

线性菲涅耳聚光装置的聚光比分析

杜春旭 王 普 吴玉庭 马重芳

(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和传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要 在设计聚光太阳能热发电系统时,有必要分析聚光装置的聚光比。线性菲涅耳聚光反射装置是对连续抛物面聚光镜的一种离散化近似,该聚光装置中每一行反射镜面均实时跟踪太阳,将太阳入射光反射至固定位置的线性吸热器上,故每一镜元在吸热器上形成的反射光带宽度均时刻变化,这使系统聚光比分析变得非常复杂。利用二维光学分析,得到线性菲涅耳反射装置任一镜元的剖面角、跟踪倾角、单个镜元在吸热器平面上的光带宽度计算公式;得到线性菲涅耳聚光反射装置的几何聚光比公式并分析几何聚光比随镜元个数与相对距离的变化趋势。在分析系统聚光比的基础上,对该类系统镜场的宽度及塔高进行优化。最后给出考虑日轮张角情况下的几何聚光比变化。

关键词 几何光学;线性菲涅耳聚光装置;光带宽度;几何聚光比;优化

中图分类号 TK513.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0808001

Concentration Ratio Analysis of Linear Fresnel Reflector

Du Chunxu Wang Pu Wu Yuting Ma Chongfang

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education,

Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing Municipality,

College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract It is necessary to analyze the concentration ratio for the design of concentrating solar thermal power system. Linear Fresnel reflector (LFR) can be treated as a smooth linear optical reflector that is broken into segments. Every mirror segment or row of this kind of concentrator needs to track the sun in real time and reflects the sunlight to a fixed linear receiver. Therefore, the bandwidth on the absorber illuminated by every mirror row varies continuously, which makes the analysis of concentration ratio very complex. Firstly, the formulae for the projected angles of incident and reflected solar rays, the tracking inclination angle and the bandwidth illuminated on the flat plane absorber are obtained by a two-dimensional optic analysis. Secondly, the expressions of geometric concentration ratio of LFR are derived and the dependence of ideal geometric concentration ratio on number of mirror slats and relative distance is analyzed. And then, optimization of mirror field width and tower height is analyzed. Finally, the effect of angular size of the sun's disc on geometric concentration ratio is illuminated.

Key words geometric optics; linear Fresnel reflector; bandwidth; geometric concentration ratio; optimization

OCIS codes 080.2740; 080.1753; 080.4035

1 引 言

当前,面对传统能源枯竭、环境污染和气候变化等问题,大力开发利用以太阳光为代表的可再生能源,在世界范围内已逐步达成共识。从国际上的技术进展看,今后 10 余年将是太阳能发电技术和产业大发展的时期^[1]。要实现高效的太阳能光热、光电

转换,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^[2,3]。采用单轴跟踪的线性菲涅耳反射装置(LFR),可直接将太阳能收集到固定的线性吸热器。这种聚光系统以其特有的优点正得到越来越多的关注,用其进行太阳能聚光热发电正在逐渐得到大规

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-27

基金项目: 国家 973 计划(2010CB227103)和国家自然科学基金重点项目(50736005)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

模的应用,目前已有一座 1.4 MW 的商业电站 Puerto Errado 1 运行,对成熟的槽式太阳能聚光热发电系统形成强有力的竞争。

太阳照射到地面上的能量密度较低,要取得足够的能量就必须从较大的面积上收集太阳能,这样就要求集热器的面积较大。但是,大面积的集热器所带来的热损失也较大,流体力质很难达到高温,于是聚光器就应运而生。聚光器利用反射或折射改变入射光方向,提高其照射在集热器上的密度。这样,集热器的面积小于聚光面积,热损失减小,因而在聚光型太阳能热发电系统的聚焦面上可获得很高的温度。虽然决定温度高低的因素很多,但最重要的是聚光比。

