

基于蒙特卡洛算法的定日镜场的优化设计

贾倩琼*, 李芊芊*

西安石油大学理学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年2月27日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月27日

摘要

针对定日镜场的优化设计问题, 本文首先建立阴影挡光效率模型, 结合蒙特卡洛与光线追踪法求解阴影遮挡效率; 根据太阳高度角、太阳方位角求解余弦效率、法向直接辐射照度等, 得出光学效率与定日镜场的输出热功率。其次, 建立以单位面积定日镜输出热功率最大为目标的非线性目标规划模型。在给定相邻定日镜间距的范围内, 求得定日镜场中每一圈层的定日镜数目与相邻定日镜的间距大小; 采用Campo布置方法确定定日镜坐标, 利用阴影挡光效率模型, 当额定年平均输出热功率达到60 MW, 求得吸收塔位置坐标(0, 0, 80), 定日镜尺寸(宽 × 高)为(6 m × 6 m), 安装高度为4 m, 定日镜总数为2475面, 定日镜场总面积为89,100 m²。利用Campo方法确定定日镜场中的定日镜排列方式, 能够在简化定日镜场的条件下更为简单的求解定日镜的具体坐标。最后, 保持额定功率不变, 设计定日镜尺寸为(7 m × 7 m)、安装高度为4 m来达到更大单位面积输出热功率。

关键词

定日镜场, 阴影挡光理论, 非线性目标规划, 蒙特卡洛与光线追踪法

Optimization Design of Heliostatic Mirror Field Based on Monte Carlo Algorithm

Qianqiong Jia*, Qianqian Li*

School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi

Received: Feb. 27th, 2024; accepted: Mar. 21st, 2024; published: Mar. 27th, 2024

Abstract

Aiming at the optimization design problem of heliostat field, in this paper, the shadow blocking efficiency model is first established, which combines with Monte Carlo and ray tracing method to

*共同第一作者。

solve the shadow blocking efficiency. According to the solar altitude Angle and solar azimuth Angle, cosine efficiency and direct irradiance of normal phase are solved, get the optical efficiency and the output thermal power of heliostatic field. Secondly, a nonlinear target programming model with the maximum output thermal power of heliostat per unit area is established. Within the range given the spacing of adjacent heliostats, the number of heliostats in each circle and the distance between the adjacent heliostats in the heliostats field are obtained. The coordinates of heliostat were determined by Campo's arrangement method. When the rated annual average thermal output power reached 60 MW, using the shadow blocking efficiency model, the position coordinate of the absorber is (0, 0, 80), and the heliostat size ($W \times H$) is (6 m \times 6 m), the installation height is 4 m, the total number of heliostats is 2475, and the total number of heliostats field is 89,100 m². Using Campo method to determine the heliostat arrangement in heliostat field, the specific coordinates of heliostat can be solved more easily under the condition of simplifying heliostat field. Finally, it keeps the rated power unchanged, designs helioscope size of (7 m \times 7 m), installation height of 4 m to achieve a large unit area of thermal output power.

Keywords

Heliostat Field, Shadow Blocking Theory, Nonlinear Objective Programming, Monte Carlo and Ray Tracing

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

塔式太阳能光热发电是我国为了实现“碳达峰”及“碳中和”推出的一种低碳环保的新型清洁能源技术。一方面,系统利用太阳能进行发电,减少二氧化碳等温室气体的排放,减轻空气污染和水污染,保护生态环境。另一方面,作为以新能源为主体的新型电力系统,该技术能够高效利用太阳能、并可以持续进行发电[1],是一种具有巨大潜力的可再生能源技术。本文采用了蒙特卡洛与光线追踪法对定日镜产生阴影面积进行建模,在给定的额定功率下,建立以单位面积定日镜输出热功率最大为目标的非线性目标规划模型。在控制定日镜的各项参数下,完成了对定日镜场的优化设计。本文采用了2023年高教社杯全国大学生数学建模竞赛A题(https://dxs.moe.gov.cn/zx/a/hd_sxjm_sthb/230523/1840580.shtml)进行分析和研究。

