

抛物碟式太阳能聚光器的聚光特性分析与设计

王云峰 季杰 何伟 陈海飞

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要 点聚焦碟式太阳能聚光反射器,应用光线追迹法模拟分析了存在太阳张角时,相同开口采光面积、不同形状的聚光器分别在相同焦距、相同边缘角情况下的聚光特性。考虑到太阳形状、开口采光面形状、抛物面焦距、抛物面边缘角及接收器的遮挡作用等几何因素,并结合旋转抛物面聚光器的光学特性,建立了模拟仿真的几何模型。采用光线追迹法直观地模拟了聚光接收面上的平均能流分布特性。为对聚光器的聚光特性进行定量评价,采用了面积效率因子的概念。模拟结果表明,采光面积相同时,等焦距的 4 种不同开口形状的聚光器具有相近的聚光能流比;等边缘角时,除圆形聚光器外的 3 种聚光器有较大光能损失。设计了多碟共焦聚光器,用低聚光比聚光器组合达到高倍聚光效果,并分析了聚光特性,为碟式太阳能聚光反射系统的设计和 optimization 提供了参考。

关键词 光学设计;碟式抛物面;光线追迹;太阳能;聚光特性;几何因素

中图分类号 TK513.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0122002

Performance Analysis and Design of Paraboloidal Dish Solar Concentrators

Wang Yunfeng Ji Jie He Wei Chen Haifei

(Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract For paraboloidal dish solar concentrators, the concentrating characteristics of concentrators with different apertures but the same area are investigated respectively with the same focal length and the same rim angle through the ray tracing. Considering several geometric factors including the influence of the sun shape, the shape of apertures, focal length and rim angle of paraboloidal dish, the shadow of receivers and so on, with the optical properties of concentrators, the geometric models for simulation are established, and the average flux distribution on the receivers is simulated and drawn with the software of TracePro. In order to make a quantitative evaluation for the concentrating performance of concentrators, the concept of efficiency factor of area is applied. The results of simulation show that when the area of apertures is same, the average flux distributions for the four concentrators with different shapes and identical focal length are similar. However, for those with different shapes but same rim angle, the average flux distributions have large attenuation except the concentrator with circular aperture. The solar concentrator of multiple panels with the same focal point is designed, and its concentrating performance is analyzed. The simulation results could present a useful reference for design and optimization of the solar paraboloidal dish concentrator.

Key words optical design; paraboloidal dish; ray tracing; solar energy; characteristics of concentration; geometric factors

OCIS codes 220.4298; 350.6050; 080.2740

1 引言

目前太阳能聚光利用越来越受到国内外研究者的关注,尤其是易于实现高倍聚焦的碟式聚光技术。采用高倍聚焦能有效地提高太阳能利用率,获得高密度光能,从而实现高温热发电或高倍聚光光伏发电。

近年太阳能光伏发电发展迅猛,性能较好的 III-V 族光伏电池倍受青睐, GaAs 电池更是成为聚光发电的首选,但高倍聚光光强的均匀性对其发电性能的影响不可忽视。Jaramillo 等^[1]通过试验和理论分析了焦平面上所获得的热能及温度分布; Peter

收稿日期: 2011-05-20; 收到修改稿日期: 2011-07-25

作者简介: 王云峰(1984—),男,博士研究生,主要从事太阳能热利用方面的研究。E-mail: wyfdoc@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 季杰(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事太阳能利用和建筑节能等方面的研究。

E-mail: jijie@ustc.edu.cn(通信联系人)

等^[2]在考虑了反射面和接收面的几何因素以及反射面的不精确度等因素后,对圆柱形中心轴接收器上的能量分布做了比较和分析,并给出了此类聚光系统的设计建议;陈奇峰等^[3]设计了两级抛物面聚光器,并分别对次级反射面为椭圆面和双曲面的两种聚光器的光学特性进行了分析,得出了椭圆反射面的聚光器性能较好的结论;帅永等^[4]应用蒙特-卡罗(Monte-Carlo)方法分析了碟式聚光系统的辐射特性,研究了太阳形状和反射面表面误差的引入对聚光辐射性能的影响;杜胜华等^[5]也应用 Monte-Carlo 方法分析了太阳光不平行度、跟踪精度和反射镜口径比对焦平面能流分布的影响;刘颖等^[6]还提出用有限元法计算焦点能流分布的新方法。以上研究都是针对开口采光面为圆形的碟式聚光器,实际应用中也有采用此种形状开口面的聚光器,如 A. Kribus 等^[7]设计制作的小型热/电联供系统,但是其规模较小,聚光比也只有 500 倍。而澳大利亚国立大学研制的 400 m² 和 500 m² 的两套聚光系统,整体开口面形状则分别采用六边形和八边形^[8,9]。在大型聚光系统中采用非圆形开口面聚光器主要是考虑到安装和生产因素,但对于此类聚光器的聚光特性研究却少有报道。本文采用基于 Monte-Carlo 原理的 TracePro 软件,考虑太阳张角、焦距等因素,对开口面分别为圆形、矩形、六边形和八边形的碟式聚光器建立几何模型,模拟分析了不同几何参数碟式聚光器的聚光特性,并根据分析结果设计了一种本课题组用于 GaAs 聚光发电的多碟共焦聚光器,为碟式聚光利用的进一步研究提供了参考。

