

# 塔式太阳能热发电站不同镜场布置方法 分项效率研究

周 治, 张思远, 杨根本, 郜振鑫

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

**摘 要:** 该研究利用自研的镜场效率分析软件, 分别计算和比较了交错玉米田、圆周径向交错、Campo型和仿生型4种镜场的年均余弦效率、阴影遮挡效率、大气衰减效率、截断效率和综合效率。计算结果表明, 在定日镜数量、尺寸、塔高和镜场可用面积等镜场参数基本相同时, 圆周径向交错布置的阴影遮挡损失最小, 在远端镜场有明显优势; 交错玉米田镜场年均余弦效率最高, 在近端镜场有明显优势; 仿生型镜场由于易形成较高密度的布置, 在中端镜场有一定优势; Campo型镜场各方面均无明显优势。

**关键词:** 塔式太阳能热发电; 定日镜场; 光学效率; 光线追迹; 太阳位置; 动态仿真

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

## 0 引言

随着“3060 双碳”目标和构建新型能源体系要求的提出, 以风电、光伏为主的新能源在中国电力系统中的装机容量占比不断提高, 电力系统需要更大的调节能力以满足新能源消纳需求<sup>[1]</sup>。太阳能热发电易于配置大容量、长周期、更安全低碳的熔盐储能系统, 且采用常规汽轮发电机组, 系统具有转动惯量和电网同步机特性, 是一种灵活性调节电源, 非常符合当前高比例不稳定可再生能源电源并网情境下电网安全稳定运行对快速调峰电源的迫切需要, 可实现用新能源调节支撑新能源<sup>[2]</sup>。

正因如此, 国务院明确提出积极发展太阳能热发电。2022年6月1日, 九部委联合印发《“十四五”可再生能源规划》。规划提出将有序推进长时储热型太阳能热发电发展; 推进关键核心技术攻关, 推动太阳能热发电成本明显下降。

在4种主流太阳能热发电系统中, 塔式太阳能热发电系统具有聚光比高的特点, 因此易实现较高的温度和效率, 可充分利用二元熔盐的显热区间, 不仅可发电、还可用于工业高温替代(如太阳能热制氢等)<sup>[3]</sup>。

镜场投资占电站总投资的40%以上, 高效的镜场布置属于塔式太阳能热发电系统集成关键核心技术之一, 此部分的效率提升对塔式太阳能热发电系统的成本下降影响明显<sup>[4]</sup>。目前主流的塔式太阳能热发电站镜场布置方法主要有交错玉米田、圆周径向交错、Campo镜场、仿生型镜场4种<sup>[5]</sup>。在

圆周径向交错布置方法中, 又有 DELSOL 经验拟合布置方法、无遮挡布置方法、无遮挡密集布置方法等。

本研究主要对交错玉米田、圆周径向交错、Campo、仿生型4种基本布置方法在定日镜尺寸、镜场反射面积、用地面积要求、塔高、吸热器受光面尺寸参数均基本相同的边界条件下, 采用自主研发的镜场效率分析软件对镜场年均余弦效率、年均阴影遮挡效率、年均大气衰减效率等主要分项效率进行详细对比分析, 找到4种基本布置方法的主要特点, 以期为其在不同场景下的应用提供参考。

## 1 镜场效率分析

镜场各项效率是对比分析各类镜场布置方式优劣的主要参考因素, 本研究使用自研的镜场效率分析软件计算镜场各项效率。

### 1.1 太阳位置及表面能量分布

太阳位置是从地球表面观察时, 太阳在天空中的位置, 可用太阳高度角和方位角来描述<sup>[6-7]</sup>。太阳表面能量分布并不均匀, 由太阳形状决定, 太阳圆盘和环日区域的能量分布规律有所不同。将太阳表面能量分布近似为二维高斯分布。

### 1.2 余弦效率的计算

因定日镜倾斜导致的定日镜实际接收到的太阳辐射小于理论最大太阳辐射的现象被称为余弦损失, 将实际接收到的太阳辐射量与理论可接收的最大太阳辐射量的比值称为

收稿日期: 2024-05-29

基金项目: 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-179)

