

定日镜场的光学模型建立与布局优化

摘 要

这篇论文研究了塔式太阳能光热发电站中的关键组件——定日镜场的优化设计问题，以应对新能源电力系统需求并实现双碳目标。定日镜场由定日镜和吸收塔组成，通过实时控制定日镜法向来聚焦太阳光线到吸收塔以产生热能。本文突出了每个问题的创新点和关键算法：

问题一：在考虑特定条件下，我们使用物理模型和光学原理来计算单个定日镜的关键效率参数，包括阴影效率和截断效率。特别是，我们采用光线追踪法和蒙特卡罗算法来解决阴影效应和挡光情况的复杂问题，建立通用的求解模型。此外，我们还利用八叉树算法来加速光学效率计算，确保高效性能分析。最后，根据计算得到的光学效率，计算得到年平均输出热功率和单位镜面面积年平均输出热功率。

问题二：问题二将定日镜场设计问题定位为一个多变量优化问题。旨在寻找最佳的定日镜安装方案以及吸收塔的位置，以使得单位镜面面积年平均输出功率最大化。。我们引入了启发式算法（如遗传算法或差分进化算法）来搜索最佳的决策变量组合，以实现单位镜面面积年平均输出功率最大化。这一创新点在于综合考虑吸收塔位置、定日镜尺寸和安装高度等多个因素，以实现最佳性能。

问题三：问题三进一步增加了优化自由度，允许各个定日镜的尺寸和安装高度不同。我们重新设计了问题二的优化模型，重点是确定每个定日镜的最佳尺寸和高度，以最大化单位镜面面积年平均输出热功率，并同时确保满足额定功率要求。这一创新点提供了更大的灵活性，适应不同条件下的能源需求。

总之，本文突出了使用光学效率模型和复杂算法来解决定日镜场设计问题的创新方法。通过充分考虑各种因素，如光学特性、布局和功率要求，本文为清洁能源领域的发展提供了重要的理论基础和实践指导。这些研究成果有望推动太阳能光热发电站的性能优化，为可持续能源的广泛应用做出贡献。

关键词：太阳能定日镜场 光学效率 优化模型 八叉树算法 可再生能源 性能分析 能源输出 启发式算法。

一、问题重述

1.1 问题背景

定日镜场作为塔式太阳能光热发电站的重要组件，其优化设计对于构建新能源电力系统具有重要意义，也对我国实现双碳目标具有深远影响。

定日镜场由定日镜和吸收塔构成，其工作原理是：工作时控制系统通过实时控制纵向转轴和水平转轴以控制定日镜的法向，以达到汇聚太阳光到吸收塔顶端的集热器的目的。

1.2 问题提出

问题一：该题要求要求计算一个特定配置下的定日镜场的性能参数，在这个问题中，我们考虑一个圆形的定日镜场，吸收塔建于该圆形定日镜场的中心。所有定日镜的尺寸均为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ ，安装高度均为 4 m 。通过分析定日镜尺寸、安装高度和附件中提供了所有定日镜中心的位置坐标，计算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，并保存到指定表格中。

问题二：第二题要求我们对①吸收塔的位置坐标。②定日镜的尺寸。③安装高度。④定日镜的数目。⑤定日镜的位置坐标等决策变量进行优化，在满足定日镜场的额定年平均输出热功率为 60 MW ，所有定日镜的尺寸和安装高度都相同的条件下，实现单位镜面面积的年平均输出热功率最大化，并得到具体最优方案。最后将设计结果按照指定模板保存到 `result2.xlsx` 文件中。

问题三：在问题二的基础上，问题三要求重新设计定日镜场的各个参数，包括定日镜的尺寸、安装高度以及吸收塔的位置，以优化单位镜面面积年平均输出热功率，同时确保达到额定功率（ 60 MW ）。

二、问题分析

为了理清各个变量之间的关系，我们选择以集热塔底部中心点为坐标系的原点。在这个坐标系中，我们将竖直向上的方向定义为 Z 轴，地面平面为 XOY 平面。此外，我们将正北方向定义为 Y 轴，正东方向定义为 X 轴。

2.1 问题一的分析

问题一旨在在特定条件下研究一个定日镜场的性能参数，包括年平均光学效率、年平均输出热功率和单位镜面面积年平均输出热功率这三个关键指标。本问题的挑战主要集中在以下两个方面：

1. 抽象出具有普适性的单个镜面光学几何性质的物理模型：首要任务是建立一个通用的物理模型，能够准确描述单个定日镜的光学特性，包括阴影效率、余弦效率、大气透射率、截断效率和镜面反射率等五个关键效率参数。在这其中，阴影效率和截断效率是研究的核心内容。

2. 计算整个定日镜场的性能参数：在建立单个镜面模型的基础上，需要考虑如何综合考虑所有镜面的效率参数以计算出整个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。

为了解决上述挑战，我们采用以下方法进行求解：

首先，我们着眼于单个定日镜，建立了几何模型，并运用光学原理来计算阴影效率、余弦效率、大气透射率、截断效率和镜面反射率等五个关键效率参数。我们特别关注阴影效率和截断效率的计算，这是研究的重点。通过结合光线追迹法和蒙特卡罗算法，我们研究了各种光线向量在不同条件下的被阴影和挡光情况，以及集热器对光线的截断情况。我们建立了通用的求解模型，可以计算出单个镜面在任意时间点的光学效率。

接下来，我们采用八叉树算法来实现快速查找可能对目标定日镜面产生阴影或挡光效应的其他镜面。这一步可以大幅加速单个镜面光学效率的计算。最后，通过嵌套循环遍历附件中提供的所有定日镜坐标，我们能够得出整个镜场的年平均光学效率。

总结而言，年平均输出热功率和单位镜面面积年平均输出热功率的计算都基于光学效率，因此我们首先着重研究了单个镜面的光学性质，并通过高效的算法来计算整个定日镜场的性能参数。

2.2 问题二的分析

问题二是一个典型的优化问题，旨在寻找最佳的定日镜安装方案以及吸收塔的位置，以使得单位镜面面积年平均输出功率最大化。这个问题的解决涉及到一系列决策变量，包括吸收塔的坐标、定日镜的尺寸和坐标、定日镜的高度等特征。问题的复杂性在于需要目标函数表达式的求解以及综合考虑各种约束条件，以确保所得到的优化方案在实际应用中是可行的。

为了解决问题二，我们需要建立一个优化模型，其中最大化单位镜面面积年平均输出功率是优化目标。具体而言，我们可以考虑以下几个方面的因素：

(1) 吸收塔位置坐标：吸收塔的位置对整个系统的性能至关重要。通过调整吸收塔的坐标，我们可以最大程度地提高镜面的入射光线，从而增加能量收集。

- (2) 定日镜尺寸和坐标：定日镜的尺寸和位置也对系统性能产生重大影响。适当调整定日镜的尺寸和位置可以确保镜面能够有效地聚焦光线，提高光能的利用效率。
- (3) 定日镜的高度：定日镜的安装高度可以影响到阴影效应和挡光情况。通过合理设置定日镜的高度，我们可以减小光线被阴影或挡光的可能性，提高光学效率。

为了建立这个优化模型，我们需要考虑各种约束条件，例如定日镜之间距离、不得超出指定区域等。这些约束条件将限制决策变量的可行范围，确保所得到的优化方案是实际可行的。

最后，通过启发式优化算法，如遗传算法或差分进化算法，我们可以搜索最佳的决策变量组合，以实现单位镜面面积年平均输出功率的最大化。这种优化方法允许我们在复杂的多变量环境中找到最佳解，以满足题目的要求。

总之，问题二涉及到光学和工程领域的专业知识，需要综合考虑各种因素来建立一个合适的优化模型，以实现最大化能源输出的目标。在此过程中，约束条件的处理和数值算法的选择都是关键因素。

2.3 问题三的分析

问题三旨在通过调整定日镜的尺寸和安装高度，寻找最佳的定日镜场布局，以最大化单位镜面面积年平均输出热功率，并确保达到额定功率。与问题二不同的是，问题三允许定日镜的尺寸和安装高度可以不同，这增加了问题的复杂性。

在问题三中，我们需要修改问题二中的优化模型，以适应新的情况。优化模型需要考虑以下几个方面的因素：

- (1) 各定日镜尺寸： 允许各个定日镜的尺寸不同，这意味着每个定日镜的聚光效率和光学特性可能不同。因此，需要确定每个定日镜的最佳尺寸，以最大程度地提高能源收集效率。
- (2) 各定日镜的安装高度： 定日镜的安装高度也可以不同，这将影响到阴影效应和挡光情况。适当调整安装高度可以降低光线被阴影或挡光的可能性，从而提高光学效率。
- (3) 定日镜场布局： 问题三要求找到一个最佳的定日镜场布局，这涉及到确定每个定日镜的位置坐标。通过优化定日镜的位置，可以进一步提高光学效率和能源输出。
- (4) 达到额定功率的约束条件： 与问题二类似，问题三也需要满足额定功率的约束条件。这意味着优化模型必须确保所得到的布局不仅最大化了输出功率，还满足了功率要求。

为了解决问题三，我们需要重新调整问题二中的优化模型，将各个定日镜的尺寸和安装高度引入考虑，并重新定义决策变量。随后，通过数值优化算法，如遗传算法或差分进化算法，搜索最佳的布局 and 参数组合，以实现最大化能源输出的目标。

