

# 多平面镜线性组合太阳能聚光器的设计和聚光特性

王云峰<sup>1</sup> 季杰<sup>2\*</sup> 李明<sup>1</sup> 陈海飞<sup>3</sup>

<sup>1</sup>云南师范大学太阳能研究所, 云南昆明 650500

<sup>2</sup>中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230026

<sup>3</sup>常州大学石油工程学院, 江苏常州 213000

**摘要** 提出了一种新型多平面镜线性组合太阳能聚光器的聚光光伏系统,应用几何分析法计算影响聚光器光学效率的几何参数因子。采用最小设计间距和余弦效率的概念,得出了不同子镜面尺寸和不同子镜面数量与焦距长短的相互影响规律,得到了最小设计间距值和最优的余弦效率。利用TracePro软件建立了聚光器的仿真模型,并对不同几何参数下焦平面上的能流分布特性进行了模拟研究。制作了一套450倍聚光的多平面镜线性组合太阳能聚光器,并进行初步测试,证实聚光焦平面上的能流分布均匀性可达到预期设计效果,为点聚光式太阳能聚光系统的设计和优化提供了参考。

**关键词** 光学设计; 碟式聚光器; 多平面镜; 最小设计间距; 余弦效率; 能流分布

中图分类号 TK513.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0422002

## Performance Analysis and Design of Multi-Plane Mirrors Linear Combination Solar Concentrator

Wang Yunfeng<sup>1</sup> Ji Jie<sup>2</sup> Li Ming<sup>1</sup> Chen Haifei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China

<sup>2</sup>Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Anhui, Hefei 230026, China

<sup>3</sup>School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213000, China

**Abstract** A new multi-plane mirrors linear combination solar concentrator is proposed for concentrating photovoltaic system. Based on the new concentrator, the geometric concentrator parameters that affect the optical performance are studied using analytic geometry method. The concepts of the minimum design spacing and cosine efficiency are proposed. The interactional condition between focal length and different sizes of sub-mirror, as well as between focal length and different numbers of sub-mirror investigated, and the optimization of the minimum design spacing and cosine efficiency are given. A model developed by TracePro software is used to obtain the flux distribution of the focal plane at different simulation parameters. An experimental prototype concentrator with 450× suns is fabricated and preliminary tested, the operation shows that the effect is obvious and the expected results is arrived. The simulation results can present a useful reference for design and optimization of the solar concentrator.

**Key words** optical design; dish concentrator; multi-plane mirror; minimum design spacing; cosine efficiency; flux distribution

**OCIS codes** 220.4298; 350.6050; 080.2740

收稿日期: 2015-10-19; 收到修改稿日期: 2015-11-18

基金项目: 国家863计划(2013AA050403)、国家自然科学基金(51466017)、云南省科技计划(2014FD015)、中国博士后科学基金(2014M562349)

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

\*通信联系人。E-mail: jijie@ustc.edu.cn

## 1 引 言

太阳能高倍聚光技术由于较易获得高温和大能流密度,有相对较高的太阳能利用效率,因而被广泛应用于太阳能热发电和聚光光伏领域中。近年来,光伏电池新工艺和新材料迅速发展,更低成本、更高效的多结Ⅲ-V族太阳能电池使人们的眼光重新回到光伏发电上来。在1000倍聚光条件下,GaAs电池仍具有较高的光电转化效率,但是聚光均匀性对其发电性能的影响仍然不可忽视。因此,一个具有较高光学效率和良好聚光均匀性的太阳能聚光器是高效利用聚光光伏技术的首要条件,国内外研究者在该方面也做了大量的研究工作。为了获得均匀的聚光能流,本课题组之前设计了一种多碟共焦的碟式抛物型聚光器,用低聚光比抛物反射镜组合成高聚光比聚光器,并达到均匀聚光的目的<sup>[1]</sup>。周希正等<sup>[2]</sup>也采用类似工作原理,研制了一种固定式条形镜面太阳能聚光装置,用离散化的条形镜面来近似圆柱面聚光镜。荆雷等<sup>[3]</sup>针对聚光光伏系统利用几何光学柯勒照明原理设计了一种不增加二次匀光器件的聚光镜,聚光效率可达90%以上。而杨光辉等<sup>[4]</sup>则通过二次光学元件来提高聚光光斑的均匀性,使太阳能电池的输出功率提高了16%。在对聚光接收面上辐射能流密度均匀性的研究上,马宏财等<sup>[5]</sup>从理论上进行了分析和优化设计。陈飞等<sup>[6]</sup>则研究了聚光接收器位置对其聚光效率和集热温度的影响。Nilsson等<sup>[7]</sup>提出了不同反射面结构的3种抛物面聚光器,同时获得了更高的聚光比。Friedman等<sup>[8]</sup>则采用了一种两级的紧凑型抛物碟式设计结构,聚光比几乎能达到热力学极限。Zou等<sup>[9]</sup>设计了一种能够适用于高倍聚光光伏模块的新型太阳能聚光器,实现了光伏模块上的均匀聚光。尽管上述聚光器都能使光伏电池获得均匀聚光,但是存在聚光比和聚光光斑面积在聚光器设计制作完成后无法调节的问题。如果焦平面处的接收器面积增大或减小,或者有一半面积的接收器需要500倍的聚光比,而另一半面积的接收器需要1000倍的聚光比,那么传统的聚光器将无法满足要求。此外,生产成本也是传统抛物聚光器未能广泛应用的一个因素,并且随着聚光效率的提高,生产成本会大幅提高<sup>[10]</sup>。如果能采用离散的平面镜单元去近似构成一个连续的抛物碟式镜面,就能极大地降低生产成本,同时还有可能获得更大范围的聚光比<sup>[11]</sup>。