通信作者: 周 治(1977—), 男, 学士、正高级工程师, 主要从事太阳能热发电方面的研究。20270091@qq.com

余弦效率。

假设以单位矢量  $I$  表示太阳位置,单位矢量  $R$  表示镜面相对于塔顶吸热器的位置,单位矢量  $n_h$  表示镜面的法向。由光的反射定律可知,  $I$ 、 $R$ 、 $n_h$  必定在同一平面内,且入射角等于反射角,于是有:

$$n_h = R - I \quad (1)$$

设  $\beta$  为  $I$  与  $n_h$  的夹角,即:

$$\beta = \arccos(I \cdot n_h) \quad (2)$$

$\beta$  的余弦值  $\cos \beta$  即为定日镜的余弦效率<sup>[8-9]</sup>,如图 1a 所示。应用矢量代数运算,在计算定日镜面法线指向方向的同时即可得到镜场内每一面定日镜的余弦效率,如图 1b 所示。

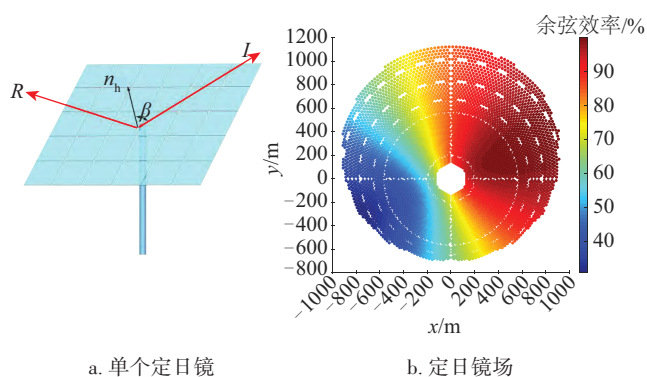


图 1 余弦效率示意

Fig. 1 Schematic diagram of cosine efficiency

### 1.3 阴影和遮挡效率的计算

由于镜场占地面积的限制,某些定日镜会出现入射或反射光线被其他定日镜遮挡的情况,其中定日镜入射光线被遮挡即发生了阴影损失,如图 2a 所示,这种情况在太阳高度角较低时尤其严重。定日镜反射光线被遮挡即发生了遮挡损失,如图 2b 所示<sup>[10]</sup>。

阴影和遮挡效率的计算较复杂,本研究采用多边形链表-光线追迹法结合计算。

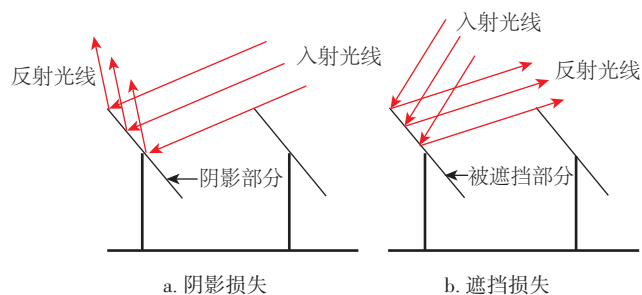


图 2 阴影遮挡效率示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shadowing and blocking efficiency

