2024中国太阳能光热大会•敦煌

塔式太阳能光热电站定日镜场优化设计研究

魏秀东

长春理工大学 光电工程学院

长春理工大学
Changchun University of Science and Technology

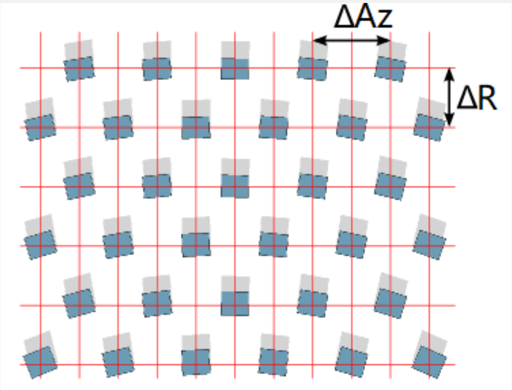
内容提纲

- 镜场布局方法
- 镜场效率计算
- 镜场优化设计
- 结果与讨论

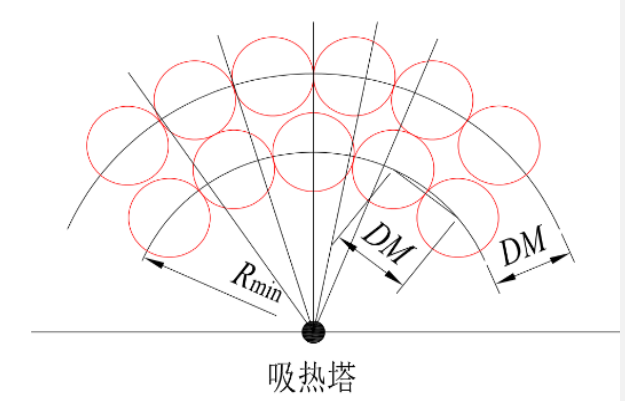
一、镜场布局方法

1.1 紧密布局

定日镜紧密排列在相互平行的直线或同心圆环上，方位间距和径向间距为常数，镜场疏密程度不变，镜场不分区。



平行排列



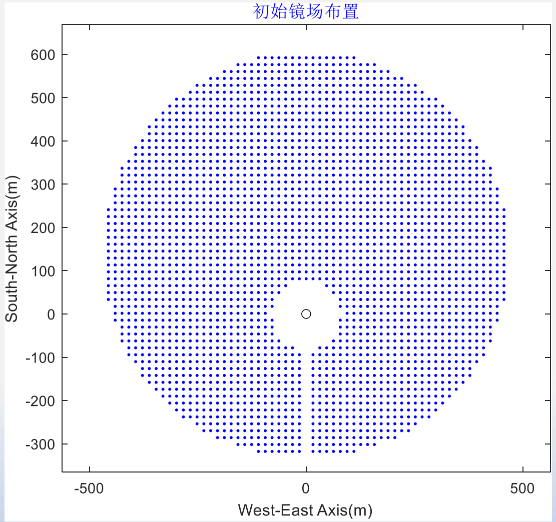
圆弧排列

$$\Delta Az_j = \Delta Az_0 (\Delta Az_0 \geq \mathrm{DM})$$

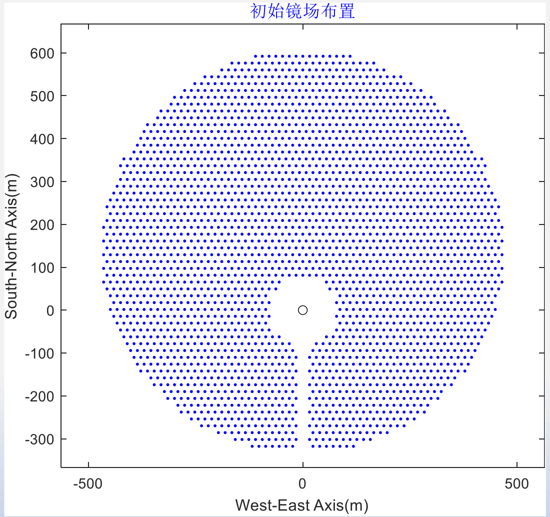
$$\Delta R_j = \Delta R_0 (\Delta R_0 \geq \mathrm{DM})$$

$$DM = DH + d_{sep}$$

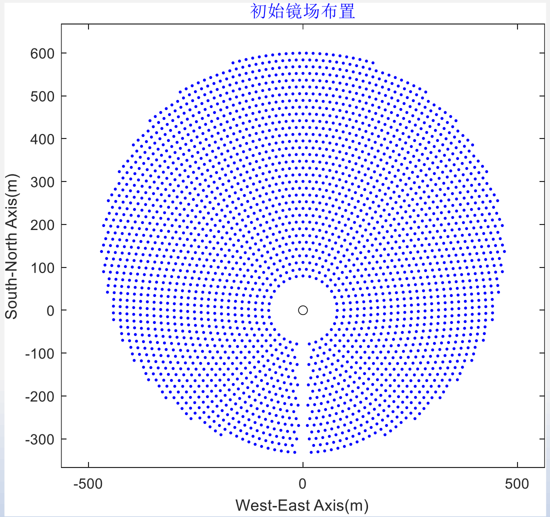
$$\Delta \alpha z_j = 2\arcsin(\frac{\Delta Az_j}{2R_j})$$



