

塔式光热电站光学效率仿真模型及定日镜场优化布置

摘要

本文从塔式太阳能光热发电站的基本子系统定日镜场的结构出发，通过分析定日镜场的光学效率组成、分布以及定日镜的布置方案，计算特定定日镜场的能量损耗和相应输出热功率，同时以单位镜面面积年平均输出热功率最高为目标，开展了定日镜场优化布置方面的研究。

针对问题 1 的表格 1，对于固定吸收塔和定日镜坐标，且定日镜尺寸大小、安装高度均相同的情况下，首先利用太阳赤纬角、当地纬度和太阳时角计算出定日镜场的太阳高度角、太阳方位角和大气透射率，再利用相关物理知识计算出余弦效率，然后通过蒙特卡罗光线追踪法 [1] 计算阴影遮挡效率，最后 **SolarPILOT** 仿真计算出集热器截断效率。根据这些计算结果可以相应计算出每月 21 日的平均光学效率和单位镜面面积平均输出热功率；

针对问题 1 的表格 2，在问题 1 表格 1 的基础上对 12 个月的各项指标分别做平均得到该定日镜场的年平均光学效率、年平均余弦效率、年平均阴影遮挡效率、年平均截断效率以及单位镜面面积年平均输出热功率，最后用单位镜面面积年平均输出热功率乘以全部定日镜的总面积得到该定日镜场年平均输出热功率；

针对问题 2，在问题 1 的基础上加入了一些约束条件，同时吸收塔和定日镜的坐标不再固定，定日镜的尺寸和安装高度也可以统一调整。首先利用软件 **SolarPILOT** 进行布局建模，使用 No Blocking-dense、Eliminate blocking、DELSOL Empirical Fit 三种建模仿真对定日镜场区域进行模拟，得到相应的输出热功率等数据，再根据可优化的参数列表对镜场布局进行优化，找到最优参数组合，并使用优化参数组合对定日镜场重新仿真模拟，得到最终的优化数据，使得整个定日镜场在达到 60 MW 额定功率的条件下，单位镜面面积年平均输出热功率尽量大；

至于问题 3，在问题 2 的基础上，定日镜的尺寸和安装高度也可以各不相同，在额定功率保持 60 MW 的情况下重新设计定日镜场的参数，同样先利用软件 **SolarPILOT** 进行布局建模，再对可变参数进行分组处理，使得定日镜场在达到 60 MW 额定功率的条件下，单位镜面面积年平均输出热功率尽量大。

关键词：光学效率；光线追踪；模拟仿真；镜场布局；优化设计；SolarPILOT

1 问题重述

为了践行我国在 2030 年达成“碳达峰”，2060 年达成“碳中和”的绿色战略目标，我国尝试构建以新能源为主体的新型电力系统，其中以塔式太阳能光热发电为代表的新型清洁能源技术得到了广泛的应用。

塔式太阳能光热发电站（以下简称塔式电站）使用定日镜作为收集太阳能的基本组件，通过改变定日镜的纵向转轴和水平转轴角度来改变镜体的方位角。大量的定日镜以特定位置排列组成定日镜场。定日镜将太阳光反射汇聚到安装在镜场中吸收塔顶端上的集热器，加热其中的导热介质，并将太阳能以热能形式储存起来，再经过热交换实现由热能向电能的转化。为了提高太阳能由热能转化为电能的效率，控制系统根据太阳位置实时控制各定日镜的法向，使得太阳中心点发出的光线经定日镜中心反射后指向集热器中心，从而更加高效地利用太阳能资源。

现在对一个圆形定日镜场做出建设规划。规划用地是以东经 98.5° ，北纬 39.4° ，海拔 3000 m，半径 350 m 为圆心的圆形区域。吸收塔高度为 80 m，集热器为高 8 m、直径 7 m 的圆柱，外表受光。为了满足发电、储能和控制设备的安装需要，同时考虑到集热器的吸收效率和定日镜离塔底的距离相关，吸收塔周围半径 100 m 范围内不安装定日镜。此外，定日镜的镜面边长在 2 m 至 8 m 之间，安装高度在 2 m 至 6 m 之间，需要保证镜面不会触及地面。由于维护及清洗车辆行驶的需要，要求相邻定日镜底座中心之间的距离比镜面宽度多 5 m 以上。

根据以上的建设规划，本文旨在解决以下几个问题：

问题 1 首先将吸收塔位置固定在圆形定日场中心，且已知所有定日镜中心的坐标，定日镜的尺寸相同且大小已给出，安装高度均为 4 m。根据已知的信息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。

问题 2 在问题 1 的基础上，不再固定吸收塔和各定日镜的位置，定日镜的尺寸和安装高度相同但可以统一调整。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，使得定日镜场在达到 60 MW 的额定年平均输出热功率的条件下，单位镜面面积年平均输出热功率尽量大。

问题 3 在问题 2 的基础上，如果每个定日镜尺寸和安装高度无需保持一致，重新设计定日镜场的各个参数，使得定日镜场在达到额定功率 60 MW 的条件下，单位镜面面积年平均输出热功率尽量大。

2 问题分析

本文的主要研究内容集中在定日镜场的优化布置，但无论何种形式的研究都必须以定日镜场的光学效率为基础。定日镜场的光学效率是镜场中每个单一定日镜相互影响共同作用的结果，而每面定日镜的总效率又受到多种因素的影响。定日镜场的光学效率由五部分组成：余弦效率 η_{\cos} 、阴影遮挡效率 η_{sb} 、大气衰减效率 η_{at} 、集热器截断效率 η_{trunc} 、镜面反射率 η_{ref} 。定日镜的光学效率可由以上五部分的乘积计算得出：

$$\eta = \eta_{\text{cos}} \eta_{\text{sb}} \eta_{\text{at}} \eta_{\text{trunc}} \eta_{\text{ref}}. \quad (1)$$

2.1 问题 1

问题 1 中, 考虑将吸收塔建于圆形定日镜场中心, 定日镜尺寸均为 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, 安装高度均为 4 m, 且附件中已给定 1745 面定日镜中心在镜场坐标系中的坐标。根据给定的参数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。

2.1.1 太阳高度角和太阳方位角

要计算定日镜场的光学效率和功率等各项指标, 首先要建立太阳位置模型。为了简化计算, 我们将整个定日镜场视为地球上的一个质点, 忽略经纬度的微小差异, 所有定日镜经纬度均相同, 由给出的圆形区域中心的经纬度计算出该质点在不同时刻的太阳方位角和太阳高度角。

如图1所示, **太阳高度角**是指太阳光线与地平线之间的夹角, 以地平线为基准, 向上测量。太阳高度角的范围通常为 0° 到 90° , 其中 0° 表示太阳光沿地平线入射, 90° 表示太阳光垂直射向地面。而**太阳方位角**是指太阳光线在地面的投影与正北方向的夹角, 以北方向为基准, 顺时针测量。太阳方位角的范围通常为 0° 到 360° , 其中 0° 表示太阳在正北方向, 90° 表示太阳在正东方向, 180° 表示太阳在正南方向, 270° 表示太阳在正西方向, 360° 又回到正北方向。

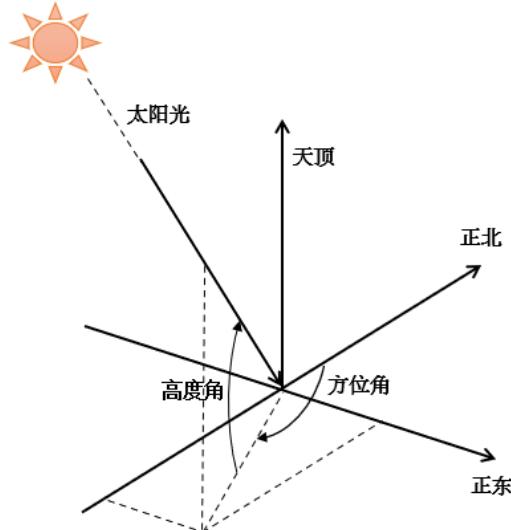


图 1: 太阳高度角与方位角

2.1.2 定日镜场的输出热功率

太阳光照射到镜面，再通过镜面反射到集热器的过程中并不能完全转化为电能，我们需要考虑定日镜的光学效率。这个概念与多项效率损失有关，包括了余弦效率、阴影遮挡效率、大气透射率、集热器截断效率、镜面反射率。我们对各分效率分别建模求解。

结合理论计算结果和 SolarPILOT 软件仿真分析，发现余弦损失是能量损耗中最主要且不可避免的部分。余弦损失是由于太阳光线不垂直入射产生的。我们首先通过太阳高度角和太阳方位角确定入射光线的单位方向向量，再由定日镜中心和集热器中心确定反射光线的单位方向向量。根据光的反射定律，太阳光在经过镜面反射后，入射角等于出射角，设为 θ 。因此入射光线的单位方向向量和反射光线的单位方向向量的内积的相反数即为 $\cos 2\theta$ 。结合二倍角公式及余弦损失的物理意义求得余弦效率 $\eta_{\cos} = \cos \theta$ 。

通过镜场坐标系和镜面坐标系之间的转换关系，利用光线追踪法 [1] 可以计算定日镜的阴影遮挡损失，进而计算出阴影遮挡效率 η_{sb} 。

由于镜面反射是一种理想的光反射现象，假设光线在与表面接触的时候完全被反射，而没有吸收或散射现象。在这种情况下，无论光线的入射角度如何，反射光线的强度都保持不变。事实上，镜面反射的平面往往存在一些微小的不规则性，这使得光线在反射时产生微小的散射，从而光强衰减。这样的不规则性使得镜面反射率成为一个与入射角度相关的函数。为了简化计算，镜面反射率 η_{ref} 可以使用一个近似的常数替代。

此外，在本文中，大气透射率 η_{at} 可以通过题目给出的公式和已知条件直接计算；集热器截断效率 η_{trunc} 可以通过 SolarPILOT 仿真得出。

计算出以上五个效率损失之后我们可以计算出定日镜的光学效率，再根据公式(2)计算出定日镜场的输出热功率即可。

$$E_{\text{field}} = \text{DNI} \cdot \sum_i^N A_i \eta_i. \quad (2)$$

2.2 问题 2 & 3

基于问题 1，当给定镜场分布及各参数时，我们已经建立模型并求解出定日镜场在不同日期、不同时刻、各项年均指标来衡量能量转化表现，这为问题 2 的优化设计提供了模型基础和一定的数据参考价值。

在问题 2 中，我们首先根据镜场吸收塔的建造标准、场地实际情况、定日镜大小及间距关系、安装高度保证镜面旋转不能碰撞地面、建造期望目标等建立本问的带约束条件的规划模型。

2.2.1 吸收塔和定日镜位置

我们的基本思路是通过在光学效率较高的区域布设更多的定向镜来确定镜场的位置分布。因此，在问题 2 中，我们十分注重研究光学效率的分布规律。为了获得整个镜场上光学效率的分布规律，借助 MATLAB 编程计算，分析典型日不同时刻的光学效率表现、讨论典型日平均光学效率随定日镜位置的变化规律、并绘制年均光学效率的分布云图将结果可视化。

在查阅大量相关文献后，基于前人的研究结果，我们考虑三种较为典型且有效的分布：No Blocking-dense、Eliminate blocking、DELSOL Empirical Fit。**SolarPILOT** 是一款用于模拟和分析太阳能热电站的性能的软件，能够通过大量参数设置较为真实地模拟设计镜场分布。我们使用该软件不仅详细分析了系统的光学效率和功率输出等性能，还能通过迭代算法为参数优化提供指引。基于仿真实验，我们验证了 EB 布局模型在 3 种布局中表现最佳。

结合光学效率历史数据的分布规律以及仿真模拟，我们首先确定吸收塔的位置仍为原点。

在 **SolarPILOT** 初始化参数，包括定日镜场的经纬度、DNI、期望达到的功率、吸收塔位置、定日镜光学效率等，从而可模拟得到计划建造的定日镜数量和定日镜中心位置。

