

线性菲涅耳式聚光系统阴影与遮挡计算分析模型

梁飞^{1,2*}, 张娜^{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 提出了一种阴影与遮挡计算分析模型, 并进行了验证。等间距布置 16 列反射镜, 瞄准线高度为 9056 mm, 对比了镜间距为 100 mm 时阴影在 SolTrace 软件中与所提模型中的计算结果。给出了所提模型在上述条件下确定镜场布置最佳间距的实例, 结果表明合理间距为 331.91 mm, 与传统无阴影布置方法得到的 330 mm 接近, 验证了所提计算模型的正确性。该模型对于线性菲涅耳聚光镜场中的阴影与遮挡分析具有普适性, 对线性菲涅耳式聚光系统的设计具有较好的指导意义。

关键词 光学设计; 太阳能聚光系统; 线性菲涅耳系统; 阴影与遮挡; 数学模型; 镜场布置

中图分类号 TK513.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.122202

Calculation and Analysis Model of Shading and Blocking in Linear Fresnel Reflector System

Liang Fei^{1,2*}, Zhang Na^{1,2}

¹National Engineering Research Center for Technology and Equipment of Environmental Deposition, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

²Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract In this paper, we propose and verify a calculation and analysis model of shading and blocking in a linear Fresnel reflector system. Specifically, 16 mirrors are arranged at an equal spacing and the aiming line height is 9056 mm. For this setup, we compare the shading calculation results from the proposed model with those from SolTrace at a mirror spacing of 100 mm. Then, we present one example of how to determine the best mirror field spacing for the proposed model under the above conditions, and it is found that the ideal spacing is 331.91 mm, close to the 330 mm obtained via the traditional shadow-less layout method. Finally, we verify the accuracy of the proposed calculation model. The proposed model can be used to analyze shading and blocking in the field of a linear Fresnel reflector, and it is helpful to guide the design of a linear Fresnel reflector system.

Key words optical design; solar concentrator system; linear Fresnel system; shading and blocking; mathematical models; mirror field arrangement

OCIS codes 220.2740; 220.2560; 080.1510; 080.1753

1 引言

太阳能发电一直是国内外科研工作者研究的热点^[1]。太阳能发电技术中, 光热发电可分为非聚光和聚光两大类。聚光式太阳能热发电技术是指通过

聚光产生高温热能进而发电, 按照聚光形式的不同, 主要分为槽式、塔式、碟式以及线性菲涅耳式^[2], 其中, 线性菲涅耳式是通过一组离散化的反射镜将阳光直接会聚至高空集热管, 或经过二次反射镜间接会聚至高空集热管的聚光技术。

收稿日期: 2018-09-20; 修回日期: 2018-11-26; 录用日期: 2019-01-15

基金项目: 国家 973 计划 (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)

* E-mail: caohai89@163.com

聚光器对整个系统的发电效率有重要影响,在工程成本上占 50% 甚至更大的比重。制约聚光器光学性能的主要因素有:一次反射镜间的阴影和遮挡、余弦效率、末端损失、拦截效率、大气衰减等。针对上述问题,国内外科研工作者开展了广泛的研究。杜春旭等^[3]探讨了减少镜场阴影和遮挡损失的方法,得到了东西方向布置、系统无阴影无遮挡损失时的镜场设计方法。Abbas 等^[4]对比分析了使用圆柱面和抛物面反射镜的线性菲涅耳式系统在平面吸热器上的光斑分布情况。戴静等^[5]提出了三运动复合线性菲涅耳反射式太阳聚光系统,可减小系统的余弦损失。邱羽等^[6]针对圆柱面和抛物面的光学性能进行了对比研究,但并没有给出具体焦距的确定方法。本文在现有研究的基础上,针对阴影与遮挡问题,提出了阴影与遮挡计算分析模型,并优化了一次镜在完全没有阴影遮挡时最小间距的确定方法。

2 数学模型

图 1 为典型线性菲涅耳式聚光器示意图。采用平面直角坐标系,反射镜东西方向对称布置^[7-8],将东侧反射镜由西(W)至东(E)依次标记为 M9~M16,西侧反射镜由东至西依次标记为 M1~M8,中间反射镜标记为 M0。

