

doi:10.3788/gzxb20134210.1197

基于 ASAP 软件的二次反射系统的比较

骆仲泱, 张艳梅, 肖刚, 杨天锋, 王涛, 倪明江

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要:针对以直径 1 000 mm、边缘角 60° 的碟式镜为一次镜的二次反射系统, 讨论了不同形状的二次镜(旋转椭圆面型、旋转双曲面型、平面型及旋转抛物面型)的聚光情况. 结果表明:当旋转椭圆面型和旋转双曲面型二次反射系统的焦点落在一次镜顶点处时, 对旋转椭圆面型二次反射系统, 随数值孔径增加, 接收板中心的能流密度先增大后又减小, 光斑直径减小; 数值孔径为 0.4 时, 能量聚光比最大, 约为 5000 倍. 旋转双曲面型二次反射系统的能流密度和光斑直径均随数值孔径的增大而减小; 数值孔径为 0.5 时, 能量聚光比最大, 约为 8 990 倍, 旋转椭圆面型和旋转双曲面型二次镜均适用于二次反射低焦系统. 旋转双曲面型二次反射系统聚光比更高, 结构更紧凑. 对平面型二次反射系统, 随焦点位置的升高, 接收板中心的能流密度增大; 光斑直径几乎不变; 焦点相对位置为 0.9 时, 能量聚光比最大, 达到 21 000 倍; 适用于高焦二次反射系统. 旋转抛物面型二次反射系统随二次镜位置的上升, 接收板中心的能流密度增加; 光斑直径减小; 最大能量聚光比约 80 倍, 适用于低倍二次反射系统.

关键词: 太阳能; 二次反射; 二次镜; 光路模拟

中图分类号: TK513.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)10-1197-6

Optical Comparison of Two-stage Reflection Systems Based on ASAP

LUO Zhong-yang, ZHANG Yan-mei, XIAO Gang, YANG Tian-feng, WANG Tao, NI Ming-jiang
(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Four types of two-stage reflection systems were compared, of which the secondary mirror was an ellipsoidal, a hyperboloidal, a planar or a paraboloidal type, respectively. A paraboloidal dish with a diameter of 1 000 mm and a rim angle of 60° was employed as a primary mirror in each system. The final concentrated spots were on the vertexes of the dishes in ellipsoidal and hyperboloidal systems. As to the ellipsoidal system, the flux density on the receiver increases when numerical aperture (NA) < 0.4 and then decreases. The spot size decreases with NA increasing. The maximum flux concentration ratio is about $5\,000\times$ at NA = 0.4. As to the hyperboloidal system, both the flux density and spot size decrease with NA increasing. The maximum flux concentration ratio is about $8\,990\times$ at NA = 0.5. The ellipsoidal and hyperboloidal systems are applicable to cases which need low concentrated spots, and the latter has a higher flux concentration ratio with a more compact structure and a smaller secondary mirror. As to the planar system, with the relative location of the concentrated spot increasing, the flux density increases and spot size changes less obviously. The maximum flux concentration ratio is about $21\,000\times$. A planar secondary mirror is suitable for a system which needs a high concentrated spot. As to the paraboloidal system, with relative location of the secondary mirror increasing, the flux density increases and spot size decrease. The maximum flux concentration

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51276167)和浙江省重大科技专项计划(No. 2012C01022-1)资助

第一作者: 骆仲泱(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为能源清洁利用、新能源及节能环保技术等. Email: zyluo@zju.edu.cn

通讯作者: 肖刚(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为生物质热化学转化、太阳能发电等. Email: xiaogangtianmen@zju.edu.cn

收稿日期: 2013-03-22; 录用日期: 2013-06-05

ratio is $80\times$, which is the lowest among systems mentioned above. A paraboloidal secondary mirror is suitable for a system that requires low concentration ratio.

