

塔式光热电站定日镜不同聚焦策略的影响分析

杜宇航, 刘向民, 王兴平, 蒋志浩

(上海发电设备成套设计研究院有限责任公司, 上海 200240)

摘 要: 以某 50 MW 塔式光热电站为仿真对象, 根据电站的主要仿真参数, 建立了光热电站定日镜场模型和圆柱形外露式吸热器模型。针对定日镜简单聚焦、交替偏移聚焦和正态分布聚焦 3 种不同聚焦策略, 选取典型气象年的气象数据, 采取光线追迹法, 通过计算得到在设计点工况、夏至日全天以及不同镜场布置条件下吸热器表面能流密度的分布情况, 比较分析了 3 种不同聚焦策略对吸热器安全性的影响。结果表明: 3 种聚焦策略中, 交替偏移聚焦策略较好地缓解了吸热器表面能流密度分布不均的现象, 具有较高的安全性。

关键词: 塔式光热电站; 定日镜; 聚焦策略; 能流密度

中图分类号: TK513

文献标志码: A

学科分类号: 480.60

Influence Analysis on Different Concentrating Strategies of Heliostats in a Tower Solar Thermal Power Station

DU Yuhang, LIU Xiangmin, WANG Xingping, JIANG Zhihao

(Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: Taking the 50 MW tower solar thermal power station as an object of simulation, a heliostat mirror field model and a cylindrical exposed receiver model were established according to the main simulation parameters of the station, based on which, the distribution of flux density on the surface of the receiver was calculated for the following three concentrating strategies of the heliostat, such as the simple, alternating offset and normal distribution concentrating strategy, using the data of typical meteorological years, by the method of ray tracing, under design point conditions, over the whole day of summer solstice, and in different layouts of heliostat field. Meanwhile, the influence of above three concentrating strategies on the safety of the receiver was analyzed. Results show that among the three concentrating strategies, the alternating offset concentrating way could effectively improve the distribution of flux density on the surface of the receiver, resulting in higher safety of the station.

Key words: tower solar thermal power station; heliostat; concentrating strategy; flux density

塔式光热电站通过定日镜场将太阳光反射到吸热器上, 将太阳光转化为传热介质的热能, 从而产生高温高压蒸汽, 驱动汽轮机发电^[1], 具有聚光比高、综合效率高、易于大规模发电等优势^[2], 因此受到国

内越来越多的关注和重视。国家能源局于 2016 年公布了 9 个中国首批塔式光热发电示范项目^[3], 总装机容量为 685 MW。目前, 德令哈 50 MW 和敦煌 100 MW 塔式光热电站已经完成并网发电, 其他示

收稿日期: 2019-08-26 修订日期: 2019-11-14

作者简介: 杜宇航(1996—), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 研究方向为太阳能热发电及电站性能优化技术。

电话(Tel.): 13263365065; E-mail: ctyduyuhang@speri.com.cn。

范项目也在建设过程中。对于塔式光热电站,由于太阳光的发散性以及太阳位置的变化,定日镜反射聚焦到吸热器表面的能流密度分布呈现出强烈的不均匀性,导致吸热器表面局部温度过高和温度梯度过大,影响吸热器的安全性^[4]。因此,必须分析不同聚焦策略对吸热器安全性的影响。

针对塔式光热电站定日镜场聚焦策略,国内外学者进行了深入研究。Besarati 等^[5]提出了一种基于遗传算法原理的优化聚焦策略,以求得吸热器表面最优的通量分布,但其优化结果受到聚焦目标点数量的限制。Astolfi 等^[6]针对外露式吸热器,提出镜场聚焦优化策略,但未考虑吸热器温度和材料的限制。黎韦偲等^[7]基于定日镜成像的二维高斯分布,通过多目标优化,得到了定日镜场聚焦策略的帕累托最优解,但未考虑吸热器的实际形状和三维位置。辛秋霞等^[8]结合贪婪算法和遗传算法提出了一种聚焦策略,但在镜场模型中忽略了阴影遮挡损失。

