

双级聚光集热的槽式太阳能热发电系统研究

盖忠睿^{1,2}, 赵凯³, 杨天龙^{1,2}, 饶琼^{2,4}, 潘莹^{2,5}, 金红光^{2,5}

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国科学院工程热物理研究所, 100190, 北京; 3. 郑州大学机械与动力工程学院, 450001, 郑州; 4. 中国科学院大学, 100049, 北京; 5. 中国科学院长时规模储能重点实验室, 100190, 北京)

摘要: 为了提高槽式光热发电系统的性能,通过高、低聚光比镜场的耦合布置,辅以两种传热介质的搭配,建立了双级聚光集热的槽式太阳能热发电系统模型,与传统槽式光热发电系统展开对比,得到了双级系统集热、换热性能提升的机理和系统关键过程焓损失减小的原因。对双级系统进行能量分析和焓分析,展示了双级系统中的能量和焓流动情况,揭示了在镜场侧和动力侧的各项能量和焓损失的分布规律。结果表明:双级聚光集热系统中镜场的耦合布置有效地提高了系统的集热性能,两种传热介质的协同搭配改善了系统的换热性能。损失分布方面,光学损失仍是导致系统集热损失的重要因素,同时光热转化过程的不可逆损失在焓损失中占比较大,具有较大的提升潜力。双级系统的热效率可达到 27.35%,焓效率达到 28.84%,相较于传统单聚光比、单介质的槽式太阳能热发电系统,热效率和焓效率均可提升 0.9%~1.5%,相同发电量下可节省镜场面积 4%~6%。研究为槽式太阳能热发电系统提出了改进策略,为进一步优化研究提供了一定的理论依据。

关键词: 槽式太阳能热发电;聚光比;传热介质;热效率;焓损失

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202502004 **文章编号:** 0253-987X(2025)02-0032-09

An Investigation into Parabolic Trough Solar Thermal Power Generation System with Double-Stage Concentrated Heat Collection

GAI Zhongrui^{1,2}, ZHAO Kai³, YANG Tianlong^{1,2}, RAO Qiong^{2,4},
PAN Ying^{2,5}, JIN Hongguang^{2,5}

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Key Laboratory of Long-Duration and Large-Scale Energy Storage, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To improve the performance of parabolic trough solar thermal power generation systems, a parabolic trough solar thermal power generation system model with double-stage concentrated heat collection (the double-stage system) was developed by coupling mirror fields with both high and low concentration ratios and combining two types of heat transfer fluids. The system was benchmarked against typical solar thermal power generation systems to explore the mechanisms for the improved heat collection and transfer performance, as well as the reasons for

reduced exergy losses in critical processes of the double-stage system. Meanwhile, detailed energy and exergy analyses were conducted on the double-stage system, revealing the energy and exergy flow in the double-stage system and the distribution patterns of energy and exergy losses on both the mirror field section and the power generation section. The results show that coupling mirror fields effectively improved heat collection performance, while combining two types of heat transfer fluids improved the heat transfer process. As for the distribution of losses, the optical loss was still a significant factor contributing to heat collection losses in the system, and a large proportion of exergy losses stemmed from the solar-to-heat conversion process, highlighting a significant potential for improvement. The double-stage system could reach a thermal efficiency of 27.35% and an exergy efficiency of 28.84%, with increases of 0.9%—1.5% in both thermal and exergy efficiency over traditional systems using a single concentration ratio and sole heat transfer fluid. Moreover, the double-stage approach reduced the mirror field area by 4%—6% at the same power output. This study proposes an improved strategy for parabolic trough solar thermal power generation systems, providing a theoretical basis for further research and optimization.

Keywords: parabolic trough solar thermal power generation; concentration ratios; heat transfer fluid; thermal efficiency; exergy loss

为了助力实现“2030 碳达峰,2060 碳中和”的双碳目标,提升以太阳能为代表的可再生能源在能源利用中的占比至关重要^[1]。目前,太阳能发电主要包括太阳能光伏发电和太阳能热发电两种途径。相比于光伏发电,太阳能热发电更适合与传统发电方式结合,更有利于构建大规模的联合循环发电系统^[2],其产生的交流电与电网的融合性更好,并且可以与储能技术相结合,保证发电的稳定性^[3]。

太阳能热发电技术已经在世界范围内得到了广泛的关注^[4]。现有的太阳能热发电技术主要包括槽式、碟式、塔式和菲涅尔式 4 种^[5-6]。其中,槽式太阳能热发电技术是现今最成熟、成本最低的大规模太阳能光热发电技术,已经在全球范围内广泛应用,其容量从几千瓦到几百兆瓦不等,全球超过 80% 的太阳能光热电站采用槽式集热技术^[7]。槽式太阳能热发电的原理是利用槽式聚光镜将太阳光聚集在焦线位置的集热管上,然后通过传热过程,将集热管吸收的太阳能转换为工质的热能,最终利用蒸汽动力循环进行发电^[8]。

近年来,槽式光热电站的装机容量显著提升,但相比于塔式、碟式光热发电技术相比,槽式太阳能热发电的聚光比和集热温度相对较低,整体发电效率有待提高^[9]。Zhao 等^[10]提出了一种在回路中分级布置不同聚光比集热器的策略,相较于单聚光比集热,通过组合 4 种不同聚光比的集热器,光学效率可提升 6.7%,集热效率可提升 4.5%。Liu 等^[11]提出了一种带有内管的槽式太阳能集热器,在内、外管中

