



## 严寒高辐照地区太阳能耦合辅助热源供暖系统运行策略优化

齐长鑫<sup>1,2</sup>, 王刚<sup>1</sup>, 王营超<sup>1</sup>, 尹少武<sup>1,2</sup>, 李旻扬<sup>1</sup>, 童莉葛<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>新疆工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023; <sup>2</sup>北京科技大学, 北京市 100083)

**摘要:** 针对新疆哈密地区某 5800 m<sup>2</sup> 办公楼太阳能耦合辅助热源供暖系统存在运行能耗高、供热温度波动剧烈、极端天气下热保障能力不足的问题, 开展了性能评估与策略优化研究。结合工程实践中受屋顶结构载荷限制, 实际蓄热水箱 (5 m<sup>3</sup>) 远低于理论设计值 (24.64 m<sup>3</sup>) 的约束条件, 提出了一种集成集热侧动态温差控制与供暖侧分季节自适应变供温的运行策略优化方案。通过构建 25000 kg/h 大流量循环模式, 将建筑围护结构转化为主动蓄热主体, 以弥补小容积水箱的调蓄缺陷。集热侧遵循 10°C 启动、2°C 关闭的逻辑, 供暖侧则依据室外气温时序特征划分为五类特征模态进行自适应调节。利用 TRNSYS 程序对优化系统进行仿真模拟验证, 同时针对空气源热泵在极端环境下性能系数 (COP) 非线性衰减特性, 将电加热功率由 195 kW 增补至 255 kW。经安全核算, 在极端工况辅助热源全功率开启时, 既有 525 kVA 变压器负载率为 81.5%, 处于安全运行区间, 无需增容改造。结果表明, 系统实现了供热功率和建筑负荷的时序精准匹配, 供暖季总能耗降低 13.29%, 年运行成本节约 12.58%, 极端工况最低供水温度稳定在 35°C 以上。该研究为严寒高辐照地区在有限边界约束下的系统升级提供了量化参考。

**关键词:** TRNSYS; 联合供暖系统; 运行成本; 多源互补

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0286

中图分类号: TK 515

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-10

## Operation strategy optimization of a solar-coupled auxiliary heat source heating system in extremely cold and high solar irradiation regions

Qi Changxin<sup>1,2</sup>, Wang Gang<sup>1</sup>, Wang Yingchao<sup>1</sup>, Yin Shaowu<sup>1,2</sup>, Li Minyang<sup>1</sup>, Tong Lige<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, Xinjiang, China; <sup>2</sup>University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Analyzed the performance and optimized the operation strategy of a solar-coupled auxiliary heat source heating system for a 5,800 m<sup>2</sup> office building in Hami, Xinjiang, to mitigate high energy consumption, severe temperature fluctuations, and insufficient thermal security. Considering the engineering constraint where the actual thermal storage tank volume (5 m<sup>3</sup>) is significantly lower than the design value (24.64 m<sup>3</sup>) due to roof load limits, an optimized strategy was developed. This strategy integrates dynamic temperature difference control on the collector side with seasonally adaptive variable supply temperatures on the

收稿日期: 2026-04-03; 修改稿日期: 2026-05-06。

基金项目: 哈密高新区科学研究与技术开发计划 (HGX2023KJXM005)。

第一作者: 齐长鑫 (1995—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事能源高效利用、传热传质、储能技术方面的研究, E-mail: qichangxin7615@163.com; 通信作者: 王刚 (1992—), 男, 博士研究生, 教授, 主要从事储能技术与清洁能源高效利用技术方面的研究, E-mail: 18515831495@163.com。

引用本文: 齐长鑫, 王刚, 王营超, 等. 严寒高辐照地区太阳能耦合辅助热源供暖系统运行策略优化[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-10.

**Citation:** Qi Changxin, Wang Gang, Wang Yingchao, et al. Operation strategy optimization of a solar-coupled auxiliary heat source heating system in extremely cold and high solar irradiation regions[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-10.

heating side. By establishing a 25,000 kg/h high-flow circulation mode, the building envelope is transformed into an active thermal storage body to compensate for the limited buffer capacity of the small-volume tank. The collector side follows a logic of starting at 10°C and stopping at 2°C, while the heating side performs adaptive regulation across five characteristic modes based on outdoor temperature time-series features. Validated via TRNSYS simulation and accounting for the non-linear attenuation of the air-source heat pump's coefficient of performance (*COP*) in extreme environments, the electric heating power was reinforced from 195 kW to 255 kW. Safety assessments confirm that the load rate of the existing 525 kVA transformer remains at 81.5% during full-power auxiliary heating in extreme conditions, staying within the safe operating range without requiring capacity expansion. Results demonstrate that the system achieves precise temporal matching between heating power and building load, achieving a 13.29% reduction in total heating season energy consumption and a 12.58% saving in annual operating costs. The minimum supply temperature during extreme conditions stabilizes above 35°C. This research provides a quantitative reference for upgrading heating systems under finite boundary constraints in severe cold and high irradiation regions.

**Keywords:** TRNSYS; Combined Heating System; Operating Cost; multi-source complementarity

我国北方地区冬季长期依赖传统能源供暖，导致环境污染与碳排放问题日益凸显。作为典型可再生能源，太阳能凭借其零碳排放与资源普适性，在北方供暖市场展现出巨大的应用潜力<sup>[1]</sup>。然而，受太阳辐射昼夜及季节性波动影响，独立太阳能系统存在热负荷供需匹配失衡的固有缺陷<sup>[2]</sup>。因此，构建太阳能耦合辅助热源供暖系统（Solar combined auxiliary energy source heating system, SAHS）成为保障能源连续性的必要举措，但高昂的投资与运行成本仍是制约其规模化应用的主要瓶颈<sup>[3-4]</sup>。

目前，为了提升各类太阳能耦合供热系统的运行效能，大量学者针对不同地域气候特性做了广泛的研究。常见的优化途径包括针对不同气候区的多源耦合系统性能分析与评价<sup>[5]</sup>；新型预热模式及分区域柔性温度控制策略的开发<sup>[6]</sup>；以及集成梯级潜热蓄热<sup>[7]</sup>、跨季节水体储热<sup>[8]</sup>或埋地管蓄热<sup>[9]</sup>等关键技术的应用。相关研究已广泛延伸至粮仓近零能耗运行<sup>[10]</sup>、办公建筑暖通配置优化<sup>[11]</sup>、工业真空除氧加热<sup>[12]</sup>、蔬菜废弃物系统供能改良<sup>[13]</sup>以及建筑立面绿化集成<sup>[14]</sup>等多元应用领域。

