

定日镜场的优化设计

摘 要

太阳能塔式光热发电定日镜场的优化设计对碳中和有重要影响。本文通过构建空间直角坐标系找到定日镜与太阳轨迹之间的关系，对定日镜场优化问题进行研究，实现对定日镜场的优化设计，提高定日镜场将太阳能转化为电能的转化效率。

针对问题一，光学效率和输出热功率的求解问题，首先，建立了定日镜余弦效率、阴影遮挡效率计算的物理模型，截断效率计算的 HFLCAL 模型，综合得到光学效率的计算模型。其次，分析了输出热功率与它的 DNI 及定日镜光学效率、采光面积间关系，建立了物理模型。求解出年平均光学效率为 52.72%、年平均余弦效率为 76%、年平均阴影遮挡效率为 56.86%、年平均截断效率 79.65%、年平均输出热功率为 0.31709MW、单位面积镜面年平均输出热效率为 $19.91952kW/m^2$ 。

针对问题二，定日镜尺寸、安装高度相同条件下，单位面积镜面平均输出热功率最大的求解问题。以单位面积镜面平均输出热功率最大为优化目标，以定日镜尺寸和安装高度关系、额定功率60MW等为约束条件，建立了一个以吸收塔的位置坐标、定日镜尺寸、安装高度、定日镜数目、定日镜位置为决策变量的单目标优化模型。使用迭代算法对定日镜尺寸及高度进行求解，根据问题一中建立的光学效率的物理模型求出单位面积镜面平均输出热功率的最优解。

针对问题三，定日镜尺寸、安装高度不同条件下，单位面积镜面平均输出热功率最大的求解问题。在问题二的基础上，将每个定日镜的尺寸与安装高度变为可变量，以单位面积镜面平均输出热功率最大为优化目标，综合给定的额定效率60MW与定日镜尺寸和安装高度关系的条件等约束，建立出多目标优化模型。使用遗传算法计算定日镜的尺寸与高度值，根据问题一中建立的光学效率的物理模型求出单位面积镜面平均输出热功率的最优解。

关键词：定日镜场 HFLCAL模型 优化目标 遗传算法

一、 问题重述	3
1.1 问题背景	3
1.2 问题题目	3
二、 问题分析	3
2.1 问题一的分析	3
2.2 问题二的分析	4
2.3 问题三的分析	4
三、 模型假设	4
四、 符号说明	4
五、 模型的建立与求解	5
5.1 问题一模型的建立与求解	5
5.1.1 光学效率模型的建立	5
5.1.2 光学效率的求解	9
5.2 问题二单目标优化模型的建立与求解	15
5.2.1 优化目标	15
5.2.2 约束条件	15
5.2.3 模型综合	16
5.2.4 模型求解	16
5.3 问题三多目标优化模型建立与求解	17
5.3.1 优化目标	17
5.3.2 约束条件	17
5.3.3 模型综合	17
5.3.4 多目标优化模型的求解	18
5.3.5 结果	19
六、 模型的评价、改进	19
6.1 模型的优点	19
6.2 模型的缺点	19
6.3 模型的改进	19
七、 参考文献	20
附录	21

一、问题重述

1.1 问题背景

随着“双碳”目标的建立，我国提出建立以可再生能源为主导、多能互补的能源体系以减少化石能源的使用。对环境更为友好的可再生能源太阳能恰恰可以满足这一需求^[1]。

定日镜作为收集太阳能的基本组件，通过控制纵向与水平方向的转轴实现方向角与俯仰角的改变。太阳光通过定日镜将反射的能量汇聚至镜场中央的集热器，通过集热器的导热性质对其中的介质加热，将太阳能转化为热能。

1.2 问题题目

规定在中心位于 98.5° E ， 39.4° N ，海拔高度 3000 米，半径 350 米范围建设定日镜场。以圆形中心为原点构建空间直角坐标系。设计吸收塔高度 80 米，集热器高 8 米、直径 7 米。镜场中央 100 米内不设置安装定日镜。注： $2 \leq \text{镜面边长（米）} \leq 8$ ， $2 \leq \text{安装高度（米）} \leq 6$ ，相邻镜面中心距离至少多与 5 米。

第一题：规定定日镜尺寸是边长为 6 米的矩形，安装高度为 4 米，结合附件给定定日镜位置坐标，计算年平均输出热功率、单位镜面面积年平均输出热功率和年平均光学效率。并将计算结果填进表格。

第二题：规定定日镜场额定功率为 60MW。假设圆形定日场内所有定日镜尺寸以及安装高度相同。设计在定日镜场达到额定功率时，令单位镜面面积年平均输出热功率尽量大的各项参数（定日镜尺寸、定日镜位置、定日镜数目、吸收塔的位置坐标、安装高度）。并将计算结果填入表格。

第三题：规定在第二题的基础上定日镜场的定日镜尺寸以及安装高度可以不同。设计在定日镜场达到额定功率时，令单位镜面面积年平均输出热功率尽量大的各项参数（定日镜尺寸、定日镜位置、定日镜数目、吸收塔的位置坐标、安装高度）。并将计算结果填入表格。

二、问题分析

2.1 问题一的分析

解决问题一，题目给定定日镜场中所有以吸收塔为原点建立坐标系的定日镜中心的坐标，规定定日镜的尺寸是边长为 6 米的矩形，安装高度为 4 米，需要根据题目所给信息，计算定日镜场的相关效率。该问题的重点在于计算光学效率，分别建立阴影遮挡损失模型、余弦损失模型、集热器截断损失模型。

计算阴影遮挡损失可以转化为判断可能产生遮挡镜中的任意一点沿着入射光线或反射光线的反方向是否落入反射镜内。求解余弦损失等效为求解入射角余弦值，构建定日镜空间坐标系，通过入射光单位向量 \vec{s} 与反射光单位向量 \vec{r} 之间的关系进行求解。运用

HFLCAL 模型计算截断效率，由于定日镜在吸热器平面的能流密度接近高斯分布，因此本文利用圆形高斯通量密度函数进行求解。

2.2 问题二的分析

问题二本质上是建立于问题一中太阳位置模型基础上的多参数单目标优化模型，目的是求解出单位镜面面积年平均输出热功率的最大值。优化是为了使造价成本降低，以单位镜面面积年平均输出热功率最大作为优化目标，以额定功率作为约束条件，并用遍历搜索法来求解本问题，得出最优解。

2.3 问题三的分析

问题三在第二问的基础上额外规定了定日镜尺寸与安装高度的选择可以不同，本质上是建立于第一问太阳位置模型的多参数多目标优化模型，目的求解当定日镜场功率达到 60MW 时，令单位镜面面积年平均输出热功率 E 尽可能达到最大值。综合考虑定日镜尺寸、位置坐标、安装高度、吸收塔位置坐标建立多目标优化模型。

三、模型假设

1. 假设问题求解中所有“年均”指标均为固定时间点。
2. 假设定日镜跟踪方式为视日跟踪法，忽略天气原因对定日镜场的影响[2]
3. 假设定日镜镜面宽度大于等于镜面高度
4. 假设题目所设区域中午太阳高度角为 180° 。
5. 假设定日镜场中定日镜规格相同。
6. 假设太阳光为平行光线。
7. 假设忽略吸热塔阴影的影响。

四、符号说明

符号	说明	单位
α_s	太阳高度角	度/ $^\circ$
γ_s	太阳方向角	度/ $^\circ$
θ	入射角与法线夹角	度/ $^\circ$
H	集热器中心距地面距离	米/m
h	定日镜中心距地面距离	米/m
\vec{s}	入射光单位向量	
\vec{r}	反射光单位向量	
σ_{sun}	太阳形状标准差	
σ_{tot}	光线在吸热体上的总标准差	
σ_{ast}	散向误差标准差	
σ_t	跟踪误差标准差	
φ	当地纬度	度/ $^\circ$
ω	太阳时角	度/ $^\circ$

