

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):

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

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