这个问题涉及到更多的自由度和复杂性，需要综合考虑多个因素，包括定日镜的光学特性、布局、功率要求等。在实际应用中，问题三的解决将为定日镜场的设计和布局提供更灵活的选择，以满足不同需求和条件下的能源需求。因此，问题三在光学和工程领域具有重要的应用前景。

三、模型假设

1. 假设制作的定日镜没有面型误差和损坏
2. 假设定日镜通过控制系统实时调整法向，使得太阳光线经定日镜反射后准确指向集热器中心。
3. 假设光锥内同一平面上能流密度均匀
4. 假设给定 60 个时间点镜场天气状况良好

四、符号说明

符号	说明
E_{field}	定日镜场的输出热功率
DNI	法向直接辐照度
N	定日镜总数
A_i	第 i 面定日镜的采光面积
η_i	第 i 面定日镜的光学效率
η_{sb}	阴影遮挡效率
η_{cos}	余弦效率
η_{at}	大气透射率
η_{trunc}	集热器截断效率
η_{ref}	镜面反射率

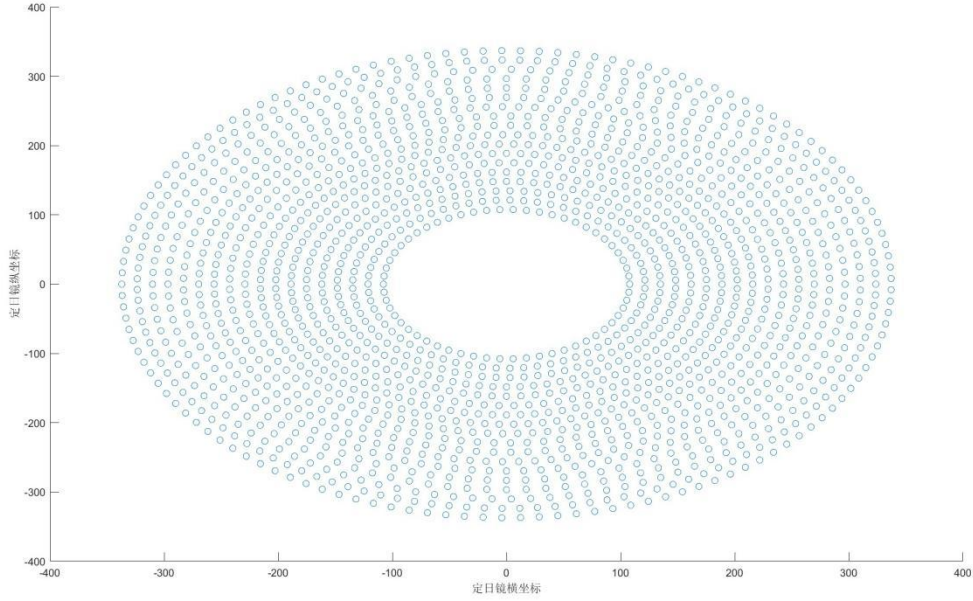
五、数据预处理

5.1 数据汇总

5.1.1 由题目已给出信息所得数据

由题目中所给信息可得数据：当地纬度，ST（当地时间），D（以春分作为第 0 天起算的天数 0），各镜面坐标。镜面坐标图如下图所示。

镜面坐标图



题目中给出计算时点数据。由于 9:00 至 15:00 时间段内的时点数据基本概括了每日日出至日落间的太阳光照数据。几个数据关于 12:00 对称，能较好地反映一天中各个时间段太阳光照的变化情况。时间间隔为一个半小时，有足够的时间使光照出现明显变化。每月 21 日的数据来源稳定，具有一定代表性，能较好地反映一个月的平均光线数据情况。

5.1.2 根据公式，使用 MATLAB 进行计算间接获得数据

由于在计算各种物理量的过程中需要很多相关变量的数据，因此我们通过查找相关论文，应用公式间接计算等方式获得如下重要数据：

①太阳时角 ω ：
$$\omega = \frac{\pi}{12}(ST - 12)$$

②太阳赤纬角 δ ：
$$\sin \delta = \sin \frac{2\pi D}{365} \sin \left(\frac{2\pi}{360} 23.45 \right)$$

③太阳高度角 α_s ：
$$\sin \alpha_s = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi$$

④太阳方位角 γ_s ：
$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \delta - \sin \alpha_s \sin \varphi}{\cos \alpha_s \cos \varphi}$$

上述数据结果已整理并输出为表格，详见附录 1

六、模型的建立与求解

6.1 问题一模型的建立与求解

6.1.1 模型的建立

在问题一的建模中，光学效率是一个至关重要的物理量，因为其他的性能参数都依赖于它。同时，问题一的求解需要考虑太阳光照方向的变化对各个变量的影响，这使得问题复杂而具有挑战性。

首先，我们需要建立一个几何模型，以便计算各个物理量的方向坐标，以及太阳光线与镜面反射之间的关系。这涉及到考虑太阳光照方向随时间的变化。因此，我们首先建立了太阳光照随时间变化的轨迹曲线模型，然后在特定时间点，针对一个定日镜面，建立了反射模型，明确了各个变量与太阳光照方向之间的具体关系和计算方法。在这个过程中，我们综合考虑了定日镜之间的互相遮挡和影响，以确保模型的准确性。

(1) 坐标系的建立

为了简化模型并减少无关变量的影响，我们选择建立地地面直角坐标系，以定日镜场中心为坐标原点，正东为 X 轴，正北为 Y 轴，垂直于地面为 Z 轴。在这个坐标系下，我们可以精确表示每个定日镜的具体位置。另外，为了更好地理解和简化计算，我们在每个定日镜的中心建立了一个镜面直角坐标系，其中法向量指向 Z 轴方向。这些坐标系之间可以通过转换矩阵进行相互转换，从而使模型更加灵活且易于计算。

太阳光线收集的几何静态模型

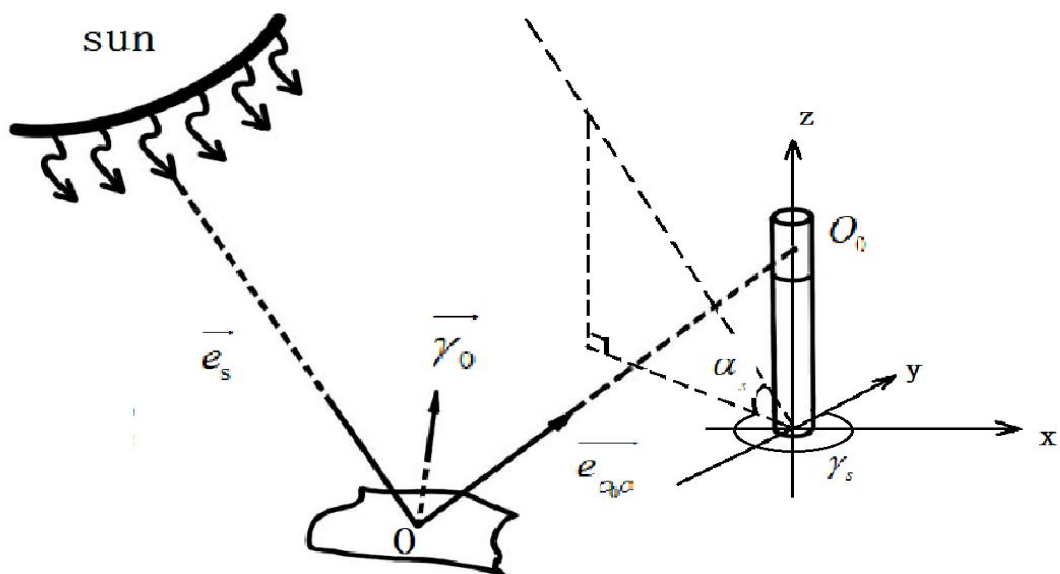
在分析中，我们选择了一个特定的时刻和一个定日镜面中心点进行研究。为了简化分析，我们暂时不考虑太阳光线呈锥形的情况，而将太阳光线的传播视为线性。这意味着我们可以将太阳光线入射到镜面上的任意一点，然后反射到集热器中心的过程表示为一个线性过程。此时太阳入射光线向量表示为

$$\vec{e}_s = (\sin \gamma_s \cdot \cos \alpha_s, \cos \gamma_s \cdot \cos \alpha_s, \sin \alpha_s)$$

具体来说，我们考虑一个特定的时刻和一个定日镜面中心点。我们知道，太阳光线入射到定日镜面上后会反射，而反射角度遵循光的反射定律。入射光线与反射光线的夹角的角平分线即为镜面的法向量。

在地面坐标系中，我们可以明确定义镜面中心点和集热器中心的坐标位置。镜面中心点在地面坐标系中的位置可以表示为 $O(x_0, y_0, 4)$ ，而集热器中心的位置也可以表示为 $O_0(0, 0, 80)$ ，这两个坐标值在后续的计算中将起到关键作用。

太阳光线反射示意图



根据以上条件，在地面坐标系中反射光线的向量可表示 $\overrightarrow{OO_0} = (-x_0, -y_0, 76)$ ，

$\overrightarrow{e_{O_0O}} = \frac{\overrightarrow{OO_0}}{|\overrightarrow{OO_0}|}$ 因此，可得镜面法向量 $\overrightarrow{\gamma_0} = \frac{\overrightarrow{e_s} + \overrightarrow{e_{O_0O}}}{|\overrightarrow{e_s} + \overrightarrow{e_{O_0O}}|}$ ，以平面法向量方向为 Z 轴，建立镜面坐标系