分别采用导热油和水作为传热介质,相比传统集热器,集热效率可提升 0.61%~7.67%。Zhang 等^[12]将槽式集热和碟式集热相结合进行双级集热发电,与参比系统相比,在辐照强度大于 550 W/m² 的条件下,系统效率可提升 0.5%~2.5%。目前,相关研究人员提出了一些能量梯级收集和利用的策略^[13-14],但关注点主要集中于集热器层面的优化,集热器层面的优化需要与发电侧进行合适的匹配才能发挥其集热效率提升所带来的优势。考虑到发电侧工质加热过程中沿程的温度差异,基于不同的温度区间,对集热侧进行分段考虑,为各段分别设计布置方案,这是能够充分利用集热器层面优化作用的有效策略。

本文基于温度对口和梯级利用的原则,设计了双级聚光集热的太阳能集热策略,搭建了双级聚光集热的槽式太阳能热发电系统模型,并与参比系统进行对比研究,探讨了双级系统集热性能和换热性能提升的机理,分析了系统关键过程焓损失减小的原因。同时,对双级系统开展了能量分析和焓分析,研究了镜场侧和动力侧的能量和焓流动及各项损失分布。

1 系统模型及参数设定

1.1 模型简介

本研究搭建了双级聚光集热的太阳能热发电系统(简称双级系统),双级系统的示意图如图 1 所示。集热侧采用的策略为双级聚光集热,即基于集热管沿程的温度区间差异,将集热镜场划分为两部分:在

给水的预热、蒸发段布置低聚光比镜场,回路搭配导热油作为传热介质;在蒸汽的过热、再热段布置高聚光比镜场,回路搭配熔盐作为传热介质。

关于镜场中槽式集热器的聚光比,其调整策略主要有两种:一种是调整镜场集热器抛物槽的开口宽度;另一种是调整集热器接收管的管径,其中第一种策略较为典型。本文对高/低聚光比镜场的布置是通过改变集热器抛物槽的开口宽度来实现的。

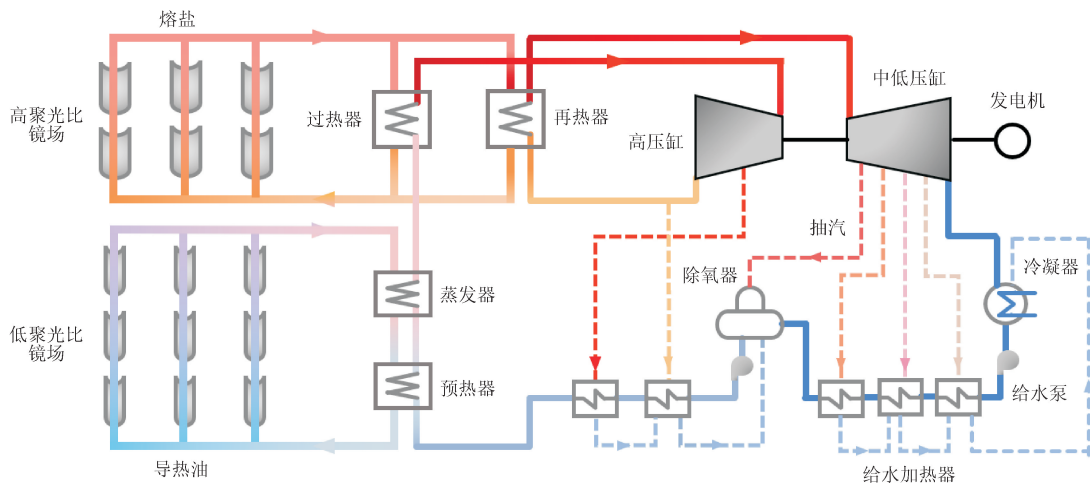


图1 双级聚光集热的槽式太阳能热发电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of parabolic trough solar thermal power generation system with double-stage concentrated heat collection

1.2 模型搭建

在模型搭建过程中,为了简化系统的数学模型,本文做出了如下假设:连接管道中沿程的散热损失和压力损失忽略不计;系统处于稳态运行。基于以上假设,根据质量守恒、能量守恒,可以对系统各部分建立数学模型。

系统输入的太阳辐射能 Q_s 为

$$Q_s = I_b A \quad (1)$$

式中: I_b 为太阳直射辐照强度,本研究设计工况时间取夏至日,设计点太阳辐照强度取 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; A 为镜场面积, m^2 。

输入的太阳能辐射能大部分被集热器接收,小部分由于光学、散热等因素产生损失,集热器接收到的太阳辐射能为

$$Q_a = Q_s \eta_o \quad (2)$$

式中: η_o 为集热器的光学效率。

集热器的光学效率 η_o 计算式^[15-16]为

$$\eta_o = \rho \gamma \tau \alpha \varphi_m \quad (3)$$

式中: ρ 为镜面反射率,取 0.935; γ 为截断因子,受到聚光比 C 的影响,随着 C 的增加而减小^[17]; τ 为玻璃套管透射率,取 0.96; α 为集热管吸收率,取 0.96;

