

定日镜场的优化设计

摘要

本文针对定日镜场的优化设计问题，建立了基于光线追迹法的几何模型，利用蒙特卡洛法求出了定日镜的平均光学效率；建立了单目标优化模型，考虑两种不同的定日镜场设计策略，根据年平均输出热功率做出比较，选取较优的设计策略，对于所有定日镜尺寸与高度相同或不同的情况下，分别对定日镜场的参数进行了优化设计。

针对问题一，建立了**基于光线追迹法的几何模型**，求解了定日镜场的日均、年均光学效率与热输出功率等问题。根据阴影遮挡效率、余弦效率、大气透射率、集热器截断效率及镜面反射率计算平均光学效率。其中，余弦效率为入射光线与法线夹角的余弦值，即入射角的余弦值；大气透射率仅与镜面中心到集热器中心的距离有关；镜面反射率为常数 0.92。而阴影遮挡效率和集热器的截断效率是计算光学效率过程中的难点：对于**阴影遮挡效率**的计算，采用**蒙特卡洛光线追迹法**。在所求定日镜平面上按照太阳光锥能量密度随机生成大量入射光线，根据定日镜法线，得到定日镜出射光线，则阴影遮挡效率可表示为入射光线且出射光线都未被遮挡的数量与总生成数量的比值；对于**集热器截断效率**的计算，将该**反射光线与集热器的曲面方程联立**。根据联立结果，若有解，则说明反射光线能够反射到集热器上，集热器截断效率可表示反射到集热器光线数量与所有反射线中未被遮挡的光线数量的比值。最终得到问题一中的**年均光学效率及输出功率等参数分别为：0.6093、0.7431、0.9283、0.9828、35.4430MW、0.5642kW/m²**。其余月份结果见正文。

针对问题二，建立了以**获得最大的单位面积的年平均输出功率**为目标函数的**单目标优化模型**，求解了在达到额定功率 60MW 的情况下，定日镜场的合理参数。该优化模型以定日镜的数目、镜面宽度与高度、安装高度及吸收塔的坐标为决策变量，以定日镜的边长限制在 2m-8m 之间、高度限制在 2m-6m 之间以及底座中心之间的距离比镜面宽度多 5m 等要求作为**约束条件**。考虑两种不同的设计策略：策略一为随机生成的定日镜布局方式，该策略在满足约束条件的情况下，随机生成定日镜的中心点，使这些中心点尽量布满整个镜场；策略二为基于同心圆的交错布局方式，即以吸热塔为圆心作同心圆，各圆上的定日镜采用交错分布方式。采用**粒子群算法**求解得到了定日镜场的最优参数，分别为：**吸收塔的位置坐标(0,-248)、定日镜尺寸为 6.5×6.5m、安装高度为 4.3m、定日镜数目为 2617 面，且额定功率为 60.5361MW**，满足题目要求。最后比较两种策略在最优情况下的单位面积年平均输出热功率，策略二明显优于策略一。

针对问题三，建立了以**获得最大的单位面积的年平均输出功率**为目标函数的**单目标优化模型**。问题三与问题二的不同之处在于：各定日镜的尺寸与高度有所不同，故需要引入多个决策变量，采用问题二中较优的设计策略二对定日镜场的参数进行重新设计。由于策略二采用同心圆交错排布方式，故可以大幅减少本问题中决策变量的数量。继续采用粒子群算法对该模型进行求解，结果分别为：**吸收塔的位置坐标(0,-200)、定日镜数目为 2638 面，且额定功率为 62.2579MW**，满足题目要求。

关键词： 塔式光热电站 光线追迹法 蒙特卡洛法 单目标优化模型 粒子群算法

一、 问题重述

1.1 问题背景

塔式太阳能光热发电是一种低碳环保的新型清洁能源技术，通过不断优化镜场光学效率等关键技术，可以提高光热电站的能量利用效率和经济效益，为实现清洁能源的可持续发展做出贡献。

其中，塔式太阳能光热电站是一种利用定日镜聚集太阳光能的设备，通过将低密度的太阳光能量反射到位于高塔顶部的吸热器上聚集成为高密度的太阳光能量，再将光能转换成工质热能，最终通过汽轮发电机组将热能转换成电能的过程。这一过程实际上是反射镜成像的过程，其中太阳为光源，定日镜为反射镜，吸热器则是光斑的成像点。

在塔式太阳能光热电站中，镜场光学效率是衡量一个镜场布置是否合理的最主要指标。因此，对于镜场光学效率的计算方法研究是光热电站的一项重点内容。为了提高镜场光学效率，可以采用多种方法，例如优化定日镜的形状和布置、改善吸热器的热传递性能等。此外，还可以采用自适应控制技术，根据天气条件和太阳位置等因素，自动调整定日镜的角度和位置，最大程度地提高镜场光学效率。

1.2 题目已给参数

(1) 该题考虑在中心位于东经 98.5 度，北纬 39.4 度，海拔 3000m，半径为 350m 的圆形区域内建设一个圆形定日镜场。

(2) 镜场坐标系：把圆形区域的中心作为原点，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。

(3) 已知吸收塔高度为 80m，集热器高 8m、直径 7m 的圆柱形外表受光式集热器。

(4) 该题中所有“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。

(5) 按设计要求，定日镜场的额定年平均输出热功率为 60MW。

1.3 问题重述

为了更好地塔式太阳能光热进行发电，请你们团队根据附录中的计算公式及相关参数建立模型解决以下问题：

问题一：已知所有定日镜中心的位置，定日镜的形状为正方形，镜面宽度与高度均为 6 米，安装高度均为 4 米，建立的吸收塔位于该圆形定日镜场中心。请根据以上条件计算该定日镜场的年平均光学效率、年平均输出热功率，以及单位镜面面积年平均输出热功率。将结果按照格式分别填入表 1 和表 2。

问题二：已知所有定日镜镜面宽度、镜面高度、安装高度相同，在定日镜场在达到额定功率的情况下，要求单位镜面面积年平均输出热功率尽量大。请设计定日镜场的以下参数：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。将结果分别按照格式填入表 1、表 2、表 3，以及把吸收塔的位置坐标、定日镜尺寸、安装高度、位置坐标按规定的格式保存在“result2.xlsx”文件中。

问题三：已知额定功率设置同问题二，考虑定日镜镜面宽度、镜面高度、安装高度可以不相同。在定日镜场在达到额定功率的情况下，要求单位镜面面积年平均输出热功率尽量大，请重新设计定日镜场的各个参数。将结果分别按照格式填入表 1、表 2、表 3，以及把吸收塔的位置坐标、各定日镜尺寸、安装高度、位置坐标按规定的格式保存到“result3.xlsx”文件中。

二、 问题分析

2.1 问题一的分析

问题一要求求解一年中每月 21 日的日均、年均光学效率与热输出功率，这需要分别求出每月 21 日中 5 个不同时刻各效率、功率的日均值，进而对全年中 12 个月各效率、功率的日均值分别求平均，即可求得各效率、功率的年均值。

为求解日均效率问题，以日均光学效率为例，需分别求出每月 21 日中 5 个时刻所对应的五个定日镜场的光学效率值，对该五个值求算数平均即为定日镜场每月 21 日的日均光学效率，对一年中 12 天的日均光学效率求算数平均值即可求出年均光学效率。为求解日均单位面积的平均输出热功率，需分别求出每月 21 日中五个时刻所对应的定日镜场单位面积输出热功率，对该五个值求平均即为日均单位面积的平均输出热功率，对一年中 12 天的日均单位面积的平均输出热功率求平均值即可求出年均单位面积的平均输出热功率。

平均光学效率的求解需要用到五个效率值，分别为镜面反射率、大气透射率、余弦效率、阴影遮挡效率和集热器截断效率。其中，**镜面反射率**为常数 0.92，而**大气透射率**只与镜面中心与集热器中心的距离有关，由于问题一中各镜面中心与集热器中心的坐标均已知，故求解该距离值较为容易。

余弦效率，即为入射光线与法线之间夹角的余弦值。这是因为入射光线射向定日镜的过程中，入射光线平行于定日镜的分量无法被反射，能被定日镜反射的部分仅仅是入射光线垂直于定日镜的分量，故余弦效率为垂直于定日镜的分量与入射光线的比值，即入射角的余弦值。

阴影遮挡效率，分为三部分，即由阴影效率、遮挡效率和吸收塔的阴影覆盖率组成：阴影效率指定日镜受其他镜面遮蔽，处在阴影区域的镜面面积占比；遮挡效率指定日镜反射的光线被其他镜面遮挡无法正常射出的比例；吸收塔的阴影覆盖率指吸收塔在太阳光下的阴影占所有定日镜面积的比例。

截断效率，指所有反射的光线中能被集热器所吸收的部分占所有反射光线(包括集热器吸收的部分、被遮挡的反射光线和未被集热器吸收)的百分比。由于太阳光不是平行光线，而是具有一定锥角的一束锥形光线^[1]。因此，在计算镜场截断效率的过程中，通常采用**基于光线追踪的蒙特卡洛法**求解。

2.2 问题二的分析

问题二是单目标优化问题，要求在额定功率达到 $60MW$ ，且单位面积的年均输出热功率尽可能大的条件下，合理设计定日镜场的参数。建立**单目标优化模型**，以**单位面积的年平均输出功率为目标函数**，以定日镜的数目、镜面宽度、镜面高度、安装高度和吸收塔的坐标为决策变量，以定日镜的边长限制在 $2m-8m$ 之间、高度限制在 $2m-6m$ 之间以及底座中心之间的距离比镜面宽度多 $5m$ 等要求作为约束条件。

考虑两种不同的设计策略：策略一为随机生成的定日镜布局，该策略在满足约束条件的情况下，随机生成定日镜的中心点，使这些中心点尽量布满整个镜场；策略二为基于同心圆的交错布局方式，即以吸热塔为圆心作同心圆，各圆上的定日镜采用交错布局方式。确定定日镜场各参数后，分别对两种策略计算单位面积的最大年平均输出热功率。联系实际生活，策略一的方式不利于施工，且定日镜之间的相互遮挡较大，而策略二的方式不仅形态上较为美观，便于施工，且定日镜之间的相互遮挡面积很小。

综上考虑，**选择策略二：基于同心圆的交错布局方式**对定日镜场进行布局。而后采

用**粒子群算法**求得，在额定功率达到 $60MW$ 的条件下，单位面积的年均输出热功率的最大值。

2.3 问题三的分析

问题三也是单目标优化问题，建立单目标优化模型，但与问题二的不同之处在于本问题中**各定日镜的尺寸、安装高度可以不相同**，这就需要重新引入多个决策变量。经过问题二的分析可知，问题二中提出的第二种设计策略较第一种设计策略更优，故在本问题中直接采取策略二对定日镜场的各参数进行设计。同样采用**粒子群算法**，在额定功率达到 $60MW$ 的条件下，求得单位面积的年均输出热功率的最大值。

三、 模型假设

1. 假设每月 21 日的天气状况均相同且晴朗；
2. 假设每面定日镜仅遮挡其相邻后方的定日镜，或仅被其相邻前方的定日镜遮挡；
3. 假设吸收塔的阴影区域近似看作一矩形；
4. 假设不考虑定日镜之间发生干涉。

四、 符号说明

符号	说明	单位
α_s	太阳高度角	度
γ_s	太阳方位角	度
δ	太阳赤纬角	度
ω	太阳时角	度
φ	当地纬度	度
ST	当地时间	/
DNI	法向直接辐射辐照度	kW/m^2
G_0	太阳常数	kW/m^2
E_{field}	定日镜场的输出热功率	kW
η_i	第 i 面定日镜的光学效率	/
η_{sbi}	第 i 面定日镜的阴影遮挡效率	/
$\eta_{\cos i}$	第 i 面定日镜的余弦效率	/
η_{ati}	第 i 面定日镜的大气透射率	/
η_{trunci}	第 i 面定日镜的集热器截断效率	/
η_{refl}	第 i 面定日镜的镜面反射率	/
d_{HRi}	第 i 面定日镜中心到集热器中心的距离	m
H_0	集热器中心到地面的距离	m
H	海拔高度	km
R	镜场圆形区域的半径	m

r	吸收塔周围不安装定日镜的区域半径	m
h_0	集热器的高度	m
d	集热器的半径	m
m_i	定日镜的镜面宽度	m
n_i	定日镜的镜面高度	m
h_i	定日镜的安装高度	m
l	吸收塔的阴影长度	m
N	定日镜总数	面

五、 问题一模型的建立与求解

针对问题一，首先要求出每月 21 日的日均效率、功率，进而对一年中 12 个月的 21 日的日均效率与功率求算术平均值，即可得到年均效率、功率。对于各日均效率，需要分别求出每月 21 日中五个不同时刻定日镜场的各效率，对这五个不同时刻的效率值求算术平均值，即为每天的日均效率。对于年平均输出热功率的求解方法与上述同理。