2 几何模型

TracePro 是利用光线追迹的方法来对所建立的实体模型进行光学研究的,因此被研究实体模型的建立尤为重要。被研究实体模型包括太阳模型、聚光抛物反射镜模型和焦点处的接收器模型。实际的太阳光不是一个点光源,是以 32' 张角的光锥形式入射到反射镜上某点,并以同样张角反射到焦平面上,如图 1(a)所示。图 1(b)中,入射光线与采光面法向所成角 α, β 和 γ 可按以下公式计算:

$$\beta = 16' = \arctan \frac{D/2}{L}, \quad (1)$$

$$\alpha = \arctan \frac{D/2 + a/2}{L} = \arctan \frac{L \tan 16' + a/2}{L}, \quad (2)$$

$$\gamma = \arctan \frac{D/2 - a/2}{L} = \arctan \frac{L \tan 16' - a/2}{L}, \quad (3)$$

式中, L 为太阳与镜面开口采光面之间的距离, D 为太阳直径, a 为反射镜面采光面开口宽度。为使所建模型与实际相符,要保证抛物反射镜面上的每一个点都能接收到最大 32' 张角的入射光锥,即保证从太阳边缘发出的光线到达反射镜面上任意点的角度都相等且与采光面法向所成的角度约为 16', 按

$$\left| \frac{\alpha - 16'}{16'} \right| < 0.001 \text{ 且 } \left| \frac{\gamma - 16'}{16'} \right| < 0.001 \quad (4)$$

进行近似计算并令其相对误差为 0.001。

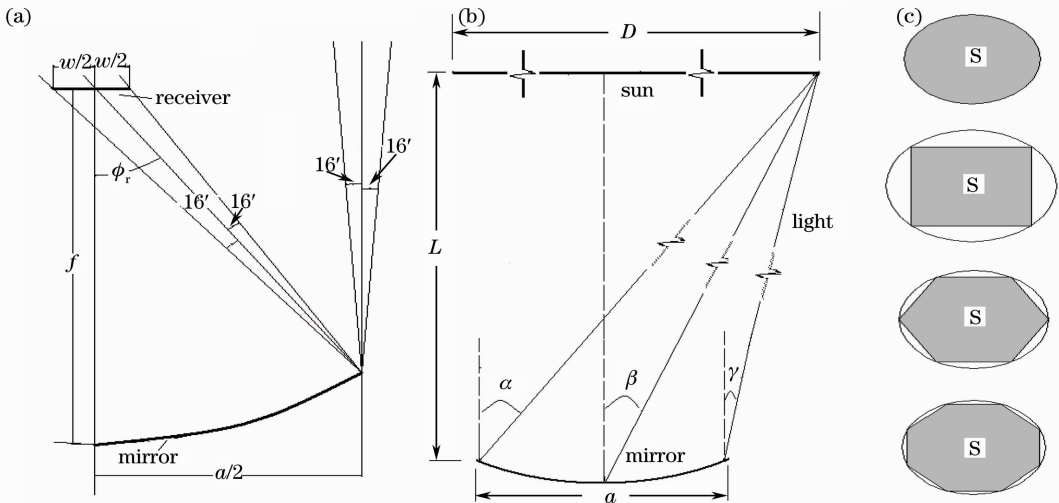


图 1 几何模型。(a)碟式抛物反射面光路示意图;(b)模型光路示意图;(c)开口采光面示意图
Fig. 1 Schematic of geometric model. (a) Optical diagram for specular dish-like parabolic reflector; (b) model dimensions; (c) apertures

将(2)式和(3)式代入(4)式即可得出 L 值,又据(1)式便可知 D 值。抛物反射镜的几何聚光比及平面接收器在焦点处接收到的太阳像的半径为^[10]

$$C = \frac{\sin^2 \phi_r \cos(\phi_r + 16')}{\sin^2 16'} - 1, \quad (5)$$

$$w/2 = \frac{a/2}{\cos(\phi_r + 16')} \times \frac{\sin 16'}{\sin \phi_r}, \quad (6)$$

