

DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2006010

槽式光热电站镜场效率计算模型与仿真分析

张晓东¹, 牛海明²

(1. 国电科技环保集团股份有限公司, 北京 海淀 100761;

2. 北京国电智深控制技术有限公司 (北京市电站自动化工程技术研究中心), 北京 昌平 102200)

摘要: 槽式太阳能热发电是当今成熟度最高的光热发电技术, 具有很大的发展潜力。槽式光热电站镜场是光热电站能量转换的关键一环, 通过跟踪太阳的方式将太阳光线折射到吸收管上, 为后续换热及发电过程奠定基础。首先, 根据太阳辐射在槽式聚光器中的能量损失, 建立了槽式光热电站镜场效率数学模型, 可计算多种型号槽式聚光器在任意地区任意时刻的镜场效率。其次, 对影响槽式光热电站镜场效率的时空因素及聚光器因素进行了仿真分析, 包括季节变化、地理位置、槽式聚光器型号、间距及布置方式对槽式光热电站镜场效率的影响。仿真结果表明: 夏季镜场效率更高; 纬度越高, 槽式光热电站日均镜场效率越大; 经度影响着槽式光热电站的整体工作时间等。

关键词: 光热发电; 槽式太阳能; 镜场效率; 聚光器; 光学损耗

中图分类号: TK 29; TM 743

文献标志码: A

Calculation Model and Simulation Analysis of Mirror Field Efficiency of Trough CSP Station

ZHANG Xiaodong¹, NIU Haiming²

(1. Guodian Technology & Environment Group Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100761, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Power Station Automation, Beijing Guodian Zhishen Co., Ltd., Changping District, Beijing 102200, China)

ABSTRACT: Trough solar thermal power generation is the most mature photovoltaic power generation technology and has great development potential. The mirror field of trough photothermal power station is a key link in the energy conversion of photothermal power station. By tracking the sun, the rays of the sun are refracted onto the absorption tube, which is the foundation for the subsequent heat exchange and power generation process. According to the energy loss of solar radiation in trough concentrator, the mirror field efficiency mathematical model of trough photothermal power station is established, which can calculate the mirror field efficiency of various types of trough concentrator at any time in any region. The temporal and spatial factors and concentrator factors that affect the mirror field efficiency of the trough type photothermal power station are simulated and analyzed, including the influence of seasonal variation, the geographical location, the shape of the trough type concentrator, the spacing and arrangement mode on the mirror field efficiency of the trough type photothermal power station. The simulation result shows that the mirror field efficiency is higher in summer; the higher the latitude is, the higher the average mirror field efficiency is; and longitude affects the overall working time of the thermal power station.

KEY WORDS: solar-thermal power stations; trough solar energy; field efficiency; concentrator; optical loss

0 引言

21 世纪, 世界面临着同样的能源问题。作为一

种新兴的绿色发电技术, 光热发电技术已经在世界范围内受到广泛关注^[1]。2015 年, 全球已建成装机容量大约为 4 940.1 GW 的光热电站。中国幅员辽阔, 拥有丰富的太阳能资源, 年辐射量大于 5 000 MJ/m² 的地区超过三分之二。2016 年, 我国国家能源局批准建设光热发电示范项目的总装机容量高达 1.35 GW,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1500801)

Project supported by National Key Research and Development Projects (2018YFB1500801)

标志着我国即将迎来光热发电技术的快速发展期^[2]。

光热发电技术是指通过大规模阵列镜面聚焦太阳光,收集太阳热能加热工质,并通过换热装置提供蒸汽,从而推动汽轮机转动发电的一种绿色发电技术。根据聚光集热方式的不同,光热发电技术主要分为槽式、塔式、菲涅尔式和碟式共4种^[3]。槽式系统通过抛物线型的槽式聚光器跟踪太阳的方式,收集太阳热能;塔式系统以集热塔为中心,按圆周分布放置很多反射镜,反射镜将太阳热能集中在中心集热塔上;菲涅尔式系统通过特制的线性菲涅尔反射镜将太阳光线聚集在一段集热管上;碟式系统每一个反射镜都配有单独的能量转换单元,然后再完成并网发电。其中,槽式光热发电技术因其结构简单,价格低廉的优点,在光热发电领域应用最广,装机比例超过70%^[4]。

槽式光热电站主要由槽式镜场、热传递及蒸汽发生系统、储热系统及发电系统四部分构成。槽式镜场作为整个光热电站的能量来源,具有极其重要的作用。中广核德令哈50 MW槽式光热示范项目中,槽式镜场由 25×10^4 片共 $62 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的槽式聚光器组成。通过计算与仿真槽型光热电站镜场效率,可以有效提高槽式光热电站的能量转化效率,对提升电站经济效益有重要意义。

