

线性菲涅耳反射聚光器聚焦光斑能流密度分布的计算

赵金龙^{1,2} 李 林¹ 崔正军² 陈洪晶² 熊勇刚² 马晓辉¹ 刘国军¹

(¹ 长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)
² 皇明太阳能股份有限公司, 山东 德州 253000)

摘要 利用光线追迹的方法, 考虑太阳形状、余弦损失、阴影及遮挡损失的影响, 建立线性菲涅耳反射(LFR)聚光器的三维光学几何模型, 给出其光斑能流密度分布的计算式, 采用 Matlab 软件编程实现该算法。将计算结果与美国国家可再生能源实验室(NREL)开发的 SolTrace 软件仿真结果相对比, 光斑能流密度分布曲线基本吻合, 证明了该算法的正确性。为了获得更高的镜场聚光效率, 对比了不同反射镜面型对 LFR 聚光器的影响。

关键词 光电子学; 光计算; 太阳能; 能流密度分布; 光线追迹法; 线性菲涅耳反射聚光器

中图分类号 TK513.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1208001

Calculation of Flux Density Distribution on Focal Plane in Linear Fresnel Reflector

Zhao Jinlong^{1,2} Li Lin¹ Cui Zhengjun² Chen Hongjing²
Xiong Yonggang² Ma Xiaohui¹ Liu Guojun¹

¹ National Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² Himin Solar Co., Ltd., Dezhou, Shandong 253000, China

Abstract The spot flux-density distribution on the focal plane of linear Fresnel reflecting (LFR) concentrators is calculated with Matlab program by the ray-tracing method, with the shape of the sun, cosine loss, shading and blocking loss, taken into account in the process. Three-dimensional optical geometric model is established and the spot flux-density distribution is calculated with Matlab program. The model is demonstrated and justified by comparing simulation results of this Matlab program with that of SolTrace software developed by the U. S. National Renewable Energy Laboratory (NREL). The effects of different mirror shapes for LFR are also compared in order to obtain the higher efficiency of concentrator field.

Key words optoelectronics; optics in computing; solar energy; flux-density distribution; ray-tracing method; linear Fresnel reflector

OCIS codes 350.6050; 080.1753; 220.1770; 080.4035

1 引 言

线性菲涅耳反射(LFR)聚光器,由多组水平布置的窄带形平面镜构成。每组反射镜都有一定的倾角,将入射的太阳光反射到公共的焦线上。吸热器放在焦线上,用于吸收聚集的辐射能^[1]。LFR聚光器可用于大型太阳能热发电、小型蒸汽发电工程和

蒸汽式制冷工程等^[2,3]。杜春旭等^[4,5]对东西向布置的LFR聚光器跟踪及遮挡进行了分析,给出全年无阴影与遮挡时相邻镜元最小间距的计算方法。刘颖等^[6,7]利用有限元法和蒙特卡罗法计算了旋转抛物面(蝶式)聚光器的光斑能流密度分布,指出聚光器聚焦光斑能流密度分布的研究对优化系统效率、

收稿日期: 2012-06-05; 收到修改稿日期: 2012-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(60976038)、国家科技支撑计划(2012BAA05B02)和吉林省科技厅项目(20100419)资助课题。

作者简介: 赵金龙(1987—),男,硕士研究生,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: zhaojinlong2015@139.com

导师简介: 李 林(1972—),男,博士,研究员,主要从事光电子材料与器件等方面的研究。E-mail: lilin@cust.edu.cn

(通信联系人)

改善系统结构起到关键作用。江守利等^[8,9]对两级反射聚光变频光伏系统(抛物面槽式聚光器)进行了分析,详细介绍了光线追迹计算光斑能流密度分布的方法。由于 LFR 聚光器结构相对抛物面槽式及蝶式聚光器更加复杂,关于 LFR 聚光器光斑能流密度分布计算的论述较少,Abbas 等^[10]利用蒙特卡罗光线追迹的方法,对比分析了圆面柱形反射镜与抛物面柱形反射镜 LFR 聚光器光斑能流密度分布情况,但并没有对于其分析方法进行详细介绍。本文详细介绍了光线追迹计算 LFR 聚光器光斑能流密度分布的方法。

2 光学系统几何模型

LFR 聚光器,采用单轴跟踪,每一镜元都遵循镜面反射,实时精确跟踪太阳,将太阳光反射至固定的线性吸热器上^[5]。在现有 LFR 光学模型^[4]的基础上,考虑太阳形状、阴影及遮挡的影响,建立南北向 LFR 聚光器几何光学模型(图 1),对于任意方向布置的镜场可以在代入太阳方位角时加入旋转变量。

