

三塔式光热电站定日镜场布局优化

李环宇 魏秀东 张全胜 张亚南 余强

Layout optimization of heliostat fields for three-tower solar thermal power plants

LI Huan-yu, WEI Xiu-dong, ZHANG Quan-sheng, ZHANG Ya-nan, YU Qiang

引用本文:

李环宇, 魏秀东, 张全胜, 张亚南, 余强. 三塔式光热电站定日镜场布局优化[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0043

LI Huan-yu, WEI Xiu-dong, ZHANG Quan-sheng, ZHANG Ya-nan, YU Qiang. Layout optimization of heliostat fields for three-tower solar thermal power plants[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0043

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0043>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

复杂水文微弱多目标激光探测仿真与实验

Simulation and experiment of weak multi-target laser detection in complex hydrology
中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 560 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0141>

磨料水射流抛光熔石英玻璃的多目标参数优化

Multi-objective parameter optimization of abrasive water jet polishing for fused silica
中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1185 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0006>

基于几何估计优化的多线激光三维重建

Multi-line laser 3D reconstruction based on geometric estimation optimization
中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 274 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0184>

面向空间目标广域探测的大视场宽光谱光学系统设计

Design of optical system with wide field of view, broad spectral range for space target detection
中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1174 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0198>

纸膜双层缺陷检测的视觉成像光场设计

Design of optical field of vision imaging for defect detection of paper and transparent film
中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 354 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0134>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-10

三塔式光热电站定日镜场布局优化

李环宇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. 中广核太阳能开发有限公司, 北京 10070;

3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要:为解决大规模塔式定日镜场边缘区域光学效率低的问题,提出了三塔光热电站交叠式镜场布局的优化方法及重叠区域定日镜的多目标瞄准策略。首先,基于粒子群算法对单塔镜场布局进行优化,得到最优的单塔镜场布局;然后,将单塔镜场进行排列,通过优化三塔间的距离得到最优的三塔交叠式镜场布局;最后,根据定日镜瞬时光学效率对重叠区域的定日镜进行多目标瞄准策略优化。对三塔式镜场聚光过程进行了建模,比较了三塔交叠式镜场和三塔分布式镜场的光学效率,结果表明:三塔交叠式镜场比三塔分布式镜场的年均光学效率提高了 0.24%,且镜场布置更紧凑,占地面积更小。

关键词: 多塔定日镜场; 多目标瞄准策略; 阴影挡光效率; 定日镜场优化

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0043 CSTR: 32171.14.CO.2026-0043

Layout optimization of heliostat fields for three-tower solar thermal power plants

LI Huan-yu¹, 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 address the low optical efficiency in the peripheral regions of large-scale solar power tower heliostat fields, this study proposes an overlapping layout optimization method and a multi-target aiming strategy for triple-tower solar thermal power plants. First, Particle Swarm Optimization (PSO) is utilized to determine the optimal configuration for a single-tower layout. These individual fields are then arranged, and the optimal overlapping triple-tower layout is established by refining the inter-tower distances. Finally, a multi-target aiming strategy is implemented for heliostats within the overlapping zones based on their instantaneous optical efficiency. By modeling the solar concentration process and comparing layout configurations,

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金面上(No. 52376219)

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

the results demonstrate that the annual average optical efficiency of the overlapping triple-tower field is 0.24% higher than that of the distributed counterpart. Furthermore, the overlapping arrangement is more compact, resulting in a significantly reduced land footprint.

Key words: multi-tower heliostat field; multi-target aiming strategy; shading and blocking efficiency; heliostat field optimization.

1 引言

在全球能源需求日益增加和气候变化问题日益严峻的背景下,太阳能发电提供了一种可行而有力的解决方案,因为它们无污染、取之不尽^[1-2]。聚光太阳能(CSP)系统是近年来发展迅速的最有前景的太阳能发电技术之一。其中,塔式光热发电(SPT)技术因其有着较高的聚光比和运行温度,具有更高热电转换效率潜力而受到人们广泛关注。SPT系统由定日镜场、吸热塔、储热系统、发电装置组成,其发电过程为定日镜场中的定日镜将太阳辐射反射聚焦到吸热塔顶的吸热器上,将太阳辐射转化为传热流质的热能,流经发电模组推动蒸汽轮机产生电力^[3-4]。储热系统是将白天加热的熔盐等传热流质储存起来,夜晚或天气不好时再推动轮机进行发电。储热系统使得塔式光热电站能够全天候发电,并且电力输出稳定^[5-6]。由于发电机组的发电效率随着装机容量的增大而提升,大容量涡轮机组往往具备更高的热功转换上限,因此近年来建造的塔式光热电厂的装机容量越来越大。但是,装机涡轮功率的增大需要聚集更多的太阳辐射,造成塔式光热电站镜场的半径增大,镜场边缘定日镜的余弦损失、大气衰减、光斑弥散和溢出损耗增加,光学效率远小于靠近塔中心区域的定日镜,造就定日镜场整体的光学效率不佳。

为了解决这种“涡轮热功率转换效率提升”与“边缘镜场光学效率降低”之间的矛盾问题,可以采用多塔式的镜场布局方式来提高塔式光热电站定日镜场的光学效率。这种通过增加吸热塔提高镜场光学效率的研究主要被划分为两种形式^[7]:

1) 由多个单塔定日镜场复制拼接而成,单塔镜场模块中的定日镜仅瞄准该模块中的接收塔。

2) 由多个吸热塔和所属的定日镜组成,不同镜场之间有重叠区域,重叠区域的定日镜可以

动态根据不同时间点的瞬时光学效率来更改瞄准塔。

对于多塔交叠式镜场布置,可通过优化镜场交叠区域定日镜的瞄准目标,来提高镜场光学效率。Piroozmand^[8]提出了一种基于群体决策(Group Decision-making)的迭代计算方法,考虑了定日镜因动态切换瞄准目标而引发的朝向变化对邻近定日镜的阴影挡光造成影响的问题。结果表明:考虑阴影挡光影响的年均光学效率比不考虑相互作用的方法高出0.21%,比两个独立不重叠的单塔系统高出0.26%。Serrano-Arrabal^[9]在研究多塔系统时,为了解决光线追迹算法计算成本高的问题,利用接收器轴对称性,提出了一种快速计算光学效率的积分方法:锥体追踪模型,并基于径向交错布局,提出一种迭代决策算法,在一天中的每个时间步长,每个定日镜会评估指向所属塔和邻近塔的瞬时光学效率,选择效率较高的作为该时刻的瞄准塔。相比于同等条件的单塔系统,优化后的双塔系统在年加权光学效率上提高了约1.5%,这种改进主要是由于余弦因子的增加。Hussaini等人^[10-11]建立了一个采用径向交错布局的传统单塔电站模型,并基于典型气象年数据进行模拟。通过在效率最低的单塔镜场边缘区域放置辅助塔来提高定日镜场的效率,并以最小化平准化热成本(LCOE)为目标函数,使用遗传算法(GA)对场参数(如塔高、接收器尺寸、行间距等)进行优化。论文表明在300 MW以上的大规模的镜场中,该配置能有效降低LCOE并提高光学效率。Pisani等人提出了一种基于量子退火(Quantum Annealing)的新型算法^[12],并将该算法应用于多塔光热电站镜场中定日镜的吸热塔的选择问题上,将定日镜的目标塔选择问题这一离散组合优化问题映射为二次无约束二进制优化(QUBO)模型,利用D-Wave量子计算机采用混合求解模式(Leap Hybrid Solver)实现了大规模镜场能流分配的高效求解,为多塔协同控制提供了

前沿的技术支撑。结果显示了从 2 到 9 座塔, 定日镜数量从几十到数千的情况下, 与经典退火方法比较, 该方法在寻找优良解方面是有效的。

本文研究了三塔式光热电站的镜场布局优化问题, 阐述了三塔交叠式镜场和三塔分布式镜场的布置方法和光学效率计算理论, 提出了三塔交叠式镜场的交叠区域定日镜的多目标瞄准优化方法, 比较了三塔交叠式镜场与三塔分布式镜场的光学效率, 为三塔太阳能光热电站镜场的优化设计、瞄准策略提供参考。

2 理论模型

2.1 三塔式镜场布置模型

三塔式镜场布置模型可分为分布式和交叠式。三塔分布式镜场是把镜场分为三个小型的单塔镜场的布置方案, 三个小型的单塔镜场之间并不交叠, 它们共用一个发电模块, 布置示意图如图 1 所示。

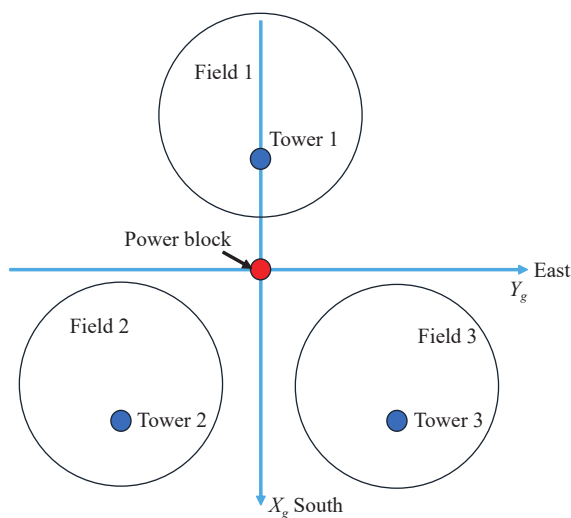


图 1 三塔一机分布式镜场布局

Fig. 1 Three-Tower and One-Turbine distributed heliostat field layout

三塔交叠式镜场布置方案是将镜场分为三个单塔式镜场, 镜场之间存在交叠区域, 系统以发电中心岛为几何中心, 三座吸热塔呈 120° 环绕分布, 如图 2 所示。吸热塔之间的间距相同, 并被各自的镜场所包围, 镜场考虑了南北比例系数。根据塔间距和分布规律, 可得到塔 1、2、3 的坐标 $(x_1, 0)$ 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 。相邻镜场平分重叠区域, 重叠区域的中心线方程可表示为:

$$y_g = k_i \cdot x_g \quad , \quad (1)$$

其中, k_i 表示中心线的斜率, $k_1 = (x_1 - x_2)/y_3$, $k_2 = (x_1 - x_2)/y_2$, $k_3 = 0$ 。

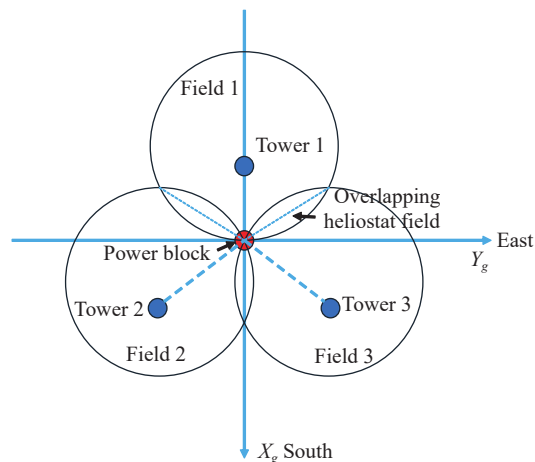


图 2 三塔一机交叠式镜场布局

Fig. 2 Three-Tower and One-Turbine overlapping heliostat field layout

2.2 镜场光学效率计算模型

定日镜的瞬时光学效率 η_{hel} 可由下式表示^[13-15]:

$$\eta_{hel} = \eta_{cos} \times \eta_{int} \times \eta_{att} \times \eta_{ref} \times \eta_{bs} \quad , \quad (2)$$

