

储热储冷多场景应用专刊



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

王瑞敏¹, 余庆华¹, 贾娜², 王琳², 孙彬博¹

(¹武汉理工大学汽车工程学院, 湖北 武汉 430070; ²中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 101199)

摘要: 太阳能跨季节水体储热供暖系统能够实现夏热冬冷地区的“夏热冬用”, 显著减少传统供暖方式的碳排放, 然而该系统存在输出温度调控困难及供暖中后期温度下降等问题, 为满足稳定供暖需求, 需耦合水源热泵实现温度的灵活调节。本研究以武汉市某三层大型建筑为供暖对象, 构建了耦合光伏/光热(photovoltaic/thermal, PV/T)组件、跨季节储热水体及水源热泵的多源供暖系统, 通过建立全年动态仿真模型, 从能效、经济性和供暖稳定性3个维度对该系统的综合性能进行了深入研究, 并将其与基于单一PV/T的跨季节水体储热供暖系统和PV/T耦合电锅炉的跨季节水体储热供暖系统进行了对比分析。结果表明: PV/T耦合水源热泵的跨季节水体储热供暖系统综合性能最优, 其系统全年平均能效比为7.537, 全生命周期成本为142.83万元, 供暖进水温度的均方根误差为1.321。进一步地, 采用Hooke-Jeeves算法对该系统的PV/T组件面积、倾斜角、蓄热水箱容积以及热泵额定制热量进行了优化配置, 优化后系统全年平均能效比提高4.59%、全生命周期成本降低8.89%, 优化效果显著。本研究可为面向夏热冬冷地区大型建筑的太阳能跨季节储热供暖系统的设计和 optimization 提供理论依据和工程指导。

关键词: 跨季节储热; PV/T系统; 水源热泵; TRNSYS; 参数优化

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0998

中图分类号: TK 11; TK 51

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-781-13

Performance analysis and optimization of a heat pump-assisted seasonal solar thermal storage heating system in hot-summer and cold-winter regions

WANG Ruimin¹, YU Qinghua¹, JIA Na², WANG Lin², SUN Binbo¹

(¹School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; ²Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 101199, China)

Abstract: Seasonal solar water thermal energy storage systems can utilize the heat accumulated in summer during winter in regions with hot summers and cold winters. They can significantly reduce the high carbon emissions characterizing the traditional heating methods. However, they exhibit problems, such as difficult output temperature regulation and temperature drops in the middle and late stage of heating. To accommodate stable heating demand, a water-source heat pump (WSHP) should be added to achieve flexible temperature

收稿日期: 2025-11-04; 修改稿日期: 2025-12-04。

基金项目: 湖北省自然科学基金联合基金 (2023AFD187)。

第一作者: 王瑞敏 (2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为储热技术, E-mail: wangrm@whut.edu.cn; 通信作者: 余庆华, 教授, 研究方向为储热技术, E-mail: qhyu@whut.edu.cn。

引用本文: 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.

Citation: WANG Ruimin, YU Qinghua, JIA Na, et al. Performance analysis and optimization of a heat pump-assisted seasonal solar thermal storage heating system in hot-summer and cold-winter regions[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 781-793.

adjustment. This study adopts a large, three-story building located in Wuhan as a case study and designs a multi-source heating system that combines photovoltaic/thermal (PV/T) collectors, a seasonal water thermal energy storage and a WSHP. A whole-year dynamic simulation model is established for an in-depth, comprehensive investigation of the system performance considering three aspects: the energy efficiency, economy, and heating stability. The proposed system is also compared with a single PV/T seasonal water thermal energy storage heating system and a PV/T system with an electric boiler. The results show that the PV/T system with a WSHP has the best overall performance. Its annual average seasonal energy efficiency ratio (SSER) is 7.537, the life cycle cost (LCC) is 1.4283 million yuan and the root mean-square error of the heating inlet water temperature is 1.321. Furthermore, the Hooke-Jeeves algorithm is used to optimize the area and tilt angle of PV/T collectors, the volume of the hot water storage tank and the rated heating capacity of the heat pump. After optimization, the system SSER increases by 4.59%, while the LCC is reduced by 8.89%, indicating significant improvements. This research provides a theoretical basis and practical guidance for the engineering design and optimization of seasonal solar thermal energy storage heating systems for large buildings located in hot-summer and cold-winter regions.