本文设计制作了一种新的多平面镜线性组合太阳能聚光器,它由传统的低成本商用小平面对镜组合而成,极大降低了制作高精度抛物面镜的生产成本,容易实现均匀高倍聚光及聚光比和聚光面积的调节。采用几何分析法并利用基于蒙特卡罗原理的TracePro软件,分析了聚光器的光学性能,给出了该种聚光器的最优设计参数,根据分析计算结果制作完成了一套用于GaAs聚光发电的太阳能聚光器,并进行了初步测试。

## 2 几何模型及理论计算

所设计的聚光器聚光比为450倍,焦平面处接收器面积为 $10\text{ cm}^2$ ,采用450块单位面积为 $10\text{ cm}^2$ 的矩形小平面对镜组合在一个平面框架上构成聚光器,其中每块小平面对镜都将入射到其反射面上的太阳光反射到中心焦平面处,实现聚光光强的线性叠加。若需将聚光比从450倍增加到600倍,则可在平面框架上增加150块平面镜,并将它们的反射光线调整到焦平面处即可。该多平面镜线性组合太阳能聚光器结构原理如图1所示。



图1 多平面反射镜线性组合太阳能聚光器原理图

Fig.1 Schematic of multi-plane mirrors linear combination dish solar concentrator

为研究多平面镜线性组合太阳能聚光器的光学特性,建立  $x$ 、 $y$  和  $z$  的三维坐标系,考虑到坐标对称性,仅取坐标系中  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴正方向所围的象限区域进行讨论,如图 2 所示。其中  $O$  为坐标原点,位于整个平面镜场的中心位置, $F$  点是位于  $z$  轴上的焦平面中心点, $F$  点坐标为  $(0,0,f)$ ,其中  $f$  为该聚光器的焦距长度, $P$  为镜场中某一块平面镜的中心点,其坐标为  $(x_n, y_m, f_z)$ 。

$$x_n = (n-1)(a+L), \quad (1)$$

$$y_m = (m-1)(a+L), \quad (2)$$

式中  $n$  为从坐标原点往  $x$  轴正方向数的镜面个数, $m$  为从坐标原点往  $y$  轴正方向数的镜面个数, $f_z$  为小平面对镜支撑杆的高度, $L$  为矩形小平面对镜的边长, $a$  为各镜面之间的间距。 $S_p$  为  $P$  点处太阳入射光线的单位方向向量,以  $P$  点到太阳的方向为正,表示为  $(0,0,1)$ ; $R_p$  为  $P$  点处太阳反射光线的单位方向向量,以向焦点处为正, $i, j, k$  是  $x, y$  和  $z$  轴上与坐标轴正向同向的单位向量,可由下式计算得到

$$R_p = \frac{F-P}{\|F-P\|} = \frac{-x_n i - y_m j + (f-f_z) k}{\sqrt{x_n^2 + y_m^2 + (f-f_z)^2}}, \quad (3)$$

$N_p$  为  $P$  点处镜面的单位法向量,由镜面反射法则得

$$N_p = \frac{R_p + S_p}{2 \cos \theta_p}, \quad (4)$$

式中  $\theta_p$  为  $P$  点处太阳光线的入射角,其满足下式

$$\cos \theta_p = \frac{\|R_p + S_p\|}{2}. \quad (5)$$

反射光线、法线单位向量  $R_p, N_p$  又可表示为

$$R_p = x_{R_p} i + y_{R_p} j + z_{R_p} k, \quad (6)$$

$$N_p = x_{N_p} i + y_{N_p} j + z_{N_p} k, \quad (7)$$

式中  $x_{R_p}, y_{R_p}$  和  $z_{R_p}$  分别为向量  $R_p$  与  $x, y$  和  $z$  轴所成夹角的余弦值; $x_{N_p}, y_{N_p}$  和  $z_{N_p}$  分别为向量  $N_p$  与  $x, y$  和  $z$  轴所成夹角的余弦值。

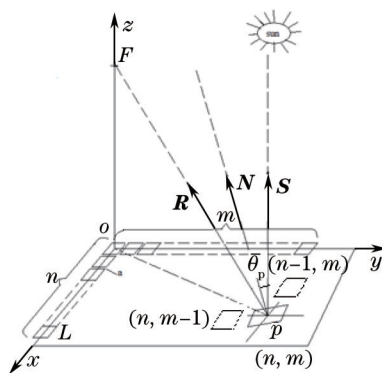


图 2 平面镜场坐标系

Fig.2 Coordinate of plane mirrors field

镜场中任何坐标处的各平面镜都必须向中心焦点处倾斜,完整地入射到其表面的太阳光反射到焦平面处,既不被前排镜面遮挡,又不遮挡后排镜面的反射光,因此各镜面之间必须保持一定间距,才能避免相邻镜面反射光线的互相遮挡。为描述镜场中相邻两镜面的位置关系,分析如图 3(a)和(b)所示的三维和二维坐标系模型。图中  $M$  为离镜场中心位置  $O$  较近的某块镜面的中心点,而  $M'$  为与其相邻且距镜场中心  $O$  稍远处的一块镜面中心点, $M$  和  $M'$  连线所在直线即为两镜面在  $y$  方向上的中心轴,即无论两块镜面怎么倾斜,该中心对称轴在  $xoy$  平面上的投影始终与  $y$  轴平行; $Q$  和  $Q'$  分别为两镜面相邻两条边的边缘中点。镜场阵列设计时,应保证相邻镜面最小间距  $a$  大于某值,才能使离中心点较远处的一块镜面反射到焦点处的光线不被其前靠近中心点处的一块镜面所遮挡,即如图 3(b)所示,当  $Q'$  点处的反射光线单位向量  $R_{Q'}$  与  $y$  轴正向所成角度