2. 模型建立与求解

2.1. 阴影挡光效率模型

定日镜场中太阳光线的损失主要为三个方面:1)前排定日镜对后排定日镜所接收到太阳光线造成阻挡;2)后排定日镜反射的太阳光线被前排定日镜遮挡;3)吸收塔在太阳照射下形成的阴影对部分定日镜造成遮挡。

建立定日镜 a 镜面坐标系 (X_a, Y_a, Z_a) 、地面坐标系 (X_d, Y_d, Z_d) 和定日镜 b 镜面坐标系 (X_b, Y_b, Z_b) , 判断定日镜 a 的反射光线是否落入定日镜 b 内, 确定其在定日镜 b 的坐标值 K_2 , 定日镜间太阳光线路径如图 1 所示:

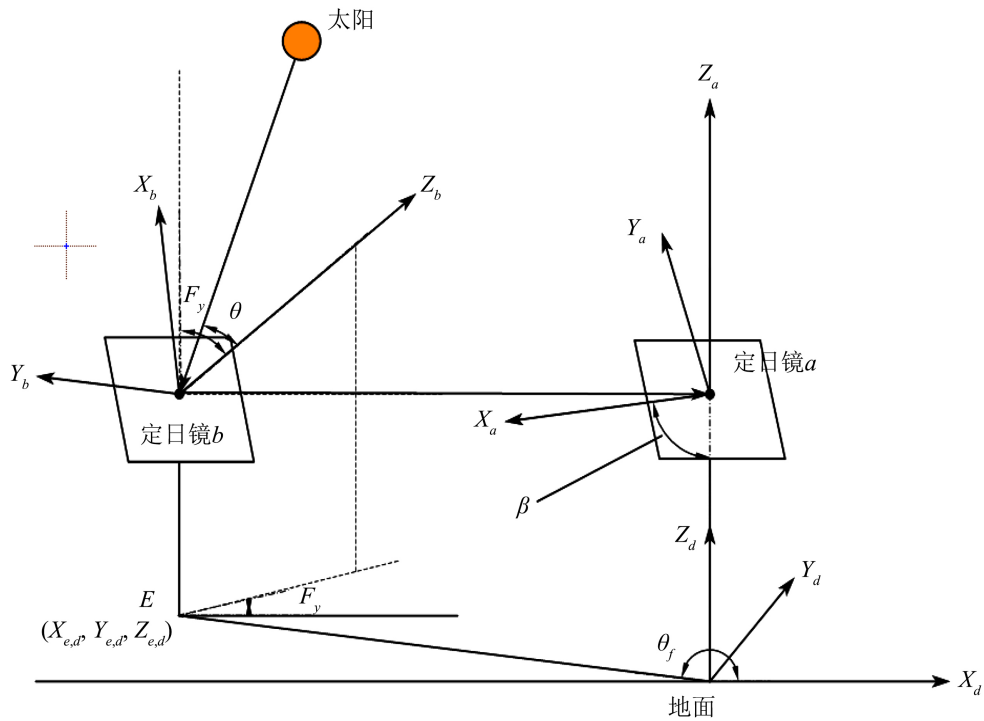


Figure 1. Diagram of the path of sun rays between heliostats
图 1. 定日镜间太阳光线路径示意图

图中给出某定日镜 E 中心在地面坐标系的坐标 $(X_{e,d}, Y_{e,d}, Z_{e,d})$ ，定日镜在整个镜场中方位角

$$\theta_f = \begin{cases} \arccos \frac{X_{e,d}}{\sqrt{X_{e,d}^2 + Y_{e,d}^2}}, & Y_{e,d} \geq 0 \\ \arctan \frac{Y_{e,d}}{X_{e,d}} + \pi, & Y_{e,d} < 0 \end{cases}, \text{ 太阳入射光线与定日镜 } b \text{ 平面法线的夹角 } \theta, \text{ 太阳高度角 } \alpha_s \text{ [2]、太阳}$$

方位角 γ_s [3] 的关系为: $\cos \theta = \frac{\sqrt{2}}{2} [\sin \alpha_s \cos \beta - \cos(\theta_f - \gamma_s) \cdot \cos \alpha_s \sin \beta + 1]^{\frac{1}{2}}$ 。定日镜平面中心法线的俯仰角 $F_y = \arctan \left(\frac{\sin \alpha_s + \cos \beta}{2 \cos \theta} \right)$ 和方位角 $F_w = \arctan \left(\frac{\sin \theta_f \sin \beta - \sin \gamma_s \cos \alpha_s}{\cos \theta_f \sin \beta - \cos \gamma_s \cos \alpha_s} \right)$ [4]。

