

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.008

# 塔式光热电站集热场设计综述及经济性研究

李心<sup>1,✉</sup>, 许粲羚<sup>2</sup>, 纪培栋<sup>1</sup>, 肖刚<sup>3</sup>, 章涵<sup>1</sup>, 金建祥<sup>1,4</sup>

(1. 浙江中光新能源科技有限公司, 杭州 310018; 2. 中国能源建设集团规划设计有限公司, 北京 100120;  
3. 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027; 4. 浙江中控太阳能技术有限公司, 杭州 3100538)

**摘要:** [目的] 为系统性梳理塔式光热电站集热场设计的内容, 评估集热场设计对电站经济性的影响, 对集热场设计进行综述介绍, 提出了塔式光热电站集热场设计的基本思路, 分析了影响集热场效率的因素并进行经济性研究。[方法] 将集热场设计分为吸热塔位置和高度设计、定日镜布置设计及集热场道路设计这三部分内容分别介绍, 采用对集热场效率的构成子效率进行分解的方法, 并以影响集热场经济性的主要两个设计因素为重点开展研究。[结果] 提炼了集热场设计需考虑的多种因素, 总结列出提升集热场子效率的各因素设计结论, 提出在目前工程条件下集热场规模越大光热电站经济性越好, 得到定日镜布局疏密对经济性的影响结论。[结论] 所提出的结论指导意义强, 为塔式光热电站设计提供借鉴。

**关键词:** 塔式光热电站; 集热场设计; 定日镜场设计; 经济性研究

中图分类号: TK519; TM615

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)02-0051-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Review and Economic Research on Solar Field Design of Solar Tower Plants

LI Xin<sup>1,✉</sup>, XU Canling<sup>2</sup>, JI Peidong<sup>1</sup>, XIAO Gang<sup>3</sup>, ZHANG Han<sup>1</sup>, JIN Jianxiang<sup>1,4</sup>

(1. Zhejiang Helios New Energy Co., Ltd., Hangzhou, 310018, China; 2. China Energy Engineering Group Planning & Engineering Co., Ltd., Beijing, 100120, China; 3. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China; 4. Zhejiang Supcon Solar Technology Co., Ltd., Hangzhou, 310053, China)

**Abstract:** [Introduction] The paper aims to sort out the contents of the design of solar field of the solar tower plant systematically and to evaluate the impact of solar field design on the economy of the plant. The solar field design is summarized and introduced. The factors affecting solar field efficiency is analyzed and the economic research is conducted. [Method] The design of the collector field was divided into three parts: design of the position and height of the receiver, design of the heliostat layout and design of the road in solar field. The method of decomposing the sub efficiencies of solar field efficiency was adopted and the research was focused on the two main design factors that affect the economy of the solar field. [Result] In this paper, several factors that need to be considered in the design of solar field are summarized and the design conclusions of various factors to improve the efficiency of solar field are listed. Under the current engineering conditions, the larger solar field results in a better the economy of the plant. The influence of the density of the heliostat layout on the economy is obtained. [Conclusion] The conclusions are of great guiding significance and can be used for reference in the design of solar tower plant.

**Key words:** solar tower plant; solar field design; heliostat field design; economic research

## 0 引言

随着国家能源局公布首批20个太阳能光热发电示范项目的启动, 中国光热行业正式起步发展。截至2018年底, 首批20个光热示范项目已并网发电3座, 其中2座塔式电站1座槽式电站; 预计2019年内将有4座塔式光热电站、1座槽式光热电站和1座

收稿日期: 2019-12-20 修回日期: 2020-03-06

基金项目: 浙江省杰出青年基金“基于复合金属氧化物可逆热化学反应的高温储热基础研究”(LR20E060001); 国家自然科学基金项目“基于冲击射流太阳能气体集热的高温化学储热与防护耦合机制”(No. 51776186); 国家标准《塔式太阳能光热发电站设计标准》(GB/T 51307—2018)

线性菲涅耳式光热电站并网发电,投产电站总数量达9座,其中塔式电站6座,成为最主流的技术路线。在塔式电站的设计标准方面,近年来在国内外均有所建树。2018年12月由中国电力企业联合会与中国能源建设有限公司工程研究院联合主编的《塔式太阳能光热发电站设计标准》正式实施,该标准是我国同时也是国际上第一部关于太阳能光热发电站设计的综合性技术标准,为我国塔式太阳能光热发电站设计提供了依据。IEC标准《塔式太阳能光热发电站设计总体要求》(PT62862-4-1)于2017年正式立项,该国际标准由中国主导编制,西班牙、德国、葡萄牙、摩洛哥等国专家均有参加。

集热场是塔式太阳能光热发电区别于其他光热技术路线的重要子系统,也是塔式光热设计中最特殊的环节。集热场是将太阳能聚集并转化为热能的区域,对塔式光热发电站来说,集热场由定日镜场和吸热塔组成。定日镜场是由多台定日镜组成将太阳辐射聚集至吸热装置的区域,它包含了大量的、具有双轴跟踪系统的、按一定方式布置的定日镜以及镜场控制系统。在塔式光热电站定日镜场运行时,定日镜场中每台定日镜实时跟踪太阳位置,将太阳光辐射能反射至位于定日镜场中或边缘的吸热塔顶部的吸热器上,加热流经吸热器内的工作介质,实现光能向热能的转化,以达到收集太阳辐射能的目的。对于50 MW级及以上装机规模的塔式光热电站,定日镜场成本占电站总投资的50%以上,是塔式光热电站最大的成本构成<sup>[1-4]</sup>。因此,在满足电站整体工艺要求和集热量要求的条件下,通过合理的定日镜场优化设计,可有效地提高定日镜场效率,从而在同等集热量条件下,减少定日镜数量、降低定日镜场投资,起到降低塔式光热电站总投资、提高电站经济效益的作用。

