

基于粒子群算法的定日镜场布局优化研究

韩鲁志¹, 张子晗², 冯叶瑶³, 王欣⁴, 王立通^{4*}

¹青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛

²青岛理工大学管理工程学院, 山东 青岛

³青岛理工大学信息与控制工程学院, 山东 青岛

⁴青岛理工大学理学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年3月25日; 录用日期: 2024年4月22日; 发布日期: 2024年4月29日

摘要

针对定日镜场的优化设计问题展开讨论, 旨在寻求最优布局以实现镜场平均光学效率的最大化。本文首先建立定日镜场的光学效率模型, 并利用蒙特卡洛模拟计算集热器的截断效率; 其次设计出“环形径向分层式”的布局方案, 建立了平均输出热功率优化模型。同时, 结合相关数据与背景, 运用粒子群优化算法进行仿真模拟。基于此, 为太阳能集热系统性能优化提供有效策略, 有望推动可再生能源利用效率的提升。

关键词

蒙特卡洛光线追踪, 粒子群优化算法, 环形径向分层式布局

Optimization of Heliostat Field Layout Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

Luzhi Han¹, Zihan Zhang², Yeyao Feng³, Xin Wang⁴, Litong Wang^{4*}

¹School of Mechanical & Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

²School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

³School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

⁴School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

Received: Mar. 25th, 2024; accepted: Apr. 22nd, 2024; published: Apr. 29th, 2024

Abstract

A discussion is conducted on the optimization design of the heliostat field, aiming to seek the op-

*通讯作者。

文章引用: 韩鲁志, 张子晗, 冯叶瑶, 王欣, 王立通. 基于粒子群算法的定日镜场布局优化研究[J]. 应用数学进展, 2024, 13(4): 1607-1617. DOI: 10.12677/aam.2024.134151

timal layout to maximize the average optical efficiency of the mirror field. This article first establishes an optical efficiency model for the heliostat field, and uses Monte Carlo simulation to calculate the truncation efficiency of the collector. Secondly, a layout scheme of “circular radial layered” is designed, and an optimization model for average output thermal power is established. At the same time, combining relevant data and background, it uses particle swarm optimization algorithm for simulation. Based on this, providing effective strategies for optimizing the performance of solar energy collection systems is expected to promote the improvement of renewable energy utilization efficiency.

Keywords

Monte Carlo Ray Tracing, Particle Swarm Optimization Algorithm, Circular Radial Layered Layout

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塔式光热电站通过定日镜系统协同工作，将太阳辐射反射至集热器，实现了太阳光到传热介质的热能转换[1]。定日镜作为电站主要的能量收集单元，镜场的布局方式显著影响电站所能捕捉的辐射总量。本文旨在以定日镜场优化设计问题为例，建立一种解决镜场布置的一般性方案。

2. 问题假设及模型准备

为便于研究，提出以下假设：① 问题中所有“年均”指标的计算时点均为当地时间每月 21 日 9:00、10:30、12:00、13:30、15:00；② 不考虑雾霾、尘埃、暴雨等极端天气状况；③ 太阳辐射恒定，不随时间和季节变化；④ 忽略镜场调整的机械误差及地形起伏；⑤ 集热器均匀受热，同时忽略集热器热传递损失；⑥ 镜场中所有定日镜都具有相同的光学特性。

在地理坐标为东经 98.5° 和北纬 39.4°，海拔 3000 m，半径 350 m 的圆域内存在一个圆形定日镜场。镜场中心设吸收塔，且吸收塔周围 100 m 内不安装定日镜。集热器采用圆柱形外表受光式集热器[1]。为精确描述集热器与定日镜的相对位置关系及其他相关参数，考虑建立以吸收塔底面中心为原点，正东方向为 X 轴，正北方向为 Y 轴，垂直地面方向为 Z 轴的坐标系。在理论模型中，若将集热器 P 视作点，其中心相对地面的高度为 H，则在镜场坐标系中位置坐标为 (0,0,H)。定日镜 M 中心的位置坐标为 (x_m, y_m, z_m) ，镜面中心相对于地平面的高度记作 h。定日镜的镜面法向量记作 \mathbf{n} ，如图 1 所示。

