线性菲涅尔系统空管预热模型分析及变占空比跟随控制应用研究

张志勇^{1,2}, 马军^{1,2}, 王成龙^{1*}, 夏养君²

1. 兰州交通大学国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心, 兰州 730070;

2. 兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 兰州 730070

* E-mail: clwang@mail.lzjtu.cn

收稿日期: 2020-08-23; 接受日期: 2020-11-19; 网络版发表日期: 2021-01-28

国家自然科学基金(批准号: 52066010)资助项目

摘要 通过分析影响线性菲涅尔集热效率的关键因素, 建立线性菲涅尔系统光热效率模型, 基于该模型提出了一种适用于线性菲涅尔系统空管预热的变占空比跟随控制方法. 通过实时数据计算每个预热周期内系统的聚光占空比, 实现线性菲涅尔系统恒速率预热控制. 通过MATLAB模拟不同时刻及不同辐照(DNI)下预热过程系统聚焦占空比, 并将该方法应用于敦煌熔盐菲涅尔示范电站空管预热. 实验结果表明, 该控制方法能够很好地实现线性菲涅尔系统集热管空管恒速率预热控制. 与常规定占空比预热方式相比, 在满足真空集热管温升速率要求的前提下, 该方法能够有效缩短系统整体预热时间, 实现最大效率太阳资源利用.

关键词 太阳能, 线性菲涅尔, 空管预热, 变占空比, 跟随控制

1 引言

在太阳能聚光集热发电系统中, 熔盐介质可以使太阳能电站操作温度提高到550°C, 从而使得蒸汽汽轮机的发电效率大幅提高. 基于熔盐介质热物性、稳定性、流动性等特点. 高温熔盐介质在太阳能光热发电中得到了极大的发展, 但是, 熔盐介质的凝固点很高, 有的甚至高达240°C以上^[1,2], 因此在使用熔盐作为传、储热介质时, 需要重点考虑熔盐凝冻的保护措施, 在电站运行中熔盐介质的防凝费用非常突出.

国内外专家学者对此进行了一定研究, 熊亚选等人^[3]通过实验验证低熔点(86°C)盐在槽式聚光集热系统中的运行规律, 探讨解决熔盐在槽式太阳能热发电系统中易于凝冻及能耗过高问题; 赵晓辉等人^[4]分析了采用低熔点盐作为传热和储热介质时电站的收益及运行可靠性等方面的优势, 但低熔点盐长期运行稳定性有待进一步验证; 廖志荣等人^[5]利用焓法模拟了水平管道内熔融盐的熔化过程, 发现电伴热的安装位置影响熔化过程的不均匀性及完全熔化时间, 电伴热功率和完全融化所需时间呈非线性关系, 为光热电站电

引用格式: 张志勇, 马军, 王成龙, 等. 线性菲涅尔系统空管预热模型分析及变占空比跟随控制应用研究. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 315–323
Zhang Z Y, Ma J, Wang C L, et al. Air tube preheating model of linear Fresnel systems and application of variable duty ratio following control (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 315–323, doi: [10.1360/SST-2020-0358](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0358)

伴热系统设计及管道冻堵情况下的解冻提供了理论指导; Caranese等人^[6]和Grogan^[7]提出, 对熔盐槽式光热电站集热管采用阻抗加热方式实现防凝解冻及管道预热, 其他熔盐管道、阀门采用矿物绝缘电缆加热的方式实现防凝解冻及管道预热, 但集热管的阻抗加热方式对设备的绝缘要求极为苛刻, 工程应用难度较大; Eickhoff等人^[8]针对线聚焦光热电站, 提出日落停机排空管道, 日出利用太阳辐照预热集热管, 待满足充盐条件后, 再将熔盐注入集热回路的运行方案; Kearney等人^[9]指出, 采用夜间低速循环方式解决熔盐介质夜间防凝问题. 国内外专家学者主要侧重于低熔点盐的应用与性能研究、管道冻堵情况下的解冻及电伴热设计、熔盐介质光热电站的防凝运行策略研究, 针对大规模商业化运行线聚焦光热电站, 快速、可靠、高效的预热方式对电站的光热利用具有巨大的现实意义, 国内外相关研究较少.

