

文章编号 1004-924X(2019)12-2542-07

## 用于线性菲涅尔式聚光系统的复合抛物面聚光器

马 军<sup>1,2,3</sup>, 王成龙<sup>1,2\*</sup>, 夏养君<sup>3</sup>

1. 兰州交通大学 国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070;
2. 兰州交通大学 聚光太阳能产业关键技术与装备省部共建协同创新中心, 甘肃 兰州 730070;
3. 兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为了分析复合抛物面聚光器(Compound Parabolic Collector, CPC)的几何光学效率及影响因素,为线性菲涅尔式聚光系统的优化设计和实际应用提供理论依据。根据用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 特点,在 Matlab 软件中建立模型并进行光线跟踪计算其几何光学效率。利用 TracePro 软件对几何光学效率模型进行验证。最后,采用该模型分析吸热管外径公差、吸热管位置偏移和线型误差对 CPC 几何光学效率的影响。结果表明:间隙为 32.5 mm、接收半角为 55°、截取比为 0.3 的 CPC 配合外径为 70 mm 的吸热管,当吸热管外径公差小于 -0.4 mm、水平方向存在偏移、垂直方向存在正偏移或线型轮廓增大等因素时,其平均几何光学效率迅速减小。实际应用中应尽可能避免以上因素,或者设计时减小 CPC 入射角的范围,从而降低对 CPC 平均几何光学效率的影响。

**关键词:** 光热;线性菲涅尔式;复合抛物面聚光器;光线跟踪;几何光学效率

**中图分类号:** TK519 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192712.2542

## Compound parabolic collector for linear Fresnel reflector system

MA Jun<sup>1,2,3</sup>, WANG Cheng-long<sup>1,2\*</sup>, XIA Yang-jun<sup>3</sup>

1. National Engineering Research Center for Technology and Equipment of Environmental Deposition, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
  2. Co-constructing Collaborative Innovation Center of Concentrated Solar Power Technology and Equipment, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
  3. Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)
- \* Corresponding author, E-mail: clwang@mail.lzjtu.cn

**Abstract:** To analyze the efficiency of geometrical optics and its influencing factors on a Compound Parabolic Collector (CPC), a theoretical basis was provided for the optimization design and practical application of a linear Fresnel reflector system. According to the CPC characteristics of a linear Fresnel reflector system, a model was built using Matlab software; the geometrical optics efficiency was simulated by a ray-tracing method. The geometrical optics efficiency model was validated by TracePro software. The model was used to analyze the influence of outer diameter tolerance, position

**收稿日期:** 2019-08-02; **修订日期:** 2019-09-06.

**基金项目:** 甘肃省高等学校科研项目(No. 2018A-029); 兰州交通大学优秀科研团队(No. 201703); 兰州交通大学青年科学基金资助项目(No. 2016007)

deviation of the absorber tube, and the profile error on the geometrical optics efficiency of the CPC. Results show that the mean geometrical optics efficiency of CPC with a gap of 32.5 mm, half-acceptance angle of  $55^\circ$ , truncation ratio of 0.3, and an absorber tube outer diameter of 70 mm, can be reduced rapidly when the outer diameter tolerance of the absorber tube is less than  $-0.4$  mm, there is a horizontal offset, a positive vertical offset, or an increase in the profile of the CPC. In practical applications, the above factors should be avoided as much as possible or the range of the incidence angle of the CPC should be reduced in design to reduce the influence on its mean geometrical optics efficiency.

