

文章编号: 0253-2239(2010)11-3276-07

线性菲涅耳聚光系统无遮挡镜场布置的光学几何方法

杜春旭 王 普 马重芳 吴玉庭

(北京工业大学环境与能源工程学院传热强化与过程节能教育部重点实验室,
传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要 线性菲涅耳聚光反射装置(LFR)是每一行反射镜面(镜元)均实时跟踪太阳光的装置,可将太阳入射光反射至固定位置的线性吸热器上,LFR上每一镜元的入射角、反射角和跟踪倾角均时刻变化,使得系统相邻镜元之间的阴影与遮挡分析变得非常复杂。利用光学投影得到LFR镜场中任一镜元在太阳矢量方向上的影长与斜长。为了得到相邻镜元之间不存在阴影与遮挡影响的条件,分析影长与斜长之间的关系,例如最小间距等。最后给出在具体算例情况下的镜元间距分析和镜元布置与有效辐照度的关系。

关键词 线性菲涅耳聚光装置;矢量法;阴影与遮挡;影长与斜长;镜元间距

中图分类号 TK513.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3276

Optical Geometric Method for LFR Mirror Field Arrangement Without Shading and Blocking

Du Chunxu Wang Pu Ma Chongfang Wu Yuting

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education and Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing Municipality, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract In a linear Fresnel reflector(LFR), every mirror row was used to track the sunlight in real time and to reflect the sunlight to fixed linear receiver. Therefore, incidence angle and reflected angle of the sunlight and every mirror row tracking tilt angle vary throughout the year. This makes the analysis of shading and blocking between adjacent mirror rows very complex. The calculating formulae of sun shadow length and skew length of LFR mirror row were obtained by the projective method. In order to get the relation of shading and blocking, shadow length and skew length were analysed, for example the minimum mirror row spacing and etc.. Finally, a examples of mirror spacing analysis and relationship of mirror elements arraryment and effective irradiance was given.

Key words linear Fresnel reflector(LFR); vector algebra; shading and blocking; sun shadow length and skew length; mirror row spacing

1 引 言

当前在可再生能源利用方面,太阳能热发电在世界上得到最多的关注^[1]。高效的太阳能光热和光电转换的实现,太阳能聚光系统是必不可少的。目前主要的太阳能聚光发电系统有槽式、线性菲涅耳型、塔式和碟式等^[2~5]。线性菲涅耳反射装置(LFR)在太阳能利用中,正以其特有的优点得到了越来越多的关注。用LFR进行太阳能聚光热发电正在逐渐得到大规模的应用,对成熟的槽式太阳能聚光热发电系统形成强有力的竞争。

对于LFR系统,反射装置的优化利用是其中重要的一个部分^[6],因为阴影与遮挡分析涉及LFR镜阵相邻反射镜元的间距、塔建费用和有效聚光面积等^[7,8]。这就需要对LFR的阴影与遮挡问题进行充分分析。另外太阳能工程中还需要仔细分析太阳能设备的机械、光学和热特性,这也需要对阴影与遮挡问题进行充分考虑^[9]。阴影是指入射到镜面的光线被相邻镜元遮挡的部分;遮挡是指即便太阳光照射到镜面上,但其反射光被相邻的镜元挡住不能到达吸热器。

收稿日期: 2009-12-17; 收到修改稿日期: 2010-03-18

基金项目: 国家973计划(2010CB227103)资助课题。

作者简介: 杜春旭(1972—),男,硕士,助理研究员,主要从事太阳能发电方面的研究。E-mail: duchunxu@bjut.edu.cn

在 LFR 系统中每一反射镜元的旋转轴位置是固定的,线性吸热器也被悬挂于固定高度的固定位置上。由于太阳的视日运动,使得太阳入射光随时变化,所以每一镜元在跟踪过程中与水平面倾角均不同,进而每一镜元的太阳光入射角和反射矢量均随时间变化,这使得 LFR 的光学分析非常复杂,使阴影与遮挡问题成为 LFR 技术的一个主要难题^[10]。尽管在文献[11~14]中对 LFR 的光学系统有详细的分析,但是其 LFR 系统是基于双轴跟踪的系统。对于该类双轴 LFR 系统,太阳入射光始终与镜元旋转轴所在平面垂直,只要镜元不是重叠布置,就不用考虑阴影的影响,同时遮挡分析变得非常简单。文献[2,15]用绘图方法直观地给出了阴影与遮挡问题的通用图形解法,但是该方法更适合固定的障碍物分析且只能定性地分析,不容易进行定量分析,绘图试算量也非常大。当图形密集时,若将一年中每天每时的太阳位置均标于图上时,并不容易分辨清楚阴影与遮挡影响大小,尤其是南北两侧均有障碍物的情况。文献[16]对塔式系统(点聚焦型菲涅耳聚光系统)的阴影与遮挡问题用几何光学方法进行了详细分析,但该分析基于相互平行的矩形日光反射镜且一个边固定在水平地面上,这与旋转轴在矩形反射镜的中线上的 LFR 系统又有所不同。