太阳位置可以通过方位角和高度角来精确地定位。由此，定日镜所接受的入射光线方向是确定的，将其表征为 \mathbf{N}_i 。

$$\mathbf{N}_i = (-\cos \alpha_s \sin \gamma_s, -\cos \alpha_s \sin \gamma_s, -\sin \alpha_s) \quad (1)$$

任意设定的定日镜，其从太阳反射的光线均会导向集热器的中心。据此，定日镜镜面中心与集热器之间的光线路径可由法向量 \mathbf{N}_r 来描述。

$$\mathbf{N}_r = \mathbf{P} - \mathbf{M} = (-x_m, -y_m, H - z_m) \quad (2)$$

依据镜面反射定律，镜面的法向量 \mathbf{n} 、入射光线的法向量 \mathbf{N}_i 和反射光线的法向量 \mathbf{N}_r 处于同一平面，入射角等于反射角。可推导出定日镜的镜面法向量 \mathbf{n} 为：

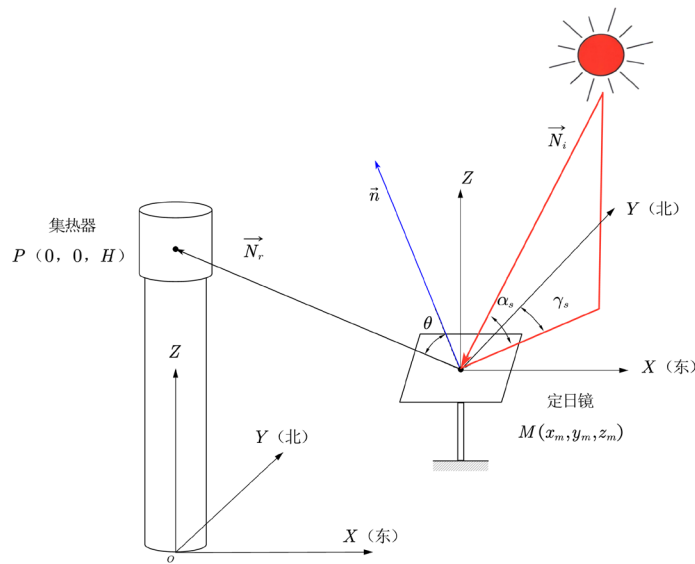


Figure 1. The principle diagram of heliostat field coordinate system and focusing

图 1. 定日镜场坐标系及聚光原理图

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{N}_r - \mathbf{N}_i}{|\mathbf{N}_r - \mathbf{N}_i|} \quad (3)$$

利用式(3)及定日镜几何关系推得俯仰角 θ_1 与方位角 θ_2 :

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{\sin(\alpha_s) \cdot m + h}{\sqrt{x_m^2 + y_m^2 + m^2 \cdot \cos^2(\alpha_s) - 2 \cos(\alpha_s) \cdot m [x_m \cdot \sin(\gamma_s) - y_m \cdot \cos(\alpha_s)]}} \right)$$

$$\theta_2 = \arcsin \left(\frac{x_m - \cos(\alpha_s) \cdot \sin(\gamma_s) \cdot m}{\sqrt{x_m^2 + y_m^2 + m^2 \cdot \cos^2(\alpha_s) - 2 \cos(\alpha_s) \cdot m [x_m \cdot \sin(\gamma_s) - y_m \cdot \cos(\alpha_s)]}} \right) \quad (4)$$

$$m = \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + h^2}$$

3. 数学模型

3.1. 定日镜场的光学效率模型

定日镜场光学效率由多重因素共同作用，经验公式如下：

$$\eta = \eta_{sb} \eta_{cos} \eta_{at} \eta_{trunc} \eta_{ref} \quad (5)$$

式中， η_{sb} 为阴影遮挡效率； η_{cos} 为余弦效率； η_{at} 为大气透射率； η_{trunc} 为集热器截断效率； η_{ref} 为镜面反射率。下面将对以上效率分别阐释：

余弦效率

定日镜在能量转换过程中，镜面采光口法线方向与太阳入射光线形成的夹角 θ ，导致接收能量产生损耗，定义夹角的余弦值即余弦效率。如图 2 所示

$$\eta_{cos} = 1 - \text{余弦损失} = \cos \theta = \mathbf{N}_i \cdot \mathbf{n} \quad (6)$$

