



# 基于无遮挡优化策略的定日镜场 优化设计方案

郭之灏<sup>1</sup>, 段睿龙<sup>1</sup>, 宋宇航<sup>1</sup>, 李明奇<sup>2\*</sup>

(1. 电子科技大学 物理学院, 成都 611731; 2. 电子科技大学 数学科学学院, 成都 611731)

**摘要:** 针对塔式光热发电系统中定日镜场的设计问题, 依据平面光学规律和布局策略建立相应的效率计算与参数优化模型。首先用蒙特卡罗法建立阴影遮挡效率计算模型和截断效率计算模型, 从而得到镜场光学效率的计算模型; 然后在对比不同镜场布局优化策略后, 选择无遮挡布局作为优化策略, 提出可满足输出功率要求的镜场参数优化模型, 并利用变步长搜索算法对镜场参数值进行估计; 最后根据模型计算得到优化后定日镜场年平均光学效率 63%, 年平均阴影遮挡效率 94.9%, 年平均截断效率 78.17%, 单位面积镜面年平均输出热功率  $0.7312 \text{ kW/m}^2$ 。与参数优化前定日镜场性能相比, 优化后镜场性能显著提高, 如优化后年均输出热功率  $60.2933 \text{ MW}$  相比优化前提升了 91.57%。

**关键词:** 定日镜场; 蒙特卡罗法; 无遮挡布局策略; 随机搜索算法

中图分类号: O141.4

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240082

## Optimization Design of Heliostat Field Based on the Occlusion-Free Optimization Strategy

GUO Zhihao<sup>1</sup>, DUAN Ruilong<sup>1</sup>, SONG Yuhang<sup>1</sup>, LI Mingqi<sup>2\*</sup>

(1. School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. School of Mathematical Science, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Regarding the design problem of heliostat field in the tower solar thermal power system, the corresponding efficiency calculation and parameter optimization models are established based on planar optical laws and layout strategies. Firstly, the Monte Carlo method is employed to establish computational models for shadow occlusion efficiency and truncation efficiency, thus obtaining the computational model for the optical efficiency of heliostat field. After comparing different optimization strategies for heliostat field layout, the occlusion-free layout is chosen as the optimization strategy. An optimization model for heliostat field parameters meeting the output power requirements is then proposed. The variable step size search algorithm is employed to estimate the heliostat field parameter values. Finally, based on the model calculation, the optimized heliostat field achieves an average annual optical efficiency of 63%, an average annual shadow occlusion efficiency of 94.9%, an average annual cutoff efficiency of 78.17%, and an average annual thermal output power per unit heliostat area of  $0.7312 \text{ kW/m}^2$ . Compared with the performance of the heliostat field before parameter optimization, the performance is significantly improved. For instance, the average annual thermal output power after optimization is  $60.2933 \text{ MW}$ , which represents an increase of 91.57% compared to the pre-optimization level.

**Key words:** heliostat field; Monte Carlo method; occlusion-free layout strategy; random search algorithm

塔式太阳能光热发电站的定日镜场中任意一面定日镜均可通过纵向转轴和横向转轴两个旋转自由度来确定其镜面的方位角和俯仰角<sup>[1]</sup>, 旋转产生的活动反射面可将不同时刻下的太阳光反射到

聚能塔上。规划范围内所有定日镜在日照时段内同时工作即可实现整个定日镜场的全时段聚光功能。

2023 年全国大学生数学建模竞赛 A 题要求计

收稿日期: 2023-12-01

基金项目: 四川省教改项目(JG2021-171)。

作者简介: 郭之灏, 本科生, 电子信息科学与技术专业。E-mail: guozhihao002@163.com

\* 通信作者: 李明奇, 博士, 副教授, 主要从事应用数学和算法设计方面的研究。E-mail: lmqi2000@126.com

算给定定日镜场的年平均光学效率、年平均输出热功率和单位镜面面积年平均输出热功率。同时, 还需要优化定日镜场的几个重要参数: 定日镜场中吸收塔的位置、定日镜的数量以及每一个定日镜的尺寸、安装高度、位置坐标, 使得该定日镜场在达到额定功率 60 MW 的条件下, 单位镜面面积年平均输出热功率尽可能大。为此, 需要如下基本假设和约定。

1) 假设定日镜上发生的光反射均为镜面反射, 所有定日镜的镜面反射率 $\eta_{\text{ref}}$ 均为 0.92。

2) 假设定日镜尺寸范围内均为镜面, 定日镜沿纵轴和横轴旋转时定日镜中心点坐标不发生变化。

3) 约定每一个定日镜和旋转轴组成的反射系统称为单元, 整个定日镜场称为全局。

4) 假设光线传播途中不发生漫反射、衍射和折射。因为太阳光是一束锥形光线, 因此太阳入射光线经定日镜任意一点的反射光线也是一束锥形光线, 约定反射光锥的半角展宽 4.65 mrad。

