

线性菲涅尔式太阳能聚光器传热及能流均匀化研究

李东锴^{1,2}, 王成龙¹, 吴泽睿^{1,2}, 祁琛阳^{1,2}

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, 甘肃 兰州

²兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年2月12日; 录用日期: 2022年3月1日; 发布日期: 2022年3月8日

摘要

对线性菲涅尔式太阳能聚光器的传热性能进行研究, 在该系统下建立传热模型并对吸热管壁面温度、热量损失随传热介质对流换热系数上升时的变化规律进行研究。研究表明: 当辐射到吸热管表面的能流密度恒定时, 随着吸热管内传热介质温度上升和换热系数增加, 集热管内壁温度逐渐下降并达到极值, 如果继续采用强化传热的方法来降低系统热损, 会使得效果逐渐减弱; 针对吸热管周向能流非均匀问题, 本文提出了一种基于粒子群算法的优化方法, 通过改变主镜场中一次反射镜的瞄准点, 使得接收器表面能流分布标准偏差达到最小, 从而使得吸热管周向的能流分布更加均匀。通过优化使得当系统光学效率达到79.75%时, 吸热管上半部分的能流分布由36.6%上升到了39.5%。以上研究结果将为线性菲涅尔式太阳能集热器的优化设计和应用提供理论支撑。

关键词

线性菲涅尔式太阳能聚光器, 传热, 热损失, 粒子群算法, 能流分布

Linear Fresnel Solar Concentrator Heat Transfer and Energy Flow Homogenization Research

Dongkai Li^{1,2}, Chenglong Wang¹, Zerui Wu^{1,2}, Chenyang Qi^{1,2}

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

²Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Intelligent Control of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 12th, 2022; accepted: Mar. 1st, 2022; published: Mar. 8th, 2022

文章引用: 李东锴, 王成龙, 吴泽睿, 祁琛阳. 线性菲涅尔式太阳能聚光器传热及能流均匀化研究[J]. 建模与仿真, 2022, 11(2): 324-334. DOI: 10.12677/mos.2022.112029

Abstract

The heat transfer performance of the linear Fresnel solar concentrator is studied, a heat transfer model is established under this system and the variation law of the wall temperature and heat loss of the collector tube with the increase of the convective heat transfer coefficient of the heat transfer medium is studied. The research results show that when the energy flux density radiated to the surface of the collector tube is constant, as the temperature of the heat transfer medium in the collector tube increases and the heat transfer coefficient increases, the temperature of the inner wall of the collector tube gradually decreases and reaches the extreme value. If the method of enhancing heat transfer is continued to reduce the heat loss of the system, the effect will gradually weaken. Aiming at the problem of the non-uniformity of the circumferential energy flow of the collector tube, an optimization method based on particle swarm optimization is proposed. By changing the aiming point of the primary mirror in the primary mirror field, the standard deviation of the energy flow distribution on the receiver surface can be minimized, so that the energy flow distribution in the circumferential direction of the collector tube is more uniform. Through optimization, when the optical efficiency of the system reaches 79.75%, the energy flow distribution in the upper half of the heat absorption tube increases from 36.6% to 39.5%. The above research results will provide theoretical support for the optimal design and application of linear Fresnel solar collectors.

Keywords

Linear Fresnel Solar System, Heat Transfer Characteristics, Heat Loss, Particle Swarm Algorithm, Energy flow Distribution

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济和科技的快速发展,能源已成为了人类生存和发展的重要基础。但是,近年来,化石燃料的使用破坏了全球生态环境。在2020年七十五届联合国大会上,习近平总书记指出“中国将力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”[1]。因此,迫切需要我们改变现有的能源结构,优先发展可再生能源[2]。太阳能作为最丰富、无污染的可再生能源,受到了科学界的广泛关注[3][4]。然而,太阳辐射的能流密度较低,所以在使用太阳能时,必须采用特定的技术和设备来收集太阳能,而太阳能聚光系统能够较好地解决这一问题。目前,太阳能聚光系统主要包括塔式、槽式、线性菲涅尔式系统(Linear Fresnel Reflector, LFR)以及蝶式等[5][6][7][8]。由于线性菲涅尔反射式聚光集热系统具有制造和安装方便、集热高效和成本低廉等特点,所以在太阳能热发电领域具有很好的发展前景[9]。

近几十年,关于太阳能聚光集热系统的光热转换性能研究受到了广泛关注。目前,对太阳能聚光系统集热器传热的研究主要集中在塔式、槽式等系统,对于LFR系统的研究相对较少。Augsburger[10]等人研究了给定条件下塔式太阳能热发电系统吸热管的最佳结构,分析了吸热管非均匀能流密度、传热工质为熔盐等条件下的传热过程,并总结出了影响规律。方勇[11]等人建立了基于塔式太阳能集热器的有限元分析方法的计算模型,研究了周向非均匀热流条件下蓄热介质对流换热系数、吸热管外壁温度分布情况。鲁红光[12]等建立了槽式太阳能吸热管的传热模型,分析了传热途径和主要热损失的