本文首先利用矢量分析,得到东西水平布置和南北跟踪的 LFR 镜场中任意 2 个几何紧邻的(不重叠)矩形镜元的反射光矢量和跟踪倾角计算公式;然后根据 LFR 特有的光学特点,计算出镜元在适当水平面上的太阳影长与斜长以及在相同太阳位置条件下的无阴影影响的太阳影长与斜长。通过比较影长与斜长,判断是否有阴影或遮挡的影响,如果有影响则增加镜元之间的间距,重新计算直到两镜元之间的间距满足全年或多年内均没有阴影或遮挡的影响,同时计算结果也是镜元之间最小无阴影与遮挡

的间距。

2 镜面定向分析

LFR 反射镜面可以东西水平布置或南北水平布置。每一镜元遵循镜面反射,精确跟踪太阳从东至西的视日运动并在跟踪过程中必须将太阳光反射至固定的线性吸热装置上^[17]。由文献[18]可知,对于东西水平布置方式,地面覆盖率比南北水平布置方式值要略大,所以本文主要考虑镜面东西水平布置方式下的阴影与遮挡问题。又因为若将反射光矢量假想为太阳矢量,便可以用分析阴影的方法分析遮挡问题,故可进一步简化为仅讨论阴影问题。

图 1 是 LFR 系统的典型示意图,由图 1 可以看出,所有镜元的旋转轴位于同一水平面且与地平面最小距离应是矩形镜元宽度的一半。任意时刻,各镜元与水平面的倾角 β 均不相同。若规定镜面朝南时倾角 β 为正,镜面朝北时倾角 β 为负。倾角 β 引入正负号能方便跟踪控制系统的应用,利用正负可以作为电机正反转的判据,例如 -1° ,电机只需反转 1° 即可;否则,需旋转 359° 。这样对于任一镜元,其倾角始终小于其北侧镜元的倾角。若将吸热器作为 LFR 镜场的参考点,为便于镜元间距计算时镜元与吸热器实际间距的获得,将 LFR 镜场分为南北两侧分别考虑,即对于吸热器北侧镜场,有 $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$,对于吸热器南侧镜场,有 $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$ 。若要分析镜场的阴影与遮挡问题,必须知道任意时刻下太阳位置、任一镜元的入射角、反射矢量及跟踪倾角 β 。太阳位置可以通过天文算法计算得到,在阴影计算时,以矢量给出形式更为方便,其它量也可用矢量法求出。图 2 是镜面东西水平布置方式下 LFR 装置光学反射矢量示意图。

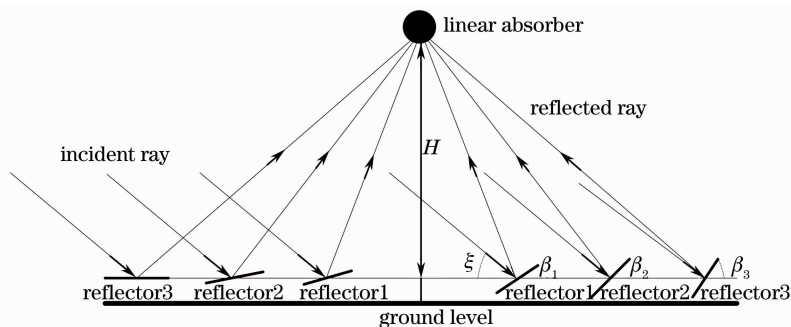


图 1 线性菲涅耳聚光系统的典型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical LFR condensing system

