

塔式太阳能电站定日镜瞄准策略优化方法

田英杰 魏秀东 张全胜 张亚南 余强

Optimal design of aiming strategy for solar power tower stations

TIAN Ying-jie, WEI Xiu-dong, ZHANG Quan-sheng, ZHANG Ya-nan, YU Qiang

引用本文:

田英杰, 魏秀东, 张全胜, 张亚南, 余强. 塔式太阳能电站定日镜瞄准策略优化方法[J]. *中国光学*, 2026, 19(2): 1-9. doi: 10.37188/CO.2025-0128

TIAN Ying-jie, WEI Xiu-dong, ZHANG Quan-sheng, ZHANG Ya-nan, YU Qiang. Optimal design of aiming strategy for solar power tower stations[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(2): 1-9. doi: 10.37188/CO.2025-0128

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

融合遗传算法和BP神经网络的光斑定位方法

Positioning algorithm for laser spot center based on BP neural network and genetic algorithm

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 407 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0084>

同时测试波导传输损耗和弯曲损耗的方法

Method for the simultaneous measurement of waveguide propagation loss and bending loss

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1177 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0027>

基于机器视觉的正碰假人胸部的研究

Design and simulation of the dummy thoracic finite element model based on machine vision

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 673 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0005>

星载二维转台U型架结构轻量化与优化设计

Lightweight and optimized U-frame design for space-borne two-dimensional turntable

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 896 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0227>

基于摄影测量的定日镜面形误差检测方法研究

The measurement method of heliostat surface shape error based on photogrammetry

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 425 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0210>

基于双观测器的拼接弧线电机改进积分滑模控制策略

Improved integral sliding mode control strategy for the segmented arc permanent magnet synchronous motor based on dual observer

中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 105 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0085>

文章编号 2097-1842(2026)02-0001-09

塔式太阳能电站定日镜瞄准策略优化方法

田英杰¹, 魏秀东^{1*}, 张全胜¹, 张亚南², 余强³
(1. 长春理工大学空间光电技术研究所, 长春 130022;
2. 中国广核新能源控股有限公司, 北京 100070;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了使吸热器表面能流呈均匀分布, 提出了一种塔式太阳能电站定日镜瞄准策略优化方法。首先, 基于全场定日镜瞬时光学效率的计算结果对镜场进行分区, 对不同分区的定日镜设计不同的瞄准因子; 然后, 根据瞄准因子计算定日镜的光斑尺寸, 通过光斑尺寸与吸热器尺寸比值确定光斑相对大小, 并规划瞄准点分布; 最后, 利用遗传算法优化定日镜瞄准点分布, 实现吸热器表面均匀的能流分布。以百兆瓦级塔式光热电站为例, 对定日镜瞄准策略进行优化, 在典型日中春分日条件下吸热器表面能流密度峰值由赤道瞄准的 1.94 MW/m^2 降低到 1.01 MW/m^2 , 均匀性提高 53.29%, 截断因子仅减小 0.86%, 在保证截断效率的同时确保了吸热器的高效安全运行。

关键词: 塔式太阳能电站; 光学效率; 瞄准策略; 遗传算法

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0128 CSTR: 32171.14.CO.2025-0128

Optimal design of aiming strategy for solar power tower stations

TIAN Ying-jie¹, WEI Xiu-dong^{1*}, ZHANG Quan-sheng¹, ZHANG Ya-nan², YU Qiang³

(1. Institute of Space Optoelectronics, Changchun University of Science and Technology,

Changchun 130022, China;

2. China General Nuclear Power New Energy Holdings Co., Ltd., Beijing 100070, China;

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

* Corresponding author, E-mail: weixiudong211@163.com

Abstract: To achieve uniform heat flux distribution on the receiver surface, an optimization method for heliostat aiming strategy in solar power tower station is proposed. First, the heliostat field is divided into zones based on the calculated instantaneous optical efficiency of heliostats throughout the entire field, and different aiming factors designed for heliostats in different zones. Then, the spot size of each heliostat is calculated according to the aiming factor, and the relative spot size is determined by the ratio of spot size to receiver size, thereby planning the aiming point distribution. Finally, a genetic algorithm is employed to optimize the heliostat aiming point distribution, achieving uniform heat flux distribution on the receiver surface. Taking a hundred-megawatt-scale solar power tower station as an example, the heliostat aiming strategy is optimized. Un-

收稿日期: 2025-10-09; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(No. 52376219)

Supported by National Natural Science Foundation of China General Program (No. 52376219)

der typical spring equinox conditions, the peak heat flux density on the receiver surface is reduced from 1.94 MW/m² with equatorial aiming to 1.01 MW/m², improving uniformity by 53.29% while reducing the spillage factor by 0.86%. This ensures efficient and safe operation of the receiver while maintaining high interception efficiency.

