

机电技术

塔式系统圆形镜场中余弦效率分布的研究

丁婷婷 祝雪妹

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 210042)

摘要 定日镜在接受和反射太阳辐射能至吸热器的过程中,存在着诸多损失。不正当的聚光镜场布置方案将引起过量的损失,其余弦损失所占的比例最大。因而有必要对定日镜处于不同坐标位置的余弦效率进行研究。首先建立了塔式太阳能热发电中余弦效率的数学模型。其次通过对阴影和阻挡损失——聚光场密度的折衷考虑,选择规则且灵活的放射状交错排列方式,得到圆形聚光镜场。最后在圆形镜场中对夏至日不同时间的余弦效率进行仿真,并从仿真结果中得到一些结论。基于这些结论,可重新定义定日镜的布置方案和检修策略,以便于获得更多的太阳辐射能,降低其成本。

关键词 塔式太阳能热发电 聚光镜场 余弦效率 入射角

中图分类号 TM615; **文献标志码** A

20世纪70年代美国和以色列初步对塔式太阳能热发电技术进行研发,之后很多国家也相继建立了不同形式的示范热电站^[1]。西班牙是目前太阳能热发电技术相对成熟的国家。建立大规模太阳能热发电站,可降低发电成本,是开发和利用太阳能的一个重要途径。在塔式太阳能热发电系统中,通常利用成千上万面绕两轴转动的定日镜将太阳辐射能反射到位于高塔上的吸热器,继而实现大容量发电^[2]。根据美国能源部主持的研究结果表明:考虑环境的污染成本,塔式太阳能热发电在大规模发电方面将是所有太阳能发电技术中成本最低的一种方式。据专家预测,到2020年,基于2.6 GW规模的发电量,其发电成本有望达到每度电5美分^[3]。

聚光镜场通常按一定规律布置而成。其设计过程中,存在着很多损失,包括余弦损失、阴影和阻挡损失、大气衰减损失和溢出损失等,其中余弦损失占总损失的50%—70%^[3,4]。为将更多的太阳辐

射能反射到接收器上,需保证定日镜表面总与太阳入射光束垂直。而实际上,余弦损失是不可避免的。定日镜在能量转换的过程中,其表面可能会与入射光束成一倾斜角度。此外,余弦效率的大小不仅取决于太阳的位置,也取决于定日镜的所在的坐标位置。因此,在设计聚光镜场时,将定日镜布置在余弦效率较高的区域中,对于提高聚光镜场中的余弦效率很重要。

本文通过MATLAB编程,首先仿真出圆形聚光镜场。其次采用圆形镜场对西班牙塞维利亚夏至日不同时刻的余弦效率进行仿真,并从结果中得到一些结论。这些结论不仅对定日镜的布置方案的选择很重要,同时也影响着定日镜的检修和清洗策略,为塔式太阳能热发电中定日镜的布置研究奠定了基础。

1 余弦效率的数学模型计算

余弦效率是太阳入射角的余弦值,太阳的入射角越小,则反射到定日镜上的有效面积越大,余弦效率就会越高。反之,太阳的入射角越大,则反射到定日镜上的有效面积越小,余弦效率就会越低。其余弦效率直接影响到整个系统的发电效率^[5],因此,找到较高余弦效率的定日镜分布区域对于定日镜场的设计和布置非常重要。

2012年6月27日收到,7月13日修改

工业控制技术国家

重点实验室开放课题(ICT1122) 资助

第一作者简介: 丁婷婷(1988—),女,汉族,江苏省盐城人,硕士,研究方向:塔式太阳能热发电的理论及仿真。E-mail: dingtingting1026@126.com。

本文以正东方向为 x 轴,正南方向为 y 轴, z 轴为天顶轴,建立三维坐标系。如图 1 所示, OQ 为接收塔, Q 为吸热器入口面中心, B 点为镜场中某一面定日镜的镜面中心点, B 点坐标为 (x_i, y_i, z_i) , \vec{S} 为 B 点处太阳入射光线的方向向量, \vec{R} 为 B 点处太阳反射光线的方向向量, \vec{H} 为 B 点处定日镜的法线向量。入射角的大小取决于太阳的位置,而太阳的位置主要取决于太阳的时角 ω 、当地的地理纬度 φ 和太阳的赤纬角 δ 。