在动力侧,系统通过朗肯循环进行发电。给水依次通过预热器、蒸发器,与导热油进行热交换后,从过冷水被加热至饱和水和饱和蒸汽;随后,饱和蒸汽经过过热器,与熔盐进行换热,被加热至过热蒸汽,并进入汽轮机高压缸做功发电;高压缸排汽通过再热器与熔盐换热后,进入汽轮机中低压缸继续做功发电。系统还包括多段抽汽,作用于高压加热器、除氧器和低压加热器。

κ 为入射角修正系数; φ_m 为其他损失系数^[18]。

在本研究中,集热器的散热损失计算式^[19]为

$$Q_l = 0.141 T_a + 6.48 \times 10^{-9} T_a^2 \quad (4)$$

式中: Q_l 为集热器单位长度的散热损失, W/m ; T_a 为集热管的平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

流过单位长度集热器的传热介质吸收的热量

$$Q_u = Q_a - Q_l = m(h_o - h_i) \quad (5)$$

式中: m 为传热介质的质量流量, kg/s ; h_i 、 h_o 分别为单位质量传热介质的进、出口焓值, J/kg 。

动力侧汽轮机的净做功量为

$$W_e = W_h + W_l - W_p \quad (6)$$

式中: W_h 为汽轮机高压缸的做功量; W_l 为汽轮机中低压缸的做功量; W_p 为系统中所有泵的耗功量。

太阳能转换为传热介质所携带热能的效率,即光-热转换能量效率^[20]为

$$\eta_{nh} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (7)$$

传热介质携带的热能转换为电能的效率即热-电转换能量效率为

$$\eta_{ne} = \frac{W_e}{Q_u} \quad (8)$$

系统太阳能到电能的总能量(热)效率为

$$\eta_a = \eta_{nh} \eta_{ne} \tag{9}$$

关于太阳辐射焓的计算方法有很多,本文采用 Petela 算法^[21],输入的太阳能辐射焓为

$$E_s = Q_s \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^4 \right) \tag{10}$$

式中: T_0 为环境温度, K; T_s 为太阳表面温度, 取值 5 770 K。

流过集热器的传热介质吸收的焓量^[15]为

$$E_u = Q_u \left(1 - \frac{T_0}{T_a} \right) \tag{11}$$

太阳辐射的焓转换为传热介质携带的热焓的效率即光-热转换焓效率为

$$\eta_{xh} = \frac{E_u}{E_s} \tag{12}$$

传热介质携带的热焓转换为电能的效率即热-电转换焓效率为

$$\eta_{xe} = \frac{W_e}{E_u} \tag{13}$$

系统的太阳能到电能的总焓效率为

$$\eta_x = \eta_{xh} \eta_{xe} \tag{14}$$

1.3 模型参数设定

双级系统的集热侧采用两种典型的商用集热器模型,低聚光比镜场侧集热器的抛物槽开口宽度 W_{a1} 为 3.5 m,聚光比 C_1 为 50;高聚光比镜场集热器的抛物槽开口宽度 W_{a2} 为 5.76 m,聚光比 C_2 为 82^[22-23],系统总镜场面积为 156 860 m²;基于文献[17,24],表 1 给出了双级系统镜场的其他布置参数。

表 1 设计工况下的镜场布置及环境参数

Table 1 Mirror fields and environmental parameters under design conditions

项目	参数	数值
镜场布置参数	高聚光比镜场集热单元数 N_1	925
	低聚光比镜场集热单元数 N_2	2 250
	集热器长度 L/m	12
	集热管外径 D_{ro}/m	0.07
	集热管内径 D_{ri}/m	0.066
	玻璃护管外径 D_{go}/m	0.115
	玻璃护管内径 D_{gi}/m	0.109
	焦距 f/m	1.84
	边缘角 $\varphi_r/(\text{^\circ})$	80
环境参数	入射角 $\varphi/(\text{^\circ})$	20
	环境温度 $T_{\text{amb}}/\text{^\circ C}$	25
	风速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	2

本系统参考了 30 MW 的槽式太阳能电站^[20]和 50 MW 的塔式电站^[25]在动力侧的模型结构及参数,采用 Aspen plus 软件,搭建了系统动力侧的模

型,并进行了模拟,动力子系统关键节点的参数如表 2 所示。考虑抽汽,高压缸各级的等熵效率 $\eta_{h1} = 0.84$ 、 $\eta_{h2} = 0.85$,低压缸各级的等熵效率 $\eta_{l1} = 0.86$ 、 $\eta_{l2} = 0.92$ 、 $\eta_{l3} = 0.94$ 、 $\eta_{l4} = 0.88$ 、 $\eta_{l5} = 0.64$,汽轮机机械效率 $\eta_m = 0.99$,泵效率 $\eta_p = 0.70$ 。

表 2 动力子系统关键节点的参数

Table 2 Parameters of key nodes in the power subsystem

项目	温度/ $^\circ\text{C}$	压力/bar	流量/ $(\text{t} \cdot \text{h}^{-1})$
导热油回路进口	295.3	23.30	956.4
导热油回路出口	391.0	20.30	956.4
熔盐回路进口	357.4	8.50	539.5
熔盐回路出口	560.0	7.10	539.5
主蒸汽	540.0	132.00	118.4
高压缸排汽	313.1	26.90	110.6
再热蒸汽	540.0	22.70	103.3
中低压缸排汽	41.5	0.08	81.7
给水预热器进口	231.9	132.00	118.4

