

太阳能塔式电站镜场对地面的遮阳分析<sup>\*</sup>

王瑞庭<sup>1</sup>, 魏秀东<sup>2</sup>

(1 吉林大学 数学学院, 长春 130022)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心, 长春 130033)

**摘 要:**分析了拟建于北京市延庆县的 1 MW 太阳能塔式电站定日镜场对地面的遮阳情况. 采用光线追迹计算了定日镜对地面的阴影. 为了精确计算镜场对地面的阴影面积, 提出了相邻镜面间阴影率的计算方法, 并推导了计算公式. 提出了在一段时期内地面日照时间分布的统计方法. 使用 MATLAB 编程模拟了镜场对地面的阴影以及地面日照时间分布情况, 并能够绘制任意时刻地面阴影图和任意时期内地面日照时间分布图.

**关键词:**太阳能塔式电站; 定日镜场; 光线追迹; 阴影率; 日照时间

**中图分类号:**TK514      **文献标识码:**A      **文章编号:**1004-4213(2009)09-2414-5

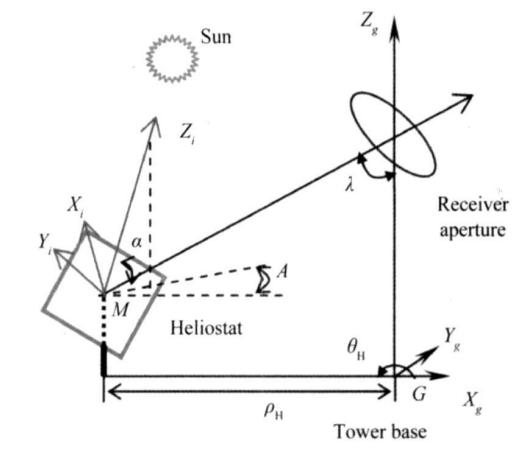
0 引言

太阳能发电技术主要包括光伏发电<sup>[1]</sup>和热发电<sup>[2]</sup>. 太阳能塔式热发电技术<sup>[2]</sup>是太阳能热发电中一种较大规模的发电方式, 它主要由定日镜场、塔、中央吸热器、传热换热装置、储热装置及热发电装置组成. 该技术是利用定日镜绕双轴<sup>[3-4]</sup>转动跟踪太阳并将太阳辐射汇聚到塔顶吸热器, 再利用传热换热装置将获得的热能输送到常规热发电机组, 最后获得电能输出. 太阳能的主要缺点是它的分散性, 这使得在收集太阳能方面存在一定的困难. 要获得足够的太阳能, 就要有面积足够大的采光设备.

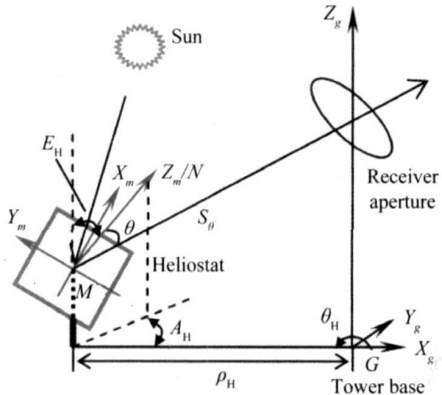
拟建于我国北京市延庆县的 1 MW 太阳能塔式电站是一座实验性电站, 设计镜场采光面积 10 000 m<sup>2</sup>, 约占用耕地 45 000 m<sup>2</sup>. 为了提高土地资源的利用率, 考虑在镜场地面上穿插种植农作物, 因此有必要分析镜场对地面的遮阳情况. 本文采用光线追迹法计算定日镜对地面的阴影, 提出了精确计算镜场对地面的阴影面积方法, 并推导了计算公式; 提出了在一段时期内地面日照时间分布的统计方法; 使用 MATLAB 编程模拟了镜场对地面的阴影以及地面日照时间分布情况, 并能够绘制任意时刻地面阴影图和任意时期内地面日照时间分布图, 为分析农作物种植, 有效利用土地资源提供了重要依据.