2.2.2 定日镜参数

我们将预估的吸收塔参数和定日镜位置及数量的数据导入 MATLAB，在问题 1 的模型基础上，编写算法，通过设定合适的步长，利用**三维网格搜索**，给出满足题目约束条件时，定日镜的最佳安装高度和尺寸。算法流程如下：

- Step1. 借助问题 1 的数据初始化参数，并将从 **SolarPILOT** 中导出的吸收塔和定日镜坐标也导入 MATLAB；
- Step2. 编写 m 文件储存函数 min_area，在 Step 1 的基础上，该函数的输入参数为定日镜安装高度，镜面宽度，镜面高度，约束条件为达到期望的额定功率，输出参数为定日镜面积及定日镜的输入参数；
- Step3. 利用**三维网格搜索**，设定合适的搜索步长，对满足约束条件的网格点，调用函数 min_area 计算相应的镜面面积；
- Step4. 在达到额定功率的网格点中，找到镜面面积最小的网格点所对应的定日镜参数。

将计算出的定日镜参数回代到 **SolarPILOT** 中作为初始参数，通过其中参数优化模块中的迭代算法为各参数进一步调整提供指引。至此，我们已经完成镜场参数设计，并在问题 1 的模型基础上求出该镜场的光学性能。

3 符号说明

所使用的符号及说明如表1所示。

符号	说明
α_s	太阳高度角
γ_s	太阳方位角
φ	当地纬度
ω	太阳时角
ST	当地时间
δ	太阳赤纬角
D	以春分为第 0 天起算的天数
DNI	法向直接辐射辐照度
G_0	太阳常数
H	海拔高度
E_{field}	定日镜场的输出热功率
N	定日镜总数
A_i	第 i 面定日镜采光面积
$\text{mirror}_{\text{height}}^i$	第 i 面定日镜高度
$\text{mirror}_{\text{width}}^i$	第 i 面定日镜宽度
η_i	第 i 面镜子的光学效率
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
d_{HR}	镜面中心到集热器中心的距离

表 1: 本文使用的符号

3.1 模型假设

- (1) 我们计划在东经 98.5° , 北纬 39.4° 的位置建造一个圆形定日镜场。将整个定日镜场视为地球上的一个质点, 忽略每个定日镜由于位置不同造成的经纬度的微小差异, 所有定日镜经纬度均相同, 则可以由该经纬度计算出该质点的太阳方位角和太阳高度角。
- (2) 计划建造的圆形定日镜场位于海拔 3000 m 的高原, 而定日镜的安装高度范围在 2 m 和 6 m 之间, 相比之下远远小于海拔高度, 因此海拔高度可以近似认为在整个定日镜场范围内保持不变。
- (3) 镜面反射作为一种理想化的光反射现象, 假设光线在与表面接触的时候完全被反射而没有被吸收或散射。在这种情况下, 无论光线的入射角度如何, 反射光线的强度

都保持不变。但是考虑到现实世界中产生镜面反射的平面往往存在一些微小的不规则性使得光线在反射时产生微小的散射，从而光强衰减，这样的不规则性使得镜面反射率成为一个与入射角度相关的函数。因此，在本文的实际应用中，我们使用一个近似的常数 $\eta_{ref} = 0.92$ 来表示镜面反射率，以简化计算和模拟。

- (4) 计算得知附件中给出的 1745 个定日镜坐标之间的距离较大，我们倾向于认为各定日镜之间的阴影不会互相造成遮挡。经过 SolarPILOT 的仿真模拟，结果如图2和图3发现计算出的阴影遮挡效率为 1，即定日镜之间确实不会被影子遮挡。

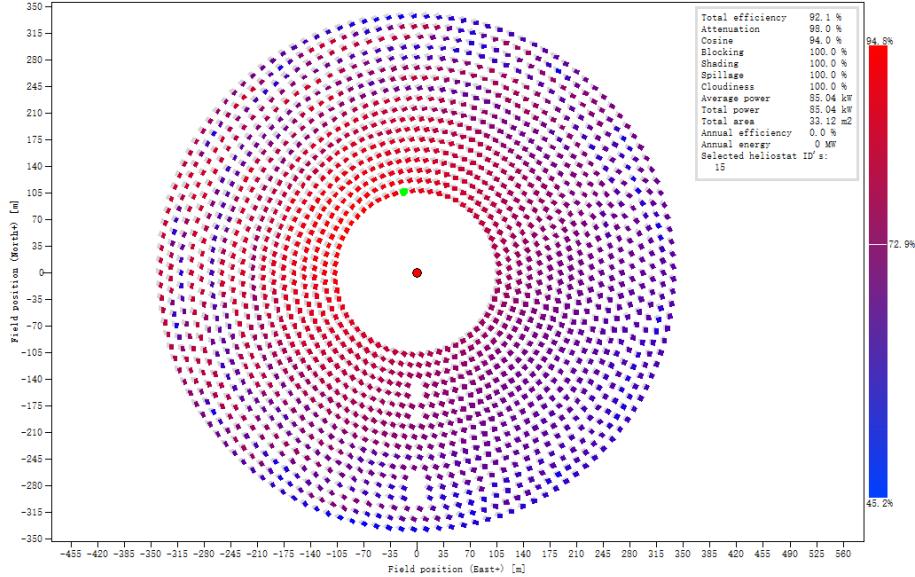


图 2: 定日镜位置模拟

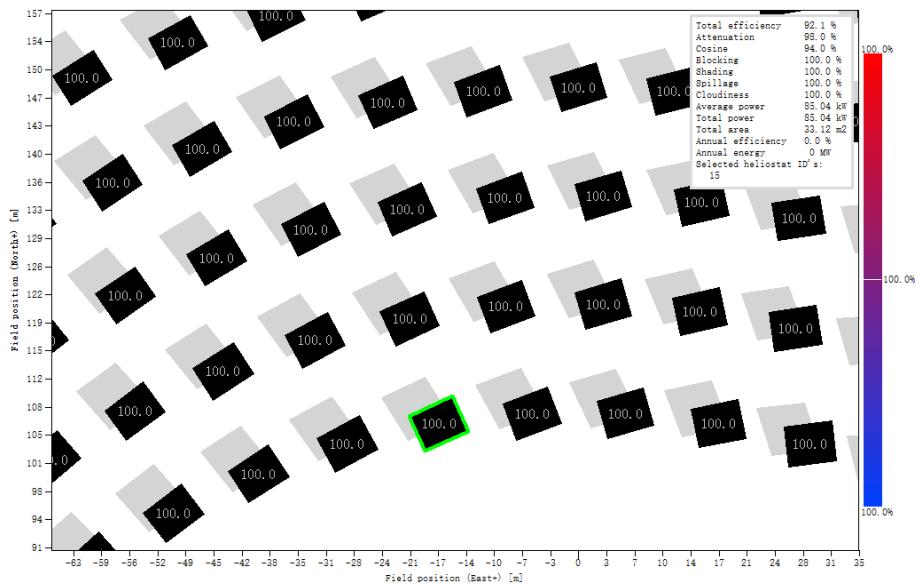


图 3: 阴影遮挡效率仿真

- (5) 假设吸收塔为上窄下宽的圆台形，顶部的集热器为最窄的部分，由太阳光形成的影子可以近似看作梯形。梯形底部较宽部分造成的阴影在距离吸收塔半径 100 m 以内，

而顶部形成的阴影较窄，对定日镜造成的遮挡效果可以忽略不计。

- (6) 在使用 **SolarPILOT** 仿真模拟时，假设仿真日期均为光照充足的晴天，即不考虑当日天气条件对定日镜场光学效率的影响。

4 模型的建立与求解

4.1 问题 1

4.1.1 太阳高度角和太阳方位角

为简化计算，本问题中所有“年均”指标的计算时点均为当地时间每月 21 日 5 个特定的时刻。因此先根据 60 个不同的时间点计算出太阳高度角和太阳方位角，以此确定太阳入射光的方向。

设 D 为以春分作为第 0 天起算的天数。例如，若春分是 3 月 21 日，则 4 月 1 日对应 $D = 11$ 。

设 $a = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31]$ ，记录每月天数，则 i 月 21 日以 1 月 1 日为第一天的对应天数为

$$\bar{D}_i = \sum_{j=1}^{i-1} a_j + 21, \quad i = 1, 2, \dots, 12. \quad (3)$$

从而以 3 月 21 日为第 0 天， i 月 21 日的对应天数为

$$D_i = \bar{D}_i - \bar{D}_3, \quad i = 1, 2, \dots, 12. \quad (4)$$

按此计算方法得出每月 21 日的天数 D 如下表：

X月21日	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
天数 D	306	334	0	30	61	91	122	153	183	214	244	275

表 2: 每月 21 日的天数

定日镜场当地时间 ST 取 5 个特定时刻：9:00、10:30、12:00、13:30、15:00，即

$$ST = [9, 10.5, 12, 13.5, 15]. \quad (5)$$

ω 为太阳时角，是指太阳位置与当地真正午线之间的角度，与当地时间 ST 有关，可由下式计算

$$\omega = \frac{\pi}{12}(ST - 12). \quad (6)$$

φ 为定日镜场当地时间纬度，以北纬为正，本文中取 39.4° 。

太阳直射地球的纬度为 δ , 称为**太阳赤纬角**, 是指地球赤道平面与太阳和地球中心的连线之间的夹角。赤纬角以年为周期, 在 $+23.45^\circ$ 与 -23.45° 的范围内变化, 与天数 D 有关, 可由如下公式计算

$$\sin \delta = \sin \frac{2\pi D}{365} \sin(\frac{2\pi}{360} 23.45). \quad (7)$$

由假设 (1) 可知对于整个定日镜场, 太阳高度角 α_s 在同一时刻相同, 根据公式 (8), 通过太阳赤纬角 δ , 当地纬度 φ 和太阳时角 ω 计算太阳高度角的正弦值, 得到表3。

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

太阳高度角正弦值	9:00	10:30	12:00	13:30	15:00
1月	-0.4217	-0.4481	-0.4574	-0.4481	-0.4217
2月	-0.2905	-0.3181	-0.3278	-0.3181	-0.2905
3月	-0.0917	-0.1199	-0.1297	-0.1199	-0.0917
4月	0.1049	0.0773	0.0676	0.0773	0.1049
5月	0.2562	0.2298	0.2205	0.2298	0.2562
6月	0.3104	0.2846	0.2756	0.2846	0.3104
7月	0.2544	0.2280	0.2188	0.2280	0.2544
8月	0.1019	0.0743	0.0646	0.0743	0.1019
9月	-0.0951	-0.1232	-0.1331	-0.1232	-0.0951
10月	-0.2934	-0.3209	-0.3306	-0.3209	-0.2934
11月	-0.4300	-0.4564	-0.4656	-0.4564	-0.4300
12月	-0.4787	-0.5045	-0.5135	-0.5045	-0.4787

表 3: 各时刻太阳高度角正弦值

同理由假设 (1) 可知对于整个定日镜场, 太阳方位角 γ_s 在同一时刻也相同, 其余弦值可通过公式 (9) 计算得出, 结果见表4。

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \delta - \sin \alpha_s \sin \varphi}{\cos \alpha_s \cos \varphi}. \quad (9)$$

4.1.2 定日镜场的输出热功率

地球上垂直于太阳光线的平面单位面积上、单位时间内接收到的太阳辐射能量, 称为**法向直接辐射辐照度** DNI (单位: kW/m^2), 可按以下公式近似计算

$$\text{DNI} = G_0 \left[a + b \exp \left(-\frac{c}{\sin \alpha_s} \right) \right], \quad (10)$$