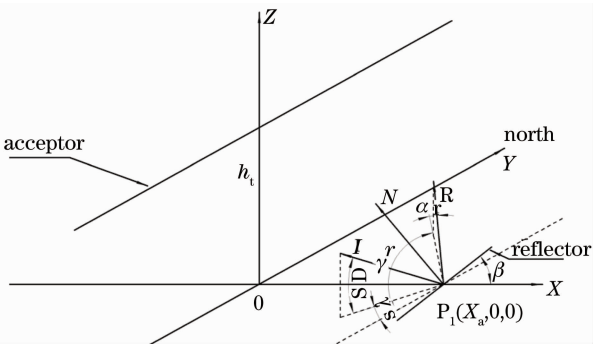


图 1 线性菲涅耳反射聚光器几何光学模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LFR geometric optical model

以接收塔基为原点,正东方向为 X 轴,正北方向为 Y 轴,天顶方向为 Z 轴建立坐标系(图 1)。接收塔高度为 h_t ,反射镜中心点 P_1 到接收器的水平距离为 X_a ,自西向东对镜元编号,第 j 面反射镜中心点坐标为 X_{aj} ,反射镜与 X 轴正向夹角为 β 。入射光线、法线、反射光线的方向向量分别为 \mathbf{I} 、 \mathbf{N} 、 \mathbf{R} 。入射光线的太阳高度角与太阳方位角分别为 α_s 、 γ_s ,反射光线的高度角与方位角分别为 α_r 、 γ_r 。 \mathbf{I} 、 \mathbf{N} 、 \mathbf{R} 可以表示为^[4]

$$\mathbf{I} = [-\cos \alpha_s \sin \gamma_s \quad -\cos \alpha_s \cos \gamma_s \quad \sin \alpha_s]^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{N} = [-\sin \beta \quad 0 \quad \cos \beta]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = [-\cos \alpha_r \sin \gamma_r \quad -\cos \alpha_r \cos \gamma_r \quad \sin \alpha_r]^T. \quad (3)$$

2.1 跟踪倾角的计算

利用平面反射的原理,入射角等于反射角,入射光线、反射光线、法线在同一平面内,可以得到如下条件^[4]:

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{N} = \cos \theta, \quad (4)$$

$$\mathbf{R} + \mathbf{I} = 2\mathbf{N}\cos \theta, \quad (5)$$

式中 θ 为入射角,即入射光线与法线的夹角。由反射光线经过接收器上一点,可以得到如下条件:

$$\frac{h_t}{X_a} = \frac{\sin \alpha_r}{\cos \alpha_r \sin \gamma_r}. \quad (6)$$

由(1)~(3)式利用条件(4)~(6)式可以计算反射光线的高度角、方位角及镜元倾角为

$$\alpha_r = \arcsin\left(\sqrt{h_t^2 \frac{1 - \cos \alpha_s^2 \cos \gamma_s^2}{h_t^2 + X_a^2}}\right), \quad (7)$$

$$\gamma_r = 180^\circ - \arcsin\left(X_a \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha_s^2 \cos \gamma_s^2}{X_a^2 + h_t^2 \cos \alpha_s^2 \cos \gamma_s^2}}\right), \quad (8)$$

$$\beta = \arctan\left[\frac{\cos \alpha_s \sin \gamma_s + \sin \alpha_r \frac{X_a}{h_t}}{\sin \alpha_s + \sin \alpha_r}\right]. \quad (9)$$

2.2 考虑太阳张角时的入射光线方程

聚光镜上一点 P_1 对太阳有一定的张角 β ,因为入射到聚光镜上一点的光线并不是相互平行的,而是一个以该点和太阳中心连线为中心,顶角为 β 的圆锥入射光束^[8]。研究太阳能聚光器聚集性能时需要考虑太阳张角的影响^[14]。建立入射光线方程,需要进行如下矢量变换,如图 2 所示。