Key words: solar power tower station; optical efficiency; aiming strategy; genetic algorithm

1 引言

太阳能热发电技术作为一种可再生能源利用技术,近年来得到了快速发展^[1-2]。塔式太阳能热发电技术是一种规模化的太阳能热发电技术,它是利用定日镜场将太阳辐射集中到位于塔顶部的圆柱形吸热器上,将辐射能转化为吸热流质的热能,再利用热能推动汽轮机发电^[3-4]。在电站运行过程中,每个定日镜均跟踪太阳运转,并将太阳辐射投射到吸热器上。定日镜在吸热器上的投射位置分布,决定了镜场的截断效率和吸热器表面的能流分布。镜场的截断效率定义为吸热器表面接收的辐射能与定日镜场反射的辐射能之比。当所有定日镜均瞄准圆柱形吸热器赤道位置时,镜场可以获得最大的截断效率,但会导致吸热器表面局部峰值能流过高,温度梯度过大,管道热应力变大,对吸热器的安全运行造成严重影响^[5-6]。因此,优化定日镜场瞄准策略,以降低峰值能流并获得更加均匀的能流分布,同时尽量减少截断效率损失,对电站安全高效运行具有重要意义^[7-8]。

在多目标瞄准策略研究方面,Vant-Hull^[9]提出了根据定日镜的反射光斑半径的大小,确定定日镜瞄准点的位置,确保定日镜光斑边缘与吸热器边缘相切,以产生对称的能流分布。但该方法在吸热器赤道上下方形成两个明显峰值,峰值能流从 2.04 MW/m² 降至 1.08 MW/m²,能流分布不均匀问题仍然存在。Sanchez-Gonzalez^[10-11]在 Vant-Hull 瞄准策略基础上,设置吸热器的最大允许通量密度,根据吸热器吸热板将定日镜场划分为不同扇区,确定每个扇区能流分布最均匀的瞄准因子,使峰值能流降低了 23%。但是以避免能流双峰分布为准则逐扇区寻找最佳瞄准因子的方法,明显对于相邻扇区间能流分布的连续性考虑不足,且缺少对能流分布均匀性指标的优化。Francisco J.^[12]分析整个镜场使用单一瞄准因子作为

参数的弊端,提出了双参数瞄准策略,基于 7400 面定日镜,150 MW 装机容量的 Noor III 型电站,根据镜场的布局,将其分为两个区域,远塔区域和近塔区域,两区域分别使用不同瞄准因子,实现了能流分布均匀化。但相对理想赤道瞄准的截断效率,仍有 1.14% 的损失,并未对定日镜瞄准点做精细化处理,在低能流区域均匀化效果不理想。

本文针对现有瞄准策略存在的问题,提出了一种优化方法,根据镜场布局计算定日镜瞬时光学效率,据此进行分区设计,高效率区域定日镜采用高自由度的瞄准策略,平衡能流分布中可能出现的峰值问题,提高吸热器能流分布的均匀性;对于低效率区域定日镜,将其瞄准点规划在吸热器赤道附近,提高镜场整体截断效率。

基于不同镜场区域设计不同的瞄准因子,而瞄准因子会影响光斑尺寸,通过光斑尺寸与吸热器尺寸比值确定光斑相对大小,规划定日镜瞄准点分布,从而有效控制瞄准点设计的自由度。结合遗传算法以能流分布均匀性为目标函数进行全局优化,寻找最优定日镜瞄准点分布,实现吸热器表面均匀的能流分布。以百兆瓦级塔式光热电站为例,对定日镜瞄准策略进行优化,优化结果表明,该方法可以有效降低峰值能流,提高均匀性,合理控制镜场的截断效率。

