

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.01.013

CPC 簇太阳能两级聚集传输特性研究

戴贵龙, 庄莹, 谢林毅

(福建工程学院 建筑新能源与节能福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 通过 3D 打印建立阵列式三维 CPC 簇测量模型, 结合 CCD 相机对其出口能流密度分布性能进行实验验证。在此基础上, 交叉使用 ProE 和 TracePro 软件技术, 对单碟与理想 CPC、单个阵列式 CPC、阵列式三维 CPC 簇 3 种两级聚集器的太阳能聚集传输特性进行模拟对比。结果表明: 当容差角取 2° , 高度方向 4 等分时, 阵列式三维 CPC 与单碟两级聚集器具有最优的综合性能和较高的传输效率; 三维 CPC 簇降低了 CPC 的高度, 对入射的太阳光干扰作用小, 能保证聚集能流集中在吸热器侧壁底部以及底面上。结论为三维复合抛物曲面聚集技术的发展提供理论支撑。

关键词: 太阳能; CPC; 两级聚集器; 能流密度; 数值模拟

中图分类号: O435.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)01-0078-05

Study on the two-stage gathering and transmission characteristics of CPC cluster solar energy

DAI Guilong, ZHUANG Ying, XIE Linyi

(Key Laboratory of New Energy and Energy-saving in Building in Colleges and Universities of Fujian Province, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: An array-type three-dimensional CPC cluster measurement model was established by 3D printing, and its outlet energy flow density distribution performance was experimentally verified with a CCD camera. On this basis, the ProE and TracePro software technologies were used alternately to simulate and compare the solar energy aggregation and transmission characteristics of three two-stage concentrators such as ideal CPC and single dish, single array CPC and single dish, array three-dimensional CPC cluster and single dish. Results show that: when the tolerance angle is 2° and the height direction is divided into 4 equal parts, the three-dimensional CPC array and the single-disc two-stage concentrator have the best overall performance, higher transmission efficiency, and better concentrated energy flow density distribution. On the other hand, the array-type of the three-dimensional CPC cluster reduces the height of the CPC, and has little interference with the incident sunlight, ensuring that the concentrated energy flow is concentrated on the bottom and bottom surface of the side wall of the heat sink. The conclusion provides theoretical support for the development of three-dimensional composite parabolic surface aggregation technology.

Keywords: solar energy; CPC; two-stage concentrator; energy flow density; numerical simulation

聚集器是聚光太阳能系统的核心部件^[1], 在太阳能一次聚集器焦平面上布置反射式二次聚集器, 形成太阳能两级聚集器系统, 是优化吸热腔内

传热性能的重要方法^[2-3], 常见的反射式二次聚集器三维 CPC (compound parabolic concentrator), 其曲面玻璃镜的成型、抛光技术难度高, 难以达到反

收稿日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51806037, 52176181)

第一作者简介: 戴贵龙(1983—), 男, 江西崇仁人, 副教授, 博士, 研究方向: 太阳能热利用。

射技术要求,在相对粗糙的三维 CPC 壳体上粘贴梯形平面小镜,以平代曲,构成阵列式三维 CPC^[4-6],是近似实现三维 CPC 反射聚光效果的有效途径。

王健等^[7]通过实验研究了散射比对低倍 CPC 热性能的影响;吴德众等^[8]为了提高二次聚集系统的光学性能,对 CPC 进行了系统优化;Li 等^[9]对 CPC 系统进行了参数研究和结果优化。尽管三维 CPC 或三维 CPC 簇的工程应用有较多的文献报道,但对三维 CPC 簇的太阳能聚集传输性能的定量分析及其影响因素缺少研究。本文在实验测量与数值模拟单级 CPC 簇聚集性能的基础上,对单碟与理想 CPC、单碟与单个阵列式 CPC、单碟与阵列式三维 CPC 簇等 3 种两级聚集器进行模拟分析,探究阵列式三维 CPC 簇太阳能两级聚集器的传输特性。

1 光路传输物理数学模型

1.1 物理模型

太阳能两级聚集系统(单碟与阵列式三维 CPC 簇)光路传输模型如图 1 所示。入射聚集太阳辐射能流的中心与抛物面聚集器焦平面上的焦点重合。入射聚集太阳能流经单碟镜反射,进入阵列式三维 CPC 簇腔内,经腔壁镜反射,在吸热器中利用。对理想 CPC 与单碟、单个阵列式 CPC 与单碟等两级聚集器,结构布置类似。

