线性菲涅尔式太阳能聚光系统二次聚光器研究进展

马军^{1,2,3}, 王成龙^{1,2*}, 夏养君³

1. 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, 兰州 730070;

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, 兰州 730070;

3. 兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 兰州 730070

* E-mail: clwang@mail.lzjtu.cn

收稿日期: 2020-05-08; 接受日期: 2020-06-22; 网络版发表日期: 2020-07-14

甘肃省高等学校科研项目(编号: 2018A-029)、兰州交通大学优秀科研团队资助项目(编号: 201703)和兰州交通大学青年科学基金项目(编号: 2016007)资助

摘要 二次聚光器配合固定安装的高温真空集热管(由吸热管和玻璃管组成)可以解决旋转接头高温动密封的技术难题, 运行更高温的传热介质, 使线性菲涅尔式太阳能聚光系统在保证发电效率和降低成本方面更具潜力. 本文综述了传统复合抛物面二次聚光器(CPC)和新型二次聚光器的研究进展, 重点论述了CPC间隙确定方法和接收半角的选择对其光学性能的影响, 分析了新型二次聚光器的优缺点, 探讨了二次聚光器的实际应用问题, 展望了二次聚光器未来的研究重点. 分析结果表明: 对于CPC间隙确定方法, 渐开线起始点前移的间隙损失较小且易于后期加工; 接收半角的选择应综合考虑CPC光学性能和开口宽度. 基于自适应方法的新型二次聚光器光学效率与CPC相当; 当要求吸热管表面达到更高的能流密度或吸热管周向能流分布更均匀时, CPC为最佳选择.

关键词 太阳能, 线性菲涅尔式, 二次聚光器, 复合抛物面聚光器

1 引言

太阳能作为最丰富的可再生能源, 受到了世界各国科学家的广泛关注^[1,2]. 但能流密度较低, 采用聚光系统是得到较高集热温度的必要手段. 根据聚光形式, 太阳能聚光系统主要包括槽式、线性菲涅尔式、塔式和碟式等^[3-8]. 由于线性菲涅尔式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^[9-12], 得到了越来越多的关注.

线性菲涅尔式太阳能聚光系统主要由主反射镜阵列、跟踪控制装置和接收器三部分构成. 接收器是光热转换部件, 其性能影响整个系统的光热转换效率. 接收器可分为多管接收器和二次反射接收器两大类^[13]. 多管接收器由一个腔体和一组平行的裸管组成, 经主反射镜阵列的反射光全部汇聚至裸管; 腔体在一定程度上减少了热损失, 但裸管的使用使得其只适用于中低温领域(180~300°C). 二次反射接收器一般仅有单根集热管(文献^[14]探讨了使用双集热管的可能性),

引用格式: 马军, 王成龙, 夏养君. 线性菲涅尔式太阳能聚光系统二次聚光器研究进展. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 997-1008

Ma J, Wang C L, Xia Y J. Research progress on secondary concentrator for linear Fresnel reflector (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 997-1008, doi: 10.1360/SST-2020-0190

因此一般需要采用二次聚光器以提高其光学性能^[15]。

二次聚光器使得单根集热管替代平行裸管阵列, 降低了制造成本^[16]。二次聚光器配合高温真空集热管时可以运行高温传热介质(如熔融盐, 运行温度 $>550^{\circ}\text{C}$), 使得系统可以在更高的温度下运行, 而高温可以提高热电转换效率, 从而降低发电成本。因此, 研究用于线性菲涅尔式太阳能聚光系统的二次聚光器尤为必要。

本文旨在通过总结分析国内外学者对线性菲涅尔式太阳能聚光系统二次聚光器的研究进展, 探讨传统复合抛物面二次聚光器(CPC)的间隙确定方法和接收半角选择等问题, 总结新型二次聚光器的优缺点, 展望二次聚光器未来的发展。以期对线性菲涅尔式太阳能聚光系统应用于大规模光热电站有指导作用。

2 线性菲涅尔式太阳能聚光系统及其二次聚光器工作原理

2.1 线性菲涅尔式太阳能聚光系统工作原理

线性菲涅尔式聚光镜场南北向或东西向对称布置。由平面或微弯的条状反射镜组成的主反射阵列在跟踪控制装置驱使下自动跟踪太阳, 将太阳光汇聚至接收器。采用CPC的线性菲涅尔式太阳能聚光系统典型示意图如图1所示。

2.2 二次聚光器工作原理

经线性菲涅尔式太阳能聚光系统主反射镜阵列的部分反射光直接投射到吸热管上, 剩余部分则经二次聚光器反射后投射到吸热管上。管内传热介质(水、

图1 (网络版彩图)线性菲涅尔式太阳能聚光系统典型示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of linear Fresnel reflector.