本文提出了塔式太阳能光热电站集热场设计的基本思路 and 需要考虑的因素,分析了影响集热场效率的因素并结合各因素变化对经济性的影响展开研究,为塔式光热电站工程设计提供借鉴。

## 1 集热场设计的基本思路和内容

### 1.1 集热场设计的基本思路

塔式太阳能光热发电站的集热场设计需要确定站址光资源、气象环境及土地等各项边界条件,以

实现电站集热量或发电量要求为目标,通过仿真计算和技术经济比选最终确定定日镜场中定日镜的数量、布局及吸热塔的位置和高度。

集热场设计遵循以下基本思路:

1) 充分考虑各类资源及边界条件,保证集热场设计的有效性和可行性。集热场设计时需要充分考虑该电站的光资源条件、湿度风速等气象信息、空气洁净度、站址纬度、海拔、土地面积、形状及地形地貌等情况,调研并获取尽量真实准确的数据以作为集热场设计的输入参数,保证集热场的设计结果有效,且在实际的条件下可行。

2) 通过综合技术经济比选,以电站经济性最优为原则。定日镜场设计时需对定日镜间距、吸热塔高度等进行优化,优化的目标和原则是使电站的综合度电成本最低、经济性最优。

3) 兼顾考虑集热场的设备选型及发电区布置。集热场中的定日镜场是塔式光热电站中占地面积最大的区域,并且一般分布位于发电区的四周,因此定日镜场的设计需兼顾考虑定日镜、吸热器、镜面清洗系统的选型,同时也需兼顾与发电区和电力系统出线设计相匹配。

### 1.2 集热场设计内容

在开展定日镜场设计时,需要获取站址所在地的地理位置、海拔高度、土地、太阳能资源和当地气温、风速等气象数据,以确定定日镜场设计的各项边界条件。对于已确定选址的光热电站,其纬度信息为主要输入参数,是吸热塔高度设计、定日镜位置布局、定日镜余弦效率及遮挡和阴影率计算的基础。对于尚未确定选址的光热电站,一般来说站址纬度越低,定日镜余弦效率越高、同等吸热塔高度条件下定日镜数量也越少,有利于提升光热电站的整体经济性。在其他因素差异不大的条件下,优先选取纬度低的地区作为光热电站选址点。

在获取定日镜场设计的边界条件和各输入因素后,即可开展定日镜场设计,确定吸热塔高度、位置及定日镜场布置,并计算定日镜场效率。初步确定定日镜场设计参数后,再验证定日镜场输出热功率是否满足吸热器热功率要求,以及验证吸热器年集热量、年发电量是否满足设计要求。

### 1.3 吸热塔位置及高度设计

定日镜场的设计与定日镜场效率紧密相关,吸

热塔的位置和高度对定日镜余弦效率、遮挡和阴影效率以及大气透射率有一定的关系。

吸热塔的位置与定日镜余弦效率紧密相关。位于北半球,尤其是在北回归线以北的塔式光热电站,太阳大部分时间或全部时间在定日镜场南侧,吸热塔以北的定日镜场余弦效率远高于吸热塔南边的定日镜场。因此,吸热塔位置处于定日镜场南部,即北定日镜场定日镜数量高于南定日镜场时,有助于北半球塔式光热电站余弦效率的提升。同理,对于南半球塔式光热电站,南定日镜场的定日镜数量高于北镜场时,将提升塔式光热电站余弦效率。

吸热塔的位置与遮挡和阴影效率也有一定关系,但遮挡和阴影效率更多地受镜场布置影响。与余弦效率相反,吸热塔南部的定日镜遮挡和阴影效率高于吸热塔北镜场。综合考虑余弦效率以及遮挡和阴影效率的影响,北半球塔式光热电站北镜场的定日镜场效率仍高于南镜场。因此对于北半球的塔式光热电站,吸热塔的位置处于定日镜场中部偏南的位置,有利于定日镜场效率的提升。同时考虑到吸热器的均匀性要求,对于我国西北北纬 $36^{\circ}\sim 43^{\circ}$ 地区北镜场和南镜场定日镜数量比例一般选取6:4至7:3左右的比例。

吸热塔高度对余弦效率、遮挡和阴影效率都有较大的影响,增加塔高对同时提升余弦效率、遮挡和阴影效率都有影响,从而可以显著提升定日镜场效率。规模越大的塔式光热电站,与吸热塔距离远的定日镜数量比例越多,余弦效率和遮挡和阴影效率越低,吸热塔高度增加对定日镜场效率的提升效果越明显。因此,一般地装机规模越大、储能时长越长、定日镜数量越多的塔式光热电站,吸热塔需要设计更高的高度。

