

用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 仿真研究

王成龙¹, 马 军¹, 范多旺^{1,2}, 鲁小兵³

- (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 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070;
3. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 以用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 为研究对象, 在 Matlab 环境下建立了数学模型。利用光线跟踪法对不同间隙、不同最大接受半角和不同截取比的 CPC 汇聚率进行仿真研究, 结果表明用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 对不同入射角光线具有特定的汇聚率, 随着入射角的变化会出现极小值, 极小值所对应的入射角仅与 CPC 最大接收半角相关, 与截取比和间隙无关。仿真计算了间隙为 50 mm、最大接受半角为 45°、截取比为 0.75 的 CPC 汇聚率为 80.15%。最后通过实验验证了仿真方法的有效性。

关键词: 线性菲涅尔系统; CPC; 建模; 仿真; 汇聚率

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0556-05

Simulation study of a CPC for linear Fresnel reflector system

Wang Chenglong¹, Ma Jun¹, Fan Duowang^{1,2}, Lu Xiaobing³

- (1. National Engineering Research Center for Technology and Equipment of Environmental Deposition, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Compound parabolic collector (CPC) plays an important role in optical efficiency of linear Fresnel reflector (LFR) system. The CPC for LFR was studied, and its mathematical model was established by using Matlab. The method of ray tracking was used to calculate the convergence ratios of CPC with different gap, different maximum acceptance angle, and different truncation ratio. The simulation study illustrates that the CPC for LFR has the specific convergence ratio for the ray with different incident angle. There are two minimum points in the convergence ratio with the change of incident angle. And their positions only depend on maximum acceptance angle, not including truncation ratio and gap. The CPC with gap 50 mm, maximum acceptance angle 45°, and truncation ration 0.75, could achieve a high concentrate ration about 80.15%. The simulation method was further verified by the experimental measurement results, and it has guiding significance for design of CPC.

Key words: linear Fresnel reflector system; CPC; modeling; simulation; convergence ratio

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2014-07-12

基金项目: 国家 973 计划前期研究专项(2012CB626805); 国家国际科技合作专项(2011DFA61850); 甘肃省高校基本科研业务费专项(202089)

作者简介: 王成龙(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事聚光太阳热能系统方面的研究。Email: clwangee@163.com

0 引言

复合抛物面聚光器(CPC)是根据边缘光线原理设计的可将给定接收角范围内的入射光线按理想聚光比收集到接收器上,获得接近于理论最大聚光比的非成像聚光器^[1],已广泛应用于太阳能热水、低倍聚光光伏和 LED 灯具等领域^[2-3]。但现有研究均将 CPC 作为独立聚光器^[4-5],并且对光学的模拟仿真需要根据设计生成实体模型后导入专用光学软件^[6-8],过程比较复杂。由 CPC 和真空集热管构成线性菲涅尔式聚光系统的接收器,可以有效增大系统光学效率,进而实现高温(如 300~550 ℃)领域的应用^[9]。文中以用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC (与真空集热管组成接收器)为研究对象,在 Matlab 中建立数学模型并优化,利用光线跟踪法对其汇聚率进行仿真,最后通过实验验证了仿真结果。

1 CPC 建模

线性菲涅尔式聚光系统中采用的真空集热管在镀有耐高温选择性吸收膜的金属内管外面套有玻璃外管,并且由于安装实际需要,集热管玻璃外管与 CPC 尖部需要有一定空隙。将真空集热管金属内管与 CPC 尖部的间距称为间隙。建模时要考虑留有间隙。

CPC 由圆的渐开线和抛物线组成,关于中心轴对称,因此建模只考虑截面的一侧即可。

1.1 渐开线部分

以真空集热管金属内管外径圆为渐开线基圆,以其圆心为原点建立直角坐标系,CPC 左半段渐开线的参数坐标方程为:

$$x = -R(\sin t - t \cos t) \quad (1)$$

$$y = R(\cos t + t \sin t) \quad (2)$$

式中: R 为基圆半径; t 为渐开线方程的参数。

将渐开线以圆心为中心旋转 α ,使得渐开线上 $t=t_0$ 的点处于 CPC 中心轴上, t_0 和 α 分别满足如下方程:

$$\sqrt{x(t_0)^2 + y(t_0)^2} = l + R \quad (3)$$

$$\begin{cases} x = -R(\sin t_0 - t_0 \cos t_0) \\ y = R(\cos t_0 + t_0 \sin t_0) \\ -(x \cos \alpha - y \sin \alpha) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: l 为间隙。