1.4 参比系统

本研究采用两类传统的槽式热发电系统作为参比系统,如图 2 所示。参比系统 A 仅采用低聚光比镜场,导热油为传热介质^[26];参比系统 B 仅采用高聚光比镜场,熔盐为传热介质^[27]。双级系统与参比系统其他关键参数的对比如表 3 所示。

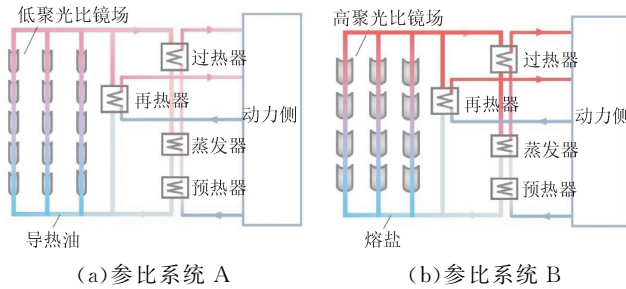


图 2 参比系统 A、B 的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reference system A and B

表 3 双级系统和参比系统 A、B 的参数对比

Table 3 The comparison of parameters between the double-stage system and the reference systems A and B

参数	数值		
	本系统	系统 A	系统 B
高聚光比镜场面积/ m^2	32 410	0	163 300
低聚光比镜场面积/ m^2	124 450	166 305	0
高压缸入口温度/ $^\circ\text{C}$	540	371	540
高压缸入口压力/MPa	13.2	12.4	13.2
高压缸出口温度/ $^\circ\text{C}$	303	208	300
高压缸出口压力/MPa	2.47	1.86	2.42
中低压缸入口温度/ $^\circ\text{C}$	540	371	540

2 结果与讨论

2.1 双级聚光集热系统的性能提升

基于不同聚光比的集热器,本文给出了传热介质平均温度 T_h 与集热效率 η_h 之间的关系,如图 3 所示,可知不同聚光比的集热器在不同传热介质温度下集热效率有明显差异,低聚光比的集热器在低温段的集热性能更优秀,而高聚光比的集热器在高温段具有较好的集热性能。

相比于只采用单一聚光比镜场的系统,双级聚光集热系统在多个温度段均获得较优的集热效率。双级聚光集热系统在低温段传热介质的平均温度为 $343\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时采用低聚光比的集热器具有更高的集热效率,比高聚光比的集热器高出 $\Delta\eta_1 = 3.2\%$;在高温段传热介质的平均温度为 $459\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时采用高聚光比的集热器具有更高的集热效率,比低聚光比的集热器高出 $\Delta\eta_2 = 2.1\%$ 。相比于参比系统 A、B,高、低聚光比镜场的组合布置优化了镜场总的集热效率,提高了系统集热性能。

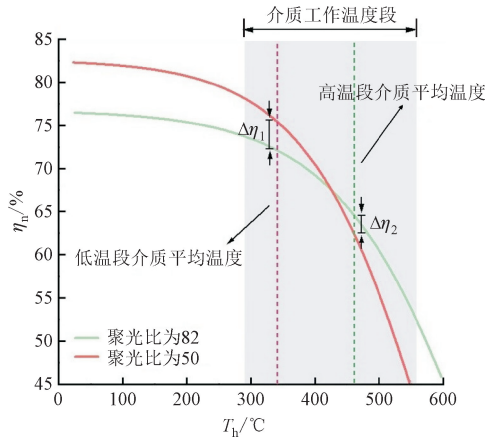


图 3 传热介质平均温度与集热效率的关系
Fig. 3 The relationship between average temperature of heat transfer fluid and efficiency of collector

图 4 为采用双级系统和参比系统 A、B 换热过程中温度与热量的关系。由于水蒸发存在相变,其换热过程曲线为折线,增大了换热温差,这是影响系统换热性能的重要因素。单独采用导热油作为传热介质,即参比系统 A,虽然导热油在低温段的流动换热系数高,与给水的换热效果好,但工作温度受限,不宜高于 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,导致主蒸汽/再热蒸汽参数较低,蒸汽初温通常只能达到 $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而单独采用熔盐作为传热介质,即参比系统 B,虽然熔盐的工作温度区间宽,主蒸汽/再热蒸汽参数显著提高,蒸汽初温可

达 $540\text{ }^{\circ}\text{C}$,但流动换热系数低于导热油,传热介质与水、蒸汽之间的换热温差较大,导致换热性能相对较差^[28]。

在双级系统相互独立的导热油和熔盐回路中,系统有效利用了两种传热介质的换热特性,在低温段采用换热系数较高的导热油,在高温段采用熔融盐拓宽换热介质的工作温度区间,并对两个的回路分别采用不同的流量调节策略,通过增加低温段的导热油流量,降低高温段的熔盐流量,使得这两部分换热温差显著减小,最大换热温差可缩减至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,远小于参比系统 B 的 $176\text{ }^{\circ}\text{C}$;同样地,在再热段将最大换热温差缩减至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,小于参比系统 A 的最大换热温差 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与参比系统 A、B 相比,两种传热介质的耦合有效地缩减了换热温差,提高了双级系统的换热性能。