笔者基于国内某塔式光热电站,从设计点工况、夏至日全天和不同镜场布置3个方面比较分析了简单聚焦、交替偏移聚焦和正态分布聚焦3种不同聚焦策略对吸热器安全性的影响。

1 定日镜场聚光模型

1.1 太阳位置

地球的公转和自转造成太阳位置时刻在改变,导致投射到定日镜场的太阳法向直射辐照度实时变化,使得定日镜反射到吸热器表面的能量分布不均。太阳位置可通过太阳高度角 α_s 和方位角 γ_s 来表示,其计算公式^[9]为:

$$\alpha_s = 90^\circ - \arccos(\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi) \quad (1)$$

$$\gamma_s = \arccos\left(\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \cos \omega \sin \varphi}{\cos \alpha_s}\right) - 180^\circ \quad (2)$$

式中: φ 为计算点当地纬度,($^\circ$); δ 为太阳赤纬角,($^\circ$); ω 为太阳时角,($^\circ$)。

1.2 太阳圆盘

在精确的太阳-地球位置模型中,太阳张角^[10]约为 $32'$,如图1所示。照射到地球水平面上某一点的太阳直射辐射光线并不是一道平行光束,而是一道锥角为 9.3 mrad 的锥形光。

因为锥形光具有发散性,距离吸热塔较近的定日镜反射到吸热器表面的光斑偏小,而距离吸热塔较远的定日镜反射到吸热器表面的光斑偏大,导致吸热器表面的能量分布不均匀。

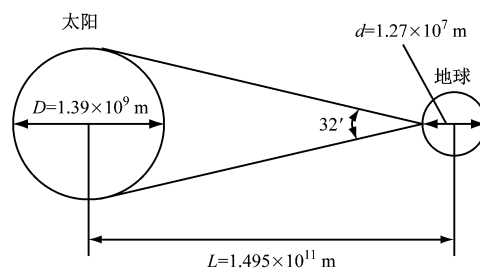


图1 太阳张角示意图

Fig.1 Schematic diagram of the solar angle

太阳法向直射辐照度 DNI(Direct Normal Incidence)是指在地球水平面上单位面积、单位时间内接收到的太阳辐射能量,其表达式^[11]为:

$$I = G_0 [a + b \times \exp(-c/\sin \alpha_s)] \quad (3)$$

$$a = 0.4237 - 0.00821(6 - H)^2 \quad (4)$$

$$b = 0.5055 + 0.00595(6.5 - H)^2 \quad (5)$$

$$c = 0.2711 + 0.01858(2.5 - H)^2 \quad (6)$$

式中: I 为太阳法向直射辐照度; H 为当地海拔高度,km; G_0 为太阳常数,其值为 1366 W/m^2 。

1.3 光线追迹法

光线追迹法是在光热电站聚光过程中常用的一种数学仿真方法,即通过模拟跟踪光线从太阳产生到反射到吸热器表面的全过程,来进行分析计算。

首先,建立定日镜场坐标系,如图2所示。

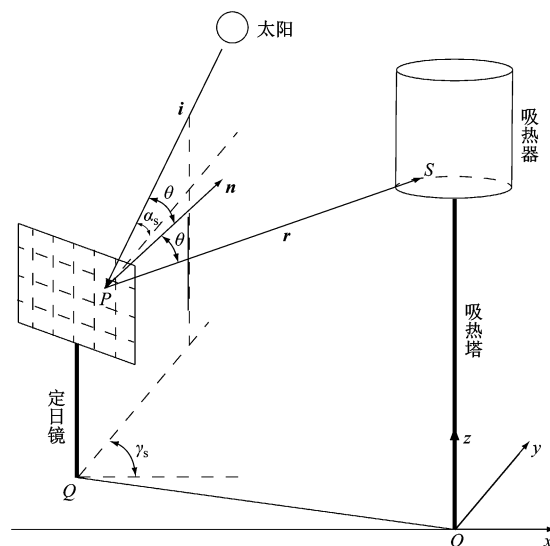


图2 光线追迹法示意图

Fig.2 Schematic diagram of the ray tracing method

以定日镜上 P 点为例,根据太阳位置,计算太阳入射光线,其方向向量可表示为:

$$i = (\cos \alpha_s \cos \gamma_s, \cos \alpha_s \sin \gamma_s, \sin \alpha_s) \quad (7)$$