**Key words:** photothermal; linear Fresnel reflector; compound parabolic collector; ray tracing; optical efficiency

## 1 引 言

太阳能是一种清洁无污染的可再生能源<sup>[1]</sup>,但能流密度低,利用太阳能发电必须先聚光。根据聚光形式,太阳能聚光系统主要有线性菲涅尔式、槽式、塔式和碟式等<sup>[2-6]</sup>。其中,线性菲涅尔式聚光系统具有结构简单、风阻小、土地利用率高等优点<sup>[7-10]</sup>,因此得到了越来越多的关注。

线性菲涅尔式聚光系统主要由主反射镜阵列、跟踪控制装置和接收器 3 部分构成。接收器是光热转换部件,其性能影响整个系统的光热转换效率。复合抛物面聚光器(Compound Parabolic Collector, CPC)配合高温真空集热管(由吸热管和玻璃管组成)时可以运行高温传热介质(如熔融盐,运行温度  $>550^\circ\text{C}$ )<sup>[11]</sup>,使得系统可以运行在更高的温度下,而高温可以提高热电转换效率,从而降低发电成本。

国内外学者对 CPC 进行了较多的研究,主要集中在结构优化设计和集热性能分析等方面<sup>[12-17]</sup>。但用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC,其开口入射光线的入射角与主反射镜的位置和形状等相关,经每列主反射镜的太阳光线投射到吸热管上的密度分布和间隙损失存在差异,无法用解析法给出其几何光学效率。余雷等<sup>[18]</sup>利用光学软件的“光线追迹”功能来分析 CPC 的光学效率,方法简单而精确,但要研究 CPC 的多个参数变化对其几何光学的影响,就需要建立多个 CPC 模型,而且每个入射角度都需要计算一组光源参数,过程过于繁琐。王成龙等<sup>[19]</sup>提出了在 Matlab 中建立数学模型并利用光线跟踪法对其光学效率

进行仿真计算,并通过实验验证了仿真结果,但验证结果仅与仿真相似,不够精确。另外,鲜有考虑 CPC 用于线性菲涅尔式聚光系统中后吸热管外径公差、吸热管位置偏移和 CPC 线型误差对其几何光学效率的影响。

本文首先利用 Matlab 对 CPC 几何光学效率进行光线跟踪仿真计算,并利用 TracePro 进行模型验证。然后,根据线性菲涅尔式聚光系统的特点,利用建立的模型分析了吸热管外径公差、吸热管位置偏移和 CPC 线型误差对其几何光学效率的影响。

## 2 基于 Matlab 的 CPC 光线跟踪仿真

### 2.1 CPC 数学模型

CPC 与真空集热管示意图如图 1 所示,真空集热管主要由内部吸热管和外部玻璃器组成。

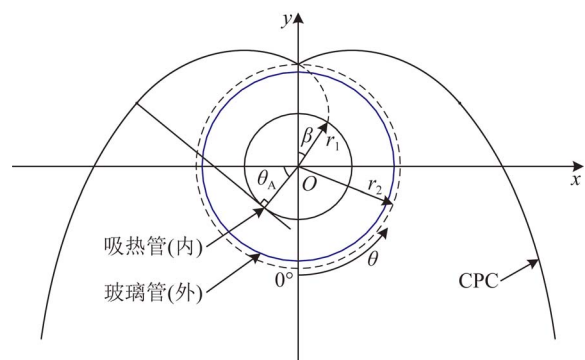


图 1 CPC 与真空集热管示意图

Fig. 1 Sketch of CPC and evacuated collector tube

假设吸热管半径为  $r_1$ ,玻璃管半径为  $r_2$ ,接收半角为  $\theta_A$ 。则 CPC 截面曲线在平面直角坐标

系  $xOy$  中的表达式为<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} x = r_1 \sin \theta - \rho \cos \theta \\ y = -r_1 \cos \theta - \rho \sin \theta \end{cases}, \quad (1)$$

其中:  $\theta$  为角度变量参数,

$$\rho = r_1 (\theta + \beta),$$

$$\arccos \left( \frac{r_1}{r_2} \right) \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \theta_A,$$

$$\rho = \frac{r_1 \left[ \frac{\pi}{2} + \theta + \theta_A + 2\beta - \cos(\theta - \theta_A) \right]}{1 + \sin(\theta - \theta_A)},$$

$$\frac{\pi}{2} + \theta_A \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_A,$$

$$\beta = \sqrt{\left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1} - \arccos \left( \frac{r_1}{r_2} \right).$$