设计矢量方程，根据方程求解镜面 X 轴在地面坐标系下的方向向量，令为 $\overrightarrow{\alpha_0}$

$$\begin{cases} \overrightarrow{\alpha_0} \cdot \overrightarrow{\gamma_0} = 0 \\ \overrightarrow{\alpha_0} \cdot (0, 0, 1) = 0 \Rightarrow \overrightarrow{\alpha_0} \\ |\overrightarrow{\alpha_0}| = 1 \end{cases}$$

由坐标系的几何关系可得，镜面坐标系的 Y 轴方向向量可由 Z 轴与 Y 轴叉乘得到。令为 $\overrightarrow{\beta_0}$

$$\overrightarrow{\gamma_0} \times \overrightarrow{\alpha_0} = \overrightarrow{\beta_0} \Rightarrow \overrightarrow{\beta_0}$$

此时由 A 镜面坐标系到地面坐标系转换关系矩阵为：

$$T_{A \text{ 镜面} \rightarrow \text{地面}} = \begin{pmatrix} \overrightarrow{\alpha_0}^T & \overrightarrow{\beta_0}^T & \overrightarrow{\gamma_0}^T \end{pmatrix}$$

同理可得，由 B 镜面坐标系到地面坐标系转换关系矩阵为： $T_{B \text{ 镜面} \rightarrow \text{地面}}$

为进一步描述阴影遮挡，可建立集热器截面坐标系。以太阳入射向量在地面坐标系下 XY 平面的分量作为截面的 Z 轴，地面坐标系下 Z 轴作为截面 X 轴。此时可得集热器截面坐标系到地面坐标系转换关系矩阵为： $T_{\text{集热器截面} \rightarrow \text{地面}}$

根据各个坐标系可以更方便地表述向量间的关系，使计算更简洁。

根据瞬时太阳光线收集模型，我们可以分析出光学效率求解所需要的各个变量。由于年平均输出热功率与单位镜面面积年平均输出热功率由镜面光学效率决定，因此该部分几何建模在求解各个问题中均能使用。

6.1.2 模型的求解

6.1.2.1 年平均光学效率

$$\eta = \eta_{sb} \cdot \eta_{\cos} \cdot \eta_{at} \cdot \eta_{trunc} \cdot \eta_{ref}$$

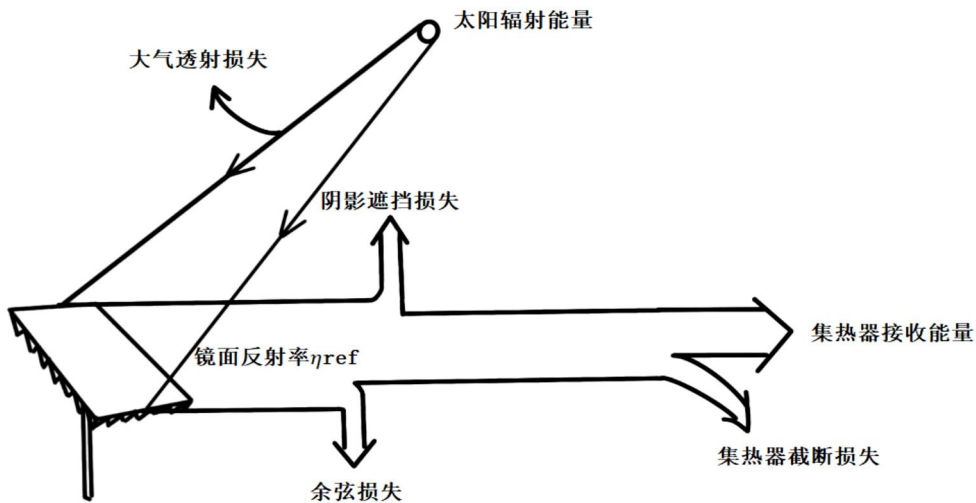
太阳能定日镜的光学效率是一个关键的性能指标，它反映了定日镜有效地收集太阳能的能力。在光学效率的计算中，有几个关键参数对其产生显著影响，其中阴影遮挡率和余弦效率起着重要的作用。

阴影遮挡率描述了在太阳光线传播过程中被遮挡的光线占总光线的比例。阴影遮挡率的高低直接影响了光线的到达集热器的数量，因此在光学效率的计算中，它是一个关键因素。高阴影遮挡率会导致光学效率降低，因为部分太阳光线无法到达集热器表面。

余弦效率描述了太阳光线收集的有效性。由于定日镜的倾斜，其反射后的光线的有效出射面积小于太阳光实际入射的面积。这使得光学效率降低，因为不是所有入射光线都能够有效地反射到集热器上。

因此，在光学效率的计算中，我们重点关注阴影遮挡率和余弦效率这两个关键参数，它们对定日镜的性能有重要影响。其他因素的影响相对较小，但仍然需要考虑在内。

镜面反射率 η_{ref} 按题目中所给 (0.92)。需要计算阴影遮挡效率 η_{sb} ，余弦效率 η_{\cos} ，大气透射率 η_{at} ，集热器截断效率 η_{trunc}



能量损失示意图

(1) 阴影遮挡效率 η_{sb} 的计算

在光学效率的计算中，由于阴影遮挡面积几何模型较为复杂，

- 阴影损失主要由以下三个方面组成：

- ①定日镜接受太阳光线时受周围定日镜阴影影响；
- ②定日镜接受太阳光线时受集热塔阴影影响；
- ③定日镜反射光线时受周边定日镜拦截。

在这里，我们将前两种统称为阴影影响，第三种称为挡光影响

- 蒙特卡罗算法计算阴影损失占比

由于无法直接计算定日镜中所有点阴影损失情况，我们使用蒙特卡罗算法，由大量定日镜内随机的损失情况预测整体阴影损失情况。具体来说，利用 MATLAB 随机种子产生随机分布于镜面内的点集（10000 个为例），统计阴影损失的点占总数的比例，将该比例视为整个镜面的阴影损失比例。

- 建立对于单个定日镜的阴影效率计算模型

阴影效率的计算目标：求出未被相邻定日镜遮挡的镜面面积与该定日镜总面积的比值

1. 计算思路：

建立判断某特定光线是否存在上述三种形式的阴影影响的判断机制，用 t_1 、 t_2 、 t_3 三个布尔系数分别标识三种形式的阴影影响，当 t_1 、 t_2 、 t_3 中有一个为真，则说明该光线被阴影影响。

2. 阴影影响判断机制的实现思路：

任取镜面 A 上一点 $H_1(x, y)$ （平面 A 坐标系下的坐标），以及通过该点的光线向量 $V_1(a, b, c)$ 。通过求平面 A 到其它镜面坐标系、平面 A 到地面坐标系、其它镜面坐标系到地面的坐标转换矩阵，实现由点 H_1 和向量 V 确定的光线在任意坐标系下的表示。在通过在各个坐标系下将光线方程与镜面平面、塔截面方程联立，解出交点的坐标值，然后由交点的坐标值推断光线是否被平面遮挡。

3. 具体计算过程

Step 1 以单个镜面为例

1. 以判断镜面 B 是否对镜面 A 上一点 $H_1(x, y)$ （平面 A 坐标系下的坐标）处入射光线产生阴影影响为例，取照在 H_1 处入射锥形光线中任意一条光线向量 $\vec{V}_1(a, b, c)$

① 先将 A 镜的某一点 H_1 转换到地面坐标系下的坐标，并表示为 H_1'

$$H_1' = T_{A\text{镜面} \rightarrow \text{地面}} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 0 \end{pmatrix} + O_A = \begin{pmatrix} x_0' \\ y_0' \\ z_0' \end{pmatrix}$$

② 再将地面坐标系下的 H_1' 转换到 B 镜坐标系下，表示为 H_1''

$$H_1'' = T_{B\text{镜面} \rightarrow \text{地面}}^T \begin{pmatrix} x_0' \\ y_0' \\ z_0' \end{pmatrix} - O_B = \begin{pmatrix} x_0'' \\ y_0'' \\ z_0'' \end{pmatrix}$$

③ 将地面坐标系下的光线(入射光线) 转换到 B 镜坐标系下

$$\vec{v}_1' = T_{B\text{镜面} \rightarrow \text{地面}}^T \cdot \vec{v}_1 = (a', b', c')$$

④ 在 B 镜坐标系下, 根据两点一线的原理, 计算光线与 B 镜交点 H_2 。此时直线方程为如下:

$$\frac{x_2 - x_1''}{a'} = \frac{y_2 - y_1''}{b'} = \frac{-z_1'}{c'}$$

$$\text{得:} \begin{cases} x_2 = \frac{cx_1'' - az_1''}{c} \\ y_2 = \frac{cy_1'' - bz_1''}{c} \end{cases}$$

⑤判断 H_2 是否在 B 镜内

- 若在 B 镜内, 则会被遮挡, 将 t_1 置为 true, 反之置为 false。
- 同理: 得出塔是否“阴影”该光线的判断系数 t_2 , B 镜是否“挡光”对应出射光线的判断系数 t_3 。当且仅当 t_1, t_2, t_3 同时为假时, 判定该光线未被阴影影响。
- 对光锥内所有光线做积分得到该光锥被遮挡的面积
- 对镜面 A 上的每个点对应光锥被遮挡面积做积分得到镜面总被遮挡面积。

