

线性菲涅耳聚光系统柱面反射镜的优化与聚光特性

马军^{1,2,3*}, 刘潮¹, 刘芳¹, 庞如帅¹, 王熔基¹, 王成龙^{1,2,3**}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兰州交通大学聚光太阳能产业关键技术与装备省部共建协同创新中心, 甘肃 兰州 730070;³甘肃省太阳能光热产业研究院, 甘肃 兰州 730070

摘要 线性菲涅耳聚光系统采用柱面反射镜可提高聚光能力。本文提出一种柱面反射镜曲率半径的优化计算方法,建立了通用计算模型,详细分析了反射光线横向偏移的变化规律、系统瞬时光学效率和能流均匀性等。研究表明,柱面反射镜的最佳曲率半径与其宽度几乎没有关联,只需要考虑其与镜场中心的距离和系统有效工作时太阳横向入射角即可得到最佳值。通用计算模型所得的结果与数值精确计算的结果非常接近,最大偏差为1.26%,平均偏差为0.38%。在考虑柱面反射镜面误差、跟踪误差和曲率半径误差的情况下,当横向入射角大于45°时,系统瞬时光学效率保持在59.46%以上。在聚焦平面的较小范围(相对距离为-0.05~0.05)内,能流密度高且均匀性较好,适合布置光伏电池组件。

关键词 光学设计; 线性菲涅耳; 柱面反射镜; 光学性能; 能流分布

中图分类号 TK513

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231552

1 引言

开发和利用可再生能源是实现“双碳目标”的重要举措之一^[1]。太阳能作为一种清洁的可再生能源,虽然到达地表的能量密度较低,但通过采用太阳能聚光系统可以实现高效利用^[2]。根据聚光方式,太阳能聚光系统主要包括槽式^[3-4]、线性菲涅耳式^[5]、塔式^[6]和碟式^[7]等。由于线性菲涅耳太阳能聚光系统具有结构简单、风阻小、成本低和土地利用率高等优点,得到了越来越多的关注^[8-9]。

反射镜作为线性菲涅耳聚光系统的聚光组件,面型主要包括平面、抛物面和柱面等^[10]。众所周知,平面反射镜的聚光能力有限,反射光斑宽度不小于自身宽度。采用微弯的柱面或抛物面反射镜可以提高聚光能力,但微弯反射镜曲率对接收器上的光通量分布和系统光学效率的影响较大。Benyakhlef等^[11]为了达到微弯反射镜曲率和接收器高度之间的平衡,研究了不同偏离系数(最高点到两端点连线的距离)和接收器高度对系统性能的影响,发现采用偏离系数在1~2 mm之间变化的曲面镜可以实现较高的聚光比。

由于柱面反射镜制造成本更低且可获得与抛物反射面非常相近的聚光效果^[12],受到了越来越多的关注。目前,有许多研究涉及线性菲涅耳聚光系统柱面反射

镜曲率半径的优化设计。Qiu等^[13]采用蒙特卡罗光线追迹法自编程建立了线性菲涅耳聚光系统三维光学模型,对柱面反射镜曲率半径进行了优化。Cheng等^[14]建立了一种基于群体的粒子群优化算法和蒙特卡罗射线追踪法的线性菲涅耳聚光系统的光学优化模型,对包括柱面反射镜在内的不同面型和几何参数的反射镜进行了优化、分析和比较。上述研究对线性菲涅耳聚光系统柱面反射镜的优化多限定于曲率半径一致,虽然生产简单且成本低,但每列反射镜(半镜场)曲率单独优化可以有效提高系统光学性能。Boito和Grena^[15]针对线性菲涅耳聚光系统反射镜焦距的优化问题,引入了一个通用函数,只需反射镜相对于接收器的位置和系统所在纬度即可求得最佳焦距。然而,线性菲涅耳聚光系统柱面反射镜反射光线的最大横向偏移与其有效工作的日出和日落时太阳横向入射角(有效工作太阳横向入射角)相关,该入射角与满足聚光系统产生高效热能的需求有关^[16]。

本文旨在研究线性菲涅耳聚光系统柱面反射镜的优化设计问题。提出了一种柱面反射镜曲率半径的优化计算方法,建立了通用计算模型,只需要考虑其与镜场中心的距离和系统有效工作时太阳横向入射角即可得到最佳值。采用光线跟踪方法建立的分析模型和基于SolTrace的光学模型,研究了柱面反射镜反射光线

收稿日期: 2023-09-14; 修回日期: 2023-10-05; 录用日期: 2023-10-10; 网络首发日期: 2023-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(52066010)、甘肃省自然科学基金(22JR5RA351)

通信作者: *majun@mail.lzjtu.cn; **clwang@mail.lzjtu.cn

横向偏移的变化规律、系统瞬时光学效率和能流均匀性等。本文研究对于进一步精细化设计线性菲涅耳聚光系统具有重要的参考价值。

2 模型与方法

2.1 物理模型

本文所研究的线性菲涅耳聚光系统主要由柱面反射镜场、接收器和跟踪装置等组成,其结构如图 1 所示。其中反射镜场关于镜场中心线对称,位于对称位置的反射镜具有相同的曲率半径。在系统运行时,跟踪装置驱