其中, η_{cos} 为余弦效率; η_{int} 为截断效率; η_{att} 为大气衰减效率; η_{ref} 为镜面反射率; η_{bs} 为阴影挡光效率。

由于太阳辐射 (DNI) 在一年内是不不断波动, 这就需要对 DNI 进行加权, 以达到真实反映每面定日镜在实际运行中的能量转化效率。定日镜的年均加权光学效率 $\eta_{hel,annual}$ 定义为:

$$\eta_{hel,annual} = \frac{\sum_{1 \text{ sunrise}}^{365 \text{ sunset}} \int DNI \cdot \eta_{hel} dt}{\sum_{1 \text{ sunrise}}^{365 \text{ sunset}} \int DNI dt} \quad , \quad (3)$$

其中 DNI 是直接法向辐照度, 是每日时间积分中的权重因子。

定日镜场的年均加权光学效率 η_{field} 是定日镜场所有定日镜年均加权光学效率的平均值, 可表示为:

$$\eta_{field} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} \eta_{hel,annual}}{N_h} \quad , \quad (4)$$

其中, N_h 为镜场中定日镜的数量。

3 镜场布置与优化

首先对单塔定日镜场进行布局优化,然后在单塔定日镜场的基础上对单塔镜场进行有序排列形成三塔分布式和三塔交叠式定日镜场。

3.1 单塔定日镜场布局及优化

本文以我国德令哈地区的地理条件为例,布局一个装机容量为 180 MW 的三塔定日镜场,其单塔装机容量为 60 MW,单塔镜场的设计参数如表 1 所示:

镜场使用无挡光径向交错分布^[16-17],太阳形状标准差为 2.51 mrad,定日镜的跟踪误差标准差为 1.5 mrad,镜面面形倾斜误差标准差为 1.5 mrad^[18]。当太阳高度角 $>15^\circ$ 且 $DNI>200 \text{ W/m}^2$ 时,镜场开始工作,定日镜瞄准吸热器的策略采用中心瞄准,采用典型日法(日期序号: 81 到 357,间隔 92,分别对应春分、夏至、秋分和冬至)来计算镜场的年均加权光学效率,一天内的时间范围为太阳时 6:00~18:00,时间间隔为 1 小时。

以定日镜场的年均加权光学效率作为优化的目标函数,使用粒子群算法(PSO)^[19]对 60 MW 的单塔镜场的方位间距因子、径向间距因子、分区间距因子、方位间距限制因子和南北比例等参数进行优化求解,得到单塔镜场年均加权光学效率最优的布局参数,优化结果如表 2 所示。

根据优化的布局参数,对初始单塔镜场进行布置,如图 3(a) 所示。

表 1 德令哈地区 60 MW 单塔光热电站镜场设计参数
Tab. 1 Design parameters of the heliostat field for a 60 MW single-tower STP plant in Delingha

类别	参数名称	数值
地理位置	地区名称	德令哈
	纬度	37.36°
	经度	97.3°
定日镜	定日镜数	5000
	镜面高度	9.752 m
	镜面宽度	12.305 m
	立柱高度	5.38 m
	镜面面积	120 m^2
	有效反射面积	115.7 m^2
	有效面积比	0.96
吸热器	塔光学高度	240 m
	吸热板数	16
	吸热器高度	15.33 m
	吸热器直径	14.8 m
	镜面反射率	0.93

表 2 PSO 优化后的 60 MW 单塔镜场布局参数
Tab. 2 Heliostat field layout parameters for the 60 MW single-tower plant optimized by PSO

镜场设计参数	优化范围	最优值
方位间距因子	1-2	1.236
径向交错方位间距因子	1-2	1.83
径向交错径向间距因子	1-2	1
径向交错分区间距因子	1-2	1
南北比例因子	0.3-1	0.4

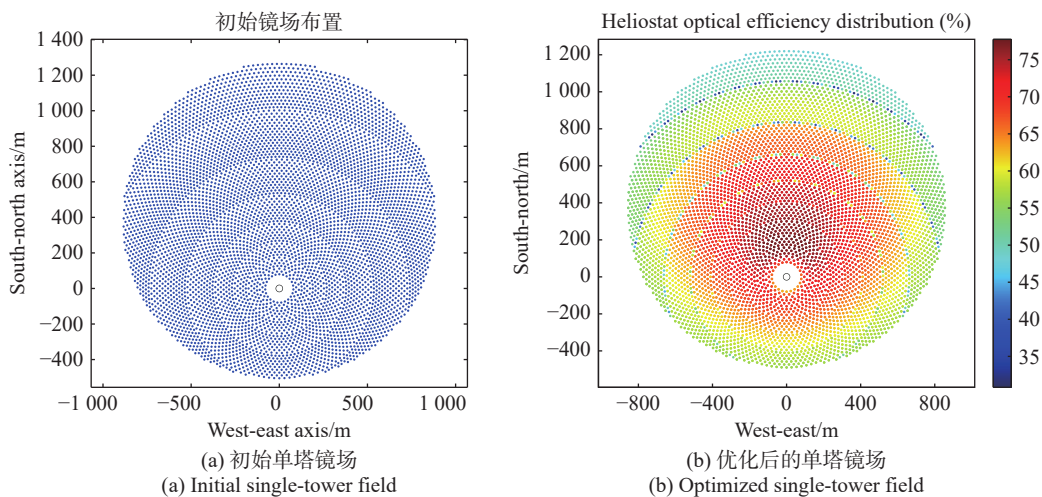


图 3 优化后的 60 MW 单塔光热电站镜场

Fig. 3 Optimized heliostat field for a 60 MW single-tower STP plant

初始镜场中定日镜数量是设计数量的 1.2 倍, 对这些定日镜求解其年均加权光学效率, 排序后选取效率较高的 5000 面定日镜作为最终单塔镜场优化布局结果, 如图 3(b) 所示。优化后的单塔镜场的年均加权光学效率为 63.32%, 镜场占地面积为 2359306.79 m², 镜场采光面积为 599625 m²。