图 3 为某定日镜在给定时刻的阴影遮挡关系分析图。以目标定日镜作为投影平面,其他四面定日镜与分析定日镜

的阴影和遮挡关系如图所示,涂色区域为最终未被阴影及遮挡影响的分析定日镜区域。由图 3 可见,阴影和遮挡可能存在重叠区域,计算中已一并考虑。

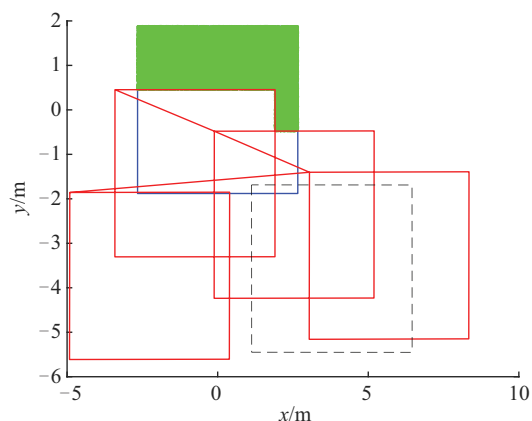


图 3 阴影遮挡关系分析

Fig. 3 Analysis of shadow and block relationship

### 1.4 截断效率的计算

截断效率是指投射到吸热器表面的太阳辐射能与定日镜反射的到达吸热器附近的总太阳辐射能之比。截断效率主要和定日镜尺寸、定日镜坐标位置、光学参数、太阳位置以及吸热器几何尺寸等参数有关,求取较为复杂。

为保证计算速度,截断效率的计算采用德国航空航天中心提出的近区定日镜场布置(short for heliostat field layout calculation, HFLCAL)计算模型,该模型采用圆形高斯通量密度函数来计算吸热器面上热流密度的分布<sup>[11-12]</sup>。当进行全场镜场单时刻详细分析时,也可采用蒙特卡洛光线追迹法计算。

### 1.5 大气衰减效率的计算

由于大气对太阳辐射存在吸收和散射,从定日镜反射到吸热器表面的过程中存在一定的损失。大气衰减效率( $\eta_{atm}$ )是用于描述太阳辐射在该传输过程中的能量效率。单面定日镜的大气衰减效率除了直接与工程所在地理位置和气候条件相关外,还与该定日镜与吸热器的相对距离有关。定日镜与吸热器之间相对距离越大,则该定日镜对应的大气透射率越低。

目前计算定日镜大气衰减效率的算法有主要有两类<sup>[13]</sup>:一类是基于美国加利福尼亚州巴斯托市实测结果的经典拟合公式,DELSOL3 和 MIRVAL 均采用上述方式;另一类是 NREL 开发的基于能见度的大气衰减效率计算方法。本文对比了不同定日镜-吸热塔距离下,经典计算方法和基于能见度计算方法的大气传输损失(1-大气衰减效率),结果如图 4 所示。

从图 4 中可见,在 4.5 km 的镜塔距离范围内,3 种计算方法得到的大气传输损失差值在 5% 以内,且基于能见度数据的大气传输损失计算结果相对于两种经典计算方法偏小,

利用经典模型的大气传输损失计算结果相对较为保守。

基于以上分析,采用基于能见度的方法计算大气衰减效率。大气能见度是指人眼能将目标物从背景中分辨出来的最远水平距离。雾、霾、雪、沙尘暴以及降水等天气现象都会对大气能见度产生影响。具体计算式如下<sup>[14]</sup>:

1)能见度 23 km,晴天:

$$\eta_{\text{att}} = 0.99326 - 0.1046S + 0.0175S^2 - 0.002845S^3 \quad (3)$$

2)能见度 5 km,阴天:

$$\eta_{\text{att}} = 0.98707 - 0.2748S + 0.003394S^2 \quad (4)$$

式中: $S$ ——定日镜中心到吸热器瞄准点的距离,km。采用式(3)计算镜场的大气衰减效率。

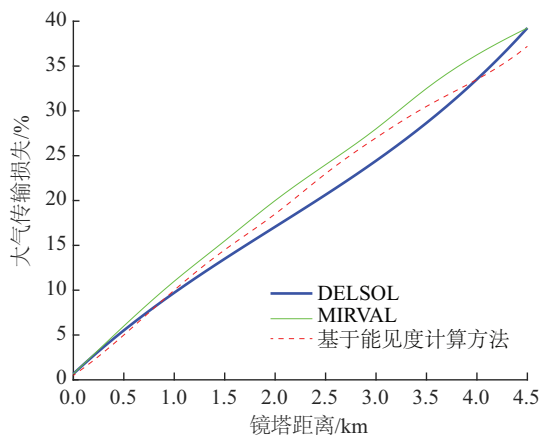


图4 经典计算方法和基于能见度计算的大气透射损失

Fig. 4 Atmospheric transmission loss based on classical calculation method and visibility based calculation method