太阳方位角余弦值	9:00	10:30	12:00	13:30	15:00
1月	-0.6793	-0.9153	-1.0000	-0.9153	-0.6793
2月	-0.6901	-0.9186	-1.0000	-0.9186	-0.6901
3月	-0.7041	-0.9227	-1.0000	-0.9227	-0.7041
4月	-0.7169	-0.9265	-1.0000	-0.9265	-0.7169
5月	-0.7271	-0.9294	-1.0000	-0.9294	-0.7271
6月	-0.7310	-0.9305	-1.0000	-0.9305	-0.7310
7月	-0.7270	-0.9294	-1.0000	-0.9294	-0.7270
8月	-0.7167	-0.9264	-1.0000	-0.9264	-0.7167
9月	-0.7039	-0.9227	-1.0000	-0.9227	-0.7039
10月	-0.6899	-0.9185	-1.0000	-0.9185	-0.6899
11月	-0.6785	-0.9150	-1.0000	-0.9150	-0.6785
12月	-0.6738	-0.9136	-1.0000	-0.9136	-0.6738

表 4: 各时刻太阳方位角余弦值

其中

$$a = 0.4237 - 0.00821(6 - H)^2, \quad (11)$$

$$b = 0.5055 + 0.00595(6.5 - H)^2, \quad (12)$$

$$c = 0.2711 + 0.01858(2.5 - H)^2. \quad (13)$$

其中 G_0 为太阳常数, 取值为 1.366 kW/m^2 , H 为海拔高度 (单位: km)。由假设 (2) 得镜面安装高度与镜场海拔高度相比可忽略不计, 因此为计算简便, 我们假设所有镜面的海拔高度 H 统一为 3 km。

由公式(2)可以计算定日镜场的输出热功率 E_{field} , 其中 N 为定日镜总数 (单位: 面), 取值为 1745; A_i 为第 i 面定日镜采光面积 (单位: m^2); η_i 为第 i 面定日镜的光学效率。

设第 i 面定日镜的镜面宽度和镜面高度分别为 $\text{mirror}_{\text{width}}^i$ 和 $\text{mirror}_{\text{height}}^i$ (单位: m), 第 i 面定日镜采光面积为

$$A_i = \text{mirror}_{\text{width}}^i \cdot \text{mirror}_{\text{height}}^i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (14)$$

定日镜的光学效率与多项效率有关, 可以通过对各分效率分别建立模型求解。以圆形区域中心为原点, 正东方向为 x 轴正向, 正北方向为 y 轴正向, 垂直于地面向上方向为 z 轴正向建立镜场坐标系 [2], 如图4所示。

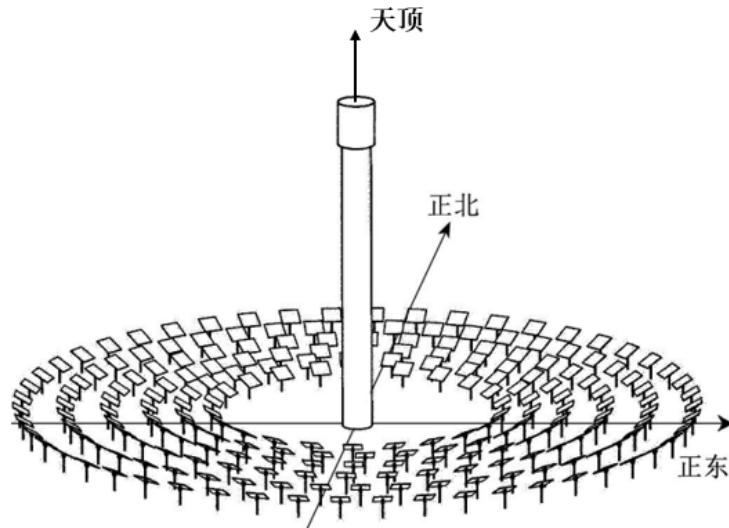


图 4: 镜场坐标系

1. 余弦效率

余弦效率的物理意义为该定日镜的有效采光面积与实际面积的比值。定日镜在工作时，需要根据太阳入射光线实时控制定日镜方向，将太阳光反射到集热器中心或采光口，进而通过一系列能量转化获取电能。此时，太阳光并非垂直入射，产生了余弦损失。

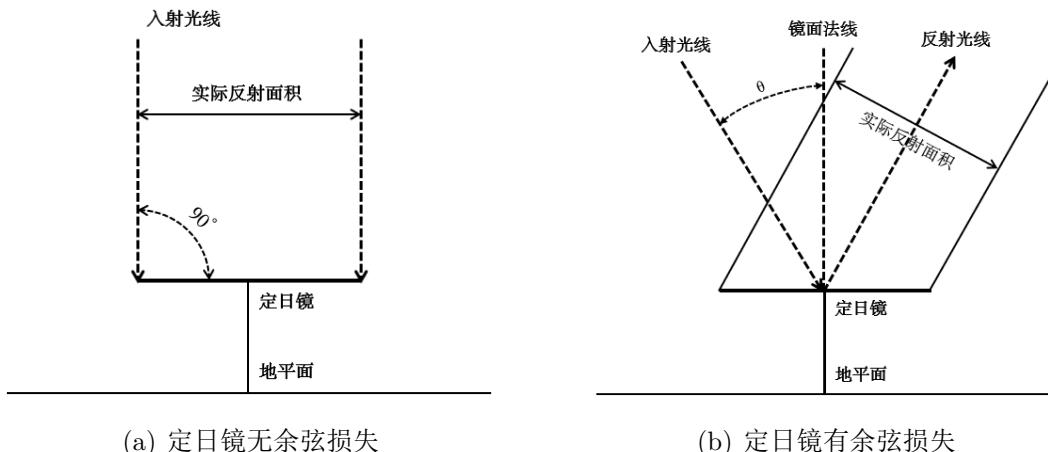


图 5: 余弦损失

由于太阳高度角和太阳方位角时时刻刻都在改变以及定日镜在镜场中的位置差异，各定日镜的余弦效率差异较大。我们由对附件中的镜场数据进行分析并使用 **SolarPILLOT** 进行仿真计算，发现余弦损失能量损失中最为严重且不可避免的一种，这使得镜场效率分布不均。如图6所示，颜色的变化表示定日镜的余弦效率变化，图中可以明显看出不同位置的余弦效率差异较大，其中红色表示效率高、蓝色表示效率低。因此，通过设计更加合理的镜场来提高定日镜场的余弦效率是镜场优化布置过程中主要解决的问题。

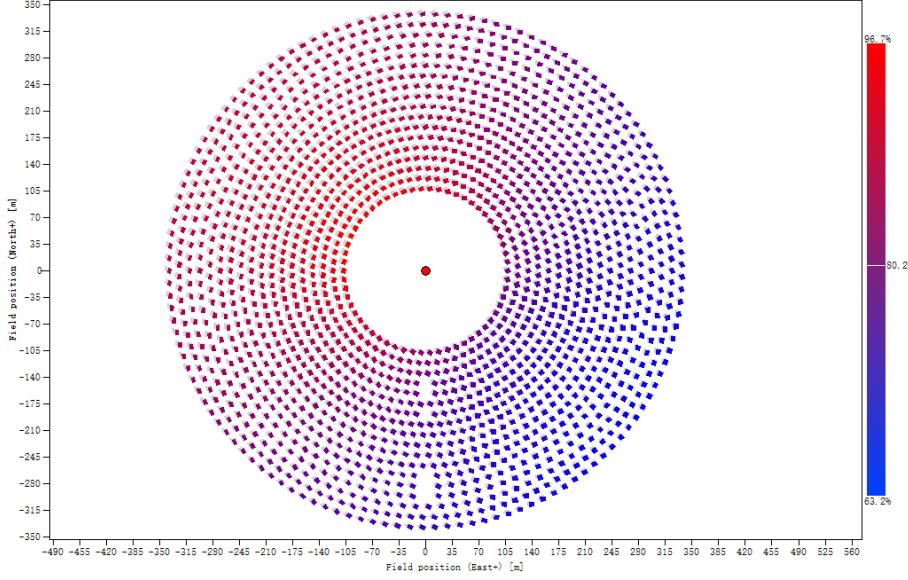


图 6: 定日镜余弦效率

根据太阳高度角 α_s 和太阳方位角 γ_s 可以计算出太阳入射光线的单位方向向量

$$I = (-\cos \alpha_s \sin \gamma_s, -\cos \alpha_s \cos \gamma_s, -\sin \alpha_s). \quad (15)$$

太阳中心点发出的光线经定日镜中心 (x_i, y_i, h_1) 反射后指向集热器中心 $(0, 0, h_2)$, 所以反射光线的单位方向向量为

$$R = \left(\frac{-x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (h_1 - h_2)^2}}, \frac{-y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (h_1 - h_2)^2}}, \frac{h_2 - h_1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (h_1 - h_2)^2}} \right). \quad (16)$$

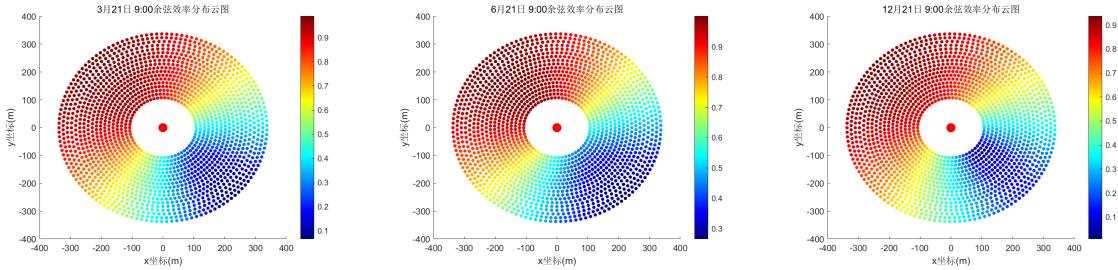
由光的反射定律知, 入射角等于出射角, 设为 θ , 则

$$\cos 2\theta = -I \cdot R, \quad (17)$$

再利用二倍角公式 $\cos 2\theta = 2\cos^2 \theta - 1$ 即得余弦效率为

$$\eta_{\cos} = \cos \theta = \sqrt{\frac{1 - I \cdot R}{2}}. \quad (18)$$

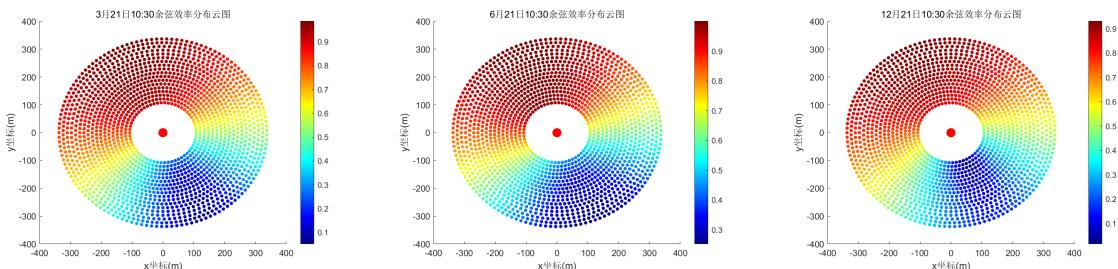
从 3 月 21 日、6 月 21 日、12 月 21 日的日均余弦效率分布云图来看, 余弦效率在镜场中分布不匀, 且镜场中红色区域面积和蓝色区域面积的比例会随时间改变。总的来说, 镜场北半部分比南半部分的平均余弦效率高。这与实际情况相符, 由于镜场位于北半球, 太阳光照到北半部分的定向镜时入射角更小, 余弦效率更高。另一方面, 对比三个日期内余弦效率的变化情况可以发现, 一天内余弦效率在镜场中的分布的变化规律是大致相同的 [3]。