五、模型的建立与求解

5.1 问题一模型的建立与求解

5.1.1 光学效率模型的建立

太阳的位置随时间一直在变换，在计算定日镜的光学效率前，先应当确定太阳的位置（如图 1）。而在计算位置时，经常使用天球坐标系中的地平坐标系来描述太阳于地球所言的视图^[2]。

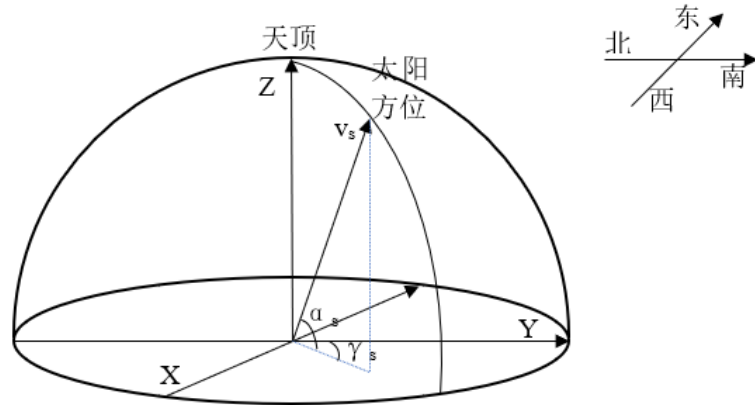


图 1 地平坐标系

图 1 地面坐标系

因此可以利用太阳高度角 α_s 和太阳方位角 γ_s 确立太阳的位置。

1. 定日镜场坐标系的建立

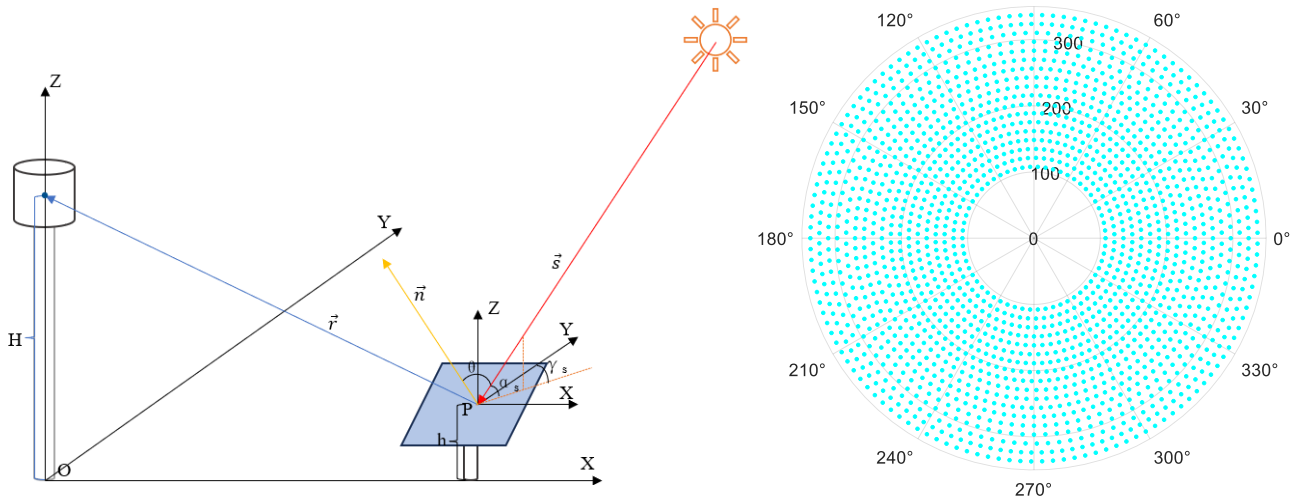


图 2 定日镜工作原理图

根据题目所给经纬度，经度： 98.5° ，纬度： 39.4° ，可以将该定日镜场定位至甘肃省张掖市肃南裕固族自治县。

注： H 为集热器中心距地面距离， h 为定日镜中心距地面距离， P 点为定日镜中心， \vec{s} 是入射光单位向量， \vec{n} 是定日镜面法线的单位向量， \vec{r} 是反射光单位向量， γ_s 为太阳方位角， α_s 为太阳高度角。

2. 余弦损失数学模型的建立

余弦损失是由于太阳入射方向与镜面采光口法线方向不平行而引起而引起的接收能量减少。余弦效率可以用太阳入射角的余弦值表示^[3]。

假设定日镜中心 P 坐标为(x,y,z)，以 PX, PY, PZ 为轴建立空间坐标系，如图 3 所示。

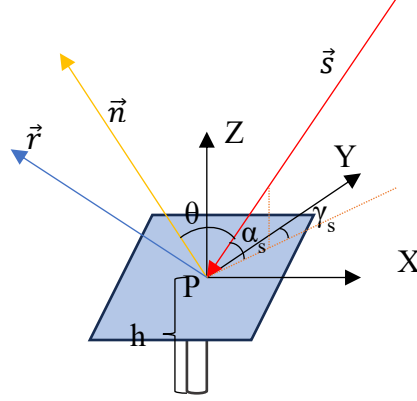


图 3 余弦损失原理图

根据上图可将 \vec{s} 用球坐标表示为 $(1, \pi - \theta, \pi - \gamma_s)$ ，根据倍角公式可得

$$\cos \theta = \left| \sqrt{\frac{(1 + \cos 2\theta)}{2}} \right| = \sqrt{\frac{1 - \sin \vec{s} \cdot \vec{r}}{2}} \quad (1)$$

将 \vec{s} 球坐标转换为直角坐标可得，

$$\vec{s} = (-\cos \alpha_s \sin \gamma_s, -\cos \alpha_s \cos \gamma_s, -\sin \alpha_s) \quad (2)$$

根据题目可知代入勾股定理求得

$$\vec{r} = \left(\frac{-x}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H - z)^2}}, \frac{-y}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H - z)^2}}, \frac{H - z}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H - z)^2}} \right) \quad (3)$$

即

$$\eta_{\cos} = \cos \theta = \sqrt{\frac{1 - \vec{s} \cdot \vec{r}}{2}} \quad (4)$$

3. 截断效率数学模型的建立

截断效率是指吸热器所获能量占全景场所获能量的百分比，其主要与定日镜的尺寸、太阳的位置、光线散射等参数有关。又由于定日镜在吸热器的平面上的能流密度接近高斯分布，于是选择采用 HFLCAL 模型来计算^[5]，结合本题进行积分，计算式如下：

$$\eta_{trunc} = \frac{1}{2\pi\sigma_{tot}^2} \iint_{xy} e^{\left(-\frac{x^2+y^2}{\sigma_{tot}^2}\right)} dx dy \quad (5)$$