3.2 三塔镜场生成

在优化的 60 MW 单塔镜场的基础上, 对三塔镜场进行布局。根据设置的塔间距, 对单塔镜场进行复制平移, 三个塔之间的间距一致, 形成一个等边三角形。当塔间距大于镜场半径时, 子镜场之间就没有交叠区域, 形成分布式三塔镜场, 其布局 and 年均效率分布如图 4 所示, 年均加权光学效率和优化的单塔一致, 为 63.32%, 镜场占地面积为 7077920.37 m²; 当塔间距小于镜场半径时, 子镜场之间有交叠, 去掉重叠区域多余的定日镜, 即得到交叠式三塔定日镜场。本文中以塔高 240 m, 塔间距 1300 m 为例进行布局, 如图 5(a) 所示, 绿色区域是给定的重叠区域, 在该区域中使用多目标瞄准优化策略。对布置好的 3 塔镜场的定日镜

进行年均加权光学效率计算, 并对其排序, 选出前 15000 面效率较高的定日镜形成最终的三塔定日镜场, 如图 5(b) 图所示, 三塔交叠镜场在不考虑瞄准策略的情况下的年均加权光学效率为 62.96%, 镜场占地面积为 6243541.1 m², 比三塔分布式的镜场占地面积减少了 834379 m², 使得镜场的布局更加紧凑, 传输传热熔盐的绝热管道更短, 因传输造成的热量损失也更小。

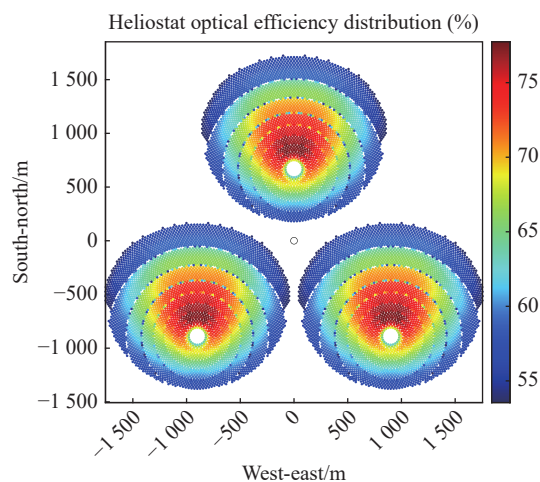


图 4 三塔分布式镜场

Fig. 4 Three-tower distributed heliostat field

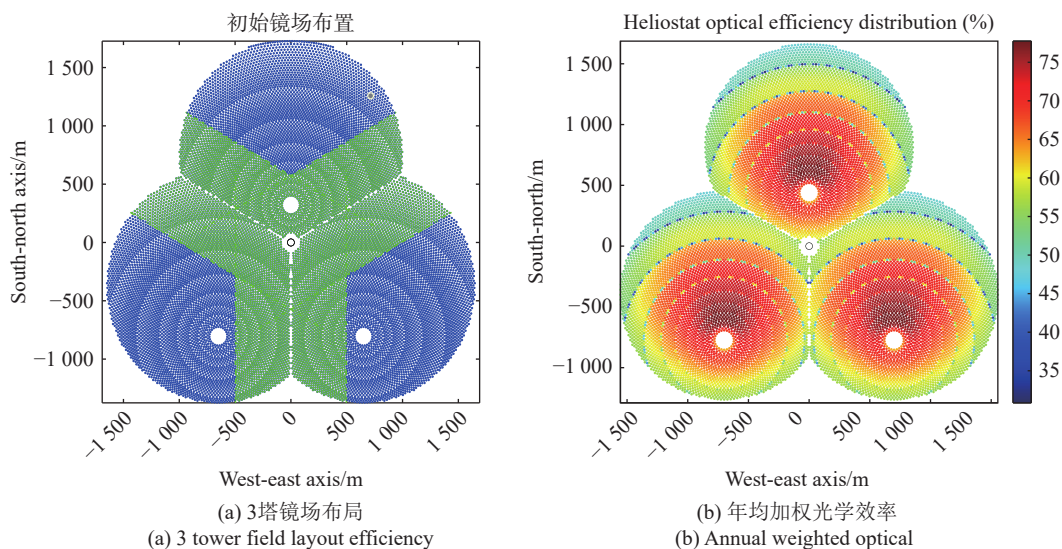


图 5 三塔交叠式镜场

Fig. 5 Three-tower overlapping heliostat field

3.3 多目标瞄准策略设计

当定日镜改变瞄准塔, 定日镜朝向也会改变, 对周围定日镜的阴影挡光效率造成影响。在对多目标瞄准策略进行设计的时候需要对该问题进行

考虑。本文以定日镜的瞬时光学效率为优化标准, 设计了多目标瞄准策略来对重叠区域定日镜进行瞄准选择优化, 其计算流程图如图 6 所示, 其过程步骤如下:

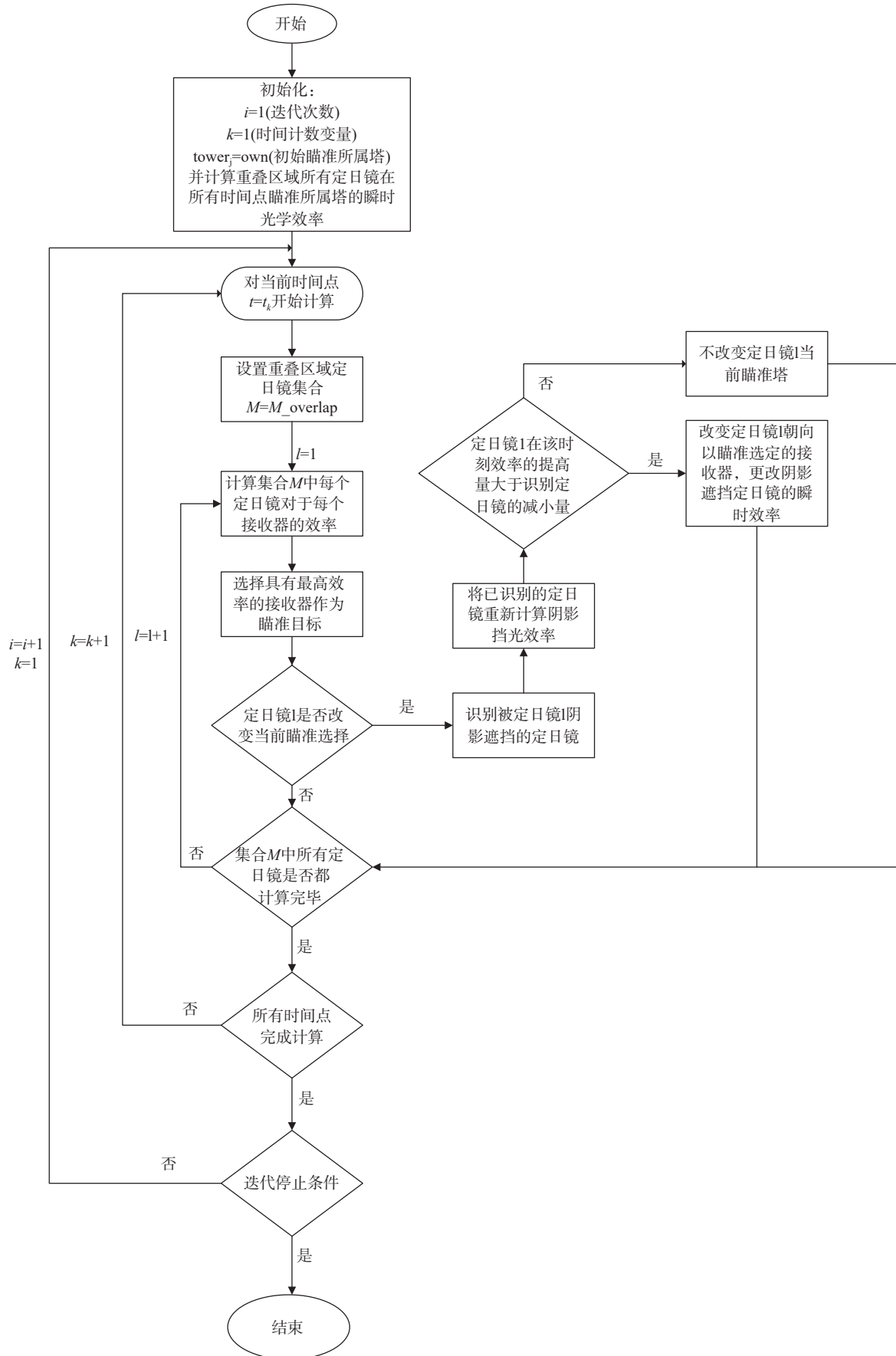


图 6 多目标瞄准策略优化流程图

Fig. 6 The flowchart of the multi-target aiming strategy optimization

步骤 1: 根据所设定的 DNI 限制和太阳高度角限制, 确定镜场开始工作时间, 根据设定的时间步长来计算每个时间点的 DNI 值、太阳高度角、太阳方位角等初始条件。

步骤 2: 整个镜场中的定日镜初始瞄准其所属吸热塔, 划分出重叠区域定日镜, 依次计算重叠区域每面定日镜在各个时间点瞄准不同吸热塔的瞬时光学效率。

步骤 3: 选取瞬时光学效率最大的吸热塔作为该时间点定日镜的瞄准塔, 如果定日镜与初始瞄准塔改变了瞄准塔, 在该定日镜周围以定日镜长度的 5 倍为半径的圆内识别阴影定日镜和两个瞄准塔的挡光定日镜, 并对这些定日镜的阴影挡光效率重新进行计算。

步骤 4: 判断该定日镜改变瞄准塔提高的瞬时光学效率是否大于识别定日镜阴影挡光效率的减少量, 如果是的话就改变瞄准塔, 否则不改变。

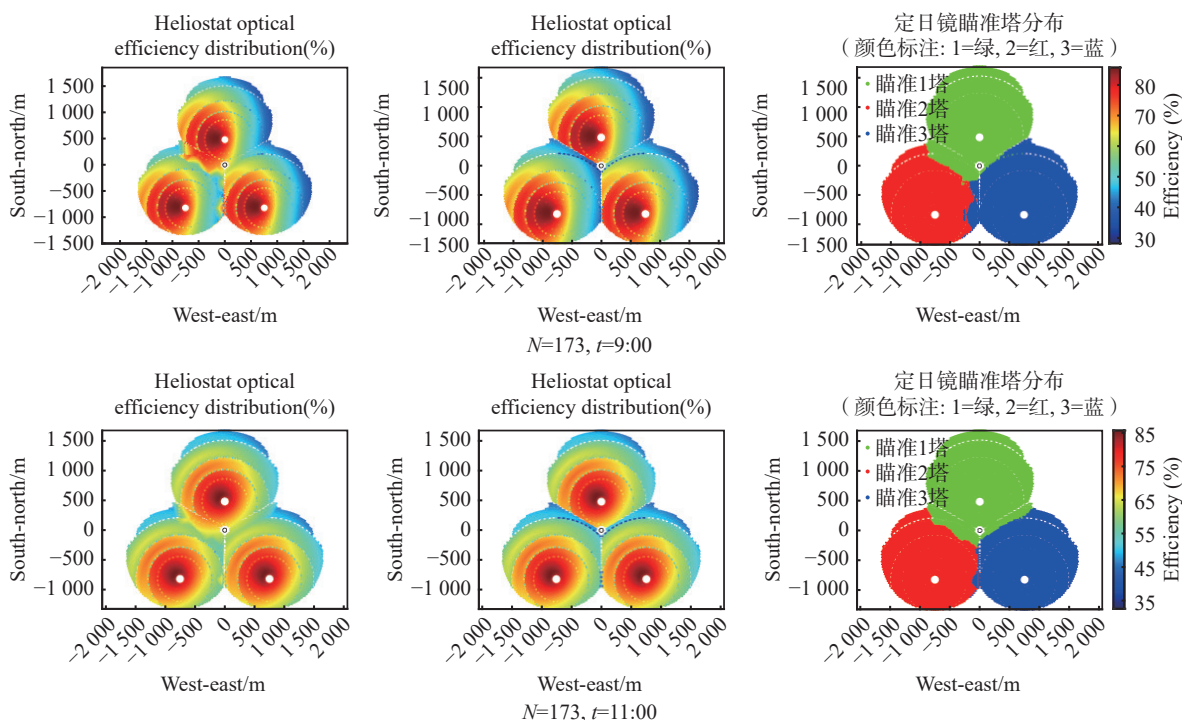
步骤 5: 对所有时间点都进行步骤 3、步骤 4 的运算, 并判断所有时间点是否都计算完成。

