

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.01.013

太阳能二次聚集器聚光性能研究

谢林毅, 戴贵龙, 陈雪淇, 庄莹

(福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350118)

摘要: 采用蒙特卡洛射线追踪法, ProE 和 TracePro 软件技术, 模拟分析了多棱台与一次抛物面、复合抛物面二次聚集器与一次抛物面两级聚集器的太阳光聚集传输特性。通过对比, 发现多棱台二次聚集器的几何聚光比为 1.4 左右(约为复合抛物面聚集器的 70%)。多棱台与一次抛物面、复合抛物面二次聚集器与一次抛物面两级聚集器圆筒侧壁和底面的太阳能流密度分布图像相当(沿圆周方向, 复合抛物面两级聚集器相对比较平滑)。结论为反射二次聚集器技术发展提供理论依据。

关键词: 太阳能; 多棱台; 二次聚集器; 蒙特卡洛; 聚光性能

中图分类号: O435.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2020)01-069-06

Study on the concentrating performance of a two-stage solar energy concentrator

XIE Linyi, DAI Guilong, CHEN Xueqi, ZHUANG Ying

(School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Monte Carlo ray tracing method, ProE and TracePro software technology were used to simulate and analyze the solar light gathering and transmission characteristics of the polygonal prism and the primary parabolic surface, and those of the compound parabolic secondary concentrator and the two-stage primary parabolic concentrator. Through comparison, it was found that the geometric concentration ratio of the two-stage polygonal prism concentrator is about 1.4 (about 70% of the composite parabolic concentrator). The solar energy flow density distribution image on the cylinder side wall and the bottom surface of the polygonal prism and the primary parabolic surface is equivalent to that of the composite parabolic secondary concentrator and the primary parabolic two-stage concentrator (along the circumference direction, the composite parabolic two-stage concentrator is relatively smoother). The conclusion provides a theoretical basis for the development of reflective two-stage concentrator technology.

Keywords: solar energy; polygonal prism; two-stage concentrator; Monte Carlo; concentrating performance

太阳能作为一种清洁无污染零排放的能源, 可以解决现阶段人类能源巨大需求和环境保护之间的矛盾^[1-3]。在吸热器太阳光入口布置二次聚集器, 与一次聚集器组成太阳能两级聚集系统, 是提高太阳能热转换温度和效率、防止吸热器外壁面被高倍聚集太阳能流烧蚀的重要技术途径。近年来, 太阳能二次聚集器技术成为太阳能高效热

转换的研究热点。

在反射式二次聚集器方面, 郑宏飞等^[4]构造了一种由二级复合抛物面叠置组成的漏斗式太阳能聚光器。庄立强^[5]设计了一种两级太阳光传输方案。张艳梅^[6]使用 ASAP 软件发现旋转双曲面反射式二次聚集器聚光比更高, 结构更紧凑。CHENG Qiang 等^[7]优化分析了能流密度均匀分

收稿日期: 2019-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助(51806037); 福建省自然科学基金资助(2017J01674)

第一作者简介: 谢林毅(1993-), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 研究方向: 太阳能聚光技术。

通信作者: 戴贵龙(1983-), 男, 江西崇仁人, 教授, 博士, 研究方向: 太阳聚集传输与高效热转换技术。

布的非成像二级反射器(NIS)结构方案。王云峰等^[8]提出了一种新型多平面镜线性组合太阳能聚光器系统。尹鹏等^[9]针对平板型太阳能聚光器中出现的漏光问题,提出了无漏光聚光器的设计方法。常泽辉等^[10]提出了一种新型槽式复合多曲面太阳能聚光器。VOUROS A 等^[11]优化设计了一种线性菲涅耳二次反射镜。BELLOS E 等^[12]研究了一种针对抛物线槽型集热器的辅助反射器。马玄等^[13]通过实验研究得出了加装CPC的非涅耳二次反射塔式太阳能聚光系统吸收器的最佳温度。综合文献可发现,通过优化(广义)三维CPC的光路反射传输途径,是提高太阳能热转换效率的发展趋势。