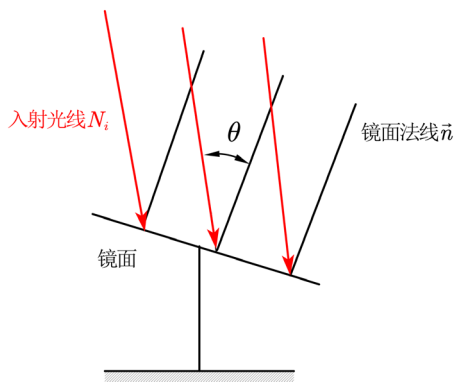


Figure 2. The principle diagram of cosine efficiency

图 2. 余弦效率示意图

大气衰减(透射)效率

大气透射率受到多种因素的影响，其中包括水汽含量和大气杂质颗粒成分的含量。特指一定波段的光线从地球大气层中穿过的能量比例，是定日镜场中影响太阳能的一个重要参数。

$$\eta_{at} = 0.99321 - 0.0001176d_{HR} + 1.97 \times 10^{-8} \times d_{HR}^2 \quad (d_{HR} \leq 1000) \quad (7)$$

阴影遮挡效率

阴影遮挡效率是定日镜场中镜与镜之间未发生阴影损失或遮挡损失的面积与定日镜场总镜面积之比。

$$\eta_{sb} = 1 - \text{阴影遮挡损失} \quad (8)$$

其中，阴影损失指是定日镜 I 接受的太阳光线由于相邻的定日镜 II 遮挡而无法反射的损失。遮挡损失是定日镜 I 反射的太阳光线中有部分被定日镜 II 遮挡处于无效反光状态，无法反射至集热器的损失。

计算阴影遮挡的损失，通过计算光线到达定日镜 I 的任意点，沿入射和反射光线路径是否会到达定日镜 II 所在的面积区域，来判断定日镜 I 与定日镜 II 之间是否产生阴影或遮挡(图 3)。首先对定日镜 I 建立如图 4 的镜面坐标系：

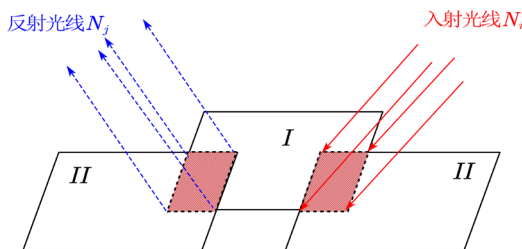


Figure 3. The principle diagram of shadow and shadow efficiency

图 3. 阴影与遮挡效率示意图

设有条入射光线 N_i ，其在地面坐标系下的方向向量为 $N_i = (x_i, y_i, z_i)$ ，经过定日镜 I 上某点 M_1 ，再对定日镜 II 建立相同的坐标系，通过转化矩阵将 M_1 转化地面坐标系下，得到 M_1' ，再将 M_1' 转化到定日镜 II 的镜面坐标系中，得到 M_1'' 。然后将入射光线 N_i 通过旋转矩阵转化同样转化到定日镜 II 的镜面坐标系下。最后判断光线与定日镜 II 的交点，判断交点是否在镜 II 内。其中镜面坐标到地面坐标的转化矩阵为：

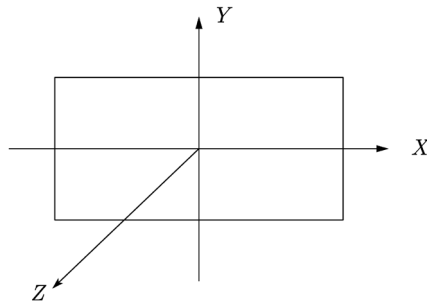


Figure 4. The mirror coordinate system
图 4. 镜面坐标系

$$R = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix},$$

地面坐标到镜面坐标的转化矩阵为:

$$R^T = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix}^T,$$

对不同的俯仰角度的定日镜, 其坐标转化矩阵数值不同。

镜面反射率

镜面反射率 η_{ref} 与定日镜所采用的材质密切相关。根据文献[2]本文选取 0.92 作为镜面反射率。

法向直接辐射辐照度

法向直接辐射辐照度 DNI (单位: kW/m^2)是指地球上垂直于太阳光线的平面单位面积上、单位时间内接收到的太阳辐射能量, 经验公式如下:

$$\begin{aligned} \text{DNI} &= G_0 \left[a + b \exp\left(-\frac{c}{\sin \alpha_s}\right) \right] \\ a &= 0.4237 - 0.00821(6 - H)^2 \\ b &= 0.5055 + 0.00595(6.5 - H)^2 \\ c &= 0.2711 + 0.01858(2.5 - H)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中 G_0 为太阳常数, 取值为 $1.366 \text{ kW}/\text{m}^2$, H 为海拔高度(单位: km)。