5) 假设入射到定日镜上的能量在镜面上均匀分布。

## 1 阴影遮挡效率模型

### 1.1 定日镜法向量

在光线全反射过程中反射光线与入射光线、法线在同一平面上; 反射光线和入射光线分别位于在法线的两侧, 反射角等于入射角<sup>[2]</sup>, 定日镜结构和光路如图 1 所示。两单位向量求和所得新向量与两向量的夹角相等且位于同一平面上。因此, 可以利用这一向量特性求出第  $i$  个定日镜的法向量为:

$$\mathbf{n}_{\text{if}} = \frac{\mathbf{n}_{\text{in}}}{|\mathbf{n}_{\text{in}}|} + \frac{\mathbf{n}_{\text{out}}}{|\mathbf{n}_{\text{out}}|} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{n}_{\text{if}}$  表示第  $i$  个定日镜的法向量,  $\mathbf{n}_{\text{in}}$  表示光线的入射向量,  $\mathbf{n}_{\text{out}}$  表示光线的反射向量。

对于任意定日镜中心, 光线的入射向量 $\mathbf{n}_{\text{in}}$ 的方向均为太阳指向定日镜中心点位置的方向。因为定日镜中心位置均已知, 所以对于任意时刻在镜场坐标系下的定日镜场光线的入射向量 $\mathbf{n}_{\text{in}}$ 为:

$$\mathbf{n}_{\text{in}} = (-\sin\gamma_s \cos\alpha_s, -\cos\gamma_s \cos\alpha_s, -\sin\alpha_s) \quad (2)$$

式中: 太阳高度角 $\alpha_s$ 和太阳方位角 $\gamma_s$ 可通过定日镜场所在地经纬度和具体时刻求出。

在定日镜场设计中, 要求定日镜中心点处的反射光线射到集热器中心位置。于是, 可根据集热器中心点坐标(0, 0, 80)和各定日镜中心点坐标( $x_i, y_i, 4$ )确定反射向量 $\mathbf{n}_{\text{out}} = (-x_i, -y_i, 80)$ 。

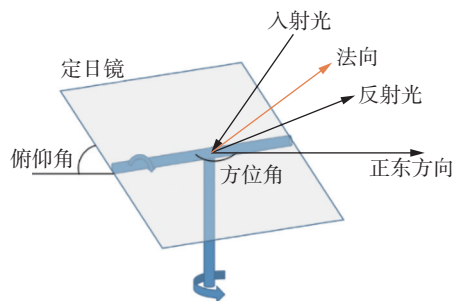


图1 定日镜结构示意图

### 1.2 阴影遮挡效率计算模型

#### 1.2.1 实际阴影遮挡效率

规定“阴影遮挡效率=1-遮挡损失”。一面定日镜的接收和反射能量过程中会受到3部分的遮挡损失, 其中两部分为入射光线被定日镜和吸收塔阻挡, 直接表现为在定日镜上产生了明显的阴影区域。设第  $i$  个定日镜阴影遮挡面积为:

$$A_{iz} = A_{iz}^1 + A_{iz}^2 - A_{iz}^3 \quad (3)$$

式中:  $A_{iz}^1$  为其他定日镜在该定日镜上产生的阴影面积,  $A_{iz}^2$  为吸收塔在该定日镜上产生的阴影面积,  $A_{iz}^3$  为  $A_{iz}^1$  和  $A_{iz}^2$  的重叠面积。

另一部分遮挡为反射光中有可能存在一部分被周围定日镜所遮挡。设在非阴影区域中有面积为  $A_{iD}$  的区域所反射的光被其他定日镜所阻挡。于是, 第  $i$  个定日镜阴影遮挡效率模型为:

$$\eta_{\text{isb}} = 1 - \frac{A_{iz} + A_{iD}}{A_i} \quad (4)$$

式中:  $A_{iz} + A_{iD}$  是整个定日镜中无法提供有效反射光的区域,  $A_i$  是第  $i$  个定日镜面积。

#### 1.2.2 蒙特卡罗法模拟阴影遮挡效率模型

在平面镜入射反射过程中, 可将光线入射过程离散成一束束离散的光线。判断平面镜某点处的入射和反射光线是否会被遮挡就是判断入射和反射光线所在的直线是否和遮挡平面产生了交点<sup>[3]</sup>。阴影遮挡损失如图 2 所示。定义入射和反射光路均不与遮挡平面相交的反射为有效反射。

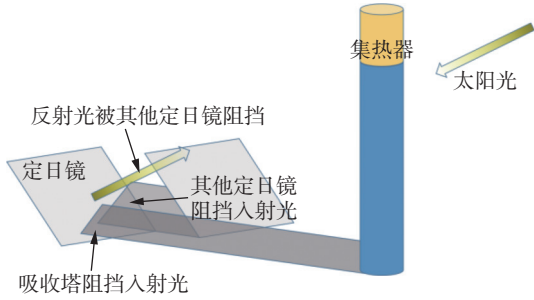


图 2 阴影损失产生示意图

如果入射光路和反射光路所在的直线都和遮挡平面相交，那么在计算光线损耗时只用计算入射光被遮挡这一次损耗。首先进行坐标变换，以传统定日镜的旋转机制为例，镜面坐标系到地面坐标系的转换关系单位矩阵<sup>[4]</sup>为：

$$T = \begin{pmatrix} -\sin E_H & -\sin A_H \cos E_H & \cos A_H \cos E_H \\ \cos E_H & -\sin A_H \sin E_H & \cos A_H \sin E_H \\ 0 & \cos A_H & \sin A_H \end{pmatrix} \quad (5)$$

