

太阳能集热系统性能优化探讨

刘嘉乐

中核第七研究设计院有限公司 山西 太原 030000

摘 要：本文针对太阳能集热系统光热转换效率低、管路热损耗大、运行调控粗放等性能瓶颈，提出结构优化与运行调控协同的综合优化方案。在结构层面，通过选择性吸热涂层替换、低铁超白盖板应用、聚氨酯保温管路升级及核心设备精准匹配，降低系统换热热阻与散热损耗。在调控层面，建立基于实时工况的动态循环参数调控机制，采用分级温差启停控制与延时判定策略，并针对高低温极端工况实施介质适配与散热平衡优化。优化后系统集热效率与工况适应能力显著提升，辅助能耗有效降低，为太阳能集热系统高效运行提供技术支撑。

关键词：太阳能集热系统；光热转换；热损耗；性能优化

引言：太阳能集热系统作为可再生能源热利用的核心装置，其运行效率直接影响建筑节能与工业供热的经济性。然而，当前系统普遍存在集热器光热转换效率偏低、管路储热散热损耗大、运行调控参数固定等问题，导致系统综合性能难以满足实际应用需求。本文针对太阳能集热系统在结构设计、部件匹配及运行调控方面的性能瓶颈，从集热器材质与流道优化、管路保温与布局改进、核心设备精准匹配、动态循环参数调控及高低温工况适配五个方面，提出系统性优化方案，旨在提升系统全工况运行效率与稳定性。

1 太阳能集热系统核心工作原理与性能评价指标

太阳能集热系统能量传递链路分为太阳辐射吸收、板管对流换热、介质循环输热、储热装置蓄热四大环节，核心设备包含集热器、换热工质、输配管路、承压储热水箱、变频循环及温差控制模块。太阳短波辐射经盖板透射后被吸热层捕获转化为热能，通过金属基板传导至流道换热介质，依靠强制循环完成热量输送储存，各环节换热、散热损耗共同决定系统综合能效^[1]。

为量化评判优化效果，选取 5 项核心定量评价指标，指标定义与基准阈值见表 1。

表1 太阳能集热系统核心性能评价指标基准参数

评价指标	量化定义	常规系统基准值	优化目标区间
瞬时集热效率	有效得热 / 入射太阳辐照量	32%~41%	45%~58%
管路综合热损耗率	管路散热量 / 集热器总得热	26%~38%	≤ 15%
循环单位热输配电耗	泵送电耗 / 有效储热容量	0.085 kWh/MJ	≤ 0.055 kWh/MJ
低温稳定运行下限	介质不凝固最低环境温度	0℃	-20℃以下
启停无效动作频次	单日报频繁启停次数	12~22 次 / 天	≤ 3 次 / 天

2 太阳能集热系统性能影响因素分析

2.1 集热器核心部件性能影响

集热器是太阳能集热系统的核心吸热部件，其结构材质、吸热涂层、流道设计直接决定光热转换效率，是影响系统性能的首要因素。当前常规平板式、管式集热器存在诸多固有缺陷：（1）吸热涂层材质耐候性较差，长期受紫外线照射、温差变化影响，容易出现涂层老化、脱落、透光率下降等问题，大幅降低太阳辐射吸收效率；（2）集热器盖板多采用普通钢化玻璃，透光性不足且存在红外辐射散热现象，集热器内部吸收的热量易通过盖板向外散失，造成无效热损耗；（3）集热器流道布局不合理，流道间距、管径尺寸设计不规范，导致换热介质流通速度不均，部分区域介质换热不充分，出现局部过热、换热死角等问题，降低整体换热效率。（4）集热器安装倾角、间距不合理，会导致光照接收面积不足、相邻集热器相互遮挡，有效辐射接收量大幅减少，直接降低系统集热能力^[2]。

2.2 管路与储热结构散热损耗影响

管路与储热装置的散热损耗是系统热能浪费的主要来源，也是制约系统性能提升的关键问题。（1）太阳能集热系统的输热管路长期暴露在室外环境中，常规管路保温层厚度不足、保温材料导热系数偏高，且管路接口、弯头、阀门等位置保温处理不完善，存在大量散热缺口。在环境温度较低、风速较大的工况下，管路内部高温介质的热量会快速向外界散失，出现“集热多、储热少”的情况。（2）储热水箱保温结构设计缺陷也会造成持续热损耗，部分水箱内胆保温层密度不足、密封性能差，水箱与管路连接位置存在热桥效应，储存的热能持续向外传导，长时间静置后水温快速下降，降低热能有效利用率。（3）管路布局冗长、弯道过多，会增加介