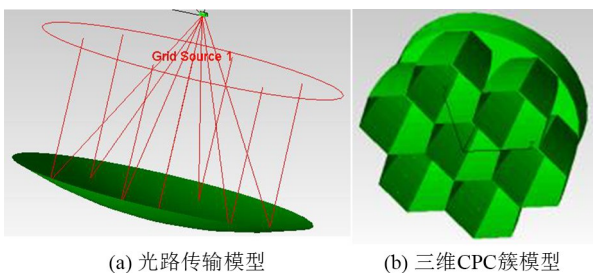


图 1 三维 CPC 簇与单碟两级聚集系统光路传输模型

Fig.1 Optical path transmission model of 3D CPC cluster and single-dish two-stage aggregation system

在直角坐标系 $o-xyz$ 中, x 轴为系统对称轴, yo 平面与单碟焦平面重合。则单碟聚集器的表面方程为

$$x = \frac{z^2 + y^2}{4f} - f \quad (1)$$

式中, f 为单碟抛物面的焦距,mm。

在直角坐标系中,单碟聚集器的开口半径 R 和高度 H 计算式分别为:

$$R = \frac{2f \cdot \sin\psi}{1 + \cos\psi} \quad (2)$$

$$H = \frac{f \cdot (1 - \cos\psi)}{1 + \cos\psi} \quad (3)$$

式中, ψ 为单碟聚集器的边缘角,rad。

考虑两级聚集器的面型误差、跟踪误差和太阳光锥角对聚光性能的影响,统一为光学误差模型,在直角坐标系中,理想三维 CPC 曲面方程为

$$\theta_{\text{opt}} = \sqrt{\theta_{\text{sol}}^2 + \theta_{\text{tra}}^2 + 2\theta_{\text{sur}}^2} \quad (4)$$

式中, θ_{sol} 为太阳光锥角,约 4.65×10^{-3} rad; θ_{tra} 为跟踪误差, $\times 10^{-3}$ rad; θ_{sur} 为面型误差, $\times 10^{-3}$ rad。

交叉使用 ProE 和 TracePro 软件建立阵列式三维 CPC 簇与单碟两级聚集器物理模型,根据光斑半径和单碟聚集器的边缘角 ψ ,在 TracePro 软件中绘制理想的三维 CPC 壳体,在 ProE 中基于该壳体模型,沿周向和高度方向进行分割,用等腰梯形小平面镜替代曲面,构成阵列式三维 CPC。在此基础上,通过镜像技术,绘制阵列式三维 CPC 簇模型。将阵列式三维 CPC 簇模型导入 TracePro,添置单碟和吸热器模型,形成完整的两级聚集系统。设置光学误差和光线抽样数等模拟参数,进行光学跟踪模拟,获得统计分析结果。

1.2 实验方法

采用 CCD 反射法测量单级阵列式 CPC 光斑能流密度分布,实验装置如图 2(a) 所示,主要包括单级阵列式 CPC、太阳光指示杆、朗伯板、CCD 相机和中性密度滤光片等,图 2(b) 为 CCD 相机拍摄下单级 CPC 实物模型的灰度图像。单级阵列式 CPC 入口半径 7.5 cm,高度 10.6 cm,由厚度 2 mm 的 ABS 树脂材料通过 3D 打印而成,在聚集器的内壁面上再粘贴 36 块(6×6)等腰梯形玻璃镜制成反光壁面。太阳光指示杆为 1.2 m 的不锈钢接杆,保证太阳光正向入射(影子长度 0)。朗伯板通过玻璃板涂抹硫酸钡浆液晾干制成,尺寸 20 cm×20 cm。

实验测量过程:将太阳光指示杆、朗伯板固定在实验底座上。阵列式 CPC 太阳光入口朝上,出口朝下放置在朗伯板上。调整实验底座的方位角和倾斜角,直到太阳光指示杆的影子长度为零,保证太阳光法向入射。而后用 CCD 相机(镜头前安装中性密度滤光片)拍摄阵列式 CPC 底面朗伯板