油、熔融盐等)被加热后流经换热器将水加热到发电所需蒸汽热能参数。二次聚光器CPC光线跟踪示意图如图2所示^[17]。

假设真空集热管吸热管(内)外径为 r_1 , 玻璃管(外)外径与间隙之和为 r_2 , 接收半角为 θ_A 。则CPC截面曲线在平面直角坐标系 xOy 中的表达式为^[18]

$$\begin{cases} x = r_1 \sin \theta - \rho \cos \theta, \\ y = -r_1 \cos \theta - \rho \sin \theta, \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 为角度变量参数;

$$\rho = r_1(\theta + \beta), \quad \arccos\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \theta_A;$$

$$\rho = \frac{r_1\left[\frac{\pi}{2} + \theta + \theta_A + 2\beta - \cos(\theta - \theta_A)\right]}{1 + \sin(\theta - \theta_A)},$$

$$\frac{\pi}{2} + \theta_A \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_A;$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1} - \arccos\left(\frac{r_1}{r_2}\right).$$

3 二次聚光器研究状况

二次聚光器的研究主要集中在反射镜光学型面的优化设计方面, 以提高其光学性能, 进而提高整个线性菲涅尔式太阳能聚光系统的光热效率。二次聚光器型面的优化设计是一个非常复杂的过程, 也可能取决于主反射镜阵列以及接收器所处高度等参数。在过去的几年里, 二次聚光器型面的优化研究从未停止。因此, 在传统二次聚光器CPC的基础上, 许多学者又提出了一些新型二次聚光器, 主要包括双抛物线翼、马蹄

图2 (网络版彩图)CPC光线跟踪示意图

Figure 2 (Color online) Ray path schematic diagram of CPC.

形、复合椭圆面、基于自适应方法、分段抛物面和梯形等聚光器。

3.1 二次聚光器CPC研究进展

1974年, Winston^[19]发明了CPC, 由两片抛物线型反射面构成, 可以将其接收角范围内的光线汇聚到吸收器。随后, Ortobasi^[20]和Rabl^[21]先后推导了与圆管吸收器(即集热管)结合的CPC(下文所述CPC都是圆管型)公式。这为CPC作为线性菲涅尔式太阳能聚光系统二次聚光器奠定了基础。如今, CPC已是研究和应用最广泛的二次聚光器。

目前, 对CPC的研究主要集中在间隙效率方面。但对于线性菲涅尔式太阳能聚光系统的CPC, 更大的接收半角可以使得反射镜场布置更宽, 因此接收半角的选择也不容忽视。

3.1.1 CPC间隙效率

为了避免热传导, 吸热管与CPC之间需要留有一定缝隙, 若采用真空集热管, 其玻璃管与吸热管之间存在空隙, 因此CPC与吸热管之间的间隙不可避免。由此会产生间隙损失, 影响其光学性能。因此需要优化选择间隙确定方法使得间隙损失更小。

Rabl等人^[22]提出了三种间隙确定方法: 减小接收管尺寸、水平截断尖部和改变金属内管形状, 分别如图3(a)~(c)所示。Winston^[23]提出了渐开线的起始点从所需间隙位置处开始(图3(d))。以上方法均以牺牲CPC

效率为代价。

Mcintire^[24]提出了将渐开线的起始点后移, 然后用V形或W形面填补以消除间隙损失的方法, 并给出了切面数量和最大间隙之间的关系(图3(e))。该方式间隙损失为0, 但显著降低了几何聚光比。

Oommen和Jayaraman^[25]提出了将渐开线的起始点前移后用V形替代尖角的方法, 并设计了吸热管外径为30 mm、接收半角为23.5°的CPC, 但未给出设计V形的具体方法。余雷等人^[26]基于此思想给出了新V形间隙确定方法并设计出模型(图3(f)), 并利用光学软件Tracepro对其与方法1、方法2、渐开线起始点前移法及吸热管沿CPC对称轴线移开方法进行了对比分析, 重点关注了相对聚光比和间隙效率。从结论中可知, 当空隙与吸热管外径之比大于0.6时, 采用渐开线起始点前移法确定间隙可以增大相对聚光比。

Feuermann和Gordon^[27]通过对比分析发现, 渐开线起始点前移法确定的间隙损失比方法2略小; 方法5无间隙损失, 但是聚光比损失大, 且不易加工制造。吴茂刚等人^[28]详细研究了几种间隙确定方法的间隙损失, 得到同样结论: 渐开线起始点前移法的间隙损失小于方法2。

综上所述, 渐开线起始点前移法的间隙损失相对较小且容易加工。因此受到了广泛关注^[9,29-32]。

本课题组在Matlab软件下建立了CPC数学模型^[33,34], 采用渐开线起始点前移法确定间隙, 利用射线追迹法分析了不同间隙对CPC几何光学效率(到达吸

图3 间隙确定方法。(a) 方法1: 减小吸热管尺寸; (b) 方法2: 截断CPC尖部; (c) 方法3: 改变吸热管形状; (d) 方法4: 改变渐开线起点位置; (e) 方法5: 渐开线起始点后移后用V形或W形填补; (f) 方法6: 渐开线起始点前移后用V形或W形替代尖角。

Figure 3 Approaches of leaving a gap between reflector and absorber. (a) Method 1: reduce size of absorber; (b) method 2: truncate edge of CPC near absorber; (c) method 3: modify absorber to form a radiation cavity; (d) method 4: start reflector at the point of closest permissible distance to absorber; (e) method 5: move back the starting point of involute and fill it with a V or W shape; (f) method 6: move forward the starting point of involute and replace the tip with a V or W shape.