2 理论模型

2.1 圆柱形吸热器表面能流分布计算模型

如图 1 所示,圆柱形吸热器表面上任意一点的坐标可以表示为 (x_c, h) , x_c 为一个圆周弧,以北方向为原点,逆时针为正。定日镜方位角 φ ,以南方向为原点,顺时针方向为正,因此可以用 θ 表示 x_c 的方位角。 h 是竖直方向的坐标,原点在吸热器中心处,向上为正, R_r 表示圆柱形吸热器的半径, H_r 表示吸热器的高度^[13]。沿着反射光线 t ,像平面上一点 (x, y) 在圆柱表面上的投影点为 (x_c, h) 。

蔽,导致目标定日镜无法接收到完整太阳辐射而产生的能量损耗。挡光损失指定日镜反射的太阳光到吸热器过程中,被周围定日镜阻挡,未能成功到达吸热器表面所产生的能量损失。因此把定日镜未被阴影和挡光的镜面面积与镜面面积之比称为阴影挡光效率。

在计算阴影挡光效率之前,需要判断哪些定日镜存在阴影或挡光,如图 2 所示, p 表示目标定日镜中心 H_o 到阴影或挡光定日镜中心 H_s 的向量, s 表示太阳方向向量, t 表示反射光线向量,则存在阴影的条件是: $\cos\lambda_s > 0$, 存在挡光的条件是: $\cos\lambda_b > 0$ 。

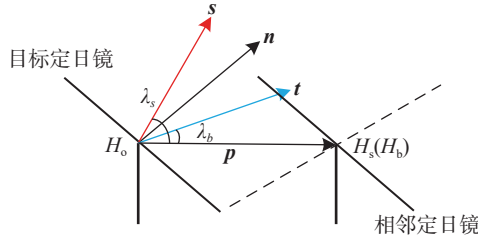


图 2 定日镜存在阴影挡光的条件

Fig. 2 Conditions under which a heliostat experience shading or light blocking

本文采用向量法计算阴影和挡光定日镜中心点在目标定日镜上的投影点坐标。将阴影挡光定日镜中心点投影到目标定日镜坐标系中,并根据定日镜几何投影轮廓计算在目标定日镜上的投影面积 N_{bs} , 从而得到阴影挡光效率公式:

$$\eta_{bs} = 1 - \frac{N_{bs}}{N_h}, \quad (12)$$

式中: N_h 为定日镜面积

2.2.4 截断效率

截断效率为定日镜反射到吸热器的太阳能量与反射光线总能量的比值。定日镜的截断效率可由式 (13) 计算:

$$\eta_{int} = \frac{1}{2\pi\sigma_{tot}^2} \int_{y_{min}}^{y_{max}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_{tot}^2}\right) dx dy, \quad (13)$$

式中: x, y 为吸热器的平面坐标。

3 瞄准策略优化方法

3.1 瞄准因子

多目标瞄准策略需要将定日镜瞄准点从吸热

器赤道位置沿垂直方向进行偏移, Vant-Hull 提出偏移量取决于定日镜反射到吸热器的光斑半径。定日镜在像平面上的光斑能流分布近似服从二维高斯分布,通过瞄准因子 K (其取值范围在 0 到 3 之间) 乘以光斑有效标准差,对光斑半径进行估算。

因此,在定日镜像面处的光斑半径计算公式为:

$$BR_{image} = SLR \cdot K \cdot \sigma_e, \quad (14)$$

式中 BR_{image} 为反射光束在像面上的半径。对于圆柱形吸热器,投影到吸热器表面的光斑半径计算公式如下:

$$BR_k = \frac{BR_{image}}{\sin\Psi} = \frac{SLR \cdot K \cdot \sigma_e}{\sin\Psi}, \quad (15)$$

式中: BR_k 为圆柱形吸热器表面的光束半径; K 为瞄准因子; σ_e 为光斑的有效标准差。

有效标准差 σ_e 是太阳形状标准差 σ_{sun} 、镜面坡度标准差 σ_{slp} 和跟踪误差标准差 σ_{trk} 的卷积^[9], 计算公式如下:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{sun}^2 + 2(1 + \cos\omega)\sigma_{slp}^2 + \sigma_{trk}^2}, \quad (16)$$