式中 C 为聚光比, $w/2$ 为平板接收器的半径, ϕ_r 为边缘角。如图 1(a)所示,若给定开口宽度 a 和焦距 f ,则边缘角为

$$\phi_r = \arctan \frac{4f \times a/2}{4f^2 - (a/2)^2}. \quad (7)$$

2.1 相同焦距和开口面积

为研究不同开口形状的碟式采光面对聚焦后能

表 1 几何模型 1 的参数

Table 1 Parameters for the geometric model 1

Apertures	Rim angle/(°)	Radius of circumscribed circle for apertures /m	Length of sides /m	Radius of receivers /m	Sun-earth distance /m	Radius of the sun /m
Circle	8.5291	0.4474	\	0.0142	96135	447.4358
Rectangle	10.6784	0.5607	0.7930	0.0143	120481	560.7481
Hexagon	9.3752	0.4920	0.4920	0.0143	105719	492.0421
Octagon	8.9870	0.4715	0.3609	0.0142	101314	471.5402

2.2 相同边缘角和开口面积

4 种几何模型的开口面积和边缘角均分别相等,仍以聚光比为 1000 倍的圆形开口面的参数为标准,即采光面开口面积为 0.6289 m^2 ,边缘角

表 2 几何模型 2 的参数

Table 2 Parameters for the geometric model 2

Parameters	Focal length /m	Radius of circumscribed circle for apertures /m	Length of sides /m	Radius of receivers /m
Circle	3.0000	0.4474	\	0.0142
Rectangle	3.7599	0.5607	0.7930	0.0178
Hexagon	3.2989	0.4920	0.4920	0.0156
Octagon	3.1617	0.4715	0.3609	0.0150

3 结果分析及讨论

据表 1 和表 2 的参数用 TracePro 建立几何模型并进行光线追迹。设太阳辐射为黑体辐射,其温度为 5762 K ,表面设为均匀发光型场,重点取样区域为与开口面外接圆半径相同的圆形区域。分别对相同开口面积、相同焦距和相同开口面积、相同边缘角的 4 种不同开口形状的碟式抛物面进行光线追迹,并获取反射面和接收面上的辐照能流密度,采样光线数变化范围为 $1 \sim 1 \times 10^6$ 条。图 2 中(a)~(d)即为光线追迹后 4 种形状开口面的反射面及其接收

量分布的影响,分别对开口面为圆形、矩形、正六边形和正八边形的抛物碟式聚光器建立几何模型,如图 1(c)所示。4 种几何模型的开口采光面积及焦距均相同,焦距设为 3 m ,开口采光面积与聚光比为 1000 倍的圆形开口面的抛物碟面相同。由(5)式迭代计算可知在边缘角为 8.5291° 和 88.4866° 时均能使聚光比达到 1000 倍,开口面积分别为 0.6289 m^2 和 107.2771 m^2 。所对应的几何模型参数本应有两个不同的值,但是在开口面积为 107.2771 m^2 时六边形和八边形开口的一个边缘角已超过 90° 。因此表 1 中只列出边缘角小于 90° 的一组数据,光学几何模型也根据表 1 中的参数来建立。

8.5291° ,其余参数据(4)~(7)式计算,结果如表 2 所示。因开口面积不变,所以日地距离和太阳半径与表 1 中相同。

面上的能流分布示意图。图 2 中反射面上的入射辐照值均在其几何中心处出现明显的衰减。这主要是由于接收器遮挡了入射光线所致,且无论何种开口形状的反射镜面,聚光后在接收面上的焦斑形状均为圆形,即与太阳发光表面形状相同。

