

# 扇形无漏光太阳能聚光器的设计方法

尹鹏, 徐熙平, 姜肇国, 赵聪

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 建立了扇形无漏光聚光系统,对其几何聚光比与抛物线系数、聚光模组后抛物面宽度及聚光模组数量之间的相互关系进行了研究。针对光线耦合结构阵列后导致的漏光问题,提出了锯齿型无漏光波导板的设计方法,在提高聚光比的同时获得较高的聚光效率。通过分析太阳运行规律,提出可传动棱镜片组的设计以取代传统双轴跟踪方式,在一定意义上实现单轴追踪,降低系统运行功耗。在考虑菲涅耳损失以及材料吸收情况下,利用 LightTools 软件对所设计的聚光系统进行光线追迹,结果表明:在抛物线系数  $a=0.019$  时,几何聚光比达到 1900,聚光效率为 65.1%;在抛物线系数  $a=0.032$  时,几何聚光比达到 1110,聚光效率达到约 82.3%。

**关键词** 几何光学; 非成像光学; 聚光光伏系统; 光波导板

中图分类号 TP302.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0208002

## Design Method of Fan-Shaped Ray-Leakage-Free Solar Concentrator

Yin Peng, Xu Xiping, Jiang Zhaoguo, Zhao Cong

College of Photoelectrical Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** A novel fan-shaped ray-leakage-free solar concentrator is proposed. The relation of geometrical concentration ratio with parabola coefficient, posterior paraboloid width of concentration module and concentration module quantity is also explored. The proposed design method of the sawtooth ray-leakage-free lightguide can deal with the leaking situation after the coupling inlets array, which increases the optical efficiency and the concentration ratio. By the analysis of the sun tracking law, a single-axis tracker with the scrollable prism sheets is proposed instead of double-axes tracker, which can decrease the system power dissipation. The ray-tracing simulations are carried out by LightTools software considering the Fresnel loss and optical material absorption. The results show that the concentration ratio and optical efficiency are 1900 and 65.1% when the parabola coefficient is 0.019; the concentration ratio and optical efficiency are 1110 and 82.3% when the parabola coefficient is 0.032.

**Key words** geometric optics; non-imaging optics; concentration photovoltaics system; light guide plate

**OCIS codes** 080.4298; 080.2740; 350.6050

## 1 引 言

太阳能是一种分布广泛、取用方便、储量丰富的可再生能源,对其有效利用能够极大地缓解能源危机。但是,太阳能能流密度小,需要利用聚光型光伏技术将大面积太阳光会聚至小面积的太阳能电池上。在反射式太阳能聚光器的设计中,槽式太阳能聚光技术是最早实现热发电商业化运营的技术,其

发电成本低,更容易与化石燃料形成混合发电系统<sup>[1-3]</sup>。蝶式太阳能聚光技术比槽式聚光器的聚光效率高,但其制造成本也相对昂贵<sup>[4-6]</sup>。此外,颜键等<sup>[7]</sup>提出以镜面单元旋转和平移运动的组合等效引入位姿误差,建立了镜面单元空间位姿与聚焦光斑特征的定量对应关系。透射式太阳能聚光器主要以设计菲涅耳透镜元件为主。宁铎等<sup>[8]</sup>针对太阳能聚光器中自动跟踪系统高故障率造成的使用成本增加

收稿日期: 2017-07-11; 收到修改稿日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61605016)

作者简介: 尹鹏(1988—),男,博士研究生,主要从事太阳能聚光器设计、LED 照明设计等非成像光学方面的研究。

E-mail: 2013100182@mails.cust.edu.cn

导师简介: 徐熙平(1969—),男,博士,教授,主要从事光电信号检测、图像处理方面的研究。

E-mail: xxp@cust.edu.cn(通信联系人)

等问题,提出了免跟踪线性菲涅耳透射式太阳能聚光器的设计方法。于春岩等<sup>[9]</sup>设计了一种透射式双面菲涅耳聚光镜,该方法减少了光能损失,同时提高了聚光效率。此外,将菲涅耳透镜用于二次光学元件的设计也可以提高聚光效率<sup>[10-11]</sup>。为使聚光光斑照度分布均匀化,荆雷等<sup>[12]</sup>根据科勒照明原理和等光程原理求解得到聚光镜各个面型的轮廓曲线,设计了结构紧凑、聚光光斑照度相对均匀的高倍聚光透镜;李望等<sup>[13]</sup>根据非成像光学理论提出了线聚焦菲涅耳聚光器的设计方法,提高了聚光光斑的辐照度均匀性。王进军等<sup>[14]</sup>提出了一种分区多焦点叠加方形光斑均匀聚光菲涅耳透镜的设计方法,解决了传统点聚焦菲涅耳透镜聚光分布均匀性差的问题。但是,上述方法只能提供固定数值的聚光比,不利于系统满足不同程度的聚光需求。为了使聚光系统能够提供动态的聚光比,Duncan等<sup>[15]</sup>提出了平板型太阳能聚光器的设计方法,该聚光器通过调节二次聚光元件的数量能够实现动态聚光比;Unger等<sup>[16]</sup>提出一个具有新型光波导板结构的平板型太阳能聚光器,但是光线在该聚光系统中的传播距离较短,几何聚光比较小,且光线经空气棱镜侧表面多次反射后能量大幅度衰减,聚光效率较低。