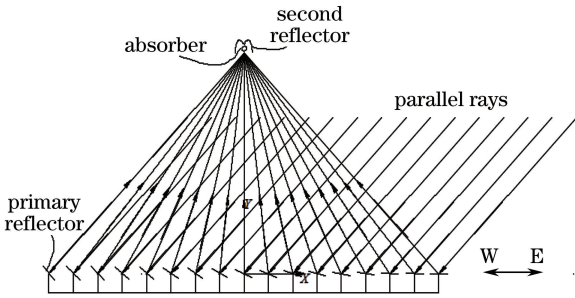


图 1 典型线性菲涅耳式聚光器示意图

Fig. 1 Schematic of typical linear Fresnel reflector

2.1 阴影计算方法

阴影示意图如图 2 所示,在太阳入射角为 θ 时,如果光线经过反射镜 b 上的边缘点 Q_{bh} 落在反射镜 a 上,则反射镜 b 会在反射镜 a 上留下阴影^[9-10]。当一次反射镜为平面镜时,阴影点为光线入射角 θ 与反射镜 b 上边缘点 $Q_{bh}(x_0, y_0)$ 所确定的直线 L 与反射镜 a 所在直线 K 的交点 $P(x, y)$,满足^[10]

$$\begin{cases} L: y - y_0 = (x - x_0) \cdot k_1 \\ K: y - y_1 = (x - x_1) \cdot k_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_1 为入射光线 L 的斜率, $k_1 = \tan \theta$; k_2 为平面镜 a 所在直线的斜率; (x_1, y_1) 为镜 a 轴点 Q_a 的

坐标。

当一次反射镜为曲面镜时,以轴点为界,可以将反射镜简化为“V”型,即由上下两块半平面反射镜组合而成,半平面反射镜宽度 W 近似等于曲面镜弦长 D 的 1/2。当太阳入射角为 θ 时,经过 b 镜上边缘点 Q_{bh} 的光线记为 L ,判断 a 镜轴点 Q_a 与 L 的关系,若 Q_a 在 L 上侧,则下半面反射镜所在直线 K 与 L 的交点为阴影点;若 Q_a 在 L 下侧,则上半面反射镜所在直线与 L 的交点为阴影点。计算方法如(1)式所示。根据阴影点 P 与反射镜 a 下边缘点坐标 Q_{al} 可以求出阴影长度 Z 。如果阴影点在 a 镜上边缘点 Q_{ah} 的上方,则此时阴影完全覆盖反射镜 a,阴影长度为 D , D 为镜宽。计算上述所求交点与反射镜 b 上边缘点 Q_{bh} 连线的角度,当该角度等于太阳入射角 θ 时,证明阴影点 P 计算正确。

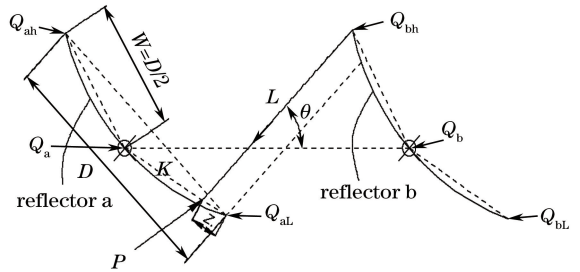


图 2 阴影示意图

Fig. 2 Schematic of shading

2.2 遮挡计算方法

有阴影有遮挡情况示意图及反射镜 b 无阴影有遮挡示意图分布如图 3、图 4 所示,入射光线在 a 镜上的反射光线落在 b 镜背面,这时 b 镜对 a 镜有遮挡^[11-12],其中 K' 为与 K_1 平行且通过反射镜 b 上端点的直线。系统全天运行过程中,有阴影有遮挡、反射镜 b 无阴影有遮挡、反射镜 a 无阴影有遮挡的情况示意图如图 3~5 所示,图中 α 为下半面反射镜与水平面的夹角, δ 为对应反射角度, S 为遮挡长度。另一种情况是反射镜 b 阴影完全覆盖反射镜 a,此

