

# 斜率误差对线性菲涅尔式太阳能聚光系统的影响研究

吴泽睿<sup>1,2</sup>, 王成龙<sup>2\*</sup>, 祁琛阳<sup>1,2</sup>, 李东锴<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

收稿日期: 2022年5月6日; 录用日期: 2022年7月4日; 发布日期: 2022年7月11日

## 摘要

为研究斜率误差对线性菲涅尔式聚光系统光学性能的影响, 采用Soltrace软件建立了16列一次反射镜的线性菲涅尔式聚光系统模型。在此基础上, 研究了斜率误差对线性菲涅尔式聚光系统中集热管表面的能流分布和光学效率的影响, 并提出根据最大光斑宽度来选择一次镜从而降低不利影响的策略。研究结果表明: 一定范围内的斜率误差使集热管表面周向的能流分布更加均匀, 而过大的斜率误差则显著降低系统的光学性能。依照该方法设计一次镜, 不仅具有较好的光学性能, 而且能容错一定范围内斜率误差带来的其他不利影响, 通过优化聚光器高度, 斜率误差对进入率和光线效率造成的影响分别降低了4.04%和2.42%。

## 关键词

线性菲涅尔, 太阳能, 斜率误差, 光学性能

# Study of the Effect of Slope Error on Linear Fresnel System

Zerui Wu<sup>1,2</sup>, Chenglong Wang<sup>2\*</sup>, Chenyang Qi<sup>1,2</sup>, Dongkai Li<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Intelligent Control of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>National Engineering Research Center for Technology and Equipment Technology of Environmental Deposition, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: May 6<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jul. 4<sup>th</sup>, 2022; published: Jul. 11<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 吴泽睿, 王成龙, 祁琛阳, 李东锴. 斜率误差对线性菲涅尔式太阳能聚光系统的影响研究[J]. 建模与仿真, 2022, 11(4): 969-977. DOI: 10.12677/mos.2022.114089

## Abstract

To study the effect of slope error on the optical performance of the linear Fresnel concentrator system, a model of the linear Fresnel concentrator system with 16 rows of primary mirrors is established using Soltrace software. On this basis, the effect of slope error on the energy flow distribution and optical efficiency of the collector surface in the linear Fresnel concentrator system is studied, and a strategy to reduce the negative effect by selecting primary mirrors according to the maximum spot width is proposed. The results show that a certain range of slope error makes the energy flow distribution around the collector surface more uniform, while too large a slope error significantly reduces the optical performance of the system. By optimizing the concentrator height, the impact of slope error on entry rate and light efficiency is reduced by 4.04% and 2.42%, respectively.

## Keywords

Linear Fresnel, Solar Energy, Slope Error, Optical Performance

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

太阳能作为一种可再生能源[1] [2], 以其总量大、分布广泛、绿色环保等特点, 引起了多国学者的研究和关注。线性菲涅尔式(LFR)聚光发电系统以其结构简单、制造成本低、抗风性能好、土地利用率高等优势成为一种主流的光热发电方式, 近年来在发电、供热等领域得到了广泛的示范化应用[3] [4] [5] [6]。

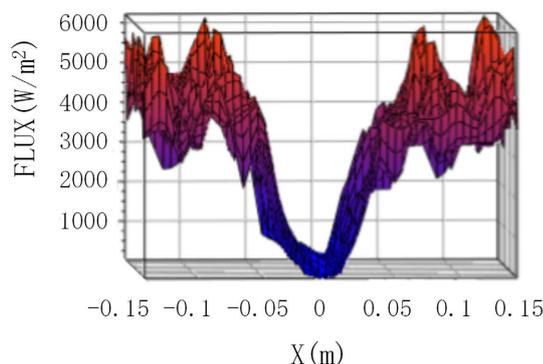
太阳能聚光系统作为整个系统的能量来源, 是决定系统效率的关键因素之一。线性菲涅尔式聚光系统的一次镜场由多列细长的、靠近安装地面的反射镜组成。一次镜的面型可以是抛物面、圆柱面或者平面。斜率误差是聚光器加工生产过程中产生的误差, 表现为反射镜表面给定点的法线与理想法线之间存在夹角。由于夹角的存在会导致反射光线偏离原方向, 故研究和分析斜率误差对线性菲涅尔式聚光系统造成的影响, 设计镜场的改进方法, 对线性菲涅尔式聚光系统的应用具有重要意义。

