

定日镜场的优化问题

李浩然, 梁磊, 王耀, 舒常江*, 谭镇

桂林信息科技学院机电工程学院数学教研部, 广西 桂林

收稿日期: 2025年6月22日; 录用日期: 2025年7月15日; 发布日期: 2025年7月25日

摘要

本文针对定日镜场的定日镜位置优化问题, 基于优化模型和定日镜优化模型的建立, 对定日镜场中定日镜的位置分布进行优化分析, 从而使定日镜在最大程度获取太阳能。其中本文对定日镜场周围的定日镜采取分层分块处理, 利用MATLAB对定日镜的位置进行极坐标建模, 并建立定日镜的位置分配模型, 通过对定日镜与吸收塔之间的角度和位置偏差建立数学模型。该方法有效应对了大规模定日镜调整带来的复杂性, 展现出更高的简洁性和准确性。

关键词

定日镜场, MATLAB, 优化模型, 定日镜位置规划

The Optimization Problem of the Solar Tracking Mirror Field

Haoran Li, Lei Liang, Yao Wang, Changjiang Shu*, Zhen Tan

Department of Mathematics Teaching, College of the Mechanical and Electrical Engineering, Guilin Institute of Information Technology, Guilin Guangxi

Received: Jun. 22nd, 2025; accepted: Jul. 15th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

Abstract

Targeting the heliostatic position optimisation problem of the heliostatic field, the position distribution of the heliostatic mirror in the heliostatic field is optimised and analysed in order to maximise the heliostatic mirror's absorption of solar energy. This is done through the development of an optimisation model and a heliostatic optimisation model. Among these, segmentation and stratification are used to handle the heliostat around the heliostat field. After establishing the polar coordinates of the heliostat position, MATLAB establishes the heliostat's position allocation model. The

*通讯作者。

heliostat's angle and the absorption tower's location deviation define the mathematical model. Considering that the number of heliostats is too large, the adjustment of heliostats is more complicated, and the method has higher simplicity and accuracy.

Keywords

Heliostat Field, MATLAB, Optimization Model, Heliostat Position Planning

Copyright © 2025 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

自从工业革命以来人类对煤炭、石油、天然气等化石能源的充分利用，推动了工业化快速发展，人类对这些宝贵资源过度开采和近乎疯狂地掠夺导致全球性的能源危机[1]。随着工业革命的产生和发展，人类生活逐渐由机械代替，由此而诞生出了汽车等现代工业产品。进而对石油资源的消耗据数据显示，截至 2023 年，全球资源贸易额约为 31 万亿美元。其中石油贸易额占比约为 17.55% [2]。

但是对化石能源的大量开采和低效利用，导致了很严重的后果：不仅加剧了全球气候变暖，也对人类生存构成威胁，使得新能源的开发迫在眉睫。所以为了保证生态、社会以及经济的可持续发展，世界各国在 20 世纪初便积极开发和利用新型可再生能源[3]。太阳能作为一种取之不尽，用之不竭的可再生能源迅速成为研究和关注的焦点[4]。

太阳能以其强大的辐射能量，和可再生特性，在开发新能源的开发中，占据重要地位。近年来随着我国绿色可持续发展目标的提出，大力发展太阳能等可再生能源，已成为我国能源领域一项重要的课题[5]。光热太阳能发电技术也因此迎来了其前所未有的发展机遇。

从技术角度讲，由于光伏发电技术遇到技术瓶颈，导致辐射利用率提升缓慢但经过国内外科学家多年的探索和研究，太阳辐射聚热技术、吸热材料吸热能力都有了长足的进步使得整个光热发电技术的能量转化效率有了明显的提高，理论效率已远超光伏发电技术[6] [7]。

从政策角度讲，我国经济进入新常态，面对燃煤电站产能过剩、光伏电站、风电站大面积存在的弃光、弃风的现象，国家提出了光热发电的标杆电价，并在“十二五”计划中批准了多个光热电站的示范项目。这表明了我国政府对于发展太阳能光热发电技术的努力与决心，并预示了光热发电将是我国的能源转型升级过程中重要的一环[8]。



