截取后 CPC 的上端顶点, x_1, y_1 为截取后 CPC 右顶点的横、纵坐标值。为使截取的部分均为抛物线部分,根据(2)式得,CPC 的接收半角不大于 70.34° 。事实上,考虑到 CPC 的聚光比的问题,CPC 的接收半角一般不宜过大。

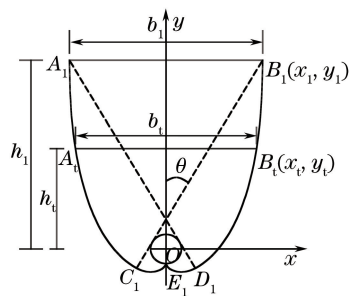


图 1 CPC 剖面示意图

Fig. 1 Schematic of CPC cross section

2.1 CPC 相关参数

截取比 N_1 定义为截取后 CPC 的高度与未截

取 CPC 的高度之比。如图 1 所示,截取后 CPC 的上端顶点为 A_t 、 B_t ,此时,CPC 的截取比为

$$N_t = \frac{h_t}{h_1} = \frac{h_t}{y_1}, \quad (5)$$

根据(5)式,得截取后 CPC 的高度为

$$h_t = -N_t r (\cos \varphi_{\max} + \varphi'_{\varphi=\varphi_{\max}} \sin \varphi_{\max}). \quad (6)$$

截取后 CPC 的高度值即为图 1 中 B_t 点纵坐标值,即将 h_t 代入到(4)式中,求出参数 $\varphi_{N=N_t}$,将 $\varphi_{N=N_t}$ 代入(3)式进而求得 B_t 点横坐标值 x_t ,则截取后 CPC 的宽度为

$$b_t = 2x_t = 2r (\sin \varphi_{N=N_t} - \varphi'_{N=N_t} \cos \varphi_{N=N_t}). \quad (7)$$

定义 CPC 的聚光比为 CPC 的开口宽度与接收管周长的比值,则其聚光比 C_t 为

$$C_t = \frac{b_t}{2\pi r} = \frac{\sin \varphi_{N=N_t} - \varphi'_{N=N_t} \cos \varphi_{N=N_t}}{\pi}, \quad (8)$$

y 轴右半支截取后 CPC 的曲线弧长 S_t 为渐开线弧长 S_{t1} 与抛物线弧长 $S_{N=N_t}$ 之和:

$$S_t = S_{t1} + S_{N=N_t}, \quad (9)$$

式中,渐开线弧长为

$$S_{t1} = \frac{r}{8} (\pi + 2\theta)^2, \quad (10)$$

抛物线弧长为

$$S_{N=N_t} = \int_{\frac{\pi}{2}+\theta}^{\varphi_{N=N_t}} \sqrt{[x'(\varphi)]^2 + [y'(\varphi)]^2} d\varphi, \quad (11)$$

式中: $x'(\varphi) = r \left[\varphi' \sin \varphi + \frac{\varphi' \cos(\varphi-\theta) \cos \varphi}{1 + \sin(\varphi-\theta)} \right]$;

$y'(\varphi) = -r \left[\varphi' \cos \varphi - \frac{\varphi' \cos(\varphi-\theta) \sin \varphi}{1 + \sin(\varphi-\theta)} \right]$; $x'(\varphi)$

为参数方程 $x(\varphi)$ 的导函数; $y'(\varphi)$ 为参数方程 $y(\varphi)$ 的导函数。

2.2 计算与分析

如图 2 所示,对理想聚光比为 2、3、4 的 3 种 CPC(接收管半径均为 29 mm)进行截取,研究分析截取比与 CPC 聚光比及弧长之间的关系。 S_1 、 S_2 、 S_3 分别是对理想聚光比为 2、3、4 的 CPC 进行截取时所对应的 CPC 中心轴右半支的弧长。由图 2 可知,理想聚光比为 2、3、4 的 CPC,截取比从 1 降为 0.5 时,聚光比分别仅降低 7.07%、8.04%、8.58%,CPC 弧长分别降低了 36.08%、42.01%、44.69%。表明对 CPC 进行一定的截取,对其聚光比的影响有限,但可大幅度减少对 CPC 弧面材料的使用。