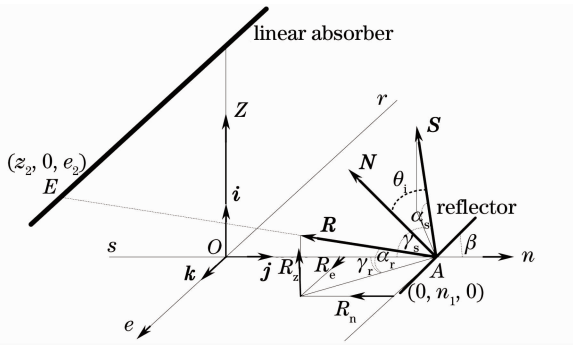


图2 线性菲涅耳反射聚光装置反射矢量图

Fig. 2 Schematic diagram of LFR reflective vector

图中 \mathbf{S} , \mathbf{N} 和 \mathbf{R} 分别为单位太阳矢量和单位镜元法线矢量, 单位反射矢量。 \mathbf{i} , \mathbf{j} 和 \mathbf{k} 分别为天顶、北和东方向单位矢量。 α 为高度角, 方位角 γ 规定由正南算起, 向西为正, 向东为负 (范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$)。下标 s, r 分别表示太阳矢量和反射矢量的方向, 下标 z, n, e 分别表示天顶、北和东方向分量, β 为镜元倾角, n_1 为镜元旋转轴距塔基的南北方向垂直距离, z_2 为塔高, e_2 为反射光反射至吸热器上的反射点距坐标原点东西方向的垂直距离。由图 2 可得

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \sin \alpha_s \mathbf{i} - \cos \alpha_s \cos \gamma_s \mathbf{j} - \cos \alpha_s \sin \gamma_s \mathbf{k} \\ \mathbf{N} = \cos \beta \mathbf{i} - \sin \beta \mathbf{j} \\ \mathbf{R} = \sin \alpha_r \mathbf{i} - \cos \alpha_r \cos \gamma_r \mathbf{j} - \cos \alpha_r \sin \gamma_r \mathbf{k} \end{cases}, (1)$$

注意到 \mathbf{S} , \mathbf{N} 和 \mathbf{R} 均是单位矢量, 由镜面反射原理及矢量求和有

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{N} = \cos \theta_i, (2)$$

$$\mathbf{R} = 2\mathbf{N} \cos \theta_i - \mathbf{S}, (3)$$

由图 2 可知, AE 的方向便是 \mathbf{R} 的方向, 当吸热器距镜元旋转轴的平面高度和镜元旋转轴距塔基的距离已知 (即 z_2, n_1 已知) 时, 由 A 和 E 点的点坐标及 (1), (2) 和 (3) 式可推出

$$R_z = \sqrt{\frac{z_2^2 (1 - \cos^2 \alpha_s \sin^2 \gamma_s)}{z_2^2 + n_1^2}}, (4)$$

$$R_n = \sqrt{\frac{n_1^2 (1 - \cos^2 \alpha_s \sin^2 \gamma_s)}{z_2^2 + n_1^2}}, (5)$$

$$R_e = \frac{e_2}{\sqrt{z_2^2 + n_1^2 + e_2^2}} = \cos \alpha_s \sin \gamma_s, (6)$$

$$\tan \beta = \frac{\cos \alpha_s \cos \gamma_s - R_n}{R_z + \sin \alpha_s}, (7)$$

由 (1) 式与 (4)~(6) 式可得, 反射光的高度角和方位角分别为

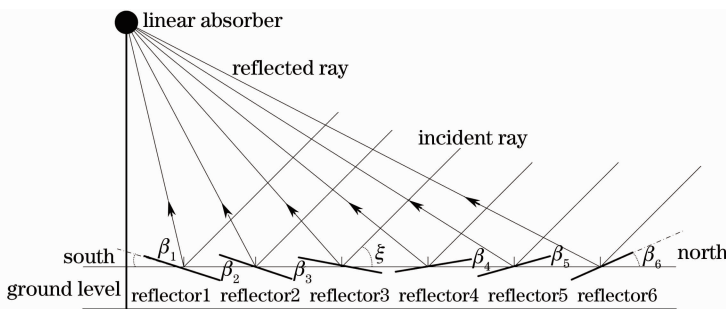
$$\begin{cases} \alpha_r = \arcsin R_z \\ \gamma_r = \arctan \frac{R_e}{R_n} \end{cases} (8)$$

在上述公式中, 对于吸热器北侧镜场, n_1 取正; 对于吸热器南侧镜场, n_1 取负。北侧镜场的反射光方位角 γ_r 取值为 $(-90^\circ \sim 90^\circ)$, 南侧镜场的反射光方位角 γ_r 取值为 $(90^\circ \sim 180^\circ) \cup (-180^\circ \sim -90^\circ)$, 具体求解时应将其置于正确的象限。