使每列反射镜单独跟随太阳绕其固定轴转动,从而将太阳光反射至镜场中心线上方的固定接收器,反射镜只有在参考位置时才能完全聚焦。参考位置主要包括两种情况^[17-18]:一是太阳位置参考,即当太阳处于典型位置时(南北方向镜场为正午时刻),所有反射镜都能完全聚焦至接收器中心;二是特定位置参考,即当太阳、接收器中心点和反射镜中心点在同一平面上时,所有反射镜都能完全聚焦至接收器中心。前者使得辐射能量在中午时集中到接收器中心,而早上和下午时辐射能量较为分散;后者则使得辐射能量在全天较为均匀地被接收。

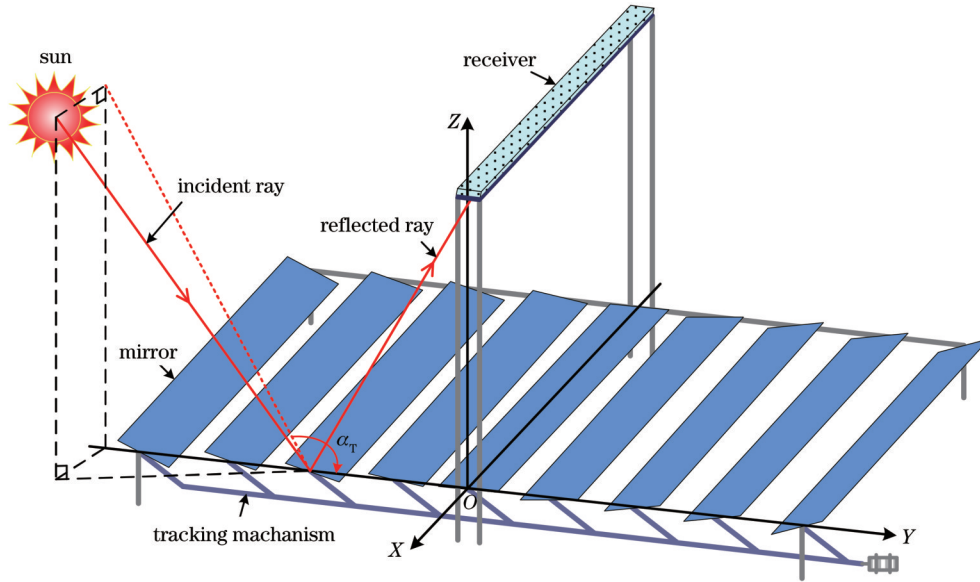


图 1 线性菲涅耳聚光系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of linear Fresnel reflector

利用二维投影法将所有入射和反射光线投影到线性菲涅耳聚光系统的横向截面(图 1 中 YOZ 平面)上。将入射光线在 YOZ 平面上的投影与 Y 之间的夹角称为太阳横向入射角(α_T)。由于线性菲涅耳聚光系统具有比例不变性,即所有与长度相关的结构参数同时增大相同倍数,则系统效率不会改变。因此,为了便于分

析,本文定义无量纲变量,即所有与长度相关的系统结构参数为其与接收器高度的比值。

针对特定的参考位置,在不同入射角下,对具有不同中心距 Q (反射镜中心与镜场中心的距离)的柱面反射镜进行边缘(两 endpoints)光线追迹,如图 2 所示。可见,当柱面反射镜偏离参考位置时,经过两 endpoints 的反射光

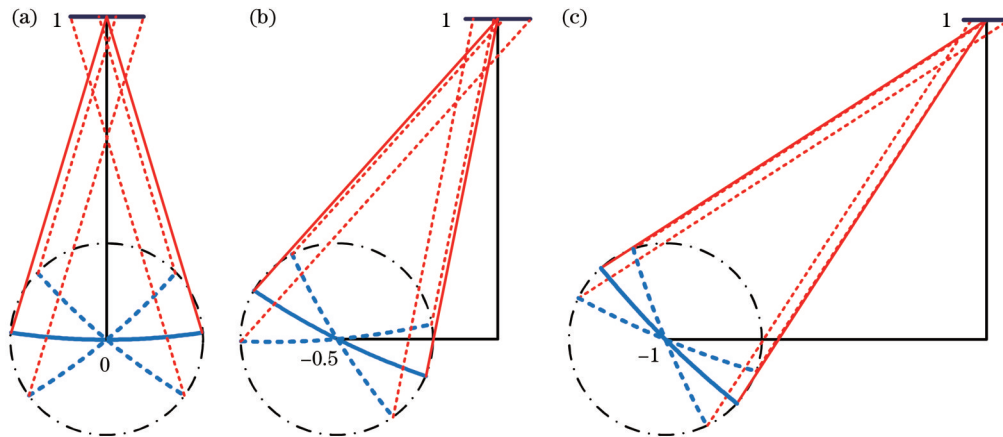


图 2 不同中心距 Q 时柱面反射镜边缘光线追迹图。(a) $Q=0$; (b) $Q=0.5$; (c) $Q=1$

Fig. 2 Ray tracing diagram of cylindrical mirror edge at different Q . (a) $Q=0$; (b) $Q=0.5$; (c) $Q=1$