计算方法, 确定了热损失的主要原因。Eck [13]等分析了 LFR 系统吸热管表面能流进, 过程中使用的是有限容积法, 结果发现吸热管顶部和底部的能流分布存在很大差异。Moghimi [14]等曾计算了腔体接收器中的太阳通量分布情况, 结果发现通量不均匀的分布在吸热管中, 导致吸热管上的温度分布也不均匀。

由以上研究可知, 线性菲涅尔式聚光集热系统的集热性能直接关系到吸热工质可获得能量的多少, 而吸热工质可获得的能量的多少又会影响到整个系统的效率。此外, 太阳直射会造成 LFR 系统吸热管周向能流分布不均匀, 导致吸热管局部温度过高, 对系统安全运行带来挑战。所以本文研究了线性菲涅尔式聚光集热系统的集热性能, 建立了该系统下的稳态传热模型, 研究了 CPC 腔内辐射传热和热损失分布。并且针对吸热管周向能流的不均匀性的问题, 提出了一种基于粒子群算法的吸热管能流分布优化算法, 其算法主要思想是改变主镜场中的一次反射镜的瞄准点, 然后最小化接收器表面的能流分布标准偏差, 最后使得吸热管周向的能流分布达到优化。集热器管周向的能量流分布提高了 LFR 系统的运行效率, 为后续实验以及系统的维护提供重要指导。

2. 传热模型及分析

2.1. LFR 系统简介

本文研究的 LFR 系统结构如图 1 所示, 我们将 LFR 系统简单地概况为三部分, 主反射镜、跟踪驱动装置和接收器。在太阳跟踪控制装置的驱动下, 每个反射镜以不同的角度将太阳光反射到 CPC 中, 然后通过二次反射投射到吸热管上。最后, 对吸热管内的传热介质进行加热, 获得热能用于其它形式的热利用。

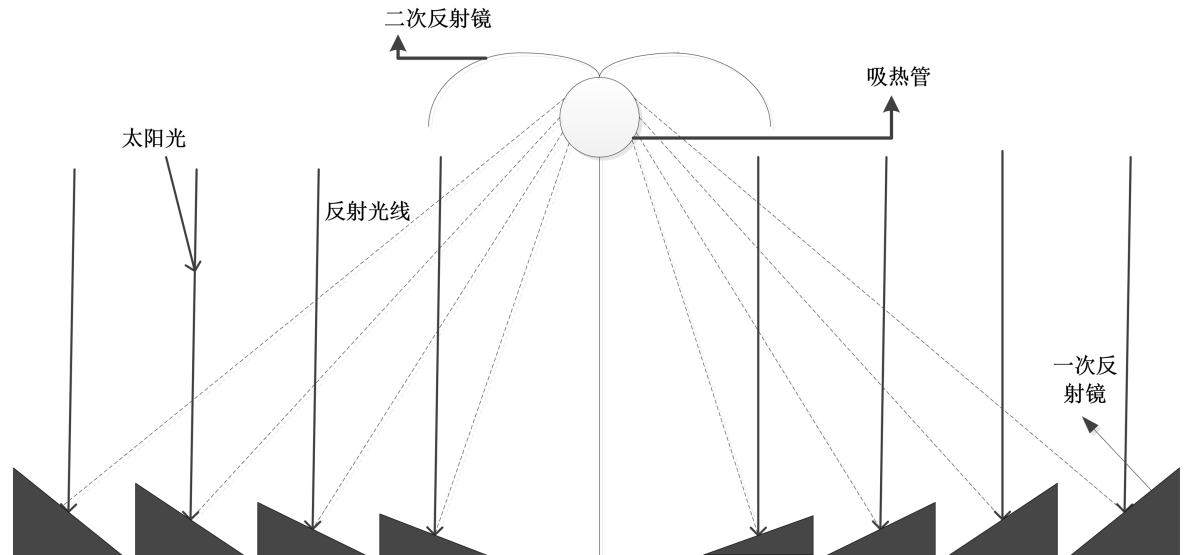


Figure 1. LFR system structure diagram

图 1. LFR 系统结构图

接收器内的吸热管是吸热和传热的关键部分, 目前, 已有众多学者研究了它的热传递和热损失[15][16][17]。线性菲涅尔聚光太阳能腔体集热器由可选玻璃盖板、二次反射器、吸热管以及传热流体这四部分组成。为了减少热损失, 通常使用的接收器有两种, 一种是图 2 所示的空腔底部带有玻璃盖板接收器, 另一种是图 3 所示的不含玻璃盖板但采用玻璃管保护的接收器。

