

# 太阳能塔式光热镜场光学效率计算方法

张 平, 奚正稳, 华文瀚, 王娟娟, 孙登科

(东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 成都 611731)

**摘 要:** 太阳能光热电站中, 镜场作为热量的聚焦装置, 其聚焦太阳能的能力需要以镜场性能来衡量, 其中镜场阴影挡光效率和截断效率是镜场光学效率计算过程中的难点, 理论模型较为复杂。采用几何光学算法分析阐述镜场性能的计算理论模型。

**关键词:** 太阳能光热发电; 镜场光学性能; 阴影挡光; 截断效率

## The calculation method of the optical efficiency of the solar power tower heliostat field

ZHANG Ping, XI Zhengwen, HUA Wenhan, WANG Juanjuan, SUN Dengke

(Dongfang Boiler Group Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

**Abstract:** In the solar thermal power generation project, as the device for focusing the sunlight to the receiver, the ability of the solar field needs to be measured by solar field performance. The shading and blocking efficiency and the spillage efficiency which belong to the solar field performance is difficult in the process of optical efficiency calculation, and the theoretical model is complex. In this paper, the geometrical optics algorithm is used to analyze the theoretical model of the solar field performance.

**Key words:** solar thermal power generation; solar field efficiency; shading and blocking efficiency; spillage efficiency

doi: 10.3969/j.issn.1006-8554.2021.06.002

### 1 概述

塔式太阳能光热电站是通过大量的定日镜聚集太阳光能, 使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, 并由吸热器将光能转换成工质热能, 再经汽轮发电机组将热能转换成电能的过程。太阳能转换为热能, 其原理实际上是反射镜成像的过程(太阳为光源、定日镜为反射镜、吸热器是光斑的成像点)。

一个镜场通常需要通过大量定日镜才能实现能量聚集, 在镜场设计过程中, 最重要的是需要考虑如何提高镜场整体对太阳光能的利用效率即镜场光学效率。镜场光学效率是指吸热器接收到的光通量与镜场反射镜能接收的最大的光通量之比。镜场设计原则是: 以最小的反射镜接收面积, 为吸热器提供最大的太阳光能量, 与此同时还需保证吸热器上能流密度的分布满足吸热器设计要求。

镜场的布置方式是决定镜场光学效率的主要因素。镜场布置时, 太阳所处的位置、定日镜之间的距离、镜场的排布方式、定日镜与吸热器之间的距离、吸热器布置高度, 都直接影响着镜场的光学效率。由于太阳在全年每一天的不同时刻, 都处于天空中的不同位置, 即光源相对于镜场中各定日镜的位置是以年为周期随时间不断变化的, 但各定日镜反射光线的目标点

是固定的, 加之组成镜场的众多定日镜在地面的位置和反射目标点各不相同, 这就使镜场中每台定日镜即使在相同时刻其反射面姿态和光学效率也不相同。即使对于同一台定日镜, 在不同时刻其反射面姿态和光学效率也不相同。

同时, 太阳光并非平行光线, 而是具有一定锥形角的锥形光线, 这也加大了镜场高效聚焦的难度, 尤其在定日镜离反射目标点距离更远的情况下, 其难度也随之增加。在这种情况下, 如果为了降低定日镜与目标点的距离而将定日镜作密集排布设计, 将增加定日镜之间的干涉, 同样会对镜场的可接收光线造成一定的浪费。而如果为了降低定日镜间的干涉在排布时加大彼此之间的距离, 这不仅会造成土地浪费, 且增加了定日镜与吸热器的距离, 这对定日镜跟踪精度等也提出了更高的要求。

