

文章编号: 0253-2239(2010)09-2652-05

塔式太阳能热发电站镜场的优化设计

魏秀东¹ 卢振武^{1*} 林 梓² 王志峰³

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ²吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012)

³中国科学院电工研究所, 北京 100080

摘要 为了提高塔式太阳能电站镜场的集光效率, 需要对镜场的布置进行优化设计。基于非成像光学设计理论, 提出了利用腔式吸热器的几何特性与定日镜年均效率因子相结合的镜场边界限制方法, 提高了定日镜的光学效率。镜场采用规则化布置, 易于进行优化, 从而提高了镜场优化设计的响应速度。采用蒙特卡罗光线追迹法建立了镜场聚光的数学模型, 采用参数搜寻算法优化镜场结构, 在 Matlab 环境下编写了镜场优化设计软件, 并利用现有的西班牙 PS10 镜场对软件进行了验证。使用该软件设计了北京 10 MW 塔式太阳能电站镜场, 设计的年均光学效率为 64.15%, 与 PS10 镜场相近, 达到国际先进水平。

关键词 非成像光学设计; 定日镜场光学效率; 光线追迹法; 塔式太阳能电站

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2652

Design and Optimization of Heliostat Field Layout for Solar Tower Power Plant

Wei Xiudong¹ Lu Zhenwu¹ Lin Zi² Wang Zhifeng³

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China
³ Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract For improving the collection efficiency of heliostat fields for solar tower power plants, the design and optimization of heliostat field layouts are needed. Based on the nonimaging optical design theory, a new method in which the field boundary is constrained by geometrical aperture of receiver and the efficiency factor of heliostat is proposed. The heliostat can be placed with higher efficiency by this method. The heliostat field layout is regular, which is helpful for the optimization of the configuration. Therefore, the response speed of the design and optimization of the field is improved. By using the Monte Carlo ray tracing method, the mathematical model of the concentration of heliostat field is created. The field configuration is optimized with parameter search algorithm. A new code for the design and optimization of the heliostat field layout is developed under the Matlab environment and validated by using the current PS10 field in Spain. A new heliostat field of 10 MW solar tower power plant which is located in Beijing is designed by using the new code. The mean annual optical efficiency of the designed heliostat field is 64.15% and is closed to that of PS10 field, which comes up to an international advanced level.

Key words nonimaging optical design; optical efficiency of heliostat field; ray tracing method; solar tower power plant

1 引言

塔式太阳能热发电^[1~3]是利用定日镜场将低能

流密度的太阳辐射能会聚到位于塔顶的吸热器, 由吸热器将高密度能流转换为热能并通过传热媒质输

收稿日期: 2009-10-15; 收到修改稿日期: 2009-12-14

基金项目: 国家 973 计划(2010CB227101)和国家 863 计划(2006AA05010101)资助课题。

作者简介: 魏秀东(1979—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事太阳能聚光方面的研究。

E-mail: wei_xiudong@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: luzw@ciomp.ac.cn

送到地面的发电装置进行发电。定日镜场由一系列能够跟踪太阳运转的反射聚光镜布置而成,是塔式太阳能热发电站的关键子系统。镜场的投资成本约占电站总投资成本的 50%^[2],效率损失约为 30%~40%,且随着镜场规模的增大,效率损失也增大,因此,镜场优化设计对提高电站的发电效率、降低太阳能发电成本具有重要意义。镜场优化设计可采用非成像光学的设计方法^[3,4],通过优化定日镜、镜场布置、塔高和吸热器等获得光能传输效率高、成本低的镜场结构,采用蒙特卡罗光线追迹^[5~7]建立镜场聚光的数学模型,以分析镜场的聚光效率。传统镜场设计软件^[8]中,镜场采用规则化布置,镜场的东西边界通过人为设定扇形区域的顶角来确定,南北边界根据塔高和吸热器尺寸计算给出^[9],这种布置方法简单,但在布置过程中不能保证定日镜具有较高的效率。Sanchez 等^[10]提出增长式镜场布置方法,可使定日镜布置在效率较高的区域,但需要重复计算定日镜的年均截断效率和阴影挡光效率,计算量较大,响应速度慢,且镜场布置不规则,不易进行再优化。