为了同时获得较高的动态聚光比和聚光效率,降低系统的径长比,本文提出了扇形无漏光太阳能聚光器的设计方法。该方法所设计的聚光系统与无漏光波导板配合使用能够同时获得较高的几何聚光比和聚光效率;调节聚光模組的数量能够实现动态聚光比,满足不同程度的聚光需求;相比于传统的抛物面聚光器,系统的径长比较小,结构紧凑,降低了系统的制造成本。此外,通过分析太阳运行规律,提出可转动棱镜片组的设计以取代传统双轴跟踪方式,在一定意义上实现单轴追踪,降低系统运行功耗。由于聚光模組本身具备一定的光线接收角度,本系统对于太阳的追踪精度要求较低。

## 2 聚光器设计原理

扇形无漏光太阳能聚光器主要由聚光模組阵列和无漏光锯齿型波导板两部分组成。如图 1(a)所示,太阳光线垂直入射聚光模組上表面,经聚光模組的后表面反射会聚,进入无漏光锯齿型波导板中传播,最终被太阳能电池接收。由于聚光模組会聚光线的范围有限,通常将聚光模組阵列组成聚光模組单元,并与波导板配合使用,如图 1(b)所示。将聚光模組单元旋转拼接后,组成类似于扇形的聚光结

构,如图 1(c)所示。聚光模組后表面基于抛物线方程的几何性质设计,无漏光波导板的设计参数由聚光模組决定。

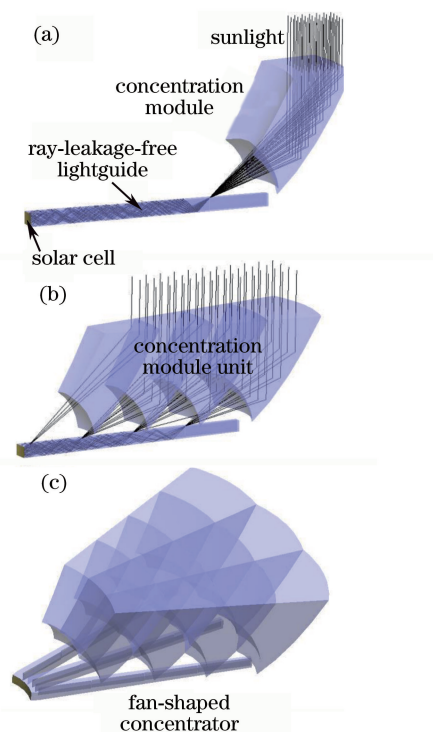


图 1 (a)单聚光模組的光线追迹;(b)聚光模組单元的光线追迹;(c)扇形无漏光太阳能聚光器结构示意图

Fig. 1 (a) Ray tracing of a concentration module; (b) ray tracing concentration modules unit; (c) schematic of fan-shaped ray-leakage-free solar concentrator structure

### 2.1 聚光模組的设计

设抛物面在  $y-z$  面上的抛物线表达式为

$$y = az^2, \quad (1)$$

式中  $a$  为抛物线系数。根据抛物线的性质,抛物线上方垂直入射的光线经抛物线反射后会聚至抛物线焦点处,焦点坐标为  $P_F(y=1/4a, z=0)$ 。将  $z$  轴正方向焦平面上方高度为  $h$  的抛物面部分作为聚光模組反射表面,如图 2(a)所示。为了使光线满足全反射条件, $h$  的取值范围为

$$\frac{3}{4a} < h < \frac{2(\tan \theta)_{\max} - 1}{4a}, \quad (2)$$

式中  $\theta$  为抛物面切平面与  $x-z$  平面的夹角; $(\tan \theta)_{\max} = \sqrt{(n_1 + \sqrt{n_1^2 - 1}) / (n_1 - \sqrt{n_1^2 - 1})}$ ,  $n_1$  为光波导板的折射率。将该反射面向  $z$  轴负方向移动  $1/2a$  的距离,可以得到双抛物面结构,如图 2(b)所示。将双抛物面结构宽度设置为  $D$ ,并将以外侧抛物面的焦点为球心、 $R$  为半径的球体部分去除,最终得到聚光模組结构,如图 2(c)所示,其中

$R$  的最大取值  $R_{\max}$  可以表示为

$$R_{\max} = \sqrt{h^2 - \frac{h + \sqrt{4h/a + a^{-2}}}{2a} + \frac{17}{16a^2}} \quad (3)$$

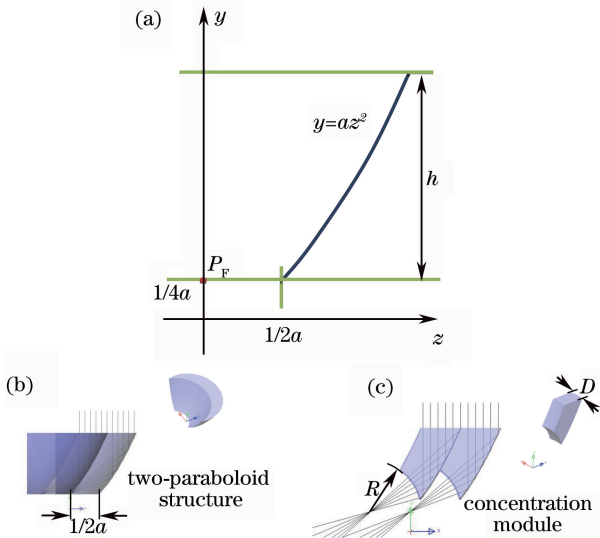


图 2 聚光模組的修減過程示意圖。(a) 反射表面所在的拋物線；(b) 雙拋物面結構；(c) 修減後得到聚光模組最終結構

Fig. 2 Schematic of modification procedure of the concentration module. (a) Parabola curve in the reflective surface; (b) two-paraboloid structure; (c) concentration module trimmed off