可用面积效率因子的概念对开口面形状不同但面积相同的点聚焦式聚光器进行量化评价。以相同面积的圆形采光面的聚光比为标准,面积效率因子为

$$\kappa = \frac{C_v}{C_c} \times 100\%, \quad (8)$$

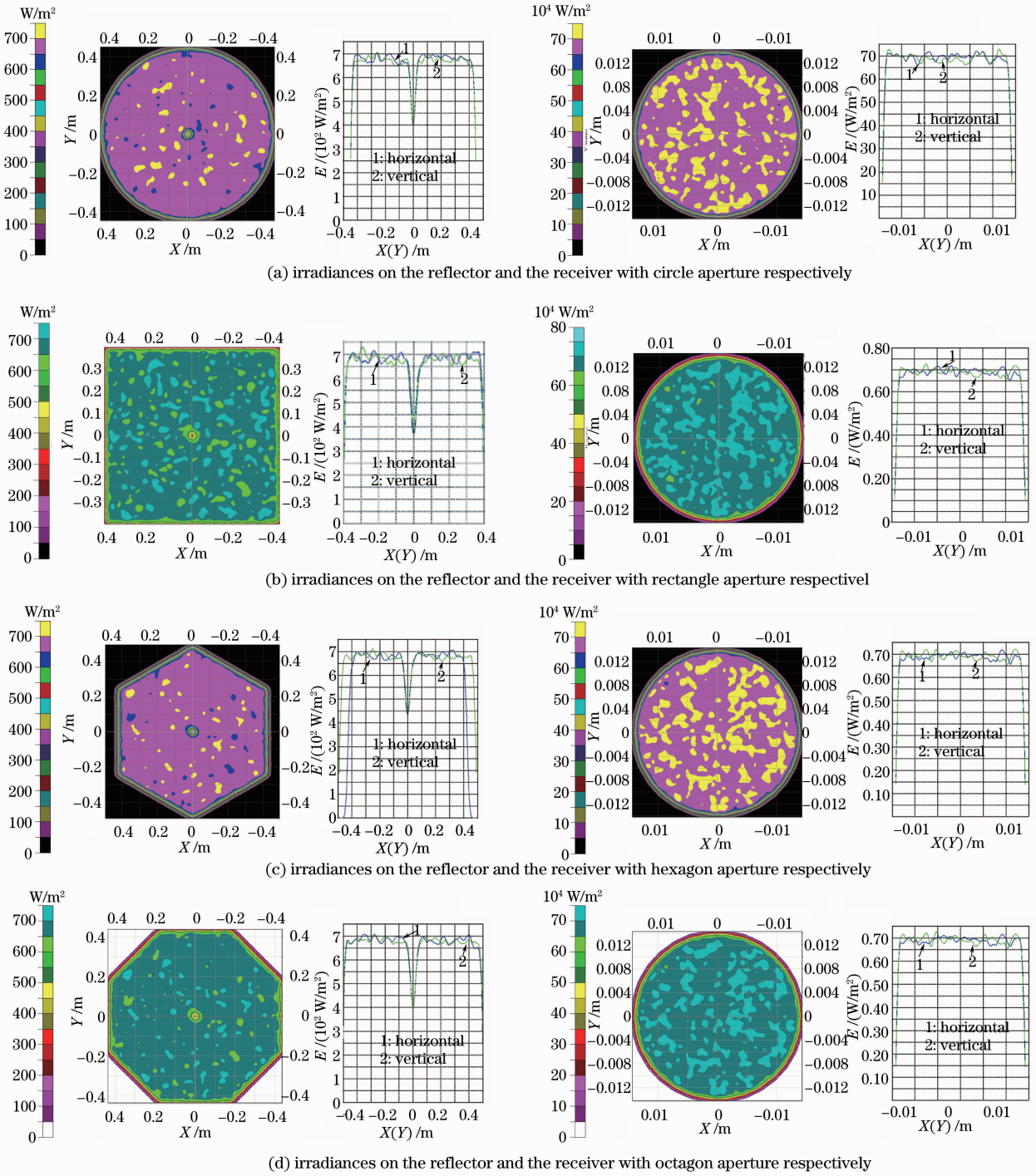


图 2 4 种不同形状采光面的反射面和接收器上的入射辐照分布示意

Fig. 2 Schematic of irradiation flux distribution on the reflector and the receiver for four different apertures

式中 κ 为聚光面积效率因子, C_c 和 C_o 分别为圆形开口面与其他形状开口面的聚光比。计算所得 κ 值可用于求出与某一聚光比的同面积圆形采光面所对应的 3 种不同形状采光面的聚光比。对模型进行光线追迹后, 分别随机选取 4 组结果列于表 3 中。由表 3 可见, 若开口采光面面积相同, 等焦距情况下的 3 种形状采光面所具有的聚光比均分别高于等边缘角

的情况。其中相同面积、相同焦距条件下的八边形采光面具有最高的面积效率因子, 为 99.7%; 矩形和六边形采光面稍低且相差不大, 分别为 99.2% 和 98.4%。但同面积同边缘角条件下的矩形采光面的面积效率因子最小, 为 64.3%, 而六边形和八边形虽较矩形采光面时有较大提高, 分别为 82.0% 和 90.0%, 但仍比同形状采光面在相同焦距时要低。

这是由于相同开口采光面积从太阳获得的太阳辐照相同,聚焦后均匀分布到由(6)式得到的接收面上,如表 1,2 所示,接收面积越大其光强平均值越小;相应的接收面积越小,其获得的光强平均值越大。等边缘角时,由(5)式知 3 种形状采光面的整个外接圆所产生聚光比相同。而由于采光面积的缩减导致聚