平行非交错



平行交错



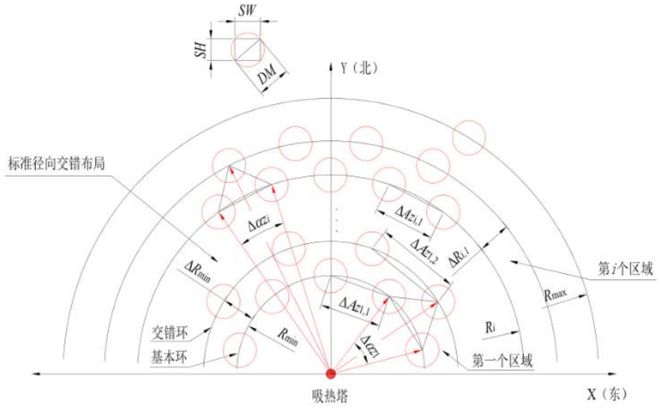
圆弧非交错

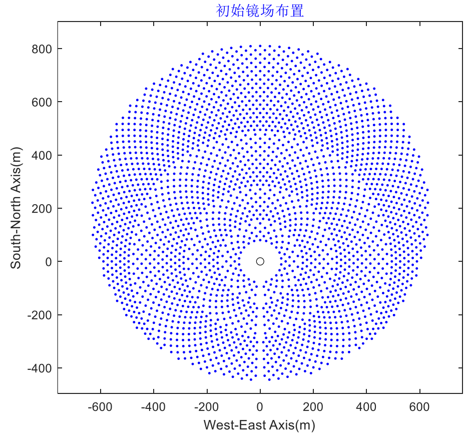
一、镜场布局方法

1.2 径向交错布局

定日镜布置在以塔为中心的同心圆环上，前后环定日镜交错布置，同一区布置角相同，随着半径增大，镜场变稀疏，分区布置。
不同布局方式定日镜方位和径向间距的计算方法不同。

a) 标准径向交错





标准径向交错

$$\Delta Az_{i,1} = Az_0$$

$$\Delta R_{i,1} = \Delta R_0$$

$$\Delta \alpha z_i = 2\arcsin\left(\frac{\Delta Az_{i,1}}{2R_{i,1}}\right)$$

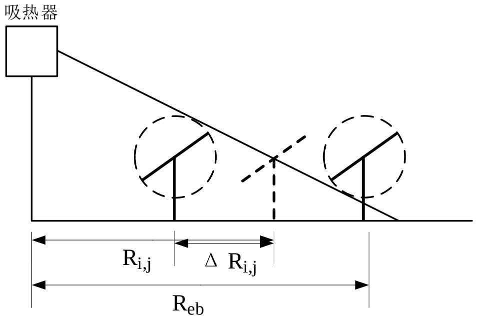
$$\Delta Az_{i,j} = 2R_{i,j} \cdot \sin(\Delta \alpha z_i / 2)$$

$$\Delta R_{i,j} = \Delta R_{i,1}$$

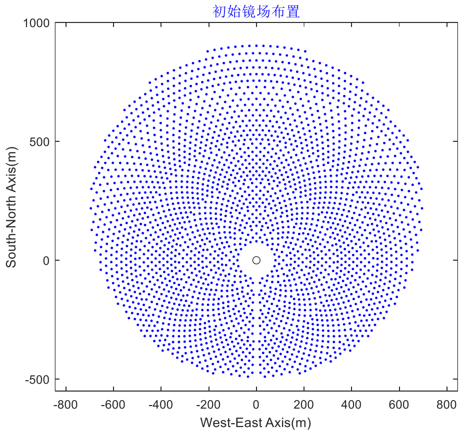
$$\Delta Z_0 = DZ_f \cdot HL$$

$$\Delta Z_i = Z_f \cdot \Delta Z_0$$

b) 无挡光径向交错



无挡光间距



无挡光径向交错

$$\Delta Az_{i,1} = 2 \cdot HW$$

$$\Delta R_{i,j} = \begin{cases} \Delta R_0, (\Delta R_0 \ge \Delta R'_{i,j}) \\ \Delta R'_{i,j}, (\Delta R_0 < \Delta R'_{i,j}) \end{cases}$$

$$R_{eb} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$A = -h_t^2 r_B^2$$

$$B = 2h_t \cdot r_B \cdot (h_t - h_h)$$

$$C = (LH/2)^2 \cdot (1 + h_t^2 r_B{}^2) - (h_t - h_h)^2$$

$$r_B = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$a = h_t^2[(LH/2)^2 - R_{i,j}{}^2]$$

$$b = 2R_{i,j} \cdot h_t \cdot (h_t - h_h)$$

$$c = (LH/2)^2 - (h_t - h_h)^2$$

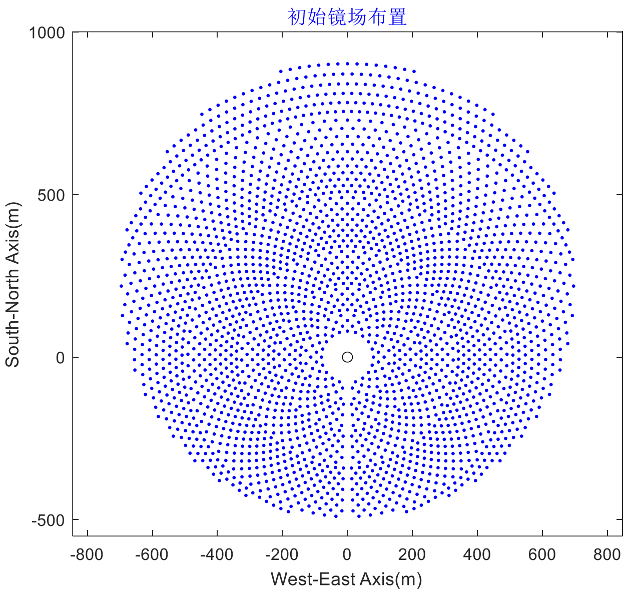
$$\Delta R'_{i,j} = (R_{eb} - R_{i,j})/2$$