热管表面的光线数与进入开口的光线数之比)的影响. 图4给出了吸热管外径为70 mm, 间隙分别为0~50 mm, 间隔10 mm, 接收半角为50°的CPC每个入射角度所对应的几何光学效率. 可见, CPC接收半角确定, 当入射角小于40°时每个入射角所对应的CPC几何光学效率随着间隙的增大而减小. 当入射角为0°(即光线垂直CPC开口方向)时CPC几何光学效率最低, 意味着间隙损失最大.

3.1.2 CPC接收半角

CPC接收半角 θ_A 决定了其聚光比 $C^{[19,22]}$, 即

$$C = \frac{1}{\sin \theta_A}. \quad (2)$$

CPC接收半角对其几何光学效率的影响未见相关研究报道. 本课题组深入研究了CPC接收半角对其性能的影响^[35]. 图5给出了吸热管外径为70 mm的CPC, 当间隙确定时, CPC平均几何光学效率与接收半角之间的关系. 可见CPC平均几何光学效率随着接收半角的增大而缓慢增大. 线性菲涅尔式太阳能聚光系统用CPC的接收半角越大, 在CPC高度一定的条件下, 镜场可以布置得更宽, 可以有效提高系统的聚光面积, 从而提高系统聚光比. 由此可见, 选择较大的接收半角不仅可以提高其平均几何光学效率, 还可以降低系统高宽比.

图6给出了CPC开口宽度与接收半角之间的关系. 可见CPC开口宽度随着接收半角增大呈指数减小趋势. 若CPC开口宽度太小, 会使得主反射镜宽度过窄, 在相同有效聚光面积的情况下增加了主反射镜的列数.

3.2 新型二次聚光器研究进展

Grena和Tarquini^[36]为了寻求吸热管表面更均匀的能流分布, 提出了一种双抛物面二次聚光器, 其截面如图7所示. 线性菲涅尔式聚光系统任意一侧的主反射镜只指向二次聚光器在该侧的抛物线.

每条抛物线都是焦点在吸热管圆心、对称轴倾向于反射光来源侧, 抛物线的焦点位于吸热管圆心(0, 0), 抛物线的顶点(x_v , y_v)由焦距 f 和旋转角度 i 来确定. 如图8所示, 主反射镜场半宽为 w , 接收器所处高度为 h , 吸热管外径为 r . 则单侧抛物线的表达式为

图4 (网络版彩图)不同间隙下CPC几何光学效率与入射角的关系

Figure 4 (Color online) Relation between geometrical optics efficiency of CPC and incidence angle under different gaps.

图5 CPC平均几何光学效率与接收半角的关系

Figure 5 Relation between mean geometrical optics efficiency of CPC and half-acceptance angle.

图6 CPC开口宽度与接收半角的关系

Figure 6 Relation between aperture width of CPC and half-acceptance angle.

图 7 (网络版彩图)双抛物线二次聚光器^[36]

Figure 7 (Color online) Geometry of the secondary reflector with two parabolic wings [36].

图 8 (网络版彩图)采用双抛物线二次聚光器的线性菲涅尔式聚光系统示意图^[36]

Figure 8 (Color online) Scheme of linear Fresnel concentrator with two parabolic wings secondary [36].

$$\begin{cases} x = x' \cos i + y' \sin i, \\ y = -x' \sin i + y' \cos i, \end{cases} \quad (3)$$

$$y' = y_v + \frac{(x' - x_v)^2}{4r}, \quad (4)$$

式中,

$$i = \frac{1}{2 \tan(w/h)},$$

$$x_v = -r \cos i,$$

$$y_v = r \sin i.$$

l 完全依赖于 w/h 和 r . 若 w/h 较大, 则 l 较小, 使得经主反射镜阵列的反射光线目标(吸热管+二次聚光器)较小. 若 w/h 较大, 则主反射镜相互之间的阴影与遮挡影响严重.

Canavarro等人^[37]基于同步多表面法(SMS)设计了一种马蹄形二次聚光器, 设计时必须与主反射镜的设

计完全匹配. 如图9所示, 主反射镜始于相对于 x_1 轴旋转 $(\pi/2 - \theta)$ 且焦点为 S_1 的抛物线 p_1 上; 二次聚光器始于宏焦点为 R 、点焦点为 P_1 且经过点 S_1 的椭圆 s_1 . 基于SMS设计 p_2 和 s_2 . 由此可见, 基于SMS设计的马蹄形二次聚光器必须配合抛物面型主反射镜, 其加工难度大, 价格相对于圆柱面更昂贵.