根据反射定律:

$$i + r = 2 \cdot n \cdot \cos \theta \quad (8)$$

式中: i 为太阳入射光线方向向量; r 为太阳反射光线方向向量; n 为定日镜镜面的法向量; θ 为入射

角或者反射角, ($^{\circ}$)。

求出反射光线的方向向量, 从而求出反射光线的直线方程式:

$$\frac{x-P(x)}{r(x)} = \frac{y-P(y)}{r(y)} = \frac{z-P(z)}{r(z)} \quad (9)$$

统计追迹反射光线和吸热器表面的交点数目 N_j , 吸热器表面的能流密度 F_{lux} 计算公式如下:

$$F_{\text{lux}} = \sum_{N_j} \frac{I(t) \cdot S_{\text{heliostat}} \cdot \eta_{\text{heliostat}}}{S_j \cdot N_{\text{tr}}} \quad (10)$$

式中: $S_{\text{heliostat}}$ 为定日镜的镜面面积, m^2 ; $\eta_{\text{heliostat}}$ 为定日镜的效率, %; S_j 为吸热器表面计算区域的面积, m^2 ; N_{tr} 为总的光线追迹数。

2 聚焦策略

2.1 简单聚焦策略

简单聚焦策略是将定日镜反射光斑简单地定位于吸热器垂直高度的中心位置, 如图 3 所示。

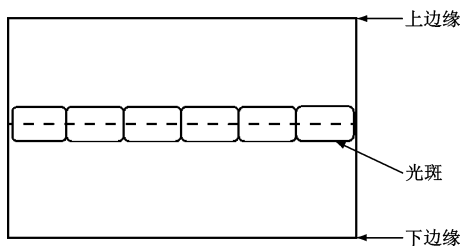


图 3 简单聚焦策略

Fig. 3 Schematic diagram of the simple concentrating strategy

2.2 交替偏移聚焦策略

交替偏移聚焦策略(见图 4)是基于定日镜反射光斑的垂直高度, 将其聚焦点交替定位在偏移吸热器上边缘和下边缘一定距离的位置。

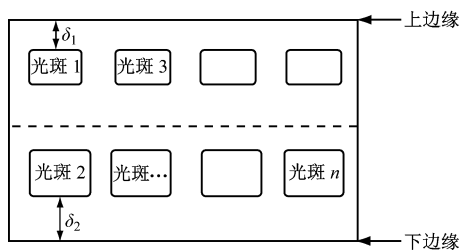


图 4 交替偏移聚焦策略

Fig. 4 Schematic diagram of the alternating offset concentrating strategy

2.3 正态分布聚焦策略

正态分布聚焦策略(见图 5)是根据正态分布曲线或公式来确定定日镜反射光斑的位置。

3 仿真与分析

3.1 塔式光热电站模型

笔者以某 50 MW 塔式光热电站为例, 选取典

型气象年的气象数据进行计算, 以该地区夏至日的太阳时 12 时为设计点, 电站的主要仿真参数见表 1^[12]。

基于电站的主要参数, 生成塔式光热电站定日镜场的布置模型, 如图 6 所示。

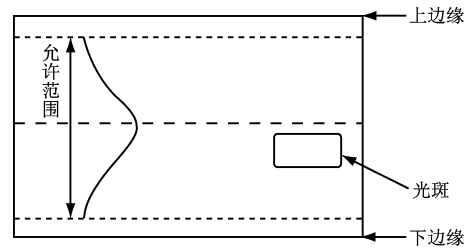


图 5 正态分布聚焦策略

Fig. 5 Schematic diagram of the normal distribution concentrating strategy

表 1 电站的主要仿真参数

参数	数值
位置	北纬 37.36° 东经 97.27°
设计点额定功率/MW	50
设计点 $I/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	900
定日镜长度/m	4
定日镜宽度/m	5
吸热塔高度/m	200
吸热器高度/m	15
吸热器直径/m	12