一、镜场布局方法

镜场分区方法

三种分区方法

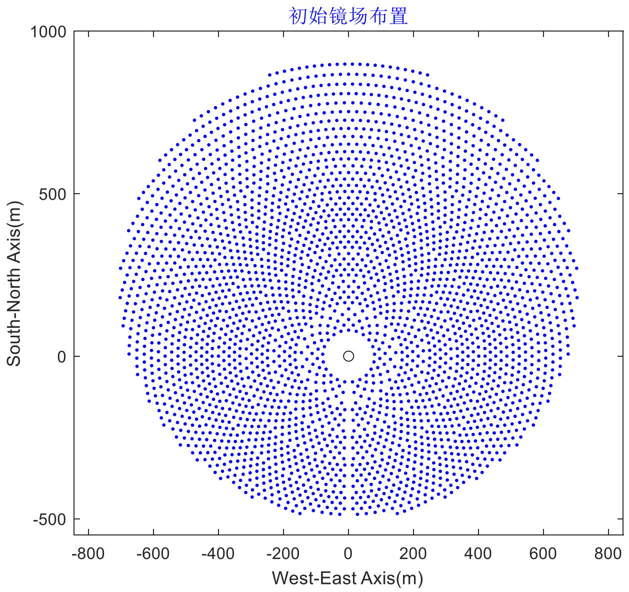
方位间距限制



$$A_f = \frac{\Delta Az_{i,k}}{\Delta Az_{i,1}}$$

当$A_f>A_{flim}$时，镜场进行分区

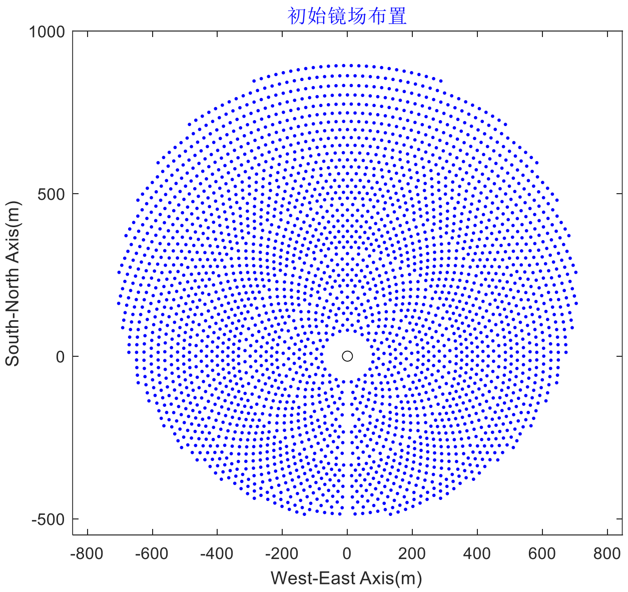
区域宽度限制



$$ZW_i = \sum_{j=1}^{k} \Delta R_{i,j}$$

当$ZW_i>ZW_{lim}$，镜场进行分区

镜场密度限制



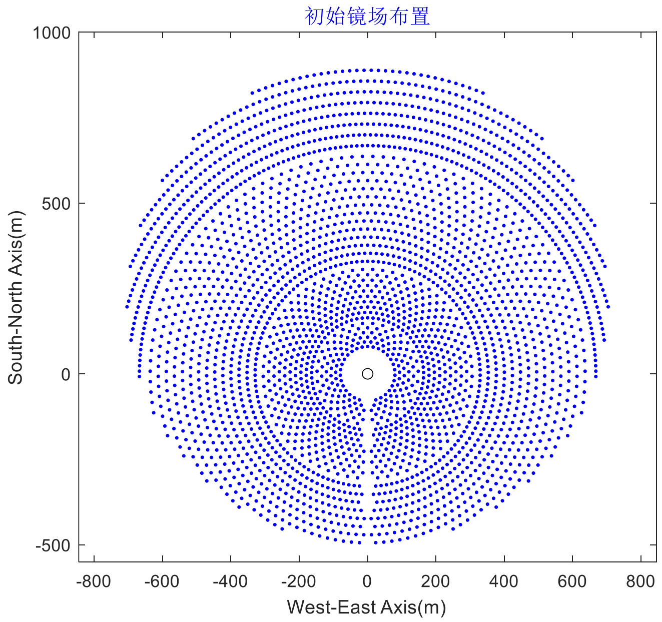
$$\rho_{i,j} = \frac{A_h}{\Delta R_{i,j} \cdot \Delta Az_{i,j}}$$

当$\rho_{i,j}<\rho_{lim}$时，镜场进行分区

一、镜场布局方法

长春理工大学 Changchun University of Science and Technology

c) Campo布局



$$\Delta Az_{i,1} = DM$$

$$\Delta R_{i,1} = DM \cdot \Delta r_i$$

$$\Delta r_i = 0.866, 1.0, 1.5, 2.0...$$

$$\Delta R_{i,j} = \Delta R_{i,1}$$

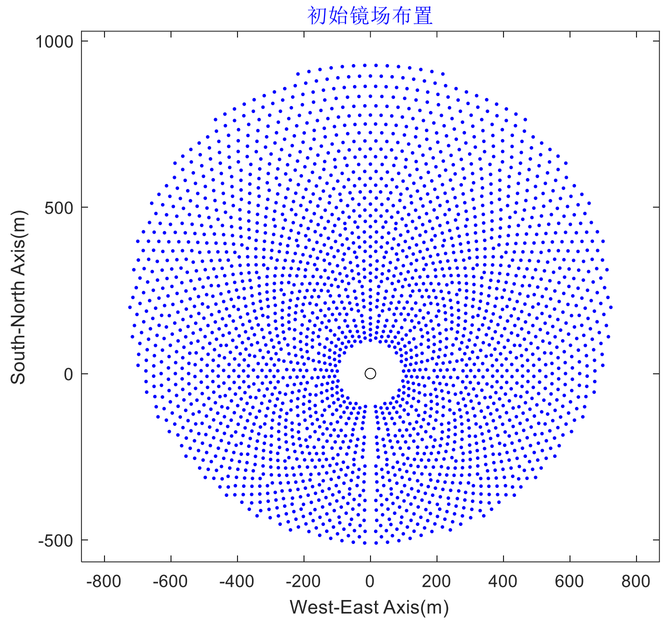
$$\Delta \alpha z_1 = 2^1 \Delta \alpha z_2 ... = 2^{i-1} \Delta \alpha z_i = 2\arcsin(\frac{DM}{2R_{1,1}})$$