3 阴影几何分析

3.1 阴影分析

由上述可知, 若 LFR 镜场中吸热器距镜元旋转轴的平面高度 H 和镜元旋转轴距塔基垂直距离 d 已知, 对于一定的太阳矢量, 便可求得镜元的法线矢量、反射矢量以及倾角。由于太阳矢量的不断变化引起镜场中各个镜元的倾角也不断变化, 所以相邻镜元之间的阴影关系也是一个动态过程。对于吸热器北侧镜场, 当 $\cos \gamma_s > 0$ 时, 如图 1 所示, 有 $\beta_3 > \beta_2 > \beta_1 > 0$, 相邻镜元之间有可能形成阴影。当 $\cos \gamma_s < 0$ 时, 如图 3 所示, 镜面方位相对复杂, 对于镜元 1 与镜元 2, 有 $0 > \beta_2 > \beta_1$, 镜元 2 在镜元 1 上有可能形成阴影。对于镜元 3 与镜元 4, 有 $\beta_3 < 0$, $\beta_4 > 0$, 当 $|\beta_3| > |\beta_4|$ 时, 镜元 4 在镜元 3 上有可能形成阴影。对于镜元 5 与镜元 6, 有

图3 当 $\cos \gamma_s < 0$ 时北侧镜场示意图Fig. 3 Schematic diagram of LFR north mirror field with $\cos \gamma_s < 0$

$\beta_6 > \beta_5 > 0$, 这时镜元之间不会有阴影。

吸热器南侧镜场也有相似的分析, 对于任意两个镜元 1 和 2, (镜元标号如图 1 所示), 当 $\cos \gamma_s < 0$ 时, 有 $0 > \beta_1 > \beta_2$, 镜元 1 在镜元 2 上有可能形成阴影。当 $\cos \gamma_s > 0$ 时, 可分为 3 种情况讨论, 1) 若 $\beta_1 > \beta_2 > 0$, 镜元 2 在镜元 1 上有可能形成阴影; 2) 若 $\beta_2 < 0, \beta_1 > 0$, 当 $|\beta_1| > |\beta_2|$ 时, 镜元 2 在镜元 1 上有可能形成阴影; 3) 若 $0 > \beta_1 > \beta_2$, 这时镜元

之间不会有阴影。

3.2 影长与斜长分析

对于 LFR 镜场任意 2 个相邻镜元, 可以通过求取镜元上边缘在水平面上的影长与斜长来判断镜元之间是否有阴影与遮挡的影响。下面对 LFR 北侧镜场的各种情况分别进行分析。

3.2.1 $\cos \gamma > 0, \alpha > 0$ 时的无阴影间距分析

当 $\cos \gamma > 0, \alpha > 0$ 时, $\beta_2 > \beta_1 > 0$ 如图 4 所示。

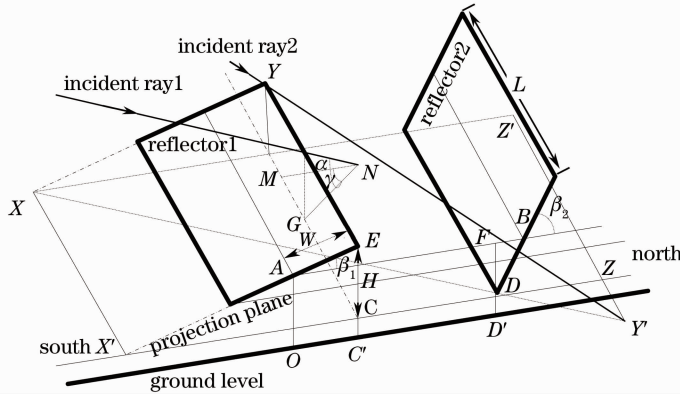


图 4 太阳影长与斜长计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of calculating sun shadow length and skew length

图中镜元长为 L , 宽度的一半为 W , 两镜元旋转轴间距为 L_{AB} , 旋转轴与大地平面距离 $L_{AO} \geq W$, α 为太阳高度角, γ 为太阳方位角。太阳射线 1 表示正好穿过镜元 1 上边缘某一点的射线, 投影平面是指镜元 2 下边缘所在水平面, 大地平面是指镜场安装地点的水平地面。设太阳射线 1 与投影平面的交点为 N , 则 N 点与镜元 1 上边缘在投影平面的垂直投影线之间的距离 L_{MN} 称为影长。设太阳射线 1 与镜元 1 上边缘交点在投影平面的垂直投影点为 G , 则 L_{MG} 称为斜长。图中 C 点为 E 点在投影平面上的垂直投影, H 为 EC 的长度, 即镜元 1 上边缘与投影平面的距离。由图 4 可知

$$H = W(\sin \beta_1 + \sin \beta_2), \quad (9)$$

$$L_{MN} = \frac{H}{\tan \alpha} \cos |\gamma|, \quad (10)$$

$$L_{MG} = \frac{H}{\tan \alpha} \sin |\gamma|, \quad (11)$$

$$L_{CD} = L_{AB} - W(\cos \beta_1 + \cos \beta_2), \quad (12)$$

当 $L_{MN} \leq L_{CD}$, 镜元 1 不会在镜元 2 上形成阴影。当 $L_{MN} \geq L_{CD}$, 如图 4 中太阳射线 2 所形成的阴影, 若要镜元 1 不在镜元 2 上形成阴影影响, 则需满足一定的条件。将镜元 1 向下延长与投影平面交于 XX' , 当线段 XY 在投影平面上所形成的太阳阴影线 XY' 正好穿过镜元 2 的 D 点时, 可保证镜元 1 不

