

塔式电站定日镜场布局的优化设计研究

程小龙 尹延国 马少波

(合肥工业大学机械工程学院 安徽合肥 230009)

摘要 以镜场年聚光效率最大为目标,通过建立数学模型对 50MW 塔式太阳能热发电站镜场布局进行优化。在仿真分析镜场效率随塔高变化的规律基础上,运用日平均和月平均 2 种不同的镜场年效率算法对镜场布局进行仿真优化。

关键词 塔式电站 镜场布局 聚光效率 数学模型 优化设计 仿真分析

中图分类号: TM614 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9064(2018)02-064-04

塔式太阳能热发电站定日镜场的作用是将实时太阳辐射能反射并汇聚到吸热器上,以达到对太阳辐射能收集目的。它由按一定方式排列的定日镜群组成,每个定日镜可通过双轴转动跟踪太阳,并将太阳光反射到吸热器上,由吸热器将光能转化为热能并通过传热介质输送至发电装置进行发电^[1]。塔式发电作为一种重要的太阳能发电形式,镜场成本约占电站总投资的 40%~50%,故对镜场布局进行优化可有效地利用和收集太阳辐射能,降低投资和发电成本^[2,3]。

本文重点研究圆形布局中存在的低聚光效率问题,建立镜场以及聚光效率数学模型,分析塔高对聚光效率的影响,基于镜场年聚光效率最优对镜场布局进行仿真优化,得到了优化后镜场中各定日镜的位置参数以及镜场效率等性能参数,通过仿真吸热器上光斑能流分布状态图验证优化结果的合理性。文中选择年 DNI 较好的德令哈作为仿真地点,电站设计容量为 50MW,研究贴合实际,具有重要的使用价值和理论意义。

1 问题分析

本文从塔式热发电站的实际运营角度研究镜场布局优化设计过程中主要存在的问题^[4-6]。

(1)施工运维。镜场布局研究的目的是要能够实现商业化,因此要采用规则的镜场布局方式,这样既降低现场施工难度、降低投资成本,又方便定日镜后期的清洗和运维。

(2)土地利用率。理论上,忽略聚光镜场中的阴影和遮挡损失时,定日镜布置在接近塔的高聚光密度区域中,则镜场土地利用率,聚光效率高。实际上,定日镜在接受和反射太阳辐射能到吸热器的过程中存在阴影和遮挡损失,定日镜须放置在距塔较远的区域,相邻定日镜之间还要有一定的间隔,则镜场聚光密度低,土地利用率低。所以须考虑镜场聚光密度与土地利用率之间的矛盾关系。

(3)机械碰撞。在定日镜场布局的设计过程中,要充分考虑不同跟踪方式下的定日镜自由旋转所需的空间大小,以避免相邻定日镜之间发生碰撞。

(4)镜场聚光效率损失。定义镜场瞬时聚光效率为:

$$\eta(t)=\eta_{\cos}\times\eta_{ref}\times\eta_{cl}\times\eta_{ai}\times\eta_{sdb}\times\eta_{im}\tag{1}$$

式中: $\eta(t)$ 为镜场聚光效率; μ_{cos} 为余弦因子; η_{ref} 为镜面

反射率; η_{cl} 为镜面清洁度; η_{a} 为大气衰减因子; η_{sdb} 为阴影和遮挡因子; η_{im} 为截断因子。

本文在镜场布局设计阶段考虑施工运维采用了圆形布局,着重从镜场聚光效率角度对圆形镜场布局进行优化。

2 布局数学模型

(1)定日镜场的初始布局。深入研究国内外的镜场布局,本文采用径向交错的辐射网格状圆形布局方式,见图 1。

相邻定日镜无机械碰撞的最小间距通过以下方程求出:

$$DM=DH+SD\tag{2}$$

$$DH=\sqrt{HH^2+WH^2}\tag{3}$$

式中: DM 为特征长度,表示相邻定日镜间无碰撞最小间距;

DH 为定日镜对角线长度;为定日镜长度; WH 为定日镜宽度; SD 为定日镜间的最小安全距离。

镜场分成 i 个区域,每个区域中各环之间的径向间距相等,镜场径向最小间距出现在靠近中央吸热器侧的第 1、2 环之间,给出下面公式:

$$\Delta R_{min}=DM\times\cos30^\circ\tag{4}$$

$$\Delta R_1=\Delta R_{min}\tag{5}$$

$$\Delta R_2=X_1\Delta R_{min}\tag{6}$$

...