## 1.6 镜场年均综合效率的计算

镜场的瞬时效率为各个分项效率的乘积,其计算式如下:

$$\eta_{\text{field}} = \eta_{\text{re}} \eta_{\text{ava}} \eta_{\text{cl}} \eta_{\text{cos}} \eta_{\text{spi}} \eta_{\text{att}} \eta_{\text{sh}} \eta_{\text{bl}} \quad (5)$$

式中: $\eta_{\text{re}}$ ——镜面反射率,%; $\eta_{\text{ava}}$ ——镜场可利用性(瞬时),%; $\eta_{\text{cl}}$ ——镜面清洁度,%; $\eta_{\text{cos}}$ ——余弦效率,%; $\eta_{\text{spi}}$ ——截断效率,%; $\eta_{\text{att}}$ ——大气衰减效率,%; $\eta_{\text{sh}}$ ——镜场及吸热塔阴影效率,%; $\eta_{\text{bl}}$ ——遮挡效率,%。

定日镜场的年均效率(不考虑资源权重)是全年 365 d (8760 h)每一时刻镜场瞬时效率积分与同时期各时刻积分之比<sup>[15]</sup>:

$$\eta_{\text{field,annual}} = \frac{\sum_{i=1}^{365} \int_0^{24} \eta_{\text{field}}(t) dt}{\sum_{i=1}^{365} \int_0^{24} dt} \quad (6)$$

为剔除太阳能资源条件不同对几种不同镜场布置对比结果的影响,后续研究采用的镜场年均效率不考虑 DNI 权重,采用全年典型时刻镜场瞬时效率的平均值。

计算时采用的项目地点为青海省共和县,太阳位置的计算按真太阳时 8760 h 做合理简化,如图 5 所示。

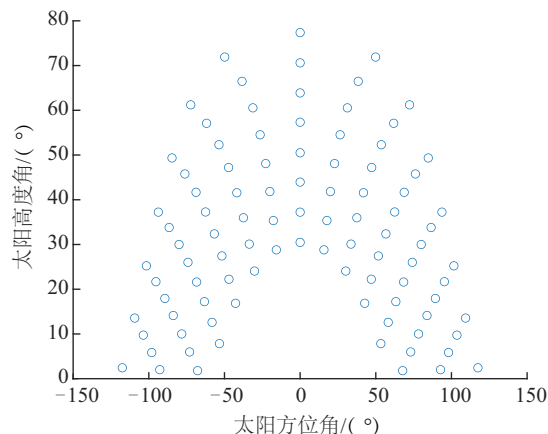


图5 计算效率时采用的太阳位置

Fig. 5 Sun position used for efficiency calculation

## 2 模型验证和研究的主要边界条件

为加快软件计算速度,将工程中常用的镜场进行等比例缩小;吸热塔北侧最远定日镜与塔的距离和塔高的比值被设置为常数;并考虑吸热塔阴影对镜场效率的影响。主要边界条件如表 1 所示。

表1 研究的主要边界条件

Table 1 Main boundary conditions of this study

| 参数                       | 数值          |
|--------------------------|-------------|
| 定日镜面积/m <sup>2</sup>     | 20          |
| 定日镜数量/台                  | 3015~3023   |
| 镜场总反射面积/m <sup>2</sup>   | 60300~60460 |
| 第一环定日镜半径/m               | 50          |
| 最大半径/m                   | 300         |
| 吸热器中心标高/m                | 60          |
| 两定日镜间空隙距离/m              | 0.45        |
| 定日镜间距最小值/m               | 7.25        |
| 镜场实际可用面积/hm <sup>2</sup> | 25.365      |

