

# 固定式条形镜面太阳能聚光镜场性能分析

周希正 马春元 王军旗 张 振

(山东大学能源与动力工程学院燃煤污染物减排国家工程实验室, 山东 济南 250061)

**摘要** 介绍了固定条形镜面太阳能聚光集热器的工作原理,其系统设计须计算聚光装置的各个倾斜镜面太阳直射辐射。固定条形镜面反射聚光是对圆柱面聚光镜的离散化近似,聚光装置中各单元反射镜面入射角、采光面积时刻变化,使系统太阳辐射计算变得复杂。利用矢量分析方法得到了固定条形镜面任一镜元入射角计算公式、采光面积及几何聚光比,计算了镜场的实时辐射通量,最后得到整个系统在工作时间段的累积辐照量。对南向倾斜纬度角安装和年调整一次倾斜角度(春季和夏季使用)安装的两种聚光器进行了比较,其中年调整一次倾角、开口宽度为 1800 mm 的聚光系统单位长度年接收辐照量提高了 6.53%,增量为 65.78 GJ/m。

**关键词** 几何光学;固定条形镜面聚光器;矢量法;太阳能;辐照量

**中图分类号** TK513.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1008001

## Performance Analysis of Fixed Mirror Solar Concentrator Mirror Field

Zhou Xizheng Ma Chunyuan Wang Junqi Zhang Zhen

(National Engineering Laboratory for Coal-Fired Pollutants Emission Reduction, School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

**Abstract** The fixed linear mirror solar concentrator and its working principle are introduced. It is necessary to calculate solar beam radiation on each of tilted mirror for the design of solar collector system. Fixed mirror solar concentrator (FMSC) is an approximation which treats smooth linear optical reflector as broken into segments. The incidence angle and illuminate area of every mirror consequentially vary throughout the year, which makes the calculation of the beam radiation relatively complex. The equation of incidence angle, illuminate area and geometric concentration ratio are obtained by vector analysis. And the instantaneous solar beam radiation of whole mirror field is computed. Finally, the cumulated irradiation of overall system is obtained during the available work. Furthermore, two kinds of concentrator are compared, including installation on the south facing with slope of latitude angle and adjustment of a tilt angle one year (spring and summer use). Adjusting slope angle once a year, radiation from concentrator system with open width of 1800 mm increases by 6.53%, with an increment of 65.78 GJ/m.

**Key words** geometrical optics; fixed mirror solar concentrator; vector method; solar energy; irradiation

**OCIS codes** 080.2740; 080.4035; 080.1753

## 1 引 言

当前太阳能聚光利用<sup>[1]</sup>主要用于高温发电,主要形式有槽式、线性菲涅耳反射式<sup>[2-3]</sup>、塔式、碟式和菲涅耳透镜聚光式<sup>[4-6]</sup>。随着工业应用、建筑空调和海水淡化等对中温(80℃~250℃)需求越来越强烈,太阳能聚光中温利用得到国内外研究学者

的广泛关注。

太阳能高倍聚光装置主要利用的是太阳直射辐射<sup>[7-8]</sup>。聚光集热器的太阳直射辐射强度和辐照量是设计时主要考虑的参数<sup>[9-12]</sup>,杜春旭等<sup>[13-15]</sup>对线性菲涅耳反射聚光装置的光学几何特性、辐照量等做了详细的研究。对于太阳能发电和中高温利用,

**收稿日期**: 2013-04-01; **收到修改稿日期**: 2013-06-08

**基金项目**: 山东大学“985工程”自主创新基金(2011JC002)

**作者简介**: 周希正(1974—),男,博士研究生,讲师,主要从事新能源海水淡化方面的研究。E-mail: zxizheng@126.com

**导师简介**: 马春元(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事燃烧污染物控制、节能减排等方面的研究。

E-mail: chym@sdu.edu.cn(通信联系人)

上述几种聚光具有很好的发展应用,但投资和运行费用较大。在中低温利用的海水淡化,吸收制冷等领域,固定条形反射聚光(FMSC)在太阳能工业应用以其特有优点得到关注及重视<sup>[8,16]</sup>。FMSC聚光系统由多个平面镜固定在圆形支架上组成反射镜场,吸收器跟踪太阳,制作简单、系统轻便、抗风载能量强,可设计安放在屋顶,与建筑匹配;也适应沿海、沙漠等风力较大地区。20世纪70年代由于石油危机和槽式聚光集热系统高造价,FMSC聚光集热系统的研究逐渐兴起。作为太阳能聚光高温发电系统,FMSC由于聚光倍数不稳定及差异性等特点而被槽式、塔式、碟式取代。但在太阳能中温利用范围,其优点使其于2008年后在世界各国重新得到重视。Moll等<sup>[17]</sup>分析了固定条形镜面聚光性能,得出聚光性能较好的结论。对于FMSC,太阳的变化、地理位置、安装及构建等因素对提高整个系统聚光特性及变化规律的研究少有报道。FMSC系统为东西向或南北向放置,随着太阳位置的改变,各个反射镜的光线入射角时刻变化,各不同镜面之间由于遮挡使得反射面积均不同,其光学分析复杂。