线总是向靠近其中心的方向偏移。当反射光线到达接收面时,总会偏离接收器中心并产生横向偏移。因此,将接收器朝着反射镜方向移动一定距离可减小反射光线横向偏移,从而提高聚焦效果。

2.2 计算方法

柱面反射镜曲率半径为 R ,弧长为 W ,弦长为 D ,弦高为 H_{ch} ,中心距为 Q ,其中心点反射光线与水平面的夹角为 γ ,在其参考位置时端点入射光线与反射光线夹角为 β ,接收器距离反射镜所在平面的高度为 H ,如图 3 所示。

当柱面反射镜处于参考位置时,忽略阴影与遮挡影响,经两端点反射的光线交点与其中心轴的距离为 f ,则

$$f = R \left[1 - \frac{1}{2 \cos(\beta/2)} \right], \quad (1)$$

式中, $\beta = W/R$ 。当柱面反射镜偏离参考位置 α 后,经过其两端点的反射光线与反射镜中心反射光线的较低

交点所处高度(与反射镜中心点所在平面的距离)为

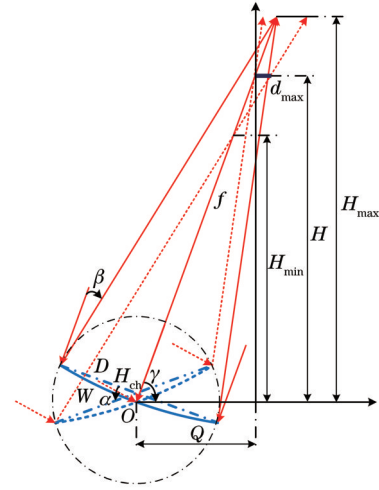


图 3 处于参考位置和偏离参考位置的反射镜边缘光线追迹
Fig. 3 Ray tracing of a mirror edge at reference position and deviation from reference position

$$H_{\min} = \sin \gamma \left\{ f - \cot \beta \left[\frac{D}{2} (1 - \cos \alpha + \sin \alpha \tan \beta) - H_{\text{ch}} \tan \frac{\alpha}{2} (1 + \cos \alpha - \sin \alpha \tan \beta) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: $\gamma = \arctan(H/Q)$; $D = 2R \sin(\beta/2)$; $H_{\text{ch}} = R - \sqrt{R^2 - (D/2)^2}$; α 可由系统有效工作时太阳横向入射角 α_s 计算得到。

由几何关系可知:

$$H_{\max} = f \sin \gamma. \quad (3)$$

为了减小反射光斑宽度,取

$$H = \frac{H_{\max} + H_{\min}}{2}. \quad (4)$$

联立式(1)~(4)可以求得柱面反射镜的曲率半径 R 。柱面反射镜在接收器高度为 H 处的反射光线最大横向偏移 d_{\max} 为

$$d_{\max} = \frac{\frac{D}{2} [\cos \beta + \cos(\alpha + \beta)] - H_{\text{ch}} \tan \frac{\alpha}{2} [\cos \beta + \cos(\alpha + \beta)]}{2 \sin(\gamma - \beta)}. \quad (5)$$

2.3 分析方法

在上述计算方法的基础上,在 Matlab 软件中编写了数值计算程序,用于求解柱面反射镜的最佳曲率半径。实际应用中,反射镜的型面误差和跟踪误差会导致反射光斑在焦平面上扩散,其大小取决于反射镜的宽度和位置。本文的主要目标是提供一个尽可能普遍和简单的线性菲涅耳聚光系统柱面反射镜曲率半径的优化设计方法。在通用计算模型的分析中,忽略反射镜型面误差和跟踪误差,但在系统光学性能分析时(第 3.3 节)考虑其影响。

对于宽度和曲率半径相对值分别为 0.083 和 3.3525 的柱面反射镜,当弦高增加/减小 1 mm 时,其曲率半径约减小 28%/增大 64%。因此,将反射镜曲率半径误差(σ_{rc})处理为高斯误差,其标准偏差为 R 的一定百分比。定义线性菲涅耳聚光系统的瞬时光学效

率(η)为吸热管表面选择性吸收涂层所吸收的实时光功率与聚光镜场最大可接收的实时入射光功率之比;定义能流均匀系数(δ)为能流的标准偏差与其平均值之比。

采用光线跟踪方法,在 Matlab 软件中建立了线性菲涅耳聚光系统二维截面内的光学分析模型,以充分展示优化后柱面反射镜的基本光学性能。基于 SolTrace 光学模型,考虑柱面反射镜型面误差(σ_{rc})和跟踪误差(σ_{tr}),对线性菲涅耳聚光系统瞬时光学效率和能流均匀性等进行详细分析。