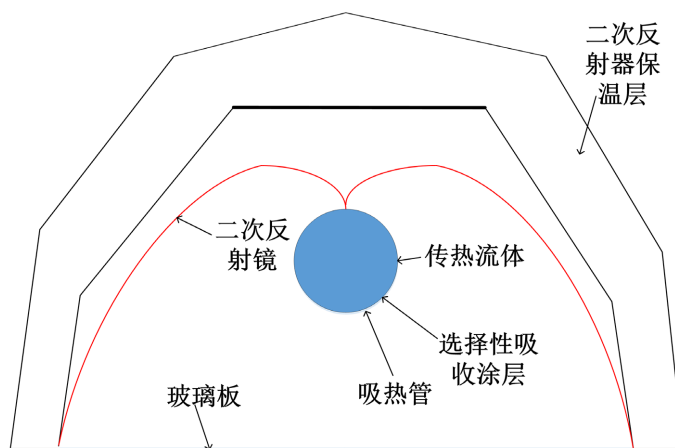


Figure 2. Diagram of bare tube LFR receiver with glass plate at bottom
图 2. 底部含玻璃板的裸管 LFR 接收器图

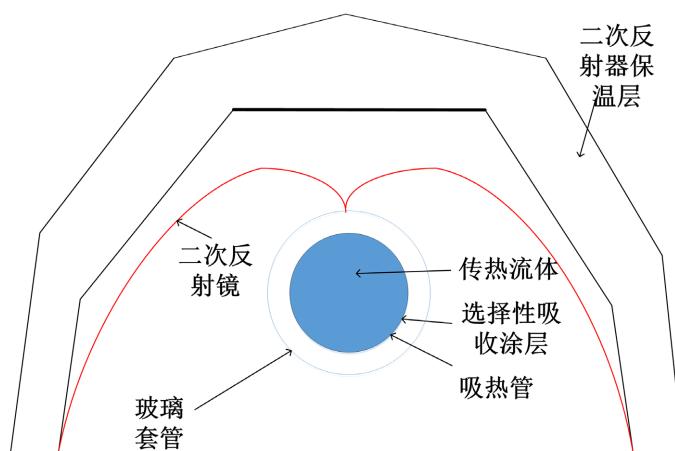


Figure 3. Drawing of vacuum collector tube receiver without glass plate at bottom
图 3. 底部不含玻璃板的真空吸热管接收器图

2.2. 传热模型

本文根据图 2 提出了一种线性菲涅尔式集热器的接收器几何结构的传热模型，同时考虑了二次反射器的平衡问题，为了方便分析整个传热过程，在建立模型之前，做了以下简化和假设：与外界环境的辐射换热只考虑 CPC 外保温层与外界环境；忽略玻璃板厚度；假设吸热管的传热系数、吸收率等参数是稳定的。

LFR 系统聚光器传热方式如下：管内的流体通过对流与吸热管内部进行热交换；这是由于管内外温差造成的，从而内外壁面通过传导热量进行热交换；管壁和玻璃板之间的辐射主要用于辐射热交换，吸热管的外壁面之间通过热传导方式热传递，通过对流传热和辐射热交换来实现玻璃管的外壁和环境中的空气之间的热传递。

通过从以上分析以及假设，我们建立了如图 4 所示的线性菲涅尔式集热器的传热模型。其中，用 q (W/m^2) 表示单位管长的传热量， q_{SolAbs} 表示镜场反射的太阳辐射， $q_{3_{\text{SolAbs}}}$ 表示吸热管吸收的太阳辐射量， $q_{5_{\text{SolAbs}}}$ 表示 CPC 吸收的太阳辐射量， $q_{7_{\text{SolAbs}}}$ 表示 CPC 保温层吸收的太阳辐射量。下标 rad、conv、cond 分别代表辐射、对流和传导。传热模型的下标具体含义如表 1 所示。