在定日镜 a 坐标系中的入射点 $K_1 = (x_a, y_a)$ ，经不同坐标系的坐标转换，判断反射光线在定日镜 b 中是否存在入射点 K_2 。定日镜 a 坐标系的三个轴在地面坐标系中的向量为 $(r_x, s_x, t_x), (r_y, s_y, t_y), (r_z, s_z, t_z)$ ，转换关系矩阵表达式(2.1) [5]:

$$G = \begin{bmatrix} r_x & r_y & r_z \\ s_x & s_y & s_z \\ t_x & t_y & t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin F_y & -\sin F_w \cos F_y & \cos F_w \cos F_y \\ \cos F_y & -\sin F_w \sin F_y & \cos F_w \sin F_y \\ 0 & \cos F_w & \sin F_w \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

锥形光线在镜面坐标系向量为 P_j ，在地面坐标系向量 $P_0 = G \cdot P_j$ 。经过以下 5 步得到 $K_2 = (x_b, y_b)$:

- 1) 将定日镜 a 的某一点 K_1 转换为地面坐标系中 K'_1 。
- 2) 将地面坐标系的 K'_1 转换为定日镜 b 坐标系中的 K''_1 。
- 3) 将地面坐标系的光线向量 P_0 转换为定日镜 b 坐标系中的 P_j 。

- 4) 在定日镜 b 坐标系中计算光线与该镜的交点, 由 $K_1'' = (x_a'', y_a'', z_a'')$ 、 $P_j = (x_0, y_0, z_0)$, 解出 $K_2 = (x_b = (z_0 x_a'' - x_0 z_a'')/z_0, y_b = (z_0 y_a'' - y_0 z_a'')/z_0, 0)$ 。
 5) 判断 K_2 是否落入定日镜 b 平面内。

2.2. 大气透射率

定日镜中心到集热器中心距离为 d_{HR} , 大气透射率的计算公式为[6]:

$$\eta_{at} = 0.99321 - 0.0001176d_{HR} + 1.97 \times 10^{-8} \times d_{HR}^2 \quad (d_{HR} \leq 1000) \quad (2.2)$$

2.3. 余弦效率

建立定日镜反射太阳光线图, 如图 2, 集热器中心 A , 定日镜中心 O_z , 太阳入射光线 BO_z , 定日镜反射光线 $O_z A$, xoy 平面的垂线 EF 和 BC , 垂足 F 、 C 。第 i 个定日镜入射角 θ_i , 得到余弦效率[7]

$$\eta_{cos} = \frac{(d_{HR} + \sin \alpha_s h_a + x_z \cos \alpha_s \sin \gamma_s + y_z \cos \alpha_s \sin \gamma_s)^{1/2}}{(2d_{HR})^{1/2}} \quad (2.3)$$

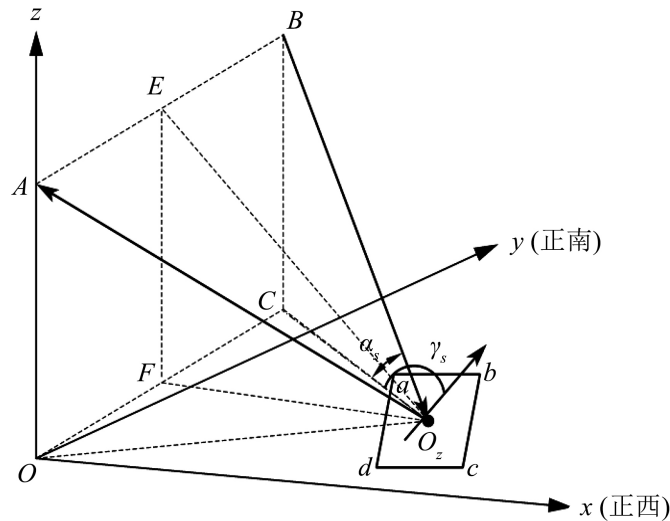


Figure 2. Three-dimensional representation of sunlight reflected by a heliostat
 图 2. 定日镜反射太阳光的三维示意图

