

基于椭圆型 Monge-Ampère 方程的太阳能聚光器设计方法

尹 鹏, 徐熙平, 姜肇国, 张璐璐

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 基于微分几何原理, 结合折射、反射定律以及能量守恒定律, 将太阳能聚光问题转换成一个带有非线性边界条件的椭圆型 Monge-Ampère 方程, 并建立了相应的数学模型。根据该数学模型, 设计了自由曲面聚光器, 利用光线追迹软件对所设计的自由曲面聚光系统进行了模拟研究。结果表明: 在考虑菲涅耳损失和光学材料的吸收情况下, 当实际太阳光线以 0.27° 的发散半角入射时, 1000 mm 长度的自由曲面聚光器的几何聚光比达到 500, 聚光效率为 77.5%。通过该方法设计的自由曲面具有很高的设计自由度, 为设计不同程度聚光需求的太阳能聚光器提供了可能。

关键词 光学设计; 聚光光伏系统; Monge-Ampère 方程; 非成像光学; 光波导板

中图分类号 TK519 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0922002

Design Method of Solar Concentrator Based on Elliptic Type Monge-Ampère Equations

Yin Peng, Xu Xiping, Jiang Zhaoguo, Zhang Lulu

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

Abstract A novel mathematical model which converts the solar collection problem into a nonlinear boundary problem for the elliptic type Monge-Ampère equations based on differential geometry, refraction law, reflection law and the conservation of energy is proposed. A freeform solar concentrator is designed based on this mathematical model. The freeform concentrator system is simulated by ray-tracing software. The results indicate that considering the Fresnel loss and the absorption of optical materials, when the sunlight possesses 0.27° divergence half-angle, the geometric concentration ratio and the focusing efficiency of the 1000 mm freeform solar concentrator reach 500 and 77.5%, respectively. The freeform designed by this method has higher degree of freedom, which makes it possible to design solar concentrators with different degrees of concentrating requirements.

Key words optical design; concentration photovoltaics system; Monge-Ampère equations; non-imaging optics; lightguide

OCIS codes 220.3620; 080.4298; 080.2740; 350.6050

1 引 言

目前, 人类消耗能量的 90% 来自于有限的化石能源, 为保证全球经济的可持续发展, 开发可再生能源已经成为世界范围内的重要战略目标。太阳能具有清洁、能量巨大、可再生等特点, 近年来备受研究者的关注^[1-2]。但由于太阳能辐照密度较低, 不适合被直接利用, 因此对于太阳能聚光器的设计与利用必不可少^[3-4]。

收稿日期: 2017-04-12; **收到修改稿日期:** 2017-05-12

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热发电、光伏发电和发光二极管照明自由曲面设计等方面的研究。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、图像处理等方面的研究。

E-mail: xxp@cust.edu.cn(通信联系人)

太阳能聚光器按照聚光方式主要分为反射式、透射式和混合式。反射式太阳能聚光器是通过将收集到的太阳光束反射至接收器表面进行接收。荆雷等^[5]根据科勒照明原理和几何光学中的等光程原理求解等光程方程组得到聚光镜各个面型的轮廓曲线,得到了结构紧凑、聚光光斑照度相对均匀的高倍聚光透镜,并详细分析了该聚光器在不同入射角度下光伏电池表面聚焦光斑的照度分布。Shanks 等^[6]利用仿生学原理提出了基于白蝴蝶起飞前姿态的太阳能聚光器设计,在弱光条件下白蝴蝶起飞前通常会展开翅膀呈“V”字型蓄能,通过相同姿态设计出的太阳能聚光器使太阳能电池的输出能量增加了 42.3%。此外,反射式聚光器还包括蝶式^[7]、槽式^[8-10]、复合抛物式^[11]等。透射式太阳能聚光器中主要以设计菲涅耳透镜元件为主,于春岩等^[12]设计了一种透射式双面菲涅耳聚光镜,可以使光线在通过双面菲涅耳聚光镜前表面环带后进入相应的后表面环带,减少了光能损失,提高了聚光效率。茹占强等^[13]设计的全反射式二次聚光器提高了太阳电池表面的光斑强度分布均匀性,增大了跟踪系统跟踪误差的容忍性,从而提高了聚光光伏系统的光电转换效率,但是该方法并未起到增大聚光角的作用,对于聚光角较小的菲涅耳聚光器并不适用。混合聚光器的设计通常需要与光波导板配合使用^[14-16],Duncan 等^[14]提出将平板型太阳能聚光器的光波导板设计成阶梯状以避免光线传播时受到光波导板的干扰,该聚光器在添加二次聚光元件基础上聚光比可达到 500。Unger 等^[15]提出一个具有新型光波导板结构的平板型太阳能聚光器,在该聚光器的光波导板中设计有分光空气棱镜,光线通过光波导板上透透镜阵列会聚后在空气棱镜的倾斜表面反射进入光波导板,通过后续空气棱镜的尾部楔形结构分光传播。该光波导板的设计能够保证光线的无漏光传播,但是光线在空气棱镜侧表面反射后的传播角度增大,导致无漏光的传播距离受到限制,因此该聚光器不能获得较高的几何聚光比;另外,光线在多次经空气棱镜侧表面反射后能量大幅度衰减,聚光效率降低,最终导致系统的光学聚光比较低。