光比的降低,矩形缩减得最多,八边形缩减得最少,这正好与表 3 中聚光比的变化趋势相同。等焦距时,图 1(c)所示的 4 种形状采光面外接圆的聚光比虽分别为 1000,1551,1204 和 1108,但其外接圆裁剪为不同形状后,采光面积损失引起了聚光比的降低。

表 3 光线追迹对比情况

Table 3 Comparison of ray tracing

Same area and focal length						Same area and rim angle				
Apertures	Number of rays	Average irradiance	Average irradiance	Ratios of concentration	$\kappa / \%$	Number of rays	Average irradiance	Average irradiance	Ratios of concentration	$\kappa / \%$
		on the reflectors / (W/m ²)	on the receivers / (W/m ²)				on the reflectors / (W/m ²)	on the receivers / (W/m ²)		
Rectangle	19006	659.7	654410	992.0	99.2	39924	661.9	425770	643.2	64.3
	63420	660.6	655120	991.6		59888	661.8	425790	643.3	
	508836	662.6	657000	991.6		499143	662.0	425840	643.2	
	636190	662.7	657150	991.7		998311	662.0	425850	643.3	
Hexagon	16473	673.4	662760	984.2	98.4	41188	673.5	551950	819.5	82.0
	57737	674.3	663680	984.3		247478	674.4	552700	819.5	
	330499	675.5	664800	984.2		412751	674.6	553070	819.8	
	826657	675.8	665120	984.2		826167	675.4	553520	819.5	
Octagon	17907	665.8	663870	997.2	99.7	26896	667.4	600620	899.9	90.0
	71814	667.4	665550	997.3		269879	669.8	602680	899.7	
	359653	668.5	666630	997.2		449543	669.6	602340	889.6	
	899353	668.8	666800	997.1		899229	669.7	602440	899.6	

若将等焦距和等边缘角两种情况的接收器面积都改为与圆形采光面的相同,则由于接收器面积的减小,其对入射光线的遮挡作用将减弱,更多的光线能入射到镜面上,但是接收面积的减小也会导致接收反射光线的损失。修改前、后聚光效率因子的变化如图 3 所示。对于相同焦距的情况,接收面积减小不明显,追迹光线数较少时,并未因接收面积的减小而对光线数产生很大影响,接收面与反射面上的光线数仍相等。当追迹光线逐渐增多时,会有部分光线从接收面边上溢出。但是由于接收面积的减小及光线分布在边缘处较弱,仍然使得平均能流聚光比有所提高。对于等边缘角的情况,接收面积的减小使得镜面入射光线增多,也致使大量反射光线从接收面边缘溢出。但是接收面的平均辐照量有所提高,使得能流聚光比均提高 20 倍以上。当与圆形采光面所用接收面相同时,聚光比由大到小依次为同焦距的矩形、八边形、六边形、同边缘角的八边形、六边形和矩形。

综上所述,在采光面形状不易做成圆形时,采用

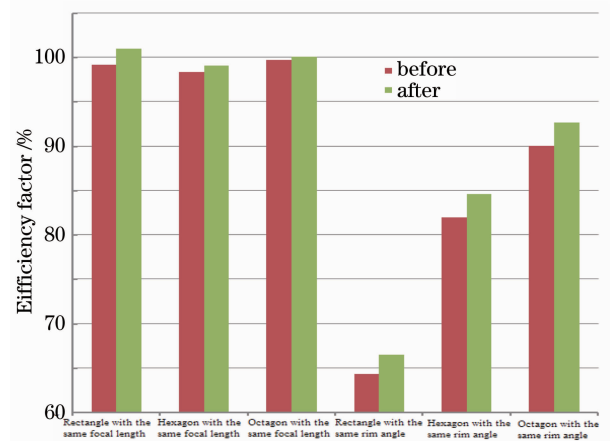


图 3 接收器面积增大前、后聚光比的对比

Fig. 3 Distinction of concentration ratio before and after expanding the area of receivers

等采光面积等焦距的八边形或矩形聚光器仍具有较理想的聚光特性,聚光面积效率因子较高。

4 设计实例

实际太阳能聚光应用中,常需要高倍聚光比的

反射器,但反射面在制作过程中由于受玻璃成型、模具加工等工艺的限制,高精度的大曲率抛物反射面生产仍有较大难度,制作加工成本也较高。而低倍聚光的小曲率抛物镜面较易制作,也较容易达到要求精度。通过分析可知,矩形开口面的抛物聚光器具有较高面积效率因子,相互之间也较易连接、安装,易于模块化生产应用;且采用同样的反射镜面,生产时仅需一个模具,利于降低生产成本。因此本文采用9个相同的矩形开口面聚光器组合来近似达到1000倍以上的聚光比,子反射镜面的开口面积和焦距与150倍聚光的圆形采光面聚光器相同,各子反射镜的焦点都在焦距为3 m处的同一位置。组合后的多碟共焦聚光器模型如图4所示,图5为9碟共焦聚光器实物图。