本文利用矢量分析,得到南向可变倾角的FMSC系统任一镜元入射角、辐照面积的计算公式。采用Hottel晴天太阳辐射模型<sup>[18]</sup>计算整个镜场的实时辐照度<sup>[19]</sup>、几何聚光比<sup>[20-21]</sup>及聚光强度,最后得到整个镜场在有效工作时间内的累积辐射量,并根据分析结果设计了一种适用于沙漠及沿海等风力较大地区太阳能海水(苦咸水)淡化需要的中温热源、可调倾角的FMSC系统。

## 2 聚光镜面矢量分析

### 2.1 条形镜面入射角

在太阳能聚光系统设计中,对集热器各反射镜面入射角 $\theta_i$ 的计算是十分必要的,反射镜面所能得到的最大太阳辐射量跟入射角余弦 $\cos \theta_i$ 密切相关<sup>[15]</sup>。FMSC平面反射镜可以东西水平或南北水平放置,东西布置得到入射角及变化都较小<sup>[21]</sup>。本文设计实验系统焦距不大,太阳光线张角的影响不作考虑,只对东西水平布置下FMSC的光学性能及辐照量进行分析。

图1为固定条形镜面聚光集热系统实验装置图,系统开口宽度为1800 mm,由37块宽度为50 mm的平面反射镜组成,反射镜固定在半径为1175 mm的圆弧装置上,整个系统长度为12 m。轴向东西放置,装置倾斜角度采用推杆电机调整,分夏季(4月~9

月)朝南倾斜角度( $\varphi - 23.45^\circ$ ,其中 $\varphi$ 为当地纬度)、冬季(10月~3月)朝南倾斜角度( $\varphi + 23.45^\circ$ )使用;根据需要也可每月调整一次(按 $\chi = \varphi - \delta_m$ , $\chi$ 为系统装置南向倾斜角度, $\delta_m$ 为当月平均日太阳赤纬角);或每日调整一次(按 $\chi = \varphi - \delta_d$ ,其中 $\delta_d$ 为当日太阳赤纬角)。电机采用可编程控制器(PLC)自动控制。对倾斜纬度角和调整一次倾角的系统两种方式聚光特性及辐照量进行比较和分析,FMSC系统各单元镜面倾斜角度 $\beta_i$ 及入射角 $\theta_i$ 均不同,需先算出不同的南向倾斜角。吸收器东西方向放置,两端由于太阳光线偏斜,有一定损失,但集热器较长时可以不作考虑。图2为固定条形聚光示意图。

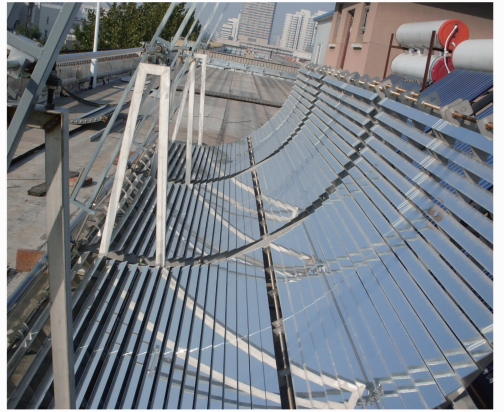


图1 固定条形反射聚光装置图

Fig. 1 Setting diagram of fixed mirror solar concentrator

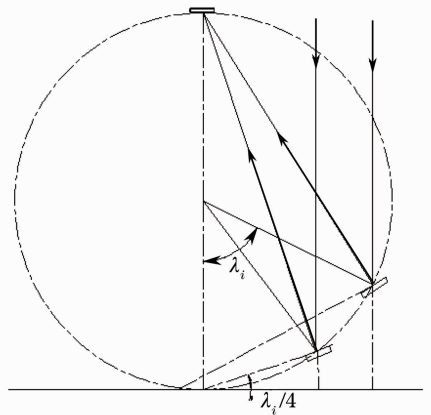


图2 固定条形聚光示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fixed mirror concentrator

太阳能固定条形镜面集热器南向倾斜一定角度的太阳位置关系包括  
太阳高度角:

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega, \quad (1)$$

方位角:

$$\begin{cases} \cos \phi = \frac{\sin \alpha \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \varphi}, & \sin \phi > 1 \\ \sin \phi = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha}, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中赤纬角  $\delta = 23.45 \arcsin \left[ \frac{360(N+284)}{365} \right]$ , 时角  $\omega = 15^\circ(t-12)$ ,  $N$  为几何聚光比,  $t$  为时间,  $\alpha$  为高度角,  $\phi$  为方位角。