1 坐标系的建立

建立右手直角坐标系(图 1):  $\alpha$  表示太阳高度角<sup>[5]</sup>, 是指阳光入射方向与水平面的夹角;  $A$  表示太阳方位角<sup>[5]</sup>, 是指入射阳光在地面的投影与地面南北轴间的夹角, 太阳的位置可近似由太阳高度角和



(a) Establishing the incidence and the ground coordinate systems



(b) Establishing the mirror coordinate system

图 1 坐标系的建立  
Fig. 1 Establishing the coordinate system

<sup>\*</sup>国家高科技研究发展计划和中国科学院知识创新工程重要方向项目 (2006AA050101, 2006AA05010102 和 2006AA05010501) 资助  
Tel: 0431-86176893    Email: wei\_xiudong@yahoo.com.cn  
收稿日期: 2008-08-06    修回日期: 2008-09-05

方位角确定; $\lambda$ 表示镜面中心与吸热器采光口中心连线相对竖直方向的夹角; $\theta_0$ 表示定日镜在地面坐标系中的方位角, $\theta$ 表示主光线在镜面上的入射角; $E_H$ 、 $A_H$ 分别表示定日镜跟踪太阳时的俯仰角和方位角; $G$ 和 $M$ 分别表示塔基和镜面中心.在跟踪太阳过程中镜面中心的反射光线瞄准吸热器采光口的中心.

以 $G$ 为原点建立地面坐标系 $X_gY_gZ_g$ (如图1(a)), $X_g$ 轴水平指向正南, $Y_g$ 轴水平指向正东, $Z_g$ 轴指向天顶;以 $M$ 为原点建立入射坐标系 $X_iY_iZ_i$ (如图1(a)), $Z_i$ 轴平行于入射主光线,方向指向太阳, $X_i$ 轴垂直于 $Z_i$ 轴并位于水平面内, $Y_i$ 轴垂直于 $X_i$ 轴方向向上;以 $M$ 为原点建立镜面坐标系 $X_mY_mZ_m$ (如图1(b)), $Z_m$ 轴与镜面中心法线重合,方向向上, $X_m$ 轴与定日镜的水平转轴重合, $Y_m$ 轴垂直于 $X_m$ 轴方向向上, $X_m$ 、 $Y_m$ 轴均在镜面内.

## 2 定日镜对地面的阴影

采用光线追迹法<sup>[6-7]</sup>计算定日镜对地面的阴影.在地面坐标系 $X_gY_gZ_g$ 中(如图1(a)),入射光线的方向余弦可写为

$$\begin{aligned}\cos \alpha &= \cos A \cos \alpha \\ \cos \beta_i &= \sin A \cos \alpha \\ \cos \gamma_i &= \sin \alpha\end{aligned}\tag{1}$$

式中, $\alpha$ 表示太阳高度角, $A$ 表示太阳方位角.

设镜面上追迹点的坐标为 $(x_m, y_m, 0)$ ,将该坐标变换到地面坐标系中,由镜面坐标系向地面坐标系的变换矩阵为

$$M_1 = \begin{bmatrix} -\sin A_H & -\cos A_H \cos E_H & \cos A_H \sin E_H & X_{gH} \\ \cos A_H & -\sin A_H \cos E_H & \sin A_H \sin E_H & Y_{gH} \\ 0 & \sin E_H & \cos E_H & Z_{gH} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{2}$$

利用式(2)可得镜面追迹点在地面坐标系中的坐标为

$$\begin{aligned}x_{mg} &= -\sin A_H x_m - \cos A_H \cos E_H y_m + X_{gH} \\ y_{mg} &= \cos A_H x_m - \sin A_H \cos E_H y_m + Y_{gH} \\ z_{mg} &= \sin E_H y_m + Z_{gH}\end{aligned}\tag{3}$$

式中, $X_{gH}$ 、 $Y_{gH}$ 、 $Z_{gH}$ 表示定日镜的镜面中心在地面坐标系中的坐标.