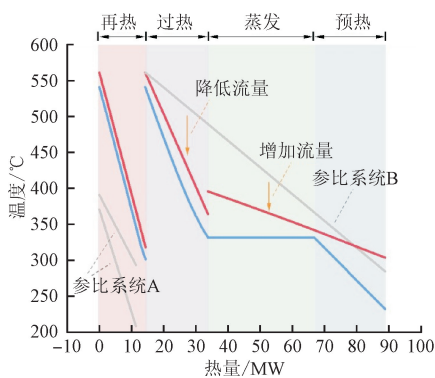


图 4 双级系统和参比组的集热场中温度与热量的关系
Fig. 4 Collector field in double-stage system and the reference system

本文通过能量利用图(EUD)方法展示了双级系统和参比系统在光热转化和工质换热过程中焓损失的内部分布,用于进一步揭示系统集热和换热性能的提升机理^[29],图 5 为光热转化过程的 EUD 图。

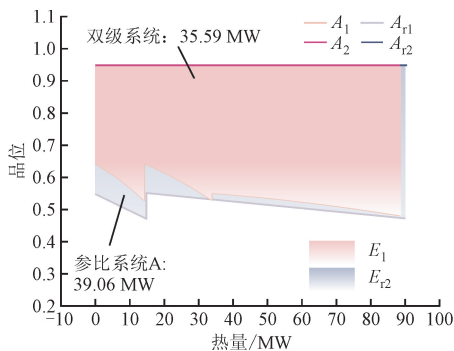


图 5 双级系统和参比系统光热转化过程的 EUD 图
Fig. 5 EUD diagram of the solar-to-heat process of the double-stage system and the reference system

双级系统的能量释放侧的品位是 A_1 , 能量接收侧的品位是 A_2 , 光热转化过程的熵损失为 E_1 ; 参比系统 A 的能量释放侧的品位是 A_{r1} , 能量接收侧的品位是 A_{r2} , 光热转化过程的熵损失为 E_{r1} 。在高聚光比镜场侧, 参比系统 A 接收侧的平均品位为 0.53, 而双级系统将接收侧的平均品位提升至 0.59, 这是双级系统在光-热转化过程中熵损失减少, 效率提升的关键。

图 6 为工质换热过程的 EUD 图。双级系统的能量释放侧的品位是 A_3 , 能量接收侧的品位是 A_4 , 工质换热过程的熵损失为 E_2 ; 参比系统 B 的能量释放侧的品位是 A_{r3} , 能量接收侧的品位是 A_{r4} , 工质换热过程的熵损失为 E_{r2} 。在预热、蒸发和过热阶段, 参比系统 B 释放侧的平均品位为 0.57, 而双级系统释放侧的平均品位 0.53 更低, 这使得双级系统在动力侧熵损失减少, 对热-电转化的熵效率提升起到增益作用。

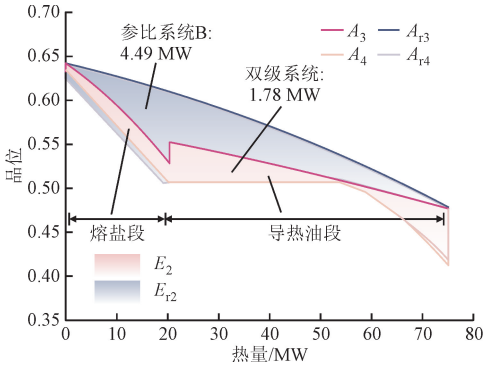


图 6 双级系统和参比系统工质换热过程的 EUD 图
Fig. 6 EUD diagram of the heat transfer process of the double-stage system and the reference system