聚光比 C 定义为聚光镜场的净聚光孔径面积与其焦平面上光斑面积之比。它是设计聚光型太阳能利用装置最重要的参数之一。聚光比越大,光斑的温度就越高。因为在一些聚光装置中吸热器面积并不总是被完全或均匀地照射,所以,聚光比可以分为辐射通量聚光比 C_{flux} 和几何聚光比 C_g 。几何聚光比基于总的吸热器面积,而不论该面积是否被照射。因为几何聚光比在热平衡计算与经济分析中更有用,所以在太阳能聚光热发电系统中,聚光比通常指几何聚光比^[4~7]。

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,而太阳入射光本身随时变化,这使得 LFR 的聚光比分析非常复杂。尽管在文献[8~13]中有对 LFR 的光学系统的详细分析,但是其 LFR 系统是基于双轴跟踪的系统。对于该类 LFR 系统,太阳入射光始终与镜元旋转轴所在平面垂直,各个镜元倾角固定,聚光比分析相对简单。文献[14~17]对 LFR 系统进行了详细的实验研究,但均没有涉及系统聚光比的计算。本文首先利用矢量分析,得到东西水平布置、南北跟踪的 LFR 镜场的矩形镜元的入射角、反射矢量、跟踪倾角计算公式,然后通过二维光学分析,得到单个镜元在吸热器平面上的光带宽度公式,然后得到 LFR 装置的几何聚光比公式并分析几何聚光比随着镜元个数与相对距离变化的趋势。

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。由文献[18]可知,东西水平布置方式 R 地面覆盖率比南北水平布置方式略大,所以本文主要考虑镜面东西水平布置方式下平面等宽矩形镜元的

LFR 系统。图 1 是该类系统的典型示意图。

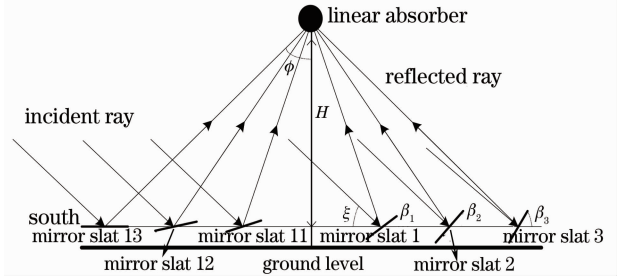


图 1 线性菲涅耳聚光系统的典型示意图

Fig. 1 Schematic of typical LFR concentration system

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。对于任意时刻,各镜元与水平面的倾角 β 均不相同。为便于获得各个镜元与吸热器的实际距离,将吸热器塔基作为 LFR 镜场的参考点,将 LFR 镜场分为南北两侧分别考虑。若要分析 LFR 镜场的聚光比,必须知道任意时刻下太阳位置,由此推算出任一镜元的入射角、反射矢量及跟踪倾角 β ,进一步推导出镜元在吸热器平面的光带宽度以及镜元的有效孔径面积。太阳位置可以通过天文算法计算得到,在光学分析时,以矢量形式给出更为方便,其他量也可用矢量法求出。图 2 是镜面东西水平布置方式下 LFR 装置的光学反射矢量示意图。

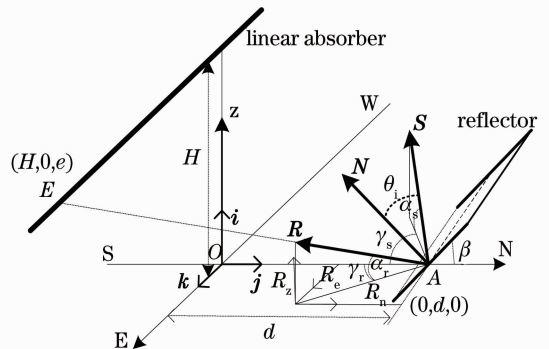


图 2 线性菲涅耳反射聚光装置反射矢量图

Fig. 2 Reflecting vector schematic diagram of LFR

在图 2 中, S, N, R 分别为单位太阳矢量、单位镜元法线矢量、单位反射矢量; i, j, k 分别为天顶、正北、正东方向单位矢量; α 为高度角, γ 为方位角,规定 γ 由正南算起,向西为正,向东为负 ($-180^\circ \sim 180^\circ$)。 θ_i 为镜元入射角;下标 s, r 分别表示太阳矢量、反射矢量,下标 z, n, e 分别表示天顶、正北、正东方向分量; β 为镜元倾角,规定镜面朝南时倾角 β 为正,镜面朝北时 β 为负; d 为镜元旋转轴距塔基的南北方向垂直距离, H 为塔高, e 为图中 A 点反射光反射至吸热器上的反射点距坐标原点的东西方向垂