朝南倾斜  $\beta_i$  的单元镜面入射角余弦为

$$\cos \theta_i = \sin(\varphi - \beta_i) \sin \delta + \cos(\varphi - \beta_i) \cos \delta \cos \omega, \quad (3)$$

式中  $\beta_i = \varphi + \frac{\lambda_i}{4}$  (镜面中心北边),  $\beta_i = \varphi - \frac{\lambda_i}{4}$  (镜面中心南边),  $\lambda_i$  为单元镜面中心位置对应的圆心角,  $\theta_i$  为第  $i$  个条形镜元对应的太阳能入射角。

## 2.2 太阳光线与主轴平面夹角

水平面太阳位置方向矢量为  $\mathbf{n}(\cos \alpha \cos \varphi, \cos \alpha \sin \varphi, \sin \alpha)$ , 旋转一定角度后可得到倾斜面上太阳坐标位置关系。

通过坐标旋转规律, 太阳位置矢量坐标为  $\mathbf{n}(X_{\text{rot}}, Y_{\text{rot}}, Z_{\text{rot}})$  为

$$\begin{bmatrix} X_{\text{rot}} \\ Y_{\text{rot}} \\ Z_{\text{rot}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \chi & 0 & -\sin \chi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \chi & 0 & \cos \chi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \phi \\ \cos \alpha \sin \phi \\ \sin \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \chi \cos \alpha \cos \phi - \sin \chi \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \phi \\ \sin \chi \cos \alpha \cos \phi + \cos \chi \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (4)$$

可得南北向系统中心主轴平面夹角

$$\theta_{\text{sn}} = \arctan \left( \frac{X_{\text{rot}}}{Z_{\text{rot}}} \right), \quad (5)$$

东西向聚焦线上偏转角度

$$\theta_{\text{ew}} = \arctan \left( \frac{Y_{\text{rot}}}{Z_{\text{rot}}} \right), \quad (6)$$

东西方向损失长度

$$l = 2R \tan \theta_{\text{ew}}, \quad (7)$$

式中  $R$  为条形反射镜所在系统的圆弧装置半径, 其值为 1175 mm。

图 3 为南北向系统主轴平面与太阳光线夹角的变化, 图 4 为调整倾斜面南北向主轴平面与太阳光线夹角的变化。由图 3 可知当聚光装置南向倾斜当地纬度角放置时, 聚光系统主轴平面与太阳光线南向夹角变化(8:00 Am~16:00 Pm)1月平均值为  $37.4^\circ \sim 20.92^\circ$ , 夹角改变为  $16.48^\circ$ ; 2月平均值为  $24.71^\circ \sim 12.95^\circ$ , 变化为  $11.76^\circ$ ; 3月平均值为  $4.03^\circ \sim 2.02^\circ$ , 变化为  $2.01^\circ$ ; 4月平均值为  $18.35^\circ \sim 9.41^\circ$ , 变化为

$8.94^\circ$ ; 5月平均值为  $34.24^\circ \sim 18.79^\circ$ , 变化为  $15.45^\circ$ ; 6月平均值为  $40.45^\circ \sim 23.09^\circ$ , 变化为  $17.36^\circ$ ; 7月平均值为  $35.58^\circ \sim 21.18^\circ$ , 变化为  $14.4^\circ$ ; 8月平均值为  $25.57^\circ \sim 13.46^\circ$ , 变化为  $12.11^\circ$ ; 9月平均值为  $4.43^\circ \sim 2.22^\circ$ , 变化为  $2.21^\circ$ ; 10月平均值为  $18.68^\circ \sim 9.6^\circ$ , 变化为  $9.08^\circ$ ; 11月平均值为  $34.42^\circ \sim 18.92^\circ$ , 变化为  $15.5^\circ$ ; 12月平均值为  $40.4^\circ \sim 23.05^\circ$ , 变化为  $17.35^\circ$ 。3月和9月变化比较平缓, 6月和12月夹角偏大, 变化也最大。由图 4 可知, 当集热器倾角年调整一次, 分夏季(4月~9月)和冬季(10月~3月)使用, 夏季朝南倾斜角度为当地纬度减  $23.45^\circ$  ( $\varphi - 23.45^\circ$ )、冬季朝南倾斜角度为当地纬度加  $23.45^\circ$  ( $\varphi + 23.45^\circ$ )。图中角度为负表示太阳光线偏向系统法向北边, 正数是偏向南。

