

塔式太阳能光热电站年发电量最大化数学模型

您的姓名

2025 年 11 月 8 日

摘要

本文建立了塔式太阳能光热电站年发电量最大化的数学模型。模型涵盖了坐标系定义、反射几何、镜面定向、太阳位置计算、能量通量分析以及效率因子等多个方面，为电站的优化设计和性能评估提供了理论基础。

目录

1	坐标系统与变量定义	2
2	反射几何与镜面法向量	2
3	有效面积与余弦损失	2
4	太阳位置模型	3
5	能量通量与效率因子	3
6	年发电量计算	4
7	最大化方法	4

1 坐标系统与变量定义

我们定义三维笛卡尔坐标系：- 原点 O ：中央接收塔基座（定日镜场中心）- z -轴：垂直向上；接收器孔径中心位于 $T = (0, 0, H_t)$ - 定日镜场：以原点为中心的圆形区域 - 定日镜 i ：中心坐标 $M_i = (x_i, y_i, 6)$ ，镜面尺寸 $6 \times 6 \text{ m}$

太阳位置角：- 太阳高度角 $\alpha_s(t)$ （地平线以上的仰角）- 太阳方位角 $\gamma_s(t)$ （从北顺时针测量， 0° 到 360° ）

定日镜定向角：- 仰角/倾斜角 $\theta_i(t)$ （镜面法线与水平面夹角）- 方位角 $\phi_i(t)$ （镜面法线在水平面投影，从北顺时针测量）

2 反射几何与镜面法向量

从地球指向太阳的单位向量（太阳方向向量）：

$$\hat{\mathbf{s}}_{\text{sun}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_s \sin \gamma_s \\ \cos \alpha_s \cos \gamma_s \\ \sin \alpha_s \end{bmatrix}$$

（约定： x -轴向东， y -轴向北， z -轴向上）

入射光线方向（从太阳到镜面）为 $\mathbf{i} = -\hat{\mathbf{s}}_{\text{sun}}$ 。

反射光线方向（从镜面到目标）：

$$\hat{\mathbf{r}} = \frac{T - M_i}{\|T - M_i\|}$$

镜面单位法向量（使用反射定律，入射向量指向镜面）：

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{i} + \hat{\mathbf{r}}}{\|\mathbf{i} + \hat{\mathbf{r}}\|}$$

这确保了 $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{i} - 2(\mathbf{i} \cdot \hat{\mathbf{n}})\hat{\mathbf{n}}$ 成立。

从 $\hat{\mathbf{n}} = (n_x, n_y, n_z)$ ，镜面定向角为：

$$\theta_i = \arcsin(n_z), \quad \phi_i = \text{atan2}(n_x, n_y)$$

（使用 atan2 获得正确象限，结果以弧度表示，从北顺时针）

3 有效面积与余弦损失

镜面面积： $A_m = 36 \text{ m}^2$ 。

余弦效率（朝向太阳的投影面积）：

$$\eta_{\cos} = \hat{\mathbf{n}} \cdot (-\hat{\mathbf{s}}_{\text{sun}}) = \hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{i}$$

这是镜面法线与入射阳光夹角的余弦值。

4 太阳位置模型

太阳赤纬（日数 n ，1 到 365）：

$$\delta \approx 23.45^\circ \times \sin\left(\frac{2\pi(n-80)}{365}\right) \quad (\text{单位：度})$$

时角：

$$h = 15^\circ \times (\text{太阳时} - 12)$$

（太阳时 = 地方时 + 时差校正；为简化，时差可忽略）

太阳高度角：

$$\sin \alpha_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h$$

太阳方位角（从北顺时针）：

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos h}{\cos \alpha_s}, \quad \sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos \alpha_s}$$

$$\gamma_s = \text{atan2}(\sin \gamma_s, \cos \gamma_s) \quad (\text{需要时调整象限})$$

5 能量通量与效率因子

法向直接辐照度 (DNI) $I_{\text{dni}}(t)$ ：

简化的晴空模型（如 Hottel 模型）或使用典型气象年 (TMY) 数据。

反射率： $\rho \approx 0.88$ （典型镜面反射率）。

大气衰减（镜面与接收器之间）：

$$\eta_{\text{atm}} = a^d, \quad a \approx 0.99 \text{ 每公里}, \quad d = \|M_i - T\|/1000 \text{ (公里)}$$

截断效率 η_{trunc} ：反射锥进入接收器孔径的比例。取决于镜面形状、瞄准、距离和接收器尺寸。简化处理：如果接收器完全捕获反射光束， $\eta_{\text{trunc}} = 1$ ；否则通过锥截计算。

遮挡/阴影损失 η_{block} ：此处忽略（=1）以简化，但在详细布局优化中必须建模。

定日镜 i 的瞬时反射功率：

$$P_i(t) = I_{\text{dni}}(t) \cdot A_m \cdot \rho \cdot \eta_{\text{cos}} \cdot \eta_{\text{atm}} \cdot \eta_{\text{trunc}}$$

场总热功率：

$$P_{\text{field}}(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t)$$

6 年发电量计算

热电转换效率： $\eta_{\text{th}} \approx 0.35$ 。

年发电量：

$$E_{\text{year}} = \eta_{\text{th}} \int_{\text{year}} P_{\text{field}}(t) dt$$

在白天（ $\alpha_s > 0$ ）且定日镜不在维护/夜间时段积分。

年平均电功率：

$$\bar{P}_{\text{electric}} = \frac{E_{\text{year}}}{8760 \text{ 小时}}$$

7 最大化方法

给定固定的定日镜位置，唯一控制是瞄准定律（已由反射几何设定）。

年输出最大化通过以下方式实现：- 优化布局以最小化平均衰减和余弦损失 - 通过适当的接收器尺寸确保 $\eta_{\text{trunc}} \approx 1$ - 在此模型中，我们计算所有 t 的 $P_{\text{field}}(t)$ ，然后积分

一旦坐标和瞄准策略固定，就没有额外的自由度。

模型验证与讨论

该模型为塔式太阳能电站的优化设计提供了完整的数学框架。在实际应用中，还需要考虑：

- 定日镜场的布局优化算法
- 接收器的热损失模型
- 实际运行中的维护周期和效率衰减
- 不同气候条件下的适应性分析