## 2.2 基于 Matlab 的光线跟踪

光线跟踪(或称光迹追踪)是计算机图形学的核心算法之一。在算法中,光源出射光线经过物体表面,其传播符合物理光学定律。

光线跟踪时,给定每条光线的入射点和入射角,跟踪光线在 CPC 反射面上经过一次或多次反射后判断是否与真空集热管的吸热管相交。CPC 几何光学效率是指不考虑光的衰减时到达吸热管的光线数与进入 CPC 开口的光线数之比。入射角根据线性菲涅尔式聚光系统的特点,从  $0 \sim \theta_A$  选择 10 个,入射角不同,则几何光学效率不同,所有入射角对应的几何光学效率的平均值称为 CPC 平均几何光学效率;入射点不同,光线也不同,入射点从 CPC 开口处均匀分布,则入射光线也均匀分布,本文选择入射点为 500 个,即入射光线为 500 条。

## 2.3 模型验证

利用 3D 软件建立二次聚光器 CPC 的几何模型,然后将已建立的 CPC 几何模型导入 TracePro 软件,设定 CPC 内表面为全反射材料,真空集热管的吸热管为全吸收材料,最后设定光源并进行仿真。

基于 Matlab 模型和 TracePro 软件的 CPC (接收半角为  $50^\circ$ 、入射角为  $22.22^\circ$ ) 光线跟踪如图 2 所示。在室内没有太阳直射的光照条件下进行实验测试。将 Matlab 计算与 TracePro 仿真的 CPC 不同入射角度下的几何光学效率进行比较,结果如图 3 所示。

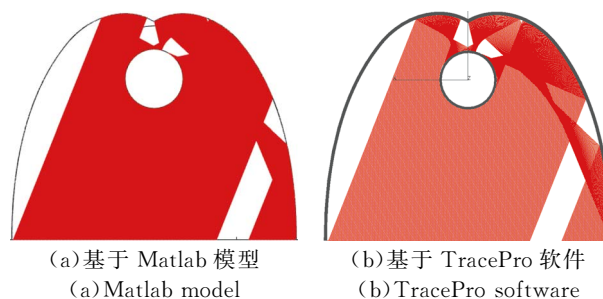


图 2 CPC 光线跟踪图

Fig. 2 Ray tracing of CPC

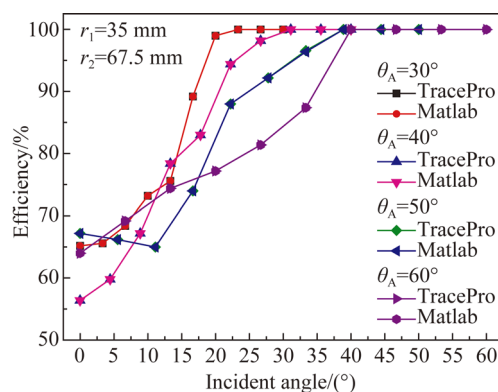


图 3 基于 Matlab 模型和 TracePro 软件的 CPC 几何光学效率比较

Fig. 3 Comparison of CPC geometrical optics efficiency based on Matlab model and TracePro software

由图 2 和图 3 可知,基于 Matlab 模型的仿真计算与基于 TracePro 软件的仿真结果一致,验证了本文 CPC 几何光学效率模型的准确性。

## 3 影响 CPC 几何光学效率的因素

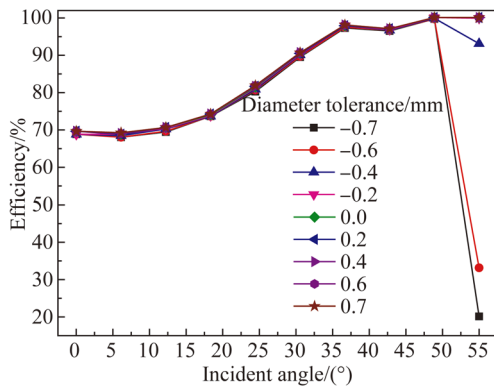
实际应用中,真空集热管的内径,即吸热管外径存在公差,外径为 70 mm 的吸热管公差为  $\pm 1\%$  (GB/T8163-1999)。用于线性菲涅尔式聚光系统的集热管之间通过膨胀节来连接,在受热膨胀时,集热管之间可能会发生错位现象;高立柱加工和安装精度也可能会导致集热管出现偏移,上述原因都可能导致吸热管偏离设计位置。由于反射镜的反射率较高,用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 一般通过玻璃热弯成型后再进行镀膜,因此 CPC 线型轮廓可能会出现误差。