质循环阻力, 不仅提升循环能耗, 还会延长换热周期, 加剧热量损耗。

2.3 系统运行调控与工况匹配影响

不合理的运行调控参数与工况匹配模式, 会导致系统无法适配复杂的光照与温度环境, 运行效率大幅波动。(1) 常规集热系统多采用固定循环参数运行, 未根据实时光照强度、环境温度、介质温度进行动态调节。光照强度较弱时, 系统强制循环持续运行, 辅助循环设备能耗过高, 且换热收益极低; 光照强度峰值阶段, 介质循环速度过慢, 集热器吸收的热量无法及时输送至储热装置, 出现集热器过热、热量堆积损耗的问题。(2) 系统启停控制阈值设置不合理, 温差控制精度较低, 容易出现频繁启停、无效运行的情况, 进一步增加能耗与设备损耗。此外, 不同季节、昼夜的环境温差较大, 固定的运行参数无法适配高低温工况, 低温环境下介质流动性变差、换热效率下降, 高温环境下热量散失加剧, 导致系统整体运行稳定性不足。

3 太阳能集热系统结构与部件优化方案

3.1 集热器部件材质与结构优化

针对集热器光热转换效率低、散热快、耐候性差的问题, 从材质升级与结构优化两方面开展改进。(1) 在材质选择上, 将常规吸热涂层替换为高吸收率、低发射率的选择性吸热涂层, 该涂层对太阳短波辐射的吸收率可达92%以上, 对长波热辐射的发射率低于8%, 可有效减少集热器自身的热辐射损耗, 同时具备抗紫外线、耐高低温老化的特性, 长期使用性能稳定。集热器盖板更换为低铁超白钢化玻璃, 透光率提升至91%以上, 同时搭配减反射镀膜, 减少光照折射损耗, 提升辐射接收量。(2) 在结构设计上, 优化集热器内部流道布局, 根据介质换热特性调整流道管径与间距, 采用均匀分布式流道结构, 消除换热死角, 保证介质流通均匀、换热充分。同时, 根据项目所在地纬度、全年光照角度, 精准计算并调整集热器安装倾角与阵列间距, 避免遮挡问题, 最大化提升有效光照接收面积。针对管式集热器, 优化真空层密封结构, 提升真空度, 杜绝空气对流造成的热量损耗, 进一步提升集热器保温吸热性能。

3.2 管路保温与布局优化

为降低管路热损耗, 重点优化管路保温结构与布局方式。(1) 更换高性能保温材质, 选用导热系数极低、防水防潮的聚氨酯发泡保温层, 适当增加保温层厚度, 全面包裹输热管路。针对管路弯头、接口、阀门、三通等易散热点位, 采用专用保温配件密封包裹, 杜绝局部散热缺口, 消除热桥效应。对于室外裸露管路, 额外增

设防水防晒保护层, 避免保温层老化破损, 保证长期保温效果。(2) 优化管路整体布局, 遵循“短、直、顺”的设计原则, 精简管路长度, 减少不必要的弯道与接头, 降低介质循环阻力。合理规划管路走向, 避免管路长期处于暴晒、迎风的极端环境, 减少环境因素带来的额外热损耗。同时对储热水箱进行升级, 采用高密度整体发泡保温结构, 优化水箱密封工艺, 提升水箱保温密闭性, 大幅降低储热阶段的静态热损耗, 减少水温衰减速度^[3]。

3.3 核心设备匹配优化

太阳能集热系统中集热器、循环泵与储热水箱之间的参数匹配精度, 直接决定系统整体运行效率与能耗水平。设备型号不匹配是导致运行效率偏低、辅助能耗偏高的核心原因, 需从流量匹配、容积配比及换热部件精度三个角度开展精准匹配优化。(1) 在循环泵匹配方面, 应依据集热器总集热面积与最大换热功率, 计算系统所需介质流量与管路阻力损失, 据此选型循环泵的额定流量与扬程参数。泵选型偏大将造成大流量小温差运行, 泵送功耗远超集热收益; 泵选型偏小则导致介质循环不畅、集热器内热量堆积、出口温度过高, 换热效率下降。(2) 在储热水箱容积匹配方面, 应结合集热器单日最大集热量与日常用热负荷曲线, 合理设定水箱有效容积。容积过大时, 单位质量储热介质升温不足, 水温长期偏低, 无法满足末端用热需求; 容积过小时, 峰值集热量无法充分消纳, 系统频繁达到满温停机, 降低有效集热时长。(3) 应更换高精度换热配件, 包括高效板式换热器、低阻力阀门及高导热集热管等, 降低各环节换热热阻, 保障集热、输热、储热各环节设备协同高效运行, 最大化发挥系统综合换热性能。