当进一步对理想聚光比为 2 的 CPC 进行截取(截取比小于 0.5)时,如图 2 所示,CPC 弧长呈现近

似线性递减的趋势,其聚光比降低的幅度逐渐增加,但根据(8)式可知,聚光比的降低表明 CPC 的开口宽度也在减小,相同面积范围内可放置的 CPC 的数量更多,而总的聚光面积并没有减小。如图 3 所示,截取比为 N_i 、 N_j 的 2 种 CPC 在相同面积内可放置的数量分别为 i 块和 j 块。在一定面积内(L 为该面积的宽度),研究低截取比对该面积内可放置的 CPC 的总弧长及所需接收管的数量的影响,可为 CPC 的结构优化设计提供一个新思路。

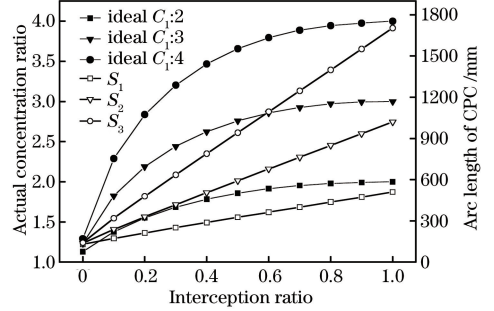


图 2 聚光比和 CPC 弧长的变化曲线

Fig. 2 Concentration ratio and CPC arc length versus interception ratio

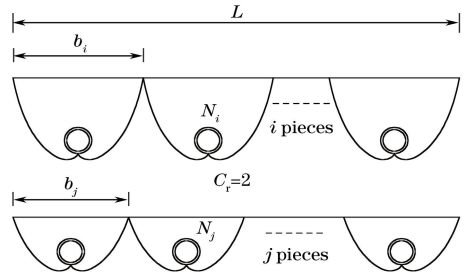


图 3 两种截取比下的 CPC 在相同面积内的数量对
Fig. 3 Number pairs of CPC under two interception ratios and same area

对理想聚光比为 C_t 、接收管半径为 r 的 CPC 进行截取,当截取比为 N_t (N_t 小于 0.5) 时,相同面积内可放置该截取比的 CPC 的数量与放置截取比为 0.5 的 CPC 的数量的比值 α ,及此面积内所有该截取比的 CPC 的总弧长与截取比为 0.5 的 CPC 在此面积内的总弧长的比值 κ 分别为

$$\alpha = \frac{\sin \varphi_{N=0.5} - \varphi'_{N=0.5} \cos \varphi_{N=0.5}}{\sin \varphi_{N=N_t} - \varphi'_{N=N_t} \cos \varphi_{N=N_t}}, \quad (12)$$

$$\kappa = \alpha \frac{r (\pi + 2\theta)^2 + 8S_{N=N_t}}{r (\pi + 2\theta)^2 + 8S_{N=0.5}}. \quad (13)$$

当理想聚光比为 2,截取比低于 0.5 时,CPC 数量之比和总弧长之比的变化曲线如图 4 所示。从图中可以看出: κ 随着截取比的降低而减小,表明相同面积内可放置的 CPC 的总弧长随截取比的降低而减小,

且呈现近似线性递减的关系; α 随着截取比的降低而增大,表明所需 CPC 接收管的数量在增加。当截取比不低于 0.25 时,相同面积内所需接收管的数量增长幅度较小,但有效减小了 CPC 的弧面长度;而当截取比小于 0.15 时,所需接收管的数量大幅度上升;截取比在 0.15~0.25 间,对接收管数量影响有限的情况下,可有效降低 CPC 的弧面长度。具体可结合 CPC 弧面材料成本和接收管成本,对比分析相同面积内各截取比 CPC 的总成本,为 CPC 结构的优化设计提供依据。