本文研究了吸热管外径公差、位置偏移和 CPC 线型误差对其几何光学效率的影响。选择

CPC 间隙为 32.5 mm、接收半角为 55°、截取比为 0.3,吸热管外径为 70 mm。

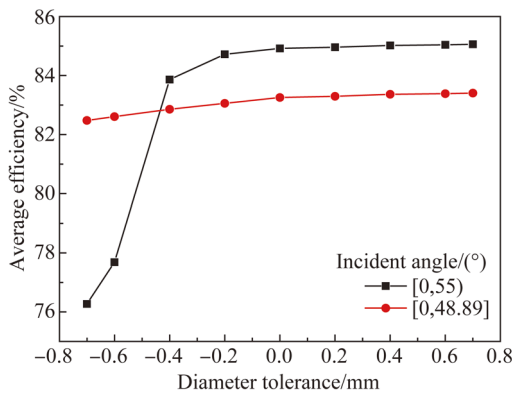
### 3.1 吸热管外径公差

吸热管外径公差对 CPC 几何光学性能的影响如图 4 所示。由图可见,当吸热管外径公差小于 -0.4 mm 时,最外侧入射光线所对应的 CPC 几何光学效率迅速减小。当吸热管外径公差为正值时,CPC 平均几何光学效率随着公差的增大而缓慢增大;当吸热管外径公差为负值时,CPC 平均几何光学效率随着公差减小而缓慢减小;当吸热管外径公差小于 -0.4 mm 时 CPC 的平均几何光学效率迅速减小。



(a)不同吸热管外径公差下 CPC 几何光学效率与入射角的关系

(a)Relation between geometrical optics efficiency of CPC and incidence angle under different outer diameter tolerances of absorber tube



(b)CPC 平均几何光学效率与吸热管外径公差的关系

(b)Relation between mean geometrical optics efficiency of CPC and outer diameter tolerance of absorber tube

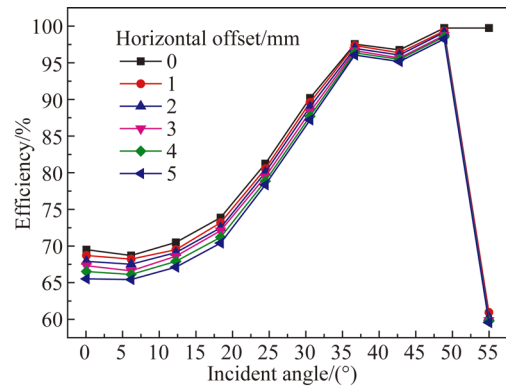
图 4 吸热管外径公差对 CPC 几何光学性能的影响

Fig. 4 Effect of outer diameter tolerance of absorber tube on geometrical optics properties of CPC

### 3.2 吸热管位置偏移

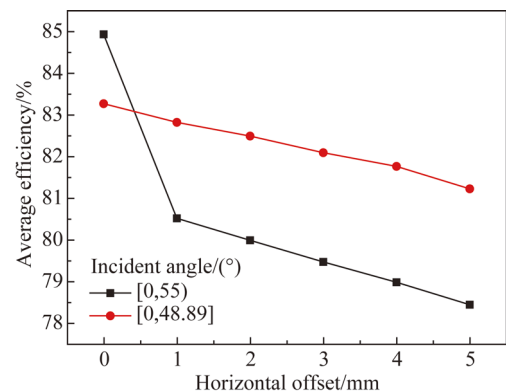
#### 3.2.1 水平方向偏移

对于吸热管在水平方向的偏移,若入射角为  $(-\theta_A \sim \theta_A)$ ,则仅需分析左平移或右平移任何一侧即可;若入射角为  $[-\theta_A \sim \theta_A]$ ,则需要分析左右平移的情况。本文以入射角为  $(-\theta_A \sim \theta_A)$  分析吸热管水平方向偏移对 CPC 几何光学性能的影响,如图 5 所示。由图可见,当吸热管在水平方向偏离设计位置时,最外侧入射光线所对应的 CPC 几何光学效率迅速减小。CPC 平均几何光学效率会在吸热管水平方向存在偏移后迅速减小,且随着偏移距离的增大而缓慢减小。