由式(1)、(3)可得入射光线方程为

$$\frac{x_g - x_{mg}}{\cos \alpha_i} = \frac{y_g - y_{mg}}{\cos \beta_i} = \frac{z_g - z_{mg}}{\cos \gamma_i}\tag{4}$$

入射光线与地面 $Z_g=0$ 的交点坐标为

$$\begin{aligned}x_g &= x_{mg} - z_{mg} \tan \alpha \cos A \\ y_g &= y_{mg} - z_{mg} \tan \alpha \sin A\end{aligned}\tag{5}$$

由式(5)可求得镜面上任意追迹点沿阳光入射

方向在地面上的投影坐标.  
单个定日镜在地面的阴影面积可表示为

$$A_{\text{shadow}} = \frac{(h_w \times h_l) \cos \theta}{\sin \alpha}\tag{6}$$

式中, $\alpha$ 表示太阳高度角, $\theta$ 表示入射主光线在镜面上的入射角, $h_w$ 表示镜面宽度, $h_l$ 表示镜面高度.  
当太阳高角较低时,相邻定日镜间存在阴影,致使定日镜在地面上的阴影存在部分重叠,按式(6)计算的阴影面积值偏大于实际值.如果已知相邻镜面间的阴影率,则实际定日镜场在地面的阴影面积可表示为

$$\text{Field}_{\text{shadow}} = \sum_{i=1}^n \frac{(h_l \times h_w) \cos \theta}{\sin \alpha} (1 - \eta_{\text{shading}})\tag{7}$$

式中, $n$ 表示定日镜总数, $\eta_{\text{shading}}$ 表示相邻定日镜镜面间的阴影率,可见要精确计算镜场对地面的阴影面积,需计算相邻镜面间的阴影率.

镜面间的阴影主要是由相邻定日镜造成的,在计算中可近似认为相邻定日镜镜面相互平行<sup>[8]</sup>.以被阴影定日镜 $H_{\text{shaded}}$ 的镜面中心 $M$ 为原点建立直角坐标系 $X_oY_oZ_o$ (图2),其中 $Z_o$ 轴指向天顶, $X_o$ 轴水平指向正南, $Y_o$ 轴水平指向正东.

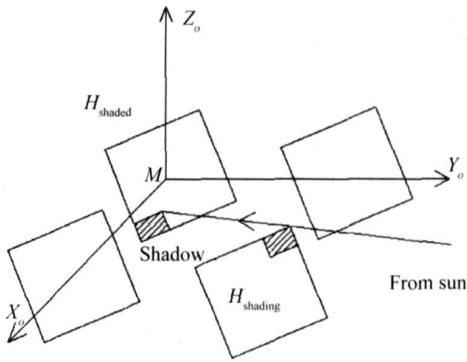


图2 被阴影定日镜坐标系 $X_oY_oZ_o$   
Fig.2 The axes  $X_oY_oZ_o$  of the shaded heliostat  
阴影定日镜 $H_{\text{shading}}$ 在坐标系 $X_oY_oZ_o$ 中的坐标可表示为

$$\begin{aligned}X_{so} &= X_{sg} - X_{og} \\ Y_{so} &= Y_{sg} - Y_{og} \\ Z_{so} &= Z_{sg} - Z_{og}\end{aligned}\tag{8}$$

式中, $(X_{sg}, Y_{sg}, Z_{sg})$ 、 $(X_{og}, Y_{og}, Z_{og})$ 分别表示定日镜 $H_{\text{shading}}$ 、 $H_{\text{shaded}}$ 在地面坐标系中的坐标.通过坐标变换,可求得阴影定日镜在入射坐标系中的坐标,由地面坐标系到入射坐标系的变换矩阵为

$$M_2 = \begin{bmatrix} -\sin A & \cos A & 0 & 0 \\ -\sin \alpha \cos A & -\sin \alpha \sin A & \cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha \cos A & \cos \alpha \sin A & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\tag{9}$$