对于镜场的改进设计, 已有国内外多名学者进行了研究。杜春旭[7]等基于几何光学原理提出了对于东西方向布置的镜场的无阴影无遮挡镜场布置方法。王成龙[8]等给出了对于单管接收器 CPC 的镜场无阴影布置的计算方法。Mills [9]等提出了一种紧凑式的线性菲涅尔聚光系统。程泽东[10]等针对聚光太阳能系统中复杂的光学过程和光热转换过程, 提出了一种统一的建模方法, 并将其应用到多种类型的聚光集热系统中, 该方法精度较高、通用性较好。Grena [11]等提出了一种翅状的二次反射器, 将集热管上半部分的能流分布提高到了 37%, 改善了集热管上的能流均匀性。Abbas [12]等从多个角度对比了线性菲涅尔系统中三种不同类型的二次接收器, 认为复合抛物面聚光器和自适应光学聚光器具有相似的光学特性。何雅玲[13]等研究了多种聚光集热系统中集热器表面不均匀温度产生的原因, 指出了系统优化的目标是匹配好系统的聚光能力与吸热能力。

本文以一次镜场为 16 列镜子的菲涅尔聚光系统为例, 使用 Soltrace 构建该镜场模型进行仿真, 分别从集热管表面周向能流均匀性和系统光学效率的两个方面探讨了斜率误差对其造成的影响, 并进行了优化研究, 为线性菲涅尔式太阳能聚光系统的优化设计和评价提供依据。

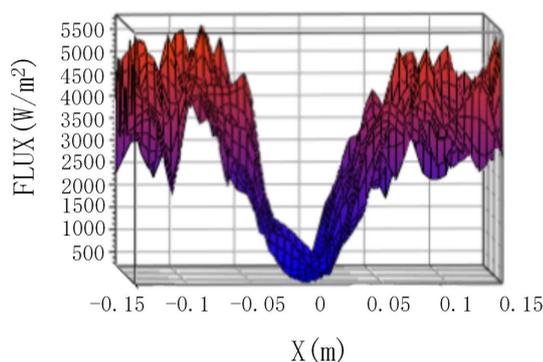
## 2. 斜率误差对线性菲涅尔式聚光系统能流分布的影响

使用 Soltrace 软件对同一线性菲涅尔式聚光系统在不同斜率误差下, 集热管表面能流分布进行仿真研究。不同斜率误差下集热管周向能流分布如下图 1、图 2 所示。



**Figure 1.** Energy flow distribution on the tube with lower slope error

**图 1.** 较低斜率误差下集热管上的能流分布



**Figure 2.** Energy flow distribution on the tube with higher slope error

**图 2.** 较高斜率误差下集热管上的能流分布

从图中可知, 当斜率误差较大时, 能量集中区域的能流密度分布更加均匀(X 方向上-0.08 和 0.08 处的两个峰更加平缓)。同时, 能流的最大值也相应减小, 能流的整体分布更加均匀。一定的斜率误差会对集热管上的能流均匀性带来有益效果, 更均匀分布的能流密度可以避免局部温度过高, 避免集热管因温度过高产生的热应力造成的形变, 保护集热管和玻璃外罩之间的真空环境。

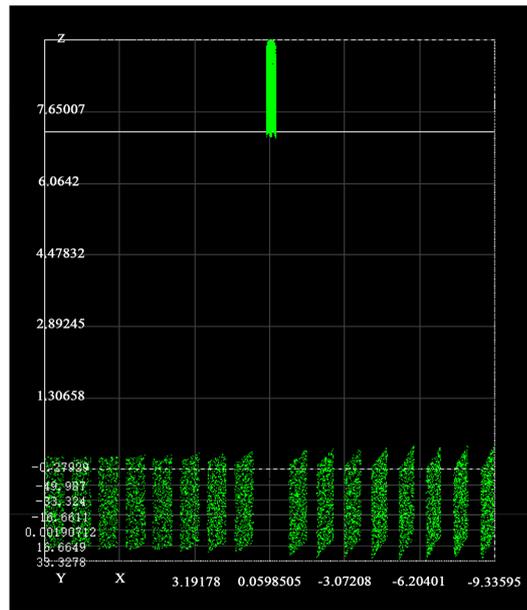
## 3. 斜率误差对线性菲涅尔式聚光系统光学性能的影响

为研究斜率误差对线性菲涅尔式聚光系统光学性能的影响, 以一 16 列镜子的线性菲涅尔聚光系统为例, 使用 Soltrace 软件建立其模型, 为方便研究, 一次镜和二次镜的反射率假定为 1.0。该镜场的主要结构参数如表 1 所示。