Key words: Solar; Two-stage reflection; Secondary mirror; Optical simulation

0 引言

常见的二次反射系统如卡塞格林 (Cassegrain) 系统及格里高利 (Gregorian) 系统等对镜面加工要求较高^[1], 主要应用于天文望远镜系统, 而在其他领域的应用不多. 近年来随着科技的进步, 太阳能利用技术发展迅速^[2]. 为了提高能量传输效率^[3]、减小接收角^[4]或优化集热器的布置^[5]等, 二次反射聚光技术在太阳能应用领域备受关注.

1976年, Rabi^[3]在塔式聚光系统的顶部安装一个平板式菲涅尔反射镜, 将汇聚的太阳光再次反射到地面, 以光传输代替循环热工质传输以降低能量的传输损失. Mauk等^[4]对卡塞格林式太阳能聚光系统进行了研究和分析, 受技术所限, 效率不高. 随着高准确度、低成本的跟踪及聚光技术的开发, 二次反射技术又受到众多研究者的关注. Feuermann和Gordon等^[5-9]的太阳能光纤-微碟 (solar fiber-optic mini-dishes) 系统运用二次反射技术, 将多个小直径碟式镜的汇聚光线经光学元件向下汇聚, 再利用光纤传输光能. Chen等^[10-11]运用美国 Breault Research Organization Inc (BRO) 公司开发的高级系统分析程序 (Advanced System Analysis Program, ASAP) 软件对椭圆面型和双曲面型二次反射系统做了比较. Jiang等^[12-13]运用抛物面型二次元件对槽式系统和碟式系统的聚光分频利用做了模拟研究. Kribus等^[14]、Segal等^[15-16]和 Hasuik等^[17]针对塔式二次反射系统做了模拟研究和系统设计. 此外, Karabulut等^[18]对碟式-斯特林二次反射系统提出了概念性设计. Schlegel等^[19]对碟式二次反射全光谱分频照明系统做了研究.

二次反射技术在太阳能发电、储能、热化学反应、照明及医疗等领域有着广泛的应用前景. 各国研究者虽针对某种特定形状的二次镜做了许多研究, 但基于常见二次反射镜比较的文献报道不多. 本文运用 ASAP 软件对常见的二次反射镜类型 (旋转椭圆面型、旋转双曲面型、平面型及旋转抛物面型) 进行比较和分析, 得出各种二次镜的适用场合.

1 二次反射及模拟工具

1.1 二次反射

二次反射系统由一次镜和二次镜组成. 在太阳能应用领域一次镜可以是槽式、塔式或碟式聚光镜等. 二次镜为安装在一次镜焦点附近的特定曲面的

反射镜, 可将光线反射到指定位置.

在太阳能系统中利用二次反射技术, 可使得集热器开口朝上布置, 增加集热工质的选择及系统的布置等的灵活性; 也可以用光纤等将高倍的太阳能远距离传输并加以利用. 对塔式聚光系统, 中心塔建造比较高, 热工质从塔顶到塔底传输时热损失严重, 采用二次反射技术以光传输代替热传输, 减少整体能量损失并易于关键设备的维护和修理. 对碟式-斯特林系统, 引入二次反射技术可将笨重的斯特林机放置到地面附近, 增加系统灵活性、降低对系统支架的要求及系统成本. 相较于前两者, 槽式聚光系统聚光倍数低, 引入二次反射损失较大, 研究相对较少. 本文以碟式镜作为一次镜, 比较分析各种形状的二次反射镜的聚光性能及适用场合.

1.2 常见二次反射系统类型

根据二次反射镜形状, 二次反射系统可分为旋转椭圆面型二次反射系统、旋转双曲面型二次反射系统、平面型二次反射系统及旋转抛物面型二次反射系统等 4 种形式. 以旋转抛物面碟式聚光镜作为一次镜为例, 4 种系统依次如图 1.

