

文章编号 1004-924X(2015)01-0078-05

线性菲涅尔式聚光系统的镜场布置与优化

王成龙^{1*}, 马 军¹, 范多旺^{1,2}

- (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)

摘要:单根真空集热管和复合抛物面聚光器(CPC)组成的接收器(单管接收器)对线性菲涅尔式聚光系统的镜场布置有特殊要求。本文根据单管接收器的特点,提出了利用CPC最大接受半角控制镜场高宽比实现镜场无阴影布置的方法。利用几何关系推导了镜场无阴影布置的数学表达式,并给出了数值计算方法。通过算例,将一次反射镜和镜场中心的距离与镜场地面覆盖率相结合对镜场布置进行了优化。研究表明:对于CPC最大接受半角为 45° 、反射镜宽度为380 mm、而反射镜列数为21的镜场,当系统无阴影工作时间确定为6 h时,相邻一次反射镜间距最大为537 mm较为合理,而此时地面覆盖率为73.28%。该方法对于单管接收器线性菲涅尔聚光镜场的布置具有普适性,对线性菲涅尔式聚光系统的设计具有较好的指导意义。

关键词:太阳能聚光系统;线性菲涅尔系统;真空集热管;复合抛物面聚光器;镜场布置

中图分类号:TK513.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0078

Arrangement and optimization of mirror field for linear Fresnel reflector system

WANG Cheng-long^{1*}, MA Jun¹, FAN Duo-wang^{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 of the Ministry of Education,
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)
* Corresponding author, E-mail: clwangee@163.com

Abstract: The single tube receiver consisting of a vacuum tube and a Compound Parabolic Concentrator(CPC) has special requirements for the mirror field arrangement of a linear Fresnel reflector system. According to the characteristics of the single tube receiver, a method of mirror field arrangement without shading was successfully presented by using CPC maximum acceptance angle to control the aspect ratio of mirror field. Practical mathematical expressions of the mirror field arrangement without shading were derived by geometric method, and concrete numerical method was given. The mirror field arrangement was optimized through combining the distance between the reflector and the center of mirror field with the ratio of ground coverage. The experiment results for

收稿日期:2014-07-07;修订日期:2014-08-19.

基金项目:国家973重点基础研究发展计划前期研究专项资助项目(No. 2012CB626805);国家国际科技合作专项资助项目(No. 2011DFA61850);甘肃省高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 202089)

the CPC with 45° maximum acceptance angle and a mirror field with 21-mirrors and 380 mm width show that when the working time of the system without shading is set to 6 hours, the relative reasonable maximum spacing between two mirrors will be 537 mm and the corresponding ground coverage is 73.28%. For the linear Fresnel reflector system with a single tube receiver, the method of mirror field arrangement has universality and guiding significances.

Key words: solar energy collector; linear Fresnel reflector system; vacuum tube; Compound Parabolic Concentrator(CPC); mirror field arrangement

1 引 言

太阳能作为一种新型的替代能源已备受世人瞩目^[1-3]。针对其低的能流密度,人们通常采用先聚光再利用的技术路线来提高太阳能的利用效率。根据聚光形式,太阳能聚光系统主要分为槽式、线性菲涅尔式、塔式和碟式等^[4-6]。其中,线性菲涅尔式聚光系统具有结构简单、风阻小、成本低、土地利用率高优点,正逐渐在大规模电站中得到应用。由于相邻反射镜存在间距,线性菲涅尔式聚光系统普遍存在阴影影响,因此优化布置反射镜场以最大限度地减小系统的阴影影响是该类聚光系统研究的关键。Mills 等提出了紧凑式线性菲涅尔反射镜(CLFR)太阳能集热系统^[7]。Nixon 等对镜元间距和集热器的运行温度进行了优化^[8]。Dai 等提出反射镜在跟踪太阳的同时自身移动,二次反射聚光器也随之转动,理论上避免了阴影和遮挡的问题^[9]。杜春旭等利用矢量分析法对东西方向的线性菲涅尔式聚光系统的无遮挡镜场布置进行了研究^[10]。

上述研究大多以梯形腔式接收器的线性菲涅尔式聚光系统为研究对象,存在适用范围小、系统成本高等问题。由于线性菲涅尔式聚光太阳热能高温高压系统需要复合抛物面聚光器(Compound Parabolic Condenser,CPC)和真空集热管构成的接收器^[11],所以它对镜场的布置有特殊要求。由文献^[12]可知南北方向的镜场总体光学效率优于东西方向的镜场,因此本文以单管接收器的线性菲涅尔式聚光系统为研究对象,镜场布置为南北方向,利用几何方法推导了接收器高度、镜场范围和反射镜间距等参数之间的关系,通过算例分析给出了无阴影布置的计算方法。该方法对线性菲涅尔式聚光系统的推广及应用具有指导意义。