直距离,称为偏移。由文献[3]可知

$$\beta = \arctan\left(\frac{\cos \alpha_s \cos \gamma_s - R_n}{R_z + \sin \alpha_s}\right), \quad (1)$$

$$\begin{cases} \alpha_r = \arcsin R_z \\ \gamma_r = \arctan(R_e/R_n) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\cos \theta_i = \sin \alpha_s \cos \beta + \cos \alpha_s \cos \gamma_s \sin \beta. \quad (3)$$

由(1)式可知, β 角取值范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,镜元镜面初始位置水平朝上时, $\beta=0$;当 β 角为负时,镜元由南向北旋转,当 β 角为正时,镜元由北向南旋转。(1)~(3)式是由吸热器北侧镜场推导得出的, d 取正;对于吸热器南侧镜场,只需将 d 取负,(1)~(3)式依然成立。

3 聚光比分析

3.1 镜元分析

文献[5]用将所有入射光线投影到孔径法平面的方法对线性槽式聚光装置进行光学分析,即用二维方式进行光学分析,可使相应分析进一步简化。本文也使用二维投影的方式对LFR系统进行分析,如图3所示。

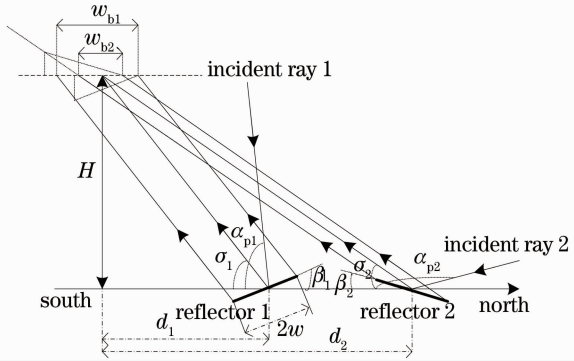


图3 LFR镜场二维反射投影射线示意图

Fig. 3 2D projected ray schematic diagram of LFR mirror field

在图3中, σ 为反射光在当地子午平面的投影与水平面正南方向的夹角,称为反射光投影角,取值范围为 $0 \sim \pi$, α_p 为太阳高度角在当地子午平面的投影与水平面正南方向的夹角,称为入射光投影角,取值范围为 $0 \sim \pi$; w_b 为反射光在吸热器平面所形成的光带宽度, w 为镜元面宽的一半。由图可得

$$\sigma = \arctan \frac{H}{d}, \quad (4)$$

$$\alpha_p = \arctan\left(-\frac{S_z}{S_n}\right) = \arctan \frac{\tan \alpha_s}{\cos \gamma_s}, \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \frac{(\alpha_p + \sigma)}{2}, \quad (6)$$

$$w_b = 2w(\cos \beta + \sin \beta \cot \sigma) =$$

$$\frac{2w \sin(\sigma + \beta)}{\sin \sigma} = \frac{2w \cos[(\sigma - \alpha_p)/2]}{\sin \sigma}. \quad (7)$$

(4)~(7)式直接由二维投影图推得,计算机数值计算时,相应变量的可直接使用文献[3]提出的公式,如(1)式与(6)式是等价的。由(7)式可知,单镜元在吸热器平面所形成的光带宽度 w_b 与镜元宽度成正比,与镜元倾角、相对距离 $D=d/H$ 有关,而镜元倾角又与镜场纬度、太阳赤纬角、太阳时角、 d 和 H 有关。太阳赤纬角与太阳时角并非时间的真正周期函数,其近似计算公式随着计算精度的提高,复杂性增加。故光带宽度 w_b 从理论上直接定量分析非常复杂,但是若借助计算机进行数值计算分析,问题可以相对简化。