小于  $\overline{Q'Q}$  连线与  $y$  轴正向所成角度时,前一镜片才不会对后一镜面的反射光线产生遮挡。由(5)式和图 3 易知,平面镜场阵列中最外层镜面的入射角最大,其受相邻镜面的干扰也越大,使相邻镜面反射光不被遮挡的镜面间距  $a$  也应最大。为了使加工制作及安装方便,将整个镜阵中各镜面之间的间距设计为统一值,将其定义为镜阵最小设计间距,大小由最外围边缘处一块镜面与它周围镜面互不遮挡的最小间距决定。例如图 2 中的  $n \times m$  阵列,应取第  $(n,m)$  与  $(n,m-1)$ 、 $(n-1,m)$  块镜面坐标来计算其最小设计间距  $a$ 。

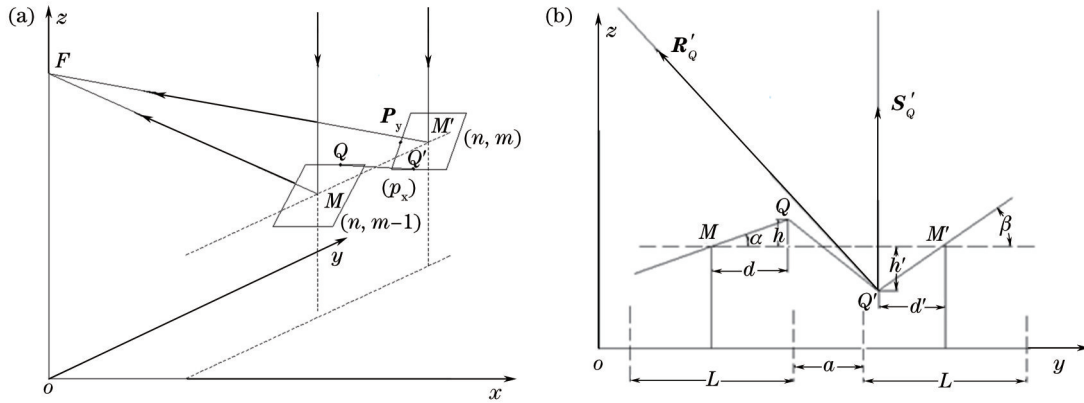


图 3 镜面阵列前后遮挡坐标模型。(a) 三维坐标系; (b) 二维坐标系

Fig.3. Geometric occlusion model of two adjacent mirrors in a mirror field. (a) Three-dimensional system of coordinate; (b) two-dimensional system of coordinate

现取第  $(n,m)$  块镜面建立模型,根据向量几何关系,第  $(n,m)$  块镜面与  $y$  轴所成夹角的余弦值为

$$v = \cos \beta = \cos \left[ \arccos(y_{N_Q}) - \frac{\pi}{2} \right], \quad (8)$$

式中,  $y_{N_Q}$  是点  $Q'$  的法向向量  $N_Q$  与  $y$  轴所成夹角。同样,第  $(n,m)$  块镜面与  $x$  轴所成夹角的余弦值为

$$u = \cos \alpha = \cos \left[ \arccos(x_{N_Q}) - \frac{\pi}{2} \right], \quad (9)$$

式中,  $x_{N_Q}$  是点  $Q'$  的法向向量  $N_Q$  与  $x$  轴所成夹角。则第  $(n,m)$  块镜面靠近  $x$  和  $y$  轴的边的中心点坐标分别为

$$P_x = (n-1)(a+L)\mathbf{i} + \left[ (m-1)(a+L) - \frac{L}{2}v \right] \mathbf{j} + \left( f_z - \frac{L}{2}\sqrt{1-v^2} \right) \mathbf{k}, \quad (10)$$

$$P_y = \left[ (n-1)(a+L) - \frac{L}{2}u \right] \mathbf{i} + (m-1)(a+L)\mathbf{j} + \left( f_z - \frac{L}{2}\sqrt{1-u^2} \right) \mathbf{k}, \quad (11)$$

式中,  $P_x$  即为图 3 中  $Q'$  点的坐标值,同理可求出第  $(n,m-1)$  块镜面离  $x$  较远的边的中心点坐标,即为图 3 中的  $Q$  点。从而得到向量  $\overline{Q'Q}$  的单位向量为

$$\overline{Q'Q} = \frac{Q - Q'}{\|Q - Q'\|} = x_{\overline{Q'Q}}\mathbf{i} + y_{\overline{Q'Q}}\mathbf{j} + z_{\overline{Q'Q}}\mathbf{k}, \quad (12)$$

式中,  $x_{\overline{Q'Q}}$ 、 $y_{\overline{Q'Q}}$  和  $z_{\overline{Q'Q}}$  分别是向量  $\overline{Q'Q}$  与  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴所成夹角的余弦值。

逐渐增大间距  $a$  的值,直到满足下列条件

$$\arccos(y_{R_Q}) \leq \arccos(y_{\overline{Q'Q}}), \quad (13)$$

此时的间距  $a$  即为满足条件的最小值,式中  $y_{R_Q}$  是  $Q'$  点的反射光线向量  $R_Q$  与  $y$  轴所成夹角的余弦值。

### 3 计算结果分析与讨论

#### 3.1 焦距对聚光器性能影响

为定量描述该多平面镜线性组合太阳能聚光器的性能,借鉴塔式定日镜场中的余弦效率表达<sup>[12]</sup>,同样定义该平面反射镜阵中的余弦效率,即各镜面太阳光线入射角(或反射角)的余弦值。余弦效率的大小反映了镜场中镜面利用率和光学效率的高低。对于镜面数目为  $23 \times 23$  的阵列,当焦距  $f$  为 3000 mm 且单块镜面尺寸为  $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$  时,图 2 所示镜场坐标一个象限内的余弦效率变化如图 4 所示。