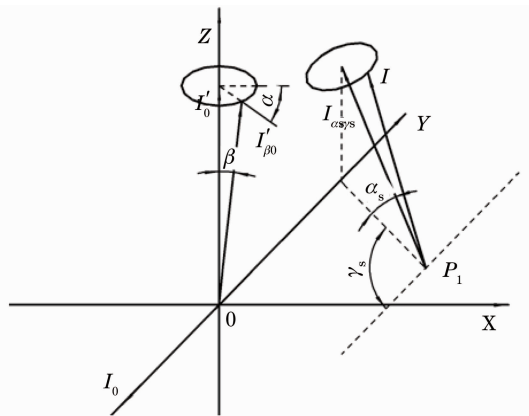


图 2 入射光线矢量变换图

Fig. 2 Sketch of the vector transformation for incident rays

当太阳高度角与太阳方位角 α_s 、 γ_s 同时为 0 时,入射光线用 \mathbf{I}_0 表示为

$$\mathbf{I}_0 = (0 \quad -1 \quad 0)^T. \quad (10)$$

\mathbf{I}_0 绕 X 轴旋转 α_s 角、再绕 Z 轴旋转 γ_s 角后,转换为

太阳高度角、太阳方位角分别为 α_s 、 γ_s 的入射光线，用 $\mathbf{I}_{\alpha_s\gamma_s}$ 表示。 \mathbf{I}_0 到 $\mathbf{I}_{\alpha_s\gamma_s}$ 的矢量变换关系可表示为

$$\mathbf{I}_{\alpha_s\gamma_s} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_s & \sin \gamma_s & 0 \\ -\sin \gamma_s & \cos \gamma_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_s & \sin \alpha_s \\ 0 & -\sin \alpha_s & \cos \alpha_s \end{pmatrix} \mathbf{I}_0. \quad (11)$$

记(1)式为 $\mathbf{I}_{\alpha_s\gamma_s} = \mathbf{A}_3\mathbf{A}_2\mathbf{I}_0$ ，在不考虑太阳形状时，入射光线可以用 $\mathbf{I}_{\alpha_s\gamma_s}$ 表示，将(11)式展开得

$$\mathbf{I}_{\alpha_s\gamma_s} = (-\cos \alpha_s \sin \gamma_s \quad -\cos \alpha_s \cos \gamma_s \quad \sin \alpha_s)^T. \quad (12)$$

太阳锥角 β 、 α 同时为 0，由天顶方向入射的光线用 \mathbf{I}'_0 表示， \mathbf{I}'_0 到 \mathbf{I}_0 的变换关系如下：

$$\mathbf{I}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{I}'_0. \quad (13)$$

记(13)式为 $\mathbf{I}_0 = \mathbf{A}_1\mathbf{I}'_0$ ，太阳锥角为 β 、 α ，日盘法线沿 Z 轴方向入射的光线用 $\mathbf{I}'_{\beta\alpha}$ 表示为

$$\mathbf{I}'_{\beta\alpha} = (\sin \beta \cos \alpha \quad \sin \beta \sin \alpha \quad \cos \beta)^T. \quad (14)$$

太阳高度角、方位角分别为 α_s 、 γ_s ，太阳锥角分别为 α 、 β ，此时的入射光线用 \mathbf{I} 表示，根据

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}_3\mathbf{A}_2\mathbf{A}_1\mathbf{I}'_{\beta\alpha}, \quad (15)$$

得到

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_s \sin \beta \cos \alpha - \cos \alpha_s \sin \gamma_s \cos \beta + \sin \alpha_s \sin \gamma_s \sin \beta \sin \alpha \\ -\sin \gamma_s \sin \beta \cos \alpha - \cos \alpha_s \cos \gamma_s \cos \beta + \sin \alpha_s \cos \gamma_s \sin \beta \sin \alpha \\ \sin \alpha_s \cos \beta + \cos \alpha_s \sin \beta \sin \alpha \end{pmatrix}. \quad (16)$$

记(16)式为 $\mathbf{I} = (I_1 \quad I_2 \quad I_3)^T$ ，设入射点 P_1 坐标为 $(X_{P_1}, Y_{P_1}, Z_{P_1})$ ，过点 P_1 的入射光线参数方程为

$$\begin{cases} X = X_{P_1} + I_1 t \\ Y = Y_{P_1} + I_2 t \\ Z = Z_{P_1} + I_3 t \end{cases} \quad (17)$$

2.3 反射光线方程

针对平面反射镜，按照反射定律建立反射光线方程，法线向量 \mathbf{N} 按照(2)式计算，反射光线方向向量为 \mathbf{R} ，按照(18)式计算

$$\mathbf{R} = 2\mathbf{N}\cos \theta - \mathbf{I}, \quad (18)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{I} \cdot \mathbf{N}}{|\mathbf{I}| |\mathbf{N}|}\right), \quad (19)$$