2 线性菲涅尔式聚光系统镜场布置

2.1 镜场布置原理

线性菲涅尔式聚光系统的镜场布置原理如图 1 所示。CPC 的最大接受半角为 θ_{\max} ;接收器放置在距反射镜所在平面高 H 处;反射镜宽度为 D ;第 n 面反射镜中心与镜场中心的距离为 Q_n , Q_n 与水平面的夹角为 β_n (倾斜角);相邻反射镜的间距为 S_n ;太阳光入射角为 α ;反射光线入射角为 θ_n 。

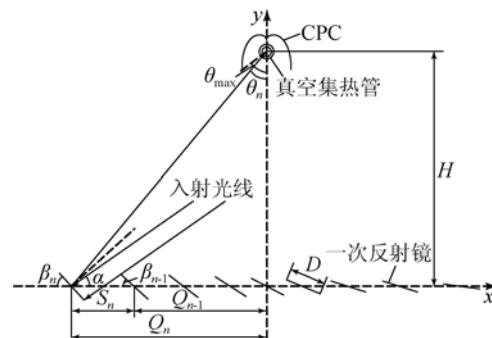


图 1 线性菲涅尔式聚光系统布置图

Fig. 1 Arrangement of linear Fresnel reflector system

由图 1 可知,所有反射镜的旋转轴位于同一水平面。太阳光入射角 α 随着时间的变化而引起镜场中各反射镜的倾角 β_n 也不断变化,因此相邻反射镜之间的阴影关系也在不断变化。太阳光入射角 α 越小,阴影影响越严重。若要分析某一时刻相邻反射镜的阴影影响,必须知道该时刻的太阳光入射角 α 、每列反射镜的中心距 Q_n 及倾角 β_n 。

2.2 无阴影布置

2.2.1 无阴影镜场关系

早上在镜场的西侧或者下午在镜场的东侧(即太阳与反射镜在镜场中心异侧),反射镜之间可能会出现阴影影响。南北方向的镜场中东西两侧反射镜关于镜场中心对称布置,因此分析计算

只考虑某一侧的布置即可,本文以早上镜场西侧阴影影响为研究对象(如图 1 所示)。如果给定太阳光入射角 α 和接收器高度 H ,无阴影镜场布置参数之间的关系为:

$$\tan(\pi - \alpha - 2\beta_n) = \frac{H}{Q_n}. \quad (1)$$

$$S_n = \frac{D}{2} [(\sin \beta_n + \sin \beta_{n-1}) / \tan \alpha + \cos \beta_n + \cos \beta_{n-1}]. \quad (2)$$

$$Q_n = Q_{n-1} + S_n, n \geq 1. \quad (3)$$

某时刻太阳光入射角 α 可通过式(4)计算得到:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \omega, \quad (4)$$

式中: ω 为太阳时角,规定正午 $\omega=0$,上午 $\omega<0$,下午 $\omega>0$,数值等于离正午的时间(小时)乘以 15° 。

按照 α 角计算无阴影布置间距,则系统在太阳时角 $\pm \omega$ 所对应的时间内无阴影影响,将该时间称为系统的无阴影工作时间。如果给定 α 角较小,则系统的无阴影工作时间较长。

2.2.2 无阴影镜场的高宽比

由 CPC 的性质可知,最远端反射镜的反射光线入射角 θ_n 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汇聚到集热管,因此有:

$$\arctan \left(\frac{Q_{\max}}{H} \right) \leq \theta_{\max}, \quad (5)$$

式中: Q_{\max} 为最远端反射镜与镜场中心的距离。

式(5)限定了 CPC 高度 H 与最远端反射镜与镜场中心的距离 Q_{\max} 之间的关系,即限定了镜场高宽比。如果线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 选定,则 CPC 的最大接受半角 θ_{\max} 确定,镜场高宽比也就确定了。

2.3 计算方法

以上给出了线性菲涅尔式聚光系统在太阳光入射角为 α 时无阴影影响的布置方法。在利用计算机进行数值计算时,先选定 CPC,从而确定了 CPC 的最大接受半角 θ_{\max} 和反射镜的宽度 D ;再设定太阳光入射角 α 和反射镜列数 N 。计算步骤如下:

(1)初始化:给定 CPC 高度 H (值较小);

(2)令 $Q_0=0, \beta_0 = \frac{1}{2}(\frac{\pi}{2} - \alpha)$;

(3)由式(2)~式(4)求得每列反射镜与镜场中心的距离;