当相对距离 D 一定时,可由精确的太阳位置算法计算出每一时刻的太阳位置,利用(1)或(6)式计算镜元倾角 β ,再由(7)式计算出全年或若干年内任意时刻的单镜元光斑宽度 w_b ,求其最大值,便是最大光斑宽度。实际上,对(7)式取导求极值可知,若满足条件 $\alpha_p = \sigma$, w_b 可取得最大值,尽管 α_p, σ 取值特点及范围与镜元的实际地理位置、塔基距离 d 有关,有可能不满足上述条件,但分析(7)式可知,当 σ 一定时,最大光带宽度 w_{bmax} 为

$$w_{bmax} = 2w/\sin \sigma = 2w \sqrt{1 + D^2}. \quad (8)$$

图4显示了单镜元最大光带宽度与相对距离的关系。

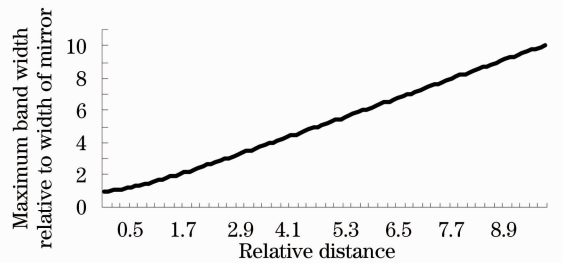


图4 LFR镜元最大光带宽度与相对距离的关系曲线

Fig. 4 Relation between the maximum bandwidth relative to mirror width and the relative distance d/H

由图4可以看出,当相对距离较小时,光带宽度增加较慢,随着镜元距塔基的相对距离的增加,吸热器平面上的光带也逐渐变宽,且变宽速度加快。一般在系统设计时,希望聚光装置全部将吸热器照亮,即吸热器的宽度应与最大光带宽度相等,同时又不希望吸热器宽度过大以增加热损失。由图4可知,当镜元相对距离为9时,最大光带宽度约为镜元宽度的9倍,这将会造成大量的热损失。若相对距离

过小,则聚光面积受到限制。若要达到需要的太阳辐射量,需要增加塔高或增加聚光模块,这将使成本提高。当选取相对距离为 2 时,最大光带宽度约为镜元宽度的 2 倍,这时南北镜场总宽度为塔高 H 的 4 倍。

由文献[2]可知,对于无反射的平面集热器,可以认为其聚光比为 1,即集光孔径面积与吸热面积相等。对于平面反射镜,其集光孔径可以仿照抛物槽式聚光系统的分析方法获得。对于矩形镜元,其有效集光孔径宽度 w_p 可通过二维投影图中镜宽与镜元入射角在投影平面的投影角的余弦的乘积求取,即

$$w_p = 2w \cos\left(\frac{\alpha_p - \sigma}{2}\right). \quad (9)$$

若不考虑日轮张角,光学系统比较理想,中途能量损失可以忽略,镜面与吸热器相等且足够长以消除太阳方向角的影响,则可以定义镜面开口有效宽度 w_p 与反射光带宽度 w_b 之比为菲涅耳平面单镜元的瞬时理想几何聚光比 $C_{sgideal}$:

$$C_{sgideal} = \frac{w_p}{w_b} = \frac{2w \cos[(\alpha_p - \sigma)/2]}{2w(\cos \beta + \sin \beta \cot \sigma)} = \sin \sigma, \quad (10)$$

或

$$C_{sgideal} = \frac{H}{\sqrt{H^2 + d^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2}}. \quad (11)$$

由(10),(11)式看出,单镜元的理想几何聚光比仅与镜元距塔基的相对距离有关,吸热器南北两侧对称镜元的 $C_{sgideal}$ 相等,接近双曲关系。

3.2 镜场聚光比分析

若镜场南北对称等间距布置 n 个镜元,则可将各镜元的几何聚光比求和得到镜场总的理想几何聚光比

$$C_{gideal} = \sum_{j=1}^n C_{sgidealj} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{1 + D_j^2}}, \quad (12)$$