然而，现有的太阳能耦合供暖系统控制逻辑单一，多采用定温或定时启停模式，缺乏集热侧动态温差响应与供暖侧自适应变温调控的协同机制，难

以应对极端环境下辅助热源性能衰减与建筑负荷激增的矛盾，导致供需匹配失衡。基于此，本文以新疆哈密地区某办公楼太阳能辅助热源供暖系统为研究对象，对现行系统运行状况进行分析，提出集成集热侧动态温差控制与供暖侧分季节变供水温度的运行策略优化方案，并利用瞬时系统模拟程序（TRNSYS）进行仿真分析，为严寒高辐照地区太阳能耦合系统设计、关键参数匹配与调控模式升级提供参考。

## 1 概况

### 1.1 示范工程简介

本研究对象为新疆哈密地区某产业园区办公楼的太阳能耦合辅助热源供暖系统（SAHS），如图1所示。主要由真空管集热器、蓄热水箱、空气源热泵、电加热器、智能控制柜及辐射末端等装置构成。系统通过太阳能、空气源热能及电能的多能互补输入，实现建筑供暖热能输出。其运行逻辑如下：太阳辐照作用于真空管集热器表面时，导热介质捕捉光热能量并将其循环交换至蓄热水箱进行热存储；当水箱温度达到供暖设定阈值（如45°C）时，系统优先调度水箱热量供给辐射末端，实现建筑直接供暖；当遭遇连续阴雨或夜间等低辐照工况

时，控制系统将自动启动空气源热泵或电加热器等辅助热源，确保供暖连续性与稳定性。

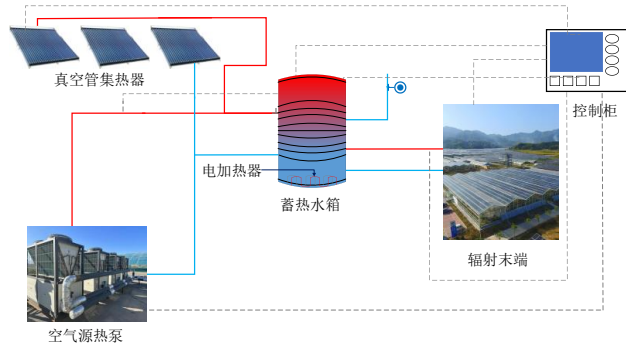


图1 哈密某产业园区供暖系统图

Fig. 1 Heating system diagram of an industrial park in Hami

## 1.2 建筑热负荷计算

本文采用理论计算与TrnBuild数值模拟双重验证方法测算该5800 m<sup>2</sup>办公楼的负荷特性。根据《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019-2015)，5800 m<sup>2</sup>办公楼每天总的耗热量用如下公式计算<sup>[15]</sup>：

$$Q = \alpha \cdot F \cdot K \cdot (t_n - t_{wn}) \cdot t \quad (1)$$

式中,  $Q$ 为围护结构的基本耗热量[kWh];  $\alpha$ 为围护结构温差修正系数;  $F$ 为围护结构的面积[m<sup>2</sup>];  $K$ 为围护结构平均传热系数[W/(m<sup>2</sup>·°C)];  $t_n$ 为供暖室内计算温度[°C];  $t_{wn}$ 为供暖室外计算温度[°C];  $t$ 为供暖时间[h]。

围护结构平均传热系数由下式计算：

$$K = \frac{\Phi}{\frac{1}{\alpha_n} + R_k + \frac{1}{\alpha_w} + \sum \frac{\delta}{\alpha_\lambda g \lambda}} \quad (2)$$

式中,  $K$ 为围护结构平均传热系数[W/(m<sup>2</sup>·°C)];  $\alpha_n$ 为围护结构内表面换热系数[W/(m<sup>2</sup>·°C)];  $\alpha_w$ 为围护结构外表面换热系数[W/(m<sup>2</sup>·°C)];  $\delta$ 为围护结构主断面各层材料厚度[m];  $\lambda$ 为围护结构主断面各层材料导热系数[W/(m·°C)];  $\alpha_\lambda$ 为材料导热系数的修正系数;  $R_k$ 为主断面封闭的空气间层的热阻[m<sup>2</sup>·°C/W];  $\Phi$ 为考虑热桥影响, 对主断面传热系数的修正系数。

经理论计算, 5800 m<sup>2</sup>办公楼每日总耗热量为5604.8 kWh, 日平均供暖负荷为40.26 W/m<sup>2</sup>。该建筑在供暖季(10月18日至次年3月15日, 共148天)的累计供暖热量为829513 kWh。

与传统负荷计算方法相比, TrnBuild负荷模型能够更精确捕捉建筑供暖负荷的时序变化特性。基于该模型生成的供暖季逐时热负荷分布(图2)反映了哈密地区严寒期的热需求波动: 在供暖初期(10月)与末期(3月), 较高的室外气温和较丰富的太阳辐射产生被动得热补偿效应, 使得热负荷维持在较低水平; 而在12月至次年1月, 受室外极低气温与日照强度减弱的双重影响, 系统瞬时热负荷显著攀升, 峰值接近380 kW, 系统进入热负荷高峰期。经对比, 模拟工况下供暖季累计供热量(788988 kWh)与理论计算值的相对误差仅为4.8%, 有力验证了仿真模型在模拟该地区复杂气候响应下的工程可靠性。