$$\Delta R_i=X_i\Delta R_{min}\tag{7}$$

式中: ΔR_{min} 为镜场径向最小间距; ΔR_i 为镜场第 i 区域中定日镜相邻环之间的径向间距; X_i 为径向间距的修正系数,取 $X_i\geq 1$ 。

定日镜的周向间距 ΔAz_i 为镜场第 i 个区域中首环周向相邻定日镜之间的夹角值,可通过下面公式求出:

$$\Delta Az_i=2\arcsin\left(\frac{DM}{2R_{min}}\right)\approx DM/R_{min}\tag{8}$$

式中: R_{min} 为镜场正北方向上最小环定日镜与聚光塔底中心的径向间距,即最内环径向半径。

随着镜场环数的增加,定日镜的周向间距开始发生变化,各区域间的周向间距呈规律减少趋势,由几何法得到:

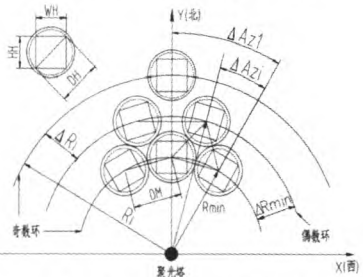


图 1 镜场初始布局基本定义

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575151)

作者简介:程小龙(1991~),男,安徽芜湖人,硕士研究生,主要从事太阳能光热利用方面的研究。

通讯作者:尹延国(1964~),男,博士,教授,博士生导师,主要从事机械摩擦磨损与控制技术方面的研究。

$$\Delta A z_2=\Delta A z_1 / 2 \tag{9}$$

$$\Delta A z_i=\Delta A z_{i-1} / 2 \tag{10}$$

求镜场各区域对应环上定日镜的数目以及径向半径需要用到(11)~(18)公式:

$$N_{helio1,N_{row1}}=N_{helio1,1}=2 \pi / \Delta A z_1=2 \pi \times R_{min} / D M \tag{11}$$

$$R_{1,1}=R_{min}=N_{helio1,1} \times D M / 2 \pi \tag{12}$$

$$R_{1,N_{row1}}=R_{1,1}+(N_{row1}-1) \Delta R_{min} \tag{13}$$

同理有:

$$N_{helio2,N_{row2}}=N_{helio2,1}=4 \pi \times R_{1,1} / D M \tag{14}$$

$$N_{helio3,N_{row3}}=N_{helio3,1}=8 \pi \times R_{1,1} / D M \tag{15}$$

$$\dots$$

$$N_{helioi,N_{rowi}}=N_{helioi,1}=2^i \times \pi \times R_{1,1} / D M \tag{16}$$

$$R_{i,1}=2^{i-1} R_{1,1} \tag{17}$$

$$R_{i,N_{rowi}}=2^{i-1} R_{1,1}+(N_{rowi}-1) \Delta R_i \tag{18}$$

镜场各分区排布的定日镜环数可通过(19)~(21)方程求解:

$$N_{row1}=(R_{2,1}-R_{1,1}) / \Delta R_{min}=\text{round}\left(2^0\left(R_{1,1} / \Delta R_{min}\right)\right) \tag{19}$$

$$N_{row2}=\text{round}\left(2^1\left(R_{1,1} / \Delta R_{min}\right)\right) \tag{20}$$

$$N_{rowi}=\text{round}\left(2^{i-1}\left(R_{1,1} / \Delta R_{min}\right)\right) \tag{21}$$

式中: N_{row1} 为镜场第1区域的环数; N_{rowi} 为镜场第*i*区域的环数; $R_{1,1}$ 为镜场第1区域首环半径; $R_{i,N_{rowi}}$ 为镜场第1区域末环半径; $R_{i,1}$ 为镜场第*i*区域首环半径; $R_{i,N_{rowi}}$ 为镜场第*i*区域末环半径。