Canavarro等人^[38]还报道了一种不对称复合椭圆面聚光器(CEC), 包括三部分: CEC段、渐开线和V形槽(图10). 他们指出, 理想情况下只包括CEC和渐开部分, 但采用的是真空集热管, 其玻璃外管使得吸热管不能与二次聚光器接触, 该间隙会导致光能损失, 因此使用V型槽来消除或减少损失. 但没有给出该二次聚光

图 9 基于同步多表面法设计二次聚光器^[37]

Figure 9 Design of the secondary concentrator with a simultaneous multiple surface method [37].

图 10 不对称CEC型二次聚光器^[38]

Figure 10 Detailed view of compound elliptical concentrator [38].

器的具体设计方法和性能参数等。

Zhu^[39]设计了一种基于自适应方法的二次聚光器(ADC)。如图11(a)所示, 首先, 确定开口起始点(由预定的孔径宽度确定)的主入射方向(可以通过进行详细的射线轨迹模拟或某些分析方法来确定, 简化方法中, 可以选择反射光线的中心线方向, 图12), 反射目标方向指向吸热管中心, 则起始点的表面法向将是主入射方向和反射目标方向的二分之一。其次, 沿曲面切线向量, 通过指定步距(取决于所需的曲面精度)来确定第二个曲面点。然后, 通过重复起始点的过程, 可以确定第二个曲面点处的主入射、反射、曲面法向和曲面切线。重复上述过程可以获得完整的聚光器形状(图11(b))。

Chaitanya Prasad等人^[40]结合瞄准线可变的概念设计了一种分段抛物面二次聚光器(SPSC), 并给出了坐标方程(图13)。SPSC坐标方程为

AB段:

$$\begin{cases} x_P = \frac{2f \sin \theta}{1 + \cos \theta}, \\ y_P = \frac{2f \sin \theta}{1 + \cos \theta} - r, \end{cases} \quad (5)$$

$$0^\circ < \theta \leq \theta_r,$$

BC段:

$$\begin{cases} x_Q = (x_P - x_{P,B}) \cos \phi - (y_P - y_{P,B}) \sin \phi + x_{P,B}, \\ y_Q = (y_P - y_{P,B}) \cos \phi - (x_P - x_{P,B}) \sin \phi + y_{P,B}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\theta_r < \theta \leq 90^\circ,$$

式中, f 为抛物线焦距, θ_r 为 $O'B$ 或 $O'B'$ 与聚光器中心平

面的夹角, $x_{P,B}$ 和 $y_{P,B}$ 为 B 点坐标, ϕ 为抛物线段 C,B 和 $B'C'$ 分别绕点 B 和 B' 旋转的角度。

Hack等人^[41]对ADC、CPC、梯形聚光器和双抛物面聚光器进行了对比, 发现垂直入射时, ADC效率最高, 分别比CPC、梯形聚光器和双抛物面聚光器高2.7%、13.4%和46.3%。Abbas等人^[13]对CPC、ADC和SPSC进行了对比, 发现最后一种效率最低。将CPC与ADC集中进行比较, 发现两者差别不大。当吸热管和二次聚光器之间不需要间隙时, ADC效率稍高; 当要求吸热管表面达到更高的能流密度或吸热管周向能流分布更均匀时, CPC效率更高。这些对比研究表明, CPC设计是一种有效的选择, 而ADC则是一种性能更高的解决方案^[42]。

Tsekouras等人^[43]提出了一种梯形聚光器, 如图14所示。梯形聚光器坐标方程为

$$y = \begin{cases} x \tan \theta_{\text{trap}}, & -\frac{W_{\text{rec}}}{2} \leq x \leq -\frac{H_{\text{trap}}}{\tan \theta_{\text{trap}}}, \\ H_{\text{trap}}, & -\frac{H_{\text{trap}}}{\tan \theta_{\text{trap}}} < x < \frac{H_{\text{trap}}}{\tan \theta_{\text{trap}}}, \\ (W_{\text{rec}}/2 - x) \tan \theta_{\text{trap}}, & \frac{H_{\text{trap}}}{\tan \theta_{\text{trap}}} \leq x \leq \frac{W_{\text{rec}}}{2}, \end{cases} \quad (7)$$

式中, W_{rec} 是二次聚光器开口宽度, H_{trap} 是二次聚光器高度, θ_{trap} 是二次聚光器侧面倾角。

文献未给出该二次聚光器的光学效率, 仅分析了吸热管周向辐射能流分布情况, 如图15所示。能流集中在吸热管底部, 而侧部和顶部较小。更具体地说, 假设吸热管被分成四个45°的象限, 能流分别为底部象限

图11 (网络版彩图)基于自适应方法设计二次聚光器^[39]。(a) 二次聚光器上最佳点的确定; (b) 优化的二次聚光器

Figure 11 (Color online) Design of the secondary concentrator with an adaptive method^[39]. (a) Determination of next optimal point on secondary-reflector surface; (b) final optimized secondary concentrator.