Figure 1. Tower solar thermal power generation

图 1. 塔式太阳能光热发电

我国拥有广阔的国土面积蕴藏着丰富的太阳能资源，因此通过建设塔式太阳能光热发电站将可以有效利用并收集太阳能资源。

塔式太阳能光热发电系统的工作原理主要是通过高效精准的定日镜场将太阳光反射聚集到塔顶的吸热器上，随后将热能存储并通过热转换装置转化为动能带动涡轮机组做功产生电能[9]。而定日镜作为塔式太阳能发电站的重要组成部分，其位置的合理分布很重要。本文将针对定日镜场的分布优化问题进行深入研究。塔式太阳能光热发电系统“见图1”。

2. 模型的建立与求解

2.1. 模型一建立

(1) 平均余弦效率

由附录可知，一块定日镜的余弦效率 η_{\cos} 为(见公式(1)):

$$\eta_{\cos} = 1 - \eta_{\text{余弦损失}} \quad (1)$$

其中， $\eta_{\text{余弦损失}}$ 为余弦损失率。

余弦损失定义为由于太阳光入射方向于镜面采光口法线方向不平行性引起的能量减少损失，因此本文假设太阳光入射方向于采光口法线方向的夹角为 θ ，根据公式(2)和公式(3)，余弦损失又可以写为:

$$\eta_{\text{余弦损失}} = \cos \theta \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\alpha_s - \arcsin\left(\frac{h}{d_{HR}}\right)}{2} \quad (3)$$

其中， α_s 为太阳高度角， h 为定日镜中心与集热器中心的垂直高度， d_{HR} 为定日镜中心与集热器中心的直线距离。

以 α_s 和 d_{HR} 为余弦效率的变量，通过 MATLAB 将数值代入进行运算。计算出每一层的定日镜所接收太阳光线的总量，通过同样的方法将所有层的能量加到一起。最后再取平均便可以得到一天内定日镜场的平均余弦效率。

(2) 平均阴影遮挡效率

阴影挡光损失包括三部分[10]: ① 塔对镜场造成的阴影损失。② 后排定日镜接收的太阳光被前方定日镜所阻挡被称为阴影损失。③ 后排定日镜在反射太阳光时被前方定日镜阻挡而未到达吸热器上被称为挡光损失。下面将对阴影挡光损失进行研究和分析

在定日镜场中定日镜的阴影落入另一个定日镜的镜面，或者反射光线照射到另一台定日镜的背面而造成接收的太阳光有损失，而产生了阴影损失。遮阴太阳能光伏板后，能量会大幅地减少，无法吸收足够的光能转换为电能输出。通过计算可知，阴影遮挡损失由式(4)计算，阴影遮挡效率由式(5)计算:

$$\frac{L - h_{\text{中心距}}}{L} = \frac{\eta_{\text{遮挡损失}}}{b} \quad (4)$$

$$\eta_{sb} = 1 - \eta_{\text{遮挡损失}} \quad (5)$$

其中， L 为镜面受到太阳光照射时阴影的长度， $h_{\text{中心距}}$ 为前后镜面中心点之间的水平距离， $\eta_{\text{遮挡损失}}$ 为阴影遮挡损失， b 为板子的长度， η_{sb} 为阴影遮挡效率。

通过 MATLAB 对附录中的数据进行分析计算，计算定日镜场层与层之间镜面中心的水平距离以及每一层定日镜在受到太阳光照射时阴影的长度，便可以求得每一块镜子的阴影遮挡效率，将所有层的阴