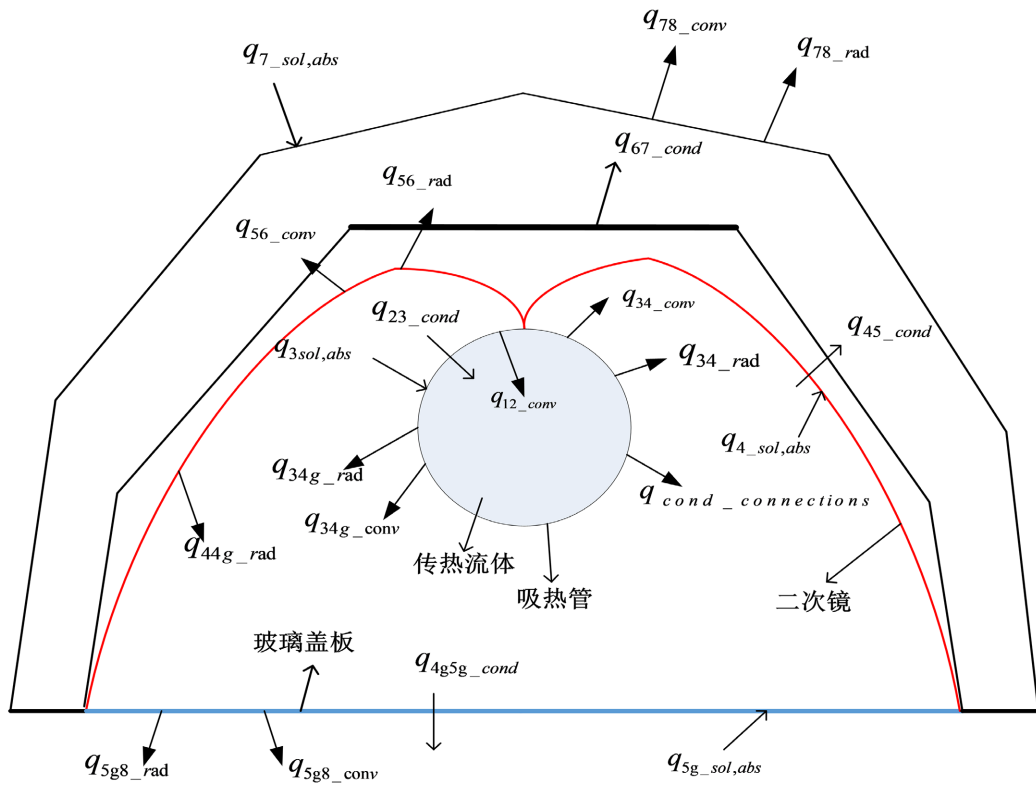


Figure 4. Heat transfer model diagram

图 4. 传热模型图

Table 1. Subscript overview of the heat transfer model of Figure 4

表 1. 图 4 的传热模型的下标概述

下标	横截面
1	传热流体
2	吸热管内壁
3	吸热管外壁
4	二次反射器(CPC)内壁
4g	玻璃板内壁
5	二次反射器(CPC)外壁
5g	玻璃板外壁
6	CPC 内保温层
7	CPC 外保温层
8	环境

据图 4 的传热模型和表 1 中的下标概述，线性菲涅尔式集热器各部分的能量守恒，具体如下：

$$q_{12_conv} = q_{23_cond} \tag{1}$$

$$q_{23_cond} + q_{34_conv} + q_{34g_conv} = q_{3_SolAbs} + q_{3_rad} \tag{2}$$

$$q_{34g_conv} + q_{4g_rad} = q_{4g5g_cond} \tag{3}$$

$$q_{4g5g_cond} + q_{5_SolAbs} = q_{4g8_conv} + q_{4g8_rad} \quad (4)$$

$$q_{5_SolAbs} + q_{34_conv} + q_{4_rad} = q_{45_cond} \quad (5)$$

$$q_{45_cond} = q_{56_conv} + q_{56_rad} \quad (6)$$

$$q_{56_conv} + q_{56_rad} = q_{67_cond} \quad (7)$$

$$q_{67_cond} + q_{7_SolAbs} = q_{78_conv} + q_{78_rad} \quad (8)$$

所以接收器的热损失为:

$$q_{78_conv} + q_{78_rad} + q_{8_conv} + q_{8_rad} = q_{loss} \quad (9)$$

2.3. 模型结果分析

基于上述传热模型分析,利用 Matlab 对传热模型进行数值化,通过循环迭代可以得出 LFR 系统的热损失相关参数。计算过程中,对吸热管内采用强化换热技术,吸热管吸收的辐射能流密度设置为 $q = 22 \text{ kW/m}^2$,当传热介质温度逐渐上升时,其温度变化趋势随对流换热系数上升时所引起的变化关系如图 5 所示。从该图可以看出,随着传热介质温度的从 200°C 逐步上升到 425°C 时,通过强化换热系数来降低吸热管内壁面温度的效率逐渐降低。而当传热介质温度高于 250°C 时,换热系数提高了 45% 时,吸热管内壁面温度最多可以下降 6.5%。在上述同等条件下,吸热管热损失变化趋势随对流换热系数上升幅度的变化关系如图 6 所示。从该图可以看出,随着传热介质温度从 200°C 逐步上升到 425°C 时,通过强化换热系数来降低吸热管热损失的效率也是逐渐降低,当传热介质温度高于 250°C 时,换热系数增加了 45% 时,吸热管热损失最多能减少 11%,根据相关文献所述,当换热系数能够增加 17.5% 时,此时吸热管热损失最多能减少 5%。