阴影定日镜在入射坐标系中的坐标可表示为

$$X_i = -X_{so} \sin A + Y_{so} \cos A$$
$$Y_i = -\sin \alpha (X_{so} \cos A + Y_{so} \sin A) + Z_{so} \cos \alpha$$
$$Z_i = \cos \alpha (Y_{so} \sin A + X_{so} \cos A) + Z_{so} \sin \alpha$$

(10)

$H_{\text{shading}}$  镜面中心沿入射光方向在  $H_{\text{shaded}}$  镜面上的投影坐标为

$$X_{is} = X_i$$
$$Y_{is} = Y_i$$
$$Z_{is} = Z_i - Z_m / \cos \theta$$

(11)

式中,  $Z_m$  为阴影定日镜  $H_{\text{shading}}$  的镜面中心在被阴影定日镜  $H_{\text{shaded}}$  镜面坐标系中的  $Z$  坐标, 如图 3.

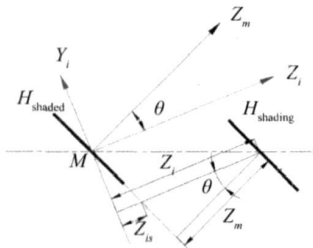


图 3 阴影定日镜在被阴影镜面上的投影

Fig. 3 The projection from the shading heliostat onto the shaded heliostat

由式(8)可得阴影定日镜  $H_{\text{shading}}$  的镜面中心在地面坐标系中的坐标, 再利用坐标变换可求得  $Z_m$  的值. 由地面坐标系到镜面坐标系的变换矩阵为

$$M_3 = \begin{bmatrix} -\sin A_H & \cos A_H & 0 & 0 \\ -\cos E_H \cos A_H & -\cos E_H \sin A_H & \sin E_H & 0 \\ \sin E_H \cos A_H & \sin E_H \sin A_H & \cos E_H & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(12)

则  $Z_m$  的值可表示为

$$Z_m = \sin E_H (X_{so} \cos A_H + Y_{so} \sin A_H) + Z_{so} \cos E_H$$

(13)

由式(10)、(11)、(13)可计算阴影定日镜的镜面中心在入射坐标系中的坐标  $(X_{is}, Y_{is}, Z_{is})$  (如图 3). 通过坐标变换可求得阴影定日镜的镜面中心沿入射光方向在被阴影镜面上的投影坐标, 由入射坐标系到镜面坐标系的变换矩阵为

$$M_4 = M_3 M_3^T$$

(14)

式中,  $M_3$  表示地面坐标系到镜面坐标系的变换矩阵(如式 12),  $M_3^T$  表示式(9)的转置.

根据坐标变换矩阵(14), 阴影定日镜的镜面中心沿入射光方向在被阴影镜面上的投影坐标表示为

$$X_{mi} = X_{is} \cos (A_H - A) + Y_{is} \sin \alpha \sin (A_H - A) - Z_{is} \cos \alpha \sin (A_H - A)$$
$$Y_{mi} = -X_{is} \cos E_H \sin (A_H - A) + Y_{is} [\cos E_H \sin \alpha \cos (A_H - A) + \sin E_H \cos \alpha]$$
$$Z_{mi} = Z_{is} [\cos E_H \cos \alpha + \sin E_H \sin \alpha \sin (A_H - A)]$$

(15)

根据图 4 可写出存在阴影的条件为

$$Z_i > 0 \text{ 且 } \begin{cases} |X_{mi}| < h_w \\ |Y_{mi}| < h_l \end{cases}$$

(16)