步骤 6: 重复步骤 2~步骤 5, 进行多次迭代, 直至在前一次迭代和当前迭代定日镜更改瞄准吸热塔的数量小于所设定的阈值, 设定的阈值为 10, 并且完成了最少 20 次迭代次数后, 算法结束。

4 结果分析

对电站中重叠区域定日镜利用多目标瞄准策略, 根据春分、夏至、秋分、冬至 ($N=81$ 、173、265、357) 四个典型日的瞬时光学效率进行优化, 其流程如图 6 所示。图 7 是瞄准策略优化后的 3 塔交叠镜场在夏至日 ($N=173$) 整天的变化情况, 显示了镜场在夏至日 9 点、11 点和 13 点和 15 点的瞄准塔 (右图) 以及考虑瞄准策略 (左图) 和不考虑瞄准策略 (中间) 的瞬效率分布图。定日镜变更瞄准塔是需要一定的时间的, 有关研究表明变更瞄准塔一般需要 20 分钟左右, 在此过程中定日镜并不能将太阳辐射反射到吸热塔上, 造成太阳能的损失。研究表明一天中每面定日镜的瞄准塔只能变动一次, 如果超过一次, 瞄准塔的更改对于定日镜效率的提高弥补不了变动时间内太阳能的损失^[20]。由图 7 的右图中重叠区域定日镜瞄准塔的变化可以看出, 重叠区域定日镜在一天中至多改变 1 次瞄准塔的选择, 避免了瞄准塔的频繁变动, 也验证了本文提出的多目标瞄准策略的有效性。

图 8 是夏至日太阳时 11 时 ($N=173$, $t=11:00$) 时重叠区域两个定日镜在优化前后的对比图。



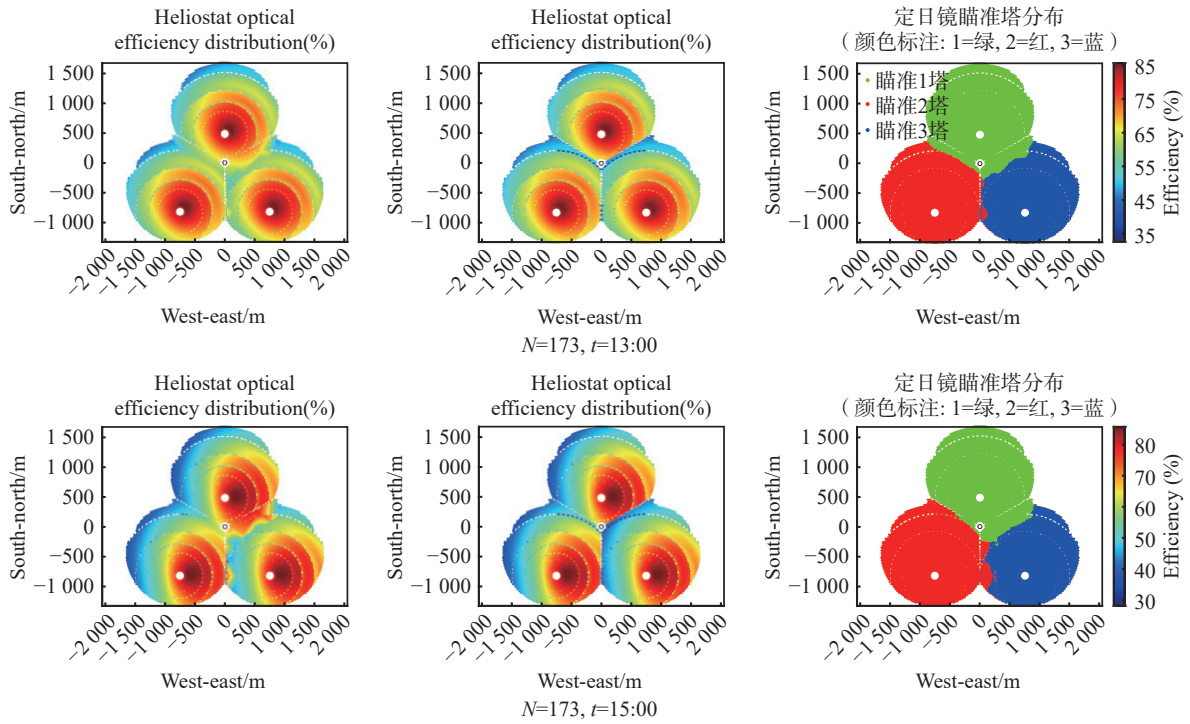


图7 夏至日 (N=173) 不同时刻的优化效果

Fig. 7 Optimization effects at different times on the summer solstice (N=173)