会在镜元 2 上形成阴影。通过这种几何关系, 可以推导出 L_{MG} 斜长必须满足下式

$$L_{MG} \geq \left(\frac{H}{\tan \beta_1} + L_{MN} \right) \frac{H}{L} + L_{CD}. \quad (13)$$

3.2.2 $\cos \gamma < 0, \alpha > 0$ 时的无阴影间距分析

在这样的条件下, 需分为两种情况考虑。第一种情况为 $\beta_1 < \beta_2 < 0$ 计算方法如图 5 所示。

在这种情况下, 太阳影长与斜长计算方法同图 4 所示状况相似, 只需注意相应角度的符号与取值范围便可。若要镜元 2 不在镜元 1 上形成阴影影响, 则需满足 $L_{MN} \leq L_{CD}$ 或 (14) 式。

$$L_{MG} \geq \left(\frac{H}{\tan |\beta_2|} + L_{MN} \right) \frac{H}{L} + L_{CD}. \quad (14)$$

第二种情况为 $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ 且 $|\beta_1| > |\beta_2|$, 计算方法如图 6 所示。

在这种状态下, 太阳影长与斜长计算方法与上述方法有所不同, 其投影点应选择镜元 2 的下边缘某点, 如图 6 中 E 点, 同时也需注意相应角度的符号与取值范围。若要镜元 2 不在镜元 1 上形成阴影影响, 则需满足 $L_{MN} \leq L_{CD}$ 或通过镜元 2 相应顶点 (与方位角符号有关) 的太阳射线正好穿过镜元 1 对

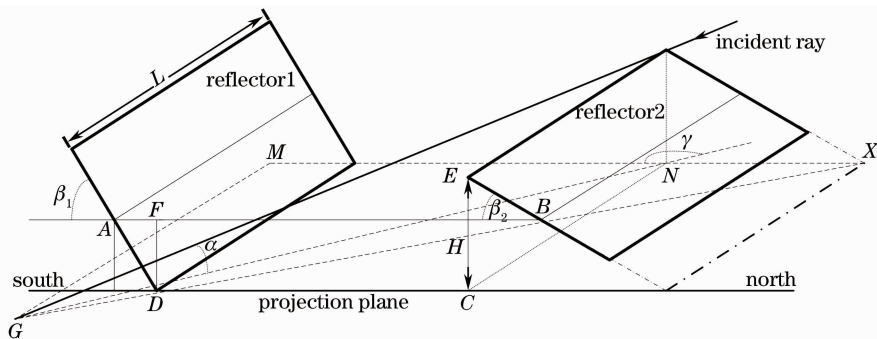


图 5 当 $\cos \gamma < 0, \beta_1 < \beta_2 < 0$, 太阳影长与斜长计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of calculating sun shadow length and skew length with $\cos \gamma < 0, \beta_1 < \beta_2 < 0$

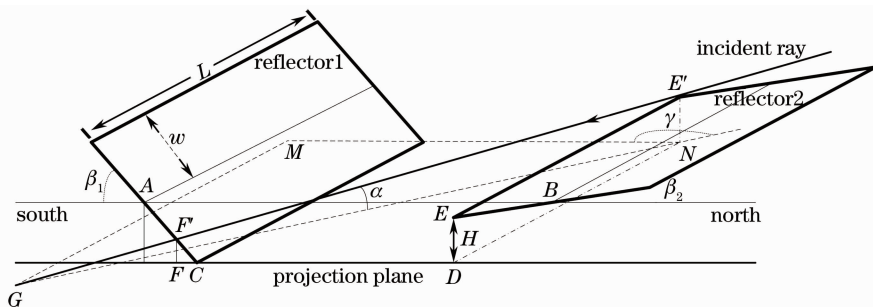


图 6 当 $\cos(\gamma) < 0, \beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ 且 $|\beta_1| > |\beta_2|$ 时太阳影长与斜长计算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of calculating sun shadow length and skew length with $\cos(\gamma) < 0, \beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ 且 $|\beta_1| > |\beta_2|$