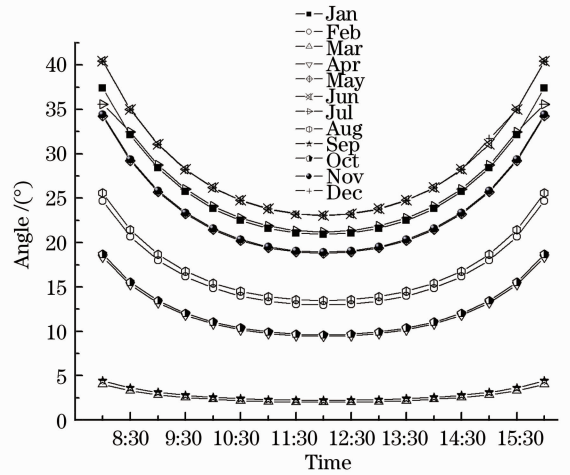


图 3 南北向系统主轴平面与太阳光线夹角变化  
Fig. 3 Variation of the angle of normal plane on north-south and solar rays

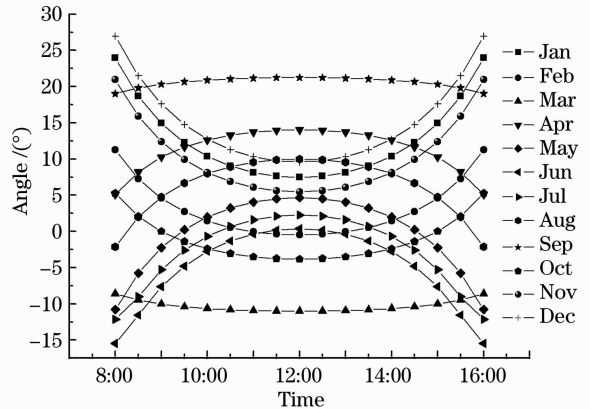


图 4 调整倾斜角南北向法主轴平面与太阳光线夹角变化

Fig. 4 Variation of the angle of normal plane on north-south and solar rays (adjust angle of inclination)

角度变化大小与倾斜纬度角时变化规律相似, 6月和12月变化较大, 为 $16^{\circ}\sim 17^{\circ}$ 。3月和9月变化约为 $2.52^{\circ}$ , 太阳光线偏离主轴平面角度为 $10^{\circ}$ 左右。其他月份太阳光线与集热器主轴平面夹角都减小了约 $11.73^{\circ}$ , 聚光器各单元镜面入射角变小, 集热器单元镜面之间遮挡和反射损失减小, 单元镜面辐照面积增大, 系统接收的太阳能直射辐射量提高较大。

根据(6)式可得东西向角度变化: 春分为 $56.54^{\circ}\sim 0^{\circ}$ , 夏至为 $57.37^{\circ}\sim 0^{\circ}$ , 秋分为 $56.46^{\circ}\sim 0^{\circ}$ , 冬至为 $54.48^{\circ}\sim 0^{\circ}$ 。当固定聚光集热器轴向西东方向放置时, 东西方向倾斜角度从早上开始减小, 到中午12点时刻为 $0^{\circ}$ , 然后又增大, 造成吸收器早晚左右两端有热损失, 如系统较长焦距较短, 损失可忽略不计。

### 3 单元镜面光照面积计算

固定条形镜面由于太阳入射光线偏斜于整个集热器主轴平面, 使得各镜面之间有遮挡和反射损失, 造成各镜面在不同时刻光照面积随之改变。根据固定条形镜面之间的几何高度差, 采用几何光学分析任一单元镜面的光照面积。

两单元镜面间相差高度为

$$h_i = \tan\left(\frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2}\right) \cdot \frac{L}{2} \left(\cos \frac{\lambda_i}{4} + \cos \frac{\lambda_{i+1}}{4}\right) - \frac{L}{2} \left(\sin \frac{\lambda_i}{4} + \sin \frac{\lambda_{i+1}}{4}\right), \quad (8)$$

式中 $L$ 为镜面宽度。图5为相邻单元镜面高度差结构示意图, 图6为本课题组实验设计的各镜面高度差数据变化, 镜面之间高度差不是线性变化, 系统两端变化越来越大。

图7为条形镜光照面积示意图。图7集热系统单位长度左边单元条形镜面积

$$S_i = L - \frac{h_i \sin \theta_{sn}}{\cos(\theta_{sn} + \lambda_i/4)}, \quad (9)$$

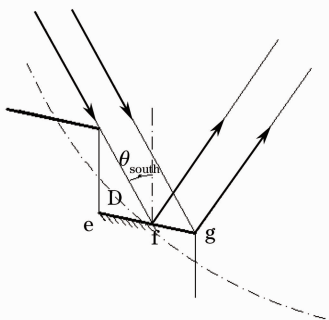


图7 条形镜面光照面积示意图

Fig. 7 Schematic diagram of irradiated area of linear mirror

集热系统单位长度右边单元条形镜面积

$$\begin{cases} S_i = L - \frac{h_i \sin(\theta_{sn} - \lambda_i/2)}{\cos(\theta_{sn} - \lambda_i/4)}, & \theta_{sn} > \frac{\lambda_i}{2} \\ S_i = L, & \theta_{sn} < \frac{\lambda_i}{2} \end{cases} \quad (10)$$