影遮挡效率加到一起。最后再取平均便可以得到定日镜场的平均阴影遮挡效率。

(3) 平均截断效率

截断效率定义为：吸热器截获的能量占镜场汇聚能量的百分比。平均截断效率由式(6)计算：

$$\eta_{unc} = \frac{Q_{集热器}}{Q_{全反射} - Q_{阴影遮挡}} \quad (6)$$

其中， η_{unc} 为集热器截断效率， $Q_{集热器}$ 为集热器接收能量， $Q_{全反射}$ 为镜面全反射能量。

由于集热器接收太阳光的能量时，并不能完全接收所有能量，因此会存在一定的能量转换，因此集热器接收的能量并不是所有能量。而集热器之所以会出现这种情况是因为定日镜在反射太阳光时出现了镜面全反射现象。在对这种光学现象进行分析后，通过调整入射角 α 进而便可以得到每一层截断效率。集热器截断效率由式(7)计算，镜面全反射能量由式(8)计算：

$$Q_{集热器} = Q_{全反射} \times \eta_{ref} \quad (7)$$

$$Q_{全反射} = DNI \times (1 - \cos \alpha) \times S \quad (8)$$

其中， η_{ref} 为镜面反射率，且 $\eta_{ref} = 0.92$ ， S 为定日镜的尺寸且 $S = 6 \times 6 \text{ m}^2$ ， DNI 为法向直接辐射辐照度。

通过将每一层定日镜所受到太阳光照射的入射角代入式中可以计算出所有定日镜对集热器所造成的截断效率。最后，将所有定日镜的截断效率加到一起再取平均值，便得到定日镜场的平均截断效率。

(4) 平均光学效率

根据题目附录中的公式，定日镜的光学效率可由式(9)计算为：

$$\eta = \eta_{sb} \eta_{\cos} \eta_{at} \eta_{unc} \eta_{ref} \quad (9)$$

根据(1) (2) (3)已经求得每一块定日镜的阴影遮挡效率、余弦效率、以及集热器截断效率。同时，令 $\eta_{ref} = 0.92$ ，因此只要求得每一块定日镜镜面中心和吸收塔上的集热器中心之间的距离 d_{HR} 便可以求得大气透射率 η_{at} ，进而求得定日镜场的平均光学效率。通过式(10)计算：

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

本问题中本文已知定日镜的安装高度为 4 m，并且附件中提供了所有定日镜的坐标位置，因此通过勾股定理和三角函数运算，可以求出 d_{HR} ，从而得到 η_{at} 。

接下来通过相同的方法计算出定日镜的光学效率，将这些结果求和，最后除以定日镜的总数，从而得到定日镜场的平均光学效率。

(5) 单位面积镜面平均输出功率

定日镜场输出热功率(E_{field})定义为由法相直接辐射照度与每一面镜子的面积和光学效率的乘积。通过式(11)计算：

$$E_{field} = DIN \cdot \sum_i^N A_i \eta_i \quad (11)$$

其中， A_i 为第 i 面定日镜采光面积， η_i 为第 i 面镜子的光学效率。

已知每一个定日镜的尺寸为 6 m × 6 m，可知每一面镜子的面积都为 $A_i = 36$ 。代入式(11)可以确定定日镜场输出热功率为式(12)如下：

$$E_{field} = 36 \cdot DIN \cdot \sum_i^N \eta_i \quad (12)$$

分别将每一面镜子的光学效率代入模型，可得定日镜场的热输出功率。

进而将热输出功率除以定日镜总数，即可得到单位面积镜面平均输出功率(\bar{E}_{field})，如式(13)：

$$\bar{N}_{field} = \frac{E_{field}}{N} \quad (13)$$

其中， \bar{E}_{field} 为单位面积镜面平均输出功率， X 为定日镜场内的定日镜总量。

根据题目要求，对上述模型进行分析求解后得到结果填入表格，结果“见表 1 和表 2”。

Table 1. Average optical efficiency and output power of Model 1 on the 21st of each month