为了获得较高的几何聚光比的同时依然保有较高的聚光效率,本文基于微分几何原理,结合光学折射、反射定律以及能量守恒定律,将太阳能聚光的问题转换成一个带有非线性边界条件的椭圆型 Monge-Ampère 方程,通过求解该方程得到聚光反射器的自由曲面面型,利用半球耦合结构将自由曲面反射器收集的光线导入至光波导板中继续传播。通过该方法设计的平板型太阳能聚光器具有较高的设计自由度,光线在光波导板中全反射传播距离较长,全反射传播时能量损失较小,因此可以同时得到较高的几何聚光比和聚光效率。

2 基于太阳光收集的椭圆型 Monge-Ampère 方程推导

设太阳光为平行光束,垂直于 $x-z$ 平面入射,光线经自由曲面全反射后会聚,按照图 1 建立空间直角坐标系。如图 1 所示,任意入射光线与自由曲面相交于点 P ,经全反射后出射至目标面并相交于点 T 。

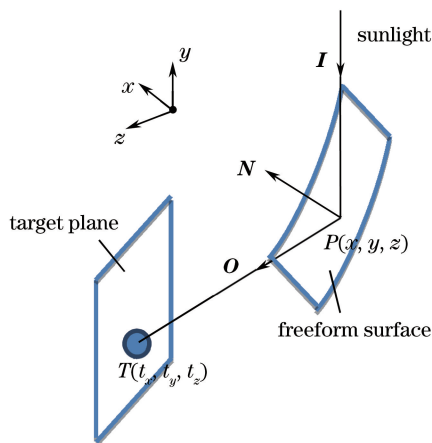


图 1 太阳光自由曲面反射原理示意图

Fig. 1 Schematic of solar reflection on freeform surface

设入射光线单位方向向量为 $\mathbf{I} = (0, -1, 0)$,点 P 的坐标为 $[x, y, z(x, y)]$,则可根据微分几何原理求出 P 点处的单位法向量 \mathbf{N}

$$\mathbf{N} = \frac{1}{\sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}}(-z_x, -z_y, 1), \quad (1)$$

式中 z_x 和 z_y 分别为 z 关于 x 和 y 的一阶偏导数。设 \mathbf{I} 和 \mathbf{O} 分别为入射光线和出射光线的单位方向向量, 根据折射定律可以得出

$$n_{\text{out}}\mathbf{O} = n_{\text{in}}\mathbf{I} + P\mathbf{N}, \quad (2)$$

式中 n_{out} 和 n_{in} 分别为自由曲面所在透镜周围介质的折射率和透镜材料折射率, 为使光线与自由曲面发生全反射, 设太阳光线所在介质为空气, 则 $n_o = -1, n_i = 1$ 。根据折射定律可以得出

$$P = \frac{n_{\text{out}} \sqrt{\left(1 - \frac{n_{\text{in}}^2}{n_{\text{out}}^2}\right)(z_x^2 + z_y^2) + 1} - n_{\text{in}}}{\sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}}, \quad (3)$$

将(1)式和(3)式代入(2)式, 可以得到出射光线单位方向向量

$$\mathbf{O} = \frac{1}{n_{\text{out}}(z_x^2 + z_y^2 + 1)}(O_x, O_y, O_z), \quad (4)$$

式中 $O_x = -z_x[n_{\text{out}}\sqrt{a(z_x^2 + z_y^2) + 1} - n_{\text{in}}], O_y = -z_y[n_{\text{out}}\sqrt{a(z_x^2 + z_y^2) + 1} - n_{\text{in}}], O_z = n_{\text{in}}(z_x^2 + z_y^2) + n_{\text{out}}\sqrt{a(z_x^2 + z_y^2) + 1}, a = 1 - \frac{n_{\text{in}}^2}{n_{\text{out}}^2}$ 。进而可以得到目标平面任意点 T 的坐标表达式

$$\begin{cases} t_x = x - (z - t_z)O_x/O_z \\ t_y = y - (z - t_z)O_y/O_z \end{cases}, \quad (5)$$