式中 θ 为入射角，记 $\mathbf{R} = (R_1 \quad R_2 \quad R_3)^T$ ，反射光线参数方程为

$$\begin{cases} X = X_{P_1} + R_1 t \\ Y = Y_{P_1} + R_2 t \\ Z = Z_{P_1} + R_3 t \end{cases} \quad (20)$$

2.4 焦平面上的入射点

接收塔的光学高度(接收器到反射镜旋转轴的高度)为 h_t ，即镜场焦距 F 为 h_t ，焦平面方程为

$$Z - h_t = 0. \quad (21)$$

联立(20)、(21)式得参数 t' 为

$$t' = \frac{h_t - Z_{P_1}}{R_3}. \quad (22)$$

接收面入射点 $P_2(X_{P_2} \quad Y_{P_2} \quad Z_{P_2})$ ，可表示为

$$\begin{cases} X_{P_2} = X_{P_1} + R_1 t' \\ Y_{P_2} = Y_{P_1} + R_2 t' \\ Z_{P_2} = Z_{P_1} + R_3 t' \end{cases} \quad (23)$$

2.5 阴影与遮挡

太阳直射辐射被相邻反射镜遮挡，无法到达该镜元采光面，造成阴影损失。聚光器反射光投射到接收塔之前被相邻聚光器遮挡，造成的遮挡损失。阴影与遮挡的光路图如图 3 所示，入射点为 P_1 ，入射光线、反射光线、法线的方向向量分别为 \mathbf{I} 、 \mathbf{R} 、 \mathbf{N} ，分别按照(2)、(16)、(18)式计算，入射光线、反射光线与相邻镜元的交点分别为 P_3 、 P_4 。

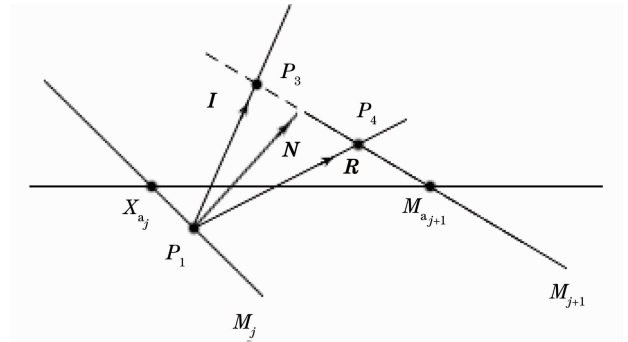


图 3 阴影与阻挡光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the shading and blocking ray path

相邻镜元斜率 $k_{j+1} = \tan \beta_{j+1}$ ，其中 β_{j+1} 为 $j+1$ 面镜元倾角，入射光线方程按照(17)式计算，相邻镜元平面方程为

$$Z = k_{j+1}X - k_{j+1}X_{a_{j+1}}. \quad (24)$$

由(17)、(24)式,计算参数 t'' 得

$$t'' = \frac{k_{j+1}(X_{P_1} - X_{\omega_{j+1}}) - Z_{P_1}}{I_3 - k_{j+1}I_1}. \quad (25)$$

将 t'' 代入(17)式计算入射光线与相邻镜元的交点, $P_3 = (X_{P_3} \ Y_{P_3} \ Z_{P_3})$ 可表示为

$$\begin{cases} X_{P_3} = X_{P_1} + I_1 t'' \\ Y_{P_3} = Y_{P_1} + I_2 t'' \\ Z_{P_3} = Z_{P_1} + I_3 t'' \end{cases}, \quad (26)$$

同理计算反射光线与相邻镜元的交点, $P_4 = (X_{P_4} \ Y_{P_4} \ Z_{P_4})$ 可表示为

$$\begin{cases} X_{P_4} = X_{P_1} + R_1 t''' \\ Y_{P_4} = Y_{P_1} + R_2 t''' \\ Z_{P_4} = Z_{P_1} + R_3 t''' \end{cases}, \quad (27)$$

$$t''' = \frac{k_{j+1}(X_{P_1} - X_{\omega_{j+1}}) - Z_{P_1}}{R_3 - k_{j+1}R_1}, \quad (28)$$

如果 P_3 点在 M_{j+1} 镜元的孔径范围内,则该光线由于阴影被截止,无法到达接收器。如果 P_4 点在 M_{j+1} 镜元的孔径范围内,则该光线由于遮挡被截止,无法到达接收器。