综上所述,强化传热技术提高传热介质热转换效率峰值为 17.5%,当吸热管表面温度高于 250°C 时,降低其热损失峰值为 5%,且其一定程度受制于最高工作温度,可见采用流体介质强化传热已经不足以降低 LFR 吸热管热损失。

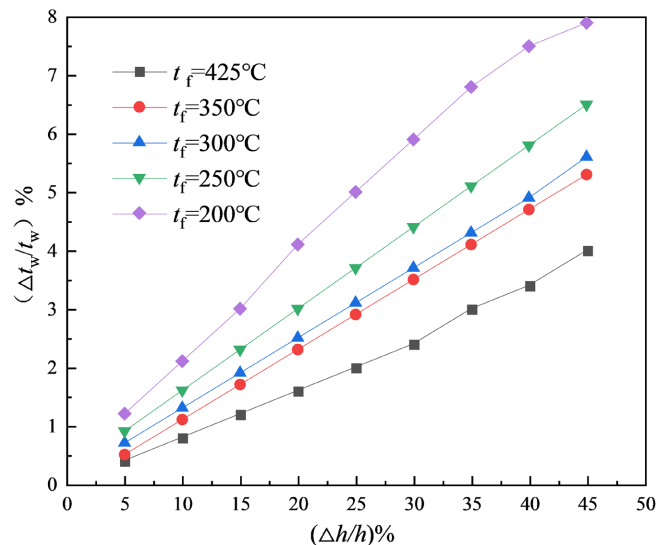


Figure 5. Diagram of the change of $(\Delta T_w/T_w)\%$ with $(\Delta h/h)\%$

图 5. $(\Delta T_w/T_w)\%$ 随 $(\Delta h/h)\%$ 的变化关系图

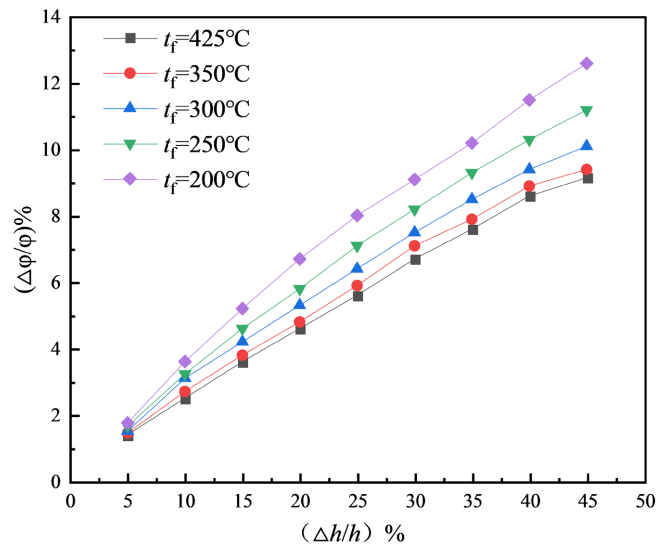


Figure 6. Diagram of the change of $(\Delta\phi/\phi)\%$ with $(\Delta h/h)\%$

图 6. $(\Delta\phi/\phi)\%$ 随 $(\Delta h/h)\%$ 的变化关系图

3. 基于粒子群算法的吸热管表面能流分布优化

在 LFR 系统的实际运行中, 由于其结构设计、镜场的分布以及吸热器表面材料等因素的影响, 集热管的周向热边界条件通常是不均匀的, 易造成集热管周向能流分布不均匀, 对系统安全运行造成影响, 近年来, 粒子群算法成为聚光太阳能发电领域一种备受青睐的算法, 该算法在镜场的光线以及吸热管能流密度分布方面效果显, 因此本文提出了一种基于粒子群算法的优化方法。

3.1. 粒子群算法

粒子群算法是一种基于 Swarm Intelligence 的优化方法, 粒子群算法是通过利用群体中个体与最优个体、个体与个体之间的信息交互, 引导整个群体中个体在保留自身多样性信息的同时, 朝向群体最优个体收敛, 通过不断地更新最终找到最优解[18]。其基本原理为: 假设搜索空间为 M 维, 由 n 个粒子组成的种群 $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)$, 那么第 i 个粒子的位置 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})^T$, 该粒子的速度为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})^T$ 。个体极值可表示为: $g_i = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im})$ 。粒子通过式(9)改变位置, 通过式(10)改变速度:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (9)$$

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_1(t) [g_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2(t) [g_{gi}(t) - x_{ij}(t)] \quad (10)$$