鉴于三维CPC曲面复杂难加工(实际的三维CPC曲面基本通过内接多块平面小镜拼接组成),本文提出一种多棱台结构二次聚集器。通过建立抛物面聚集器与多棱台两级聚集器光路传输模型,结合ProE和TracePro软件,采用了蒙特卡罗射线追踪法(Monte Carlo Ray Tracing Method, MCRTM),对两级聚集器的太阳能聚集传输特性进行模拟分析,为反射式二次聚集器的发展优化提供技术支持。

1 光路传输物理数学模型

1.1 物理模型

抛物面聚集器与多棱台两级聚集器光路传输模型物理模型如图1所示。多棱台二次聚集器的太阳光入口布置在抛物面聚集器的焦平面上,中心与焦点重合。吸热器的入口与多棱台二次聚集器的太阳光出口位置重合。入射太阳光经抛物面

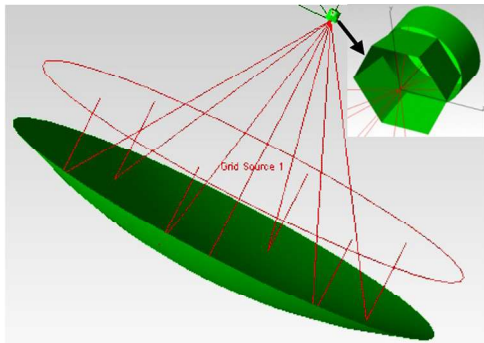


图1 抛物面与多棱台两级聚集器光路传输模型

Fig.1 Optical path transmission model of the two-stage concentrator with a parabolic surface and a polygonal prism

镜反射,进入多棱台二次聚集器腔内,经多棱台二次聚集器腔壁镜反射,从出口穿出,进入吸热器被吸收利用。

在直角坐标系 $o-xyz$ 中,抛物面的焦点在坐标原点(对称轴为 x 轴),其表面方程为

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

式中, x, y, z 分别为直角坐标系 $o-xyz$ 中的 x 轴、 y 轴和 z 轴, f 为抛物面的焦距,单位:mm。

抛物面聚集器的开口半径和高度计算式为

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

$$H = \frac{f(1 - \cos\psi)}{1 + \cos\psi} \quad (2b)$$

式中, ψ 为抛物面的边缘角,即抛物面最边缘位置反射光线与对称轴的夹角,单位:(°); R 为开口半径,单位:mm; H 为聚集器高度,单位:mm。

1.2 二次聚集器的光路模型描述

多棱台(四棱台、六棱台或八棱台)的侧壁为平面,其截面内的光路反射传输过程如图2所示。经抛物面聚集器反射的太阳光以圆锥的形式入射到多棱台二次聚集器的入口(圆锥半角等于抛物面的边缘角 ψ)。多棱台的壁面倾斜角为 α , 点 A 为光学与一次入口直径的交点,点 B 为二次入口与光线的交点,点 C 为光锥对称轴与二次入口直径延长线的交点,点 D 为二次入口直径与多棱台

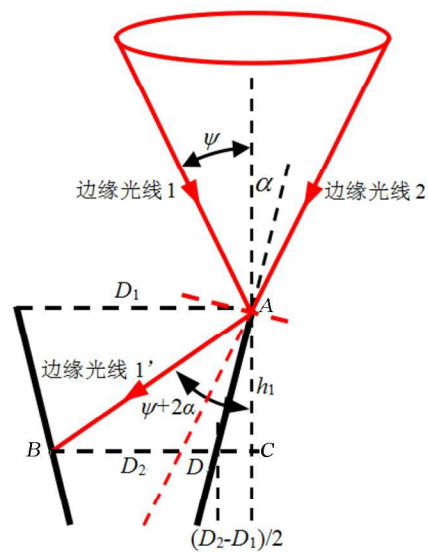


图2 多棱台二次聚集的截面光路传输模型

Fig.2 Optical path transmission model of the cross-section of secondary concentration of the polygonal prism