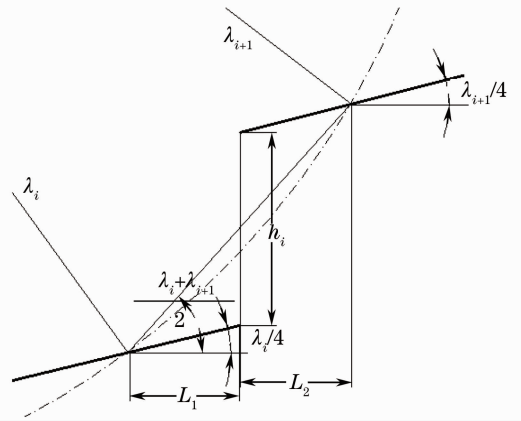


图5 相邻单元镜面高度差示意图

Fig. 5 Schematic diagram of difference in height of adjacent mirrors

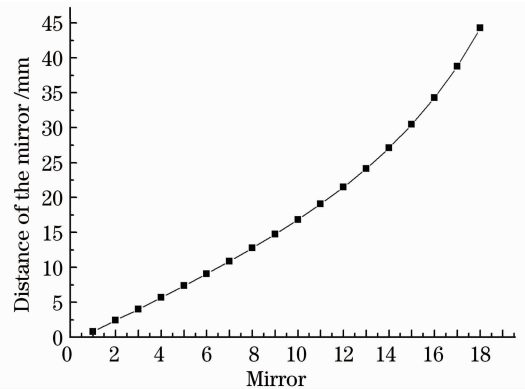
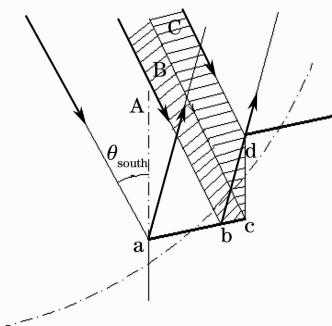


图6 实验装置相邻镜面高度差

Fig. 6 Datum of difference in height of adjacent mirrors in testing apparatus





整个镜场的光照面积  $S = \sum_{i=1}^n S_i$ ,  $n$  为镜场镜元数。吸收器采用圆形玻璃-金属真空管, 聚焦宽度为 50 mm, 因此几何聚光比  $N = S/50$ 。

图 8 为倾斜纬度角整个镜场光照宽度变化, 由图 8 可知南向倾斜当地纬度角放置, 集热器开口宽度为 1800 mm, 由于遮挡和反射损失, 使得系统集热器实际光照面积小于镜场所有镜子总面积之和, 且随时间变化。1 月份和 12 月份光照面积比较小, 上午 8:00~9:00 之间由于太阳光线与主轴平面夹角较大, 光学损失大, 系统集热宽度仅为 932.9 mm, 到 11:00~12:00 时内夹角较小, 损失较小, 集热宽度达到 1596.2 mm; 3 月份和 9 月份中午太阳时 12:00 左右最大, 可达 1798 mm, 几乎等于开口宽度。图 9 为调整倾斜角度整个镜场光照, 宽度变化。由图 9

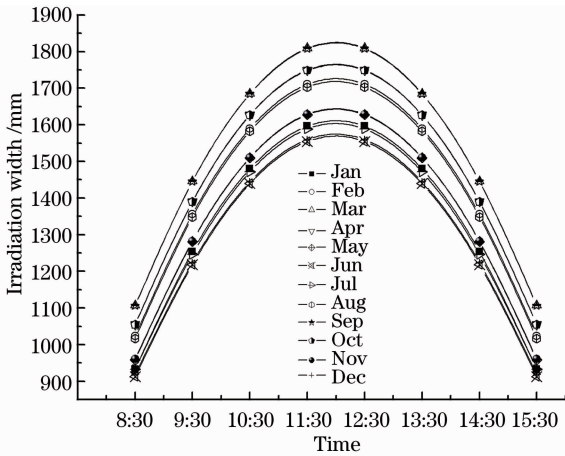


图 8 倾斜纬度角整个镜场光照宽度变化  
Fig. 8 Variation of total irradiated width with latitude-inclination

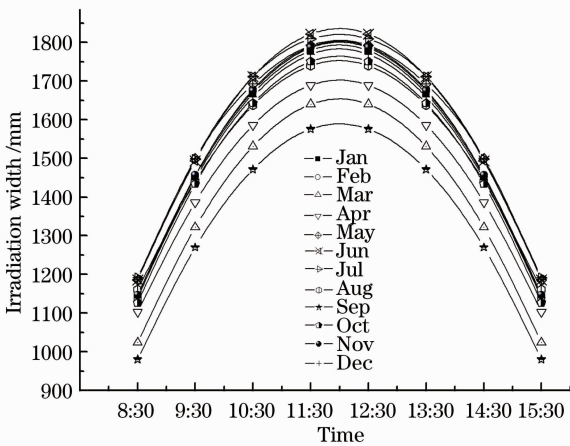


图 9 调整倾斜角度整个镜场光照宽度变化  
Fig. 9 Variation of total irradiated area with adjusting angle of inclination