5.1 问题一模型的建立

5.1.1 问题一模型建立的准备

(1) 建立定日镜场坐标系

为了计算定日镜场的光学效率、输出热效率，首先需要确定太阳的位置、集热塔的高度和集热器的类型及尺寸、定日镜的位置、规格以及朝向等。

如图 1 所示，以圆形区域的中心作为坐标原点，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，即镜场坐标系。

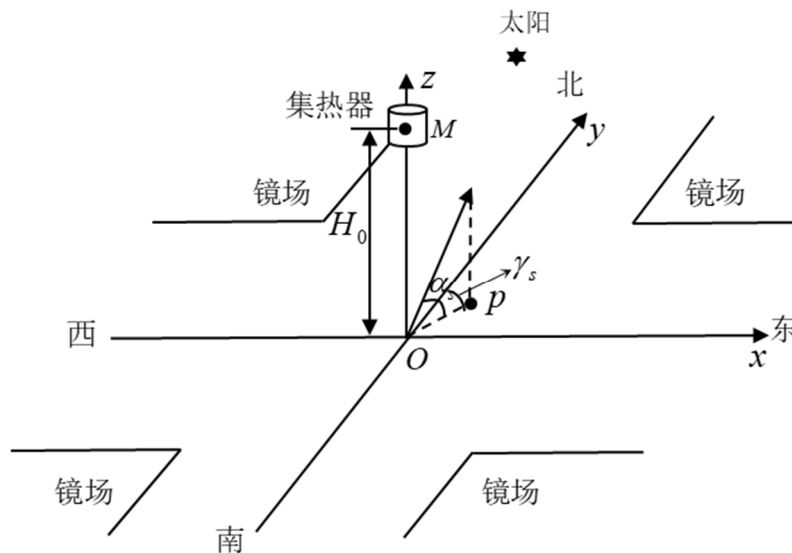


图 1 定日镜场坐标系示意图

(2) 计算反射光线的方程

太阳的位置与当地的经纬度、海拔和观测时间有关,通常用高度角与方位角来表示:太阳高度角 $\alpha_s^{[2]}$ 为一个地方的太阳入射光线与入射光在地平面上的投影所成的夹角,范围为 $(0^\circ-90^\circ)$;太阳方位角 $\gamma_s^{[3]}$ 为太阳入射光线在地平面上的投影光线从地球北方沿地平线顺时针量度的角,范围为 $(0^\circ-360^\circ)$ 。

因此,太阳入射光的单位向量 $\vec{r}_{in}=(x_i, y_i, z_i)$,结合建立的**镜场坐标系**可以得到具体的计算公式:

$$\begin{cases} x_i = \cos \alpha_s \sin \gamma_s \\ y_i = \cos \alpha_s \cos \gamma_s \\ z_i = \sin \alpha_s \end{cases} \quad (5-1)$$

设反射光线的单位向量 $\vec{r}_{out}=(x'_i, y'_i, z'_i)$,已知吸收塔高度 $H=80m$,即**集热器中心**为 $M(0,0,80)$,可得具体的计算公式:

$$\begin{cases} x'_i = \frac{-x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (80 - x_i)^2}} \\ y'_i = \frac{-y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (80 - x_i)^2}} \\ z'_i = \frac{80 - z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (80 - x_i)^2}} \end{cases} \quad (5-2)$$

已知入射光线与反射光线的方向向量后,由光的反射原理反射角等于入射角,可以得到第*i*面向日镜平面上的法向量,它们的关系如图2所示:

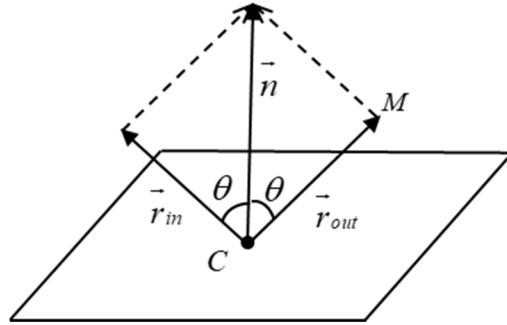


图2 向日镜面上的入射与反射光线方向向量及法向量的关系

由平行四边形法则,入射光线与反射光线的方向向量和第*i*面向日镜平面上的单位法向量 $\vec{n}=(a,b,c)$ 之间的关系可以表示为:

$$\vec{r}_{in} + \vec{r}_{out} = 2\vec{n} \cos \theta \quad (5-3)$$

因此,可以用点向式表示反射光线 **CM** 的方程:

$$\frac{x - x_i}{a} + \frac{y - y_i}{b} + \frac{z - z_i}{c} = 0 \quad (5-4)$$

(3) 太阳高度角和方位角的表达式

太阳高度角 α_s 为一个地方的太阳入射光线与入射光在地平面上的投影所成的夹角，其表达式为：

$$\sin \alpha_s = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi \quad (5-5)$$

太阳方位角 γ_s 为太阳入射光线在地平面上的投影光线从地球北方沿地平线顺时针量度的角，其表达式为：

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \delta - \sin \alpha_s \sin \varphi}{\cos \alpha_s \cos \varphi} \quad (5-6)$$

其中， δ 为太阳赤纬角^[4]，其计算式为：

$$\sin \delta = \sin \frac{2\pi D}{365} \sin \left(\frac{2\pi}{360} 23.45 \right) \quad (5-7)$$

其中 D 为以春分作为第 0 天起开始计算的天数，且 $D \geq 0$ ； φ 为当地纬度，以北纬的方向为正方向； ω 为太阳时角，其计算式为：

$$\omega = \frac{\pi}{12} (ST - 12) \quad (5-8)$$

其中 ST 为当地时间。

5.1.2 阴影遮挡模型

定日镜的阴影遮挡效率本质上是由镜面布置过于紧密引起的，它包含阴影效率和遮挡效率两部分。

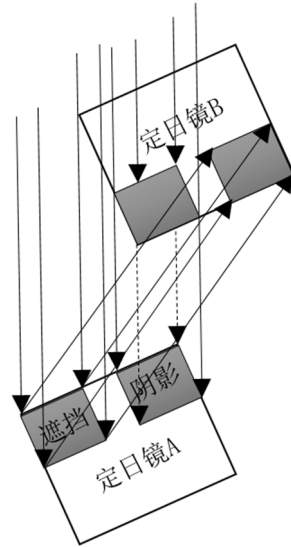


图 3 定日镜间的阴影和遮挡示意图

如图 3 所示，阴影效率指定日镜 A 受位于其光线来向前方镜面 B 的阻挡，部分镜面处在前方镜面的阴影区内，未被遮蔽的镜面面积占比即为阴影效率；遮挡效率指定日镜 A 上部分镜面反射的光线，被前方镜面 B 遮挡无法到达吸热面。遮挡区域与总镜面积之比为遮挡效率。

由于阴影和遮挡可能在同一面定日镜上同时发生，而它们都与面积相关，可以用比值来衡量。因此，将二者统一考虑并称为阴影遮挡效率。对于任一面定日镜，其阴影遮挡效率可看作所有定日镜有效反射面积与定日镜总面积之比。

要计算阴影遮挡导致光线损失的过程，即判断定日镜 A 上任意一点沿着入射或逆着反射光线是否能落入定日镜 B 的镜面区域内，并求出该点在定日镜 B 的镜面坐标。

(1) 建立定日镜坐标系

在定日镜 A 坐标系上随机生成大量点，任意取一点 $A_1 = (x_1, y_1, z_1)$ ，对经过该点的入射光线进行研究。如图 4 所示：

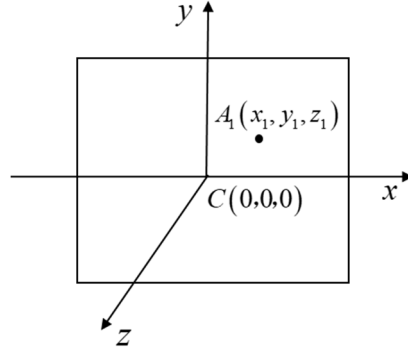


图 4 定日镜坐标系示意图

(2) 坐标系转换

每面定日镜都有自己的坐标系，若在这些坐标系统中表示的点坐标之间无法对应，则整个定日镜场没有意义。因此，需要建立这些坐标系与定日镜场坐标系之间的转换关系。

根据坐标系的空间旋转关系可知，任一坐标系旋转一定角度后可获得新的坐标系。在原坐标系统中的点 A_1 ，在新坐标系中的坐标等于原坐标乘以一个旋转矩阵 R_{xyz} 。即：

$$A'_1 = R_{xyz} \cdot A_1 \quad (5-9)$$

坐标系统 x 轴旋转 τ_x 度，可以得到旋转矩阵：

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \tau_x & -\sin \tau_x \\ 0 & \sin \tau_x & \cos \tau_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

坐标系统 y 轴旋转 τ_y 度，可以得到旋转矩阵：

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \tau_y & 0 & \sin \tau_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \tau_y & 0 & \cos \tau_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

坐标系统绕 z 轴旋转 τ_z 度，可以得到旋转矩阵：

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \tau_z & -\sin \tau_z & 0 \\ \sin \tau_z & \cos \tau_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

以上三式中， τ_x, τ_y, τ_z 均以逆时针旋转方向为正方向。

针对定日镜的旋转，由于定日镜的方位角为 τ_z ，俯角为 τ_x ，面上的单位法向量为 $\vec{n} = (a, b, c)$ 。要得到旋转矩阵 R_{xyz} ，则需要将坐标轴先绕 z 轴旋转 τ_z 度，再绕 x 轴旋转 τ_x 度，即可得到旋转矩阵：

$$R_{xyz} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} & \frac{-\sqrt{a^2+b^2}}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{a^2+b^2}}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} & \frac{c}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}} & \frac{-a}{\sqrt{a^2+b^2}} & 0 \\ \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}} & \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5-10)$$

合并可得：

$$R_{xyz} = \begin{pmatrix} \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}} & \frac{-a}{\sqrt{a^2+b^2}} & 0 \\ \frac{ac}{\sqrt{a^2+b^2}} & \frac{bc}{\sqrt{a^2+b^2}} & -\sqrt{a^2+b^2} \\ a & b & c \end{pmatrix} \quad (5-11)$$

假设经过点 A_1 的一条光线在镜场坐标系的向量为：

$$\vec{V}_0 = (a, b, c), \quad (5-12)$$

在定日镜坐标系的向量为：

$$\vec{V}_1 = (a_1, b_1, c_1),$$

由式(5-9)可得两向量之间的转换关系：

$$\vec{V}_0 = R_{xyz} \cdot \vec{V}_1 \quad (5-13)$$

(3) 将定日镜 A 上的点转换到定日镜 B 上

在定日镜 A 坐标系下， A 镜上的一点 $A_1 = (x_1, y_1, z_1)$ ，要求经过太阳光入射到 B 镜上的点 $B_1 = (x_2, y_2, z_2)$ 。

将定日镜 A 上的一点 A_1 转换到镜场坐标系下的坐标，即定日镜坐标系下的点 A_1 在镜场坐标系下可表示为：

$$A'_1 = R_{xyz} \cdot A_1 + O_{A_1} = \begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} \quad (5-14)$$

其中， O_{A_1} 表示定日镜 A 坐标系原点在镜场坐标系的坐标值，可以将它记作 $(x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1})$ 。

再将镜场坐标系上的点 A'_1 转换到定日镜 B 坐标系上得到 A''_1 ，即：

$$A''_1 = R_{xyz}^\top \cdot (A'_1 - O_{B_1}) = \begin{pmatrix} x''_1 \\ y''_1 \\ z''_1 \end{pmatrix} \quad (5-15)$$

其中， O_{B_1} 表示定日镜 B 坐标系原点在镜场坐标系的坐标值，可以将它记作 $(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$ 。

把光线在镜场坐标系下的向量 $\vec{V}_0 = (a, b, c)$ ，转换到定日镜 B 坐标系下可得向量 \vec{V}_B ：

$$\vec{V}_B = R_{xyz}^\top \cdot \vec{V}_0 \quad (5-16)$$

将转换后的光线向量记为 $\overrightarrow{V_B} = (a_B, b_B, c_B)$ 。由点向式，已知 A_1 点在定日镜坐标系上的投影点 A_1'' 以及光线向量 $\overrightarrow{V_B}$ 可求得光线的表达式为：

$$\frac{x-x_1''}{a_B} = \frac{y-y_1''}{b_B} = \frac{z-z_1''}{c_B} \quad (5-17)$$

联立该光线的表达式与定日镜 B 所在平面可得：

$$\begin{cases} \frac{x-x_1''}{a_B} = \frac{y-y_1''}{b_B} = \frac{z-z_1''}{c_B} \\ z=0 \end{cases} \quad (5-18)$$