## 3 研究结果及对比分析

在 2.2 节的边界条件下,分别生成交错玉米田、圆周径向交错、Campo 型和仿生型布置下的镜场,并分别计算镜场的各项效率。

### 3.1 交错玉米田镜场布置

交错玉米田布置的定日镜数量为 3018 面,实际镜地面积比为 46.38%,镜场年均阴影遮挡效率为 82.88%,镜场年均余弦效率为 75.43%,镜场年均综合效率为 55.18%,如图 6a~图 6c 所示。

### 3.2 圆周径向交错布置

圆周径向交错布置的定日镜数量为 3023 面,实际镜地

面积比为 23.21%,镜场年均阴影遮挡效率为 94.08%,镜场年均余弦效率为 74.25%,镜场年均综合效率为 61.32%,如图 6d~图 6f 所示。

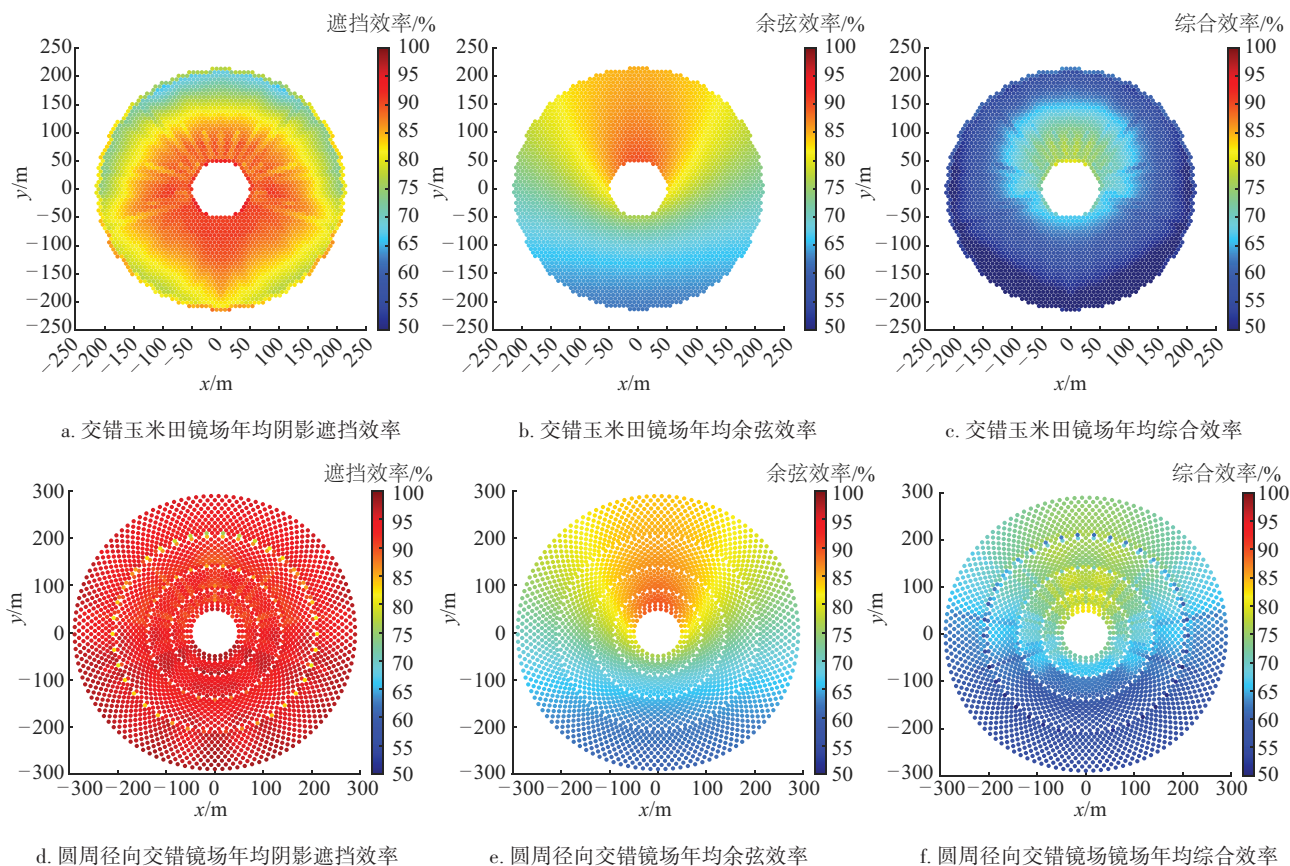


图6 交错玉米田和圆周径向交错镜场各项效率分布