式中, $j=1, 2, 3, \dots, d$; $i=1, 2, 3, \dots, n$; n 为种群的规模数目, t 为当前迭代数, r_1, r_2 分别为随机数, 范围为: $[0, 1]$; c_1, c_2 为加速度常数, c_1 为自身经验, c_2 表示群体经验。从式(10)可以看出: 粒子的当前速度值可以分为三个部分, 即上一代速度惯性值、粒子通过自身思考对运行方向的改变以及粒子在种群间进行信息共享和协作而做出的改变。

该算法的基本步骤如下: 1) 参数。2) 全局与个体的最优解的选择。3) 粒子的速度和位置更新。4) 判断是否满足终止条件。粒子群算法的流程示意图如图 7 所示。

在本文的研究中, 以 LFR 系统的二次反射镜开口平面作为目标平面, LFR 系统二次反射器的开口平面被用作目标平面, 二次反射器 CPC 开口平面上的瞄准线通过改变系统中一次反射镜的瞄准点, 从而寻找到光线最佳的分布方案, 使得吸热管能流分布更均匀。

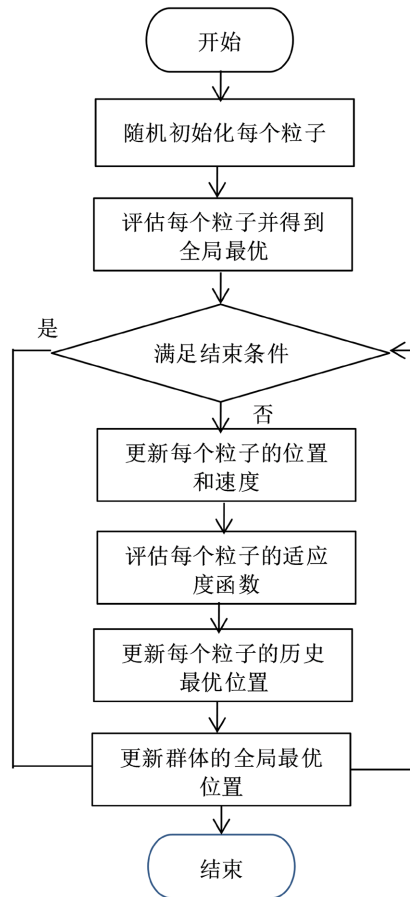


Figure 7. Basic operation flow chart of particle swarm optimization
图 7. 粒子群算法基本操作流程图

3.2. 种群初始化

通常, LFR 系统的镜场以 CPC 的聚光器为中心, 并以列为单位呈南北对称分布, 每列镜场由处在同一轴上的反射镜组成。以二次反射镜 CPC 的开口平面为主镜场的瞄准平面, 瞄准线段即为开口宽度, 在瞄准线上取 x 个点, 设一次反射镜列数为 y , 则可形成一个 x 行 y 列的矩阵, 对一次反射镜进行编号从 1 到 y , 瞄准点编号从 1 到 x 。矩阵中每个元素都由随机函数生成, 并采用浮点数表示, 元素的取值范围处于瞄准线的范围内。生成的该矩阵即为初始矩阵:

$$\begin{array}{c} \text{瞄准点个数 } x \\ \downarrow \end{array} \begin{array}{c} \xrightarrow{\hspace{1.5cm}} \\ \left[\begin{array}{cccccc} 30 & 0 & \bullet & \bullet & 0 \\ 0 & 6 & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 20 \\ 0 & 0 & \bullet & \bullet & \bullet \end{array} \right] \end{array}$$

其中, 第一行元素表示 y 列镜子聚焦到第一个瞄准点上, 第二行元素表示 y 列镜子聚焦到第二个瞄准点上, 以此类推, \dots 第 x 行元素表示 y 列镜子聚焦到第 x 个瞄准点上。

3.3. 适应的函数

在本优化算法中定义系统光学效率为 η 、吸热管表面能流分布标准差为 σ_q 、吸热管周向能流的局部聚光比为 LCR 、太阳辐射通量为 DNI 。其中， σ_q 是评价群体适应度函数的标准值，同时也用于衡量吸热管周向能流分布是否均匀，值越大表示能流分布的梯度越大，对所有方案进行编号，根据每种方案所得出的能流分布结果以及 σ_q 的值，筛选出 σ_q 值较小的方案。定义系统相关参数：系统光学效率： η_s ，吸热管表面能流分布标准差 σ_q ，吸热管周向能流的局部聚光比 LCR 。判断吸热管表面能流分布是否均匀可用数学模型衡量为能流分布标准差大小，因此将标准差 σ_q 作为均匀性判别指标，该值越大表示能流分布梯度越大，计算公式如下：

$$\sigma_q = \sqrt{1/N_c \sum_{i=1}^{N_c} (q_{i,c} - \mu_c)^2}, \mu_c = \sum_{i=1}^{N_c} (q_{i,c} - \mu_c) \quad (11)$$