熔盐电站有两种主流运行模式: 一种是夜间低速循环模式; 另一种是退盐-注盐模式, 即傍晚聚光结束时退盐, 次日开启运行时注盐. 对于退盐-注盐的运行模式, 在开始向集热回路注盐时, 需提前将集热管的空管温度预热至安全温度以上, 当采用光预热时, 需考虑每个预热周期内空管的聚光时长, 使空管的温升速率在安全温升速率以下, 如果超过空管的温升速率, 将会对集热管的选择性吸收膜层造成不可逆转的破坏, 影响集热管性能和使用寿命. 影响集热管温升速率的因素很多, 辐照强度、镜面洁净度、集热系统的集热效率、环境温度、集热管自身的特性等都将影响集热管的温升速率. 集热管的温升控制是一个非线性、多变量、强惯性的过程, 这些众多因素增加了温控的难度, 常规的定时摆动预热不能适应系统随机、恒速率预热控制的要求. 基于以上问题, 本文通过对影响因素中权重较大、且时变的遮挡效率、余弦效率进行建模分析, 构建系统的实时效率模型, 结合辐照、清洁度等实时信息, 提出一种变占空比跟随控制, 并通过实际测试对其进行验证.

2 线性菲涅尔集热系统分析及建模

2.1 线性菲涅尔集热系统结构

考虑系统容积率和性价比的因素, 线性菲涅尔式太阳能系统相邻反射镜间距使聚光系统普遍存在遮挡

影响, 优化布置反射镜场可最大限度地减小系统的阴影影响^[10,11]. 以敦煌50 MW熔盐线性菲涅尔电站集热岛为研究对象, 通过分析系统结构, 提出一种适用于该系统的空管预热方法, 通过现场测试验证该方法的实用性. 本项目中线性菲涅尔集热系统的结构如图1所示.

2.2 阴影与遮挡效率模型

线性菲涅尔反射镜场中, 相邻反射镜间存在阴影与遮挡. 太阳光线照射到两个相邻的镜元上, 其中一个镜元在相邻镜元上造成阴影, 使阳光不能照射到被遮挡的镜元上. 设两列镜子平铺时边缘间距为 S , 镜子宽度为 D , 造成的阴影和遮挡长度为 L , 太阳光入射角为 α , 镜元的倾角为 β , 每列镜子编号为 $1, 2, \dots, n, n=20$, 镜元倾角依次为 $\beta_1, \dots, \beta_n$, 设第 n 列镜元在相邻镜元上造成的阴影和遮挡设为 L_n , 阴影和遮挡的长度如式(1)所示, 20列镜元的总遮挡记为 L , L 的计算方法如式(2)所示, 阴影和遮挡效率如式(3)所示^[12-15].

$$L_n = \frac{D}{2} - \frac{\tan \alpha \times \left(S + D - \frac{D}{2} \cos(\beta_n) \right) - \frac{D}{2} \sin(\beta_n)}{\sin(\beta_{n-1}) \left(1 + \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\beta_{n-1})} \right)},$$

$$(L_n \geq 0), \quad (1)$$

$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_n, n = 19, \quad (2)$$

$$\eta_{sh} = 1 - (L_1 + L_2 + \dots + L_n) / D / R, R = 20. \quad (3)$$

相邻镜元之间遮挡的几何关系如图2所示.

在线性菲涅尔集热系统中, 一次镜列随时间自动

图1 线性菲涅尔集热系统结构

Figure 1 Structure of linear Fresnel thermal system.

图 2 (网络版彩图)镜元遮挡几何关系示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of occlusion relation between adjacent mirror elements.

调整倾角, 相邻镜元之间的阴影与遮挡随时间不断变化, 镜面的阴影与遮挡随时间和季节时刻变化^[16,17]. 不同季节阴影与遮挡效率全天变化曲线如图3(a)所示, 阴影与遮挡效率全年变化曲线如图3(b)所示(以上午9点为例). 从图中可以看出, 夏至时, 镜面无阴影与遮挡影响的时长约为7 h; 春分、秋分时, 镜面无阴影与遮挡影响的时长约为5 h; 冬至时, 镜面无阴影与遮挡影响的时长约为3 h.

