

定日镜场的光热转化与配置优化研究

许尔文, 黄初*

杭州师范大学数学学院, 杭州 浙江

收稿日期: 2024年3月27日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

定日镜是一种捕捉和聚焦太阳光的光学组件, 优化其配置和排列方式有助于最大限度地吸收太阳能并将其转化为热量。本文基于定日镜的光学性质, 建立局部镜面坐标系和整体坐标系之间的坐标变换, 根据中心极限定理, 以反射光线整体误差为标准差, 将集热器的截断效率和高斯分布相关联, 对镜场输出热功率进行测算, 初步建立了光热转化模型。在此基础上, 本文根据整体效益最大化原则和光照均匀性理论, 设立圆形径向交错的排列规则, 以避免定日镜之间的光线遮挡, 利用遗传算法对定日镜场的配置进行优化设计, 将吸收塔约束于南偏西的光学效率较低处, 实现能源效率的最大化, 得到定日镜场年平均光学效率的优化率为16.65%, 单位镜面面积的年平均输出热功率的优化率为12.18%, 模型科学且有效。

关键词

定日镜, 坐标变换, 反射定律, 遗传算法

Research on Photothermal Conversion and Configuration Optimization of Heliostat Mirror Field

Erwen Xu, Chu Huang*

School of Mathematics, Hangzhou Normal University, Hangzhou Zhejiang

Received: Mar. 27th, 2024; accepted: Apr. 23rd, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

A heliostat is an optical component that captures and focuses the sun's rays, and optimizing its configuration and arrangement helps maximize the absorption of solar energy and convert it into heat. Based on the optical properties of the heliostat, the coordinate transformation between the

*通讯作者。

文章引用: 许尔文, 黄初. 定日镜场的光热转化与配置优化研究[J]. 应用数学进展, 2024, 13(4): 1709-1722.

DOI: 10.12677/aam.2024.134162

local mirror coordinate system and the global coordinate system is established, and according to the central limit theorem, the overall error of the reflected light is taken as the standard deviation, the truncation efficiency of the collector is correlated with the Gaussian distribution, and the output heat power of the mirror field is calculated, and the photothermal conversion model is preliminarily established. On this basis, according to the principle of maximizing the overall benefit and the theory of illumination uniformity, this paper establishes a circular radial staggered arrangement rule to avoid the light occlusion between heliostats, uses genetic algorithm to optimize the configuration of the heliostat field, and restricts the absorption tower to the low optical efficiency of the south-west to maximize the energy efficiency, and obtains that the optimization rate of the annual average optical efficiency of the heliostat field is 16.65%, and the optimization rate of the annual average output thermal power per unit mirror area is 12.18%, and the model is scientific and effective.

Keywords

Heliostat, Coordinate Transformation, Reflection Law, Genetic Algorithm

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

我国正努力实现“双碳”目标,其中大力推进具有环保和低碳排放特点的新型清洁能源技术——塔式太阳能光热发电是一项核心举措,而定日镜作为塔式电站光热发电系统中的重要构件,其聚焦零落的太阳光线并将其传导到吸收塔中的功能,大大提高了太阳能光热系统的光学功率和能源密度。因此,研究定日镜的性质和配置排列方式有助于实现能源高效转换与充分利用,并为能源的可持续发展做出贡献。

本文将基于所获取的数据,综合运用反射定律、坐标转化、能流密度分布等数学物理知识,建立空间模型以求解定日镜场的光学效率和输出热功率,并从定日镜的排布方式、吸收塔的阴影域、光学效率的呈现分布三个角度考虑,利用遗传算法优化定日镜场的排列设计,使得达到额定功率的情况下,单位镜面面积年平均输出热功率最大。

其中,阴影挡光损失的计算通常涉及到复杂的几何关系,例如太阳位置、定日镜的几何形状等,本文通过坐标转换,将坐标系转换为统一的标准,对不同定日镜上的光线遮挡情况进行有效的刻画和评估。此外,本文使用的遗传算法在优化模型中具有较高的适配性和解决能力,能够较好地处理高维参数且出现多种局部最优解的搜索空间,且在搜索过程中同时考虑多个解,增加算法对噪声和随机扰动的鲁棒性。

2. 定日镜场的概念模型建立

定日镜是塔式太阳能光热发电站(以下简称塔式电站)收集太阳能的基本组件,其底座由纵向转轴和水平转轴组成,平面反射镜安装在水平转轴上。纵向转轴的轴线与地面垂直,可以控制反射镜的方位角。水平转轴的轴线与地面平行,可以控制反射镜的俯仰角,两转轴的交点(也是定日镜中心)离地面的高度称为定日镜的安装高度。定日镜将太阳光反射汇聚到安装在镜场中吸收塔顶端上的集热器,加热其中的导热介质,并将太阳能以热能形式储存起来,再经过热交换实现由热能向电能的转化。太阳光并非平行光线,而是具有一定锥形角的一束锥形光线,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[1]。定日镜及底座示意图如图 1:

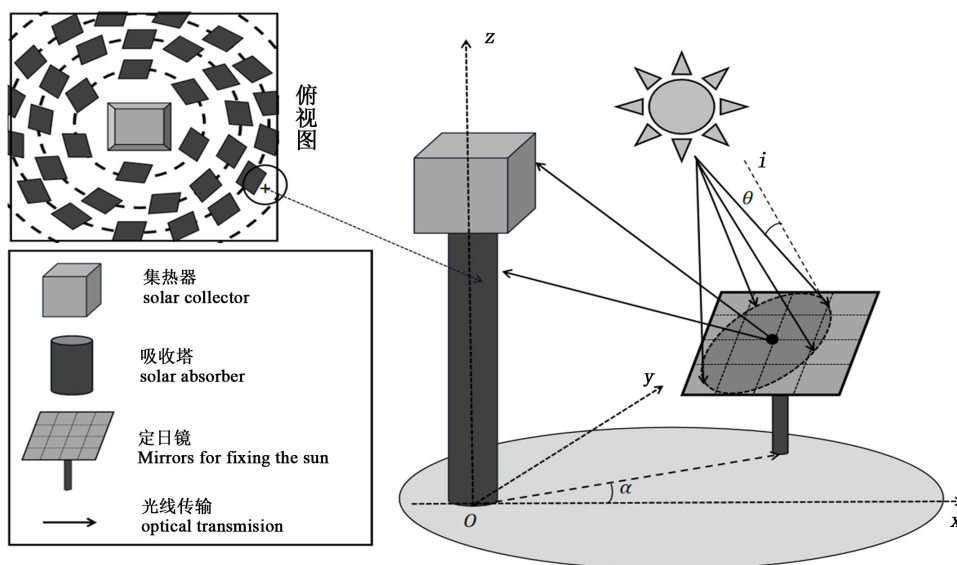


Figure 1. Schematic diagram of the heliostat field

图 1. 定日镜场示意图

本文假设在中心位于东经 98.5° , 北纬 39.4° , 海拔 3000 m, 半径 350 m 的圆形区域内建设一个圆形定日镜场。以圆形区域中心为原点, 正东方向为 x 轴正向, 正北方向为 y 轴正向, 垂直于地面向上方向为 z 轴正向建立坐标系, 称为镜场坐标系。规划的吸收塔高度为 80 m, 集热器采用高 8 m、直径 7 m 的圆柱形外表受光式集热器。吸收塔周围 100 m 范围内不安装定日镜, 留出空地建造厂房, 用于安装发电、储能、控制等设备。此外, 镜面边长在 2 m 至 8 m 之间, 安装高度在 2 m 至 6 m 之间, 安装高度保证镜面在绕水平转轴旋转时不会触及地面。为简化计算, 本文中所有“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。

3. 基于光学性能理论的镜场输出热功率测算

3.1. 坐标系的建立与变换

为了研究太阳入射光线在每个平面定日镜上的反射过程, 本文需要建立定日镜和采光点的局部坐标系, 以便后续通过向量的运算确定阴影的遮挡损失情况等。

由线性代数知识, 在给定的线性空间中, 任意两个笛卡尔坐标系之间只需通过平移和旋转即可完成转换。以地面坐标系作为参考坐标系 C_0 , 其原点位于东经 98.5° , 北纬 39.4° , 海拔 3000 m 处。镜场中任一一定日镜的局部坐标系 $C_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 的 3 个坐标轴在 C_0 中的方向余弦分别为 (p_x, q_x, r_x) 、 (p_y, q_y, r_y) 和 (p_z, q_z, r_z) 。因此, 假设镜面坐标系中某离散点的坐标为 $A_1(x_1, y_1, 0)$, 则它在地面坐标系 C_0 中的坐标为 $A_0(x_0, y_0, z_0)$, 满足:

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x & p_y & p_z \\ q_x & q_y & q_z \\ r_x & r_y & r_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, (O_x, O_y, O_z) 是该镜面坐标系 C_i 的原点在地面坐标系 C_0 中的坐标。上式也可表示成:

$$A_0 = T_{strew} \cdot A_1 + O_0 \quad (2)$$

此处, T_{strew} 是两坐标系之间的旋转矩阵。由旋动理论的旋转变换关系 Rodrigues 等式[2], 存在一个

旋转向量 $u = (u_x, u_y, u_z)$, 由其构成的关系矩阵 U 为反向斜对称矩阵, 其结构为:

$$U = \begin{bmatrix} 0 & -u_z & u_y \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

且旋转矩阵 T_{strew} 与 U 之间满足下述关系式:

$$T_{strew} = [I + U][I - U]^{-1} \quad (4)$$

考虑到 U 是奇异矩阵, 本文可以任取空间中的两个向量, 已知它们在地面坐标系 C_0 和镜面坐标系 C_i 下的坐标, 通过构造增广矩阵方程即可求得两坐标系之间的旋转向量 u 。此外, 还需将旋转矩阵 T_{strew} 中的 3 个列向量归一化, 使之成为正交矩阵[3], 具体示意如图 2:

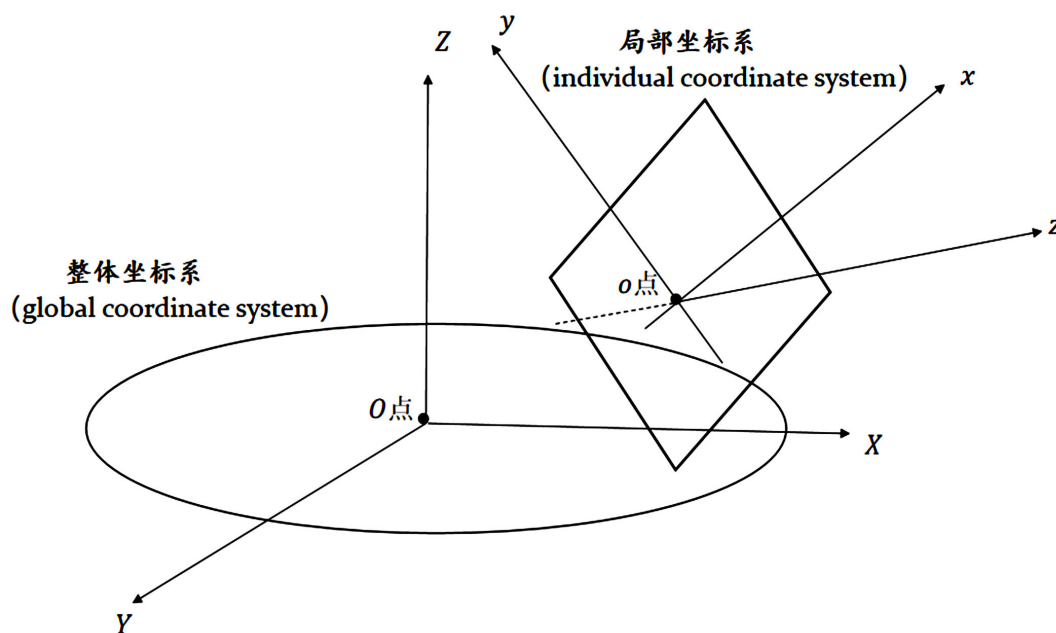


Figure 2. Schematic diagram of coordinate system transformation
图 2. 坐标系转化示意图

3.2. 镜场年平均光学效率的推算

不妨假设, 该吸收塔位于圆形定日镜场的中心, 定日镜尺寸均为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$, 安装高度均为 4 m , 且给定所有定日镜中心的位置, 则该定日镜场的年平均光学效率 η_p 满足下式:

$$\eta_p = \frac{1}{12} \sum_i^N \sum_j^{Time} \eta_{sb} \eta_{\cos} \eta_{at} \eta_{trunc} \eta_{ref} \quad (5)$$