3 能流密度分布的计算

前面讨论了单个入射点的光线轨迹,移动入射点 P_1 在反射镜表面的位置,就得到了一面反射镜在焦平面的光斑,将所有反射镜的光斑叠加,便可计算整个镜场在焦平面上的光斑能流密度分布情况。在二次反射聚光分频光伏系统(抛物面槽式聚光器)光斑能流密度分布计算式^[9]的基础上,增加单个反射镜余弦因子,计算 LFR 聚光器光斑能流密度分布。

3.1 太阳形状的日盘网格划分

太阳日盘上的每一点的亮度并不是相同的^[11],

这种太阳日盘中亮度分布被称为太阳形状,因此圆锥入射光束中的每一条光线所代表的能量也是不相同的。下式^[12]为高斯分布的太阳形状模型:

$$\phi(\beta) = \frac{1}{2\pi\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{\tan^2 \beta}{2\sigma_0^2}\right), \quad (29)$$

式中 β 为径向角位移, σ_0 为高斯分布模型的标准方差,一般建议取为 2.5 mrad ^[12]。上述太阳模型是归一化的,即满足下式^[6]:

$$2\pi \int_0^{\theta_0} \phi(\beta) \sin \beta d\beta = 1, \quad (30)$$

式中 θ_0 为太阳半截角。一般 θ_0 取 4.65 mrad ^[9]。

对于反射镜上每一个点来说,入射光线的太阳圆锥光束都是相同的,因此建立如图 4 所示的网格^[9],对日盘上的发射点 P_0 进行抽样。日盘网格是均匀的,总的网格数为 $N_s = I_s \times J_s$,实际采用的计算点是图 4 中的实心点(网格单位 $\Delta_s = \frac{2\theta_0}{I_s}$)。

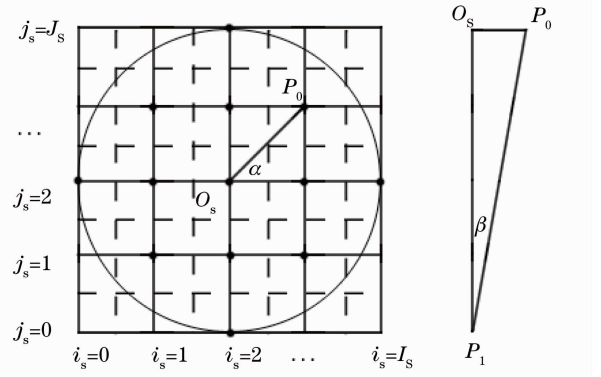


图 4 日盘网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the solar disk meshing

图中入射光线 $\overline{P_0 P_1}$ 对应的入射角 α 及 β 可计算得

$$\alpha_{i_s, j_s} = \begin{cases} 2\pi - \arccos\left[\frac{2i_s - I_s}{\sqrt{(2i_s - I_s)^2 + (2j_s - J_s)^2}}\right], & j_s \leq \frac{J_s}{2} \\ \arccos\left[\frac{2i_s - I_s}{\sqrt{(2i_s - I_s)^2 + (2j_s - J_s)^2}}\right], & j_s > \frac{J_s}{2} \end{cases}, \quad (31)$$

$$\beta_{i_s, j_s} = \arctan\left[\frac{\sqrt{(2i_s - I_s)^2 + (2j_s - J_s)^2}}{I_s} \tan \theta_0\right]. \quad (32)$$

3.2 镜场网格划分

确定入射点的位置,就需要对反射镜进行网格划分,网格数量越多模拟的入射光线数量也就越多,网格数量无限大时,可以逼近光斑能流密度的真实值,但网格数量越多,计算量也就越大,所需要的时间

也就越长。

对 N 面水平的反射镜划分网格,每面反射镜的网格数量为 $N_m = I_m J_m$ 。日盘网格总数量为 $N_s = I_s J_s$ 。总的光线数量为 $N_{\text{tot}} = N_s N_m N$ 。

3.3 能流密度分布的计算

由于每面反射镜的倾角不同,但由反射镜网格数决定的入射光线数量相同,所以不同反射镜上的单条光线能量不同。该影响可以用余弦因子表示,即跟踪过程中反射镜接收的太阳辐射功率与其接收的最大太阳辐射功率之比,等于入射光线与法线夹角的余弦。第 j 面反射镜上每条光线的能量可表示为

$$e_j = \frac{E_0 A_m \cos \theta_j}{N_m}, \quad (33)$$

式中 E_0 为太阳直射辐射强度 (W/m^2), A_m 为镜元面积, θ_j 为第 j 面反射镜光线入射角。对于均匀划分的接收面,每个微元内的能量为

$$E_{ir,jr} = \frac{\sum_{j=1}^N (N_{ir,jr,j} e_j \rho_c)}{\Delta_r} = \frac{E_0 A_m \rho_c}{\Delta_r N_m} \sum_{j=1}^N (\cos \theta_j N_{ir,jr,j}), \quad (34)$$