再进行坐标平移变换，在 1 镜上取点  $(x_1, y_1, z_1)$ ，经过坐标系变换到 2 镜坐标系下坐标  $(x'_1, y'_1, z'_1)$ ，所以使用  $a$ 、 $b$ 、 $c$  表示入射光线方向的单位向量分别在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的投影大小。入射光线过 2 镜坐标系下的方程为：

$$\frac{x-x'_1}{a} = \frac{y-y'_1}{b} = \frac{z-z'_1}{c} \quad (6)$$

在 2 镜坐标系下  $z=0$ ，可以解得：

$$x = \frac{cx'_1 - az'_1}{c}, \quad y = \frac{cy'_1 - bz'_1}{c} \quad (7)$$

为了降低计算量提高求解效率，使用蒙特卡罗法对定日镜反射过程离散化<sup>[5]</sup>处理，在第  $i$  个定日镜内取  $N$  个反射点，设与遮挡平面相交的入射或反射光路的反射点有  $n$  个，此时阴影遮挡效率为：

$$\eta_{\text{isb}} = 1 - \frac{n}{N} \quad (8)$$

### 1.3 集热器截断效率计算模型

#### 1.3.1 实际集热器截断效率

集热器截断效率  $\eta_{\text{trunc}}$  为集热器接收能量与镜面有效反射能量的比值：

$$\eta_{\text{trunc}} = \frac{E_{\text{itake}}}{\eta_{\text{at}} E_i \eta_{\text{sb}}} \quad (9)$$

式中： $E_{\text{itake}}$  为集热器接收来自第  $i$  面定日镜反射的能量， $E_i$  为第  $i$  面定日镜全反射的能量。由于阴影遮挡效率  $\eta_{\text{sb}}$  已经求得， $E_i \eta_{\text{sb}}$  为镜面有效反射能量。大气透射率  $\eta_{\text{at}}$  为：

$$\eta_{\text{at}} = 0.99321 - 1.176 \times 10^{-4} \times d_{\text{HR}} + 1.97 \times 10^{-8} \times d_{\text{HR}}^2 \quad (10)$$

式中： $d_{\text{HR}}$  为各定日镜中心点到集热器中心的距离，单位  $\text{m}$ 。

#### 1.3.2 集热器截断效率计算模型

如图 3 所示，锥形反射光面的半角展宽为  $4.65 \text{ mrad}$ ，光锥末端为一个四棱锥与球面相交的球面，曲率和球的半径有关。

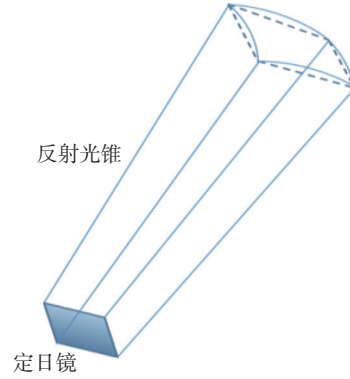


图 3 反射光锥示意图

计算集热器的截断效率时，每个锥形光束球面末端可以简化为能量分布均匀的平面，将反射的所有锥形光束累加后得到一个反射平面，能量反射面在中间部分能量均匀分布，在周围呈线性减少变化。本文将能量的数值大小作为蒙特卡罗模拟取点的权重  $\beta$ <sup>[6]</sup>。

如图 4 所示，随机给出了一种集热器接收反射光的情况。通过定日镜尺寸和光锥的半角展宽可以求出光锥末端平面所处的区域，在反射光区域中使用蒙特卡罗模拟随机取  $H$  个赋权重后的点 ( $H$  为较大整数)，找出反射光锥末端平面与集热器交面上交点的集合点。此时，集热器截断效率模型为：

$$\eta_{\text{trunc}} = \frac{\sum_{j>0, j \in h} \beta_j}{\sum_{i=1}^H \beta_i} \quad (11)$$

式中： $\beta_i$  和  $\beta_j$  分别代表第  $i$  个点和第  $j$  个点的权重。

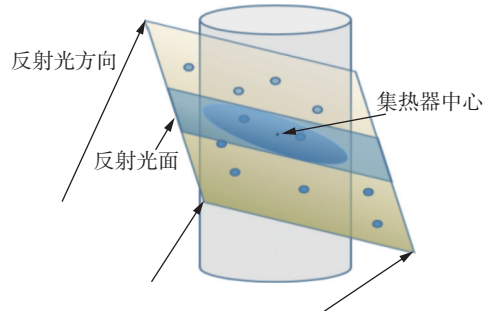


图 4 蒙特卡罗模拟示意图

## 2 给定定日镜场布局设计的效率计算

在给定定日镜场布局坐标数据和设计参数的情况下, 对阴影遮挡效率、截断效率和光学效率的计算有以下6步。

第1步: 根据计算得到太阳时角和太阳赤纬角, 循环遍历计算得到不同时刻不同月份的太阳高度角和太阳方位角, 通过入射向量和反射向量计算各镜面在不同时刻的法向向量。直接计算得到余弦效率<sup>[7]</sup>、大气透射率和法向直接辐射辐照度。