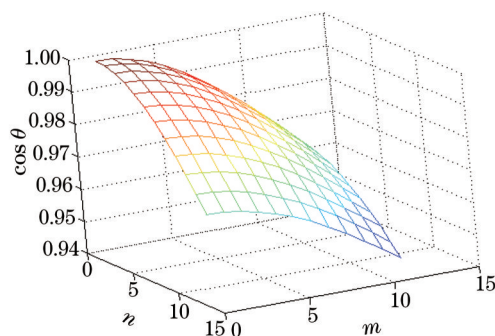


图4 镜阵内余弦效率变化示意图

Fig.4 Variation of cosine efficiency in a mirror field

由图4可知镜场中最低余弦效率位于镜场外围角落上。当焦距 $f$ 变化时,根据(1)~(11)式计算得到镜阵中镜面的最小余弦效率和镜阵最小设计间距的变化。子镜面尺寸由140 mm×140 mm逐渐递增到220 mm×220 mm,焦距 $f$ 也从2000 mm递增到6000 mm,由图5可知,尽管镜面尺寸大小不同,但是镜阵最小间距和最小余弦效率变化趋势相同,镜阵最小间距 $a$ 都随着焦距 $f$ 的增加而逐渐减小,而余弦效率 $\cos\theta$ 则随焦距 $f$ 的增大逐渐趋于1。即在同一规模的镜阵中(聚光比固定),焦距 $f$ 越大,其镜阵设计最小间距越小,即镜阵总体开口采光面越小,越节省空间,而余弦效率越大,将使得有效焦斑处的光强越强。由图5还可知,当焦距 $f$ 不变时,镜阵中的镜面尺寸越小,镜阵最小设计间距 $a$ 也越小,但最小余弦效率越大。

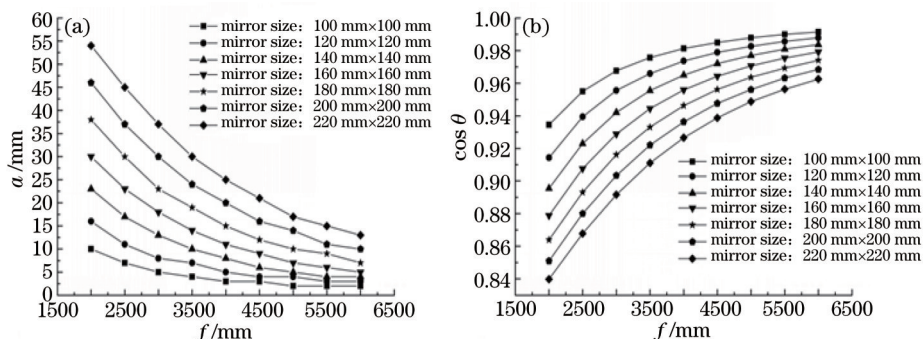


图5 (a) 不同镜面尺寸下最小设计间距随焦距变化; (b) 不同镜面尺寸下光线入射角余弦值随焦距变化

Fig.5 (a) Change of minimum design spacing over focal length with different mirror sizes;

(b) change of incidence angle cosine over focal length with different mirror sizes

### 3.2 镜阵规模对聚光器性能影响

镜阵中的镜面数量多少对镜阵的最小设计间距 $a$ 以及最小余弦效率都有影响。当单块镜面尺寸为140 mm×140 mm时,镜阵中镜面数量变化引起的镜阵最小设计间距 $a$ 和最小余弦效率变化情况如图6所示。在同一焦距,镜阵中的镜面数量从225块增加到1225块时,镜阵的最小设计间距随着镜面数量的增加而加大,从4 mm增加到19 mm,而最小余弦效率却随着镜面数量的增加而减小,从0.98减小到了0.91。但随着焦距的增加,不同镜面数量的镜阵最小设计间距都减小,而镜阵最小余弦效率都增大。

由图5、图6可看出,对于多平面反射镜聚光器,焦距越长,其镜阵中镜面最小设计间距越小,整个聚光器镜阵的采光面面积也越小,这能节省镜阵所占空间;焦距越长,其镜阵中各镜面的余弦效率越大,整个聚光器镜阵的光学有效利用率也越大,有效焦平面处的能量越大。但是,过长的焦距也会给多平面聚光器带来不利的影响。例如,焦距越长,意味着光线经平面镜反射后到达焦平面的光程变长,因空气中粉尘等颗粒的存在,光程越长,光线在传播过程中损失的能量越多。其次,焦距越长,镜阵采光面积越小,当聚光器镜阵采光面在跟踪太阳光线过程中与地面有较大倾角时,整个聚光装置的重心将严重偏向焦平面处,这加大了装置巡日部件的工作难度,也对装置的机械强度和平衡性提出了较高要求。另外,由于发电/换热设备安装于焦平面处,过长的焦距也不便于设备的安装和操作。