(3) 计算挡光面积: 同理, 取在 H_1 处出射锥形光线中任意一条光线向量 $V_2(a, b, c)$, 判断 H_2 是否在 B 镜内, 如果在, 则会被挡光。

对单个镜面上单个点分析入射与出射光线是否通过 B 镜面, 从而确定是否存在阴影和遮挡。

(4) 使用 MATLAB 封装判断函数如下:

% 是否被遮挡, t_1 、 t_2 、 t_3 分别表示入射和出射光线的遮挡情况, 同时计算该入射线的余弦损失
`function [t1,t2,t3,t4,Ncos] = checkSunlightVisibility(SINas, COSas, SINys, COSys, x0, y0, x1, y1, x_h, y_h)`

函数返回所有判断系数的值方便后续分析。

(5) 使用蒙特卡罗算法, 计算出单个镜面的阴影损失。

由单个镜面分析推广到任意镜面分析:

在解决问题中, 一个主要难点是考虑每个镜面时都需要考虑其周围多台定日镜的阴影和遮挡作用。由于镜场中的定日镜数量众多, 完全遍历计算将需要大量的计算资源和时间。因此, 我们采用了一种高效的空问数据结构, 即八叉树 (Octree), 来快速搜索可能对目标镜面产生阴影影响的其他定日镜坐标。

八叉树的原理如下:

空间分割：首先，我们将镜场空间进行递归的二进制空间分割，将空间划分为八个子立方体（Octants），每个子立方体可以进一步分为八个子立方体，如此类推。

数据存储：每个子立方体内部存储了其中包含的定日镜的信息。这个结构允许我们以高效的方式存储和检索定日镜的位置坐标。

快速搜索：当需要计算一个特定镜面是否受到其他定日镜的阴影影响时，我们可以使用八叉树来快速确定位于同一或相邻子立方体内的其他定日镜，而无需遍历全部定日镜。这样，我们可以大大减少计算的复杂度，提高计算效率。

通过应用八叉树这一空间数据结构，我们能够更高效地处理复杂的阴影和遮挡计算，从而更准确地评估每个镜面的光学效率。这在面对大规模镜场时尤为重要，因为它显著减少了计算的时间和资源成本。（原理）

通过 MATLAB 对函数进行封装，得到计算阴影效率的函数

（函数截图）

```
function resultTable = calculateSunlightVisibilityForYear(x0, y0, x1, y1, data)
```

对附件中所有定日镜坐标进行遍历求解，并将结果保持在表格中。

最后，为简化计算，我们使用五个特定时间点对应阴影效率的平均值作为每个月的月平均阴影效率。

示例点月均阴影效率	
月份	月平均阴影效率（%）
3	61.2456
4	61.6072
5	57.5934
6	54.1081
7	57.6692
8	61.7025
9	61.0848
10	56.9918
11	51.9475
12	52.2762
1	51.8485
2	57.5491

（2）集热器截断效率 η_{trunc}

集热器截断效率描述了集热器最终收集到未被阴影遮挡部分的反射光线的效率。因此，在计算集热器截断效率需要考虑三个方面：

- (1) 部分光线未反射在集热器上；
- (2) 镜面反射衰减率；
- (3) 集热器接收能量衰减率。

镜面反射衰减率与集热器能量衰减率都能用系数表示，因此重点分析未反射在集热器上的光线部分所影响的效率。

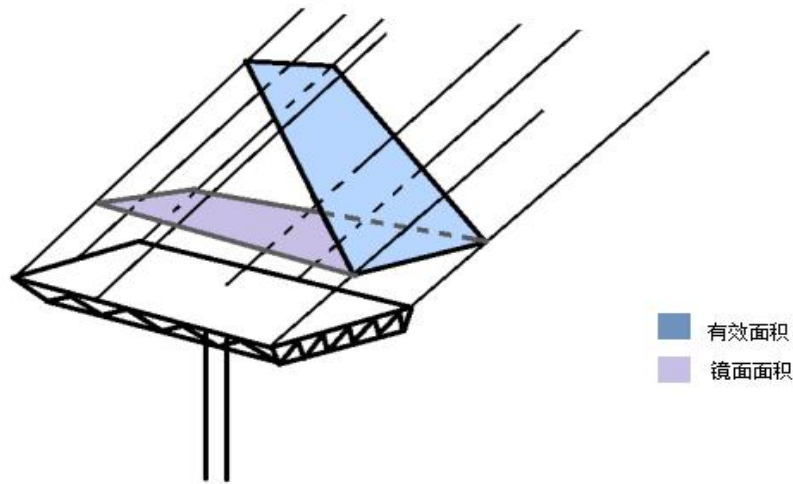
- ① 首先研究光锥的中心光线。以单个定日镜为例。
 - ② 接阴影效率计算过程，计算能够射入集热器的光线：取照在 H_1 处入射锥形光线中任意一条光线向量 $\vec{V}_1(a,b,c)$
 - ③ 首先根据阴影效率计算过程，判断是否为阴影部分
 - ④ 若不为阴影部分，则先将 A 镜的某一点 H_1 转换到地面坐标系下的坐标，并表示为 H_1' 。
 - ⑤ 再将地面坐标系下的 H_1' 转换到集热器截面坐标系下，表示为 H_1'' 。
 - ⑥ 将地面坐标系下的光线(反射) 转换到集热器截面坐标系下
 - ⑦ 在吸收塔截面平面坐标系下，根据两点一线的原理，计算光线与吸收塔截面平面交点 H_2
 - ⑧ 判断 H_2 是否在集热器截面内
 - ⑨ 对光锥内所有光线做积分得到该光锥能够射入集热器的面积
- 对镜面 A 上的每个点对应光锥被遮挡面积做积分得到镜面总被遮挡面积。

示例点月均截断效率

月份	月平均截断效率 (%)
3	93.8248616
4	89.30209858
5	83.44219309
6	80.26477541
7	83.51734828
8	89.55756539
9	94.00126024
10	96.21994021
11	97.58492569
12	98.03771522
1	97.45762712
2	96.02333117

(3) 余弦效率 η_{\cos}

余弦效率示意图



为将太阳过光线反射入集热器中心，定日镜与地面有一定夹角。这部分夹角使得太阳出射的实际有效面积不为镜面面积。余弦效率描述了在反射过程中实际有效面积相对于镜面面积的损失。

通过太阳高度角和太阳方位角得出入射光线与镜面法线的夹角
 $\eta_{\cos} = \omega_s \cdot n_h = \cos\theta_n$ ，可计算出余弦效率

示例点月均余弦效率

月份	月平均余弦效率
3	0.961364465
4	0.977821375
5	0.983637751
6	0.984472898
7	0.98359809
8	0.97729545
9	0.96027792
10	0.934822311
11	0.909370106
12	0.899564565
1	0.911722782
2	0.938006256

(4) 大气透射率 η_{at}

大气透射率描述了大气状态对于镜面场效率的影响。
 根据方程

$$\begin{cases} d_{HR} = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + 76^2} \\ \eta_{at} = 0.99321 - 0.0001176d_{HR} + 1.97 \times 10^{-8} \times d_{HR}^2 \quad (d_{HR} \leq 1000) \end{cases}$$

可计算出具体时间对应的大气透射率

根据公式求得瞬时光学效率，将用每日的 9:00、10:30、12:00、13:30、15:00 时间点的光学效率代表整天的光学效率，每月 21 日的光学效率代表整个月的月平均光学效率。

$$\text{年平均光学效率表达式: } \eta = \frac{\sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^5 \eta_i}{60}$$

月份	光学效率
3	0.716
4	0.7384
5	0.7508
6	0.7542
7	0.7507
8	0.7375
9	0.7147
10	0.6872
11	0.6627
12	0.6538
1	0.6649
2	0.6905

示例点的光学效率

6.1.2.2 年平均输出热功率

$$E_{\text{field}} = \text{DNI} \cdot \sum_i^N A_i \eta_i$$

如上所示公式为任一时间点上定日镜场的输出热功率。已求出各个定日镜各个时间点对应的光线效率，能够计算任一时间点上定日镜场的输出热功率。将所有时间点的定日镜场的输出热功率进行累加，再求平均值。

$$\text{年平均热功率: } E = \frac{\sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^5 E_{\text{feild}}}{60}$$

6.1.2.3 单位镜面面积年平均输出热功率

已得到年平均输出热功率，则单位镜面面积年平均输出热功率可由年平均输出热功率除以镜面面积得到。

月份	单位镜面平均输出热功率
3	1.5893
4	1.5654
5	1.4851
6	1.4347
7	1.4862
8	1.5680
9	1.5886
10	1.5313
11	1.4324
12	1.3830
1	1.4430
2	1.2506

表 1问题 X 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	0.6649	0.911722782	13.07407826	93.8248616	1.4430
2 月21 日	0.6905	0.938006256	12.06828759	89.30209858	1.2506
3 月21 日	0.716	0.961364465	9.876164913	83.44219309	1.5893
4 月21 日	0.7384	0.977821375	6.406720844	80.26477541	1.5654
5 月21 日	0.7508	0.983637751	3.25168242	83.51734828	1.4851
6 月21 日	0.7542	0.984472898	2.015250153	89.55756539	1.4347
7 月21 日	0.7507	0.98359809	3.263105229	94.00126024	1.4862
8 月21 日	0.7375	0.97729545	6.581939724	96.21994021	1.5680
9 月21 日	0.7147	0.96027792	10.00449564	97.58492569	1.5886