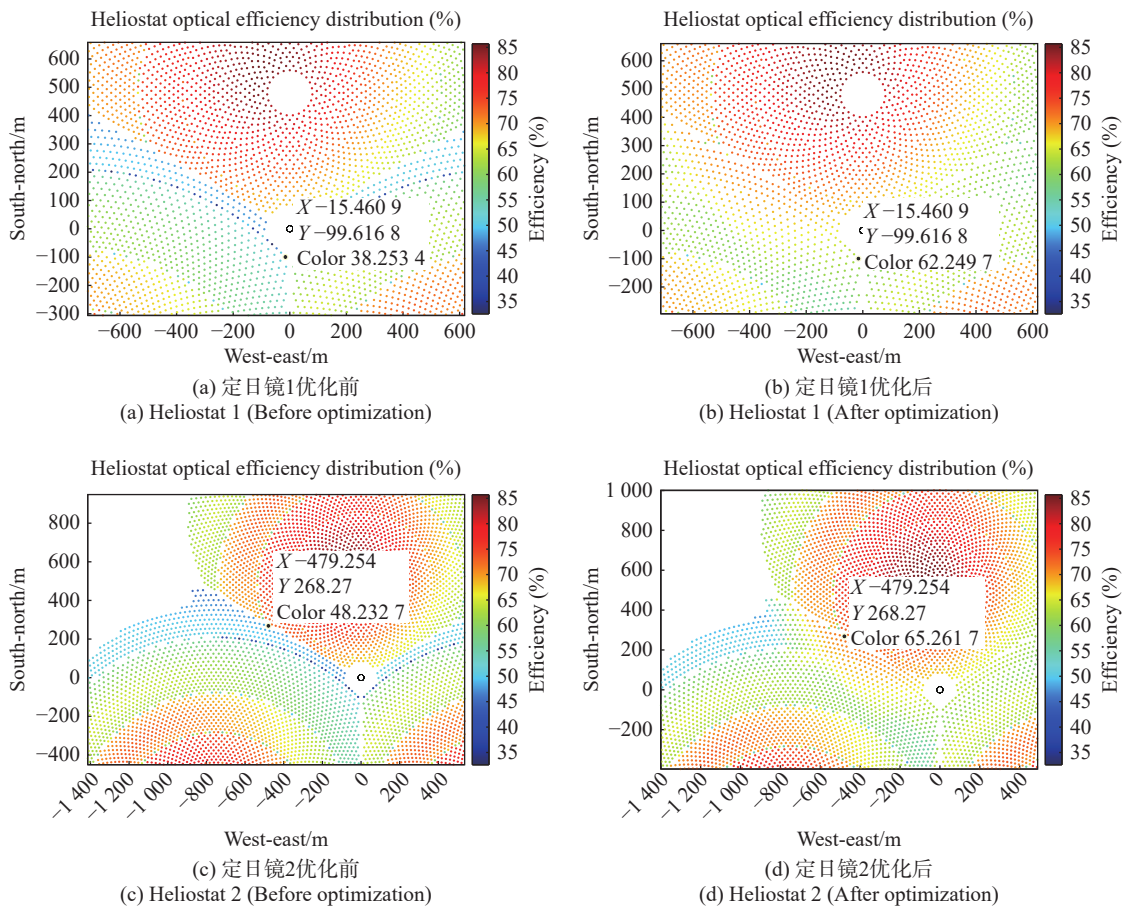


图8 典型定日镜优化前后效率对比

Fig. 8 Efficiency comparison of typical heliostats before and after optimization

从中可以看到在经过瞄准策略优化其吸热塔选择后, 两个定日镜在该时刻的瞬时光学效率得到大幅提高。

图 9 是使用多目标瞄准策略优化前后的镜场年均加权光学效率分布图, 表 3 是几种镜场布置方案的年均加权光学效率的对比。优化后, 镜

场中重叠区域的年均加权光学效率从 59.12% 提升到现在的 61.51%, 总镜场的年均加权光学效率从原先不考虑动态瞄准策略的 62.96% 提升至 63.56%, 提升了将近 0.6%; 与之相比三塔分布式镜场的 63.32% 提升了将近 0.24% 左右; 比等效传统单塔式镜场的 49.4% 提高了整整 14.16%。

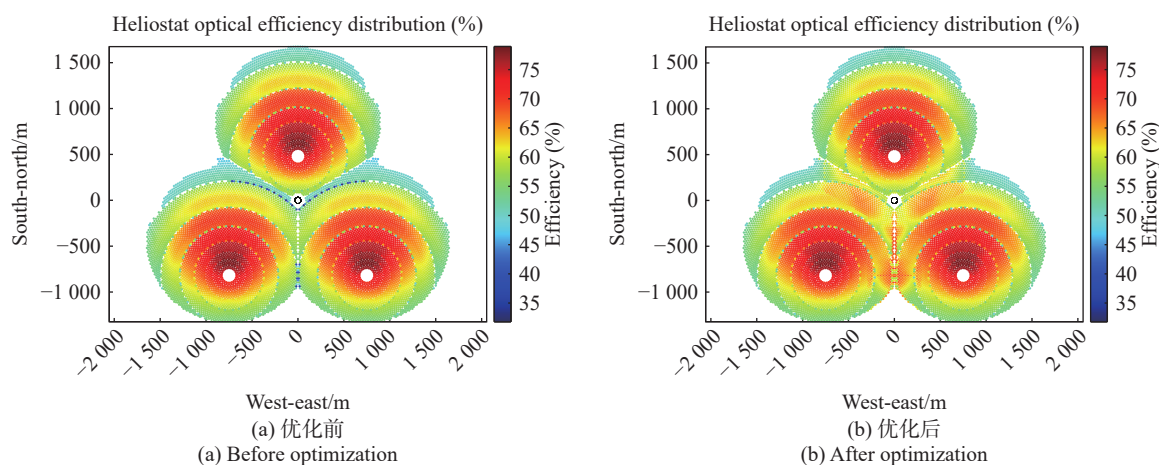


图 9 优化前后年均加权光学效率

Fig. 9 Annual weighted optical efficiency before and after optimization

表 3 镜场布置方案的年加权光学效率

Tab. 3 Annual Weighted Optical Efficiency of the Heliostat Field Layout

布置方案	总光学效率	余弦效率	截断效率	大气衰减效率	阴影挡光效率
三塔交叠式(无瞄准策略)	62.96%	82.75%	95.11%	92.54%	96.97%
三塔交叠式(瞄准策略)	63.56%	83.56%	95.35%	92.58%	96.71%
三塔分布式	63.32%	83.27%	95.05%	92.37%	97.17%
单塔	49.4%	77.43%	86.33%	90.38%	91.77%