為了增大系統的幾何聚光比，將聚光模組整列修減，得到扇形結構的聚光模組單元，如圖 3 所示。設聚光模組單元的圓心角為  $\gamma$ ，則

$$\gamma = 2\arctan\left(\frac{a \cdot D}{N_c - 1 + \sqrt{4a \cdot h + 1 - a^2 D^2}}\right) \quad (4)$$

式中  $N_c$  為聚光模組單元中所包含聚光模組的數量。修減後的聚光模組單元中只有第  $N_c$  個聚光模組的後拋物面寬度  $D$  值被保留。

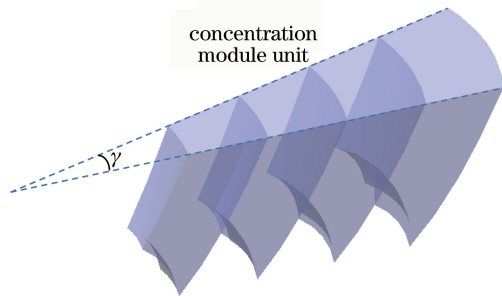


圖 3 聚光模組單元示意圖

Fig. 3 Schematic of the concentration module unit

## 2.2 無漏光波導板的设计

對於會聚後的光線，需要設計耦合結構將光線導入波導板中。圖 4(a) 中在波導板上表面添加半

球型光線耦合結構，使會聚光線以原有路徑通過全反射傳播至波導板末端的光電池所在位置處。但是，光線經過陣列過多的光線耦合結構後，會從波導板上表面的半球型部分漏出，影響系統的聚光效率。為了解決漏光引起的聚光效率降低的問題，在波導板中嵌入空氣三棱柱結構，如圖 4(b) 所示，該結構的高度與波導板厚度相同均為  $d_y$ ，底邊寬度為  $d_x$ ，底邊高度為  $d_z$ 。定義空氣三棱柱底面三角形的高寬比為  $r = d_z/d_x$ ，則空氣三棱柱頂角  $\alpha$  的表達式為

$$\alpha = 2\arctan(1/2r) \quad (5)$$

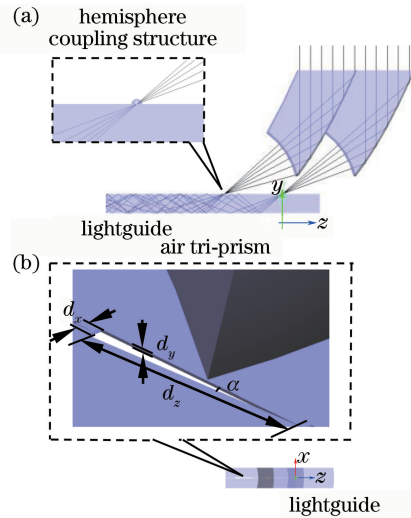


圖 4 (a) 半球形光線耦合結構示意圖；(b) 空氣三棱柱結構示意圖

Fig. 4 (a) Schematic of the hemisphere coupling structure; (b) schematic of air tri-prism structure

由於光線耦合結構的尺寸很小，等腰三角形底邊上的高  $d_z$  與聚光模組上兩個拋物面之間的距離  $1/2a$  近似相等，光線通過耦合結構進入波導板後被空氣三棱柱分成兩部分，並通過全反射向前傳播，從而繞過了後面的半球型耦合結構，保證光線在波導板中無漏光傳播。但是，隨著傳播距離的增加，光線與空氣三棱柱結構表面的入射角度不斷減小，當小於臨界角時，全反射條件被打破，漏光現象發生。因此，光波導板的最大長度取決於光線首次發生漏光的位置，該長度在扇形聚光系統中約等於扇形波導板的半徑。

## 2.3 光線的傳播距離計算

在聚光模組單元所接收的光線中，只有來自第  $N_c$  個聚光模組內側拋物面上的邊緣光線與聚光模組單元軸線的夾角最大，因此該光線所能傳播的最大距離就等於扇形波導板的最大半徑。如圖 5(a) 所示，由幾何關係可以得到該光線在  $x-z$  平面上的

投影与  $z$  轴夹角  $\beta$  的表达式为

$$\beta = -2 \cdot \ln \left\{ r_\beta - R_{N_C-1} + \frac{\sqrt{\tan^2(\gamma/2) \cdot r_\beta^2 - R_{N_C-1}^2 + 2R_{N_C-1} \cdot r_\beta}}{r_\beta \cdot [1 + \tan^2(\gamma/2)]} \right\}, \quad (6)$$

式中  $r_\beta = (\sqrt{4a \cdot h + 1} - 1)/(2a)$  为该条光线从被反射面到进入光线耦合结构之间的距离。如图 5(b) 所示,  $R_{N_C-1} = (N_C - 2 + \sqrt{4a \cdot h + 1})/(2a)$  为从中心点到第  $(N_C - 1)$  个聚光模组边缘之间的距离