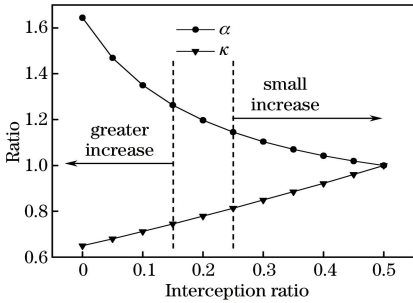


图 4 CPC 数量之比和总弧长之比的变化曲线

Fig. 4 Total number and arc length ratios of CPC versus interception ratio

3 低截取比 CPC 聚光性能分析

CPC 光学效率定义为接收管表面接收的太阳辐射能与 CPC 反射镜面接收的太阳辐射能的比值,光学效率分为直射光学效率和散射光学效率^[13],即

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{I_1 \eta_b + I_2 \eta_d}{I_U}, \quad (14)$$

$$\eta_b = \tau \rho^n \alpha \zeta_b, \quad (15)$$

$$\eta_d = \tau \rho^n \alpha \zeta_d, \quad (16)$$

式中: η_{opt} 为 CPC 的总光学效率; I_1 为等效直射辐照度; η_b 为直射光学效率; I_2 为等效散射辐照度; η_d 为散射光学效率; I_U 为 CPC 倾斜面上的有效辐照强度; τ 为真空管透过率; ρ 为抛物面的反射率; n 为光线的平均反射次数; α 为接收管的吸收率; ζ_b 和 ζ_d 为 CPC 直射和散射的几何光学效率。

3.1 散射几何光学效率

散射几何光学效率受天气、环境等因素的影响比较大,难以找到精确的模型。因此,本文参考了 CPC 散射辐射的传统计算方法^[14]:

$$\zeta_d = \frac{1}{C_t}. \quad (17)$$

3.2 直射几何光学效率

CPC 直射几何光学效率是指不考虑光的衰减

时 CPC 所具有的光学效率^[15],即为到达 CPC 接收管的光线数与到达 CPC 上端进口处光线数的比值。根据 CPC 的基本原理,在接收角范围内的光线入射到 CPC 抛物面后均能被接收器吸收,即 CPC 的直射几何光学效率为 1,但 CPC 存在末端光线损失和内外玻璃管间隙处的漏光损失。因此,有必要对 CPC 的直射光学效率进行模拟计算,探究末端光线损失对 CPC 光学效率的影响,进而为 CPC 的优化设计提供依据。接收管选用全玻璃真空集热管,表 1 为 CPC 的具体参数。

表 1 CPC 的相关参数

Table 1 Related parameters of CPC

Outer glass tube radius R /mm	Inner glass tube radius r /mm	Parabolic reflectivity /%	Vacuum tube transmittance /%	Receiver tube absorptivity /%
35	29	82	84	91

各时刻 CPC 抛物面上光线密度分布及能量损失存在差异,难以用解析的方法给出 CPC 效率的计算结果。本文基于 Tracepro 软件对不同结构的 CPC 进行二维光线追迹,CPC 直射几何光学效率模拟步骤如下:

1) 将 CAD 软件中设计生成的 CPC 三维实物模型导入到 Tracepro 软件中,设置 CPC 的光学参数(透过率、反射率、吸收率等),同时将 CPC 实物模型东西方向放置并向南倾斜 30° ^[15]。

2) 设置格点范围,使模拟光源发射的光线完全覆盖 CPC 聚光器。

3) 太阳相对地球做二维运动。根据不同时刻太阳高度角和方位角,确定格点范围所在平面的法向向量,该法向向量与入射光线方向平行,从而实现 CPC 的二维光线追踪。

4) 设置接收管为吸收体并收集接收管吸收的入射光线数 λ_1 ,然后设置玻璃盖板为吸收体并收集玻璃盖板吸收的光线数 λ_2 ,则直射几何光学效率为 $\zeta_b = \lambda_1 / \lambda_2$,根据(15)式可求出直射光学效率。