然而,吸热塔高度越高,将增加吸热塔成本,熔盐泵扬程与成本以及熔岩泵的能耗,因此塔式光热电站的吸热塔高度设计往往综合考虑定日镜场效率与吸热塔成本综合技术经济比选后确定。表1是已商业化运行的国内外塔式光热电站的装机容量与吸热塔高度对比,基本符合装机容量越大、储能时长越长,吸热塔高度越高的规律。如表1所示,目前国内外塔式光热电站吸热塔最高设计高度约为260 m。

表1 塔式光热项目装机容量与吸热塔高度

Tab. 1 Capacities and receiver tower heights of global tower power plants under operation

| 项目名称            | 装机容量/MW | 储能时长/h | 塔高/m |
|-----------------|---------|--------|------|
| Crescent Dunes  | 110     | 10     | 164  |
| Ivanpah SEGS    | 392     | —      | 137  |
| Sierra SunTower | 5       | —      | 55   |
| PS 10           | 11      | —      | 115  |
| PS 20           | 20      | —      | 165  |
| Gemasolar       | 20      | 15     | 140  |
| 青海德令哈50 MW 电站   | 50      | 7      | 200  |
| 甘肃敦煌100 MW 电站   | 100     | 10     | 260  |
| Ashalim CSP     | 121     | —      | 243  |
| 青海格尔木50 MW 电站   | 50      | 12     | 188  |
| 青海共和50 MW 电站    | 50      | 6      | 228  |

#### 1.4 集热场道路布置

集热场道路即定日镜场中的道路,其布置需要综合考虑定日镜安装、设备运输、维修及清洗车辆通行的要求,在满足上述要求的条件下,尽量减小道路长度和宽度,以实现节省土地和降低道路土建施工量的优化目标。集热场道路布置的具体设计包括以下内容:

1) 集热场道路布置需要考虑吸热器、传热、储换热系统及发电区设备的维护检修。由于吸热器、传热、储换热系统发电区均位于定日镜场包围的中央区域,因此集热场中的道路也需要考虑到上述系统中各设备的运输、安装、检修和消防安全通行空间。

2) 考虑定日镜的安装、维修和清洗,集热场道路需要在定日镜场中设置若干条环形道路,道路需要覆盖到全部定日镜。

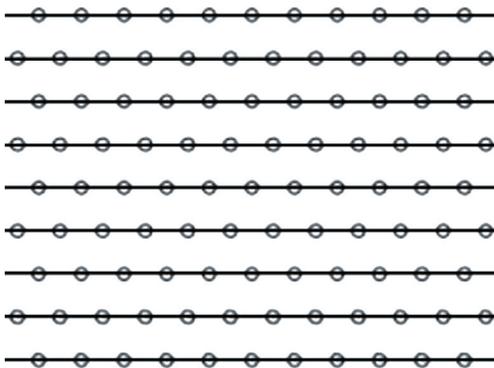
3) 考虑吸热塔、传热、储换热系统及发电区大型设备的安装、运输以及电力系统出线,需要设置一条由发电区通向与城镇现有公路相连接的主通道道路,该道路需要尽量短捷,以降低成本。

#### 1.5 定日镜场布置方式

自1950年原苏联设计建设了世界上第一座小型塔式太阳能热发电试验电站以来,国际上已有多个国家也在设计、开发塔式光热电站。从已建成电站的镜场设计来看,定日镜的布置具有较强的规律性。目前国内外主要的定日镜场布置采用直线型阵列式布置和圆形布置两种方式。以青海中控太阳能德令哈10 MW塔式光热电站、美国Sierra Sun Tow-

er等电站为代表的塔式光热电站采用定日镜场直线型设计方法；以西班牙 Gemasolar 电站、美国 Crescent Dunes 等电站为代表的塔式光热电站采用定日镜场圆形布置方式。

如图1所示，直线型阵列式布局定日镜场的布置相对比较简单，其特点是定日镜在多条平行直线上进行排布。每行上的定日镜位于同一条直线上，相邻行之间的定日镜东西方向交错布局，不同行之间的行间距相等或者不完全相等，同一行上的定日镜间距相等。直线型布局的优点是，可以尽量高地运用土地面积，镜地密度（定日镜总采光面积占定日镜场总占地面积比例）可高达48%。然而，直线型布局的镜场阴影遮挡损失也会相对比较大，特别是距离吸热塔较远的东西两个角落区域，定日镜之间的交错对减小阴影遮挡的效果并不明显。综上所述，在定日镜场规模较小，或土地面积限制较大时，一般可以采用直线型阵列式布局。



注：小圆圈代表定日镜。

图1 直线型阵列式定日镜场布局示意图

Fig. 1 Schematic diagram of linear type layout of heliostats

与直线型阵列式布局不同的是，圆形布局几乎每一面定日镜都处于交错状态。这样定日镜场圆形布局可以比较好地解决直线型布局东西两侧阴影遮挡损失高的问题。圆形布局的特点是定日镜按照以吸热塔为圆心的同心圆环排布，相邻圆环之间的定日镜按照半径方向交错排布；圆形布局按分区布置，同一区域的径向间距相等，镜环上的定日镜数目相等；不同区域圆环上的定日镜数目随着区域与塔的距离的增加而增加。圆形布局虽然在一定范围内使东西两侧的阴影遮挡损失不至于太严重，提高了定日镜场的效率，但是随着镜塔距离的不断增加，若相间镜环之间定日镜距离仍保持不变，其阴影遮挡效率同样比较低。