Keywords: seasonal thermal energy storage; PV/T system; water source heat pump; TRNSYS; parameter optimization

在中国,建筑能耗约占社会总能耗的 22.3%^[1],在力求达成“双碳”目标的背景下,建筑供热的低碳转型成为优化能源结构的关键环节。中国夏热冬冷气候区(以长江中下游地区为核心,武汉为典型城市)冬季湿冷特征显著,且普遍缺乏集中供暖^[2]。该区域乡镇卫生院多采用燃气锅炉、电采暖等传统供暖方式,化石能源消耗高、碳排放量大,同时医疗建筑对室内温度要求严苛,其能耗约为普通公共建筑的 1.6~2.0 倍^[3],因此医疗建筑的节能低碳供暖研究意义重大。

跨季节储热技术可解决能源供需的季节不平衡,实现“夏热冬用”,是提升可再生能源利用率的关键。其中跨季节水体储热因储热介质(水)廉价安全、比热容高、系统结构简单等优势成为工程首选^[4]。同时,光伏/光热(photovoltaic/thermal, PV/T)组件通过集成光伏电池与换热板,实现同步产电产热,较传统太阳能集热器能显著提高太阳能利用率,其发电可直接驱动供暖用电设备,降低电网依赖,实现能源的梯级利用。Chen 等^[5]针对青藏高原公共卫生服务建筑的研究表明,光伏、光热、蓄热、蓄电一体化系统综合性能最好。但考虑到经济性及高负荷时期的供暖稳定性,需结合辅助热源构建多源耦合系统。

辅助热源是保障跨季节储热供暖系统稳定性、弥补冬季热量缺口的关键,常用方案包括锅炉、热泵等,其中水源热泵通过消耗少量电能即可将低品位热能转化为高品位热能,具有显著节能优势^[6]。Aguilar 等^[7]的实验表明,光伏-水源热泵系统比传统燃气锅炉减少 79% 的不可再生一次能源消耗和 82% 的 CO₂ 排放。Fu 等^[8]以海河沿岸建筑为研究对象,采用瞬态系统模拟程序 TRNSYS 开展了以海河水为热源的水源热泵系统的动态模拟分析,结果表明该系统的热泵 COP 可达 3.08。Han 等^[9]提出了一种太阳能辅助原生水源热泵系统,以解决其在低温工况下的性能退化问题,使系统的全年总 COP 提升 18%。上述研究仅聚焦“太阳能-热泵”的简单耦合,缺乏与跨季节储热单元深度耦合的“集热-储热-供热”闭环设计,难以应对冬季复杂工况。此外,这些研究多依赖地表水(江水、海水)作为热泵热源,对地理条件要求较高。Xu 等^[10]针对南京一小型建筑的低碳供暖需求,搭建“集热-长短双蓄储热-供热”系统并优化了集热器面积和储热水箱容积,最终使系统碳排放较常规供暖系统减少 3.5 t,但该系统需耦合地下水作为热泵的补充热源,且未采用 PV/T 热电联产技术,能量利用形式单一,热泵及水泵等设备未考虑采用新能源电力驱动。

Dong等^[1]以张家口地区太阳能跨季节地理水体储热供暖系统为研究对象,进一步对比了锅炉和水源热泵作为辅助热源对系统性能的影响,明确了以跨季节储热水体为热源的水源热泵在提升集热效率和节约化石能源方面更具优势,但该研究未对系统组件进行优化分析,且未考虑与PV/T系统的耦合,在节能减碳方面仍有较大的提升空间。

综上所述,针对以跨季节储热水体为热源的水源热泵辅助供暖系统及耦合PV/T系统的研究相对较少,尤其是以武汉地区大型高热负荷建筑为跨季节储热供暖对象的应用研究还十分欠缺,且缺乏不同辅助热源系统的综合性能与成本对比分析,还需通过多参数协同优化进一步提升系统性能。基于此,本研究以武汉某乡镇卫生院为供暖对象,提出一种耦合PV/T组件、跨季节储热水体和水源热泵的新型低碳供暖系统。PV/T组件输出的热量存储在跨季节储热水体中,供暖期间依据储热水体的输出温度,储热水体可直接用于供暖或作为水源热泵的蒸发端热源提升系统输出温度后再进行供暖,克服储热水体输出温度调控困难及供暖中后期温度下降等问题, PV/T组件输出的电能为水泵和热泵等提供动力,进一步降低供暖系统的碳排放;通过TRNSYS构建系统仿真模型并开展全年动态仿真,在能效指标、经济性与稳定性3个方面,对比其与单一PV/T、PV/T耦合电锅炉的2种跨季节储热供暖系统的性能差异;结合惩罚因子,建立考虑能效、经济性、供暖充足性以及供暖稳定性的多目标优化函数,采用Hooke-Jeeves算法对系统关键参数进行协同优化分析,在保障供暖充足性以及供暖稳定性的基础上进一步提升系统能效和降低综合成本,为夏热冬冷地区大型公共建筑清洁供暖系统的设计提供理论依据和实践参考。