2.3 余弦效率模型

另一个随时间变化影响集热系统聚光效率的主要因素是余弦损失. 太阳入射光线并不是垂直地打在镜面上, 与镜面法线有一定的夹角, 余弦损失就是由于这种倾斜所导致的镜元表面面积相对于太阳光可见面积的减少而产生的. 平面上某一面积接收的太阳辐照度与其接收的最大辐照度之比, 等于入射光线与镜面法线方向夹角的余弦值^[18,19]. 余弦损失如图4所示.

设入射光线与镜面法线的夹角为 θ , 那么, 余弦效

率为

$$\eta_{\cos} = \cos(\theta) = -\cos(\alpha_s)\sin(\gamma_s)\sin(\beta) + \cos(\beta)\sin(\alpha_s), \quad (4)$$

式中, α_s 为太阳高度角, γ_s 为太阳方位角, β 为镜列倾角.

余弦效率随太阳位置的变化有所差异. 另外, 余弦效率还因纬度的不同有所差异. 纬度越高, 余弦损失越大. 敦煌地区(北纬37.25°)余弦效率在一天中的变化如图5(a)所示, 全年内不同时间点余弦效率的变化曲线如图5(b)所示.

2.4 线性菲涅尔集热系统综合光热效率模型

影响线性菲涅尔聚光集热系统效率的因素很多, 遮挡与阴影效率(η_{sh})、余弦效率($\eta_{\cos}$)、末端损失效率(η_{end})、一次反射镜反射率(η_{ref})、二次反射镜反射率(η_{re-cpc})、复合抛物面二次聚光器(CPC)汇聚率(η_{cpc})、真空集热管透过率(η_{tr})、真空集热管吸收率(η_{ob})、真空集热管热损系数(η_{loss})、跟踪控制精度(η_{track})和镜面清洁度(η_{mirror})等都将对集热系统的光热效率产生影响^[20,21]. 系统综合集热效率如式(5)所示^[22,23].

$$\eta = \eta_{sh} \cdot \eta_{\cos} \cdot \eta_{end} \cdot \eta_{ref} \cdot \eta_{ref_cpc} \cdot \eta_{cpc} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{ob} \cdot \eta_{loss} \cdot \eta_{track} \cdot \eta_{mirror}. \quad (5)$$

综合考虑各影响因素, 假设镜面清洁, 其余因素按照常规经验取值, 末端损失效率取值0.985, 一次反射镜反射率取值0.94, 二次反射镜反射率取值0.935, CPC汇聚率取值0.92, 真空集热管透过率取值0.92, 真空集热管吸收率取值0.95, 真空集热管热损系数取值0.92, 跟踪控制精度取值0.95, 镜面清洁度取值0.95. 集热系

图 3 (网络版彩图)阴影与遮挡效率. (a) 全天变化曲线; (b) 9:00时刻全年变化曲线

Figure 3 (Color online) Shadow and occlusion efficiency. (a) The all-day variation curve; (b) the annual variation curve at 9:00.

图 4 (网络版彩图)余弦损失示意图
Figure 4 (Color online) Diagram of cosine loss.

统全天综合光热效率变化如图6(a)所示, 系统全年光热效率在不同时间点的变化曲线如图6(b)所示。

图 5 (网络版彩图)余弦效率. (a) 不同季节全天变化曲线; (b) 不同时刻全年变化曲线
Figure 5 (Color online) Cosine efficiency. (a) All-day variation curve in different seasons; (b) the annual curve at different times.

图 6 (网络版彩图)系统光热效率. (a) 不同季节全天变化曲线; (b) 不同时刻全年变化曲线
Figure 6 (Color online) System thermal efficiency. (a) All-day variation curve in different seasons; (b) the annual variation curve at different times.

3 变占空比预热控制

影响集热管温升速率的主要因素是太阳辐照和集热系统的效率, 基于上节分析得到的集热系统当前效率, 计算机系统根据实时采集的辐照数据(I), 结合当前温度(T_{re})、温升速率(Δt)、镜面清洁度(η_{mirror})、集热系统投用面积(S)等, 通过计算生成该升温周期内适合本次控制的聚焦占空比(dc).