表 1. 模型一每月 21 日平均光学效率及输出功率

| 日期 | 平均光学效率 | 平均余弦效率 | 平均阴影遮挡效率 | 平均截断效率 | 单位面积镜面平均输出功率 |
|-----------|--------|--------|----------|--------|--------------|
| 1 月 21 日 | 0.5825 | 0.9255 | 0.821 | 0.8392 | 776.751 |
| 2 月 21 日 | 0.5849 | 0.9520 | 0.833 | 0.8388 | 776.35 |
| 3 月 21 日 | 0.5832 | 0.9756 | 0.835 | 0.8482 | 776.983 |
| 4 月 21 日 | 0.5899 | 0.9921 | 0.837 | 0.8463 | 776.71 |
| 5 月 21 日 | 0.5814 | 0.9978 | 0.832 | 0.8449 | 776.533 |
| 6 月 21 日 | 0.5867 | 0.9986 | 0.83 | 0.8436 | 776.859 |
| 7 月 21 日 | 0.5866 | 0.9978 | 0.834 | 0.8427 | 776.374 |
| 8 月 21 日 | 0.5827 | 0.9916 | 0.829 | 0.8418 | 776.23 |
| 9 月 21 日 | 0.5884 | 0.9745 | 0.827 | 0.8411 | 776.20 |
| 10 月 21 日 | 0.5839 | 0.9488 | 0.823 | 0.8405 | 776.19 |
| 11 月 21 日 | 0.5873 | 0.9231 | 0.82 | 0.84 | 775.958 |
| 12 月 21 日 | 0.5891 | 0.9132 | 0.818 | 0.8396 | 775.725 |

Table 2. Table of the annual average optical efficiency and output power of the Model 1

表 2. 模型一年平均光学效率及输出功率表

| 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 | 年平均输出热功率(MW) | 单位面积镜面年平均输出热功率(kw/m ²) |
|---------|---------|-----------|---------|--------------|------------------------------------|
| 0.5856 | 0.9659 | 0.8282 | 0.8422 | 48.7945 | 776.4052 |

2.2. 模型二建立

假设平均输出热功率提高到 60 MW，通过控制变量的方法，对变量进行通过式(12)可知，影响定日镜场的输出热功率 E_{field} 的主要因素为定日镜镜面面积，和定日镜的采光效率。在多次调试过程中发现定日镜的安装高度和数量改变的情况下，定日镜的采光效率发生改变并不明显。因此，通过改变定日镜的面积，可以使输出功率接近额定功率。在此情况下，可以确定额定功率下的定日镜尺寸。

在计算过程中，需同时考虑输出功率的变化和定日镜在总面积上的变化。通过 MATLAB 进行大量的调试以后发现当镜面尺寸 $6 \times 7 \text{ m}^2$ ，安装高度为 4 m 的规格上，通过将定日镜总数量调整为 1700 个，并且这些定日镜只有均匀分布在吸收塔 100 m 范围外的 18 个圆周上时，可以使得定日镜场的年平均输出功率与额定输出热功率极为接近。因此，本文有理由，在这种情况下所得到的单位镜面面积年平均输出热功率最大。

通过第一问的模型，将尺寸更改为 $6 \times 7 \text{ m}^2$ ，定日镜数量改为 1700 个，最终得到第二问所需要的其他各参数值。

根据题目要求，对上述模型进行分析求解后得到结果填入表格，结果“见表 3、表 4 和表 5”。

Table 3. Average optical efficiency and output power of Model 2 on the 21st of each month
表 3. 模型二每月 21 日平均光学效率及输出功率

| 日期 | 平均光学效率 | 平均余弦效率 | 平均阴影遮挡效率 | 平均截断效率 | 单位面积镜面平均输出热功率 |
|-----------|--------|--------|----------|--------|---------------|
| 1 月 21 日 | 0.5830 | 0.9251 | 0.825 | 0.8396 | 776.662 |
| 2 月 21 日 | 0.5845 | 0.9532 | 0.835 | 0.8324 | 776.521 |
| 3 月 21 日 | 0.5866 | 0.9748 | 0.839 | 0.8442 | 776.328 |
| 4 月 21 日 | 0.5841 | 0.9915 | 0.834 | 0.8476 | 775.291 |
| 5 月 21 日 | 0.5895 | 0.9985 | 0.831 | 0.8405 | 776.852 |
| 6 月 21 日 | 0.5823 | 0.9935 | 0.836 | 0.8442 | 776.395 |
| 7 月 21 日 | 0.5847 | 0.9947 | 0.823 | 0.8491 | 775.269 |
| 8 月 21 日 | 0.5811 | 0.9975 | 0.824 | 0.8455 | 775.841 |
| 9 月 21 日 | 0.5864 | 0.9742 | 0.821 | 0.8436 | 776.208 |
| 10 月 21 日 | 0.5865 | 0.9488 | 0.834 | 0.8501 | 776.526 |
| 11 月 21 日 | 0.5842 | 0.9235 | 0.819 | 0.8305 | 777.129 |
| 12 月 21 日 | 0.5894 | 0.9234 | 0.814 | 0.8426 | 776.891 |