第2步: 利用各镜子大致阴影遮挡筛选每个镜子可能被周围的哪些镜子遮挡。

第3步: 选取被遮挡面C, 在其坐标系下用蒙特卡洛取镜面C中的点, 通过坐标系变换到遮挡面B坐标系。根据入射向量和反射向量确定直线方程, 判断所取的点是否落在B镜上。同时, 以落入B镜上的点数与总点数之比估计阴影遮挡损失, 利用入射向量计算吸收塔影子遮挡。

第4步: 利用镜面A的反射向量与集热器位置坐标求解出该面发出能量与集热器的交面。考虑半角展宽求解出该定日镜面发出能量到集热器位置大致接收的区域, 然后为区域中的各个子区

域赋权重。

第5步: 利用蒙特卡洛模拟, 在反射能量范围内随机取10000个点, 每个点赋权重。将在集热器范围内的点加权求和, 所得值与所有点加权求和之比为截断器效率。计算所有镜子的光学效率与接收能量。

第6步: 重复步骤2~5, 循环直到将所有镜面的数据求出。再求和得到最终结果。

计算后求得全年的相关效率和单位面积镜面平均输出热功率随月份的变化如图5所示, 具体效率值如表1所示。基础定日镜场设计下的年平均光学效率只有51.36%, 单位面积镜面平均输出热功率只有0.5010 kW/m<sup>2</sup>, 镜场性能较差, 待优化空间很大。

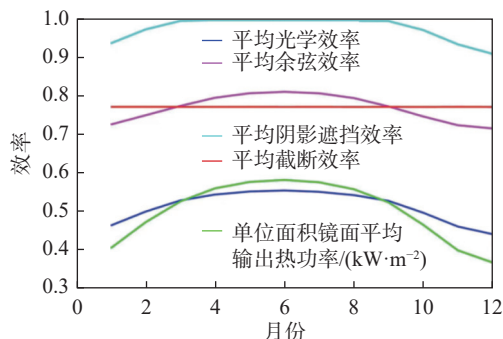


图5 定日镜场各性能效率随月份变化曲线图

表1 基础定日镜场布局下年平均光学效率及输出功率表

光学效率	余弦效率	阴影遮挡效率	截断效率	输出热功率/MW	单位面积镜面输出热功率/(kW·m <sup>-2</sup> )
0.5136	0.7682	0.9738	0.7712	31.4737	0.5010

## 3 定日镜场设计参数优化模型

实际工程应用中需要定日镜场在满足额定功率的条件下单位镜面面积年平均输出热功率尽可能大, 从而使工程效益最大化。考虑定日镜场设计参数对性能的影响程度, 我们选择对5个重要设计参数进行优化: 吸收塔的位置坐标、定日镜尺寸、数量和位置、安装高度。

### 3.1 优化策略选择

#### 3.1.1 定日镜场布局策略

在实际建设中为降低建设成本和维护成本, 定日镜场多选择模式化布局, 如圆形、螺旋形、矩形等。为保证镜场各处的输出功率尽量保证稳定, 定日镜场的分布需要尽可能满足轴对称或旋转对称等几何规律<sup>[8]</sup>。现有镜场中大部分使用径向交错的辐射网格排布, 但缺陷是光学效率不高、

阴影遮挡损失较大。针对这种问题, 发展出无遮挡布局、无阻塞布局和经验型布局<sup>[9]</sup>。无遮挡布局如图6所示。

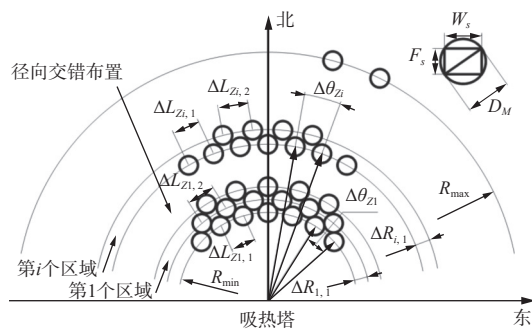


图6 无遮挡布局示意图<sup>[9]</sup>

在3种新型定日镜场布局方案中, 无遮挡布局中定日镜的等价圆相切排布, 相邻的定日镜也相切, 做到了彼此间的径向和方位间距尽可能小

的效果。无遮挡镜场布局方式在镜场中心区域将生成密集型镜场，交错排布。相比于经验布局，无遮挡布局的土地利用率为 33.24%。随着镜场规模的增大，无遮挡布局的土地利用率会逐渐趋近无阻塞布局。