其中, 对任一特定时刻(每月 21 日 9:00、10:30、12:00、13:30、15:00), 每个定日镜的光学效率表示为:

$$\eta = \eta_{sb} \eta_{\cos} \eta_{at} \eta_{trunc} \eta_{ref} \quad (6)$$

它包括了阴影挡光效率 η_{sb} 、余弦效率 η_{\cos} 、大气透射率 η_{at} 、集热器的截断效率 η_{trunc} 和镜面反射率 η_{ref} 。下文将逐一对其进行分析。

其中, 定日镜的光学效率示意图如图 3:

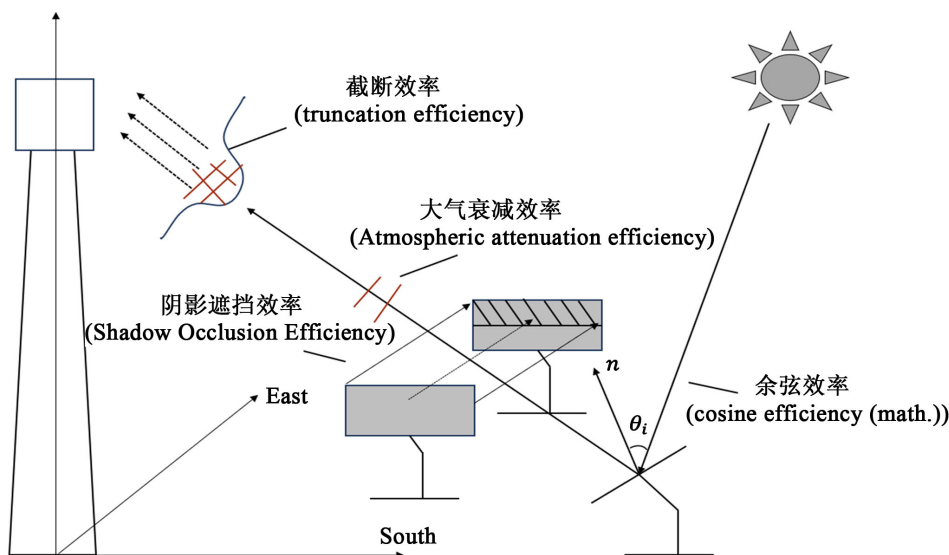


Figure 3. Schematic diagram of the optical efficiency of a heliostat
图 3. 定日镜的光学效率示意图

3.2.1. 阴影挡光效率

通过分析可知其基本表达式为:

$$\eta_{sb} = 1 - \text{阴影遮挡损失} \quad (7)$$

阴影遮挡损失是指: 在太阳能镜场设置中, 若一个定日镜的阴影投射到另一定日镜的反射面, 或者其反射的光束照射到另一定日镜的背部, 就会导致整个镜场接收到的太阳光线减少[4]。而一般定义下, 阴影遮挡损失应考虑吸收塔对镜场造成的阴影损失、前排定日镜对后排定日镜的入射太阳光线造成的阴影损失、后排定日镜的出射光线被前排定日镜遮挡造成的挡光损失共三部分。

由于吸收塔周围 100 m 范围内不安装定日镜, 因此需要由计算吸收塔在地面的投影面积。已知太阳高度角 α_s 的计算公式[5]:

$$\sin \alpha_s = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi \quad (8)$$

其中, φ 为当地纬度(北纬为正), ω 为太阳时角, 满足:

$$\omega = \frac{\pi}{12} (ST - 12) \quad (9)$$

其中, ST 为当地时间, δ 为太阳赤纬角, 满足:

$$\sin \delta = \sin \frac{2\pi D}{365} \sin \left(\frac{2\pi}{360} 23.45 \right) \quad (10)$$

其中, D 为以春分作为第 0 天起算的天数。

将太阳高度角 α_s 代入下式:

$$H_{tower} = \tan \alpha_s h_{shadow} \quad (11)$$

其中, H_{tower} 为吸收塔高度, h_{shadow} 为其影子长度。

计算可得, 恰好覆盖到定日镜安置范围 100 m 处的临界值 $\sin \alpha_{s0}$ 约为 0.6247。即当太阳高度角小于 $\arcsin \alpha_{s0}$ 时, 部分定日镜会受到吸收塔的阴影遮挡, 通过等比例放缩可求得吸收塔对镜场造成的阴影损

失面积满足:

$$S_{shadow} = \cot \alpha_s D_{tower} (\cot \alpha_s H_{tower} - 100) \tag{12}$$

其中, S_{shadow} 为阴影损失面积, D_{tower} 为吸收塔的直径。

在此基础上, 还需计算定日镜重合分布造成的相邻镜面间的遮挡损失, 如图 4 所示:

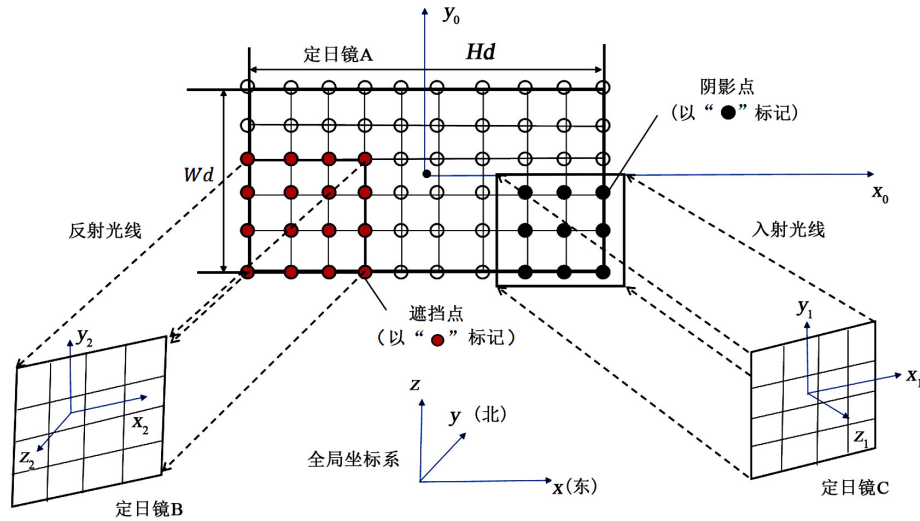


Figure 4. Schematic diagram of the shadow blocking of the front and rear heliostats
图 4. 前后定日镜的阴影挡光示意图

探究阴影挡光损失的过程, 实则是计算通过定日镜 A 上任一点的入射光线或反射光线, 沿着相反的方向是否会落入其相邻定日镜 B 所在的区域, 并利用坐标变换求出该光线在 B 镜面坐标系下的坐标[1]。

假设某光线(入射或反射)在地面坐标系 C_0 下的坐标为 \vec{V}_0 , 该光线在镜面局部坐标系下的坐标为 $\vec{V}_m = (m, n, l)$, 则利用两坐标系间的旋转矩阵 T_{strew} 有:

$$\vec{V}_m = \begin{pmatrix} p_x & p_y & p_z \\ q_x & q_y & q_z \\ r_x & r_y & r_z \end{pmatrix}^T \cdot \vec{V}_0 \tag{13}$$

若该光线在定日镜 A 坐标系上的采光点坐标为 $H_1 = (x_1, y_1)$, 设其在地面坐标系 C_0 下的向量坐标为 H_1' , 转换到定日镜 B 坐标系上的坐标为 H_1'' , 则根据两点一线原理可求得该光线与定日镜 B 之间的交点。具体步骤如下:

$$H_1' = \begin{pmatrix} p_x & p_y & p_z \\ q_x & q_y & q_z \\ r_x & r_y & r_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \end{pmatrix} + O_A = \begin{pmatrix} x_1' \\ y_1' \\ z_1' \end{pmatrix} \tag{14}$$

其中, O_A 为镜 A 的坐标原点在 C_0 下的向量坐标, 同理有:

$$H_1'' = \begin{pmatrix} p_x & p_y & p_z \\ q_x & q_y & q_z \\ r_x & r_y & r_z \end{pmatrix}^T \cdot (H_1' - O_B) = \begin{pmatrix} x_1'' \\ y_1'' \\ z_1'' \end{pmatrix} \tag{15}$$

其中, O_B 为镜 B 的坐标原点在 C_0 下的向量坐标。

将 C_0 坐标系下的光线向量 \vec{V}_0 转换到镜面坐标系 B, 得到坐标 \vec{V}_m 表示为:

$$\vec{V}_m = \begin{pmatrix} p_x & p_y & p_z \\ q_x & q_y & q_z \\ r_x & r_y & r_z \end{pmatrix}^T \cdot \vec{V}_0 = \begin{pmatrix} m \\ n \\ l \end{pmatrix} \quad (16)$$

联立直线方程即可得到落入定日镜 B 中的向量坐标 $H_2 = (x_2, y_2, 0)$ 。

解:

$$\frac{x_2 - x_1''}{m} = \frac{y_2 - y_1''}{n} = \frac{-z_1''}{l} \quad (17)$$

$$\text{得: } \begin{cases} x_2 = \frac{lx_1'' - mz_1''}{l} \\ y_2 = \frac{ly_1'' - nz_1''}{l} \end{cases} \quad (18)$$

由此, 即可判断 H_2 是否落入镜面 B 的镜面区域。

3.2.2. 余弦效率

由于镜面法线与太阳入射光线有一定角度 θ , 所以会造成余弦损失, 定义余弦效率 $\eta_{\cos} = \cos \theta$, 其物理意义为表示定日镜面实际接受光照的面积和总面积的比值, 对于单个定日镜而言, 余弦效率随角度 θ 的减小而增大[6]。其具体计算方法如下:

对于定日镜面法线与太阳入射光线夹角 θ 的求解, 根据几何光学的知识, 反射角与入射角是相等的, 其值均为 θ , 因此可以将问题转化为研究入射光线和反射光线。

首先, 太阳入射光线的方向向量 \vec{I} 可以表示为

$$(\cos \alpha_s \sin \gamma_s, -\cos \alpha_s \cos \gamma_s, -\sin \alpha_s) \quad (19)$$

其中 α_s 为太阳高度角, γ_s 为太阳方位角, 且已知太阳方位角余弦值的计算公式为

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \delta - \sin \alpha_s \sin \varphi}{\cos \alpha_s \cos \varphi} \quad (20)$$

其中 δ 为太阳赤纬角, φ 为当地纬度。

对于反射光线, 其方向由定日镜面中心指向集热器中心, 而定日镜面中心坐标为 (x, y, H_d) , 集热器中心坐标为 $(0, 0, H_{tower})$, 因此反射光线的方向向量 \vec{R} 可以表示为

$$\left(\frac{-x}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H_{tower} - H_d)^2}}, \frac{-y}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H_{tower} - H_d)^2}}, \frac{H_{tower} - H_d}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H_{tower} - H_d)^2}} \right) \quad (21)$$