目前,海内外学者们已对槽式聚光器及其系统开展了大量研究。文献[5]改进了槽式聚光集热器尾部增益的计算方法,提出了在对太阳能资源进行评估时,可以用太阳辐射强度替代直射辐射强度,评估了其光热电站选址的合理性。文献[6]基于槽式集热器系统顾问模型,阐述了在计算太阳辐射时,必须同时考虑恒定的光学损耗和随太阳位置变化的可变光学损耗,并分别对两部分损耗模型进行了详细的说明。文献[7]对埃及开罗某地的倾斜面和水平面上的太阳辐照强度进行了仿真计算,并与实际太阳辐射进行对比。文献[8]基于Matlab软件,仿真模拟了槽式太阳能聚光器模型,针对接收器热转换性能的影响进行了研究。文献[9]仿真分析了槽式槽式太阳能集热器运行特性。但在槽式镜场建模、镜场效率计算及系统优化方面还鲜有研究。

本文考虑槽式聚光器工作过程中恒定的光学损耗和随太阳位置变化的可变光学损耗,建立槽式光热电站镜场数学模型。基于AnySimu仿真平台,对槽式光热电站镜场进行仿真模拟,可以得到任意

型号聚光器下任意地区任意时刻的镜场效率。此外,本文对影响槽式光热电站镜场效率的时空因素及聚光器因素进行仿真分析。

1 槽式光热电站镜场效率模型

槽式太阳能镜场是槽式光热电站的核心之一,通过跟踪太阳的方式将太阳光线折射到吸收管上,为后续换热及发电过程奠定基础。本文依据太阳辐射在槽式聚光器中的能量损失搭建了槽式光热电站镜场效率模型。在研究镜场效率数学模型之前,首先对太阳几何学进行介绍。

1.1 太阳几何学

本小节介绍了太阳赤纬角 δ_s 、太阳时角 ω 、太阳高度角 α_s 、太阳天顶角 θ_z 、太阳方位角 γ_s 及太阳入射角 θ 的计算方法,为研究槽式太阳能镜场效率数学模型奠定基础。

根据文献[9],可以计算出精确的赤纬角:

$$\begin{aligned} \delta_s = & 0.372\ 3 + 23.256\ 7 \sin \theta_d + 0.114\ 9 \sin 2\theta_d - \\ & 0.171\ 2 \sin 3\theta_d - 0.758 \cos \theta_d + \\ & 0.365\ 6 \cos 2\theta_d + 0.020\ 1 \cos 3\theta_d \end{aligned} \quad (1)$$

$$\theta_d = \frac{2\pi(N - N_0)}{365.242\ 2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} N_0 = & 79.676\ 4 + 0.242\ 2(Y - 1985) - \\ & \text{INT}\left(\frac{Y - 1985}{4}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: θ_d 为日角; N 为一个无量纲数,表示当天日期的序号,如:1月1日的日期序号为1,平年12月31日的日期序号为365,闰年12月31日的日期序号为366; N_0 为年校正系数,无量纲数; Y 为年份;INT为取整函数。

太阳时角的计算公式为:

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (4)$$

$$t_s = t_d + t_e \quad (5)$$

$$t_d = t_{\text{loc}} - \frac{(120 - J)}{15} \quad (6)$$

$$t_{\text{loc}} = h + \frac{m}{60} + \frac{s}{3600} \quad (7)$$

$$t_e = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (8)$$

$$B = \frac{360(N - 81)}{364} \quad (9)$$

式中: t_s 为当地太阳时; t_d 为地方时; t_e 为时差,是由地球运转中的偏差引起的; t_{loc} 为当地时间,单位为h; h 、 m 、 s 分别为时、分、秒; $J = |\text{北京经度} - \text{当}$

地经度 $|$; B 为修正参数。

正午 12 时整, 太阳时角为 0° ; 太阳时角的周期为 1 天中, 从 -180° 变到 $+180^\circ$, 每小时变化 15° 。例如: 10:00 太阳时角为 -30° ; 15:00 太阳时角为 45° 。

如图 1 所示, 太阳高度角 α_s 为太阳到地面的射线与射线在地面上投影的夹角。太阳天顶角 θ_z 为太阳到地面上射线与地面法线的夹角。

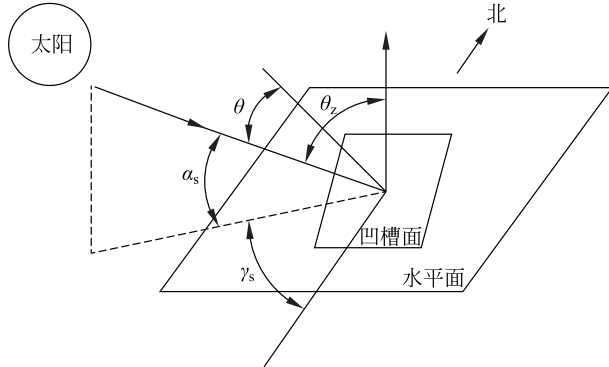


图 1 与太阳光线有关的几何角

Fig. 1 A geometric Angle associated with the rays of sun

太阳高度角 α_s 的计算公式^[9]为

$$\sin \alpha_s = \sin \delta_s \sin W + \cos \delta_s \cos W \cos \omega \quad (10)$$