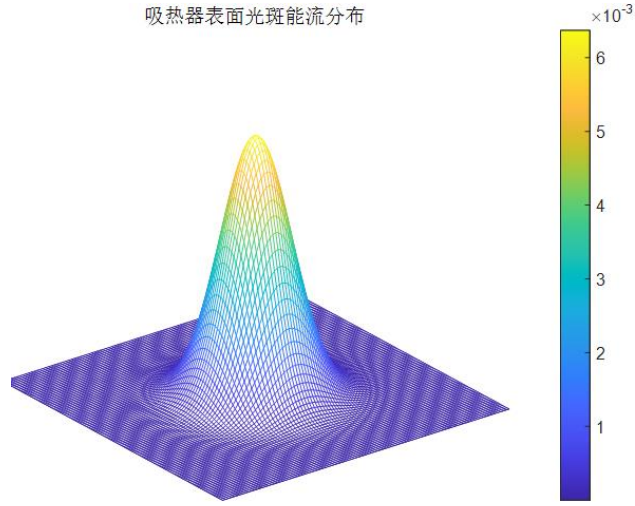


图 4 吸热器表面光斑能流分布

其中：

$$\sigma_{tot} = \sqrt{d_{hr}^2(\sigma_{sun}^2 + \sigma_{bp}^2 + \sigma_{ast}^2 + \sigma_t^2)} \quad (6)$$

上式中， σ_{sun} 是太阳形状标准差， σ_{tot} 是光线在吸热体上的总标准差， σ_{ast} 是散相误差标准差， σ_t 是跟踪误差标准差。

其中：

$$\begin{cases} \sigma_{bp}^2 = (2\sigma_s)^2 \\ \sigma_{ast} = \sqrt{0.5H_t^2 + W_s^2/4d_{hr}} \\ H_t = \sqrt{SH \times SW} \left| \frac{d_{hr}}{f} - \cos\theta \right| \\ W_s = \sqrt{SH \times SW} \left| \frac{d_{hr}}{f} \cos\theta - 1 \right| \end{cases} \quad (7)$$

规定 H_t, W_s 分别是吸热器上光斑在子午方向的尺寸以及弧矢方向的尺寸， f 定日镜轴向焦距， σ_s 是斜率误差的标准差， SH 与 SW 是定日镜的高和宽度。

根据文献所给参考数据可知, $\sigma_{sun} = 2.51\text{mrad}$, $\sigma_t = 0.63\text{mrad}$ 。

4.大气透射率数学模型的建立

基于上述定日镜场坐标系的建立, 根据勾股定理易得

$$d_{hr} = \sqrt{x^2 + y^2 + (H - z)^2} \quad (8)$$

大气透射率计算公式:

$$\eta_{at} = 0.99321 - 0.0001176d_{hr} + 1.97 \times d_{hr}^2 (d_{hr} \leq 1000) \quad (9)$$

5.阴影挡光效率数学模型的建立

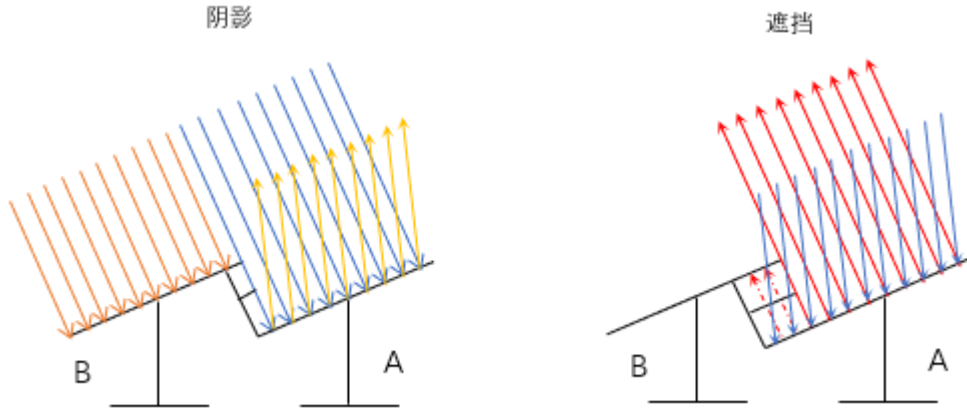


图 5 隐形遮挡损失示意图

阴影遮挡损失的成因主要分为三部分: 如上图所示, 一是入射光在照射 A 镜的过程中, 入射光线被 B 镜遮挡使得在 A 镜中产生阴影; 二是入射光经由 A 镜反射后形成反射光线, 反射光线被 B 镜遮挡在 A 镜上投影产生遮挡; 三是塔经由太阳光照射在定日镜产生的阴影。为简化模型, 本文忽略塔对阴影挡光损失的影响。

计算阴影遮挡损失效率就是计算定日镜场中定日镜未产生阴影面积和遮挡面积的总和与总面积之比, 如图 5。

模型准备:

Step1: 建立单镜面坐标系, 如图 6, 选择一定日镜 A, 并在 A 镜面坐标系中找一点 $M_1(x_1, y_1)$, 经过光线投影至另一定日镜, 本文记作 B 定日镜, 在 B 镜面坐标系得到 $M_2(x_2, y_2)^{[6]}$ 。

Step2: 设一束太阳光线在地面坐标系中为 $\vec{v}_0 = (a, b, c)$, 在镜面坐标系为 \vec{v}_k 二者之间有如下转换关系:

$$\vec{v}_0 = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix} \cdot \vec{v}_k \quad (10)$$

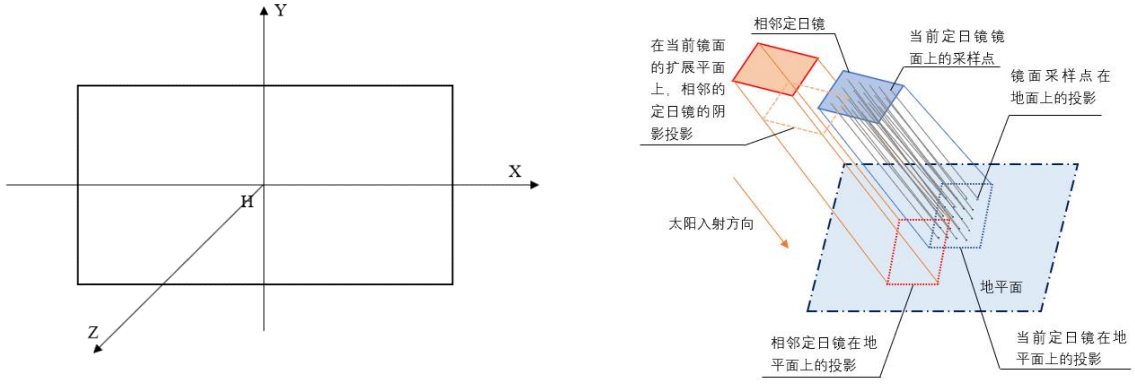


图 6 镜面坐标系（左）及阴影遮挡损失计算模型（右）

其中矩阵中的每一列对应 3 个轴中由镜面向地面坐标系的表示。

模型建立：

Step1: 将 A 镜中的一点 $M_1(x_1, y_1, 0)$ 转化为地面坐标 M_1' ,

$$M_1' = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1' \\ y_1' \\ z_1' \end{pmatrix} \quad (11)$$

Step2: 将 $M_1'(x_1', y_1', z_1')$ 转换到 B 镜中为 M_1''

$$M_1'' = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1' - x_B \\ y_1' - y_B \\ z_1' - z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1'' \\ y_1'' \\ z_1'' \end{pmatrix} \quad (12)$$

,

Step3: 将 \vec{v}_0 转换为 \vec{v}_k 。

Step4: 根据两点一线的原理, 求解 B 镜与光线交点 $M_2(x_2, y_2, 0)$ 模型的求解。

Step5: 依次可求出阴影范围内所存在的点, 整理后的面积与定日镜总面积比值则有阴影损失（遮挡损失与此类似）。

5.1.2 光学效率的求解

1. 余弦效率的求解：

假设集日镜为平面镜, 因此

$$\vec{v}_k = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix}^T \cdot \vec{v}_0 = (a, b, c) \quad (13)$$