壁面的交点。在 $\triangle ACD$ 和 $\triangle ABC$ 中,根据三角形几何关系,有 $\angle CAD = \alpha$, $\angle BAC = \psi + 2\alpha$ 。

在 $\triangle ACD$ 和 $\triangle ABC$ 中,分别有

$$\tan \alpha = \frac{D_1 - D_2}{2h_1} \quad (3)$$

$$\tan(\psi + 2\alpha) = \frac{D_1 + D_2}{2h_1} \quad (4)$$

式中, D_1 为棱台的直径,单位:mm; h_1 为光线第一次反射传输的深度,单位:mm; D_2 为出口直径,单位:mm。

联立式(3)和式(4),可得出出口直径 D_2 计算式为

$$D_2 = \frac{D_1 [\tan(\psi + 2\alpha) - \tan \alpha]}{\tan(\psi + 2\alpha) + \tan \alpha} \quad (5)$$

重复式(3)~(5),可依次递推出每次反射的出口直径 D_{n+1}

$$D_{n+1} = \frac{D_n [\tan(\psi + 2n\alpha) - \tan \alpha]}{\tan(\psi + 2n\alpha) + \tan \alpha} \quad (6)$$

将式(5)代入式(3)可得第一次反射所需高度 h_1 为

$$h_1 = \frac{D_1}{\tan(\psi + 2\alpha) + \tan \alpha} \quad (7)$$

依次类推,可得第 n 次反射所需高度 h_n 为

$$h_n = \frac{D_n}{\tan(\psi + 2n\alpha) + \tan \alpha} \quad (8)$$

式中, D_2 为出口直径,单位:mm; D_{n+1} 为反射第 n 次的出口直径,单位:mm; h_1 为第一次反射的高度,单位:mm; h_n 为第 n 次反射需要的高度,单位:mm。

已知抛物面的边缘角 ψ (入射聚集光圆锥半角)、二次聚集器侧壁倾斜角 α 和多棱台的直径 D_1 ,结合二次聚集器内光线反射次数,即可计算 h_n ,从而确定二次聚集器几何结构参数。

抛物面聚集器尺寸较大,在曲面加工和抛光过程中存在面型误差(实际曲面与理想曲线的差异)和镜反射误差(实际反射方向与理想镜反射方向的差异),为方便分析,统一用光学误差表示^[14],有

$$\theta_{\text{opt}} = \sqrt{\theta_s^2 + 2\theta_{\text{sr}}^2 + \theta_{\text{mr}}^2} \quad (9)$$

式中, θ_s 为太阳光锥半角, 4.65×10^{-3} rad; θ_{sr} 为面型误差,取 $(1 \sim 8) \times 10^{-3}$ rad; θ_{mr} 为镜反射误差,取 $(1 \sim 5) \times 10^{-3}$ rad。

结合 ProE 和 TracePro 软件,采用了蒙特卡洛射线追踪法,模拟分析抛物面与多棱台两级聚集器的太阳光聚集传输特性,计算步骤概括为:

1) 利用 ProE 软件建立结构相对复杂的多棱台二次聚集器、圆筒吸热器几何模型,如图 3。

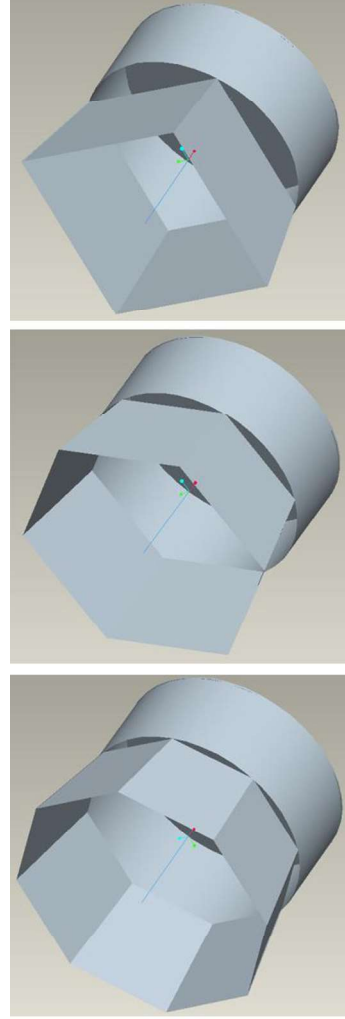


图 3 Proe 软件几何模型

Fig.3 Geometric model of ProE software

2) 将 ProE 建立好的几何模型导入 TracePro 软件,补充 TracePro 中自带的抛物面等模型,进行组装、调试。

3) 定义一次聚集器、二次聚集器、圆筒壁和接收面材料光学属性(镜反射、漫反射以及吸收系数等等)。

4) 建立光源模型(位置、形状、方向、光学误差),通过设置光线发射面的圆环数调整跟踪光线数目。

5) 光线追踪求解,根据追踪结果完成模型分

析讨论。

2 结果分析

2.1 计算参数设置分析

模拟条件取:抛物面焦距 $f=3\ 000\text{ mm}$,边缘角 $\psi=45^\circ$ 。圆筒吸热器,直径 126.3 mm (与多棱台二次聚集器出口直径相当),高度 50 mm 。圆盘光源,直径 $2\ 428\text{ mm}$,在 $x=1\ 000\text{ mm}$ 处,入射太阳光沿 x 负方向,能流密度为 $1\ 000\text{ W/m}^2$ 。跟踪光源数密度为 $10^7/\text{m}^2$ (抽样环数约 $1\ 827$)。太阳光锥半角为 $4.65\times 10^{-3}\text{ rad}$,面形误差取 $5\times 10^{-3}\text{ rad}$,镜反射误差取 $5\times 10^{-3}\text{ rad}$,根据式(9)计算出光学误差为 $9.82\times 10^{-3}\text{ rad}$,取 $10\times 10^{-3}\text{ rad}$ 。一次反射面和二次反射面反射率为 1 ,接收面吸收率为 1 。

二次聚集器为多棱台结构(四边形、六边形和八边形),入口直径为 150 mm (与抛物面焦斑半径相当)。当光线在多棱台腔内反射次数 $n=1$ 时,求得出出口直径为 147.9 mm 、高度为 26.0 mm 、聚光比为 1.028 ;当光线在多棱台腔内反射次数 $n=2$ 时,求得出出口直径为 126.3 mm 、高度为 61.0 mm 、聚光比为 1.411 ;当光线在多棱台腔内反射次数 $n=3$ 时,求得出出口直径为 118.5 mm 、高度为 128.2 mm 、聚光比为 1.602 (为保证光线持续向前传输,要求 $\psi+2n\alpha<\pi/2$,当取入口直径等于 150 mm , ψ 等于 45° 时,求得 $n\alpha<22.5^\circ$)。从上述数据中可以看出,随着反射次数增加,尽管二次聚集器的聚光比略有增加,但是高度显著增加。综合考虑几何尺寸和聚光比,取 $n=2$ 比较合适。对复合抛物面聚集器(三维 CPC),根据抛物面一次聚集器边缘角和焦斑半径,算得高度 61 mm ,出口直径 126.3 mm ,接收半角为 23° ^[15]。如无特殊说明,上述计算参数保持不变。

2.2 模型验证

为验证发射光线数量对 MCRTM 计算精度的影响,以六棱台两级聚集器为例(一次聚集器为抛物面聚集器),分析发射光线数量对六棱台出口能流密度分布曲线的影响,如图 4 所示,图中 q_s^* 为 q_s 除以 q_s 最大值的无量纲量。从图 4 可以看出,六棱台出口能流密度分布曲线基本左右对称,且两端高、中间相对平坦。