$$\Delta Az_{i,j} = 2R_{i,j} \cdot \sin(\Delta \alpha z_i / 2)$$

$$\Delta Z_i = \Delta R_{i,1}$$

分区条件： $\Delta Az_{i,j} = 2DM$

d) Delsol布局



$$\Delta R_{i,j} = (1.14424\cot\theta_{i,j} - 1.0935 + 3.0684\theta_{i,j} - 1.1256\theta_{i,j}^2) \cdot LH / 2$$

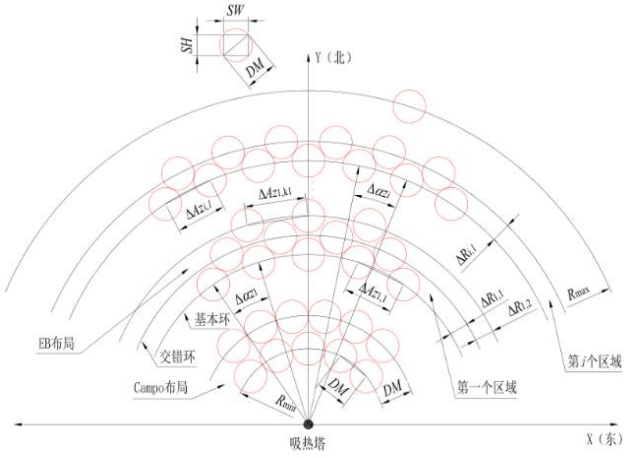
$$\Delta Az_{i,1} = (1.791 + 0.6396\theta_{i,1}) \cdot WH + \frac{0.02873}{\theta_{i,1} - 0.04902}$$

$$\Delta Az_{i,j} = 2R_{i,j} \cdot \sin(\Delta \alpha z_i / 2)$$

一、镜场布局方法

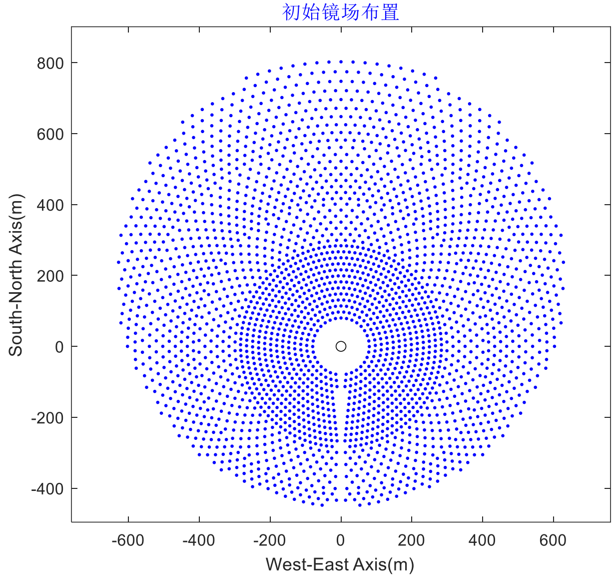
1.3 混合布局

近塔区域光学效率较高，可采用密集布局以增加高效率定日镜的数量；镜场外围区域可采用径向交错布局，以减小阴影挡光损失。

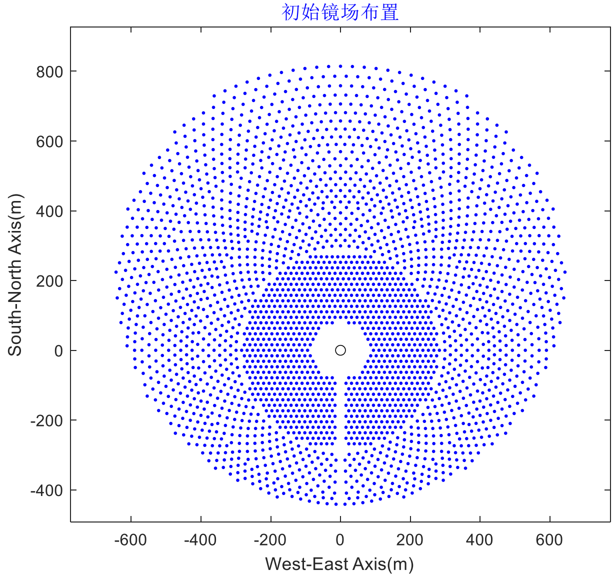


$\Delta Az_{1,j} = \Delta Az_0 \qquad \Delta R_{1,j} = \Delta R_0$

紧密布局满足无挡光间距条件，计算每行或每环的无挡光间距 $\Delta R'_{1,j}$，当 $\Delta R_{1,j} \approx C_f \cdot \Delta R_0$ 时，结束近塔区密集布局，C_f 表示混合布局过渡因子。