2.4. 单个定日镜的光学效率

单个定日镜的光学效率 $\eta = \eta_{sb} \eta_{cos} \eta_{at} \eta_{trunc} \eta_{ref}$ 中阴影遮挡效率 η_{sb} 、余弦效率 η_{cos} 和大气透射率 η_{at} 由之前式子已表示出, 资料显示集热器截断效率 η_{trunc} 取值 60%~90% [8], 镜面反射率 η_{ref} 为 0.92。

2.5. 法向直接辐射辐照度

法向直接辐射辐照度[9]为

$$DNI = G_0 \left[a + b \exp \left(-\frac{c}{\sin \alpha_s} \right) \right]$$

其中: $a = 0.4237 - 0.008216(6 - H)^2$, $b = 0.5055 + 0.00595(6.5 - H)^2$, $c = 0.2711 + 0.01858(2.5 - H)^2$,

$G_0 = 1.366 \text{ kW/m}^2$ 是太阳常数, H 为当地的海拔高度为 3000 m。

2.6. 定日镜场年平均输出热功率的求解

每面定日镜采光面积 A_i 即定日镜尺寸为 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, 由之前给出的各个定日镜的光学效率 η_i 和定日镜场的法向直接辐射辐照度 DNI , 定日镜总数 N 为 1745 面, 按照以下公式即可求出定日镜场的输出热功率: $E_{field} = DNI \cdot \sum_i^N A_i \eta_i$, 得出平均光学效率 $\bar{\eta}$, 平均余弦效率 $\overline{\eta_{cos}}$, 平均阴影遮挡效率 $\overline{\eta_{sb}}$, 平均截断效率 $\overline{\eta_{trunc}}$, 单位面积镜面平均输出热功率 $\left(\frac{E_{field}}{N \times A} \right)$, 结果如表 1 和表 2 所示:

Table 1. Average optical efficiency and output power on 21st per month

表 1. 每月 21 日平均光学效率及输出功率

日期	$\bar{\eta}$	$\overline{\eta_{cos}}$	$\overline{\eta_{sb}}$	$\overline{\eta_{trunc}}$	$\overline{E_{field}} / (N \times A)$
1 月 21 日	0.543440747	0.790895784	0.88722	0.8723459	0.493146841
2 月 21 日	0.55498721	0.806084862	0.87231	0.8890342	0.518939745
3 月 21 日	0.567908242	0.81509369	0.87992	0.8918967	0.564501479
4 月 21 日	0.577014059	0.818542441	0.89003	0.892129	0.593527476
5 月 21 日	0.590836903	0.815817555	0.90402	0.9023679	0.616706666
6 月 21 日	0.596222479	0.806293553	0.92301	0.9023933	0.625373899
7 月 21 日	0.601603651	0.791690147	0.93289	0.9175123	0.628606574
8 月 21 日	0.585272892	0.776101811	0.92331	0.9199819	0.602248936
9 月 21 日	0.572436585	0.765626719	0.91678	0.91861235	0.570268117
10 月 21 日	0.554517146	0.762241825	0.90203	0.90842344	0.520380316
11 月 21 日	0.544281187	0.765515871	0.89133	0.89849923	0.471132767
12 月 21 日	0.537198117	0.775443951	0.88544	0.8812762	0.444665057

Table 2. Annual average optical efficiency and output power

表 2. 年平均光学效率及输出功率

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)
0.568809935	0.790779018	0.900690833	0.899539368	34.81012136	0.554124823

2.7. Campo 布置方法

以吸收塔为中心构造定日镜场为同心圆模型, 每个定日镜的占地范围视为圆形, 依据 Campo 布置方法布置圆形定日镜场, 以定日镜间不发生机械碰撞为原则进行周向均匀布置, 模型示意图如图 3:

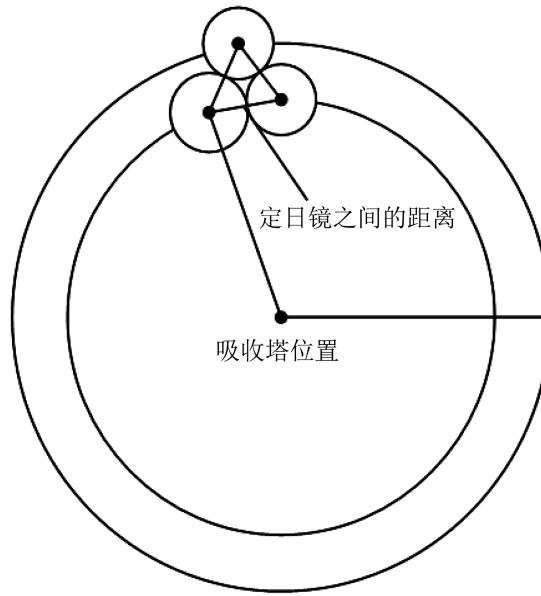


Figure 3. Heliostat field model
图 3. 定日镜场模型

假定定日镜位置坐标为 (X, Y) ，其中 (x_i, y_i) 表示定日镜场中第 i 个定日镜在地面坐标系下的坐标。 $(x_{b,i}, y_{b,i})$ 表示光线在定日镜 b 中的反射点坐标， $x_{i,j}$ 表示第 j 圈圆周上的第 i 个点。构建非线性规划模型表达式如下：

$$\begin{aligned}
 E_{field} &= DNI \sum_{i=1}^N A_i \eta_i \\
 \left\{ \begin{aligned}
 &DNI = G_0 + [a + b \exp(-c/\sin \alpha_s)] \\
 &\eta_i = \eta_{sb,i} \eta_{cos,i} \eta_{at,i} \eta_{trunc,i} \eta_{ref,i} \\
 &\eta_{at,i} = 0.99321 - 0.0001176 d_{HR} + 1.79 \times 10^{-8} d_{HR}^2 \quad (d_{HR} \leq 1000) \\
 &\eta_{cos,i} = \cos \theta_i = d_{HR} + h_a \sin \alpha_s + x_i \cos \alpha_s \sin \gamma_s + y_i \cos \alpha_s \sin \gamma_s / (2d_{HR})^{\frac{1}{2}} \\
 &\eta_{sb,i} = (x_{b,i} - 3)(y_{b,i} - 3)/36 \\
 &100 < |x_i| < 350 \\
 &100 < |y_i| < 350 \\
 &11 < a < 14 \\
 &\sqrt{(x_{i+1,j} - x_{i,j})^2 + (y_{i+1,j} - y_{i,j})^2} > a \\
 &\sqrt{(x_{i,j} - x_{i,j+1})^2 + (y_{i,j} - y_{i,j+1})^2} > a \\
 &r_j = \begin{cases} 106 & j = 1 \\ 106 + aj & j > 1 \end{cases} \quad (j \text{ 表示的是第 } j \text{ 圈; 其中 } 100 < |r_j| < 350)
 \end{aligned} \right. \tag{2.4}
 \end{aligned}$$

利用 Python 进行编程，将定日镜间的距离从 11 m 开始，以 0.1 m 的步长增加至 14 m， R 表示定日

镜场的圆周半径, r 为定日镜场圆周上单个定日镜中心的半径, 依据定日镜之间距离以及 R 求得每个圈层内设置的定日镜个数 $n = 360 \times [2 \times \arcsin(r/R)]$ 。

编程所绘制的不同间距定日镜安排示意图 4 如下:

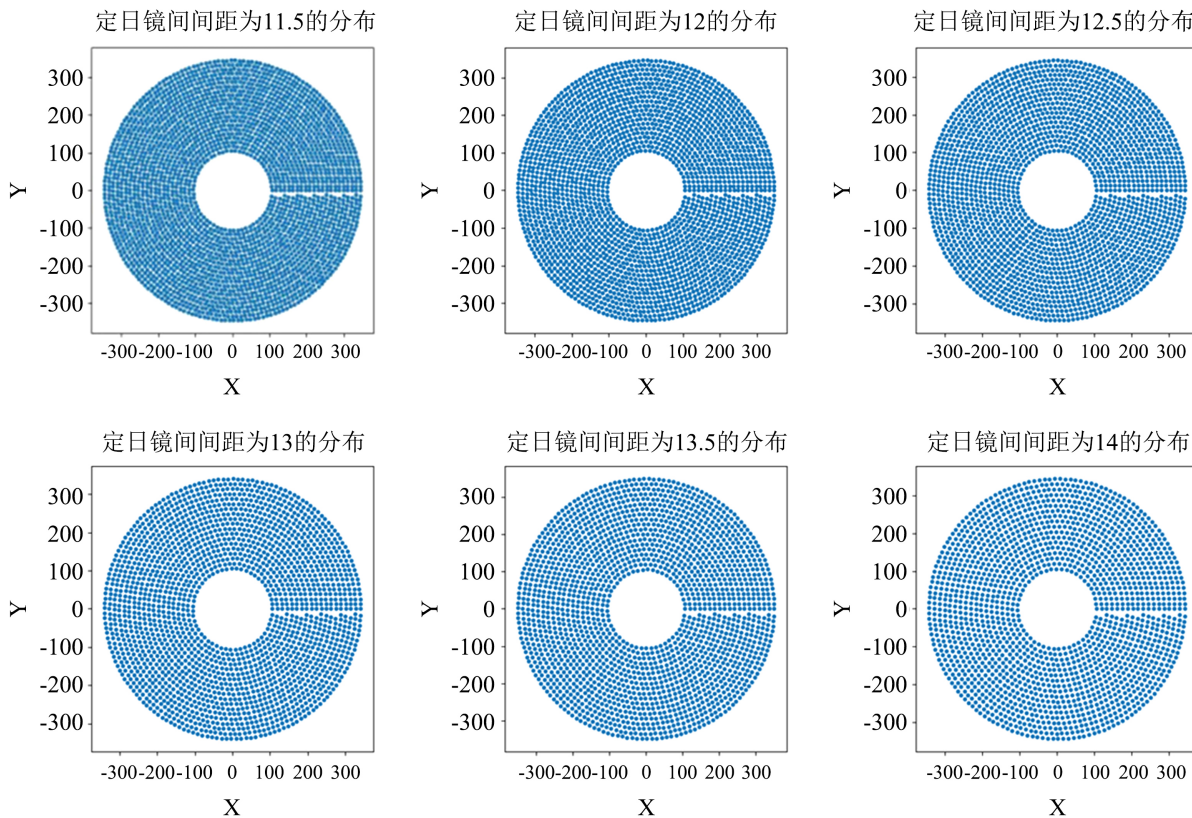


Figure 4. Schematic diagram of heliostat arrangement with different spacing
图 4. 不同间距定日镜安排示意图

得出最优的相邻定日镜之间的间距为 12 m, 在满足定日镜场的额定年平均输出热功率为 60 MW 的情况下, 求得相关数据为: 吸收塔位置坐标(0, 0, 80), 定日镜尺寸(宽 × 高)为(6 m × 6 m), 其安装高度为 4 m, 定日镜总数为 2475 面, 定日镜场总面积为 89,100 m²。

2.8. 求解更大的单位面积输出热功率

保持额定功率不变, 设计定日镜尺寸和安装高度达到更大的单位面积输出热功率。现将定日镜的尺寸从原来的 6 m × 6 m 增加至 7 m × 7 m [10], 使相邻镜面在不超过间距范围的同时达到最大的镜面尺寸; 接着为了尽可能增大定日镜的输出热功率, 使定日镜从内圈至外圈的安装高度逐次递增, 由题可知, 安装高度的范围是 3.5 m~6 m。

为确定各圈层所包含的定日镜数目, 利用 MATLAB 进行编程[11], 搜索满足各圈层半径范围内定日镜的个数, 再逐个相减, 即可求得从内至外各圈层内包含的定日镜的数目, 之后将安装高度分成 20 等份, 在 Excel 表格中为各圈层内的定日镜附加上其安装高度的数值。最后将所得的数值代入上述的 Python 代码, 并增加上关于定日镜安装高度的关系函数, 即可求得各项数值。结果如表 3、表 4 和表 5 所示:

Table 3. Average optical efficiency and output power on the 21st day of each month after optimization
表 3. 优化后的每月 21 日平均光学效率及输出功率

