

线性菲涅尔式聚光系统单管接收器的设计与优化

王成龙^①, 马军^①, 范多旺^{①②*}

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, 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, 兰州 730070

* E-mail: fanduowang-l@mail.lzjtu.cn

收稿日期: 2014-02-15; 接受日期: 2014-04-01; 网络出版日期: 2014-05-04

国家重点基础研究发展计划前期研究专项(2012CB626805)、国家国际科技合作专项(2011DFA61850)和甘肃省高校基本科研业务费专项(202089)资助项目

摘要 接收器是决定线性菲涅尔式聚光集热系统光学效率的关键部件之一。设计了一种适用于高温介质($>500^{\circ}\text{C}$)的线性菲涅尔式聚光系统的接收器, 由单根真空集热管和 CPC 组成, 并重点研究了 CPC 最大接受半角和截取比选择对其性能的影响。研究结果表明: CPC 汇聚率随最大接受半角的增大而缓慢增大; 若截取比小于 0.65, 则 CPC 汇聚率急剧下降; 最大接受半角为 45° 、截取比为 0.75 的 CPC 开口宽度为 475.49 mm, 汇聚率为 80.15%; 基于该 CPC 的系统光热效率为 58.06%, 由此得出 CPC 实际汇聚率高于 78.42%。

关键词
线性菲涅尔系统
CPC
最大接受半角
截取比
汇聚率

1 引言

太阳能总量巨大, 但能流密度低, 提高太阳能利用效率的最佳技术路线是先聚光、再利用。根据聚光形式, 太阳能聚光系统主要有槽式、线性菲涅尔式、塔式和碟式等^[1-3]。由于线性菲涅尔式聚光系统具有结构简单、风阻小、成本低、土地利用率高以及接收器不需跟踪等优点^[4], 正逐渐在大规模电站中得到应用。

接收器是决定线性菲涅尔式聚光集热系统光学效率的关键部件之一, 按照集热管的排列方式主要有梯形腔式、V型及倒V型^[5-8]等。Sahoo 等人^[9]以梯形腔式接收器为研究对象, 对线性菲涅尔式聚光集热系统的集热管进行热分析; Facão 等人^[10]利用光线追踪和 CFD 仿真对线性菲涅尔式太阳能集热器的梯形腔式接收器进行了分析和优化; Lin 等人^[11]对线性菲涅尔式集热系统的倒 V 型集热器进行了理论和实验研究。以上接收器采用了非真空镀膜金属裸管紧

密排列, 有效增大了线性菲涅尔聚光系统的光学效率, 但是由于高温下集热管热损急剧增加而只能应用于低温领域($180\text{--}300^{\circ}\text{C}$)^[12,13]。

发电系统中常规岛部分对系统的运行温度要求高, 现有接收器已不能满足高温介质的运行需求。随着真空集热管技术的成熟和成本下降, 设计出由复合抛物面聚光器(CPC)和真空集热管构成的线性菲涅尔式聚光系统接收器是一个可行方案。国内外学者对 CPC 进行了较多的研究, 如 Muschaweck 等人^[14]用数值和光线跟踪法对一种在实际工作环境下的 CPC 进行了优化。Parretta 等人^[15]采用太阳能模拟器对 CPC 表面光学特性进行了试验分析; 陈华林等人^[16]设计并优化了几种可应用于真空太阳集热管的 CPC。上述研究均将 CPC 作为独立聚光系统, 如应用于热水系统或低倍聚光光伏系统等领域。

目前, 对于由 CPC 与单根真空集热管构成的接收器应用于线性菲涅尔式聚光系统的研究较少。CPC

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 597-602
Wang C L, Ma J, Fan D W. Design and analysis of a CPC with single vacuum tube for linear Fresnel reflector system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 597-602, doi: 10.1360/N092014-00025