(a) 3月21日 9:00

(b) 6月21日 9:00

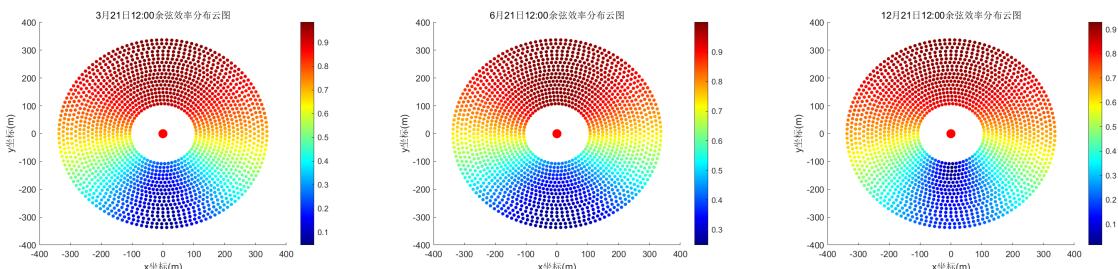
(c) 12月21日 9:00



(d) 3月21日 10:30

(e) 6月21日 10:30

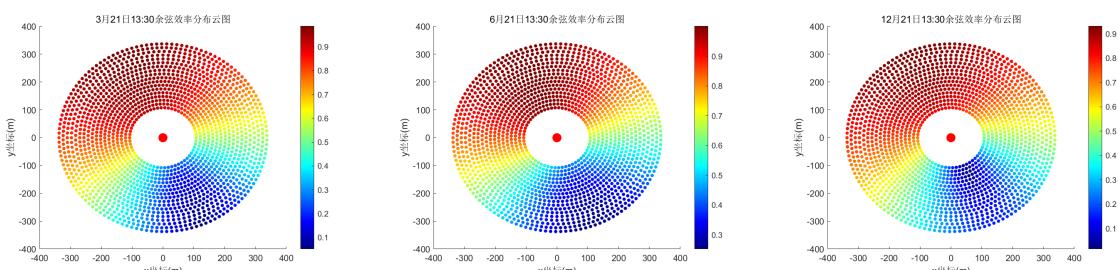
(f) 12月21日 10:30



(g) 3月21日 12:00

(h) 6月21日 12:00

(i) 12月21日 12:00



(j) 3月21日 13:30

(k) 6月21日 13:30

(l) 12月21日 13:30

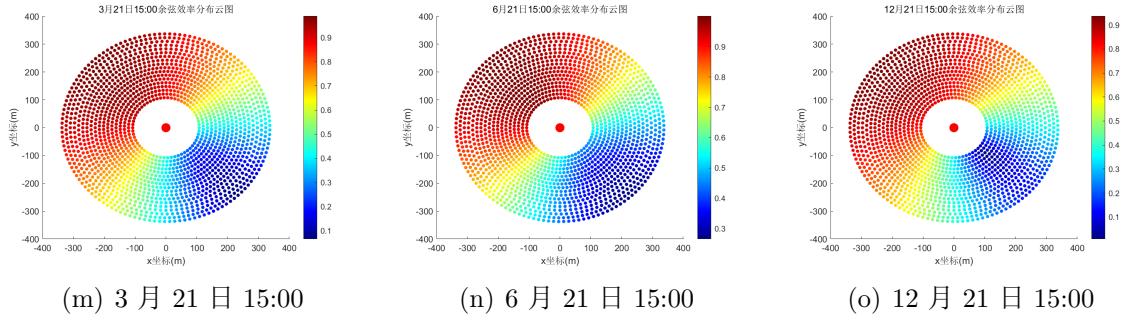


图 7: 部分日期各时间点镜场的余弦效率的分布规律

2. 阴影遮挡效率

在镜场中当定日镜的阴影落入另一个定日镜的镜面、后排定日镜的反射光线照射到前排另一台定日镜的背面或者入射光被吸收塔阻断，这就造成了镜场接收到的太阳光线有所损失，从而产生的阴影遮挡损失。

阴影遮挡效率为

$$\eta_{\text{sb}} = 1 - \text{阴影遮挡损失.} \quad (19)$$

由(15)和(16)知, 镜面的法向为

$$n = \frac{-I + R}{|-I + R|}. \quad (20)$$

定义定日镜所在地的地平面与定日镜之间的夹角为定日镜高度角，记为 α_m ，定日镜法线在地平面上的投影与正北方向所成角为定日镜方位角，记为 γ_m 。定日镜高度角 α_m 与定日镜镜面法线和定日镜所在地的天顶方向之间的夹角大小相等。

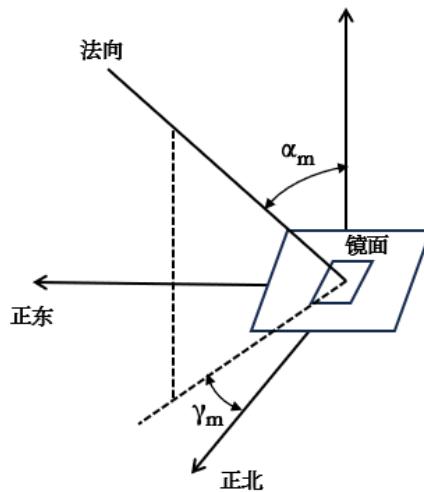


图 8: 太阳高度角与方位角

在定日镜上，可以以定日镜面中心为原点，水平转轴的轴线为 x 轴，平行于定日镜的高的方向为 y 轴，定日镜垂直镜面指向天空的方向为 z 轴正向，建立镜面坐标系 (X_m, Y_m, Z_m) ，建立的坐标系满足右手螺旋法则。设 T 为镜面坐标系 (X_m, Y_m, Z_m) 到镜场坐标系 (X, Y, Z) 的转换关系单位矩阵，则 T 以镜面坐标系 x 轴、 y 轴、 z 轴正方向的单位向量在镜场坐标系下的坐标作为列向量，即

$$T = \begin{pmatrix} -\cos \gamma_m & \sin \gamma_m & 0 \\ -\cos \alpha_m \sin \gamma_m & -\cos \alpha_m \cos \gamma_m & \sin \alpha_m \\ \sin \alpha_m \sin \gamma_m & \sin \alpha_m \cos \gamma_m & \cos \alpha_m \end{pmatrix}. \quad (21)$$

清楚镜面坐标系和镜场坐标系的定义和转换关系之后，我们可以通过光线追踪法计算定日镜的阴影遮挡损失。如图9所示，考虑定日镜 A 对定日镜 B 的遮挡，由于 A 和 B 距离很近，所以可以将它们的镜面视作平行，即在 A 和 B 上分别建立的镜面坐标系到镜场坐标系的转换矩阵 T 相同。

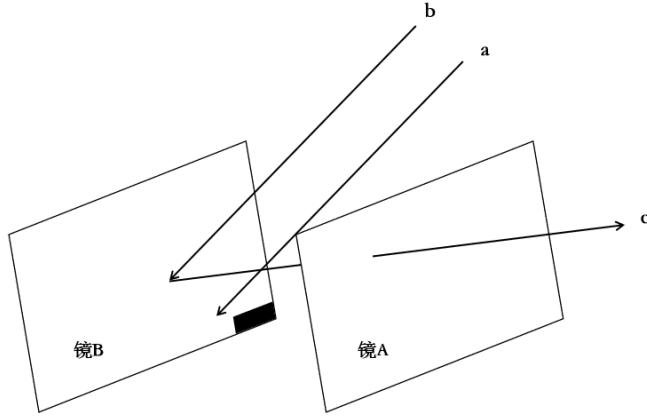


图 9: 阴影遮挡示意图

计算阴影挡光损失的过程，实际上就是计算 A 镜的任意一点顺着入射光线或反射光线的相反方向是否会落入 B 镜区域内，并求出其在 B 镜的镜面坐标值。如图9所示，展示了阴影遮挡的两种情况，其中 a, b 为入射光， c 为反射光。 a 为入射光被遮挡的临界光线，而 b, c 展示光路沿 b 射入镜 B 后沿 c 射出时被镜 A 遮挡。

在 A 镜的镜面坐标系下， A 镜面上一点坐标为 $M_1(x_1, y_1, 0)$ ，通过转换矩阵 T 可以计算 M_1 在镜场坐标系下的坐标 $M'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ 为

$$M'_1 = TM_1 + O_A, \quad (22)$$

$$= \begin{pmatrix} -\cos \gamma_m & \sin \gamma_m & 0 \\ -\cos \alpha_m \sin \gamma_m & -\cos \alpha_m \cos \gamma_m & \sin \alpha_m \\ \sin \alpha_m \sin \gamma_m & \sin \alpha_m \cos \gamma_m & \cos \alpha_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ h_1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$= \begin{pmatrix} -\cos \gamma_m x_1 + \sin \gamma_m y_1 + x_A \\ -\cos \alpha_m \sin \gamma_m x_1 - \cos \alpha_m \cos \gamma_m y_1 + y_A \\ \sin \alpha_m \sin \gamma_m x_1 + \sin \alpha_m \cos \gamma_m y_1 + h_1 \end{pmatrix}. \quad (24)$$

其中 $O_A = (x_A, y_A, h_1)$ 为 A 镜镜面坐标系原点（即 A 镜镜面几何中心）在镜场坐标系下的坐标。

接下来计算 $M'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ 在 B 镜镜面坐标系下的坐标 $M''_1(x''_1, y''_1, z''_1)$,

$$M''_1 = T^{-1}(M'_1 - O_B), \quad (25)$$

$$= \begin{pmatrix} -\cos \gamma_m & \sin \gamma_m & 0 \\ -\cos \alpha_m \sin \gamma_m & -\cos \alpha_m \cos \gamma_m & \sin \alpha_m \\ \sin \alpha_m \sin \gamma_m & \sin \alpha_m \cos \gamma_m & \cos \alpha_m \end{pmatrix}^{-1} \times \quad (26)$$

$$\begin{pmatrix} -\cos \gamma_m x_1 + \sin \gamma_m y_1 + x_A - x_B \\ -\cos \alpha_m \sin \gamma_m x_1 - \cos \alpha_m \cos \gamma_m y_1 + y_A - y_B \\ \sin \alpha_m \sin \gamma_m x_1 + \sin \alpha_m \cos \gamma_m y_1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$= \begin{pmatrix} -\cos \gamma_m & -\cos \alpha_m \sin \gamma_m & \sin \alpha_m \sin \gamma_m \\ \sin \gamma_m & -\cos \alpha_m \cos \gamma_m & \cos \gamma_m \sin \alpha_m \\ 0 & \sin \alpha_m & \cos \alpha_m \end{pmatrix} \times \quad (28)$$

$$\begin{pmatrix} -\cos \gamma_m x_1 + \sin \gamma_m y_1 + x_A - x_B \\ -\cos \alpha_m \sin \gamma_m x_1 - \cos \alpha_m \cos \gamma_m y_1 + y_A - y_B \\ \sin \alpha_m \sin \gamma_m x_1 + \sin \alpha_m \cos \gamma_m y_1 \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$= \begin{pmatrix} -\cos \gamma_m(x_A - x_B) - \cos \alpha_m \sin \gamma_m(y_A - y_B) + x_1 \\ \sin \gamma_m(x_A - x_B) - \cos \alpha_m \cos \gamma_m(y_A - y_B) + y_1 \\ \sin \alpha_m(y_A - y_B) \end{pmatrix} \quad (30)$$

入射光线和反射光线的方向向量 I 和 R 在 B 镜镜面坐标系下的表示为

$$I' = T^{-1}I, \quad (31)$$

$$R' = T^{-1}R. \quad (32)$$

通过计算入射光线 I 和反射光线 R 和 B 镜平面的交点 $M_2(x_2, y_2, 0)$, 再和 B 镜边界进行比较, 从而判断 M_2 是否落入 B 镜镜面范围内。

将光线在地面坐标系下的向量 V_0 转换到 B 镜坐标系下, 表示为 V_H :

$$V_H = T^{-1} \cdot V_0 = (a, b, c). \quad (33)$$

在 B 镜坐标系下, 以光线向量 $V_H = (a, b, c)$ 为方向, 经过点 $M''_1 = (x''_1, y''_1, z''_1)$ 的直线方程为

$$\frac{x_2 - x''_1}{a} = \frac{y_2 - y''_1}{b} = \frac{z_2 - z''_1}{c}. \quad (34)$$