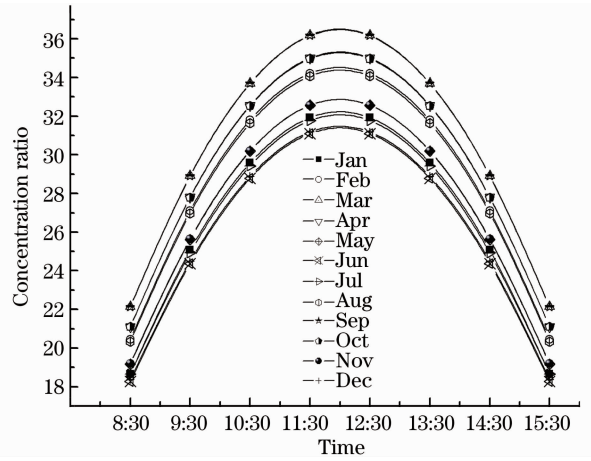


图 10 倾斜纬度角条形镜面聚光集热器几何聚光比  
Fig. 10 Geometry concentration ratio of fixed mirror solar concentrator with latitude-inclination

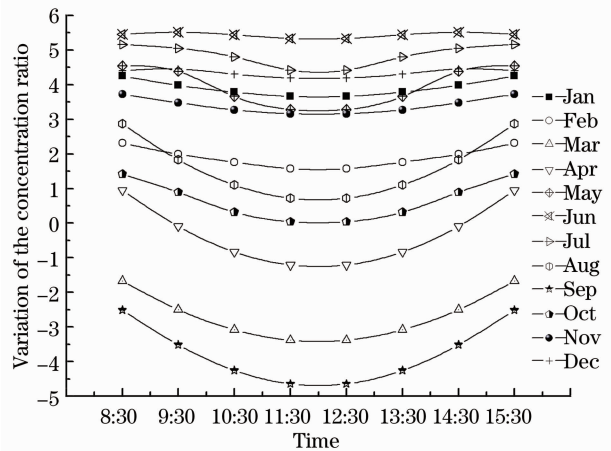


图 11 两种聚光集热器几何聚光比的变化  
Fig. 11 Variation of geometry concentration ratio of two-kind concentrator

可知条形镜面聚光装置年调整一次倾斜角度集热宽度比固定安装有很大提高, 尤其在夏天, 聚光宽度增大使整个系统得到更多的太阳直射辐照量。图 10 为倾斜纬度角条形镜面聚光集热器几何聚光比, 由图 10 可知, 吸收器宽度为 50 mm, 可得相应几何聚光比变化规律与集热面积变化一样, 早上最小、中午左右最大。集热器几何聚光比在 1 月份和 6 月份较小, 在 3 月份和 9 月份达到最大。全年最小的几何聚光比 18.27 出现在夏至和冬至日, 最大 36.2 出现在春分秋分日。图 11 为调整倾斜角度和固定倾角的固定条形镜面几何聚光比的比较, 除了 3 月和 9 月减小外, 其他几个月调整一次倾角的系统都有增大, 尤其是 6 月, 几何聚光比增加 5.5 左右, 可见只要调整一次倾角, 聚光性能即可得到较大改善和提高。

### 4 镜场直射辐射通量计算

日地距离在一年内在 1.7% 范围内变化, 为了计算和比较需采用一个统一的方法, 本文选用 Hottle 提出的标准晴空辐射<sup>[18]</sup> 模型。标准晴空下地面垂直于辐射方向的直射辐照为

$$G_{onb} = G_{on} \tau_b, \quad (11)$$

式中  $G_{on}$  为大气层外辐照度,  $\tau_b$  为晴天模型直射辐射大气透明度。任意单元条形镜面所接收得直接辐射通量为

$$I = S_i G_{on} \tau_b \cos \theta_i. \quad (12)$$

整个系统的镜场直接辐射通量为

$$H_b = \sum_{i=0}^n S_i \cdot 3600 G_{on} \tau_b \cos \theta_{i,S} + \sum_{i=1}^n S_i \cdot 3600 G_{on} \tau_b \cos \theta_{i,N}, \quad (13)$$

式中  $\cos \theta_{i,S}$  为南边入射角余弦,  $\cos \theta_{i,N}$  为北边入射角余弦。

根据 FMSC 镜场镜元之间遮挡, 对于等宽矩形镜面, 所接收的太阳直射辐射通量为(13)式。实验装置包括 37 块单元镜面, 镜宽为 50 mm, 镜长为 12 m, 系统开口张角为  $100^\circ$ , 开口宽度为 1800 mm。