作为线性菲涅尔式聚光系统的核心部分, 对其设计优化必须考虑与系统其他部件的协同配合, 更需考虑集热管与 CPC 的相对位置及汇聚率等。将一次反射镜的反射光看作多条均匀分布的光线, 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 汇聚率。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。本文结合工程实际, 在 Matlab 中建立 CPC 数学模型, 利用光线跟踪法设计并优化了适合线性菲涅尔式聚光系统的 CPC, 同时对其汇聚率进行分析, 最后实验验证了理论分析结果。

2 理想 CPC 的结构及特性

理想 CPC 的结构如图 1 所示^[17]。 a 和 b 为两段关于 CPC 中心轴对称的抛物线, F_b 和 F_a 分别为 a 和 b 的焦点, AF_a 和 BF_b 分别与抛物线 b 和 a 的对称轴平行, 其夹角为 CPC 最大接受角 $2\theta_c$ 。 F_bC 和 CF_a 为两段以集热管外圆为基圆的渐开线, 同样关于 CPC 中心轴对称。由圆的渐开线性质可知, 从圆外任何方向射向圆渐开线上的光线经反射后都投射到该圆上, 因此它具有不用跟踪太阳也可以接收会聚光线的功能, 提高了聚光器的光学效率。理想 CPC 的汇聚率为 100%。

3 线性菲涅尔式聚光系统用 CPC

3.1 线性菲涅尔式聚光系统

线性菲涅尔式聚光系统布置原理图如图 2 所示。根

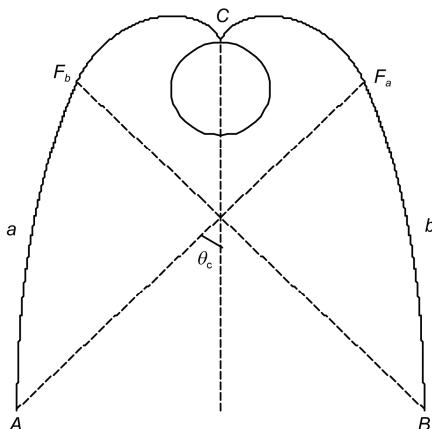


图 1 理想 CPC 结构图

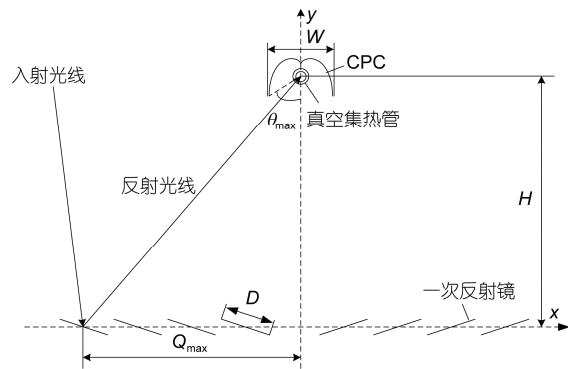


图 2 线性菲涅尔式聚光系统布置原理图

据 CPC 的性质, 太阳光经最远端反射镜反射后入射到 CPC 的光线与 CPC 中心轴的夹角应该小于或等于 CPC 最大接受半角 θ_{\max} , 否则入射光线将无法到达集热管。CPC 的最大接受半角决定 CPC 高度 H 与镜场最大宽度 Q_{\max} 的比值。由几何关系可知, 当最远端反射镜旋转到与反射光线垂直时, 其在 CPC 开口处形成的光斑最大。CPC 开口宽度 W 必须大于该光斑宽度, 才能保证所有的反射光线全部入射到 CPC。

3.2 CPC 建模

根据 CPC 设计的相关理论^[18], 它由圆的渐开线和抛物线组成, 且关于中心轴对称, 因此对其建模只需考虑截面的一侧即可。

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, 并且由于实际安装需要, 集热管的玻璃外管与 CPC 尖部需要有一定间隙, 建模时要考虑留有该间隙。

3.2.1 渐开线部分

以真空集热管的金属内管外径为基圆, 以其圆心为原点建立直角坐标系, 可以得到 CPC 左半段渐开线的参数坐标方程:

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

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

式中 R 为真空集热管的金属内管半径, t 为渐开线方程参数。

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 为集热管的玻璃外管分别与 CPC 尖部和金属内管的距离之和.