Table 4. Table of the two-year average optical efficiency and output power of the Model 2
表 4. 模型二年平均光学效率及输出功率表

| 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 | 年平均输出热功率(MW) | 单位面积镜面年平均输出热功率(kw/m ²) |
|---------|---------|-----------|---------|--------------|------------------------------------|
| 0.5852 | 0.9666 | 0.8279 | 0.8425 | 60 | 776.3261 |

Table 5. Design parameter table for Model 2
表 5. 模型二设计参数表

| 吸收塔位置坐标 | 定日镜尺寸(宽*高) | 定日镜安装高度(m) | 定日镜总面数 | 定日镜总面积(m ²) |
|---------|------------|------------|--------|-------------------------|
| (0, 0) | 6 × 7 | 4 m | 1700 | 32 |

2.3. 模型三建立

在假设定日镜的尺寸和安装高度可存在差异的条件下本文依然要求定日镜场的额定功率维持在 60 MW，本部分旨在探讨如何设计各参数，以最大化定日镜平均的输出功率。

为实现这一目标，本文采用了“分层分梯度”的策略对定日镜分析。本文将每一层的安装高度设计为分逐步增高的排布模式。问题要求，定日镜的安装高度要限定在 2~6 m 之间，且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。这一限制在设计中得到了充分考虑。

经过多次调试与验证，本文发现当定日镜的数量和排布规律与第二问保持一致时，定日镜场的输出功率最合理且达到最大值。因此，本文沿用了第二问的布局方案，即定日镜均匀分布在吸收塔 100 m 范围外的 18 个圆周上，且位置坐标保持不变。

由于吸收塔周围 100 m 范围内禁止布置定日镜，因此定日镜场仅可在这 18 个圆周上进行布局。由此本文将这 18 个圈划分为三个区域：(1) 1~6 圈。(2) 7~12 圈。(3) 13~18 圈。在每个区域上，各圆周上的定日镜均保持相同的尺寸和安装高度。

接下来本文计算了三个区域的平均输出功率，并求和得出整个定日镜场的总输出功率，通过式(14)本文可以进一步计算出整个定日镜场的平均输出功率。

$$\bar{E}_{\text{输出}} = \sum_{i=1}^3 E_i \quad (14)$$

通过不断地调试并计算, 本文最终确定了定日镜场的输出功率在达到 60 MW 且单位面积镜面年平均输出热功率最大值时, 各定日镜的规格和安装高度, 以及其他相关参数。

最终, 通过一系列的严格的测试和计算, 本文得出了三个部分的定日镜尺寸与规格“见表 6”。

Table 6. The sizes and installation heights of the heliostats in the three parts of Model 3

表 6. 模型三中三个部分的定日镜尺寸和安装高度

| | 尺寸 | 安装高度 |
|------|-----------|------|
| 第一部分 | 6 m × 7 m | 4 m |
| 第二部分 | 7 m × 7 m | 5 m |
| 第三部分 | 7 m × 7 m | 6 m |

通过上述的方法本文求得第一部分的选用规格与模型二的规格相同, 所以第一部分所得到的数据也相同, 如表 3 和表 4。

第二部分的定日镜规格对应的各参数的结果“见表 7、表 8 和表 9”。

Table 7. The average optical efficiency and output power on the 21st of each month in the second part of Model 3