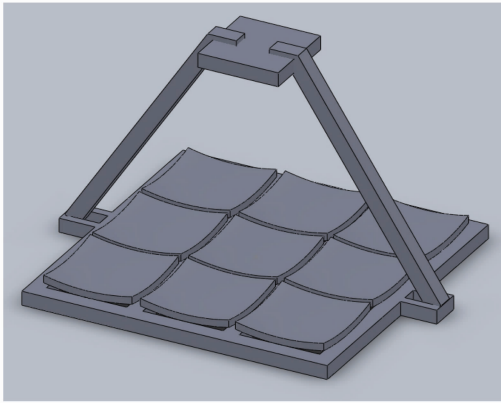


图4 多碟共焦太阳能聚光器模型

Fig. 4 Model of the solar confocal concentrator of multiple panels

接收器焦平面处的能量是各子反射镜聚光后能量的叠加,除中心反射镜外,其余各子反射镜开口平面并不与接收平面相平行,因而可能会导致聚光后的最大能流密度点不在原焦点处,焦斑面积也会发生变化。对组合系统建立几何模型,并用光线追迹法进行模拟,多反射镜组合共焦聚光器接收面上能流密度随焦距变化的情况如图6所示。本文设计的多碟共焦系统,焦距无明显改变,仍在3 m处出现最大峰值能流密度,并以3 m处为对称中心,焦距增大或减小均引起能流密度的降低。图7所示为接收器半径变化所引起的焦平面上能流密度及其所截获总能量的变化。由于各子反射镜聚光的叠加,会引起能流密度分布的不均匀,焦斑中心处能流密度最大,而周围较弱,如图8所示。接收面积缩小,得到的平均能流密度增大,光强分布越均匀,但是所截获的总光能便会减小,要使聚光器有较好的聚光均匀性就要保证有较大的平均能流密度,但同时又要

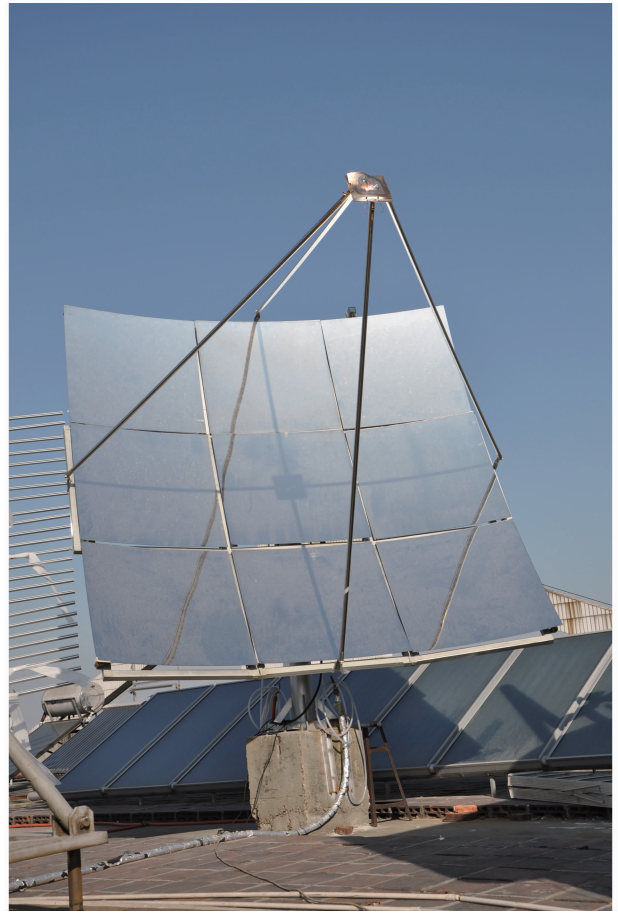


图5 多碟共焦太阳能聚光器实物

Fig. 5 Photograph of the solar confocal concentrator of multiple panels

尽量减少光能损失。图7中两条曲线交点所对应的接收器半径为最佳接收半径,既能使接收器截获反射聚光后98%的光能,又可获得 0.88 MW/m^2 的平均能流密度,此处半径为0.0141 m。该多碟共焦反射器9块反射面上接收到的平均辐照强度均为 661.89 W/m^2 ,而半径为0.0141 m的接收器上接收