式中 $N_{ir,jr,j}$ 为第 j 面反射镜的反射光线入射到该微元内的数量, ρ_c 为全光谱反射率, Δ_r 为微元面积,定义接收面上的能流密度与系统入射的能流密度之比为相对能流密度

$$\xi_{ir,jr} = \frac{\sum_{j=1}^N (N_{ir,jr,j} \xi_j \rho_c)}{\Delta_r} = \frac{A_m \rho_c}{\Delta_r N_m} \sum_{j=1}^N (N_{ir,jr,j} \cos \theta_j). \quad (35)$$

考虑太阳形状时的能流密度分布按照下式计算:

$$\xi_{ir,jr} = \frac{A_m \rho_c}{\Delta_r N_m} \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^{N_s} [N_{ir,jr,j,l} \phi(\beta_l) \Delta_s^2 \cos \theta_j], \quad (36)$$

式中 l 为光线自日盘出射时的位置, N_s 为日盘网格的总数量, $N_{ir,jr,j,l}$ 为入射到该微元内,第 j 面反射镜,第 l 日盘位置光线的数量。 Δ_s 为日盘网格单位。

4 数学模型的验证及结果分析

为验证本模型的正确性,采用 Matlab 软件编程,实现 LFR 聚光器光斑能流密度分布的计算,并与美国国家可再生能源实验室 (NREL) 开发的 SolTrace 软件^[13] 分析结果进行对比,对比结果显示光斑能量分布情况基本吻合,证明了本算法的正确性。比较轻微弯曲反射镜的 LFR 聚光器与平面反射镜的 LFR 聚光器光斑能流密度分布情况,分析反射镜面型对 LFR 聚光器的影响。

4.1 数学模型的验证

仿真的菲涅耳镜场系统参数如下:反射镜采用

平面反射镜,单个反射镜宽度 0.7 m,间距(间隙) 0.125 m,长度 16 m,数量 16;接收塔高度 7.2 m;反射镜全光谱反射率为 0.9;时间定为春分日上午 9 时;不计反射镜面型误差与跟踪误差;太阳直射辐射强度取 $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ 。按照上述参数绘制系统三维图,如图 5 所示。

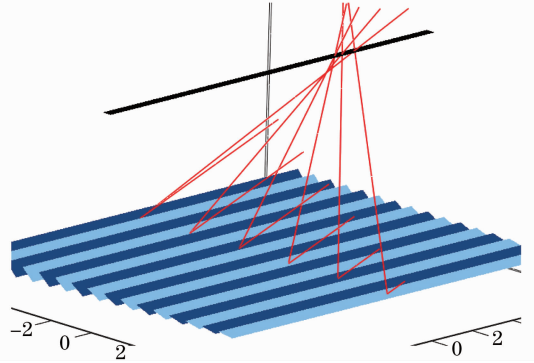


图 5 系统三维图

Fig. 5 Three-dimensional image of the system

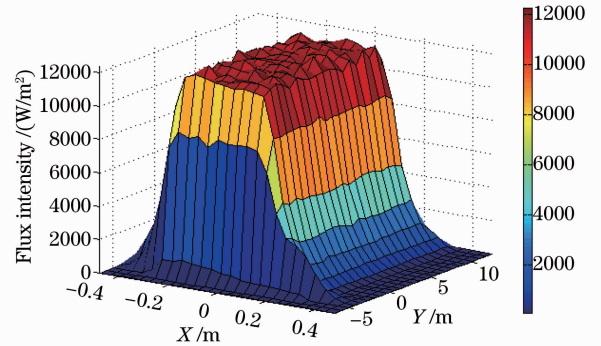


图 6 利用 Matlab 编程计算的 LFR 光斑能流密度分布

Fig. 6 LFR spot flux-density distribution calculated with Matlab program

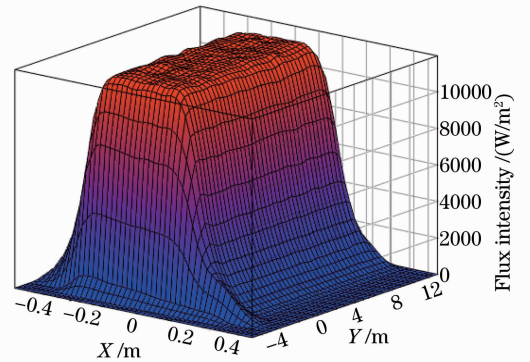


图 7 利用 SolTrace 软件计算的 LFR 光斑能流密度分布

Fig. 7 LFR spot flux-density distribution calculated with SolTrace software

根据(36)式计算光斑能流密度分布,利用 Matlab 仿真软件,编写程序实现该算法(图 6)。利用美国国家可再生能源实验室开发的 SolTrace 软件,对于上述菲涅耳镜场进行光学仿真,计算焦平面上的光斑能流密度分布(图 7)。为更好地对比结