衡量一个镜场布置是否合理, 最主要的指标就是镜场光学效率的高低, 因此对于镜场光学效率的计算方法研究是光热电站一项重点内容。

### 2 光学性能理论建模

#### 2.1 光学效率的概念

镜场光学效率综合表征了镜场的各项性能指标, 从时间表征上包括瞬时光学效率以及全年平均光学效率。

镜场效率包括镜面的反射率的情况(包括镜面本身的反射性能以及暴露在空气下的镜面的沾污情况)、因镜面与入射太阳光线有一定角度而造成的余弦损失、太阳光在传播过程中的衰减损失、定日镜之间因干涉而造成的阴影挡光、反射到吸热器上的太阳光的溢出等各项分效率。对于镜场各项分效率的定义如下。

1) 镜面反射率: 是指反射镜的反射率以及镜面脏污程度的综合效率。

2) 余弦损失: 是指由于太阳光入射方向与镜面采光口法线方向不平行引起的接收能量损失。

3) 大气衰减损失: 太阳光在空气传播的过程中, 由于空气中的粉尘、颗粒等对光线造成了一定的衰减, 因此从镜面反射到吸热器的光路径中, 因镜面与反射目标点的距离, 其损失也略有不同。

4) 阴影挡光损失: 有面向太阳光线的迎光面就有背向太阳的阴影面, 在镜场中定日镜的阴影落入另一个定日镜的镜面, 或者反射光线照射到另一台定日镜的背面等, 这就造成了镜场接收到的太阳光线有所损失, 而产生的阴影挡光损失。

5) 溢出损失: 也叫截断损失。当镜场反射的光斑落入吸热器接受面时, 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溢出损失。主要针对阴影挡光效率以及溢出效率进行研究讨论。

## 2.2 阴影挡光效率理论模型

阴影挡光损失包括三部分<sup>[1]</sup>: ①塔对镜场造成的阴影损失。②后排定日镜接收的太阳光被前方定日镜所阻挡被称为阴影损失。③后排定日镜在反射太阳光时被前方定日镜阻挡而未到达吸热器上被称为挡光损失。下面将对阴影挡光损失的核心算法进行详细阐述。

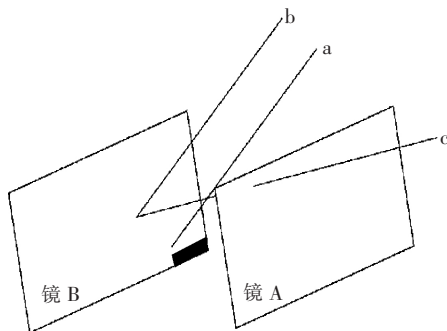


图1 阴影挡光效应的模拟

如图1所示, 图中a、b代表太阳入射光线, c代表b入射光线经定日镜反射的光线, 从图1中光线路径可见, a入射光线在入射到B镜的过程中恰巧被A镜阻挡, 从而使A镜在B镜

上产生了阴影。而b光线经由B镜反射后的反射光线c, 其到达吸热器的过程中, 被B镜阻挡, 从而产生了B镜对A镜的挡光现象。

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。

假设一条光线(包括入射光线和反射光线)在地面坐标系的向量为:

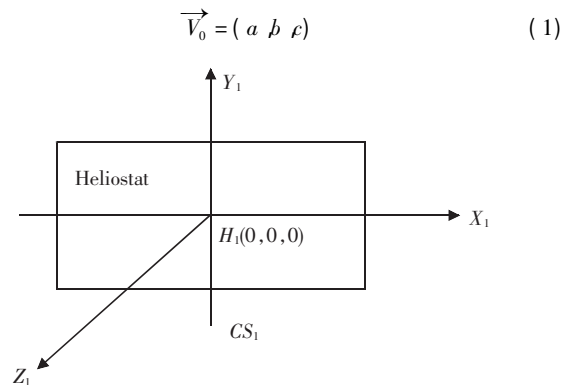


图2 镜面坐标系

建立镜面坐标系(见图2), 在A镜坐标系下, A镜中某一点  $H_1 = (x_1, y_1)$ , 求经过光线落入B镜中的坐标  $H_2 = (x_2, y_2)$  (该坐标在B镜坐标系中)。