4 模拟结果

图 5 是基于 Tracepro 软件对 CPC 进行光线追踪的示意图,图 5(a)是以改变入射光线的入射角对 CPC 进行的一维光线追踪,图 5(b)是基于各时刻太阳高度角和方位角确定入射光线的方位,对 CPC 进行的二维光线追踪。相较于一维光线追踪,对 CPC 进行的二维光线追踪准确模拟了各时刻 CPC 的直

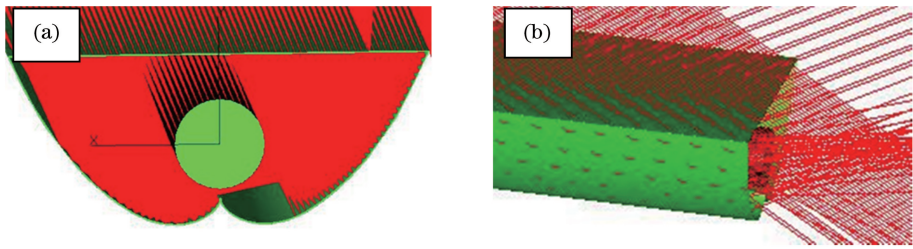


图 5 光线追踪示意图。(a) 一维;(b)二维

Fig. 5 Schematic of ray tracing. (a) One dimensional; (b) two dimensional

射光学效率,同时可分析末端光线损失对 CPC 直射光学效率的影响,进而为 CPC 的结构优化设计提供依据。文中 CPC 的理想聚光比均为 2。

图 6 分析了 4 个典型日期下截取比对 CPC 直射光学效率的影响。从图 6 可知,4 个日期下低截取比 CPC 的直射光学效率均高于高截取比 CPC 的直射光学效率;当真太阳时间不断偏离 12:00 时,3 种截取比的 CPC 的末端光线损失均逐渐增大,截取比对 CPC 直射光学效率的影响也在增大,减小 CPC 的截取比有助于降低末端光线损失对 CPC 直射光学效率的影响。1 月 1 日、4 月 1 日、7 月 1 日、

10 月 1 日,在 8:00 至 10:48 及 13:12 至 16:00 间,相较于截取比为 0.36、0.56 的 CPC,截取比为 0.16 的 CPC 的平均直射光学效率分别提高了 6.86%、13.77%;6.93%、15.24%;4.73%、9.30%、;5.58%、11.54%。对于截取比为 0.16 的 CPC,相较于其他 3 个日期所对应的 3 个季节,7 月 1 日对应的夏季因太阳高度角较大,CPC 的直射光学效率最大,末端光线损失最小;10 月 1 日所对应的秋季因太阳高度角较小且方位角较大,CPC 的直射光学效率最小,末端光线损失最大;7 月 1 日相较于 10 月 1 日,在 8:00 至 16:00 间,平均直射光学效率提高了 8.09%。

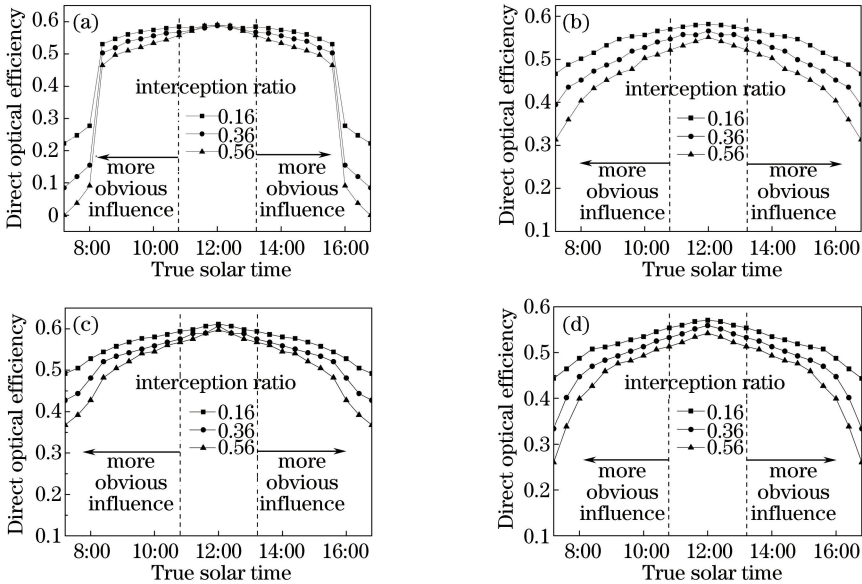


图 6 截取比对 CPC 直射光学效率的影响。(a) 1 月 1 日;(b) 4 月 1 日;(c) 7 月 1 日;(d) 10 月 1 日

Fig. 6 Influence of interception ratio on direct optical efficiency of CPC.