当光线数由 $10^5/\text{m}^2$ 增加到 $10^7/\text{m}^2$ 时,能流密度分布曲线逐渐变得光滑稳定。进一步分析发

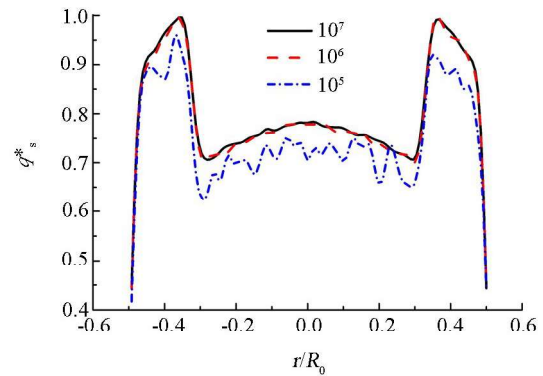


图 4 六棱台跟踪光线数模拟结果

Fig.4 Simulation results of the number of tracked rays by the hexagon prism

现,光线数为 $10^6/\text{m}^2$ 和 $10^7/\text{m}^2$ 时,两者的曲线分布几乎没有差异。综合考虑计算时间和结果精度,后续的计算工况,跟踪光线数取 $10^7/\text{m}^2$ 。

2.3 圆筒吸热器侧壁面能流密度图像分析

在 TracePro 中输入 2.1 中的参数进行模拟,四棱台、六棱台、八棱台以及复合抛物面两级聚集器的圆筒吸热器侧壁面能流密度分布特性如图 5 所示。由于圆筒吸热器的轴对称性,图 5 仅显示半个圆筒壁区域(圆周角 θ 为 $0\sim 3.14\text{ rad}$)。 $x=60\text{ mm}$ 处为吸热器开口位置, $x=110\text{ mm}$ 处为吸热器底部)。

从图 5 中可看出,多棱台两级聚集器的侧壁太阳能流图像沿圆周方向为波浪型分布(图 5(a)~(c)),波峰或波谷的位置靠近吸热器太阳光入口,且波峰或波谷的个数与等棱台的边或角相等,图 5(a)的四棱台有 4 个峰,图 5(b)的六棱台有 6 个峰,图 5(c)的八棱台有 8 个峰(由于图 5 仅显示半个圆筒壁区域,峰的数量减半)。分析发现,能流图像的波浪型分布由多棱台的边角结构特性造成。多棱台的平面边与圆筒吸热器的侧壁存在较大缝隙,导致反射光线照射不到多棱台平面边背后的侧壁,导致吸热器侧壁能流图像出现波谷,而多棱台角坐落在圆筒侧壁上,反射光线能够照射多棱台角附近的侧壁区域,形成波峰。

另一方面,太阳能流密度峰值一般位于图像的波峰上,且随着多棱台边数增加,太阳光聚集度增加,太阳能流密度峰值略有升高,四棱台的太阳能流密度峰值为 939 kW/m^2 ,六棱台的太阳能流密度峰值为 964 kW/m^2 ,八棱台的太阳能流密度峰值为 969 kW/m^2 。