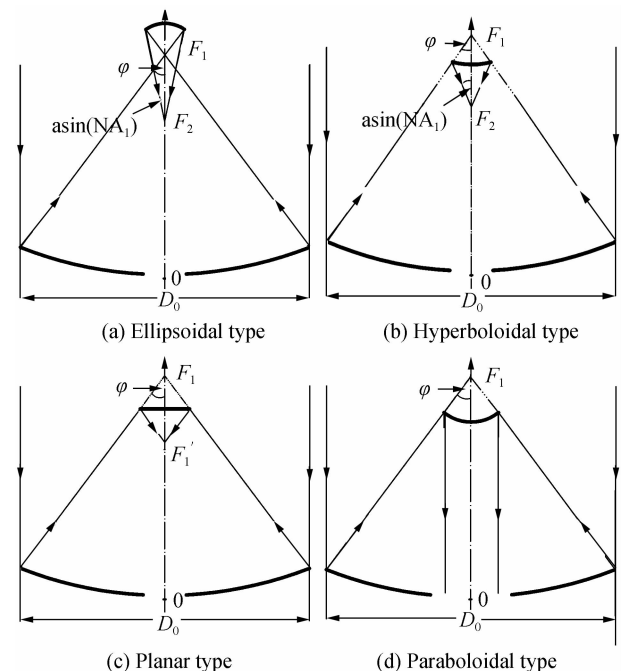


图 1 4 种二次反射系统

Fig. 1 Schematic of four kinds of two-stage reflectors

根据圆锥曲面的光学性质可知, 汇聚于一次镜焦点的光线被共焦的旋转椭圆面型或旋转双曲面型二次镜反射后重新汇聚于其另一焦点, 即格里高利系统或卡塞格林系统, 如图 1(a) 或 (b); 汇聚于一次镜焦点的光线经平面型二次镜反射后的光线汇聚点

和原来的一次镜焦点关于该平面型二次镜呈镜面对称,如图 1(c);汇聚于一次镜焦点的光线经共焦的旋转抛物面型二次镜反射后平行于一次镜的主光轴,如图 1(d).

1.3 模拟工具

光学软件的应用广泛、追踪速度快和准确度高,已被众多研究者用来进行光学模拟^[10-11,20-21]. 本文运用 Excel 及 MATLAB 程序,得到各个二次反射系统的几何及形状参量,再运用 ASAP 软件对 4 种二次反射系统进行了光学模拟和对比分析.

2 数学分析

由图 1 可知,旋转椭圆面型、旋转双曲面型和平面型二次反射系统均得到汇聚光斑,旋转抛物面型二次反射系统得到平行光束. 给定一次镜直径 D_0 和焦距 f 时,一次镜的边缘角 φ 可由式(1)得到

$$\varphi = \arctan \left[\frac{8}{16(f/D_0) - (D_0/f)} \right] \quad (1)$$

实际中考虑到加工难度和镜面利用率,本文只讨论一次镜边缘角 $\varphi < 90^\circ$ 的情况. 对旋转椭圆面

型、旋转双曲面型和平面型二次反射系统,焦点的相对位置 m 为二次反射焦点 $F_2(F')$ 到一次镜顶点 O 的距离与一次镜焦距 f 的比值

$$m = |OF_2|/f \quad (2)$$

规定 $F_2(F')$ 在 F_1 和 O 之间时, $0 < m < 1$; $F_2(F')$ 恰好位于 O 点处时, $m = 0$; $F_2(F')$ 在 O 点下方时, $m < 0$. 对旋转抛物面型二次反射系统, m 为二次镜的放置位置与一次镜焦距 f 的相对值. 二次镜的数值孔径 NA 和接收半角 θ 之间关系为

$$NA = \sin \theta \quad (3)$$

对于平面型二次反射系统有 $\theta = \varphi$; 对旋转抛物面型二次反射系统,二次反射的光束平行于一次镜光轴,故 $\theta = 0$. 当 $\varphi < 90^\circ$ 时,根据一次镜和二次镜相对位置的几何关系,四种二次镜的焦距 f_s 、接收半角 θ 、半径 r 、放置位置 Z_0 及形状参量 a (双曲面的实半轴或椭圆面的长半轴)、 b (双曲面的虚半轴或椭圆面的短半轴)、 c (双曲面或椭圆面的半焦距)依次如表 1.