为了方便计算, 将(5)式改写为

$$\begin{cases} t_x = t_x(x, y, z, z_x, z_y) \\ t_y = t_y(x, y, z, z_x, z_y) \end{cases}, \quad (6)$$

对(6)式进行坐标变换可得

$$dt_x dt_y = |\mathbf{J}(\mathbf{T})| dx dy, \quad |\mathbf{J}(\mathbf{T})| = \begin{vmatrix} \frac{\partial t_x}{\partial x} & \frac{\partial t_x}{\partial y} \\ \frac{\partial t_y}{\partial x} & \frac{\partial t_y}{\partial y} \end{vmatrix}, \quad (7)$$

式中 \mathbf{T} 为点 T 的位置矢量, $\mathbf{J}(\mathbf{T})$ 为矢量 \mathbf{T} 的 Jacobi 矩阵。

事实上, 收集太阳光能量的过程与光束能量重新分配的过程相同, 要求太阳光入射的能量与接收区域的能量相等, 即满足能量守恒定律

$$\iint_{S_2} E(t_x, t_y) dt_x dt_y = \iint_{S_1} I(x, y) dx dy, \quad (8)$$

式中 S_1 和 S_2 分别代表太阳光入射区域和收集光线的接收区域; $I(x, y)$ 代表太阳光入射区域内的强度分布, $E(t_x, t_y)$ 代表接收区域的辐照度分布。将(7)式代入(8)式可得

$$|\mathbf{J}(\mathbf{T})| E(t_x, t_y) = I(x, y), \quad (9)$$

对上式进行整理后可得

$$A_1(z_{xx}z_{yy} - z_{xy}^2) + A_2z_{xx} + A_3z_{yy} + A_4z_{xy} + A_5 = 0, \quad (10)$$

$$\text{式中 } A_1 = (z - t_z)^2 \frac{\frac{n_{\text{out}}}{b}(1 + z_x^2 + z_y^2)(n_{\text{out}}b - n_{\text{in}})^2}{[n_{\text{out}}b + n_{\text{in}}(z_x^2 + z_y^2)]^3},$$

$$A_2 = (z - t_z) \frac{(n_{\text{out}}b - n_{\text{in}})[n_{\text{out}}b(1 + z_y^2) - n_{\text{in}}z_x^2] + \frac{n_{\text{out}}n_{\text{in}}a}{b}z_x^2(1 + z_x^2 + z_y^2)}{[n_{\text{out}}b + n_{\text{in}}(z_x^2 + z_y^2)]^2},$$

$$A_3 = (z - t_z) \frac{(n_{\text{out}}b - n_{\text{in}})[n_{\text{out}}b(1 + z_x^2) - n_{\text{in}}z_y^2] + \frac{n_{\text{out}}n_{\text{in}}a}{b}z_y^2(1 + z_x^2 + z_y^2)}{[n_{\text{out}}b + n_{\text{in}}(z_x^2 + z_y^2)]^2}, A_4 = 2(z - t_z)$$

$$z_x z_y \left[\frac{an_{out}n_{in}}{b} (1 + z_x^2 + z_y^2) - (n_{out}^2 b^2 - n_{in}^2) \right] \frac{A_5}{[n_{out}b + n_{in}(z_x^2 + z_y^2)]^2}, A_5 = \frac{n_{out}b(1 + z_x^2 + z_y^2)}{n_{out}b + n_{in}(z_x^2 + z_y^2)} - \frac{I(x, y)}{E(x, y)}, b =$$

$\sqrt{a(z_x^2 + z_y^2) + 1}$ 。(10)式为一个椭圆型 Monge-Ampère 方程^[17],描述了在收集太阳光过程中能量的重新分布和守恒关系。但是,在自由曲面重新调整光束能量分布的同时,接收区域的边界也需要被限定,因此下式给出了该 Monge-Ampère 方程的一个边界条件

$$\begin{cases} t_x = t_x(x, y, z, z_x, z_y) \\ t_y = t_y(x, y, z, z_x, z_y) \end{cases} : \partial S_1 \rightarrow \partial S_2, \quad (11)$$

式中 ∂S_1 和 ∂S_2 分别为太阳光入射区域和收集光线接收区域的边界,该边界条件要求入射太阳光束边界 ∂S_1 上的光线经自由曲面反射后入射到接收区域的边界 ∂S_2 上。至此,已将一个太阳光束经自由曲面会聚的问题转换成一个带有非线性边界条件的椭圆型 Monge-Ampère 方程,并得到了相应数学模型

$$\begin{cases} A_1(z_{xx}z_{yy} - z_{xy}^2) + A_2z_{xx} + A_3z_{yy} + A_4z_{xy} + A_5 = 0 \\ \begin{cases} t_x = t_x(x, y, z, z_x, z_y) \\ t_y = t_y(x, y, z, z_x, z_y) \end{cases} : \partial S_1 \rightarrow \partial S_2 \end{cases} \quad (12)$$

