

# 激光与光电子学进展

## 线性菲涅耳集热器聚光误差分析及其 补偿算法研究

张志勇<sup>1,2</sup>, 孔令刚<sup>1</sup>, 范多进<sup>1</sup>, 姚小明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>兰州交通大学研究院光热储能综合能源系统工程研究中心, 甘肃 兰州 730070;

<sup>2</sup>兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 线性菲涅耳式集热器聚光精度对光热效率有着非常重要的影响,同时,聚光集热器偏焦引起的局部热斑使吸热器不均衡膨胀会对集热器的结构造成严重破坏,对集热器聚光误差的分析至关重要。根据线性菲涅耳式集热系统线聚焦跟踪的特点,通过机理分析探讨影响线性菲涅耳式集热器聚光精度的主要因素,采用MATLAB软件对各因素进行仿真分析得出线性菲涅耳镜场南北布置偏差、一次反射镜反射中心动态位移偏差及反射光线光程动态变化是引起集热器聚光偏差的最主要因素。镜场布置的南北偏差引起的聚光偏差关于正午时刻呈正态分布,并随着纬度的变化而变化;一次反射镜反射中心动态位移偏差对聚光精度的影响在早晨和傍晚时较大且早晨与下午非对称,最大误差接近 $0.08^\circ$ ;反射光线光程变化对聚光误差的影响主要体现在全年时间轴上。通过仿真分析结合现场测试,采用线性补偿算法对集热器一次反射镜目标跟踪角度进行补偿,补偿后集热系统的最大聚光误差小于 $0.06^\circ$ 。

**关键词** 几何光学; 线性菲涅耳; 聚光误差; 补偿算法; 追日控制; 太阳能

中图分类号 TK-9 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0708001

## Analysis of Light Concentration Error and Compensation Algorithm of Linear Fresnel Collector

Zhang Zhiyong<sup>1,2</sup>, Kong Linggang<sup>1</sup>, Fan Duojin<sup>1</sup>, Yao Xiaoming<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Engineering Research Center for Photothermal Energy Storage Integrated Energy System, Research Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070

**Abstract** The focusing precision of the linear Fresnel collector has an important effect on the photothermal efficiency. Moreover, the partial hot spot caused by the partial focus of the concentrator causes an unbalanced expansion of the absorber, which causes severe damage to the collector's structure. Therefore, it is crucial to analyze the concentrating error of the collector. According to the characteristics of the linear Fresnel heat collecting system, the main factors affecting the light-gathering precision of the Fresnel collector are discussed through mechanism analysis. All the factors are analyzed and simulated by MATLAB software, and it is concluded that the main factors that cause the concentration deviation of the collector are the north-south arrangement deviation of the

收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-06-09; 录用日期: 2021-06-30

基金项目: 国家能源局项目(国新能源[2016]223)、甘肃省科技重大专项(20ZD7GF011)、校青年基金项目(2017037)、科技合作项目(19ZD2GA003)

通信作者: \*zzy\_2050@163.com

linear Fresnel mirror field, dynamic displacement deviation of the reflection center of the primary mirror, and dynamic variation of the light path of the reflected light. The concentrated light deviation caused by the north-south deviation of the mirror field layout is normally distributed at noon and varies with the latitude. Meanwhile, the effect of the dynamic displacement deviation of the reflection center of the primary mirror on the focusing precision is greater in the morning and evening, and it is asymmetric in the morning and afternoon with the maximum error approaching  $0.08^\circ$ . The influence of light path variation of the reflected light on the concentrating error is mainly reflected in the annual time axis. Through simulation analysis and field testing, the linear compensation algorithm was used to compensate the target tracking angle of the collector's primary mirror. After the compensation, the maximum concentration error of the heat collecting system was less than  $0.06^\circ$ .

**Key words** geometric optics; linear Fresnel; focusing error; compensation algorithm; tracking control; solar energy

## 1 引言

能源问题已成为全球的焦点,国际局势的动荡变化,归根结底是对能源的争夺<sup>[1-2]</sup>。随着化石能源的过度消耗及全球环境问题日益恶化,可再生能源和清洁能源的开发已成为大趋势<sup>[3]</sup>。太阳能具有清洁、无污染和可再生的优点,是一种理想的可再生能源,但是太阳能能流密度低,聚光集热是利用其进行热发电的最佳形式<sup>[4-5]</sup>。根据聚光形式,太阳能聚光系统主要有槽式、线性菲涅耳式、碟式和塔式<sup>[6]</sup>等,目前国内已建成的光热电站有中控 50 MW 塔式电站、首航节能 100 MW 塔式电站、中广核 50 MW 槽式电站、共和 50 MW 塔式电站、敦煌大成 50 MW 线性菲涅耳电站。在众多的光热电站中,线性菲涅耳式聚光器具有结构简单,风阻小、成本低、土地容积率高及聚光均匀<sup>[7]</sup>等特点,正逐渐成为最具竞争力的光热发电形式。