(a)不同吸热管水平偏移下 CPC 几何光学效率与入射角的关系

(a)Relation between geometrical optics efficiency of CPC and incidence angle under different horizontal offsets of absorber tube



(b)CPC 平均几何光学效率与吸热管水平偏移的关系

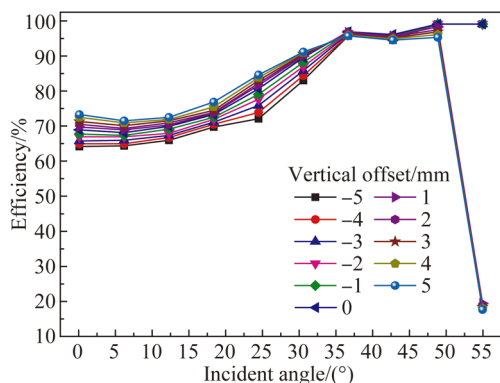
(b)Relation between mean geometrical optics efficiency of CPC and horizontal offset of absorber tube

图 5 吸热管水平偏移对 CPC 几何光学性能的影响

Fig. 5 Effect of horizontal offset of absorber tube on geometrical optics properties of CPC

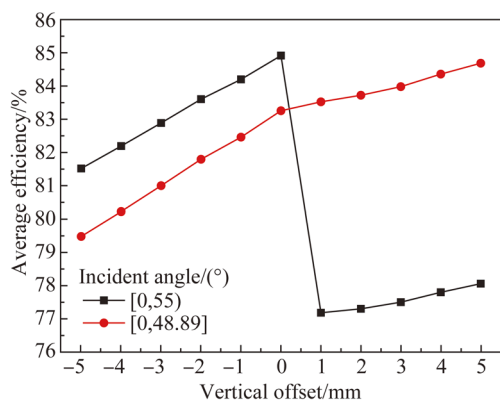
### 3.2.2 垂直方向偏移

吸热管在垂直方向的偏移对 CPC 几何光学性能的影响如图 6 所示。由图可见,当吸热管在垂直方向正偏离设计位置时,最外侧入射光线所对应的 CPC 几何光学效率迅速减小。CPC 的平均几何光学效率会在吸热管垂直方向存在正偏移后迅速减小。



(a)不同吸热管垂直偏移下 CPC 几何光学效率与入射角的关系

(a)Relation between geometrical optics efficiency of CPC and incidence angle under different vertical offsets of absorber tube



(b)CPC 平均几何光学效率与吸热管垂直偏移的关系

(b)Relation between mean geometrical optics efficiency of CPC and vertical offset of absorber tube

图 6 吸热管垂直偏移对 CPC 几何光学性能的影响

Fig. 6 Effect of vertical offset of absorber tube on geometrical optics properties of CPC

### 3.3 CPC 线型误差

根据热弯成型的实际情况,本文采用增大或减小 CPC 渐开线基圆半径的方法,使得 CPC 线型轮廓整体增大或减小,分析其几何光学效率的

变化。CPC 渐开线基圆的半径变化量为  $-2 \sim 2$  mm,间隔 0.5 mm (CPC 线型变化如图 7 所示),它对应的 CPC 开口处单侧增大量如表 1 所示,对 CPC 几何光学性能的影响如图 8 所示。