对于这样的数学问题,通常的解法是将上述连续方程离散化,最后应用牛顿迭代法求解非线性方程组,具体求解过程不再给出。需要注意的是,由于在收集太阳光束过程中,光线经自由曲面反射后将会聚成一点,因此需要保证区域 S_2 的面积足够小,区域 S_2 的边界 ∂S_2 可以近似看成一个圆周,该圆周的半径 r 趋近于0。此外,由于没有限定入射到区域 S_2 的光线的具体位置,因此通过该方法得到的自由曲面具有很高的设计自由度。

3 太阳能聚光器设计

3.1 自由曲面反射器的设计

根据所提出的 Monge-Ampère 理论,设计了用于太阳能聚光系统的自由曲面反射器。入射光束为具有均匀强度分布的平行光,经反射器中自由曲面反射后会聚于接收面一点。将经过数值求解得到的离散数据点构建自由曲面,得到连续自由曲面的面型如图 2(a)所示。

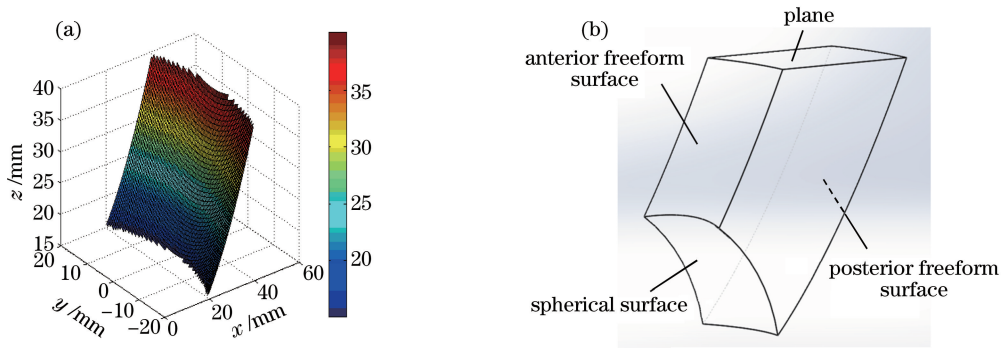


图 2 (a)利用 Monge-Ampère 理论设计的自由曲面反射面面型;(b)自由曲面反射器结构示意图

Fig. 2 (a) Designed reflection surface of freeform surface based on Monge-Ampère theory; (b) structure schematic of the freeform surface reflector

自由曲面反射器的设计结构如图 2(b)所示,为了能够使入射的太阳光在进入自由曲面反射器时不发生偏折,自由曲面反射器上表面设计为平面。类似的,为了使光线从自由曲面反射器出射时不发生偏折,将自由曲面反射器的下表面设计为球面。自由曲面反射器的前后两个表面均设计为自由曲面:光线经后自由曲面全反射后会聚;前自由曲面与后自由曲面的面型设计完全相同,为下文中自由曲面反射器的阵列化提供方便。至此,自由曲面反射器设计完成。

3.2 光波导板设计

为了更好地收集从自由曲面反射器出射的光线,需要对光波导板结构进行设计。在之前的相关设

计^[14-15]中,研究人员在光波导板内部设置空气反射表面使光线进入光波导板。本设计中,由于光线被自由曲面反射后已经具备一定的倾斜角度,因此无需设计复杂的空气反射表面,只需要将光线无偏折地导入光波导板中即可实现全反射传播。在王骁等^[16]的研究基础上,提出光波导板上表面阵列光线耦合结构,如图3所示,这些光线耦合结构由半球体构成,材料与光波导板一致,用于将自由曲面反射器阵列出射的光线导入至光波导板中继续传播。值得注意的是,半球耦合结构的球心位置与第二节中自由曲面反射器会聚光线的位置区域 S_2 重合,因此光线进入半球耦合结构时不发生任何偏折。光电池位于光波导板的末端,从半球耦合结构进入的光线在传播时与光波导板上下表面均发生全反射,最终到达光波导板的末端被光电池所吸收。