为解决圆形定日镜场布置时距离吸热塔较远的定日镜阴影遮挡效率低的问题，有几种对普通圆形定日镜场布局进行改进的布置方式被提出。最常见的为辐射网格布置，最初是由美国休斯敦大学的 Lipps 和 Vant-Hull 提出的，其优点是避免了定日镜处对相邻后环上定日镜的反射光线正前方而造成的光学阻挡<sup>[5-6]</sup>。如图2所示，在圆形定日镜场辐射网格布置中，定日镜被安装在距离吸热塔不同距离的圆环上，称为镜环。距离吸热塔最近的第一个镜环为基本环，其半径与吸热塔的高度有关，其他环的半径则根据与相邻镜环之间的径向间距的大小来确定，而同一环上相邻定日镜之间的距离由周向间距的大小来确定。环之间的最小径向间距需要保证相邻镜环上的相邻定日镜之间不发生碰撞；镜环之间的最大径向间距需要考虑减小定日镜对其后方定日镜反射光线的遮挡损失，但间距的增加会增加定日镜场占地面积；镜环上最小周向间距需要保证镜环上相邻定日镜之间不发生机械碰撞；镜环上最大周向间距需要考虑减小镜环上相邻定日镜对其后一镜环上定日镜反射光线的遮挡损失，但间距的增加会增加定日镜场占地面积。由于辐射网格布置的圆形定日镜场镜环间距以及镜环内定日镜间距可以根据不同边界条件要求进行调节，在土地利用率和镜场效率之间实现灵活设计达到平衡，因此是国内外20 MW级规模及以上塔式光热电站定日镜场设计中最多采用的定日镜场布置方式。

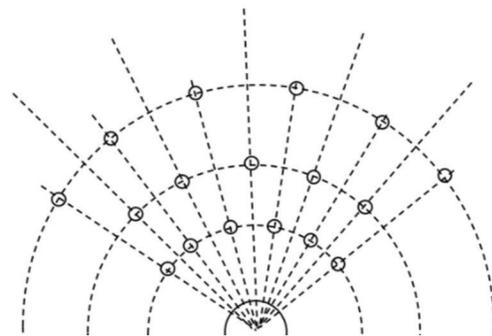


图2 辐射网格状的圆形定日镜场布置示意图,其中小圆圈代表定日镜

Fig. 2 Schematic diagram of radiative circle-type layout of heliostat

另外，Francisco J. Collado 等<sup>[7-8]</sup>提出了一种新型 Campo 定日镜场设计方法。Campo 布置是一种类圆形布置，定日镜场布置由南至北定日镜环向间距

逐渐变大。该布置方法适当地增加远距离定日镜在北镜场镜环之间的距离。由于在北半球南镜场的遮挡和阴影效率相对高很多, Campo布置的定日镜场还适当地(保证定日镜之间相互不碰撞的安全距离下)减小南镜场中远距离定日镜镜环之间的距离。Campo布局定日镜场的优点是有效地解决了圆形布局镜场远距离定日镜的阴影遮挡损失较严重的问题。且由于它适当地减小南镜场镜环之间的距离,不但增加了南镜场的余弦效率,也有利于定日镜场的土地利用率的提高。不过, Campo布置的定日镜场仍然无法解决区域变化时,由定日镜数目骤增引起的局部区域阴影遮挡损失的增加。

近年来一些新的定日镜场布局方式也被提出。Corey J. Noone等<sup>[9]</sup>提出的一种新型仿生型定日镜场布置方式,定日镜采用螺旋线型布置。仿生型定日镜场布局的特点是定日镜均位于仿生型螺旋线之上,并以黄金分割角确定每个定日镜的方位。针对Campo镜场布局区域变化处局部定日镜的阴影遮挡损失较严重的问题,仿生型定日镜场布局可以使定日镜的镜地密度几乎是连续的减小,即相同土地面积上的定日镜随着镜塔距离的增加,逐渐连续地减少,从而降低距离吸热塔距离较远的定日镜的阴影遮挡损失。

定日镜场间距和布置方式的选择,本质上是阴影遮挡损失和土地利用率间的平衡。尤其随着定日镜场规模的增加,对于距离吸热塔更远的定日镜,更大的占地空间,会带来更少的阴影遮挡和更高的定日镜场效率。

然而,定日镜场布置不仅影响土地面积和定日镜场效率,对定日镜施工、维护及运营期内的定日镜清洗都有较大的影响。一般来说,定日镜场布置越复杂,施工及清洗设备的操作复杂度越高,受清洗设备影响的定日镜安全系数就越低(更易因清洗设备导致镜面破损)。上述几种定日镜场布局方式中,清洗设备影响对定日镜的安全系数由高向低排序如下:直线型阵列布局、辐射网格状圆形布局、Campo圆形布局、仿生型布局。

对于Campo布局的圆形镜场,由于南北定日镜场相邻镜环间距由北向南是逐渐较小的,对于在其中工作的镜面清洗设备来说,不同的定日镜场位置要求清洗车辆的行驶距离不同,不利于标准化操作,对清洗车驾驶员操作要求高,不利于定日镜的