3.1 模型结构

当利用太阳光对真空集热管进行预热时, 热源为太阳, 吸热物体为真空集热管内不锈钢管, 不锈钢管吸收热量使温度上升, 通过调整每个升温周期内反射光线在集热管上的汇聚时长 T_f 来控制集热管的温升

速率.

不锈钢集热管外径 $d=90$ mm, 壁厚 $\delta=4.5$ mm, 比热 $C=0.502$ kJ/(kg $\cdot$ °C), 密度 $\rho=7.98$ g/cm³, 选取集热管吸热长度 $l=100$ m. 真空集热管的升温速率要求不超过5°C/min, 短时极限温升速率不超过30°C/min. 通过式(6)~(9)可以计算出系统预热时的聚光占空比 dc .

$$Q_{\text{turb}} = C \cdot m \cdot \Delta t, \quad (6)$$

$$Q_{\text{sun}} = I \cdot S \cdot \eta \cdot t, \quad (7)$$

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot ((d/2)^2 - (d/2 - \delta)^2) \cdot l, \quad (8)$$

$$dc = \frac{Q_{\text{turb}}}{Q_{\text{sun}}} = \frac{C \cdot \rho \cdot \pi \cdot ((d/2)^2 - (d/2 - \delta)^2) \cdot l \cdot \Delta t}{I \cdot S \cdot \eta \cdot t}, \quad (9)$$

式中, Q_{turb} 为集热管吸收的热量, Q_{sun} 为太阳释放的能量, I 为太阳辐照强度, S 为对应的集热面积.

当计算所得占空比 $dc>1$ 时, 设置 $dc=1$, 设定每个升温周期为 T_c , 聚光时长 $T_f=T_c \times dc$.

以100 m长度真空计热管为研究对象, 按照最大速率5°C/min升温, 100 m长度集热管升温5°C所需吸收的热量约为2530 kJ. 夏至时敦煌地区最大辐照实测值约为1000 W/m², 100 m长度集热回路一次反射镜面积约为1440 m². 根据图6(a)得出, 集热系统综合效率最大值约为0.55, 100 m长度集热镜场每秒释放的最大能量约为790 kJ. 在最大辐照强度且最大集热效率情况下, 集热器聚焦3.2 s时长可将集热管温度提升5°C, 在此工况下, 集热系统通常采用半幅镜场进行系统预热. 正常运行中, 为最大化利用太阳资源, 当太阳升起后便开始进行系统预热. 在冬至早晨太阳资源较差条件下(直射辐照强度(DNI)=400 W/m², $\eta=0.15$), 100 m长度集热镜场每秒释放能量约为86 kJ, 在此集热条件下, 集热器聚焦约30 s可将集热管温度提升5°C. 确定集热管常规运行条件和极限运行条件后, 结合驱动电机的运行速度, 保证光斑在整个预热过程中能够完全偏离CPC接收面, 同时, 根据现场试验结果, 预热过程的扫描周期随镜面倾角的不同全天划分为5个区间, 5个区间关于正午时刻对称划分, 不同扫描经验取值依次为34, 38, 42, 46和50 s.

3.2 控制流程

预热时聚光占空比的变化受到实时辐照、镜面洁

净度、聚光面积及当前时刻聚光效率等多个参数的影响. 控制系统根据当地地理信息和当前时刻计算出系统的集热效率, 结合实时太阳辐照强度及镜面洁净程度, 自动计算出每个扫描周期内的聚光占空比, 根据每个周期的聚光占空比控制驱动电机电作, 调节太阳反射光线在复合抛物面二次聚光器(CPC)内的聚光时长. 在保证空管安全升温速率的前提下, 最大化利用太阳资源完成空管预热. 当集热管的空管温度达到安全注盐温度以上时, 预热过程结束, 控制系统输出温度到达设定值报警信号. 变占空比预热控制流程如图7所示.

图7 变占空比预热控制流程图

Figure 7 Flow chart of variable duty cycle preheating control.