10月21日	0.6872	0.934822311	12.24230649	98.03771522	1.5313
11月21日	0.6627	0.909370106	13.18108103	97.45762712	1.4324
12月21日	0.6538	0.899564565	13.45069041	96.02333117	1.3830

表 2问题 X 年平均光学效率及输出功率表

年平均 均光学效 率	年平均 均余弦效 率	年平均 阴影遮挡效 率	年平均 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)
0.710116667	0.951829497	0.57135325	91.6028035	92.961036	1.4798

6.2 问题二、三模型的建立与求解

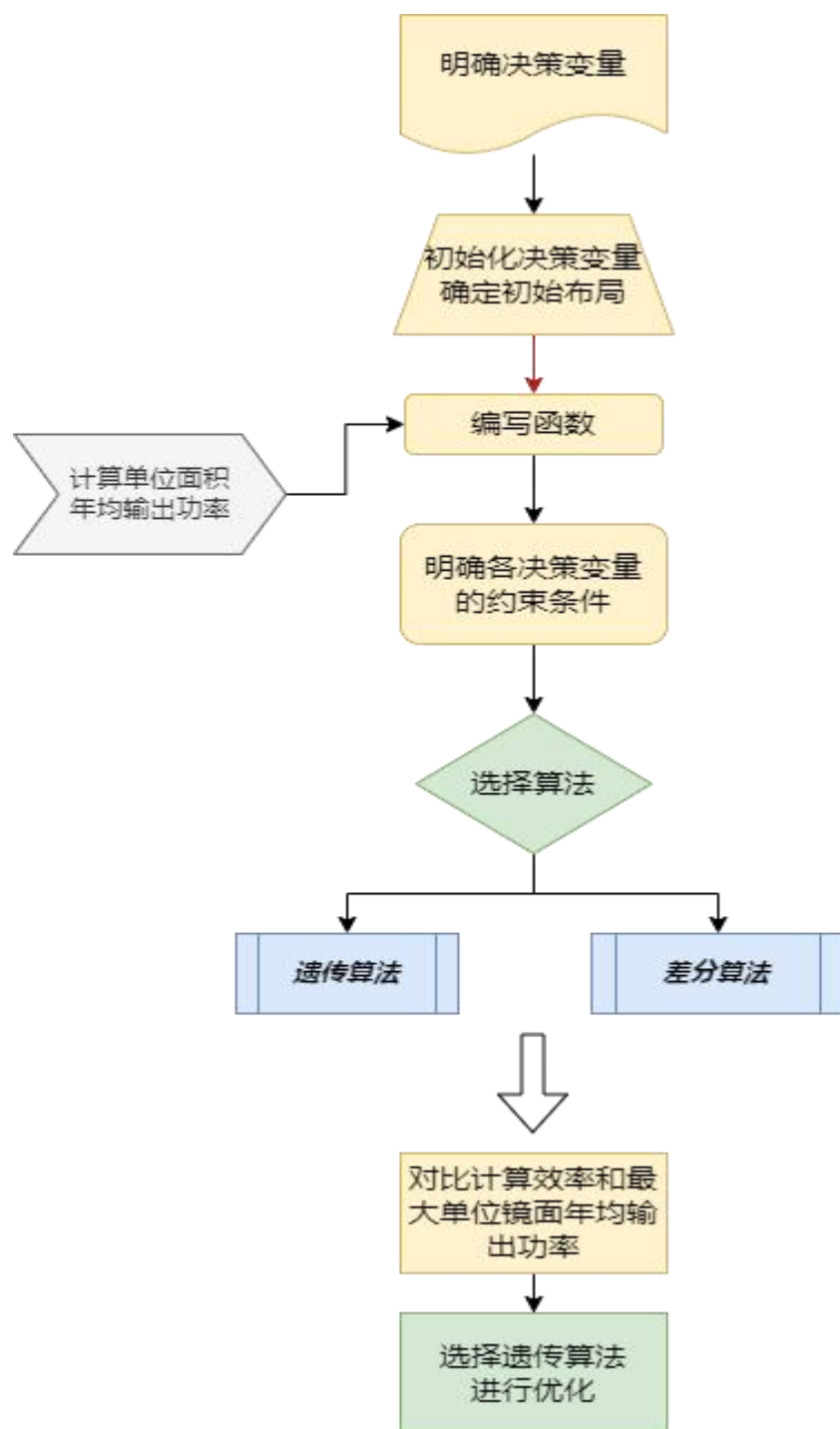
6.2.1 模型的建立

本题中优化的目标是在满足额定功率为 60 MW 的条件下，使得单位镜面面积年平均输出热功率尽量大。在本问中需要确定以下参数：吸收塔的位置坐标、定日镜的尺寸、定日镜的安装高度、定日镜的数量、定日镜的位置坐标。需要确定大量约束条件，找到一种合适的定日镜场布局，以最大化镜场的光学效率。从而提高单位镜面面积的年平均输出热功率。

考虑到本题参数将多，运算量较大，将使用适当的优化算法来寻找最优解。考虑到问题的复杂性，可以选择使用启发式算法或元启发式算法，如遗传算法、模拟退火算法等。这些算法可以在大量可能的解空间中搜索最优解。最终选定运用差分算法与遗传算法，对整体进行动态规划。对两种算法得到的结果进行分析与评价，综合考虑其中的优劣之处，输出结果。下图为解题流程图。

以下为目标函数与约束条件：

$$\max(E_{avg} = \frac{E_{field}}{n \cdot d_1 \cdot d_2})$$



$$s.t. \left\{ \begin{array}{l} (x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 \geq (d_2 + 5)^2 \\ (x_i - x_{i-1})^2 \geq (d_2 + 5)^2 \\ (y_i - y_{i-1})^2 \geq (d_2 + 5)^2 \\ 5 \leq d_1 \leq d_2 \leq 8 \\ 2 \leq h \leq 6 \\ \frac{1}{2}d_1 \leq h \\ 60MW \leq E_{field} \leq 66MW \\ 100 \leq \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \leq 350 \end{array} \right.$$

其中 E_{avg} 为单位镜面平均输出功率，其余变量在符号说明中解释。

6.2.2 模型的求解

6.2.2.1

Step 1: 决策变量的确定

问题 2 中涉及到的决策变量包括：

吸收塔位置、定日镜数量、定日镜尺寸、间距等

这些决策变量需要根据问题的优化目标进行调整，以达到最佳的定日镜场布局，以满足额定功率为 60 MW 的要求。在实际应用中，可以通过数学建模和优化算法来确定这些变量的最佳值。

Step 2: 采用放射状栅格法对定日镜进行初始化排布

- 确定吸收塔位置：吸收塔位于圆心处。
- 确定定日镜数量：1000
- 计算最小间距增量： d_2+5 。
- 确定定日镜的半径：

① 第一排定日镜的半径：可以根据设计要求选择。一种常见的方法是取塔高的一定比例，通常为塔高的一半或三分之一。我们选择取塔高的一半，即半径 $R_1 = 0.5 * THT$ 。

② 逐排增加半径：从第一排开始，每一排的定日镜半径可以按照 z 最小间距增量 ΔR 逐渐增加以实现放射状排布。得到半径表达式。

这样，我们就可以得到每一排定日镜的半径，并将它们用于放射状栅格法的初始化布局。

③ 从第一排开始，每一排的定日镜半径可以按照一定的增量逐渐增加，

计算定日镜位置：

- 从吸收塔的位置开始，按照放射状排布的原则，计算每排定日镜的位置坐标。
- 确定每排的镜子数量，以保持镜子之间的最小间距增量。
- 根据定日镜的半径和角方位间距，计算每个定日镜的位置坐标。
- ④ 重复直到覆盖整个镜场：
 - 持续计算新的排镜子的位置，直到整个镜场被覆盖。
 - 可能需要考虑镜场的形状，以确保定日镜布局在规定的区域内。

Step 3: 确定目标函数

$$\max(E_{avg} = \frac{E_{field}}{n \cdot d_1 \cdot d_2})$$

Step 4: 建立完整优化模型

Step 5: 使用遗传算法进行计算

以下是使用遗传算法来计算布局的详细步骤：

步骤 1：问题建模

首先，将问题建模为一个遗传算法的优化问题。明确定义目标函数、决策变量、约束条件等。

交叉概率（Crossover Rate, CR）：0.8

变异概率（Mutation Rate, MR）：0.05

步骤 2：初始化种群

		编码方式	范围
吸收塔坐标	x_0	实数编码	$[-100, 100]$
	y_0	实数编码	$[-100, 100]$
定日镜尺寸	d_1	实数编码	$[2, 8]$
	d_2	实数编码	$[2, 8]$
安装高度	h	实数编码	$[2, 6]$
定日镜数目	N	整数编码	$[1000, 2500]$
定日镜位置	x_i	排列编码	$[-350, -100] \cup [100, 350]$
	y_i		$[-350, -100] \cup [100, 350]$