(a) January 1st; (b) April 1st; (c) July 1st; (d) October 1st

图 7 是对 4 种不同长度、截取比均为 0.16 的 CPC 进行直射光学效率的模拟计算。从图中可以看出,CPC 直射光学效率随着 CPC 长度的增加而提高。随着时间的推移,CPC 长度对直射光学效率的影响不断减小。对于 8:00、9:36、11:12 三个特定时刻,长度为 1700 mm 的 CPC 相较于长度为 1100、

1300、1500 mm 的 CPC,直射光学效率分别提高了 14.09%、6.77%、1.98%;7.44%、4.87%、2.50%;3.41%、2.31%、1.54%。尤其是当真太阳时间偏离 12:00 时,末端光线损失对长度更短的 CPC 的影响更为显著。因此,在设计 CPC 时,为降低末端光线损失对 CPC 的影响,其长度不应过短。

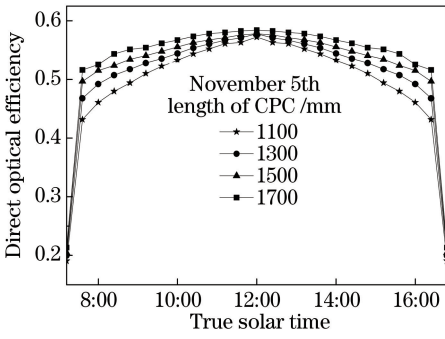


图 7 CPC 长度对末端光线损失的影响

Fig. 7 Effect of CPC length on end ray loss

5 数学模型和实验测试

5.1 模型建立

太阳光线经 CPC 抛物面反射后到达接收管, 能量在接收管内部传递并最终传递给传热工质。真空集热管主要由玻璃管、接收管、铝翅片和 U 型铝管组成, 如图 8(a) 所示。接收管表面涂有高吸收率涂层材料的目的是降低其向外玻璃管传递的能量损失。

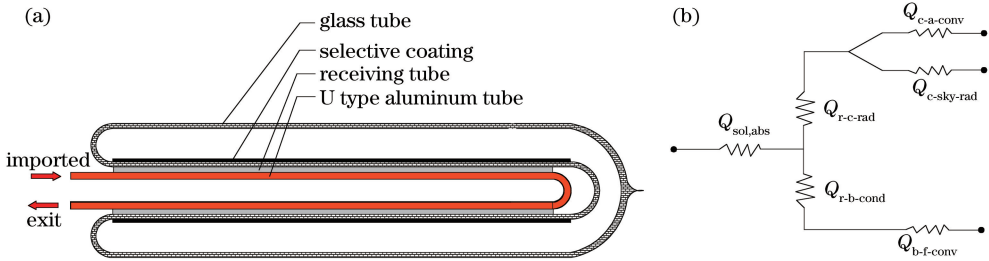


图 8 集热管传热模型。(a) 内部结构为 U 型铝管的全玻璃真空管; (b) 热阻网格

Fig. 8 Heat transfer model of collector tube. (a) All glass vacuum tube with internal structure of U type aluminum tube; (b) thermal resistance grid