安全。仿生型布局镜场,镜场中根本不存在很规则直线型或环形的清洗路线可供清洗设备通行,清洗存在很大的困难。因此,由于定日镜的安装施工和清洗都需要定点定位操作,而仿生型布局和Campo布局中定日镜的排布和间距不规律,定位可行性差,它们的布局方式给定日镜施工和维护造成了极大的不便。出于上述原因,目前国内外均未有采用这两种定日镜场布局方法的塔式光热电站。

实际工程中,定日镜场设计方法不能只停留在理论分析上,必须兼顾项目的实际工程和运营维护。

## 2 集热场效率分析

### 2.1 概述

集热场设计与定日镜场的效率紧密相关,定日镜布局、吸热塔高度等各种设计参数都对定日镜场效率有影响,而定日镜场效率又是定日镜数量的计算依据,因此在集热场设计时需要重点考虑定日镜场的效率,以及不同边界条件下不同输入变量对定日镜效率的影响<sup>[10-11]</sup>。

集热场的效率指传热工质从集热场中获得的总能量与入射在定日镜场采光口面积上的太阳法向直接总辐射量之比,由定日镜场效率和吸热器效率构成。

定日镜场效率,指经定日镜场反射至吸热器采光面的太阳辐射能与入射至定日镜场采光面积上总法向直射太阳辐射能之比。它可以是某一时刻的定日镜场瞬时效率(如设计点时刻),也可以是某一个时段内的平均效率(如年均效率)。由于定日镜场效率是与太阳高度角紧密相关的,而太阳高度角在不同纬度、不同季节、不同时刻都不同,因此一个确定位置光热电站的定日镜场效率随着季节的变化而变化,并不是一个恒定不变的值。在确定了单个定日镜面采光面积、定日镜总数量、太阳直接辐射量后,定日镜场效率 $\eta_{\text{field}}$ 与定日镜场的输出热功率 $E_{\text{field}}$ , kW成正比,如下列公式计算所示:

$$E_{\text{field}} = A_m \cdot N_m \cdot \text{DNI} \cdot \eta_{\text{field}} \quad (1)$$

式中: $A_m$ 为单个定日镜面采光面积( $\text{m}^2$ ); $N_m$ 为定日镜总数量(个);DNI为单位面积太阳直接辐射( $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ )。理论上,定日镜场效率 $\eta_{\text{field}}$ 由以下效率相乘而得:

$$\eta_{\text{field}} = \eta_{\text{sb}} \cdot \eta_{\text{cos}} \cdot \eta_{\text{att}} \cdot \eta_{\text{trunc}} \cdot \eta_{\text{clin}} \cdot \eta_{\text{ref}} \quad (2)$$

式中： $\eta_{sb}$ 为遮挡和阴影率； $\eta_{cos}$ 为定日镜余弦效率； $\eta_{at}$ 为大气透射率（等于1—大气衰减率）； $\eta_{unc}$ 为吸热器截断效率（等于1—吸热器溢出率）； $\eta_{cln}$ 为定日镜镜面清洁度； $\eta_{ref}$ 为定日镜镜面反射率。

其中定日镜余弦效率与电站所在站址纬度、吸热塔高度和定日镜与吸热塔位置有关，外部边界条件为站址纬度；遮挡和阴影率与吸热塔高度和定日镜间距与布局有关；大气透射率与空气洁净度、湿度、风速、海拔等外部边界条件有关，它也与定日镜到吸热塔距离有关；镜面反射率与定日镜设备选型参数有关，可视为固定值；定日镜镜面清洁度与空气洁净度、降雨量以及采用的清洗方案有关；吸热器截断效率与吸热器尺寸、定日镜场布局和控制技术有关。

此外，一般来说海拔越高，空气越通透，大气透射率越高；空气洁净度越高、湿度越低，大气透射率也越高。因此，在其他因素差异不大的条件下，优先选取空气通透度高、湿度低、空气洁净度高的地区作为光热电站选址点。对于我国高原高海拔、空气稀薄的西北地区可根据电站装机规模取大气透射率90%~93%；对于我国海拔高度低于2000m的西北地区，大气透射率一般低于高海拔地区。

定日镜场设计时，还需重点考虑镜定日镜镜面反射率与镜面洁净度对定日镜场效率的影响。其中镜面反射率的取值可参照反射镜出厂时的测试值。一般地，目前国内外主流镀银反射镜厂商提供的镜面反射率为92%~94%，且在光热电站发电的全寿命周期内不会衰减。因此该输入因素可根据具体设备选型情况而确定为某一固定值。定日镜镜面清洁度的取值需根据当地实际空气清洁度、环境（如沙尘、露水、积雪等）及镜面清洗策略进行综合评估。我国西北地区风沙较大，根据实际对比，清洁度水平不如国外如美国加州、西班牙塞维利亚等地区的光热电站。一般地，在现有镜面清洗策略和技术条件下，在我国西北地区定日镜镜面清洁度值选取85%~90%，而上述国外地区的光热电站则可选取高于90%的数值作为镜面清洁度设计值，如国外有项目选择97%作为年均清洁度设计值。

吸热器效率是指单位时间内，吸热器内传热介质获得的总能量与进入吸热器采光口上总能量之比。造成吸热器热损失的主要是吸热器表面反射损

失和吸热器散热损失。为了减少吸热器表面损失，吸热器管屏表面一般会喷涂在各个波段吸收率高的黑体涂层材料。吸热器散热主要包括对流散热和辐射散热两类，对流散热与风速密切相关，辐射散热则与环境温度有关。目前国内外吸热器设计效率值一般为85%~92%。

