

细多管 CPC 线性菲涅耳聚光系统仿真及实验研究

魏博斌¹, 孔令刚^{2*}, 蒋庆安², 曹玉梅¹

¹ 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司, 甘肃 兰州 730050;

² 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

摘要 线性菲涅耳聚光发电系统具有迎风面小、土地占有率高等优点, 从而受到市场的青睐, 但是聚光系统建造的高成本制约着其发展应用。针对上述问题, 采用多个细集热管代替一个粗集热管的方式来解决, 使复合抛物面聚光器(CPC)的总开口达到 1118.79 mm, 一次反射镜的宽度达到 831.81 mm。同时本文对于该设计思路下的聚光系统进行了研究, 得到 CPC 开口半角 $\theta=45^\circ$ 较好, 在工作时长 6 h 内, 照射在一次镜场中的光线进入 CPC 的比率均达到 75% 以上, 瞬时进入率也高达 75% 以上, 实验验证在夏天晴朗天气中午系统光学效率达到 61%。

关键词 几何光学; 线性菲涅耳; 聚光系统; 集热管; 镜场布置; 光线进入复合抛物面聚光率

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.030801

Simulation and Experimental Study of a Thin Multi-Tube Compound Parabolic Condenser Linear Fresnel Spot System

Wei Bobin¹, Kong Linggang^{2*}, Jiang Qing'an², Cao Yumei¹

¹ China Energy Engineering Group Gansu Electric Power Design Institute Company Limited, Lanzhou, Gansu 730050, China;

² National Engineering Research Center for Technology and Equipment of Environmental Deposition, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract A linear Fresnel concentrating power-generation system is favored by the market because of its small windward area and high land-occupation rate. However, the further reduction of the construction cost of the concentrating system is an ongoing problem. Therefore, we include several thin heat pipes instead of a crude heat pipe to solve this problem so that the total opening and primary reflector widths are increased to 1118.79 and 831.81 mm, respectively, for the compound parabolic condenser (CPC). Additionally, we study the light-gathering system for this design idea and find a CPC opening half-angle of 45° . For a working time of 6 h, the light that is incident on the primary mirror field is reflected into the CPC, and the rate is above 75%. Additionally, the instantaneous rate of light entry into the CPC is more than 75%. The experimental results showed that the optical efficiency reached 61% at noon in summer/sunny weather.

Key words geometric optics; linear Fresnel; condenser system; collector tube; mirror field layout; light entering compound parabolic condenser rate

OCIS codes 080.3620; 080.2740; 080.4035

1 引言

受传统能源危机、环境破坏的影响, 新能源的发展刻不容缓, 太阳能作为最有前途的新能源之一, 受

到了国家的大力支持^[1-3]。太阳能聚光光热系统分为槽式、塔式、碟式和线性菲涅耳式^[4-5], 线性菲涅耳发电系统具有迎风面小、一次镜制作简单等优点, 受到了市场的青睐^[6]。

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-07-28; 录用日期: 2018-08-31

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAF01B00)、甘肃省科技计划(2017GS11036, 18JR3RA116)、甘肃省陇原青年创新创业人才项目

* E-mail: konglinggang1978@163.com

目前许多学者对线性菲涅耳发电系统进行了深入研究。皇明太阳能技术研发中心刘元元等^[7]论证了复合抛物面聚光器(CPC)在线性菲涅耳聚光系统中的应用,同时为一次镜的设计提供了借鉴方法。西安交通大学邱羽等^[8-10]通过改变瞄准线位置和一次反射镜的曲率来对镜场和CPC进行优化设计,使集热管上的能流密度分布均匀,延长集热管寿命。华东理工大学欧阳海玉等^[11]在设计一次反射镜中采用微弧镜子,通过减小二次反射镜的通光孔径,减小一次镜的数量,降低成本。美国国家可再生能源实验室 Hack 等^[12-13]采用自适应方法对二次镜进行了设计,使二次镜开口达到 350 mm,一次平面镜宽为 150 mm。兰州交通大学王成龙等^[14-15]对线性菲涅耳式聚光镜场及单管接收器进行了优化设计,集热管采用 90 mm,CPC 开口宽度为 475.49 mm,一次反射镜为 380 mm,光学效率为 56%。上海交通大学宋景慧等^[16]采用三角腔体代替 CPC,排管紧贴三角腔体布置,工作温度为 150 °C 时,集热器效率可以达到 36.6%,热损系数为 110 W/m。北京工业大学杜春旭等^[17]提出了线性菲涅耳反射装置中太阳跟踪倾角的计算方法,提高跟踪精度。