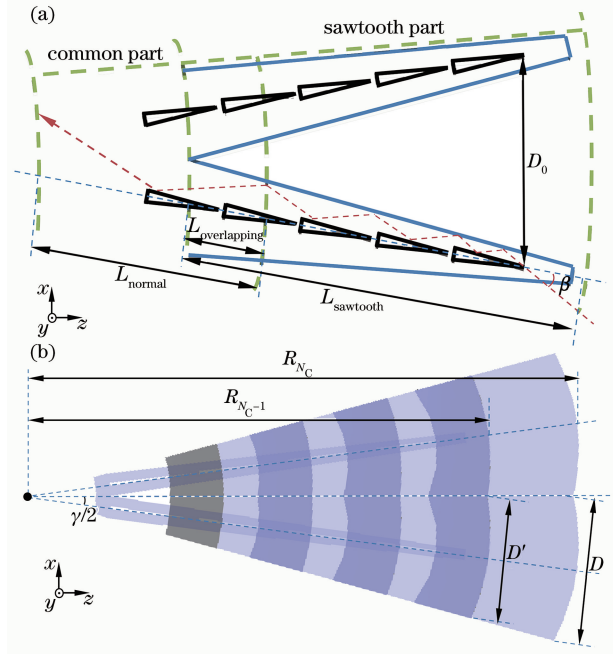


图 5 (a)  $x-z$  平面边缘光线无漏光传播路径示意图;  
(b) 扇形无漏光聚光器俯视图

Fig. 5 (a) Schematic of the edge-ray leakage-free propagating path in  $x-z$  plane; (b) top view of the fan-shaped ray-leakage-free solar concentrator

离。此外,第  $N_C$  个聚光器内抛物面的宽度  $D'$  可表示为

$$D' = 2r_\beta \cdot \sin \beta. \quad (7)$$

设该光线进入光线耦合结构处与相邻空气三棱柱结构对应位置之间的距离为  $D_0$ , 则

$$D_0 = D' \cdot \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cdot \left[1 - \frac{\tan(\gamma/2)}{\tan \beta}\right]. \quad (8)$$

光线在波导板中传播的最大距离  $L$  由两部分组成: 锯齿部分和普通部分。锯齿部分的长度  $L_{\text{sawtooth}}$  可表示为

$$L_{\text{sawtooth}} = \frac{D_0 \cdot \cos(\alpha/2)}{2\sin[(\gamma + \alpha)/2]} + r_\beta \cdot \cos \beta. \quad (9)$$

对于在锯齿部分传播的光线而言,全反射入射角度  $\beta$  是不变的。当光线进入普通部分后,全反射入射角度改变,如图 6 所示,设光线首次进入普通区域时与聚光模组光轴之间的夹角为  $\delta_1$ , 当光线在空气三棱柱结构表面发生第  $n$  次全反射后,出射光线与聚光模组光轴之间的夹角为  $\delta_n$ , 可以得到

$$\delta_n = \beta + (n - 1)\alpha + (n - 1)\gamma, \quad n \geq 1. \quad (10)$$

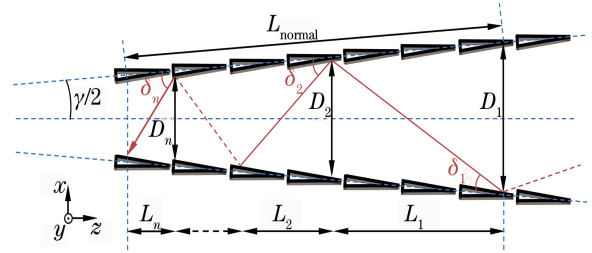


图 6  $x-z$  平面边缘光线在波导板普通部分的传播路径示意图  
Fig. 6 Schematic of the edge-ray propagating path in the normal part of the lightguide in  $x-z$  plane

光线在空气三棱柱表面的入射点与相邻聚光模组对应位置之间的距离  $D_n$  为

$$D_n = \begin{cases} D_0 \cdot \frac{\sin(\alpha/2) \cdot \sin(\beta + \gamma/2)}{\sin[(\gamma + \alpha)/2] \cdot \sin \beta}, & n = 1 \\ D_{n-1} \cdot \left[1 - \frac{2\tan(\pi/2 - \gamma/2 - \delta_{n-1})}{1/\tan(\gamma/2) + \tan(\pi/2 - \gamma/2 - \delta_{n-1})}\right], & n \geq 2 \end{cases}. \quad (11)$$

两次全反射间在水平轴线所传播的投影距离  $L_n$  可表示为

$$L_n = D_n \cdot \frac{\tan(\pi/2 - \gamma/2 - \delta_n)}{\tan(\gamma/2) \cdot [1/\tan(\gamma/2) + \tan(\pi/2 - \gamma/2 - \delta_n)]}, \quad n \geq 1, \quad (12)$$