解得该直线与定日镜 B 平面的交点 B_1 的坐标为 $(x_2, y_2, 0)$ 。

(4) 判断是否存在阴影

通过判断投影点位置是否在定日镜 B 的镜面范围上可确定是否存在阴影损失，由于已知镜面安装高度与宽度为 $6m$ ，因此，具体的判断依据为：

$$\begin{cases} -3 \leq x_2 \leq 3 \\ -3 \leq y_2 \leq 3 \end{cases} \quad (5-19)$$

(5) 吸收塔的阴影覆盖面

由于太阳发出的锥形光的顶角很小，故研究吸收塔在太阳光中的阴影覆盖面积时，可将锥形光线近似等价为平行光线，且平行光线与地面的夹角即为太阳的高度角 α_s ，吸收塔在太阳光线下的阴影形态如下图 5 所示：

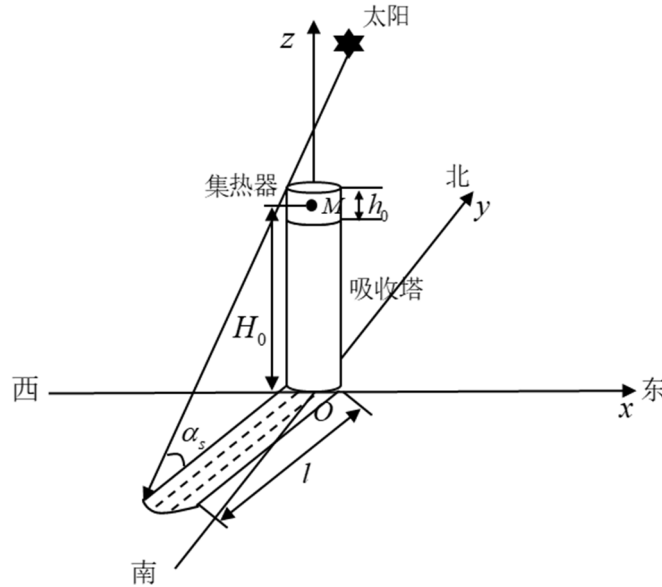


图 5 吸收塔的阴影示意图

由于集热器中心离地面的距离为 H_0 ，集热器的高度为 h_0 ，故该吸收塔的实际高度为 $H_0 + \frac{h_0}{2}$ 。在高度角为 α_s 的平行光下，该吸收塔的阴影长度为：

$$l = \frac{H_0 + \frac{h_0}{2}}{\tan \alpha_s} \quad (5-20)$$

由于太阳与地面的距离足够远，故该阴影区域可近似看作一矩形区域，其宽度即为集热器的直径 d 。因此，吸收塔的阴影覆盖面为：

$$S = dl \quad (5-21)$$

5.1.3 截断效率模型

由于太阳光不是平行光线，而是具有一定锥角的一束锥形光线。因此，在计算镜场截断效率的过程中，通常采用**光线追踪法**，它可以从光线的产生开始模拟并且一直追踪光线直到其到达接受面。

(1) 非平行太阳光的锥角^[5]

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。如图 6 所示：

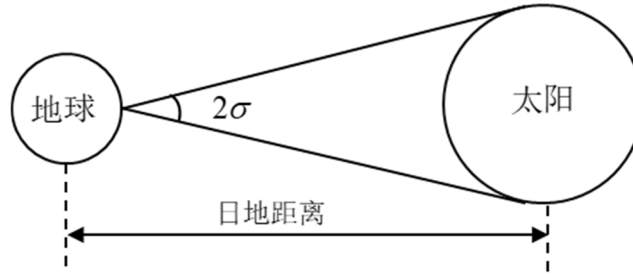


图 6 太阳光锥示意图

日地距离为 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ ，太阳的半径为 $6.96 \times 10^5 \text{ km}$ 。由此可以得到太阳光锥的锥角：

$$2\sigma = 2 \sin \sigma = 9.3 \text{ mrad} \quad (5-22)$$

其中， σ 为太阳光锥的一半，即 4.65 mrad 。

由光的反射原理，反射角等于入射角。因此，经定日镜反射后得到的光线锥角等于入射的光线锥角等于 9.6 mrad 。

(2) 建立光锥坐标系

为求出光锥中某一条锥形光线的表达式，首先需要建立一个光锥坐标系 $O'-X'Y'Z'$ ，如图 7 所示：

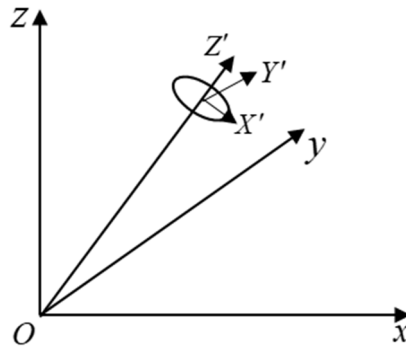


图 7 光锥坐标系示意图

一束光锥包含无数光线。计算截流效率或吸热器能量密度时，需要累积计算许多光线经定日镜反射后到达吸热器的落点坐标。以一束光锥中的单根光线为例，详细的计算过程为：

设一束光锥中的一根光线在该坐标系的向量为 $\vec{V}_s = (d, e, f)$ ，将它乘以一个旋转矩阵即可转换到镜场坐标系下，得到在镜场坐标系的向量 $\vec{V}_{s_1} = (d_1, e_1, f_1)$ ，即：

$$\vec{V}_{s_1} = R_{x'yz'}^{-1} \cdot \vec{V}_s \quad (5-23)$$

$$R_{XYZ'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90-\alpha_s) & -\sin(90-\alpha_s) \\ 0 & \sin(90-\alpha_s) & \cos(90-\alpha_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma_s & -\sin \gamma_s & 0 \\ \sin \gamma_s & \cos \gamma_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-24)$$

根据向日镜面上的入射光线方向向量及法向量可以计算出反射光线的表达式，由平行四边形法则，入射光线与反射光线的方向向量和向日镜平面上的单位法向量 $\vec{n}=(a,b,c)$ 之间的关系可以表示为：

$$\cos \theta = \frac{\vec{V}_{s_1} \cdot \vec{n}}{|\vec{V}_{s_1}| |\vec{n}|} = \vec{V}_{s_1} \cdot \vec{n} \quad (5-25)$$

由于反射角等于入射角，可以得到反射光线的向量表达式：

$$\vec{V}_{s_2} = 2 \cos \theta \vec{n} - \vec{V}_{s_1} \quad (5-26)$$

将反射光线的单位向量记为 $\vec{V}_{s_2} = (d_2, e_2, f_2)$ 。因此，可以用点向式表示反射光线的方程：

$$\frac{x-x'_1}{d_2} = \frac{y-y'_1}{e_2} = \frac{z-z'_1}{f_2} \quad (5-27)$$

联立集热器圆柱面的方程，可以解得反射光线与集热器在圆柱面上的交点，即：

$$\begin{cases} \frac{x-x'_1}{d_2} = \frac{y-y'_1}{e_2} = \frac{z-z'_1}{f_2} \\ x^2 + y^2 = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \\ z \in \left[H_0 - \frac{h_0}{2}, H_0 + \frac{h_0}{2}\right] \end{cases} \quad (5-28)$$

对该方程组进行求解，若有解，则说明反射光线能够反射到集热器上，若无解，则说明反射光线不能够反射到集热器上或反射光线被前一个定日镜所遮挡。

5.1.4 定日镜光学效率 η 模型

由于光学效率受多种因素影响，附录中给出定日镜的光学效率 η 的表达式为：

$$\eta = \eta_{sb} \eta_{\cos} \eta_{at} \eta_{trunc} \eta_{ref} \quad (5-29)$$

其中， η_{sb} 为定日镜的阴影遮挡效率，与相邻定日镜间产生的阴影和遮挡的面积有关； η_{\cos} 为定日镜的余弦效率，与太阳入射角，即入射光线与定日镜平面法线的夹角有关； η_{at} 为大气透射率，与当地以及当天的天气情况，例如阴晴、温度、风速等有关； η_{trunc} 为集热器截断效率； η_{ref} 为定日镜的反射效率，与镜面的材质、清洁度等有关，本文中将其视作常数，取 0.92。

➤ 阴影遮挡效率

阴影遮挡效率反映了定日镜之间相互遮挡对光能利用效率的影响，是评估定日镜场设计的重要指标，它由阴影效率、遮挡效率和吸收塔的阴影覆盖率三部分组成。其中，阴影效率指定日镜受其他镜面遮蔽，处在阴影区域的镜面面积占比；遮挡效率指定日镜反射的光线被其他镜面遮挡无法正常射出的比例；吸收塔的阴影覆盖率指吸收塔在太阳光下的阴影占有所有定日镜面积的比例。这三种效率越高，表示镜面布置越紧密，光能利

用效率越低。计算阴影遮挡效率需要建模镜面的几何位置关系，通过光线追踪判断遮挡情况。

➤ 余弦效率

定日镜的余弦效率对定日镜光学效率的影响很大，且是不可避免的一个因素。当太阳辐照直射到吸热面时，若入射光线垂直定日镜面，那么入射能量几乎可以全部反射出去。但实际中，入射光线和镜面之间一定存在一个角度 θ_i ，如图8所示：

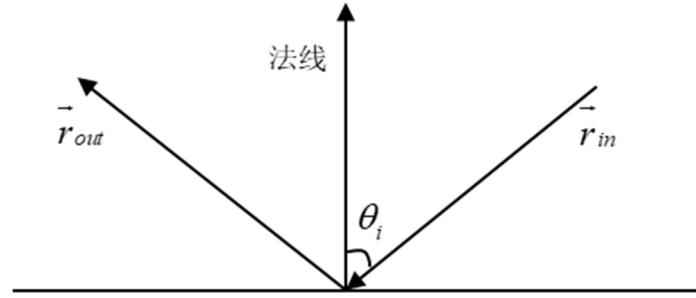


图8 余弦效率示意图

这致使入射光线平行于镜面的分量无法被反射，只有垂直镜面的分量可以反射，而这部分与入射能量比值为入射光线和镜面夹角的余弦值。因此，由向量的内积公式可知：

$$\vec{n} \times \vec{r}_{out} = |\vec{n}| \cdot |\vec{r}_{out}| \cdot \cos \theta_i \quad (5-30)$$

得到余弦效率的表达式：

$$\cos \theta_i = \frac{|\vec{n} \times \vec{r}_{out}|}{|\vec{n}| \cdot |\vec{r}_{out}|} \quad (5-31)$$

其中， θ_i 为入射角。

➤ 大气透射率^[6]

经过定日镜反射的太阳辐照在从镜面到达吸热器的过程中会发生一定程度的衰减，这种现象称为大气透射损失。吸热器接收的能量与镜面反射出的能量之比即为大气透射率。

大气透射率与观测地海拔、气候条件、空气组成(湿度、颗粒浓度等)以及镜面与吸热器距离有关。对已知的定日镜场而言，前三项因素基本固定，所以大气透射率主要取决于镜面与吸热器距离，可以用数学公式表示为一个距离的单变量函数，即：

$$\eta_{at} = 0.99321 - 0.0001176d_{HR} + 1.97 \times 10^{-8} \times d_{HR}^2 \quad (d_{HR} \leq 1000) \quad (5-32)$$

其中， d_{HR} 为镜面中心到集热器中心的距离，单位是 m ，即：

$$d_{HR} = \sqrt{(x_i - 0)^2 + (y_i - 0)^2 + (z_i - 80)^2} \quad (5-33)$$

➤ 集热器截断效率

集热器截断效率反映了定日镜反射进入集热器的光线比例。如果反射光线未打在集热器打开口，而溢出边界，则表示发生截流现象。截流光线无法被集热器利用，降低了系统效率。计算时需要确定各定日镜反射光线方向，追踪光线是否入射集热器内，然后统计截流光线数目。截断效率越高，表示定日镜布置和集热器匹配性越好，光能聚集利用效率越高。

在5.1.3中得到：若式(5-21)有解，则说明反射光线能够反射到集热器上，若无解，则说明反射光线不能够反射到集热器上或反射光线被前方定日镜所遮挡。

5.1.5 定日镜输出热功率 E_{field} 模型

由附录，定日镜场的输出热功率 E_{field} 模型为：

$$E_{field} = DNI \cdot \sum_i^N A_i \eta_i \quad (5-34)$$

其中， N 为定日镜的总数； A_i 为第 i 面定日镜的面积； η_i 为第 i 面镜子的光学效率； DNI 为法向直接辐射辐强度^[8]，它表示地球上与太阳光线相垂直的平面在单位时间内，单位面积上接收到的太阳辐射能力，其计算式为：

$$\begin{aligned} DNI &= G_0 \left[a + b \exp \left(-\frac{c}{\sin \alpha_s} \right) \right] \\ a &= 0.4237 - 0.00821(6-H)^2 \\ b &= 0.5055 + 0.00595(6.5-H)^2 \\ c &= 0.2711 + 0.01858(2.5-H)^2 \end{aligned} \quad (5-35)$$