图 12 (网络版彩图)反射至二次聚光器的太阳光线示意图^[39]

Figure 12 (Color online) Incidence of reflected sun rays to secondary reflectors^[39].

图 13 分段抛物面聚光器^[40]

Figure 13 Profile of segmented parabolic concentrator^[40].

图 14 (网络版彩图)梯形聚光器^[43]

Figure 14 (Color online) Reflector of acute trapezoid shape^[43].

62.1%, 顶部象限7.4%, 侧部象限15.5%和15%。文献^[29]提出了一种采用二次聚光器CPC的熔融盐线性菲涅尔系统, 采用蒙特卡罗光线追迹和有限容积耦合方法对吸热管表面能流分布均匀化进行了优化, 如图16所示。可见该新型梯形聚光器与优化的CPC相比, 其吸热管能流密度分布均匀性差。

Bellos等人^[44]利用贝塞尔多项式对线性菲涅尔式

图 15 (网络版彩图)梯形二次聚光器的吸热管表面能流分布情况^[43]

Figure 15 (Color online) Surface plots of the ray-tracing simulation for the absorber^[43].

图 16 (网络版彩图)吸热管表面能流分布^[29]

Figure 16 (Color online) Circumferential solar flux distribution on the absorber^[29].

聚光系统的二次聚光器进行了优化。该方法基于控制点的移动确定二次聚光器的最佳几何结构。通过优化设计, 使得系统光学效率达到72.84%, 而初始设计的光学效率为61.01%。此外, 与初始设计相比, 这种设计使吸热管周向热流分布相对更均匀。他们也指出, 该方法并不是专门针对太阳能聚光系统的设计而产生的, 旨在优化他们先前研究中提出的线性菲涅尔式聚光系统的二次聚光器^[45](图17(a)), 优化后的最佳几何形状如图17(b)所示。

Vouros等人^[46]提出了一种光线跟踪优化设计线性菲涅尔聚光系统二次聚光器的方法, 其主要步骤包括: (1) 光线的定义和损失且需要由二次聚光器重新定向光线的选择; (2) 二次聚光器片段最佳方向的判断; (3) 将二次反射镜的形状构造为相邻的优化段序列。顶点

图 17 (网络版彩图)几何形状比较^[44]. (a) 初始几何形状; (b) 最佳几何形状

Figure 17 (Color online) Comparison of the designs [44]. (a) Initial geometry; (b) optimum geometry.

在不同垂直位置的二次聚光器如图18所示. 设计的二次聚光器中, 与吸热管的垂直距离较小的聚光器效率最高, 可超过95%; 位于较大距离处的聚光器效率较低, 但汇聚至吸热管的能流分布更均匀. 他们研究的主要目的是提出优化的原理.

对于新型二次聚光器, CEC未给出具体的设计方法, 双抛物线二次聚光器和基于SMS的马蹄形二次聚光器必须与主反射镜阵列高度匹配; 通用性较好的SPSC和梯形聚光器不能获得均匀的吸热管表面能流分布且效率低, 利用贝塞尔多项式优化二次聚光器只是给出了一种设计思路, 利用光线跟踪优化设计二次聚光器主要是提出优化的原理. 其中, ADC与CPC性能相当, 但不适用于要求吸热管表面能流密度高或吸热管周向能流分布均匀性好的线性菲涅尔式太阳能聚光系统. 因此, 目前对二次聚光器的最佳反射镜光学型面并没有达成共识.

3.3 二次聚光器的应用

3.3.1 二次聚光器的实际应用

目前, 全世界许多国家建立了线性菲涅尔式太阳能光热电站. 根据NREL统计数据^[47]和文献[48]发现已建线性菲涅尔式太阳能光热电站主要采用多管接收器和二次聚光器CPC+单管接收器, 其中采用CPC+单管接收器的电站见表1. 这些电站分别位于中国、西班牙、法国、比利时和摩洛哥. 容量最大为50 MWe, 传热介质大多数为水/水蒸气, 仅有3个采用了导热油和熔融盐. 对于新型二次聚光器的实际应用未见文献报道, 目前还处于理论探索阶段.

图 18 (网络版彩图)顶点在不同垂直位置的优化的二次聚光器^[46]

Figure 18 (Color online) Optimized shapes of the secondary reflector produced for various vertical positions of the top point [46].