结合定日镜场满足额定功率条件和单位镜面面积年均输出热功率尽可能大的要求，需要让定日镜场的遮挡损失尽可能少，才能让单位镜面面积年均输出热功率尽可能高。根据这种要求，本文选择无遮挡布局作为优化定日镜的策略方向<sup>[10]</sup>。

### 3.1.2 吸收塔选址策略

因为太阳东升西落的特性，太阳的运行轨迹以南北方向上的  $y$  轴对称<sup>[10]</sup>，吸收塔的选址需要考虑到在完整白天内定日镜场的功率输出波动。

为了使定日镜场全天的输出功率保持稳定，吸收塔的位置需要在定日镜场坐标系的  $y$  轴上。又因为给定的定日镜场的纬度为北纬  $39.4^\circ$ ，所以全年太阳都将在定日镜场南方的空域中，反映到镜场坐标系中即为太阳始终处在  $xoy$  平面中三、四象限的上方。因为余弦效率是太阳入射角的余弦值<sup>[7]</sup>，太阳入射角越小余弦效率越大。如图 7 所示，根据定日镜处在吸收塔和太阳之间或之外两种情况，分为 I 和 II 两个区域，而为了保证反射光线指向集热器中心，同一时刻在 I 区域定日镜的太阳入射角  $1$  一定大于 II 区域中定日镜的太阳入射角  $2$ ，I 区域中的余弦效率较小，所以需要让 I 区域内的定日镜数量少于 II 区域的定日镜数量。吸收塔作为 I 和 II 区域分界线的中点，其位置应该在  $y$  轴负半轴上选择，即吸收塔的坐标为  $(0, y_0)$ ，其中  $y_0$  因为定日镜场场地的范围限制取值为  $-350 \leq y_0 \leq 0$ 。

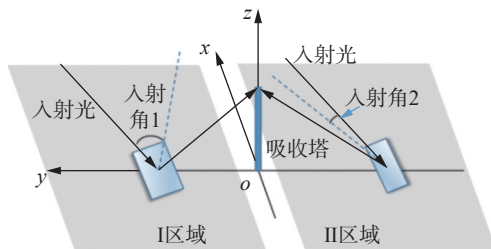


图 7 余弦效率与定日镜位置的关系图

### 3.1.3 定日镜尺寸 $d_i \times h_i$ 和安装高度 $z_i$ 优化策略

定日镜尺寸的选择需要考虑生产成本问题，因此定日镜的高度应尽可能和宽度相近。定日镜

的宽度决定了定日镜场中镜子的安装密度，为了满足定日镜场无遮挡设计策略，需要让靠近吸收塔的区域镜面分布更密集。定日镜尺寸和安装高度与  $d_{HR}$  之间具有一定的线性变化关系，其中斜率系数分别为  $k, k_1, k_2$ ，偏置系数分别为  $c, c_1, c_2$ 。定日镜尺寸应满足随着  $d_{HR}$  的增大而增大：

$$h_i(d_i) = k(k_1) \cdot d_{HR}^2 + c(c_1) \quad (12)$$

定日镜的安装高度不仅要满足定日镜的自由旋转，还要让阴影遮挡效率尽可能高。根据图 2 所示的阴影遮挡关系，为了让定日镜的入射光线不被相邻定日镜阻挡，图 7 中 I 区域内的定日镜的安装高度  $z_i$  需要与定日镜到吸收塔的距离成反比。在 II 区域中的定日镜的安装高度  $z_i$  需要与定日镜到吸收塔的距离成正比：

$$z_i = k_2 \cdot d_{HR} + c_2 \quad (13)$$

## 3.2 单目标多设计参数优化模型

### 3.2.1 目标函数

定日镜场要在各种约束条件下满足单位镜面面积年平均输出功率  $\overline{E_d}$  尽可能大的要求，而  $\overline{E_d}$  受到定日镜场吸收塔位置坐标  $(x_0, y_0)$ 、定日镜数目  $N(x_i, y_i)$ 、第  $i$  个定日镜位置  $(x_i, y_i)$ 、第  $i$  个定日镜尺寸  $d_i \times h_i$  和第  $i$  个定日镜安装高度  $z_i$  的影响。所以最大化单位镜面面积年平均输出功率  $\overline{E_d}$  是优化目标：

$$\max \overline{E_d} = \frac{\sum_p \sum_q E_{\text{field},pq}}{60Nd_i h_i} \quad (14)$$

式中： $p, q$  分别为月份和一天内的时刻序号。

### 3.2.2 约束条件

定日镜场对于各部件的结构与分布有较多设计要求，下面分别将其转化为定日镜场各参数的几何约束条件。

- 1) 镜面宽度不小于镜面高度： $d_i \geq h_i$ 。
- 2) 镜面边长在 2~8 m：

$$2 \text{ m} \leq d_i \leq 8 \text{ m}, \quad 2 \leq h_i \leq 8 \text{ m}$$

- 3) 安装高度在 2~6 m： $2 \text{ m} \leq z_i \leq 6 \text{ m}$ 。

- 4) 安装高度必须保证镜面在绕水平转轴旋转时不会触及地面： $\frac{h_i}{2} \leq z_i$ 。

- 5) 相邻定日镜底座中心之间的距离比镜面宽度多 5 m 以上： $\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > d_i + 5 \text{ m}$ 。