式中: σ_{sun} 为太阳形状标准差; σ_{slp} 为镜面坡度标准差; σ_{trk} 为跟踪误差标准差, ω 为定日镜入射角。

对于正态分布的光斑, 99.7% 的定日镜反射能流位于 $3\sigma_e$ 张角范围内, 95% 位于 $2\sigma_e$ 范围内, 68% 位于 σ_e 范围内。由式 (15) 可得, K 值越大, 光斑半径越大, 光斑溢出吸热器边界的能量增加, 导致溢散损失增大。

3.2 溢散损失

溢散损失是指定日镜反射的太阳能量中, 未能被吸热器拦截而损失的部分, 是影响系统光热转换效率的关键因素。为了量化溢散损失, 引入截断因子 f_{int} , 其定义为定日镜反射的太阳能量与吸热器实际拦截的能量比; 若吸热器网格中心点坐标中每个中心点的聚光比 $C_{i,j,p}$, 则截断因子计算公式为^[15]:

$$f_{int} = \frac{\sum_{i,j,p} C_{i,j,p} \cdot Ae}{\cos I_s \cdot AM}, \quad (17)$$

式中: Ae 为吸热器网格中单元的面积; AM 为定日镜的镜面面积。

3.3 定日镜场分区策略

在大规模定日镜场中, 不同位置定日镜的光学性能差异巨大, 低效率定日镜由于大气衰减和余弦效率损失较大, 单镜能流贡献较低, 需要优先保证截断效率; 中高效率定日镜贡献的能流较高, 单镜能流密度高, 是造成吸热器表面局部过热的主要来源, 因此中高效率定日镜是瞄准优化的重点。

定日镜的光学效率综合反映了其对吸热器能流贡献的能力。通过对全场定日镜光学效率的统计分析, 本文选择 0.4 和 0.7 作为分区阈值, 将镜场划分为三个区域: 低效率区 ($\eta < 0.4$), 中效率区 ($0.4 \leq \eta < 0.7$) 和高效率区 ($0.7 \leq \eta$)。低效率区域定日镜对峰值能流贡献小, 其容易产生溢散, 策略

$$z_R = \begin{cases} [0] & \lambda_{\text{beam}} > 2 \\ \left[\frac{H_r}{2} \times 0.3, 0, -\frac{H_r}{2} \times 0.3 \right] & 1 < \lambda_{\text{beam}} \leq 2 \\ \left[\left(\frac{H_r}{2} - BR \right), \left(\frac{H_r}{2} - BR \right) \times 0.6, 0, -\left(\frac{H_r}{2} - BR \right) \times 0.6, -\left(\frac{H_r}{2} - BR \right) \right] & 0.6 < \lambda_{\text{beam}} \leq 1 \\ \left[\left(\frac{H_r}{2} - BR \right), \left(\frac{H_r}{2} - BR \right) \times 0.8, 0, -\left(\frac{H_r}{2} - BR \right) \times 0.8, -\left(\frac{H_r}{2} - BR \right) \right] & \lambda_{\text{beam}} \leq 0.6 \end{cases}, \quad (19)$$

根据 λ_{beam} 的取值范围, 设计分层瞄准策略:

(1) 当 $\lambda_{\text{beam}} > 2$ 时, 光斑直径超过吸热器高度的 2 倍, 采用赤道瞄准使截断效率达到最大值;

(2) 当 $1 < \lambda_{\text{beam}} \leq 2$ 时, 选择偏移系数为 0.3, 能够显著降低奇偶瞄准产生的“双峰现象”, 同时不会造成光斑的过度溢出;

(3) 当 $\lambda_{\text{beam}} \leq 1$ 时, 利用更多瞄准点提供的自由度使吸热器能流均匀分布, 设计 5 个瞄准点呈对称分布, 通过计算确定瞄准点分布, 使其既能全覆盖吸热器, 又能避免过度溢出。

3.5 遗传算法优化模型

在确定了上述分区规则和瞄准点分布后, 各区域定日镜具体瞄准点排布需要通过全局优化确定, 本文采用遗传算法寻找全局最优解^[20-21]。综合考虑吸热器表面能流分布和约束条件后构建适应度函数, 如下:

$$I = \frac{F_{\text{mean}}}{1 + CV^2} \cdot P_1 \cdot P_2, \quad (20)$$

式中: F_{mean} 为平均能流密度; CV 为变异系数, 用于衡量能流分布均匀性; P_1 为约束惩罚因子; P_2

上采用较大的瞄准因子, 优先保证截断效率。中高效率区定日镜采用较小的瞄准因子, 通过多目标瞄准策略分散光斑, 实现能流均匀化。

3.4 多目标瞄准策略设计

为优化吸热器表面能流均匀性, 需要对中高效率定日镜进行针对性调控, 引入光斑相对系数 λ_{beam} , 并根据光斑与吸热器高度的关系设计瞄准点。

首先, 定义光斑相对系数 λ_{beam} , 即光斑半径与吸热器半高度之比, 计算公式如下:

$$\lambda_{\text{beam}} = \frac{BR}{H_r/2}, \quad (18)$$

式中: BR 为光斑半径。

基于光斑相对系数 λ_{beam} 设计瞄准点计算公式如下:

$$\lambda_{\text{beam}} > 2$$

$$1 < \lambda_{\text{beam}} \leq 2$$

$$0.6 < \lambda_{\text{beam}} \leq 1$$

$$\lambda_{\text{beam}} \leq 0.6$$

为紧凑性奖励因子。

采用变异系数对吸热器表面能流分布的均匀性进行量化评价。变异系数定义为能流密度分布标准差与其算术平均值的比值, 其数学表达式为:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (21)$$

式中: σ 为吸热器表面能流分布的标准差; μ 为吸热器表面能流密度分布的平均值。

4 瞄准策略验证

4.1 镜场介绍

为验证所提出的瞄准策略, 以我国德令哈地区地理条件设计的百兆瓦塔式光热电站为研究对象, 该光热电站集热塔光学高度为 220 m, 周围环绕着一个圆形定日镜场, 一共有 26667 面定日镜, 占地面积为 264.66 公顷, 吸热器位于塔顶, 为圆柱形, 高度为 16.4 m, 直径为 15.8 m。镜场基本的设计参数如表 1 所示。

表 1 德令哈地区 100 MW 光热电站镜场设计参数
Tab. 1 Design parameters of the 100 MW heliostat field for the Delingha CSP plant

参数名称	数值
地理纬度/ $^{\circ}$	37.36
定日镜数/面	26667
立柱高度/m	3.2
定日镜高度/m	4.81
定日镜宽度/m	6.29
有效反射面积/ m^2	30
镜面反射率	0.94
塔光学高度/m	220
吸热器高度/m	16.4
吸热器直径/m	15.8

镜场布置如图 3 所示。

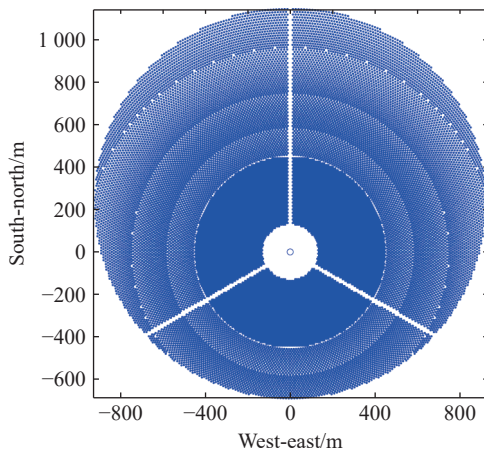


图 3 定日镜场布置图

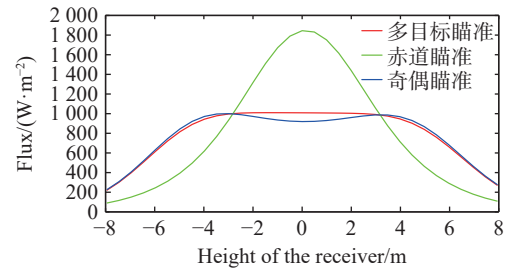
Fig. 3 Layout of heliostat field

4.2 优化结果

图 4(彩图见期刊电子版)显示了镜场在春分(第 81 天)、夏至(第 172 天)、秋分(第 264 天)和冬至(第 345 天)的正午时,采用赤道瞄准、奇偶瞄准和多目标瞄准,3 种瞄准策略对应的吸热器垂直剖面能流分布。表 2 对比分析了 3 种瞄准策略在 4 个典型日的光学性能。