上述研究对于线性菲涅耳聚光发电系统的发展起到了巨大的推动作用,但是如何降低聚光镜场成本仍是一大难题,目前国内建设的线性菲涅耳项目,聚光场的投资费用占到总成本的 50% 以上。华能集团清洁能源技术研究院刘明义等^[18]对菲涅耳式太阳能光热电站经济性进行分析,发现、储热系统成

本、热力发电岛建设成本,以及其他部分成本分别占总电站建造成本的 57.7%、4.7%、28.9%、8.7%,可见集热场建设费用是决定菲涅耳式太阳能光热发电项目总体投资水平的决定性因素。华能集团清洁能源技术研究院李启明等^[19-20]提出了聚光镜场成本高是阻碍线性菲涅耳式太阳能光热发电项目发展的主要因素之一,降低聚光镜场的支架和镜架,是降低成本的一个有效途径。目前一次反射镜采用曲面镜,可提高光线 CPC 率,减少曲面镜数量,从而降低成本。但是文献^[18]提出曲面镜本身成本较高,运行成本也高,采用曲面镜达不到降低成本的目的。

本文一次镜场采用平面镜,利用多个细集热管代替一个粗管来增加 CPC 的总开口宽度和一次镜的宽度,同时对一次镜场进行了优化设计。该方法通过减小一次镜数量降低成本,同时由于聚光比减小,避免了集热管上热斑的出现,保护了涂层,提高了寿命。

2 理论设计

2.1 CPC 的设计

CPC 聚光器的设计原理如图 1 所示,CPC 是由渐开线 AB 段和抛物线 BC 段组成。集热管的型号确定以后,集热管内半径 r 也被确定,角度从 Y 轴的正方向开始。如图 1 所示,渐开线 AB 段上任意点 $D(x, y)$ 的方程为

$$\begin{cases} x = r \sin \beta - L \cos \beta \\ y = r \cos \beta + L \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

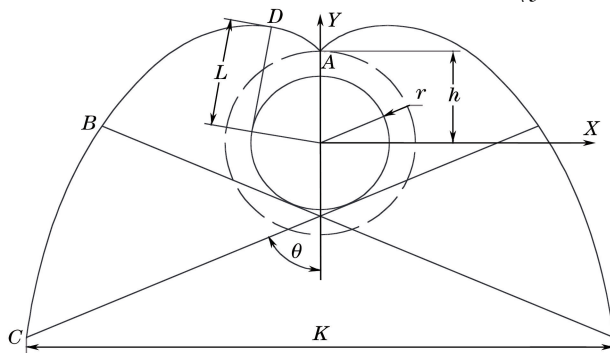


图 1 CPC 原理图

Fig. 1 Schematic of CPC

式中 L 为渐开线角度 β 的弧长,且满足

$$L = \frac{\pi r}{180} \times \left[\frac{180 \times \sqrt{h^2 - r^2}}{\pi r} - \arccos\left(\frac{r}{h}\right) + \beta \right] \quad (2)$$

B 点为渐开线段和抛物线段的结合点,该点的

L 长度为抛物线的焦距 f ,CPC 的开口半角 θ 确定时,焦距 f 为

$$f = \frac{\pi r}{180} \times$$

$$\left[\frac{180 \times \sqrt{h^2 - r^2}}{\pi r} - \arccos\left(\frac{r}{h}\right) + \frac{\pi}{2} + \theta \right] \quad (3)$$

转化坐标系,以 f 为 y 轴方向,垂直于 f 的为方向为 x 轴,抛物线(BC)段的方程满足下列条件。

1) CPC 开口半角小于 45° 时:

$$\begin{cases} x^2 = 4fy \\ x \sin(\frac{\pi}{2} - 2\theta) = y - (f + \frac{r}{\tan \theta})^\circ \end{cases} \quad (4)$$

2) CPC 开口半角等于 45° 时:

$$\begin{cases} x^2 = 4fy \\ y = f + \frac{r}{\tan \theta} \end{cases} \quad (5)$$