3 结果与讨论

3.1 通用计算模型

系统有效工作的太阳横向入射角 α_s 与地理位置、气候条件等相关,在设计过程中需要进行选择。假设

α_s 为 30° , 不同 W 柱面反射镜曲率半径 R 随 Q 的变化情况如图 4 所示。可见优化后的不同 W 柱面反射镜的 R 非常接近, 以致所有曲线几乎重合。

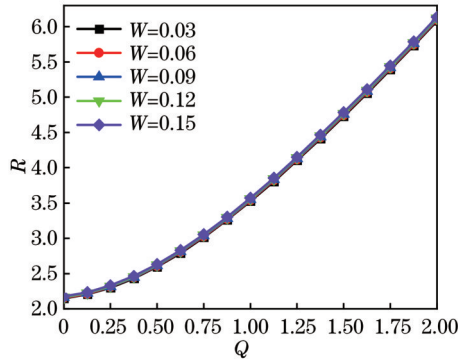


图 4 不同 W 柱面反射镜的 R 随 Q 的变化

Fig. 4 Variation of R with Q for different W -cylindrical mirrors

取 α_s 为 20° 到 40° 每间隔 1° , 计算不同 Q 下 W 为 0.09 的 R 值, 采用多项式曲面拟合的方法对数据进行处理。通过大量的计算和分析, Q 次数为 3、 α_s 次数为 1 时, 多项式曲面拟合的效果较好 (图 5)。最终的拟合结果为

$$R = 2.308 + 0.5724Q - 0.005041\alpha_s + 1.362Q^2 - 0.007283Q\alpha_s - 0.2276Q^3 - 0.003209Q^2\alpha_s. \quad (6)$$

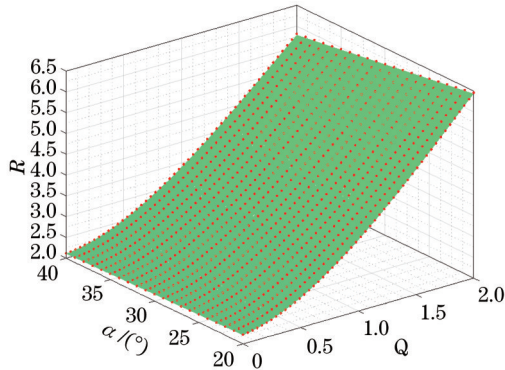


图 5 多项式曲面拟合模型

Fig. 5 Polynomial surface fitting model

为了验证模型的准确性, 将利用式 (6) 所得的结果 (M) 与第 2.2 节中数值计算方法得到的结果 (N) 进行比较, 如图 6 所示。其中, M 的计算仅涉及 Q 和 α_s , 而 N 的计算需要考虑到 Q 、 α_s 和 W 。由图 6 可见, 通用计算模型所得结果与数值计算结果非常接近, 最大偏差为 1.26%, 平均偏差为 0.38%。这表明在线性菲涅耳聚光系统中, 柱面反射镜曲率半径与其宽度几乎不相关, 只需要考虑其与镜场中心的距离和系统有效工作的太阳横向入射角即可求得最佳值。

3.2 基本光学性能

在忽略反射镜面误差和跟踪误差的影响时, 反射光线最大横向偏移 d_{\max} 随 Q 的变化如图 7 所示, 其中 $\alpha_T = 30^\circ$ 。可见, 随着 Q 的增大, d_{\max} 基本呈线性增大的