(4)如果最远端反射镜的反射光线入射角 θ_n

小于或等于 CPC 的最大接受半角 θ_{\max} ,则转至下一步布置;否则令 $H=H+1$,转至第(2)步;

(5)计算结束,保存计算结果。

以上计算结果就是 N 列反射镜在太阳光入射角为 α 时所对应时间内无阴影影响的布置间距。

3 算例分析

实际工程应用中,在保证系统一定时间内无阴影运行的前提下,反射镜与镜场中心的距离应尽可能小,以增加系统的地面覆盖率(镜面面积/占地面积)、降低接收器高度,使得镜场布置更紧凑,从而提高土地利用效率、降低系统成本。本算例中,选用的 CPC 最大接受半角为 45° ,反射镜宽度为 380 mm,反射镜列数为 21 列,反射镜从镜场中心到某一侧最远端依次编号为 1~11。系统无阴影工作时间与反射镜与镜场中心的距离的关系如图 2 所示。

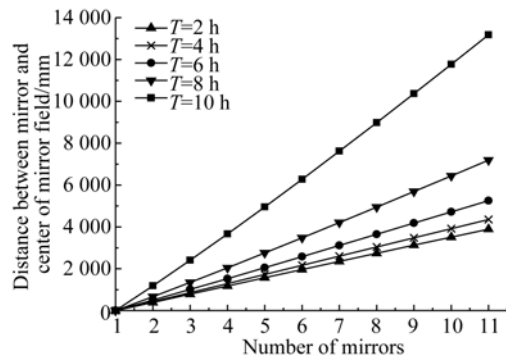


图 2 系统无阴影工作时间与镜场布置的关系

Fig. 2 Relationship between working time without shading and mirror field arrangement

由图 2 可知,随着系统无阴影工作时间的增长,同列反射镜的中心距逐渐增大。系统无阴影工作时间在 6 h 内时,反射镜中心距增速缓慢,当超过 6 h 后,中心距急剧增大。以第 6 列反射镜为例,系统的工作时长分别为 2, 4, 6, 8 和 10 h 对应的中心距分别为 1 962. 0, 2 166. 3, 2 579. 2, 3 478. 6 和 6 273. 9 mm。

系统的无阴影工作时间与地面覆盖率的关系如图 3 所示。由图 3 可以看出,随着系统无阴影工作时间的增长,镜场的地面覆盖率逐渐下降。当系统无阴影工作时间由 2 h 增长到 10 h 时,地面覆盖率从 97. 75% 下降至 29. 84%。当系统的无阴影工作时间为 6 h 时,镜场的地面覆盖率为

73.28%;当系统的无阴影工作时间为7.5 h时,地面覆盖率为60%。该结果明显好于槽式太阳能聚光镜场的地面覆盖率(约30%)。

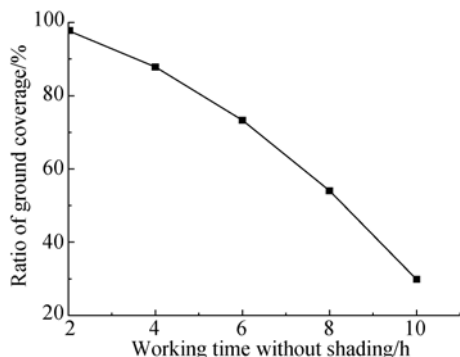


图3 系统无阴影工作时间与地面覆盖率的关系

Fig. 3 Relationship between working time without shading and ratio of ground coverage

表1 系统无阴影工作时间为6 h的镜场布置

Tab. 1 Mirror field arrangement without shading for working time of 6 h

| 反射镜 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----------------|---|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Q_n/mm | 0 | 501 | 1 011 | 1 528 | 2 051 | 2 579 | 3 111 | 3 645 | 4 181 | 4 718 | 5 255 |
| S_n/mm | — | 501 | 510 | 517 | 523 | 528 | 532 | 534 | 536 | 537 | 537 |



图4 线性菲涅尔式聚光系统图

Fig. 4 Practical photograph of linear Fresne reflector system

4 应用实例

该镜场布置方法在兰州大成科技股份有限公司建设的200 kW聚光太阳热能示范电站中得到了应用。电站由线性菲涅尔式聚光集热回路和槽式聚光集热回路联合构成。线性菲涅尔系统包括2个集热单元,每个单元长100 m,集热面积为2 330 m²。一次反射镜的镜面宽度为500 mm,镜面等间距布置,相邻反射镜间距为705 mm。线性菲涅尔式聚光系统如图4所示。电站运行良好,晴天在10:10~15:30时间段系统反射镜之间无阴影