Step1: 数据处理

根据题目可知，吸收塔高80m，集热器高8m，即集热器中心至地面的高度 H 为 $H = 84m$ 。由于定日镜安装高度为4m，则 $h = 4m$ 。

Step2: 假设定日镜中心 P 坐标为 (x, y, z) ，以 PX, PY, PZ 为轴建立空间坐标系，如下图所示

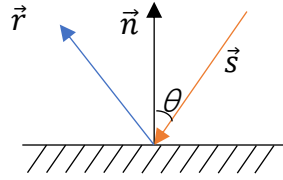


图 7 太阳光照射平面镜示意图

根据图 7 可将 \vec{s} 用球坐标表示为 $(1, \pi - \theta, \pi - \gamma_s)$ ，根据倍角公式可得

$$\cos \theta = \left| \sqrt{\frac{(1 + \cos 2\theta)}{2}} \right| = \sqrt{\frac{1 - \sin \vec{s} \cdot \vec{r}}{2}}$$

将 \vec{s} 球坐标转换为直角坐标可得，

$$\vec{s} = (-\cos \alpha_s \sin \gamma_s, -\cos \alpha_s \sin \gamma_s, -\sin \alpha_s)$$

根据题目可知代入勾股定理求得，

$$\vec{r} = \left(\frac{-x}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H - z)^2}}, \frac{-y}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H - z)^2}}, \frac{H - z}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H - z)^2}} \right)$$

其中 $z = h = 4m$ 。根据题目可知，

太阳高度角：

$$\sin \alpha_s = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi \quad (14)$$

太阳方位角：

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \delta - \sin \alpha_s \sin \varphi}{\cos \alpha_s \cos \varphi} \quad (15)$$

规定 φ 是当地纬度，以北纬为正方向。

ω 是太阳时角，

$$\omega = \frac{\pi}{12}(ST - 12) \quad (16)$$

规定 ST 是当地时间。

δ 太阳赤纬角：

$$\sin \delta = \sin \frac{2\pi D}{365} \sin \left(\frac{2\pi}{360} 23.45 \right) \quad (17)$$

规定 D 是从春分开始计算的天数。

联立式(2)(3)(4)(14)(15)(16)(17)得

$$\begin{cases} \vec{s} = (-\cos \alpha_s \sin \gamma_s, -\cos \alpha_s \cos \gamma_s, -\sin \alpha_s) \\ \vec{r} = \left(\frac{-x}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H-z)^2}}, \frac{-y}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H-z)^2}}, \frac{H-z}{\sqrt{x^2 + y^2 + (H-z)^2}} \right) \\ \eta_{cos} = \cos \theta = \sqrt{\frac{1 - \vec{s} \cdot \vec{r}}{2}} \\ \sin \alpha_s = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \\ \cos \gamma_s = \frac{\sin \delta - \sin \alpha_s \sin \phi}{\cos \alpha_s \cos \phi} \\ \omega = \frac{\pi}{12}(ST - 12) \\ \sin \delta = \sin \frac{2\pi D}{365} \sin \left(\frac{2\pi}{360} 23.45 \right) \end{cases} \quad (18)$$

带入数据可得余弦效率结果见表 1，由于每月的平均余弦效率变化较稳定，为简便计算，本文假设一个月中每天的平均余弦效率相同，

$$\text{年平均余弦效率: } \eta_{\cos year} = \frac{\sum_{k=1}^N \eta_{cos} d_k}{365} \quad (19)$$

规定 η_{cosi} 表示第*i*月的平均余弦效率， d_k 表示第*k*月份的天数。经计算可得年平均余弦效率为 76.00%。

2. 截断效率求解：

假设集热镜为平面镜，即 $\sigma_s = 0, \sigma_{bp} = 0, f = 1$ 。

Step1：计算光线在集热器上的总标准差 σ_{tot} 。

根据文献可知 σ_{sun}, σ_t 的参考值分别为 $2.51 \text{ mrad}, 0.63 \text{ mrad}$ 。因此

$$\sigma_{ast} = \sqrt{(0.5(H_t^2 + W_s^2))/4d_{hr}} \quad (20)$$

$$\sigma_{tot} = \sqrt{d_{hr}^2(\sigma_{sun}^2 + \sigma_{bp}^2 + \sigma_{ast}^2 + \sigma_t^2)} \quad (21)$$

规定 H_t 是集热器上光斑在子午方向的尺寸， W_s 是集热器上光斑在弧矢方向上的尺寸

$$\begin{cases} H_t = \sqrt{SH \times SW} |d_{hr} - \cos\theta| \\ W_s = \sqrt{SH \times SW} |d \cos\theta - 1| \end{cases} \quad (22)$$

规定 SH 为定日镜的高 4m ， SW 为定日镜的宽度 6m 。

Step2：计算截断效率 η_{trunc}

$$\eta_{trunc} = \frac{1}{2\pi\sigma_{tot}^2} \iint_{xy} e^{(-\frac{x^2+y^2}{\sigma_{tot}^2})} dx dy \quad (23)$$