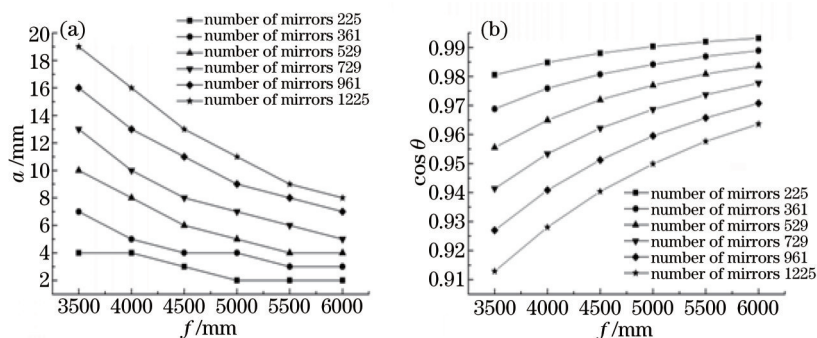


图 6 (a) 不同镜面数目下最小设计间距随焦距变化; (b) 不同镜面数目下光线入射角余弦值随焦距变化

Fig.6 (a) Change of minimum design spacing over focal length with different number of mirrors;

(b) change of incidence angle cosine over focal length with different number of mirrors

因此该种聚光器应根据焦平面处聚光电池尺寸大小,选择合适的镜阵镜面尺寸,具体的焦距长度则根据上述分析,确保实际工作中的镜面开口采光面积恰当,以及保证镜阵有较高的余弦效率。

#### 4 焦平面接收器处的能流分布分析

对于多平面镜线性组合太阳能聚光器,太阳入射光线经各小镜面反射到焦点处,即焦平面接收器处的光斑是聚光器镜阵中各镜面反射光线的叠加,由于接收器平面与各反射镜面不平行,即余弦效率有差别,导致在焦平面处的光斑面积与反射镜面面积不一致,焦平面处的光强能流分布并不是简单的镜面数量的线性叠加,会有少量损失。如图 7 所示,焦平面处的接收器平面与聚光器开口采光面平行,而反射镜与接收器不平行,当垂直采光面入射的太阳光经镜面反射到焦平面时,会使得焦斑宽度  $W$  大于镜面宽度  $L$ ,其关系式如下

$$w' + \frac{L}{2} + \frac{L}{2} + w'' = W = \frac{L}{\cos\theta}, \quad (14)$$

式中  $W$  为焦斑在焦平面处的宽度,  $\theta$  为反射光线入射角,  $w'$  和  $w''$  分别为焦斑在坐标中心对称轴两侧超过镜面半个边长  $L/2$  的部分。

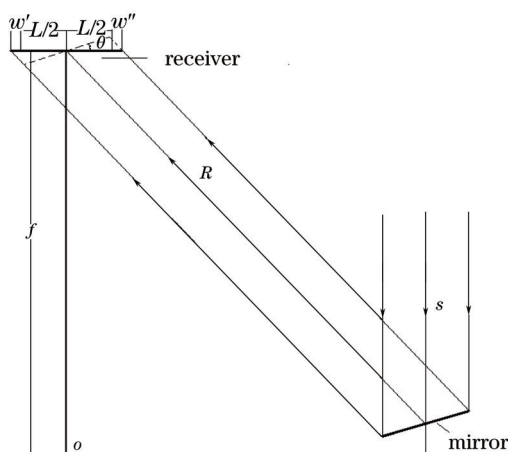


图 7 平面镜反射光路示意图

Fig.7 Schematic diagram of reflection light path from mirror

利用 TracePro 软件建立模型,模拟分析聚光后焦平面上的能流分布情况。所建多平面镜线性组合太阳能聚光器模型由 529 块尺寸为  $140\text{ mm} \times 140\text{ mm}$  的方形平面反射镜镜阵组成,反射镜面按 23 排  $\times$  23 列组成镜阵,接收器位于整个镜阵中心位置正上方  $3000\text{ mm}$  处。将镜场分为对称的 4 个部分,分别位于图 2 中平面坐标  $xoy$  的 4 个象限,原点位于镜阵中心处镜面的中心点上,  $x$  轴与第 12 排的镜面中心轴相重合,  $y$  轴与第 12 列的镜面中心轴相重合,  $z$  轴过镜阵中心点和接收器中心点。根据对称性,只模拟第二象限内的镜面反射光强分布情况,其中各镜面倾角由(1)~(5)式计算得出,如表 1 和表 2 所示,表中  $m$  代表列数,从原点开始向  $y$  轴正向计数;  $n$  代表行数,从原点开始向  $x$  轴正向计数。

表1 第二象限各镜面与y轴所成角度

Table 1 Angles formed between each mirror and axis y in the second quadrant

$m \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	1.4507	2.8941	4.3228	5.7302	7.1102	8.4573	9.7670	11.0355	12.2601	13.4388	14.5703
2	0	1.4493	2.8913	4.3187	5.7249	7.1037	8.4497	9.7584	11.0262	12.2500	13.4281	14.5591
3	0	1.4452	2.8831	4.3066	5.7090	7.0844	8.4272	9.7331	10.9983	12.2200	13.3962	14.5257
4	0	1.4384	2.8696	4.2866	5.6829	7.0525	8.3901	9.6913	10.9523	12.1705	13.3437	14.4707
5	0	1.4290	2.8510	4.2591	5.6470	7.0087	8.3391	9.6338	10.8891	10.1023	13.2713	14.3948
6	0	1.4172	2.8277	4.2246	5.6019	6.9537	8.2750	9.5615	10.8096	12.0165	13.1801	14.2993
7	0	1.4033	2.8001	4.1838	5.5485	6.8885	8.1990	9.4757	10.7150	11.9144	13.0716	14.1853
8	0	1.3875	2.7686	4.1372	5.4875	6.8141	8.1121	9.3775	10.6069	11.7974	12.9470	14.0545
9	0	1.3699	2.7338	4.0856	5.4199	6.7315	8.0156	9.2684	40.4865	11.6671	12.8082	13.9085
10	0	1.3509	2.6960	4.0297	5.3466	6.6419	7.9109	9.1499	10.3555	11.5252	12.6568	13.7490
11	0	1.3507	2.6559	3.9702	5.2686	6.5463	7.7991	9.0233	10.2155	11.3733	12.4946	13.5779
12	0	1.3095	2.6137	3.9078	5.1867	6.4460	7.6816	8.8900	10.0679	11.2130	12.3231	13.3968