## 2.2 定日镜场效率的影响因素

### 2.2.1 定日镜余弦效率

余弦损失是由于太阳光入射光线方向与镜面采光口法线方向不平行引起的接收能量的减少。余弦效率大小与定日镜表面法线方向和太阳入射光线之间夹角的余弦成正比，余弦效率=1—余弦损失。余弦损失的大小与太阳能接收的时间、定日镜的位置、吸热器的位置和镜场选址地理纬度有关。随着纬度的升高，余弦效率的峰值区逐渐往北偏移。

镜场规模越大，整个定日镜场的余弦效率越低；吸热塔越高，定日镜场的余弦效率越高。

### 2.2.2 遮挡和阴影效率

遮挡和阴影效率=1—阴影遮挡损失。阴影遮挡损失包括阴影损失和遮挡损失。阴影损失指被其他定日镜或吸热塔遮挡使得太阳直接辐射无法到达该定日镜的采光面上而造成的能量减少；遮挡损失指定日镜的反射光线投射到目标靶（吸热器）之前被相邻定日镜遮挡造成的能量减少。

阴影和遮挡损失的大小与太阳的位置、定日镜的位置、吸热器的位置、吸热塔高度有关，通过定日镜沿太阳入射光线方向或沿吸热塔上吸热器反射光线方向上，在相邻定日镜上的投影来进行计算。一般可通过调整相邻定日镜之间的间距，尤其是距离吸热塔前后定日镜的距离，来减小定日镜相互之间所造成的阴影和遮挡损失。

### 2.2.3 大气透射率

大气透射率与太阳能传输损失的和为1。太阳能传输损失指由于大气对太阳辐射的吸收和散射带来的太阳辐射传输损失。太阳能传输损失通常与当地海拔高度以及空气清洁度（如灰尘、湿气、二氧化碳的含量等）引起吸收率的变化有关。当气象及环境条件一定时，太阳能传输损失与定日镜与吸热器的距离有关，定日镜距吸热器越远，太阳能传输损失越大。因此镜场的规模越大，大气透射率越低。一般地，100 MW项目比50 MW项目的大气透

射率低3个百分点。

#### 2.2.4 吸热器截断效率

吸热器截断效率=1-吸热器溢出损失率。吸热器溢出损失指由定日镜反射但没有到达吸热器吸热面的能量(去除遮挡损失)。溢出损失与定日镜光斑形状和大小、定日镜的跟踪误差、吸热器受光面大小等因素有关。

#### 2.3 土地对定日镜场效率的影响

在上述影响定日镜场效率的各项因素中,土地因素是值得重点关注的。电站土地的面积和形状直接对定日镜数量、定日镜间距和布局产生了限制和影响,从而间接影响定日镜余弦效率以及遮挡和阴影效率。

在评估土地对定日镜场设计的影响时,首先应关注土地面积对定日镜数量的限制,以评估该土地面积是否能够布局足够多的定日镜以满足电站的集热量或发电量要求。其次,对于土地面积尚未明确或较充裕的情况,则需要在集热量或发电量的需求的基础上完成定日镜场设计,再确定土地面积和形状。定日镜场设计时还需要考虑不同土地性质和成本,以降低电站综合成本。最后,定日镜场设计时,需要考虑地形地貌以及对动植物保护要求。具体来说,土地对定日镜场设计的影响有以下几点。

1) 土地的尺寸限制和成本将影响定日镜场布局方式的选择。设计时需要针对土地成本与定日镜场成本综合性经济比较后确定定日镜的间距与布局。对于土地成本低且土地面积充裕的情况下,可以在定日镜场布局中使定日镜间距适当加大,以减少阴影遮挡损失,增加遮挡和阴影效率,从而减少定日镜的总数量,降低综合成本。对于土地成本高或土地面积有限的情况下,为减少土地面积或在有限的土地面积中提升集热量或发电量,可以采用适当减小定日镜间距、增高吸热塔高度等方式进行设计。

2) 土地的地势对定日镜余弦效率及遮挡和阴影效率有一定影响。位于北半球的塔式光热电站,北高南低的地势将提升定日镜场整体的余弦效率。而吸热塔所处位置地势低、四周地势高的条件下,将同时对定日镜余弦效率及遮挡和阴影效率有提升作用。

3) 土地的地形地貌若高低起伏较大,则可能

会影响到定日镜的正常转动以及镜面清洗车的通行。因此在高低起伏较大的地区进行定日镜场设计,需要以不影响定日镜正常转动和镜面清洗车正常通行为原则,进行土地场地平整。

4) 定日镜场布置的同时还需要为传热、储热系统、发电区及电力系统出线留出所需布置的土地和空间。

5) 有动植物保护要求时,定日镜场土地范围内有需要保护又不能迁移的动物和植被时,镜场设计时应避开动物的洞穴和植被的位置,同时需要考虑植被产生的阴影和遮挡。

### 3 集热场设计的经济性研究

在集热场设计时,应结合集热场的效率、地理位置、自然条件、场地范围、土地利用率等因素,对吸热塔高度、定日镜与吸热塔的距离和定日镜间的距离进行技术经济比较后确定。经济性目标是集热场设计时需要重点考虑的因素,不同的设计方案会对电站整体经济性和度电成本有重要的影响,主要包括集热场规模、定日镜场布置疏密以及吸热塔高度这三方面。