此时渐开线方程为

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

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

3.2.2 抛物线部分

抛物线和渐开线的结合点选为渐开线上 $t = \frac{3\pi}{4} + \frac{\theta_c}{2} + t_0$ (θ_c 为 CPC 最大接受半角) 的点.

抛物线绕其顶点旋转后经过结合点, 并且以右边结合点为焦点, 其旋转角度为 θ_c . 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 和 n 为抛物线分别在 x 和 y 轴方向上的移动量, p 为抛物线焦距. m, n, p 可以通过上述条件求得.

3.3 CPC 优化

在线性菲涅尔式聚光系统中, CPC 渐开线部分由真空集热管的金属内管外径决定, 集热管的玻璃外管与 CPC 尖部和金属内管之间的距离需根据实际情况确定. 因此, 线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 优化主要从最大接受半角和截取比的选择两个方面进行.

根据工程实际, 选用的真空集热管在 $\Phi 90$ mm 金属内管外面套有 $\Phi 145$ mm 玻璃外管, 根据 CPC 与集热管的安装设计, 集热管玻璃外管与 CPC 尖部保持间距大于 30 mm.

3.3.1 最大接受半角的选择

CPC 汇聚率与最大接受半角之间的关系如图 3 所示. 汇聚率随着最大接受半角的增大而缓慢地线性增大. 线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 最大接受半角越大, 在 CPC 高度一定时, 镜场可以布置得更宽, 从而有效提高系统的聚光面积和聚光比. 由此可见, 应尽可能选择较大的最大接受半角. CPC 开口宽度与最大接受半角之间的关系如图 4 所示. 用指数拟合实

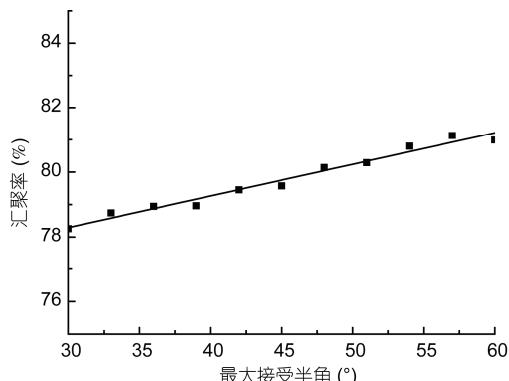


图 3 汇聚率与最大接受半角的关系

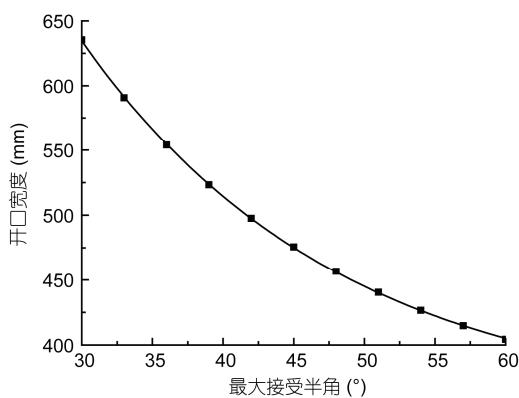


图 4 开口宽度与最大接受半角的关系

验数据, 结果表明 CPC 开口宽度随最大接受半角指数的增大而减小. 若 CPC 开口宽度太小, 会使得一次反射镜宽度过窄, 降低系统的有效聚光面积, 应根据系统优化选择合适的 CPC 最大接受半角.

3.3.2 截取比的选择

理想 CPC 的特点是高宽比过大, 即高度过长, 镜面面积很大, 而收集太阳光的开口较小, 对于大规模应用其经济性较差. 根据 CPC 结构, 下部镜面几乎与对称轴平行, 对太阳光线的汇聚作用不大, 截取一部分可以减少用材, 从而降低成本. 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. CPC 汇聚率与截取比的关系如图 5 所示.

由图 5 可知, 汇聚率随截取比的增加而增大, 当截取比在 0.5 ~ 0.65 之间时, 汇聚率从 75% 快速增加到约 80% ; 当截取比大于临界值 0.7 后, 随着截取比的增大汇聚率增大非常缓慢.