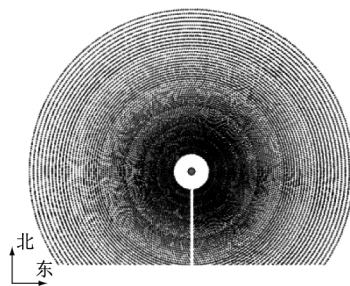


图 6 定日镜场分布图

Fig. 6 Distribution map of the heliostat field

本模型采用直径 12 m、高度 15 m 的圆柱形外露式吸热器, 其由 32 片吸热屏构成, 每片吸热屏由 70 根竖直排列的金属吸热管(内径 2.1 cm、壁厚 1.2 mm)焊接而成, 在吸热管的外壁涂覆选择性吸收涂层, 吸热屏圆环形布置形成暴露在周围环境中的一个圆柱体, 接收来自吸热塔周围 360° 范围内经过定日镜反射、聚焦的太阳光, 太阳辐射汇聚产生的热量通过导热和对流的方式传递给管内流动的传热介质(如水、熔融盐等), 传热介质温度一般在 100~600 $^{\circ}\text{C}$ 。圆柱形外露式吸热器结构如图 7 所示。

3.2 设计点能流密度

基于该塔式光热电站模型, 不考虑风速、环境温

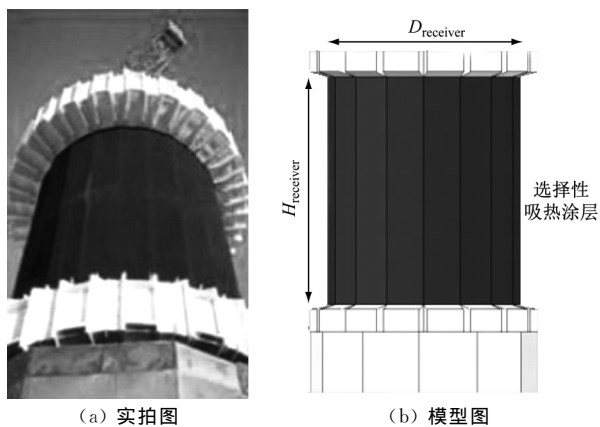


图7 圆柱形外露式吸热器结构图

Fig. 7 Structure of the cylindrical exposed receiver

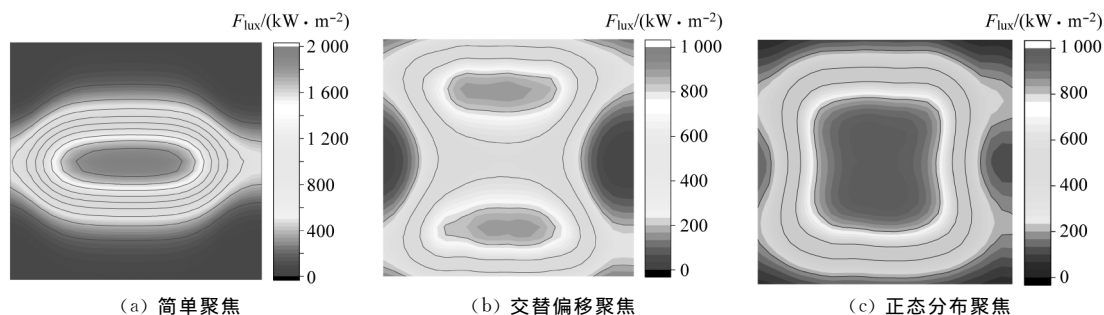


图8 不同聚焦策略下吸热器表面的能流密度分布

Fig. 8 Flux density distribution on the surface of the receiver under different concentrating strategies

表2 不同聚焦策略下吸热器的性能指标

Tab. 2 Performance index of the receiver under different concentrating strategies