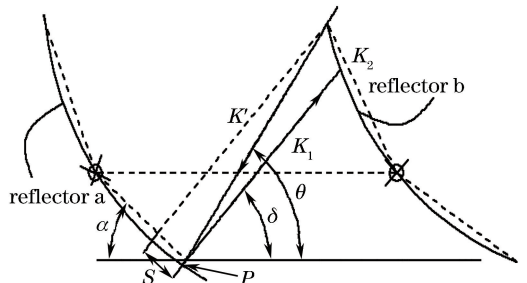


图 3 有阴影有遮挡情况示意图

Fig. 3 Schematic of shading and blocking

时反射镜 a 不存在遮挡计算问题。分别对图 3~5 中遮挡长度 S 的计算方法进行讨论。

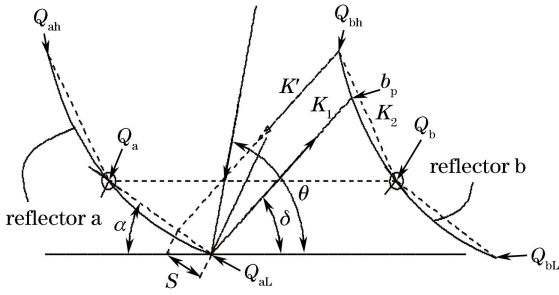


图 4 反射镜 b 无阴影有遮挡示意图
Fig. 4 Schematic of reflector b with blocking but without shadow

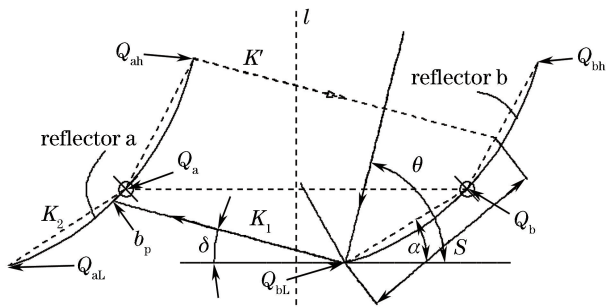


图 5 反射镜 a 无阴影有遮挡示意图
Fig. 5 Schematic of reflector a without shadow but with blocking

对于图 3 情况,反射镜 b 在反射镜 a 上有阴影,则取阴影点 P 作为反射点进行后续计算;对于图 4 情况,反射镜 b 在反射镜 a 上不存在阴影,则取反射镜 a 下边缘点 Q_{al} 作为反射点进行后续计算。图 3 和图 4 两种遮挡情况唯一的区别是反射点的选取,后续的计算方法完全一致,下面以图 4 为例进行说明。

对于图 4 的遮挡情况,若一次反射镜为微曲面,则根据边缘点与轴点简化为“V”形;若选取的反射点在反射镜 a 轴点 Q_a 下方,则取下半面反射镜与水平面的夹角记为 α ;若选取的反射点在轴点上方,则取上半面反射镜与水平面的夹角记为 α 。根据角度 α 、太阳入射角 θ 及光的反射定律,可以计算出入射光线在反射点 Q_{al} 处的反射光线 K_1 ,对应反射角度 $\delta = \pi - \theta - 2\alpha$ 。判断反射光线 K_1 与反射镜 b 轴点 Q_b 的关系,若轴点 Q_b 在光线 K_1 下方,则取 b 镜上半面反射镜所在直线记为 K_2 ;反之,则取 b 镜下半面反射镜所在直线记为 K_2 。计算 K_1 与 K_2 的交点,若交点在反射镜 b 上边缘点 Q_{bh} 的左侧,则不存在遮挡;若在右侧,则有遮挡影响。将 K_1 平移至

K' , K' 为与 K_1 平行且通过反射镜 b 上端点的直线。将 K' 作为入射光线通过阴影计算方法可以求出遮挡长度 S 。计算 K_1 与 K_2 交点与反射镜 a 中反射点 Q_{al} 连线的角度,当角度等于反射光线角度 δ 时,证明遮挡点 b_p 计算正确。

对于图 5 的遮挡情况,同理,在太阳入射角 θ 下,根据反射镜 b 下半面所在直线方程可以求出此时经过下边缘点的反射光线 K_1 ,其中 K_1 与平面夹角 $\delta = \theta + 2\alpha$ 。判断 K_1 与反射镜 a 轴点 Q_a 的关系,若轴点在 K_1 下侧,则取 a 镜上半面反射镜所在直线记为 K_2 ,计算 K_2 与 K_1 的交点;反之,则取 a 镜下半面反射镜所在直线记为 K_2 ,计算 K_2 与 K_1 的交点。若交点在反射镜 a 上边缘点 Q_{ah} 的右侧,则不存在遮挡,反之,会产生遮挡。接着,将反射光线平移至 K' , K' 为与 K_1 平行且通过反射镜 a 上端点的直线,如图 5 所示,反射镜连同 K' 绕竖直轴旋转 180° ,旋转之后的反射镜坐标与光线 K' 代入阴影计算方法可以求出遮挡长度 S 。计算 K_2 与 K_1 交点与反射镜 b 中反射点 Q_{bl} 连线的角度,当其大小等于反射光线角度 δ 时,证明遮挡点计算正确。