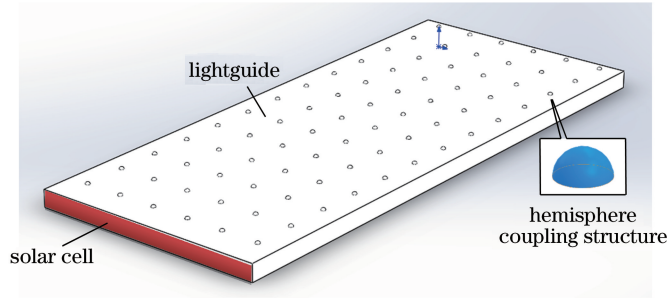


图3 具有半球光线耦合结构阵列的光波导板示意图

Fig. 3 Schematic of the lightguide with hemisphere beam coupling structure array

3.3 太阳能聚光系统设计

将自由曲面反射器阵列与光波导板组合,得到所设计的太阳能聚光系统,如图4(a)所示。太阳光线垂直于自由曲面反射器上表面入射,光线经过自由曲面全反射后汇聚于半球耦合结构的球心处,以便没有任何偏折地进入光波导板中,最后经过光波导板上下表面的全反射传输至光波导板末端,被光电池所吸收。利用光线追迹软件 TracePro 对所设计的太阳能聚光系统进行光线追迹,如图4(b)所示。

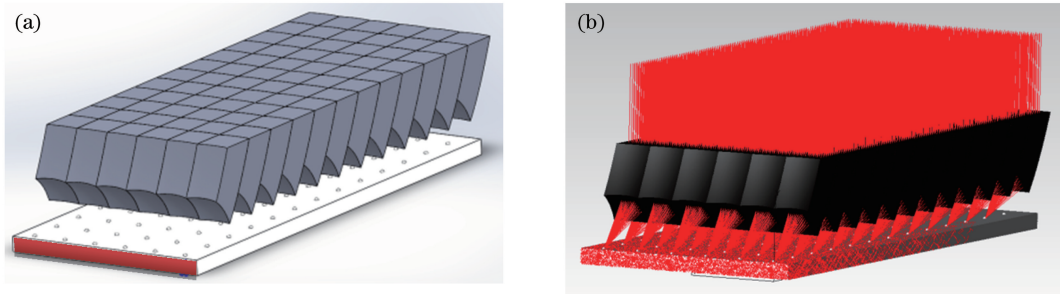


图4 (a)太阳能聚光系统结构示意图; (b) TracePro 光线追迹示意图

Fig. 4 (a) Structure schematic of the solar concentration system; (b) ray-tracing schematic of TracePro

设计的太阳能聚光系统属于平板型聚光系统,其几何聚光比定义为聚光器长度与光波导板厚度的比值,即

$$C_g = L/D, \quad (13)$$

式中 C_g 代表聚光系统的几何聚光比, L 代表光波导板的长度, D 代表光波导板的厚度。由于光波导板厚度不受聚光器长度影响,因此可以通过调整光波导板长度或厚度改变平板型聚光器的聚光比,从而实现聚光比的动态调控,以适应不同程度的聚光需求。聚光效率是另一个用于评价系统聚光能力的参数,设 E_{cell} 为进入光电池的能量, E_{solar} 为接收到的太阳能量,则

$$\eta = E_{\text{cell}}/E_{\text{solar}} \times 100\%, \quad (14)$$

式中 η 代表聚光效率,通常用百分比表示。对于所提出的平板型聚光器而言,导致聚光效率下降的因素除了光线在光学表面的菲涅耳损失以及光学材料的吸收外,还包括自由曲面面型的计算误差和光在光波导中传输损耗的影响。光线经自由曲面反射后将会聚在区域 S_2 的圆周边界 ∂S_2 的内部,受边界 ∂S_2 圆周半径的影响,自由曲面反射器的曲面面型将发生变化。当曲面的变形足够大时,通过自由曲面反射器反射的部分太阳光束将偏离理想的反射路径,从而不会通过半球耦合结构的球心,这对光波导板接收光能产生影响,导致反

射能量损失。将自由曲面反射器中的反射曲面离散成面积足够小的微元平面区域,位置编号为 (i, j) ($i, j = 1, 2, 3, \dots, n$),微元平面区域的面积为 $S_{(i, j)}$ 。每个微元平面区域接收足够多点计算,同时判断反射光线是否被半球耦合结构接收,从而确定该位置处产生损失的微元平面区域面积 $S'_{(i, j)}$ 。受边界 ∂S_2 圆周半径影响的平板型聚光系统的聚光效率定义为

$$\eta' = \sum_{i, j=1}^N \frac{S_{(i, j)} - S'_{(i, j)}}{S_{(i, j)}} \times 100\%。 \quad (15)$$