(2)余弦效率。余弦效率损失是镜场中效率损失最严重的一种,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减少,定义夹角的余弦值即余弦效率。根据镜面反射定律和几何矢量法可知:

$$\eta_{cos}=\vec{s} \cdot \vec{n} \tag{22}$$

式中: η_{cos} 为余弦效率; \vec{s} 为太阳光入射光单位矢量; \vec{n} 为镜面法线单位矢量。

(3)大气衰减效率。大气衰减效率损失是由于镜面反射太阳光到吸热器的过程中大气对太阳辐射的吸收和散射带来的能量损失,定义这种效率为^[7]:

$$\eta_{at}=\begin{cases} 0.99321-0.000176d_{ref}+1.97 \times 10^{-8} d_{ref}^2 & d_{ref} \leq 1 \text{km} \\ \exp((-0.0001106d_{ref})) & d_{ref} > 1 \text{km} \end{cases} \tag{23}$$

式中, d_{ref} 为定日镜与吸热器之间的距离。

(4)阴影和遮挡效率。阴影和遮挡因子是镜场中未发生阴影和遮挡的定日镜面积与总的定日镜面积之比。Campo 基于 Sassi^[8]提出的程序高效计算阴影遮挡效率,过程使用了几何投影法^[9],文献^[10]在计算的过程中考虑了太阳高度角较低的情况。在以上研究的基础上采用了定日镜之间无遮挡损失^[11]的数学模型,定义定日镜之间无阴影损失,计算时假定镜场地面相对聚光塔的倾斜角度为。

(5)截断效率。截断因子定义为吸热器上吸收太阳辐射能与定日镜反射的太阳辐射能之比。文献^[12]上指出,HFLCAL 和 UNIZAR 模型均适合计算截断因子,本文选用更简单、更精确的 HFCAL 模型,HFLCAL 使用圆形正态分布表征吸热器表面的通量能流密度分布,给出公式^[13]:

$$\eta_{int}=\frac{1}{2 \pi \sigma_{tot}^2} \iint_{tot} \exp \left(-\frac{\left(x-x_i\right)^2+\left(y-y_i\right)^2}{2 \sigma_{tot}^2}\right) d x d y \tag{24}$$

式中, x_i, y_i 为吸热器上目标点的坐标; σ_{tot} 为吸热器表面光斑图像的总标准偏差。

3 优化仿真和结果分析

3.1 镜场布局优化流程图

以年聚光效率最大为目标对镜场布局进行优化,仿真优化流程如图2所示。

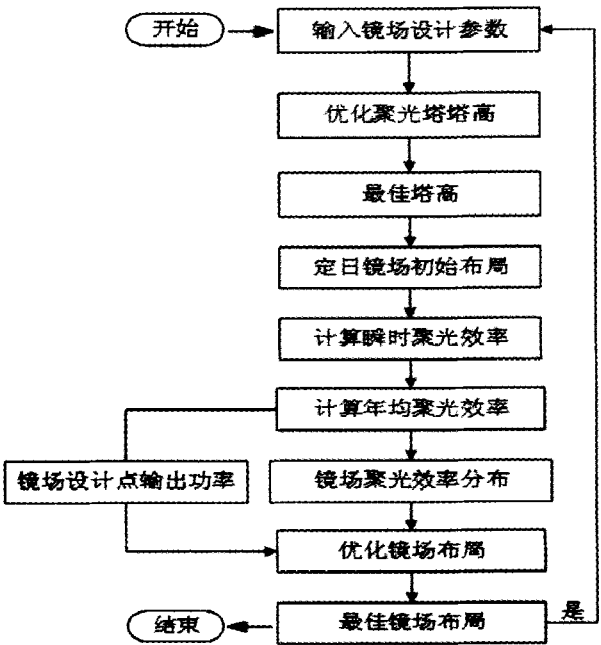


图2 镜场布局优化设计流程图

3.2 镜场年效率计算

(1)日平均镜场年聚光效率。通过(1)式瞬时效率计算镜场1年中每日从日出到日落的镜场年均聚光效率为:

$$\eta_{year,d}=\frac{\sum_{d=1}^{365} \int_{t=\text{日出}}^{t=\text{日落}} \eta(t) d t}{\sum_{d=1}^{365} \int_{t=\text{日出}}^{t=\text{日落}} d t} \tag{25}$$