表 1 二次反射镜形状参量

Table 1 Key parameters of the secondary mirror

	f_s	θ	c	r	a	b	Z_0
Ellipsoid	$f-mf$	$\arcsin(NA)$	$\frac{f-mf}{2}$	$\frac{2c}{\frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \varphi}}$	$\frac{r\left(\frac{1}{\sin \theta} + \frac{1}{\sin \varphi}\right)}{2}$	$\sqrt{a^2 - c^2}$	$f - c + a$
Hyperboloid	$f-mf$	$\arcsin(NA)$	$\frac{f-mf}{2}$	$\frac{2c}{\frac{1}{\tan \theta} + \frac{1}{\tan \varphi}}$	$\frac{r\left(\frac{1}{\sin \theta} - \frac{1}{\sin \varphi}\right)}{2}$	$\sqrt{c^2 - a^2}$	$f - c + a$
Plane	$f-mf$	φ	—	$\frac{(1-m)f \tan \theta}{2}$	—	—	$\frac{f+mf}{2}$
Paraboloid	$f-mf$	—	—	$\frac{2f_s(\sqrt{\tan^2 \varphi + 1} - 1)}{\tan \varphi}$	—	—	mf

3 模拟与比较

太阳并非点光源,到达地面的太阳光呈一定的锥角入射^[22]. 同时受大气层中颗粒物的影响,使得太阳表面的亮度分布不均匀,研究者们对此作了大量的研究^[2, 23-24]. 本文运用 ASAP 软件对日盘模型做了简化,假定在太阳光 $32'$ 的锥角内的亮度呈均匀分布. 在镜面制造过程中会存在斜率误差 σ_{slope} 及型线误差 σ_{mirror} , 综合考虑这些误差的影响, Kalogirou^[25] 给出了如式(4)的评价指标

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{sun}}^2 + 4\sigma_{\text{slope}}^2 + \sigma_{\text{mirror}}^2} \quad (4)$$

取 $\sigma_{\text{sun}} = 4.65$ mrad, 对理想镜面下二次反射系统进行比较和分析. 此外对系统作如下假设:入射辐射强度为 $1\,000$ W/m²; 一次镜、二次镜反射率均为 0.95; 接收板吸收率为 1; 光线追迹数量约 1.7×10^6 条; 光线分布采用 ASAP 软件的随机函数分布.

$D_0 = 1\,000$ mm, $\varphi = 60^\circ$ 时,讨论 $m = 0$ 且 NA 在 0.1 到 0.5 之间时旋转椭圆面型和旋转双曲面型二次反射系统的聚光情况; 讨论 m 在 0.5 到 0.9 之间时平面型和旋转抛物面型二次反射系统的光线汇聚情况.

3.1 旋转椭圆面型二次反射系统

图 2 为 $m = 0$ 且 NA 在 0.1 到 0.5 之间变化时,旋转椭圆面型二次反射系统接收板中心沿 X 轴向的能流密度分布. 可以看出,随着 NA 值的增加,接收板中心的能流密度值先增加到最大值 (4.98×10^6 W/m² 当 NA=0.4 时) 后又减小. 这是因为随着 NA 的增大,二次镜半径逐渐增大,遮光也就越来越严重. 光斑的等效半径 (接收板上含 90% 能量的圆域半径) 随着 NA 值的增加而逐渐减小. 当 NA=0.5 时,等效半径最小约为 4.53 mm. 当 NA=0.4 时,接收板上的平均能量聚光比最大,约为 5 000 倍.