4 仿真结果验证与分析

在仿真中选择聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为聚光器的光学材料,该材料折射率为 1.49386,在可见光波段具有较高的光学效率。在 400~800 nm 光谱范围内,采用分立光谱局部测量方法模拟存在 0.27° 的发散半角的太阳光源^[18]下聚光器的聚光性能。首先根据主聚光器的数量划分受光面积,设主聚光器阵列上表面的面积为 U ,第 i 个主聚光器上表面的面积为 U_i ,主聚光器的数量为 M_1 ,则可以计算出在某单色光下聚光器聚光效率的平均值为

$$\bar{\eta} = \sum_{i=1}^{M_1} \eta_i \cdot U_i / U, \quad (16)$$

式中 η_i 为通过第 i 个主聚光器收集光线得到的聚光器的聚光效率。将各种单色光在所选光谱范围内所占的权重 ω_j 与各单色光下聚光器模拟聚光效率平均值相乘,可以得到聚光器聚光效率的估计值 $\bar{\eta}'$

$$\bar{\eta}' = \sum_{j=1}^{M_2} \bar{\eta}_j \cdot \omega_j, \quad (17)$$

式中 M_2 为光谱范围内所选取的单色光数量。选取 7 种波长的单色光替代全光谱,对聚光器的聚光效率以及受边界 ∂S_2 圆周半径影响的平板型聚光系统的聚光效率进行仿真,各单色光在全光谱中的权重 ω_j 为各单色光的辐照度在该波长附近区域内的积分值与光波辐照度函数在全光谱范围内积分值的比值,不同波长的单色光所占权重如表 1 所示。将(16)式中的 η_i 替换为 η'_i 可以计算出在某单色光下受边界 ∂S_2 圆周半径影响的聚光效率的平均值;再利用(17)式可以得到受边界 ∂S_2 圆周半径影响的聚光效率的估计值。

表 1 不同波长的单色光所占权重

Table 1 Normalized weights of monochromatic light with different wavelengths

Wavelength /nm	424	491	512	526	614	702	788
Normalized weight ω_j	0.0648	0.1661	0.2327	0.3319	0.1818	0.0223	0.0004

4.1 不同光波导板长度下几何聚光比和聚光效率的研究

由于本研究主要目的是研究在获得较高几何聚光比的同时依然保有较高的聚光效率,因此本节详细讨论几何聚光比增大的同时聚光效率的变化情况。设置该聚光器中光波导板的厚度为 2 mm,宽度为 400 mm,长度为 3000 mm,并设置 1000 个自由曲面反射器阵列于光波导板上用于接收太阳光线。软件仿真中考虑菲涅耳损失和光学材料的吸收,仿真结果如图 5 所示。

图 5 给出了几何聚光比、聚光效率、受边界 ∂S_2 圆周半径影响的聚光效率三者在不同光波导板长度下的变化情况。图中红色实线代表自由曲面聚光器的几何聚光比,蓝色实线代表自由曲面聚光器的聚光效率,蓝色虚线代表受边界 ∂S_2 圆周半径影响的平板型聚光系统的聚光效率。在光波导板长度为 1000 mm 时,自由曲面聚光器的几何聚光比可以达到 500,此时聚光效率为 77.5%,受边界 ∂S_2 圆周半径影响的聚光效率为 83.7%;随着光波导板长度增加至 2000 mm,自由曲面聚光器的几何聚光比增长到 1000,聚光效率则下降至 66.7%,受边界 ∂S_2 圆周半径影响的聚光效率下降至 70.1%;当光波导板长度达到 3000 mm 时,自由曲面聚光器的几何聚光比达到 1500,聚光效率为 55.8%,受边界 ∂S_2 圆周半径影响的聚光效率为 62.7%。可以看出,自由曲面聚光器的聚光效率始终低于受边界 ∂S_2 圆周半径影响的聚光效率,这是由于自由曲面聚光器的光能损失除了受边界 ∂S_2 圆周半径影响不能进入半球耦合结构的光能损失之外,还包括光线在光学表面的菲涅耳损失以及光学材料的吸收等。综上所述,在几何聚光比随光波导板长度增加的同时,聚光效率成为限制该聚光器的主要因素,因此,为了同时获得较高的几何聚光比和聚光效率,光波导板的长度通常限制在

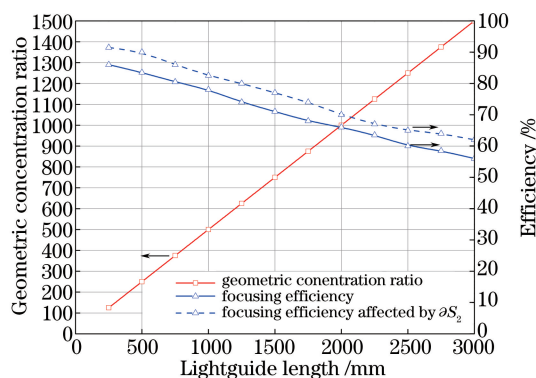


图 5 聚光效率与几何聚光比随光波导板长度的变化曲线

Fig. 5 Curves of focusing efficiency and geometric concentration ratio versus lightguide length