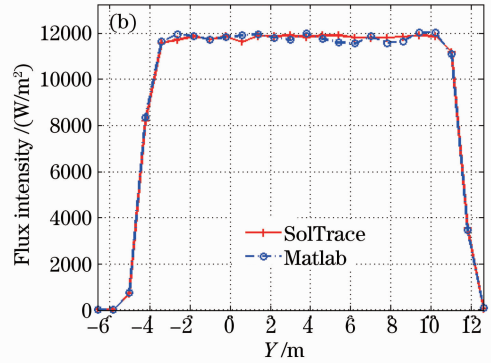
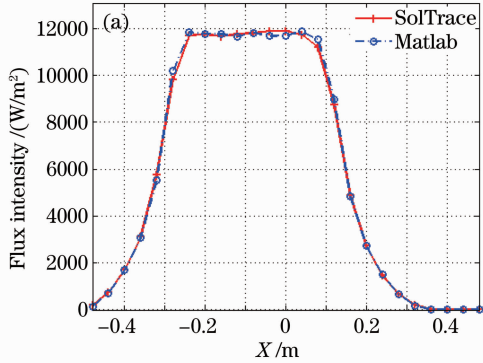


图 8 不同程序计算的光斑能流密度分布对比。(a)横向截面;(b)纵向截面

Fig. 8 Comparison of the spot flux-density distribution with different programs. (a) Transverse section; (b) longitudinal section

4.2 结果分析

采用平面反射镜的 LFR 镜场,理想状态下光斑中心能量应为均匀分布,但由图 8 可以看出,两种分析结果的光斑能量中心分布都不均匀,这是由于模拟的光线数量有限造成的。两种分析结果,中心能量分布略有不同,是由于入射光线的抽样采样方法不同造成的,SolTrace 软件利用随机抽样的方法获取入射光线,本文所采用的 Matlab 软件是利用划分等间距网格的方法获取入射光线,在光线数量有限的情况下分析结果略有不同。当光线数量趋近无限大时,两种分析方法计算结果将完全相同。由光斑能量分布情况[图 8(b)],可以看出光斑在南北方向

上(Y轴),有一定的偏离距离,在布置小规模 LFR 聚光器时,需要将接收器向北移动,以减少端部损失。光斑在东西方向(X轴)上有一定的偏移,是由于反射镜相互遮挡造成。

为提高聚光比,增加聚光场效率,可以采用轻微弯曲的反射镜,例如圆面柱形反射镜或抛物面柱形反射镜^[10]。对比平面反射镜与圆面柱形反射镜的 LFR 镜场光斑能流密度分布(图 9),可以看出采用圆面柱形的反射镜,光斑能量分布较集中。在建设大容量的 LFR 聚光镜场时,可以考虑采用微弯的反射镜,提高聚光场效率。

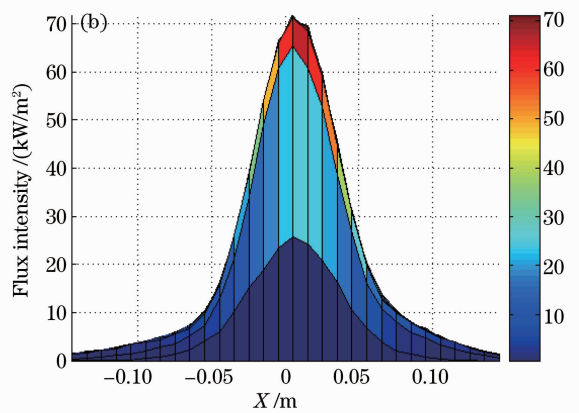
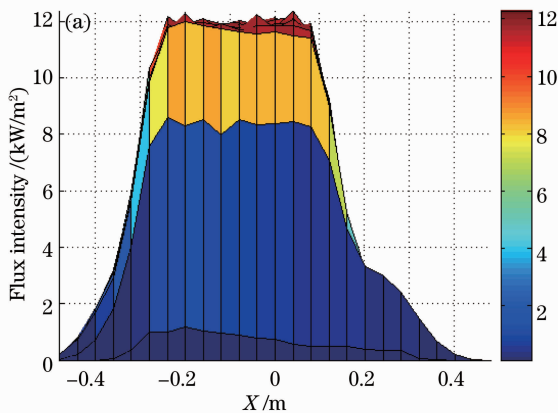