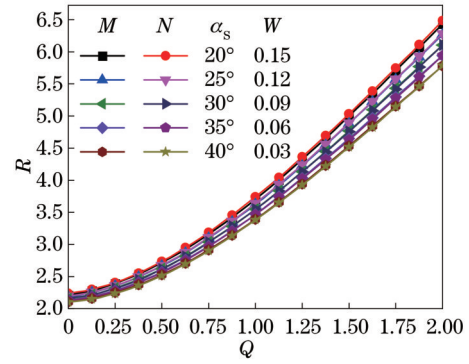


图 6 模型计算结果与数值计算结果的比较

Fig. 6 Comparison of results between model calculation and numerical calculation

趋势; 在相同的 Q 下, d_{\max} 随着 W 的增大而增大。因此, 在需要布置较大宽度的镜场时, 柱面反射镜的宽度不宜过大。

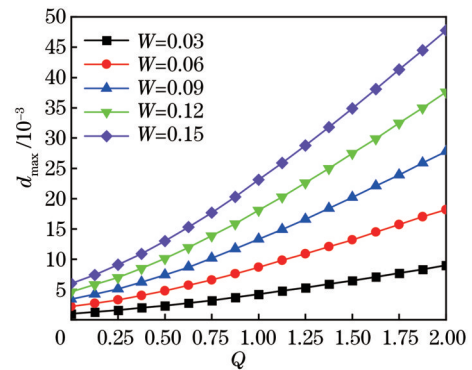


图 7 不同 W 柱面反射镜的 d_{\max} 随 Q 的变化

Fig. 7 Variation of d_{\max} with Q for different W -cylindrical mirrors

不同 W 柱面反射镜在不同 Q 下, 反射光线横向偏移 d 随横向入射角 (α_T) 的变化如图 8 所示。当柱面反射镜位于镜场中心 ($Q=0$) 时, d 随着 α_T 的变化呈现出关于 $\alpha_T=90^\circ$ 对称的特点, 其中任何一侧都随 α_T 的增大而先减小后增大。当柱面反射镜偏离镜场中心 ($Q \neq 0$) 时, 随着 α_T 的增大, d 总是先减小后增大, 最小值出现时的 α_T 与 Q 相关。总体而言, d 随着 Q 和 W 的增大而增大; 当 Q 和 W 较小时, d 的变化范围较小。因此, 在反射镜远离镜场中心时, 其宽度不应过大。

3.3 系统光学性能

以文献 [19] 优化的线性菲涅耳聚光系统为例, 接收器高度和反射镜宽度相对值分别为 1 和 0.083, 反射镜与镜场中心的距离和本文优化计算的曲率半径相对值如表 1 所示。接收器和反射镜长度都选择为相对值 0.4。

η 和 δ 随 α_T 的变化关系如图 9 所示, 其中, 法向直接辐射 (DNI) 为 1000 W/m^2 。可见, 随着 α_T 的增大, η 持续增大, 而 δ 呈现先减小后在较小范围波动的趋势。

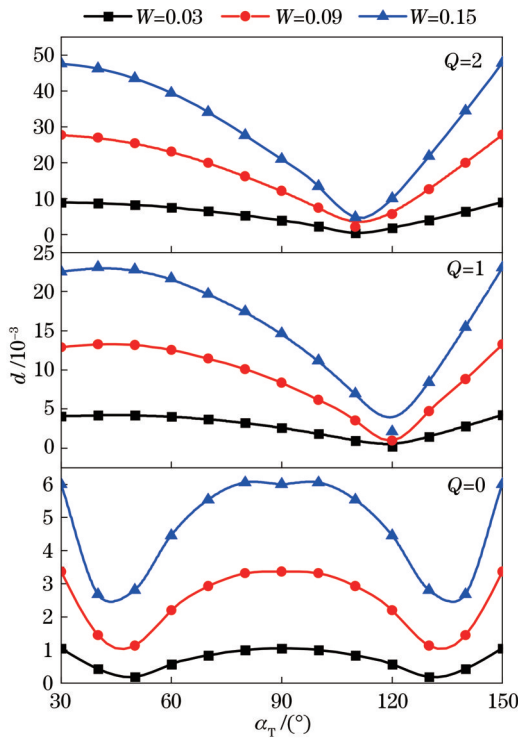


图 8 不同 W 柱面反射镜在不同 Q 下的 d 随 α_T 的变化
Fig. 8 Variation of d with α_T at different Q for different W -cylindrical mirrors

当 α_T 较小时 (小于 45°), η 较小而 δ 较大, 表面系统光学性能较差。当 α_T 大于 45° 时, η 保持在 59.46% 以上, 而

表 1 反射镜场主要参数

Table 1 Main parameters of mirror field

Mirror	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Q	0	0.1096	0.2213	0.3348	0.4496	0.5655	0.6821	0.7991	0.9164	1.0337	1.1511
R	2.1750	2.2247	2.3058	2.4187	2.5621	2.7342	2.9320	3.1521	3.3917	3.6476	3.9175

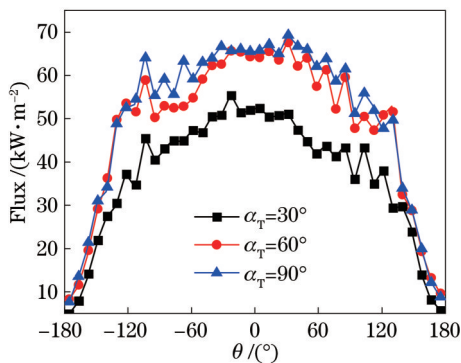


图 10 不同 α_T 下的吸热管表面能流分布
Fig. 10 Solar flux distributions at different α_T

总体而言, 通过优化柱面反射镜的曲率半径可以使线性菲涅耳聚光系统的聚焦能流更加集中且较为均匀, 因此在聚光光伏领域具有应用潜力。然而, 在线性菲涅耳聚光系统中, 聚焦光斑通常由多列反射镜的反射光斑会聚形成, 其能流分布并非完全均匀。因此, 在