带入数据经 $matlab$ 求解结果见表 1，表 2。

3. 阴影遮挡效率求解 η_{sb} ：

Step1：根据上述模型求解得出 M_2 后，判断 x_2 与 y_2 是否均在 $[-3, 3]$ 内。

Step2：由于阴影面积的解析解比较难求，在此基础上，将所找定日镜 B 等比例划分为 $n \times n$ 个网点^[7]，并计算出每个网点的坐标。

Step3：求出网点中所有满足 Step1 的交点 M 坐标，从而统计出交点个数。

Step4: 与总交点进行比值，最终求得阴影损失。

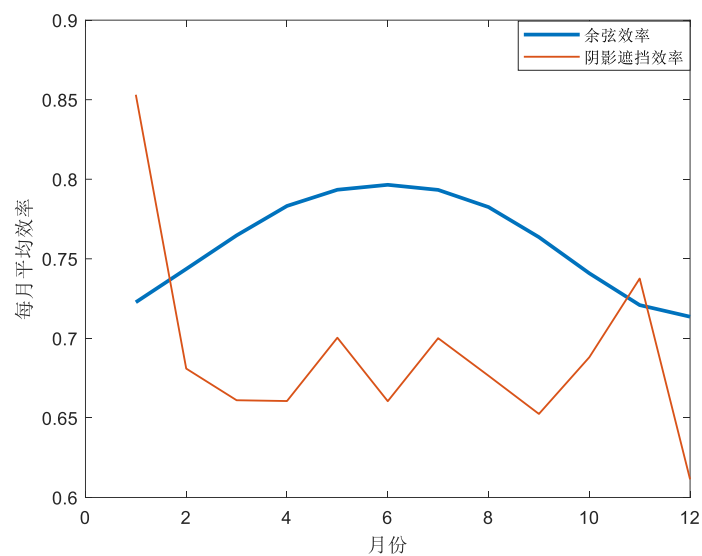


图8 余弦效率、阴影遮挡效率随月份的变化规律

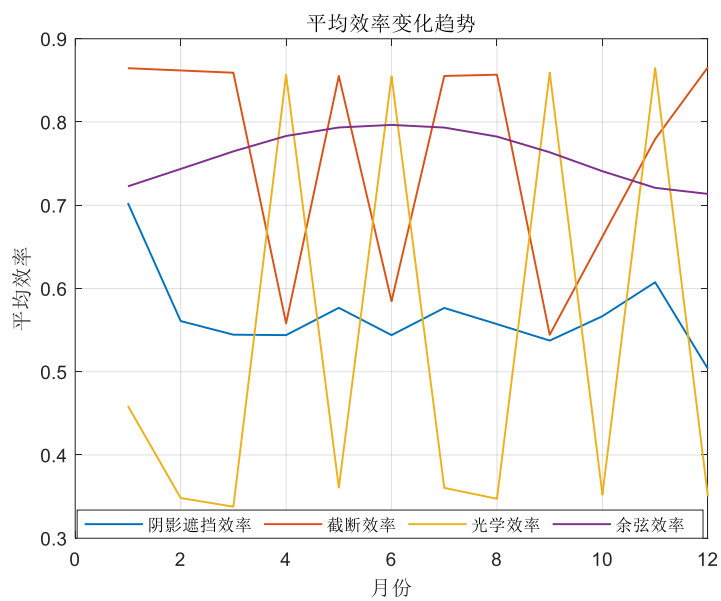


图9 平均效率随月份变化趋势

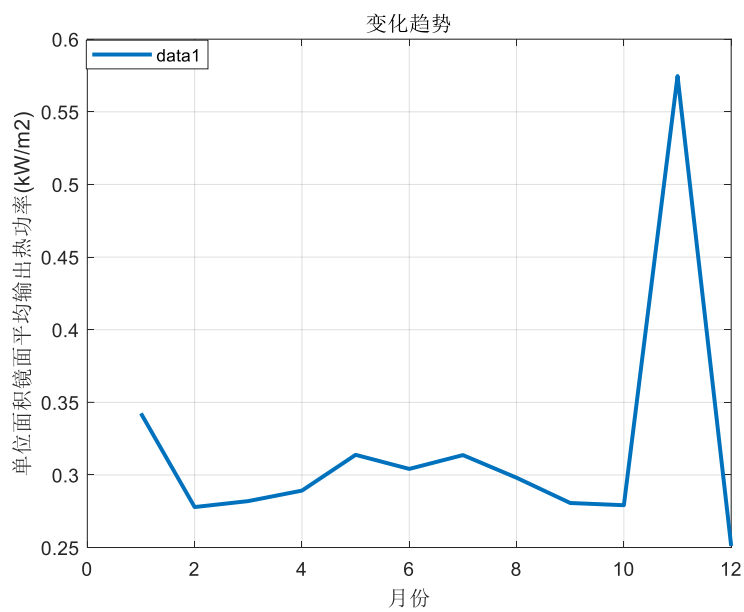


图10 单位面积镜面平均输出热功率随月份变化趋势

4. 光学效率求解 η :

$$\eta = \eta_{sb} \eta_{cos} \eta_{at} \eta_{trunc} \eta_{ref} \quad (24)$$

Step1: 求解大气透射率 η_{at} : 根据题目所给公式

$$\eta = 0.99321 - 0.000117d_{HR} + 1.97 \times 10^{-8} \times d_{hr}^2 (d_{hr} \leq 1000) \quad (25)$$

联立式(8)(24)得到大气透射率。

Step2: 镜面反射率取常数 $\eta_{ref} = 0.92$ 。

Step3: 将上述求解平均阴影遮挡效率、余弦效率、大气投射率，截断效率，镜面反射率相乘即可得到结果。

5.单位面积镜面平均输出热功率 E 求解:

由于定日镜场输出热功率表示为

$$E_{field} = DNI \cdot \sum_i^N A_i \eta_i \quad (26)$$

因此求解公式可以表示为

$$\text{单位面积镜面平均输出热功率} E = \frac{E_{field}}{NA_i} \quad (27)$$

DNI 为法向直接辐射辐照度，其含义是地球上垂直与太阳光线的平面单位时间内，平面单位面积上接受到的辐射能量。

$$\begin{cases} DNI = G_0 \left[a + b e^{-\frac{c}{\sin \alpha_s}} \right] \\ a = 0.4237 - 0.00821(6 - H)^2 \\ b = 0.5055 + 0.00595(6.5 - H)^2 \\ c = 0.2711 + 0.01858(2.5 - H)^2 \end{cases} \quad (28)$$

根据题目，规定 $G_0 = 1.366kW/m^2$, A 为定日镜镜面面积为 $36m^2$ 。

Step4: 由第三问求得每月 21 日 单位面积平均输出热功率 E ，假设一个月中的 E 值变化可以忽略不计，则

$$\text{单位面积镜面年平均输出热功率: } E_{year} = \frac{\sum_{k=1}^N E_i d_k}{365} \quad (29)$$

规定 E_i 表示第 i 月的单位面积镜面平均输出热功率 E ， d_k 表示第 k 月份的天数。结合 Step3 即可得出结果。

最后求解出年平均光学效率为 52.72%、年平均输出热功率为 0.31709MW、单位面积镜面年平均输出热效率为 $19.91952kW/m^2$ 。

具体结果见表 1，表 2。

表 1 问题一每月 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 出热功率(kW/m ²)
1 月 21 日	45.89%	72.27%	70.26%	86.46%	0.34239
2 月 21 日	34.83%	74.36%	56.09%	86.19%	0.27792
3 月 21 日	33.79%	76.47%	54.45%	85.92%	0.28202
4 月 21 日	85.67%	78.32%	54.40%	55.82%	0.28924
5 月 21 日	36.07%	79.34%	57.68%	85.53%	0.31387
6 月 21 日	85.49%	79.65%	54.40%	58.48%	0.30417
7 月 21 日	36.05%	79.33%	57.66%	85.53%	0.31369
8 月 21 日	34.74%	78.25%	55.72%	85.68%	0.29810
9 月 21 日	85.93%	76.36%	53.74%	54.44%	0.28071
10 月 21 日	35.24%	74.09%	56.67%	86.23%	0.27919
11 月 21 日	86.48%	72.09%	60.75%	97.95%	0.57462
12 月 21 日	35.04%	71.36%	50.36%	86.57%	0.25117

表 2 问题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)
52.72%	76.00%	56.86%	79.65%	0.31709	19.91952

5.2 问题二单目标优化模型的建立与求解

5.2.1 优化目标

目标函数为单位面积镜面平均输出热功率最大

$$\max E = \frac{1000E_{\text{year}}}{AB \cdot CD \cdot N} \quad (30)$$

规定：AB 为定日镜宽度，CD 为定日镜高度，WY 为定日镜安装高度，N 为定日镜数目，YB 为相邻定日镜中心距离

5.2.2 约束条件

要求定日镜宽度大于等于定日镜高度，且定日镜宽度与高度介于2m至8m之间，安装高度介于2m至6m之间，定日镜在绕水平轴转动的过程中，定日镜高度不接地，定日镜中心之间的距离大于等于定日镜的距离。

$$\begin{cases} AB \geq CD \\ 2 \leq AB \leq 8 \\ 2 \leq CD \leq 8 \\ 2 \leq WY \leq 6 \\ WY \geq \frac{CD}{2} \\ YB \geq AB + 5 \\ E_{year} = 60 \end{cases} \quad (31)$$

5.2.3 模型综合

$$\begin{aligned} \max E &= \frac{1000E_{year}}{AB \cdot CD \cdot N} \\ \text{s.t.}, \quad &\begin{cases} AB \geq CD \\ 2 \leq AB \leq 8 \\ 2 \leq CD \leq 8 \\ 2 \leq WY \leq 6 \\ WY \geq \frac{CD}{2} \\ YB \geq AB + 5 \\ E_{year} = 60 \end{cases} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{cases} \eta_{cos} = \cos\theta = \sqrt{\frac{1 - \vec{s} \cdot \vec{r}}{2}} \\ \eta_{trunc} = \frac{1}{2\pi\sigma_{tot}^2} \iint_{xy} e^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma_{tot}^2}} dx dy \\ d_{hr} = \sqrt{x^2 + y^2 + (H - z)^2} \end{cases}$$