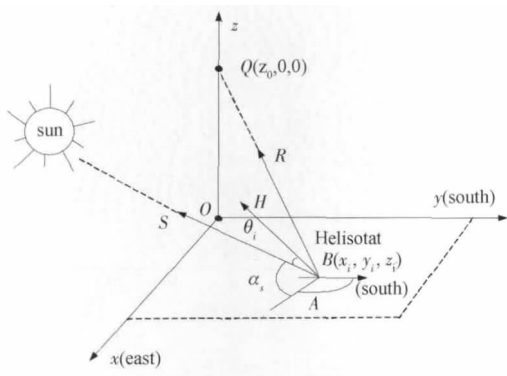


图 1 定日镜入射角示意图

$$a_s = \sin^{-1}(\cos\varphi\cos\delta\cos\omega + \sin\varphi\sin\delta) \quad (1)$$

$\delta = 23.45^\circ \sin(360^\circ \times \frac{284 + n_d}{365})$, 其中 n_d 为所求日期在一年中的天数。当 $n = 1$ 时,即为 1 月 1 日。

$$\sin A = -\frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos a_s} \quad (2)$$

太阳入射光线的方向向量 \vec{S} 为:

$$\vec{S} = (\cos\alpha_s \sin A, \cos\alpha_s \cos A, \sin\alpha_s) \quad (3)$$

太阳反射光线的方向向量 \vec{R} 为:

$$\vec{R} = \left(\frac{-x_i}{(x_i^2 + y_i^2 + (z_0 - z_i)^2)^{\frac{1}{2}}}, \frac{-y_i}{(x_i^2 + y_i^2 + (z_0 - z_i)^2)^{\frac{1}{2}}}, \frac{(z_0 - z_i)}{(x_i^2 + y_i^2 + (z_0 - z_i)^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (4)$$

式(4)中, a_s 为太阳的高度角; A 为太阳的方位角。

利用 $\cos 2\theta_i = \vec{S}^* \vec{R}$, 将公式(3)和式(4)代入得到:

$$\cos 2\theta_i = \frac{-x_i \cos\alpha_s \sin A - y_i \cos\alpha_s \cos A + (z_0 - z_i) \sin\alpha_s}{(x_i^2 + y_i^2 + (z_0 - z_i)^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

从公式(5)可求得太阳入射角 θ_i 的值,即余弦效率的计算公式如下:

$$\eta_{\cos} = \cos\theta_i \quad (6)$$

2 分析和讨论定日镜场的布置方式

最初美国休斯顿大学的 Lipps 和 Vanthull 提出了放射状栅格法分布的定日镜场排列方式^[1]。该排列方式避免了定日镜处于相邻定日镜反射光线的正前方而造成的阻挡损失。本文采用规则且灵活的放射状交错排列法,由 Francisco J. Collado 和 Jesús Guallar 在文献[6]中提到,基于放射状栅格法发展而成。通过对阴影和阻挡损失——聚光镜场密度之间关系的折中考虑,对原始的放射状栅格法作了改进,具体布置如图 2 所示。接收塔位于原点,定日镜按同心圆弧排列,被放置在距接收塔不同距离的圆环上。奇数排上的第一个定日镜放置在 y 轴的右边,与 y 轴相切,奇数排上的其它定日镜顺时针绕着第一个定日镜按不同区域的周向夹角放置,第一个区域周向夹角为 Δaz_1 ,第二个区域周向角为 Δaz_2 ,依次类推其它区域的周向角。为了获得交错布置的结构,偶数排的第一个定日镜放置在 y 轴上,偶数排的其它定日镜顺时针绕着第一个定日镜按不同区域的周向角放置。所有相邻环之间取最小径向间距。