为了实现对塔式电站镜场的优化设计,提高设计响应速度,基于非成像光学边缘光线原理^[11]提出了利用腔式吸热器几何特性和定日镜效率因子相结合的镜场边界限制方法,使定日镜具有较高的光学效率,镜场布置采用规则的对称分布,易于进行结构优化。采用蒙特卡罗光线追迹法对镜场的聚光过程进行数学建模,并基于 MATLAB 工具编写了镜场优化与分析软件(HFLD)^[12],利用现有的西班牙 PS10 镜场^[13~15]数据验证了软件的正确性,使用该软件设计了北京 10 MW 塔式太阳能电站镜场 DAHAN-10,分析结果表明,DAHAN-10 镜场的年均光学效率与 PS10 相近,达到国际先进水平。

2 镜场边界的限制

镜场的光学效率^[16]

$$\eta_{\text{field}} = \eta_{\text{ref}} \times \eta_{\text{cos}} \times \eta_{\text{bs}} \times \eta_{\text{at, tr}} \times \eta_{\text{int}}, \quad (1)$$

式中 η_{ref} 为镜面反射效率, η_{cos} 为余弦效率, η_{bs} 为阴影和挡光效率, $\eta_{\text{at, tr}}$ 为大气透过效率, η_{int} 为截断效率。镜场的反射效率可设为常数,与镜场结构无关,其它效率项均与镜场结构有关,在镜场优化设计中要予以考虑。

镜场的边界限制是决定镜场结构的重要参数之一,基于非成像光学的边缘光线原理,利用腔式吸热器的几何特性对镜场边界进行限制,保证定日镜具有高的截断效率,避免采用光线追迹法计算时较大

的计算量。腔式吸热器的几何特性决定于采光口尺寸和接收角。腔式吸热器的接收角是指光束以不同角度入射时能够被吸热器完全接收的最大入射角,与非成像光学中复合抛物面聚光器(CPC)接收角的定义相似,可由下式计算:

$$\theta_{\text{R}} = \arcsin\left(\frac{-2dl + L\sqrt{4l^2 + L^2 - d^2}}{4l^2 + L^2}\right), \quad (2)$$

式中 d 为镜场聚光光斑的直径, D 为吸热器采光口的直径($D > d$), L 为吸热表面的入口直径, l 为吸热器采光口平面与吸热面入口平面的距离(图 1)。当采光口平面与吸热面入口平面重合时(即 $l=0, L=D$),接收角可简化为

$$\theta_{\text{R}} = \arccos(d/D), \quad (3)$$

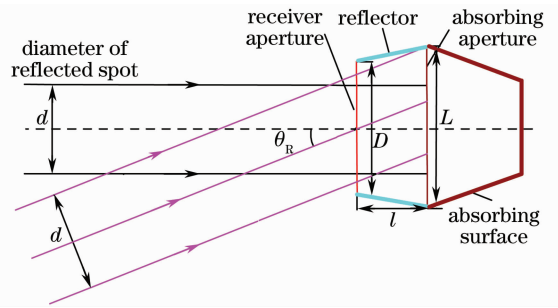


图 1 腔式吸热器接收角定义

Fig. 1 Definition of acceptance angle of the cavity-type heat absorber

腔式吸热器采光口的形状主要有圆形和矩形,相应的在地面的投影为椭圆和梯形,如图 2 所示, δ_{R} 为采光口法线与竖直方向的夹角, θ_{R} 为圆形采光口吸热器的接收角, $\theta_{\text{RT}}, \theta_{\text{RS}}$ 为矩形采光口吸热器的子午和弧矢接收角, h_{t} 为采光口中心距离地面高度。

对于圆形采光口,投影椭圆的方程为

$$y^2 + (x \cos \delta_{\text{R}} + h_{\text{t}} \sin \delta_{\text{R}})^2 - \tan^2 \theta_{\text{R}} (x \sin \delta_{\text{R}} - h_{\text{t}} \cos \delta_{\text{R}})^2 = 0. \quad (4)$$

对于矩形采光口,根据图 2(b)中的几何关系可求得 M 点的坐标为

$$\begin{cases} x_{\text{M}} = \frac{h_{\text{t}} (\tan \theta_{\text{RS}} \cos \delta_{\text{R}} - \sin \delta_{\text{R}})}{\cos \delta_{\text{R}} + \tan \theta_{\text{RS}} \sin \delta_{\text{R}}}, \\ y_{\text{M}} = \frac{-\tan \theta_{\text{RT}} h_{\text{t}}}{\cos \delta_{\text{R}} + \tan \theta_{\text{RS}} \sin \delta_{\text{R}}}. \end{cases} \quad (5)$$