其中， H 为当地海拔高度(单位：km)，即 $H=3$ 。

5.2 问题一模型的求解

5.2.1 光学效率的计算

➤ 日均光学效率

为求解日均效率问题，以日均光学效率为例，需分别求出每月 21 日中 5 个时刻所对应的五个定日镜场的光学效率值，对该五个值求算数平均即为定日镜场每月 21 日的日均光学效率，对一年中 12 天的日均光学效率求算数平均值即可求出年均光学效率。计算式如下：

(1) 第 j 月 21 日的日均光学效率：

$$\eta_{(j)} = \frac{1}{5} \cdot (\eta_{(j-1)} + \eta_{(j-2)} + \eta_{(j-3)} + \eta_{(j-4)} + \eta_{(j-5)}) = \frac{1}{5} \cdot \sum_{k=1}^5 \eta_{(j-k)} \quad (5-36)$$

(2) 全年 12 个月的年均光学效率：

$$\bar{\eta} = \frac{1}{12} \cdot \sum_{j=1}^{12} \eta_{(j)} = \frac{1}{12} \cdot \sum_{j=1}^{12} \left[\frac{1}{5} \cdot \sum_{k=1}^5 \eta_{(j-k)} \right] = \frac{1}{60} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 \eta_{(j-k)} \quad (5-37)$$

计算日均余弦效率，阴影遮挡效率，截断效率只需将式(5-35)(5-36)中的 η 代入相对应的 η_{\cos} ， η_{sb} ， η_{trunc} 即可。

➤ 日均单位面积镜面平均输出热功率

为求解日均单位面积的平均输出热功率，需分别求出每月 21 日中五个时刻所对应的定日镜场单位面积输出热功率，对该五个值求平均即为日均单位面积的平均输出热功率，对一年中 12 天的日均单位面积的平均输出热功率求平均值即可求出年均单位面积的平均输出热功率。计算式如下：

(1) 第 j 月 21 日的单位面积镜面平均输出热功率：

$$E_{(j)} = \frac{1}{5A} \cdot [E_{field(j-1)} + \dots + E_{field(j-5)}] = \frac{1}{5A} \cdot \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \quad (5-38)$$

(2) 全年 12 个月的单位面积镜面平均输出热功率：

$$\bar{E} = \frac{1}{12} \cdot \sum_{j=1}^{12} E_{(j)} = \frac{1}{12} \cdot \sum_{j=1}^{12} \left[\frac{1}{5A} \cdot \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \right] = \frac{1}{60A} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \quad (5-39)$$

➤ 年均输出热功率：

$$\bar{E}_{field} = \bar{E} \cdot A = \frac{1}{12} \cdot \sum_{j=1}^{12} \left[\frac{1}{5} \cdot \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \right] = \frac{1}{60} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \quad (5-40)$$

以上各式中的 $A = \sum_{i=1}^N A_i$ ，其中 N 为定日镜的数目，即 $N=1745$ 。

5.2.3 算法设计

蒙特卡洛法是一种用随机点的概率分布来展现概率密度函数的数学方法，如图所示：

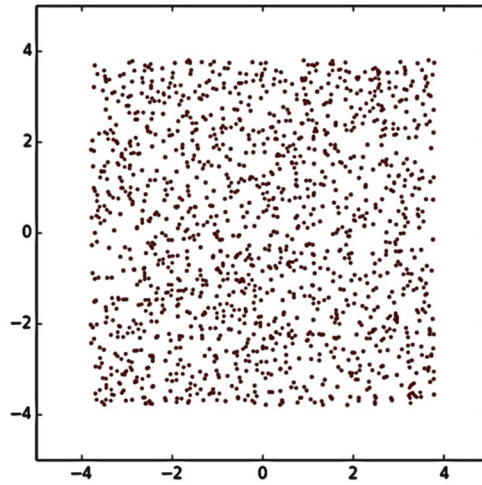


图 9 蒙特卡洛法示意图

其基本思想是使用概率统计的方法求解确定性问题，即使用随机取样来代表整个分布，通过大量重复试验获取统计规律，然后求解相关期望、近似确定性问题的解。

蒙特卡洛法可避免解析求解的复杂性。因此，本文采用**蒙特卡洛法**求解，具体算法如下：

算法 1：蒙特卡洛算法

- 1：设立定日镜面上入射光线最大条数 N ；
 - 2：根据光锥顶角大小以及能量密度分布，随机产生入射光线的方向向量；
 - 3：根据定日镜尺寸大小，随机选取一点；
 - 4：由点向式直线方程确定该入射光线；
 - 5：判断该定日镜的入射光线是否会被其它定日镜遮挡，若被遮挡，则返回到第 2 行，否则继续执行；
 - 6：由入射光线、定日镜法线确定出该定日镜的反射光线；
 - 7：判断该定日镜的反射光线是否会被其它定日镜遮挡，若被遮挡，则返回到第 2 行，否则继续执行；
 - 8：判断该反射光线是否能达到吸收塔集热器，若达到，该光线能为有效光线；
 - 9：判断当前光线个数是否达到最大生成数 N ，若达到，算法结束，计算各个参数， 否则返回到第二行执行。
-

说明：上述算法第 5 行，在判断该定日镜的入射光线是否会被其他定日镜遮挡时，只判断其周围最有可能遮挡的定日镜，可大量减少计算时间。如果每个定日镜都要判断，

则遍历完所有定日镜时间复杂度为 $O(n^2)$ ，若只判断其周围 m 个定日镜，则时间复杂度为 $O(mn)$ ，执行时间可缩短 100 倍左右。

5.3 问题一的结果与分析

5.3.1 问题一的结果

求解上述模型得到：在已知所有定日镜中心的位置，镜面宽度与高度均为 6 米，安装高度均为 4 米，建立的吸收塔位于该圆形定日镜场中心的情况下，每月 21 日平均光学效率、年平均输出功率和单位镜面面积年平均输出热功率的结果如下表所示：

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	0.5681	0.7199	0.9139	0.9868	0.4503
2 月 21 日	0.5981	0.7404	0.9316	0.9840	0.5308
3 月 21 日	0.6172	0.7611	0.9349	0.9812	0.5894
4 月 21 日	0.6338	0.7793	0.9359	0.9799	0.6333
5 月 21 日	0.6437	0.7893	0.9365	0.9803	0.6565
6 月 21 日	0.6469	0.7924	0.9367	0.9807	0.6637
7 月 21 日	0.6435	0.7892	0.9365	0.9803	0.6562
8 月 21 日	0.6332	0.7706	0.9359	0.9800	0.6317
9 月 21 日	0.6163	0.7601	0.9348	0.9813	0.5867
10 月 21 日	0.5951	0.7378	0.9305	0.9844	0.5221
11 月 21 日	0.5650	0.7182	0.9116	0.9870	0.4422
12 月 21 日	0.5511	0.7111	0.9006	0.9876	0.4071

对上述各日均效率、功率求算数平均值可得各年均效率、功率，结果如下表所示：

表 2 问题一年平均光学效率及输出表

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)
0.6093	0.7431	0.9283	0.9828	35.4430	0.5642

5.3.2 结果分析

由表不难发现：定日镜的平均光学效率呈现明显的季节性变化趋势，冬季(11-2 月)值较低，夏季(5-8 月)较高，全年变化范围约在 0.55-0.65 之间；平均余弦效率变化范围较小，全年基本维持在 0.71-0.79 的水平，夏季略高于冬季；平均阴影遮挡效率随时间变化较大，冬季较低，夏季较高，全年在 0.9-0.94 之间波动；平均截断效率走势与阴影遮挡效率相反，冬季较高，夏季较低，全年在 0.97-0.99 之间变化；单位面积输出热功率与光学效率走势一致，峰值出现在夏季，冬季较低。全年在 0.4-0.67 之间变化。

结合各效率的分析，光学效率的季节变化主要由阴影遮挡效率和截断效率的相互影响所致。

以定日镜的光学效率为例，作出在镜场中的能量高低分布图：

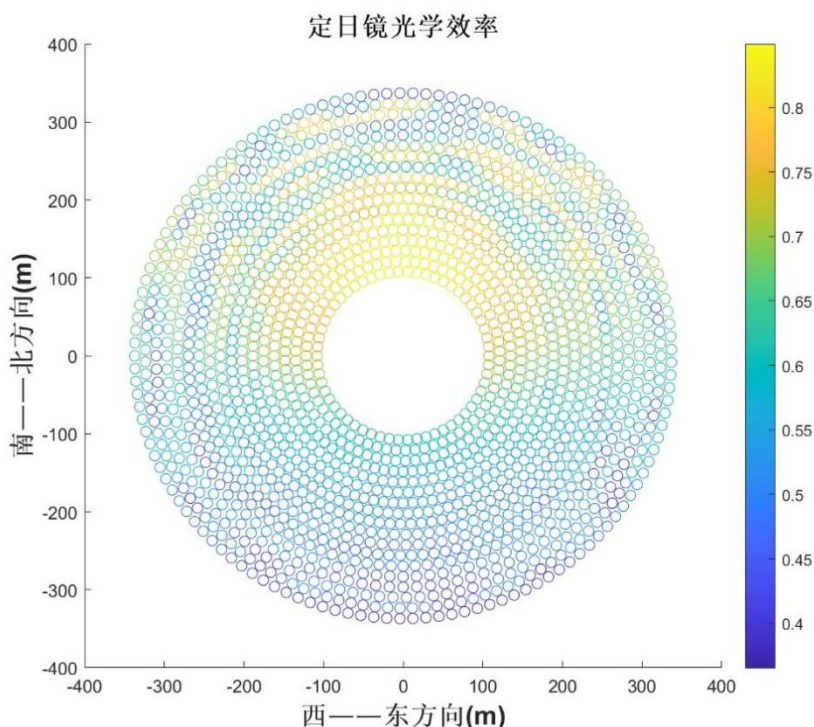


图 10 定日镜的光学效率在镜场中的分布图

由图 10 可知，由于北纬地区太阳出现在南方的时间较长^[7]，故定日镜的平均光学效率在北方的数值较大。因此，应将吸收塔布置在镜场南方，定日镜布置在聚光密度较高的镜场北方。

六、 问题二模型的建立与求解

针对问题二，建立了单目标优化模型，求解出达到要求额定功率的条件下时，定日镜场的合理参数，使得单位面积的年平均输出功率达到最大。以单位面积的年平均输出功率为目标函数，以定日镜的数目、镜面宽度、镜面高度、安装高度和吸收塔的坐标为决策变量，以定日镜的边长限制、高度限制和底座中心之间的距离等要求作为约束条件，采用粒子群算法对该单目标优化模型进行求解。

6.1 问题二模型的建立

6.1.1 定日镜场布局的设计

定日镜场作为整个太阳能塔式发电系统的能量输入单元，其综合效率直接决定系统的最高发电量上限。因此，定日镜在场内的最佳布置就显得尤为重要。

定日镜场的布局规划多采用以吸热塔为中心进行辐射状布置的模式，各定日镜之间的相对位置关系会影响光线遮挡和截流损失。

(1) 策略一：随机生成的定日镜布局方式

已知定日镜的尺寸及安装高度相同，在半径为 $350m$ 的圆形定日镜场中，以吸收塔为中心，半径为 $100m$ 的圆形范围外随机安装定日镜，在符合约束条件的要求下，使定日镜中心尽量布满圆形区域。如图 11 所示，每个点对应定日镜的镜面中心。

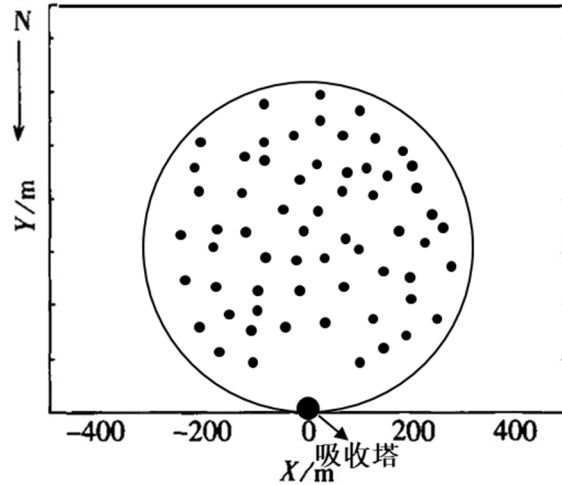


图 11 随机生成的定日镜场布局示意图

由于定日镜的位置是随机的，未考虑阴影遮蔽效率等因素，因此这种定日镜场布局的**综合效率较低**，考虑将布局的策略改进。

(2) 策略二：基于同心圆的交错布局方式

初始情况下，吸收塔的位置在坐标原点处，即 $(0,0)$ 。以吸收塔为圆心构造同心圆，由于吸收塔 $100m$ 范围内不安装定日镜，故第一层半径为 $100m$ ，从第二圆环起，确定每个圆环上定日镜的分布情况。