式中 W 为当地纬度。

根据太阳天顶角与太阳高度角互余的关系, 其计算公式如下:

$$\cos \theta_z = \sin \delta_s \sin W + \cos \delta_s \cos W \cos \omega \quad (11)$$

如图 1, 太阳方位角 γ_s 为太阳到地面的一条射线在地面上的投影与正南方向夹角:

$$\gamma_s = \frac{\sin \alpha_s \sin W - \sin \delta_s}{\cos \alpha_s \cos W} \quad (12)$$

太阳入射角 θ 的计算公式^[10]如下:

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_s \cos^2 (\theta_x - \gamma_s)} \quad (13)$$

式中 θ_x 为轴线和聚光器的夹角。

在南北布置东西跟踪方式下, $\theta_x = 0\pi$, 则:

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_s \cos^2 \gamma_s} \quad (14)$$

在南北布置东西跟踪方式下 $\theta_x = (1/2)\pi$, 则:

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_s \sin^2 \gamma_s} \quad (15)$$

1.2 镜场效率数学模型

在槽式光热电站中, 主要存在二次能量转化过程, 一次是太阳光线被槽式太阳能镜场聚集在集热器的接收器上, 将太阳辐射能转换为热能; 另一次是携带热量的流动介质产生过热蒸汽使得完成后续发电过程, 将热能转换为电能。槽式光热电站镜场是能量转换部分的关键一环。

槽式光热电站镜场效率 η_{col} 的表达式^[11]为

$$\eta_{col} = \eta_{opt} \xi_{geo} \quad (16)$$

式中: η_{opt} 为镜场的光学效率; ξ_{geo} 为镜场的几何效率。

为了衡量槽式聚光器运行性能, 引入槽式聚光器的光学效率。槽式聚光器的光学效率与穿透率、反射率、聚光器抛物面的光学精密度和集热器接收器的吸收率等参数有关, 其计算公式为

$$\eta_{opt} = \alpha \rho \gamma \tau_m \tau_d \quad (17)$$

式中: α 为接收器金属管的接受率; ρ 为槽式抛物线型反光镜的反射率; τ_d 为接收器玻璃管外管的穿透率; τ_m 为反光镜面的穿透率; γ 为槽式抛物面反光镜的拦截因子, 影响拦截因子大小的因素分为随机误差和非随机误差 2 类。随机误差包括聚光器选取光学材料的散射效应、反射镜表面波纹造成的局部倾斜误差; 非随机误差包括聚光器的抛物面形误差、聚光器和吸热器装配误差, 跟踪误差。

此外, 抛物线型聚光镜的洁净度、吸收率等因素也会使对抛物线型聚光镜的光学效率产生干扰。

抛物线型反光镜的跟随程度、尺寸大小等因素是影响其几何效率 ξ_{geo} 的主要因素, 其计算公式为

$$\xi_{geo} = \xi_e \xi_s I \cos \theta \quad (18)$$

式中: ξ_e 为集热器端部损失; ξ_s 为遮挡系数; $\cos \theta$ 为太阳入射角的余弦; I 为入射角修正系数。

当槽式聚光器与接收器处于一个平面时, 可能会使得反光镜反射的部分太阳辐射能量在接收管末端一段长度无法被获取, 如图 2 所示。

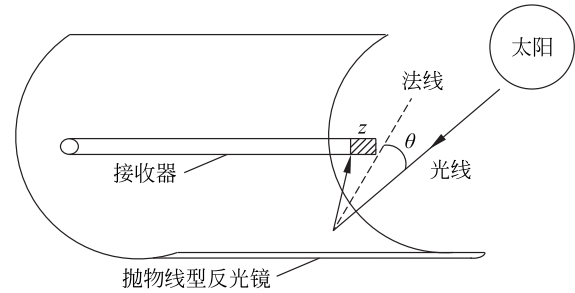


图 2 槽式聚光器与接收器处于同一平面下的工作示意图

Fig. 2 Working diagram of the trough concentrator and receiver under the same plane