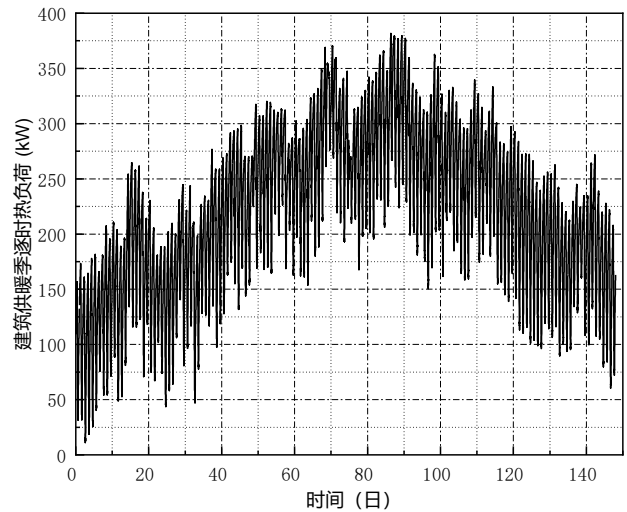


图2 办公楼供暖季逐时热负荷

Fig. 2 Heating season hourly heat load of the office building

## 1.3 系统设备选型与配置参数

根据《太阳能供热供暖工程技术标准》规定, 本研究针对哈密地区的气候特征结合既有建筑的客观约束, 采取了差异化的选型策略。针对集热器, 以供暖季平均热负荷为基准结合太阳能保证率进行面积计算, 旨在平衡系统经济性与稳定性; 针对空气源热泵及电加热等辅助热源, 以TrnBuild模拟的峰值热负荷(380 kW)为约束条件, 确保系统在极端低温工况下的供暖可靠性。最后依据集热面积配比确定蓄热水箱容量, 并结合建筑结构承重限制对参数进行修正。

集热器采光面积表达式如下<sup>[16]</sup>：

$$A = \frac{Qf}{J_t \eta_s (1 - \eta_L)} \quad (3)$$

式中,  $A$ 为太阳能供热系统集热器总面积,  $\text{m}^2$ ;  $Q$ 为供暖季平均每日基本耗热量,  $\text{MJ}$ ;  $f$ 为太阳能保证率, % (取0.6);  $J_t$ 为供暖季平均每日太阳辐照量,  $\text{MJ}/\text{m}^2$ ;  $\eta_s$ 为集热器的平均集热效率, 按目前的技术水平一般在0.3为0.5之间选择, 本文取0.5;  $\eta_L$ 为系统管路和蓄热水箱的热损失率, 对于短期蓄热的太阳能供热系统, 热损失率一般为10%~20%, 本文取15%。

经由公式(3)计算, 真空管集热器需求总面积约为2913  $\text{m}^2$ 。然而, 实际工程施工中受建筑屋顶结构限制(可用面积 $\leq 620 \text{m}^2$ ), 系统最终仅能部署616  $\text{m}^2$ 集热器阵列, 其实际建设规模仅为理论设计值的21.1%。以上矛盾凸显出在实际建筑改造场景中, 太阳能集热系统需在能源供给需求与空间约束间寻求平衡。

蓄热水箱作为SAHS的能量调节核心, 其容量的大小直接影响系统的热稳定性。根据《太阳能供热供暖工程技术标准》GB50495-2019中的规定, 短期蓄热系统, 推荐每平方米集热器采光面积对应40-300 L的水箱容积。结合哈密市太阳辐照度时序特性(日均9.3  $\text{MJ}/\text{m}^2$ )及建筑日间供暖需求特征, 设计选取规范下限值40  $\text{L}/\text{m}^2$ 进行计算, 理论需求蓄热水箱容积为24.64  $\text{m}^3$ 。然而, 由于蓄热水箱安装在办公楼楼顶, 受限于既有建筑楼顶的结构安全条件, 其等效静载荷限值为250  $\text{kg}/\text{m}^2$ , 无法支撑此等量级水箱在楼顶产生的局部集中载荷。经结构安全评估与多方案比选, 最终将水箱容量修正为5  $\text{m}^3$ 。

针对蓄热水箱容积受限的约束条件, 本研究提出一种高流速低储热容量的主动蓄热策略。该策略的核心在于弱化水箱的短时调蓄功能, 通过提升循环流速, 将建筑围护结构转化为储能系统的一部分。蓄热水箱作为能量调节核心, 其温度变化直接影响供暖可靠性。本系统采用5  $\text{m}^3$ 小容积水箱, 且运行于大流量循环模式下, 内部混水现象充分。其热平衡方程可表示为:

$$M_s C_p \frac{dT_s}{dt} = Q_{\text{coll}} + Q_{\text{aux}} - Q_{\text{load}} - Q_{\text{loss}} \quad (4)$$

式中:  $M_s$ 为水箱储水量,  $\text{kg}$ ;  $C_p$ 为水的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{C})$ ;  $T_s$ 为水箱实时温度,  $\text{C}$ ;  $Q_{\text{coll}}$ 为太阳能集热量,  $\text{kW}$ ;  $Q_{\text{aux}}$ 为空气源热泵及电加热提供的辅

助热量,  $Q_{\text{load}}$ 为建筑末端供热量,  $\text{kW}$ ;  $Q_{\text{loss}}$ 为水箱围护结构散热损失,  $\text{kW}$ 。

这种大流量小温差的运行模式旨在确保太阳能集热量能够被末端循环实时带至建筑中, 从而规避小容积水箱在强辐照工况下的热失控风险。在此逻辑下, 系统需适当放宽室内温度波动范围。因此该系统配置了额定流量为7800  $\text{kg}/\text{h}$ 的集热循环泵(功率0.84  $\text{kW}$ )以及额定流量25000  $\text{kg}/\text{h}$ 的供暖循环水泵(功率3  $\text{kW}$ )。

空气源热泵制热功率由下式计算<sup>[16]</sup>:

$$Q_c = \frac{k_1 Q}{T_1} \quad (5)$$

式中,  $k_1$ 为安全系数, 取1.1;  $T_1$ 为热泵设计工作时间, 取16h;  $Q$ 为围护结构的基本耗热量,  $\text{kWh}$ 。

根据式(5)计算所得, 空气源热泵的设计制热功率需求为366.5  $\text{kW}$ 。考虑到系统采用多能互补模式, 工程实际选取3组30匹的空气源热泵机组, 其在标准工况下的额定制热量为294  $\text{kW}$ 。针对哈密极寒工况下空气源热泵会出现低温性能衰减导致制热能力不足的情况, 在蓄热水箱内布置13组316 L不锈钢铠装电加热管作为应急冗余热源。每组电加热功率为15  $\text{kW}$ , 总功率195  $\text{kW}$ 。该配置确保了在太阳能贡献缺失且热泵效率触底的极端环境下, 系统总供热能力(489  $\text{kW}$ )仍能满足建筑峰值热负荷需求。SAHS各个设备选型参数如表1所示。