应斜边,如图 6 中通过镜元 2 的 E 点的太阳射线正好穿过镜元 1 的 AC 边,可导出斜长 MG 应满足(15)式。

$$L_{MG} \geq \frac{\left[\frac{L}{\tan(\pi - |\gamma|)} - L_{CD} \right] \tan |\beta_1|}{\sin(\pi - |\gamma|) + L} \times \quad (15)$$

以上分析了 LFR 北侧镜场所有可能形成阴影影响的镜元关系,并给出相邻镜元之间无阴影影响的判据。对于 LFR 南侧镜场,形成阴影影响的镜元关系及斜长判据与上相似。在利用计算机进行数值计算时,可先设定塔高 H、镜元长度 L、宽度 2W、两镜元初始间距 S_p 以及镜元旋转轴距塔基的距离 d_1 和 d_2 。然后设定起算条件,如太阳高度角为 $\alpha > 0$ 时开始计算。计算步骤如下:

- 1) 根据镜场地理位置计算相应时刻的太阳位置;
- 2) 根据系统尺寸,计算紧邻($S_p = 2W$)两镜元的反射光矢量即跟踪倾角;
- 3) 计算相应的影长与斜长,并判断镜元之间是否存在阴影;
- 4) 若有阴影影响,则镜元间距增加一个步长并重新计算和判断(步长依所需精度可任意设定);

5) 若无阴影影响,则时间增加一个单位(如 1 s 或 1 m)继续计算,直至整年或若干年计算完成。

由上计算结果所得间距便是两镜元间最小无阴影间距。若将镜元 1 距线性塔基的初始南北垂直距离 d_1 与所得间距 S_p 的和重新赋予 d_1 ,进行再计算,便可得到下一个镜元 3 与镜元 2 的最小无阴影间距,如此往复迭代,可以得到 N 个镜元的最小无阴影位置分布。对于遮挡问题,若将反射光的高度和方位角替代太阳高度角和方位角,便可用上述求阴影的方法求解遮挡问题,只是遮挡发生时,镜元之间关系略有不同。由于吸热器是固定的,对于南和北两侧镜场,只能是两镜元中靠近塔基的镜元对另一镜元形成遮挡,例如图 3 中的镜元 6 不会对镜元 5 形成遮挡影响。若要镜元 5 对镜元 6 无遮挡,也就是从反射光方向看,镜元 5 对镜元 6 无阴影影响,利用上述方法,通过相似的分析,便可得到 N 个镜元的最小无遮挡位置分布。综合阴影与遮挡分布,选择间距较大的便是两镜元无阴影与遮挡最小间距。

4 算例分析

4.1 间距分析

依照上述方法进行分析 LFR 系统的镜场地理

位置为经度 0, 纬度 39.8751°N, 海拔 54 m, 所有镜元旋转轴东西布置且处于同一水平面, 各个镜元尺寸相同, 镜元长 $L=2.2$ m, 宽度的一半 $W=0.1$ m, 塔高 $H=3$ m. 若两镜元初始布置为非重叠紧密布置, 即旋转轴初始间距 $S_p=0.2$ m, 线性塔正下方为镜元 1, 向北和向南分别布置 9 行镜元. 由此可知, 初始镜元 1 距塔基的南北垂直距离 $d_1=0, d_2=0.2$ m, 计算步长设为 0.01 m. 太阳位置利用 Reda

在文献[19]中提出的 SPA 太阳位置算法计算(算法精度为 $\pm 0.0003^\circ$), 计算时间为 2009 年全年, 每 10 min 计算一次. 利用上述参数对于北侧镜场计算, 当仅考虑阴影时, 计算结果可由表 1 列出.

以表 1 所列位置为各镜元参考位置, 计算仅考虑遮挡时, 每一镜元与相邻镜元的无遮挡的间距, 然后与仅考虑阴影时的间距比较(如表 2 所示).