此时渐开线方程为:

$$X = x \cos(-t_0) - y \sin(-t_0) \quad (5)$$

$$Y = x \sin(-t_0) + y \cos(-t_0) \quad (6)$$

1.2 抛物线部分

选取渐开线上 $t = \frac{3\pi}{4} + \frac{\theta_c}{2} + \alpha$ (θ_c 为 CPC 最大接受半角)的点为渐开线和抛物线的结合点。

绕抛物线顶点将其旋转 θ_c 使其经过左结合点,并且以右结合点为焦点,求得抛物线方程为:

$$\begin{aligned} &((x-m)\cos\theta_c + (y-n)\sin\theta_c)^2 = \\ &-2p[-(x-m)\sin\theta_c + (y-n)\cos\theta_c] \end{aligned} \quad (7)$$

式中: m 、 n 为抛物线分别在 x 轴、 y 轴方向的移动量; p 为抛物线焦准距。 m 、 n 、 p 可以通过上述条件求得。

间隙为 50 mm、最大接受半角为 45° 的 CPC(未截取)模型如图 1 所示。

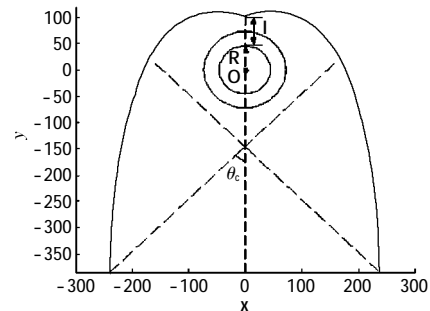


图 1 CPC 模型

Fig.1 Model of CPC

2 仿真分析

2.1 光线跟踪法

将太阳光看作多条均匀分布的光线,经一次反射镜反射后入射 CPC 开口的光线与其中心轴的夹角称为入射角。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,光线从光源被抛射出来,当它们经过物体表面的时候,对它们应用符合物理光学定律的变换。当应用到此研究中,则具体为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金属内管相交。CPC 到达真空集热管金属内管的光线数与进入 CPC 开口的光线数之比称为 CPC 的汇聚率。用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 汇聚率是每列一次反射镜反射光线汇聚率的均值。

2.2 仿真结果分析

线性菲涅尔式聚光系统南北方向对称布置,东西方向一维自动跟踪太阳。当线性菲涅尔式聚光器结构确定,太阳光经每列一次反射镜反射后的反射光线进入 CPC 的方向始终是固定的,即入射角固定,因此文中仿真实验仅模拟聚光系统镜场中的一半反射镜的反射光线即可。

仿真实验以 20 列反射镜的线性菲涅尔式聚光系统为例,即反射光线的入射角度为 10 个。由于 CPC 下部镜面几乎与对称轴平行,截取一部分对太阳光线的汇聚作用影响不大,同时可以显著减小 CPC 深度,降低风阻。CPC 经过截取后,开口到真空集热管圆心的间距与原来的间距之比称为截取比(d)。选用外径 90 mm 的金属内管外套有外径 145 mm 的玻璃外管的真空集热管,根据 CPC 与真空集热管的安装设计,间隙不小于某一值。由已知参数可以在 Matlab 中建立针对该规格真空集热管的 CPC 模型。

CPC 未截取($d=1$),最大接受半角 θ_c 为 45° ,间隙 l 分别为 0、30 mm、40 mm 和 50 mm 时每个入射角度所对应的汇聚率如图 2 所示。

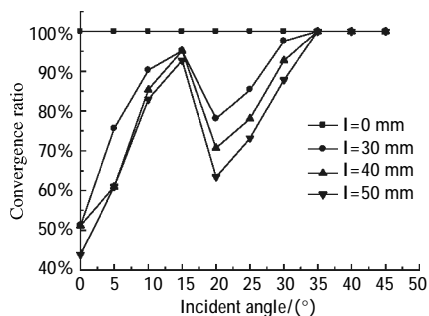


图 2 入射角与汇聚率的关系

Fig.2 Relationship between incident angle and convergence ratio

从图 2 中可以看出,CPC 未截取、最大接受半角确定,每个入射角所对应的汇聚率随着间隙的增大而减小,当入射角为 22.5° 时汇聚率出现极小值,且极小值出现的入射角与间隙 l 无关。给定每条光线的入射点和入射角,光线在 CPC 内有以下 4 种可能:①光线直接照射到集热管金属内管,则光线被吸收;②光线与 CPC 反射面相遇后并被反射,如果反射光线与真空集热管金属内管相交,则认为被吸收;③光线与 CPC 反射面相遇后从交点处被反射,反射光线再次与同侧 CPC 相交,经反射面反射后与真