采用 Soltrace 软件构建的线性菲涅尔式聚光系统如图 3 所示。对该镜场在不同斜率误差下的光线效率进行仿真研究。光线效率定义为光线数量(到达目标物体)与光线数量(入射到一次镜场)的比值。该镜场在不同斜率误差下的光线效率如图 4 所示。

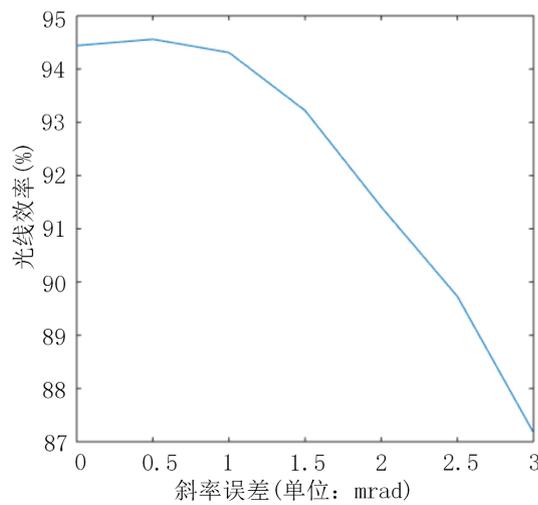
**Table 1.** Main structural parameters of linear Fresnel system  
**表 1.** 线性菲涅尔式聚光系统主要结构参数表

| 项目      | 值       | 项目         | 值             |
|---------|---------|------------|---------------|
| 一次反射镜列数 | 16      | 一次反射镜间距    | 0.332 m       |
| 镜宽      | 0.8 m   | 金属管直径      | 90 mm         |
| 镜长      | 100 m   | CPC 最大接收半角 | 45°           |
| 一次反射镜面型 | 圆柱面     | 接收器高度      | 9.056 m       |
| 一次反射镜总宽 | 18.84 m | CPC 形状     | 渐开线 + 抛物线[14] |



**Figure 3.** Linear Fresnel concentrating system built with SolTrace

**图 3.** 构建的线性菲涅尔式聚光系统



**Figure 4.** Light efficiency at different slope error

**图 4.** 不同斜率误差下的光线效率

由图 4 可见, 对于该系统, 斜率误差较小时, 该系统光线效率始终保持较高水平(斜率误差  $< 1$ , 光线效率  $> 94\%$ ), 当斜率误差大于  $1 \text{ mrad}$  后, 光线效率下降明显。根据工程经验推测导致光线效率急剧下降的原因是由于斜率误差过大, 导致太阳光经一次反射镜反射至二次聚光器(CPC)开口时, 其光斑宽度已经超过了聚光器开口宽度, 致使部分光线没能进入二次镜。为验证这一猜想, 对该系统在二次镜开口平面处的最大光斑宽度和进入率进行仿真研究。进入率定义为进入二次镜的光线与入射到一次镜场的光线的比值。最大光斑宽度定义为二次镜开口平面处 X 方向上最两端的光子之间的距离。仿真结果如下图 5 所示。