式中: $\eta_{year,d}$ 为日年年均聚光效率; d 为日期序号。

(2)月均法镜场年聚光效率。Typical 代表各月典型日,通过对12个月求平均来计算镜场年均聚光效率,给出下面公式:

$$\eta_{year,m}=\frac{\sum_{m=1}^{12} \sum_{\text{typical}} \int_{t=\text{日出}}^{t=\text{日落}} \eta(t) d t}{\sum_{m=1}^{12} \sum_{\text{typical}} \int_{t=\text{日出}}^{t=\text{日落}} d t} \tag{26}$$

式中: $\eta_{year,m}$ 为月平均年聚光效率; m 为月数。

3.3 仿真结果分析

基于 NLOpt 算法,参考国内外电站数据,仿真优化德令哈地区50MW塔式太阳能热发电站的镜场布局,定义镜场设计参数如表1所示。假设镜场中所有定日镜均可用,模拟仿真镜场布局。

(1)优化前镜场初始布局。基于镜场初始布局数学模型仿真得到50MW塔式太阳能热发电站定日镜场初始布局,如图3所示。

表 1 定日镜场设计参数

经纬度	37.4°N,97.4°E
设计点 DNI/(W/m ²)	1000
镜场设计输出功率/MW _i	300
塔光学高度/m	180
吸热器尺寸/m	10×10
H_{opt} /m	180
太阳张角/πrad	4.65
太阳倍数	2.2
储热时间/h	15
$WH \times HH/m^2$	15×15
$\eta_{ref} \times \eta_{ele}$	0.95×0.95

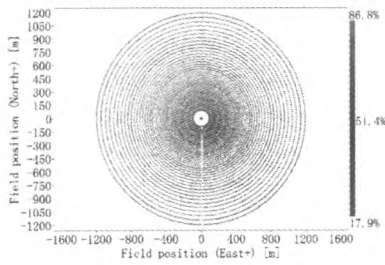


图 3 镜场初始布局

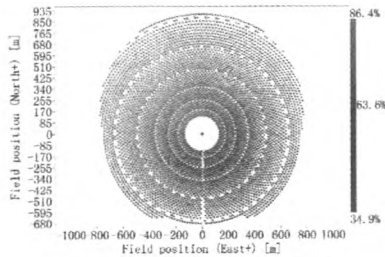


图 4 日平均算法优化后镜场布局

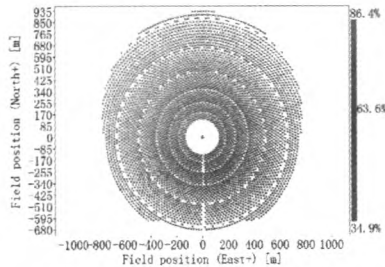


图 5 月平均算法优化后镜场布局

所以,随着镜场半径的增加定日镜聚光效率逐渐降低。如图 4、5 所示,优化后镜场布局关于东西对称,南镜场部分定日镜被移除,更多的定日镜布置在镜场北方。考虑到建站厂址位于北纬低纬度地区,全年高 DNI 时刻的太阳主要处于南方,为了提高镜场的聚光效率,将定日镜更多在镜场北方高聚光密度区域。从图 4、5 中可以看出,镜场各区域交界处定日镜数目明显较少,分析原因可能是交界处阴影遮挡效率损失比较严重,因此,在实际工程应用中需要减少交界处的定日镜数量以提高效率。

表 3 中,利用日平均算法优化后镜场年聚光效率相比优化前提高了 $0.1284 \times 100\% = 12.84\%$,镜场中定日镜利用率增加了 $1064/6409 = 16.6\%$;日平均和月平均年聚光效率算法优化后镜场效率以及定日镜数目基本一致。仿真结果表明:在

(2)镜场布局仿真优化。①日平均镜场聚光效率算法。模拟 1 年 365 天从日出到日落镜场的年均聚光效率,以此为目标函数对镜场布局进行优化,优化布局如图 4 所示。②月平均镜场聚光效率算法。月平均算法可提高计算效率,表 2 为用于计算的各月代表日,优化后的镜场布局如图 5 所示。