接收器接受不到太阳光线的长度为

$$z = r \tan \theta \quad (19)$$

式中 r 为抛物线型反光镜的焦点到其末端点的距离。

图 3 所示为根据数学原理, 接收管到抛物线型反光镜末端距离的光线分析图, 由于槽式聚光器是

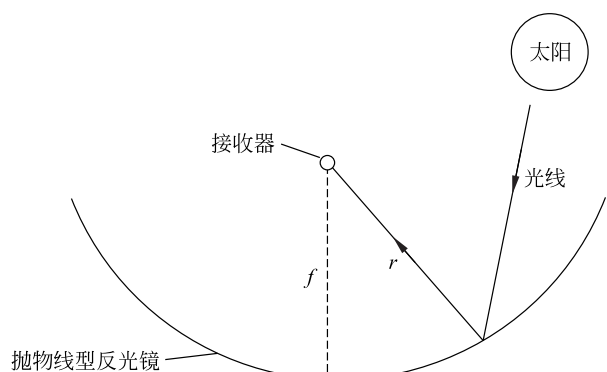


图3 抛物线型反光镜光线分析图

Fig. 3 Parabolic reflector ray analysis diagram

抛物弧形,计算时也应按照其对应的原理。本文将 r 取值为平均距离,根据几何关系,如下可得 $\bar{r}$:

$$\bar{r} = \frac{w}{2} \int_0^{\frac{w}{2}} \left(f + \frac{x^2}{4f} \right) dx = f \left(1 + \frac{w^2}{48f^2} \right) \quad (20)$$

式中: f 为槽式聚光器的焦距; w 为聚光器的开口弦长。

那么,端部损失系数 ξ_{endlose} 为

$$\xi_{\text{endlose}} = 1 - \frac{f}{L_{\text{HCE}}} \left(1 + \frac{w^2}{48f^2} \right) \tan \theta \quad (21)$$

式中 L_{HCE} 为单个槽式聚光器的长度。

此外,引入了遮挡损失系数来对镜场的遮挡情况进行相对准确描述。实际环境中,由于前后排槽式聚光器的间距有限,导致后排被部分遮挡(见图4),未被遮挡的部分所占比例为遮挡损失系数,其计算公式如下:

$$\xi_s = \frac{L_{\text{space}}}{w} \cdot \frac{\cos \gamma_s}{\cos \theta} \quad (22)$$

式中 L_{space} 为两排槽式聚光器相隔的基本距离。

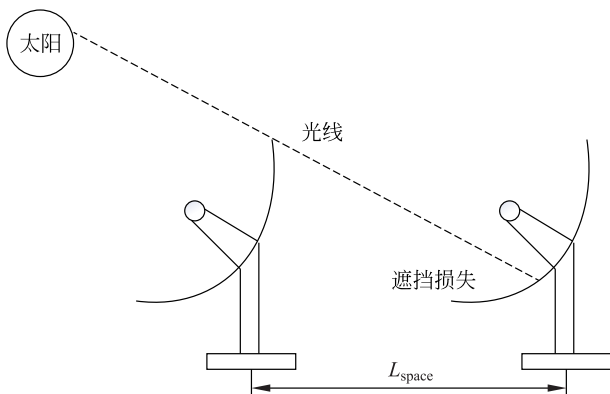


图4 槽式聚光器部分遮挡示意图

Fig. 4 Schematic diagram of partial shielding for the trough concentrator

当太阳入射角增大时,会产生一部分额外的能量损失,源于太阳光线穿过槽式集热器接收管吸收

和反射一部分太阳辐射能^[12]。为表述能量损耗的大小,将其命名为修正系数。

2 模型建立

基于 AnySimu 仿真平台,建立了槽式光热电站镜场效率模型,该模型可计算多种型号槽式聚光器在任意地区、任意时刻的镜场效率。

如图5所示,对槽式聚光器的镜场效率进行了建模。给定当地时间、地理位置信息、槽式聚光器类型及布置方式,即可得到实时的槽式聚光器镜场效率。在同一槽式光热电站中,单个槽式聚光器镜场效率即可代表整个槽式光热电站的镜场效率。

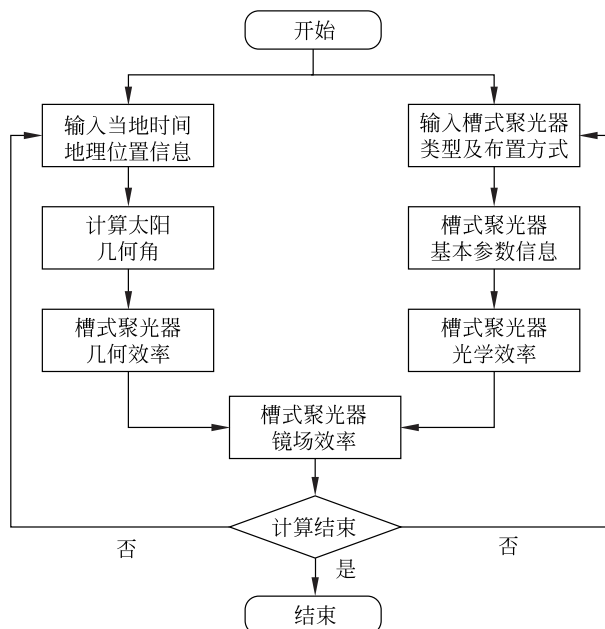


图5 槽式聚光器镜场效率模型建模过程

Fig. 5 Modeling process of efficiency model of trough concentrator

在表1中,列出了2种典型槽式聚光器的关键数据,它们都由LUZ公司生产。目前,我国采用的聚光装置的主要参数与LUZ公司LS-3型槽式聚光装置的参数大致相同^[13-14]。