式中  $n$  为大于或等于 1 的自然数。根据全反射临界角条件:

$$\pi/2 - (\delta_n - \alpha/2) \geq \theta_c, \quad (13)$$

可得光线在波导板中传播时与空气三棱柱结构发生全反射的最大次数  $N$  为

$$N \leq (\theta_c - \beta)/(\alpha + \gamma), \quad (14)$$

式中  $\theta_c$  为全反射临界角。

光线在波导板普通部分的传播距离  $L_{\text{normal}}$  为

$$L_{\text{normal}} = \sum_{n=1}^N L_n / \cos(\gamma/2). \quad (15)$$

需要注意的是,传播距离  $L_{\text{normal}}$  包含与锯齿部分重叠的部分,在计算最终距离时需要将该区域去除,去除的区域长度  $L_{\text{overlapping}}$  可表示为

$$L_{\text{overlapping}} = \frac{D_0 \cdot \sin(\alpha/2)}{2\sin[(\gamma + \alpha)/2] \cdot \tan \beta}, \quad (16)$$

因此,最终光线在扇形波导板中的传播距离  $L$  可表示为

$$L = L_{\text{sawtooth}} + L_{\text{normal}} - L_{\text{overlapping}}. \quad (17)$$

### 3 复合跟踪装置的设计

为了更高效地接收太阳光线,需要设计太阳轨迹跟踪系统。文中提出的复合跟踪装置分为两部分:机械单轴追踪器和可传动棱镜片组。单轴追踪器绕  $x$  轴转动以便追踪太阳在东西方向的运动轨迹,如图 7 所示。可传动棱镜片组能够校正赤道面与黄道面之间的夹角引起的太阳与  $y$  轴之间的偏转角度  $\gamma$ (如图 8 所示),使光线能够在聚光模组上表面垂直入射。根据太阳在一年中的运行规律,计算出  $\gamma$  的变化角度,以便于更准确地追踪太阳光线位置。

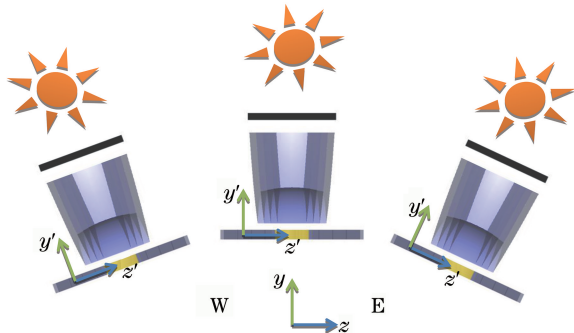


图 7 单轴追踪器运动轨迹示意图

Fig. 7 Schematic of the single-axis tracker movement trace

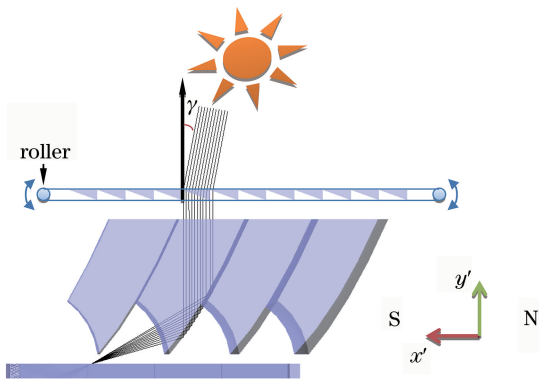


图 8 可传动棱镜片组示意图

Fig. 8 Schematic of the scrollable prism sheets

根据太阳轨迹的运行规律,如图 9 所示,将太阳在天空中的位置用球坐标系表示,即半径为  $r$ 、方位

角为  $A_z$ 、俯仰角为  $A_e$ 。因此,在笛卡尔坐标系中太阳的运行轨迹可表示为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} x = r \times \cos A_e \times \cos A_z, \\ y = r \times \sin A_e, \\ z = r \times \cos A_e \times \sin A_z. \end{cases} \quad (18)$$

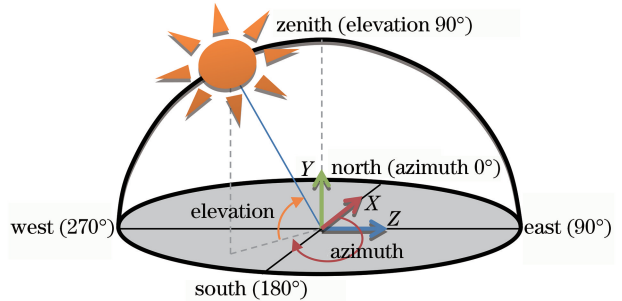


图 9 太阳在天空中的坐标位置示意图

Fig. 9 Schematic of the sun position in the sky

考虑到太阳在一年四季中运行轨迹的变化,追踪系统需要与地面保持一定的倾斜角  $\gamma_0$ ,以保证在春分或者秋分时期光线能够垂直入射聚光器上表面,如图 10(a)所示。因此,在以波导板为  $x-z$  平面的局部坐标系下,太阳的位置坐标可表示为

$$\begin{cases} x' = x \times \cos \gamma_0 + y \times \sin \gamma_0, \\ y' = -x \times \sin \gamma_0 + y \times \cos \gamma_0, \\ z' = z. \end{cases} \quad (19)$$

在太阳自东向西的运行过程中,单轴追踪器绕  $x'$  轴旋转并始终朝向太阳的位置方向。设追踪器绕  $x'$  轴旋转了  $\alpha'$  角度,如图 10(b)所示,此时太阳的位置坐标在以波导板为  $x'-z'$  平面的局部坐标系下可表示为