图 12 为济南地区晴天模型地表面太阳直射辐射强度变化, 日变化为早晚较小, 中午时刻较大; 年变化为冬季较小, 春季和秋季其次、夏季最大。

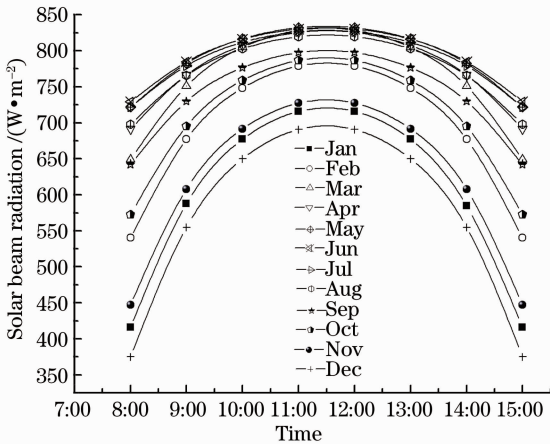


图 12 地表面直射辐射强度变化

Fig. 12 Variation of solar beam radiation on surface

图 13 为斜倾纬度角整个镜场辐照量变化, 由图 13 可知, 倾斜角不变的固定条形镜面聚光集热系统 1 月份和 12 月份聚光强度最小, 这是由于冬季直射辐射小及太阳光线与聚光装置偏射较大, 镜场遮挡损失和光学损失较大造成的。系统朝南倾斜当地纬度角固定, 3 月份和 9 月份太阳光线和系统主轴

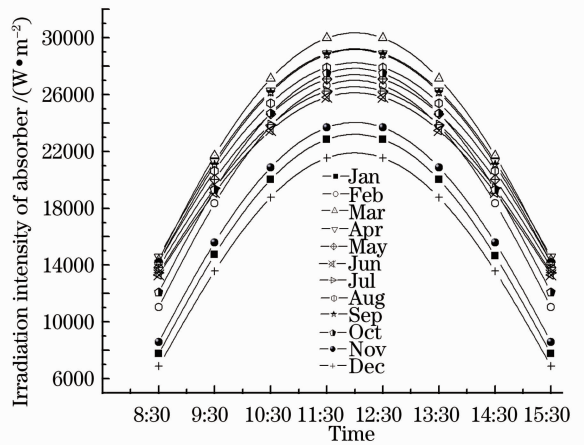


图 13 倾斜纬度角整个镜场辐照量变化

Fig. 13 Variation of total irradiation with adjusting angle of inclination

平面夹角很小、遮挡损失很少, 达到最高值。夏季虽然直射辐射较大, 但偏射角较大造成遮挡损失也大, 使得系统整个镜场接收的辐射量并非最大。图 14 为年调整一次倾斜角度(冬季和夏季使用)和倾斜纬度角固定的两种条形镜面聚光装置辐照量比较, 相比于固定倾斜角度的聚光系统, 调整一次倾角的聚光系统仅在 3 月份和 9 月份有所减少, 9 月份日平均减少为  $1612 \sim 3700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 其他月份均有所增加, 尤其是 6 月日平均增加  $3822 \sim 5994 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。因此年调整一次倾角, 使聚光性能得到较大改善和提高。图 15 为两种聚光装置单位长度系统得到辐照量变化规律, 调整一次倾斜角度的 FMSC 系统中, 在吸收器跟踪状态下, 整个镜场所接收的辐照量全年变化相对平缓, 春分和秋分期间有个拐点, 这是由于在春分和秋分当日调整倾角, 夏季接收辐照量