3 模型准确性验证

单侧布置 8 列反射镜,当镜间距为 100 mm,瞄准线高度为 9056 mm,镜宽为 800 mm 时,等间距布置镜场,并利用所提阴影与遮挡分析模型计算在太阳入射角为 45° 时各反射镜的偏转角度以及形成的阴影长度,计算得到的阴影数据如表 1 所示。

利用上述条件,在 SolTrace 中建立模型并计算阴影数据。SolTrace 不能一键式导出阴影数据,单列反射镜的阴影长度可通过对话框读取。对话框中包含了该列反射镜照亮区域左右边缘点的坐标信息,结合镜宽 0.8 m 可计算得到阴影长度。图 6 为 SolTraces 中的阴影分布图,给出了位置为 M8 和 M0 处反射镜的阴影分布,详细的阴影数据如表 1 所示。

阴影长度随反射镜位置的变化图如图 7 所示,对比了阴影长度在所提计算模型与 SolTrace 中的计算结果。由图 7 可见,两种阴影长度的计算结果吻合度高,验证了所提方法的正确性。在 SolTrace 下分析阴影与遮挡,需要先建模,且阴影遮挡长度数据只能对单面反射镜读取计算,无法导出精确值,而所提阴影与遮挡模型可在 Matlab 软件中编程实现,只需给出镜场初始数据便可得到阴影与遮挡数据,更加方便快捷。

表 1 所提模型计算得到的阴影数据

Table 1 Shadow data obtained by calculation based on proposed model

Reflector	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Location /mm	-900	-1800	-2700	-3600	-4500	-5400	-6300	-7200
Shadow /mm (Matlab)	117.39	129.31	139.08	146.84	152.79	157.18	160.28	162.34
Shadow /mm (SolTrace)	117.36	129.28	138.91	146.66	152.61	157.04	160.22	162.31
Reflector	M0	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
Location /mm	0	900	1800	2700	3600	4500	5400	6300
Shadow /mm (Matlab)	103.25	87.01	68.85	49.05	27.96	5.95	0	0
Shadow /mm (SolTrace)	103.34	87.270	69.350	49.830	28.950	6.16	0	0

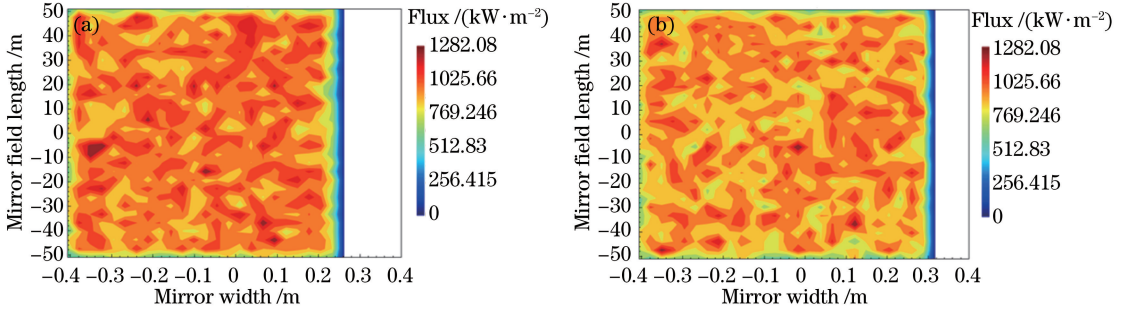


图 6 SolTrace 中阴影分布图。(a)反射镜 M8 的阴影分布;(b)反射镜 M0 的阴影分布

Fig. 6 Shadow distribution maps in SolTrace. (a) Shadow distribution of reflector M8; (b) shadow distribution of reflection M0