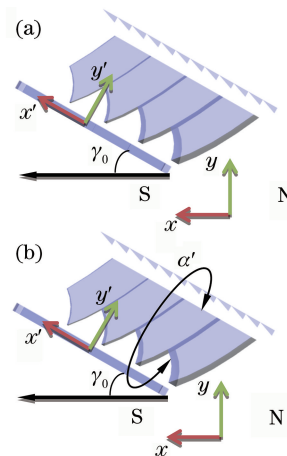


图 10 (a)追踪系统与地面倾斜角  $\gamma_0$  示意图;

(b)追踪器绕  $x'$ 轴旋转  $\alpha'$ 角度示意图

Fig. 10 (a) Schematic of the angle  $\gamma_0$  between the tracker and ground; (b) schematic of the tracker rotates  $\alpha'$  around the  $x'$ -axis

$$\begin{cases} x'' = x', \\ y'' = y' \times \cos \alpha' + z \times \sin \alpha', \\ z'' = -y' \times \sin \alpha' + z \times \cos \alpha'. \end{cases} \quad (20)$$

太阳能够照射在  $x''$ - $y''$  平面上, 并与  $y''$  轴夹角为  $\gamma''$ , 则

$$\gamma'' = -\arctan(x''/y''). \quad (21)$$

某地区中央气象局发布的太阳位置空间坐标 ( $r$ ,  $A_c$  和  $A_e$ ) 已知, 利用 (18)~(21) 式可计算得到夹角  $\gamma''$ 。通过设计相应的可传动棱镜片组可以校正并消除夹角  $\gamma''$ 。

## 4 仿真与结果分析

### 4.1 聚光器的几何聚光比研究

对于本文提出的基于抛物线方程的太阳能聚光器而言, 几何聚光比  $C_{\text{geo}}$  定义为接收光线面积  $S_r$  与太阳能电池面积  $S_c$  的比值<sup>[18]</sup>, 即

$$S_r = \gamma \cdot [R_{N_c}^2 - (R_{N_c} - L)^2], \quad (22)$$

$$S_c = 2\gamma \cdot (R_{N_c} - L) \cdot d_y, \quad (23)$$

$$C_{\text{geo}} = \frac{S_r}{S_c} = \frac{R_{N_c}^2 - (R_{N_c} - L)^2}{2(R_{N_c} - L) \cdot d_y}, \quad (24)$$

式中  $R_{N_c} = (N_c - 1 + \sqrt{4a \cdot h + 1}) / (2a)$  为中心点到第  $N_c$  个聚光模组边缘之间的距离。由于 (24) 式中包含波导板厚度独立变量  $d_y$ , 故可以通过调整波导板厚度改变聚光器的聚光比, 从而实现聚光比的动态调控, 适应不同程度的聚光需求。在本文的设计方法中, 抛物线系数的变化是影响整个系统几何聚光比的主要因素, 因此需要在分析几何聚光比的同时研究抛物线系数的变化。

利用 MATLAB 软件, 根据 (4) 式和 (24) 式对抛物线系数、聚光模组数量和几何聚光比进行仿真, 如图 11 所示, 设置抛物线系数和聚光模组数量为变量, 其他参数为常量。由图 11 可以看出, 几何聚光

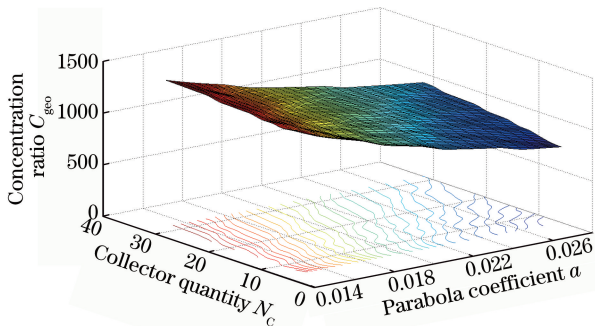


图 11 几何聚光比随抛物线系数和聚光模组数量变化图  
Fig. 11 Diagram of geometrical concentration ratio varies with parabola coefficient and concentration module amount

比随抛物线系数的增大而逐渐减小, 从等高线的疏密程度发现, 几何聚光比在减小的过程中减小速度变小, 这说明数值较小的抛物线系数对于几何聚光比有较大影响; 另一方面, 随着聚光模组数量的增多几何聚光比数值变大, 但是相比抛物线系数对于几何聚光比的影响较小, 这说明增加聚光模组的数量能够在一定程度上提高系统的几何聚光比, 但同时增加了系统的总体质量与体积, 因此在选择聚光模组数量时, 除了要满足系统几何聚光比的需求外, 在实际应用中还需要考虑聚光模组以及波导板的质量和体积。

利用 MATLAB 软件, 根据 (4) 式和 (24) 式对抛物线系数、第  $N_c$  个聚光模组的后抛物面宽度和几何聚光比进行仿真, 如图 12 所示, 设置抛物线系数及抛物面宽度为变量, 其他参数为常量。由图 12 可以看出, 当给定抛物线系数数值时, 几何聚光比随抛物面宽度的变化呈抛物线状, 即在给定区间内存在几何聚光比的极大值和极小值。此外, 根据等高线的疏密程度可以看出, 在抛物面宽度较小时, 几何聚光比增大的速度较快; 在抛物面宽度较大时, 几何聚光比下降的速度较慢。因此, 选用抛物面宽度较大的聚光模组能够得到相对稳定的几何聚光比。