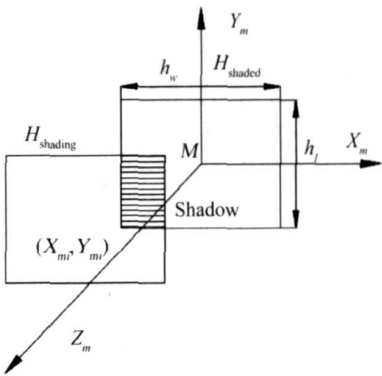


图 4 相邻定日镜间的阴影示意

Fig. 4 Schematic of the shading between adjacent heliostats

在镜面上追迹  $n \times n$  个点, 并生成  $n$  行  $n$  列的二维全 1 矩阵, 矩阵元素与追迹点一一对应, 位于镜面第  $k$  行  $l$  列  $(0 < k < n, 0 < l < n)$  的追迹点的坐标可表示为

$$X_{mkl} = \frac{h_w}{n} (l - \frac{n}{2} - 0.5)$$
$$Y_{mkl} = \frac{h_l}{n} (0.5 + \frac{n}{2} - k)$$

(17)

则追迹点被阴影的条件是

$$Y_{mi} < 0 \text{ 且 } X_{mi} < 0 \begin{cases} 0.5 - \frac{nY_{mi}}{h_l} < k < n + 0.5 \\ 0.5 < l < n + 0.5 + \frac{nX_{mi}}{h_w} \end{cases}$$
$$Y_{mi} > 0 \text{ 且 } X_{mi} < 0 \begin{cases} 0.5 < k < n + 0.5 - \frac{nY_{mi}}{h_l} \\ 0.5 < l < n + 0.5 + \frac{nX_{mi}}{h_w} \end{cases}$$
$$Y_{mi} < 0 \text{ 且 } X_{mi} > 0 \begin{cases} 0.5 - \frac{nY_{mi}}{h_l} < k < n + 0.5 \\ 0.5 + \frac{nX_{mi}}{h_w} < l < n + 0.5 \end{cases}$$
$$Y_{mi} > 0 \text{ 且 } X_{mi} > 0 \begin{cases} 0.5 < k < n + 0.5 - \frac{nY_{mi}}{h_l} \\ 0.5 + \frac{nX_{mi}}{h_w} < l < n + 0.5 \end{cases}$$

(18)

在计算阴影率的程序中, 根据式(18)判断追迹点是否被阴影, 判断被阴影的追迹点, 在矩阵的对应位置记 0, 最后统计矩阵中 0 的个数占总追迹点数的百分比, 即可得到镜面间的阴影率  $\eta_{\text{shading}}$ , 代入式(7), 可求得镜场对地面的阴影面积.

假设 1 MW 塔式太阳能电站的镜场布置如图 5, 定日镜采光面尺寸为  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ , 镜面中心离地高度为 6 m, 镜场由 100 面定日镜布置而成, 计算得到的镜场占地面积(不包括塔)为  $45\,028 \text{ m}^2$ .

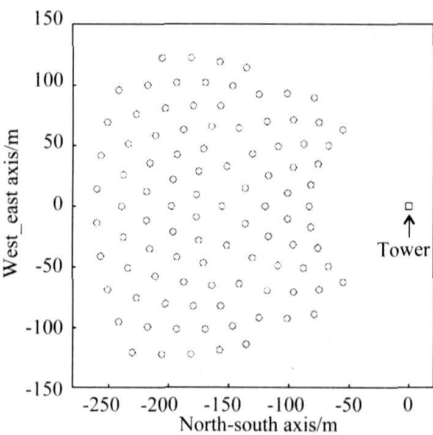


图5 镜场布置图

Fig.5 The pattern of the heliostat field layout

根据式(5)计算镜场对地面的阴影分布如图6,其中图6(a)表示春分日正午12时镜场的阴影分布,阴影面积为12 705 m<sup>2</sup>;图6(b)表示春分日下午15时镜场的阴影分布,阴影面积为16 583 m<sup>2</sup>.