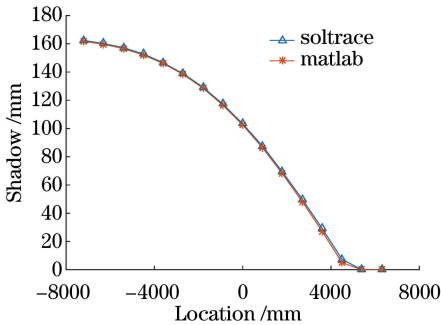


图 7 阴影长度随反射镜位置的变化图

Fig. 7 Shadow length versus reflector location

4 镜场布置中的应用

利用无阴影布置的方法可以确定一次镜的间距^[13-14],这是一种根据光线通过反射镜边缘在恰好没有阴影的情况下确定镜场间距的数学模型。但是,该方法没有考虑遮挡,也没有给出具体阴影遮挡长度的计算方法,阴影遮挡对拦截效率的影响机理并不明确,因此,这种方法对于根据当地光照强度设计具有特定功率的聚光器的需求并不适用^[15]。所提方法将在给定反射镜列数、反射镜间距、所有反射镜瞄准点、截面三角形形状以及太阳入射角的情况下,布置镜场并计算在给定间距下的阴影和遮挡长

度。以微小步长变换间距,重复计算不同间距下的镜场布置对应的阴影和遮挡长度,得到没有阴影和遮挡时的间距即为最终布置间距。

单侧布置 8 列,镜宽为 800 mm,截面为等腰直角三角形结构,太阳入射角为 45°,所有一次镜瞄准点为二次镜开口平面的中点,各反射镜等间距布置。镜间距以 25 为步长,在 100~350 mm 范围内调整,计算特定间距下镜场中存在阴影的反射镜数与阴影总长度,得到阴影长度的变化如图 8 所示。

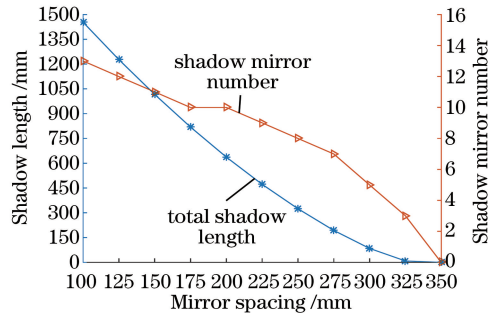


图 8 当镜间距为 100~350 mm 时阴影长度的变化

Fig. 8 Variation of shadow length when mirror spacing is 100-350 mm

镜间距以 1 为步长,在 300~335 mm 范围内调整,得到阴影长度的变化如图 9 所示。由图可知,在间距为 331 mm 时,所有反射镜恰好没有阴影,根据

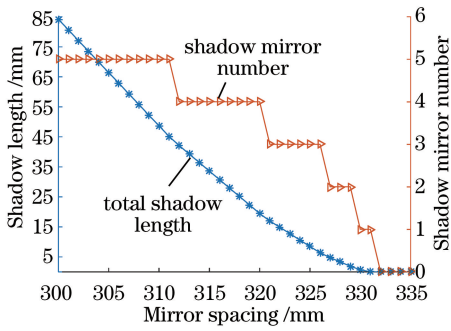


图9 当镜间距为300~335 mm时阴影长度的变化

Fig. 9 Variation of shadow length when mirror spacing is 300-335 mm

等腰直角三角形结构(即高宽比为1)可知,对应二次开口平面与一次镜轴平面的距离为9056 mm。此时太阳入射角及接收器高度不变,但由于反射镜偏转角变化,单面反射镜阴影长度引起的变化会减小,相邻镜间距增大,即反射镜本身与相邻反射镜形成的阴影区域重叠面积减小,从而可以得到阴影长度随镜间距单调递减的变化规律。图10为不同太阳入射角下的无阴影最小间距随太阳入射角的变化

表2 系统无阴影工作6 h的镜场布置

Table 2 Mirror field arrangement for shadow free working of 6 h

Reflector	1	2	3	4	5	6	7	8
Location /mm	1056.93	2135.38	3231.39	4340.89	5460.01	6585.48	7714.67	8845.58
Spacing /mm	256.93	278.44	296.01	309.49	319.12	325.47	329.18	330.91

由表2可知,无阴影工作的最大镜间距为330.91 mm,与所提算法模型计算得到的无阴影工作最大镜间距331 mm接近,因此,所提算法模型可以用于计算线性菲涅耳式聚光器的镜场布置。