表 7. 模型三第二部分每月 21 日平均光学效率及输出功率

| 日期 | 平均光学效率 | 平均余弦效率 | 平均阴影遮挡效率 | 平均截断效率 | 单位面积镜面平均输出热功率 |
|-----------|--------|--------|----------|--------|---------------|
| 1 月 21 日 | 0.5267 | 0.9364 | 0.77 | 0.8609 | 702.3779 |
| 2 月 21 日 | 0.5253 | 0.9331 | 0.723 | 0.8685 | 702.852 |
| 3 月 21 日 | 0.5239 | 0.9336 | 0.724 | 0.8635 | 702.395 |
| 4 月 21 日 | 0.5275 | 0.9323 | 0.721 | 0.8647 | 702.269 |
| 5 月 21 日 | 0.5211 | 0.9324 | 0.734 | 0.8642 | 702.841 |
| 6 月 21 日 | 0.5247 | 0.9321 | 0.719 | 0.8633 | 702.836 |
| 7 月 21 日 | 0.5299 | 0.9334 | 0.764 | 0.8645 | 702.539 |
| 8 月 21 日 | 0.5238 | 0.9319 | 0.778 | 0.8678 | 702.334 |
| 9 月 21 日 | 0.5271 | 0.9323 | 0.779 | 0.8626 | 702.911 |
| 10 月 21 日 | 0.5247 | 0.9324 | 0.773 | 0.8693 | 702.339 |
| 11 月 21 日 | 0.5217 | 0.9321 | 0.777 | 0.8597 | 702.886 |
| 12 月 21 日 | 0.5217 | 0.9334 | 0.769 | 0.862 | 702.634 |

Table 8. Table of annual average optical efficiency and output power of the second part of Model 3

表 8. 模型三第二部分年平均光学效率及输出功率表

| 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 | 年平均输出热功率(MW) | 单位面积镜面年平均输出热功率(kw/m ²) |
|---------|---------|-----------|---------|--------------|------------------------------------|
| 0.5248 | 0.9329 | 0.7526 | 0.8642 | 61 | 702.601 |

Table 9. Design parameter table for the second part of Model 3

表 9. 模型三第二部分设计参数表

| 吸收塔位置坐标 | 定日镜尺寸(宽*高) | 定日镜安装高度(m) | 定日镜总面数 | 定日镜总面积(m ²) |
|---------|------------|------------|--------|-------------------------|
| (0, 0) | 7 × 7 | 5 m | 594 | 49 |

第三部分通过调试计算求解得出, 该部分所选用的规格为: 定日镜为 7 m × 7 m 的尺寸, 安装高度为 4 m。然后通过第一问的求解方法, 将定日镜规格改为第三部分所得的尺寸规格, 最终求解出的各项参数

数据“见表 10、表 11 和表 12”。

Table 10. Average optical efficiency and output power on the 21st of each month in the third part of Model 3

表 10. 模型三第三部分每月 21 日平均光学效率及输出功率

| 日期 | 平均光学效率 | 平均余弦效率 | 平均阴影遮挡效率 | 平均截断效率 | 单位面积镜面平均输出热功率 |
|-----------|--------|--------|----------|--------|---------------|
| 1 月 21 日 | 0.5271 | 0.9372 | 0.777 | 0.8607 | 703.245 |
| 2 月 21 日 | 0.5238 | 0.9325 | 0.773 | 0.8632 | 703.662 |
| 3 月 21 日 | 0.5277 | 0.9335 | 0.775 | 0.8648 | 703.521 |
| 4 月 21 日 | 0.5294 | 0.9339 | 0.777 | 0.8615 | 703.328 |
| 5 月 21 日 | 0.5217 | 0.9334 | 0.772 | 0.8685 | 703.291 |
| 6 月 21 日 | 0.5217 | 0.9331 | 0.763 | 0.8635 | 703.852 |
| 7 月 21 日 | 0.5269 | 0.9336 | 0.764 | 0.8647 | 703.395 |
| 8 月 21 日 | 0.5261 | 0.9323 | 0.769 | 0.8675 | 703.269 |
| 9 月 21 日 | 0.5295 | 0.9324 | 0.777 | 0.8642 | 703.841 |
| 10 月 21 日 | 0.5247 | 0.9321 | 0.773 | 0.8688 | 703.208 |
| 11 月 21 日 | 0.5285 | 0.9334 | 0.762 | 0.8635 | 703.526 |
| 12 月 21 日 | 0.5235 | 0.9319 | 0.778 | 0.8634 | 703.129 |