表 1 仅考虑阴影时, 南北两侧镜场分布

Table 1 Only shadow considered, the distribution of LFR mirror field in the south and north side

Reflector	Distances of tower base to the reflector's rotating axis d/m									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
North field	0	1.64	3.26	4.88	6.49	8.1	9.7	11.3	12.89	14.48
South field	0	1.63	3.21	4.78	6.34	7.89	9.42	10.94	12.45	13.97

表 2 阴影间距与遮挡间距的比较

Table 2 Comparison of shading spacing and blocking spacing

Reflectors	Space between adjacent reflectors S_p/m								
	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10
Shading spacing of North field	1.64	1.62	1.62	1.61	1.61	1.60	1.60	1.59	1.59
Blocking spacing of North field	0.21	0.24	0.32	0.41	0.51	0.62	0.73	0.84	0.95
Shading spacing of South field	1.63	1.58	1.57	1.56	1.55	1.53	1.52	1.51	1.52
Blocking spacing of South field	0.21	0.24	0.31	0.40	0.50	0.61	0.71	0.81	0.92

由表中可以看到, 算例中由避免相互阴影而引起的间距大于为避免相互遮挡而引起的间距(即阴影影响占主导地位), 所以表 1 所列基于塔基的位置便是算例中镜场的最小无阴影与遮挡布置. 当然随着镜元数的增加, 镜元与塔基的距离也将加大, 遮挡影响也将逐渐占据主导地位. 图 7 为算例中镜元数增加到 77 时, 阴影间距与遮挡间距的比较. 由图可以看出, 南北两侧从第 18 个镜元开始, 遮挡影响将逐渐占据主导地位.

遮挡. 这样在应用上述算法时, 还能进一步减小间距, 因为当系统的有效辐照度确定后, 起算的太阳位置便是太阳直接辐照度大于系统有效直接辐照度的那段区间. 从图 8 看出, 随着有效直接辐照度(G_{ob})的加大, 镜元距塔基的距离越来越小, 即镜元布置更紧凑. 图 9 显示了算例中 LFR 系统的地面覆盖率随系统有效直接辐照度变化而变化的趋势. 由图 9 可以看出随着有效直接辐照度的加大, 镜场的地面覆盖率逐渐增加, 其中有效直接辐照度从 0 增加到 100 W/m^2 时, 地面覆盖率增速比较大, 从 0.133 增加到 0.373; 当有效直接辐照度取为 500 W/m^2 时, 地面覆盖率为 0.777. 由以上分析可知, 当有效

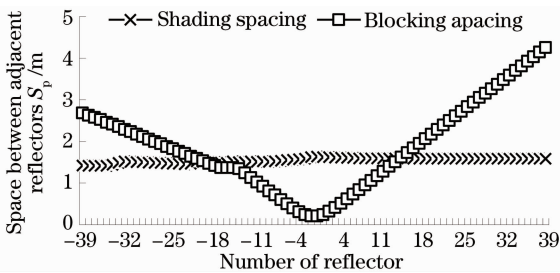


图 7 阴影间距与遮挡间距的比较

Fig. 7 Comparison between shading spacing and blocking spacing

4.2 镜元布置与有效辐照度关系

在实际工程应用中, 镜元间距必须尽可能小, 以增加系统的地面覆盖率(镜面面积/占地面积), 同时确保在主要工作期间(如有效直接辐照度大于 300 W/m^2)无

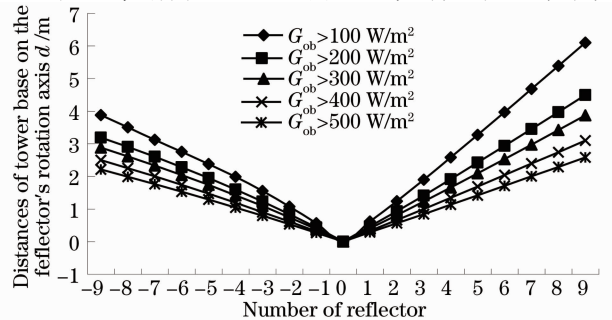


图 8 有效直接辐照度与 LFR 镜场布置关系

Fig. 8 Relation between available solar irradiance and LFR mirror field distribution

直接辐照度增加到 100 W/m^2 时, 最远镜元距吸热器距离从 14.48 m 减至 6.1 m, 地面覆盖率可提高将近 200%, 故实际系统设计时, 可以考虑以 100 W/m^2 作为有效直接辐照度。图中辐照度 G_{ob} 是指标准晴天地表水平面直接辐照度, 计算模型采用选用 Hottel 晴天太阳辐射模型。

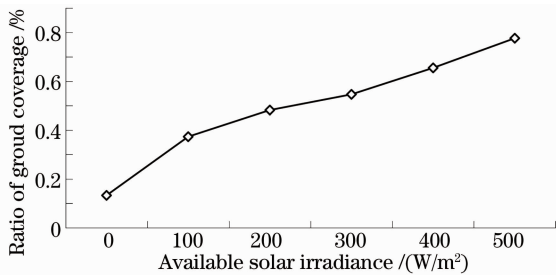


图 9 有效直接辐照度与 LFR 镜场地面覆盖率的关系
Fig. 9 Relation between available solar irradiance and ratio of ground coverage of LFR mirror field