同理,可计算 N, C, D 各点的坐标,进而得到投影梯形的边界。在布置定日镜时,镜场边缘的定日镜要布置在吸热器所限定的边界之内,保证定日镜具有较高的截断效率,根据边缘光线原理,位于镜场中心区域的定日镜也具有高的截断效率。

为了保证定日镜具有较高的余弦效率和大气透过效率,还需利用定日镜的效率因子(年均余弦效

率×年均大气透过效率)对镜场边界进行限制。定日镜某一时刻的余弦效率等于阳光在镜面中心入射角的余弦值,可由下式计算^[12]:

$$\eta_{\cos} = \frac{\sqrt{2}}{2} [\sin \alpha \cos \lambda - \cos(\theta_H - A) \cos \alpha \sin \lambda + 1]^{1/2}, \quad (6)$$

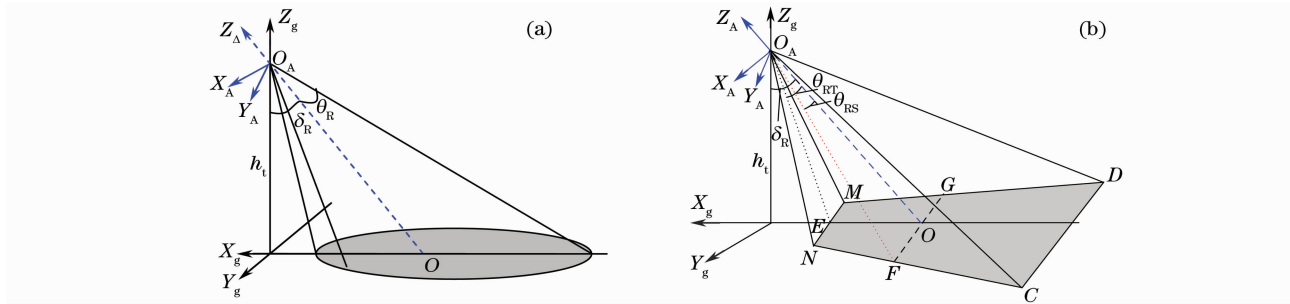


图 2 腔式吸热器采光口在地面的投影。(a)圆形采光口和(b)矩形采光口的投影
Fig. 2 Schematics of the projections on the ground from the circular and rectangular aperture receivers.

(a) circular aperture and (b) rectangular aperture projection

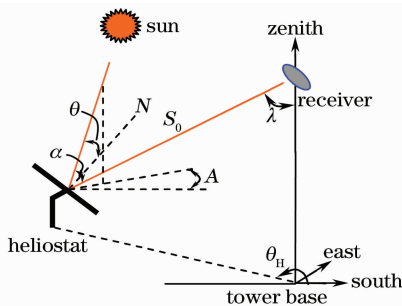


图 3 定日镜场坐标系

Fig. 3 Coordinate system of the heliostat field layout

大气透射率取决于天气状况以及定日镜与目标点之间的距离,在能见度为 40 km 的晴天模式下,镜场某一位置的大气透射率^[17]

$$\eta_{at} = 0.99321 - 0.0001176 \times S_0 + 1.97 \times 10^{-8} \times S_0^2, \quad S_0 \leq 1000 \text{ m}$$

$$\eta_{at} = \exp(-0.106 \times 10^{-4} S_0), \quad S_0 > 1000 \text{ m} \quad (7)$$

式中 S_0 为该镜场位置到目标点的距离(图 3)。

利用定日镜的效率因子对镜场边界进行限制,可使定日镜布置在年均余弦效率和大气透过效率较高的区域内。另外,在镜场设计中,定日镜的阴影挡光损失也需要考虑,它主要取决于镜场的布置方式和相邻定日镜的间距,与镜场边界无关,可通过优化定日镜间距减小阴影挡光损失。