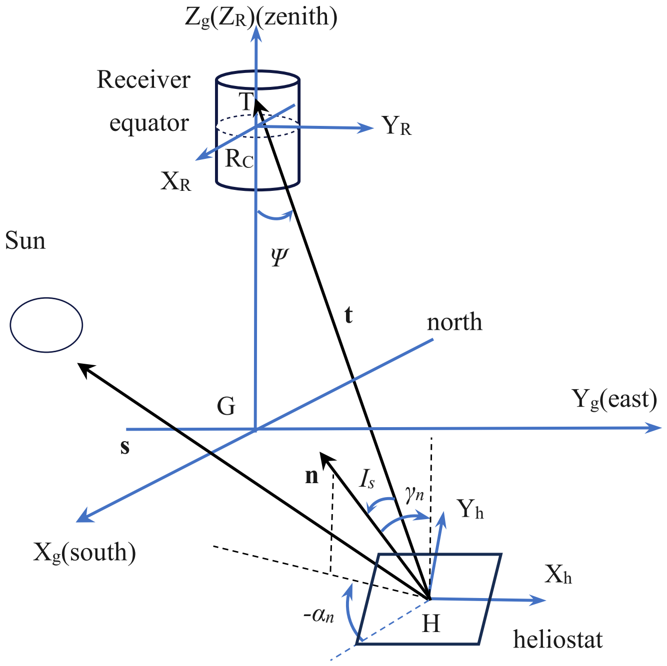


径向非交错+无挡光径向交错



平行交错+无挡光径向交错

二、镜场效率计算



定日镜瞬时效率

$$\eta_{hel}(t)=\eta_{ref}(t)\cdot\eta_{\cos}(t)\cdot\eta_{att}(t)\cdot\eta_{bs}(t)\cdot\eta_{\text{int}}(t)$$

定日镜年均效率

$$\eta_{hel,annual}=\frac{\sum_{n=1}^{365}\int_{sunrise}^{sunset}\eta_{hel}(t)I(t)dt}{\sum_{n=1}^{365}\int_{sunrise}^{sunset}I(t)dt}$$

镜场平均效率

$$\eta_{field,annual}=\frac{\sum_{i=1}^{N_h}\eta_{hel,annual,i}}{N_h}$$

2.1 余弦效率

定日镜法线的单位向量**n**可表示为

$$\mathbf{n}=\frac{\mathbf{s}+\mathbf{t}}{|\mathbf{s}+\mathbf{t}|}\qquad \eta_{\cos}=\mathbf{n}\bullet\mathbf{s}$$

$$\cos I_s=\frac{\sqrt{2}}{2}[\sin\theta_s\cos\Psi-\cos(\theta-A_s)\cos\theta_s\sin\Psi+1]^{\frac{1}{2}}$$

2.2 大气衰减效率

Schmitz 等人提出的能见度40km

$$f_{at}=0.99321-0.0001176\times SLR+1.97\times10^{-8}\times SLR^2\quad(SLR\le1000m)$$

$$f_{at}=e^{-0.0001106\times SLR}\quad(SLR>1000m)$$

Kistler等人提出的能见度23km

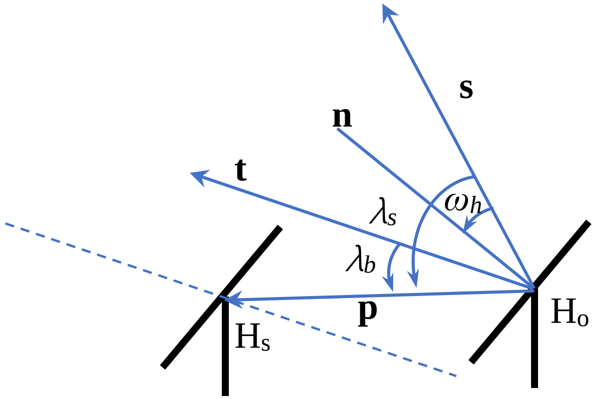
$$f_{at}=0.99326-0.1046\times SLR+0.017\times SLR^2-0.002845\times SLR^3$$