图 9 LFR 光斑能流密度分布对比。(a)平面反射镜;(b)圆面柱形反射镜

Fig. 9 Comparison of LFR spot flux-density distribution. (a) Flat mirrors; (b) circular-cylindrical mirrors

5 结 论

本文采用光线追迹的方法计算了LFR聚光器焦平面上的光斑能流密度分布,其中考虑了太阳形状、余弦损失、阴影及遮挡损失的影响。通过实例计算的比较,证明了该方法的正确性。通过计算接收器的能流密度分布,可以推算出接收器的温度分布,聚光系统的光学效率和聚光比等参量,为LFR聚光器的结构优化奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 P. L. Singh, R. M. Sarviya, J. L. Bhagoria. Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers[J]. *Appl. Energy*, 2010, **119**(2): 541~550
- 2 W. J. Platzer. Linear Fresnel collectors as an emerging option for concentrating solar thermal power[C]. Proceedings of the ISES Solar World Congress On Renewable Energy Shaping Our Future, 2009. 1065~1074
- 3 N. Velázquez, O. García-Valladares, D. Saucedo *et al.*. Numerical simulation of a linear Fresnel reflector concentrator used as direct generator in a solar-GAX cycle [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, **51**(3): 434~445
- 4 Du Chunxu, Wang Pu, Ma Chongfang *et al.*. Optical geometric method for LFR mirror field arrangement without shading and blocking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3276~3282
杜春旭,王普,马重芳等. 线性菲涅耳聚光系统无遮挡镜场布置的光学几何方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3276~3282
- 5 Du Chunxu, Wang Pu, Ma Chongfang *et al.*. Vector algorithm of tracking tilted angle of Fresnel concentrated solar power systems [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2011, **32**(6): 831~835
杜春旭,王普,马重芳等. 菲涅耳太阳能聚光系统跟踪倾角的矢量算法[J]. *太阳能学报*, 2011, **32**(6): 831~835
- 6 Liu Ying, Dai Jingmin, Lang Zhiguo *et al.*. Finite-element analysis for flux distribution on the focal plane of rotating parabolic concentrators[J]. *Acta Optica 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 Liu Ying, Dai Jingmin, Sun Xiaogang. Calculation method of flux distribution on focal plane in parabolic concentrators[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2007, **28**(10): 1049~1054
刘颖,戴景民,孙晓刚等. 抛物面型聚光器聚焦光斑能流密度分布的计算[J]. *太阳能学报*, 2007, **28**(10): 1049~1054
- 8 Jiang Shouli, Chen Zeshao, Hu Peng *et al.*. Three-dimension optical model of two-stage reflective spectral beam splitting concentrating PV system [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2009, **30**(9): 1188~1193
江守利,陈则韶,胡亢等. 二次反射聚光器分频光伏系统的三维光学模型[J]. *太阳能学报*, 2009, **30**(9): 1188~1193
- 9 Jiang Shouli. Fundamental Theory and Experimental Study of Reflective Concentrating Solar Energy Utilization [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. 33~42
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:中国科技大学,2009. 33~42
- 10 R. Abbas, M. J. Montes, M. Piera *et al.*. Solar radiation concentration features in Linear Fresnel reflector arrays [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, **54**(1): 133~144
- 11 A. Neumann, A. Witzke, S. A. Jones *et al.*. Representative terrestrial solar brightness profiles [J]. *J. Solar Energy Engineering-Trans. Asme*, 2002, **124**(2): 198~204
- 12 A. J. Harris. Focal plane flux density distributions produced by solar concentrating reflectors[J]. *Solar Energy*, 1981, **27**(5): 403~411
- 13 NREL. Concentrating Solar Power Research; SolTrace Optical Modeling Software [EB/OL]. <http://www.nrel.gov/csp/soltrace/>
- 14 Du Shenghua, Xia Xinlin, Tang Yao. Numerical investigation on effects of non-parallelism of solar rays on concentrating solar power[J]. *Acta Energiae 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

栏目编辑: 韩峰