线性菲涅耳式太阳能聚光集热系统主要由一次反射镜、复合抛物面二次聚光器(CPC)和跟踪控制装置三部分构成。集热岛是太阳能光热电站的能量提供单元,集热岛的聚光精度对光热电站的发电量具有非常重要的作用,集热岛的聚光精度主要体现在一次反射镜的面型精度、CPC 的结构设计(高会聚率)和追日系统的跟踪精度,对于工程化的商业电站,关键部件的制造误差、工程施工的安装误差等最终会归根于跟踪控制系统的追踪误差。

Gåsvik 等<sup>[8]</sup>采用两种不同的动态测试方法用于提升线性菲涅耳一次反射镜等性能,使一次镜面的面型平均绝对误差小于  $0.0098 \text{ mrad}$ ; Hofer 等<sup>[9]</sup>采用条纹反射法及温度补偿策略完成对线性菲涅耳一次镜面面型的质量控制;王成龙等<sup>[10]</sup>设计了一种适用于高温介质的线性菲涅耳式 CPC 接收器,通过研究最大接受半角和截取比对 CPC 性能的影响,得

出最大接收半角  $45^\circ$ , 截取比为 0.75 的 CPC 开口宽度为 475.49 mm; 马军等<sup>[11]</sup>基于射线追踪法对菲涅耳聚光镜场阴影与遮挡进行分析,探讨了阴影与遮挡对线性菲涅耳式聚光镜场系统光学效率的影响结果;杜春旭等<sup>[12]</sup>通过比较几种常用的太阳位置计算方法,总结出一种高度角、方位角最大误差分别为  $0.05^\circ$  和  $0.13^\circ$  的高精度太阳位置计算方法。线性菲涅耳光热发电技术的研究起步晚,规模化工程案例较少,国内外研究团队主要关注于线性菲涅耳系统单体的结构设计、性能优化及质量控制,对于规模化运行的菲涅耳式商业电站,一次镜的跟踪控制精度问题对于系统热学性能和集热器的设备安全至关重要,本文结合敦煌光热电站实际运行过程中遇到的聚光误差问题,通过仿真对其进行定量分析,并通过非线性补偿算法减小系统聚光误差,提高系统的光热转换效率,该研究成果对线性菲涅耳式太阳能聚光集热系统的发展具有非常重要的意义。

## 2 线性菲涅耳聚光系统工作原理

### 2.1 线性菲涅耳式集热场结构

线性菲涅耳式集热场有南北向和东西向两种布置形式<sup>[13]</sup>,一次镜由平面或微弧反射镜组成,在跟踪控制装置的驱动下,直射阳光反射至 CPC 接收器,经 CPC 会聚后将阳光投射到集热管上,南北向布置的线性菲涅耳式聚光集热单元示意图<sup>[14]</sup>如图 1 所示。集热单元东、西侧镜列跟踪角度的计算公式为

$$\beta_{n,e} = \frac{\alpha - \alpha \tan(H/Q_n)}{2} - 180/2, n = 1, 2, \dots, 10, \quad (1)$$

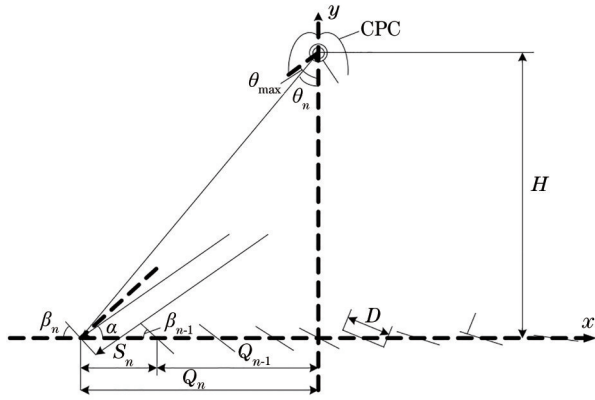


图 1 线性菲涅耳聚光集热器  
Fig. 1 Linear Fresnel concentrator

$$\beta_{n,w} = \frac{\alpha + \alpha \tan(H/Q_n) - 180}{2}, n = 1, 2, \dots, 10, \quad (2)$$

式中： $\beta_{n,e}$ 、 $\beta_{n,w}$  为东、西侧镜列倾角； $H$  为镜面水平放

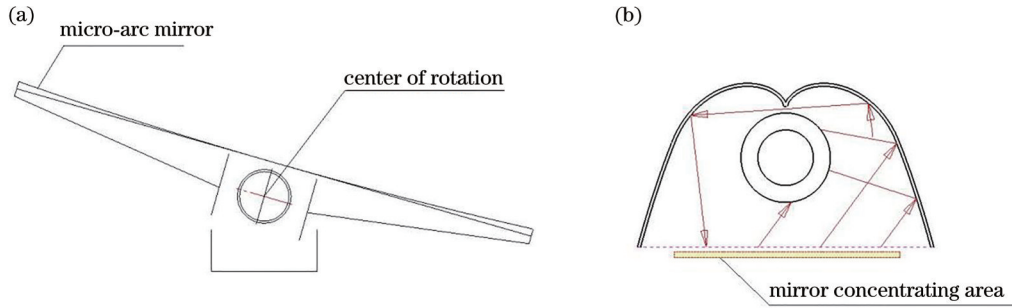


图 2 线性菲涅耳系统反射镜。(a) 微弧型一次反射镜；(b) CPC 二次反射镜  
Fig. 2 Linear Fresnel system reflector. (a) Micro-arc primary reflector; (b) CPC secondary reflector