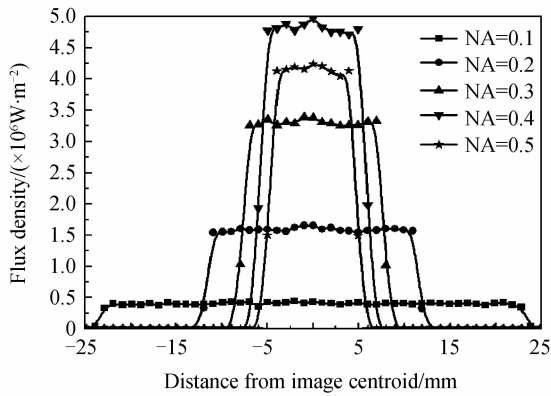


图2 旋转椭圆面型二次反射系统接收板中心沿 X 轴向的能流密度分布

Fig. 2 The flux distribution in X direction on the receiver of the ellipsoidal system

3.2 旋转双曲面型二次反射系统

图3为 $m=0$ 时旋转双曲面型二次反射系统接收板中心沿 X 轴向能流密度分布与 NA 的关系。

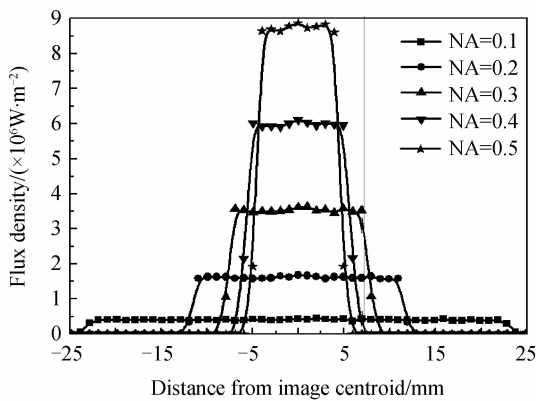


图3 旋转双曲面型二次反射系统接收板中心沿 X 轴向的能流密度分布

Fig. 3 The flux distribution in X direction on the receiver of the hyperboloidal system

由图3可知,旋转双曲面型二次反射系统的平均能流密度值和光斑的等效半径均随 NA 值的增大而减小。当 $NA=0.5$ 时,接收板中心的能流密度值最大,约为 $8.85 \times 10^6 \text{ W/m}^2$;光斑等效半径约 4.40 mm ;平均能量聚光比可达 $8\,990$ 倍。在相同条件下,相较于旋转椭圆面型二次反射系统,旋转双曲面型二次反射系统接收板中心的能流密度值更大、光斑半径更小,聚光效果更好。

3.3 平面型二次反射系统

给定一次镜时,平面型二次反射系统焦点处的接受半角也随之确定,故本节讨论二次反射焦点相对位置 m 变化时,平面型二次反射系统的接收板中心沿 X 轴向的能流密度分布,如图4。

比较发现,随着 m 值增大,接收板中心的能流密度值逐渐增大,说明用平面镜做二次反射镜时,二次反射的焦点和一次镜焦点的距离越近,所得光斑的能流密度值越大。光斑的等效半径随 m 值的变化

不明显。当 $m=0.9$ 时,接收板中心的能流密度值最大,约为 $32.90 \times 10^6 \text{ W/m}^2$;光斑的等效半径约为 3.02 mm ;平均能量聚光比可达 $21\,000$ 倍。