由 5.3.2 知，吸收塔的最优位置在镜场的南半部分，考虑到吸收塔东西两侧的阳光分布均匀，故将吸收塔的坐标从坐标原点处沿正南方向移动。

在满足约束条件的要求下，使得定日镜呈交错式分布：即当定日镜距离吸收塔较近时，其排布较密集；当定日镜距离吸收塔较远时，其排布逐渐分散。分布示意如下图所示：

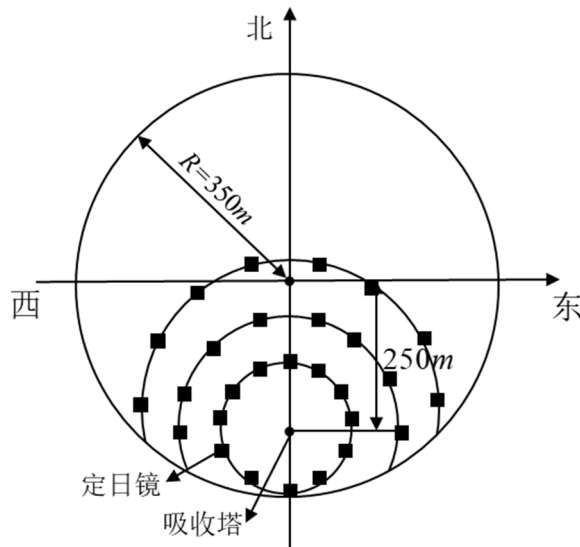


图 12 基于同心圆的交错布局示意图

该策略不仅能**有效提高综合效率**，同时也能降低甚至消除相邻定日镜之间的阴影遮挡面积。因此，本文采用**策略二**的方式对定日镜场进行布局。

6.1.2 单目标优化模型

➤ **决策变量：**

m : 每块定日镜的镜面宽度;
 n : 每块定日镜的镜面高度;
 h : 每块定日镜的安装高度;
 (x_i, y_i) : 第 i 面反光镜的中心坐标;
 (x_0, y_0) : 吸收塔的坐标。

➤ **目标函数:**

目标函数为在定日镜场达到额定功率的情况下, 最大化单位镜面面积年平均输出热功率:

$$\max Z_1 = \frac{1}{60A} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \quad (6-1)$$

➤ **约束条件:**

约束 1: 定日镜镜面边长在 $2m-8m$ 之内, 且镜面宽度 m 不小于镜面高度 n 。

$$\begin{cases} 2 \leq m \leq 8 \\ 2 \leq n \leq 8 \\ n \leq m \end{cases} \quad (6-2)$$

约束 2: 定日镜安装高度在 $2m-6m$ 之内, 且镜面在绕水平转轴旋转时不会接触到地面。

$$\begin{cases} 2 \leq h \leq 6 \\ \frac{n}{2} < h \end{cases} \quad (6-3)$$

约束 3: 第 i 面与第 $i+1$ 面定日镜底座中心之间的距离比镜面宽度多 $5m$ 以上。

$$5 \leq \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} - m \quad (6-4)$$

约束 4: 吸收塔的坐标在镜场的南半部分, 且周围 $100m$ 范围内不安装定日镜。

$$-250 \leq y_0 \leq 0 \quad (6-5)$$

约束 5: 定日镜场的年平均输出热功率达到额定功率 $60MW$ 。

$$60 \leq \frac{1}{60} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \quad (6-6)$$

基于上述分析, 可以得到以单位镜面面积年平均输出热功率最大的单目标优化模型:

$$\begin{aligned} \max Z_1 &= \frac{1}{60A} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \\ s.t. &\begin{cases} 2 \leq m \leq 8 \\ 2 \leq n \leq 8 \\ 2 \leq h \leq 6 \\ n \leq m \\ \frac{n}{2} < h \\ 5 \leq \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} - m \\ -250 \leq y_0 \leq 0 \\ 60 \leq \frac{1}{60} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \end{cases} \end{aligned} \quad (6-8)$$

6.2 问题二模型的求解

6.2.1 粒子群算法的思想

粒子群算法是一种基于群体的优化算法。其中，每个成员称为一个粒子，代表一个潜在的可行解，而全局最优解对应的是食物源的位置。

整个群体在 D 维解空间上搜寻全局最优解，并且每个粒子都具有一个速度，用于调整其飞行方向，使其接近食物源。在飞行过程中，群体中所有的粒子都具有记忆的能力，能对自身位置和自身经历过的最佳位置进行调整。为了实现接近食物位置这个目的，每个粒子通过不断地向自身经历过的最佳位置和种群中最好的粒子位置学习，最终接近食物源，实现优化目标。

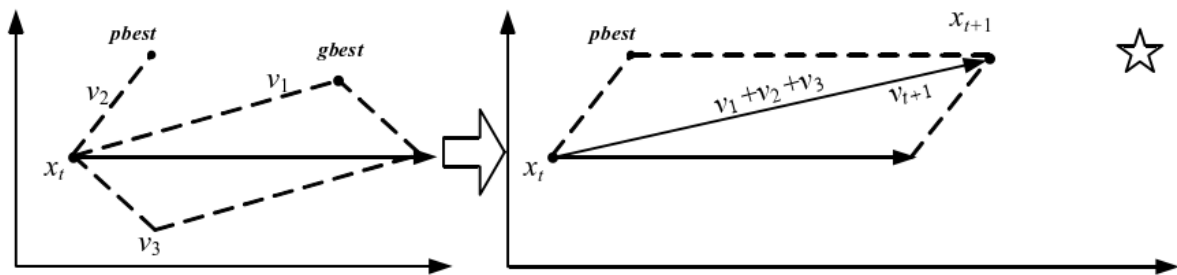


图 13 粒子的速度与位置调整图

粒子群算法的数学描述如下，假设种群规模为 N ，在迭代时刻 t ，每个粒子在 D 维空间中的坐标位置可以表示为： $\bar{x}_i(t) = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^d, \dots, x_i^D)$ 粒子的速度表示为 $\bar{v}_i(t) = (v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^d, \dots, v_i^D)$ 。坐标位置 $\bar{x}_i(t)$ 和速度 $\bar{v}_i(t)$ 在 $t+1$ 时刻，按照下述方式进行调整：

$$\begin{aligned}\bar{v}_i(t+1) &= \bar{v}_i(t) + c_1 \cdot r_1 (\bar{p}_i(t) - \bar{x}_i(t)) + c_2 \cdot r_2 (\bar{p}_g(t) - \bar{x}_i(t)) \\ \bar{x}_i(t+1) &= \bar{x}_i(t) + \bar{v}_i(t+1)\end{aligned}$$

其中 $\bar{p}_i(t)$ 表示粒子 i 所经历的最优位置 ($pbset$)， $\bar{p}_g(t)$ 表示粒子向整个种群学习的能力。

通过个体记忆和群体信息共享，粒子群算法可以实现分布式协作搜索。相较于单一个体算法，其全局搜索能力更强，更难陷入局部最优解。针对不同问题，也可以设计适应的函数、位置更新策略等。

因此，粒子群算法是一类具有广阔应用前景的优化算法。

6.2.2 算法设计

针对问题二的高维决策变量优化模型，直接使用粒子群算法，不仅要花费大量时间，而且难以求得最优解。

根据基于同心圆交错布局模型，各个定日镜如图 规律排列，相邻环之间的距离作为决策变量，大大减少了模型的复杂；粒子群算法如下：

算法 2：粒子群算法

- 1: 初始化参数，设置最大迭代次数 $G = 50$ ，粒子数 $N = 50$ ，决策变量数 d ；
 - 2: 按照变量范围，随机生成维数为 d ，大小为 N 的随机粒子；
 - 3: 设置粒子最大移动速度 V_{\max} 为变量范围的十分之一，初始化粒子速度；
 - 4: 粒子从第 1 代开始遍历；
 - 5: 构建适应度函数，计算每个粒子当前的适应度；
-

- 6: 判断各个粒子当前位置的适应度是否比各个粒子历史最优适应度更优，如果是，则更新粒子历史最优位置和最优适应度；
- 7: 判断粒子当前位置适应度是否比种群最优适应度更优，如果是，则更新种群最优适应度及位置；
- 8: 根据粒子速度变化公式，更新粒子速度；
- 9: 更新粒子位置；
- 10: 判断当前迭代次数是否为最大迭代次数，如果是则退出程序，返回最优结果，否则，跳转到第 5 行继续循环；

6.3 问题二的结果与分析

6.3.1 问题二的结果

利用粒子群算求解该单目标优化模型，结果显示单位镜面面积年平均输出热功率最大值为 **60.5361**，此时每月 21 日的平均光学效率及输出功率**部分结果如下**：

表 3 问题二每月 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 (kW/m^2)
1 月 21 日	0.5791	0.8598	0.8149	0.9650	0.5003
6 月 21 日	0.6551	0.9297	0.8398	0.9609	0.6551
12 月 21 日	0.5745	0.8547	0.8075	0.9648	0.5072

其余结果见附录。

对上述各日均效率、功率求算数平均值可得各年均效率、功率，结果如下表所示：

表 4 问题二年平均光学效率及输出表

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)
0.6203	0.8922	0.8989	0.9619	60.5361	0.5475

在所有定日镜尺寸及安装高度相同的条件下，求解得到定日镜场的设计相关参数如下表所示：

表 5 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,-248)	6.5×6.5	4.3	2617	110568

吸收塔的位置坐标、每面定日镜的尺寸等见文件“**result2.xlsx**”中。

6.3.2 问题二结果的分析

策略一：在吸收塔的最优位置时，年平均光学效率为 0.3508，单位面积镜面年平均输出热功率为 35.6268。策略二：在吸收塔的最优位置时，年平均光学效率为 **0.5475**，单位面积镜面年平均输出热功率为 **60.5361**。

策略二相较于策略一的方法，在年平均光学效率与单位面积镜面年平均输出热效率都有显著提升，分别提升了 **56.07%**和 **69.92%**。

七、 问题三模型的建立与求解

针对问题三，同样建立单目标优化模型，但与问题二的区别在于问题三中各定日镜的尺寸与安装高度可能有所不同，这就需要引入更多决策变量，即每块定日镜的尺寸与安装高度均为决策变量。目标函数与约束条件与问题二中保持一致，并且继续沿用问题一中所建立的模型。比较问题二中的两种策略可得，策略二比策略一更优，故该问题中直接采用策略二进行参数的设计，利用粒子群算法进行求解。

7.1 问题三单目标优化模型的建立

➤ 决策变量：

- m_i ：第 i 面定日镜的镜面宽度；
- n_i ：第 i 面定日镜的镜面高度；
- h_i ：第 i 面定日镜的安装高度；
- (x_i, y_i) ：第 i 面定日镜的中心坐标；
- $(0, y_0)$ ：吸收塔的坐标。

➤ 目标函数：

目标函数为在定日镜场达到额定功率的情况下，最大化单位镜面面积年平均输出热功率：

$$\max Z_2 = \frac{1}{60A} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \quad (7-1)$$

➤ 约束条件：

约束 1： 定日镜镜面边长在 $2m-8m$ 之内，且镜面宽度 m 不小于镜面高度 n 。

$$\begin{cases} 2 \leq m_i \leq 8 \\ 2 \leq n_i \leq 8 \\ n_i \leq m_i \end{cases} \quad (7-2)$$

约束 2： 定日镜安装高度在 $2m-6m$ 之内，且镜面在绕水平转轴旋转时不会接触到地面。

$$\begin{cases} 2 \leq h_i \leq 6 \\ \frac{n_i}{2} < h_i \end{cases} \quad (7-3)$$

约束 3： 第 i 面与第 $i+1$ 面定日镜底座中心之间的距离比镜面宽度多 $5m$ 以上。

$$5 \leq \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} - m_i \quad (7-4)$$

约束 4： 吸收塔的坐标在镜场的南半部分，且周围 $100m$ 范围内不安装定日镜。

$$-250 \leq y_0 \leq 0 \quad (7-5)$$

约束 5： 定日镜场的年平均输出热功率达到额定功率 $60MW$ 。

$$60 \leq \frac{1}{60} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \quad (7-6)$$