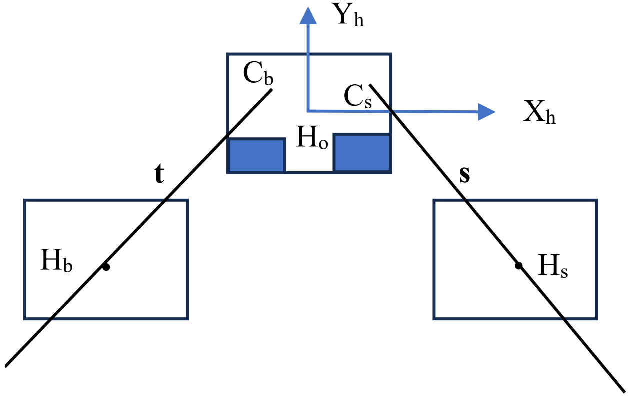
能见度为5km时

$$f_{at}=0.98707-0.2748\times SLR+0.3394\times SLR^2$$

二、镜场效率计算

2.3 阴影挡光效率

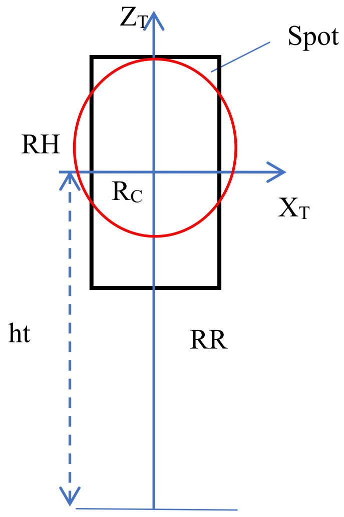


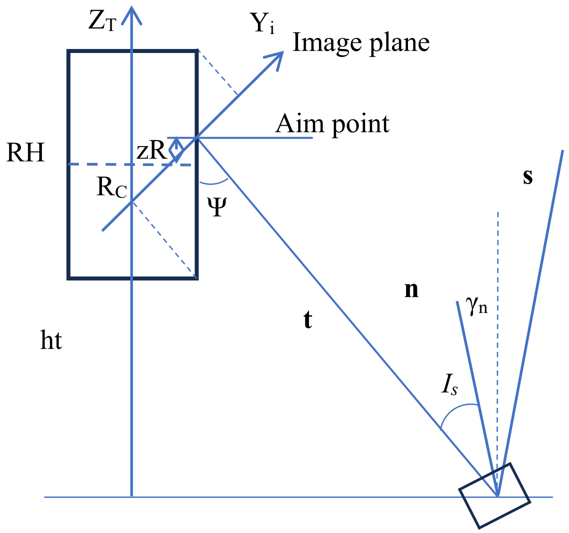


存在阴影的条件是：$\cos\lambda_s>0$
存在挡光的条件是：$\cos\lambda_b>0$

$$\eta_{bs}=\frac{A_{bs}}{A_h} \qquad \eta_{bs}=1-\frac{N_{bs}}{N_m}$$

2.4 截断效率





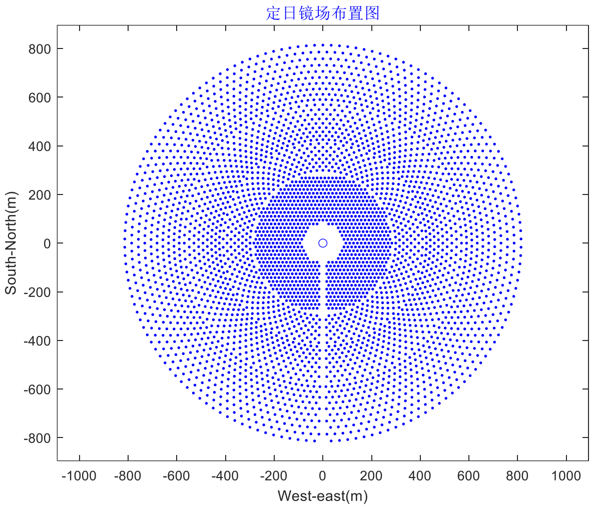
解析法计算截断效率

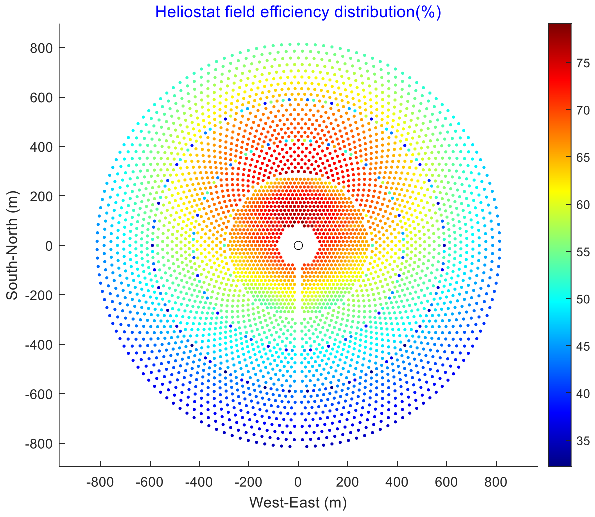
$$Flux(x,y)=\frac{P_h}{2\pi\sigma_{tot}^2}\exp(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_{tot}^2})$$

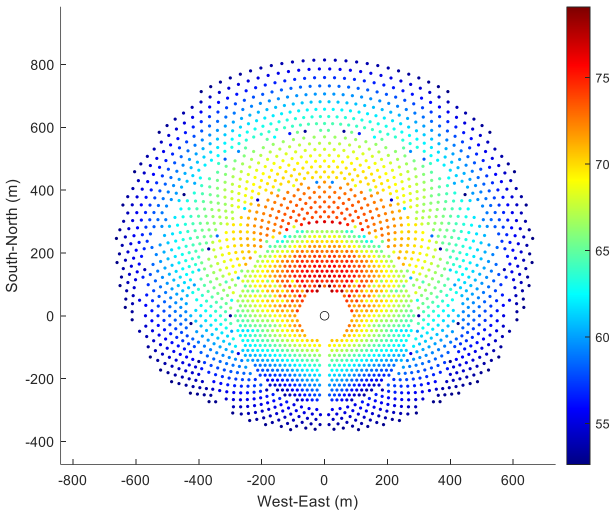
$$\eta_{\text{int}}=\frac{1}{2\pi\sigma_{tot}^2}\int_{y_{\min}}^{y_{\max}}\int_{x_{\min}}^{x_{\max}}\exp(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_{tot}^2})dxdy$$

$$f_{\text{int}}=\int_{x=-RR}^{x=RR}\frac{1}{\sigma_{tot}\sqrt{2\pi}}\exp(-\frac{x^2}{2\sigma_{tot}^2})dx\cdot\int_{y=(-\frac{RH}{2}-zR)\sin\Psi}^{y=(\frac{RH}{2}-zR)\sin\Psi}\frac{1}{\sigma_{tot}\sqrt{2\pi}}\exp(-\frac{y^2}{2\sigma_{tot}^2})dy$$