上的光斑图像。通过对光斑图像的数据处理,获得阵列式 CPC 聚集能流密度分布结果。

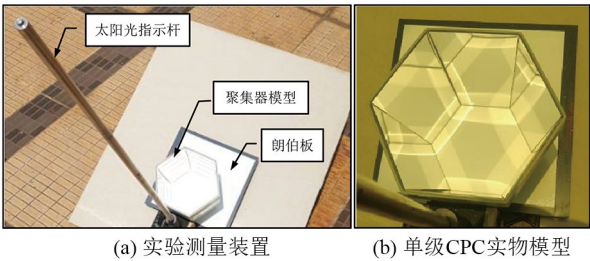


图 2 太阳能聚集器朗伯板实验测量装置
Fig.2 Experimental measuring device of Lambert plate of solar concentrator

2 结果分析

2.1 计算条件说明

根据室外太阳平行光入射单级 CPC 的实验条件进行模拟,取单碟聚集器焦距 $f = 3.0\text{ m}$, $\psi = 50^\circ$ 。根据单碟聚集器光斑直径,取理想三维 CPC 太阳光入口直径 $d_c = 7.5\text{ cm}$,接收半角 $\theta_c = \psi + \Delta\theta$, ($\Delta\theta$ 为容差角,取 2°)。阵列式 CPC 以理想 CPC 为壳体,周向 6 等分,高度方向 4 等分。圆筒吸热器半径 6 cm,高度 5 cm,壁面为黑表面。在 TracePro 中,采用圆盘光源,半径 2.8 m (等于单碟聚集器口径), $x = -2.0\text{ m}$,沿 x 轴负方向发射,跟踪光源数密度为 $5 \times 10^6/\text{m}^2$ (抽样环数 1 300)。两级聚集器的光学误差 $\theta_{\text{opt}} = 10.0 \times 10^{-3}\text{ rad}$ 。

2.2 模拟结构可靠性验证

单级阵列式 CPC 的模拟结果与测量结果对比如图 3 所示。由于单级阵列式 CPC 为中心对称的六边形结构,图 3 中的结果曲线为 CPC 出口朗伯板上对角线能流密度分布数据(图中六边形为 CCD 拍摄图像)。综合考虑阵列式 CPC 壳体面型误差、等腰梯形玻璃镜切割与粘贴误差、朗伯面漫反射误差、系统安装误差以及 CCD 仪器误差等,测量结果的不确定度约 3.6%。

由于阵列式 CPC 聚集器镜壁面将大部分反射聚集在出口边缘处,导致特征曲线中间低,两侧高。对比发现,实验结果和模拟结果在下降拐点处差别最大,这是由于在该处能流密度变化剧烈,受实验测量精度影响,该处的测量结果误差较中心区域大。实验结果与数值模拟匹配性高,说明本文模拟方法的可靠性高。

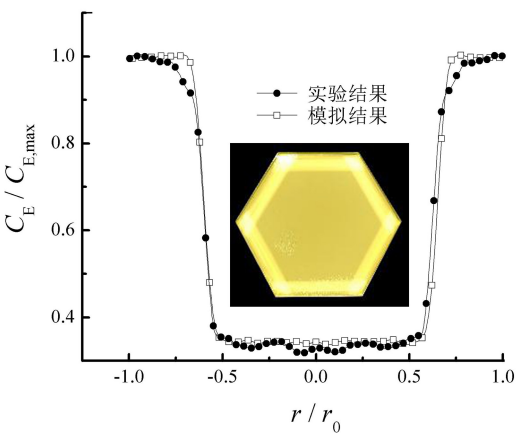


图 3 单级阵列式 CPC 实验测量与数值模拟对比
Fig.3 Comparison of single-stage array CPC experimental measurements with numerical simulations

2.3 阵列式三维 CPC 两级聚集器的聚光性能影响分析

2.3.1 容差角对两级聚集器传输效率的影响

对于两级结构聚集器,抛物面入口为外界平行光,该平行光经过抛物面反射聚集,形成不平行、非均匀光线投射到 CPC 的入口,经 CPC 再次反射聚集,进入吸热器。容差角对两级聚集器的传输效率(指单碟聚集器反射传输的太阳光能够进入吸热器的份额)的影响如图 4 所示。从图中可看出,随着容差角增加,单碟聚集器有更多的边缘光线(反射度大)穿透阵列式 CPC 进入吸热器,传输效率明显增加。但阵列式 CPC 接收半角增加,几何聚光比有所减小。