3) CPC 开口半角大于 45° 时:

$$\begin{cases} x^2 = 4fy \\ \frac{x}{\sin(\pi - 2\theta)} = \frac{y - f + \frac{r}{\tan \theta}}{\sin(2\theta - \frac{\pi}{2})} \end{cases} \quad (6)$$

CPC 二次反射镜开口 K 为

$$K = 2x \sin \theta. \quad (7)$$

2.2 平面镜场的布置

2.2.1 镜子宽度的确定

目前示范项目中选用集热管的直径均为 90 mm , 选用集热管直径为 40 mm (市场上最小集热管直径), 集热管内装有流体工质的容量相等,需要集热管数

$$n = \frac{\pi \times (\frac{90}{2})^2}{\pi \times (\frac{40}{2})^2} = 5.0625, \quad (8)$$

式中 n 取整数,因此 $n=5$ 。CPC 的总开口宽度为 $5K$ 。一次反射镜选用平面镜,宽度相等且等间距对称布置,布置方式如图 2 所示。以左边为例进行设计,然后对称布置右边。如图 2 所示,从中心依次向两边分开,镜子列数依次为 $0, 1, 2, \dots, N$,第 N 列

镜子投影在 CPC 开口处的光斑宽度为

$$\frac{D}{\sin \lambda_N} = \frac{M}{\sin(\frac{a}{2} + \frac{\lambda_N}{2})}, \quad (9)$$

式中 $M \leq 5K$ 。镜子宽度 D 一定后,不同列镜子不同时刻在 CPC 二次反射镜开口处形成的投影并不相同。当所有镜子在转动过程中反射的光线全部进入 CPC 二次反射镜开口 ($5K$) 时, λ_N 取最小值,其中 $\lambda_{\min} = \pi/2 - \theta$ 。镜子宽度 D 的初始值

$$D = \frac{5K \times \sin(\frac{\pi}{2} - \theta)}{\sin(\frac{\pi}{2} + \theta - |\frac{a + \theta}{2} - \frac{\pi}{4}|)}, \quad (10)$$

式中 $\sin[(\pi/2) + \theta - |(a + \theta/2) - (\pi/4)|]$ 取最大值。

2.2.2 镜场无阴影和遮挡布置方式

一次反射镜选用平面镜,宽度相等,等间距对称布置,从中心开始依次向两边展开,镜子列数依次为 $0, 1, 2, \dots, N$,如图 2 所示。

CPC 二次反射镜开口距镜面的距离为 H ,相邻镜子中心距离为 S ,得到关系式为

$$\lambda_N = \arctan \frac{H}{N \times S}. \quad (11)$$

太阳光入射角 a ,无阴影和遮挡时,对镜场进行设计。第 N 列镜子遮挡 $N-1$ 列镜子的入射光,其关系式为

$$S = \frac{D}{2} \left[\frac{\sin(\frac{a}{2} + \frac{\lambda_N}{2})}{\sin a} + \frac{\sin(\frac{a}{2} + \frac{\lambda_{N-1}}{2})}{\sin a} \right], a < \lambda_N. \quad (12)$$

第 $N-1$ 列镜子遮挡 N 列镜子的反射光,其关系式为

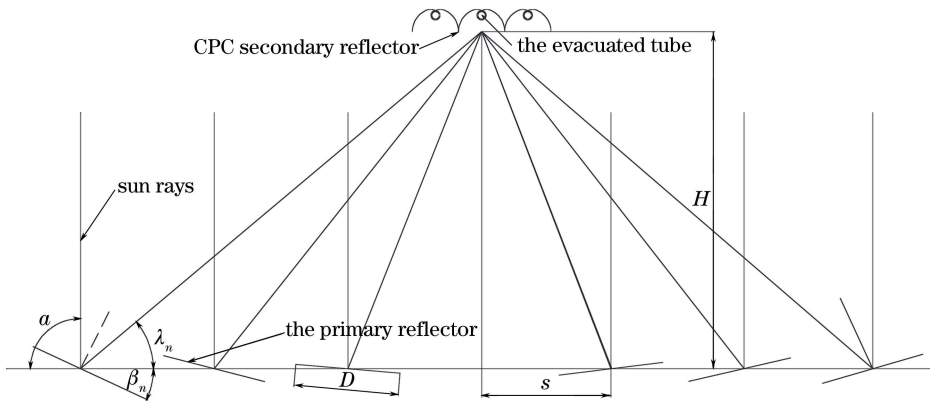


图 2 镜场布置图

Fig. 2 Arrangement of mirror filed

$$S = \frac{D}{2} \left[\frac{\sin(\frac{a}{2} + \frac{\lambda_N}{2})}{\sin \lambda_N} + \frac{\sin(\frac{a}{2} - \frac{\lambda_{N-1}}{2} + \lambda_N)}{\sin \lambda_N} \right],$$