式中下标 j 表示第 j 个镜元。由上述分析可知, D_j 是离散值,取值与镜元宽度相关,若从塔基处布置第 1 个镜元且各镜元紧邻排置,则 $D_j = 2(j-1)w/H$ 。实际的 LFR 系统中,为避免或减少相邻镜元间的阴影与遮挡,各镜元之间总是以一定规律隔开。如某系统镜元宽度 0.2 m,镜元间等间距 0.1 m 布置,其聚光比将随着镜元个数的增加与塔高的增高而增大,如图 5 所示,当塔高为 12 m,南北镜场镜元总数为 100 时,系统理想的几何聚光比可达 83。

应该指出,随着镜元个数的增加,镜场最远处镜

元的相对距离即最大相对距离变大。图 6 为最大相对距离与镜场镜元总数及塔高的关系曲线。

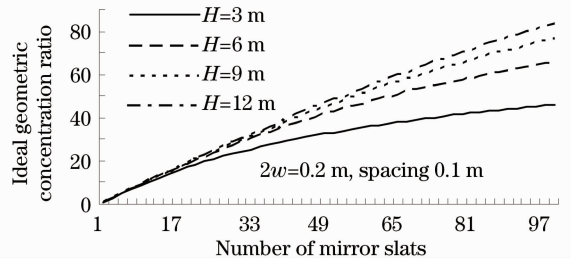


图 5 几何聚光比与镜元个数及塔高的关系
Fig. 5 Dependence of ideal geometric concentration ratio on number of mirror slats and tower height

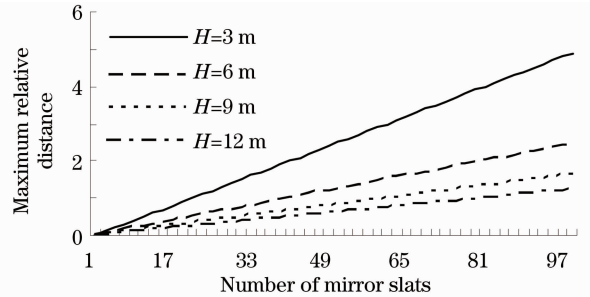


图 6 最大相对距离与镜元个数及塔高的关系
Fig. 6 Dependence of the maximum relative distance on number of mirror slats and tower height

综合图 4,6 可知,随着镜元个数的增加,聚光镜场在吸热平面所照亮的最大光带宽度也变宽。若吸热器的宽度设为最大光带宽度,各镜元的有效孔径宽度的和 w_{psum} 为镜场总聚光孔径,则可定义镜场最小几何聚光比为

$$C_{gmin} = \frac{\sum_{j=1}^n w_{pj}}{w_{bmax}}. \quad (13)$$

实际上,由(9)式可知,单镜元的有效孔径宽度是随时间变化的,其变化规律随着镜场地理位置的不同而不同,这使得镜场几何聚光比分析变得复杂。若用数值计算方法,计算出 w_p 在一年或几年内的平均值 w_{pmean} 作为单镜元的有效孔径宽度则可以简化分析。图 7 为北纬 39.8751° 地区镜元平均孔径与相对距离的关系曲线。

由图 7 可知,南侧镜场镜元的平均孔径宽度 w_{pmean} 小于北侧镜场镜元,塔基北侧相对距离在 0~1 之间的镜元平均孔径宽度取最大值,相对距离越大, w_{pmean} 越小。因此,(13)式可替换为