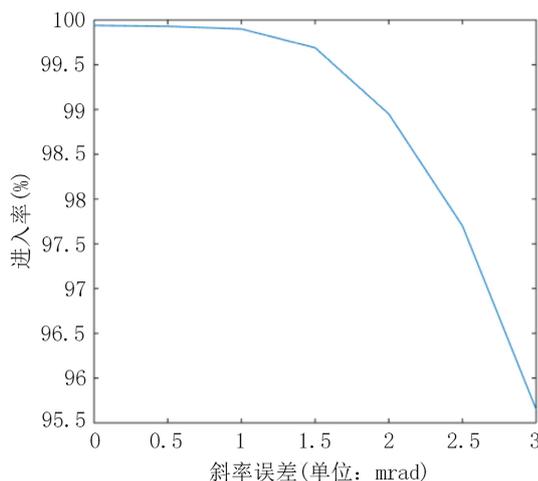


Figure 5. Entry rate at different slope error

图 5. 不同斜率误差下的进入率

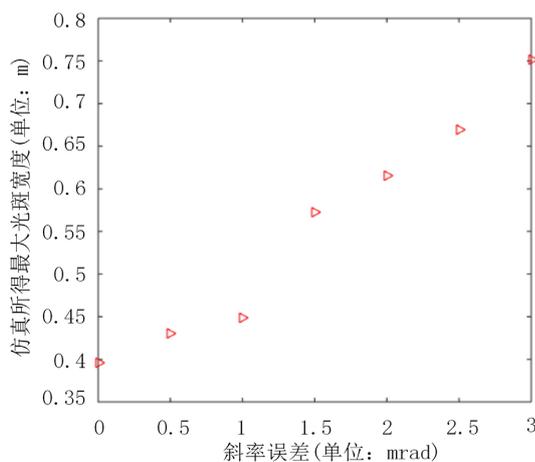


Figure 6. Maximum spot width at different slope error

图 6. 不同斜率误差下的最大光斑宽度

由图 5 可见, 当斜率误差  $> 1 \text{ mrad}$  时, 进入率开始明显下降, 有部分光线并没有进入二次镜开口。光线经一次镜反射至二次聚光器开口处的最大光斑宽度如图 6 所示, 从图中可以看出, 当斜率误差  $> 1 \text{ mrad}$  时, 光斑宽度明显大于二次镜的开口宽度。以上研究结果表明由于斜率误差过大导致了线性菲涅尔式聚光系统一次镜场形成的光斑宽度大于二次镜开口宽度  $0.4 \text{ m}$ , 降低了进入率, 从而使得系统的光线效率降低。因此, 一次反射镜过大的斜率误差对线性菲涅尔式聚光系统的光学性能产生了不利影响。

## 4. 线性菲涅尔式聚光系统光学性能优化

### 4.1. 最优圆柱面相对高度的计算与选择

根据上述研究结果，为了降低斜率误差对线性菲涅尔式聚光系统光学性能的不利影响，可以通过改变一次镜的相对高度的方式，优化一次镜的焦距，减小光斑宽度，增加二次镜开口处的进入率，从而提高系统的光学性能。

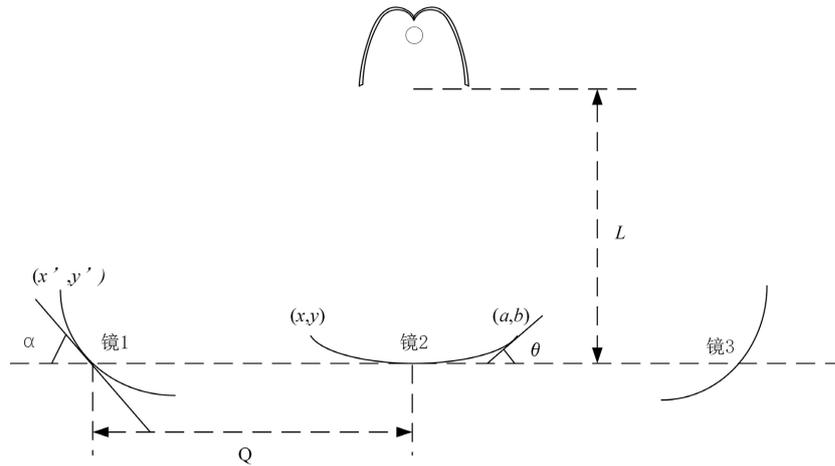


Figure 7. Schematic diagram of primary reflector field  
图 7. 一次反射镜场示意图

线性菲涅尔系统如图 7 所示，二次聚光器高度为  $L$ ，太阳入射角为  $\delta$ ，以水平放置的圆柱面镜的最低点为原点建立坐标系，对于图中水平放置的 2 号圆柱面镜，其右边缘点坐标为  $(a, b)$ ，则该圆柱面镜的半径  $r = (a^2 + b^2) / 2b$ ，右边缘点的切角  $\theta = -\arctan(-a / (b - r))$ 。

对于左侧的 1 号圆柱面镜，已知其倾斜角为  $\alpha_i$ ，在系统中的坐标为  $Q_i$ ，由于 1 号圆柱面镜可以被视为由 2 号圆柱面镜平移和旋转得到的，在已知 2 号圆柱面镜左边缘点坐标为  $(x, y)$  的情况下，可以求得 1 号圆柱面镜的左边缘点坐标为：

$$\begin{cases} x' = x \cos(-\alpha_i) - y \sin(-\alpha_i) - Q_i \\ y' = y \sin(-\alpha_i) + x \cos(-\alpha_i) \end{cases} \quad (1)$$