1500 mm, 此时自由曲面聚光器的几何聚光比为 750, 聚光效率为 70.8%, 受边界 ∂S_2 圆周半径影响的聚光效率为 77.1%。

4.2 边界 ∂S_2 圆周半径对聚光效率的影响

在将太阳光束经自由曲面会聚的问题转换成带有非线性边界条件的椭圆型 Monge-Ampère 方程过程中, 理想状态下光线将会聚于一点, 并能够顺利被光波导板上表面的半球耦合结构接收; 但在实际计算过程中, 会聚区域 S_2 的圆周边界 ∂S_2 的半径 r 不能为零, 自由曲面与理想面型存在面型误差, 导致部分光线不能会聚于半球耦合结构的球心处, 聚光效率降低, 因此本节将分析讨论该圆周半径 r 的取值对同等光波导板长度下聚光系统聚光效率的影响, 应用 4.1 节中设计的自由曲面聚光器进行仿真分析, 软件仿真中考虑菲涅耳损失和光学材料的吸收, 光波导板长度设置为 1000 mm。对于不同的边界 ∂S_2 圆周半径 r 的取值, 自由曲面面型变化示意图如图 6 所示。从图中可以看出, 随着 r 值的不断增大, 自由曲面面型发生变化。不难看出, 当 r 值较大时, 自由曲面面型下部变形明显, 说明此时光线不能全部被反射到半球耦合结构, 从而对系统的聚光效率产生影响。边界 ∂S_2 圆周半径对聚光效率的影响如图 7 所示, 图中蓝色实线代表不同自由曲面聚光器在不同 r 值时聚光效率的变化。容易看出, 当 r 值变大后, 自由曲面发生变形, 导致聚光器的聚光效率下降。因此为了避免由于边界 ∂S_2 圆周半径 r 的取值导致聚光效率的下降, r 值应小于 0.6 mm。

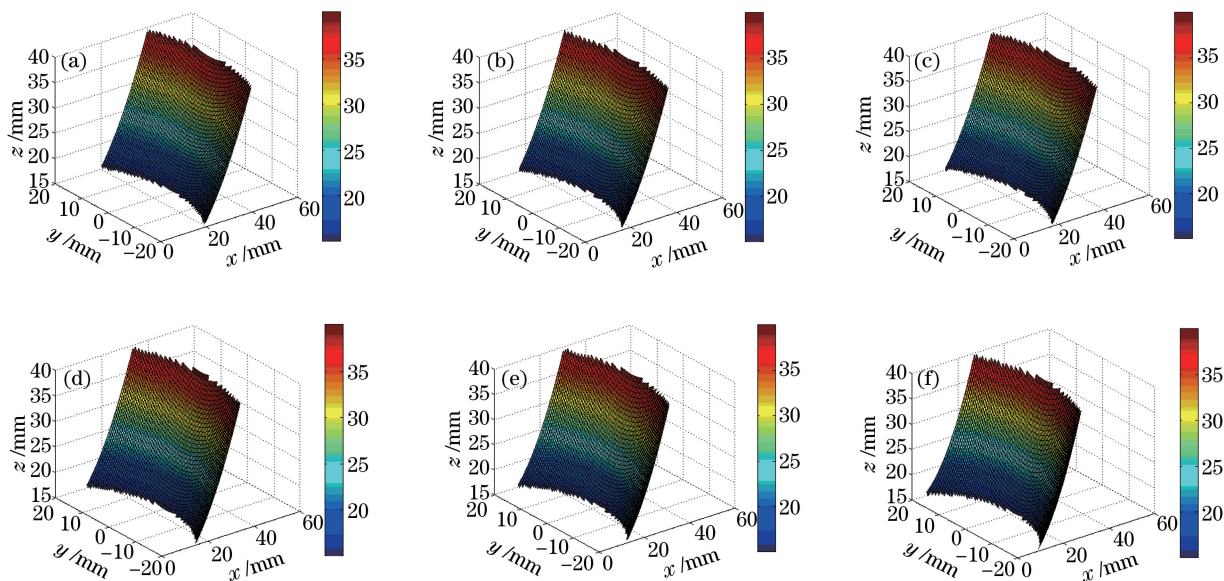
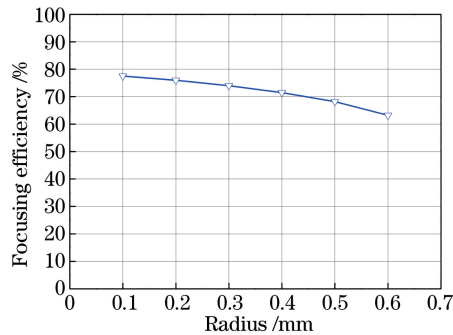