4 太阳能集热系统运行调控优化方案

4.1 动态循环参数调控优化

传统太阳能集热系统多采用固定流量、固定转速的循环运行模式, 无法随外部工况变化做出响应, 导致辅助能耗偏高、换热效率波动较大。针对这一问题, 应建立基于实时工况反馈的动态循环参数调控机制, 以光照强度、集热器进出口介质温差及环境温度作为核心控制变量, 实时调节循环泵的运行流量与转速。在弱光照或阴天工况下, 集热器吸热量有限, 进出口温差较小, 此时应降低循环泵转速、减小介质流量, 避免泵送功耗超过集热收益, 减少无效运行带来的辅助能耗。在强光照峰值时段, 集热器吸热量大幅增加, 进出口温差显著升高, 此时应提升循环泵转速、增大介质流量, 加快热量从集热器向储热装置的传递速率, 降低集热器表面温度,

减小向环境的对流与辐射散热损失,维持较高的集热效率。通过上述动态调控策略,系统运行参数可随工况实时匹配,在全天候条件下实现辅助能耗最小化与集热换热效率最大化的协调统一,显著提升系统综合热性能^[4]。

4.2 精准启停控制优化

传统太阳能集热系统多采用单一温差启停控制逻辑,温差阈值设置粗放,在光照快速变化或温差处于临界值附近时,系统极易出现频繁启停现象,不仅造成循环泵电机机械磨损加剧,还因反复启动产生较大的瞬时电流冲击,增加辅助能耗,降低系统运行可靠性。针对上述问题,应优化启停控制逻辑,采用分级温差阈值控制策略。设定上、下两级有效换热温差阈值:当集热器出口与进口介质温差达到上阈值时,判定当前工况具备有效集热条件,启动循环系统;当温差降至下阈值以下时,判定集热收益不足以覆盖系统运行功耗,自动停机。两级阈值之间设置合理滞回区间,有效区分有效集热与无效集热工况,从控制逻辑层面杜绝低效率工况下的无效运行。同时,在启停控制中增设延时判定功能,对温差信号与光照信号设定连续达标时间要求,仅当参数持续满足条件超过设定延时时长后才执行启停动作,避免云层瞬时遮挡、辐射强度短暂波动等因素引发的系统频繁动作,减少设备启停次数与冲击损耗,提升系统全天候运行的稳定性与耐久性。

4.3 高低温工况适配优化

太阳能集热系统在高低温极端工况下性能衰减显著,需针对不同温度区间开展工况适配优化,保障系统全天候稳定运行。在低温环境下,常规换热介质粘度增大、流动性下降,严重时出现凝固现象,导致循环阻力急剧升高、换热效率大幅降低,甚至引发管路冻裂。对此,应选用低温流动性优良、凝固点低、防冻性能突出的换热介质,确保管路内介质在低温条件下仍维持正常循环。同时,启动管路保温防护机制,对集热管路、储热水箱及连接阀门等关键部件施加保温层包覆,降低管

路向环境的散热速率,减少冻损风险,维持系统低温段运行稳定性。在高温强光工况下,集热器表面温度与介质温度急剧攀升,若循环换热不及时,将加速密封件老化、加速集热器涂层退化,并导致储热水箱温度超出安全控制区间。应提升循环泵转速、增大介质流量,加快集热器热量向储热装置的转移速率,有效控制集热器工作温度。同时优化储热系统散热平衡逻辑,将水箱水温控制在设计允许范围内,减少高温段向环境的无效散热损耗,提升系统在全温度区间的工况适配能力与综合运行效率^[5]。

结束语

太阳能集热系统性能优化是提升可再生能源利用效率的关键技术路径。本文围绕系统结构、部件选型与运行调控三个维度,提出了涵盖集热器材质升级、管路保温优化、核心设备精准匹配及动态循环参数调控的综合优化方案。通过选择性吸热涂层替换、高精度换热配件应用、分级温差启停控制及高低温工况适配策略,系统在集热效率、热损耗控制、工况适配性等方面均可获得显著改善。上述方案从硬件改造与软件调控两个层面协同推进,为太阳能集热系统的高效稳定运行提供了系统性技术参考。未来可进一步结合智能控制算法与季节性工况数据库,实现更精细化的自适应运行调控。

参考文献

- [1]陈宇.太阳能热水系统集热效率分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(4):076-079.
- [2]王晶钰,王磊,沈雷雷.太阳能甲烷重整膜反应器性能优化研究[J].工程热物理学报,2025,46(6):2012-2020.
- [3]李天一.太阳能与燃气联合循环发电系统设计[J].灯与照明,2025,49(6):155-157.
- [4]张子恒,袁红岩.基于智能跟踪技术的太阳能高效供热系统设计与优化[J].智能建筑与智慧城市,2025(6):129-131.