空集热管金属内管相交,则认为被吸收;④光线与 CPC 反射面相遇后从交点处被反射,反射光线通过真空集热管与 CPC 间隙 l 照射到对称侧 CPC 反射面,反射光线逸出 CPC,不需要再跟踪(见图 3)。从图 3 中可以看出,当间隙增大时,光线经过 CPC 反射后穿过间隙 l 的概率增大,从而汇聚率降低。极端情况,当间隙 l 为 0 时,也就是集热管为金属裸管且完全与 CPC 底部接触,光线经过 CPC 反射后全部投射到接受面上,因此汇聚率为 100%。

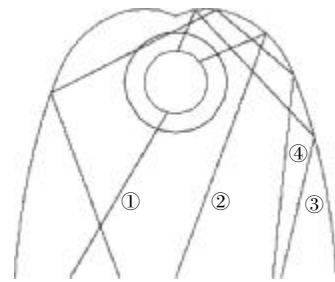


图 3 光线跟踪示意图

Fig.3 Schematic of ray tracing

CPC 未截取($d=1$),间隙 l 为 50 mm,最大接受半角 θ_c 分别为 40° 、 45° 和 50° 时每个入射角度所对应的汇聚率如图 4 所示。

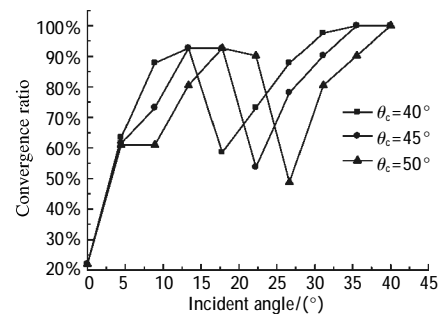


图 4 入射角与汇聚率的关系

Fig.4 Relationship between incident angle and convergence ratio

CPC 未截取、间隙确定,每个入射角所对应的汇聚率随着最大接受半角的变化如图 4 所示。根据前期研究结果^[10],汇聚率随着最大接收半角的增大而增大;间隙导致的汇聚率出现极小值所对应的入射角对于不同最大接收半角的 CPC 并不相同,且随着最大接受半角的增大而增大。如最大接受半角为 50° 时,汇聚率极小值位置对应的入射角为 26.5° ,对于最大接受半角为 45° 的 CPC 则入射角为 22.5° 附近汇聚率出现极小值,最大接收半角 40° 的 CPC 汇聚率极小值位置为 17.5° 。

最大接受半角 θ_c 为 45° , 间隙 l 为 50 mm , 截取比 d 分别为 $1, 0.8, 0.7, 0.6$ 时每个入射角度所对应的汇聚率如图 5 所示。

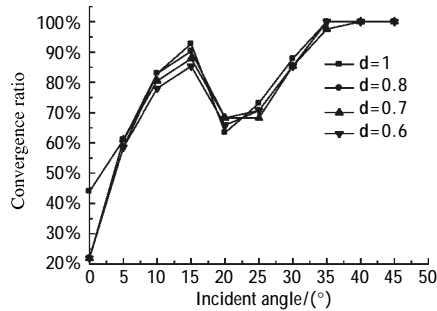


图 5 入射角与汇聚率的关系

Fig.5 Relationship between incident angle and convergence ratio

从图 5 中可以看出, CPC 最大接受半角及间隙确定, 每个入射角所对应的汇聚率随着截取比的增加而缓慢增大, 也就是说截取比的变化对 CPC 汇聚率的影响不大。因此在实际工程中, 为了减小风阻, 可以对 CPC 进行适当的剪裁, 减小 CPC 的高度, 减小迎风面。此外, 还可以看出对于不同的截取比 d , 汇聚率出现极小值对应的入射角相同。

综合上述分析, 汇聚率极小值出现的位置仅与 CPC 最大接收半角 θ_c 相关, 与 CPC 的截取比 d 以及间隙 l 无关。绕抛物线顶点将其旋转 θ_c 使其经过左结合点, 并且以右结合点为焦点, 当 CPC 中集热管金属内管外径 R 确定, 抛物线旋转过的角度 θ_c 决定了 CPC 的反射面线型。也就是说 CPC 反射面的结构决定了汇聚率极小值出现的入射角。线性菲涅尔式太阳能聚光系统中, 一次反射镜中的每一列反射镜对应着一个特定的入射角。其大小由 CPC 距离一次反射镜平面的距离和该列反射镜所在的位置决定。对于确定的 CPC, 不同入射角光线具有特定的汇聚率(见图 3、4、5)。