#### 3.1 集热场规模的经济性分析

直接相关的两个重要设计参数是定日镜场采光面积以及吸热器的热功率。对于采用单一尺寸定日镜规格的定日镜场,定日镜场采光面积是定日镜数量和单台定日镜采光面积的乘积。

定日镜场采光面积与吸热器热功率存在有直接相关的关系,在确定的定日镜场采光面积和布局的条件下,吸热器热功率 $E_{\text{receiver}}$ , kW可采用如下公式计算:

$$E_{\text{receiver}} = E_{\text{field}} \cdot \eta_{\text{receiver}} \quad (3)$$

式中: $\eta_{\text{receiver}}$ 为吸热器效率。

同时,由于吸热器表面有最高温度限制,在确定了吸热器热功率的条件下也可以反推出吸热器的尺寸。因此,集热场规模的经济性分析也等价于定日镜场采光面积的经济性分析。

在分析定日镜场采光面积与电站经济性关系前,首先需要确定的是,定日镜场采光面积应与储能容量、汽轮发电机组容量相匹配。一般来说,当定日镜场采光面积过大时,在夏季(日照时间长、太阳角度高镜场效率高)因储罐储满导致的弃光增

加,从而降低电站的经济性;当定日镜场采光面积过小时,储罐、熔盐量相对余量较大,从而出现储能系统不能储满的情况,造成投资浪费降低电站经济性。因此,定日镜场采光面积与储能容量和汽轮机发电机组容量存在一个经济性最优的配比关系。该配比关系与相关系统设备的造价及光资源情况密切相关。在假定已选取最优配比关系的条件下,定日镜场采光面积与塔式光热电站的经济性关系是设计时应分析考虑的。

如图3所示,在年DNI值 $2\text{ MWh/m}^2$ 、储能时长 $15\text{ h}$ 的条件下,不同定日镜场采光面积条件下反算塔式光热电站度电成本的趋势图。测算的基本条件为:定日镜场单价 $800\text{ 元/m}^2$ ,土地成本为 $18\text{ 元/m}^2$ ,土地税为 $0.6\text{ 元}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,大气透射率 $90\%$ ,其他系统成本和费用参考目前国内塔式光热项目实际情况。从图中可以看出,随着定日镜场采光面积的增加,塔式光热电站的度电成本不断下降,但下降幅度越来越小。

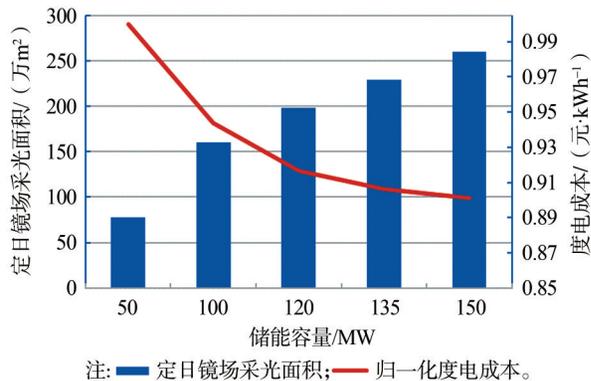


图3 不同定日镜场采光面积对应塔式光热电站归一化度电成本趋势图

Fig. 3 LCOE of different areas of heliostats fields for tower power plant

通过图3的分析,可以发现以下规律:在一定范围内,增加机组装机容量、增加集热场面积,电站度电成本下降。然而,集热场面积增加,新增定日镜的镜场效率低,导致需要额外增加定日镜,增加额外成本,导致电站度电成本下降幅度不断变小。

同时,由于集热场面积增加,定日镜至吸热塔最远水平距离增加,这对定日镜的反射光斑质量要求和控制精度的要求都会增加。因此达到多大规模的定日镜场或最远多少距离的定日镜距吸热塔距离可以实现最优经济性仍有待研究。

目前世界上已投运的塔式光热电站集热场面积超过 $130\text{ 万 m}^2$ 的有两个,分别为:摩洛哥 NOOR III  $150\text{ MW}$  项目,集热场面积 $132\text{ 万 m}^2$ ;首航节能敦煌 $100\text{ MW}$ 项目,集热场面积 $140\text{ 万 m}^2$ 。根据上述分析,现有塔式光热电站集热场规模均小于 $150\text{ 万 m}^2$ ,随着集热场规模的增加,电站的度电成本根据理论分析将下降,因此集热场规模未来仍有进一步增加的空间。

### 3.2 定日镜布置疏密的经济性分析

定日镜布置的疏密对塔式光热电站的效率和经济性均有影响。更加紧密布置的定日镜场会导致阴影遮挡损失的增加,从而降低镜场效率,导致集热量和发电量的减少,降低电站的经济性。但更加紧密布置的定日镜场土地利用率更高。

定日镜布置的疏密对于电站经济性有两方面的影响。第一方面,对于选址时已确定土地面积的电站,定日镜布置的更加紧密,虽然降低了镜场效率,但提升了发电量。在这种情况下,当增加的边际发电收入大于增加的定日镜成本时,电站经济性边际效益为正。