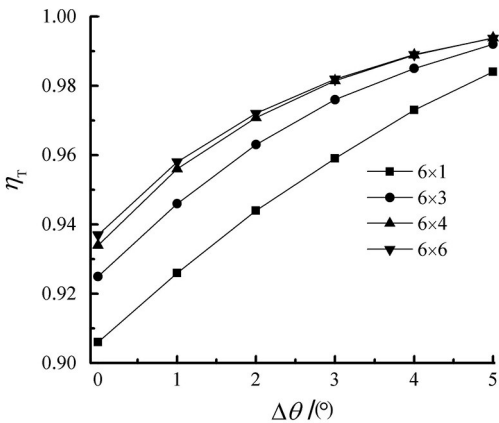


图 4 阵列式 CPC 两级聚集器传输效率特性曲线
Fig.4 Transmission efficiency characteristic curve of array-type CPC two-stage aggregator

另一方面,在同等容差角条件下,当阵列式 CPC 高度方向等分数小于 4 时,随着等分数增加,传输效率显著升高;等分数大于 4 时,传输效率基本稳定,随等分数增加几乎没有变化。综合来看,对阵列式 CPC 两级聚集器,容差角取 2° ,阵列式 CPC 高度方向 4 等分比较合适。

2.3.2 阵列式 CPC 两级聚集器能流密度分布特性分析

阵列式 CPC 两级聚集器中的圆筒吸热器侧壁面及底面能流密度分布特性如图 5, C_E 为能流聚光比(当地聚集太阳能流密度值与外界直射太阳能流密度值之比)。从图 5(a)可看出,受阵列式 CPC 周向 6 等分影响,沿周向侧壁面能流密度波浪型分布。受阵列式 CPC 出口遮挡影响,吸热器底部(图 5(a)上端)能流较低。绝大部分能流集中在侧壁中间偏入口区域,峰值约 2 400。

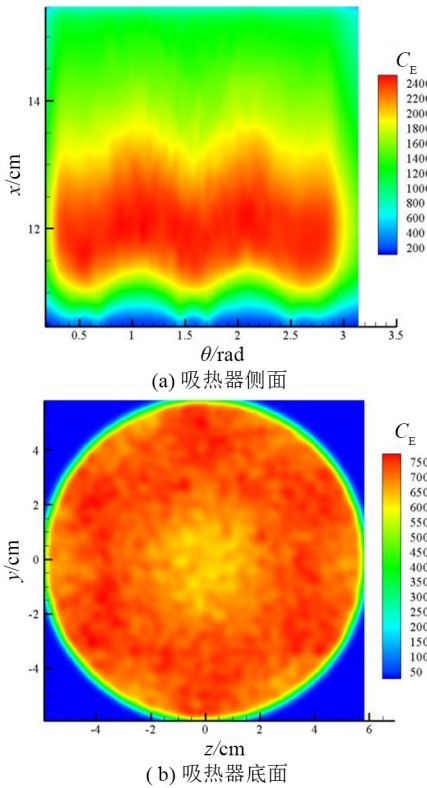


图 5 圆筒吸热器侧壁面及底面能流密度分布
Fig.5 Energy flow density distribution on the side wall and bottom surface of the cylindrical heat sink

如图 5(b)所示,在圆筒吸热器底部,中心区域聚集能流密度低,边缘区域相对较高。光路分析表明,单碟聚集器边缘反射光线,绝大部分投射到阵列式 CPC 侧壁面上,经反射进入吸热器被侧

面及底面吸收。此外,还有少量光线不经阵列式 CPC 壁面反射直接进入吸热器,被吸热器底面和侧面吸收。对比图 5(a)和(b),由于单碟聚集器边缘面积较中心区域大,反射光线多,吸热器侧壁面能流密度整体比底面高,侧壁面能流密度峰值是底面峰值 3 倍左右。

2.4 三维 CPC 簇两级聚集器的能流密度分布

三维 CPC 簇(由 7 个尺寸相同、大小一致的阵列式 CPC 组成,中心 1 个,四周 6 个)两级聚集器中圆筒型吸热器的侧壁面及底面能流密度分布如图 6 所示。圆筒型吸热器是轴对称结构,因此