性能指标	聚焦策略		
	简单聚焦	交替偏移聚焦	正态分布聚焦
拦截因子/%	95.38	94.24	91.65
镜场效率/%	70.50	69.69	67.78
光热效率/%	66.09	65.51	63.71
最小能流密度/ (kW·m ⁻²)	0.79	5.96	37.23
最大能流密度/ (kW·m ⁻²)	1 980.88	997.82	899.21
平均能流密度/ (kW·m ⁻²)	682.58	557.60	474.83

kW/m²,最小能流密度仅为 0.79 kW/m²,会产生相当严重的局部过热和分布不均的现象,威胁吸热器的安全运行。

交替偏移聚焦策略将光斑分别从吸热器的上、下边缘同时进行交替偏移聚焦,光斑没有集中聚集在吸热器中线位置,在吸热器表面形成了分别位于吸热器表面上部和下部的“双峰”状能流密度分布,其峰值能流密度降低为 997.82 kW/m²,在吸热器

度及压力等因素的影响,利用光线追迹法,计算简单聚焦、交替偏移聚焦和正态分布聚焦 3 种不同聚焦策略下吸热器表面的能流密度分布,评估对吸热器安全性的影响。3 种不同聚焦策略下吸热器表面的能流密度分布如图 8 所示,吸热器的部分性能指标见表 2。

由图 8 可知,简单聚焦、交替偏移聚焦和正态分布聚焦 3 种聚焦策略在将太阳能转化为热能的过程中都导致了吸热器表面能流密度分布不均。

简单聚焦策略将定日镜反射光斑简单地聚焦在吸热器垂直高度的中线处,导致吸热器表面能流密度呈“条带”状分布。其最大能流密度高达 1 980.88

允许的能流密度范围内。

正态分布聚焦策略使得反射光斑聚焦点在允许范围内呈正态分布,其能流密度分布也具有正态分布趋势,吸热器中心位置达到最大能流密度 899.21 W/m²,但正态分布聚焦策略的光热效率相比交替偏移聚焦明显下降。

与简单聚焦策略相比,交替偏移聚焦策略从吸热器上、下边缘开始偏移,聚焦点多分布在吸热器的上、下两部分;正态分布聚焦策略从吸热器垂直高度的中线开始偏移,聚焦点多分布在具有较大可信度的置信区间内,即吸热器垂直高度中线附近。从而 2 种聚焦策略分散了聚焦点的集中程度,使得聚焦面积增大,能流密度降低;另一方面,在聚焦的偏移过程中,部分光斑未能被吸热器完全地拦截吸收,拦截因子有所减小,导致能流密度降低。

3.3 夏至日全天能流密度的变化

选取夏至日当地标准时间 6~20 时为仿真时间,计算 3 种不同聚焦策略下,吸热器表面能流密度随时间的变化,结果如图 9 所示。

选取夏至日当地标准时间上午 8 时、中午 12 时、下午 16 时 3 个时刻,在 3 种不同聚焦策略下,吸热器表面能流密度的分布如图 10 所示。

根据 3 个时刻下吸热器表面能流密度分布可

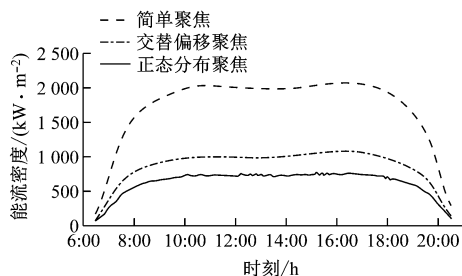


图 9 夏至日 6~20 时能流密度的变化

Fig. 9 Changes of flux density from 6:00 to 20:00 on the summer solstice

知,在 3 种聚焦策略下,随着太阳位置由东到西变化,吸热器表面能流密度的峰值位置由西向东移动,但能流密度分布具有与设计点相似的分趋势。

随着时间接近正午,太阳法向直射辐照度增大,吸热器表面具有较高能流密度分布的区域面积扩大,吸热器获得较多的能量;而后随着日落时间的邻近,吸热器表面能流密度较高区域的面积开始缩小,获得的热量开始减少。