其中 H_{tower} 为吸收塔高度, H_d 为定日镜安装高度。于是根据

$$\theta = \frac{1}{2} \arccos(-\vec{I} \cdot \vec{R}) \quad (22)$$

即得余弦效率的值。通过计算得到年平均余弦效率为 0.7730。

因为太阳相对于各面定日镜的位置在实时发生变化, 且定日镜面的朝向各异, 因此余弦效率的值也在实时进行改变, 而余弦效率在较大程度上反映了定日镜场的采光情况, 所以对平均光学效率有着较大

影响。此外, 还可以根据入射光线和反射光线的方向向量求出定日镜面的法线 \vec{n} , 利用反射定律[7], 有:

$$\vec{I} + \vec{R} = 2\vec{n} \cos \theta \quad (23)$$

镜面法线的求解对于研究定日镜的朝向以及建立镜面坐标系有着直接联系。

3.2.3. 大气透射率

大气透射率是指大气对可见光的透过程度, 用来刻画太阳辐射经过大气层时的折损程度。太阳能传输损失是由大气对太阳辐射的吸收和散射导致的, 透射率的范围通常在 0 到 1 之间, 越接近 1 表示大气透明度越高, 光线传播损失越小。其基本表达式[8]为:

$$\eta_{at} = 0.99321 - 0.0001176d_{HR} + 1.97 \times 10^{-8} \times d_{HR}^2 \quad (d_{HR} \leq 1000) \quad (24)$$

$$d_{HR} = \sqrt{(80 - H_d)^2 + r^2} \quad (25)$$

其中, H_d 为定日镜的安装高度, r 为定日镜在镜场的分布半径, d_{HR} 为镜面中心到集热器中心的直线距离。由此可知, 当外界环境条件一定时, 太阳辐射传输折损与定日镜到集热器中心的直线距离有关, 定日镜距集热器越远, 太阳辐射传输折损越大。因此, 镜场的规模越大, 大气透射率越低[9]。

3.2.4. 集热器的截断效率

通过分析可得其基本表达式为:

$$\eta_{trunc} = \frac{\text{集热器接收能量}}{\text{镜面全反射能量-阴影遮挡损失能量}} \quad (26)$$

分析可知, 它表示的是集热器截获的能量占镜场汇聚的能量的百分比, 而镜场汇聚的总能量应考虑的是去除阴影挡光后能反射出的太阳光线。

由 HFLCAL 的假设, 利用中心极限定理可证明, 定日镜在集热器开口平面上的能流密度分布接近圆形高斯分布, 且该定理指出两个或多个分布函数(日形误差和镜面误差等)的卷积向高斯分布收敛[10]。由此, 截断效率 η_{trunc} 可表示为:

$$\eta_{trunc} = \frac{1}{2\pi\sigma_{tot}^2} \int_{(x)} \int_{(y)} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2 \cdot \sigma_{tot}^2}\right) dy \cdot dx \quad (27)$$

其中, σ_{tot} 为反射光线的整体误差。由 Rabl (1985), 通量分布的离散度可以计算为:

$$\sigma_{tot} = \left[\sigma_{sunshape}^2 + \sigma_{mirror}^2 + (2 \cdot \sigma_{track})^2 \right]^{1/2} \quad (28)$$

其中, $\sigma_{sunshape}$ 为太阳形状的标准误差, σ_{mirror} 为定日镜的面形误差, σ_{track} 为定日镜的跟踪误差。而根据 Neumann 等人(2002)收集的 DLR 太阳形状的平均剖面 and 测量结果, 可以独立于 DNI 使用 $\sigma_{sunshape}$ 为 2.09 mrad。

此外, 本文采用定日镜的平面面形误差[11] σ_{mirror} 为 1.801 mrad, 而根据 Sener 定日镜的测试结果[12], 其跟踪误差 σ_{track} 取值为 0.63 mrad。

因此, 将上述参数代入公式, 可得整体误差 σ_{tot} 为 3.033, 平均截断效率 η_{trunc} 为 0.9255。

3.2.5. 平均光学效率

基于上文, 可推得各月特定时刻的阴影遮挡效率、余弦效率, 各定日镜的大气透射率以及集热器的截断效率, 不妨取镜面反射率为常数 $\eta_{ref} = 0.92$, 可以算出各月特定时刻的光学效率, 由此, 月平均光学效率和年平均光学效率均可求出, 其中各项的月平均值如图 5 所示:

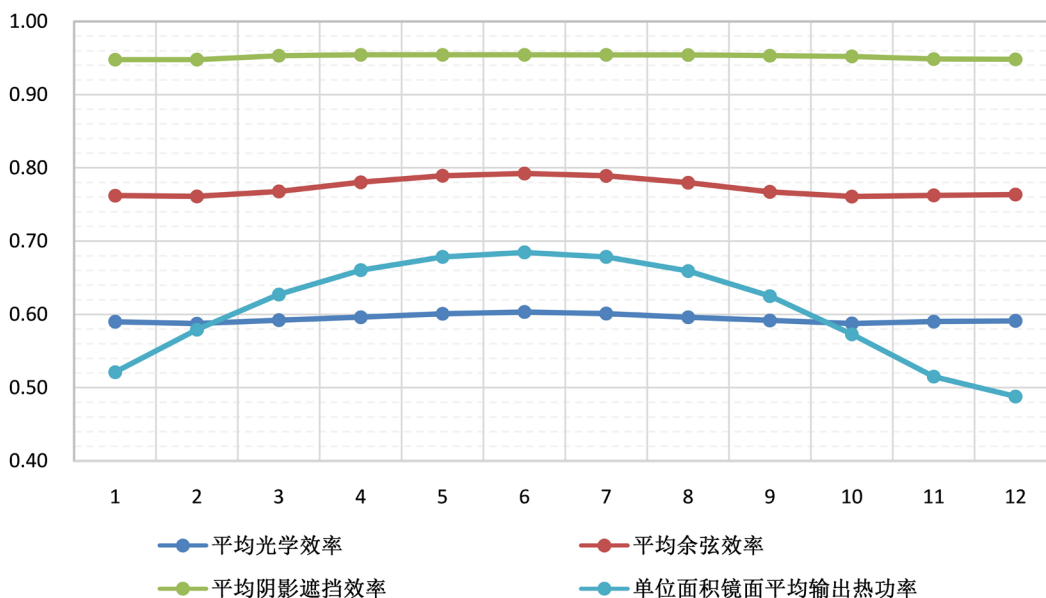


Figure 5. Line chart for each indicator over month
图 5. 各指标随月份变化折线图

从图 5 可以看出, 在各项效率中, 月平均光学效率、平均余弦效率、平均阴影遮挡效率、平均截断效率的波动较为稳定, 而单位面积镜面平均输出热功率呈现出先增大后减少的趋势。