$$\lambda_N < a < \pi - \lambda_N. \quad (13)$$

第 $N-1$ 列镜子遮挡 N 列镜子的入射光,其关系式为

$$S = \frac{D}{2} \left[\frac{\sin(\frac{a}{2} + \frac{\lambda_N}{2})}{\sin(\pi - a)} + \frac{\sin(\frac{a}{2} + \frac{\lambda_{N-1}}{2})}{\sin(\pi - a)} \right],$$

$$\pi - \lambda_N < a. \quad (14)$$

无阴影和遮挡出现在以设计地区方位角为 0° 时的时间点为分界限的时间段内,该地区方位角为 0° 时定义太阳光入射角为 90° ,即无阴影和遮挡时太阳光入射角

$$a \in \left[\left(\frac{\pi}{2} - \frac{15 \times t}{2} \right), \left(\frac{\pi}{2} + \frac{15 \times t}{2} \right) \right], \quad (15)$$

式中 t 为无阴影和遮挡时长。

3 算例设计分析

3.1 CPC 数据的确定

如图 1 所示,为防止 CPC 二次反射镜因重力变形或下沉时压溃集热管,在实际中集热管的外管跟 CPC 二次反射镜的顶角存在一定距离,根据经验取间隙为 5 mm。由(4)~(6)式可知,CPC 开口半角以 45° 为界限,选用不同的计算方法进行设计,然而当 CPC 开口半角 $\theta < 45^\circ$ 时,一次反射镜的镜场窄,集热面积小,不可取,所以选用 CPC 开口半角 $\theta \geq 45^\circ$ 进行计算。

CPC 开口半角 $\theta = 60^\circ$ 的数据如表 1 所示。

表 1 CPC 开口半角为 60° 的数据表

Table 1 Data sheet with a half opening angle of 60°

Item	Value
Distance h from center of the collector tube to the CPC top / mm	50
Parabolic focal length f / mm	74.985
CPC opening width K / mm	192.624
Total opening width of CPC $5K$ / mm	963.124

CPC 开口半角 $\theta = 45^\circ$ 的数据如表 2 所示。

表 2 CPC 开口半角为 45° 的数据表

Table 2 Data sheet for CPC with a half opening angle of 45°

Item	Value
Distance h from center of the collector tube to the CPC top / mm	50
Parabolic focal length f / mm	69.752
CPC opening width K / mm	223.753
Total opening width of CPC $5K$ / mm	1118.798

3.2 镜场土地占有率的计算

比较(12)式和(14)式可知,(14)式得出的镜子中心之间的间距 S 较大。由(13)式和(14)式可知, λ_N 取最外列镜子的值,即 $\lambda_{\min} = \lambda_N$ 时,镜子中心之间的间距 S 最大,在计算过程中取值 $\lambda_{\min} = \lambda_N = \lambda_{N-1}$,根据(13)式和(14)式得到土地占有率:

$$\frac{D}{S} = \frac{\sin \lambda_{\min}}{\sin(\frac{\pi}{4} + \frac{15 \times t}{4} + \frac{\lambda_{\min}}{2})}, \frac{\pi}{2} - \frac{15 \times t}{2} > \lambda_{\min}, \quad (16)$$

$$\frac{D}{S} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{15 \times t}{2})}{\sin(\frac{\pi}{4} + \frac{15 \times t}{4} + \frac{\lambda_{\min}}{2})}, \frac{\pi}{2} - \frac{15 \times t}{2} < \lambda_{\min}. \quad (17)$$

当 $\lambda_{\min} = \pi/2 - \theta$, CPC 开口半角 $\theta = 60^\circ$ 和 $\theta = 45^\circ$ 时, $\lambda_{\min} = 30^\circ$ 和 $\lambda_{\min} = 45^\circ$ 。由(16)式和(17)式计算在无阴影和遮挡情况下,镜场的土地占有率随无阴影和遮挡工作时长 t 变化曲线如图 3 所示。