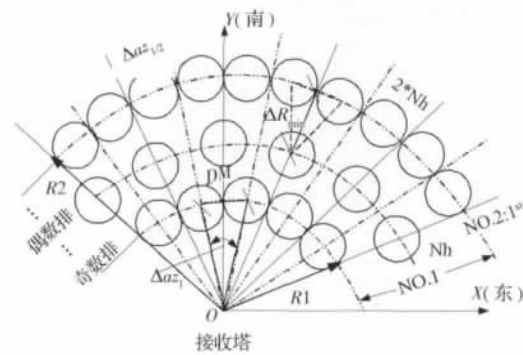


图 2 规则且灵活的放射状交错排列方式

如图 2 所示,在 $x-y$ 平面建立了聚光镜场,并定义了镜场中一些基本的参数, ΔR_{\min} 为最小径向间距, Δaz_1 为第一个区域相邻定日镜之间的周向夹角, DM 为定日镜的特征长度。

$$\Delta az_1 = 2\sin(DM/2 * R1) = DM/2 \quad (7)$$

式(7)中 $R1$ 为定日镜场中正南方向上离塔最近的定日镜中心距塔的距离,为最小镜场半径,根据第一个区域定日镜的个数 N_h 来计算。

$$N_h = 2\pi/\Delta az_1 \quad (8)$$

把式(7)带入式(8)得:

$$R1 = (DM * N_h) / 2\pi \quad (9)$$

则 $R1$ 是 DM 和 N_h 的函数。

由于径向交错排列方式的特征,相邻定日镜之间的周向夹角将随着每排定日镜的半径而逐渐增长,不同区域的周向夹角也不相同。第二个区域相邻定日镜之间的周向夹角为 Δaz_2 。

$$\Delta az_2 = \Delta az_1 / 2 \quad (10)$$

将式(7)代入式(10),得:

$$R2 = 2 \times R1 \quad (11)$$

式(11)中 $R2$ 为第二个区域中第一排定日镜中心距塔的距离。

随着镜场中每排定日镜半径的增加,可以计算每个区域能够放置定日镜的排数 N_{row} ,对于第一个区域来说:

$$N_{rows1} = (R2 - R1) / \Delta R_{min} \quad (12)$$

当计算得到小数时,对其取整。

通过将式(9)和式(11)代入式(12)得到:

$$N_{rows1} = \text{floor}(N_h / 5.44) \quad (13)$$

式(13)中 floor 是取整。

以次类推,得到第三个区域的周向夹角,

$$\Delta az_3 = \Delta az_1 / 4 \quad (14)$$

由式(7)代入式(13)得到:

$$R3 = 4R1 \quad (15)$$

同样,第二个区域的排数:

$$N_{rows2} = (R3 - R2) / \Delta R_{min} \quad (16)$$

第三个区域的排数:

$$N_{rows3} = (R4 - R3) / \Delta R_{min} \quad (17)$$

以此类推得到其它区域的最小镜场半径与排数。

3 数学模型验证

3.1 计算条件

仿真时间为夏至(6月22日),地理位置为西班牙塞维利亚,北纬 34.7° ,东经 6.3° 。定日镜镜面中

心点高度为 6 m,吸热器中心点的坐标为 $(0, 0, 100.5)$ 。定日镜的尺寸为 12.84×9.75 m,第一排定日镜数量为 14 面, ds 取 $0.3^{[6]}$,通过上面对定日镜场设计的描述,计算得到 $R1 = 41.4899$, $R2 = 82.9789$, $R3 = 165.9596$, $N_{rows1} = 2$, $N_{rows2} = 5$, $N_{rows3} = 10$,则聚光镜场总共有 17 环,定日镜的个数为 728。通过 MATLAB 仿真得到圆形定日镜场的布置,如图 3 所示。

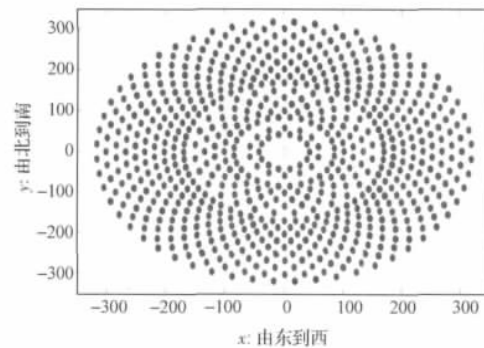


图3 定日镜场的布置方案

3.2 定日镜场中余弦效率的分布

根据已知的参数和公式,可以得到当地夏至日太阳的高度角与方位角随时间的变化曲线,如图 4 所示,从图 4 中可看出,当太阳位于 12 点时,太阳的方位角为 0° ,而太阳的高度角为一天中的最大值约 76° 。