## 2 现有系统运行状况分析

本研究选取新疆哈密地区典型极寒工况(2026年1月1日-7日)的连续运行数据, 对SAHS系统进行热力性能评估。由图3可知, 测试周期内环境温度呈现显著昼夜波动特性, 极端温度出现于1月3日00:00 ( $-10.0\text{C}$ )及1月7日12:00 ( $+6.0\text{C}$ )。虽然环境处于严寒状态, 但哈密地区优越的太阳辐照条件为系统提供了良好的得热基础, 使得太阳能集热器出口温度在27.5-50 $\text{C}$ 之间波动。具体表现为: 每日10:00-16:00随太阳辐射强度逐渐攀升, 集热器捕捉的短波太阳辐射增益远超其向低温环境散失的热量, 集热器出口温度在1月1日达到最高温度50 $\text{C}$ 。每日16:00后, 太阳辐射量逐渐减弱至零, 集热器在失去能量输入的同时受

表1 SAHS各设备参数  
Table 1 SAHS equipment parameters

设备名称	数量	性能参数
真空管集热器	77组	总集热面积616 m <sup>2</sup> ；集热器安装倾角45°
蓄热水箱	1台	蓄热水箱体积5 m <sup>3</sup>
空气源热泵机组	3组	空气源热泵总输入功率105 kW；空气源热泵能效比2.8
循环水泵	1台	循环水泵功率3 kW；循环水泵流量25000 kg/h
集热循环泵	1台	循环水泵功率0.84 kW；集热循环泵流量7800 kg/h
电加热器	13组	电加热器总功率195 kW

极寒环境的散热驱动，导致其温度逐渐跌至最低点，1月3日在环境最低温度（-10℃）影响下，集热器出口温度达到最低点27.5℃。这种高辐照增益与严寒环境散热之间的动态平衡，构成了系统在严寒高辐照地区运行的热力特征。

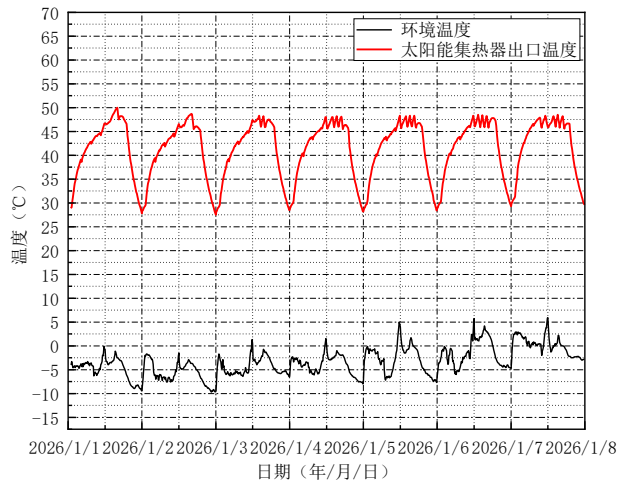


图3 环境温度和太阳能温度  
Fig. 3 Ambient temperature and solar collector temperature

如图4所示，测试期间供暖系统日均供水温度为41.08℃，符合《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》中35-45℃的建议区间。需特别说明的是，系统供回水温差实测均值仅为0.01℃，显著低于规范建议阈值（5-10℃）的现象。此种现象印证了第1.3节所述大流量小温差主动蓄热策略的有效执行。采用此种运行模式使得系统处于近趋等温循环状态，从而实现了集热效率的最大化。但在极寒工况下，此种运行模式也导致了系统对建筑瞬时热负荷激增的响应迟滞，并使得输配系统与辅助热源能耗激增。

实测数据分析显示，在1月1日至7日运行周期内，系统输入总电能（即系统总能耗）达22739

kWh。为进一步分析电能消耗结构，对各子系统的电能消耗进行统计，结果如下：热泵系统占比70.4%（16004 kWh），电加热装置占比25.3%（5756 kWh），循环水泵占比4.3%（979 kWh）。数据表明，系统在极端工况下存在能耗偏高且供热温度不达标的问题。上述问题的产生主要有两方面原因，一方面系统采用定时控制策略，未能识别建筑热负荷的时序特征，缺乏动态调节机制。另一方面供热温度未建立与外界环境温度的联动调节机制，导致供暖策略僵化，系统运行不经济。基于此，本文提出集成动态温差控制与分季节变供水温度的优化方案。

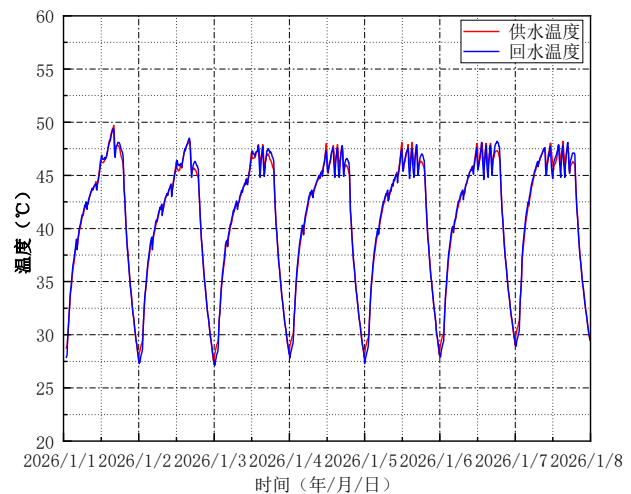


图4 系统供回水温度  
Fig. 4 System supply and return water temperatures

### 3 动态变温优化系统仿真模拟分析

#### 3.1 TRNSYS模型有效性验证

根据前述系统组成及运行机理，本研究利用TRNSYS模拟软件搭建了SAHS仿真模型（图5）。模型验证采用第1.3节所述工程参数（详见表1），选取2026年1月1日至7日的极寒工况进行对比

实验。

为评估数值模型的工程适用性，将现场实测数据与仿真输出的供热参数进行对比（图6）。结果显示，实际供暖温度曲线与模拟结果在动态趋势上基本一致，每日峰值温度相对误差均值为7.7%（绝对误差均值为4.4℃），谷值温度相对误差均值为3%（绝对误差均值为0.6℃）。表明该模型能够准确地捕捉复杂气候扰动下系统的演变规律，证实了模型具有较高的工程吻合度。