### 3 线性菲涅耳聚光系统跟踪误差分析

线性菲涅耳式聚光集热系统是一个大型精密光学系统,根据其结构特点,目前应用于线性菲涅耳镜列的追日方式主要为视日运行轨迹主动式开环控制方式<sup>[15-18]</sup>,通过精确的算法,可获得准确的太阳位置坐标,在线性菲涅耳聚光集热系统实际运行过程中,影响系统聚光精度的因素很多,镜场设计时南北轴向坐标定位偏差、CPC 安装时垂直、水平偏差、一次镜面追踪旋转过程中镜面反射中心动态位移偏差、一次镜面与 CPC 轴向不平行偏差、镜列之间安装间距误差及大气层对光线折射<sup>[19-20]</sup>等都将对线性菲涅耳系统的光线会聚造成一定的影响。

#### 3.1 镜场南北向偏差

太阳位置的计算公式为

$$\hat{\alpha} = \alpha \sin[\sin(\delta) \cdot \sin(\theta_{\text{latitude}}) + \cos(\delta) \cdot \cos(\theta_{\text{latitude}}) \cdot \cos(\omega)], \quad (3)$$

置时距离 CPC 二次反射镜下沿的垂直距离； $Q_n$  为第  $n$  个镜列的距离集热器中心的距离； $\alpha$  为太阳光入射角。

#### 2.2 线性菲涅耳一次、二次镜结构及工作原理

为提高热发电过程中熔盐介质的温度,线性菲涅耳系统一次镜通常设计为微弧型结构,根据不同镜列反射光程距离,微弧镜面设置不同焦距,为降低生产制造和工程安装难度,每种镜面结构相互兼顾。每个线性菲涅耳集热单元分为东西两部分,每部分由统一的装置驱动完成追日跟踪,一次反射镜结构示意图如图 2(a)所示。二次聚光器安装在一次镜镜列中央正上方一定高度处,经一次反射镜反射的部分反射光线直接投射到 CPC 中央集热管上,未直接投射到集热管的部分光线经 CPC 二次反射后被集热管吸收,少量光线经 CPC 反射后漏出。CPC 光线投射示意如图 2(b)所示。

$$\gamma = \alpha \cos[\sin(\hat{\alpha}) \cdot \sin(\theta_{\text{latitude}}) - \sin(\delta) / \cos(\hat{\alpha}) / \cos(\theta_{\text{latitude}})], \quad (4)$$

式中： $\hat{\alpha}$  为太阳高度角； $\delta$  为太阳赤纬； $\theta_{\text{latitude}}$  为当地纬度； $\omega$  为太阳时角； $\gamma$  为太阳方位角。文献[13]通过对比几种常见的太阳位置计算方法,总结出一种高度角、方位角最大误差分别为  $0.05^\circ$  和  $0.13^\circ$  的高精度太阳位置计算方法。得出太阳高度角和方位角后,太阳光线在东西向平面内入射光线与水平面的夹角(即线聚焦太阳能光热应用中通常所指的太阳入射角)可表示为

$$\alpha = \alpha \tan[\sin(\hat{\alpha}) / \cos(\hat{\alpha}) / \sin(\gamma)]. \quad (5)$$

南北向布置的线性菲涅耳式聚光集热场,镜列的跟踪角度在时间上是关于正午对称的,正午时刻,太阳在地面的投影与当地经线重合<sup>[21]</sup>。高温熔盐线性菲涅耳式系统中,为满足熔盐的温升要求,集热回路长度可达 1000 m 以上,集热系统安装基础的定位误差使得集热回路在南北向存在一定的误

差,镜场的南北布置偏差可理解为提早或推迟了系统运行的“正午”时刻点,当镜场存在南偏东误差时,可认为系统运行的“正午”时刻提前到来;当镜

场存在南偏西误差时,可认为系统运行的“正午”时刻推迟到来,因此太阳入射角的计算式变为

$$\begin{cases} \alpha = 180 - \alpha \tan [\sin(\hat{\alpha}) / \cos(\hat{\alpha}) / \sin(|\gamma + \theta_{n,s,off}|)], \omega < 0 \& \gamma < 0 \\ \alpha = \alpha \tan [\sin(\hat{\alpha}) / \cos(\hat{\alpha}) / \sin(\gamma + \theta_{n,s,off})], \omega < 0 \& \gamma > 0 \\ \alpha = 180 - \alpha \tan [\sin(\hat{\alpha}) / \cos(\hat{\alpha}) / \sin(\gamma - \theta_{n,s,off})], \omega > 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\theta_{n,s,off}$ 为镜场南北向布局偏差。