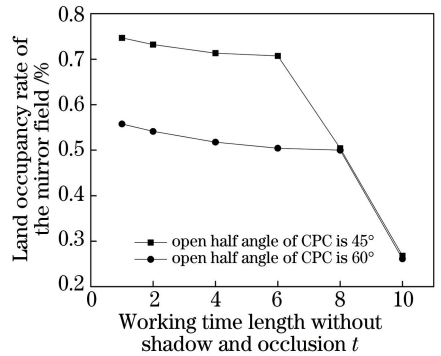


图 3 一次反射镜镜场土地占有率随无阴影和遮挡工作时长的变化图

Fig. 3 Diagram of the change of land occupancy rate in a mirror field without shadow and sheltered working hours

如图 3 所示,一次反射镜镜场的土地占有率随无阴影和遮挡的时长增加而变小,所以无阴影和遮挡工作时长不宜过长。(16)式和(17)式中 $\sin[(\pi/4) + 15 \times t/4 + (\lambda_{\min}/2)]$ 随着时间 t 增加而增加,导致土地占有率逐渐减小。CPC 开口半角 $\theta = 45^\circ$ 时,在 $t = 6$ 时, $(\pi/2) - (15 \times t/2) = 45^\circ$ 和 λ_{\min} 相等,在 $t = 6$ 以内选用(16)式,以外选用(17)式。在 $t = 6$ 以内, $\sin[(\pi/4) + (15 \times t/4) + (\lambda_{\min}/2)]$ 随时间增大, $\sin \lambda_{\min}$ 不变,土地占有率减少缓慢。在 $t = 6$ 以外, $\sin[(\pi/4) + (15 \times t/4) + (\lambda_{\min}/2)]$ 随时间增大, $\sin[(\pi/2) - (15 \times t/2)]$ 随 t 减小,土地占有率减少加剧。CPC 开口半角 $\theta =$

60°时,在 $t=8$ 时, $(\pi/2) - (15 \times t/2) = 30^\circ$ 和 λ_{\min} 相等,跟 $\theta=45^\circ$ 情况相似。

对比表 1 和表 2 可知,CPC 开口半角 $\theta=60^\circ$ 得到的 CPC 开口总宽度小于 $\theta=45^\circ$ 。由图 3 可知,无阴影和遮挡工作 6 h 以内,当 CPC 开口半角 $\theta=60^\circ$ 时,土地占有率在 50% 左右,太低,不建议采用;当 CPC 开口半角 $\theta=45^\circ$ 时,土地占有率在 70% 以上。因此选择 CPC 开口半角 $\theta=45^\circ$,无阴影和遮挡工作时长 6 h 进行镜场布置设计。

表 3 λ_N 的值
Table 3 Value of λ_N

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Angle/(°)	90	84.63	79.35	74.25	69.39	64.82	60.57	56.65	53.05	49.76	46.77

一次镜场对称布置,所以最终确定布置 21 列,即 N 的最大值为 10。在原有的相邻镜子中心间距 ($S=1118.78$ mm) 不变情况下,增加镜子宽度使第 $N-1$ 列刚好挡住第 N 列镜子的反射光线,确定镜子宽度,根据(13)式得到镜子宽度 $D=831.81$ mm,镜场土地占有率为

$$c = \frac{D \times N + \frac{D}{2}}{S \times N + \frac{D}{2}} \times 100\% \quad (18)$$

3.4 两种镜宽的效率计算

当 $D=791.10$ mm 时,根据(18)式得到 $c=71.71\%$;当 $D=831.81$ mm 时, $c=75.27\%$ 。按照镜场有效工作时长为 8 h 进行计算,根据(15)式得到 $a \in [30^\circ, 150^\circ]$,当 $D=831.81$ mm 时,根据(10)式得到只有第 10 列镜子在转动过程中反射的光线无法完全进入 CPC,角度 a 在 $110.26^\circ \sim 156.26^\circ$ 之间光线无法完全反射进入 CPC 中,在不同工作时长下,照射在整个一次反射镜镜场中的光线进入 CPC 率如图 4 所示。

如图 4 所示,在 8 h 工作时长内, $D=831.81$ mm,照射在镜场的光线进入 CPC 率一直大于 $D=791.10$ mm,且约高 4%。同时从工作时长 6 h 开始,照射在镜场中的光线进入 CPC 率急剧下降,6 h 以外太阳光入射角 a 小于 45° 或者大于 135° ,光线斜射角度较大,部分光线被相邻镜子遮挡,导致光线进入 CPC 率急剧下降。