3.3.2 二次聚光器应用中的光能损失问题

线性菲涅尔式太阳能聚光系统是将槽式抛物反射镜线性分段离散化而来. 最初的目的是解决宽幅玻璃镜的热弯成型技术难题, 同时解决旋转接头高温动密封的技术难题^[49], 降低技术难度是以牺牲系统的光学效率为代价. 显而易见, 由于增加了二次聚光器, 势必增加了从主反射镜到吸热管的光程以及光路上的光学界面, 进而增加吸收损失(二次聚光器反射率94%)、散射损失(二次聚光器型面误差等)等, 与槽式太阳能聚光系统的光学效率(72%)^[50]相比, 线性菲涅尔式太阳能聚光系统的光学效率下降至64%^[29], 但用有限的效率下降大幅降低了工程实施难度.

表 1 世界上已建的采用CPC+单管接收器的线性菲涅尔式太阳能系统**Table 1** The linear Fresnel reflector with CPC and single-tube receiver built in the world

名称	国家	容量 (MWe)	传热介质	建成时间
Solarmundo	比利时	—	水/水蒸气	2001年
FRESDEMO	西班牙	0.8	水/水蒸气	2007年
Puerto Errado 1	西班牙	1.4	水	2009年
Puerto Errado 2	西班牙	30.0	水	2012年
华能南山电厂	中国	1.5	水/水蒸气	2012年
Augustin Fresnel 1	法国	0.25	水/水蒸气	2012年
拉萨热电联供能源站	中国	1.0	导热油	2014年
Alba Nova 1	法国	12.0	水/水蒸气	2015年
IRESEN plant	摩洛哥	1.0	导热油	2016年
兰州大成敦煌项目	中国	50.0	熔融盐	2020年

3.3.3 二次聚光器应用中的热破坏问题

二次聚光器一般由曲率较大的型面组成。目前多采用模具热弯成型, 但工艺难度较大。为了便于热弯和镀膜, 将二次聚光器按照对称面分为两部分, 安装时采用机械结构进行拼接, 使用过程中的热膨胀会导致结构畸变, 从而影响性能。如果采用一体式结构, 热弯过程中存在热应力, 使用过程中会出现破损, 从而导致热破坏问题。因此, 在热弯工艺中需要增加热保温处理工艺以解决实际应用中的热破坏问题。

4 展望

太阳能光热发电通过配备储能系统可以实现24 h发电, 有望成为可以调峰的清洁基础电源。但目前居高不下的成本以及国内技术的不成熟阻碍了其推广应用。

线性菲涅尔式聚光系统具有结构简单、风阻小、成本低和土地利用率高优点, 在降低发电成本方面极具潜力。二次聚光器配合固定安装的高温真空集热管可以实现较高的聚光倍数($>100\times$), 使得熔融盐线性菲涅尔式聚光太阳能发电技术成为可能, 该技术将显著简化系统配置, 提升系统运行效率。二次聚光器主要包括CPC和新型二次聚光器。尽管研究人员对CPC反射镜光学型面进行了优化, 但光学效率更高且易于后期加工的CPC仍然需要深入研究; 不少研究人员也提出了一些新型二次聚光器, 其中ADC效率与CPC相当, 甚至当吸热管和二次聚光器之间不需要间隙时效率稍高, 但光学效率高且可获得均匀能流分布的新型二次聚光器依然需要研究设计。此外, 二次聚光器所对应的吸热管表面辐射能流密度分布条件下的光热耦合性能也将是未来研究的重点。

参考文献

- Kumar Sahu B. A study on global solar PV energy developments and policies with special focus on the top ten solar PV power producing countries. *Renew Sustain Energy Rev*, 2015, 43: 621–634
- Li M, Feng Y Y, Liu E Z, et al. Azobenzene/graphene hybrid for high-density solar thermal storage by optimizing molecular structure. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1383–1390
- Varun K, Arunachala U C, Elton D N. Trade-off between wire matrix and twisted tape: SOLTRACE® based indoor study of parabolic trough collector. *Renew Energy*, 2020, 156: 478–492
- Allouhi A, Benzakour Amine M, Saidur R, et al. Energy and exergy analyses of a parabolic trough collector operated with nanofluids for medium and high temperature applications. *Energy Convers Manage*, 2018, 155: 201–217
- 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. *Renew Energy*, 2016, 97: 129–144