2.2 双级聚光集热系统的能量分析

为了清晰展示双级聚光集热系统的原理, 本研究通过桑基图描述了系统各部分的能量流动, 如图 7 所示, 具体的数值如表 4 所示。

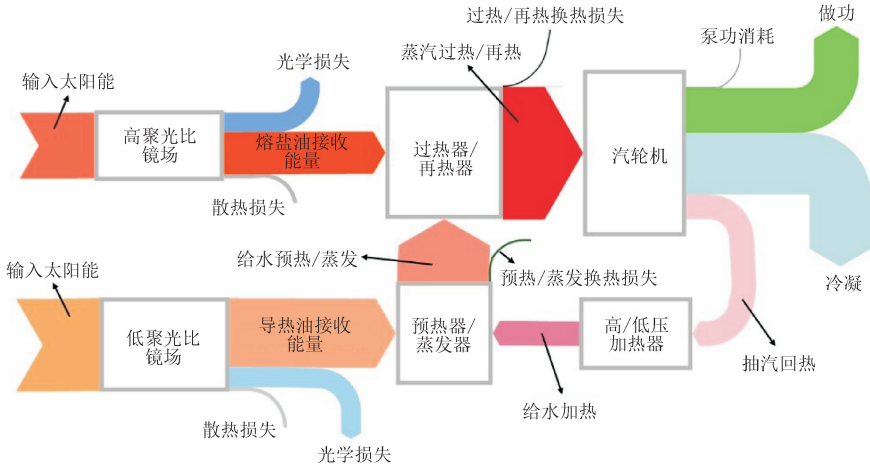


图 7 双级聚光集热系统的能流图
Fig. 7 Energy flow diagram of the double-stage system

表 4 双级系统的能量平衡表

Table 4 Energy balance results of the double-stage system

参数	数值	参数	数值
镜场的集热量/kW	126 803.7	低聚光比侧集热量/kW	75 520.9
高聚光比侧集热量/kW	51 282.8	镜场侧能量损失/kW	38 222.9
低聚光比侧光学损失/kW	17 608.6	低聚光比侧散热损失/kW	2 993.5
高聚光比侧光学损失/kW	14 384.5	高聚光比侧散热损失/kW	3 236.2
传热介质输入能量/kW	88 580.8	导热油侧输入热量/kW	54 918.8
熔盐侧输入热量/kW	33 662.0	动力侧能量损失/kW	53 202.9
换热器能量损失/kW	1 848.2	冷凝器能量损失/kW	52 146.4
其他能量损失/kW	924.1	汽轮机输出功量/kW	35 897.9
泵功损失/kW	910.6	净发电量/kW	34 637.4

从图 7、表 4 可以看出, 系统的总能量损失为 92 166.2 kW, 其中镜场侧的能量损失主要源于高、低聚光比镜场的光学损失 14 384.5、17 608.6 kW, 分别占总能量输入的 11.3%、13.9%; 动力侧的能

量损失主要源于冷凝器的冷却损失 52 146.4 kW,水蒸气的冷凝会伴随大量的潜热损失,这导致了较大的能量损失,占总能量输入的 39.5%。

在镜场侧,低聚光比镜场的集热效率为72.7%,高聚光镜场效率为 65.6%,组合优化后的镜场总光-热转化能量效率为 69.9%;在动力侧,耦合两种传热介质进行换热,换热损失较小,占比仅为1.4%;使热-电转化的能量效率达到了 39.2%,系统的总能量效率为 27.3%。

2.3 双级聚光集热系统的焓分析

为了阐明双级聚光集热系统的各部分不可逆损失,本研究通过桑基图展示了系统各部分的焓流,如图 8 所示,具体的数值如表 5 所示。从图 8、表 5 可以看出,系统的总焓损失为 85 445.6 kW,其中镜场侧焓损失主要由高聚光比镜场光学损失 13 622.2 kW、低聚光比镜场光学损失 16 675.3 kW、高聚光比侧

光热转化焓损失 13 312.6 kW、低聚光比侧光热转化焓损失 24 660.0 kW 这几项组成,分别占总焓量输入的 11.3%、13.9%、11.1%和 20.2%。光热转化焓损失较大,主要原因是太阳直接辐射能量释放侧与传热介质接收侧能量品位差很大,其中高聚光比镜场的光热转化焓损失占其输入焓量的 27.4%,低聚光比镜场由于处于低温段,光热转化焓损失占比更大,占该镜场输入焓量的 33.9%。动力侧的焓损失 12 765.0 kW 主要由换热器焓损失、冷凝器焓损失和汽轮机焓损失组成,分别占总焓量输入的 3.0%、2.3%、和 4.5%,均相对较小。在镜场侧,高/低聚光比镜场的光热转化焓效率相差不大,组合优化后镜场总的光-热转化焓效率为 40.5%;在动力侧,系统热-电转化的焓效率为 71.2%;系统总的焓量效率为 28.84%。