根据文献[15],可以得到LS-2与LS-3型槽式聚光器的修正系数 I ,如表2所示。

AnySimu 是华北电力大学研发的一款图形建模仿真平台^[16]。当用户需要建立和修改模型时,AnySimu 仿真支撑软件可以根据用户需求,对数据库进行在线修改,大大提高了工作效率,其系统构成如图6所示。

AnySimu 作为一款将算法图形化、模块化的仿真平台,在大型火电机组的建模及仿真中已经得到

表 1 2 种典型槽式聚光器模型的关键数据

Table 1 Key data of two typical trough concentrator models

参数	LS-2	LS-3
面积/m ²	235	545
聚光比	71.1	82.1
开口宽度/m	5	5.75
平均焦距/m	1.84	2.12
长度/m	48	99
光学效率	0.737	0.772
涂层反射率	0.24	0.10
涂层吸收率	0.94	0.96
玻璃管穿透率	0.95	0.965
镜片反射率	0.94	0.94
集热器峰值效率/%	66	68
集热器全年效率/%	50	53

表 2 修正系数 I 在不同型号聚光器中的数学模型

Table 2 Mathematical models of correction coefficient I in different types of concentrators

槽式聚光器名称	修正系数 I
LS-2	$I = 1 - 8.84 \times 10^{-4} \cdot \theta / \cos \theta - 5.396 \times 10^{-5} \theta^2 / \cos \theta$
LS-3	$I = 1 - 2.2307 \times 10^{-4} \theta - 1.1 \times 10^{-4} \theta^2 + 3.18596 \times 10^{-6} \theta^3 - 4.85509 \times 10^{-8} \theta^4$

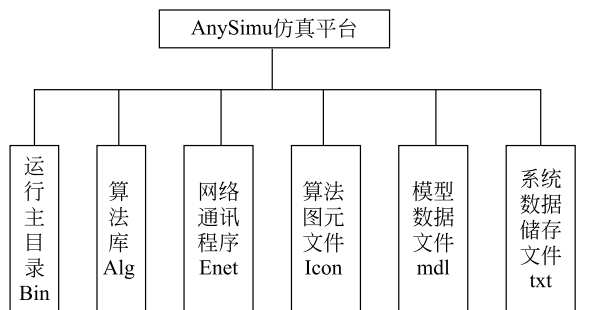


图 6 AnySimu 仿真平台系统构成图

Fig. 6 System composition diagram of AnySimu simulation platform

了广泛的应用。本文将其应用于槽式光热电站镜场效率计算及仿真分析中,图形建模系统 AnySimu 界面如图 7 所示。

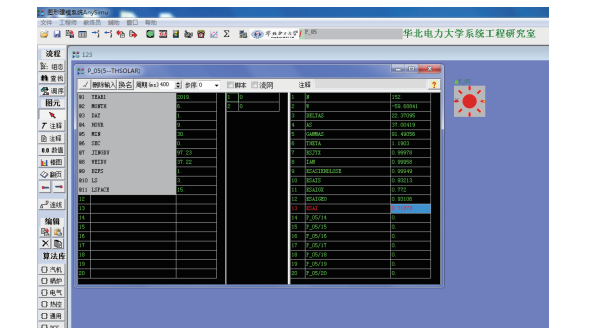


图 7 图形建模系统 AnySimu 界面

Fig. 7 AnySimu interface of graphical modeling system

本算法的输入依次为:年、月、日、时、分、秒、经度、纬度、槽式镜场聚光器布置方式、槽式镜场聚光器选用类型、槽式镜场聚光器间距。本算法的输出依次为:日期序数、太阳时角、赤纬角、太阳高度角、太阳方位角、太阳入射角、入射角余弦、入射角修正系数、端部损失系数、遮挡系数、槽式镜场光学效率、槽式镜场几何效率、槽式光热电站镜场效率。

3 仿真分析

基于上述模型,本文对影响槽式光热电站镜场效率的时空因素及聚光器因素进行了仿真分析,内容包括季节变化、地理位置、槽式聚光器型号、槽式聚光器间距及槽式聚光器布置方式对槽式光热电站镜场效率的影响。