3 镜场优化设计与分析

为了实现对镜场的优化设计,采用蒙特卡罗光线追迹法建立了镜场聚光的数学模型^[18],采用参数搜

式中 α 为太阳高度角, A 为太阳方位角, λ 表示镜面中心反射光线与竖直方向的夹角, θ_H 表示定日镜在地面坐标系中的方位角(图 3)。将 η_{\cos} 在全年内积分并取平均值,可得定日镜的年均余弦效率。

寻算法实现对镜场结构的优化,在 Matlab 环境下编写了镜场的优化设计和分析软件(HFLD)^[12],利用现有西班牙的 PS10 镜场对软件进行验证。PS10 电站位于北纬 37.4° ,镜场由 624 面 $12.84 \text{ m} \times 9.45 \text{ m}$ 的矩形球面定日镜布置而成,镜面平均反射率为 0.88。吸热器为腔式,采光口尺寸为 $13.78 \text{ m} \times 12 \text{ m}$,倾斜 12.5° ,距地面高度 100.5 m 。在 HFLD 软件中输入 PS10 镜场的结构参数并忽略地形的影响,计算 PS10 镜场的年均光学效率,如图 4 所示。

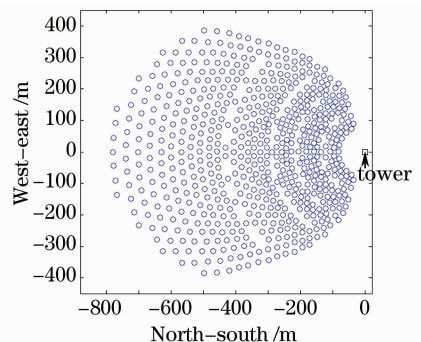


图 4 PS10 镜场年均光学效率计算
Fig. 4 Calculation of the annual optical efficiencies of the PS10 field

软件 HFLD 的计算结果与公布结果的比较如表 1 所示。

由表 1 可见,软件 HFLD 计算的 PS10 镜场年均光学效率与公布数据吻合很好,余弦效率和阴影挡光效率的偏差较大,是因为在软件的计算中忽略了地形的影响,而实际 PS10 镜场的地形存在一定起伏。

表 1 PS10 公布数据与软件 HFLD 计算结果比较

Table 1 Comparison between the published data of PS10 and calculated data by the HFLD

Efficiency	Published data / %	Calculated data / %	Relative deviation / %
Annual mean optical efficiency	64	64.07	0.1
Annual mean cosine efficiency	81	82.3	1.6
Annual mean block and shadow efficiency	95.5	92.9	2.7

使用 HFLD 软件设计了北京 10 MW 塔式太阳能电站镜场 DAHAN-10, 该镜场位于北纬 40.4° , 镜场规模、定日镜尺寸、塔高及吸热器尺寸等参数均与 PS10 电站相同, 设计吸热器采光口的倾斜角度为 15° , 设计结果如图 5 所示, 图中“·”线表示矩形吸热器采光口对镜场的限制边界, 灰度图表示定日镜效率因子在镜场地面的分布。

DAHAN-10 和 PS10 镜场的效率比较如表 2 所示, 可见 DAHAN-10 镜场的光学效率与 PS10 镜场相近, 达到了国际先进水平。

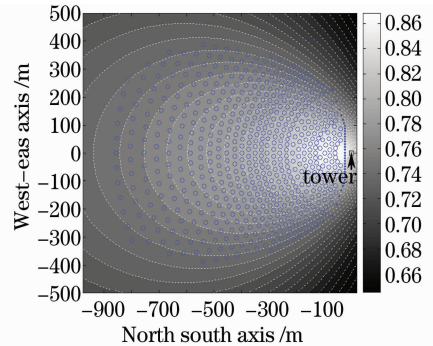


图 5 DAHAN-10 镜场布置图

Fig. 5 Layout of the DAHAN-10 field

表 2 DAHAN-10 与 PS10 镜场光学效率比较

Table 2 Optical efficiency comparison between the DAHAN-10 and the PS10 fields

Efficiency	PS10 / %	DAHAN-10 / %	Deviation / %
Nominal optical efficiency	77	76.6	-0.4
Annual mean optical efficiency	64	64.15	+0.2
Annual mean cosine efficiency	81	82.8	+1.8
Annual mean block and shadow efficiency	95.5	92.9	-2.6