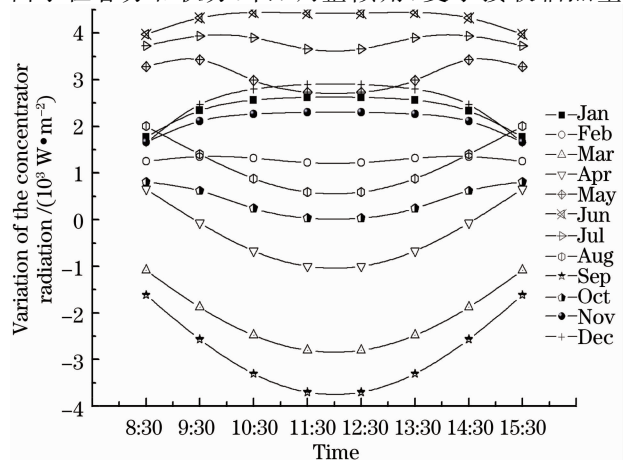


图 14 两种聚光集热器聚光强度改变量

Fig. 14 Variation of geometry concentration ratio of two-kind concentrator

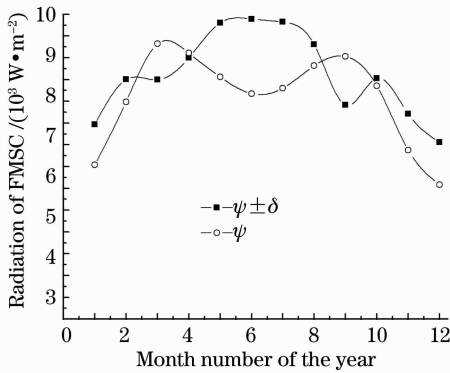


图 15 两种聚光装置单位长度辐照量变化

Fig. 15 Variation of total solar irradiation for two-kind concentrator

最大。朝南固定倾斜纬度角安装, FMSC 系统辐射通量全年波动较大, 也是在春分和秋分出现拐点。由图 15 可知, 除了 3 月份和 9 月份, 其他月份改变一次倾斜角度整个镜场接收辐照量都增大, 全年整个镜场累积辐照量有很大改善。年调整一次倾角, 开口宽度为 1800 mm 聚光系统单位长度年接收辐照量提高了 6.53%, 增量为 65.78 GJ/m。

## 5 结 论

根据反射聚光原理, 设计了 50 mm 宽的平面反射镜按一定角度固定在半径 1175 mm 圆弧支架上, 开口宽度为 1800 mm, 吸收器跟踪太阳反射聚焦的实验装置。通过建立 FMSC 聚光镜场的几何光学模型、遮挡和损失数学模型, 采用晴天直射辐射模型对 FMSC 系统的影响因素进行了分析和比较。在对 FMSC 聚光镜场进行矢量分析和光学性能分析基础上, 得到了镜场的几何聚光比、集热面积及辐射通量的计算方法和系统聚光特性的变化规律。分析结果表明, 固定条形镜面反射聚光朝南倾斜纬度角, 系统东西向放置时, 入射夹角变化较大, 造成全年波动较大。冬季和夏季由于遮挡及阴影损失, 得到辐照量偏小。年调整一次倾斜角度安装, 系统主轴平面与太阳光线的夹角变小, 遮挡和阴影损失相应变小, 开口宽度为 1800 mm 的聚光系统单位长度年接收辐照量提高了 6.53%, 增量为 65.78 GJ/m。

## 参 考 文 献

1 Soteris A Kalogirou. Solar thermal collectors and applications [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(3): 231-295.

2 D R Mills, G L Morrison. Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants [J]. Solar Energy, 2000, 68(3): 263-283.

3 D R Mills, G L Morrison, J Pye, *et al.*. Multi-tower line focus Fresnel array project [J]. Journal of Solar Energy Engineering. Transactions of the ASME, 2006, 128(1): 118-121.

4 S Kalogirou, S Lloyd, J Ward. Modelling optimisation and performance evaluation of a parabolic trough collector steam generation system [J]. Solar Energy, 1997, 60(1): 49-59.

5 A Rabl. Active Solar Collectors and Their Application [M]. Oxford: oxford University Press, 1985. 19-20.

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

7 J A Duffie, W A Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes [M]. New York: John Wiley and Sons, 2006. 320-368.

8 J L Russell, Jr.. Principles of the fixed mirror solar concentrator [C]. SPIE, 1977, 85, 139-145.

9 D K Jo, Y H Kang, C M Auh. A study on the analysis of solar radiation characteristics on a high elevated area [J]. J Korea Solar Energy Soc, 2003, 23(3): 23-28.

10 Jorge Facao, Armando C Oliverira. Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator [J]. Renewable Energy, 2011, 36(2): 90-96.

11 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.

12 Chen Fei, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Influence of glass thickness of reflector on the concentrating characteristics in the solar energy trough system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1208002.

陈飞, 李明, 季旭, 等. 太阳能槽式系统反射镜玻璃厚度对聚光特性的影响 [J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1208002.

13 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.

14 Du Chunxu, Wang Pu, Wu Yuting, *et al.*. Concentration ratio analysis of linear fresnel reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0808001.

杜春旭, 王普, 吴玉庭, 等. 线性菲涅耳聚光装置的聚光比分析 [J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0808001.

15 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.

16 Ravinder Kumar Bansal. Theoretical Analysis of Fixed Mirror Solar Concentrator [D]. Arizona: Arizona State University, 1974. 15-52.

17 Martinez Moll, V Pujol Nadal. Analysis of a stationary Fresnel like linear concentrator with tracking absorber [C]. Seville: 13th Solar PACES Symposium, 2006, 211-215.

18 Monika Adsten. Solar Thermal Collectors at High Latitudes [D]. Uppasala: Uppsala University, 2002. 18-35.

19 W B Stine, R W Harrigan. Solar Energy Fundamentals and Design with Computer Application [M]. New York: John Wiley and Sons, 1985. 120-186.

20 G D Sooth, 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.

21 S S Mathur, T C Kandpal, B Negi. Optical design and concentration characteristics of linear Fresnel reflector solar concentrator-I. Mirror elements of varying width [J]. Energy Conversion and Management, 1991, 31(3): 205-219.