5.2 实验测试

为了测试低截取比下 CPC 的光热性能, 同时验证数学模型的准确性, 搭建了 SCPC 聚光集热试验系统, 如图 9 所示。SCPC 聚光集热器为 4 块 CPC 通过内部铝管以串联的方式进行连接, 同时 2 块 SCPC 聚光集热器通过波纹管串联连接。每块 CPC 的长度为 1700 mm, 宽为 265.93 mm, 高为 58.82 mm, 截取比为 0.16。实验测试时间为 2017 年 11 月 5 日, 当天晴朗无云, 实验平台周围无高大障碍物遮挡, 满足测试要求。测试温度采用温度传感器 (PTW-3A) 测量, 工质水体积流量采用电磁流量计测量, 总辐照度和法向直射辐照度采用总辐射仪 (TBQ-2) 和直接辐射仪 (DRT-2-2) 采集, 周围环境风速采用环境风速风向传感器 (WS-

全玻璃真空管能量传递可分为以下过程: 接收管表面与太阳之间通过热辐射进行换热; 接收管与 U 型铝管之间通过热传导进行换热; 传热工质与 U 型铝管通过对流进行换热; 接收管和外玻璃管之间通过热辐射进行换热; 外玻璃管和周围环境之间通过热辐射和对流进行换热。整个能量传递的过程可用热阻网格来表示, 如图 8 (b) 所示。根据热阻模型可建立真空集热管能量平衡方程组, 即

$$Q_{sol,abs} = Q_{r-b-cond} + Q_{r-c-rad}, \quad (18)$$

$$Q_{r-b-cond} = Q_{b-f-conv}, \quad (19)$$

$$Q_{r-c-rad} = Q_{c-a-conv} + Q_{c-sky-rad}, \quad (20)$$

$$Q_{b-f-conv} = mc_p (T_{out} - T_{in}), \quad (21)$$

式中: $Q_{sol,abs}$ 为接收管吸收到的太阳辐射量; $Q_{sol,abs} = I_U \eta_{opt} A_{cpc}$ (A_{cpc} 为 CPC 槽面面积); $Q_{r-b-cond}$ 为接收管与 U 型铝管的导热热量; $Q_{r-c-rad}$ 为接收管与外玻璃管间的辐射换热热量; $Q_{b-f-conv}$ 为 U 型铝管与传热工质的对流换热热量; $Q_{c-a-conv}$ 为外玻璃管与环境的对流换热热量; $Q_{c-sky-rad}$ 为外玻璃管与大气间的辐射换热热量; m 为工质的质量流量; c_p 为工质的定压比热容; T_{in} 、 T_{out} 分别为工质的进口温度和出口温度。

8SX) 测量。

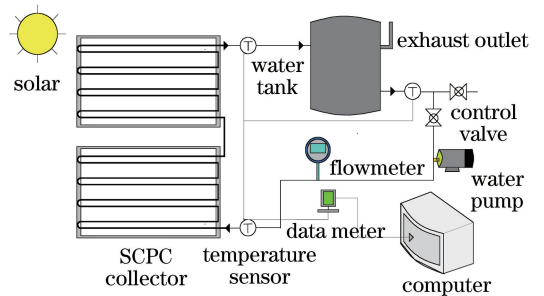


图 9 SCPC 聚光集热系统示意图

Fig. 9 Schematic of SCPC heat collector system

5.3 实验效率计算

CPC 集热器倾斜面上的等效直射辐照强度为^[16]

$$I_1 = I_n \sin \alpha \cos \beta + I_n \cos \alpha \cos \gamma_s \sin \beta, \quad (22)$$

式中: I_n 为法向直射辐照强度; α 为太阳高度角; β 为 CPC 安装倾角; γ_s 为太阳方位角。

CPC 集热器倾斜面上接收到的有效辐照强度为

$$I_U = I_1 + \frac{I_{TOT} - I_1}{C_a}, \quad (23)$$

式中: I_{TOT} 为 CPC 集热器倾斜面上的总辐照强度; C_a 为 CPC 集热器的聚光比。

CPC 的集热效率为

$$\eta = \frac{m c_p (T_{out} - T_{in})}{I_U A_{epc}}. \quad (24)$$

5.4 实验结果与讨论

图 10(a) 为测试当天采集的气象数据, 测试期间, 平均法向直射辐照度为 $832 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均总辐照度为 $898 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均环境温度为 $18.61 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 10(b) 为 CPC 聚光集热器进出口温差的理论值和实验值随测试时间变化的趋势图。从图中可看出理论值和实验值的变化趋势基本相符, 理论值和实验值最大相对误差为 8.43% , 平均相对误差为 3.89% 。