Table 11. Table of annual average optical efficiency and output power of the third part of Model 3

表 11. 模型三第三部分年平均光学效率及输出功率表

| 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 | 年平均输出热功率(MW) | 单位面积镜面年平均输出热功率(kw/m ²) |
|---------|---------|-----------|---------|--------------|------------------------------------|
| 0.5259 | 0.9333 | 0.7717 | 0.8645 | 62 | 703.439 |

Table 12. Design parameter table for the third part of Model 3

表 12. 模型三第三部分设计参数表

| 吸收塔位置坐标 | 定日镜尺寸(宽*高) | 定日镜安装高度(m) | 定日镜总面数 | 定日镜总面积(m ²) |
|---------|------------|------------|--------|-------------------------|
| (0, 0) | 7 × 7 | 6 m | 728 | 49 |

最后，通过上述三部分的结果，将三个表格中对应参数位置的结果进行求和取平均，便可以求出该本文所设计的定日镜场在表格中所对应的参数值。

2.4. 方法对比

定日镜场的优化设计是一个复杂的过程，涉及到光学、结构力学、材料科学以及控制工程等多个领域的知识。现有的定日镜场优化方法主要包括以下几个方面：

1) 光学性能优化

光线追踪技术：通过模拟太阳光在一天中的不同时间点和一年中不同季节照射到定日镜上的路径，来优化镜面布局，以确保最大的能量收集效率。

镜面材料与工艺优化：选择具有高反射率和耐久性的材料，并采用先进的制造工艺来提高镜面的质量。

镜面清洁度维护：定期清洁镜面，保持其表面的高反射率，减少灰尘和其他污染物的影响。

2) 系统控制精度优化

跟踪系统改进：使用更精确的传感器和控制系统，比如双轴跟踪系统，以确保镜子始终准确地指向太阳。

软件算法优化：开发高效的算法来预测太阳的位置，并实时调整镜子的角度，以最大化聚光效果。

以上的两种方法最为重要的是对太阳的位置进行预测，通过高效的算法模拟太阳在一天和一年中的不同时间点的光线照射的路径，从而控制镜面的不断调整而获取最大的太阳能源。而本文则是通过多尺度优化的方法针对不同大小的定日镜进行优化配置，以适应不同的地理和气候条件。进行整体布局优化，考虑整个镜场的空间布局，包括定日镜之间的距离、角度等因素，以获得最佳的整体性能。

最大的区别在于本文不需要通过较为频繁地调整镜面的角度，同时也不需较为复杂的算法对太阳的位置进行预测。只需要对定日镜场的不同尺寸、高度以及不同区域之间的距离、角度进行调整。针对太阳在整个过程中的整体范围，将不同区域的镜面设置为不同的尺寸、高度和角度，从而使不同的区域之间在太阳的照射过程中不会存在遮挡的情况，最终已实现每个区域对于太阳的照射时长达到最佳效果，从而可以使每个区域的太阳能源获取率最高。

3. 结论

在本研究中本文设计了定日镜场的三个不同部分，并针对每部分分别设定了定日镜的参数。

通过模型一、模型二以及模型三的结合，可以得到：在定日镜尺寸不同，安装高度不同时，合理的将定日镜场中的定日镜分为三个部分，分别设计其定日镜的参数。从而使定日镜场在达到额定功率的条件下，单位镜面面积年平均输出热功率达到最大。最终得到的各项数据“见表 13、表 14、表 15”。其中表 6 详细列出了本研究中所使用的定日镜尺寸信息。

综上所述，本研究通过模型分析与数据整合，得出了在定日镜尺寸和安装角度变化时，如何合理设计定日镜场布局以最大化热功率输出的结论。这些结论为定日镜场的设计与优化提供了有价值的参考。

Table 13. Average optical efficiency and output power on the 21st of each month in the third part of Question 3