第二方面,对于选址时土地面积尚未确定,但定日镜场采光面积和电站装机量已确定情况,定日镜布置的更加紧密,更少占用土地,节省了土地成本、缩短了镜塔距离提升了大气透射率,但同时定日镜场阴影遮挡效率降低。在这种情况下,需要综合比较土地成本降低、大气透射率增加带来的正面效益和阴影遮挡效率降低带来的负面效益,以确定电站的经济性边际效益。

因此,在进行定日镜布置疏密的经济性分析时,在确定土地条件下,针对紧密布置定日镜而引起的发电量提升和定日镜投资增加进行经济比选;在确定定日镜数量条件下,针对紧密布置定日镜而引起的发电量减小(主要受阴影遮挡效率降低和大气透射率提升的综合影响)和土地成本降低进行经济比选。

目前世界上最紧密布置的定日镜场案例是以色列 Ashlim 塔式光热电站,该电站土地 $3.15\text{ km}^2$ ,定日镜场总采光面积 $105\text{ 万 }2\text{ 480 m}^2$ ,土地利用率达 $33.4\%$ 。如图4所示,该电站的定日镜场布置同时考虑了地形地貌对集热场的影响,可根据实际地形布置,而不需要严格圆形、类圆形或方形布置。



图4 以色列 Ashalim 塔式光热电站照片

Fig. 4 Photo of Ashalim tower power plant in Israel

## 4 结论

本文综述性介绍了塔式太阳能光热电站集热场设计的基本思路和内容,针对集热场设计时需要重点考虑的集热场效率及其影响因素进行了分析,并结合电站的经济性对集热场设计时较难考虑的集热场规模和定日镜布置的疏密设计进行了分析,形成了结论性意见,对塔式光热电站集热场的设计提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 李心,赵晓辉,李江辉,等. 塔式太阳能热发电全寿命周期成本电价分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):84-88.  
LI X, ZHAO X H, LI J Y, et al. Analysis of life-cycle levelized cost of electricity for tower solar thermal power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 84-88.
- [2] CARRIZOSA E, DOMÍNGUEZ-BRAVO C, FERNÁNDEZ-CARA E, et al. An optimization approach to the design of multi-size heliostat fields [D]. Seville, Spain: University of Seville, 2014.
- [3] GARCÍA-BARBERENA J, MONREAL A, MUTUBERRIA A, et al. Towards cost-competitive solar towers - energy cost reductions based on Decoupled Solar Combined Cycles (DSCC) [J]. Energy Procedia, 2014(49): 1350-1360.
- [4] LARMUTH J, MALAN K, GAUCHÉ P. Design and cost review of 2 m<sup>2</sup> Heliostat Prototypes [D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2014.
- [5] PACHECO J E. Esolar's modular concentrating solar power tower plant and construction of the sierra solar generating station [C]// Anon. ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability Collocated with the Heat Transfer and InterPACK09 Conference, San Francisco, California, USA, 2009. San Francisco: [s. n.], 2009.
- [6] SIALA F M F, ELAYEB M E. Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout [J]. Renewable Energy, 2001, 23(1):77-92.
- [7] COLLADO F J, GUALLAR J. A review of optimized design layouts for solar power tower plants with campo code [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(20): 142-154.

- [8] COLLADO F J, GUALLAR J. Campo: generation of regular heliostat field [J]. Renewable Energy, 2012(46): 49-59.
- [9] NOONE C J, TORRILHON M, MITSOS A. Heliostat field optimization: a new computationally efficient model and biomimetic layout [J]. Solar Energy, 2011, 86(2):792-803.
- [10] 宓霄凌,王伊娜,李建华,等. 塔式太阳能热发电站镜场设计分析[J]. 太阳能,2016(6):61-65.  
MI X L, WANG Y N, LI J H, et al. Analysis of heliostat field of solar tower plant [J]. Solar Energy, 2016(6):61-65.
- [11] 楚攀,白凤武,黄长华,等. 槽式太阳能直接蒸汽发生系统的热力特性研究[J]. 南方能源建设,2019,6(1):86-91.  
CHU P, BAI F W, HUANG C H, et al. Study on the thermal characteristics of trough solar direct steam generation system [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(1):86-91.

### 作者简介:



李心

李心 (通信作者)

1983-, 男, 山东济南人, 高级工程师, 光学工程博士, 主要从事太阳能发电技术研究和工程应用的工作 (e-mail) 57760417@qq.com。

许黎玲

1995-, 女, 北京人, 硕士, 主要从事电力工程技术与管理工作 (e-mail) clxu@cpecc.net。

纪培栋

1989-, 男, 山东聊城人, 工程师, 硕士, 主要从事太阳能发电技术研究和工程应用的工作 (e-mail) jpd@heliosolar.com。

肖刚

1979-, 男, 湖北天门人, 浙江大学教授, 博士, 主要从事太阳能热发电与高效利用、高温集热储热和先进的热功转换等方面的教学和科研工作 (e-mail) xg@heliosolar.com。

章涵

1983-, 男, 浙江金华人, 高级工程师, 自动化博士, 主要从事太阳能发电技术研究和工程应用的工作 (e-mail) zh@heliosolar.com。

金建祥

1962-, 男, 浙江诸暨人, 研究员, 硕士, 主要从事工业自动化及太阳能热发电产品技术开发和应用工作 (e-mail) jinjx@supcon.com。

(责任编辑 李辉)