镜场南北向偏差带来的跟踪角度偏差如图 3 所示。

从图 3 跟踪角度误差曲线可以看出,镜场南北

向偏差因素造成的跟踪角度偏差随季节的变化逐渐变化,按照季节对比,冬至时偏差最大,夏至时偏差最小,按照全天时刻对比,中午时偏差最大,早晨及傍晚时偏差最小。

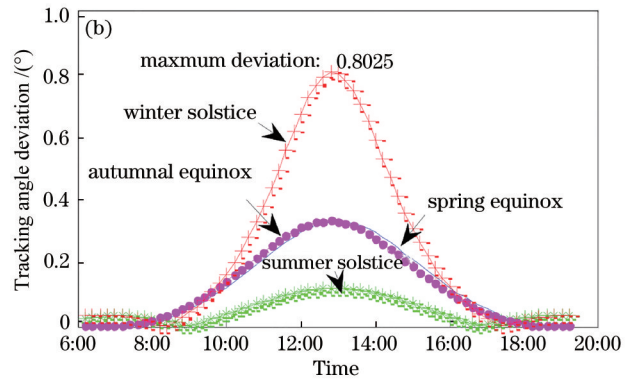
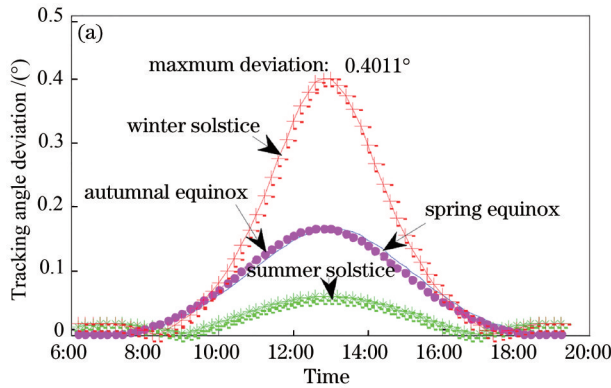


图 3 镜场南北向偏差引起的跟踪角度偏差。(a)  $\theta_{n,s,off}=0.4^\circ$ ; (b)  $\theta_{n,s,off}=0.8^\circ$

Fig. 3 Tracking angle deviation caused by south-north deviation of mirror field. (a)  $\theta_{n,s,off}=0.4^\circ$ ; (b)  $\theta_{n,s,off}=0.8^\circ$

### 3.2 CPC 安装偏差

线性菲涅耳系统 CPC 二次反射镜安装于集热器镜列中央正上方, CPC 的安装高度依据一次镜列的设计列数、镜列间距及最大接收半角确定,综合考虑系统的建造成本、电站容积率等多种因素, CPC 的安装高度一般超过 10 m,工程化建设过程中,结构件数量多、制造工序多,并且施工过程中容易受到环境风速、地基施工误差、测量仪器精度及安装人员责任心等众多因素影响, CPC 的安装误差非常容易出现, CPC 安装误差主要分为垂直安装误差和水平安装误差。安装误差示意如图 4 所示。

CPC 垂直安装误差的存在使得(1)式、(2)式调整为

$$\beta_{n,e} = \frac{\alpha - \alpha \tan[(H + \Delta)/Q_n]}{2} - 180/2, \quad n = 1, 2, \dots, 10, \quad (7)$$

$$\beta_{n,w} = \frac{\alpha + \alpha \tan[(H + \Delta)/Q_n] - 180}{2}, \quad n = 1, 2, \dots, 10. \quad (8)$$

CPC 水平安装误差的存在使得(1)式、(2)式调

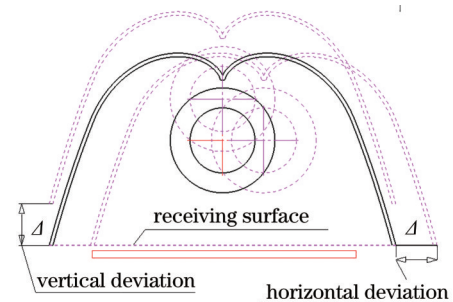


图 4 CPC 的水平、垂直安装误差示意图

Fig. 4 Schematic of CPC horizontal and vertical installation errors

整为

$$\beta_{n,e} = \frac{\alpha - \alpha \tan[H/(Q_n + \Delta)]}{2} - 180/2, \quad n = 1, 2, \dots, 10, \quad (9)$$

$$\beta_{n,w} = \frac{\alpha + \alpha \tan[H/(Q_n + \Delta)] - 180}{2}, \quad n = 1, 2, \dots, 10. \quad (10)$$