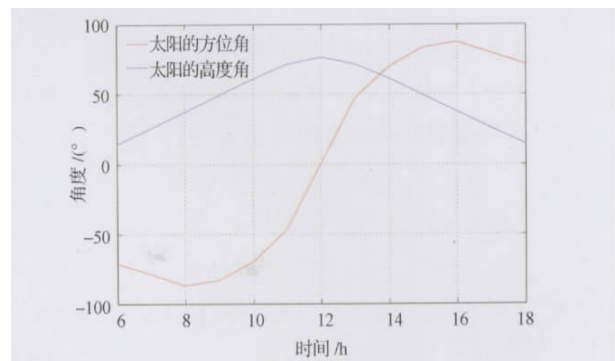


图4 夏至日太阳的高度角和方位角

定日镜可通过两轴旋转(高度角和方位角)跟踪方式跟踪太阳,第一个旋转轴与水平面垂直,跟踪太阳的方位角;第二个旋转轴与水平面平行,跟踪太阳的高度角,使得更多的太阳辐射能反射到接

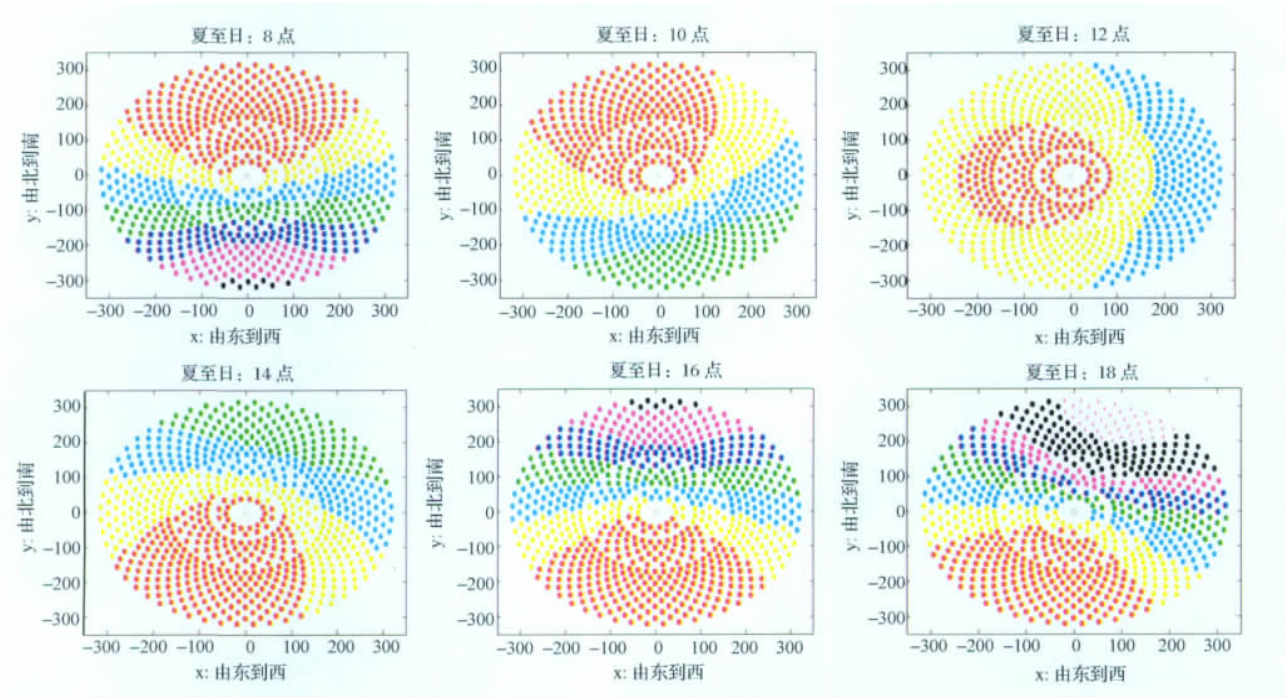


图5 夏至日不同时间定日镜场中余弦效率的分布

收器上。定日镜在跟踪控制的过程中,太阳的入射角取决于某个时间,在不同的时间,太阳光照射在定日镜表面上的入射角不相同,则镜场中的余弦效率分布也各不相同,下面就针对8点、10点、12点、14点、16点和18点这6个不同的时间点,仿真出该地点圆形定日镜场排列时,余弦效率的分布情况,如图5所示。