式中， μ_c 表示吸热管表面划分网格时网格中的能量均值。

吸热管表面能流的聚光比 LCR 计算公式如式(12)所示：

$$LCR = q_{i,c} / DNI \quad (12)$$

式中， N_c 表示划分的网格总数， $q_{i,c}$ 表示第 i 个网格中的太阳辐射能量，该处的 LCR 表示单位网格中的局部聚光比。

光学效率为光子到达吸热管所携带的能量 E_a 与到达主镜场上的总能量的比，计算公式如下：

$$n_z = \frac{E_a}{DNI \times S_m} \times 100\% \quad (13)$$

式中， S_m 表示一次镜场中的有效面积。

3.4. 更新离子速度与位置

对于 x 个候选方案，每个方案中都包含有 y 列一次镜瞄准的数据，每列镜子得到的瞄准点为个体粒子。将当前方案的适应度函数与个体粒子的历史最佳位置和速度进行比较，如果当前适应度函数值更高，则使用当前位置和速度更新个体粒子的历史最佳位置和速度。即寻找到 x 种方案中每列镜子的最佳瞄准点，并根据适应度函数指标得到吸热管表面的能流分布标准差以及 y 列镜子的瞄准点数据。

3.5. 结果分析

以镜场的数学模型、几何模型以及镜场的相关参数为例进行研究，设主镜场的一次反射镜和CPC具有相同的形面误差，且 $\sigma_q = 2.5 \text{ mrad}$ ， $DNI = 1 \text{ kW/m}^2$ ，跟踪误差暂忽略不计。对吸热管周向进行网格划分，将网格数设置为46，将太阳入射角设置为 90° 。沿吸热管的圆周方向划分网格，经过粒子群算法适应度函数更新速度和位置后，随机生成的几种方案中，结果表明，第4种方案在6代时吸热管具有更均匀的周向能流密度更高的光学系统效率。具体数据如表2所示。对于系统的接收器，粒子群算法共优化了两个参数：能流分布的标准差和系统光学效率。

图8是该算法随机生成的5种方案在第6代时所对应的吸热管周向能流分布对比图，表2显示，在第6代时，方案3和方案4与其他几种方案相比，表现出较低的能流分布标准差，其中方案4的标准差最低，系统光学效率达到了79.75%。可以看出，再使用粒子群算法优化主镜场的面准线后，提高了系统的光学效率，降低了吸热管能流分布标准差，也提高了系统的光学效率。可通过调整瞄准线，使得吸热管上半部分和下半部分的辐射更加分散、均匀。在方案4中，吸热管上半部分获得的辐射总量达到吸热管接收到的总辐射量的39.5%，从而避免了局部温度过高的缺点，确保了系统的安全、高效运行。

Table 2. Comparison of aiming schemes of 5 schemes in the sixth generation
表 2. 5 种方案在第 6 代时的瞄准方案对比

方案号	1	2	3	4	5
均值/(kW/m ²)	14.92	15.3	15.72	15.84	15.62
标准差/(kW/m ²)	15.36	14.13	13.57	12.71	14.22
光学效率/%	67.6	68.5	77.23	79.75	76.10

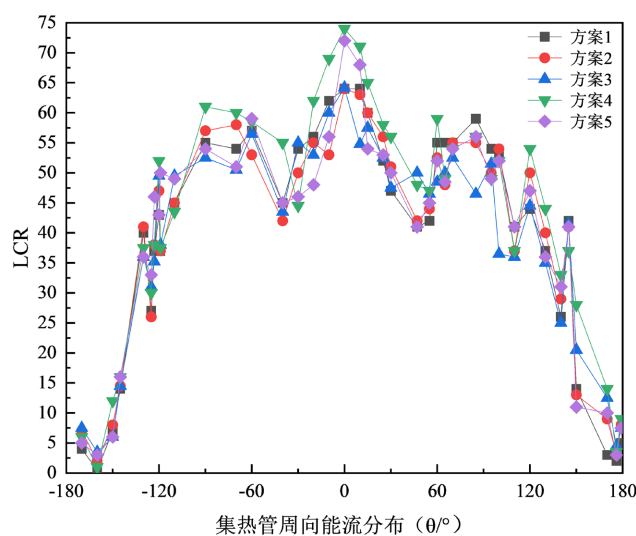


Figure 8. Energy flow distribution diagram of 5 schemes in the 6th generation
图 8. 5 种方案在第 6 代时的能流分布图