表2 第二象限各镜面与x轴所成角度

Table 2 Angles formed between each mirror and axis x in the second quadrant

$n \backslash m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	1.4507	2.8941	4.3228	5.7302	7.1102	8.4573	9.7670	11.0355	12.2601	13.4388	14.5703
2	0	1.4493	2.8913	4.3187	5.7249	7.1037	8.4497	9.7584	11.0262	12.2500	13.4281	14.5591
3	0	1.4452	2.8831	4.3066	5.7090	7.0844	8.4272	9.7331	10.9983	12.2200	13.3962	14.5257
4	0	1.4384	2.8696	4.2866	5.6829	7.0525	8.3901	9.6913	10.9523	12.1705	13.3437	14.4707
5	0	1.4290	2.8510	4.2591	5.6470	7.0087	8.3391	9.6338	10.8891	10.1023	13.2713	14.3948
6	0	1.4172	2.8277	4.2246	5.6019	6.9537	8.2750	9.5615	10.8096	12.0165	13.1801	14.2993
7	0	1.4033	2.8001	4.1838	5.5485	6.8885	8.1990	9.4757	10.7150	11.9144	13.0716	14.1853
8	0	1.3875	2.7686	4.1372	5.4875	6.8141	8.1121	9.3775	10.6069	11.7974	12.9470	14.0545
9	0	1.3699	2.7338	4.0856	5.4199	6.7315	8.0156	9.2684	40.4865	11.6671	12.8082	13.9085
10	0	1.3509	2.6960	4.0297	5.3466	6.6419	7.9109	9.1499	10.3555	11.5252	12.6568	13.7490
11	0	1.3507	2.6559	3.9702	5.2686	6.5463	7.7991	9.0233	10.2155	11.3733	12.4946	13.5779
12	0	1.3095	2.6137	3.9078	5.1867	6.4460	7.6816	8.8900	10.0679	11.2130	12.3231	13.3968

根据表1和表2的参数用TracePro建立几何模型并进行光线追迹。设模型中太阳光线发射形式为照度,大小为 $1000 \text{ W/m}^2$ ,不考虑太阳张角,太阳光线设为垂直采光面入射。经过光线追迹后接收器处的能流分布如图8所示。图8(a)为与镜面面积大小相同的接收器模型上的能流分布,即尺寸为 $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ ,图8(b)为尺寸大小为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 的接收器模型上的能流分布。由图8(a)、(b)可看出,焦平面处接收器上的能流分布很平均,基本在 $1.3 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 上下,根据对称性可知,整个平面反射镜聚光器都工作后,接收器上的光照强度约可达 $5.2 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ,约是模拟太阳光源入射强度的520倍,与镜阵中反射镜面的总数量529相近。验证了该聚光器能通过添加或删减反射镜面数量达到调整聚光比的目的。

图8(a)中接收器的面积与反射聚光器中的镜面面积大小相同,接收器光强在靠近x负方向的边缘分布较弱。镜面的余弦效率越小,其反射光斑拉伸面积越大。图8(a)所模拟的是镜阵坐标第二象限的聚光情况,即分别由x轴和y轴的正向所围区域,该区域内各镜面反射光斑多偏向正向,而相互叠加后,导致在x负方向边缘较弱。若将模拟接收器面积扩大到 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ ,则能看出光斑偏移的明显效果,如图8(b)所示。接收器上的光强在区域 $x \in (-50, 70)$ ,  $y \in (-70, 70)$ 内光强分布比较均匀,大约为 $1.3 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 。根据模型对称性分析可知,当整个镜阵的镜面都将光线反射到接收器时,接收器上的光强最大值约为 $5.2 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ,且均匀分布在区域 $x \in (-50, 50)$ ,  $y \in (-50, 50)$ 内,该区域位于 $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ 接收器的中心区域处,面积约 $100^2 \text{ mm}^2$ ,占整个接收器总面积的51.0%。为保证接收器上的光伏电池接收到均匀光照和最高光学效率,应将光伏电池有效面积控制在 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 内。