不同安装误差下随机跟踪误差趋势如图 5 所示。



从图 5 可以看出, CPC 安装的水平误差对跟踪角度的误差影响较为明显, 水平安装误差 50 mm

时, 跟踪角度的误差约为  $0.11^\circ$ ; 水平误差 100 mm 时, 跟踪角度的误差约为  $0.23^\circ$ 。

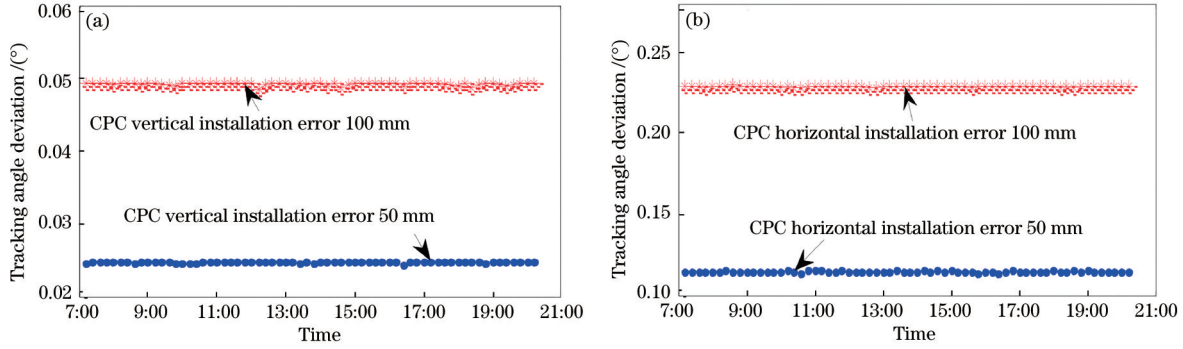


图 5 CPC 安装误差引起的跟踪角度偏差。(a)垂直安装误差;(b)水平安装误差

Fig. 5 Tracking angle deviation due to CPC installation error. (a) Vertical installation error; (b) horizontal installation error

### 3.3 镜面反射中心动态位移偏差

线性菲涅耳式聚光集热系统一次镜列通过一套驱动装置完成追日跟踪, 一次反射镜面和镜列转轴之间存在一定的间距, 该间距因各种原因很难消

除。所以一次镜镜面和转轴之间的间距是必然存在的, 具体结构示意图如图 6 所示。其中  $\Delta h$  为镜列转动时高度方向的变化量;  $\Delta w$  为镜列转动时宽度方向的变化量。

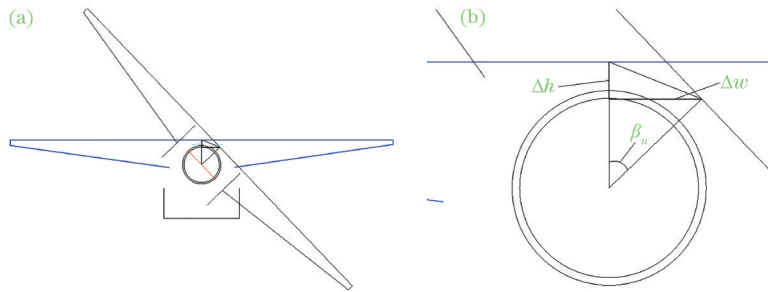


图 6 一次镜运行轨迹示意图。(a)旋转示意图;(b)运动轨迹几何关系

Fig.6 Schematic of trajectory of primary mirror. (a) Rotation diagram; (b) trajectory geometry

从图 6 可以看出, 随着镜列的旋转, 镜面反射中心的位置时刻变化, 导致一次镜镜面反射中心距离 CPC 开口中心的距离时刻变化, 时变的高度、宽度距离表示为

$$\begin{cases} H_d = H + h - h \cdot \cos(\beta_d) \\ W_d = W - h \cdot \sin(\beta_d) \\ H_x = H + h - h \cdot \cos(\beta_x) \\ W_x = W + h \cdot \sin(\beta_x) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $H_d$ 、 $W_d$  为东侧镜列动态高度、宽度;  $H_x$ 、 $W_x$  为西侧镜列动态高度、宽度;  $H$ 、 $W$  为镜列水平时高度、宽度;  $h$  为镜列旋转中心与镜面反射中心的间距;  $\beta_n$  为镜列旋转过程中的动态倾角。高度、宽度动态变化引起的跟踪角度误差变化如图 7 所示。

线性菲涅耳集热单元一次反射镜由多组平行镜列组成, 每组镜列初始角度不同, 驱动装置驱动镜列转动时整个镜列组按照平行四边形的性质转

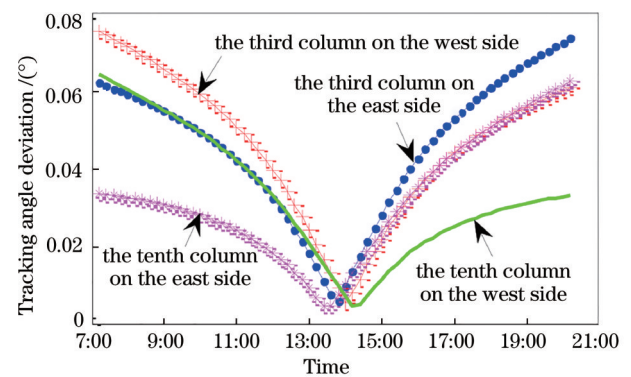


图 7 运行轨迹变化引起的跟踪角度偏差

Fig. 7 Tracking angle deviation caused by trajectory change

动。从图 7 可以看出, 全天跟踪时间段内, 镜列在旋转过程中因高度和宽度的动态变化所引入的跟踪角度误差在早晨、傍晚时相对较大, 中午时相对较小; 同一时刻点, 不同镜列因倾斜角度不同而引入的跟踪角度偏差存在一定的差异, 进入 CPC 开口处