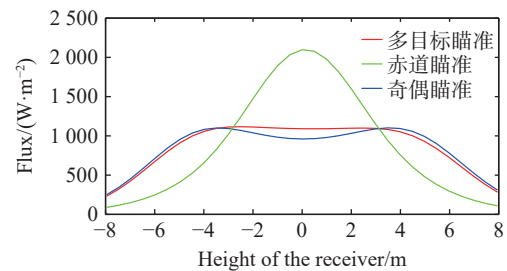
在赤道瞄准策略下,能流密度高度集中于吸热器赤道附近,形成最高峰值能流。采用瞄准因子 $K=1.8$ 的奇偶瞄准后,峰值能流明显降低,但在赤道上下方形成了两个局部峰值,呈现典型的“双峰现象”,这源于定日镜瞄准点上下偏移导致的光斑重叠。表 2 显示,从赤道瞄准到奇偶瞄准,

截断因子分别下降 2.23%, 2.28%, 2.24%, 2.14%。结果表明,峰值能流密度与溢散损失之间存在平衡关系。



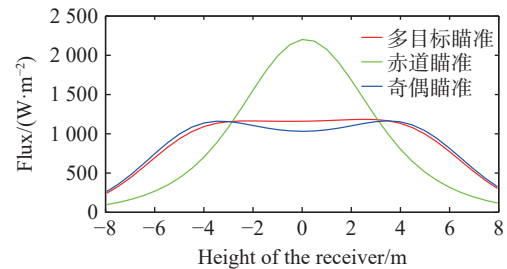
(a) 春分日垂直剖面能流分布图

(a) Flux map of the vertical cross-sections on the vernal equinox



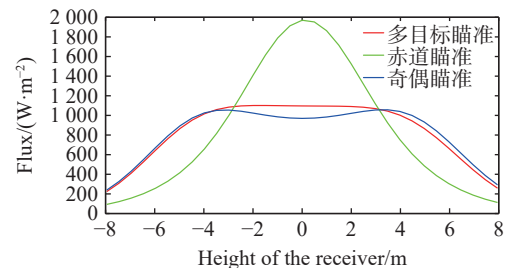
(b) 夏至日垂直剖面能流分布图

(b) Flux map of the vertical cross-sections on the summer solstice



(c) 秋分日垂直剖面能流分布图

(c) Flux map of the vertical cross-sections on the autumnal equinox



(d) 冬至日垂直剖面能流分布图

(d) Flux map of the vertical cross-sections on the winter solstice

图 4 不同瞄准策略在典型日条件下的吸热器能流分布
Fig. 4 Energy Flux distribution of the receiver under typical daily conditions with different aiming strategies

多目标瞄准策略则根据定日镜光学效率对镜场进行分区,通过对不同区域定日镜设置不同瞄准因子提高瞄准点自由度,从而改善吸热器表面能流均匀性:一方面,对低效率区域定日镜设置较大的瞄准因子 K_3 ,增大光斑半径,使定日镜瞄准

吸热器赤道附近,有效降低“双峰现象”;另一方面,中高效定日镜选择合适的瞄准因子 K_2K_1 ,降低热点的峰值能流,平衡整个吸热器表面的能流分布;最后利用遗传算法全局搜索每个定日镜最佳瞄准点,在保证高截断效率的同时,实现吸热器表面能流分布均匀性。其中, K_1 为高效率区域定日镜的瞄准因子, K_2 为中效率区域定日镜的瞄准

因子, K_3 为低效率区域定日镜的瞄准因子。根据表 2 可知,采用多目标瞄准策略优化后在全年四个典型日均表现出显著的均匀化效果,峰值能流显著降低。多目标瞄准策略相较于奇偶瞄准,峰值能流略有增加,但截断因子提升显著,春分日提升 1.37%,夏至日提升 1.33%,表明该策略在保持低峰值能流的同时,有效减小了溢散损失。

表 2 赤道瞄准、奇偶瞄准、多目标瞄准在典型日结果对比

Tab. 2 Comparison of results for equatorial aiming, odd-even aiming, and multi aiming on typical days