上述直线与 B 镜镜面的交点的坐标为

$$\begin{cases} x_2 = \frac{cx''_1 - az''_1}{c}, \\ y_2 = \frac{cy''_1 - bz''_1}{c}, \\ z_2 = 0. \end{cases} \quad (35)$$

随机取 A 镜上的点进行以上算法, 将得到的 M_2 坐标与 B 镜边界进行比较, 计算落入 B 镜范围内的点的比例, 即可得到阴影遮挡面积所占比例。

3. 大气透射率

太阳光线在空气中传播时, 空气中的粉尘、颗粒等不可避免地使光线衰减。定日镜场中, 各个定日镜与吸收塔之间光线的传播距离不同, 其损失也略有不同。各个定日镜的大气透射率可由下式计算

$$\eta_{\text{at}} = 0.99321 - 0.0001176d_{\text{HR}} + 1.97 \times 10^{-8} \times d_{\text{HR}}^2 \quad (d_{\text{HR}} \leq 1000). \quad (36)$$

其中 d_{HR} 表示镜面中心到集热器中心的距离 (单位: m)。设第 i 个定日镜镜面中心在镜场坐标系中的坐标为 (x_i, y_i, h_{1i}) , 其中 h_{1i} 为第 i 个定日镜的安装高度, 问题 1 中统一设定为 4 m。吸收塔高度 $h_2 = 80$ m。

$$d_{\text{HR}}^i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + (h_{1i} - h_2)^2}. \quad (37)$$

如图10所示, 对于圆形镜场来说, 镜场中同一环上的定日镜的大气透射率是相等的。从整体来看, 越靠近吸热塔的定日镜的大气透射率越高, 越远离吸热塔的定日镜的大气透射率越低。随着定日镜行数的增加, 镜场中离吸热塔最远的定日镜的大气透射率逐渐降低。

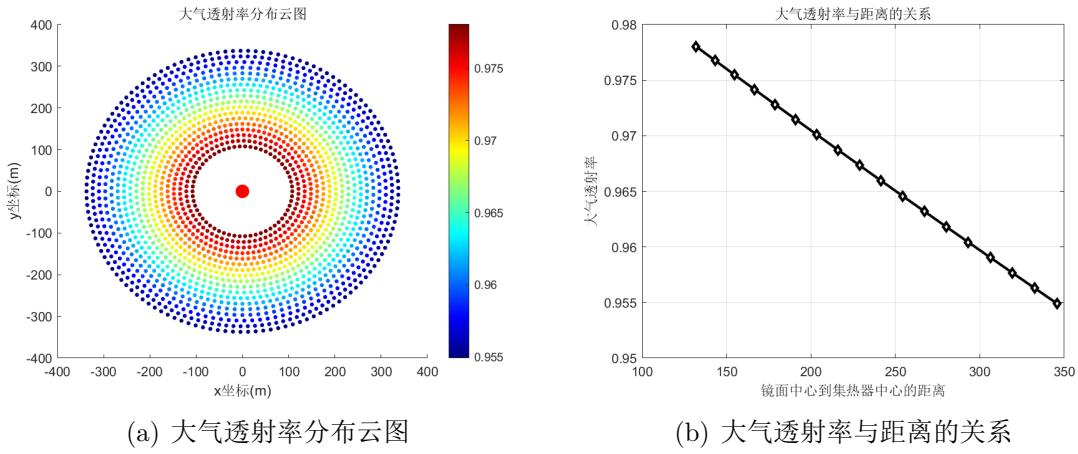


图 10: 大气透射率

4. 集热器截断效率

太阳光本质并非平行光线，只是考虑到太阳和地球之间的距离过远因而常把太阳光看作平行光；实际上太阳光是具有一定锥形角的一束锥形光线，因此太阳入射光线经定日镜任意一点的反射光线也是一束锥形光线。镜场反射的光斑落入吸热器接受面上时，由于光斑的特征以及定日镜的精度或晃动可能造成光斑的偏移或溢出，导致有部分光照射在吸热器之外，这部分溢出光斑就形成了截断损失。根据题目信息，集热器截断效率可表示为

$$\eta_{\text{trunc}} = \frac{\text{集热器接收能量}}{\text{镜面全反射能量} - \text{阴影遮挡损失能量}}, \quad (38)$$

由于在模型假设中已经说明阴影遮挡效率为 1，即阴影遮挡损失能量在本文中可忽略不计，因此集热器截断效率可以简化为

$$\eta_{\text{trunc}} = \frac{\text{集热器接收能量}}{\text{镜面全反射能量}}. \quad (39)$$

由图11可以看出,对于集热器截断效率最高的定日镜, $\eta_{\text{trunc}} = 96.7\%$, 对于集热器截断效率最低的定日镜, $\eta_{\text{trunc}} = 86.2\%$, 平均截断效率为 $\eta_{\text{trunc}} = 92.5\%$, 因此本文在计算过程中取

$$\eta_{\text{trunc}} = 92.5\%. \quad (40)$$

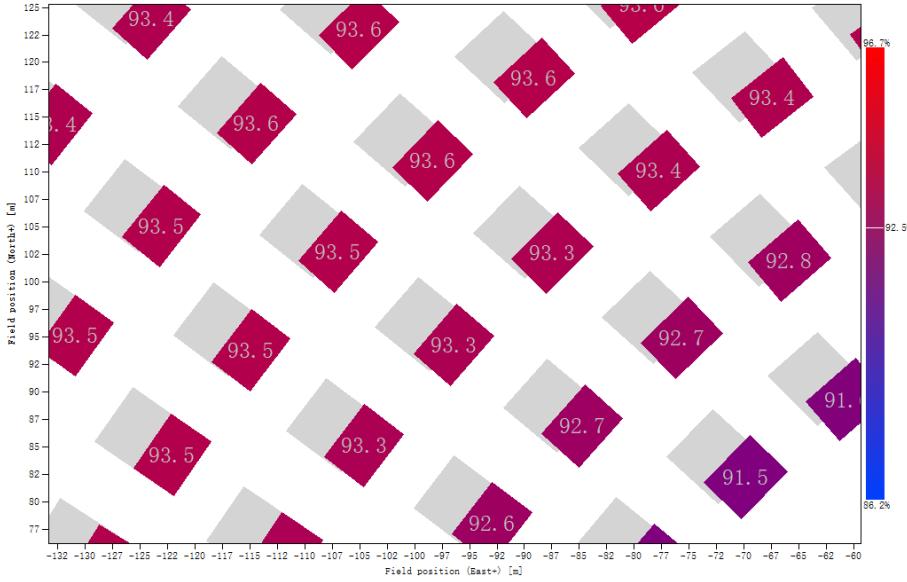


图 11: 集热器截断效率

5. 镜面反射率

我们查阅资料发现镜面反射率可以使用常数替代，因此在本文我们使用一个近似的常数

$$\eta_{\text{ref}} = 0.92 \quad (41)$$

来表示镜面反射率，以简化计算和模拟。

根据以上建模，定日镜的光学效率 η 可由各分效率的乘积表示，即

$$\eta = \eta_{\cos} \eta_{\text{sb}} \eta_{\text{at}} \eta_{\text{trunc}} \eta_{\text{ref}}. \quad (42)$$

至此，我们建立了在给定镜场布局时的太阳位置模型和镜场光学效率模型。利用 **MATLAB** 编程，初始化镜场参数，代入本小节公式，可以求得该定日镜场的年平均光学效率、年平均输出热功率，以及单位镜面的面积年平均输出热功率，结果如下表所示。

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)
0.621347	0.756339	1.00	0.925	37.873695	0.602892

表 5: 问题 1 年平均光学效率及输出功率表

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	0.591421	0.719936	1.00	0.925	0.513880
2月21日	0.606441	0.738205	1.00	0.925	0.567052
3月21日	0.625295	0.761140	1.00	0.925	0.621544
4月21日	0.639872	0.778873	1.00	0.925	0.657680
5月21日	0.648457	0.789317	1.00	0.925	0.677269
6月21日	0.650958	0.792360	1.00	0.925	0.682791
7月21日	0.648370	0.789212	1.00	0.925	0.677077
8月21日	0.639678	0.778637	1.00	0.925	0.657224
9月21日	0.625009	0.760792	1.00	0.925	0.620791
10月21日	0.606137	0.737835	1.00	0.925	0.566076
11月21日	0.590386	0.718676	1.00	0.925	0.509775
12月21日	0.584143	0.711082	1.00	0.925	0.483550

表 6: 问题 1 每月 21 日平均光学效率及输出功率

4.2 问题 2

问题 2 在问题 1 的基础之上加入了一些约束条件, 需要在这些约束下设计定日镜场, 使其在达到 60 MW 的额定年平均输出热功率 (以下简称额定功率) 的条件下, 单位镜面面积年平均输出热功率尽量大。

- 假定所有定日镜尺寸及安装高度相同, 且镜面宽度不小于镜面高度, 即

$$\text{mirror}_{\text{width}} > \text{mirror}_{\text{height}}, \quad (43)$$

- 镜面边长取值在 2 m 至 8 m 之间,

$$2 \leq \text{mirror}_{\text{height}} \leq 8, \quad 2 \leq \text{mirror}_{\text{width}} \leq 8. \quad (44)$$

- 定日镜安装高度在 2 m 至 6 m 之间,

$$2 \leq h_1 \leq 6. \quad (45)$$

- 同时, 定日镜旋转时不能碰撞到地面, 因此安装高度必须大于镜面高度的一半,

$$h_1 > \frac{1}{2} \text{mirror}_{\text{height}}. \quad (46)$$

- 进一步, 必须保证相邻定日镜在旋转时不能相互碰撞, 如图12所示, 在定日镜的大

小规格相同的情况下，两个相邻定日镜中心的最小间距不能小于定日镜的对角线长度。

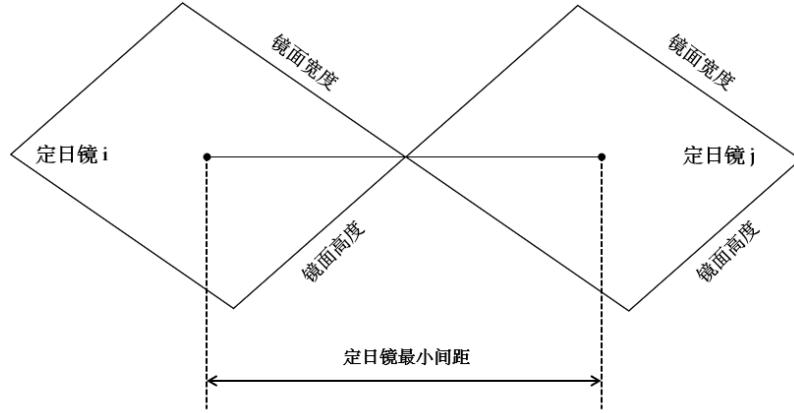


图 12: 定日镜最小距离

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} - \sqrt{\text{mirror}_{\text{width}}^2 + \text{mirror}_{\text{height}}^2} > 0, \quad \forall i \neq j. \quad (47)$$

- 考虑到日常维护及清洗车辆通行的需要，我们假设相邻定日镜底座中心之间的距离比镜面宽度多 5 m，

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} - \text{mirror}_{\text{width}} > 5, \quad \forall i \neq j. \quad (48)$$

- 此外，为了满足发电、储能和控制设备的安装需要，同时考虑到集热器的吸收效率和定日镜离塔底的距离有关，吸收塔周围 100 m 范围内不安装定日镜，即定日镜中心和镜场坐标系原点的距离大于 100 m，且小于定日镜场半径 350 m。