δ 在 $44\sim 45$ 之间波动, 表明系统光学效率较高, 但吸热管表面的能流分布相对较不均匀。 α_T 分别为 30° 、 60° 和 90° 情况下吸热管上的太阳辐射能流分布如图 10 所示。可见, 随着 α_T 的增大, 吸热管上的太阳辐射能流密度增大, 但主要集中在吸热管的下半部分。该结论证明, 优化后的柱面反射镜减小了反射光线最大横向偏移, 有效提高了聚光能力。

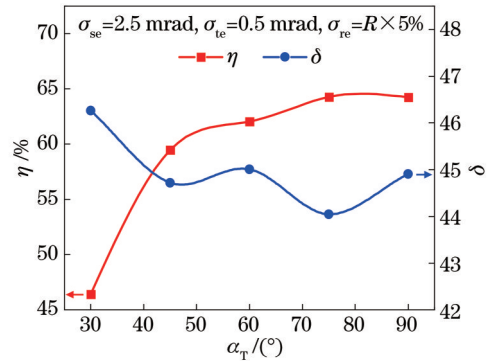


图 9 η 和 δ 随 α_T 的变化
Fig. 9 Variations of η and δ with α_T

图 11 给出了不同 α_T 下系统焦平面处的能流分布情况, 其中, x 表示焦平面的横向相对距离, y 表示焦平面的纵向相对距离。可见, 随着 α_T 的增大, 焦平面上的能流密度基本呈现增加的趋势。在相对距离为 $-0.05\sim 0.05$ 的范围内, 能流分布比较均匀, 适合布置光伏电池组件。

实际应用中, 可以根据需要参考文献 [20] 提出的瞄准策略优化方法, 在牺牲少量光学效率的情况下进一步提高吸热管的能流均匀性。

4 结 论

本文针对线性菲涅耳聚光系统, 提出了一种优化计算柱面反射镜曲率半径的方法, 建立了通用计算模型。采用光线跟踪方法建立的分析模型和基于 SolTrace 的光学模型, 分析了优化柱面反射镜的基本光学性能和线性菲涅耳聚光系统的聚光特性。主要研究结论如下:

1) 线性菲涅耳聚光系统中, 柱面反射镜最佳曲率半径与其宽度几乎不相关, 只需要考虑其与镜场中心的距离和系统有效工作的太阳横向入射角即可求得最佳值。柱面反射镜曲率半径通用计算模型所得的结果与数值精确计算结果非常接近, 最大偏差为 1.26%, 平均偏差为 0.38%;

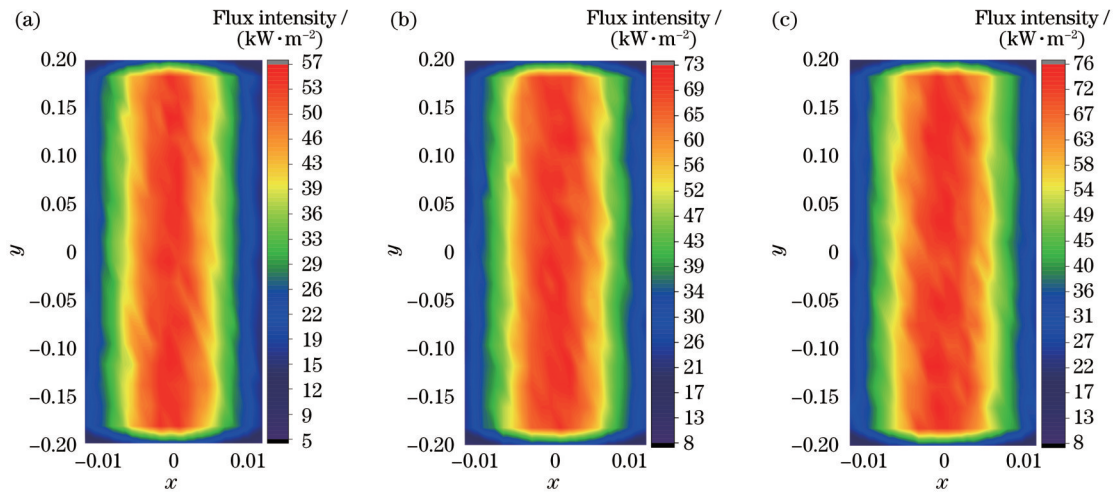


图 11 不同 α_T 下系统焦平面上的太阳能流分布。(a) $\alpha_T=30^\circ$; (b) $\alpha_T=60^\circ$; (c) $\alpha_T=90^\circ$

Fig. 11 Solar flux distributions on focal plane of system at different α_T . (a) $\alpha_T=30^\circ$; (b) $\alpha_T=60^\circ$; (c) $\alpha_T=90^\circ$

2) 在镜场中心, 柱面反射镜的反射光线横向偏移随着横向入射角的变化关于 90° 对称, 其中一侧呈现先减小后增大的趋势。当柱面反射镜偏离镜场中心时, 柱面反射镜反射光线横向偏移在横向入射角全范围内先减小后增大, 最小值与其中心距相关。柱面反射镜反射光线横向偏移随着其中中心距和宽度的增大而增大, 因此, 当反射镜远离镜场中心时, 其宽度不宜过大;