$$C_{gmin} = \frac{\sum_{j=1}^n w_{pmeanj}}{w_{bmax}}. \quad (14)$$

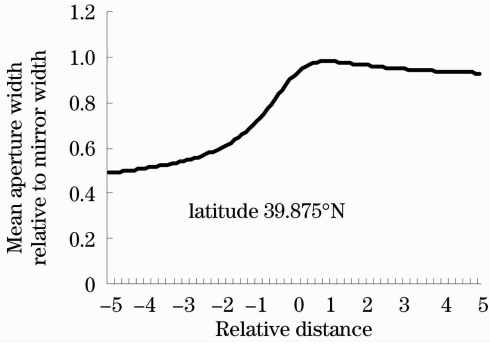


图 7 相对平均孔径宽度与镜元相对距离的关系

 Fig. 7 Relation between relative mean aperture width and relative distance d/H

仍以北纬 39.8751° 地区为例, 设某系统镜元南北两侧对称分布, 镜元宽度 0.2 m , 镜元间等间距 0.1 m 布置, 塔高为 3 m 。随着镜元个数的增加, 镜场中最远镜元的相对距离即镜场最大相对距离增大, 吸热器平面上的最大光斑变宽, 由(14)式计算镜元个数从 $1\sim 100$ 时, 镜场最小几何聚光比如图 8 所示。

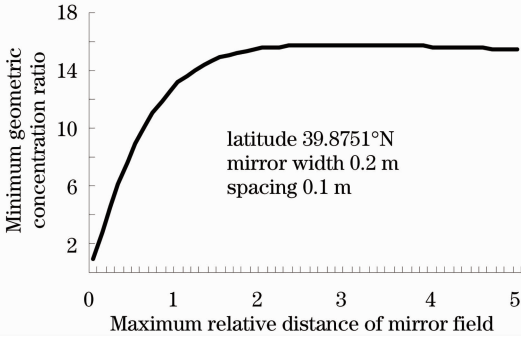


图 8 最小几何聚光比与镜场最大相对距离的关系

Fig. 8 Relation between the minimum geometric concentration ratio and the maximum relative distance of mirror field

由图 8 可知, 当南北镜场宽度约为塔高的 2.8 倍, 即镜元个数约为 50 时, 镜场最小几何聚光比取最大值 16 。若定义最远镜元的反射光与地平面法线夹角为镜场边缘角 ϕ , 如图 1 所示, 则 ϕ 取 70° 时, 最小几何聚光比取最大值。与图 5 对比可知, 镜场的理想聚光比与最小聚光比相差较大。实际上, 平面吸热器上的辐射通量是非连续阶跃变化的, 在吸热器中线附近, 聚光比较大, 可以接近理想聚光比, 从吸热器中线向两侧扩展, 聚光比逐渐下降。若吸热器与最大光带等宽, 其边缘处聚光比会更小, 若吸热器宽度小于最大光带宽度, 则会有部分辐射损失, 这取决于实际吸热器的宽度。

3.3 日轮张角的影响

对于地面上一点, 太阳光并非点光源, 约有 0.53° 的入射夹角, 称为日轮张角。对于连续聚焦型

聚光装置, 日轮张角是制约系统聚光比的重要因素。根据热力学第二定理, 理想聚光系统最大几何聚光比与日轮半张角 ξ 的关系如下:

对于线性聚光系统为

$$C_{\text{gmax}} = 1/\sin \xi, \quad (15)$$

对于点聚光系统为

$$C_{\text{gmax}} = 1/\sin^2 \xi. \quad (16)$$

对于像 LFR 系统这样的离散的带状聚光系统, 日轮张角的引入必将使系统的几何聚光比下降, 若考虑日轮张角, 聚光比分析会进一步复杂化。图 9 是考虑日轮张角后 LFR 镜场二维反射投影射线示意图。

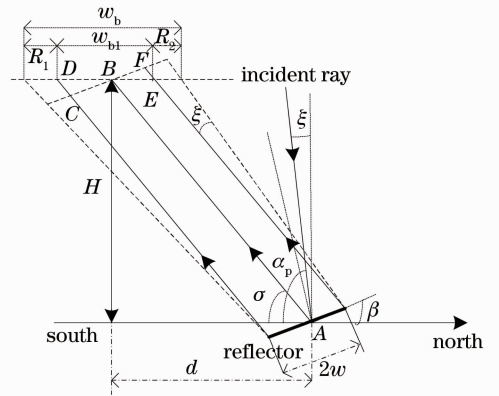


图 9 考虑日轮张角后 LFR 镜场二维反射投影射线示意图

Fig. 9 2D projected ray schematic diagram of LFR mirror field considering acceptance angle