春分日、夏至日、秋分日、冬至日是四季的开端,利用这 4 个特殊的时间节点来代表四季。图 8 为 LS-3 型槽式聚光器在南北布置东西跟踪且聚光器间距为 15 m 的条件下,在德令哈地区槽式光热电站镜场效率的日变化趋势图。由图 8 可知,镜场效率日变化趋势大同小异:上午镜场效率先逐渐增大再逐渐减小,于正午时刻达到一天中镜场效率的最低值;正午 12 时以后,镜场效率又慢慢攀升,达到高点后再慢慢降低。其中,夏至日的平均镜场效率最高;春分日和秋分日居中;冬至日最低。春季,槽式光热电站的镜场效率从春分日的日变化趋势逐渐演化为夏至日的日变化趋势。四季交替变化,周而复始。

此外,槽式光热电站镜场效率在日出与日落时

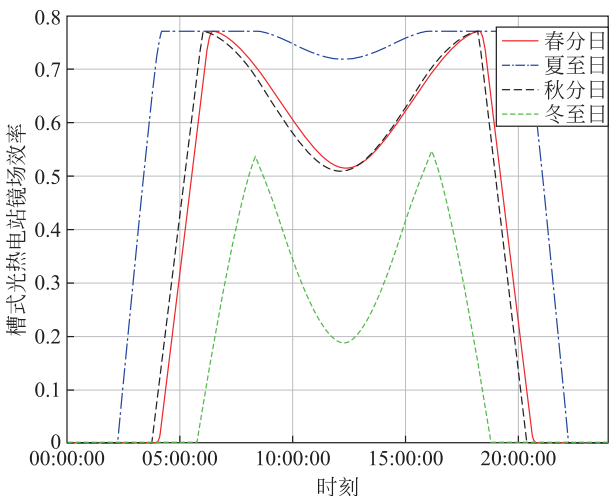


图 8 不同季节槽式光热电站镜场效率日变化趋势图

Fig. 8 Diurnal trend diagram of mirror field efficiency of trough type photothermal power station in different seasons

变化非常迅速。在实际运行过程中,应当充分利用这一特点,在镜场效率迅速变化时期做系统稳定性分析。同时,可以根据镜场效率随季度及时间的变化情况来划分电厂运行和维护时间,制定全年槽式光热电站的发电计划。

图 9 为不同地理位置槽式光热电站镜场效率的日变化趋势图。其他环境及设备条件同上,地理位置信息如下:北京(东经 $116^{\circ}20'$, 北纬 $39^{\circ}56'$)、德令哈(东经 $97^{\circ}23'$, 北纬 $37^{\circ}22'$)、广州(东经 $113^{\circ}15'$, 北纬 $23^{\circ}06'$)、上海(东经 $121^{\circ}47'$, 北纬 $31^{\circ}23'$)、哈尔滨(东经 $126^{\circ}53'$, 北纬 $45^{\circ}80'$)。

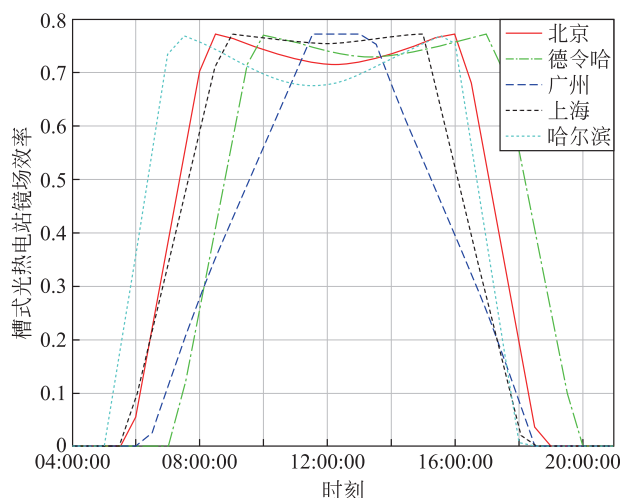


图 9 不同地理位置槽式光热电站镜场效率日变化趋势图

Fig. 9 Diurnal trend diagram of mirror field efficiency of trough type photothermal power station at different geographical locations

通过对比可以发现,纬度越高的地区,槽式光热电站日均镜场效率越高;纬度越低的地区,槽式光热电站镜场效率的极大值越大;经度只影响日出日落的时间,即光热电站发电的时间。

图 10 模拟了 2019 年 6 月 1 日在德令哈地区使用 LS-2 型、LS-3 型槽式聚光器与改进 LS-3 型槽式聚光器(平均焦距 2.5 m, 光学效率 0.80)时,槽式光热电站镜场效率的日变化趋势,布置方式均为南北布置东西跟踪。改进 LS-3 型槽式聚光器相较 LS-2 型,提升槽式光热电站镜场日平均效率约为 6%,最高提升槽式光热电站镜场实时效率接近 12%。显然,聚光比更大、焦距更长、光学效率更高的改进 LS-3 型槽式聚光器,极大地提升了槽式光热电站的镜场效率,更有利于提升电站整体能量转化效率与经济效益。