3) 考虑柱面反射镜型面误差、跟踪误差和曲率半径误差的影响, 随着横向入射角的增大, 系统瞬时光学效率逐渐增大, 能流分布均匀性在较小范围内波动。当横向入射角大于 45° 时, 系统瞬时光学效率保持在 59.46% 以上, 能流均匀系数在 44~45 之间变化。吸热管上的太阳辐射能流主要集中在吸热管的下半部分;

4) 优化后的柱面反射镜具有较高的聚焦能力, 在聚焦平面的较小范围(相对距离 $-0.05 \sim 0.05$) 内能流密度高且均匀性较好, 适合布置光伏电池组件。在实际应用中, 可以根据需要参考文献[20]提出的瞄准策略优化方法, 在牺牲少量光学效率的情况下进一步提高吸热管的能流均匀性。

参 考 文 献

[1] 王志峰, 何雅玲, 康重庆, 等. 明确太阳能热发电战略定位促进技术发展[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 1-4.
Wang Z F, He Y L, Kang C Q, et al. Defining the strategic orientation of solar thermal power generation and promoting technological development[J]. Integrated Intelligent Energy, 2021, 43(11): 1-4.

[2] 常泽辉, 刘雪东, 刘静, 等. 吸收体形状对太阳能复合多曲面聚光器光热性能的影响[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0508001.
Chang Z H, Liu X D, Liu J, et al. Influence of absorber shape on photothermal performance of solar compound multi-surface concentrator[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0508001.

[3] Gong J H, Wang J Z, Hu X L, et al. Optical, thermal and thermo-mechanical model for a larger-aperture parabolic trough concentrator system consisting of a novel flat secondary reflector and an improved absorber tube[J]. Solar Energy, 2022, 240:

376-387.

[4] 颜健, 田勇, 刘永祥, 等. 基于相同参数抛物镜面旋转阵列的太阳能槽式聚光器聚焦特性研究[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0522002.
Yan J, Tian Y, Liu Y X, et al. Focusing characteristics of solar trough concentrator based on parabolic mirror rotating array with same parameters[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0522002.

[5] Men J J, Zhao X R, Cheng Z D, et al. Study on the annual optical comprehensive performance of linear Fresnel reflector concentrators with an effective multi-objective optimization model[J]. Solar Energy, 2021, 225: 591-607.

[6] Wang W Q, Qiu Y, Li M J, et al. Coupled optical and thermal performance of a fin-like molten salt receiver for the next-generation solar power tower[J]. Applied Energy, 2020, 272: 115079.

[7] 颜健, 刘永祥, 胡耀松, 等. 相同尺寸抛物/球面镜单元旋转阵列的碟式太阳能聚光器聚焦特性研究[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1522002.
Yan J, Liu Y X, Hu Y S, et al. Study on focusing characteristics of dish solar concentrator with rotating array of parabolic/spherical mirror units of the same size[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1522002.

[8] Ordóñez F, Valverde D, Arias R, et al. Numerical study of a nanofluid-based receiver for linear Fresnel collectors[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120746.

[9] 马军, 王成龙, 夏养君. 线性菲涅耳式太阳能聚光系统二次聚光器研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(8): 997-1008.
Ma J, Wang C L, Xia Y J. Research progress on secondary concentrator for linear Fresnel reflector[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2020, 50(8): 997-1008.

[10] Pulido-Iparraguirre D, Valenzuela L, Fernández-Reche J, et al. Design, manufacturing and characterization of linear Fresnel reflector's facets[J]. Energies, 2019, 12(14): 2795.

[11] Benyakhlef S, Al Mers A, Merroun O, et al. Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators[J]. Renewable Energy, 2016, 89: 463-474.

[12] Qiu Y, He Y L, Wu M, et al. A comprehensive model for optical and thermal characterization of a linear Fresnel solar reflector with a trapezoidal cavity receiver[J]. Renewable Energy, 2016, 97: 129-144.

[13] 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.

[14] Cheng Z D, Zhao X R, He Y L, et al. A novel optical

- optimization model for linear Fresnel reflector concentrators[J]. *Renewable Energy*, 2018, 129: 486-499.
- [15] Boito P, Grena R. Optimal focal length of primary mirrors in Fresnel linear collectors[J]. *Solar Energy*, 2017, 155: 1313-1318.
- [16] Abbas R, Martínez-Val J M. Analytic optical design of linear Fresnel collectors with variable widths and shifts of mirrors[J]. *Renewable Energy*, 2015, 75: 81-92.
- [17] 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.
- [18] Abbas R, Martínez-Val J M. A comprehensive optical characterization of linear Fresnel collectors by means of an analytic study[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 1136-1151.
- [19] Ma J, Wang C L, Zhou Y, et al. Optimized design of a linear Fresnel collector with a compound parabolic secondary reflector [J]. *Renewable Energy*, 2021, 171: 141-148.
- [20] Qiu Y, Li M J, Wang K, et al. Aiming strategy optimization for uniform flux distribution in the receiver of a linear Fresnel solar reflector using a multi-objective genetic algorithm[J]. *Applied Energy*, 2017, 205: 1394-1407.