图5中●表示余弦效率大于等于95%的定日镜,●表示余弦效率在90%与95%之间的定日镜,●表示余弦效率在85%与90%之间的定日镜,●表示余弦效率在85%与80%之间的定日镜,●表示余弦效率在80%与75%之间的定日镜,●代表余弦效率在70%与75%之间的定日镜,●表示余弦效率在60%到70%之间的定日镜,+号表示余弦效率在40%到60%之间的定日镜。

从图5中看出,定日镜场的占地面积为 $350\times 350\text{ m}$,则定日镜场的密度为72%;中午12时,太阳在一天中的最高点,此时定日镜场获得的余弦效率最高;从早上8时到下午18时,不同区间的余弦效率分布以正南为基准,逆时针方向移动;早上8时和傍晚18时的低效率区间明显比其他时刻多;下午的

时候,东北方向获得的余弦效率明显比西北方向的高;同时,与接收塔某个方向偏角较小的区域的余弦效率较高,而与某方向偏角较大的区域余弦效率较低。

不同时间的平均余弦效率分布如图6所示。

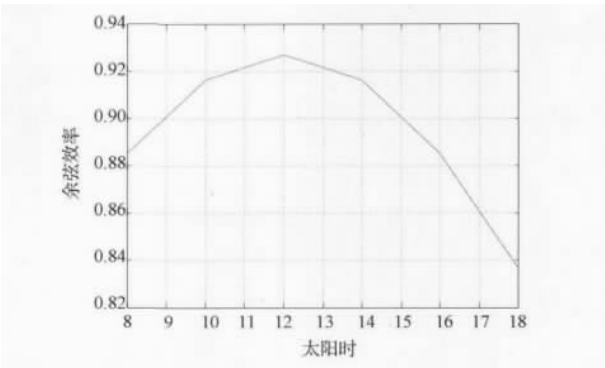


图6 太阳时与平均余弦效率之间的关系

从图6中可以看出,余弦效率的分布关于12时对称。上午与下午对应时间的平均余弦效率相同。基于此,对塔的高度与不同时刻的平均余弦效率进行分析。因为随着塔高度的变化,平均余弦效率也随之变化,如图7所示,为塔高与不同时刻平均余弦效率的关系图。

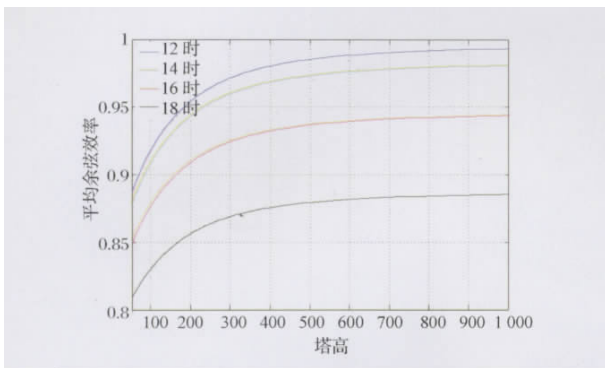


图7 塔高与平均余弦效率之间的关系

从图7中可看出,不同时刻的曲线相似。且随着塔高度的不断增大,其平均余弦效率也逐渐增加且趋于稳定值,可见,并非塔越高越好。

4 结束语

余弦效率不仅决定了定日镜场的分布,也决定了定日镜的检修和清洗策略。在定日镜场的设计中,通常会选择一年中比较有代表性的几天来计算,如:春分日、夏至、秋分日、冬至,再将其结果推算到全年。文中采用夏至日对一天中不同时刻定日镜的余弦效率进行了理论分析,可为定日镜场布置方案的选择奠定基础。主要结论如下:

(1) 在中午12时,太阳的方位角接近0,太阳的高度角达到最大值。

(2) 选择夏至对不同时间的余弦效率分析是一个很好的选择,不仅可以体现一天中定日镜场的平

均收集效率,将其推算到一个季度,也可体现这个季度的平均收集效率。

(3) 从早上8时到下午18时,高余弦效率区域分布以正南为基准,逆时针方向移动;因此,需避免在某个高效率区域的时间点对定日镜进行检修和清洗,从而保证高余弦效率区域能够反射更多的太阳辐射能到接收器。

(4) 定日镜的平均余弦效率在上午时呈现递增趋势,到中午12时达到最大值,此后,在下午呈现递减趋势。该趋势近似抛物线函数,关于12时对称。同时塔的高度与不同时刻的平均余弦效率成正比关系,且随着塔高度的不断增加,平均余弦效率趋于稳定。

参考文献

- 1 张宏丽, Favrat D, Pelet X. 塔式太阳能热发电系统-定日镜场的设计思考. 太阳能, 2007; (11): 21—23
- 2 Mill D. Advances in solar thermal electricity technology. Solar Energy, 2004; (76): 19—31
- 3 张耀明, 王军, 张文进, 等. 塔式与槽式太阳能热发电. 太阳能, 2006; (2): 29—32
- 4 Sánchez M, Romero M. Methodology for generation of heliostat field layout in central receiver systems based on yearly normalized energy surfaces. Solar Energy, 2006; (80): 861—874
- 5 张宏丽, 王志峰. 塔式电站定日镜场布置范围的理论分析. 太阳能学报, 2011; 32(1): 89—94
- 6 Collado F J, Cuallar J. Campo: generation of regular heliostat fields. Renewable Energy, 2012: 1—11

(下转第8433页)

参 考 文 献

- 1 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络. 北京:清华大学出版社,2005
- 2 毛沙. 无线传感器网络节能优化策略研究. 合肥:合肥工业大学硕士学位论文,2011
- 3 Sinha A, Chandrakasan A. Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks. IEEE Design & Test of Computers, 2001; 18(4),

62—74

- 4 刘苏敏. 无线传感器网络节点管理技术研究. 武汉:武汉理工大学博士学位论文,2010
- 5 田丰民. 基于小波分解的无线传感器网络动态功率管理. 成都:西南交通大学硕士学位论文,2005
- 6 高铁梅. 计量经济分析方法与建模: EViews 应用及实例. 北京:清华大学出版社,2006

Analysis of Dynamic Power Management Method in the Nodes of Wireless Sensor Network

ZHAO Jing, WANG Cheng

(Electronic Information Engineering College of Chengdu University, Chengdu 610106, P. R. China)

[Abstract] In the wireless sensor network, nodes carry limited battery energy, and focused on how to efficiently utilize network node energy and extend network lifespan, an effective method of the dynamic power management (DPM) based on the theory of the Autoregressive (AR) model and Moving Average (MA) model in the time series analysis is put forward. Through setting a threshold time and comparing the extent of time between two events with the threshold time for nodes, and according to the result they can judge their work status. The results of the experiment show that the method is effective.

[Key words] wireless sensor network dynamic power management autoregressive model moving average model

(上接第 8410 页)

Cosine Efficiency Distribution of Circular Heliostats Field of Solar Power Tower Plants

DING Ting-ting, ZHU Xue-mei

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, P. R. China)

[Abstract] Heliostats have some losses in the process of receiving and reflecting solar radiation. Improper heliostat layout results in excessive losses, among these losses, cosine efficiency accounted for the largest proportion. So, it is necessary to study on the cosine efficiency of the heliostats at different coordinates. In this paper, mathematical model of cosine efficiency in solar power tower plant was established. Then, there are trade-offs among shadowing, blocking losses and heliostats field density, and the regular and flexible radical staggered configuration was chosen as an optimal field layout, which generate of densest circular heliostat fields. Furthermore, summer solstice is used to simulate at different solar time, while the distribution of cosine efficiency was analyzed. From simulated graphics show that some useful results. Based on this principle, placement and maintenance strategy of heliostats should be made so as to collect more solar energy and reduce cost.

[Key words] solar thermal power tower heliostats field cosine efficiency incident angle