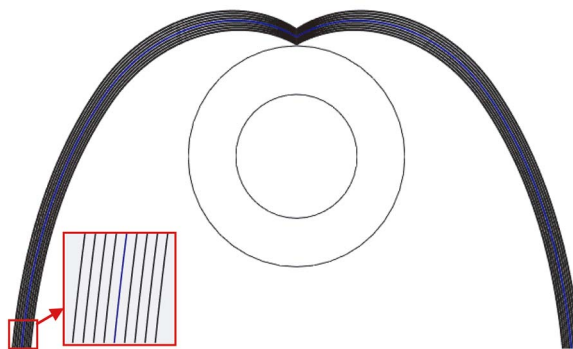


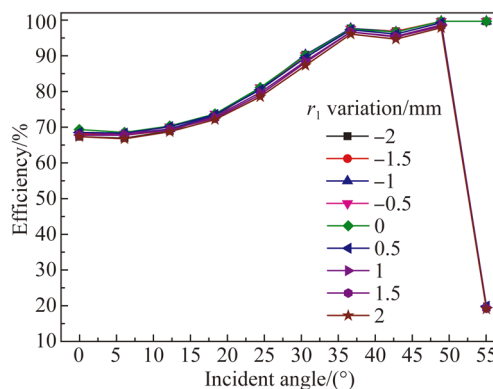
图 7 CPC 基圆半径对其线型的影响

Fig. 7 Influence of base circle radius on outline of CPC

表 1 CPC 基圆半径变化所对应的开口处单侧增大量

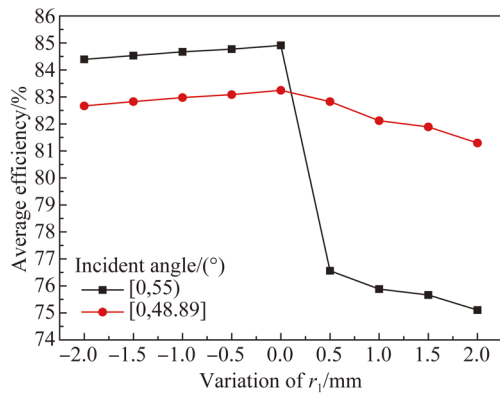
Tab. 1 Unilateral incremental value at opening corresponding to base circle radius change of CPC

$r_1$ 变化量/mm	CPC 开口处单侧变化/mm
-2	-5.032 3
-1.5	-3.780 9
-1	-2.528 1
-0.5	-1.266 6
0.5	1.268 1
1	2.545 1
1.5	3.827 2
2	5.110 8



(a)不同基圆半径下 CPC 几何光学效率与入射角的关系

(a)Relation between geometrical optics efficiency of CPC and incidence angle under different base circle radii



(b)CPC 平均几何光学效率与基圆半径相对变化的关系  
(b)Relation between mean geometrical optics efficiency of CPC and variation of base circle radii

图 8 基圆半径对 CPC 几何光学性能的影响

Fig. 8 Effect of base circle radius on geometrical optics properties of CPC

由图 8(a)可见,当基圆半径增大(即 CPC 线型轮廓大于设计线型)时,最外侧入射光线所对应的 CPC 的几何光学效率迅速减小。由图 8(b)可见,CPC 的平均几何光学效率随着基圆半径的增大而急剧减小后缓慢增大;当基圆半径减小(即

CPC 轮廓小于设计线型)时,CPC 的平均几何光学效率随着基圆半径的减小而缓慢减小。

## 4 结 论

本文为了分析 CPC 的几何光学效率及影响因素,为线性菲涅尔式聚光系统的优化设计和实际应用提供理论依据,利用 Matlab 对 CPC 进行光线跟踪,计算其几何光学效率并利用 TracePro 进行模型验证。根据线性菲涅尔式聚光系统的特点,利用建立的模型分析了吸热管外径公差、位置偏移和线型误差对 CPC 几何光学效率的影响。结果表明:间隙为 32.5 mm、接收半角为  $55^\circ$ 、截取比为 0.3 的 CPC 配合外径为 70 mm 的吸热管,吸热管外径公差小于  $-0.4$  mm、水平方向存在偏移、垂直方向存在正偏移或线型轮廓增大等情况下,其平均几何光学效率迅速减小。实际应用中应尽可能避免以上情况,或者设计时减小 CPC 入射角的范围,从而降低对 CPC 平均几何光学效率的影响。