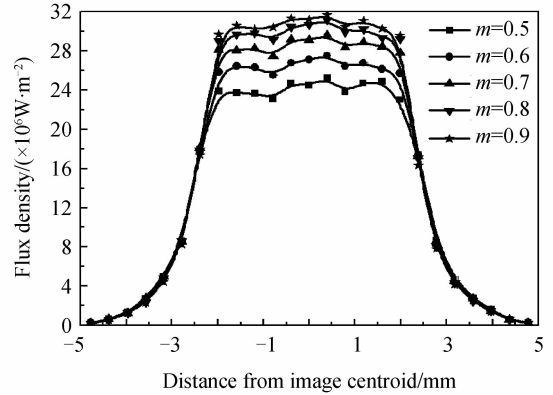


图4 平面型二次反射系统接收板中心沿 X 轴向的能流密度分布

Fig. 4 The flux distribution in X direction on the receiver of the planar system

3.4 旋转抛物面型二次反射系统

旋转抛物面型二次镜顶点放置在不同位置处时的二次反射系统接收板中心沿 X 轴向的能流密度分布如图5。

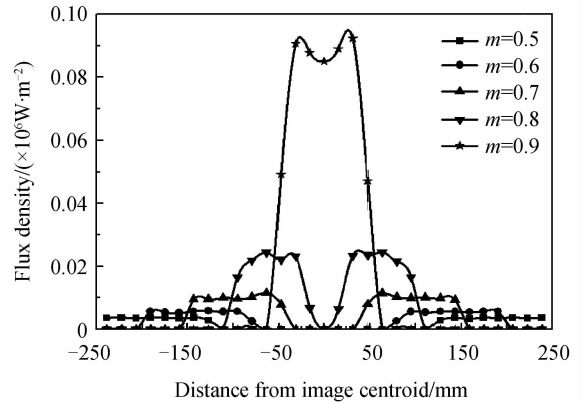


图5 旋转抛物面型二次反射系统接收板中心沿 X 轴向的能流密度分布

Fig. 5 The flux distribution in X direction on the receiver of the paraboloidal system

由图5可以看出,随着二次镜相对位置 m 的增加,接收板中心的能流密度逐渐增加;光斑的等效半径减小。由于二次镜的遮挡,光斑中心有一较大的阴影区,该阴影区面积随着 m 值的增大而减小。当 $m=0.9$ 时,中心阴影区几乎消失,聚光性能得到一定程度的改善;此时接收板中心最大能流密度可达 $0.11 \times 10^6 \text{ W/m}^2$;平均能量聚光比约 80 倍。

3.5 分析与比较

本节对直径 D_0 为 $1\,000 \text{ mm}$ 、边缘角 φ 为 60° 的一次镜结合不同参量的旋转椭圆面型、旋转双曲面型、平面型及旋转抛物面型二次镜进行综合分析比较。图6(a)为旋转椭圆面型和旋转双曲面型二次

反射系统的二次镜半径及二次镜相对位置随二次镜 NA 值的变化关系,图 6(b)为平面型和旋转抛物面型二次反射系统的二次镜半径及二次镜相对位置随 m 值的变化关系。

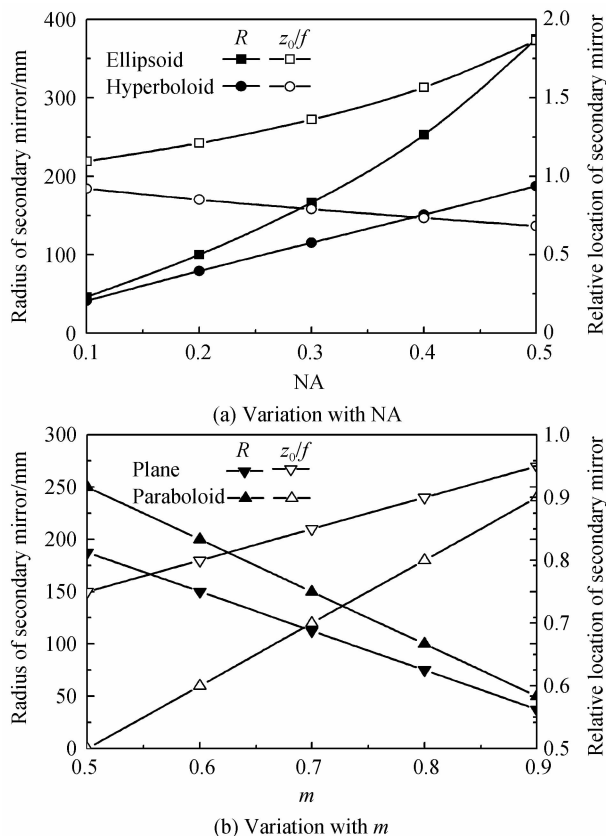


图 6 二次镜半径及相对位置的变化

Fig. 6 Variation of the shading percentage and relative location of the secondary mirror