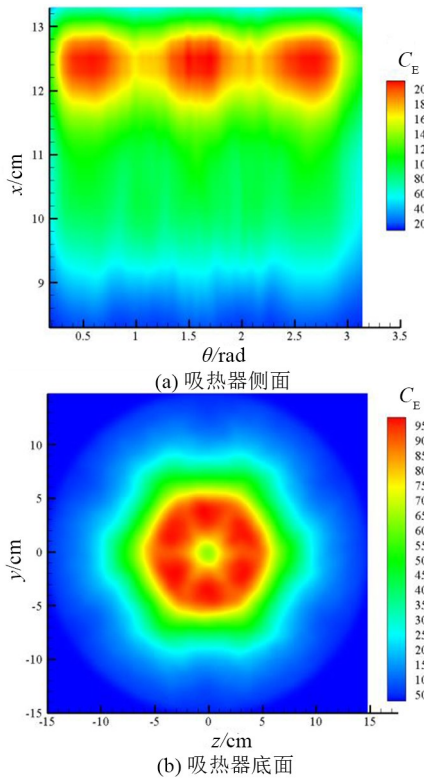


图 6 圆筒吸热器侧壁面及底面能流密度分布
Fig.6 Energy flow density distribution on the side wall and bottom surface of the cylindrical heat sink

取圆周角范围 $0 \sim \pi$ 的半圆筒壁侧面区域,如图 6(a)所示,可以看出,沿圆周方向出现 3 个明显的离散聚集能流光斑,每个光斑半径约 0.5 cm,能流峰值 200 左右。造成的原因是入口半径减小,与单个阵列式 CPC 相比,CPC 簇的高度相应变短(约为单个阵列式 CPC 高度的 0.75),更多的入射光线可不经 CPC 簇侧壁反射直接进入吸热器投射到吸热器侧壁面底部(若入射光线经 CPC 簇侧壁反射,则进入吸热器的入射角变大,更容易投射

到吸热器侧壁面入口附近)。另外,CPC 簇由 7 个参数一致的阵列式 CPC 组成,每个阵列式 CPC 都可对入射太阳光进行相对独立的二次收集、聚集,在吸热器侧壁形成独立的聚集能流光斑。

从图 6(b)可看出,由于多个阵列式 CPC 的反射光线叠加,在吸热器底面上聚集能流图像从中心到边缘可大致分为 3 个区域,中心区近似为圆形,内部由 6 个三角形光斑组成,能流峰值最大,接近 950。次中心区外围近似六边形,聚集能流密度相对均匀,均值 450 左右。第 3 个区域只有一些边缘光线照射,聚集能流密度很小,但由于该区域面积相对较大,聚集能流总量大约在 10%。

参考文献:

- [1] PUGSLEY A, ZACHAROPOULOS A, DEB MONDOL J, et al. BIPV/T facades—A new opportunity for integrated collector-storage solar water heaters? Part 1: State-of-the-art, theory and potential[J]. Solar Energy, 2020, 207: 317–335.
- [2] LOVEGROVE K, BURGESS G, PYE J. A new 500m² paraboloidal dish solar concentrator[J]. Solar Energy, 2011, 85(4): 620–626.
- [3] 王骁, 曹秒, 安志勇, 等. 全内反射型太阳能聚光模块设计与研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1020001.
- [4] 戴贵龙, 夏新林, 李德富. 三维 CPC 太阳能聚集特性的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2011, 32(9): 1419–1423.
- [5] XIA X L, DAI G L, SHUAI Y. Experimental and numerical investigation on solar concentrating characteristics of a sixteen-dish concentrator[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(24): 18694–18703.
- [6] 肖丽仙, 何永泰. 复合抛物面聚光器(CPC)在光伏/热太阳能系统中的应用及实验[J]. 太阳能学报, 2018, 39(9): 2536–2543.
- [7] 王健, 裴刚, 杨明, 等. 散射占比对低倍 CPC 热性能影响的对比实验研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 1–7.
- [8] 吴德众, 李明, 李国良, 等. 低截取比下复合抛物面聚光器的光热性能[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 193–200.
- [9] LI L F, WANG B, PYE J, et al. Temperature-based optical design, optimization and economics of solar polar-field central receiver systems with an optional compound parabolic concentrator[J]. Solar Energy, 2020, 206: 1018–1032.

3 结论

1) 分析对比实验测量结果,验证了单级阵列式三维 CPC 计算模型的可靠性,为阵列式三维 CPC 与单碟两级聚集器和三维 CPC 簇与单碟两级聚集器的模拟分析奠定基础。

2) 对比分析表明,当容差角取 2°,高度方向 4 等分时,阵列式三维 CPC 与单碟两级聚集器具有最优的综合性能,较高的传输效率,较好的聚集能流密度分布。

3) 三维 CPC 簇尽管结构相对复杂,但是降低了 CPC 的高度,对入射的太阳光干扰作用小,且保证聚集能流集中在吸热器侧壁底部以及底面上。

(责任编辑: 陈雯)