基于上述分析，可以得到以单位镜面面积年平均输出热功率最大的单目标优化模型：

$$\max Z_2 = \frac{1}{60A} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \quad (7-7)$$

$$s.t. \begin{cases} 2 \leq m_i \leq 8 \\ 2 \leq n_i \leq 8 \\ n_i \leq m_i \\ 2 \leq h_i \leq 6 \\ \frac{n_i}{2} < h_i \\ 5 \leq \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} - m_i \\ -250 \leq y_0 \leq 0 \\ 60 \leq \frac{1}{60} \cdot \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^5 E_{field(j-k)} \end{cases} \quad (7-8)$$

7.2 问题三的计算结果

问题三继续采用粒子群算法对上述模型进行求解，结果显示单位镜面面积年平均输出热功率最大值为 **62.2579**，此时每月 21 日的平均光学效率及输出功率部分结果如下：

表 6 问题三每月 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	0.5787	0.8590	0.8188	0.9600	0.5012
6 月 21 日	0.6554	0.9290	0.8428	0.9659	0.6847
12 月 21 日	0.5755	0.8538	0.8115	0.9599	0.5077

其余结果见附录。

对上述各日均效率、功率求算数平均值可得各年均效率、功率，结果如下表所示：

表 7 问题三年平均光学效率及输出表

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)
0.6210	0.8915	0.8337	0.9603	62.2579	0.6028

在定日镜尺寸和安装高度可以不同的条件下，求解得到定日镜场的设计相关参数如下表所示：

表 8 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,-200)	/	/	2638	10328

吸收塔的位置坐标、每面定日镜的尺寸等见文件“**result3.xlsx**”中。

八、 模型的评价与推广

8.1 模型的优点

1. 本文建立的定日镜场的优化模型对定日镜的安装位置进行了合理简化,效率高;
2. 在计算阴影遮挡效率时,充分考虑了定日镜形成阴影与发生遮挡以及塔本身形成的阴影所造成的影响,模型精度高;
3. 问题二中的单目标优化模型简洁实用。因此,问题三可沿用问题二中的模型,只需新增一到两个决策变量,确定合理的目标函数,即可建立优化模型。

8.2 模型的不足

1. 由于问题二与问题三中的决策变量较多,会导致程序运行需要较长的时间;
2. 该模型的目标函数主要集中在提高系统的输出热功率,然而在实际工程中,还需要考虑投资成本最小化的约束,以及环境和社会影响等多方面因素。

8.3 模型的改进与推广

考虑在本模型的基础上构建多目标优化模型:即在现有考虑发电量或效率目标基础上,加入投资成本约束,以发电量与成本比作为目标函数;同时加入地形约束,平衡发电量最大化和环境影响最小化。

求解时同样可以采用基于精确光线追踪的蒙特卡罗法,快速地评估各种规模和布局方案,为引入优化算法提供支持。同时,蒙特卡罗法的随机取样特性也有利于全局优化和避免局部最优。通过建立兼顾技术经济和环境影响的多目标优化模型,运用蒙特卡罗全局优化策略,我们可以获得更优的定日镜场设计方案,实现可持续发展。

这种模式扩展也可推广至其他可再生能源系统的优化设计中,例如:优化风电场微选址、光伏电站配置、海上风电机组叶轮等。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 百度百科,太阳高度角,
https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E9%AB%98%E5%BA%A6%E8%A7%92?fromModule=lemma_search-box
- [3] 百度百科,太阳方位角,
https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E6%96%B9%E4%BD%8D%E8%A7%92?fromModule=lemma_search-box
- [4] 蔡志杰.太阳影子定位[J].数学建模及其应用,2015,4(04):25-33.
- [5] 高维东.塔式太阳能电站定日镜场调度优化研究[D].华北电力大学,2021.
- [6] O. Farges,J.J. Bézian,M. El Hafi. Global optimization of solar power tower systems using a Monte Carlo algorithm: Application to a redesign of the PS10 solar thermal power plant[J]. Renewable Energy,2018,119.
- [7] 杜宇航,刘向民,王兴平,蒋志浩.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(05):426-432.
- [8] 程小龙,尹延国,马少波.塔式电站定日镜场布局的优化设计研究[J].能源与环境,2018,(02):64-66+70.

附录

附件清单			
文件夹名		文件名	介绍
数据		result2.xlsx	问题二结果
		result3.xlsx	问题三结果
代码	1	prob1.m	问题一主函数
		fun1.m	求线面交点的函数
	2	prob2.m	问题二主函数
	3	prob3.m	问题三主函数

附录 1										
介绍：问题一的太阳高度角与方位角结果和问题二、三的吸收塔坐标等结果										
表 1 每月 21 日各时刻的太阳高度角与方位角										
时刻	9:00		10:30		12:00		13:30		15:00	
日期	α_s	γ_s	α_s	γ_s	α_s	γ_s	α_s	γ_s	α_s	γ_s
1 月 21 日	17.43	135.78	27.21	156.11	30.83	180	27.21	203.89	17.43	224.22
2 月 21 日	24.83	130.02	35.77	152.38	39.97	180	35.77	207.62	24.83	229.98
3 月 21 日	33.12	122.40	45.55	146.87	50.60	180	45.55	213.13	33.12	237.60
4 月 21 日	41.57	112.24	55.85	138.11	62.28	180	55.85	221.89	41.57	247.76
5 月 21 日	47.05	103.10	62.77	128.30	70.79	180	62.77	231.70	47.05	256.90
6 月 21 日	48.93	99.13	65.17	123.29	74.05	180	65.17	236.71	48.93	260.87
7 月 21 日	46.99	103.23	62.69	128.44	70.69	180	62.69	231.56	46.99	256.77
8 月 21 日	41.22	112.74	55.41	138.60	61.76	180	55.41	221.40	41.22	247.26
9 月 21 日	32.67	122.86	45.02	147.22	50.01	180	45.02	212.78	32.67	237.14
10 月 21 日	23.85	130.83	34.63	152.92	38.75	180	34.63	207.08	23.85	229.17
11 月 21 日	16.83	136.21	26.51	156.39	30.10	180	26.51	203.61	16.83	223.79
12 月 21 日	14.40	137.95	23.73	157.45	27.16	180	23.73	202.55	14.40	222.05

表 2 问题二每月 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 (kW/m^2)
1 月 21 日	0.5791	0.8598	0.8149	0.9650	0.5003
2 月 21 日	0.6021	0.8805	0.8216	0.9640	0.5608
3 月 21 日	0.6275	0.9003	0.8346	0.9609	0.5994
4 月 21 日	0.6458	0.9124	0.8387	0.9599	0.6533
5 月 21 日	0.6539	0.9201	0.8389	0.9603	0.6765
6 月 21 日	0.6551	0.9297	0.8398	0.9609	0.6837
7 月 21 日	0.6535	0.9192	0.8375	0.9602	0.6762
8 月 21 日	0.6431	0.8952	0.8359	0.9600	0.6517
9 月 21 日	0.6283	0.8911	0.8348	0.9613	0.6199
10 月 21 日	0.6032	0.8774	0.8312	0.9625	0.5589
11 月 21 日	0.5778	0.8655	0.8116	0.9635	0.5356
12 月 21 日	0.5745	0.8547	0.8075	0.9648	0.5072

表 3 问题三每月 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	0.5787	0.8590	0.8188	0.9600	0.5012
2 月 21 日	0.6015	0.8804	0.8252	0.9591	0.5616
3 月 21 日	0.6255	0.9001	0.8396	0.9559	0.6005
4 月 21 日	0.6465	0.9117	0.8425	0.9549	0.6542
5 月 21 日	0.6545	0.9198	0.8419	0.9653	0.6776
6 月 21 日	0.6554	0.9290	0.8428	0.9659	0.6847
7 月 21 日	0.6545	0.9185	0.8415	0.9652	0.6771
8 月 21 日	0.6457	0.8942	0.8499	0.9649	0.6516
9 月 21 日	0.6275	0.8905	0.8389	0.9565	0.6203
10 月 21 日	0.6045	0.8763	0.8356	0.9575	0.5598
11 月 21 日	0.5785	0.8645	0.8166	0.9585	0.5368
12 月 21 日	0.5755	0.8538	0.8115	0.9599	0.5077