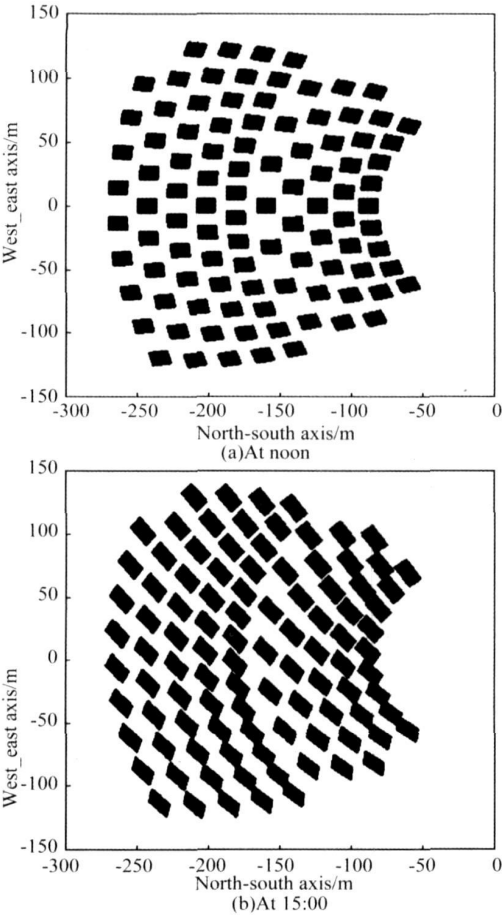


图6 定日镜场的阴影分布

Fig.6 Distribution of the shadow of the heliostat field

3 地面日照时间分布

日照时间分布是指镜场地面上太阳照射的时间分布,给出在一段时期内镜场地面某区域的日照时间占总日照时间的百分比,本文采用光线追迹和量

化法统计镜场地面在一段时期内的日照时间分布,计算过程为

- 1)光线追迹,在镜面追迹  $N$  个点,根据式(5)计算追迹点沿入射光方向在地面上的投影坐标;
- 2)量化地面,将镜场地面划分为  $k \times l$  个小区域,以矩阵方式排布,并生成  $k$  行  $l$  列的二维全1矩阵,矩阵元素与地面划分的小区域一一对应.判断追迹点在地面上的投影坐标是否被包含在该小区域内,将包含该坐标位置的小区域的对应矩阵元素置0;
- 3)在考察时期内,每计算一个抽样时间点,重复第1、2步的计算;
- 4)所有抽样时间点的计算完成后,将代表地面小区域分布的矩阵相加,得到新的矩阵,其矩阵元素也与镜场的小区域一一对应.假设总抽样时间点数为  $u$  个,计算完成后某小区域对应矩阵元素的数值为  $v$ ,则该小区域在考察时期内的相对日照时间为

$$T_{\text{shine}} = T \frac{v}{u}$$

(19)

式中,  $T_{\text{shine}}$  表示考察时期内的相对日照时间,  $T$  表示考察时期内的总日照时间.图7表示了从春分日到夏至日镜场地面的日照时间分布,其中相对日照时间小于80%的区域面积为28 397 m<sup>2</sup>,占镜场总面积的63%,相对日照时间小于65%的区域面积为20 253 m<sup>2</sup>,占镜场总面积的45%.

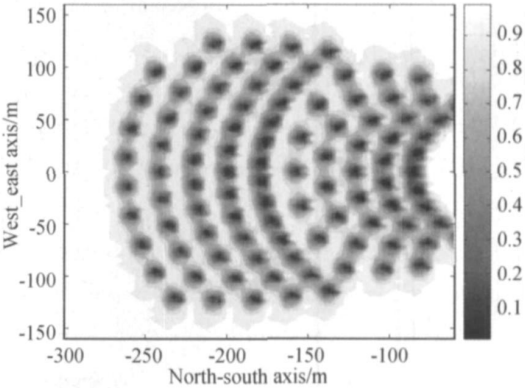


图7 镜场地面日照时间分布

Fig.7 The distribution of the sunlit time of the ground

一般农作物具有一定的高度,针对所种植农作物的具体生理特性(农作物高度、体积等),通过改变式(4)中  $z_g$  的值,可计算镜场地面以上一定高度区域范围内的遮阳情况.