6) 定日镜场可建设范围是以(0, 0)点为圆心, 半径为 350 m 的圆域:  $\sqrt{x_i^2 + y_i^2} < 350$  m。

7) 评价定日镜场的重要性能指标为额定年平均输出热功率的大小。在设计定日镜场参数过程中需要满足额定年平均输出热功率达到 60 MW。

$$\frac{\sum_p \sum_q E_{\text{field},pq}}{60} > 60 \text{ MW}$$

### 3.2.3 设计参数优化模型建立

$$\max \bar{E}_d = \frac{\sum_p \sum_q E_{\text{field},pq}}{60N d_i h_i} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} & d_i \geq h_i \\ & 2 \text{ m} \leq d_i \leq 8 \text{ m} \\ & 2 \text{ m} \leq h_i \leq 8 \text{ m} \\ & 2 \text{ m} \leq z \leq 6 \text{ m} \\ & \frac{h_i}{2} \leq z \\ & \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > d_i + 5 \quad (0 < i, j \leq N) \\ & \sqrt{x_i^2 + y_i^2} < 350 \text{ m}^2 \\ & \frac{\sum_p \sum_q E_{\text{field},pq}}{60} > 60 \text{ MW} \\ & E_{\text{field},pq} = \text{DNI}_{pq} \sum_i d_i h_i \eta_{iq} \end{aligned} \right\} \text{s.t.} \quad (16)$$

### 3.2.4 模型的变步长随机搜索算法

结合定日镜场的单目标多设计参数优化模型, 可以采用变步长随机搜索算法<sup>[9]</sup>对上述单目标优化模型进行求解, 算法步骤如下。

第 1 步: 计算无遮挡布局, 根据题目中接收塔半径 100 m 内无定日镜的条件确定布局第一环的半径大小, 将上一区域最后一环的数据作为下一区域第一环数据进行迭代, 求解出整个定日镜场的布局。

第 2 步: 将相邻两环之间的间距设定为优化变量, 通过定日镜方位角计算得到定日镜场分布。

第 3 步: 根据之前计算结果发现一天中各效率和能量大小基本关于正午对称, 理论分析吸收塔应在地面原坐标系的 y 轴上, 将其纵坐标定为优化变量。

第 4 步: 正对太阳入射方向距离远的镜子遮挡效率较低, 理论上应增大安装高度来减少阴影

遮挡损失。故选择安装高度和正对太阳入射方向距离成正相关, 并将相关参数作为优化变量。

第 5 步: 各定日镜尺寸面积的分析与第 4 步相同, 正对太阳入射方向距离近的镜子面积大时, 可能会产生较大的阴影遮挡损失。依据定日镜能量利用率最高的原则, 固定宽度为两定日镜间间距所能允许的最大值。各定日镜面积与其位置存在函数关系, 将函数参数设置为优化变量, 代回前面的计算程序, 返回参数为输出功率和光学效率。

第 6 步: 在变量的定义域内采用大步长随机取值, 初步遍历得到最大输出功率对应变量的大致区间, 再缩小步长求解最优解。

### 3.2.5 求解结果与分析

根据以上算法, 求得在该模型下最大单位镜面面积年平均输出功率  $\bar{E}_d$  为 0.7312 kW/m<sup>2</sup>, 年平均输出热功率为 60.2933 MW, 其他关键性能如表 2 所示。计算全年每月 21 日定日镜场性能, 发现全年最低的平均光学效率出现在 12 月份, 和冬天太阳高度角较低的情况相符合。优化后定日镜场的月平均余弦效率可以稳定维持在 73% 以上, 随着夏天太阳高度角的升高最高可以达到 81%; 平均遮挡效率也可以稳定维持在 86%~99.8%。

表 2 优化后定日镜场关键性能参数

年平均光学效率/%	年平均余弦效率/%	年平均阴影遮挡效率/%	年平均截断效率/%
63.00	77.71	94.99	78.17

反射光的光锥特性导致较远的定日镜无法将反射光完全聚焦到集热塔上, 因此年平均截断效率维持在 78.17%, 和实际情况较为符合。单位面积镜面年平均输出热功率可以达到 0.7312 kW/m<sup>2</sup>, 相比优化前提升明显。和基础定日镜场设计相比, 年平均光学效率从 51.36% 提升到 63.00%。单位面积镜面平均输出热功率和年平均光学效率这两个重要性能指标都有了很大的提升。优化后镜场的布局 and 安装高度分布如图 8 和图 9 所示。

从图 9 中可以看到优化后吸收塔坐标为(0, -80), 总镜面数为 2685, 镜面密度有明显提升。

对优化算法进行验证, 如图 10 所示。可以看到随着迭代轮数的增加, 年平均输出热功率有较为明显的增加, 在迭代初期增加较快, 从第 6 轮迭代后增加放缓, 在第 20 轮迭代后趋于平稳。因