5 结 论

本文研究了三塔式光热电站镜场布局方法, 包括三塔分布式和三塔交叠式布置, 提出了一种用于三塔交叠式镜场布局的多目标瞄准策略, 根据定日镜在四个典型日不同时刻的瞬时光学效率

为依据进行瞄准塔的选择, 在这过程中考虑了朝向改变对周围定日镜的阴影挡光效率的影响。以德令哈 180 MW 的三塔镜场为研究对象, 设计了三塔交叠式镜场布置, 考虑多目标瞄准策略, 其年均加权光学效率较三塔分布式镜场布置提高了 0.24%, 镜场布置更紧凑, 占地面积更小。

参考文献:

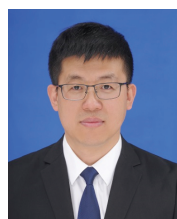
- [1] REZAEI E, SILVA S R P. Solar energy in 2025: global deployment, cost trends, and the role of energy storage in enabling a resilient smart energy infrastructure[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2026, 9(3): e70199.
- [2] LI S Y, AFSHAN S, MAMADIYAROV Z, et al.. Renewable energy investments, climate mitigation technologies, productive capacity and fiscal policy challenges: responsible resource production and consumption implications from top-10 resource exporting economies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2026, 400: 128715.
- [3] ASLAM Z, GILANI S I U H, MOHAMAD T I, et al.. Advancements in solar power tower technology: innovations in

- optical systems and heliostat field design[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2026, 48(1): 61.
- [4] ARRIF T, HASSANI S, SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, *et al.*. Heliostat aiming strategies in concentrated solar power towers: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 227: 116489.
- [5] TAGLE-SALAZAR P D, CABEZA L F, PRIETO C. Transient performance modelling of solar tower power plants with molten salt thermal energy storage systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 97: 112793.
- [6] SINGH R, NARAYANAN R. Performance simulation and techno-economic assessment of a concentrated solar thermal power tower plant with thermal storage: a case study of Queensland, Australia[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2026, 77: 107488.
- [7] ZAVERSKY F, LES I, SÁNCHEZ M, *et al.*. Techno-economic optimization and benchmarking of a solar-only powered combined cycle with high-temperature TES upstream the gas turbine[M]//YAP E H, TAN A H P. Green Energy and Environment. IntechOpen, 2020: 21. (查阅网上资料, 未找到本条文献出版地和页码, 请确认).
- [8] PIROOZMAND P, BOROUSHAKI M. A computational method for optimal design of the multi-tower heliostat field considering heliostats interactions[J]. *Energy*, 2016, 106: 240-252.
- [9] SERRANO-ARRABAL J, SERRANO-AGUILERA J J, SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A. Dual-tower CSP plants: optical assessment and optimization with a novel cone-tracing model[J]. *Renewable Energy*, 2021, 178: 429-442.
- [10] HUSSAINI Z A, KING P, SANSOM C. Design and configuration of solar thermal multi-tower field layout[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2020, 2303(1): 030021.
- [11] HUSSAINI Z A, KING P, SANSOM C. Numerical simulation and design of multi-tower concentrated solar power fields[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2402.
- [12] PISANI L, MOREAU G S, LEONARDI E, *et al.*. Multi-tower heliostat field optimization by means of adiabatic quantum computer[J]. *Solar Energy*, 2023, 263: 111893.
- [13] 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).
- [14] XIE Q Y, GUO Z Q, LIU D F, *et al.*. Optimization of heliostat field distribution based on improved Gray Wolf optimization algorithm[J]. *Renewable Energy*, 2021, 176: 447-458.
- [15] RIZVI A A, YANG D. A detailed account of calculation of shading and blocking factor of a heliostat field[J]. *Renewable Energy*, 2022, 181: 292-303.
- [16] DERBAL D, ABDERREZAK A, CHEHAIDIA S E, *et al.*. Parametric study and optimization of no-blocking heliostat field layout[J]. *Energies*, 2023, 16(13): 4943.
- [17] BELAID A, FILALI A, HASSANI S, *et al.*. Heliostat field optimization and comparisons between biomimetic spiral and radial-staggered layouts for different heliostat shapes[J]. *Solar Energy*, 2022, 238: 162-177.
- [18] SONG J F, YANG G B, WANG H Y, *et al.*. Influence of sunshape and optical error on spillover of concentrated flux in solar thermal power tower plant[J]. *Energy*, 2022, 256: 124633.
- [19] LI CH, ZHAI R R, YANG Y P. Optimization of a heliostat field layout on annual basis using a hybrid algorithm combining particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm[J]. *Energies*, 2017, 10(11): 1924.
- [20] ARBES F, LANDMAN W, WEINREBE G, *et al.*. Multi tower systems and simulation tools[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2126(1): 030004.

作者简介:



李环宇(2000—), 男, 河南商丘人, 长春理工大学硕士研究生, 主要从事塔式太阳能热发电技术、高能流太阳辐射模拟系统设计及研制的研究。E-mail: 3361929300@qq.com



魏秀东(1979—), 男, 河北河间人, 副研究员, 研究生导师, 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。E-mail: weixiudong211@163.com