附录 2

介绍：问题一的太阳方位角和高度角及问题二、三光学效率的示意图

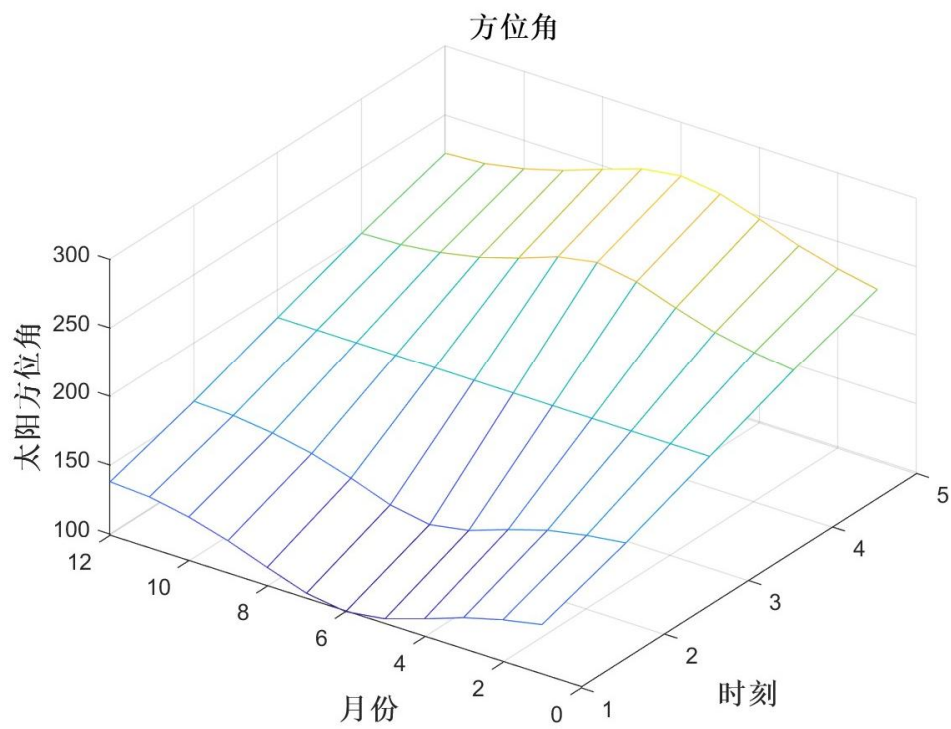


图 1 问题一中太阳的方位角

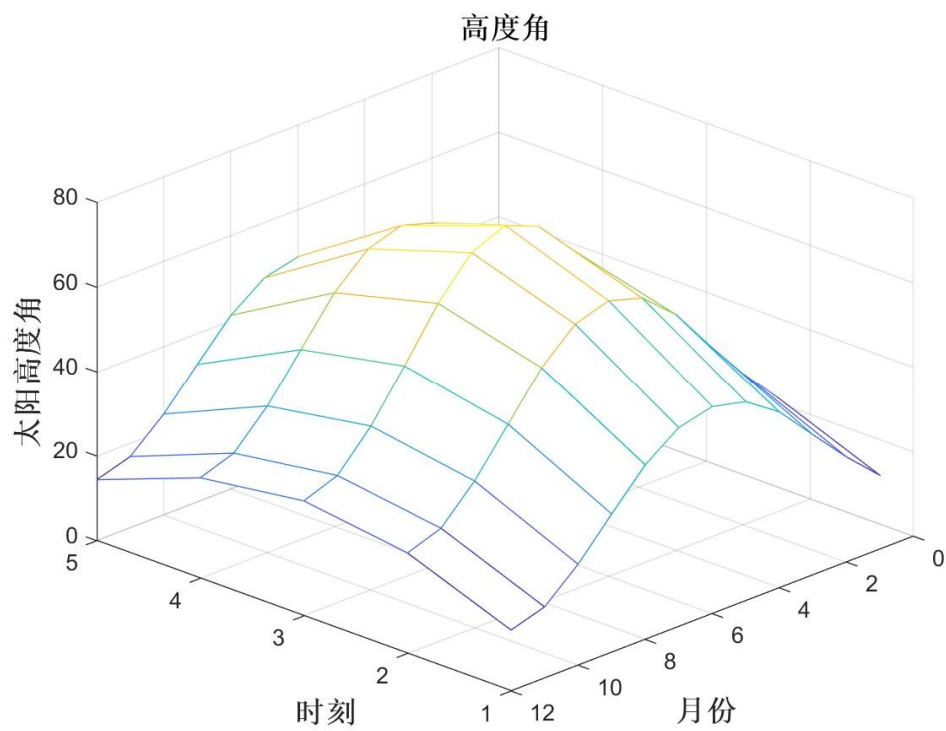


图 2 问题一中太阳的方位角

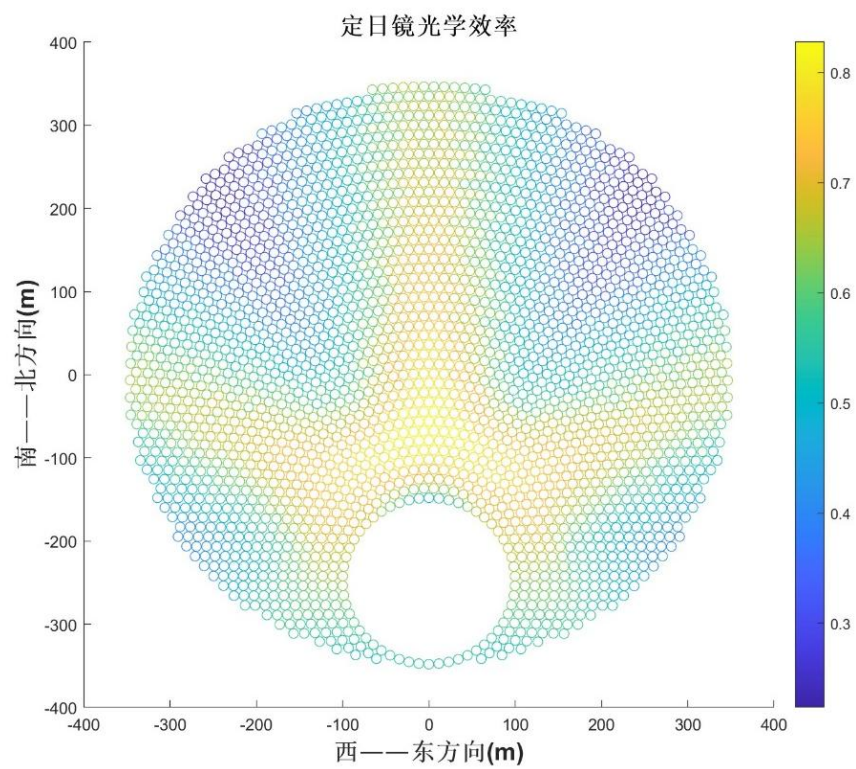


图 3 问题二光学效率的分布图

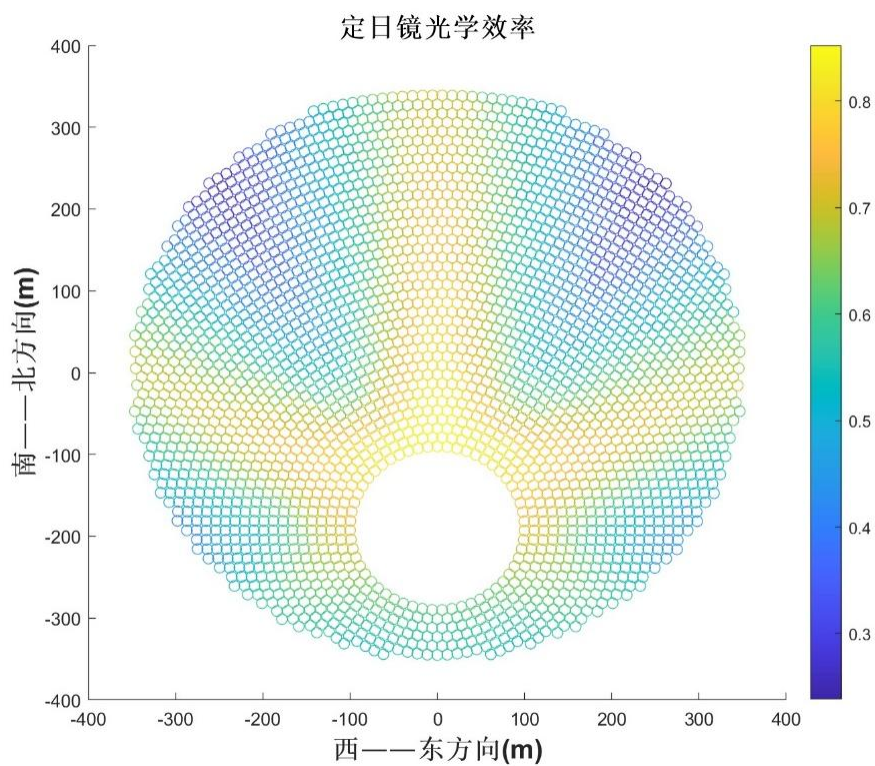


图 4 问题三光学效率的分布图

附录 3

介绍：问题一的代码

```
clc
clear
ST=[9,10.5,12,13.5,15];
D=[-59,-28,0,31,61,92,122,153,184,214,245,275];
weidu=39.4;
shijiao=pi*(ST-12)/12;
alpha=[];
b=[];
for i=1:12
chiweijiao=asind(sin(2*pi*23.45/360)*sin(2*pi*D(i)/365));
alphas=asind(cosd(chiweijiao)*cosd(weidu)*cos(shijiao)+sind(chiweijiao)*sind(weidu));
g=(sind(chiweijiao)-sind(alphas)*sind(weidu))./(cosd(alphas)*cosd(weidu));
alpha=[alpha;alphas];
b=[b;g];
b(:,3)=-1;
gama=acosd(b);
end
gama(:,[4,5])=360-gama(:,[4,5]);
%%
clc
clear
load('alpha.mat')
load('gama.mat')
% load('zuobiao.mat')
load('Y1.mat')
load('X1.mat')
zuobiao(:,1)=X1';
zuobiao(:,2)=Y1'+190;
d=pdist2(zuobiao,zuobiao);
zuobiao1=[zuobiao,4*ones(size(zuobiao,1),1)];
% zuobiao=[zuobiao,4*ones(size(zuobiao,1),1)];
H=3;
G0=1.366;
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;
% for month=2:12
    month=3;
for time=1:5
DNI=G0*(a+b*exp(-c/sind(alpha(month,time))));
```

```

r1=[cosd(alpha(month,time))*sind(gama(month,time)),cosd(alpha(month,time))*cosd(
gama(month,time)),sind(alpha(month,time))];%
chushe=[-zuobiao(:,1),-zuobiao(:,2),80-4*ones(size(zuobiao,1),1)];
r2=chushe./(chushe(:,1).^2+chushe(:,2).^2+chushe(:,3).^2).^0.5;
n=r1+r2;
ne=n./(n(:,1).^2+n(:,2).^2+n(:,3).^2).^0.5;
sita=0.5*acosd(r2*r1');
num=zeros(size(zuobiao,1),1);
for i=1:size(zuobiao,1)
    for j=1:size(zuobiao,1)
        if j==i
            fangx(j)=100;
        else
            fangx(j)=acosd((zuobiao(j,:)-zuobiao(i,:))*r1([1,2])'/(((zuobiao(j,:)-
zuobiao(i,:))*(zuobiao(j,:)-zuobiao(i,:))')^0.5*(r1([1,2])*r1([1,2])')^0.5)));
        end
    end

    for j=1:size(zuobiao,1)
        if j==i
            fangx2(j)=100;%
        else
            fangx2(j)=acosd((zuobiao(j,:)-zuobiao(i,:))*(-zuobiao(i,:))'/(((zuobiao(j,:)-
zuobiao(i,:))*(zuobiao(j,:)-
zuobiao(i,:))')^0.5*(zuobiao(i,:)*zuobiao(i,:))')^0.5)));
        end
    end

    ind2=find(fangx2<50);
    xianglin2=find(d(i,ind2)<20);
    xianglinZ2=zuobiao(ind2(xianglin2),:);
    xianglinF2=ne(ind2(xianglin2),:);

ind=find(fangx<50);
xianglin=find(d(i,ind)<20);

xinglinZ=zuobiao(ind(xianglin),:);
xinglinF=ne(ind(xianglin),:);

A1=[1,0,0;0,cosd(90-alpha(month,time)),-sind(90-alpha(month,time));0,sind(90-
alpha(month,time)),cosd(90-alpha(month,time))];%
A2=[cosd(gama(month,time)), -
sind(gama(month,time)),0;sind(gama(month,time)),cosd(gama(month,time)),0;0,0,1];
%
A=A1*A2;

```

```

% fangxiang1=A'*[0;0;1];

w=ne(i,:);
B1=[w(2)/(w(1)^2+w(2)^2)^0.5,-
w(1)/(w(1)^2+w(2)^2)^0.5,0;w(1)*w(3)/(w(1)^2+w(2)^2)^0.5,w(3)*w(2)/(w(1)^2+w(2)^2)^0.5,-(w(1)^2+w(2)^2)^0.5;w(1),w(2),w(3)];
yinying=ones(100,1);
zhedang=ones(100,1);
ishzedang=[];
ishzedang2=[];
for k=1:100
    aa=[unifrnd(-3,3,[1,2]),0];
    aa1=B1'*aa'+zuobiao1(i,:)';
    t1=unifrnd(0,0.00465);
    t2=unifrnd(0,2*pi);
    fangxiang1=A'*[sin(t1)*cos(t2);sin(t2)*sin(t1);cos(t1)];
    ss=acosd(fangxiang1'*w');
    fangxiang2=2*cosd(ss)*w'-fangxiang1;
    if isempty(xianglin)
    else
        N=length(xianglin);
        for ii=1:N
            jiaodian=fun1(aa1,fangxiang1,[xianglinZ(ii,:),4],xianglinF(ii,:));
            w1=xianglinF(ii,:);
            T=[w1(2)/(w1(1)^2+w1(2)^2)^0.5,-
w1(1)/(w1(1)^2+w1(2)^2)^0.5,0;w1(1)*w1(3)/(w1(1)^2+w1(2)^2)^0.5,w1(3)*w1(2)/(w1(1)^2+w1(2)^2)^0.5,-(w1(1)^2+w1(2)^2)^0.5;w1(1),w1(2),w1(3)];
            jiaodain2=T*(jiaodian-[xianglinZ(ii,:),4])';
            if abs(jiaodain2(1))<3&&abs(jiaodain2(2))<3
                iszhedang(ii)=1;
            else
                iszhedang(ii)=0;
            end
        end
    end
    if isempty(xianglin2)
    else
        N=length(xianglin2);
        for ii=1:N
            jiaodian=fun1(aa1,fangxiang2,[xianglinZ2(ii,:),4],xianglinF2(ii,:));
            w2=xianglinF2(ii,:);
            T=[w2(2)/(w2(1)^2+w2(2)^2)^0.5,-
w2(1)/(w2(1)^2+w2(2)^2)^0.5,0;w2(1)*w2(3)/(w2(1)^2+w2(2)^2)^0.5,w2(3)*w2(2)/(w2(1)^2+w2(2)^2)^0.5,-(w2(1)^2+w2(2)^2)^0.5;w2(1),w2(2),w2(3)];

```

```

jiaodain2=T*(jiaodian-[xianglinZ2(ii,:),4])';
if abs(jiaodain2(1))<3&&abs(jiaodain2(2))<3
    iszhedang2(ii)=1;
else
    iszhedang2(ii)=0;
end
end
end

if any(iszhedang)
    yinying(k)=0;
    iszhedang=[];
else
    iszhedang=[];
end
if any(iszhedang2)
    zhedang(k)=0;
    iszhedang2=[];
else
    iszhedang2=[];
end
if yinying(k)+zhedang(k)>=2
if abs((fangxiang2(1)*aa1(2)-
fangxiang2(2)*aa1(1))/(fangxiang2(1)^2+fangxiang2(2)^2)^0.5)<3.5
    if
(76<=fangxiang2(3)*(aa1(1)^2+aa1(2)^2)^0.5/((fangxiang2(1)^2+fangxiang2(2)^2)^0.
5)+aa1(3))&&(fangxiang2(3)*(aa1(1)^2+aa1(2)^2)^0.5/((fangxiang2(1)^2+fangxiang2(
2)^2)^0.5)+aa1(3))<=84
        num(i)=num(i)+1;
    end
end
end
end

l(i)=length(find(yinying+zhedang==2));
end
yitasb(:,time)=l'/100;
yitacos(:,time)=cosd(sita);
dHR=(zuobiao1(:,1).^2+zuobiao1(:,2).^2+zuobiao1(:,3).^2).^0.5;
yitaat=0.99321-0.0001176*dHR+1.97*10^(-8)*dHR.^2;
yitaref=0.92;
yitatrun(:,time)=num./l';
% sum((1)/5000)/1745
yita(:,time)=yitasb(:,time).*yitacos(:,time).*yitaat.*yitatrun(:,time).*yitaref;