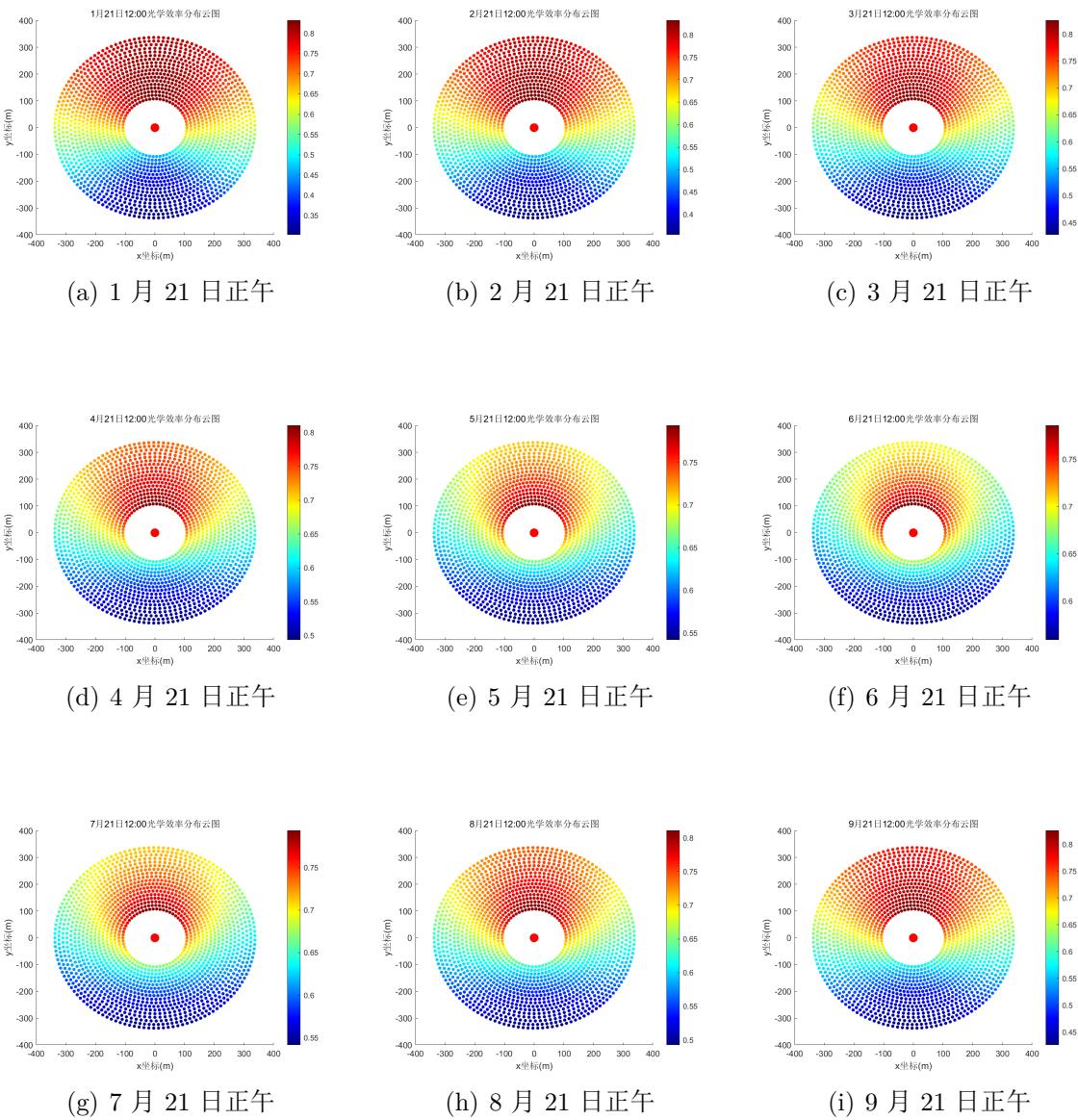
$$100 \leq \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \leq 350 \quad (49)$$

- 在上述约束下，要求额定功率达到 60MW，并使得单位镜面面积年平均输出热功率尽量大。

综上，本问题的数学模型为

$$\max \frac{E_{\text{field}}}{\sum_{i=1}^N A_i}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{field}} \geq 60, \\ \text{mirror}_{\text{width}} > \text{mirror}_{\text{height}}, \\ 2 \leq \text{mirror}_{\text{height}} \leq 8, \\ 2 \leq \text{mirror}_{\text{width}} \leq 8, \\ 2 \leq h_1 \leq 6, \\ h_1 > \frac{1}{2} \text{mirror}_{\text{height}}, \\ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} - \sqrt{\text{mirror}_{\text{width}}^2 - \text{mirror}_{\text{height}}^2} > 0, \\ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} - \text{mirror}_{\text{width}} > 5, \\ 100 \leq \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \leq 350. \end{array} \right. \quad (50)$$



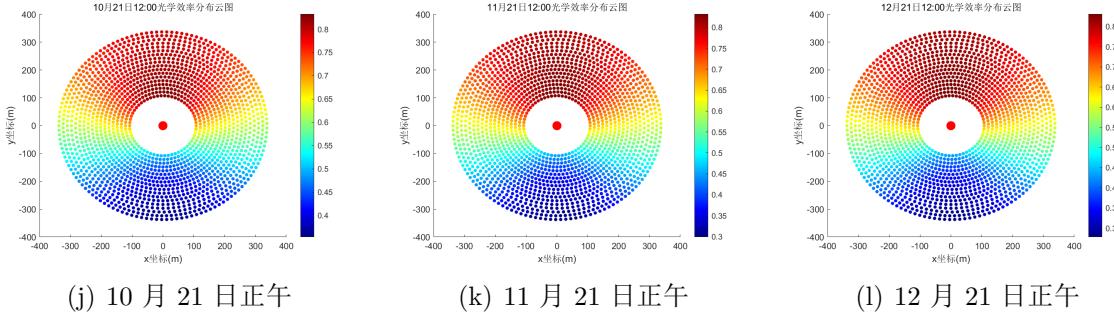


图 13: 不同日期正午的光学效率分布云图

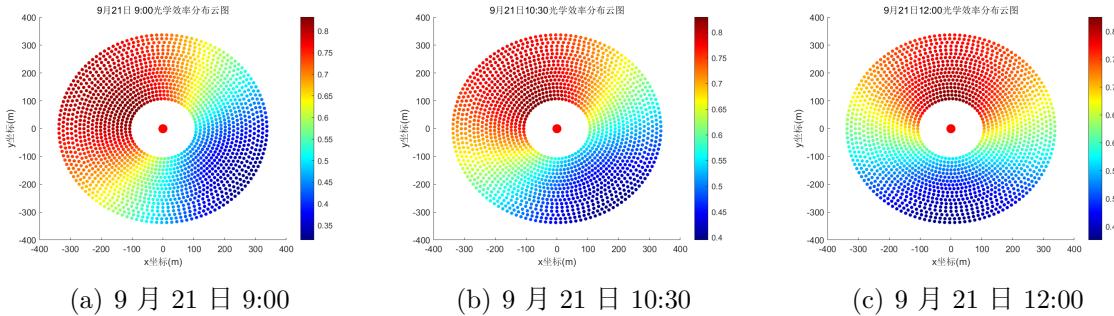


图 14: 9月21日不同时刻的光学效率分布云图

观察 12 个日期正午的光学效率分布云图，相同方位的定日镜光学效率值随镜面反射距离的增加而逐渐降低。南方区域的光学效率相对较低，北方区域较高。

对比某一代表日（9月21日）的不同时刻的光学效率分布云图，虽然每天的光学效率分布云图随时间不尽相同，但总体上看，镜场南方区域的光学效率相对较低。在上午，东南方区域光学效率较低，下午西南方区域光学效率较低。

因此，设计镜场布局的轮廓时，我们优先把更多的定日镜布置在镜场北方区域。镜场东南、西南方区域也应相应地减少布置定日镜的数量。余弦效率分布不均匀是导致镜场光学效率分布不均匀的主要原因 [3]。

我们基于 SolarPILOT 软件进行仿真模拟。首先在给定的圆形区域，分别选择 No Blocking-dense、Eliminate blocking、DELSOL Empirical Fit 三种布局方式进行布局设计，得到三种方式的镜场初始布局，接着针对定日镜的尺寸进行布局优化，得到三种优