3.1 优化设计方法







Step1：生成初始镜场布置，定日镜为设计值的1~2倍；

Step2：计算定日镜的年均光学效率

Step3：选择效率最优的定日镜，定日镜数等于设计值

改变镜场布置参数，生成不同的镜场布置，从中选择效率最优的镜场，作为最终镜场布置。

三、镜场优化设计

3.2 镜场边界限制方法

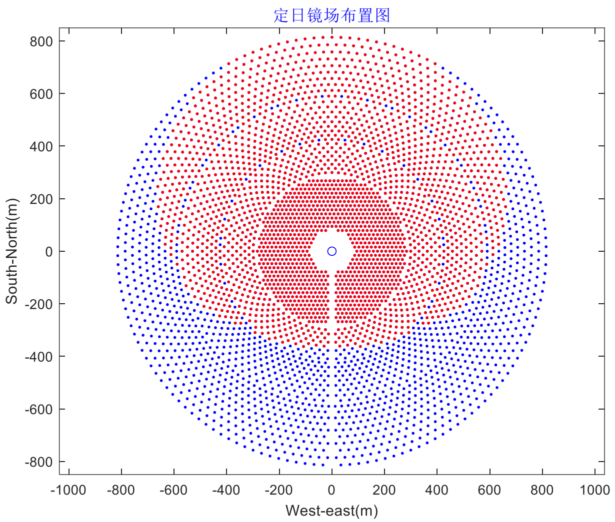
传统方法：以塔基中心为圆心、Rmax为半径的圆，边界方程为：

$$x_g^2 + y_g^2 = R_{\max}^2$$

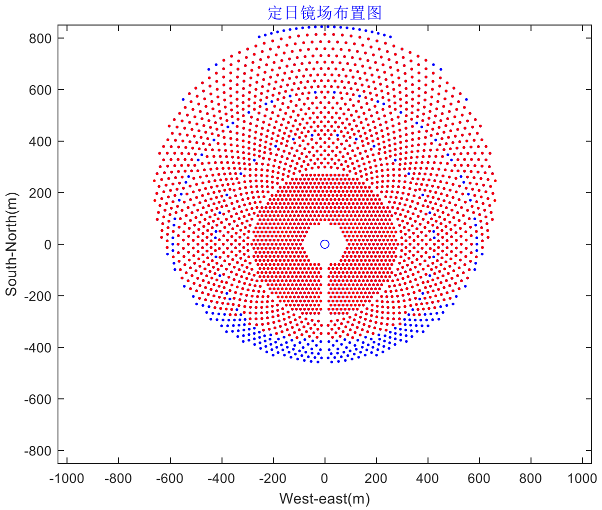
新方法：镜场中心偏移因子E_c，镜场中心向北偏移，边界方程表示为：

$$x_g^2 + [y_g - (1-E_c)/(1+E_c)\cdot R_{\max}]^2 = R_{\max}^2$$

定日镜数量减小，节省优化设计时间



初始镜场布置，定日镜数量为3978面，从中选择2650面



初始镜场布置，定日镜数量为2918面，从中选择2650面

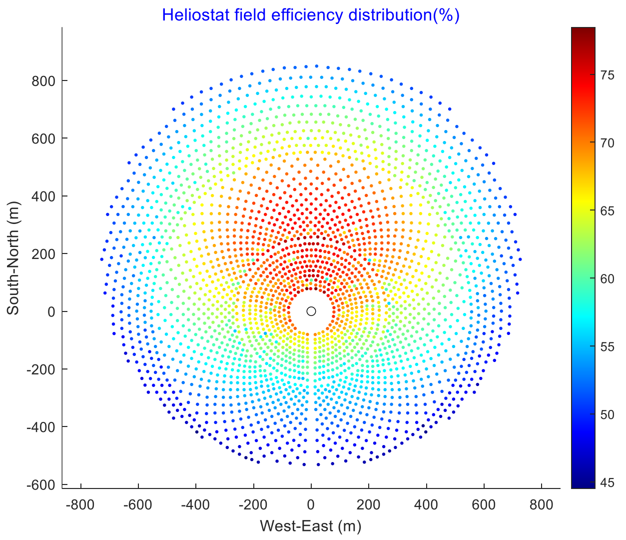
四、结果与讨论

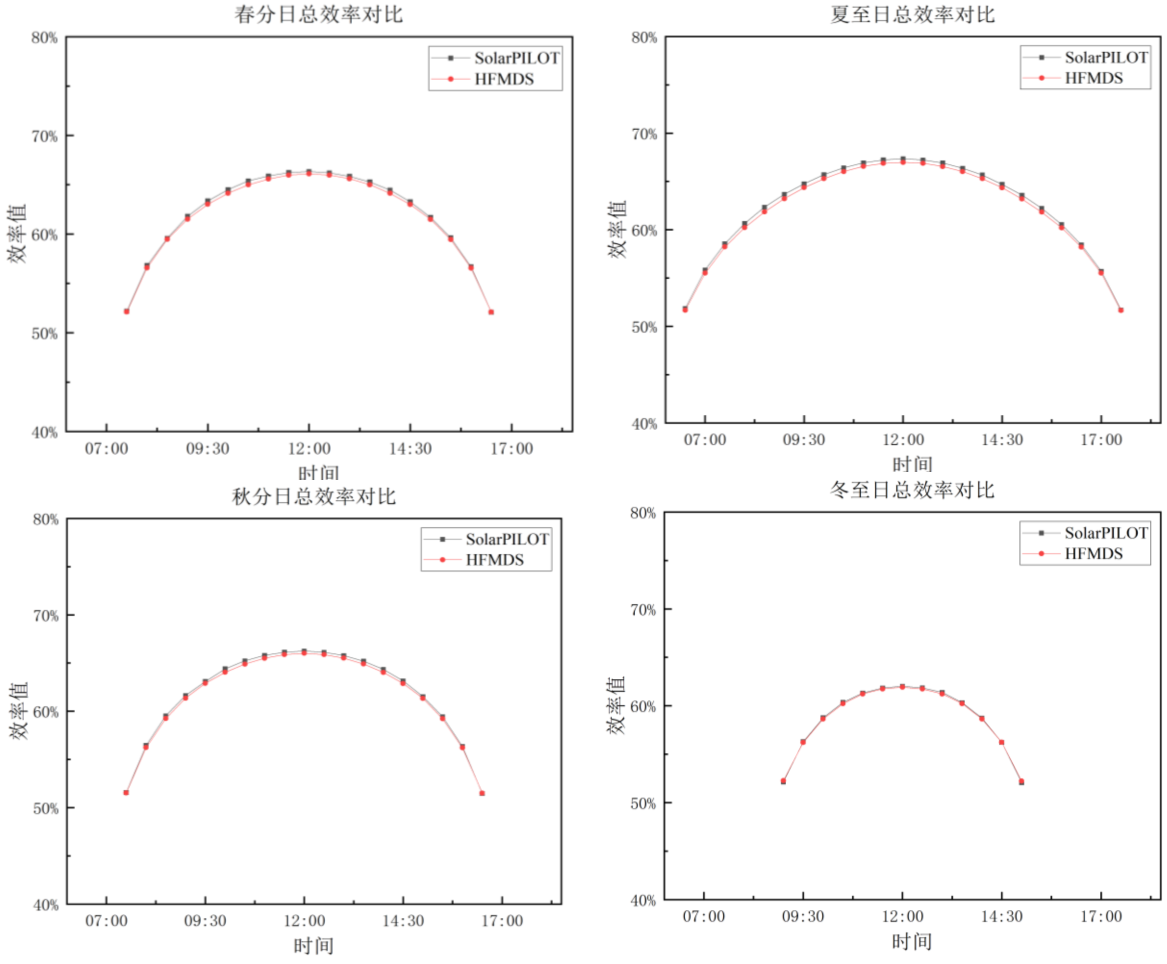
4.1 模型正确性验证

以Gemasolar镜场为例，使用本模型和SolarPilot软件分别计算春分、夏至、秋分和冬至的镜场光学效率分布，二者计算结果最大偏差为0.2%