5.2.4 模型求解

Step1: 设吸收塔的位置处于定日镜场中心。

Step2: 利用迭代算法，给出定日镜尺寸（定日镜宽度 AB 和定日镜高度 CD ）与安装高度 WY 的所有可能。

Step3: 根据定日镜之间的距离与面积组合来确定出定日镜的数量 N 。

Step4: 将求出的所有定日镜尺寸与对应数量一一代入目标函数，观察是否满足题目所给额定功率。

Step5: 找出最优解。

Step6: 将最优解代入光学效率模型，求出定日镜位置。

问题二设计参数表

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)	12.0×9.0	4.52	2060	222480

5.3 问题三多目标优化模型建立与求解

5.3.1 优化目标

在第二问的基础上，增加了定日镜尺寸与安装高度可各不相同的条件，因此目标函数如下：

$$\max E = \frac{E_{year}}{\sum_{i=1}^N LY_i \cdot N} \quad (33)$$

$$LY_i = AB_i \times CD_i (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (34)$$

其中 AB_i 与 CD_i 每次的取值是改变的。

5.3.2 约束条件

$$\sigma_{tot} = \sqrt{d_{hr}^2(\sigma_{sun}^2 + \sigma_{bp}^2 + \sigma_{ast}^2 + \sigma_t^2)} \quad (35)$$

5.3.3 模型综合

$$\begin{aligned} \max E &= \frac{E_{year}}{\sum_{i=1}^N LY_i \cdot N} \\ LY_i &= AB_i \times CD_i (i = 1, 2, 3, \dots) \\ s. t., \quad &\begin{cases} AB \geq CD \\ 2 \leq AB \leq 8 \\ 2 \leq CD \leq 8 \\ 2 \leq WY \leq 6 \\ WY \geq \frac{CD}{2} \\ YB \geq AB + 5 \\ E_{year} = 60 \end{cases} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{cases} \eta_{cos} = \cos\theta = \sqrt{\frac{1 - \vec{s} \cdot \vec{r}}{2}} \\ \eta_{trunc} = \frac{1}{2\pi\sigma_{tot}^2} \iint_{xy} e^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma_{tot}^2}} dx dy \\ d_{hr} = \sqrt{x^2 + y^2 + (H - z)^2} \end{cases}$$

5.3.4 多目标优化模型的求解

同第二题类似：

Step1: 设吸收塔的位置处于定日镜场中心。

Step2: 由于此次是多目标优化，利用现代优化算法——遗传算法（如图 11）来确定不同的定日镜尺寸 AB_i, CD_i 与安装高度 WY 的所有可能。

图 11 遗传算法流程图

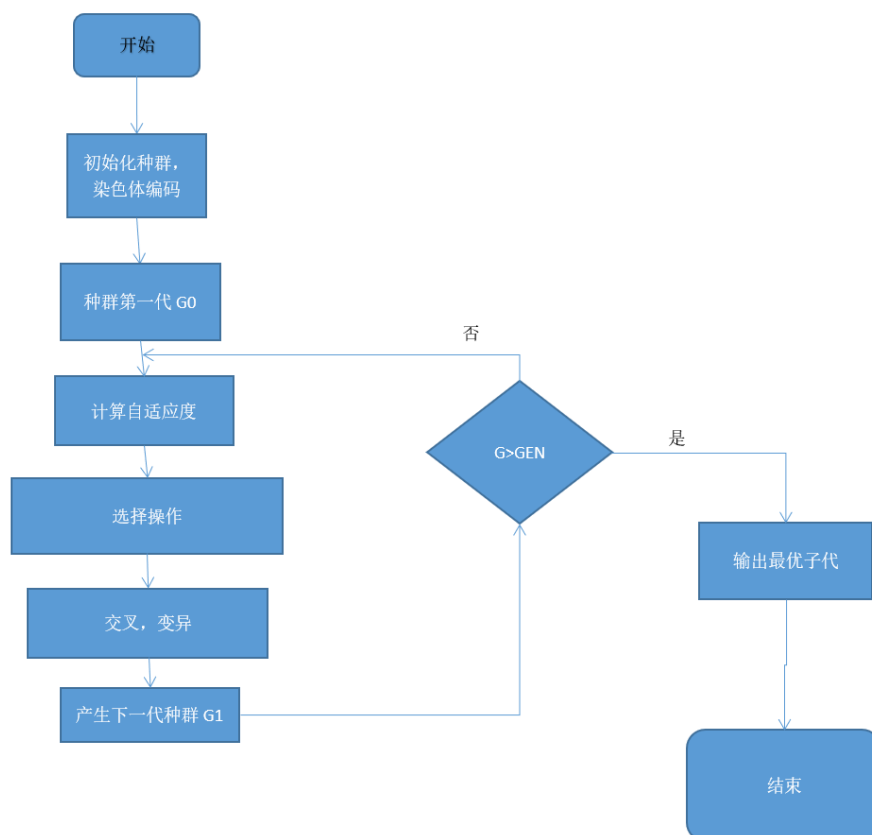


图 11 遗传算法流程图

Step3: 根据定日镜之间的距离与面积组合来确定出定日镜的数量 N 。

Step4: 将求出的所有定日镜尺寸与对应数量——代入目标函数，观察是否满足题目所给额定功率。

Step5: 找出最优解。

Step6: 将最优解代入光学效率模型，求出定日镜位置。

5.3.5 结果

问题三设计参数表

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)	11 × 8.5	4.52	2650	318000

六、模型的评价、改进

6.1 模型的优点

1. 本文使用大量图示，将问题构建为物理模型，利于问题可视化。
2. 本文采用HFLCAL模型计算截断效率，其计算速度较快并且精度高，利用高斯分布表示集热器表面的热流密度函数，便于计算定日镜场中每一面定日镜的截断效率。
3. 本文第三问选用遗传算法来确定不同的定日镜尺寸 AB_i, CD_i 与安装高度 WY 的所有可能。能够高效，自适应的控制搜索过程求得最佳解。

6.2 模型的缺点

1. 本文未考虑太阳光线为锥形光的情况，实验结果存在误差。
2. 对模型部分参数结合现实情况进行了估算，对参数精度存在影响。

6.3 模型的改进

1. 由于本文为简便模型将太阳光线模拟为平行光，因此可以建立锥形光模型与阴影遮挡效率模型结合，提高光学效率精度。

七、参考文献

- [1] 陈昕, 范海涛. 太阳能光热发电技术发展现状[J]. 能源与环境, 2012(01):90-92.
- [2] 刘家颖. 塔式太阳能定日镜跟踪控制系统的设计[D]. 中北大学, 2022:13
- [3] 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]. 合肥工业大学, 2018.
- [4] 舟丹. 太阳能光热发电[J]. 建筑玻璃与工业玻璃, 2012(11):42-46.
- [5] 文龙, 肖斌, 周治, 张俊峰, 陈鹏飞, 王晓. 基于 HFLCAL 计算模型的定日镜成像仿真分析[J]. 太阳能, 2017, (07):46-49.
- [6] 张平, 奚正稳, 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(06):5-8.
- [7] 刘建兴. 塔式光热电站光学效率建模仿真及定日镜场优化布置[D]. 兰州交通大学, 2022.