1 号圆柱面镜左边缘点切角为  $\theta'_i = \alpha_i - \theta$ ，可以求得左边缘点反射光线角度和光线在高度  $L$  处光斑点横坐标为：

$$\gamma_1 = \pi - \delta - 2\theta'_i \quad (2)$$

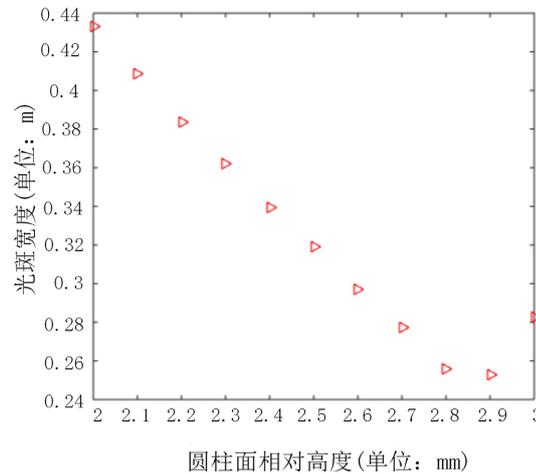
$$xl_1 = \frac{(L - y')}{\tan(\gamma)} + x' \quad (3)$$

对于右侧的 3 号圆柱面镜， $\theta'_i = \alpha_i + \theta$ ，同理可得其左边缘点反射光线角度和光线在高度  $L$  处光斑点横坐标为：

$$\gamma_3 = \delta + 2\theta'_i \quad (4)$$

$$xl_3 = \frac{(L - y')}{\tan(-\gamma)} - x' \quad (5)$$

右侧边缘点在  $L$  处光斑点横坐标同理可以求得，左右边缘点在  $L$  处光斑点横坐标之间的距离即为该镜子产生的光斑宽度，同理可以计算镜场中其他镜子的光斑宽度，取所有镜子在  $L$  处光斑点横坐标的最大最小值，这两个值之间的距离即为该镜场最大光斑宽度。下图为不同的圆柱面相对高度计算得到的理论最大光斑宽度。



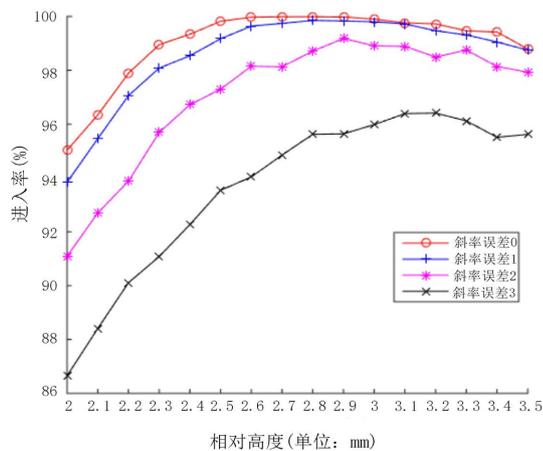
**Figure 8.** Relationship between relative height of cylindrical surface and theoretical spot width

**图 8.** 圆柱面相对高度与理论光斑宽度的关系

由图 8 可见，对于该线性菲涅尔式聚系统而言，选择相对高度为 2.9 mm 的圆柱面镜，可以取得最小的理论光斑宽度 0.253 m，此时理论光斑宽度远小于二次镜开口宽度，为此情况下的最优选择，在设计镜场时应予以考虑。