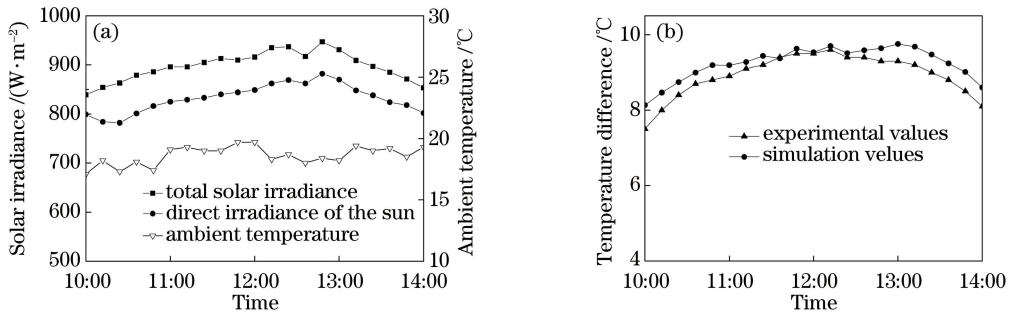


图 10 数据处理。(a) 气象数据图; (b) 实验值与模拟值对比图

Fig. 10 Data processing. (a) Diagram of meteorological data; (b) comparison diagram of experimental and simulated values

受数学模型简化影响和实验条件的限制, 模拟温差与实际温差存在一定的偏差, 但总体上二者变化趋势大致相同且平均相对误差仅为 3.89% , 表明建立的数学模型能较好地反映 CPC 聚光集热器进出口温差随测试时间的变化情况。上述实验工作的开展, 验证了基于 Tracepro 软件模拟计算直射光学效率的准确性, 证明了通过模拟分析所提出来的相关结论的准确性。

测试中, 研究了归一化温差 T^* 对 CPC 集热效率的影响。从表 2 可以看出, CPC 集热效率随着 T^* 的增加而减小, 表明工质水进口温度的增加、环境温度的降低以及有效辐照强度的减小将增加

表 2 低截取比下 CPC 集热器的测试数据

Table 2 Test data of CPC heat collector under low interception ratio

T_a / $^\circ\text{C}$	T_{in} / $^\circ\text{C}$	T_{out} / $^\circ\text{C}$	I_U / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$T^* /$ $(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1})$	η / $\%$
17.9	20.2	29.4	877.51	0.0026	59.41
17.1	29.5	38.2	852.83	0.0145	57.81
17.2	40.3	49.1	916.19	0.0252	54.43
17.9	50.2	58.9	935.32	0.0345	52.71
18.2	60.1	68.1	931.86	0.0450	50.47

Annotation: T_a is the ambient temperature and T^* is the normalized temperature difference, $T^* = (T_{in} - T_a) / I_U$.

CPC 接收管热量传递过程中的能量损失。当 T^* 为 $0.0026 \text{ m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 时, 集热效率为 59.41% , 比 T^* 为 $0.0450 \text{ m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 时效率提高了 17.71% 。

6 结 论

根据 CPC 的基本原理和参数方程, 给出了截取比对相同聚光面积内 CPC 总弧长和接收管数量的函数关系, 计算分析表明低截取比下的 CPC 可有效减少对 CPC 抛物面材料的使用; 对比分析了相同面积内各截取比下 CPC 的总弧长和接收管数量, 结合弧面材料和接收管的成本, 可为 CPC 结构的优化设计提供依据。基于 Tracepro 软件对四个季节日期下各截取比 CPC 的光学效率进行了模拟计算, 模拟结果显示低截取比的 CPC 可有效降低末端光线损失对 CPC 直射光学效率的影响; 增加 CPC 的长度有利于降低 CPC 的末端光线损失。建立了真空管传热数学模型, 将光学效率代入数学模型进行进出口温差的数值模拟计算, 与实验值进行对比分析, 验证了 Tracepro 软件模拟计算得出的光学效率的准确性。实验测试同时得出工质水的集热效率随归一化温差的增加而减小, 有效辐照强度的增加和进口温度的减小有利于提高 CPC 的集热效率。相较于以改变太阳光线入射角对 CPC 进行的一维光线追