Optimization and Concentration Characteristics of Cylindrical Mirrors in Linear Fresnel Reflectors

Ma Jun^{1,2,3*}, Liu Chao¹, Liu Fang¹, Pang Rushuai¹, Wang Rongji¹, Wang Chenglong^{1,2,3**}

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

²Collaborative Innovation Center for Technology and Equipment of Concentrated Solar Power Co-Constructed by Ministry and Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

³Solar Thermal Industry Research Institute of Gansu Province, Lanzhou 7300700, Gansu, China

Abstract

Objective Linear Fresnel reflectors (LFRs) have gained increasing attention due to their advantages of simplified construction, reduced wind loads, cost-effectiveness, and optimal land area utilization. Mirrors are the focusing components of LFRs, including flat, parabolic, and cylindrical shapes. Flat mirrors have limited focusing ability, with a reflected light spot width not smaller than its width. The use of slightly curved cylindrical or parabolic mirrors can improve the focusing ability. Existing research on the optimization of cylindrical mirrors in LFRs is mostly limited to unaltered curvature radii. Although the production is simple and cost-effective, the individual optimization of the curvature of each mirror (half mirror field) can improve the optical performance of the system more effectively. We aim to investigate the optimization design problem of cylindrical mirrors in LFRs and propose an optimized calculation method for the curvature radius of cylindrical mirrors. A general calculation model is established, which only requires considering its distance from the center of the field and the transversal incidence angle of the sun during effective sunrise to obtain the optimal value.

Methods Firstly, based on the characteristic that the reflected rays passing through the two endpoints of the cylindrical mirror of LFRs always deviate towards the direction closer to the center when the mirror deviates from the reference position, an optimized calculation method for the curvature radius of cylindrical mirrors is proposed, and the calculation formula is derived. Secondly, using the method of polynomial surface fitting, the curvature radii calculated for cylindrical mirrors at different widths, distances from the center of the field, and the transversal incidence angles of the sun during effective sunrise are processed to obtain a general calculation model. The accuracy of the model is validated using numerically precise calculation results. Finally, the optical performance of the optimized cylindrical mirrors is analyzed using a ray tracing-based optical model. The focusing characteristics of the system are analyzed using an optical model based on SolTrace, with an LFR optimized in existing literature as an example.

Results and Discussions It is assumed that a transversal incidence angle of the sun during effective sunrise is 30° , and the curvature radii for cylindrical mirrors with different widths are nearly identical at the same distance from the center of the field (Fig. 4). By taking the transversal incidence angle of the sun during effective sunrise from 20° to 40° with an interval of 1° , the curvature radii for cylindrical mirrors with a relative width of 0.09 are calculated at different distances from the center of the field. A good fit is achieved with a polynomial surface fitting order of 3 for the distances from the center and an order of 1 for the transversal incidence angle of the sun during effective sunrise (Fig. 5). After ignoring the influence of mirror slope error and tracking error, it can be observed that as the distance from the center increases, the lateral offset of reflected rays from the cylindrical mirror exhibits a linear increasing trend. Under the same distance from the center, the maximum lateral drift of reflected rays from the cylindrical mirror increases with wider mirror widths (Fig. 7). At the

center of the field, the lateral offset of reflected rays from the cylindrical mirror in response to the transversal incidence angle demonstrates a symmetrical relationship around 90° . Overall, a decreasing trend is followed by an increasing trend. When the cylindrical mirror deviates from the center of the field, the lateral offset of reflected rays from the cylindrical mirror first decreases and then increases across the entire range of transversal incidence angles, with the minimum value determined by the distance from the center (Fig. 8). With an increase in the transversal incidence angle of the sun during effective sunrise, the optical efficiency of the system and the concentrated solar flux on the absorber surface continue to rise, while the uniformity shows a decreasing trend followed by slight fluctuations within a narrower range. The concentrated solar flux primarily concentrates on the lower half of the absorber tube (Figs. 9 and 10).

Conclusions The optimal curvature radius of the cylindrical mirrors has little correlation with its width but rather depends on the distance from the mirrors to the center of the field and the transversal incidence angle of the sun during effective sunrise. The results obtained from the general calculation model closely match the numerically precise calculations, with a maximum deviation of 1.26% and an average deviation of 0.38%. By considering the slope error, tracking error, and curvature radius error of the cylindrical mirrors, the real-time optical efficiency remains above 59.46% when the transversal incidence angle exceeds 45° . Within a small range on the aperture (relative distance $-0.05-0.05$), the concentrated solar flux density is high and exhibits good uniformity, making it suitable for concentrating photovoltaic systems.

Key words optical design; linear Fresnel; cylindrical mirror; optical performance; flux distribution