定日镜场的输出热功率

$$E_{field} = \text{DNI} \cdot \sum_i^N A_i \eta_i \quad (10)$$

其中 DNI 为法向直接辐射辐照度, N 为定日镜总数量, A_i 为第 i 面定日镜的采光面积(单位: m^2); η_i 为第 i 面镜子的光学效率。

单位面积镜面平均输出热功率

$$P_s = \frac{E_{field}}{\sum_i^N A_i} \quad (11)$$

年平均输出热功率

$$\bar{P} = \frac{\sum_i^{12} E_{field}}{12} \tag{12}$$

3.2. 集热器的截断效率

集热器的截断效率是集热器接受的能量与定日镜场反射太阳光的有效能量之比。其中，镜场反射太阳光的有效能量为镜面全反射能量与阴影遮挡损失能量之差，即除去阴影、被挡光等无效反射的能量。

太阳入射光线以发散的锥形形状照射在镜面上，反射到集热器上同理。光锥的截面大小与镜面到集热器距离的远近有关，在一定距离，镜面反射的光锥截面会有部分反射到集热器以外，即超出集热器接受反射光线的范围。截断效率的公式：

$$\eta_{trunc} = \frac{\text{集热器接收能量}}{\text{镜面全反射能量} - \text{阴影遮挡损失能量}} \tag{13}$$

计算集热器接受的能量，采用蒙特卡洛光线路径追踪，为追踪光锥中任意一条光线的路径，求一条光线的表达式，在镜场坐标系下的定日镜面上模拟大量的太阳光线，并判断光线是否被镜子有效地反射到吸收塔的集热器上(见图 5)。此时，截断效率的计算公式：

$$\text{截断效率} = \frac{\text{集热器接收到的有效能量}}{\text{镜面全反射能量} - \text{阴影遮挡损失}} \tag{14}$$

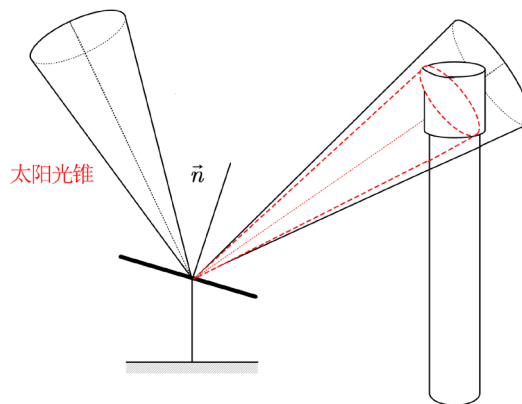


Figure 5. The principle diagram of solar conical projection
图 5. 太阳光锥投射示意图

3.3. “环形径向分层式”布局

在以集热塔为圆心的若干个同心圆环上放置定日镜，将镜场分为 i 级，第一级定日镜尽可能紧密排列，即以矩形定日镜的对角线为直径的圆始终相切，其余 $(i-1)$ 级的各层径向交错排列，且在同一级中各层所排列定日镜数量相等。最大程度上减少相邻环径向上的定日镜反射光线的遮挡现象。

第一级定日镜方位间距为：

$$\Delta A_{z1,1} = A_{sf} \cdot w \tag{15}$$

其中， A_{sf} 为方位间距因子，参考文献[3]取 1.5。

第一级定日镜第 m 层的定日镜总数 $N_{1,m}$:

$$N_{1,m} = \left\lfloor \frac{2\pi R_{1,m}}{S} \right\rfloor \quad (16)$$

$R_{1,m}$ 为第一级 m 层圆的半径, $S = \sqrt{w^2 + l^2}$ 为定日镜对角线长, $N_{1,m}$ 的值向下取整。第 $(i-1)$ 级 m 层定日镜方位间距 $\Delta A_{z(i-1),m}$ 为:

$$\Delta A_{z(i-1),m} = 2R_{(i-1),m} \cdot \sin\left(\frac{\Delta\alpha_{z(i-1),m}}{2}\right) \quad (17)$$