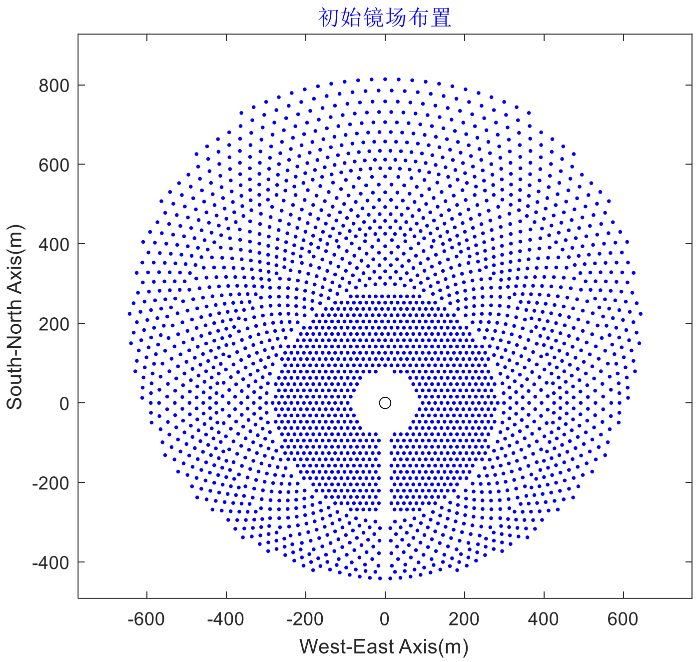
Gemasolar镜场布置参数

参数名称	数值
地理纬度/°	37.4
定日镜数/面	2650
定日镜高度/m	9.752
定日镜宽度/m	12.305
塔光学高度/m	147
吸热器高度/m	14.2
吸热器直径/m	8.9

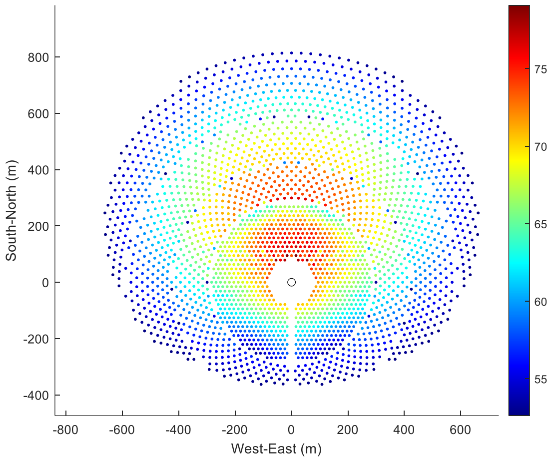




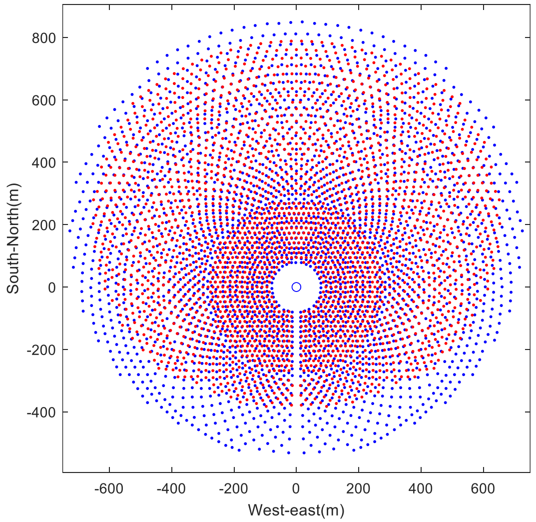
4.2 新镜场设计



初始镜场布置



优化镜场布置



新镜场与原镜场比较

计算条件：σ_{sun} =2.51mrad，σ_{bq}=1.5mrad，σ_{trk}=1.5mrad，太阳高度角大于10°，每月第21日作为计算典型日，时间采样范围为太阳时6：00~18：00，间隔为0.2小时。

参数名称	Gemasolar 镜场	新设计镜场
定日镜数	2650个	2650个
镜场占地面积	158.8万m^2	124.2万m^2
年均镜场余弦效率	78.47	79.97
年均镜场阴影挡光	96.69	96.8
年均镜场截断效率	94.28	95.41
年均镜场反射效率	89.28	89.28
年均镜场大气衰减效率	94.53	94.75
年均镜场光学效率	60.35	62.45
镜场年最大光学效率	66.86	68.73

谢谢聆听，
敬请指正！

魏秀东

Email:weixiudong211@163.com

长春理工大学 光电工程学院