确定编码方式

根据决策变量的性质，确定如何对每个个体进行编码。

例如，可以生成一个长度为 N 的排列，表示定日镜的位置顺序，然后根据位置顺序计算每个定日镜的具体坐标 (x_i, y_i) 。

步骤 3: 适应度函数

$$\max(E_{avg} = \frac{E_{field}}{n \cdot d_1 \cdot d_2})$$

步骤 4: 选择

计算适应度值（单位镜面面积年平均输出热功率）：对于种群中的每个个体，使用问题的目标函数来计算其适应度值。在这里，适应度值表示个体的性能，即年平均输出热功率越高，适应度值越高。

归一化适应度值：为了将适应度值转化为选择概率，通常会对适应度值进行归一化处理。这可以通过将适应度值除以总体适应度值之和来完成，以确保所有适应度值之和等于 1。

选择个体：使用 MATLAB 自带的排名选择函数进行 `selectedIndices = rankSelection(normalizedFitness, populationSize);`

步骤 5: 循环演化

演化操作步骤（包括交叉和变异）：

1. 从父代种群中选择两个个体作为父代。
2. 使用交叉算子对选定的两个父代进行交叉操作，生成两个子代。交叉操作可以是单点交叉、多点交叉等，具体取决于问题的性质。
3. 对生成的子代进行变异操作，以引入多样性。变异操作可以是随机改变个体的某些基因或属性，使得搜索空间更广泛。
4. 计算子代的适应度值。
5. 比较子代的适应度值与父代的适应度值，保留适应度较高的子代。
6. 重复上述步骤，直到生成足够数量的子代。
7. 将新生成的子代替换掉一部分父代，形成下一代种群。通常，选择具有较高适应度的子代来保留，以确保种群的质量。

这个演化操作步骤是遗传算法的核心部分，它通过交叉和变异操作来生成新的个体，并通过适应度比较来筛选和替换个体，从而逐步优化种群中的个体。

这个步骤会在遗传算法的迭代过程中反复执行，直到达到终止条件为止，以搜索潜在的最优解。每一代都会生成新的子代，逐渐改进种群的性能。

七、模型的评价、改进与推广

7.1 模型的优点

本文在清楚、正确地分析了整个物理过程的基础上，将模型进行了合理的简化，为问题的求解提供了必要条件。

模型的建立更多基于理性分析和合理推导，对于部分重要原则给出了有保证的定义和证明，对求解的决策原则进行了全面的分析和讨论，使得模型具有较多的理论支持。模型在一定程度上准确且巧妙地回答了问题，并做出了一些简化，提升了求解效率，易于理解和解答。

采用了合理的近似，在简化问题的同时不会产生较大误差。

通过多种方法对问题进行了分析，采用逐层递进的思路，使得结果具有较强的可信性。结合了其他领域的求解结果，具有较强的说服力。

对函数的拟合效果较好，根据拟合的函数对数据进行了优化，有利于进一步分析和决策。

在实际问题中具有实用性，值得在相关领域推广应用。

7.2 模型的缺点

虽然模型具有多个优点，但也存在一些缺点：

主要使用某种模型，考虑某些因素，拟合结果容易产生一定误差。

实际情况下的理想化假设，未考虑某些复杂情况，可能导致结果与实际情况存在差距。

模型在某些方面有待进一步提升，尤其是在计算效率和复杂性方面。

某些性质的证明和指导原则需要满足一定条件，限制了模型的普适性和推广能力。

模型的实施可能需要较高的算力支撑，不易通过人工计算快速验证。

数据来源有限，模型的准确度无法进一步评估，可能具有一定的局限性。

7.3 模型的改进

为了克服模型的一些缺点，可以考虑以下改进措施：

针对模型使用的某种算法，优化其简明性，提高代码的可读性。

考虑某些情况下的模型扩展，以更好地适应不同场景。

加入新的函数或因素以完善模型，增加其适用性。

更多地考虑真实情况，引入更多的实际数据和变量。

7.4 模型的推广

本模型的方法可以推广到其他领域，例如：

阴影效率的求解部分可以将各个步骤进行单独函数封装处理，有利于未来在不同场景中的应用。

模型的优化算法，如遗传算法和差分进化算法，可以用于其他优化问题的求解。

模型的理论基础和建模方法可以用于太阳能领域以外的能源收集和优化问题。

模型的思维框架和分析方法可以启发其他领域的研究者解决复杂问题。

总之，本模型的优点和改进潜力使其具备在不同领域和实际应用中推广的可能性，为相关领域的研究和实践提供了有价值的经验和方法。

参考文献

[1]张莉莉. DE 算法改进及其在塔式光热电站镜场布局优化中的应用[D].哈尔滨工业大学,2021.DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.005764.

[2] 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.

- [3]张国勋,饶孝枢.塔式太阳能聚光系统太阳影象方程[J].太阳能学报,1982(02):172-178.DOI:10.19912/j.0254-0096.1982.02.008.
- [4]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.
- [5] 蔡志杰, 太阳影子定位[J], 数学建模及其应用, 2015, 4(4):25-33.
- [6] 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.
- [7] O. Farges, J.J. Bezian, 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, 119:345-353.
- [8]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(03):64-69+75.DOI:10.13661/j.cnki.issn1001-9006.2020.03.014.

九、附录

附录 1					
表 1问题 X 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	0.6649	0.911722782	13.07407826	93.8248616	1.4430
2 月21 日	0.6905	0.938006256	12.06828759	89.30209858	1.2506
3 月21 日	0.716	0.961364465	9.876164913	83.44219309	1.5893
4 月21 日	0.7384	0.977821375	6.406720844	80.26477541	1.5654
5 月21 日	0.7508	0.983637751	3.25168242	83.51734828	1.4851
6 月21 日	0.7542	0.984472898	2.015250153	89.55756539	1.4347
7 月21 日	0.7507	0.98359809	3.263105229	94.00126024	1.4862
8 月21 日	0.7375	0.97729545	6.581939724	96.21994021	1.5680

9月21日	0.7147	0.96027792	10.00449564	97.58492569	1.5886
10月21日	0.6872	0.934822311	12.24230649	98.03771522	1.5313
11月21日	0.6627	0.909370106	13.18108103	97.45762712	1.4324
12月21日	0.6538	0.899564565	13.45069041	96.02333117	1.3830
表 2问题 X 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)
710116667	0.951829497	0.57135325	91.6028035	92.961036	1.4798

附录 2					
太阳相关角度数据图					
月	时刻	时角	赤纬角	高度角	方位角
3	9:00	-45	0	33.12073905	57.59545756
	10:30	-22.5	0	45.55416438	33.12773407
	12:00	0	0	50.6	0
	13:30	22.5	0	45.55416438	33.12773407
	15:00	45	0	33.12073905	57.59545756
4	9:00	-45	11.67879687	41.5733731	67.76318931
	10:30	-22.5	11.67879687	55.85486422	41.88800676
	12:00	0	11.67879687	62.27879687	0
	13:30	22.5	11.67879687	55.85486422	41.88800676
	15:00	45	11.67879687	41.5733731	67.76318931
5	9:00	-45	20.19419235	47.04822444	76.89602785
	10:30	-22.5	20.19419235	62.76513036	51.7029789
	12:00	0	20.19419235	70.79419235	0
	13:30	22.5	20.19419235	62.76513036	51.7029789
	15:00	45	20.19419235	47.04822444	76.89602785
6	9:00	-45	23.44792869	48.92526902	80.86818971
	10:30	-22.5	23.44792869	65.16599791	56.71264743
	12:00	0	23.44792869	74.04792869	0
	13:30	22.5	23.44792869	65.16599791	56.71264743
	15:00	45	23.44792869	48.92526902	80.86818971
7	9:00	-45	20.08941689	46.98556033	76.77286414
	10:30	-22.5	20.08941689	62.68508886	51.55544011

8	12:00	0	20.08941689	70.68941689	0
	13:30	22.5	20.08941689	62.68508886	51.55544011
	15:00	45	20.08941689	46.98556033	76.77286414
	9:00	-45	11.15778607	41.21639148	67.25730745
	10:30	-22.5	11.15778607	55.41106763	41.40448065
	12:00	0	11.15778607	61.75778607	0
	13:30	22.5	11.15778607	55.41106763	41.40448065
	15:00	45	11.15778607	41.21639148	67.25730745
9	9:00	-45	-0.58869085 7	32.67375673	57.13919378
	10:30	-22.5	-0.58869085 7	45.02000014	32.77603206
	12:00	0	-0.58869085 7	50.01130914	0
	13:30	22.5	-0.58869085 7	45.02000014	32.77603206
	15:00	45	-0.58869085 7	32.67375673	57.13919378
	9:00	-45	-11.8509440 4	23.85393128	49.17151684
	10:30	-22.5	-11.8509440 4	34.63479617	27.07717569
	12:00	0	-11.8509440 4	38.74905596	0
10	13:30	22.5	-11.8509440 4	34.63479617	27.07717569
	15:00	45	-11.8509440 4	23.85393128	49.17151684
	9:00	-45	-20.4995272 1	16.829322	43.78587038
	10:30	-22.5	-20.4995272 1	26.51434492	23.61458107
	12:00	0	-20.4995272 1	30.10047279	0
	13:30	22.5	-20.4995272 1	26.51434492	23.61458107
	15:00	45	-20.4995272 1	16.829322	43.78587038
	9:00	-45	-23.4442465 9	14.40452957	42.05080426
12	10:30	-22.5	-23.4442465 9	23.73117266	22.55196002
	12:00	0	-23.4442465 9	27.15575341	0