3.3 控制过程仿真分析

太阳能光热应用中, DNI 大于 400 W/m^2 称为有效太阳辐照。当 DNI 小于 400 W/m^2 时, 可利用该时段太阳资源进行集热系统空管预热。为最大程度利用太阳资源, 通常情况下, 早晨太阳升起后就应当开始系统预热。早晨运行系统时, 线性菲涅尔一次镜列之间的遮挡比较严重, 同时太阳高度角较低, 系统的余弦损失也较大。阴影与遮挡效率、余弦效率、太阳辐照强度是影响预热温升的主要因素, 随着时间的推移, 太阳辐照强度、系统遮挡效率及余弦效率逐渐变化。由图 6(a) 可以看出, 以敦煌地区为例, 同一季节太阳升起后的 1.5 h 内, 集热系统的综合效率变化较大。早晨阶段最大效率与最小效率相差超过 5 倍。当综合效率超过 0.1 时可进行有效利用。对于不同季节, 集热系统的效率同样存在较大差别, 夏至最大效率是春分、秋分最大效率的约 1.2 倍, 夏至最大效率是冬至最大效率的 2 倍多。早晨阶段太阳辐照的变化速度也相对较快。当系统的预热启动时间在中午时段, 镜列间的遮挡损失影响减小, 余弦效率和辐照强度是影响系统聚光占空比的主要因素。若采用恒定占空比, 预热过程很可能出现温升速率超限造成真空集热管损伤, 或者使整个预热过程漫长造成太阳资源浪费。集热系统效率和太阳辐照的非线性变化使预热过程中聚焦占空比也应随之变化, 系统在安全温升速率下, 预热过程聚光占空比应随时调整, 以满足系统预热的温升要求。采用 MATLAB 软件进行实时数据仿真, 预热时聚光占空比的目标输出曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出, 系统占空

比的输出调整在早晨时比较频繁, 在中午时段, 占空比的变化主要受辐照强度的影响。

4 应用实例及分析

该控制方法已应用于兰州大成敦煌熔盐线性菲涅尔实验系统, 如图 9 所示。该实验系统循环回路总长度为 2300 m , 传热介质为二元熔盐, 熔盐的凝冻点为 243°C 。循环支路中设置多个温度测点, 计算机控制系统完成温度、辐照等实时数据的采集, 通过实时数据及当前集热器聚光效率计算预热时聚光占空比, 控制系统在每个扫描周期自动调整聚光占空比, 输出控制信号驱动电机, 完成集热管的预热控制。根据 3.1 节分析计算结果, 综合考虑定占空比预热过程中驱动电机运行速度, 保证夏季太阳资源最好时不能因预热过程过为频繁造成集热管升温超限, 同时保证冬季太阳资源较差时有足够的光斑汇聚使集热管快速升温, 结合现场实验经验, 定占空比预热扫描周期设定为 40 s , 聚焦时长设定为 3 s 。图 10 为 2019 年 9 月 8 日分别采用变占空比和定占空比进行预热控制时集热管的温升曲线。由图 10 可以看出, 变占空比控制温升曲线近乎直线, 控制效果基本实现了恒速率温升控制。定占空比控制在辐照效率低、集热器聚光效率较低时, 集热管温升较慢; 当辐照升高, 集热系统效率升高时, 集热管温升较快; 整体升温是按照指数曲线变化, 前期升温较慢, 后期升温变快。在图 10 所示的实际温升曲线中, 在保证集热管安全温升速率的前提下, 变占空比控制更

图 8 (网络版彩图)实时辐照及占空比输出
Figure 8 (Color online) Real-time irradiation and duty cycle output.

图 9 (网络版彩图)线性菲涅尔实验系统

Figure 9 (Color online) Linear Fresnel experimental system.

快的使集热管达到设定的温度, 变占空比控制整体预热时长是定占空比预热时长的78%, 太阳资源利用率更优; 从变占空比预热控制温升曲线可以得出, 从10:38到11:18, 集热管温度从22°C升温至250°C, 平均温升率约为5.7°C, 实际温升率是理想温升率的114%, 该模型条件下, 实际温升速率与理论温升速率误差为14%, 考虑到光斑进出CPC接收面时部分光斑的加热结果, 模型的实际输出结果符合理论计算的升温要求。

5 结论

本文针对熔盐线性菲涅尔系统注盐运行前集热管防凝问题, 提出变占空比跟随控制方法实现集热管空管预热。通过机理分析建立线性菲涅尔系统空管预热

图 10 (网络版彩图)变占空比与定占空比下温升曲线对比

Figure 10 (Color online) Comparison of temperature rise curve under variable duty cycle and constant duty cycle.