踪,本文实现了对 CPC 的二维光线追踪,可准确模拟分析不同时刻末端光线损失对 CPC 直射光学效率的影响,为 CPC 结构的进一步优化设计提供了一种新的方法。

参 考 文 献

- [1] Reichl C, Hengstberger F, Zauner C. Heat transfer mechanisms in a compound parabolic concentrator: comparison of computational fluid dynamics simulations to particle image velocimetry and local temperature measurements[J]. *Solar Energy*, 2013, 97(5): 436-446.
- [2] Yang M, Pei G, Li G Q, *et al.* Experimental comparison of compound parabolic concentrator with three low concentration ratio [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(2): 431-437.
杨明,裴刚,李桂强,等.三种低倍聚光比的CPC的实验对比研究[J].*太阳能学报*, 2017, 38(2): 431-437.
- [3] Kalogirou S. The potential of solar industrial process heat applications[J]. *Applied Energy*, 2003, 76(4): 337-361.
- [4] Abdullahi B, Al-Dadah R K, Mahmoud S, *et al.* Optical and thermal performance of double receiver compound parabolic concentrator [J]. *Applied Energy*, 2015, 159(4): 1-10.
- [5] Liu L Z, Li J H. The optical performance of compound parabolic concentrators (CPC)[J]. *Energy Technology*, 2006, 27(2): 52-56.
刘灵芝,李戡洪.复合抛物面聚光器(CPC)光学分析研究[J].*能源技术*, 2006, 27(2): 52-56.
- [6] Zhang X W, You S J, Zhang H. Research on thermal performance of serpentine compound parabolic concentrator solar collector[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2013, 34(8): 1398-1403.
张晓伟,由世俊,张欢.蛇形复合抛物面太阳集热器的热力性能研究[J].*太阳能学报*, 2013, 34(8): 1398-1403.
- [7] Yu L, Wang J, Zhang Y M. Optical analysis of heat-pipe evacuated tubular solar collector with inner CPC [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(8): 1392-1397.
余雷,王军,张耀明.内聚光CPC热管式真空集热管的光学效率分析[J].*太阳能学报*, 2012, 33(8): 1392-1397.
- [8] Feng Z K, Li M, Wang Y F, *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.
- [9] Tchinda R, Kaptouom E, Njomo D. Study of the CPC collector thermal behavior [J]. *Energy Conversion and Management*, 1998, 39(13): 1395-1406.
- [10] Waghmare S A, Gulhane N P. Design and ray tracing of a compound parabolic collector with tubular receiver[J]. *Solar Energy*, 2016, 137: 165-172.
- [11] 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(5): 175-185.
- [12] Bellos E, Korres D, Tzivanidis C, *et al.* Design, simulation and optimization of a compound parabolic collector [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2016, 16: 53-63.
- [13] Tian Q. A study on CPC thermal property and application in low or medium temperature range[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 21-27.
田权.CPC太阳能集热器的集热性能及其在中低温领域的应用研究[D].南京:东南大学,2016:21-27.
- [14] Su Z Y, Gu S Y, Wang J, *et al.* Simulation of optical performance for compound parabolic solar collector[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(9): 2448-2453.
苏中元,顾晟彦,王军,等.复合抛物面集热器光学模拟[J].*太阳能学报*, 2017, 38(9): 2448-2453.
- [15] Tang R S, Lu E R. The optimal tilt angle of collectors[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1988, 9(4): 369-376.
唐润生,吕恩荣.集热器最佳倾角的选择[J].*太阳能学报*, 1988, 9(4): 369-376.
- [16] Yang M. Comparative study on three CPC of low concentration ratio[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 25-29.
杨明.三种低倍聚光比CPC的对比研究[D].合肥:中国科学技术大学,2015:25-29.