日期	$\bar{\eta}$	$\overline{\eta_{cos}}$	$\overline{\eta_{sb}}$	$\overline{\eta_{trunc}}$	$\left[\frac{E_{field}}{(N \times A)} \right]$
1 月 21 日	0.523745568	0.763128059	0.88722	0.8723459	0.475274395
2 月 21 日	0.532102309	0.773754046	0.87231	0.8890342	0.49754126
3 月 21 日	0.549914813	0.790195917	0.87992	0.8918967	0.546615989
4 月 21 日	0.56768292	0.806251682	0.89003	0.892129	0.583929291
5 月 21 日	0.590019553	0.815646237	0.90402	0.9023679	0.615853529
6 月 21 日	0.605040133	0.819179402	0.92301	0.9023933	0.634622679
7 月 21 日	0.619645784	0.816391126	0.93289	0.9175123	0.647458526
8 月 21 日	0.607461142	0.806471063	0.92331	0.9199819	0.625080764
9 月 21 日	0.590742135	0.791038547	0.91678	0.91861235	0.588504323
10 月 21 日	0.562741657	0.774456199	0.90203	0.90842344	0.528098515
11 月 21 日	0.542031167	0.763247051	0.89133	0.89849923	0.469185138
12 月 21 日	0.525610674	0.759609008	0.88544	0.8812762	0.435073565

Table 4. Annual average optical efficiency and output power
表 4. 年平均光学效率及输出功率

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)
0.568061488	0.789947361	0.900690833	0.899539368	67178.64878	0.553936498

Table 5. Design parameter
表 5. 设计参数

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(面)	定日镜总面积(m ²)
(0, 0, 80)	7 m × 7 m	4	2475	121,275

3. 结论

本文针对定日镜场的优化设计问题, 建立阴影挡光效率模型和以单位面积定日镜输出热功率最大为目标的非线性目标规划模型。

在定日镜尺寸确定情况下, 得出表 1 和表 2 定日镜场的平均年光学效率、年平均输出热功率, 以及单位镜面面积年平均输出热功率。

在定日镜场额定年平均输出热功率为 60 MW 情况下, 得出最优的相邻定日镜之间的间距为 12 m, 在满足定日镜场的额定年平均输出热功率为 60 W 的情况下, 求得相关数据为: 吸收塔位置坐标(0, 0, 80), 定日镜尺寸(宽 × 高)为(6 m × 6 m), 其安装高度为 4 m, 定日镜总数为 2475 面, 定日镜场总面积为 89,100 m²。

在定日镜场达到额定功率的条件下, 单位镜面面积年平均输出热功率尽量大, 得出按表 5 的设计参数。

参考文献

- [1] 24 小时连续发电!“清洁+储能+调峰”, 超万面定日镜“绽放”戈壁滩[EB/OL]. <https://news.cctv.com/2023/08/14/ARTIJJaYKT6LbTf30MOzHkBY230814.shtml>, 2023-09-08.
- [2] 百度百科, 太阳高度角[EB/OL]. https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E9%AB%98%E5%BA%A6%E8%A7%92?fromModule=lemma_search-box, 2023-09-08.
- [3] 百度百科, 太阳方位角[EB/OL]. https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E6%96%B9%E4%BD%8D%E8%A7%92?fromModule=lemma_search-box, 2023-09-08.
- [4] 余强, 徐二树, 常春, 杨正. 塔式太阳能电站定日镜场的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(23): 90-97.
- [5] 张平, 华文瀚, 王娟娟, 孙登科. 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.
- [6] Farges, O., Bezan, J.J. and El Hafi, M. (2018) Global Optimization of Solar Power Tower Systems Using a Monte Carlo Algorithm: Application to a Redesign of the PS10 Solar Thermal Power Plant. *Renewable Energy*, **119**, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.028>
- [7] 潘磊, 李丽娟, 丁婷婷. 塔式太阳能热发电镜场中余弦效率仿真研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(2): 1-5.
- [8] 房淼森. 塔式太阳能发电系统镜场分布及其控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2016.
- [9] 杜宇航, 等. 塔式光热电站定日镜不同聚焦策略的影响分析[J]. 动力工程学报, 2020, 40(5): 426-432.
- [10] 高博, 刘建兴, 孙浩, 等. 基于自适应引力搜索算法的定日镜场优化布置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 119-125.
- [11] 姜启源, 谢金星, 叶俊. 数学模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.