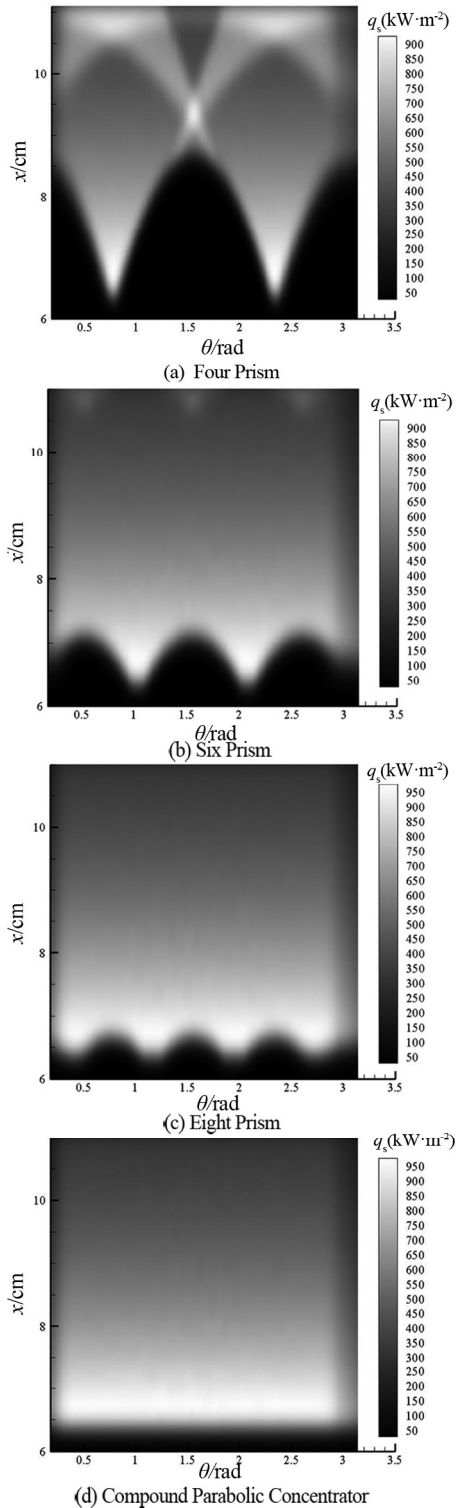


图 5 两级聚集器圆筒壁太阳能流密度分布

Fig.5 Distribution of solar energy flow density on cylinder wall of the two-stage concentrator

进一步分析可发现,四棱台二次聚集器,由于边数较少,对一次聚集太阳光的变异较大,导致吸热器侧面能流图像比较复杂,出现离散的多峰值

分布特性,如图 5(a) 所示,在吸热器底部和中部也出现峰值,不利于布置工质换热系统。

对三维 CPC,由于其旋转对称结构,在圆周方向太阳能流密度分布没有波动,比较均匀,且聚集度高,侧壁能流密度分布峰值约 970 kW/m^2 。

2.4 吸热器入口平面太阳能流密度图像分析

多棱台两级聚集器的吸热器底面太阳能流密度分布特性如图 6 所示。从图 6(a) ~ (c) 可看出,

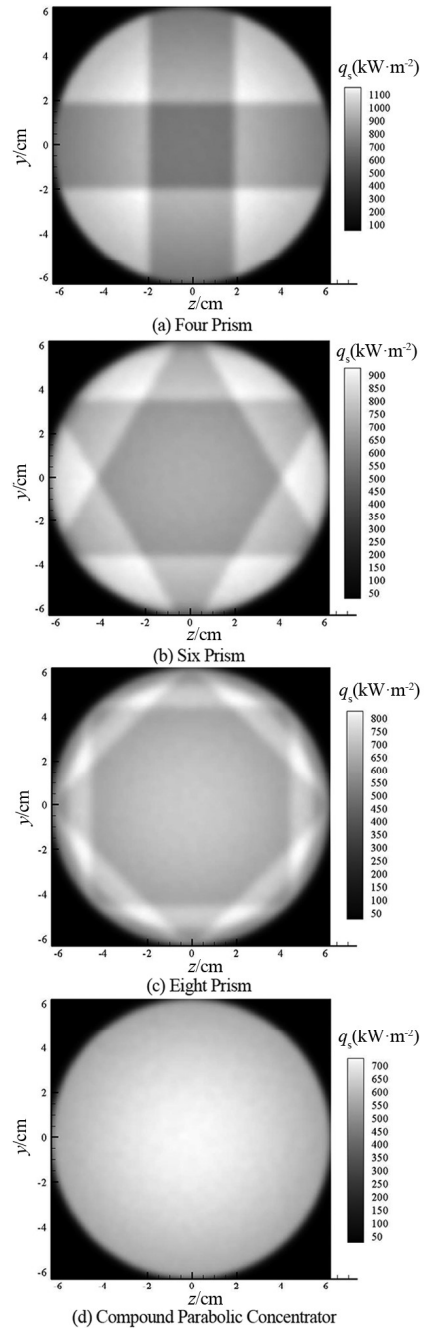


图 6 两级聚集器圆筒吸热器底面太阳能流密度分布

Fig.6 Solar energy flow density distribution of the cylinder bottom of the two-stage concentrator