$\Delta\alpha_{z(i-1)}$ 为第 $(i-1)$ 级 m 层相邻定日镜与同心圆圆心构成的夹角; 相邻各级镜场交界处定日镜径向间距恒定为 S , 则第 $(i-1)$ 级 m, n 两层间的径向间距 $\Delta R_{m,n}$ 为:

$$\Delta R_{m,n} = \sqrt{S^2 - \frac{\Delta A_{z(i-1),m}}{2}} \quad (18)$$

3.4. 平均输出热功率优化模型

目标函数

优化目标为单位镜面面积年平均输出功率最大, 即:

$$\max = \frac{E_{field}}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (19)$$

其中, 定日镜场的输出热功率为,

$$E_{field} = \text{DNI} \cdot \sum_i^N A_i \eta_i,$$

A_i 为第 i 面定日镜采光面积(单位: m^2)。

约束条件

(1) **定日镜场额定功率:** 按定日镜场设计要求, 其额定年平均输出功率

$$\text{DNI} \cdot \sum_i^N A_i \eta_i \geq 60 \text{ MW} \quad (20)$$

(2) **相邻定日镜距离:** 相邻定日镜底座中心之间的距离 d 应当比定日镜面宽度 l 多 5 米以上, 即:

$$d \geq l + 5 \quad (21)$$

(3) **定日镜尺寸及高度:** 定日镜面的长宽应在 2 m 至 8 m 之间, 同时为了使镜面在俯仰变化时镜面不会碰触地面, 高度 h 的设置应该在 2 m 到 6 m 之间, 且安装高度大于水平轴以下镜面高度:

$$\begin{cases} 2 \leq l \leq 8 \\ 2 \leq w \leq 8 \\ 2 \leq h \leq 6 \\ \frac{w}{2} \leq h \end{cases} \quad (22)$$

(4) **定日镜数目**：在定日镜场($r = 350$ m)的范围内，定日镜的数目是有限的。由于吸收塔周围 100 m 范围内不安装定日镜，因此定日镜场中可安放定日镜的面积 $\pi(350^2 - 100^2)$ m²，而相邻定日镜需要间隔 $(l+5)$ m 以上，即一个定日镜占地范围为 $[\pi(l+5)^2]$ m²，则定日镜数目 n ：

$$n \leq \frac{350^2 \pi - 100^2 \pi}{(l+5)^2 \pi}$$

综上，建立平均输出热功率优化模型如下：

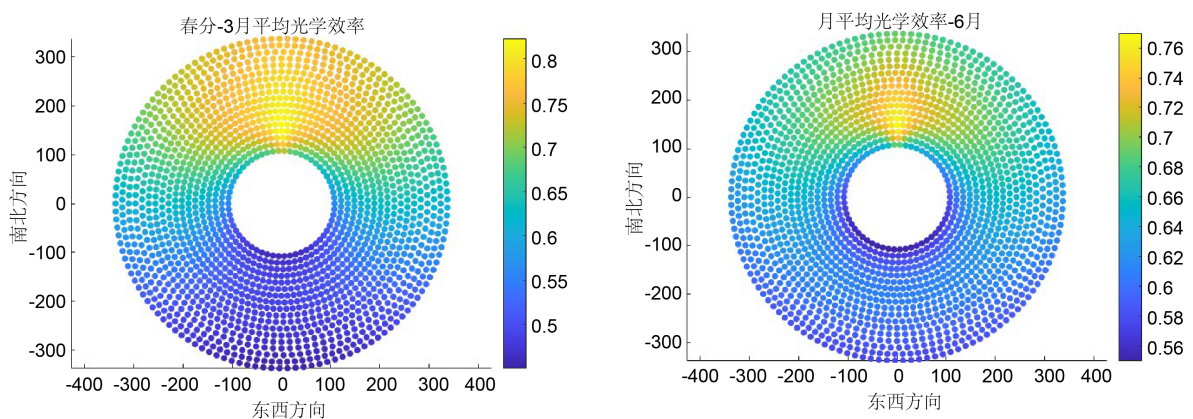
$$\begin{aligned} \max &= \frac{E_{field}}{\sum_{i=1}^N A_i} & (23) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \text{DNI} \cdot \sum_i A_i \eta_i \geq 60 \text{ MW} \\ d \geq l + 5 \\ 100 < r < 350 \\ 2 \leq l \leq 8 \\ 2 \leq w \leq 8 \\ 2 \leq h \leq 6 \\ \frac{w}{2} \leq h \\ n \leq \frac{350^2 \pi - 100^2 \pi}{(l+5)^2 \pi} \end{cases} & (24) \end{aligned}$$