由图 6(a)可知,当 $m=0$ 时,旋转椭圆面型和旋转双曲面型二次反射系统的二次镜半径均随 NA 值的增大而增大.前者的二次镜半径始终大于后者且差值随 NA 值的增大而增大.因此,旋转椭圆面型二次反射系统的遮光率大于旋转双曲面型二次反射系统.旋转椭圆面型二次反射系统二次镜的相对位置始终大于 1 且随着 NA 值的增加而增加.旋转双曲面型二次反射系统二次镜的相对位置始终小于 1 并随着 NA 值的增加而减小.在同样条件下,旋转双曲面型二次反射系统的二次镜半径较小,二次镜相对位置更低,结构更为紧凑。

在图 6(b)中,随着平面型二次反射系统焦点位置的上升即 m 值的增大,二次镜半径逐渐减小,二次镜的相对位置逐渐升高并趋近于 1.对旋转抛物面型二次反射系统随着二次镜相对位置的上升即 m 值的增大,二次镜半径逐渐减小。

4 结论

本文讨论了直径为 1 000 mm、边缘角为 60° 的

旋转抛物面一次镜结合不同参量的旋转椭圆面型、旋转双曲面型、平面型及旋转抛物面型四种形状的二次镜的聚光效果.旋转椭圆面型和旋转双曲面型二次反射系统的焦点落在一次镜顶点处.对旋转椭圆面型二次反射系统,随着 NA 值的增加,接收板中心沿 X 轴向的能流密度值先增大后又减小;光斑的等效半径减小;当 $NA=0.4$ 时,能量聚光比最大,约为 5 000 倍.旋转双曲面型二次反射系统接收板中心沿 X 轴向的能流密度值和光斑的等效半径均随 NA 值的增大而减小;当 $NA=0.5$ 时,能量聚光比最大可达 8 990 倍.在相同条件下,旋转双曲面型二次反射系统的光斑半径更小,能量聚光比更高,二次镜半径更小,结构更为紧凑.旋转椭圆面型和旋转双曲面型二次镜均适用于二次反射低焦系统.对平面型二次反射系统,随着 m 值增大,接收板中心沿 X 轴向的能流密度值逐渐增大;光斑的等效半径变化不明显;二次镜半径减小;二次镜的相对位置逐渐升高并趋近于 1;当 $m=0.9$ 时,能量聚光比最大,可达 21 000 倍;适用于高焦二次反射系统.旋转抛物面型二次反射系统随着 m 值的增加,接收板中心沿 X 轴向的能流密度逐渐增加;光斑等效半径及其中心的阴影减小;二次镜半径减小;当 $m=0.9$ 时平均能量聚光比约 80 倍,适用于低倍二次反射系统。

参考文献

- [1] YIN Yi-fang, CHEN Kai, ZHANG Yong, *et al.* A new type of optical concentrating system with secondary reflection[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1983, **4**(4): 399-404. 尹仪方,成凯,张勇,等.一种新型的二次反射聚光系统[J]. *太阳能学报*, 1983, **4**(4): 399-404.
- [2] JIANG Shou-li. Fundamental theory and experimental study of reflective concentrating solar energy utilization[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. 江守利.反射聚光利用太阳能的基础理论与实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2009.
- [3] RABL A. Tower reflector for solar power plant[J]. *Solar Energy*, 1976, **18**(3): 269-271.
- [4] MAUK C E, PRENGLE Jr H W, SUN E C. Optical and thermal analysis of a cassegrainian solar concentrator[J]. *Solar Energy*, 1979, **23**(2): 157-167.
- [5] FEUERMAN D, GORDON J M. Solar fiber-optic mini-dishes: a new approach to the efficient collection of sunlight[J]. *Solar Energy*, 1999, **65**(3): 159-170.
- [6] FEUERMAN D, GORDON J M. High-concentration photovoltaic designs based on miniature parabolic dishes[J]. *Solar Energy*, 2001, **70**(5): 423-430.
- [7] GORDON J M. Tailoring optical systems to optimized photobioreactors[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, **27**(11): 1175-1184.
- [8] FEUERMAN D, GORDON J M, HULEIHIL M. Solar fiber-optic mini-dish concentrators: first experimental results and field experience[J]. *Solar Energy*, 2002, **72**(6): 459-472.
- [9] GORDON J M, FEUERMAN D. Optical performance at the thermodynamic limit with tailored imaging designs[J].