3.3. 定日镜场的输出热功率

法向直接辐射辐照度 DNI (单位: kW/m²)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, 可按以下公式近似计算[7]:

$$\begin{aligned}
 a &= 0.4237 - 0.00821(6.0 - H)^2 \\
 b &= 0.5055 + 0.00595(6.5 - H)^2 \\
 c &= 0.2711 + 0.01858(2.5 - H)^2
 \end{aligned} \tag{29}$$

其中 $H = 3 \text{ km}$ 为圆形定日镜场的海拔高度, 计算得 $a = 0.34981$, $b = 0.57839$, $c = 0.27575$, 由:

$$DNI = G_0 \left[a + b \exp\left(-\frac{c}{\sin \alpha_s}\right) \right] \tag{30}$$

其中 $G_0 = 1.366 \text{ kW/m}^2$, 为太阳常数, α_s 为太阳高度角, 根据得到的每一特定时刻的太阳高度角正弦值, 可以计算出对应的每一特定时刻的 DNI, 再根据:

$$E_{field} = DNI \cdot \sum_{i=1}^N A_i \eta_i \tag{31}$$

其中 A_i 为第 i 个定日镜面积, η_i 为其对应的光学效率, 可以求出各时刻的输出热功率。

最后, 得到年平均输出热功率为 38.16 MW, 单位面积定日镜面年平均输出热功率为 0.6075KW。

3.4. 结果分析

现将年平均光学效率、输出功率等数据结果汇总如表 1:

Table 1. Average optical efficiency and output power meter over the year
表 1. 年平均的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)
0.5940	0.7730	0.9520	0.9255	38.16	0.6075

从另一角度进行分析, 对于每一面定日镜, 同样可以求出一年内的平均光学效率, 为进一步考察平均值的区域分布特征, 本文将这一结果做了可视化处理, 具体效果如图 6:

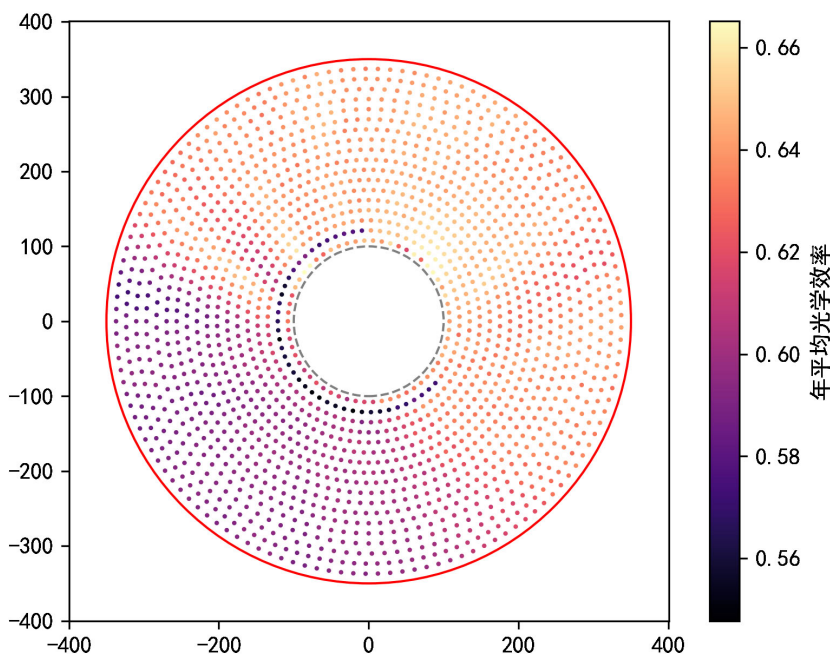


Figure 6. Heat map of the annual average optical efficiency of a heliostat under coordinate distribution
图 6. 坐标分布下定日镜年平均光学效率热力图

基于以上结果图, 可以作出以下分析: 该圆形定日镜场在一年中的平均光学效率大致呈现出东北高西南低的分布, 这与该地处于北半球相关, 太阳光线来自于偏南方位置, 因此从镜面朝向来看, 应是位于北面的定日镜采光效果更好。上述结果有利于进一步分析决策过程中吸收塔位置坐标的确定, 以及定日镜的数量与位置排布等优化配置。

4. 基于遗传算法的定日镜场优化设计

4.1. 模型的构建

针对定日镜场的优化配置问题, 本文首先考虑定日镜的排布方式, 需要尽量避免定日镜的光线遮挡以获取效率最大化, 按照个体效率最大的原则将每个定日镜放置在其效率最优的位置, 但这种基于贪婪选择的方式往往计算成本巨大且整体效率较低。因此, 基于整体效益最大化原则和光照均匀性理论, 本文设立某种具有特定几何特征如圆形径向交错的排列规则, 而每两排之间的径向间距相等, 这种规则采用较少参数来表征整个镜场的布置, 更加切合实际计算要求且效率较高。

本文设计的阴影分布及径向交错排列示意图如图 7:

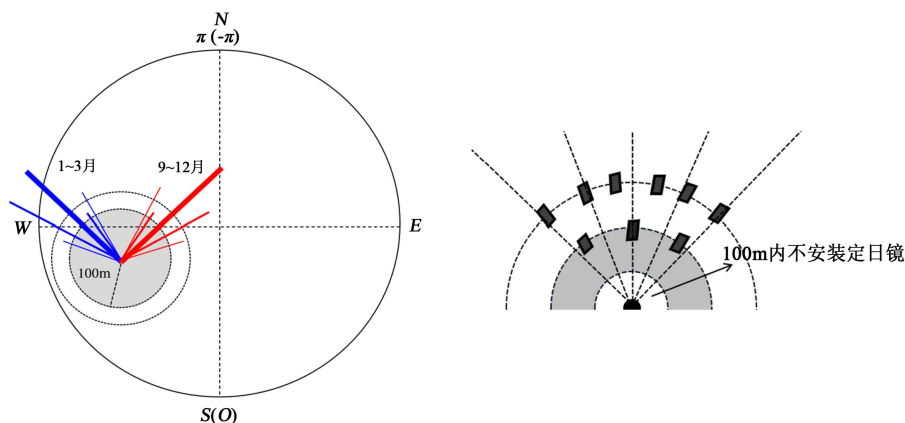


Figure 7. Shadow distribution and radial staggered arrangement
图 7. 阴影分布与径向交错排列图

其次, 考虑吸收塔的阴影域对定日镜是否有影响, 经过计算, 吸收塔(塔高 80 m)形成的阴影长度超出 100 m (即留出空地建造厂房不安装定日镜的范围), 因而会对定日镜造成阴影覆盖, 本文计算出 1~3 月、9~12 月的阴影角度以及长度进行计算, 利用几何知识计算出相应扇形点位并进行去除, 对剩余坐标进行遍历计算。

最后, 结合上文中考虑的光学效率问题, 鉴于平均光学效率大致呈现出东北高西南低的分布, 本文将吸收塔的位置约束于西南部分光学效率较低的位置, 可以最大化定日镜的光学效率以提高热功率。

基于此, 本文建立下列定日镜场的目标优化模型:

决策变量: 设立吸收塔位置坐标为 (x_0, y_0) , 定日镜的尺寸(其中高为 h_d , 宽为 W_d), 定日镜的数目为 N , 定日镜位置 $position_i = (x_i, y_i)$ 。

约束条件:

a) 定日镜场总的年平均输出热功率达到额定值 60 MW

$$E_{field} = DNI \times \sum_{i=1}^N A_i \eta_i \geq 60 MW, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (32)$$

b) 定日镜安装尺寸限制, 如下:

- ① 镜面边长范围 $h_d, W_d \in [2, 8]$ 。
- ② 安装高度范围 $H_d \in [2, 6]$ 。
- ③ 保证镜面在绕水平转轴旋转时不会触及地面即 $H_d \geq \frac{h_d}{2}$ 。
- ④ 相邻间隔 $D_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > 5 + W_d, \forall i, j \in N$ 。

a) 定日镜安装位置限制, 如下:

考虑到吸热器 100 m 内不安装定日镜以及镜场的最大径向为 350 m, 其圆形区域边界限制为:

$$\begin{cases} 100^2 \leq (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 \\ x_i^2 + y_i^2 \leq 350^2 \end{cases}, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (33)$$

b) 吸收塔位置约束域, 如下:

$$\begin{aligned} x_0 &\in [-200, 0] \\ y_0 &\in [-100, 50] \end{aligned}$$

目标函数: 单位镜面面积平均输出热功率最大化, 即 $\max(E_{single})$, 其中

$$E_{single} = \frac{E_{field}}{\sum_{i=1}^N h_d \cdot W_d} = \frac{DNI \cdot \sum_{i=1}^N A_i \eta_i}{\sum_{i=1}^N h_d \cdot W_d} = \frac{\left[G_0 \cdot \left(a + be^{-\frac{c}{\sin \alpha_s}} \right) \cdot \sum_{i=1}^N A_i \cdot \eta_{sb} \cdot \eta_{\cos} \cdot \eta_{at} \cdot \eta_{trunc} \cdot \eta_{ref} \right]}{\sum_{i=1}^N h_d \cdot W_d} \quad (34)$$

综上, 目标优化模型为: $\max(E_{single})$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{field} = DNI \times \sum_{i=1}^N A_i \eta_i \geq 60MW, i = 1, 2, 3, \dots, N \\ h_d, W_d \in [2, 8] \\ H_d \in [2, 6] \\ H_d \geq \frac{h_d}{2} \\ D_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} > 5 + W_d, \forall i, j \in N \\ 100^2 \leq (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2, i = 1, 2, 3, \dots, N \\ x_i^2 + y_i^2 \leq 350^2, i = 1, 2, 3, \dots, N \\ E_{single} = \frac{\left[G_0 \cdot \left(a + be^{-\frac{c}{\sin \alpha_s}} \right) \cdot \sum_{i=1}^N A_i \cdot \eta_{sb} \cdot \eta_{\cos} \cdot \eta_{at} \cdot \eta_{trunc} \cdot \eta_{ref} \right]}{\sum_{i=1}^N h_d \cdot W_d} \\ x_0 \in [-200, 0] \\ y_0 \in [-100, 50] \end{array} \right. \quad (35)$$

4.2. 模型求解与分析

(1) 算法构建——遗传算法(GA)

针对定日镜场目标优化问题, 本文使用遗传算法进行求解。在参数设定时, 定日镜的位置、尺寸、数目等决策变量构成了一个高维且存在多个局部最优解的搜索空间, 同时受到各种条件约束的限制。而遗传算法通过选择、交叉和变异操作, 在整个搜索空间中通过不断的迭代和演化, 逐步提升种群中的个体质量, 遍历问题中存在的多个局部最优解, 最终找到最佳的参数组合。同时, 遗传算法具有较高的并行处理能力, 能同时对多个个体进行评估, 以加快算法的收敛速度和搜索效率。