```



```

time
sum((1)/100)/1745
end
sum(sum(yitacos))/(1745*5)
sum(sum(yitasb))/(1745*5)
sum(sum(yita))/(1745*5)
sum(sum(yitatrun))/(1745*5)
DNI*sum(sum(yita))/(1745*5)

function f = fun1(dian,fangxiang,dian2,faxiang)
    x=(faxiang(1)*dian2(1)+fangxiang(2)*faxiang(2)*dian(1)/fangxiang(1)-
dian(2)*faxiang(2)+dian2(2)*faxiang(2)...
        +faxiang(3)*fangxiang(3)*dian(1)/fangxiang(1)-
dian(3)*faxiang(3)+dian2(3)*faxiang(3))/(faxiang(1)+fangxiang(2)*faxiang(2)/fang
xiang(1)+fangxiang(3)*faxiang(3)/fangxiang(1));
    y=(x-dian(1))*fangxiang(2)/fangxiang(1)+dian(2);
    z=(x-dian(1))*fangxiang(3)/fangxiang(1)+dian(3);
    f=[x,y,z];
end

```

附录 4

介绍：问题二的代码

```

clc
clear
R=100:11:600;
huanshu=length(R);
X=[];
Y=[];
for i=1:huanshu
    if rem(i,2)==1
        jiao=linspace(0,2*pi-11/R(i),55+6*(i-1));
    else
        jiao=linspace(5.5/R(i),2*pi-5.5/R(i),55+6*(i-1));
    end
    X=[X,R(i)*sin(jiao)];
    Y=[Y,R(i)*cos(jiao)];
end
Y=Y-190;
ind22=find(X.^2+Y.^2<350^2);
X1=X(ind22);
Y1=Y(ind22);

```

```

scatter(X1,Y1)
%%
% clc
% clear
load('alpha.mat')
load('gama.mat')
% load('zuobiao.mat')
% load('Y1.mat')
% load('X1.mat')
zuobiao(:,1)=X1';
zuobiao(:,2)=Y1'+190;
d=pdist2(zuobiao,zuobiao);
zuobiao1=[zuobiao,4*ones(size(zuobiao,1),1)];
% zuobiao=[zuobiao,4*ones(size(zuobiao,1),1)];
H=3;
G0=1.366;
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;
% for month=2:12
    month=3;
for time=1:5
DNI=G0*(a+b*exp(-c/sind(alpha(month,time))));
r1=[cosd(alpha(month,time))*sind(gama(month,time)),cosd(alpha(month,time))*cosd(
gama(month,time)),sind(alpha(month,time))];%
chushe=[-zuobiao(:,1),-zuobiao(:,2),80-4*ones(size(zuobiao,1),1)];
r2=chushe./(chushe(:,1).^2+chushe(:,2).^2+chushe(:,3).^2).^0.5;
n=r1+r2;
ne=n./(n(:,1).^2+n(:,2).^2+n(:,3).^2).^0.5;
sita=0.5*acosd(r2*r1');
num=zeros(length(X1),1);
for i=1:size(zuobiao1,1)
    for j=1:size(zuobiao,1)
if j==i
    fangx(j)=100;
else
    fangx(j)=acosd((zuobiao(j,:)-zuobiao(i,:))*r1([1,2])'/(((zuobiao(j,:)-
zuobiao(i,:))*(zuobiao(j,:)-zuobiao(i,:)))^0.5*(r1([1,2])*r1([1,2])')^0.5));
end
end

    for j=1:size(zuobiao,1)
if j==i
    fangx2(j)=100;

```

```

else
    fangx2(j)=acosd((zuobiao(j,:)-zuobiao(i,:))*(-zuobiao(i,:))'/(((zuobiao(j,:)-
zuobiao(i,:))*(zuobiao(j,:)-
zuobiao(i,:))')^0.5*(zuobiao(i,:)*zuobiao(i,:))'^0.5));
end
    end
    ind2=find(fangx2<50);
    xianglin2=find(d(i,ind2)<20);
    xianglinZ2=zuobiao(ind2(xianglin2),:);
    xianglinF2=ne(ind2(xianglin2),:);

ind=find(fangx<50);
xianglin=find(d(i,ind)<20);

xinglinZ=zuobiao(ind(xianglin),:);
xinglinF=ne(ind(xianglin),:);

A1=[1,0,0;0,cosd(90-alpha(month,time)),-sind(90-alpha(month,time));0,sind(90-
alpha(month,time)),cosd(90-alpha(month,time))];%
A2=[cosd(gama(month,time)),-
sind(gama(month,time)),0;sind(gama(month,time)),cosd(gama(month,time)),0;0,0,1];
%
A=A1*A2;
% fangxiang1=A'*[0;0;1];

w=ne(i,:);
B1=[w(2)/(w(1)^2+w(2)^2)^0.5,-
w(1)/(w(1)^2+w(2)^2)^0.5,0;w(1)*w(3)/(w(1)^2+w(2)^2)^0.5,w(3)*w(2)/(w(1)^2+w(2)^
2)^0.5,-(w(1)^2+w(2)^2)^0.5;w(1),w(2),w(3)];
yinying=ones(100,1);
zhedang=ones(100,1);
ishzedang=[];
ishzedang2=[];
for k=1:100
    aa(1)=unifrnd(-3,3);
    aa(2)=unifrnd(-3,3);
    aa(3)=0;
    aa1=B1'*aa'+zuobiao1(i,:);
    t1=unifrnd(0,0.00465);
    t2=unifrnd(0,2*pi);
    fangxiang1=A'*[sin(t1)*cos(t2);sin(t2)*sin(t1);cos(t1)];
    ss=acosd(fangxiang1'*w');
    fangxiang2=2*cosd(ss)*w'-fangxiang1;
    if isempty(xianglin)

```

```

else
    N=length(xianglin);
    for ii=1:N
        jiaodian=fun1(aa1,fangxiang1,[xinglinZ(ii,:),4],xinglinF(ii,:));
        w1=xinglinF(ii,:);
        T=[w1(2)/(w1(1)^2+w1(2)^2)^0.5, -
w1(1)/(w1(1)^2+w1(2)^2)^0.5,0;w1(1)*w1(3)/(w1(1)^2+w1(2)^2)^0.5,w1(3)*w1(2)/(w1(
1)^2+w1(2)^2)^0.5,-(w1(1)^2+w1(2)^2)^0.5;w1(1),w1(2),w1(3)];
        jiaodain2=T*(jiaodian-[xinglinZ(ii,:),4])';
        if abs(jiaodain2(1))<3&&abs(jiaodain2(2))<3
            iszhedang(ii)=1;
        else
            iszhedang(ii)=0;
        end
    end
end
if isempty(xianglin2)
else
    N=length(xianglin2);
    for ii=1:N
        jiaodian=fun1(aa1,fangxiang2,[xianglinZ2(ii,:),4],xianglinF2(ii,:));
        w2=xianglinF2(ii,:);
        T=[w2(2)/(w2(1)^2+w2(2)^2)^0.5, -
w2(1)/(w2(1)^2+w2(2)^2)^0.5,0;w2(1)*w2(3)/(w2(1)^2+w2(2)^2)^0.5,w2(3)*w2(2)/(w2(
1)^2+w2(2)^2)^0.5,-(w2(1)^2+w2(2)^2)^0.5;w2(1),w2(2),w2(3)];
        jiaodain2=T*(jiaodian-[xianglinZ2(ii,:),4])';
        if abs(jiaodain2(1))<2.75&&abs(jiaodain2(2))<2.75
            iszhedang2(ii)=1;
        else
            iszhedang2(ii)=0;
        end
    end
end
if any(iszhedang)
    yinying(k)=0;
    iszhedang=[];
else
    iszhedang=[];
end
if any(iszhedang2)
    zhedang(k)=0;
    iszhedang2=[];
else

```

```

        iszhedang2=[];
    end
    if yinying(k)+zhedang(k)>=2
        if abs((fangxiang2(1)*aa1(2)-
fangxiang2(2)*aa1(1))/(fangxiang2(1)^2+fangxiang2(2)^2)^0.5)<3.5
            if
(76<=fangxiang2(3)*(aa1(1)^2+aa1(2)^2)^0.5/((fangxiang2(1)^2+fangxiang2(2)^2)^0.
5)+aa1(3))&&(fangxiang2(3)*(aa1(1)^2+aa1(2)^2)^0.5/((fangxiang2(1)^2+fangxiang2(
2)^2)^0.5)+aa1(3))<=84
                num(i)=num(i)+1;
            end
        end
    end
end

l(i)=length(find(yinying+zhedang==2));
end
yitasb(:,time)=l'/100;
yitacos(:,time)=cosd(sita);
dHR=(zuobiao1(:,1).^2+zuobiao1(:,2).^2+zuobiao1(:,3).^2).^0.5;
yitaat=0.99321-0.0001176*dHR+1.97*10^(-8)*dHR.^2;
yitaref=0.92;
yitatrun(:,time)=num./l';
% sum((l)/5000)/1745
yita(:,time)=yitasb(:,time).*yitacos(:,time).*yitaat.*yitatrun(:,time).*yitaref;
time
sum((l)/100)/length(X1)
end

```

附录 5

介绍：问题三的代码

```

clc
clear
record=[];
N = 50;
d = 5; %变量维数
ger =50;
limit = [0.6,25;
0.6,6.4];
vlimit = [-1.2, 1.2;-0.3,0.3];
w = 0.8;

```

```

c1 = 1;
c2 = 1;
for i = 1:d
x(:,i) = limit(i, 1) + (limit(i, 2) - limit(i, 1)) * rand(N, 1);
end
v = [2.4,0.6].*rand(N, d)-[1,0.2].*ones(N,d);
xm = x;
ym = zeros(1, d);
fxm = inf*ones(N, 1);
fym = inf;
iter = 1;

while iter <= ger
for kk=1:N
fx(kk) = fun3(x(kk,:),alpha,k);
end
for i = 1:N
if fxm(i) >fx(i)
fxm(i) = fx(i);
xm(i,:) = x(i,:);
end
end
if fym > min(fxm)
[fym, nmax] = min(fxm);
ym = xm(nmax, :);
end
v = v * w + c1 * rand * (xm - x) + c2 * rand * (repmat(ym, N, 1) - x);
v(v(:,1) > 1.2,1)= 1.2;
v(v(:,1) < -1.2,1)= -1.2;

v(v(:,2) > 0.3,2)= 0.3;
v(v(:,2) < -0.3,2)= -0.3;
x = x + v;
x(x(:,1) >25,1) =25;
x(x(:,1) <0.6,1) =0.6;
x(x(:,2) >6.4,2) =6.4;
x(x(:,2) <0.6,2) =0.6;
record(iter)=fym;
iter = iter+1
end
plot(record,'k','LineWidth',1.3)
xlabel('迭代次数','FontSize',13,'FontWeight','bold');
ylabel('目标函数值','FontSize',13,'FontWeight','bold')
title('收敛过程','FontSize',13,'FontWeight','bold')

```

```

box off
set(gca,'FontSize',13,'FontWeight','bold')
disp(['最小值: ',num2str(fym)]);
disp(['变量取值: ',num2str(ym)]);

```

附录 6

介绍：相关图像的代码

```

scatter(zuobiao(:,1),zuobiao(:,2))
%%
d=pdist2(zuobiao,zuobiao);
%%
jiaodian=fun1([zuobiao(1,:),4],r1,[zuobiao(58,:),4],ne(58,:))
w=ne(58,:);
B=[w(2)/(w(1)^2+w(2)^2)^0.5,-
w(1)/(w(1)^2+w(2)^2)^0.5,0;w(1)*w(3)/(w(1)^2+w(2)^2)^0.5,w(3)*w(2)/(w(1)^2+w(2)^
2)^0.5,-(w(1)^2+w(2)^2)^0.5;w(1),w(2),w(3)];
B*(jiaodian-[zuobiao(58,:),4])'

%%
scatter(zuobiao(:,1),zuobiao1(:,2),[],sum(yita,2)/5)
xlabel('西—东方向(m)','FontSize',15,'FontWeight','bold')
ylabel('南—北方向(m)','FontSize',15,'FontWeight','bold')
title('定日镜光学效率','FontSize',15,'FontWeight','bold')
%%
scatter(zuobiao(:,1),zuobiao1(:,2),[],yita(:,5))
%%
writematrix(alpha,'结果.xlsx','Sheet','Sheet1','Range','A1')
writematrix(gama,'结果.xlsx','Sheet','Sheet1','Range','G1')
%%
clc
clear
load('gama.mat')
load('alpha.mat')
[XX,YY]=meshgrid([1:5],[1:12]);
figure(1)
mesh(XX,YY,gama);
xlabel('时刻','FontSize',13,'FontWeight','bold');
ylabel('月份','FontSize',13,'FontWeight','bold');
zlabel('太阳方位角','FontSize',13,'FontWeight','bold');
title('方位角','FontSize',13,'FontWeight','bold');
figure(2)

```

```
mesh(XX,YY,alpha);  
xlabel('时刻','FontSize',13,'FontWeight','bold');  
ylabel('月份','FontSize',13,'FontWeight','bold');  
zlabel('太阳高度角','FontSize',13,'FontWeight','bold');  
title('高度角','FontSize',13,'FontWeight','bold');
```