- 6 Zhou L Y, Dai Y J, Li X, et al. Performance study and optimization of a linear fresnel reflector solar collector with cavity receiver (in Chinese). *Acta Energ Sol Sin*, 2018, 39: 704–712 [周凌宇, 代彦军, 李显, 等. 一种采用腔体吸收器的线性菲涅尔太阳集热器性能分析与优化. *太阳能学报*, 2018, 39: 704–712]
- 7 Reddy K S, Veershetty G, Srihari Vikram T. Effect of wind speed and direction on convective heat losses from solar parabolic dish modified cavity receiver. *Sol Energy*, 2016, 131: 183–198
- 8 Rea J E, Oshman C J, Olsen M L, et al. Performance modeling and techno-economic analysis of a modular concentrated solar power tower with latent heat storage. *Appl Energy*, 2018, 217: 143–152
- 9 Bellos E, Tzivanidis C. Multi-criteria evaluation of a nanofluid-based linear Fresnel solar collector. *Sol Energy*, 2018, 163: 200–214
- 10 Lin M, Sumathy K, Dai Y J, et al. Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver. *Appl Thermal Eng*, 2013, 51: 963–972
- 11 Lancereau Q, Rabut Q, Itskhokine D, et al. Wind loads on linear fresnel reflectors' technology: A numerical study. *Energy Procedia*, 2015, 69: 116–125
- 12 Rovira A, Barbero R, Montes M J, et al. Analysis and comparison of integrated solar combined cycles using parabolic troughs and linear Fresnel reflectors as concentrating systems. *Appl Energy*, 2016, 162: 990–1000
- 13 Abbas R, Sebastián A, Montes M J, et al. Optical features of linear Fresnel collectors with different secondary reflector technologies. *Appl Energy*, 2018, 232: 386–397
- 14 Abdullahi B, AL-Dadah R K, Mahmoud S, et al. Optical and thermal performance of double receiver compound parabolic concentrator. *Appl Energy*, 2015, 159: 1–10
- 15 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 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 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. *科学通报*, 2016, 61: 3208–3237]
- 16 Zhu G, Wendelin T, Wagner M J, et al. History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors. *Sol Energy*, 2014, 103: 639–652
- 17 Ma J, Wang C L, Xia Y J. Compound parabolic collector for linear Fresnel reflector system (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2019, 27: 2542–2548 [马军, 王成龙, 夏养君. 用于线性菲涅尔式聚光系统的复合抛物面聚光器. *光学精密工程*, 2019, 27: 2542–2548]
- 18 Oommen R, Jayaraman S. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses—oversized reflector. *Energy Convers Manage*, 2001, 42: 1379–1399
- 19 Winston R. Principles of solar concentrators of a novel design. *Sol Energy*, 1974, 16: 89–95
- 20 Ortabasi U. A tubular evacuated solar collector utilizing a heat pipe as absorber. *Revue Int D'Heliotech*, 1976, 2: 14–17
- 21 Rabl A. Solar concentrators with maximal concentration for cylindrical absorbers: Erratum. *Appl Opt*, 1977, 16: 15
- 22 Rabl A, Goodman N B, Winston R. Practical design considerations for CPC solar collectors. *Sol Energy*, 1979, 22: 373–381
- 23 Winston R. Ideal flux concentrators with reflector gaps. *Appl Opt*, 1978, 17: 1668–1669
- 24 McIntire W R. Design parameters for concentrators without gap losses. *Sol Energy*, 1984, 32: 439–441
- 25 Oommen R, Jayaraman S. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses—'V' groove reflector. *Renew Energy*, 2002, 27: 259–275
- 26 Yu L, Wang J, Zhang Y M. Analysis of the gaps of compound parabolic concentrators with tubular absorbers (in Chinese). *Acta Energ Sol Sin*, 2011, 32: 246–251 [余雷, 王军, 张耀明. 关于管状CPC缝隙的相关问题的分析. *太阳能学报*, 2011, 32: 246–251]
- 27 Feuermann D, Gordon J M. Analysis of a two-stage linear fresnel reflector solar concentrator. *J Sol Energy Eng*, 1991, 113: 272–279
- 28 Wu M G, Tang R S, Cheng Y B, et al. Gap design and optical losses of compound parabolic concentrators (in Chinese). *Trans CSAE*, 2009, 25: 308–312 [吴茂刚, 唐润生, 程艳斌, 等. CPC空隙设计及光能损失. *农业工程学报*, 2009, 25: 308–312]
- 29 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. *Appl Energy*, 2015, 146: 162–173
- 30 Perini S, Tonnellier X, King P, et al. Theoretical and experimental analysis of an innovative dual-axis tracking linear Fresnel lenses concentrated solar thermal collector. *Sol Energy*, 2017, 153: 679–690
- 31 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. *Appl Energy*, 2017, 205: 1394–1407