模型, 结合该模型将变占空比跟随控制方法应用于线性菲涅尔系统空管预热。经过现场实验验证, 该方法消除了常规定占空比预热方法的不足之处, 控制效果满足恒速率温度控制, 温升速率误差约为14%, 远远小于集热管极限安全温升速率。同时, 在满足集热管安全温升速率的前提下, 缩短系统整体预热时间, 最优化利用太阳资源完成集热管空管预热。变占空比方法整体预热时长较定占空比预热方式缩短22%, 该方法控制效果良好, 控制精度高, 理论模型同样可应用于槽式及塔式太阳能光热系统的部分子系统中, 方法具有一定的通用性及实用性。

参考文献

- 1 Mills D. Advances in solar thermal electricity technology. *Sol Energy*, 2004, 76: 19–31
- 2 Zhang J R, Wei A Z. Application and development prospect of molten salt in solar thermal power generation (in Chinese). *Petro Prod Appl Res*, 2017, 2: 16–21 [张静如, 韦安柱. 熔盐在太阳能热发电中的应用与发展前景. 石油商技, 2017, 2: 16–21]
- 3 Xiong Y X, Wu Y T, Liu S W, et al. Preliminary experimental study on low melting point molten salt in trough solar heat collection (in Chinese). *Acta Energ Sol Sin*, 2015, 36: 173–178 [熊亚选, 吴玉庭, 刘闪威, 等. 低熔点熔盐在槽式太阳能集热中的初步实验研究. 太阳能学报, 2015, 36: 173–178]
- 4 Zhao X H, Zhao K J, Zhang J M. Optimal selection of heat transfer fluid in line focused photo-thermal power generation (in Chinese). *Energy Eng*, 2017, 6: 45–48 [赵晓辉, 赵坤蛟, 张晋茂. 线聚焦光热发电传热流体的优化选择. 能源工程, 2017, 6: 45–48]
- 5 Liao Z R, Li X, Xu C, et al. The melting process of a freezing molten salt pipe of concentrated solar power plant (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 960–966 [廖志荣, 李鑫, 徐超, 等. 太阳能热电站中熔融盐冻堵管道的熔化过程. 科学通报, 2017, 62: 960–966]
- 6 Caranese C, Matino F, Maccari A. On purpose simulation model for molten salt CSP parabolic trough. *AIP Conf Proc*, 2017, 1850: 160002
- 7 Grogan D C P. Development of molten-salt heat transfer fluid technology for parabolic trough solar power plants. Public Final Technical Report.