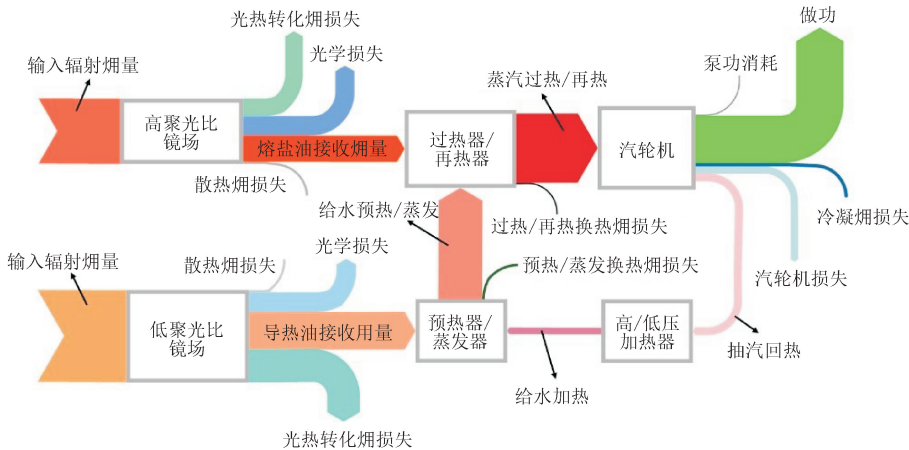


图 8 双级聚光集热系统的焓流图

Fig. 8 Exergy flow diagram of the double-stage system

表 5 双级系统的焓平衡表

Table 5 Exergy balance results of double-stage system

参数	数值	参数	数值
镜场侧输入焓量/kW	120 083.1	导热油侧输入焓量/kW	28 762.3
低聚光比侧输入焓量/kW	71518.3	熔盐侧输入焓量/kW	19 900.5
高聚光比侧输入焓量/kW	48564.8	动力侧焓损失/kW	12 765.0
镜场侧焓损失/kW	71 810.4	换热器焓损失/kW	3 652.5
低聚光比侧光学损失/kW	16 675.3	冷凝器焓损失/kW	2 676.1
低聚光比侧光热转化焓损失/kW	24 660.0	汽轮机焓损失/kW	5 438.2
低聚光比侧散热焓损失/kW	1 810.7	其他焓损失/kW	880.0
高聚光比侧光学损失/kW	13 622.2	汽轮机输出功量/kW	35 897.9
高聚光比侧光热转化焓损失/kW	13 312.6	泵功损失/kW	910.6
高聚光比侧散热焓损失/kW	1 729.7	净发电量/kW	34 637.4
传热介质输入焓量/kW	48 662.9		

2.4 双级系统与参比系统的能量效率和炯效率对比

根据本文建立的双级系统和参比系统 A、B 的模型,对 3 种系统能量效率和炯效率进行了对比分析,具体的数值如表 6 所示。由表 6 可以看出,在设计点工况下,参比系统 A、B 的能量效率分别为 25.90%、26.36%,而双级系统具有最高的能量效率,约 27.35%。对于采用低聚光比镜场的参比系统 A,虽然其集热效率最高,但是由于其动力侧参数低,导致了热-电转化效率也较低。参比系统 B 虽然维持了较高的热-电转化效率,但由于其采用高聚光比镜场,集热效率低,影响了总体的热效率。相比于这两种参比系统,双级系统在保证高热-电转化效率的基础上,通过高、低聚光比镜场的组合布置,优化了集热效率,系统热效率提升了 0.9%~1.5%。

在设计点工况下,参比系统 A、B 的炯效率分别为 27.42%、27.94%,双级系统的炯效率最高,约 28.84%。参比系统 A 由于其光热转化过程的不可逆损失大,导致了光-热转化炯效率偏低;参比系统 B 受到了换热炯损失的影响,其热-电转化炯效率较低。相比于这两种参比系统,双级系统炯效率提升了 0.9%~1.5%。

表 6 双级系统和参比系统在各环节的热/炯效率对比
Table 6 Comparison of energy and exergy efficiency in each section between the double-stage system and the reference system

系统	能量效率/%			炯效率/%		
	η_{th}	η_{te}	η_{t}	η_{th}	η_{te}	η_{t}
本系统	69.85	39.15	27.35	40.52	71.18	28.84
参比系统 A	72.72	35.62	25.90	39.16	70.02	27.42
参比系统 B	67.77	38.89	26.36	39.78	70.23	27.94

双级系统在镜场、传热介质方面的优化有效地减少了所需镜场面积,相同发电量下,参比系统 A、B 所需镜场面积分别为 166 305、163 300 m²,而双级系统所需镜场面积为 156 860 m²,节省了 4%~6% 的镜场面积,有效降低了镜场成本。

3 结 论

(1) 通过高、低聚光比镜场的耦合布置和传热介质的搭配,双级聚光集热的太阳能热发电系统的热效率为 27.35%,炯效率为 28.84%,相比于两种典型的参比系统,热效率和炯效率均提升了 0.9%~1.5%,相同发电量下,可节约 4%~6% 的镜场面积。

(2) 在双级系统镜场侧,能量损失占总能量输入的 30.1%,主要源于两类镜场的光学损失,散热损失占比小,炯损失占总炯输入的 59.4%,除光学损失外,光热转化过程产生的不可逆损失较大,具有较大改善空间。在双级系统的动力侧,能量损失占总能量输入的 41.6%,主要源于冷凝器的冷却损失;炯损失占总炯输入的 10.6%,各项不可逆损失均较小。

参考文献:

[1] YU Jinna, TANG Y M, CHAU K Y, et al. Role of solar-based renewable energy in mitigating CO₂ emissions: evidence from quantile-on-quantile estimation [J]. Renewable Energy, 2022, 182: 216-226.

[2] FALOPE T, LAO Liyun, HANAK D, et al. Hybrid energy system integration and management for solar energy: a review [J]. Energy Conversion and Management, 2024, 21: 100527.

[3] 袁振国. 熔盐储能供蒸汽技术的应用前景分析 [J]. 能源与节能, 2022(3): 116-119.

YUAN Zhenguo. Application prospect of molten salt energy storage technology for steam supply [J]. Energy and Energy Conservation, 2022(3): 116-119.

[4] RAVI K K, KRISHNA C N, SENDHIL K N. Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation-a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282: 125296.

[5] 何雅玲, 王坤, 杜保存, 等. 聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展 [J]. 科学通报, 2016, 61(30): 3208-3237.

HE Yaling, WANG Kun, DU Baocun, et al. Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions; a review [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(30): 3208-3237.

[6] 白章, 郑博, 胡文鑫, 等. 太阳能模拟器聚光仿真及能流分布特性调控分析 [J]. 实验技术与管理, 2022, 39(12): 86-92.