系统的无阴影工作时间为6 h的反射镜中心距及相邻反射镜间距如表1所示。由表1可以看出,当无阴影工作时间确定后,相邻反射镜间距各不相同,且随着与镜场中心距离的增大而逐渐增大。当增大到第6列反射镜后,与第5列反射镜的间距为148 mm,反射镜列数继续增加,相邻反射镜间距的增速缓慢。前期研究表明: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,使太阳光经它反射后入射到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实际的指导意义^[13]。在实际工程应用中,为了简化系统,便于采用简单实用的驱动系统,反射镜可以考虑等间距(各列反射镜间距的平均值)布置。

影响(存在接收器阴影),现已顺利并网发电。

5 结论

本文针对单管接收器的线性菲涅尔式聚光系统镜场南北布置的特点,利用几何关系推导了镜场无阴影布置的数学表达式,给出了数值计算方法。以CPC最大接受半角为45°、反射镜宽度为380 mm、反射镜列数为21列的镜场为例,详细研究了系统的无阴影工作时间与镜场布置及地面覆盖率的关系。结果表明:随着系统无阴影工作时间的增长,反射镜与镜场中心的距离逐渐增大,地面覆盖率逐渐减小。选择系统无阴影工作时间为6 h,相邻反射镜间距最大为537 mm,地面覆盖率为73.28%的镜场布置相对合理,满足高温高压线性菲涅尔式聚光太阳热能电站的实际需要。

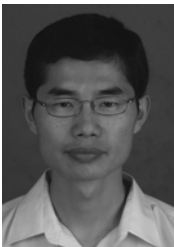
6 致谢

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:

- [1] 周求湛, 张彦创, 周承鹏, 等. 1/f 噪声的精确测量及其在太阳能电池可靠性筛选中的应用 [J]. 光学精密工程, 2012(3): 625-631.
ZHOU Q ZH, ZHANG Y CH, ZHOU CH P, *et al.*. Precise measurement of 1/f noise and its application to reliability screening for solar cells [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012(3): 625-631. (in Chinese)
- [2] 潘其坤, 张来明, 谢冀江, 等. 基于卡塞格林结构的高倍太阳能聚光镜 [J]. 中国光学, 2012, 5(4): 388-393.
PAN Q K, ZHANG L M, XIE J J, *et al.*. Review of concentration system in solar thermal power plant [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 388-393. (in Chinese)
- [3] 刘华, 卢振武. 可横向分光的大接收角非成像式聚光系统 [J]. 光学精密工程, 2009(12): 2881-2886.
U H, LU ZH W. Lateral splittable non-imaging concentrators with large acceptable angles [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009(12): 2881-2886. (in Chinese)
- [4] DUFFIE J A, BECKMAN W A. *Solar Engineering of Thermal Processes* [M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [5] KALOGIROU S A. Solar thermal collectors and applications [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(3): 231-295.
- [6] 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, 3(3): 233-239.
HAN X B, WEI X D, LU ZH W, *et al.*. High power solar condenser based on Cassegrain structure [J]. *Chinese Optics*, 2011, 3(3): 233-239. (in Chinese)
- [7] MILLS D R, MORRISON G L. Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants [J]. *Solar Energy*, 2000, 68(3): 263-283.
- [8] NIXON J D, DAVIES P A. Cost-exergy optimisation of linear Fresnel reflectors [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(1): 147-156.
- [9] DAI J, ZHENG H F, SU Y H, *et al.*. The motional design and analysis for linear Fresnel reflector system combined three-movement [J]. *Energy Procedia*, 2012, 14: 971-976.
- [10] 杜春旭, 王普, 吴玉庭, 等. 线性菲涅耳聚光系统无遮挡镜场布置的矢量分析法 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 397-404.
DU CH X, WANG P, WU Y T, *et al.*. Vector analysis method for LFR mirror field arrangement without shading and blocking [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(3): 397-404. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 杜春旭, 王普, 吴玉庭, 等. 线性菲涅耳不同镜场光学性能比较 [J]. 太阳能学报, 2013, 34(8): 1353-1359.
DU CH X, WANG P, WU Y T, *et al.*. Compares of optical performance of different aligned linear fresnel mirror field [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2013, 34(8): 1353-1359. (in Chinese)
- [13] 王成龙, 马军, 范多旺. 线性菲涅耳式聚光系统单管接收器的设计及优化 [J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1-6.
WANG CH L, MA J, FAN D W. 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)

作者简介:



王成龙 (1978—), 男, 甘肃临泽人, 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, 主要从事聚光太阳能系统方面的研究。E-mail: clwangee@163.com