化后的镜场布局。最终再对单位镜面面积年平均输出热功率进行计算和比较，即可得到相对更优的布局方式。

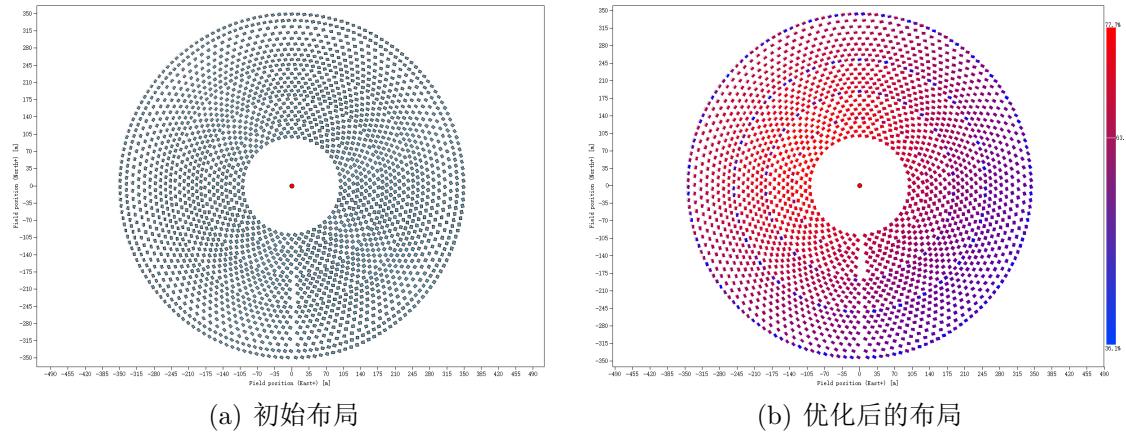


图 15: DELSOL3 布局方式

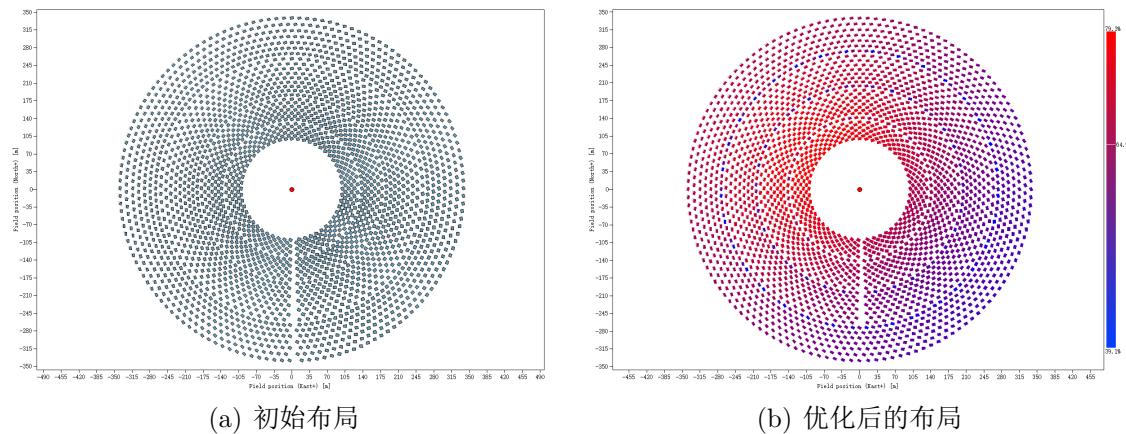


图 16: Eliminate blocking 布局方式

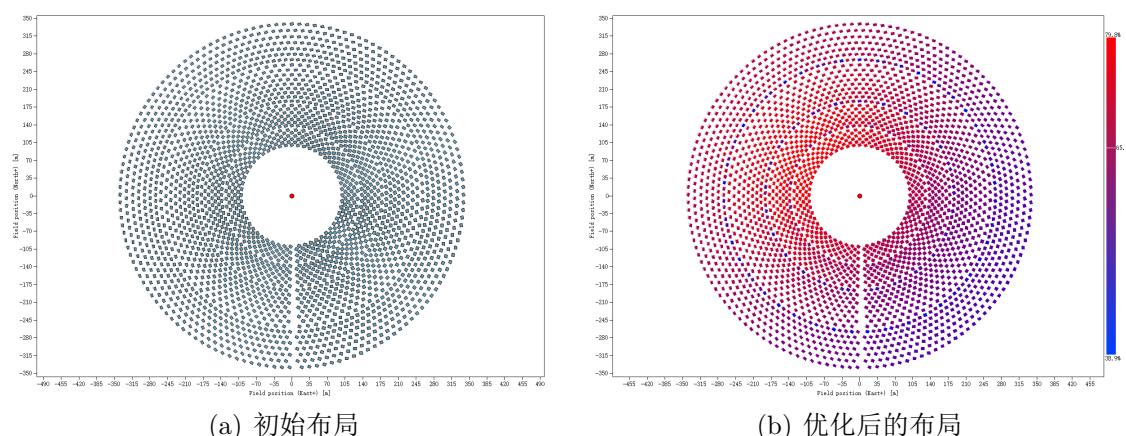


图 17: No Blocking-dense 布局方式

经过计算，得到在满足题目约束条件下，用 EB 方式进行布局更优，相关的数据和参数如下表所示。

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	0.659	0.807	1.00	0.932	0.572597943
2月21日	0.669069634	0.7759	1.00	0.9374	0.6256123
3月21日	0.660315015	0.7644	1.00	0.936	0.656353924
4月21日	0.668651344	0.7738	1.00	0.9361	0.687260639
5月21日	0.670429457	0.7783	1.00	0.9359	0.700217957
6月21日	0.679997228	0.7856	1.00	0.9386	0.713249399
7月21日	0.665347229	0.7656	1.00	0.9437	0.694805397
8月21日	0.681019262	0.7819	1.00	0.9416	0.699699606
9月21日	0.669345192	0.7691	1.00	0.9429	0.664827881
10月21日	0.66968353	0.7757	1.00	0.9384	0.625423066
11月21日	0.664632817	0.7695	1.00	0.9374	0.57388403
12月21日	0.676627919	0.7785	1.00	0.9439	0.560108702

表 7: 问题 2 每月 21 日平均光学效率及输出功率

年平均光学效率	年平均余弦效率	年平均阴影遮挡效率	年平均截断效率	年平均输出热功率 (MW)	单位面积镜面年平均输出热功率 (kW/m ²)
0.670239	0.774242	1.00	0.939116667	61.513394	0.647837

表 8: 问题 2 年平均光学效率及输出功率表

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)	6.5*5.5	3	2656	95416.75

表 9: 问题 2 设计参数表

4.3 问题 3

在问题 2 的基础上，本小问中额定功率仍然取 60 MW，但是每个定日镜尺寸和安装高度可以不同，因此需要重新设计定日镜场的各个参数，使得在达到额定功率并满足

其他约束条件时，单位镜面面积年平均输出热功率尽量大。最终的设计方案包括吸收塔的位置坐标、各定日镜尺寸、安装高度及位置坐标。

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	0.662649	0.7923	1.00	0.9326	0.575768519
2月21日	0.667684334	0.7759	1.00	0.9278	0.624316977
3月21日	0.670450154	0.7644	1.00	0.9534	0.666428264
4月21日	0.664523558	0.7819	1.00	0.9288	0.683017973
5月21日	0.691644568	0.7554	1.00	0.9361	0.722375698
6月21日	0.695512284	0.7529	1.00	0.9391	0.729523147
7月21日	0.674192945	0.7547	1.00	0.9263	0.704042756
8月21日	0.6719462	0.7537	1.00	0.928	0.69037767
9月21日	0.6342397	0.7644	1.00	0.9312	0.629959311
10月21日	0.69237453	0.7724	1.00	0.9279	0.646614382
11月21日	0.6751702	0.7835	1.00	0.9374	0.582982641
12月21日	0.66091892	0.7785	1.00	0.9439	0.547104883

表 10: 问题 3 每月 21 日平均光学效率及输出功率

年平均光学效率	年平均余弦效率	年平均阴影遮挡效率	年平均截断效率	年平均输出热功率 (MW)	单位面积镜面年平均输出热功率 (kW/m ²)
0.6717755	0.769168	1.00	0.934375	62.040863	0.6502094

表 11: 问题 3 年平均光学效率及输出功率表

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)	6.5*5.5	3	2656	95416.75

表 12: 问题 3 设计参数表

5 结果与讨论

本文中完成了太阳位置模型、光学效率模型建立及相关计算，得到了光学效率的变化规律，运用 MATLAB 和 SolarPILOT 软件进行仿真模拟，优化了镜场的设计布局。

- (1) 问题 1 中, 圆形定日镜场的分布及参数已给定, 我们根据建立的太阳位置模型, 得出了在每月 21 日太阳光入射的具体角度, 从而建立了余弦效率的数学模型。此外, 通过详细分析影响光学效率各分效率的因素, 在符合实际应用的基础上建立光学效率的数学物理模型进行求解。
- (2) 运用 MATLAB 编写了分析光学效率的程序, 对不同时刻的光学效率进行了计算和分析, 我们发现余弦损失是造成定日镜场能量损失的最重要的原因。对问题 1 的分析求解过程得到了符合实际情况的结果, 为后续设计镜场分布, 进一步优化提供了理论基础和优化指引。这为后续的镜场布局优化提供了一定的依据

6 总结与展望

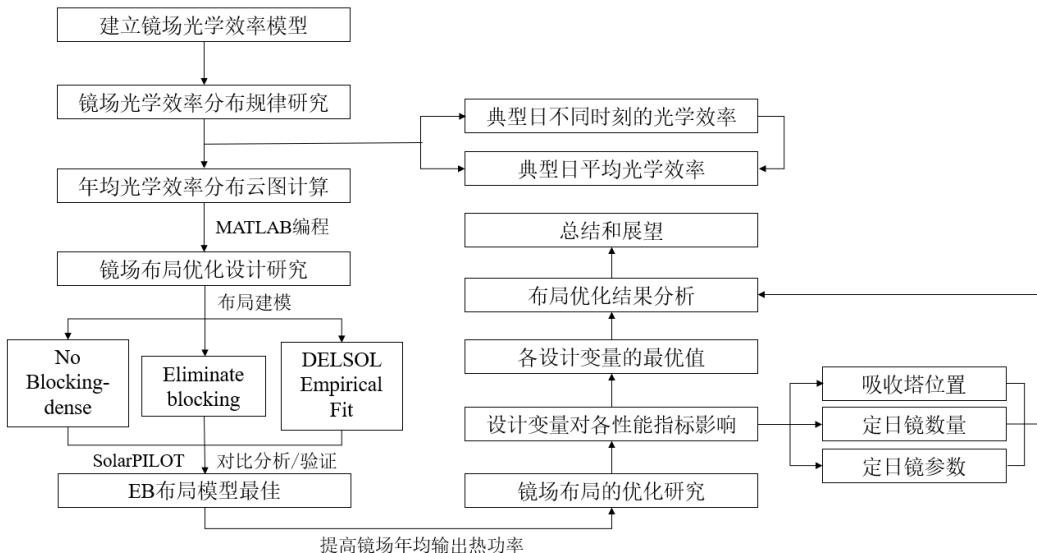


图 18: 流程图

如图18所示, 本文严格按照流程图中的步骤进行探索与研究, 建立定日镜场的光学效率模型, 通过 MATLAB 研究光学效率的分布, 以云图的形式进行可视化呈现。然后使用 SolarPILOT 进行定日镜场的布局建模, 选择效果最佳的 EB 模型进行仿真模拟, 并且对各个可变参数进行分组调节, 起到优化的效果。

6.1 模型优点

- 在建模之前查阅资料, 了解到常见的仿真模型 No Blocking-dense、Eliminate blocking、DELSOL Empirical Fit, 并且学习使用相关的仿真软件进行模拟仿真, 比较三种模型在实际情况中的应用效果, 进而选择出最优模型进行计算拟合, 具有较高的适应性。
- 使用 Matlab 对光学效率分布做出模拟, 同时进行可视化绘制热力图, 能够更加直观地认识到不同特殊日和不同时间下光学效率的变化, 从而对定日镜场的优化设计具有更深的理解和刻画。

- 针对问题 1 中设定的定日镜场进行优化设计，取得了较好的成果，定日镜场的理论输出热功率明显得到提高，同时减少了资源浪费。

6.2 反思与改进

- 在问题 2 到问题 3 的优化过程中，没有太仔细考虑每一面定日镜的独立性，只是进行了一个概览性的调参，优化效果不明显。
- 仿真软件 **SolarPILOT** 所使用的天气文件和实际情况仍有差距，造成了仿真结果和实际结果可能存在一定误差。
- 对于部分光学效率的影响因素，为了简化计算我们取了接近的常数，忽略了部分经纬度和海拔造成细微影响，可能对整个系统的稳健性具有一定影响。

参考文献

- [1] 张平, 奚正稳, 华文瀚等. 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(06):5-8.
- [2] 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, 2023.
- [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, 2019.

附录

A 代码

A.1 太阳位置模型和光学效率模型

格子网络所使用的代码如下。

```
1 %计算每月 21号 到春分的天数D
2 d = 21;
3 m = 0:1:11;
4 A = [31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31];
5 D = cumsum(A)+d;
6 D = D-D(3);
7
8 %当地时间 ST
9 ST=9:1.5:15;
10
11 %太阳时角 omega
12 omega=pi/12*(ST-12);
13
14 %太阳赤纬角 delta 的正余弦值 (每天不同, 共 12个值)
15 sin_delta = sin(2*pi*D/365)*sin(2*pi/360*23.45);
16 cos_delta = sqrt(1-sin_delta.^2);
17
18 %当地纬度 phi
19 phi = 39.4*pi/180;
20
21 %海拔高度 H(km)
22 H = 3;
23
24 %太阳高度角 alpha_s 的正余弦值 (每天每时不同, 60个值)
25 sin_alpha_s = cos_delta'*cos(omega)*cos(phi)+sin_delta'*sin(phi);%
    12*5
26 cos_alpha_s = sqrt(1-sin_alpha_s.^2);%12*5
27 %太阳方位角 gamma_s 的正余弦值 (每天每时不同, 60个值)
28 cos_gamma_s = (sin_delta'-sin_alpha_s*sin(phi))./(cos_alpha_s*cos(phi))
    )%12*5
29 cos_gamma_s = cos_gamma_s';
30 cos_gamma_s = cos_gamma_s(:)%60*1
31 sin_gamma_s = -cos_delta'*sin(omega)./cos_alpha_s
32 sin_gamma_s = sin_gamma_s';
33 sin_gamma_s = sin_gamma_s(:);
```

```

34
35 %将太阳高度角的正余弦值转为一列向量
36 sin_alpha_s = sin_alpha_s';
37 sin_alpha_s = sin_alpha_s(:); %每天每个时间点的数值 (60*1)
38 cos_alpha_s = cos_alpha_s';
39 cos_alpha_s = cos_alpha_s(:);

40
41 %太阳常数  $G_0 (kW/m^2)$ 
42 G0 = 1.366;

43
44 %法向直接辐射辐照度  $DNI$ 
45 a = 0.4237-0.00821*(6-H)^2;
46 b = 0.5055+0.00595*(6.5-H)^2;
47 c = 0.2711+0.01858*(2.5-H)^2;
48 DNI = G0*(a+b*exp(-c./sin_alpha_s));
49 DNI = reshape(DNI,5,12);
50 mean_DNI = mean(DNI)';

51
52 %定日镜宽度和高度 (m)
53 mirror_width = 8;
54 mirror_height = 8;

55
56 %定日镜面积 ( $m^2$ )
57 A = mirror_width*mirror_height;

58
59 %定日镜安装高度 (m)
60 h1 = 6;

61
62 %吸收塔高度 (m)
63 h2 = 80;

64
65 %定日镜总数  $N$ (面)
66 N = 1745;

67
68 %定日镜坐标  $xy$ 
69 xy_1 = xlsread('附件.xlsx');

70
71 %镜面中心到集热器中心的距离  $d_{HR}$  (m)
72 d_HR = sqrt(xy_1(:,1).^2+xy_1(:,2).^2+(h1-h2)^2);

73
74 %大气透射率 (其中  $d_{HR} \leq 1000$ )
75 eta_at = 0.99321-0.0001176*d_HR+1.97*1e-8*d_HR.^2;
76