此验证了优化算法的有效性较好。同时结合了随机搜索与变步长搜索两种搜索方法，在计算时比直接遍历求解速度稍快。

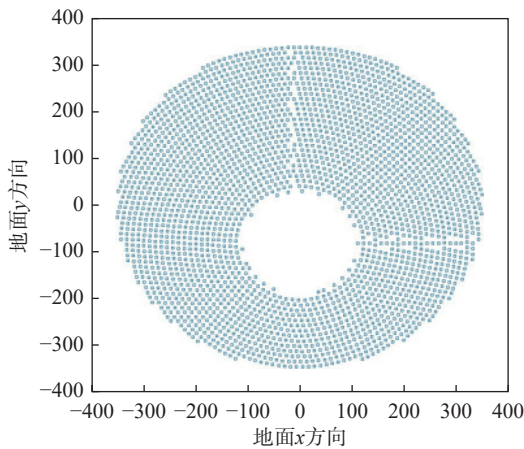


图 8 定日镜场布局示意图

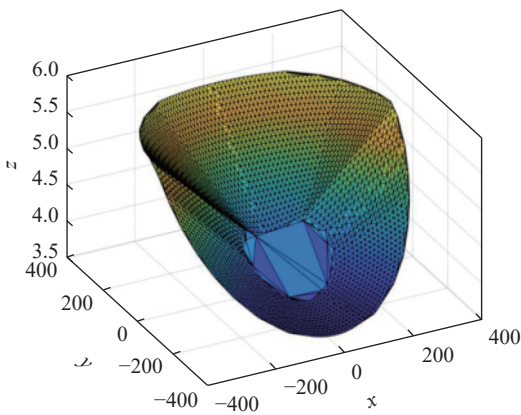


图 9 安装高度分布示意图

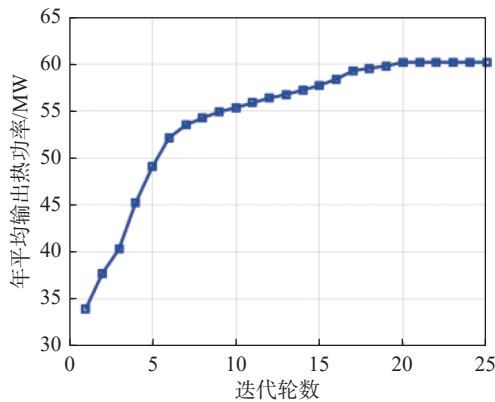


图 10 优化算法迭代轮数对目标函数值的影响曲线图

### 4 模型检验与灵敏度分析

#### 4.1 优化模型优化效果检验

在相同施工地点和面积的条件下，与给定的

基础定日镜场布局相对比，优化后定日镜场相关性能指标有明显的提升。关键性能指标对比如表 3 所示。

表 3 优化前后关键性能指标对比

	年均输出热功率/MW	单位面积镜面年均输出热功率/(kW·m <sup>-2</sup> )	年平均光学效率/%
优化前	31.4737	0.5010	51.36
优化后	60.2933	0.7312	63.00
优化率/%	91.57	45.95	22.66

从表 3 中可以看到定日镜场年均输出热功率从优化前的 31.4737 MW 提升至 60.2933 MW，优化率达到 91.57%，意味着定日镜场全年发电量增长了约一倍。单位面积镜面年平均输出热功率从优化前的 0.5010 kW/m<sup>2</sup> 提升至 0.7312 kW/m<sup>2</sup>，优化率为 45.95%，单位镜面经济效益大大提高。

如表 4 所示，对镜场布局的优化也让定日镜场在相同施工面积下镜面总使用面积增大了 31.26%，土地利用率明显提高。通过对关键性能进行对比，镜场参数优化模型优化效果明显，优化前后定日镜场性能有显著提升。

表 4 优化前后吸收塔位置和镜面使用量

	吸收塔位置坐标	定日镜总面数	定日镜总面积/m <sup>2</sup>
优化前	(0, 0)	1745	62820.00
优化后	(0, -80)	2685	82462.00

#### 4.2 对光学效率灵敏度分析

如图 11 所示，当定日镜高度为 3.5 m 时光学效率为 53.75%，而当安装高度为 6 m 时光学效率为 53.60%。安装高度变化 2.5 m 光学效率只降低 0.15%，定日镜的安装高度在 3.5~6 m 变化下对光学效率影响不大，光学效率计算模型稳定性较好，对变化具有一定适应能力。