4. 仿真模拟

4.1. 吸收塔位置确定

为全面的分析定日镜场综合效率的分布规律，同时考虑了余弦效率、大气衰减效率、阴影遮挡效率、截断效率对镜场综合效率的影响[4] [5] [6] [7]。图 6 分别为春分、夏至、秋分、冬至所在月份的平均光学效率。由下图可见，位于正北方向的镜场平均光学效率较高。

以确保最大程度使定日镜反射的太阳光聚焦到集热器中心，吸收塔应该朝着圆心的南方偏移。



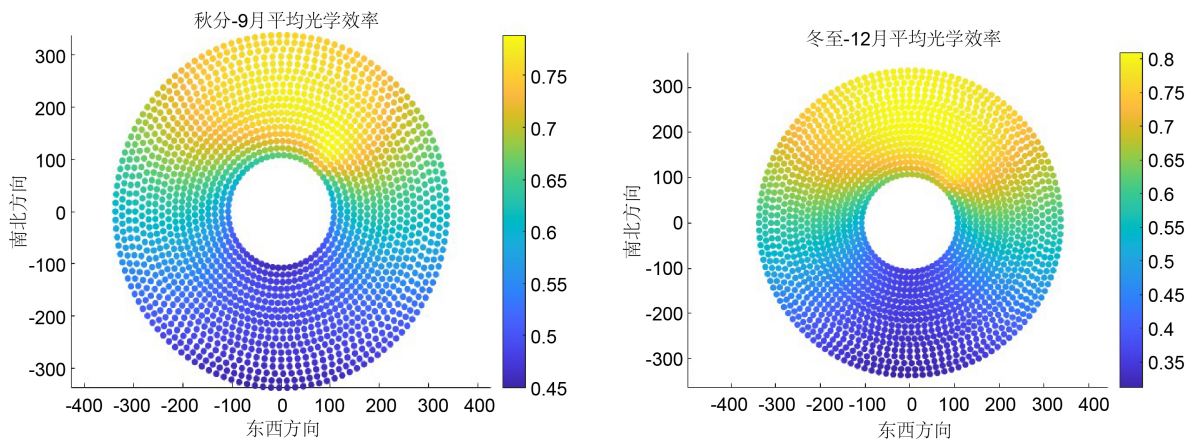


Figure 6. Average optical efficiency in the months of the Spring Equinox, Summer Solstice, Autumn Equinox, and Winter Solstice