的反射光斑位置是动态变化的。

### 3.4 角度传感器的温漂误差

在反射镜跟踪太阳过程中,倾角传感器是完成驱动电机闭环控制的关键部件,基于微机电原理制造的倾角传感器无法避免环境温度变化对其输出角度的影响,通常情况下,倾角传感器输出值与温度的对应关系为 $0.004(^{\circ})/^{\circ}\text{C}$ ,在太阳能资源丰富的西北戈壁地区,冬天和夏天环境温度差值最大可达 $50^{\circ}\text{C}$ ,因此环境温度变化引起的季节性跟踪角度误差可达 $0.2^{\circ}$ 。倾角传感器输出值误差与环境温度的对应如图 8 所示,其中 F99\_1~F99\_10 分别为倾角输出值在 $-45^{\circ}$ 、 $-35^{\circ}$ 、 $-25^{\circ}$ 、 $-15^{\circ}$ 、 $-5^{\circ}$ 、 $5^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ 、 $25^{\circ}$ 、 $35^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 时的测试结果。

## 4 跟踪倾角偏差对光线会聚的影响

### 4.1 跟踪误差仿真

反射镜列倾角误差对太阳光线进入率的影响

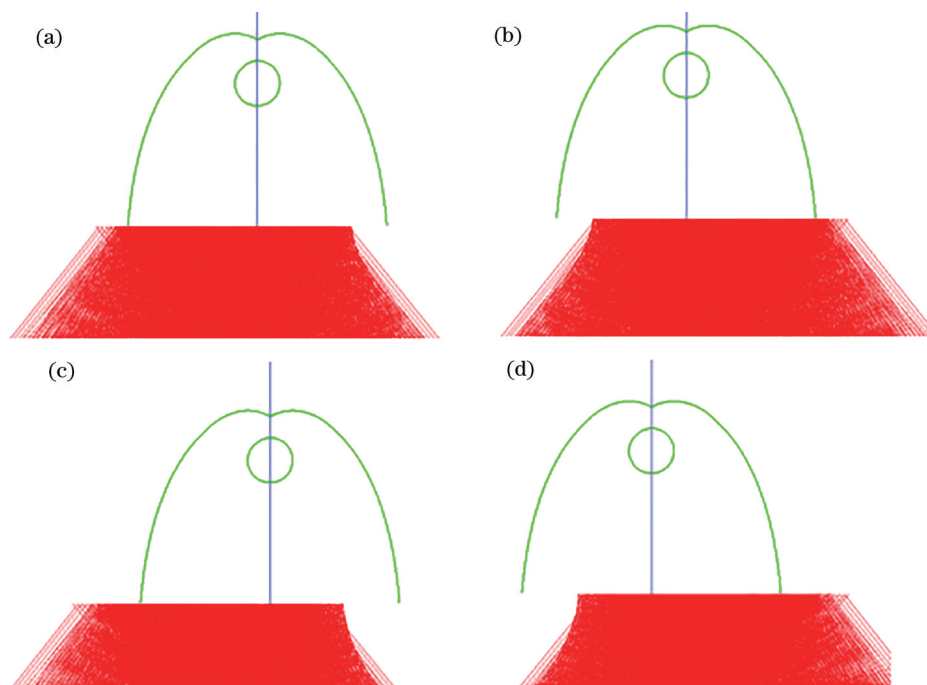


图 9 跟踪偏差下的光线会聚情况。(a)  $\Delta=-0.1^{\circ}$ ; (b)  $\Delta=0.1^{\circ}$ ; (c)  $\Delta=-0.2^{\circ}$ ; (d)  $\Delta=0.2^{\circ}$

Fig. 9 Convergence of light under tracking deviation. (a)  $\Delta=-0.1^{\circ}$ ; (b)  $\Delta=0.1^{\circ}$ ; (c)  $\Delta=-0.2^{\circ}$ ; (d)  $\Delta=0.2^{\circ}$

### 4.2 跟踪角度实测分析

在敦煌熔盐线性菲涅耳示范电站实验回路中对集热单元的跟踪情况进行观察,间隔 10 min 人为对跟踪角度进行调整(驱动装置最小的分辨误差为 $0.03^{\circ}$ ),将 2019 年 9 月 2 日实测数据与理论计算数据进行对比,理论数据与实测数据的拟合曲线如图 10 所示,二者的误差曲线如图 11 所示。误差分

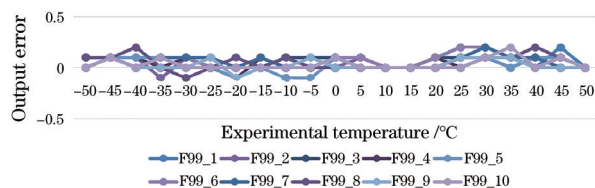


图 8 温度对倾角传感器输出误差的影响关系

Fig. 8 Influence of temperature on output error of inclination sensor

十分显著,采用微弧结构的单列镜元聚光比大于 120 倍,跟踪角度的准确性对于线性菲涅耳式光热电站光资源的利用具有十分重要的意义,另外,跟踪角度的偏差造成高聚光倍数的阳光无法被集热管吸收,反而被集热管周边的支撑件吸收,长期的高温环境会导致支撑结构变形或者损坏,对集热系统的寿命造成一定的影响,跟踪倾角出现偏差时的光线会聚仿真如图 9 所示。