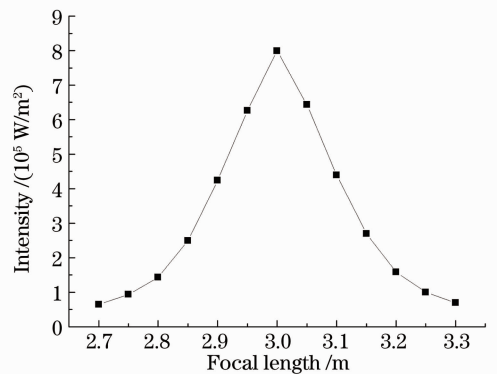


图6 焦距变化与能量分布的关系

Fig. 6 Relation between focal lengths and flux distributions

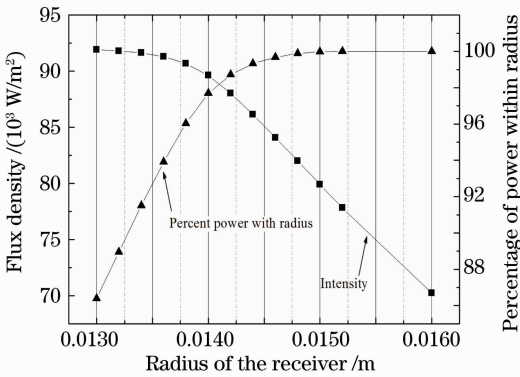


图7 接收器半径与能流密度、通量的关系

Fig. 7 Relation among flux density, percentage of power within radius and radius of the receiver

到的辐照强度为 884285 W/m², 由此可知多碟组合后的聚光比约为 1336 倍。实际应用中由于镜面误差、方向误差等因素的存在, 聚光比将会降低。

为对比多碟共焦聚光器性能, 采用与上述 9 碟共焦聚光器总面积相同的单碟矩形开口聚光反射镜, 且焦距仍为 3 m, 但接收器半径为 0.0145 m 时才能截获所有反射光线。经光线追迹模拟, 反射镜面和接收器上的平均辐照强度分别为 662.57 W/m² 和 859820 W/m², 聚光比约为 1298 倍, 比同面积 9 碟共焦

聚光器的聚光倍率要低约 2.84%。若仍采用 0.0141 m 的接收器半径, 由于接收面积的减少, 接收器上的平均辐照强度增加为 902190 W/m², 聚光比约为 1362 倍, 聚光比比同面积的 9 碟共焦聚光器只高了约 1.95%, 而光通量损失和均匀性变化几乎可忽略。若采用与上述 9 碟共焦聚光器聚光比相同且接收面半径仍为 0.0141 m 的单碟矩形开口聚光反射镜, 光线追迹后, 反射光在接收器上分布均匀, 但焦距和开口面积比 9 碟组合聚光器分别减少了 2.67% 和 2.38%。可见, 单碟式聚光器与多碟共焦组合聚光器相比, 虽采用了独立镜面, 但采光面积并无显著减少, 同聚光比下也只减少了 2.38%, 而正是多碟组合聚光器各子碟间的缝隙, 使其能在抗风性上弥补了面积上的劣势。等开口面积时, 单碟聚光器的聚光倍率提高也不明显, 而对于多碟组合聚光器提高聚光比只需增加子碟个数即可大幅提高聚光倍率。同时随着追迹光线数量的增多, 多碟组合聚光器接收面上的光强分布均匀性有所改善, 最大偏差逐渐减小, 而实际生产应用中, 各子碟反射光线的不均匀性在接收面处相叠加, 正好能使其能流分布峰、谷相消, 产生比单碟更好的聚光效果。