#### 4.2. 仿真实验

为了验证通过降低理论光斑宽度的方法可以在不同斜率误差情况下降低实际光斑宽度，仿真计算了不同圆柱面高度下的光线效率和进入率。



**Figure 9.** Relative height and entry rate at different slope error

**图 9.** 不同斜率误差下的相对高度与进入率

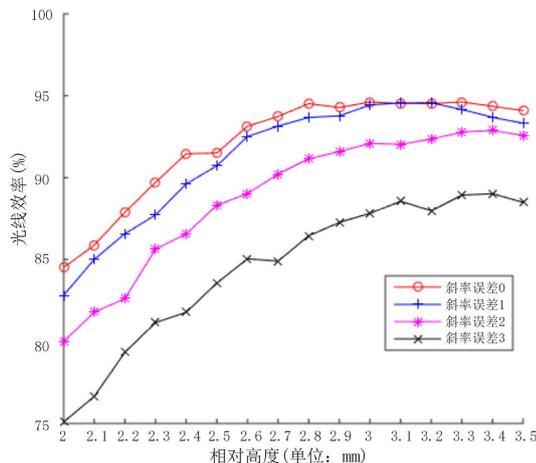


Figure 10. Relative height and light efficiency at different slope error

图 10. 不同斜率误差下的相对高度与光线效率

由图 9、图 10 可见，圆柱面高度相对较低时，该线性菲涅尔式聚光系统的进入率和光线效率均比较低，随着相对高度的升高，进入率和光线效率逐渐升高，不同斜率误差下进入率和光线效率的走势略有不同，但均在 2.9~3.1 mm 之间取得比较高的进入率和光线效率，与相对高度为 2 mm 的系统相比，在斜率误差为 0~3 mrad 的情况下，进入率分别提高了 4.95%、5.99%、8.09%、8.99%，光线效率分别提高了 9.77%、10.95%、11.59%、12.19%。故通过合理选择相对高度的一次镜，降低理论光斑宽度来增加系统在一定斜率误差范围内的进入率和光线效率，这一方法是合理有效的。

并且在此区域四条曲线趋于集中，对于相对高度为 2.9 mm 的系统，不同斜率误差间进入率和光线效率差值最大为 4.34%、7.01%，对于相对高度为 2 mm 的系统，不同斜率误差间进入率和光线效率差值最大为 8.38%、9.43%，优选相对高度后的系统不同斜率误差对系统进入率和光线效率造成的影响降低了 4.04%、2.42%。同一相对高度不同斜率误差的系统间进入率和光线效率的差异降低，说明该相对高度的一次镜能有效抵抗一定范围内的斜率误差对进入率和光学效率和造成的不良影响，具有较好斜率误差耐受性。该方法从考虑系统光学效率和抵抗斜率误差带来不利影响的角度均是较好的方案。

## 5. 结论

为研究一定范围内的斜率误差对线性菲涅尔式聚光系统能流分布和光学性能的影响，使用 Soltrace 软件建立了线性菲涅尔式聚光系统的模型，并基于此进行了一系列的计算与分析。具体结论如下：

- 1) 一定范围内的斜率误差可以使得集热管上的能流分布更加均匀，这对线性菲涅尔式聚光系统是有益的。
- 2) 较高的斜率误差会造成光斑宽度大于二次镜开口宽度，降低进入率，导致了系统光学性能的降低，这对线性菲涅尔式聚光系统是有害的。
- 3) 可以从降低光斑宽度的角度选择一次镜，这种方式选择的镜场具有较好的光学性能，并且可以有效抵抗斜率误差对光学性能造成的不利影响。

## 参考文献

- [1] Guney, M.S. (2016) Solar Power and Application Methods. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **57**, 776-785. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.055>
- [2] Khan, J. and Arsalan, M.H. (2016) Solar Power Technologies for Sustainable Electricity Generation—A Review. *Re-*

- Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **55**, 414-425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.135>
- [3] 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.
- [4] Baharoon, D.A., Rahman, H.A., Omar, W.Z.W., *et al.* (2015) Historical Development of Concentrating Solar Power Technologies to Generate Clean Electricity Efficiently—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **41**, 996-1027. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.008>
- [5] Mills, D.R. (2012) Linear Fresnel Reflector (LFR) Technology. *Concentrating Solar Power Technology, Principles, Developments and Applications* Woodhead Publishing Series in Energy, 153-196. <https://doi.org/10.1533/9780857096173.2.153>
- [6] Zhu, G., Wendelin, T., Wagner, M.J., *et al.* (2014) History, Current State, and Future of Linear Fresnel Concentrating Solar Collectors. *Solar Energy*, **103**, 639-652. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.021>
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Mills, D.R. and Morrison, G.L. (2000) Compact Linear Fresnel Reflector Solar Thermal Powerplants. *Solar Energy*, **68**, 263-283. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00068-7)
- [10] 程泽东, 何雅玲, 崔福庆. 聚光集热系统统一 MCRT 建模与聚光特性[J]. 科学通报, 2012, 57(22): 2127-2136.
- [11] Grena, R. and Tarquini, P. (2011) Solar Linear Fresnel Collector Using Molten Nitrates as Heat Transfer Fluid. *Energy*, **36**, 1048-1056. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.003>
- [12] Abbas, R., Sebastián, A., Montes, M.J., *et al.* (2019) A Comparison of Optical Performance for Linear Fresnel Collectors with Different Secondary Reflector Receiver Shapes. *AIP Conference Proceedings*, **2126**, 100001. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.003>
- [13] 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(30): 3208-3237.
- [14] 王锐东, 马军, 王成龙, 等. 线性菲涅尔式聚光集热系统研究进展[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 236-254.