附录

附录 1

介绍：该代码是由 MATLAB 编写的，用于问题一求解光学效率，余弦效率、阴影遮挡效率、截断效率、单位面积平均输出热功率；年平均余弦效率、年平均阴影遮挡效率、年平均截断效率、年平均光学效率/单位面积镜面年平均输出热功率、年平均输出热功率

Code 1 (Matlab)

```
data=readmatrix("附件.xlsx");
[theta,rhombic]=cart2pol(data(:,1),data(:,2));
figure;
polarplot(theta, rhombic, 'o');

clear;
close all;clc;%输出 DNI
r2=39.4;%当地纬度（度）
i=1;%初始月份
day=-59;%初始化天数，以春分为原点，增加方向及为正
sumefficiency=0;%定义总年个体余弦效率和
sumefficiency1=0;%定义总年个体阴影遮挡效率和
sumefficiency2=0;%定义总年个体截断效率和
sumefficiency3=0;%定义总年个体光学效率和
sumDNI=0;
sumefficiency4=0;%定义单位面积镜面年平均输出热功率
while i<=12
    if (i==1||i==3||i==5||i==7||i==8||i==10||i==12)%month
        [Q1,Q2]=Myfun1(day);
        ST=9;%每日初始时间
        dni=0;%初始化
        SUM=0;
        SUM1=0;%阴影遮挡
        SUM2=0;%截断总和
        SUM3=0;%光学效率综合
        SUM4=0;%每日平均有效光学面积
        while ST<=15
            [DNI, EFF, EFF1, AverageT5, AverageT6, averageT7]= Myfun2(ST, Q1, Q2);
            SUM=SUM+EFF;
            SUM1=SUM1+EFF1;
            SUM2=SUM2+AverageT5;
            SUM3=SUM3+AverageT6;
            SUM4=SUM4+averageT7;
```

```

dni=dni+DNI;
ST=ST+1.5;
end
averageefficiency=SUM./8725;%在第 i 月平均个体的余弦效率
averageefficiency1=SUM1./5;%在第 i 月平均个体的阴影遮挡效率
averageefficiency2=SUM2./5;%在第 i 月平均个体的截断效率
averageefficiency3=SUM3./5;%在第 i 月平均个体的光学效率
averageefficiency4=SUM4./5;%在第 i 月平均个体的每日平均有效光学面积
sumefficiency=31.*averageefficiency+sumefficiency;
sumefficiency1=31.*averageefficiency1+sumefficiency1;
sumefficiency2=31.*averageefficiency2+sumefficiency2;
sumefficiency3=31.*averageefficiency3+sumefficiency3;
average1=dni./5;
P1=average1.*averageefficiency4;
sumefficiency4=31.*P1+sumefficiency4;
formatSpec='第%d 月 21 日的平均余弦效率:%2.4f 平均阴影遮挡效率:%2.4f 平均截断效率:%2.4f 平均光学效率:%2.4f\n 单位面积镜面平均输出热功率(kW/m2):%5.5f\n';
fprintf(formatSpec,i,averageefficiency,averageefficiency1,averageefficiency2,averageefficiency3,P1);
%sumDNI=sumDNI+31.*average1;
day=day+31;
elseif i==2
[Q1,Q2]=Myfun1(day);
ST=9;%每日初始时间
dni=0;%初始化
SUM=0;%余弦
SUM1=0;%阴影遮挡
SUM2=0;%截断总和
SUM3=0;%光学效率综合
SUM4=0;%每日平均有效光学面积
while ST<=15
[DNI, EFF, EFF1, AverageT5, AverageT6, averageT7]= Myfun2(ST,Q1,Q2);%DNI,1745 个定
日镜在某一时刻的加和余弦效率,阴影遮挡加和效率
SUM=SUM+EFF;
SUM1=SUM1+EFF1;
SUM2=SUM2+AverageT5;
SUM3=SUM3+AverageT6;
SUM4=SUM4+averageT7;
dni=dni+DNI;
ST=ST+1.5;
end
averageefficiency=SUM./8725;%在第 i 月平均个体的余弦效率

```

```

averageefficiency1=SUM1./5;%在第 i 月平均个体的阴影遮挡效率
averageefficiency2=SUM2./5;%在第 i 月平均个体的截断效率
averageefficiency3=SUM3./5;%在第 i 月平均个体的光学效率
averageefficiency4=SUM4./5;%在第 i 月平均个体的每日平均有效光学面积
sumefficiency=28.*averageefficiency+sumefficiency;
sumefficiency1=28.*averageefficiency1+sumefficiency1;
sumefficiency2=28.*averageefficiency2+sumefficiency2;
sumefficiency3=28.*averageefficiency3+sumefficiency3;
average2=dni./5;
P1=average2.*averageefficiency4;
sumefficiency4=28.*P1+sumefficiency4;
formatSpec='第 2 月 21 日的平均余弦效率:%2.4f 平均阴影遮挡效率:%2.4f 平均截断效
率:%2.4f 平均光学效率:%2.4f\n 单位面积镜面平均输出热功率(kW/m2):%5.5f \n';
fprintf(formatSpec,averageefficiency,averageefficiency1,averageefficiency2,a
verageefficiency3,P1);
sumDNI=sumDNI+28.*average2;
day=day+28;
else
[Q1,Q2]=Myfun1(day);
ST=9;%每日初始时间
dni=0;%初始化
SUM=0;
SUM1=0;%阴影遮挡
SUM2=0;%截断总和
SUM3=0;%光学效率综合
SUM4=0;%每日平均有效光学面积
while ST<=15
[DNI, EFF, AverageT5, AverageT6, averageT7]= Myfun2(ST,Q1,Q2);%DNI, 累计余弦效率
(EFF)
SUM=SUM+EFF;
SUM1=SUM1+EFF1;
SUM2=SUM2+AverageT5;
SUM3=SUM3+AverageT6;
SUM4=SUM4+averageT7;
dni=dni+DNI;
ST=ST+1.5;
end
averageefficiency=SUM./8725;%在第 i 月平均个体的余弦效率
averageefficiency1=SUM1./5;%在第 i 月平均个体的阴影遮挡效率
averageefficiency2=SUM2./5;%在第 i 月平均个体的截断效率
averageefficiency3=SUM3./5;%在第 i 月平均个体的光学效率
averageefficiency4=SUM4./5;%在第 i 月平均个体的每日平均有效光学面积

```

```

sumefficiency=30.*averageefficiency+sumefficiency;
sumefficiency1=30.*averageefficiency1+sumefficiency1;
sumefficiency2=30.*averageefficiency2+sumefficiency2;
sumefficiency3=30.*averageefficiency3+sumefficiency3;
average3=dni./5;
P1=average2.*averageefficiency4;
sumefficiency4=30.*P1+sumefficiency4;
formatSpec='第%d 月 21 日的平均余弦效率:%2.4f 平均阴影遮挡效率:%2.4f 平均截断效率:%2.4f 平均光学效率:%2.4f\n 单位面积镜面平均输出热功率(kW/m2):%5.5f\n';
fprintf(formatSpec,i,averageefficiency,averageefficiency1,averageefficiency2,averageefficiency3,P1);
%sumDNI=sumDNI+30.*average3;
day=day+30;
end
if i==12
averageyear=sumefficiency./365;%余弦
averageyear1=sumefficiency1./365;%阴影
averageyear2=sumefficiency2./365;%截断
averageyear3=sumefficiency3./365;%光学
averageP2=sumefficiency4./365;%单位面积镜面年平均输出热功率
P3=averageP2.*1745.*36./1000;
formatSpec='X 年的年平均余弦效率:%2.4f 年平均阴影遮挡效率:%2.4f 年平均截断效率:%2.4f 年平均光学效率:%2.4f\n 单位面积镜面年平均输出热功率(kW/m2):%5.5f 年平均输出热功率(MW):%5.5f\n';
fprintf(formatSpec,averageyear,averageyear1,averageyear2,averageyear3,averageP2,P3);
end
i=i+1;
end
function [q1,q2] = Myfun1(x)%赤纬角正弦值（天数为参数）
q1=sin(2.*pi.*x./365).*sin(2.*pi.*23.45./360);%赤纬角正弦值
q2=realsqrt(abs(1-q1.^2));%赤纬角余弦值
end
function [DNI,Eff,Eff1, averageT5,averageT6,averageT7] = Myfun2(st,e1,e2)%法向直接辐射辐照度 DNI,传递参数值: NDI,余弦效率, 阴影遮挡效率,e1=Q1=赤纬角正弦,e2=Q2=赤纬角余弦
r2=39.4;%当地纬度（度）
G=1.366;%太阳常数
H=3;%海拔高度(km)
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;