(3)性能分析。表 3 为镜场布局优化前后的镜场性能参数。

如图 3 所示,优化前镜场为规则圆形布局,定日镜聚光效率是关于镜面和吸热器中心距离的函数,

表 2 各月代表日参数

日期序号 /d	月数 /月	代表日 /d	日照时数 /h	峰值 DNI /(W/m ²)
4	1	4	11	502.0
34	2	3	12	459.9
64	3	5	13	427.9
95	4	5	14	458.7
125	5	5	15	336.8
156	6	5	16	344.6
186	7	5	16	383.9
217	8	5	15	471.0
247	9	5	14	529.7
277	10	4	13	764.1
308	11	5	12	719.7
338	12	4	11	765.6

表 3 定日镜场性能参数的优化结果

参数	优化前	日平均优化	变化值	月平均优化
$N_{\text{heliostat}}$	6409	5344	1064	5345
η_{field}	0.5346	0.6630	0.1284	0.6629
η_{cos}	0.7607	0.8230	0.0623	0.8232
η_{at}	0.9289	0.9425	0.0136	0.9425
$\eta_{\text{s\&b}}$	0.9757	0.9893	0.0136	0.9893
η_{int}	0.8484	0.9548	0.1064	0.9543

塔式电站建设前有必要对镜场布局进行优化,这样可以降低成本、提高光热发电效率。为了提高计算效率,在大规模镜场布局优化中可考虑采用月平均年效率算法。

(4)吸热器上能流分布。为了进一步探讨布局优化对镜场聚光性能的影响,同时验证日平均和月平均年效率算法仿真结果一致性,开展吸热器上能流状态分布研究,选取春分日正午 12 点为设计点,仿真吸热器上光斑能流分布如图 6、图 7、图 8 所示。

如图 6 所示,优化前吸热器表面光斑有溢出迹象;日平均年效率算法优化后吸热器表面能流密度分布更加均匀,光斑中心位置偏移较小。这是因为镜场布局优化后年聚光效率和截断效率增加的缘故,与表 3 表征结果一致。如图 7、图 8 所示,2 种年效率算法优化后吸热器上光斑能流分布以及光斑外形尺寸基本一致,验证了月平均年效率算法优化镜场布局的可行性。

4 结论

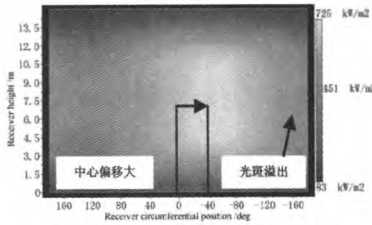


图 6 优化前吸热器上能流分布

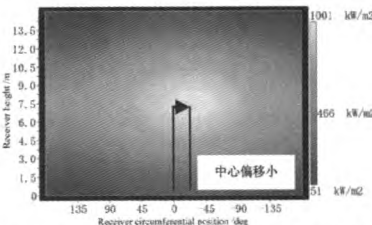


图 7 日平均算法优化后吸热器上能流分布

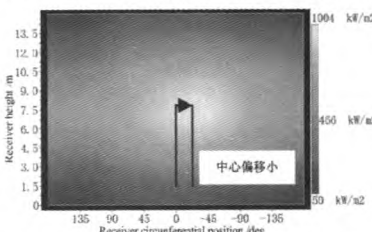


图 8 月平均算法优化后吸热器上能流分布
(下转第 70 页)

表 2 样品精密度实验的标准浓度/cm(L)[RSD%,n=5]。

表 2 样品精密度测定			
组分	0.02	0.15	1.02
乙苯	8.42	5.55	3.87
甲苯	7.92	6.21	3.35
间二甲苯	8.02	6.57	7.52
对二甲苯	7.81	8.12	6.27
邻二甲苯	7.82	6.27	4.51
异丙苯	8.21	5.67	4.92

备注：RSD 代表计算结果算术平均值、标准偏差比值，计算公式为：RSD(相对标准偏差)=SD(标准偏差)/X(计算结果算术平均值)·100.0%，其主要代表测试结果的准确度。

3 结果分析

处理样品时，萃取环节完成后仅使用脱脂棉进行过滤，虽然不能完全去除乳化带来的水分，但经过过滤之后的水分层、二硫化碳分层情况明显，吸收有机层在进样时不会对结果产生影响，与无水硫酸钠过滤的结果相比，峰会显著提升。