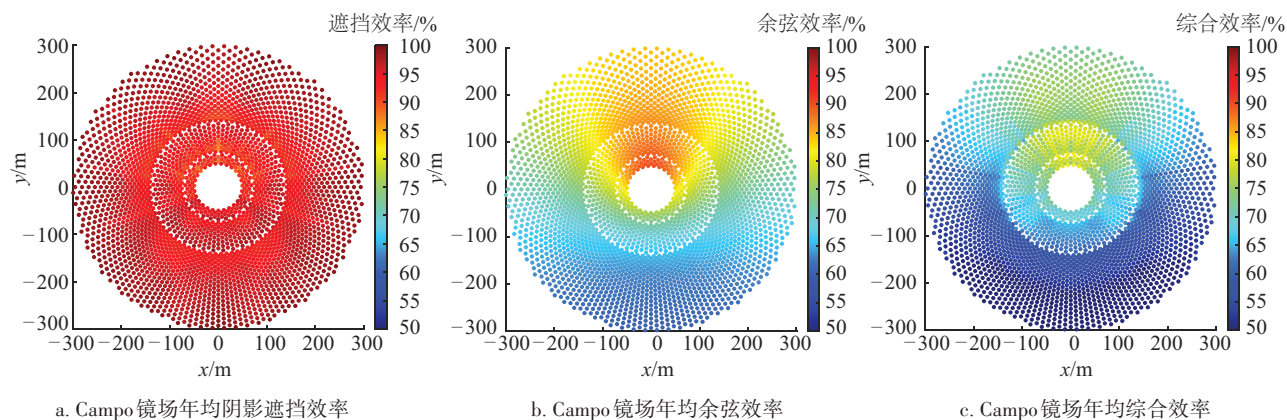
Fig. 6 Distribution of various efficiency in radial cornfield layout and radial staggered layout

### 3.3 Campo 镜场布置

Campo 镜场布置<sup>[16]</sup>的定日镜数量为 3016 面,实际镜地面积比为 23.16%,镜场年均阴影遮挡效率为 90.60%,镜场年均余弦效率为 73.48%,镜场年均综合效率为 58.22%,如图 7a~图 7c 所示。

### 3.4 仿生型镜场

仿生型镜场布置<sup>[17]</sup>的定日镜数量为 3015 面,实际镜地面积比为 23.15%,镜场年均阴影遮挡效率为 93.58%,镜场年均余弦效率为 74.32%,镜场年均综合效率为 61.15%,如图 7d~图 7f 所示。