计算阴影挡光损失的过程, 即由已知  $H_1$ , 求  $H_2$ , 再判断  $H_2$  是否在镜面内。

假设镜面坐标系a到地面坐标系b的转换关系单位矩阵为:

$$T = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix}$$

$(l_x, m_x, n_x)$ ,  $(l_y, m_y, n_y)$ ,  $(l_z, m_z, n_z)$  是镜面坐标系a的3个轴在地面坐标系b的向量表示。对于不同跟踪形式的定日镜, 其坐标转换方程不同, 以传统定日镜的旋转机制为例, 其坐标转换关系如下:

$$T = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin E_H & -\sin A_H \cos E_H & \cos A_H \cos E_H \\ \cos E_H & -\sin A_H \sin E_H & \cos A_H \sin E_H \\ 0 & \cos A_H & \sin A_H \end{pmatrix} \quad (2)$$

而对于极轴跟踪定日镜, 其转换形式有所不同, 由于涉及极轴定日镜的理论参数及概念, 在这里不加以讨论。

一束光线在镜面坐标系中的向量表示为  $\vec{V}_H$ , 在地面坐标系中的向量表示为  $\vec{V}_0$ 。

则有如下转换关系:

$$\vec{V}_0 = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix} \cdot \vec{V}_H \quad (3)$$

为了计算  $H_2 = (x_2, y_2, z_2)$  的值: 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  $H'_1$ 。②再将地面坐标系下的  $H'_1$  转换到 B 镜坐标系下, 表示为  $H''_1$ 。③将地面坐标系下的光线(入射或反射)转换到 B 镜坐标系下。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。⑤判断  $H_2$  是否在镜内。

下面将依照上述过程分步计算:

$H_1(x_1, y_1, z_1)$  转换为  $H'_1$ :

$$H'_1 = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix} \cdot H_1 + O_A = \begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$O_A$  为 A 镜坐标系原点在面坐标系的坐标值, 表示为  $(x_A, y_A, z_A)$

$H'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$  转换为  $H''_1$ :

$$H''_1 = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix}^T \cdot (H'_1 - O_B) = \begin{pmatrix} x''_1 \\ y''_1 \\ z''_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$O_B$  为 B 镜坐标系原点在面坐标系的坐标值, 表示为  $(x_B, y_B, z_B)$

将光线在地面坐标系下的向量  $\vec{V}_0$  转换到 B 镜坐标系下, 表示为  $\vec{V}_H$ :

$$\vec{V}_H = \begin{pmatrix} l_x & l_y & l_z \\ m_x & m_y & m_z \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix}^T \cdot \vec{V}_0 = (a, b, c) \quad (6)$$

已知 B 镜坐标系下  $H''_1 = (x''_1, y''_1, z''_1)$  点、光线向量  $\vec{V}_H = (a, b, c)$  求  $H_2 = (x_2, y_2, z_2)$

解:

$$\frac{x_2 - x''_1}{a} = \frac{y_2 - y''_1}{b} = \frac{-z''_1}{c} \quad (7)$$

$$\text{得: } \begin{cases} x_2 = \frac{cx''_1 - az''_1}{c} \\ y_2 = \frac{cy''_1 - bz''_1}{c} \end{cases} \quad (8)$$

判断  $H_2$  是否落入镜面范围内。

镜场阴影挡光效率中, 不仅是定日镜之间会互相影响产生阴影和挡光, 还有塔对镜场的影响<sup>[2]</sup>。但塔对镜场只有阴影影响, 没有挡光影响。而评估塔对镜场的影响时, 为了减少计算

量, 首先判断塔的阴影在当下时间内影响的镜场区域, 因为一天当中, 根据太阳位置的变化, 塔的阴影区域也跟着变化。

当判定塔阴影造成的镜场区域后, 只需要对该区域的定日镜进行塔阴影计算即可。

### 2.3 截断效率理论模型

截断效率定义为: 吸热器截获的能量占镜场汇聚能量的百分比。其中, 所谓“镜场汇聚的能量”应是整个镜场能够反射出的太阳光能量, 这就要除去已经被阴影或挡光、衰减等损失的太阳光能量。