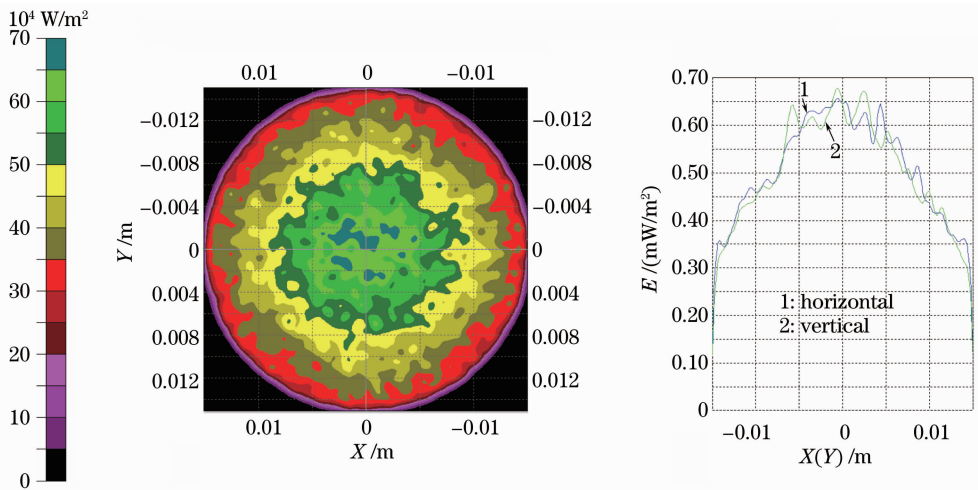


图8 多碟共焦太阳能聚光器接收面能流分布

Fig. 8 Flux distribution on the receiver of the solar confocal concentrator of multiple panels

5 结 论

通过建立有张角的太阳模型及等焦距、等边缘角的等面积开口采光面碟式聚光模型, 并采用直观的光线追迹方法对影响碟式太阳能聚光特性的几何因素进行分析和比较, 结果表明:

- 1) 若开口采光面积相同, 当圆形、矩形、六边形

和八边形 4 种形状开口面的碟式聚光器具有与 1000 倍聚光比的圆形开口面聚光器相等的焦距时, 4 种聚光器的能流聚光比差距很小, 面积效率因子大小依次为圆形、八边形、矩形和六边形。

- 2) 若开口采光面积相同, 4 种不同形状开口面的聚光器具有与 1000 倍聚光比的圆形开口面相等的边缘角时, 矩形、六边形和八边形采光面的碟式聚

光器能流聚光比较同焦距时有较大衰减面积效率因子大小依次为八边形、六边形和矩形。

3) 若开口采光面积相同,接收器面积与圆形开口面聚光器 1000 倍聚光比时接收面积相等时,则等焦距和等边缘角情况下接收器上的平均能流密度都有所提高。开口面积相等时,可用焦距相等的矩形或八边形聚光器代替,仍然聚光较高的面积效率因子。

4) 用 9 个矩形开口面的子碟组合成的多碟共焦聚光器,仍在 3 m 焦距处有峰值能流密度,接收器半径为 0.0141 m 时有最佳接收效果。

参 考 文 献

- 1 O. A. Jaramillo, C. A. Pérez-Rábago, C. A. Arancibia-Bulnes *et al.*. A flat-plate calorimeter for concentrated solar flux evaluation[J]. *Renewable Energy*, 2008, **33**(10): 2322~2328
- 2 Peter D. Jones, Wang Lili. Concentration distributions in cylindrical receiver/paraboloidal dish concentrator systems[J]. *Solar Energy*, 1995, **54**(2): 115~123
- 3 Chen Chifeng, Lin Chihhao, Jan Huangtung. A solar concentrator with two reflection mirrors designed by using a ray

- tracing method[J]. *Optik*, 2010, **121**(11): 1042~1051
- 4 Shuai Yong, Xia Xinlin, Tan Heping. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems [J]. *Solar Energy*, 2008, **82**(1): 13~21
- 5 Du Shenghua, Xia Xinlin, Tang Yao. Numerical investigation on effects of non-parallelism of solar rays on concentrating solar power[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006, **27**(4): 388~393
- 杜胜华, 夏新林, 唐 尧. 太阳光不平行度对太阳能聚集性能影响的数值研究[J]. *太阳能学报*, 2006, **27**(4): 388~393
- 6 Liu Ying, Dai Jingming, Lang Zhiguo *et al.*. Finite-element analysis for flux distribution on focal plane of rotating parabolic concentrators[J]. *Acta Optic Sinica*, 2007, **27**(10): 1775~1778
- 刘 颖, 戴景民, 郎治国等. 旋转抛物面聚光器焦面能流密度分布的有限元分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1775~1778
- 7 A. Kribus, D. Kaftori, G. Mittelman *et al.*. A miniature concentrating photovoltaic and thermal system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, **47**(20): 3582~3590
- 8 G. Johnston, K. Lovegrove, A. Luzzi. Optical performance of spherical reflecting elements for use with paraboloidal dish concentrators[J]. *Solar Energy*, 2003, **74**(2): 133~140
- 9 K. Lovegrove, G. Burgess, J. Pye. A new 500 m² paraboloidal dish solar concentrator [J]. *Solar Energy*, 2011, **85**(4): 620~626
- 10 John A. Duffie, William A. Backman. *Solar Engineering of Thermal Processes*[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1980. 307~320

栏目编辑: 谢 婧