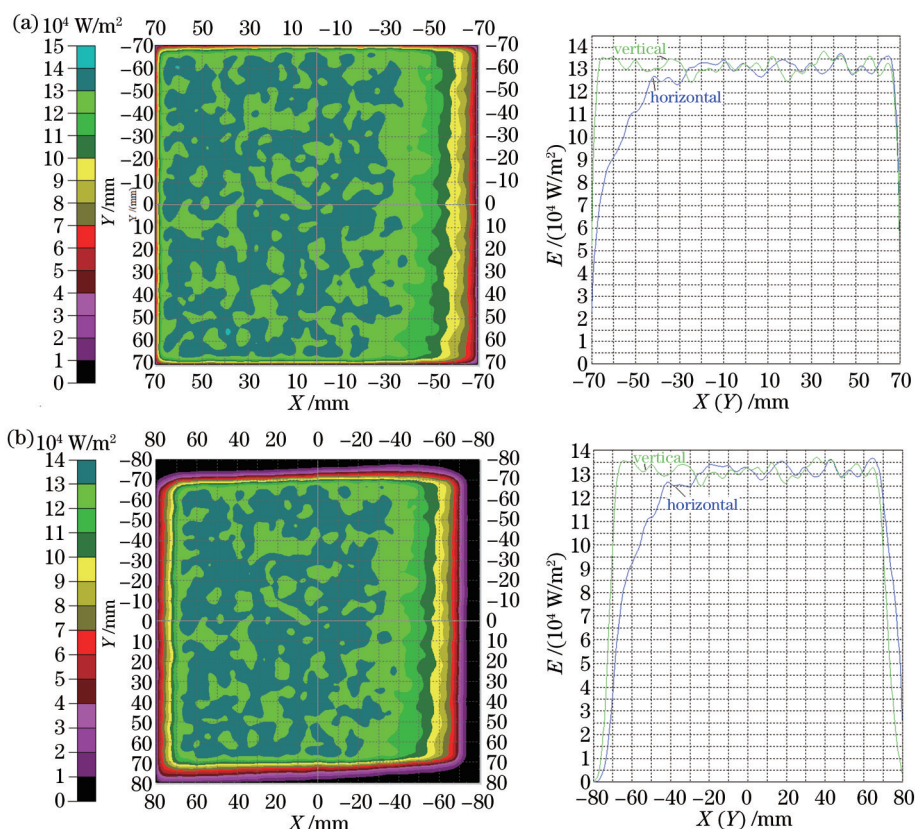


图 8 (a) 面积 140 mm×140 mm 的接收器上的光强分布; (b) 面积 160 mm×160 mm 的接收器上的光强分布  
 Fig.8 (a) Flux density distribution of 140 mm×140 mm receiver; (b) flux density distribution of 160 mm×160 mm receiver

## 5 聚光器试制与初步测试

中国科学技术大学于 2011 年底在广东五星太阳能公司内制作了一套多平面镜线性组合太阳能聚光器系统。聚光器支架采用两级支撑结构和二维跟踪方式,图 9 所示为该聚光器的支撑框架结构实物图及安装现场。

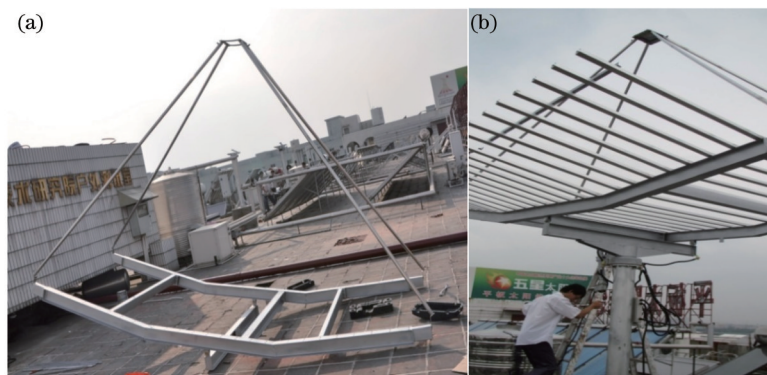


图 9 (a) 多平面镜聚光器支撑框架结构实物图; (b) 多平面镜聚光器支撑框架安装现场

Fig.9 (a) Construction of the multi-plane mirrors concentrator support frame;  
 (b) multi-plane mirrors concentrator support installation on the frame

研制的多平面镜线性组合太阳能聚光器采用面积为 140 mm×140 mm 的普通商用平板镀银镜面作为子反射镜。各子反射镜通过万向节支架与支撑结构相连,而支撑结构则摒弃传统点聚光器中复杂的抛物型框架构造,采用简单的直线型结构。如图 10 所示,万向节支架是该聚光器中实现准确对焦的关键部件,其能使镜面在二维空间里向任意角度转动,且在竖直高度上有一定的微调范围,以防止相邻镜面的相互碰撞和遮挡;其位置在平行支撑条上可变动,以便根据不同面积和形状的反光镜面做出相应调整,可最大程度利用采光面空间。



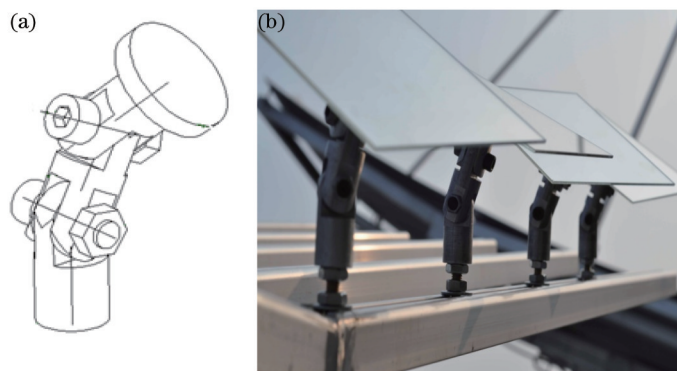


图 10 (a) 万向节支架结构模型; (b) 万向节实物图

Fig.10 (a) Structural model of universal joint; (b) construction of universal joint

设计的聚光比为 450 倍,根据计算结果对每块反射镜进行调试,使入射到镜面上的光线都反射到焦平面上,共完成了 450 个子反射镜的安装,如图 11 所示。放置一块不锈钢板在焦点位置,通过观察不锈钢板上的聚光光斑,检查焦平面处的聚光情况,焦平面处的聚光情况如图 12(a)所示,为进一步分析焦斑处的能流分布均匀情况,采用红外热像仪捕获焦斑处的热图,由图 12(b)观察知,焦平面上的热流分布较理想,正如图 8 所示,在焦斑  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的中心区域光强均匀,其边缘区域稍弱,无需额外采用匀光设备即能满足光伏电池对聚光均匀性的要求。