在平面的边缘处,能流图像呈离散的多峰分布,峰的个数与多棱台二次聚集器的边或角的数量相等。能流图像峰值位于多棱台角的正上方,由角两侧的反射壁反射光线叠加形成。对比发现,随着多棱台边数增加,能流峰面积减小,峰值也相应降低,平面的中心区域能流密度逐渐增加,当多棱台由四棱台增加到八棱台时,相应的峰值由 $1\ 190\ \text{kW/m}^2$ 降低到 $836\ \text{kW/m}^2$ 。

对三维 CPC,如图 6(d)所示,平面边缘的能流密度峰消失,呈现边缘区域能流密度低、中心区域能流密度高的近似高斯分布。

综合图 5 和图 6 可以发现,随着反射式多棱台二次聚集器的边数增加,沿圆筒吸热器的圆周方向,能流图像分布的峰值幅度逐渐减小,越来越平缓均匀。从能流图像性能来看,三维 CPC 是理想的反射式二次聚集器。但是三维 CPC 曲面复杂,加工技术难度大,成本高,多棱台二次聚集器,尤其是六棱台二次聚集器,聚光比适中,能流图像分布较均匀,容易多个拼接构成大型二次聚集器

簇,具有良好的发展应用潜力。

3 结论

1)随着多棱台二次聚集器高度增加,光线在腔内的反射次数增加,聚光比相应增加。当光线反射次数为 2 时,入射边缘角为 45° ,3 种多棱台二次聚集器的聚光比约 1.4,为三维 CPC(聚光比为 2)的 70%左右。

2)在圆筒形吸热器侧壁靠近太阳光入口处,多棱台二次聚集器的太阳能流密度呈波浪型多峰(谷)分布,且峰的个数与多棱台的边数相等;在圆筒形吸热器底面边缘处,太阳能流密度分布呈离散的多峰分布,峰由多棱台的折角反射光线重叠形成。

3)在圆筒侧面和底面的圆周方向,三维 CPC 两级聚集器的太阳能流密度分布相对光滑平整。但总体上,多棱台两级聚集器与三维 CPC 两级聚集器的太阳能聚集性能相当,是后者的有效替代技术。

参考文献:

- [1] 刘欣然,张宁,徐熙平,等. 平板型太阳能聚光器的静力分析和模态分析[J]. 光子学报, 2018, 47(7): 1-11.
- [2] 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): 1-6.
- [3] 丁浩楠,李尧. 碟式太阳能光热发电跟踪控制系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4): 202-209.
- [4] 郑宏飞,李正良,陶涛,等. 漏斗式二级复合抛物面太阳能聚光器的优化设计[J]. 太阳能学报, 2008, 29(7): 820-826.
- [5] 庄立强. 碟式太阳能聚光器二次反射性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [6] 张艳梅. 基于碟式的太阳能二次反射及其分频系统的数值模拟和实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [7] CHENG Q, CHAIJ, ZHOU Z, et al. Tailored non-imaging secondary reflectors designed for solar concentration systems[J]. Solar Energy, 2014, 110: 160-167.
- [8] 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): 1-10.
- [9] 尹鹏,徐熙平,姜肇国,等. 平板型太阳能聚光器的无漏光设计[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 1-11.
- [10] 常泽辉,李文龙,王帅,等. 槽式复合多曲面太阳能聚光集热器光热性能研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(3): 729-736.
- [11] VOUIROS A, MATHIOULAKIS E, PAPANICOLAOU E, et al. On the optimal shape of secondary reflectors for linear Fresnel collectors[J]. Renewable Energy, 2019, 143: 1454-1464.
- [12] BELLOSE, TZIVANIDIS C. Investigation of a booster secondary reflector for a parabolic trough solar collector[J]. Solar Energy, 2019, 179: 174-185.
- [13] 马玄,章代红,代彦军,等. 基于菲涅尔二次反射塔式太阳能聚光系统的新型吸收器集热性能实验研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(7): 1823-1831.
- [14] BUIE D, MONGER A. The effect of circumsolar radiation on a solar concentrating system[J]. Solar Energy, 2004, 76: 181-185.
- [15] W. T. 威尔福德, R. 维恩斯顿. 非成像聚光器光学[M]. 王国强,译. 北京: 科学出版社, 1987: 50-51.

(责任编辑: 陈 雯)