本实验方法的线性范围较宽，达到 0~40mg/L，同时不同

苯系物线管系统均超过 0.9990。

从表 2 结果可知，毛细管柱气相色谱法精密度与填充柱气相色谱法相比，更高，且其最低检测限计算值为 3 倍基线噪声，不同苯系物都小于 0.01mg/L，符合当前相关标准的限值。

4 结语

综上所述，水中存在的苯系物具有挥发性，会直接危害到人体健康，也是衡量水体有机污染情况的先兆指标，进而越来越受到人们关注，通过检测饮用水中含有的苯系物，对提升水质、防治水污染、保护人们健康都有十分重要的作用。毛细管柱气相色谱法是当前常见的苯系物检测方法，其具备多种优势，包括检测的界限低、结果精准、线性关系良好且范围广，值得推广。

参考文献

1 原变,孙存云.毛细柱气相色谱法测定水源水中苯系物含量[J].全面腐蚀控制,2016,30(12):11-13.

2 薛晓庆,卢鹏宇.气相色谱法测定水中苯系物[J].科学与财富,2015(13):182-183.

6 Schwarzbozl P,Buck R,Sugarmen C,et al.Solar gas turbine systems: design, cost and perspectives [J].Solar Energy,2005,80(10):1231-1240.

7 周艺艺,田军,陈将,等.基于 GPU 的塔式太阳能热系统吸热功率计算[J].控制工程,2015,22(2):282-286.

8 Sassi G.Some notes on shadow and blockage effects[J].Solar Energy,1983,31(3):331-333.

9 Collado FJ,Turégano JA.Calculation of the annual thermal energy supplied by a defined heliostat field [J].Solar Energy,1989,42(2):149-165.

10 Wei X,Lu Z,Z Wang,et al.A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant [J].Renewable Energy,2010,35(9):1970-1975.

11 张宏丽,Isabelle Juchli,Daniel Favrat,等.塔式系统定日镜场的热经济性优化设计[J].太阳能学报,2009,30(1):55-60.

12 Collado FJ.One-point fitting of the flux density produced by a heliostat[J].Solar Energy,2010,84(4):673-684.

13 Besarati SM,Goswami DY,Stefanakos EK.Optimal heliostat aiming strategy for uniform distribution of heat flux on the receiver of a solar power tower plant [J].Energy Conversion&Management,2014,84:234-243.

(上接第 66 页)

(1)北纬地区太阳出现在南方的时间较长，应将定日镜布置在聚光密度较高的镜场北方；

(2)镜场区域交界处阴影遮挡损失较为严重，应该减少该区域布置定日镜的数量。

(3)月平均年效率算法相比日平均年效率算法，计算速度较快，适合大规模镜场仿真优化。

(4)镜场布局优化后年聚光效率提升 12.84%，定日镜利用率增加 16.6%，明显提高了太阳能利用率。

参考文献

1 魏秀东,卢振武,王志峰,等.塔式太阳能热发电站镜场的优化设计[J].光学学报,2010,30(9):2652-2656.

2 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.

3 Larmuth J,Malan K,Gauché P.Design and cost review of 2m² heliostat prototypes[J].Stellenbosch;Stellenbosch University,2014.

4 曹传利,郑建涛,刘明义,等.塔式太阳能热发电站集热场布置优化研究[J].太阳能,2015(8):47-51.

5 张宏丽,王志峰.塔式电站定日镜场布置范围的理论研究[J].太阳能学报,2011,32(1):89-94.

(上接第 68 页)

持续发展奠定基础。

参考文献

1 福建省统计局.福建统计年鉴[J].福州:中国统计出版社,2016.

2 阮应君,刘青荣,周伟国,等.我国养猪场清洁发展机制(CDM)发展潜力分析研究[J]中国沼气,2009,27(4):3-9.

3 周强,浅析大型养殖场沼气发电-以山东民和养殖场沼气发电工程为例[J]中国沼气,2009,28(1):34-36.

4 陈泽智.生物质沼气发电技术[J].环境保护,2000.10:41-42

5 徐晓秋,王钢,刘伟,等.畜禽粪便厌氧消化沼气发电行业的现状分析[J].应用能源技术,2011(6):1-3.