图 11 所示为两排 LS-3 型槽式聚光器的布置间距分别为 10, 15, 20 m 时,在德令哈地区 3 月 21 日

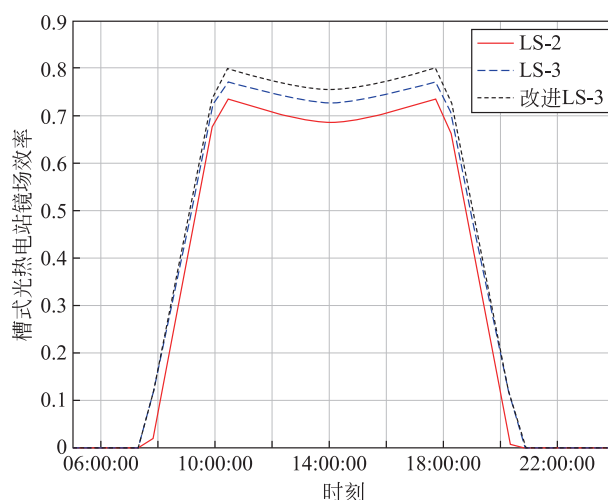


图 10 3 种槽式聚光器镜场效率日变化趋势对比图

Fig. 10 Comparison chart of diurnal variation trend of mirror field efficiency of three trough concentrators

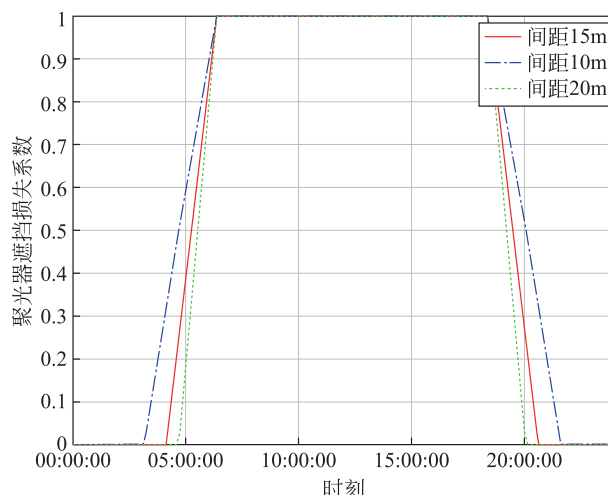


图 11 不同间距下槽式聚光器遮挡损失系数日变化趋势图

Fig. 11 Diurnal variation trend of shielding loss coefficient of trough concentrator at different intervals

的遮挡损失系数的日变化趋势图。遮挡损失系数越大,表示镜场受遮挡因素的影响越小。随着布置间距的增大,槽式聚光器之间的遮挡效果逐渐减弱,日遮挡损失系数逐渐增大,遮挡系数的变化速度也越来越快。理想条件下,若两排槽式聚光器之间的间距大到一定程度时,槽式镜场的遮挡损失为 0。但受到场地限制及经济性因素影响,应当根据实际情况取一个最佳值。

槽式聚光器的布置方式主要有 2 种,一种为南北布置东西跟踪,即槽式聚光器依据焦线南北水平布置,单跟踪轴东西向跟踪,另一种为东西布置南北跟踪。两种布置方式下,槽式光热电站的镜场效率有很大的区别。如图 12 所示,为同一环境条件下,LS-3 型槽式聚光器在 2 种布置方式下的槽式光

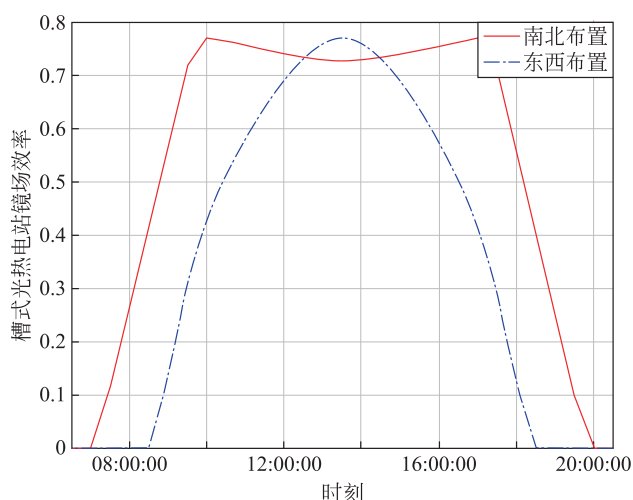


图 12 2 种布置方式下槽式光热电站镜场效率日变化趋势图
Fig. 12 Diurnal variation trend diagram of the efficiency of mirror field in the trough photothermal power station under two arrangement modes