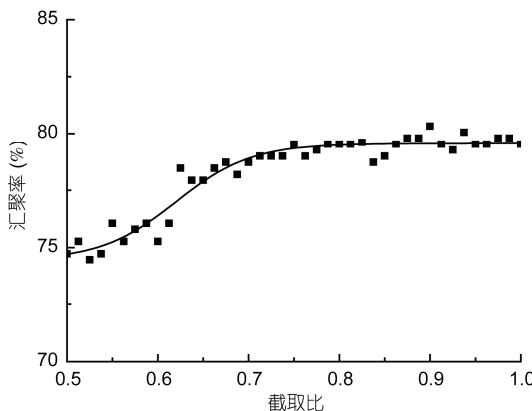


图 5 汇聚率与截取比的关系

4 仿真分析

若选择 CPC 最大接受半角为 45° 、截取比为 0.75, 则开口宽度为 475.49 mm. 将太阳入射光线与 CPC 开口平面的夹角称为入射角, 其范围为 $\left(\frac{\pi}{2} - \theta_{\max}\right) \sim \frac{\pi}{2}$.

仿真实验中选择 11 个入射角度, 相邻的两个角度差 4° , 对应的汇聚率如图 6 所示, 可见对于不同入射角的入射光线有不同的汇聚率. CPC 汇聚率是一个平均值, 为 80.15%.

入射角分别为 45° , 60° , 75° 和 85° 时, CPC 内部的光线分布如图 7 所示.

由图 7 可知, CPC 对入射角分别为 45° , 60° , 75° 和 85° 的太阳光线具有较高的汇聚率, CPC 的汇聚光线比较集中.

对多组 CPC 进行了入射角与汇聚率关系的仿真实验, 结果表明, 对于确定的 CPC, 不同入射角光线

入射角 (°)	汇聚率 (%)
45	100.0
50	100.0
55	95.0
60	85.0
65	70.0
70	65.0
75	85.0
80	75.0
85	65.0

图 6 汇聚率与入射角的关系

图 7 不同入射角光线在 CPC 内的汇聚光线分布图

(a) 入射角为 45° ; (b) 入射角为 60° ; (c) 入射角为 75° ; (d) 入射角为 85°

具有特定的汇聚率(实验数据未给出). 线性菲涅尔式太阳能聚光系统中, 每列一次反射镜对应一个特定的入射角, 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 开口的入射角避开汇聚率较低的位置, 对提升整个系统的光学效率具有较高实际价值.

5 实验研究

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. CPC 聚光器规格参数与仿真分析中的完全一致, 采用 $\Phi 90$ mm 真空集热管与 CPC 组合为接收器进行集热. 系统分为 2 个集热单元, 每个单元长 100 m, 累计长 200 m, 实际镜面集热面积为 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. 实验原理及实验系统分别如图 8 和 9 所示.

经测试, 由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%. 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

600



图 8 实验系统原理图



图 9 实验系统图

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。

实验测试推算得到的 CPC 汇聚率较仿真结果略低, 其原因可能是: 系统一次反射镜的布置导致经其反射的太阳光线入射 CPC 时的入射角并非仿真时所选的精确角度; 反射镜表面有灰尘, 真空集热管有热损; 实验条件中的忽略因素等。

6 结论

本文针对线性菲涅尔式太阳能聚光系统的特点, 在 Matlab 中建立了用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 数学模型。利用光线跟踪方法从最大接受半角和截取比两方面优化 CPC, 并对其汇聚率进行了研究, 得到了以下结论。