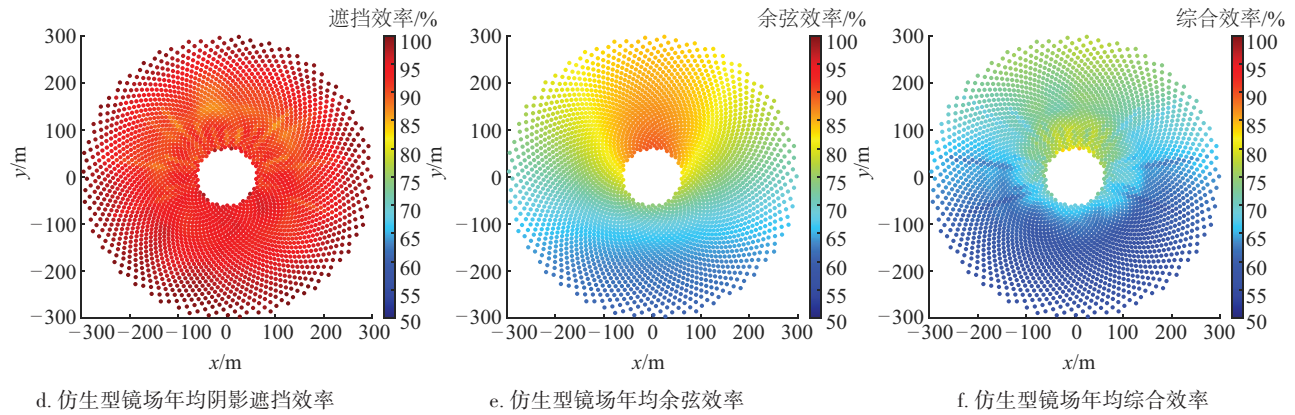


图7 Campo和仿生型镜场各项效率分布图

Fig. 7 Distribution of various efficiency in Campo layout and bio-mimetic layout

### 3.5 对比分析

4类镜场的各项参数对比如表2所示。

表2 4类镜场各项参数对比

Table 2 Comparison of various parameters of 4 types of heliostat layout

| 参数         | 交错玉米田镜场 | 圆周径向交错镜场 | Campo镜场 | 仿生型镜场 |
|------------|---------|----------|---------|-------|
| 定日镜数量      | 3018    | 3023     | 3016    | 3015  |
| 实际镜地面积比/%  | 46.38   | 23.21    | 23.16   | 23.15 |
| 年均阴影遮挡效率/% | 82.88   | 94.08    | 90.60   | 93.58 |
| 年均余弦效率/%   | 75.43   | 74.25    | 73.48   | 74.32 |
| 大气衰减效率/%   | 97.48   | 97.10    | 97.10   | 97.15 |
| 截断效率/%     | 96.32   | 96.18    | 95.81   | 96.28 |
| 年均综合效率/%   | 55.18   | 61.32    | 58.22   | 61.15 |

## 4 结 论

在定日镜数量、尺寸、塔高和镜场可用面积等镜场参数基本相等时,4类镜场的大气衰减效率和截断效率值相近。圆周径向交错布置方法易实现较低的遮挡损失,在遮挡损失起明显主导作用的远端镜场具有显著优势,具有最高的年均综合效率。交错玉米田镜场年均余弦效率最高,在镜场较小时,遮挡损失较小的近端镜场具有优势。仿生型镜场各方面较均衡。Campo镜场占地面积过大,当边界条件与其他布置方式一致时,无明显优势。

### [参考文献]

[1] 李美成,高中亮,王龙泽,等.“双碳”目标下我国太阳能利用技术的发展现状与展望[J].太阳能,2021(11):13-18.  
LI M C, GAO Z L, WANG L Z, et al. Development status and prospect of solar energy utilization technology in China under goal of emission peak and carbon neutrality [J]. Solar energy, 2021(11): 13-18.

[2] 汪硕承,谢开贵,胡博,等.含光热电站的多能源系统混合储能容量优化配置[J].分布式能源,2019,4(5):58-66.  
WANG S C, XIE K G, HU B, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage capacity in multi-energy system with CSP integration[J]. Distributed energy, 2019, 4(5): 58-66.  
[3] 顾煜炯,耿直,张晨,等.聚光太阳能热发电系统关键技术研究综述[J].热力发电,2017,46(6):6-13.  
GU Y J, GENG Z, ZHANG C, et al. Review on key technologies of concentrating solar thermal power generation systems [J]. Thermal power generation, 2017, 46(6): 6-13.  
[4] 王志峰.太阳能热发电站设计[M].北京:化学工业出版社,2014.  
WANG Z F. Design of solar thermal power station [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.  
[5] RIZVI A A, DANISH S N, EL-LEATHY A, et al. A review and classification of layouts and optimization techniques used in design of heliostat fields in solar central