4 结论

目前,太阳能塔式热发电技术被认为是可以实现商业化的.随着电站规模的扩大,发电成本随之降低,但镜场占用的土地面积增大,以至浪费土地资源,因此商业化太阳能塔式电站一般考虑建在人烟

稀少的荒漠地区,这种情况下无需考虑镜场对地面的遮阳.对于占用耕地的实验性太阳能塔式电站,为了提高土地资源的利用率,需考虑在镜场地面上穿插种植农作物.农作物的生长可能会引起地表土壤的变形,而定日镜支架的地基很牢固,因此农作物不会对电站设施造成不良影响.本文提出了计算镜场地面及地面以上一定高度区域范围内日照时间分布的方法,并以圆弧交错式镜场布置为例,计算了从春分日到夏至日镜场地面的日照时间分布,绘制出日照时间分布图,这为镜场地面农作物的种植研究提供了重要依据.

参考文献

[1] REN Ju, GUO Wen-ge, ZHENG Jian-bang. Analysis and simulation of solar cells V-A properties based on P-N junction [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 171-175.  
任驹,郭文阁,郑建邦. 基于 P-N 结的太阳能电池伏安特性的分析与模拟[J]. 2006, **35**(2): 171-175.

[2] MILLS D. Advances in solar thermal electricity technology [J]. *Solar Energy*, 2004, **76**(1-3): 19-31.

[3] IGEL E A, HUGHES R L. Optical analysis of solar facility

heliostats [J]. *Solar Energy*, 1979, **22**(3): 283-295.

[4] RIES H, SHUBNELL M. The optics of a two-stage solar furnace [J]. *Solar Energy Materials*, 1990, **21**(2-3): 213-217.

[5] STINE W B, GEYER M. Power from the Sun [M/OL]. (2001), [2008-8-3], <http://www.powerfromthesun.net/book.htm>.

[6] ZHANG Hong-xin, LU Zhen-wu, LI Feng-you, et al. The building and analysis of the superposition compound eye's optical model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1106-1109 .  
张红鑫,卢振武,李凤有,等.重叠复眼光学模型的建立与分析[J]. 光子学报,2007, **36**(6): 1106-1109.

[7] MA Hua, ZENG Xiao-dong, TIAN Ya-ling. Heteroaxial double half-cylindrical lens collimate beam of laser diode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 181-184.  
马华,曾晓东,田亚玲.异轴双半圆柱透镜准直半导体激光光束[J]. 光子学报,2008, **37**(1): 181-184.

[8] MCFEE R H. Power collection reduction by mirror surface nonflatness and tracking error for a central receiver solar power system [J]. *Appl Opt*, 1975, **14**(7): 1493-1502.

Shadow of Heliostat Field in the Solar Tower Power Plant

WANG Rui-ting<sup>1</sup>, WEI Xiu-dong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Mathematics, Jilin University, Changchun 130022, China)  
(<sup>2</sup> Optoelectronic Technology Center, Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The shadow of the heliostat field on the ground in the 1 MW solar tower power plant, which will be built in the Yanqing town of the Beijing city, is analyzed. The shadow of the heliostat on the ground is calculated with ray trace method. For calculating the shadow area of the heliostat field on the ground accurately, the calculation method of the shading ratio among the adjacent heliostats is proposed and the theoretic formulas are derived. The statistical method of the sunlit time distribution on the ground in a period is proposed. The program based on the MATLAB is developed for modeling the shadow of the heliostat field and the sunlit time distribution on the ground. The shadow pattern of the field at any time and the sunlit time distribution on the ground in any period can be made with the program.

**Key words:** Solar tower power plant; Heliostat field; Ray trace; Shading ratio; Sunlit time

**WANG Rui-ting** was born in 1955. He is an associate professor at College of Mathematics, Jilin University, and his research focus on mathematics and application of the mathematics in the optics.