热电站变化趋势图。

通过对比可以发现,2 种布置方式下,槽式光热电站的镜场效率峰值基本一致,但南北布置东西跟踪方式下的平均镜场效率远大于东西布置南北跟踪方式。

4 结论

基于 AnySimu 平台,建立了槽式太阳能镜场效率模型,模型可计算多种型号槽式聚光器在任意地区任意时刻的镜场效率。在此基础上,本文对影响槽式光热电站镜场效率的时空因素及聚光器因素进行了仿真分析。

从时间因素来看,槽式光热电站的平均镜场效率夏天高,冬天低,可以根据这一特性,合理规划光热电站的运维时间。从空间因素来看,槽式光热电站适合建立在高纬度地区,纬度越高,槽式光热电站日均镜场效率越大;经度影响着槽式光热电站的工作时间,也是光热电站选址的一个重要参考因素。从聚光器本身来看,改进 LS-3 型槽式聚光器明显优于 LS-2 型,下一代槽式聚光器应当朝着聚光比更大、焦距更长、光学效率更高的方向发展。从聚光器布置方式来看,两排槽式聚光器的间距应当根据实际情况取一个最佳值;聚光器南北布置东西跟踪明显优于东西布置南北跟踪。

参考文献

[1] 张哲喆, 巨星, 潘信宇, 等. 太阳能光伏-光热复合发电技术

及其商业化应用[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 220-230.

ZHANG Zheyang, JU Xing, PAN Xinyu, et al. Photovoltaic/concentrated solar power hybrid technology and its commercial application[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 220-230.

[2] 杜尔顺, 张宁, 康重庆, 等. 太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5765-5775, 6019.

DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5765-5775, 6019.

[3] PRIETO C, OSUNA R, FERNÁNDEZ A I, et al. Molten salt facilities, lessons learnt at pilot plant scale to guarantee commercial plants; heat losses evaluation and correction[J]. Renewable Energy, 2016, 94: 175-185.

[4] GAN Guohui, XIANG Yetao. Experimental investigation of a photovoltaic thermal collector with energy storage for power generation, building heating and natural ventilation [J]. Renewable Energy, 2020, 150: 12-22.

[5] 曲航, 杨宾, 赵军. 槽型抛物面太阳能电站的前景和不同冷却系统的比较分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(3): 64-67.

QU Hang, YANG Bin, ZHAO Jun. Simulation of parabolic trough solar power generating system for typical Chinese sites [J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(3): 64-67.

[6] WAGNER M J. Technical Manual for the SAM Physical Trough Model[R]. NREL, 2011.

[7] KHALIL S A, SHAFFIE A M. A comparative study of total, direct and diffuse solar irradiance by using different models on horizontal and inclined surfaces for Cairo Egypt[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 853-863.

[8] 陈飞, 李明, 许成木, 等. 腔体吸收器位置对太阳能槽式系统光热转换性能的影响[J]. 光学期刊, 2014, 34(9): 238-244.

CHEN Fei, LI Ming, XU Chengmu, et al. Influence of photo-thermal conversion characteristics by the position of cavity absorber in parabolic trough solar concentrator [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 238-244.

[9] 王启扬, 王金平, 张祥成, 等. 槽式太阳能集热器运行特性分析[J]. 热能动力工程, 2019, 34(10): 172-177.

WANG Qiyang, WANG Jinping, ZHANG Xiangcheng, et al. Analysis on operation characteristics of parabolic trough solar collector[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(10): 172-177.

[10] 张宏丽, 王存旭, 王树群, 等. 抛物槽式集热器太阳入射角的计算[J]. 太阳能学报, 2016, 37(1): 98-102.

ZHANG Hongli, WANG Cunxu, WANG Shuqun, et al. Calculation of incident angle of parabolic trough collector[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(1): 98-102.

[11] 杨宾. 槽式太阳能直接蒸汽热发电系统性能分析与实验研究

- [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- YANG Bin. Performance analysis and experimental research on direct steam generation parabolic trough solar thermal power plant[D]. Tianjing: University of Tianjing, 2011.
- [12] FORRESTER J. The value of CSP with thermal energy storage in providing grid stability[J]. Energy Procedia, 2014, 49: 1632-1641.
- [13] BINOTTI M. Analytical approach treating three—dimensional geometrical effects of parabolic trough collectors: preprint [R]. USA: National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [14] WANG J, WANG J, BI X, et al. Performance simulation comparison for parabolic trough solar collectors in China[J]. International Journal of Photoenergy, 2016, 18: 1-16.
- [15] PADILLA R V. Simplified methodology for designing parabolic trough solar power plants[D]. Florida: University of South Florida, 2011.
- [16] 高亚龙. 基于 AnySimu 平台的火电厂电网络潮流计算研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- GAO Yalong. The research of AnySimu platform-based thermal power plant electric network flow calculation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

收稿日期: 2020-07-15

作者简介:

张晓东(1975),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电气控制与信息化研究, 12065306@chnenergy.com.cn;

牛海明(1980),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为控制系统及建模技术, nhm80@sohu.com。



张晓东