(1) CPC 汇聚率随着最大接受半角的增大呈线性缓慢增大; 开口宽度随着最大接受半角的增大而急剧减小。

(2) 当截取比大于临界值后, 随着截取比的增大, 汇聚率增大非常缓慢。

(3) 设计线性菲涅尔式太阳能聚光系统镜场时, 当 CPC 选定后, 一次反射镜可以不均匀布置。

致谢 本文研究工作得到了兰州大成科技股份有限公司的大力支持, 在此表示衷心的感谢。

参考文献

- Duffie J A, Beckman W A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013
- Kalogirou S A. Solar thermal collectors and applications. Prog Energy Combust Sci, 2004, 30: 231–295
- Mills D. Advances in solar thermal electricity technology. Solar Energy, 2004, 76: 19–31
- 杜春旭, 王普, 吴玉庭, 等. 线性菲涅耳聚光装置的聚光比分析. 光学学报, 2011, 31: 91–97
- Pye J D, Morrison G L, Behnia M. Transient modelling of cavity receiver heat transfer for the compact linear Fresnel reflector. In: ANZSES Annual Conference, 2003. 69–78
- Reynolds D J, Jance M J, Behnia M, et al. An experimental and computational study of the heat loss characteristics of a trapezoidal cavity absorber. Solar Energy, 2004, 76: 229–234
- Abbas R, Montes M J, Piera M, et al. Solar radiation concentration features in linear Fresnel reflector arrays. Energy Convers Manage, 2012, 54: 133–144
- Abbas R, Muñoz J, Martínez-Val J M. Steady-state thermal analysis of an innovative receiver for linear Fresnel reflectors. Appl Energy, 2012, 92: 503–515
- Sahoo S S, Singh S, Banerjee R. Steady state hydrothermal analysis of the absorber tubes used in linear Fresnel reflector solar thermal system. Solar Energy, 2013, 87: 84–95
- Facão J, Oliveira A C. Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator. Renew Energy, 2011, 36: 90–96
- Lin M, Sumathy K, Dai Y J, et al. Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped

- cavity receiver. *Appl Therm Eng*, 2013, 51: 963–972
- 12 Xie W T, Dai Y J, Wang R Z. Thermal performance analysis of a line-focus Fresnel lens solar collector using different cavity receivers. *Solar Energy*, 2013, 91: 242–255
- 13 Flores Larsen S, Altamirano M, Hernández A. Heat loss of a trapezoidal cavity absorber for a linear Fresnel reflecting solar concentrator. *Renew Energy*, 2012, 39: 198–206
- 14 Muschaweck J, Spirkl W, Timinger A, et al. Optimized reflectors for non-tracking solar collectors with tubular absorbers. *Solar Energy*, 2000, 68: 151–159
- 15 Parretta A, Antonini A, Stefaneieh M, et al. Inverse illumination method for characterization of CPC concentrators. *Opt Model Meas Solar Energy Syst*, 2007, 6652: 66502
- 16 陈华林, 殷志强, 齐京. 用于真空太阳集热器的复合抛物面聚光器. *太阳能学报*, 2011, 7: 1081–1086
- 17 Duffie J A, Beckman W. *A Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1991. 345–358
- 18 Welford W T, Winston R. *The Optics of Nonimaging Concentrators*. New York: Academic Press, 1978. 171–191

Design and analysis of a CPC with single vacuum tube for linear Fresnel reflector system

WANG ChengLong¹, MA Jun¹ & FAN DuoWang^{1,2}

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

Compound parabolic collector (CPC) plays an important role in optical efficiency of linear Fresnel reflector (LFR) system. In this paper, we designed and optimized a CPC for LFR system. The main element influence on optical performance of CPC was studied, and the maximum acceptance angle and the truncation ratio of CPC were principally reported. Simulation results of the relationship between maximum acceptance angle and convergence ratio show that CPC convergence ratio increased slowly and linearly with the increase of maximum acceptance angle. Experimental results of the relationship between truncation ratio and convergence ratio show that CPC convergence ratio increased sharply until truncation ratio is greater than 0.65. CPC convergence ratio basically achieves a certain value when truncation ratio is greater than 0.7. Ray tracing simulation study illustrated that CPC, with 45° maximum acceptance angle, 0.75 truncation ratio and 475.49 mm opening width, could achieve a high concentrate ratio about 80.1%. Meanwhile, this conclusion was further verified by the experimental measurement results.

linear Fresnel reflector system, CPC, maximum acceptance angle, truncation ratio, convergence ratio

doi: 10.1360/N092014-00025