对于 $D=791.10$ mm,在工作时长 6 h 以后开始出现遮挡和阴影,且所有反射光线均进入 CPC 中。 $D=832.81$ mm,在工作时长 2 h 以外反射光线中第 10 列镜子的反射光线不能完全进入 CPC,第

3.3 镜场布置

根据 2.1 和 2.2 节得出的结论选择 CPC 开口半角 $\theta=45^\circ$ 进行设计,如表 3 所示,CPC 开口总宽度 $M=1118.79$ mm,根据(10)式得到镜子宽度 $D=791.10$ mm。根据(16)式和无阴影工作 6 h 得到相邻镜子中心间距 $S=1118.78$ mm。以国内正在建立的线性菲涅耳发电厂为例进行计算,高度 $H=11.9$ m,根据(11)式得到镜子中心距 CPC 开口中心与一次反射镜中心形成的角度 λ_N 如表 3 所示。

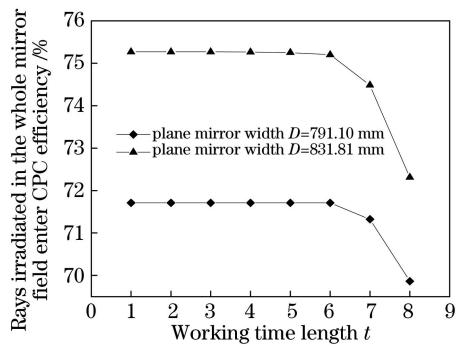


图 4 照射在镜场中的光线进入 CPC 率随镜场工作时间的变化图

Fig. 4 Rate at which the light entering the field enters the CPC varies with the length of the field work

10 列镜子位于镜场最外列,最容易受到相邻镜子的影响。

对于 $D=831.81$ mm,工作时长在 6 h 以内,照射在镜场中的光线进入 CPC 率在 75% 以上;工作时长为 8 h,在 72% 以上。不同时间点,照射在整个一次反射镜镜场中的光线进入 CPC 率的瞬时效率如图 5 所示。

由图 5 可知,两种形式的瞬时效率均对称分布。在 8:30 到 15:30, $D=831.81$ mm 的瞬时效率明显大于 $D=791.10$ mm,在 8:00 和 16:00 时 $D=831.81$ mm 的瞬时效率明显低于 $D=791.10$ mm。 $D=831.81$ mm 时,镜子宽度大,光线斜射角度较大时,相互影响较大,导致 8:00 和 16:00 时较瞬时效率小。镜场对称分布,光线照射过程对称照射,效率对称分布。

在 9:00 到 15:00 之内(工作时长 6 h)瞬时效率变化较小,之外变化较大。工作时长为 6 h 内,系统的瞬时效率较高,符合图 4 的变化规律。主要由于

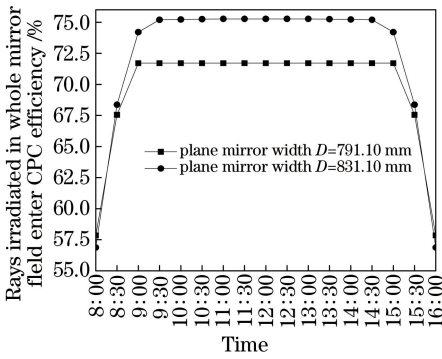


图5 照射在整个一次反射镜镜场中的光线进入CPC率的瞬时效率

Fig. 5 Instantaneous efficiency of light entering the CPC rate across the entire primary mirror field

6 h以后,光线斜射角度大,镜子之间的光线相互影响较大。

基于以上时间段效率和瞬时效率,选择 $D = 831.81$ mm 的镜子,同时工作时长保持在 8 h 以内,进行实验验证。

4 实验论证及应用

采用上述设计方法及设计理念设计了线性菲涅耳发电系统,CPC 开口半角 $\theta = 45^\circ$,高度 $H = 11.9$ m,选用 20 列镜子(去掉了中间 1 列),镜子宽度为 760 mm,间距为 270 mm。系统分为两个集热单元,每个单元长 100 m,累计长 200 m,实际镜场集热面积为 2455 m^2 ,聚光系统如图 6 所示,系统运行良好。由太阳辐照度与熔盐升速率计算系统光热效率,实验测试夏天晴天 10:00~15:00 时,系统集热效率最优,约为 58%以上,夏季晴天中午 11:00~14:00 的系统光学效率可达到 61%。