5 结论

针对线性菲涅耳式太阳能系统中存在的阴影与遮挡问题,提出并实现了一种阴影与遮挡计算分析模型,给出了阴影与遮挡计算验证方法。在单侧布置8列,镜间距为100 mm,瞄准线高度为9056 mm,镜宽为800 mm,太阳入射角为45°,等间距布置条件下,分别计算了所提模型与SolTrace软件所得的阴影数据,对比验证了所提数学模型的正确性。给出了所提模型在确定镜场布置中的应用实例,并与传统镜场布置方法^[16]进行了对比,结果表明,所提模型可以准确得出镜场在无阴影工作条件下的最佳间距,相较于传统的阴影遮挡分析方法^[17],所提模型更加准确、快速。

关系,由图可见,当间距为331 mm时,太阳入射角在45°~90°范围内变化时不存在阴影,随着太阳入射角的增加,单面反射镜阴影逐渐减小。

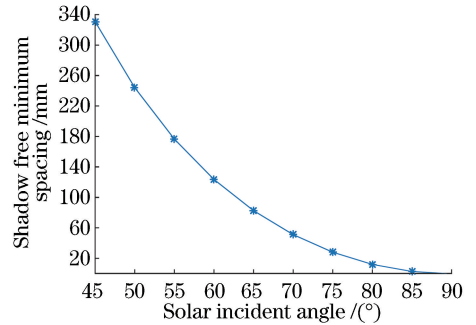


图10 不同太阳入射角下的无阴影最小间距随太阳入射角的变化关系

Fig. 10 Shadow free minimum distance versus solar incident angle

根据传统的无阴影布置方法^[15],在设定高度为9056 mm,镜宽为800 mm,最大入射角为45°,全天无阴影工作6 h时,得到系统无阴影工作6 h的镜场布置如表2所示。

参 考 文 献

- [1] Montero G, Escobar J M, Rodríguez E, *et al.* Solar radiation and shadow modelling with adaptive triangular meshes[J]. *Solar Energy*, 2009, 83(7): 998-1012.
- [2] Kalogirou S A. Solar thermal collectors and applications[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(3): 231-295.
- [3] Du C X, Wang P, Ma C F, *et al.* Optical geometric method for LFR mirror field arrangement without shading and blocking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3276-3282.
杜春旭, 王普, 马重芳, 等. 线性菲涅耳聚光系统无遮挡镜场布置的光学几何方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3276-3282.
- [4] Abbas R, Montes M J, Piera M, *et al.* Solar radiation concentration features in linear Fresnel reflector arrays [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 54(1): 133-144.
- [5] Dai J, Zheng H F, Feng C Q. Performance of linear

- Fresnel reflector system combined three-movement [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(5): 464-469.
- 戴静, 郑宏飞, 冯朝卿. 三运动复合线性菲涅耳反射式太阳聚光系统的性能研究 [J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(5): 464-469.
- [6] 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): 2551-2556.
- 邱羽, 何雅玲, 程泽东. 线性菲涅耳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): 2551-2556.
- [7] Mills D R, Morrison G L. Compact linear Fresnel reflector solar thermal powerplants [J]. Solar Energy, 2000, 68(3): 263-283.
- [8] 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.
- [9] Shi X, Sun C, Wang X Q. 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. 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.
- [10] 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.
- [11] 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): 2142-2149.
- 邱羽, 何雅玲, 梁奇, 等. 线性菲涅耳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): 2142-2149.
- [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] 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. 线性菲涅耳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.
- [14] Wang C 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.
- 王成龙, 马军, 范多旺, 等. 用于线性菲涅耳式聚光系统的CPC仿真研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 556-560.
- [15] 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): 353-356, 381.
- 刘明义, 亓海青, 郑建涛, 等. 菲涅耳式太阳能光热电站经济性分析 [J]. 节能技术, 2016, 34(4): 353-356, 381.
- [16] Wang C L, Ma J, Fan D W. Design and analysis of a CPC with single vacuum tube for linear Fresnel reflector system [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(6): 597-602.
- 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与优化 [J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(6): 597-602.
- [17] Du C X, Wang P, Ma C F, *et al.* Vector algorithm of tracking tilted angle of Fresnel concentrated solar power systems [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 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.