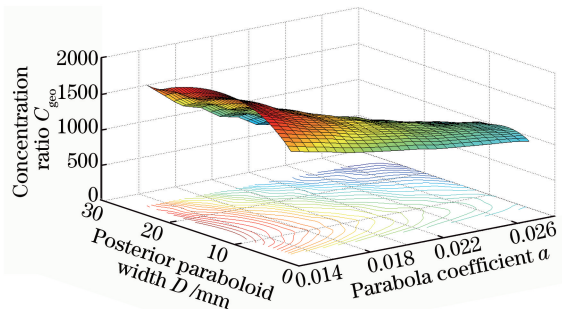


图 12 几何聚光比随抛物线系数和聚光模组后抛物面宽度变化图

Fig. 12 Diagram of geometrical concentration ratio varies with parabola coefficient and posterior paraboloid width

### 4.2 聚光器的聚光效率研究

聚光效率  $\eta$  定义为进入光电池的能量与接收全部太阳能量的比值<sup>[19]</sup>, 设  $E_{\text{cell}}$  为进入光电池的能量,  $E_{\text{solar}}$  为接收到的太阳能量, 则

$$\eta = E_{\text{cell}} / E_{\text{solar}}. \quad (25)$$

在该仿真中, 太阳光选择以  $\pm 0.26^\circ$ <sup>[20]</sup> 发散角入射至聚光模组上表面, 波段选择为 400~700 nm, 考虑光线在各表面的菲涅耳损失及光学材料的吸收, 聚光模组及波导板的光学材料选择聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)。

利用 LightTools 软件对不同抛物线系数的聚光器进行仿真,几何聚光比及相应的聚光效率随抛物线系数的变化情况如图 13 所示,其中红色圆点曲线代表几何聚光比,可以看出,几何聚光比随抛物线系数的增大而减小,这与 4.1 节分析一致。图中蓝色方块实线代表无漏光波导板情况下聚光效率变化情况,蓝色方块虚线代表普通波导板情况下聚光效率变化情况。在抛物线系数  $a=0.019$  时,几何聚光比达到 1900,此时添加无漏光波导板情况下的聚光效率达到 65.1%,是相同条件下普通波导板聚光效率的 2.61 倍;在抛物线系数  $a=0.032$  时,几何聚光比达到 1110,此时添加无漏光波导板情况下聚光效率达到 82.3%,是相同条件下普通波导板聚光效率的 1.11 倍。故无漏光波导板情况下聚光效率始终保持在普通波导板情况的上方,且在几何聚光比较大的情况下,聚光效率的差值较大,这说明无漏光波导板在大聚光比情况下的作用更加明显。

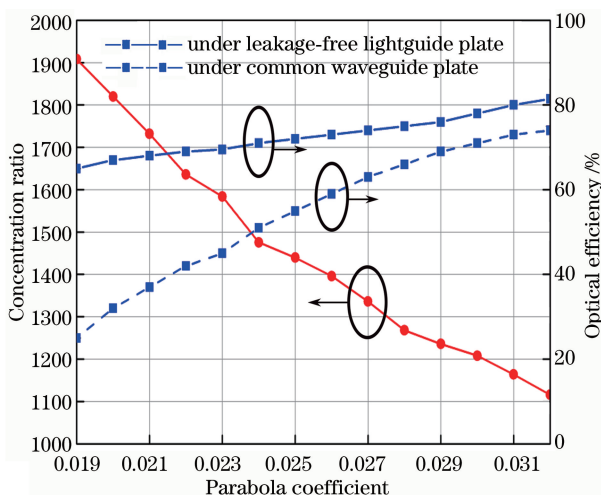


图 13 几何聚光比与聚光效率随抛物线系数变化图  
Fig. 13 Diagram of geometrical concentration ratio and optical efficiency varies with the parabola coefficient

### 4.3 可传动棱镜片组的底角设计

根据文中第 3 部分所提出的聚光器追踪器的设计方法,计算得到太阳位置与  $y''$  轴夹角  $\gamma''$  在一天之内的变化约为  $0.26^\circ$ ,若聚光系统在俯仰方向能够接收  $\pm 0.5^\circ$ ,则需要每 4 d 对俯仰方向进行调节。本节通过 LightTools 仿真数据结果绘制出校正夹角  $\gamma''$  所需相应棱镜底角的角度变化,如图 14 所示,得到棱镜底角随夹角  $\gamma''$  变化的离散数据点。容易看出,棱镜底角随夹角  $\gamma''$  的增大而增大,但增长速度逐渐变缓。不同底角角度的棱镜片组顺序排列在聚光模组上方,通过步进电机以 4 d 为步进周期调整校正夹角  $\gamma''$ ,相关结构与电路设计本文不再给出。

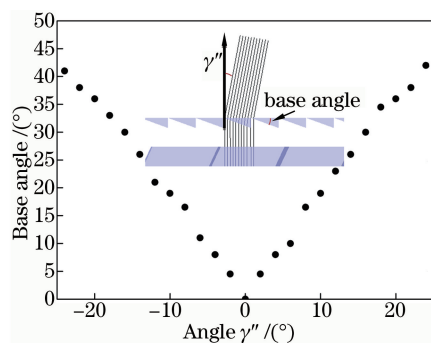


图 14 棱镜底角随光线入射角度的变化示意图  
Fig. 14 Diagram of the base angle of prism varies with incident angles of light