- Lakewood: Abengoa Solar, LLC, 2013
- 8 Eickhoff M, Meyer-Grünefeldt M, Keller L. New operating strategies for molten salt in line focusing solar fields—Daily drainage and solar preheating of receivers. *AIP Conf Proc*, 2016, 1734: 070007
 - 9 Kearney D, Kelly B, Herrmann U, et al. Engineering aspects of a molten salt heat transfer fluid in a trough solar field. *Energy*, 2004, 29: 861–870
 - 10 Wang C, Ma J, Fan D W. Arrangement and optimization of mirror field for linear Fresnel reflector system. *Opt Precis Eng*, 2015, 23: 78–82
 - 11 Wang C L, Ma J, Fan D W. Design and analysis of a CPC with single vacuum tube for linear Fresnel reflector system (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 597–602 [王成龙, 马军, 范多旺. 线性菲涅尔式聚光系统单管接收器的设计与优化. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44: 597–602]
 - 12 Montero G, Escobar J M, Rodríguez E, et al. Solar radiation and shadow modelling with adaptive triangular meshes. *Sol Energy*, 2009, 83: 998–1012
 - 13 Kalogirou S A. Solar thermal collectors and applications. *Prog Energy Combust Sci*, 2004, 30: 231–295
 - 14 Du C X, Wang P, Ma C F, et al. Optical geometric method for LFR mirror field arrangement without shading and blocking (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2010, 30: 3276–3282 [杜春旭, 王普, 马重芳, 等. 线性菲涅耳聚光系统无遮挡镜场布置的光学几何方法. *光学学报*, 2010, 30: 3276–3282]
 - 15 Du C X, Wang P, Wu Y T, et al. Analysis of field shielding performance of linear Fresnel solar condenser (in Chinese). *Acta Energ Sol Sin*, 2013, 34: 1868–1876 [杜春旭, 王普, 吴玉庭, 等. 线性菲涅耳太阳能聚光镜场遮挡性能分析. *太阳能学报*, 2013, 34: 1868–1876]
 - 16 Liang F, Zhang N. Calculation and analysis model of shadow and occlusion in linear Fresnel concentrating system (in Chinese). *Las Optoelect Prog*, 2019, 56: 180–185 [梁飞, 张娜. 线性菲涅耳式聚光系统阴影与遮挡计算分析模型. *激光与光电子学进展*, 2019, 56: 180–185]
 - 17 Pu S, Xia C. Optical design of a linear reflecting solar concentrator with all-flat mirrors (in Chinese). *Trans CSAE*, 2011, 27: 282–285 [浦绍选, 夏朝凤. 全平面镜线反射太阳能聚光器的光学设计. *农业工程学报*, 2011, 27: 282–285]
 - 18 Facão J, Oliveira A C. Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator. *Renew Energy*, 2011, 36: 90–96
 - 19 Pan L, Li L J, Ding T T. Simulation of cosine efficiency in tower solar thermal power mirror field (in Chinese). *Renew Energy Res*, 2013, 31: 1–5 [潘磊, 李丽娟, 丁婷婷. 塔式太阳能热发电镜场中余弦效率仿真研究. *可再生能源*, 2013, 31: 1–5]
 - 20 Du C X, Wang P, Wu Y T, et al. Vector analysis method for unoccluded mirror field placement in linear Fresnel concentrating system (in Chinese). *Acta Energ Sol Sin*, 2012, 3: 397–404 [杜春旭, 王普, 吴玉庭, 等. 线性菲涅耳聚光系统无遮挡镜场布置的矢量分析法. *太阳能学报*, 2012, 3: 397–404]
 - 21 Reda I, Andreas A. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Sol Energy*, 2004, 76: 577–589
 - 22 Song J H, Ma J S, Dai Y J. Design theory and optical analysis of linear Fresnel collector mirror field (in Chinese). *Renew Energy Res*, 2016, 34: 1–8 [宋景慧, 马继帅, 代彦军. 线性菲涅尔集热器镜场设计理论与光学分析. *可再生能源*, 2016, 34: 1–8]
 - 23 Xu H W, Zeng J T, Xu S S, et al. Analysis of optical efficiency of linear Fresnel primary mirror field (in Chinese). *Renew Energy Res*, 2016, 34: 962–969 [徐海卫, 郑建涛, 许世森, 等. 线性菲涅尔一次镜场光学效率分析. *可再生能源*, 2016, 34: 962–969]

Air tube preheating model of linear Fresnel systems and application of variable duty ratio following control

ZHANG ZhiYong^{1,2}, MA Jun^{1,2}, WANG ChengLong¹ & XIA YangJun²

¹ National Engineering Research Center for Technology and Equipment of Environmental Deposition, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

² Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

Through the analysis of the key factors that affect linear Fresnel collection efficiency, a thermal efficiency model for linear Fresnel systems is established. On the basis of the model, a suitable method of variable duty cycle following control is used for the hollow tube preheating of linear Fresnel systems. Through calculating the system concentrated duty ratio in each preheating cycle based on the real-time data, the linear Fresnel system constant speed control is achieved. MATLAB is used to simulate the focus duty ratio of the preheating system under different time and different irradiation, and the method is applied to the air tube preheating of Dunhuang molten salts in a Fresnel demonstration station. Experimental results show that compared with commonly prescribed duty ratio preheating methods, the proposed control method can achieve a constant rate of preheating control of the hollow tube in the linear Fresnel system under the premise that the requirements of hollow-tube temperature rise rate are met. Furthermore, the method can effectively shorten the overall preheating process to achieve maximum efficiency of solar resource utilization.

solar energy, linear fresnel, air tube preheating, variable duty ratio, follow control

doi: [10.1360/SST-2020-0358](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0358)