- receiver systems[J]. *Solar energy*, 2021, 218: 296-311.
- [6] GRENA R. An algorithm for the computation of the solar position[J]. *Solar energy*, 2008, 82(5): 462-470.
- [7] 房森森, 逯静, 姜奕雯. 定日镜能量传输效率建模及镜场排布设计[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(1): 112-116.
- FANG M S, LU J, JIANG Y W. Heliostat energy efficiency modeling and field layout design[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(1): 112-116.
- [8] GHIRARDI E, BRUMANA G, FRANCHINI G, et al. Heliostat layout optimization for load-following solar tower plants[J]. *Renewable energy*, 2021, 168: 393-405.
- [9] 高博, 孙浩, 刘盛. 基于改进鲸鱼算法的太阳能热发电站镜场优化布置[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(10): 209-217.
- GAO B, SUN H, LIU S. Heliostat field layout optimization of solar tower power station based on improved whale algorithm[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(10): 209-217.
- [10] 程小龙, 尹延国, 马少波. 塔式电站定日镜场布局的优化设计研究[J]. *能源与环境*, 2018(2): 64-66, 70.
- CHENG X L, YIN Y G, MA S B. Study on optimal design of heliostat field layout in tower power station [J]. *Energy and environment*, 2018(2): 64-66, 70.
- [11] COLLADO F J. One-point fitting of the flux density produced by a heliostat [J]. *Solar energy*, 2010, 84(4): 673-684.
- [12] HE C T, ZHAO Y H, FENG J Q. An improved flux density distribution model for a flat heliostat (iHFLCAL) compared with HFLCAL[J]. *Energy*, 2019, 189: 116239.
- [13] 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: 合肥工业大学, 2018.
- CHENG X L. Research on optimal design of mirror field layout of tower power station based on optical efficiency [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [14] BERENGUEL M, RUBIO F R, VALVERDE A, et al. An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant[J]. *Solar energy*, 2004, 76(5): 563-575.
- [15] 高博, 刘建兴, 孙浩, 等. 基于自适应引力搜索算法的定日镜场优化布置[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 119-125.
- GAO B, LIU J X, SUN H, et al. Optimization of a heliostat field layout using adaptive gravity search algorithm[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(10): 119-125.
- [15] 高博, 刘建兴, 孙浩, 等. 基于自适应引力搜索算法的定日镜场优化布置[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 119-125.
- GAO B, LIU J X, SUN H, et al. Optimization of heliostat field layout based on adaptive gravity search algorithm[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(10): 119-125.
- [16] COLLADO F J, GUALLAR J. Campo: Generation of regular heliostat fields[J]. *Renewable energy*, 2012, 46: 49-59.
- [17] NOONE C J, TORRILHON M, MITSOS A. Heliostat field optimization: a new computationally efficient model and biomimetic layout [J]. *Solar energy*, 2012, 86(2): 792-803.

## SUB-ITEM EFFICIENCY RESEARCH ON LAYOUT METHODS OF DIFFERENT HELIOSTAT FIELD FOR SOLAR THERMAL POWER TOWER STATIONS

Zhou Zhi, Zhang Siyuan, Yang Genben, Gao Zhenxin

(PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** This study used self-developed heliostat field efficiency analysis software to calculate and compare the annual cosine efficiency, shadowing and blocking efficiency, atmospheric attenuation efficiency, interception efficiency, and comprehensive efficiency of 4 types of heliostat fields: radial cornfield, radial staggered, Campo-type, and bio-mimetic type. The calculation results show that when the number and size of heliostats, tower height, and available area of heliostat field are basically equal, the shadowing and blocking loss of radial staggered layout is the smallest, and it has a significant advantage in the remote heliostat field; The annual cosine efficiency of the radial cornfield heliostat field is the highest, and it has a significant advantage in the near field heliostat field; The bio-mimetic heliostat fields have certain advantages in the mid-range due to their tendency to form higher densities; The Campo-type heliostat field has no significant advantages in all aspects.

**Keywords:** solar power tower generation; heliostat field; optical efficiency; ray tracing; sun position; dynamic simulation