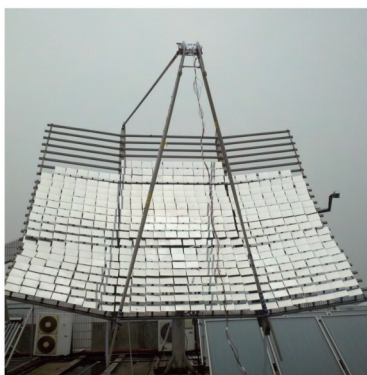


图 11 多平面镜线性组合太阳能聚光器运行现场

Fig.11 Multi-plane mirrors linear combination dish solar concentrator under operation

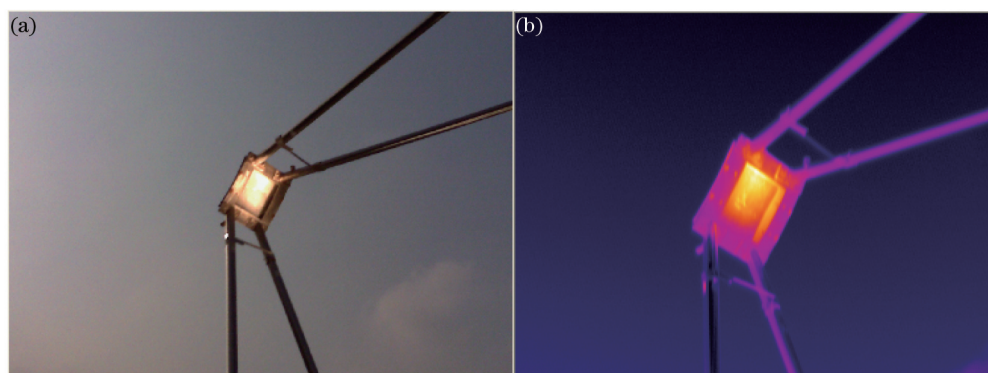


图 12 多平面反射镜聚光器实际工作时接收面状况。(a) 焦平面处的聚光情况; (b) 红外热像仪所测热图

Fig.12 Condition of multi-plane mirrors linear combination dish solar concentrator's receiver.

(a) Concentrating on the focal plane; (b) flux mapping receiver with infrared thermal camera

## 6 结 论

对多平面镜线性组合太阳能聚光器的光学性能和几何参数进行了研究,得出了不同子镜面尺寸和不同

子镜面数量与焦距长短的相互影响规律,得到了最优的余弦效率和最小设计间距值,并利用TracePro软件建立聚光器光路模型,研究了两种不同大小聚光器的聚光焦平面上的焦斑特性和能流分布情况。

根据优化设计结果,研制了包括基础部件、转动部件及平面镜支撑结构在内的450倍聚光的多平面镜线性组合太阳能聚光器。安装调试完成后进行了聚光效果测试,结果表明该聚光器聚光焦平面上的能流分布均匀性可达到预期设计效果,是一种适合聚光光伏使用的高倍聚光器。

**致 谢** 感谢广东五星太阳能股份有限公司提供的场地支持,以及东莞中能阳光能源科技有限公司给予的安装帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Yunfeng, Ji Jie, He Wei, *et al.*. Performance analysis and design of paraboloidal dish solar concentrators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0122002.  
王云峰, 季 杰, 何 伟, 等. 抛物碟式太阳能聚光器的聚光特性分析与设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0122002.
- 2 Zhou Xizheng, Ma Chunyuan, Wang Junqi, *et al.*. Performance analysis of fixed mirror solar concentrator mirror field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1008001.  
周希正, 马春元, 王军旗, 等. 固定式条形镜面太阳能聚光镜场性能分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1008001.
- 3 Jing Lei, Wang Yao, Zhao Huiyu, *et al.*. Design of uniform-irradiance concentrator for concentration photovoltaics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0208001.  
荆 雷, 王 尧, 赵会富, 等. 实现均匀照度光伏聚光镜设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0208001.
- 4 Yang Guanghui, Liu Youqiang, Yao Shun, *et al.*. Optimized design and research of secondary optics in concentrating photovoltaic module [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0322006.  
杨光辉, 刘友强, 尧 舜, 等. 聚光模组二次光学元件优化设计与研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0322006.
- 5 Ma Hongcai, Jin Guang, Zhong Xing, *et al.*. Arrangement and shape optimization of solar concentrating receivers using Monte Carlo method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0308001.  
马宏财, 金 光, 钟 兴, 等. 基于蒙特卡罗法的太阳能聚光接收器布局及形状优化设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0308001.
- 6 Chen Fei, Li Ming, Xu Chengmu, *et al.*. Influence of photo-thermal conversion characteristics by the position of cavity absorber in parabolic trough solar concentrator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0922003.  
陈 飞, 李 明, 许成木, 等. 腔体吸收器位置对太阳能槽式系统光热转换性能的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0922003.
- 7 Nilsson J, Leutz R, Karisson B. Micro-structured reflector surfaces for a stationary asymmetric parabolic solar concentrator[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, 91(6): 525-533.
- 8 Friedman R P, Gordon J M, Ries H. New high-flux two-stage optical designs for parabolic solar concentrators[J]. *Solar Energy*, 1993, 51(5): 317-325.
- 9 Zou Y H, Yang T S. Optical performance analysis of a HCPV solar concentrator yielding highly uniform cell irradiance[J]. *Solar Energy*, 2014, 107(9): 1-11.
- 10 Kussul E. Micro-facet solar concentrator[J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 2008, 27(2): 61-71.
- 11 Liu Z, Lapp J, Lipinski W. Optical design of a flat-facet solar concentrator[J]. *Solar Energy*, 2012, 86(6): 1962-1966.
- 12 Guo Su. Investigation to the heliostat field layout in tower solar power plants, compound parabolic concentrator and roof CPV system[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.  
郭 苏. 塔式太阳能热发电站镜场和CPC及屋顶CPV设计研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

栏目编辑: 张浩佳