图6 实验装置及应用图

Fig. 6 Experimental setup and application diagram

5 比较分析

CPC 的设计原理决定了开口宽度跟基圆半径(集热管内管半径)成正比,增加 CPC 开口宽度采取

的方法有:1) 增加集热管内管半径。2) 集热管内管半径不变,增加图 1 中的 h ,即增大 CPC 顶尖和集热管之间的缝隙,该方法以损失 CPC 的会聚率来增加开口。国内和本文建设项目都采用 CPC 开口半角 $\theta = 45^\circ$ 和镜场高度 $H = 11.9$ m。对其他数据进行比较,得到结果如表 4 所示。

表4 线性菲涅耳发电系统数据比较

Table 4 Data comparison of linear Fresnel power generation system

Item	Proposed system (thin multi tube)	Construction projects (a rough pipe)
Total opening half angle of CPC / ($^\circ$)	45	45
Total opening width of CPC / mm	1118.79	475.49 ^[15]
Convergence rate of CPC / %	95 ^[8-10]	78.42 ^[15]
Width of the mirror / mm	831.81	500(V-type) ^[14]
Number of mirrors	20	32
Rate of rays light entering the CPC working 6 h / %	75.19	73.28 ^[14]
Optical efficiency / %	58	56 ^[15]

表 4 中 CPC 开口半角 $\theta = 45^\circ$,镜场高度 $H = 11.9$ m,本文方法需要 20 列镜子,国内目前建设的项目需要 32 列镜子。本文方法减少了镜子数量、镜子支架、镜架、传动机构和跟踪机构,从而降低了成本,符合文献[19-20]提出的总方针。尽管镜子数量减少了,但是 CPC 总开口增大了,镜子宽度增大了,保证了光学效率不变。

本文系统的光学效率约为 58%,国内正在建设的项目为 56%,这是因为该项目为了增加 CPC 的开口宽度,增加了 CPC 顶尖和集热管之间的缝隙,损失了 CPC 的会聚率。

6 结论

采用多个细集热管代替一个粗集热管的方法,增大 CPC 总开口及一次反射镜的宽度,从而降低聚光系统成本,同时利用该设计原理对现有数据下的聚光镜场进行设计,得到如下结果:1) 在本文设计的系统中,当 CPC 开口半角 $\theta = 45^\circ$ 时,CPC 开口总宽度达到 1118.79 mm,平面镜宽度为 831.81 mm。2) 对CPC 开口半角 θ 为 45° 和 60° 进行对比研究, $\theta = 60^\circ$ 时土地占有率太低,不宜采用,为了增加聚光比,建议采用增加高度 H 的方法。3) 对一次反射镜宽度 $D = 791.10$ mm 和 $D = 831.81$ mm 进行对比研究,得到在 CPC 开口半角 $\theta = 45^\circ$, $D =$

831.81 mm系统的光学效率较高,当工作时长变化在6 h内,照射在一次镜场中的反射光线进入CPC率的瞬时效率高达75%以上。4) 实验测试在天气晴朗时,系统的光学效率达到61%,高于文献[15]。5) 在不损失光学效率的基础上,减小镜子数量,降低成本,符合文献[19-20]提出的总方针。