4. 结论

本文通过建立线性菲涅尔聚光式太阳能发电系统的聚光器传热模型，研究了在给定模型和参数下，吸热管壁面温度、热损失随传热介质对流换热系数增大时的变化规律，实验发现，随着传热介质温度从 200℃ 逐步上升到 425℃ 时，通过强化换热系数来降低吸热管内壁面温度的效率逐渐降低。随后，针对吸热管表面能流分布不均匀问题，提出一种基于粒子群算法的优化方法，研究证明当系统的光学效率达到 79.75% 时，该算法的优化将吸热管上半部分的能量流分布从 36.6% 提高到了 39.5%。且该优化算法收敛速度快、参数少，也适用于 LFR 式太阳能聚光系统的吸热管在不同参数等条件下的能流密度分布优化。

参考文献

- [1] 汪晓东, 刘毅, 林小溪. 让绿水青山造福人民泽被子孙——习近平总书记关于生态文明建设重要论述综述[N]. 人民日报, 2021-06-03(10).
- [2] 郭子珣, 曹雅妃. 中国可再生能源东中西部差异化发展现状研究[J]. 现代商贸工业, 2021, 42(10): 11-12.
- [3] Wang, Z.F. (2010) Prospectives for China's Solar Thermal Power Technology Development. *Energy*, **35**, 4417-4420. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.004>
- [4] Li, M., Feng, Y.Y., Liu, E.Z., et al. (2016) Azobenzene/Graphene Hybrid for High-Density Solar Thermal Storage by Optimizing Molecular Structure. *Science China Technological Sciences*, **59**, 1383-1390. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-6091-5>
- [5] Varun, K., Arunachala, U.C. and Elton, D.N. (2020) Trade-Off between Wire Matrix and Twisted Tape: SOLTRACE® Based Indoor Study of Parabolic trough Collector. *Renewable Energy*, **156**, 478-492. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.093>

- [6] 周凌宇, 代彦军, 李显, 等. 一种采用腔体吸收器的线性菲涅尔太阳集热器性能分析与优化[J]. 太阳能学报, 2018, 39(3): 704-712.
- [7] Reddy, K.S., Veershetty, G. and Srihari Vikram, T. (2016) Effect of Wind Speed and Direction on Convective Heat Losses from Solar Parabolic Dish Modified Cavity Receiver. *Solar Energy*, **131**, 183-198. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.039>
- [8] Rea, J.E., Oshman, C.J., Olsen, M.L., *et al.* (2018) Performance Modeling and Techno-Economic Analysis of a Modular Concentrated Solar Power Tower with Latent Heat Storage. *Applied Energy*, **217**, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.067>
- [9] 张丽丽, 杨启岳, 杜强, 等. 线性菲涅尔反射式太阳能热发电系统研究进展及应用[J]. 能源与环境, 2013(6): 44-46.
- [10] Augsburg, G., Das, A.K., Boschek, E., *et al.* (2016) Thermo-Mechanical and Optical Optimization of the Molten Salt Receiver for a Given Heliostat Field. *AIP Conference Proceedings*, **1734**, Article ID: 030005. <https://doi.org/10.1063/1.4949057>
- [11] 方勇, 宿建峰, 王娜娜, 等. 塔式太阳能热发电吸热器模拟计算[J]. 发电与空调, 2014, 35(3): 4-8.
- [12] 鲁红光, 杨晓军, 马禄彬. 槽式太阳能集热管的传热分析与建模[J]. 绿色科技, 2020(24): 218-220.
- [13] Eck, M., Uhlig, R., Mertins, M., *et al.* (2007) Thermal Load of Direct Steam-Generating Absorber Tubes with Large Diameter in Horizontal Linear Fresnel Collectors. *Heat Transfer Engineering*, **28**, 42-48. <https://doi.org/10.1080/01457630600985659>
- [14] Moghimi, M.A., Craig, K.J. and Meyer, J.P. (2015) A Novel Computational Approach to Combine the Optical and Thermal Modelling of Linear Fresnel Collectors Using the Finite Volume Method. *Solar Energy*, **116**, 407-427. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.014>
- [15] 刘尧东, 张燕平, 万亮, 高伟. 基于 Al_2O_3 纳米流体的槽式太阳能热发电集热器传热建模及性能分析[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 230-237.
- [16] 赖艳华, 宋固, 吕明新, 董震. 玻璃真空套管-金属管复合接收器集热性能研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(5): 867-870.
- [17] Montes, M.J., Barbero, R., Abbas, R., *et al.* (2016) Performance Model and Thermal Comparison of Different Alternatives for the Fresnel Single-Tube Receiver. *Applied Thermal Engineering*, **104**, 162-175. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.015>
- [18] 冯茜, 李擎, 全威, 裴轩墨. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. 工程科学学报, 2021, 43(6): 745-753.