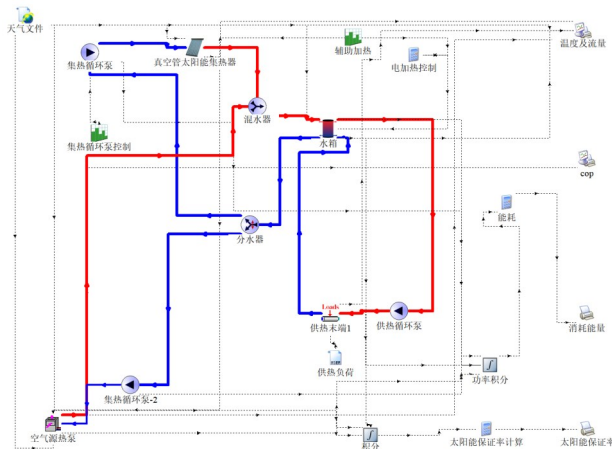


图5 太阳能供暖系统TRNSYS模型

Fig. 5 TRNSYS model of a solar heating system

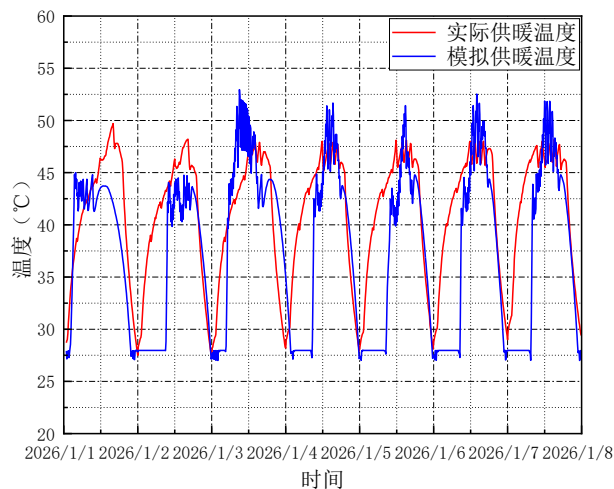


图6 仿真模型验证

Fig. 6 Simulation model validation

### 3.2 动态变温运行策略设计

原系统运行策略为定时控制，此种控制方式耗能严重。为提高太阳能耦合辅助热源供暖系统的能效与经济性，本研究构建了集热侧动态温差控制与

供暖侧分季节自适应变温耦合的调控策略。在集热侧控制逻辑方面，逻辑遵循太阳能优先原则，当集热器出口与蓄热水箱出口温差超过10℃时启动循环泵，温差降至2℃时关闭。同时，系统设置了双重辅助热源触发条件，当太阳能实时贡献率低于用户端温度需求的60%，或水箱底部温度较设定值（45±0.5℃）出现持续300s的-5℃稳态偏差时，辅助热源将自动介入以保障供暖稳定性。

在供暖侧热量匹配方面，本研究构建了融合气象学温度分区与多模态调控逻辑的供暖温度自适应策略。该策略依据室外温度 $T_{air}$ 的时序变化特征，将系统运行划分为五类特征模态：①过渡季模式（ $T_{air} \in [5, 15]^\circ\text{C}$ ）执行45℃供水温度，采用控制器维持±1.5℃控制精度；②低负荷运行模式（ $T_{air} > 15^\circ\text{C}$ 且持续5日以上）下调供水温度至40℃并激活蓄热罐负荷缓冲功能；③常规供暖模式（ $T_{air} \in [-5, 5]^\circ\text{C}$ ）设定50℃供水温度，通过控制算法动态优化太阳能与辅助热源的供能配比；④深度供暖模式（ $T_{air} \in [-15, -5]^\circ\text{C}$ ）提升至55℃，以应对显著增长的围护结构散热损失；⑤极端工况应急模式（ $T_{air} < -15^\circ\text{C}$ ）启动60℃供温，开启辅助热源全功率输出，保障室内热环境安全。优化后动态变温控制逻辑及具体策略参数详见表2。

表2 工业园区供热温度控制策略表

Table 2 Table of heating temperature control strategies for an industrial park

环境温度/ $^\circ\text{C}$	供暖温度/ $^\circ\text{C}$
$T_{air} < -15$	$T_{供水} = 60$
$-15 < T_{air} < -5$	$T_{供水} = 55$
$-5 < T_{air} < 5$	$T_{供水} = 50$
$5 < T_{air} < 15$	$T_{供水} = 45$
$T_{air} > 15$	$T_{供水} = 40$

### 3.3 优化系统运行效果与评价

基于前文提出的动态温差与分级变温供暖策略，本研究重构了SAHS的TRNSYS模型（图7）。

仿真结果显示（图8），系统在85.7%的供暖时段内可维持设定温度±1.5℃偏差，但在3次极寒时间（定义： $T_{air} < -15^\circ\text{C}$ 持续24h且热负荷 $> 35 \text{ W/m}^2$ ）中出现显著供温失控现象。以1月13日09:00为例，实测供水温度仅27℃，较目标值60℃产生33℃偏差。