典型日(天)	时刻(h)	DNI(KW/m ²)	瞄准因子[K_1, K_2, K_3]	峰值能流(MW/m ²)	截断因子(%)	Δf_{int} (%)	CV
春分日(81)	12.0	0.850	赤道瞄准	1.943 1	82.02	0.0	0.450 3
			[1.8]	1.026 8	79.79	-2.23	0.215 5
			[2.0,2.5,3.0]	1.017 1	81.16	-0.86	0.210 3
夏至日(172)	12.0	0.972	赤道瞄准	2.097 4	82.24	0.0	0.464 1
			[1.8]	1.103 6	79.96	-2.28	0.182 2
			[2.0,2.5,3.0]	1.121 4	81.29	-0.95	0.161 7
秋分日(264)	12.0	0.964	赤道瞄准	2.201 2	82.02	0.0	0.450 1
			[1.8]	1.164 7	79.78	-2.24	0.209 6
			[2.0,2.5,3.0]	1.185 9	81.14	-0.88	0.201 9
冬至日(345)	12.0	0.882	赤道瞄准	1.969 8	80.65	0.0	0.450 7
			[3.0]	1.057 8	78.51	-2.14	0.229 9
			[2.0,2.5,3.0]	1.102 6	80.07	-0.58	0.225 9

表 2 中第一行显示在每个典型日赤道瞄准策略的结果,可见,峰值能流最高,截断因子最大。对于任何瞄准策略,截断因子都低于最大值。因此,在表 2 最后两列分别定义了截断因子降低量和变异系数。

图 5(彩图见期刊电子版)显示了典型日中春分日正午 12 点(太阳高度角 52.6° , $\text{DNI}=850 \text{ W/m}^2$)条件下,采用不同瞄准策略的圆柱形吸热器表面能流密度分布情况,可见与表 2 的量化结果高度一致。

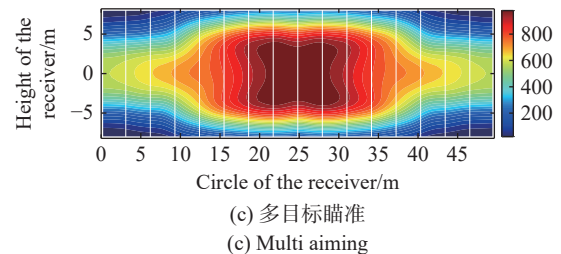
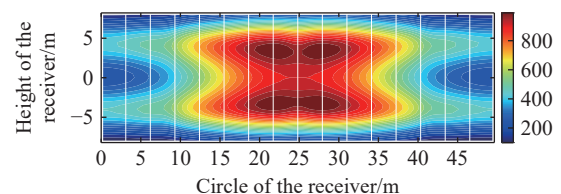
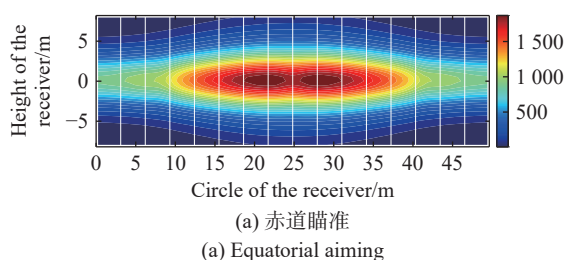


图 5 不同瞄准策略的圆柱形吸热器能流分布图

Fig. 5 Energy Flux distribution of the cylindrical receivers with different aiming strategies

5 结 论

本文提出了一种基于光学效率分区和多目标

瞄准的定日镜瞄准策略优化方法。该方法根据定日镜瞬时光学效率将镜场划分为不同区域,并设计不同瞄准因子。根据瞄准因子计算光斑尺寸,结合光斑尺寸与吸热器尺寸比值设计瞄准点,并利用遗传算法进行全局优化。以德令哈地区百兆瓦级塔式光热电站为验证对象,在 4 个典型日下,峰值能流密度均发生显著降低,分别降低 47.65%,