简单聚焦策略使得吸热器从上午 7 点就处于超

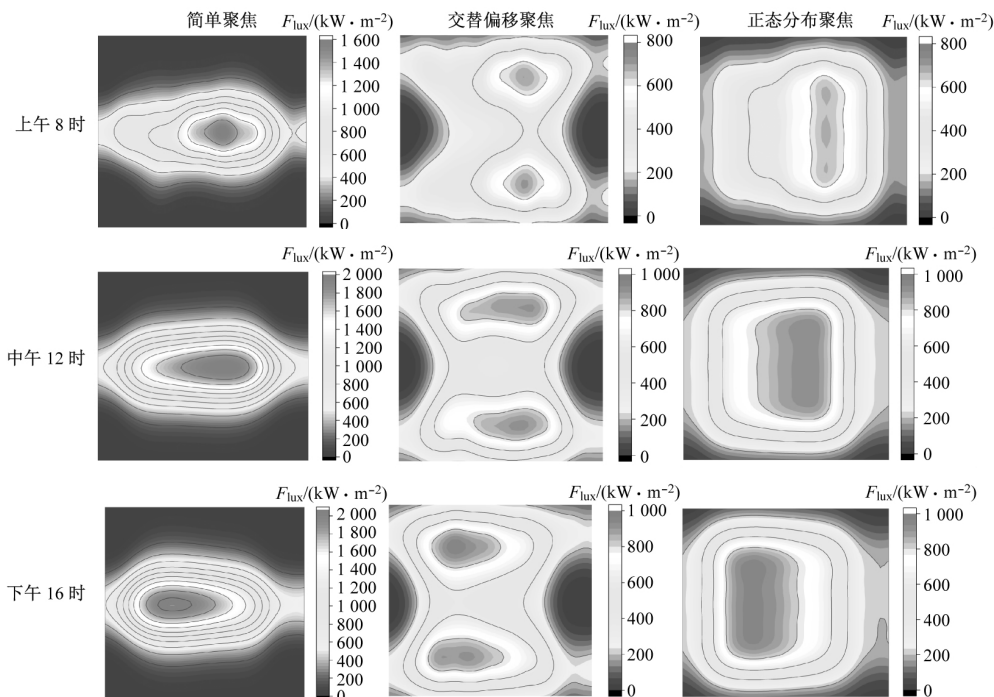


图 10 3 个不同时刻、不同聚焦策略下吸热器表面能流密度的分布

Fig. 10 Distribution map of flux density on the surface of the receiver under different concentrating strategies at three different moments

温运行状态,对吸热器的安全运行和使用寿命造成极大危害。

交替偏移聚焦策略不仅将吸热器表面最大能流密度降低到安全运行范围,而且能够保证最大能流密度在主要工作时间(8~18 时)的稳定性,有利于吸热器的安全高效运行。

正态分布聚焦策略有效地降低了吸热器表面的最大能流密度,但是由于聚焦点的分布受到正态分布统计采样随机性的影响,其最大能流密度呈现锯齿状波动。

与简单聚焦策略相比,交替偏移聚焦策略和正态分布聚焦策略在一天当中太阳位置及 D_{NI} 随时间不断变化的情况下,有效地缓解了吸热器表面能流密度分布不均的现象,保证吸热器在安全允许范围内运行。

3.4 不同镜场布置对聚焦策略的影响

基于表 1 所示 50 MW 塔式光热电站的仿真数

据,选取典型气象年的气象数据进行计算,以该地区夏至日的某时刻为设计点,生成新的定日镜场布置模型,如图 11 所示。计算在新的镜场布置下,简单聚焦、交替偏移聚焦和正态分布聚焦 3 种不同聚焦策略下吸热器表面能流密度的分布。