根据图 9, 由三角形正弦定理有

$$CD = \frac{w}{\sin \sigma} \sin \beta, \quad (17)$$

$$AB = \sqrt{H^2 + d^2}, \quad (18)$$

$$\frac{R_1}{\sin \xi} = \frac{AB + CD}{\sin(\sigma - \xi)}. \quad (19)$$

进一步化简有

$$R_1 = \frac{H + w \cos(\alpha_p + \sigma)/2}{\sin \sigma \sin(\sigma - \xi)} \sin \xi. \quad (20)$$

其最大值可以表示为

$$R_{1\text{max}} = \frac{H + w}{\sin \sigma \sin(\sigma - \xi)} \sin \xi. \quad (21)$$

同理, R_2 可以有相似表示公式:

$$R_2 = \frac{H - w \cos(\alpha_p + \sigma)/2}{\sin \sigma \sin(\pi - \sigma - \xi)} \sin \xi, \quad (22)$$

$$R_{2\text{max}} = \frac{H}{\sin \sigma \sin(\sigma + \xi)} \sin \xi. \quad (23)$$

考虑日轮张角后, 单镜元的光带宽度 w_b 变宽, R_1, R_2 的和为加宽的量, 相应的几何聚光比下降:

$$w_b = w_{b1} + R_1 + R_2. \quad (24)$$

同样用(10)式和(12)式的概念,可以计算考虑日轮张角后的理想几何聚光比。因 ξ 角的介入,公式已不能化为最简式,几何聚光比随着时间的变化而变化。仍以北纬 39.8751° 地区为例,某系统镜元南北两侧对称分布40个镜元,镜元宽度0.2 m,镜元间等间距0.1 m布置,塔高为5 m。图10是全年每月按日平均在日出后某时段内每10 min计算一次的几何聚光比分布。

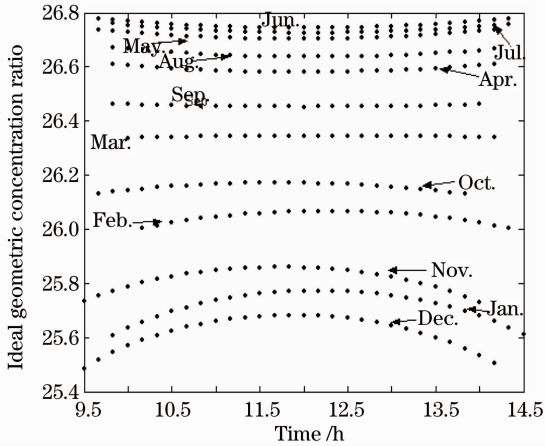


图10 考虑日轮张角后理想几何聚光比的全年变化
Fig. 10 Annual changes of ideal geometric concentration ratio considering acceptance angle

由图10可知,几何聚光比分布较散,且每日的变化规律也不尽相同,求其平均值为26.3,与图5相比较,有所下降。

由(21)和(23)式可以看出,考虑日轮张角后,光带加宽量的最大值与塔高、镜元宽度以及镜元距塔基距离有关。实际系统中, $\xi \ll \sigma$,对加宽量的最大值进一步简化,有

$$R_{\max} = \frac{2H \sin \xi}{\sin^2 \sigma} \quad (25)$$

在光带加宽的 R_1, R_2 区域,大部分是由镜元边缘区域在日轮张角影响下而扩展的区域,对于镜元中心区域,所有太阳射线可能均被反射至吸热器有效区域内,这取决于 R_{\max} 占 w_{b1} 最大值的比值,综合(8)式和(25)式,可得该比值为

$$\frac{R_{\max}}{w_{b1\max}} = \frac{H}{w \sin \sigma} \sin \xi \quad (26)$$

若该比值很小,则大部分反射光可以利用,就可以忽略日轮张角的影响,聚光比受日轮张角的影响也可以忽略。

若定义镜场张角因子 $v = (H \sin \xi) / w$,则张角因子的大小影响 R_{\max} 与 w_{b1} 最大值的比值。若希望由于太阳张角的影响而使光带变宽的量小于20%,