析见表 1。

### 4.3 跟踪角度误差补偿

从图 10 可以看出,早晨到晚上跟踪角度并非线性变化,从早晨到正午,跟踪角度的变化呈轻微上升趋势,从正午到晚上,跟踪角度的变化呈轻微下降趋势,从早晨到傍晚,跟踪角度的变化范围为 $-40^{\circ}\sim+40^{\circ}$ ;从图 11 的跟踪角度误差曲线可以看

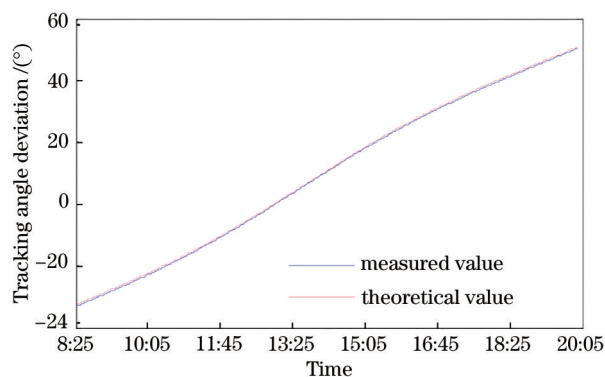


图 10 理论与实测跟踪角度曲线

Fig. 10 Theoretical and measured tracking angle curve

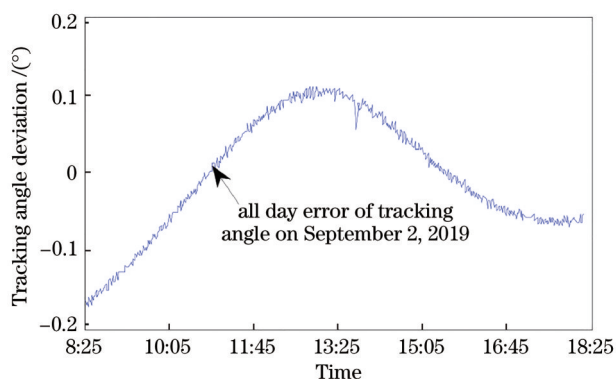


图 11 理论与实际跟踪角度偏差曲线

Fig. 11 Theoretical and measured tracking angle deviation curve

表 1 理论与实测跟踪角度误差分析

Table 1 Theoretical and measured tracking angle error analysis

Item	Max	Min	Max-min
Error / (°)	0.1101	-0.1722	0.2823
Time	13:04	8:25	

出,早晨到正午前后,跟踪误差在 $-0.17^{\circ}\sim 0.12^{\circ}$ ,从正午到晚上的跟踪误差在 $0.1^{\circ}\sim -0.06^{\circ}$ ,早晨到正午的相对最大误差为 $0.29^{\circ}$ ,正午到晚上的相对最大误差为 $0.16^{\circ}$ 。为减轻系统的运算负担,降低误差补偿的复杂度,分别对正午前、后的误差采用线性关系进行补偿。线性补偿算法的计算公式为

$$\Delta\beta_m = 0.0075 \times \beta + 0.1, \quad (12)$$

$$\Delta\beta_a = -0.004 \times \beta + 0.1, \quad (13)$$

式中: $\Delta\beta_m$ 为早晨的误差补偿值; $\Delta\beta_a$ 为下午的误差补偿值; $\beta$ 为镜列实时跟踪角度值。

补偿后的跟踪误差曲线如图 12 所示。实际跟踪聚光效果如图 13 所示。误差分析见表 2。

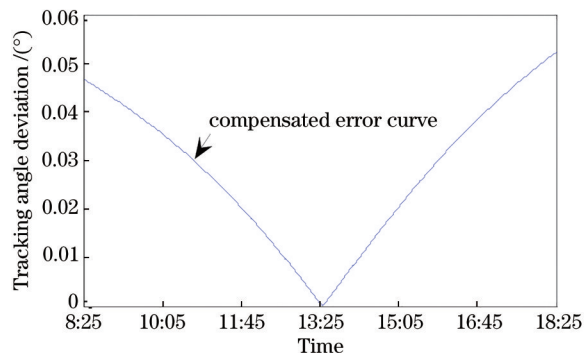


图 12 补偿后的实际跟踪角度偏差

Fig. 12 Actual tracking angle deviation after compensation

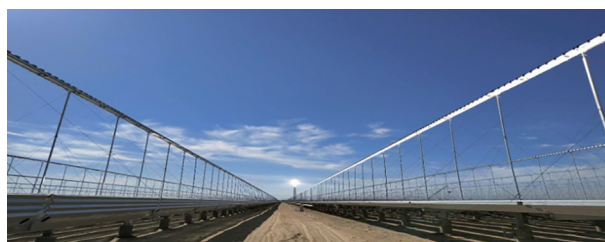


图 13 实际跟踪效果图

Fig. 13 Actual tracking renderings

表 2 补偿后理论与实测跟踪角度误差分析

Table 2 Theoretical and measured tracking angle error analysis after compensation

Item	Max (a. m.)	Max (p. m.)	Min	Max-min
Error / (°)	0.0472	0.0506	0	0.0506
Time	8:25	18:25	13:31	