参 考 文 献

- [1] Wang J, Dong M L, Li W, *et al.* Photogrammetric method for large trough solar reflector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051204.
王君, 董明利, 李巍, 等. 大型槽式太阳能反射镜面摄影测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051204.
- [2] Shi X, Sun C, Wang X Q, *et al.* One-dimensional diffraction grating structure for rear reflection surface of thin film silicon solar cells [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 010501.
石鑫, 孙诚, 王晓秋, 等. 适用于薄膜硅太阳能电池背反射面的一维衍射光栅结构[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 010501.
- [3] Han X B, Wei X D, Lu Z W, *et al.* Review of concentration system in solar thermal power plant [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 233-239.
韩雪冰, 魏秀东, 卢振武, 等. 太阳能热发电聚光系统的研究进展[J]. *中国光学*, 2011, 4(3): 233-239.
- [4] He Y L, Wang K, Du B C, *et al.* Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: a review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(30): 3208-3237.
何雅玲, 王坤, 杜保存, 等. 聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展[J]. *科学通报*, 2016, 61(30): 3208-3237.
- [5] Jing L, Wang Y, Zhao H F, *et al.* Design of uniform-irradiance concentrator for concentration photovoltaics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0208001.
荆雷, 王尧, 赵会富, 等. 实现均匀照度光伏聚光镜设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0208001.
- [6] Che S P. Research of optical and thermal properties of linear Fresnel reflector [D]. Jinan: Shandong University, 2012.
车淑平. 线性菲涅尔反射系统光学和集热性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [7] Liu Y Y, Chen H J, Xiong Y G, *et al.* Application of compound parabolic concentrator in linear Fresnel spot light[J]. *Solar Energy*, 2013, 9: 41-43.
刘元元, 陈洪晶, 熊勇刚, 等. 复合抛物面聚光器在线性菲涅尔聚光上的应用[J]. *太阳能*, 2013, 9: 41-43.
- [8] Qiu Y, He Y L, Liang Q, *et al.* A MCRT-FVM simulation method for the coupled photo-thermal conversion process in a linear Fresnel reflector solar collector[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(10): 2142-2150.
邱羽, 何雅玲, 梁奇, 等. 线性菲涅尔太阳能系统光热耦合模拟方法研究[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(10): 2142-2150.
- [9] Qiu Y, He Y L, Cheng Z D, *et al.* Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods[J]. *Applied Energy*, 2015, 146: 162-173.
- [10] Qiu Y, He Y L, Cheng Z D. Optical performance investigation and optimization of a linear Fresnel reflector solar collector [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(12): 2551-2557.
邱羽, 何雅玲, 程泽东. 线性菲涅尔太阳能系统光学性能研究与优化[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(12): 2551-2557.
- [11] Ouyang H Y, Niu Y G, Wang H L, *et al.* Design of a micro arc linear Fresnel solar heat collector [J]. *Electrical Automation*, 2015(4): 41-44.
欧阳海玉, 牛玉刚, 王浩林, 等. 微弧线性菲涅尔太阳能集热器的设计[J]. *电气自动化*, 2015(4): 41-44.
- [12] Hack M, Zhu G D, Wendelin T. Evaluation and comparison of an adaptive method technique for improved performance of linear Fresnel secondary designs[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 1441-1451.
- [13] Zhu G D. New adaptive method to optimize the secondary reflector of linear Fresnel collectors [J]. *Solar Energy*, 2017, 144: 117-126.
- [14] Wang C L, Ma J, Fan D W. Arrangement and optimization of mirror field for linear Fresnel reflector system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 78-82.
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.
- [15] Wang C L, Ma J, Fan D W. Design and optimization of single tube receiver for linear Fresnel spot system [J]. *Chinese Science (Technical Science)* 2014, 44(6): 597-602.

- 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(6): 597-602.
- [16] Song J H, Ma J S, Chen Y, *et al.* Experimental study on performance of line Fresnel collector in triangular cavity [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(12): 103-108. 宋景慧, 马继帅, 陈宇, 等. 三角腔体菲涅尔线集热器性能实验研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(12): 103-108.
- [17] Du C X, Wang P, Ma C F, *et al.* Vector algorithm for tracking inclination of Fresnel solar concentration system[J]. Journal of Solar Energy, 2011, 32(6): 831-835. 杜春旭, 王普, 马重芳, 等. 菲涅耳太阳能聚光系统跟踪倾角的矢量算法[J]. 太阳能学报, 2011, 32(6): 831-835.
- [18] Liu M Y, Qi H Q, Zheng J T, *et al.* Economic analysis of Fresnel solar thermal power system [J]. Energy Conservation Technology, 2016, 34(4): 353-556. 刘明义, 亓海青, 郑建涛, 等. 菲涅尔式太阳能光热电站经济性分析[J]. 节能技术, 2016, 34(4): 353-356.
- [19] Li Q M, Zheng J T, Xu H W, *et al.* Development of linear Fresnel solar thermal power generation technology[J]. Solar Energy, 2012, 7: 41-45. 李启明, 郑建涛, 徐海卫, 等. 线性菲涅尔式太阳能热发电技术发展概况[J]. 太阳能, 2012, 7: 41-45.
- [20] Chen Y P. Application and prospect of concentrating solar energy power plant (CSP) technology [J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(7): 29-33. 陈于平. 聚光太阳能发电技术应用与前景[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(7): 29-33.