图 6 不同边界 ∂S_2 圆周半径 r 取值下的自由曲面面型示意图。(a) $r=0.1$ mm; (b) $r=0.2$ mm; (c) $r=0.3$ mm; (d) $r=0.4$ mm; (e) $r=0.5$ mm; (f) $r=0.6$ mm

Fig. 6 Schematic diagram of freeform surfaces with different circumferential radii r of ∂S_2 boundary.

(a) $r=0.1$ mm; (b) $r=0.2$ mm; (c) $r=0.3$ mm; (d) $r=0.4$ mm; (e) $r=0.5$ mm; (f) $r=0.6$ mm

图 7 边界 ∂S_2 圆周半径对聚光效率的影响Fig. 7 Influence of circumferential radius of ∂S_2 boundary on focusing efficiency

5 结 论

提出了一种基于椭圆型 Monge-Ampère 方程求取聚光反射器自由曲面面型的方法,通过阵列自由曲面反射器以及半球光线耦合结构将太阳光会聚并收集,在不同的光波导板长度下对自由曲面聚光器的聚光比和聚光效率进行了分析与讨论。为了在获得较高几何聚光比的同时依然保有较高的聚光效率,光波导板长度应该限制在 1500 mm 之内,此时自由曲面聚光器的几何聚光比最大为 750,聚光效率在 70% 以上;为了避免边界 ∂S_2 圆周半径 r 的取值导致聚光效率的下降,边界 ∂S_2 圆周半径应小于 0.6 mm。通过将太阳能聚光的问题转换成一个带有非线性边界条件的椭圆型 Monge-Ampère 方程求解出自由曲面面型,为太阳能聚光器的设计提供了一个新的思路,但是,对于在聚光过程中出现的热辐射等问题未作相关的研究讨论,这也是未来的研究重点和方向。

参 考 文 献

- [1] Al-Sulaiman F A. Exergy analysis of parabolic trough solar collectors integrated with combined steam and organic rankine cycles[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77(1): 441-449.
- [2] Tripathi B, Yadav P, Rathod S, *et al.* Performance analysis and comparison of two silicon material based photovoltaic technologies under actual climatic conditions in Western India[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80(4): 97-102.
- [3] Zhao Y L, Zhang H, Zhan D D, *et al.* Study on thermal efficiency of CPC heat pipe evacuated tubular collectors[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007, 28(9): 1022-1025.
- [4] Chen F, Li M, Xu C M, *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.
- [5] Jing Lei, Wang Yao, Zhao Huifu, *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.
- [6] Shanks K, Senthilarasu S, French-Constant R H, *et al.* White butterflies as solar photovoltaic concentrators[J]. Scientific Reports, 2015, 5(44): 12267.
- [7] 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.
- [8] Zhan Qian, Hu Peng, Chen Zeshao, *et al.* Performance analysis of segmented parabolic trough solar concentrator[J]. Acta Energiæ 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.
- [9] Yan Suying, Chang Zheng, Wang Feng, *et al.* Effect of dust accumulation on focal energy flux density distribution of trough solar concentrator and concentration 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.
- [10] Xu Chengmu, Li Ming, Ji Xu, *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.
- [11] Duan Pengfei, Gui Tete, Chen Fei, *et al.* Surface shape model research 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.
- [12] Yu Chunyan, Cui Qingfeng, Zhu Hao, *et al.* Optical design of adouble-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.
- [13] Ru Zhanqiang, An Zhiyong, Song Helun, *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.
- [14] Moore D, Schmidt G, Unger B. Concentrated photovoltaic stepped planar light guide[C]. *OSA International Optical Design Conference*, 2010: 415-420.
- [15] Unger B L, Schmidt G R, Moore D T. Dimpled planar lightguide solar concentrators[C]. *OSA International Optical Design Conference*, 2010: ITuE5P.
- [16] Wang Xiao, Cao Miao, An Zhiyong, *et al.* Design and research of total-internal-reflection solar energy concentrating module[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1020001.
王 骁, 曹 秒, 安志勇, 等. 全内反射型太阳能聚光模块设计与研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1020001.
- [17] Ji L Z, Li P, Schoen R, *et al.* Handbook of geometric analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 467-524.
- [18] Duffie J A, Beckman W A. Solar engineering of thermal processes[M]. New York: Wiley Inter Science, 1980: 288.