## 5 结 论

通过对影响线性菲涅耳集热场一次反射镜跟踪精度主要因素进行定量分析可以得出,线性菲涅耳镜场布置的南北偏差引起的聚光偏差关于正午时刻呈正态分布且在全年时间轴和全天时间轴的影响都是最大的,误差的大小主要取决于南北偏差大小,并随着纬度的变化而变化;一次反射镜反射中心动态位移偏差对聚光精度的影响在早晨和傍晚时较大且早晨与下午非对称,最大误差接近 $0.08^{\circ}$ ;倾角传感因温度变化造成的精度误差主要体现在全年的时间轴上的误差,全年最大误差约为 $0.2^{\circ}$ ,以上几类误差影响因素是全局的、时变的;CPC水平安装误差带来的跟踪角度误差远大于垂直误差所引起的,该类误差影响因素是局部的、固定的。采用线性补偿算法对集热器一次反射镜目标跟踪角度进行补偿,补偿后集热系统的最大聚光误差小于 $0.06^{\circ}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Danish, Zhang B, Wang B, et al. Role of renewable energy and non-renewable energy consumption on EKC: evidence from Pakistan[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 855-864.
- [2] Bhuiyan M A, Jabeen M, Zaman K, et al. The impact of climate change and energy resources on biodiversity loss: evidence from a panel of selected Asian countries[J]. *Renewable Energy*, 2018, 117: 324-340.
- [3] Gozgor G, Lau C K M, Lu Z. Energy consumption and economic growth: new evidence from the OECD countries[J]. *Energy*, 2018, 153: 27-34.
- [4] Varun K, Arunachala U C, Elton D N. Trade-off between wire matrix and twisted tape: SOLTRACE® based indoor study of parabolic trough collector[J]. *Renewable Energy*, 2020, 156: 478-492.
- [5] Allouhi A, Benzakour Amine M, Saidur R, et al. Energy and exergy analyses of a parabolic trough collector operated with nanofluids for medium and high temperature applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 155: 201-217.
- [6] Qiu Y, He Y L, Wu M, et al. A comprehensive model for optical and thermal characterization of a linear Fresnel solar reflector with a trapezoidal cavity receiver[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 129-144.
- [7] Bellos E, Tzivanidis C. Multi-criteria evaluation of a nanofluid-based linear Fresnel solar collector[J]. *Solar Energy*, 2018, 163: 200-214.
- [8] Gåsvik K J, Robbersmyr K G, Vadseth T. Phase error analysis of clipped waveforms in surface topography measurement using projected fringes[J]. *Optics Communications*, 2021, 483: 126601.
- [9] Hofer A, Büchner D, Kramer K, et al. Comparison of two different (quasi-) dynamic testing methods for the performance evaluation of a linear Fresnel process heat collector[J]. *Energy Procedia*, 2015, 69: 84-95.
- [10] Wang C L, Ma J, Fan D W, et al. Simulation study of a CPC for linear Fresnel reflector system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 556-560  
王成龙, 马军, 范多旺, 等. 用于线性菲涅尔式聚光系统的 CPC 仿真研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 556-560.
- [11] Ma J, Xia R B. Analysis on shading and blocking of a linear Fresnel reflector based on ray tracing method[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2019, 38(4): 120-124.  
马军, 夏荣斌. 基于射线追踪法的线性菲涅尔聚光镜场阴影与遮挡分析[J]. *兰州交通大学学报*, 2019, 38(4): 120-124.
- [12] Du C X, Wang P, Ma C F, et al. A high accuracy algorithm for the calculation of solar position[J]. *Energy Engineering*, 2010(2): 41-44, 48.  
杜春旭, 王普, 马重芳, 等. 一种高精度太阳位置算法[J]. *能源工程*, 2010(2): 41-44, 48.
- [13] Grena R. An algorithm for the computation of the solar position[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(5): 462-470.
- [14] Ma J, Wang C L, Xia Y J. Compound parabolic collector for linear Fresnel reflector system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2542-2548.  
马军, 王成龙, 夏养君. 用于线性菲涅尔式聚光系统的复合抛物面聚光器[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(12): 2542-2548.
- [15] Reda I, Andreas A. Solar position algorithm for solar radiation applications[J]. *Solar Energy*, 2004, 76(5): 577-589.
- [16] Wang C L, Ma J, Fan D W. Arrangement and optimization of mirror field for linear Fresnel reflector system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 78-82.  
王成龙, 马军, 范多旺. 线性菲涅尔式聚光系统的镜场布置与优化[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 78-82.
- [17] Lee J D, Bhang K J, Lee J. Development of survey method using the sun's position information[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2013, 16(4): 418-426.
- [18] Grena R. An algorithm for the computation of the solar position[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(5): 462-470.
- [19] Du C X, Wang P, Ma C F, et al. Vector algorithm of tracking tilted angle of Fresnel concentrated solar power systems[J]. *Acta Energetica 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.
- [20] Yuan Y, Fu Y N, Cheng Z. A prediction method for ground-based stellar occultations by ellipsoidal solar system bodies and its application[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2017, 17(5): 045.
- [21] Zhang J, Huang J, Liang W, et al. A correction method of estimating the pointing error for reflector antenna[J]. *Shock and Vibration*, 2018, 2018: 1-12.