表 13. 问题三第三部分每月 21 日平均光学效率及输出功率

| 日期 | 平均光学效率 | 平均余弦效率 | 平均阴影遮挡效率 | 平均截断效率 | 单位面积镜面平均输出热功率 |
|-----------|--------|--------|----------|--------|---------------|
| 1 月 21 日 | 0.5456 | 0.9329 | 0.790 | 0.8537 | 727.4283 |
| 2 月 21 日 | 0.5445 | 0.9396 | 0.777 | 0.8547 | 727.6783 |
| 3 月 21 日 | 0.5461 | 0.9473 | 0.779 | 0.8567 | 727.4147 |
| 4 月 21 日 | 0.5470 | 0.9526 | 0.777 | 0.8679 | 726.9627 |
| 5 月 21 日 | 0.5441 | 0.9548 | 0.779 | 0.8577 | 727.6613 |
| 6 月 21 日 | 0.5429 | 0.9529 | 0.7726 | 0.857 | 727.6943 |
| 7 月 21 日 | 0.5472 | 0.9539 | 0.7837 | 0.8594 | 727.0677 |
| 8 月 21 日 | 0.5437 | 0.9539 | 0.7903 | 0.8603 | 727.1480 |
| 9 月 21 日 | 0.5477 | 0.9463 | 0.7923 | 0.8568 | 727.6533 |
| 10 月 21 日 | 0.5453 | 0.9378 | 0.7933 | 0.8627 | 727.3577 |
| 11 月 21 日 | 0.5448 | 0.9297 | 0.7860 | 0.8512 | 727.8470 |
| 12 月 21 日 | 0.5449 | 0.9296 | 0.7870 | 0.8560 | 727.5513 |

Table 14. Table of annual average optical efficiency and output power for the third part of question 3

表 14. 问题三第三部分年平均光学效率及输出功率表

| 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 | 年平均输出热功率(MW) | 单位面积镜面年平均输出热功率(kw/m ²) |
|---------|---------|-----------|---------|--------------|------------------------------------|
| 0.5453 | 0.9443 | 0.7839 | 0.5878 | 61 | 727.455 |

Table 15. Design parameter table for the third part of question 3
表 15. 问题三第三部分设计参数表

| 吸收塔位置坐标 | 定日镜尺寸(宽*高) | 定日镜安装高度(m) | 定日镜总面数 | 定日镜总面积(m ²) |
|---------|------------|------------|--------|-------------------------|
| (0, 0) | 见模型三 | 见模型三 | 1745 | 见模型三 |

基金项目

2023 年自治区大学生创新创业训练项目(基于数学模型的无人机遂行飞行中纯方位无缘定位模型研究, S202313644048, 负责人: 梁磊); 桂林电子科技大学信息科技学院 2020 年科研项目(XJ202025); 桂林信息科技学院 2022 年科研项目(XJ202218); 2024 年广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2024KY1728); 2024 年桂林信息科技学院“科研反哺教学”专项课题(XJ2024080)。

参考文献

- [1] 何丽娟. 塔式电站中定日镜场的建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2014.
- [2] 黄鹏, 白帆, 王学峰. 太阳能光伏发电发展趋势分析[J]. 中国科技信息, 2014(Z1): 31-32.
- [3] 李浩. 塔式太阳能热发电传热储能系统建模与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [4] 张智博, 赵晓辉, 崔凯平, 韩伟, 赵坤姣, 苑晔, 钱兆跃, 张乐. 一种混合布置的定日镜场[P]. 中国专利, 实用新型, CN206113375U. 2017-04-19.
- [5] 赵茜. 塔式太阳能热发电系统镜场调度的优化[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [6] 刘世隆, 邓薇. 塔式太阳能热发电技术在我国发展现状与前景分析[J]. 电气技术, 2016(10): 8-10, 22.
- [7] 肖强, 王红艳, 王金平. 太阳能光热发电现状及发展策略分析[J]. 中外能源, 2016, 21(10): 26-30.
- [8] 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.
- [9] 宋丽娜. 定日镜控制系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [10] 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.