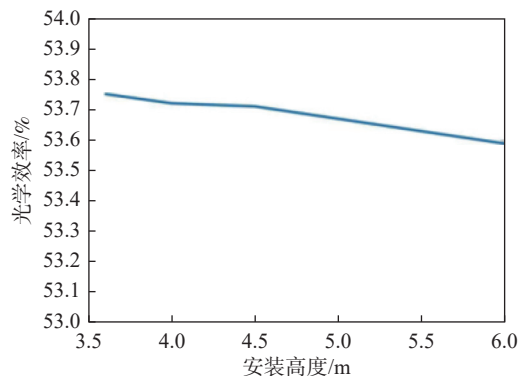


图 11 灵敏度分析曲线图

## 5 结束语

本文针对塔式熔盐发电站中定日镜场的优化问题, 基于无遮挡布局优化策略和蒙特卡罗模拟和变步长搜索法, 建立了定日镜场中阴影遮挡效率和截断效率计算模型和定日镜场设计参数优化模型, 对计算模型进行求解所得结果准确。采用变步长随机搜索算法验证了镜场优化设计方案效果明显, 性能提升显著。本文可为不同地区塔式熔盐发电站中定日镜场相关参数的优化设计提供参考方案。

同时, 对于不同经纬度的地区可以考虑采用多种镜场分布策略相结合的方法进一步提高定日镜场设计的性能, 在计算截断效率时可以采用光锥坐标系来减小系统误差, 从而得到更准确的解。

### 参考文献

- [1] 许利华, 侯晓东, 刘可亮. 塔式熔盐太阳能光热发电技术[J]. *能源研究与信息*, 2020, 36(3): 135-142.
- [2] 蔡志杰. 太阳影子定位[J]. *数学建模及其应用*, 2015, 4(4): 25-33.
- [3] 赵豫红, 冯结青, 何才透. 塔式太阳能热发电系统中阴影和遮挡的快速判定方法: CN105956331B[P]. 2019-01-11.
- [4] 张平. 太阳能塔式光热镜场光学效率计算方法[J]. *技术与市场*, 2021, 28(6): 5-8.
- [5] 张茂龙, 卫慧敏, 杜小泽, 等. 塔式太阳能镜场阴影与遮挡效率的改进算法[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(8): 1998-2003.
- [6] 魏秀东, 王瑞庭, 张红鑫, 等. 太阳能塔式热发电聚光场的光学性能分析[J]. *光子学报*, 2008(11): 2279-2283.
- [7] 丁婷婷, 祝雪妹. 塔式系统圆形镜场中余弦效率分布的研究[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(31): 8406-8410.
- [8] 孙浩. 基于混合策略鲸鱼优化算法的定日镜场布局研究及优化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [9] 孙浩, 高博, 刘建兴. 塔式太阳能电站定日镜场布局研究[J]. *发电技术*, 2021, 42(6): 690-698.
- [10] 程小龙. 基于光学效率的塔式电站镜场布局优化设计研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [11] 杨荣武. 生物化学原理[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [12] 谭宇蕙. 生物化学与分子生物学实验指导[M]. 广州: 中山大学出版社, 2016.
- [13] 陈秀芳. 医学生物化学与分子生物学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [14] 梁存钧, 吴贤聪. 对“琥珀酸脱氢酶活性的测定”实验方法的改进[J]. *安徽师大学报(自然科学版)*, 1988, 11(3): 75-76.
- [15] 赵玉萍, 尹秀玲. 探究“琥珀酸脱氢酶的作用及其抑制”实验操作过程的再设计[J]. *生物学教学*, 2012, 37(7): 36-37.
- [16] 金青. 生物化学实验指导[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014.
- [17] 杨奕樱. 生物化学与分子生物学实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [18] 孙玉宁. 生物化学实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [19] 张兴丽, 王永敏. 生物化学实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017.
- [20] 章正璞. 生物化学实验指导[M]. 上海: 第二军医大学出版社, 2007.
- [21] 杨雯乐, 谢俊秋, 龙瑶, 等. 创新性人才培养的基础医学实验教学改革[J]. *实验室研究与探索*, 2023, 42(10): 228-232.
- [22] 李晨, 谭宗花, 杨晓月, 等. 过氧化物酶的固定及同工酶鉴定综合实验设计[J]. *实验科学与技术*, 2024, 22(2): 47-53.
- [23] BÉNIT P, GONCALVES J, EL KHOURY R, et al. Succinate dehydrogenase, succinate, and superoxides: A genetic, epigenetic, metabolic, environmental explosive crossroad[J]. *Biomedicines*, 2022, 10(8): 1788.
- [24] HUANG S B, MILLAR A H. Succinate dehydrogenase: The complex roles of a simple enzyme[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013, 16(3): 344-349.
- [25] RUSTIN P, MUNNICH A, RÖTIG A. Succinate dehydrogenase and human diseases: New insights into a well-known enzyme[J]. *European Journal of Human Genetics*, 2002, 10(5): 289-291.
- [26] RUTTER J, WINGE D R, SCHIFFMAN J D. Succinate dehydrogenase-Assembly, regulation and role in human disease[J]. *Mitochondrion*, 2010, 10(4): 393-401.
- [27] NACHLAS M M, MARGULIES S I, SELIGMAN A M. A colorimetric method for the estimation of succinic dehydrogenase activity[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1960, 235(2): 499-503.
- [28] 陈舒丽, 邓秋红, 黎威巍, 等. “丙二酸对琥珀酸脱氢酶竞争性抑制作用”实验的改进及分析[J]. *山西化工*, 2022, 42(2): 7-10.

编辑 钟晓

编辑 葛晋