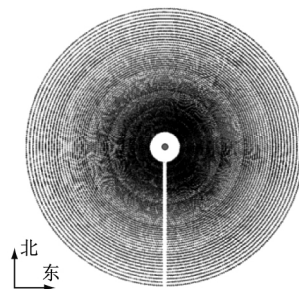


图 11 新的定日镜场分布图

Fig. 11 Distribution map of the new heliostat field

3 种聚焦策略下,吸热器表面的能流密度分布如图 12 所示。

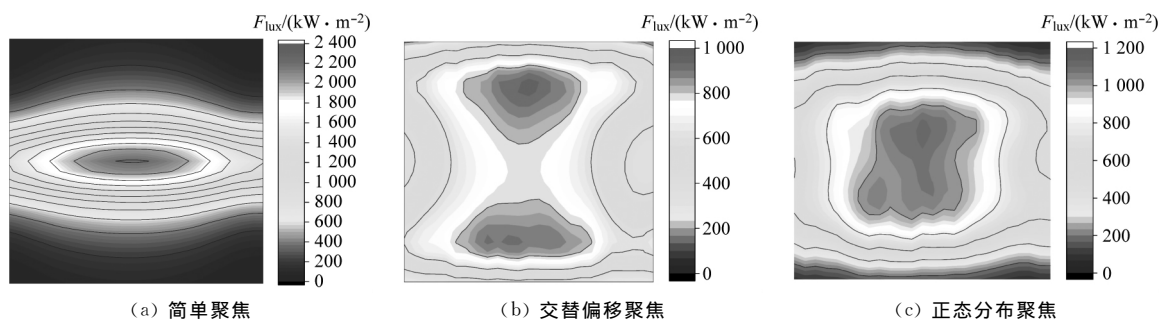


图12 新的定日镜场布置下不同聚焦策略下吸热器表面能流密度的分布

Fig. 12 Flux density distribution on the surface of the receiver under different concentrating strategies in the new heliostat field

在新的定日镜场布置模型中,镜场下部距离吸热塔较远的定日镜数目增多,导致具有较大面积的光斑数目增多。

与之前镜场布置模型下的吸热器能流密度分布相比,简单聚焦策略聚焦到吸热器上的光斑面积向吸热器上、下边缘扩大,形成的“条带”状分布宽度有增加的趋势,能流密度显著上升;交替偏移聚焦的光斑向吸热器垂直高度中线处偏移,“双峰”也向吸热器中心汇聚,“双峰”之间的能流密度有所升高;正态分布聚焦的光斑允许范围扩大,能流密度分布向着吸热器的上、下边缘逼近。在镜场布置改变时,3种聚焦策略均通过不同方式来增大反射光斑分布的面积,试图降低吸热器表面的能流密度。3种聚焦策略下能流密度分布的形状没有根本变化,只是能流密度分布区域面积大小的变化。

与简单聚焦策略相比,交替偏移聚焦和正态分布聚焦策略仍然能够缓解吸热器表面能流密度分布不均的现象。交替偏移聚焦策略的能流密度仍分布在吸热器安全允许范围内,具有较好的稳定性。对于正态分布聚焦,与交替偏移聚焦相比,其能流密度上升较高。

因此,当镜场布置发生变化时,交替偏移聚焦策略仍然能够较好地缓解吸热器表面能流密度分布不均的现象。

4 结 语

(1) 与简单聚焦相比,交替偏移聚焦和正态分布聚焦均降低了吸热器表面能流密度。

(2) 在设计点工况下,正态分布聚焦的光热效率相比交替偏移聚焦有所下降。

(3) 在全天工作时间内,正态分布聚焦下吸热器最大能流密度具有一定的波动性。

(4) 针对不同的镜场布置,交替偏移聚焦具有较好的稳定性。

(5) 交替偏移聚焦策略是一种值得推荐的定日

镜聚焦策略,有助于吸热器安全高效地运行。

参考文献:

- [1] ISLAM T, HUDA N, ABDULLAH A B, et al. A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: current status and research trends[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91: 987-1018.
- [2] LOVEGROVE K, STEIN W. Concentrating solar power technology: principles, developments and applications [M]. Amsterdam, Holland: Elsevier, 2012.
- [3] 王婷, 庞力平, 杨勇平. 两段式塔式太阳能腔式吸热器设计及性能分析[J]. *动力工程学报*, 2017, 37(4): 313-320.
WANG Ting, PANG Liping, YANG Yongping. Design and performance analysis of a two-stage tower-type solar cavity receiver[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2017, 37(4): 313-320.
- [4] 何雅玲, 王坤, 杜保存, 等. 聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展[J]. *科学通报*, 2016, 61(30): 3208-3237.
HE Yaling, WANG Kun, DU Baocun, et al. Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: a review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(30): 3208-3237.
- [5] BESARATI S M, GOSWAMI D Y, STEFANAKOS E K. Optimal heliostat aiming strategy for uniform distribution of heat flux on the receiver of a solar power tower plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 84: 234-243.
- [6] ASTOLFI M, BINOTTI M, MAZZOLA S, et al. Heliostat aiming point optimization for external tower receiver[J]. *Solar Energy*, 2017, 157: 1114-1129.
- [7] 黎韦偲, 马纪明. 塔式太阳能电站定日镜场的聚焦策略研究[J]. *可再生能源*, 2016, 34(4): 475-480.
LI Weicai, MA Jiming. Researches and simulation on