46.53%, 46.12%, 44.02%; 能流分布均匀性得到提高,相较于赤道瞄准基准工况,多目标瞄准策略的截断因子降幅控制在 0.58%~0.95% 内,较奇偶瞄准策略的 2.14%~2.28%,降幅减小了约 60%,显著改善了光能利用率。结果表明该方法能够有效降低峰值能流,同时兼顾均匀性和截断因子,验证了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] 吕子奎, 房方. 基于能量流的塔式太阳能热发电吸热器动态建模[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 132-137.
LYU Z K, FANG F. Dynamic modeling of solar tower receiver based on energy flow[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2022, 43(6): 132-137. (in Chinese).
- [2] MOURAD A, AISSA A, SAID Z, *et al.*. Recent advances on the applications of phase change materials for solar collectors, practical limitations, and challenges: a critical review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 49: 104186.
- [3] JIANG K J, TIAN Z Q, ZHANG Q, *et al.*. Dynamic response characteristics of molten salt solar tower power plant utilizing coordinated control strategies for optimized peak shaving performance[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 75: 107061.
- [4] LI X Y, BAI F W. A review on the thermal modeling method for molten salt receivers of concentrating solar power tower plants[J]. *Energies*, 2025, 18(2): 292.
- [5] OBERKIRSCH L, ZANGER D A V, QUINTO D M, *et al.*. Static optimal control: Real-time optimization within closed-loop aim point control for solar power towers[J]. *Solar Energy*, 2023, 255: 327-338.
- [6] ELFEKY K E, WANG Q W. Techno-economic assessment and optimization of the performance of solar power tower plant in Egypt's climate conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 280: 116829.
- [7] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, KONTOPYRGOS M, MILIDONIS K, *et al.*. Heliostat field aiming strategy based on deterministic optimization: an experimental validation[J]. *Renewable Energy*, 2024, 236: 121406.
- [8] CUI M SH, ZHANG Q, JIANG K J, *et al.*. A multi-objective control strategy for molten salt external receiver in solar tower power plant[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 275: 126818.
- [9] VANT-HULL L L. The role of “allowable flux density” in the design and operation of molten-salt solar central receivers[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2002, 124(2): 165-169.
- [10] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ M R, SANTANA D. Aiming factor to flatten the flux distribution on cylindrical receivers[J]. *Energy*, 2018, 153: 113-125.
- [11] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ M R, SANTANA D. Aiming strategy model based on allowable flux densities for molten salt central receivers[J]. *Solar Energy*, 2017, 157: 1130-1144.
- [12] COLLADO F J, GUALLAR J. A two-parameter aiming strategy to reduce and flatten the flux map in solar power tower plants[J]. *Solar Energy*, 2019, 188: 185-189.
- [13] RAJ M, BHATTACHARYA J. Precise and fast spillage estimation for a central receiver tower based solar plant[J]. *Solar Energy*, 2023, 265: 112103.
- [14] COLLADO F J, GUALLAR J. Fast and reliable flux map on cylindrical receivers[J]. *Solar Energy*, 2018, 169: 556-564.
- [15] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, SANTANA D. Solar flux distribution on central receivers: a projection method from analytic function[J]. *Renewable Energy*, 2015, 74: 576-587.
- [16] RIZVI A A, DANISH S N, EL-LEATHY A, *et al.*. A review and classification of layouts and optimization techniques used in design of heliostat fields in solar central receiver systems[J]. *Solar Energy*, 2021, 218: 296-311.
- [17] 吴凡路, 闫得杰, 姬琪, 等. 天问一号星下点太阳高度角在轨实时计算方法[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(2): 210-216.
WU F L, YAN D J, JI Q, *et al.*. On-orbit real-time calculation method of solar elevation angle of sub-satellite point of Tianwen-1[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(2): 210-216. (in Chinese).
- [18] 魏秀东, 张凡, 许英朝. 基于摄影测量的定日镜面形误差检测方法研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(2): 425-

433.

WEI X D, ZHANG F, XU Y CH. The measurement method of heliostat surface shape error based on photogrammetry[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 425-433. (in Chinese).

[19] ASTOLFI M, BINOTTI M, MAZZOLA S, *et al.*. Heliostat aiming point optimization for external tower receiver[J]. *Solar Energy*, 2017, 157: 1114-1129.

[20] 常宁东, 冯春, 程鹏达, 等. 基于 Bekker 理论改进遗传算法的野外路径优化方法研究[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(5): 767-775.

CHANG N D, FENG CH, CHENG P D, *et al.*. Research on off-road path optimization algorithm based on Bekker theory improved genetic algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(5): 767-775. (in Chinese).

[21] 杨健, 赵宏宇. 浮点数编码改进遗传算法在平面度误差评定中的研究[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 706-711.

YANG J, ZHAO H Y. The research of floating-point coding improved genetic algorithm in flatness error evaluation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 706-711. (in Chinese).

作者简介:



魏秀东(1979—), 男, 河北河间人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 2009 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得光学博士学位, 主要从事非成像光学设计、机器视觉与摄影测量技术、光学面型检测、高能流太阳辐射模拟系统设计及研制的研究。E-mail: weixiudong211@163.com