```

```

77 %镜面反射率 eta_ref
78 eta_ref = 0.92;
79
80 %反射光向量
81 reflect = ([0,0,h2]-[xy_1,h1*ones(N,1)]);
82 norm = sqrt(reflect(:,1).^2+reflect(:,2).^2+reflect(:,3).^2);
83 reflect = reflect./norm;%单位化
84
85 %入射光方向向量
86 incident = [cos_alpha_s.*sin_gamma_s,cos_alpha_s.*cos_gamma_s,
87 sin_alpha_s];
88
89 %余弦效率
90 cos_eff = zeros(N,60);
91 for i = 1:60
92     temp = sum(reflect.*incident(i,:),2);
93     cos_eff(:,i) = sqrt((1+temp)/2);
94 end
95 cos_eff_all = real(cos_eff);
96 cos_eff = mean(reshape(mean(cos_eff),5,12));%每月21日的平均余弦效率
97 cos_eff = real(cos_eff);
98 cos_eff_mean = mean(cos_eff);%年平均余弦效率
99
100 %阴影遮挡效率
101 eta_sb = 1;
102
103 %集热器截断效率
104 eta_trunc = 0.925;
105
106 %定日镜的光学效率 eta
107 eta_all = real(eta_sb*cos_eff_all.*eta_at*eta_trunc*eta_ref);%1745*60
108 eta = mean(eta_all);%1*60
109 eta = mean(reshape(eta,5,12))';%12*1
110
111 %定日镜场的输出热功率 E_field
112 E_field = mean(N*mirror_height*mirror_width*mean_DNI.*eta)/1000;
113
114 %单位面积镜面平均输出热功率
115 P = mean_DNI.*eta;
116 P_mean = mean(P);

```

A.2 绘制光学效率分布云图

```
1 %%光学效率分布云图绘制
2 ST_text = [' 9:00';'10:30';'12:00';'13:30';'15:00'];
3 for i = 1:12
4     for j = 1:5
5         S = 15;
6         scatter(xy(:,1),xy(:,2),S,eta_all(:,(i-1)*5+j),'filled');
7         colormap("jet");
8         caxis([0,1]);
9         h = colorbar;
10        hold on;
11        plot(0,0,'ro-','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10)
12        ;
13        set(get(h,'label'));%给颜色栏命名
14        xlabel('x坐标(m)');
15        ylabel('y坐标(m)');
16        text = [num2str(i),'月21日',ST_text(j,:),'光学效率分
布云图'];
17        title(text);
18        saveas(gca,['eta_MATLAB_',num2str(i),'月21日时刻',
19 num2str(j),'.png']);
20        hold off;
21    end
22
23 %%光学效率分布云图绘制12个月
24 for i = 1:12
25     S = 15;
26     scatter(xy(:,1),xy(:,2),S,mean(eta_all(:,[1:5]+(i-1))*5,2),'filled');
27     colormap("jet");
28     h = colorbar;
29     caxis([0,5]);
30     hold on;
31     plot(0,0,'ro-','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10);
32     set(get(h,'label'));%给颜色栏命名
33     xlabel('x坐标(m)');
34     ylabel('y坐标(m)');
35     text = [num2str(i),'月21日光学效率分布云图'];
36     title(text);
37     saveas(gca,['eta_MATLAB_',num2str(i),'月21日.png']);
```

```

37         hold off;
38 end
39
40 %%余弦效率分布云图绘制
41 ST_text = [' 9:00';'10:30';'12:00';'13:30';'15:00'];
42 for i = 1:12
43     for j = 1:5
44         S = 15;
45         scatter(xy(:,1),xy(:,2),S,eta_all(:,(i-1)*5+j),'filled');
46         colormap("jet");
47         h = colorbar;
48         hold on;
49         plot(0,0,'ro-','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10)
50         ;
51         set(get(h,'label'));%给颜色栏命名
52         xlabel('x坐标(m)');
53         ylabel('y坐标(m)');
54         text = [num2str(i),'月 21 日',ST_text(j,:),'余弦效率分
布云图'];
55         title(text);
56         saveas(gca,['coseff_MATLAB_',num2str(i),'月 21 日时刻',
57         num2str(j),'.png']);
58         hold off;
59     end
60 end
61
62 %%大气透射率分布云图绘制
63 S = 10;
64 scatter(xy(:,1),xy(:,2),S,eta_at,'filled')
65 colormap("jet");
66 h = colorbar;
67 hold on;
68 plot(0,0,'ro-','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10);
69 set(get(h,'label'));%给颜色栏命名
70 xlabel('x坐标(m)');
71 ylabel('y坐标(m)');
72 title('大气透射率分布云图');
73 saveas(gca,'eta_at.png');
74 hold off;
75
76 %%大气透射率与距离的关系
77 temp = [d_HR,eta_at];

```

```

76 temp = sortrows(temp);
77 plot(temp(:,1),temp(:,2),'-dk','MarkerSize',5,'LineWidth',2,
    'MarkerFaceColor','w','MarkerEdgeColor','k');
78 xlabel('镜面中心到集热器中心的距离');
79 ylabel('大气透射率');
80 grid on;
81 title('大气透射率与距离的关系');
82 saveas(gca,'eta_at_dis.png');

```

A.3 网格搜索算法

```

1 %solve2mirror mlx
2 clear all
3 d = 0.5;
4 N = 10/d;
5 M = 10003;
6 A_result = M*ones(N,N,N);
7 A_result_h = M*ones(N,N,N);
8 A_result_s1 = M*ones(N,N,N);
9 A_result_s2 = M*ones(N,N,N);
10
11 test_set_i = 2:d:6;
12 test_set_j = 2:d:8;
13 test_set_k = 2:d:8;
14
15 for i = 1:1:length(test_set_i)
16     for j = 1:1:length(test_set_j)
17         for k = 1:1:length(test_set_k)
18             [A_result(i,j,k),A_result_h(i,j,k),
19              A_result_s1(i,j,k),A_result_s2(i,j,k)]=
20              min_area(test_set_i(i),test_set_j(j),
21                      test_set_k(k));
22         end
23     end
24 end
25
26
27
28 %min_area.m

```

```

29 function [obj,h11r,s1r,s2r] = min_area(h11,s1,s2)%安装高度，镜面宽度，镜面高度
30 if s1<s2||h11<=s2/2
31     obj = 10001;
32     h11r = h11;
33     s1r = s1;
34     s2r = s2;
35 else
36     N = 2564;%定日镜总数N(面)
37     d = 21;%计算每月21号到春分的天数D
38     m = 0:1:11;
39     AA = [31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31];
40     D = cumsum(AA)+d;
41     D = D-D(3);
42     ST=9:1.5:15;%当地时间ST
43     omega=pi/12*(ST-12);%太阳时角omega
44     sin_delta = sin(2*pi*D/365)*sin(2*pi/360*23.45);%太阳赤纬角
        delta的正余弦值（每天不同，12个值）
45     delta = sin(2*pi*D/365)*23.45;
46     cos_delta = sqrt(1-sin_delta.^2);
47     phi = 39.4*pi/180;%当地纬度phi
48     H = 3;%海拔高度H(km)
49     %太阳高度角alpha_s的正余弦值（每天每时不同，60个值）
50     sin_alpha_s = cos_delta'*cos(omega)*cos(phi)+sin_delta'*sin(
        phi);%12*5
51     cos_alpha_s = sqrt(1-sin_alpha_s.^2);%12*5
52
53     %太阳方位角gamma_s的正余弦值（每天每时不同，60个值）
54     cos_gamma_s = (sin_delta'-sin_alpha_s*sin(phi))./(cos_alpha_s
        *cos(phi));%12*5
55     cos_gamma_s = cos_gamma_s';
56     cos_gamma_s = cos_gamma_s(:)%60*1
57     sin_gamma_s = -cos_delta'*sin(omega)./cos_alpha_s
58     sin_gamma_s = sin_gamma_s';
59     sin_gamma_s = sin_gamma_s(:);
60     %将太阳高度角的正余弦值转为一列向量
61     sin_alpha_s = sin_alpha_s';
62     sin_alpha_s = sin_alpha_s(:) %每天每个时间点的数值(60*1)
63     cos_alpha_s = cos_alpha_s';
64     cos_alpha_s = cos_alpha_s(:) %60*1
65
66     %太阳常数GO(kW/m^2)
67     GO = 1.366;

```

```

68 %法向直接辐射辐照度 DNI
69 a = 0.4237-0.00821*(6-H)^2;
70 b = 0.5055+0.00595*(6.5-H)^2;
71 c = 0.2711+0.01858*(2.5-H)^2;
72 DNI = G0*(a+b*exp(-c./sin_alpha_s));
73 DNI = reshape(DNI,5,12);
74 mean_DNI = mean(DNI)';
75
76 %定日镜宽度和高度(m)
77 mirror_width = s1;
78 mirror_height = s2;
79 %定日镜面积(m^2)
80 A = mirror_width*mirror_height;
81 %定日镜安装高度(m)
82 h1 = h11;
83 %吸收塔高度(m)
84 h2 = 80;
85
86 %定日镜坐标xy
87 xy = xlsread('D:\桌面文件夹\CMC2023Problems\A\问题2\xy2564.
88 xlxs');
89
90 %镜面中心到集热器中心的距离 d_HR(m)
91 d_HR = sqrt(xy(:,1).^2+xy(:,2).^2+(h1-h2)^2);
92 %大气透射率(其中 d_HR<=1000)
93 eta_at = 0.99321-0.0001176*d_HR+1.97*1e-8*d_HR.^2;
94 %镜面反射率 eta_ref
95 eta_ref = 0.92;
96
97 %反射光向量
98 reflect = ([0,0,h2]-[xy,h1*ones(N,1)]);
99 norm = sqrt(reflect(:,1).^2+reflect(:,2).^2+reflect(:,3).^2);
100 reflect = reflect./norm;
101 %入射光方向向量
102 incident = [cos_alpha_s.*sin_gamma_s,cos_alpha_s.*cos_gamma_s
103 ,sin_alpha_s];
104 %余弦效率
105 cos_eff = zeros(N,60);
106 for i = 1:60
107     temp = sum(reflect.*incident(i,:),2);
108     cos_eff(:,i) = sqrt((1+temp)/2);
109 end
110 cos_eff_all = real(cos_eff);

```

```

109 cos_eff = mean(reshape(mean(cos_eff),5,12));%每月21日的平均余弦效率
110 cos_eff = real(cos_eff);
111 cos_eff_mean = mean(cos_eff);%年平均余弦效率
112
113 %阴影遮挡效率
114 eta_sb = 1;
115 %集热器截断效率
116 eta_trunc = 0.925;
117 %定日镜的光学效率 eta
118 eta_all = real(eta_sb*cos_eff_all.*eta_at*eta_trunc*eta_ref)
119 ;
120 eta = mean(eta_all);
121 eta = mean(reshape(eta,5,12))';
122 %定日镜场的输出热功率E_field
123 E_field = mean(N*A*mean_DNI.*eta)/1000;
124 if E_field<60
125     obj = 10002;
126     h11r = h11;
127     s1r = s1;
128 else
129     %单位面积镜面平均输出热功率
130     P = mean_DNI.*eta;
131     obj = s1*s2;
132     h11r = h11;
133     s1r = s1;
134     s2r = s2;
135 end
136 end
137 end

```