## 参考文献:

- [1] SAHU K, BIKASH. A study on global solar PV energy developments and policies with special focus on the top ten solar PV power producing countries [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43:621-634.
- [2] MILLS D. Advances in solar thermal electricity technology [J]. *Solar Energy*, 2004, 76(1-3): 19-31.
- [3] DUFFIE J A, BECKMAN W A. *Solar Engineering of Thermal Processes* [M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [4] CAVALLARO F. Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(7): 1678-1685.
- [5] YANG M, YANG X, YANG X, et al.. Heat transfer enhancement and performance of the molten salt receiver of a solar power tower [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(9):2808-2811.
- [6] CUI F, YALING H E, CHENG Z, et al.. Study on combined heat loss of a dish receiver with quartz glass cover [J]. *Applied Energy*, 2013, 112(4):690-696.
- [7] MORIN G, JÜRGEN DERSCH, PLATZER W, et al.. Comparison of linear Fresnel and parabolic trough collector power plants [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(1):1-12.
- [8] LANCEREAU Q, RABUT Q, ITSKHOKINE D, et al.. Wind loads on linear Fresnel reflectors' technology: A numerical study [J]. *Energy Procedia*, 2015, 69:116-125.
- [9] BARBERO R A, MONTES R N, JOSÉ M A, et al.. Analysis and comparison of integrated solar combined cycles using parabolic troughs and linear Fresnel reflectors as concentrating systems [J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 990-1000.
- [10] CHAITANYA P G S, REDDY K S, SUNDARARAJAN T. Optimization of solar linear Fresnel reflector system with secondary concentrator for uniform flux distribution over absorber tube [J]. *Solar Energy*, 2017, 150:1-12.
- [11] 王成龙,马军,范多旺.线性菲涅尔式聚光系统的镜场布置与优化 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 78-82.

WANG CH L, MA J, FAN D W. Arrangement and optimization of mirror field for linear Fresnel

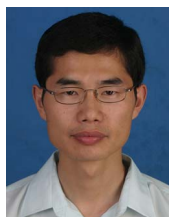
- reflector system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 78-82. (in Chinese)
- [12] ABDULLAHI B, AL-DADAH R K, MAHMOUD S, *et al.*. Optical and thermal performance of double receiver compound parabolic concentrator [J]. *Applied Energy*, 2015, 159:1-10.
- [13] LI L F, WANG B, POTTAS J, *et al.*. Design of a compound parabolic concentrator for a multi-source high-flux solar simulator [J]. *Solar Energy*, 2019, 183:805-811.
- [14] 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):239-247.  
FENG ZH 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):239-247. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] 史继富, 朱艳青, 李注苓, 等. 复合抛物面-渐开线聚光的闷晒式太阳能热水器 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6):1281-1288.  
SHI J F, ZHU Y Q, LI ZH L, *et al.*. Novel integrated solar water heater with compound parabolic and involute concentrator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6):1281-1288. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] 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.  
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. (in Chinese)
- [19] 王成龙, 马军, 范多旺, 等. 用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 仿真研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2):556-560.  
WANG CH L, MA J, FAN D W, *et al.*. Simulation study of a CPC for linear Fresnel reflector system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2):556-560. (in Chinese)
- [20] OOMMEN R, JAYARAMAN S. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses-over-sized reflector [J]. *Energy Conversion & Management*, 2001, 42(11):1379-1399.

#### 作者简介:



马 军(1986—),男,甘肃定西人,博士研究生,讲师,2013年于兰州交通大学获得硕士学位,主要从事聚光太阳能利用技术的研究。E-mail: majun@mail.lzjtu.cn

#### 通讯作者:



王成龙(1978—),男,甘肃张掖人,博士,教授,2004年于华南师范大学获得硕士学位,2009年于兰州交通大学获得博士学位,主要从事新能源利用技术等方面的研究。E-mail: clwang@mail.lzjtu.cn