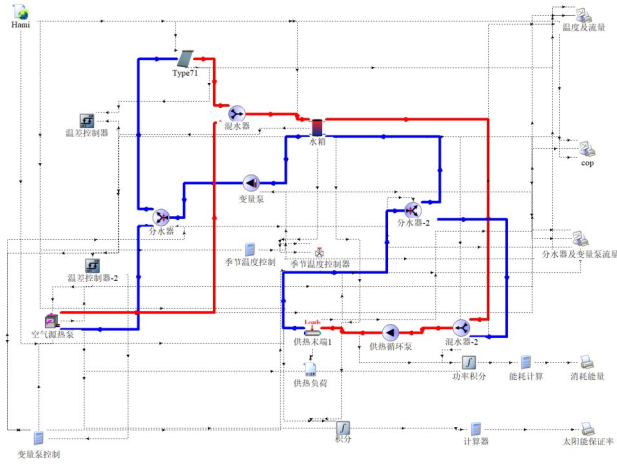


图7 优化后太阳能供暖系统TRNSYS模型

Fig. 7 Optimized TRNSYS model of the solar heating system

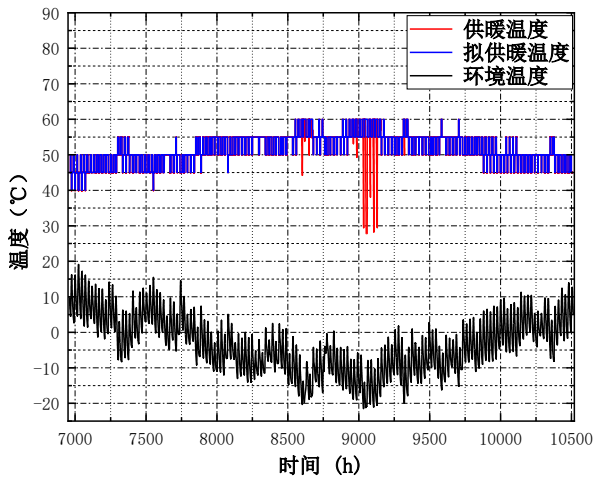


图8 运行策略优化后供暖温度

Fig. 8 Heating temperature after operation strategy optimization

其深层次热力学机理在于，系统在极寒环境下热量供需的严重失衡，一方面建筑围护结构传热温差达到峰值导致热负荷激增；另一方面，空气源热泵受压缩机等熵效率下降及蒸发器结霜频次增加的影响，其制热性能系数（COP）随环境温度降低呈现非线性衰减（从2.2降至1.2）（图9），导致系统在热需求最高时刻出现供温失控现象。同时，虽然哈密地区辐照优越，但极低环境温度增加了集热器的散热损失，使得原配置的195 kW电加热器功率不足以弥补太阳能贡献减弱与热泵效率触底留下的能量缺口。

为此，本研究提出将电加热功率提升的优化方案。该功率的选定是基于极端工况下系统热力学平

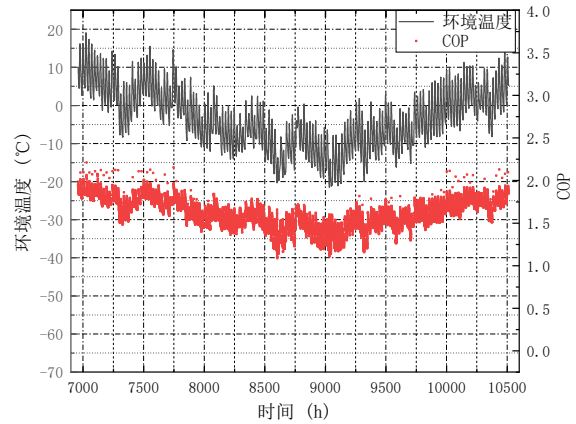


图9 SAHS运行策略优化后供暖季空气源热泵COP  
Fig. 9 COP of the air-source heat pump during the heating season after optimization of the SAHS operation strategy

衡的临界需求核算。根据哈密地区典型极寒工况（ $T_{air} < -21^{\circ}\text{C}$ ），建筑瞬时峰值热负荷  $Q_{load, peak}$  约为380 kW。此时，空气源热泵受低温环境影响，制热性能系数（COP）衰减至1.2，其实际制热出力降至最低。为保障系统在太阳能贡献消失时的供暖可靠性，辅助电加热功率  $P_{elec}$  应满足下式：

$$P_{elec} \geq Q_{load, peak} - P_{hp, in} \cdot COP_{min} \quad (6)$$

式中， $P_{hp, in}$  为热泵额定输入功率，为105 kW； $COP_{min}$  取1.2。经计算，极端工况下电加热功率需求约为254 kW。考虑到设备标准规格，本研究将电加热功率由195 kW补强至255 kW。

经实地调研，该办公楼配备的专用变压器额定容量  $S_{strans}$  为525 kVA。优化后系统的总装机功率约为364 kW。在极端极寒工况下，考虑系统综合功率因数  $\cos\Phi$  取0.85，系统运行时的视在功率  $S_{sys}$  以及变压器负载率  $\beta$  为：

$$S_{sys} = \frac{P_{sys}}{\cos\Phi} = \frac{364}{0.85} \approx 428 \text{ kVA}$$

$$\beta = \frac{S_{sys}}{S_{strans}} = \frac{428}{525} \approx 81.5\%$$

计算结果表明，在极端工况下辅助热源全功率开启时，变压器负载率为81.5%，处于70%~85%的安全运行区间。此外，极寒工况通常伴随办公楼非供暖负荷的低谷期，实际运行安全余量充足，无需进行变压器增容改造。

为进一步揭示优化后系统在极端环境下的调控逻辑与多源互补机理，本文选取典型极寒日的运行数据进行深度分析，结果如图10所示。由图10(a)可知，系统严格执行动态温差控制逻辑。尽管环境

温度处于严寒状态,但在10:00-16:00的高辐照时段,真空管集热器出口温度仍能攀升至 $50^{\circ}\text{C}$ 以上。图10(b)和图10(c)则展现了空气源热泵与电加热器的时序互补特性。受哈密极寒工况影响,空气源热泵的性能出现非线性衰减,导致其出口温度达到 $50^{\circ}\text{C}$ 后很难进一步提升。此时系统触发分级自适应控制策略,当水箱出口温度低于 $60^{\circ}\text{C}$ 设定值时,电加热器介入。由图10(c)可见,电加热器通过精准的启停调控,补偿了热泵效率降低及太阳能缺

失留下的能量缺口,使供水温度即使在极端低温下也能稳定在 $60\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 的范围内。

各热源对建筑负荷的时序匹配机理如图10(d)所示。通过设备容量补强与动态策略的协同,太阳能集热功率在日间优先抵消建筑热负荷,空气源热泵维持常态化输出,电加热器则根据实时热缺口进行功率动态补偿。这种多源互补模式,实现了供热能力和建筑动态热负荷在时间尺度上精准匹配。