```



```

%sin(r1)=Q1;%赤纬角正弦值
%cos(r1)=Q2;%赤纬角余弦值
r3=pi.*(st-12)./12;%太阳时角，ST 为标准时间单位
sun=e2.*cosd(r2).*cos(r3)+e1.*sind(r2);%太阳高度角正弦值
Sun=sqrt(abs(1-sun.^2));%太阳高度余弦值
cosangle=(e1-sun.*sind(r2))./(Sun.*cosd(r2));%太阳方位角余弦值
if(st<=12)
sinangle=realsqrt(abs(1-cosangle.^2));%太阳方位角正弦值
else
sinangle=-realsqrt(abs(1-cosangle.^2));
end
vector1=[-Sun.*sinangle,-Sun.*cosangle,-sun];
f=1;
Eff=0;%累积余弦效率
Eff1_=0;%累计阴影遮挡效率
LOP=0;%累计截断效率
LOP1=0;%累计光学效率
AA=0;%采光面积.*光学效率
load('mirror.mat');
while f<=1745%镜子个数
x1=mirror(f,1);
y1=mirror(f,2);
dhr=realsqrt(6400+x1.^2+y1.^2);%镜面中心到集热器中心距离
vector2=[-x1,-y1,80]./realsqrt(x1.*x1+y1.*y1+6400);
EFFICIENCY=abs(sqrt((1-dot(vector1,vector2))./2));
Eff=EFFICIENCY+Eff;
T1=0.99321-0.0001176.*dhr+1.97.*10.^-8.*dhr.*dhr;%大气透射率
T2=0.92;%镜面反射率
T3=EFFICIENCY;%单镜余弦效率
vector3=[-x1,-y1,80]./realsqrt(x1.^2+y1.^2+6400);%向量 q，用于计算遮挡效率
vector4=[Sun.*sinangle,Sun.*cosangle,sun];%向量 S 用于计算遮挡效率
OP= (sun.*realsqrt(x1.^2+y1.^2+6400)-
80)./(realsqrt(x1.^2+y1.^2+6400).*norm(vector4+vector3));%镜片仰角正弦
T4=0.65365./(realsqrt(1-OP.*OP)+(Sun.*OP./sun));%阴影遮挡效率
T5= Myfun3(x1,y1,T3); %集热器截断效率
LOP=LOP+T5;
T6=T5.*T4.*T3.*T2.*T1;%光学效率
LOP1=LOP1+T6;%累计光学效率
Eff1_=T4+Eff1_;
%%镜子面积与光学效率乘积
aa=0.96.*36.*T6;
AA=AA+aa;%求和公式

```

```

f=f+1;
end
Eff1=Eff1_./1745;%平均阴影
averageT5=LOP./1745;%平均截断
averageT6=LOP1./1745;%平均光学效率
averageT7=AA./(36.*1745);%单位有效镜面面积
DNi=G.*(a+b.*exp(-c./sun));%法向直接辐射辐照度 DNi(参数)
end
function w1 = Myfun3(X1,Y1,A)%截断效率,余弦效率
d=sqrt(X1.^2+Y1.^2+6400);
Ht=6.*abs(d-A);
Ws=6.*abs(d.*A-1);
k1=2.51;
k2=0.63;
k3=sqrt(0.5.*(Ht.^2+Ws.^2))./(4.3.*d);
k4=d.*sqrt(k1.^2+k2.^2+k3.*k3);
fun = @(x,y) exp(-(x.^2+y.^2)./k4.^2).*10.^4./(2.*pi.*k4.^2);
w1=integral2(fun,-7,7,-8,8);
end

```

附录 2

介绍：该代码是 matlab 语言编写的，作用是计算单位面积镜面平均输出热功率最大值。

2code

```

%% 初始化种群
clear
clc
f = @(x,y) -60000./(x.*y.*y) ;%[-5.12 ,5.12 ]

x0 = -5.12:0.05:5.12;
y0 = x0 ;
[X,Y] = meshgrid(x0,y0);
Z =f(X,Y);
figure(1); mesh(X,Y,Z);
colormap(parula(5));

N = 100; % 初始种群个数
d = 2; % 可行解维数
ger = 100; % 最大迭代次数
limit = [-5.12,5.12]; % 设置位置参数限制
vlimit = [-.5, .5]; % 设置速度限制
w = 0.8; % 惯性权重
c1 = 0.4; % 自我学习因子
c2 = 0.6; % 群体学习因子

x = limit(1) + ( limit( 2 ) - limit( 1 ) ) .* rand(N, d);%初始种群的位置

v = rand(N, d); % 初始种群的速度
xm = x; % 每个个体的历史最佳位置
ym = zeros(1, d); % 种群的历史最佳位置
fxm = ones(N, 1)*inf; % 每个个体的历史最佳适应度
fym = inf; % 种群历史最佳适应度
% record = zeros(ger,1);
hold on
% [X,Y] = meshgrid(x(:,1),x(:,2));
% Z = f( X,Y ) ;
scatter3( x(:,1),x(:,2) ,f( x(:,1),x(:,2) ), 'r*' );
figure(2)
record=[];

%% 群体更新
iter = 1;
% record = zeros(ger, 1); % 记录器
while iter <= ger

```

```

fx = f( x(:,1),x(:,2) ); % 个体当前适应度
for i = 1:N
    if fx(i) < fxm(i)
        fxm(i) = fx(i); % 更新个体历史最佳适应度
        xm(i,:) = x(i,:); % 更新个体历史最佳位置(取值)
    end
end
if min(fxm) < fym
    [fym, nmin] = min(fxm); % 更新群体历史最佳适应度
    ym = xm(nmin, :); % 更新群体历史最佳位置
end
v = v * w + c1 * rand * (xm - x) + c2 * rand * (repmat(ym, N, 1) - x); % 速度更新
% 边界速度处理
v(v > vlimit(2)) = vlimit(2);
v(v < vlimit(1)) = vlimit(1);
x = x + v; % 位置更新
% 边界位置处理
x(x > limit(2)) = limit(2);
x(x < limit(1)) = limit(1);
record(iter) = fym; % 最大值记录
subplot(1,2,1)
mesh(X,Y,Z)
hold on
scatter3( x(:,1),x(:,2) ,f( x(:,1),x(:,2) ) , 'r*'); title(['状态位置变化', '-
迭代次数: ', num2str(iter)])
subplot(1,2,2); plot(record); title('最优适应度进化过程')
pause(0.01)
iter = iter+1;

end

figure(4); mesh(X,Y,Z); hold on
scatter3( x(:,1),x(:,2) ,f( x(:,1),x(:,2) ) , 'r*'); title('最终状态位置')
disp(['最优值: ', num2str(fym)]);
disp(['变量取值: ', num2str(ym)]);

```

二元函数非线性优化

```

fun = @(x) 60000./(-(x(1).*x(2).^2));
lb = [2, 500];
ub = [8, 2000];

```

```
A = [];  
b = [];  
Aeq = [];  
beq = [];  
x0=[500,3];  
nonlcon = @circlecon;  
x = fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon);
```