可使 $v < 0.2$,则塔高 H 应小于镜宽的22倍,即当塔高小于22个镜元宽度时,可以忽略日轮张角对聚光比的影响。

4 结 论

LFR镜场由于其跟踪反射聚光原理的特殊性,造成了其聚光比分析在时间、空间上的复杂性。本文讨论了LFR镜场瞬时的理想几何聚光比以及平均意义下的最小几何聚光比,并初步研究了考虑日轮张角后系统几何聚光比的变化以及忽略日轮张角影响的判据。系统理想几何聚光比随着镜元数的增加而增大,但反射光带也随之变宽,这就造成了平均意义下的几何聚光比会在一定镜元个数时取得最大值。如当塔高为12 m、南北镜场镜元总数为100时,系统理想的几何聚光比可达83;当镜元个数为50时,最小几何聚光比取最大值。实际上,LFR系统为避免镜元之间的相互遮挡,随着镜元个数的增加,镜元间距会急剧扩大,导致理想的几何聚光比随镜元个数的增加而增加的速度急剧下降,以至于边缘镜元作用非常微小。同时,镜元数量的增加还会增加材料和控制的成本。另外,随着镜元距塔基距离的增加,反射光在吸热器上的偏移会加大,甚至移出吸热器,失去聚光作用,所以,镜元个数还需考虑反射光偏移问题。LFR系统聚光比的设计应综合考虑系统的经济成本、实际场地尺寸参数以及反射光偏移等问题。

参 考 文 献

- 1 Fang Zujie, Chen Gaoting, Ye Qing *et al.*. Progress of photovoltaic electric power generation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 5~14
方祖捷,陈高庭,叶青等.太阳能发电技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 5~14
- 2 B. Sorensen, P. Breeze, T. Storvick *et al.*. *Renewable Energy Focus Handbook* [M]. New York: Elsevier/Academic Press, 2009. 319~333
- 3 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
- 4 J. A. Duffie. *Solar Engineering of Thermal Processes*[M]. New York: Jone Wiley & Sons, 2006. 326
- 5 A. Rabl. *Active Solar Collectors and Their Applications*[M]. New York: Oxford, 1985. 19~120
- 6 Jorge Facão, Armando c. Oliveira. Numerical simulation of a trapezoideal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator [J]. *Renewable Energy*, 2011, **36**(2): 90~96
- 7 Frank Kreith, Jan F. Kreider. *Principles of Solar Engineering* [M]. Washington: Hemisphere Pub. Corp., 1978. 242~252
- 8 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
- 9 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
- 10 B. S. Negi, T. C. Kandpal, S. S. Mathur. Designs and performance characteristics of a linear Fresnel reflector solar concentrator with a flat vertical absorber[J]. *Solar & Wind Technology*, 1990, **7**(4): 379~392
- 11 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 J. Energy Research*, 1990, **14**(7): 107~124
- 12 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
- 13 G. D. Sotha, B. S. Negi. A comparative study of optical designs and solar flux concentrating characteristics of a linear Fresnel reflector solar concentrator with tubular absorber[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1994, **32**(2): 169~186
- 14 Daniel Chemisana, Manuel. Linear Fresnel concentrators for building integrated applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, **51**(7): 1476~1480
- 15 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
- 16 Roberto Grena, Pietro Tarquini. Solar linear Fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid[J]. *Energy*, 2011, **36**(2): 1048~1056
- 17 D. Feuermann, J. M. Gordon. Analysis of a two-stage linear Fresnel reflector solar concentrator [J]. *J. Solar Energy Engineering*, 1991, **113**(11): 272~279
- 18 Karl W. Boer, J. A. Duffie. *Advances in Solar Energy — An Annual Review of Research and Development*[M]. Volume 2. New York: Plenum Press, 1985. 428~433