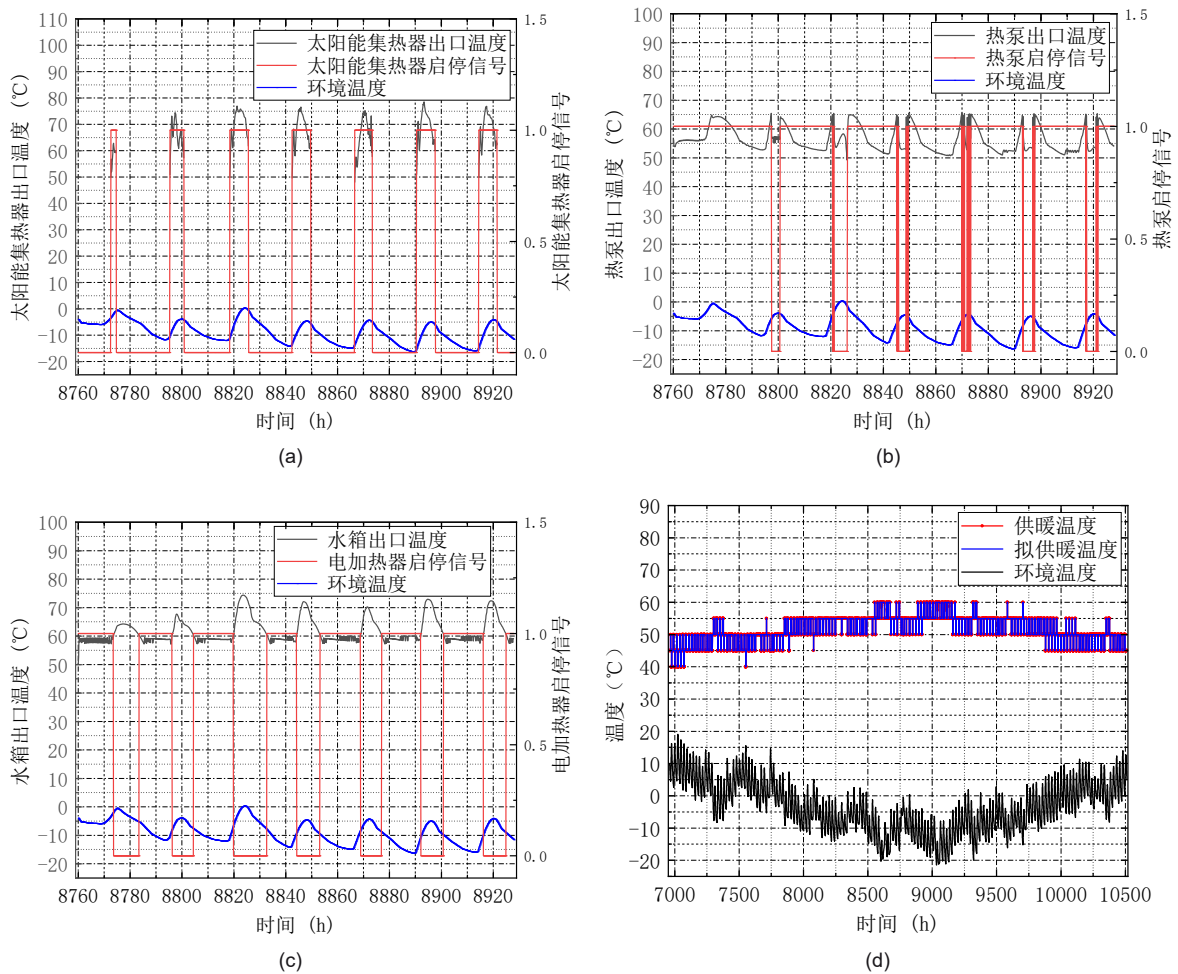


图10 典型极寒工况下系统运行特性:(a)集热器出口温度与循环泵启停信号(b)空气源热泵出口温度与启停信号(c)水箱出口温度与电加热启停信号(d)供暖温度

Fig. 10 System operating characteristics under typical extreme cold conditions: (a) Collector outlet temperature and circulation pump on/off signal (b) Air source heat pump outlet temperature and on/off signal (c) Water tank outlet temperature and electric heating on/off signal (d) Heating temperature.

当前太阳能耦合供暖系统推广的核心障碍在于全生命周期成本(LCC)优化。如表3所示,本研究通过设备容量补强(将电加热器功率提升至 $255\text{ kW}$ ),并配合集热侧动态温差与供暖侧分级变温控

制策略,实现了在初始投资增加 $1,280$ 元(+0.55%)的情况下年运行费用降低 $28304$ 元,系统静态投资回收周期缩短至 $12$ 个月。仿真数据显示(如图11),优化后的SAHS系统供暖季总能耗

从 532276 kWh 降至 461516 kWh，降幅达 13.29%。在忽略设备折旧与维护费用的简化估算前提下，20 年设计周期内的累计系统运行支出由 4490050 元降至 3925250 元，整体降幅达 12.58%。需要强调的是，这种瞬时功率补强与全季总能耗下降并不矛盾，255 kW 的高功率电加热器配置主要用于保障极寒时期热安全，补偿空气源热泵在低温

下的性能衰减，而 13.29% 的节能效益主要源于占供暖季 85% 以上的常规工况，通过分级变温逻辑实现了热源出力与建筑动态热负荷的精准匹配，有效避免了过渡季及常规供暖季的能源冗余消耗，最终利用极小的硬件成本投入，保障了系统在全工况下能源利用率与经济性的多目标协同提升。

表 3 优化前后系统投资成本

Table 3 System investment cost before and after optimization

	优化前供暖系统	优化后系统供暖系统
初始成本	5 m <sup>3</sup> 水箱 6490 元；3 组 30 匹空气源热泵 150000 元；2 个水泵 1000 元；54 台真空管集热器 70200 元；电加热器 13 组 4160 元	5 m <sup>3</sup> 水箱 6490 元；3 组 30 匹空气源热泵 150000 元；2 个水泵 1000 元；54 台真空管集热器 70200 元；电加热器 17 组 5440 元
运行成本	每个供暖季 212910 元	每个供暖季 184606 元

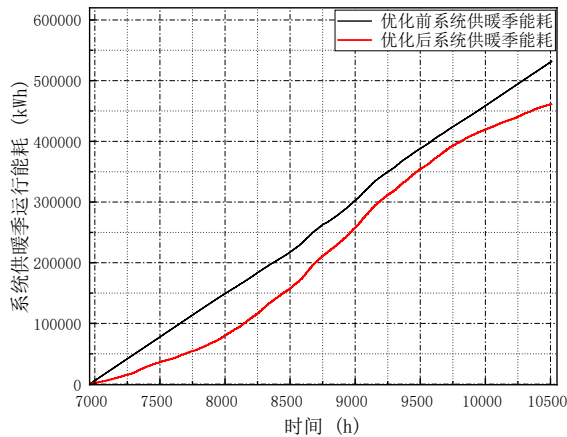


图 11 优化前后 SAHS 供暖季能耗

Fig. 11 SAHS heating season energy consumption before and after optimization

## 4 结论

在本研究中，针对新疆哈密地区某办公楼太阳能耦合辅助热源供暖系统存在的能耗高、供热温度波动大等问题，提出了一种集成动态温差控制与分季节变供水温度的优化策略。通过实验测试与 TRNSYS 仿真相结合的方法，以设备参数与运行模式为优化变量，系统探究了经济性、能耗效率及热舒适性目标下的系统升级方案。得出以下主要结论：