BAI Zhang, ZHENG Bo, HU Wenxin, et al. Optical simulation of solar simulator and regulate on analysis of energy flow distribution characteristics [J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(12): 86-92.

[7] KURKUTE N, PRIYAM A. A thorough review of the existing concentrated solar power technologies and various performance enhancing techniques [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147(24): 14713-14737.

[8] 韩建国, 王强, 刘向民, 等. 槽式太阳能光热电站集热系统分区数对系统性能的影响 [J]. 动力工程学报,

- 2022, 42(9): 829-834.
- HAN Jianguo, WANG Qiang, LIU Xiangmin, et al. Effect of the numbers of partitions in the collector system of a parabolic trough concentrated solar power station on system performance [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(9): 829-834.
- [9] BILAL A A, KHAN M N, ZUBAIR M, et al. Commercial parabolic trough CSP plants: research trends and technological advancements [J]. *Solar Energy*, 2020, 211: 1422-1458.
- [10] ZHAO Kai, JIN Hongguang, GAI Zhongrui, et al. A thermal efficiency-enhancing strategy of parabolic trough collector systems by cascadingly applying multiple solar selective-absorbing coatings [J]. *Applied Energy*, 2022, 309: 118508.
- [11] LIU Peng, DONG Zhimin, XIAO Hui, et al. A novel parabolic trough receiver by inserting an inner tube with a wing-like fringe for solar cascade heat collection [J]. *Renewable Energy*, 2021, 170: 327-340.
- [12] ZHANG Cheng, ZHANG Yanping, ARAUZO I, et al. Cascade system using both trough system and dish system for power generation [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 142: 494-503.
- [13] DESAI N B, BANDYOPADHYAY S. Integration of parabolic trough and linear Fresnel collectors for optimum design of concentrating solar thermal power plant [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2015, 17(7): 1945-1961.
- [14] OSHIDA I, SUZUKI A. Optical cascade heat-collection for effective solar energy gain [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1987, 109(4): 298-302.
- [15] PADILLA R V, FONTALVO A, DEMIRKAYA G, et al. Exergy analysis of parabolic trough solar receiver [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 67(1/2): 579-586.
- [16] BELLOS E, TZIVANIDIS C. A detailed exergetic analysis of parabolic trough collectors [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 149: 275-292.
- [17] ZHAO Kai, WANG Xueqing, GAI Zhongrui, et al. Enhancing the efficiency of solar parabolic trough collector systems via cascaded multiple concentration ratios [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 437: 140665.
- [18] 高志卫, 袁宇, 白章, 等. 抛物槽式太阳能集热器光热耦合特性数值模拟仿真与分析 [J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(6): 92-96.
- GAO Zhiwei, YUAN Yu, BAI Zhang, et al. Numerical simulation and analysis of the solar-thermal coupling characteristics for parabolic trough solar collector [J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(6): 92-96.
- [19] YANG Honglun, WANG Qiliang, HUANG Xiaona, et al. Performance study and comparative analysis of traditional and double-selective-coated parabolic trough receivers [J]. *Energy*, 2018, 145: 206-216.
- [20] WANG Yuanjing, ZHANG Cheng, ZHANG Yanping, et al. Performance analysis of an improved 30 MW parabolic trough solar thermal power plant [J]. *Energy*, 2020, 213: 118862.
- [21] 楚双霞, 刘林华. 太阳辐射最大转化效率公式的精度分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(14): 57-62.
- CHU Shuangxia, LIU Linhua. Analysis on the accuracy of maximum conversion efficiency formulae of solar radiation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(14): 57-62.
- [22] 郭睿桑. 基于熔盐槽式光热发电的风光热储一体化发电系统运行策略与经济性分析 [D]. 太原: 中北大学, 2024: 20-47.
- [23] 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 [J]. *太阳能学报*, 2015, 36(1): 173-178.
- XIONG Yaxuan, WU Yuting, LIU Shanwei, et al. Preliminary experimental study of low melting-point molten salt in parabolic trough collectors [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2015, 36(1): 173-178.
- [24] BAI Zhang, SUN Jie, LIU Qibin. Comprehensive assessment of line-point-focus combined scheme for concentrating solar power system [J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(5): 1983-1998.
- [25] 曹东宏. 常规塔式太阳能光热电站动态特性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 9-19.
- [26] 王金平. 槽式太阳能光热电站关键技术及运行特性的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017: 19-95.
- [27] 王慧富, 吴玉庭, 张晓明, 等. 熔盐槽式太阳能热发电站集热系统性能研究 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(6): 317-325.
- WANG Huifu, WU Yuting, ZHANG Xiaoming, et al. Performance research on solar field of molten salt parabolic trough solar power plants [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2020, 41(6): 317-325.
- [28] ABED N, AFGAN I, CIONCOLINI A, et al. Assessment and evaluation of the thermal performance of various working fluids in parabolic trough collectors of solar thermal power plants under non-uniform heat flux distribution conditions [J]. *Energies*, 2020, 13(15): 3776.
- [29] CHEN Zhewen, WANG Yanjuan, ZHANG Xiaosong. Energy and exergy analyses of S-CO₂ coal-fired power plant with reheating processes [J]. *Energy*, 2020, 211: 118651.

(编辑 赵炜)