4 结 论

本文基于非成像光学的设计思想, 提出吸热器几何特性和定日镜年均效率因子相结合的边界限制方法, 确保定日镜布置在光学效率较高的区域内, 镜场布置比较规则, 易于对镜场结构进行优化, 提高了镜场优化设计的响应速度。为了实现对镜场的优化设计和性能分析, 采用蒙特卡罗光线追迹法建立镜场聚光的数学模型, 采用参数搜寻算法实现对镜场结构的优化, 在 Matlab 环境下编写了新镜场设计软件, 并对软件进行了验证。使用新软件设计了北京 10MW 塔式太阳能电站镜场 DAHAN-10, 计算年均光学效率为 64.15%, 与 PS10 镜场相近, 已经达到国际先进水平。

参 考 文 献

- 1 B. S. William, G. Micheal. Power from the sun[M/OL]. 2001. <http://www.powerfromthesun.net/book.htm>
- 2 G. J. Kolb, S. A. Jones, M. W. Donnelly *et al.*. Heliostat cost reduction study [EB/OL]. 2007. <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2007/073293.pdf>
- 3 R. Winston, J. C. Minano, P. Benitez. Nonimaging optics[M].

ELSEVIER Academic Press. 2005

- 4 Zhu Rui, Lu Zhenwu, Liu Hua *et al.*. The solar concentrator design method based on nonimaging optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2251~2255
- 朱 瑞, 卢振武, 刘 华等. 基于非成像原理设计的太阳能聚光镜[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2251~2255
- 5 Feng Guoying, Lü Baida, Zheng Wanguo. Computational simulation of the single-segment Nd: glass glass amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **26**(8): 673~677
- 冯国英, 吕百达, 郑万国. 单段钕玻璃激光放大器的计算模拟[J]. *中国激光*, 1999, **26**(8): 673~677
- 6 Zhong Xianghong, Zhang Baozheng, Lin Meirong. Analysis and correction of angio scope image distortion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4): 377~379
- 钟向红, 张包铮, 林美荣. 血管内窥镜图像畸变的分析和校正[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 377~379
- 7 Luo Xi, Chen Peifeng, Wang Ying. Novel kind of wide-band shaping parabolic mirror for high power laser processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1853~1856
- 罗 曦, 陈培锋, 王 英. 一种大功率激光加工用新型宽带光斑成形抛物面镜[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1853~1856
- 8 P. Garcia, A. Ferriere, J. J. Bezan. Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: a comparative review[J]. *Solar Energy*, 2008, **82**(3): 189~197
- 9 F. M. F. Siala, M. E. Elayeb. Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout [J]. *Renewable Energy*, 2001, **23**(1): 77~92
- 10 M. Sanchez, M. Romero. Methodology for generation of

- heliostat field layout in central receiver systems based on yearly normalized energy surfaces[J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(7): 861~874
- 11 H. Ries, A. Rabl. Edge-ray principle of nonimaging optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2627~2632
- 12 X. D. Wei, Z. W. Lu, Z. Lin. Optimization procedure for design of heliostat field layout of a 1 MWe solar tower thermal power plant[C]. *SPIE*, 2007, **6841**: 684119
- 13 10 MW solar thermal power plant for southern Spain[EB/OL]. 2006, http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/csp/ps10_final_report.pdf
- 14 Plataforma Salarde Almeria Annual Report 2003[EB/OL]. 2003, http://www.psa.es/webeng/techrep/2003/ATR2003_ing.pdf
- 15 SOLUCAR PS10: a 11.0 MW solar tower power plant with saturated steam receiver [EB/OL]. 2005, <http://www.upcomillas.es/catedras/crm/report05>
- 16 P. Schwarzbözl, R. Buck, C. Sugarmen *et al.*. Solar gas turbine systems: design, cost and perspectives[J]. *Solar Energy*, 2005, **80**(10): 1231~1240
- 17 M. Schmitz, P. Schwarzbo, R. Buck *et al.*. Assessment of the potential improvement due to multiple apertures in central receiver systems with secondary concentrators[J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(1): 111~120
- 18 Wei Xiudong, Wang Ruiting, Zhang Hongxin. Analysis on optical performance of the concentrator field in the solar tower thermal power system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2279~2283
- 魏秀东, 王瑞庭, 张红鑫. 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