图 6. 春分、夏至、秋分、冬至所在月份的平均光学效率

4.2. 定日镜场布局方案确定

以年平均输出功率最大为优化目标，仿真优化流程图如图 7 所示：

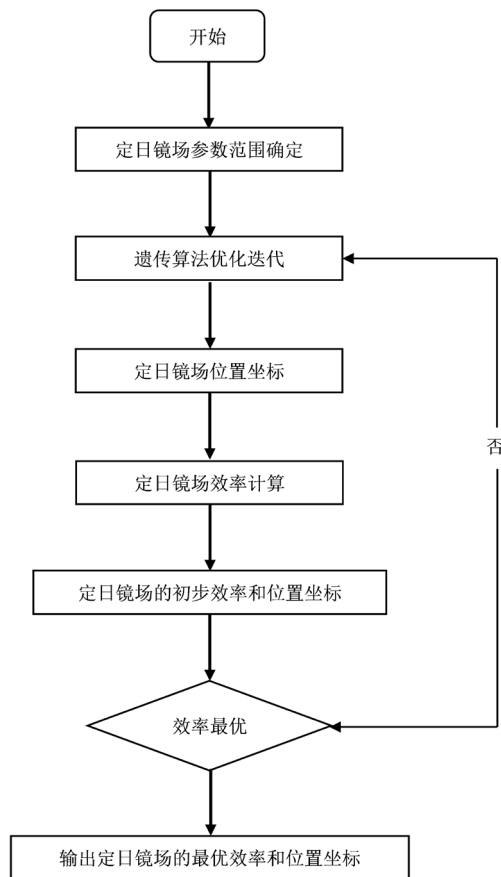


Figure 7. The mirror field layout optimization design flow chart

图 7. 镜场布局优化设计流程图

将定日镜场的基本参数带入模型,可求得所有定日镜场的布局图及平均光学效率分布图如图8所示:

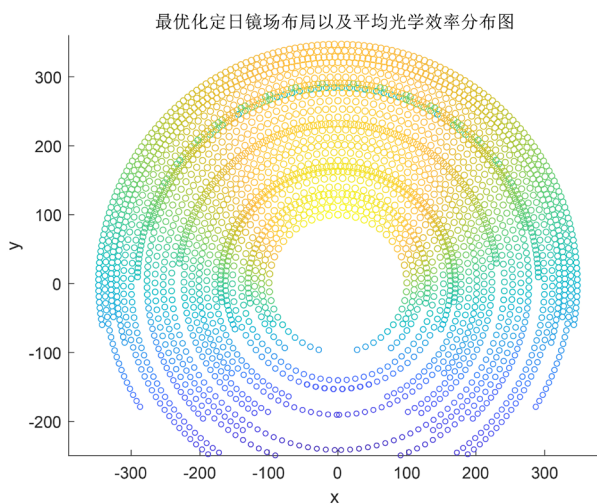


Figure 8. The optimal heliostatic field layout and distribution of average optical efficiency

图 8. 最优化定日场布局及平均光学效率分布图

结合上述仿真模型进行分析,可以发现镜场中各定日镜平均光学效率的分布规律与太阳相对于地球纬度的位置具有强关联性。当镜场内北侧定日镜经太阳直射后,其转换太阳能的光学效率较高,而南侧定日镜的光学效率相对偏低,甚至正南侧定日镜的光学效率可近似忽略。此外,定日镜呈现环形分布,最内侧一环的光学效率最高,由内向外依次递减。每组环与相邻环之间存在密集排列的圆环,将部分偏移的光束重新聚焦到集热塔上,进而提高太阳光能的利用率。“环形径向分层式”布局最大化避免了由于光线的入射、反射以及阴影遮挡等对镜场内各定日镜平均光学效率的影响,且在优化定日镜场布局问题时具有高精度性和稳定性。

5. 结论

本文基于塔式光热电站定日镜场的工作原理为基础建立数学模型。通过蒙特卡洛光线追踪和粒子群优化算法解决复杂的定日镜场布局问题,确保模型具有较高的精确性和稳定性。该模型的核心原理和算法可应用于其他类型的太阳能聚焦系统,例如抛物槽式、抛物面或球面太阳能聚焦系统,可为实际工程应用提供有力的决策依据。

基金项目

2023 年山东省自然科学基金项目(ZR2023QB065)。

参考文献

- [1] 2023 年高教杯全国大学生数学建模竞赛 A 题[EB/OL]. http://www.mcm.edu.cn/html_cn/node/c74d72127066f510a723a94b5323a26.html
- [2] 张平, 奚正稳, 华文瀚, 等. 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.
- [3] 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.
- [4] 高维东. 塔式太阳能电站定日镜场调度优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.

<https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2021.000683>

- [5] 李心, 许粲羚, 纪培栋, 等. 塔式光热电站集热场设计综述及经济性研究[J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 51-59.
<https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.008>
- [6] 郭铁铮, 刘国耀, 刘德有, 等. 塔式太阳能电站定日镜场优化调度的光功率控制研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8): 1467-1472.
- [7] Li, X., Xu, C.L., Ji, P.D., Xiao, G., Zhang, H. and Jin, J.X. (2020) Review and Economic Research on Solar Field Design of Solar Tower Plants *Southern Energy Construction*, 7, 51-59.