- Applied Optics*, 2005, **44**(12): 2327-2331.
- [10] CHEN C F, LIN C H, JAN H T, *et al.* Design of a solar concentrator combining paraboloidal and hyperbolic mirrors using ray tracing method[J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(3): 360-366.
- [11] CHEN C F, LIN C H, JAN H T. A solar concentrator with two reflection mirrors designed by using a ray tracing method [J]. *Optik*, 2010, **121**(11): 1042-1051.
- [12] JIANG S L, HU P, MO S P, *et al.* Modeling for two-stage dish concentrating spectral beam splitting photovoltaic/thermal system[C]. IEEE, 2009.
- [13] JIANG S L, HU P, MO S P, *et al.* Optical modeling for a two-stage parabolic trough concentrating photovoltaic/thermal system using spectral beam splitting technology[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, **94**(10): 1686-1696.
- [14] KRIBUS A, ZAIBEL R, SEGAL A. Extension of the hermite expansion method for cassegrainian solar central receiver systems[J]. *Solar Energy*, 1998, **63**(6): 337-343.
- [15] SEGAL A, EPSTEIN M. Comparative Performances of 'Tower-top' and 'Tower-reflector' Central Solar Receivers [J]. *Solar Energy*, 1999, **65**(4): 207-226.
- [16] SEGAL A, EPSTEIN M. The optics of the solar tower reflector[J]. *Solar Energy*, 2001, **69**(1-6): 229-241.
- [17] HASUIKE H, YOSHIZAWA Y, SUZUKI A, *et al.* Study on design of molten salt solar receivers for beam-down solar concentrator[J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(10): 1255-1262.
- [18] KARABULUT H, YUCESU H S, CINAR C, *et al.* Construction and testing of a dish/Stirling solar energy unit [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2009, **82**(4): 228-232.
- [19] SCHLEGEL G O, BURKHOLDER F W, KLEIN S A, *et al.* Analysis of a full spectrum hybrid lighting system[J]. *Solar Energy*, 2004, **76**(4): 359-368.
- [20] YAN Chun-guang, TAN Bai-mei, YUAN Jing-yu, *et al.* Simulation of LED's optical characteristic base on ASAP[J]. *Advanced Display*, 2008(9): 58-61.
闫春光,檀柏梅,袁景玉,等. 基于 ASAP 软件的 LED 光学特性模拟[J]. *现代显示*, 2008(9): 58-61.
- [21] ZHU Rui, LU Zhen-wu, LIU Hua, *et al.* The solar concentrator design method based on nonimaging optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2251-2255.
朱瑞,卢振武,刘华,等. 基于非成像原理设计的太阳能聚光镜[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2251-2255.
- [22] RABL A. Active solar collectors and their applications[M]. Oxford University Press, 1985.
- [23] KUIPER G P. The photosphere, the sun, the solar system I [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1953.
- [24] BUIE D, MONGER A G, DEY C J. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations[J]. *Solar Energy*, 2003, **74**(2): 113-122.
- [25] KALOGIROU S. Parabolic trough collector system for low temperature steam generation: design and performance characteristics[J]. *Applied Energy*, 1996, **55**(1): 1-19.