## 5 结 论

利用抛物面方程的几何性质,根据折射和反射定律,设计了扇形无漏光太阳能聚光器,所提出的无漏光锯齿型波导板能够有效提高聚光系统的几何聚光比和聚光效率。为了降低系统运行功耗,通过分析太阳运行规律,提出可传动棱镜片组的设计以取代传统双轴跟踪方式,在一定意义上实现单轴追踪。在考虑菲涅耳损失以及材料吸收情况下,利用 LightTools 软件对所设计的聚光系统进行光线追迹,结果表明:在抛物线系数  $a=0.019$  时,添加无漏光波导板后聚光器的几何聚光比达到 1900,此时添加无漏光波导板情况下的聚光效率达到 65.1%,是相同条件下普通波导板聚光效率的 2.61 倍;在抛物线系数  $a=0.032$  时,几何聚光比达到 1110,此时添加无漏光波导板情况下聚光效率达到 82.3%,是相同条件下普通波导板聚光效率的 1.11 倍。为了进一步获得该光学系统的实际聚光效率,需要进行实际系统的平台搭建与实验测试,这也是本课题组未来工作的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Zhan Q, Hu P, Chen Z S, *et al.* Performance analysis of segmented parabolic trough solar concentrator[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2015, 36(5): 1219-1224.  
张谦, 胡芑, 陈则韶, 等. 分段式槽式太阳能聚光器的性能分析[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(5): 1219-1224.
- [2] Yan S Y, Chang Z, Wang F, *et al.* The effect of dust accumulation on focal energy flux density of the trough solar concentrator and concentrated optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0722002.  
闫素英, 常征, 王峰, 等. 积尘对槽式太阳能聚光器

- 焦面能流密度分布的影响及聚光优化[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0722002.
- [3] Xu C M, Li M, Ji X, *et al.* Frequency statistics analysis for energy-flux-density distribution on focal plane of parabolic trough solar concentrators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0408001.  
许成木, 李明, 季旭, 等. 槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的频数统计分析[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0408001.
- [4] Wang Y F, Ji J, He W, *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.
- [5] Duan P F, Gui T T, Chen F, *et al.* Research on the model of the surface shape for compound parabolic concentrators with circular absorber and its simulation verification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0622002.  
段鹏飞, 桂特特, 陈飞, 等. 圆形吸收体复合抛物聚光器面形模型研究及仿真验证[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0622002.
- [6] Katie S, Senthilarasu S, Richard H, *et al.* White butterflies as solar photovoltaic concentrators[J]. *Nature*, 2015, 12(5): 12267.
- [7] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R, *et al.* Correlative characteristics between focal spot of solar dish concentrator mirror unit and posture error[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1122003.  
颜健, 彭佑多, 程自然, 等. 碟式聚光器镜面单元聚焦光斑与位姿误差的关联特性[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1122003.
- [8] Ning D, Liu F H, Wu Y R, *et al.* Non-tracking transmission solar concentrators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2284-2287.  
宁铎, 刘飞航, 吴彦锐, 等. 免跟踪透射式太阳聚光器的设计[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2284-2287.
- [9] Yu C Y, Cui Q F, Zhu H, *et al.* Optical design of a double-side Fresnel lens for concentrator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0122008.  
于春岩, 崔庆丰, 朱浩, 等. 双面菲涅耳聚光镜设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122008.
- [10] Ru Z Q, An Z Y, Song H L, *et al.* Design and performance analysis of total reflection-type secondary optics in concentrated photovoltaic module[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 262-266.  
茹占强, 安志勇, 宋贺伦, 等. 应用于聚光光伏模组的全反射式二次聚光器的设计与性能分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 262-266.
- [11] Yang G H, Liu Y Q, Yao S, *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.
- [12] Jing L, Wang Y, Zhao H F, *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.
- [13] Li W, Xu X P, Song H L, *et al.* Design and analysis of the line focus Fresnel concentrator based on the diffused focal points method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 721-726.  
李望, 徐熙平, 宋贺伦, 等. 分布式焦点法线聚焦菲涅耳聚光器设计及性能分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 721-726.
- [14] Wang J J, Wang X, Ning D. Design of the sub-region multi-focus superposition square spot uniform concentration Fresnel lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0322001.  
王进军, 王侠, 宁铎. 分区域多焦点叠加的方形光斑均匀聚光菲涅耳透镜设计及聚光性能研究[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0322001.
- [15] Duncan M, Greg S, Blair U. Concentrated photovoltaic stepped planar light guide[C]. SPIE, 2010, 7652: 765215.
- [16] Unger B L, Schmidt G R, Moore D T. Dimpled planar lightguide solar concentrators[C]//OSA International Optical Design Conference and Optical Fabrication and Testing, 2010, ITuE: ITuE5P.
- [17] Benford F, Bock J E. A time analysis of sunshine[M]. Boston: General electric Company, Research Laboratory, 1938.
- [18] Xie P, Lin H C, Liu Y, *et al.* Total internal reflection-based planar waveguide solar concentrator with symmetric air prisms as couplers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(S6): A1389-A1398.
- [19] Wu H Y, Chu S C. Ray-leakage-free sawtooth-shaped planar lightguide solar concentrators[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20073-20089.
- [20] Rabl A. Active solar collectors and their applications[M]. Oxford: Oxford University Press on Demand, 1985.