(2) 定日镜场目标优化模型的求解与分析

对相关指标进行月度分析, 发现平均光学效率、平均余弦效率、平均阴影遮挡效率等波动仍较为稳定, 而单位面积镜面平均输出热功率仍呈现出先增大后减少的趋势, 这是由于每个定日镜尺寸高度等参数保持一致, 所以分布规律相似。其中, 年平均光学效率、输出功率等数据结果如表 2:

Table 2. Optimized annual average optical efficiency and output power meters

表 2. 优化后年平均的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	年平均输出功率(MW)	单位面积镜面年平均输出热功率(kW/m ²)
0.6929	0.8730	0.9842	0.9255	60.37	0.6815

基于遗传算法, 利用 Python 对整个镜场坐标进行遍历搜索, 计算出吸收塔的大致位置信息与定日镜的交错散落分布, 其中阴影区域是不考虑的定日镜位置范围。每个定日镜的尺寸、安装高度是相同的, 因此, 定日镜的分布较为均匀、错落有致, 且避开了太阳辐射吸收较差的影带, 空间分布示意如图 8, 吸收塔位置坐标与定日镜各个参数见表 3。

通过深入分析, 可以发现各项指标都在优化布局后基本都得到了提升, 此外, 通过计算, 本文得到了年平均光学效率的优化率为 16.65%, 年平均输出热功率的优化率为 58.20%, 单位镜面面积的年平均输出热功率的优化率为 12.18%, 有力地说明了本文对定日镜场的优化设计是有效且值得应用推广的。

Table 3. Absorption tower location coordinates and heliostat parameters

表 3. 吸收塔位置坐标与定日镜各个参数表

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)
(-180, -32)	5.5 × 5.5	2.75	3297	99734.25

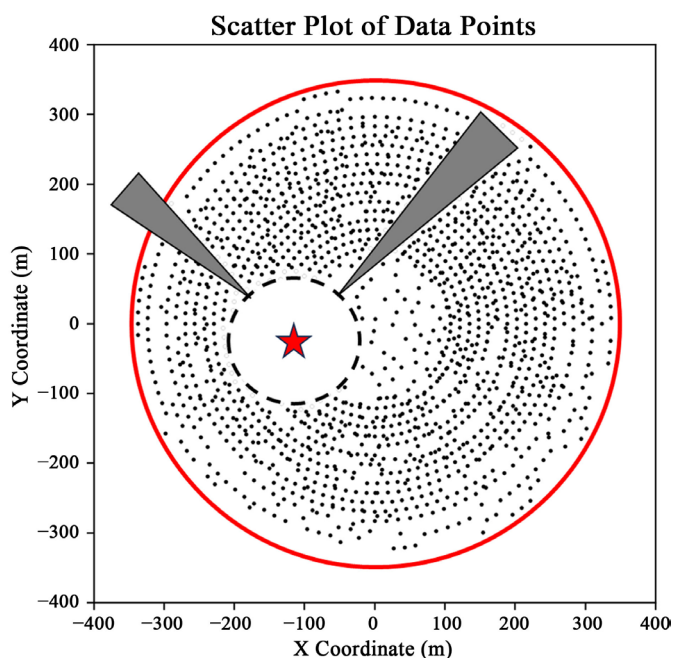


Figure 8. Schematic diagram of the location distribution of the absorption tower and heliostat

图 8. 吸收塔与定日镜的位置分布示意图

由于本文所研究的定日镜场地处北半球, 东北方位的定日镜朝向偏南, 能够更好地有效采光, 尽可能地减少了采光时造成的损失, 所以该区域的排布更集中, 且定日镜的安装高度为 2.75 m, 这可能和阴影遮挡效率、大气透射率有关, 因为设置较高高度可能会造成较大的阴影域, 遮挡部分的定日镜, 而设置过低的高度与吸收塔的距离较远, 太阳辐射传输折损较多, 降低大气透射率影响太阳辐射量, 从这个角度来看, 各个数据合理且符合预期效果。

5. 结论

本文应用了数学物理相关理论, 建立了定日镜场的光热转化模型, 并通过遗传算法对定日镜场进行优化配置设计, 使得达到额定功率 60 MW 的情况下, 单位镜面面积年平均输出热功率尽可能大, 得到了年平均光学效率为 0.6929, 较优化前的 0.5940 提升了 16.65%, 单位镜面输出热功率为 0.6815 kW/m²,

较优化前的 0.6075 kW/m^2 提升了 12.18%。同时, 本文所研究的模型可以推广到太阳能、建筑设计、温室农业等领域, 对定日镜进行调节提高能源利用效率和可再生能源的使用比例, 还可以与其他能源系统相结合, 如光伏发电、风能等, 形成综合的能源利用系统。

参考文献

- [1] 张平, 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.
- [2] 王岩, 郝颖明. 空间向量法求解坐标变换[J]. 沈阳工业学院学报, 1999(1): 31-34.
- [3] 胡亮, 张平, 奚正稳, 等. 塔式光热发电聚光场截断效率的光线追迹和人工神经网络计算方法[J]. 东方电气评论, 2020, 34(3): 64-69+75.
- [4] 王瑞庭, 魏秀东. 太阳能塔式电站镜场对地面的遮阳分析[J]. 光子学报, 2009, 38(9): 2414-2418.
- [5] 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
- [6] 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]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [7] 杜宇航, 刘向民, 王兴平, 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. <https://doi.org/10.19805/j.cnki.jcspe.2020.05.012>
- [8] Farges, O., Bebian, 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>
- [9] 李心, 赵晓辉, 李江焯, 等. 塔式太阳能热发电全寿命周期成本电价分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 84-88.
- [10] Schmitz, M., Schwarzbo, P., Buck, R., *et al.* (2006) Assessment of the Potential Improvement Due to Multiple Apertures in Central Receiver Systems with Secondary Concentrators. *Solar Energy*, **80**, 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.02.012>
- [11] 孟力. 面向塔式太阳能聚光系统的柔性定日镜设计[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2013.
- [12] 李晓霞. 太阳能跨季节储/供热系统动态特性及运行策略研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.