- heliostat concentrating strategy in solar power tower system[J]. **Renewable Energy Resources**, 2016, 34(4): 475-480.
- [8] 辛秋霞, 卞新高, 杨缝缝. 塔式太阳能热发电系统镜场调度方法的研究[J]. **太阳能学报**, 2010, 31(3): 317-322.
- XIN Qiuxia, BIAN Xingao, YANG Fengfeng. Research on dispatching heliostats in solar power tower plant[J]. **Acta Energiæ Solaris Sinica**, 2010, 31(3): 317-322.
- [9] WANG Zhifeng. Chapter 2-the solar resource and meteorological parameters[M]//**Design of Solar Thermal Power Plants**. Pittsburgh, USA: Academic Press, 2019: 47-115.
- [10] BUIE D, MONGER A G, DEY C J. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations[J]. **Solar Energy**, 2003, 74(2): 113-122.
- [11] 陈将. 塔式太阳能热电系统的聚光仿真与聚焦策略优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [12] CSP Focus 光略咨询. 中控德令哈 50 MW 熔盐塔式光热发电项目[C]//第八届光热发电中国聚焦大会. 北京: CSP Focus 光热发电聚焦, 2019.

(上接第 418 页)

- GAO Xiang, LIU Haijiao, TENG Bin, et al. Experimental study of semi-dry flue gas desulfurization in circulating suspension fluidized bed[J]. **Journal of Power Engineering**, 2006, 26(5): 720-725.
- [10] PAPADAKIS S E, KING C J. Air temperature and humidity profiles in spray drying. 2. experimental measurements[J]. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 1988, 27(11): 2116-2123.
- [11] SCALA F, LANCIA A, NIGRO R, et al. Spray-dry desulfurization of flue gas from heavy oil combustion [J]. **Journal of the Air & Waste Management Association**, 2005, 55(1): 20-29.
- [12] 陈建中. 焦炉烟气 SDA 脱硫与烧结烟气脱硝前混合再热特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [13] RUHLAND F, KIND R, WEISS S. The kinetics of the absorption of sulfur dioxide in calcium hydroxide suspensions[J]. **Chemical Engineering Science**, 1991, 46(4): 939-947.
- [14] 王乃华, 骆仲决, 岑可法. 布袋除尘器脱硫特性试验及机理研究[J]. **热能动力工程**, 2003, 18(4): 361-364.
- WANG Naihua, LUO Zhongyang, CEN Kefa. Tests on the desulfurization characteristics of a bag-type dust collector and related mechanism investigation [J]. **Journal of Engineering for Thermal Energy and Power**, 2003, 18(4): 361-364.

(上接第 425 页)

- [13] 骆仲决, 方梦祥, 李明远, 等. 二氧化碳捕集、封存和利用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 98-99.
- [14] 凌凡, 张忠孝, 樊俊杰, 等. 膜分离法、化学吸收法以及联合法分离 CO_2/CH_4 试验比较[J]. **动力工程学报**, 2015, 35(3): 245-250.
- LING Fan, ZHANG Zhongxiao, FAN Junjie, et al. Experimental study on CO_2/CH_4 separation respectively by membrane, chemical and the combined method[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2015, 35(3): 245-250.
- [15] 陈勇, 王从厚, 吴鸣. 气体膜分离技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 30-35.
- [16] KIM S H, KIM J K, YEO J G, et al. Comparative feasibility study of CO_2 capture in hollow fiber membrane processes based on process models and heat exchanger analysis[J]. **Chemical Engineering Research and Design**, 2017, 117: 659-669.