1	13:30	22.5	-23.4442465 9	23.73117266	22.55196002
	15:00	45	-23.4442465 9	14.40452957	42.05080426
	9:00	-45	-19.7662446 1	17.43091546	44.22460767
	10:30	-22.5	-19.7662446 1	27.20616975	23.88704723
	12:00	0	-19.7662446 1	30.83375539	0
	13:30	22.5	-19.7662446 1	27.20616975	23.88704723
	15:00	45	-19.7662446 1	17.43091546	44.22460767
2	9:00	-45	-10.6301869 4	24.83077923	49.97510304
	10:30	-22.5	-10.6301869 4	35.7727981	27.61790374
	12:00	0	-10.6301869 4	39.96981306	0
	13:30	22.5	-10.6301869 4	35.7727981	27.61790374
	15:00	45	-10.6301869 4	24.83077923	49.97510304

附录 3

介绍：MATLAB 计算太阳相关数据的主程序

```
%%
%画出散点图
clc;clear;close all;
data=readtable("附件.xlsx");
figure;
scatter(data,"x__m_","y__m_")
xlabel('定日镜横坐标'); % 替换 '横轴标签' 为您想要的标签
ylabel('定日镜纵坐标'); % 替换 '纵轴标签' 为您想要的标签
%%
clc; clear;
```

```

% 定义纬度
latitude = 39.4;
% 当地时间数据
ST = [9, 10.5, 12, 13.5, 15];
% 一年中的日期，每个日期表示一年中的第几天
D = [0, 31, 61, 92, 122, 153, 184, 214, 245, 275, 306, 337];

% 创建一个空表格
dataTable = table();

% 声明符号变量 x
syms x
for i = 1:length(D)
for j = 1:length(ST)
% 计算太阳时角
W = (ST(j) - 12) * pi / 12;

% 计算太阳赤纬角 Q 的正弦值和余弦值
SINQ = solve(x - sin(2 * pi * D(i) / 365) * sin(46.9 * pi / 360), x);
COSQ = sqrt(1 - SINQ^2);
SINQ = double(SINQ);
COSQ = double(COSQ);
Q=asin(SINQ);

% 计算太阳高度角 as
SINas = solve(x - COSQ * cosd(latitude) * cos(W) - SINQ * sind(latitude));
COSas = sqrt(1 - SINas^2);
SINas = double(SINas);
COSas = double(COSas);
as=asin(SINas);

% 计算太阳方位角 ys
COSys = solve(x - (SINQ - SINas * sind(latitude)) / (COSas * cosd(latitude)));
SINys = sqrt(1 - COSys^2);
SINys = double(SINys);
COSys = double(COSys);
ys=asin(SINys);

W=W*180/pi;
Q=Q*180/pi;
as=as*180/pi;
ys=ys*180/pi;
% 将计算结果存储在表格中

```

```

dataRow = {W,Q,as,ys};
dataTable = [dataTable; dataRow];
end
end
% 显示表格
disp(dataTable);
writetable(dataTable,'太阳相关数据.xlsx');

```

附录 4

介绍：计算月平均阴影效率、平均截断效率和余弦损失

```

%%
%求某面镜子 A 在全年 60 个时间点被它前面镜子 B 遮挡的比例
% 已知的 60 组数据
clc;clear;
datas = readtable("太阳高度角与方位角.xlsx");
data = datas(:, 3:6);
data1=readtable('附件.xlsx');
[N,Colnum]=size(data1);
Ncos=zeros(12,1);
for i=1:N
for j=1:N
if j~=i
x0 = table2array(data1(i,1));
y0 = table2array(data1(i,2));
x1= table2array(data1(j,1));
y1 = table2array(data1(j,2));
resultTable = calculateSunlightVisibilityForYear(x0, y0, x1, y1, data);
avg_sb=resultTable("平均阴影效率");
avg_tranc=resultTable("平均截断效率");
Ncos=Ncos+resultTable("余弦损失");
end
end
end
avg_sb=avg_sb/(N*N);
avg_tranc=avg_tranc/(N*N);
Ncos=Ncos/(N*N);
X0=[-59.987,-9.07,242.266,120.012,3.775,-9.07,-214.862,-147.257];
Y0=[249.099,121.028,15.091,18.089,-242.706,-121.028,19.715,17.88];
X1=[-56.115,-5.841,229.134,107.25,3.637,-5.841,-201.381,-133.597];

```

```

Y1=[236.16,107.724,7.274,11.664,-229.24,-107.724,19.036,18.362];
final_result_sb = table();
final_result_tranc = table();
final_result_cos = table();

for i = 1:8
    x0 = X0(i);
    y0 = Y0(i);
    x1 = X1(i);
    y1 = Y1(i);
    % 调用函数并获取输出
    resultTable = calculateSunlightVisibilityForYear(x0, y0, x1, y1, data);
    avg_sb = resultTable("平均阴影效率");
    avg_tranc = resultTable("平均截断效率");
    Ncos = resultTable("余弦损失");
    % 将结果添加为表格
    temp_sb = table(avg_sb, 'VariableNames', {'平均阴影效率_', num2str(i)});
    temp_tranc = table(avg_tranc, 'VariableNames', {'平均截断效率_',
num2str(i)});
    temp_cos = table(Ncos, 'VariableNames', {'余弦损失_', num2str(i)});
    final_result_sb = [final_result_sb, temp_sb];
    final_result_tranc = [final_result_tranc, temp_tranc];
    final_result_cos = [final_result_cos, temp_cos];
end

% 打印表格
disp(final_result_sb);
disp(final_result_tranc);
disp(final_result_cos);
writetable(final_result_sb, '最终结果--阴影效率.xlsx');
writetable(final_result_cos, '最终结果--余弦效率.xlsx');
writetable(final_result_tranc, '最终结果--截断效率.xlsx');

% 假设 final_result_sb 是您的表格
avg_sb_per_row = mean(final_result_sb{:, 1:end}, 2); % 从第二列开始计算平均值,
按行
avg_tranc_per_row = mean(final_result_tranc{:, 1:end}, 2);
avg_cos_per_row = mean(final_result_cos{:, 1:end}, 2);

% 创建包含平均值的新表格
avg_table = table(avg_sb_per_row, avg_tranc_per_row, avg_cos_per_row,
'VariableNames', {'平均阴影效率', '平均截断效率', '平均余弦损失'});

% 打印新表格

```

```
disp(avg_table);
writetable(avg_table,'最终结果平均值.xlsx');
```

附录 5

介绍：第一题：计算光学效率和输出热功率主程序

```
%%
% 计算第 i 面镜子的光学效率 Ni
clc;clear;
%%
% 计算光学效率
% 计算阴影遮挡效率和余弦效率
datas = readtable("太阳高度角与方位角.xlsx");
location=readtable("附件.xlsx");
data = datas(:, 3:6);
SINas = table2array(data(:, 1));
COSas = table2array(data(:, 2));
SINys = table2array(data(:, 3));
COSys = table2array(data(:, 4));
X0=[-59.987,-9.07,242.266,120.012,3.775,-9.07,-214.862,-147.257];
Y0=[249.099,121.028,15.091,18.089,-242.706,-121.028,19.715,17.88];
X1=[-56.115,-5.841,229.134,107.25,3.637,-5.841,-201.381,-133.597];
Y1=[236.16,107.724,7.274,11.664,-229.24,-107.724,19.036,18.362];
i=1;
x0 =X0(i);
y0 =Y0(i);
x1 =X1(i);
y1 =Y1(i);
% 调用函数并获取输出
resultTable = calculateSunlightVisibilityForYear(x0, y0, x1, y1, data);
%这里直接用均值代替了
Nsb=table2array(resultTable(:,12));
Nsb=Nsb./100;
Ncos=table2array(resultTable(:,2));
%计算大气透射率
dHR=0;
[Rownum,Colnum]=size(location);
for i=1:Rownum
a=table2array(location(i,1));
b=table2array(location(i,2));
```

```

dHR=dHR+sqrt(a*a+b*b+76*76);
end
dHR=dHR/Rownum;
% dHR=dHR+sqrt(x0*x0+y0*y0+76*76);
Nat=0.99321-1.176e-4*dHR+1.97e-8*dHR*dHR;
%计算截断效率
Ntrunc=table2array(resultTable(:,13));
%计算镜面反射率
Nref=0.92;
%计算光学效率
Nlight=Nsb.*Ncos.*Nat.*Ntrunc.*Nref
%%
%%
% 计算输出热功率
% 计算法向直接辐射辐照度 DNI
H=3;
a=0.4237-0.00821*(6-H)*(6-H);
b=0.5055+0.00595*(6.5-H)*(6.5-H);
c=0.2711+0.01858*(2.5-H)*(2.5-H);
G0=1.366;
temp=c./SINas;
DNI=G0*(a+b*exp(-temp));
avg_DNI=zeros(12,1);
flag=0;
res=0;
for i=1:60
if (mod(i,5)==1&&i>5)||(i==60)
flag=flag+1;
res=res/5;
avg_DNI(flag)=res;
res=DNI(i);
else
res=res+DNI(i);
end
end

%计算定日镜场输出热功率 Efiled
A=Nsb;
Efield=0;
N=1745;
Efield=avg_DNI.*A*N;
avg_Efield=Efield/(N*36);
Efield=Efield/1024