- 32 Cheng Z D, Zhao X R, He Y L, et al. A novel optical optimization model for linear Fresnel reflector concentrators. *Renew Energy*, 2018, 129: 486–499
- 33 Fan D W, Wang C L, Ma J, et al. Modeling method of compound paraboloid concentrator for a linear Fresnel concentrating system based on Matlab (in Chinese). PRC Patent, ZL201410081409.0, 2017-01-11 [范多旺, 王成龙, 马军, 等. 基于Matlab的线性菲涅尔式聚光集热系统用复合抛物面聚光器的建模方法. 中国专利, ZL201410081409.0, 2017-01-11]
- 34 Wang C L, Ma J, Fan D W, et al. Simulation study of a CPC for linear Fresnel reflector system (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2015, 44: 556–560 [王成龙, 马军, 范多旺, 等. 用于线性菲涅尔式太阳能聚光系统的CPC仿真研究. 红外与激光工程, 2015, 44: 556–560]
- 35 Wang C L, Ma J, Fan D W. Design and analysis of a CPC with single vacuum tube for linear Fresnel reflector system (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 597–602 [王成龙, 马军, 范多旺. 线性菲涅尔式太阳能聚光系统单管接收器的设计与优化. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 597–602]
- 36 Grena R, Tarquini P. Solar linear Fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid. *Energy*, 2011, 36: 1048–1056
- 37 Canavarró D, Chaves J, Collares-Pereira M. Simultaneous multiple surface method for linear Fresnel concentrators with tubular receiver. *Sol Energy*, 2014, 110: 105–116
- 38 Canavarró D, Chaves J, Collares-Pereira M. New dual asymmetric CEC linear Fresnel concentrator for evacuated tubular receivers. In: *International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*. Melville: AIP, 2017
- 39 Zhu G. New adaptive method to optimize the secondary reflector of linear Fresnel collectors. *Sol Energy*, 2017, 144: 117–126
- 40 Chaitanya Prasad G S, Reddy K S, Sundararajan T. Optimization of solar linear Fresnel reflector system with secondary concentrator for uniform flux distribution over absorber tube. *Sol Energy*, 2017, 150: 1–12
- 41 Hack M, Zhu G, Wendelin T. Evaluation and comparison of an adaptive method technique for improved performance of linear Fresnel secondary designs. *Appl Energy*, 2017, 208: 1441–1451
- 42 Bellos E. Progress in the design and the applications of linear Fresnel reflectors—A critical review. *Thermal Sci Eng Prog*, 2019, 10: 112–137
- 43 Tsekouras P, Tzivanidis C, Antonopoulos K. Optical and thermal investigation of a linear Fresnel collector with trapezoidal cavity receiver. *Appl Thermal Eng*, 2018, 135: 379–388
- 44 Bellos E, Tzivanidis C, Papadopoulos A. Secondary concentrator optimization of a linear Fresnel reflector using Bezier polynomial parametrization. *Sol Energy*, 2018, 171: 716–727
- 45 Bellos E, Tzivanidis C, Papadopoulos A. Optical and thermal analysis of a linear Fresnel reflector operating with thermal oil, molten salt and liquid sodium. *Appl Thermal Eng*, 2018, 133: 70–80
- 46 Vouros A, Mathioulakis E, Papanicolaou E, et al. On the optimal shape of secondary reflectors for linear Fresnel collectors. *Renew Energy*, 2019, 143: 1454–1464
- 47 <https://solarpaces.nrel.gov/by-technology/linear-fresnel-reflector>
- 48 He Y L, Wang K, Qiu Y, et al. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions. *Appl Thermal Eng*, 2019, 149: 448–474
- 49 Balaji S, Reddy K S, Sundararajan T. Optical modelling and performance analysis of a solar LFR receiver system with parabolic and involute secondary reflectors. *Appl Energy*, 2016, 179: 1138–1151
- 50 Bellos E, Tzivanidis C, Tsimpoukis D. Thermal enhancement of parabolic trough collector with internally finned absorbers. *Sol Energy*, 2017, 157: 514–531

Research progress on secondary concentrator for linear Fresnel reflector

MA Jun^{1,2,3}, WANG ChengLong^{1,2} & XIA YangJun³

¹ Collaborative Innovation Center for Technology and Equipment of Concentrated Solar Power, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

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

³ Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

As the most abundant renewable energy resource, solar energy has aroused the interest of scientists all over the world. In order to increase its efficient use, collectors maximizing sun power density are developed. According to concentration type, the solar collector system consists mainly of the linear Fresnel reflector (LFR), the parabolic trough collector (PTC), the solar power tower and the parabolic dish collector. LFR has attracted much attention because of its simple construction, low wind loads and optimal utilization of land area. The molten salt can be used as the heat transfer fluid when the fixed secondary concentrator is combined with the high temperature evacuated tube, which makes the system has great potential in reducing the cost of power generation. In this paper, the development of traditional compound parabolic concentrator (CPC) and new secondary concentrator is reviewed. Approaches of leaving a gap between secondary concentrator and receiver and the choice of the half-acceptance angle of the CPC are analyzed. The advantages and disadvantages of new secondary concentrators are summarized. The practical application of secondary concentrator is discussed, and the future research directions of secondary concentrator are prospected. The analysis result shows that for the approaches of leaving the gap, the gap loss of involute starting point moving forward is small and easy to process. Geometric optical efficiency and aperture width of the CPC should be considered for the choice of the half-acceptance angle. The efficiency of the new secondary concentrator based on the adaptive method is close to that of the CPC. When a higher flux intensity or a medium to high circumferential flux intensity homogeneity is required, the CPC is the best choice.

solar energy, linear Fresnel reflector, secondary concentrator, compound parabolic concentrator

doi: [10.1360/SST-2020-0190](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0190)