1) 提出并验证了高流速搭配小容积水箱的主动蓄热模式。针对建筑现实约束，本研究确定了集热面积 616 m<sup>2</sup>、蓄热水箱体积 5 m<sup>3</sup>、空气源热泵输入功率 105 kW 的匹配方案，通过提升循环泵流

量 25000 kg/h 将建筑围护结构转化为蓄热主体。该模式有效避免了小容积水箱在强辐照条件下的热失控风险，确保了严寒高辐照环境下系统的热平衡。

2) 构建了基于 COP 衰减补偿的分级自适应控制策略。针对空气源热泵在极寒工况（-21℃）下，因压缩机效率下降及结霜导致的性能衰减（COP 从 2.2 降至 1.2），将系统电加热功率提升至 255 kW。经校核，该补强方案下变压器负载率为 81.5%，处于安全运行区间，无需增容改造。在此硬件保障基础上，系统通过分级自适应变温控制策略，在占供暖季 85% 以上的常规工况下实现了热源出力与建筑负荷的时序精准匹配，使得系统供暖季总能耗降低 13.29%，年运行成本减少 12.58%。为类似地区的清洁能源供暖系统设计与优化提供了有益的参考和借鉴。

## 参考文献

- [1] 张晓明, 王晨铮, 张昊天, 等. 太阳能光伏光热-空气源热泵供热系统不同地区模拟仿真研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(8): 545-554. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-0673.  
ZHANG X M, WANG C Z, ZHANG H T, et al. Simulation study of solar photovoltaic/thermal-airsource heat pump heating system in different regions[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2025, 46(8): 545-554.
- [2] 王瑞敏, 余庆华, 贾娜, 等. 夏热冬冷地区热泵辅助太阳能跨季节储热供暖系统性能分析与优化[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 781-793. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0998.  
WANG R M, YU Q H, JIA N, et al. Performance analysis and optimization of a heat pump assisted solar seasonal thermal energy storage heating system in hot summer and cold winter regions[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3):

- 781-793.
- [3] 宋航, 赵鹏, 申妙. 太阳能-空气源热泵双联系统在高寒地区的应用[J]. 区域供热, 2023(3): 112-122. DOI:10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2023.03.016.  
SONG H, ZHAO P, SHEN M. Application of solar-air source heat pump dual system in alpineregion[J]. District Heating, 2023(3): 112-122.
- [4] 闫秀英, 夏宇. 太阳能-空气源热泵新型供暖策略及其优化研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(7): 748-757. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-0367.  
YAN X Y, XIA Y. Research on novel heating strategy and optimization of solar-air source heatpump[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(7): 748-757.
- [5] SARBU I, DORCA A. Investigating the performance of an air-source heat pump coupled to heating and cooling system of a single-family house located in a hilly area with low outdoor temperatures[J]. Renewable Energy, 2026, 263: 125539. DOI: 10.1016/j.renene.2026.125539.
- [6] DENG C, LI G, LI M, 等. Optimised control and parameter matching of a solar-assisted air-source heat-pump drying system for cold-region applications[J]. Solar Energy, 2026, 309: 114445. DOI:10.1016/j.solener.2026.114445.
- [7] 肖鑫, 杨耿, 王云峰. 基于TRNSYS的太阳能梯级蓄热热泵系统模拟[J]. 化工学报, 2025, 76.  
XIAO X, YANG G, WANG Y F. Simulation of solar cascade thermal storage heat pump system basedon TRNSYS[J]. CIESC Journal, 2025, 76 .
- [8] LING Y, TIAN J, CHU Z, 等. Interseasonal solar thermal energy storage in abandoned mine shaft: A study based on TRNSYS[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 290: 130152. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2026.130152.
- [9] MA J, WEN H, WANG R, 等. Life cycle assessment of a solar-assisted ground source heat pump with integrated phase change material and borehole thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 154: 121156. DOI: 10.1016/j.est.2026.121156.
- [10] 陈雁, 闫喜龙, 戴诗渝, 等. 基于trnsys模拟的粮仓太阳能-土壤源热泵系统(火用)分析[J]. 太阳能学报, 2025, 46(10): 434-443. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-0982.  
CHEN Y, YAN X L, DAI S Y, et al. Exergy analysis of solar-ground source heat pump system forgranary based on TRNSYS simulation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(10): 434-443
- [11] 刘伟, 李怀, 黄巍, 等. 基于TRNSYS模拟的某近零能耗办公楼暖通空调系统优化配置分析[J]. 建筑科学, 2022, 38(4): 158-168. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2022.04.21.  
LIU W, LI H, HUANG W, et al. Optimization configuration analysis of HVAC system for a nearly zeroenergy office building based on TRNSYS simulation[J]. Building Science, 2022, 38(4): 158-168.
- [12] LIEW S K, HASANUZZAMAN M, TAN C K, 等. Real - time experimental performance, economic and environmental impact assessment of solar-assisted vacuum deaeration heating system [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2026: e70356. DOI:10.1002/ep.70356.
- [13] 李金平, 石紫菡, 杨嘉威, 等. 蔬菜废弃物处理和循环利用系统的运行策略优化[J]. 兰州理工大学学报, 2026, 52(1): 33-40.  
LI J P, SHI Z H, YANG J W, et al. Optimization of operation strategy for vegetable waste treatmentand recycling system[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2026, 52(1): 33-40.
- [14] BRUNO R, CRISTAUDO A. Assessing the energy performance of integrated living wall systems: A dynamic numerical model coupled with TRNSYS for building energy simulations[J]. Energy and Buildings, 2026, 356: 117073. DOI: 10.1016/j.enbuild.2026.117073.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50019-2015[S].  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design codefor heating ventilation and air conditioning of industrial buildings: GB 50019-2015[S].
- [16] 李金平, 李彩军, 李天澍, 等. 寒冷地区户用大平板太阳能集热器-空气源热泵系统性能研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 246-256. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0004.  
LI J P, LI C J, LI T S, et al. Performance study on household large flat plate solar collector-air source heat pump system in cold regions[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(5): 246-256.