```

附录 6

介绍：求某定日镜每个月的平均阴影效率的函数

```
%%月平均阴影效率
function resultTable = calculateSunlightVisibilityForYear(x0, y0, x1, y1,
data)
% 初始化表格
resultTable = table();
% 循环处理数据
for i = 1:size(data, 1)
    SINas = table2array(data(i, 1));
    COSas = table2array(data(i, 2));
    SINys = table2array(data(i, 3));
    COSys = table2array(data(i, 4));

    % 调用函数并获取输出
    [percentage1,percentage2,Ncos] =
calculateSunlightVisibilityPercentage(SINas, COSas, SINys, COSys, x0, y0, x1, y1);

    % 将结果存储在表格中，每 5 个数据放在一行
    if mod(i, 5) == 1
        newRow = table();
    end
    newRow.('余弦损失')=Ncos;
    newRow.(['阴影效率', num2str(mod(i, 5))]) = percentage1;
    newRow.(['截断效率', num2str(mod(i, 5))]) = percentage2;

    if mod(i, 5) == 0
        resultTable = [resultTable; newRow];
    end
end
NewCol1=ones(12,1);
NewCol2=ones(12,1);
for i=1:12
    res1=table2array(resultTable(i,2))+table2array(resultTable(i,4))+table2array(resultTable(i,6))+table2array(resultTable(i,8))+table2array(resultTable(i,10));
    avg1=res1/5;
    NewCol1(i,1)=avg1;
    res2=table2array(resultTable(i,3))+table2array(resultTable(i,5))+table2array(resultTable(i,7))+table2array(resultTable(i,9))+table2array(resultTable(i,11));
```



```

avg2=res2/5;
NewCol1(i,1)=avg2;
end
resultTable = [resultTable, table(NewCol1, 'VariableNames', {'平均阴影效率'
' })];
resultTable = [resultTable, table(NewCol1, 'VariableNames', {'平均截断效率'
' })];
end

```

附录 7

介绍：计算某时刻某定日镜的阴影损失占比和平均余弦的函数

```

%%
%计算某时刻某面镜子的被遮挡比例以及平均余弦损失
function [percentage_1,percentage_2,Ncos] =
calculateSunlightVisibilityPercentage(SINas, COSas, SINys, COSys, x0, y0, x1, y1)
% 初始化随机数生成器
rng('default');

% 生成 10000 个随机数据对 (x_h, y_h)
num_samples = 10000;
x_h_range = [-3, 3];
y_h_range = [-3, 3];
x_h_values = (x_h_range(2) - x_h_range(1)) * rand(1, num_samples) +
x_h_range(1);
y_h_values = (y_h_range(2) - y_h_range(1)) * rand(1, num_samples) +
y_h_range(1);

% 初始化计数器
count1 = 0;
count2 = 0;
% 循环计算 t 值
total=0;
for i = 1:num_samples
x_h = x_h_values(i);
y_h = y_h_values(i);

[t1,t2,t3,t4,Ncos] = checkSunlightVisibility(SINas, COSas, SINys, COSys, x0,
y0, x1, y1, x_h, y_h);
total=total+Ncos;
%入射线被 B 遮阴影、出射线被 B 遮挡、入射线被塔阴影
% 根据返回值 t 进行处理
if t1 == 1&&t2==1&&t3==1
count1 = count1 + 1;

```

```

end
if t1 == 1&&t2==1&&t3==1&&t4==0
count2 = count2 + 1;
end
end
%计算平均余弦损失
Ncos=total/num_samples;
% 计算没被遮挡在所有点中的占比
percentage_1 = count1 / num_samples * 100;
% 计算截断率
percentage_2= count2/count1*100;
end

```

附录 8

介绍：判断某条光线是否被塔和其它定日镜阴影或挡光的函数

```

%%
%判断 A 镜面上 H1 点处入射线向量是否被 B 或者塔阴影，出射线向量
% 是否被遮挡，t1、t2、t3 分别表示入射和出射光线的遮挡情况，同时计算该入射线的余弦损失
function [t1,t2,t3,t4,Ncos] = checkSunlightVisibility(SINas, COSas, SINys,
COSys, x0, y0, x1, y1,x_h,y_h)
% 确定太阳入射线坐标
x_sun = SINys * COSas;
y_sun = COSys * COSas;
z_sun = SINas;
% 太阳入射线向量
V_in_A = [x_sun; y_sun; z_sun];
% 镜面出射线向量
V_out_A = [-x0;-y0;76];

% 初始点坐标
OA = [x0; y0; 4];
OB = [x1; y1; 4];

% 调用函数求坐标转换矩阵 T1 和 T2
[T1,Ncos] = calculateCoordinateTransformationMatrix(SINas, COSas, SINys,
COSys, x0, y0);
[T2,~] = calculateCoordinateTransformationMatrix(SINas, COSas, SINys, COSys,
x1, y1);

% 对入射光线做坐标变换

```

```

V_in_ground = V_in_A;
V_in_B = T2' * V_in_ground;

% 对出射光线做坐标变换
V_out_ground = V_out_A;
V_out_B = T2' * V_out_ground;

% 任取 A 镜面上一点测试
H1 = [x_h; y_h; 0];
H1l = T1 * H1 + OA;
H1ll = T2' * (H1l - OB);

% 求入射线与 B 平面交点 H2 的坐标
a1 = V_in_B(1);
b1 = V_in_B(2);
c1 = V_in_B(3);
x_H = H1ll(1);
y_H = H1ll(2);
z_H = H1ll(3);
x2 = (c1 * x_H - a1 * z_H) / c1;
y2 = (c1 * y_H - b1 * z_H) / c1;

% 判断结果
if x2 >= -3 && x2 <= 3 && y2 >= -3 && y2 <= 3
    t1 = 0;
else
    t1 = 1;
end

% 求出射线与 B 平面交点 H2 的坐标
a2 = V_out_B(1);
b2 = V_out_B(2);
c2 = V_out_B(3);
x_H = H1ll(1);
y_H = H1ll(2);
z_H = H1ll(3);
x2 = (c2 * x_H - a2 * z_H) / c2;
y2 = (c2 * y_H - b2 * z_H) / c2;
% 判断结果
if x2 >= -3 && x2 <= 3 && y2 >= -3 && y2 <= 3
    t2 = 0;
else
    t2 = 1;
end

```

```

%建立塔的截面坐标系及相对地面的坐标转换方程
tower_x=[0;0;1];
tower_z=[V_in_ground(1);V_in_ground(2);0];
tower_y=cross(tower_z,tower_x);
T3=[tower_x,tower_y,tower_z];
OC=[0;0;80];
%判断入射线是否被塔遮挡
H1 = [x_h; y_h; 0];
H1l = T1 * H1 + OA;
H1ll = T3' * (H1l - OC);
V_in_s=T3'*V_in_ground;
V_out_s=T3'*V_out_ground;
% 求入射线与塔截平面交点 H3 的坐标
a1 = V_in_s(1);
b1 = V_in_s(2);
c1 = V_in_s(3);
x_H = H1ll(1);
y_H = H1ll(2);
z_H = H1ll(3);
x2 = (c1 * x_H - a1 * z_H) / c1;
y2 = (c1 * y_H - b1 * z_H) / c1;
% 判断结果
if x2 >= -80 && x2 <= 4 && y2 >= -3.5 && y2 <= 3.5
    t3 = 0;
else
    t3 = 1;
end
% 求出射线与塔截平面交点 H3 的坐标
a3 = V_out_s(1);
b3 = V_out_s(2);
c3 = V_out_s(3);
x_H = H1ll(1);
y_H = H1ll(2);
z_H = H1ll(3);
x3 = (c3 * x_H - a3 * z_H) / c3;
y3 = (c3 * y_H - b3 * z_H) / c3;
% 判断结果
if x3 >= -4 && x3 <= 4 && y3 >= -3.5 && y3 <= 3.5
    t4 = 0;
else
    t4 = 1;
end
end

```

附录 9

介绍：计算某个镜面坐标系相对于地面坐标系的坐标转换矩阵

```
function [T,Ncos] = calculateCoordinateTransformationMatrix(SINas, COSas,
SINys, COSys, x0, y0)
% 确定太阳入射线坐标
x_sun = SINys * COSas;
y_sun = COSys * COSas;
z_sun = SINas;

% 确定镜面中心点坐标和出射线向量单位向量
V_out = [-x0; -y0; 76];
magnitude = norm(V_out); % 计算向量的模长
unit_vector = V_out / magnitude; % 单位化向量
V_out = unit_vector;

% 太阳入射线向量
V_in = [x_sun; y_sun; z_sun];

% 求镜面法向量
V_m = V_in + V_out;
magnitude = norm(V_m); % 计算向量的模长
unit_vector = V_m / magnitude; % 单位化向量
V_m = unit_vector;

%求余弦损失
Ncos=dot(V_m,V_in);

% 求镜面坐标系 x 轴方向向量
% 令 x 为 1, z 为 0
b = -V_m(1) / V_m(2);
V_x = [1; b; 0];

% 求镜面坐标系 y 轴方向向量
V_y = cross(V_m, V_x);

% 求坐标转换矩阵 T
T = [V_x, V_y, V_m];
end
```

--	--