用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 汇聚率是各列反射镜反射光线汇聚率的平均值。间隙为 50 mm 、最大接受半角为 45° 、截取比为 0.75 的 CPC 汇聚率为 80.15% 。当 CPC 选定后, 在设计聚光系统镜场时, 通过合理设置一次反射镜位置, 使太阳光经其反射后入射到 CPC 开口时避开汇聚率出现极小值所对应的入射角度, 对提升整个系统的光学效率具有实际的指导意义。

3 实验

CPC 汇聚率测试实验在兰州大成科技股份有限公司线性菲涅尔聚光太阳能光热发电试验示范系统中进行。选用间隙为 50 mm 、最大接受半角为 45° 、截取比为 0.75 的 CPC 和 $\Phi 90\text{ mm}$ 真空集热管组合为接收器进行集热。

实验系统分为 2 个集热单元, 每个单元 100 m 长, 累计 200 m 长, 实际镜面集热面积 2455 m^2 。实验选择在夏季晴天中午 $11:00$ 时至下午 $14:00$ 时之间进行。系统无需考虑阴影及遮挡, 只考虑太阳入射角引起的余弦系数。忽略太阳光从一次反射镜到集热器的传播距离引起的大气传播衰减和反射光在集热器上偏移引起的末端溢出损失等。实验系统如图 6 所示。



图 6 实验系统图

Fig.6 Practical photograph of experimental system

经测试太阳辐照度与导热油温升速率计算得到系统光热效率为 58.06% 。实验系统中, 一次反射镜反射率为 93% , CPC(二次反射镜)反射率为 93% , 真空集热管玻璃管透过率为 92% , 集热管吸收率为 95% 。由此, 推算得到 CPC 汇聚率为 78.42% , 与仿真结果非常接近。

4 结论

文中针对线性菲涅尔式太阳能聚光系统的特点, 在 Matlab 中建立线性菲涅尔式聚光系统用 CPC 数学模型。利用光线跟踪方法对其汇聚率进行了仿真研究, 得到了以下结论:

(1) 建立数学模型并进行汇聚率仿真, 容易实现 CPC 优化与设计。

(2) CPC 的汇聚率仿真值与实验值吻合较好, 表明该方法具有可行性。

参考文献:

- [1] Ding X, Lin W, Xu L, et al. The research and applications of heat-pipe-type evacuated tubes and solar collectors [J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2011, 31: 41-49.
- [2] Schmitz M, Schwarzbözl P, Buck R, et al. Assessment of the potential improvement due to multiple apertures in central receiver systems with secondary concentrators [J]. *Solar Energy*, 2006, 80(1): 111-120.
- [3] Hedayatzadeh M, Ajabshirchi Y, Sarhaddi F, et al. Thermal and electrical assessment of an integrated solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector equipped with a compound parabolic concentrator (CPC) [J]. *International Journal of Green Energy*, 2013, 10(5): 494-522.
- [4] Muschaweck J, Spirkl W, Timinger A, et al. Optimized reflectors for non-tracking solar collectors with tubular absorbers [J]. *Solar Energy*, 2000, 68: 151-159.
- [5] Parretta A, Antonini A, Stefaneieh M, et al. Inverse illumination method for characterization of CPC concentrators [J]. *Opt Model Meas Solar Energy Syst*, 2007, 6652: 66502.
- [6] Wang Le, Zhang Shusheng, Zhai Jing. Modeling of LED reflector cup based on compound parabolic concentrator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 102202.
- [7] Guo Limin, Wei Ming, Yang Guanghui, et al. Design and research of removable secondary mirror in high concentrated photovoltaic technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3338-3341. (in Chinese)
郭丽敏, 卫明, 杨光辉, 等. 高倍聚光光伏可拆卸型二次反射镜设计与研究 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3338-3341.
- [8] Ru Zhangqiang, An Zhiyong, Song Helun, et al. Design and performance analysis of total reflection-type secondary optics in concentrated photovoltaic module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 262-266. (in Chinese)
茹占强, 安志勇, 宋贺伦, 等. 应用于聚光光伏模组的全反射式二次聚光器的设计与性能分析 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 262-266.
- [9] Wang C L, Ma J, Fan D W. Optimization design and simulation study of a CPC for LFR system [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 953-954: 74-77.
- [10] Wang Chenglong, Ma Jun, Fan Duowang. Design and analysis of a CPC with single vacuum tube for linear Fresnel reflector system [J]. *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 1-6. (in Chinese)
王成龙, 马军, 范多旺. 线性菲涅尔式聚光系统单管接收器的设计与优化 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44: 1-6.