前文已经讲过, 来自太阳的入射光线是一束锥形光线, 其半角展宽为 4.65 mrad。根据反射原理, 反射到吸热器上的光线也是呈发散的锥形形状。目标点和反射镜的距离越远, 光锥的截面越大, 而镜场是由成千上万的定日镜按一定规律排列在吸热塔四周, 自然有离吸热器距离较近和距离较远的定日镜。这就使得吸热器上的反射光斑尺寸会根据定日镜与吸热器的距离而有所变化; 而定日镜在制造过程中存在一定的跟踪精度以及面型精度, 跟踪精度的存在会影响反射光斑是否精准地投射到目标点上, 而定日镜面型误差的存在会使反射光斑的形状不再具有规则性。以上种种因素使镜场反射光斑并不能全部落入吸热器接收范围内, 而造成了一定的光溢出现象。

在计算镜场溢出光学效率的过程中, 理论模型的建立, 通常采用光线追迹法<sup>[3]</sup>, 追迹一束太阳光中任意一条光线在经过定日镜反射后, 落入吸热器的位置。

一束光锥的半角展宽是 4.65 mrad, 在太阳发散角内均匀追迹若干光线作为入射光线, 均匀追迹的方式是在半角展宽方向以均匀角度进行步长的划分, 在周向方向上, 也同样以均匀角度进行步长的划分<sup>[4]</sup>, 如图 3 所示。

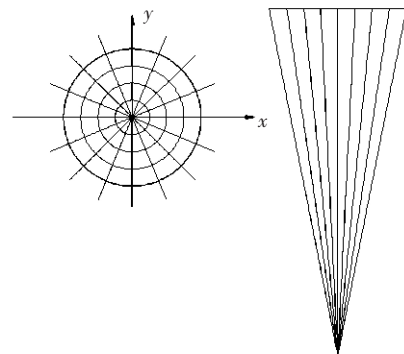


图3 角均分法将一束光锥等分为若干根光线

下面为了求光锥中某一根光线的表达式, 首先建立一个光锥坐标系  $O_s - X_s Y_s Z_s$ , 如图 4 所示, 在一锥形光束中,  $Z_s$  沿着主光线方向, 并朝向太阳圆盘中心。  $X_s$  轴始终与地面平行,  $Y_s$  轴垂直于  $X_s$  和  $Z_s$  轴。

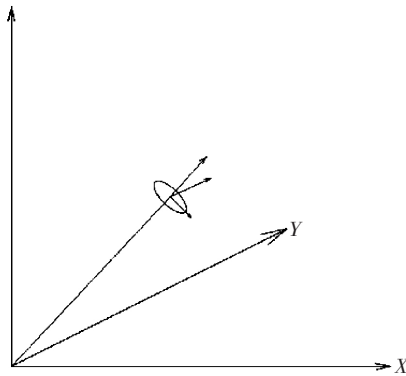


图4 光锥坐标系

假设任一光线在光锥中与来自太阳中心的主光线的夹角为  $\sigma$  与  $X_s$  的夹角为  $\tau$  ,则任一光线的表达式为:

$$\vec{S}_s = (\sin \sigma \cos \tau \quad \sin \sigma \sin \tau \quad \cos \sigma) \quad (9)$$

一束光锥是由无数根光线组成 ,计算截断效率或者计算吸热器上的能留密度 ,即是累积计算许多光线在经过定日镜的反射后到达吸热器上时的落点坐标。以一束光锥中某一根光线为例。整个计算过程如下:

1) 求镜面坐标系上  $H_1$  点在地面坐标系的坐标表示: A 镜的某一点  $H_1$  转换到地面坐标系下的坐标 ,并表示为  $H'_1$ :

$$H'_1 = T \cdot H_1 + O_A = \begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