5 结 论

LFR 以其特有的优点得到了越来越多的关注, 用其进行太阳能热发电正在逐渐进行大规模的应用。然而其特有的单轴反射定位跟踪方式使相邻镜元之间的阴影与遮挡计算变得相对复杂。本文利用矢量法, 求出 LFR 镜元的法线矢量、反射矢量以及镜元的跟踪倾角, 然后利用光学投影的方法求出镜元的影长与斜长并给出镜元间无阴影与遮挡影响的斜长判据, 利用计算机对全年或若干年的所有时刻进行 LFR 镜场中相邻镜元间距计算, 最后得到 LFR 镜场无阴影与遮挡最小间距分布。本文还分析了系统应用中有效辐照度与镜场布置的关系, 可方便 LFR 镜场的合理设计, 当然更优化的布置设计还应考虑场地面积、聚光装置与吸热器的尺寸等方面的因素。若要结合上述几方面的因素, 还可以得到更优化的 LFR 镜场布置方案。

参 考 文 献

1 G. Montero, J. M. Escobar, E. Rodri' guez *et al.*. Solar radiation and shadow modelling with adaptive triangular meshes [J]. *Solar Energy*, 2009, **83**(7): 998~1012

2 J. A. Duffie. *Solar Engineering of Thermal Processes*[M]. New York: Jone Wiley & Sons, 2006, 326

3 A. Rabl. *Active Solar Collectors and Their Applications*[M]. New York: Oxford Press, 1985, 19~120

4 S. A. Kalogirou. Solar thermal collectors and applications[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, **30**(3): 231~295

5 Liu Ying, Dai Jingmin, Lang Zhiguo *et al.*. Finite-element analysis for flux distribution on focal plane of rotating parabolic concentrators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1776~1778

刘 颖, 戴景民, 郎治国 等. 旋转抛物面聚光器焦面能流分布的有限元分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1776~1778

6 F. W. Lipps, L. L. Vant-Hull. Shading and blocking geometry for a solar tower concentrator with rectangular mirrors[R]. New York: ASME paper 74-WA/Sol-11, presented at the winter annual Meeting, 1974, 1~7

7 L. L. Vant-Hull, A. F. Hildebrandt. Solar thermal power system based on optical transmission[J]. *Solar Energy*, 1976, **18**(1): 31~39

8 A. Niewianda, F. D. Heidt, Sombrero. A pc-tool to calculate shadows on arbitrarily oriented surfaces[J]. *Solar Energy*, 1996, **58**(4~6): 253~263

9 R. Budin, L. Budin. A mathematical model for shading calculations[J]. *Solar Energy*, 1982, **29**(4): 339~349

10 David R. Mills, Graham L. Morrison. Compact linear fresnel reflector solar thermal powerplants [J]. *Solar Energy*, 2000, **68**(3): 263~283

11 P. L. Singh, S. Ganesan, G. C. Yadav. Performance study of a linear Fresnel concentrating solar device[J]. *Renewable Energy*, 1999, **18**(3): 409~416

12 S. S. Mathur, B. S. Negi, T. C. Kandpal. Geometrical designs and performance analysis of a linear Fresnel reflector solar concentrator with a flat horizontal absorber [J]. *International Journal of Energy Research*, 1990, **14**(7): 107~124

13 S. S. Mathur, T. C. Kandpal, B. S. Negi. Optical design and concentration characteristics of linear Fresnel reflector solar concentrators—II. Mirror elements of equal width [J]. *Energy Conversion and Management*, 1991, **31**(3): 221~232

14 B. S. Negi, S. S. Mathur, T. C. Kandpal. Optical and thermal performance evaluation of a linear Fresnel reflector solar concentrator [J]. *Solar & Wind Technology*, 1989, **6**(5): 589~593

15 J. Appelbaum, J. Bany. Shadow effect of adjacent solar collectors in large scale systems [J]. *Solar Energy*, 1979, **23**(6): 497~507

16 M. R. Riaz. A theory of concentrators of solar energy on a central receiver for electric power generation [J]. *J. Engng. Power ASME*, 1976, **98**(3): 375~385

17 D. Mills. Advances in solar thermal electricity technology [J]. *Solar Energy*, 2004, **76**(1): 19~31

18 K. W. Boer, J. A. Duffie. *Advances in Solar Energy—An Annual Review of Research and Development*[M]. New York: Plenum Press, 1985, 428~433

19 I. Reda. A. Andreas. Solar position algorithm for solar radiation applications [J]. *Solar Energy*, 2004, **76**(5): 577~589