T 的矩阵表达参看式(2) ,仅针对传统追踪型定日镜有效。

2) 求光锥中任一光线在地面坐标系的向量表示: 假设该光线在光锥坐标系下的向量表示为  $\vec{V}_s = (a \ b \ c)$  ,实际表达式见式(9) 。光锥坐标系到地面坐标系的矩阵转换关系式如下:

$$T = \begin{pmatrix} \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma \\ -\cos \gamma & -\sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \gamma \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (11)$$

则 ,将光锥坐标系中的  $\vec{V}_s = (a \ b \ c)$  向量转化到地面坐标系中 ,得

$$\vec{V}_{sl} = T \cdot \vec{V}_s = (a_1 \ b_1 \ c_1) \quad (12)$$

3) 求地面坐标系下的反射光线的向量。理想情况下 ,反射主光线的向量已知 ,但在求解截断效率时 ,由于光锥中光线向量不同 ,且实际镜面法线也不是一成不变的 ,所以须根据入射光线和镜面实际法线来求解反射光线。

假设定日镜的法线单位向量  $\vec{V}_N = (u_0 \ v_0 \ w_0)$  ,具体向量值将在后面章节进行讨论。

求得该光线通过定日镜反射后的反射光线向量为  $\vec{V}_R$ 。

光线向量  $\vec{V}_{sl}$  与镜面法线向量  $\vec{V}_N$  都是单位向量 ,两个向量的夹角假设为  $\theta$  ,其余弦值

$$\cos \theta = \frac{\vec{V}_{sl} \cdot \vec{V}_N}{|\vec{V}_{sl}| |\vec{V}_N|} = \vec{V}_{sl} \cdot \vec{V}_N \quad (13)$$

$$\vec{V}_R = 2 \cos \theta \vec{V}_N - \vec{V}_{sl} = (m \ n \ l) \quad (\text{单位向量}) \quad (14)$$

4) 反射光线的方程表示:

$$\frac{x - x_1}{m} = \frac{y - y_1}{n} = \frac{z}{l} \quad (15)$$

5) 根据吸热器受热面方程求解光线交点坐标。已求得反射光线的方程表示 ,结合吸热器的接受面方程 ,可求得反射光线在吸热器上的交点。在此典型的以圆柱式吸热器为例 ,圆柱式吸热器的方程表示:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2 \\ z \in [-\frac{h}{2}, \frac{h}{2}] \end{cases} \quad (16)$$

$h$  表示吸热器的高度。

结合公式(15) 和公式(16) ,即可求解吸热器上光线的入射坐标。由于同一镜场不同时刻的光学效率不同 ,常以年均光学效率作为镜场设计是否合理的主要指标 ,需对各时刻进行分别计算并进行累积后求平均光学效率。

### 3 结语

由于一个大型镜场中不仅包含的定日镜数以千计甚至万计 ,而且需要计算多时刻镜场效率 ,采用上述方法虽然不能直接用于镜场光学效率的计算 ,但上述计算方法不仅可以作为镜场光学效率计算软件开发的基本理论模型 ,也对镜场设计人员具有理论指导价值。

参考文献:

- [1] 王瑞庭. 太阳能塔式电站镜场对地面的遮阳分析[J]. 光子学报 2009 38(9): 2414-2418.
- [2] 郭苏, 刘德有. 考虑接收塔阴影的定日镜有效利用率计算[J]. 太阳能学报 2007 28(11): 1182-1187.
- [3] 张国勋, 饶孝枢. 塔式太阳能聚光系统太阳影像方程[J]. 太阳能学报 2019 3(2): 172-178.
- [4] 魏秀东, 王瑞庭, 张红鑫, 等. 太阳能塔式热发电聚光场的光学性能分析[J]. 光子学报 2008 37(11): 2279-2283.

作者简介:

张平(1984—),女,黑龙江肇东人,硕士研究生,工程师,从事太阳能光热发电技术的设计与研发。