1 系统原理及运行模式

1.1 系统组成

本研究3种方案的系统结构原理如图1所示,均以PV/T组件为集热部件,蓄热水箱为跨季节储热部件,主要差异在于辅助热源。其中,方案A(单一PV/T的跨季节水体储热供暖系统)对应图1(a),由PV/T组件、逆变器、蓄电池、蓄热水箱、供热水箱、循环水泵及阀门组成。方案B(PV/T耦合电锅炉的跨季节水体储热供暖系统)对应图1(b),在

方案A基础上增设电锅炉,当蓄热水箱水温达不到供暖需求时,可通过开启电锅炉直接加热。方案C(PV/T耦合水源热泵的跨季节水体储热供暖系统)对应图1(c),以水源热泵替代方案B中的电锅炉,通过热泵循环实现水温提升。

各核心部件功能保持一致: PV/T组件实现太阳能热电联产,逆变器将直流电转为交流电供系统设备运行,蓄电池储存多余电能,蓄热水箱存储经PV/T加热后的水,供热水箱承担向末端输送稳定热水的作用。

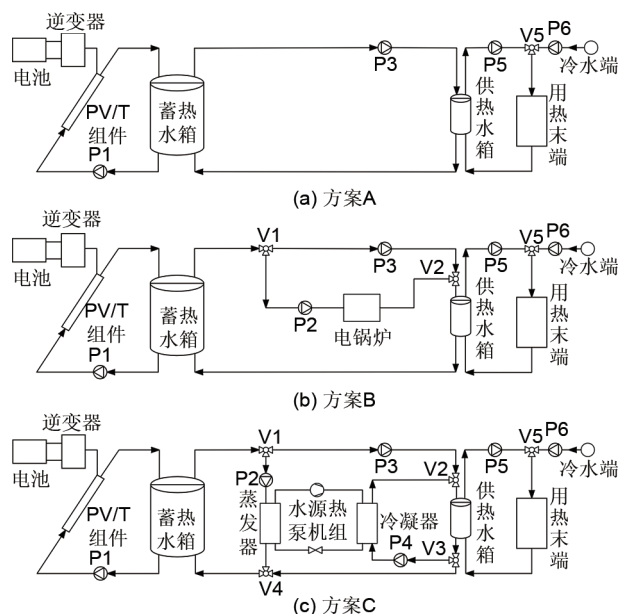


图1 供暖系统结构原理

Fig. 1 Schematic diagram of the heating system structure

1.2 运行模式

系统运行分为非供暖季与供暖季(11月15日至次年3月15日)。集热循环全年开启,当PV/T组件进出口水的温差大于 5°C 时,集热循环泵P1开启,将热量储存至蓄热水箱,为供暖季储备能量;光伏产生的电能优先供系统设备使用,多余电能存入蓄电池。在供暖季,直接供暖泵P3开启,将蓄热水箱热水输送到供热水箱中,通过与冷水端冷水混合维持供暖进水温度 48°C 。对于设有辅助热源的系统,当供热水箱的供暖水温小于 45°C 时,三通阀V1切换至辅助加热回路:电锅炉直接电加热进水,水源热泵则是从蓄热水箱取热,通过热泵循环将供热水箱底层水的温度提升至设定温度。

2 系统模型构建

2.1 负荷计算

本研究目标对象为武汉市某三层乡镇卫生院，建筑总高 10.5 m，采暖面积 2376 m²，设计一层门诊区的供暖温度 18℃，二、三层住院、办公区的供暖温度为 22℃^[12]。建筑围护结构的热物性参数如表 1 所示。

在 SketchUp 中建立建筑模型，导入到 TRNSYS 的 Type56 模块设置供暖要求，考虑到人员、照明、设备等内热源降低热负荷，通风、渗透增大热负荷，两者影响相互抵消且总偏差处在工程允许范围内，本模型忽略这两种因素的耦合影响。气象数据采用 Meteonorm8.0 的武汉典型气象年文件，经模拟计算获得武汉市全年逐时热负荷。如图 2 所示，全年累计热负荷为 166.7 MWh，其中采暖季为

表 1 建筑围护结构

Table 1 Building envelope

围护结构	材料	厚度/mm	传热系数/[W/(m ² ·℃)]
屋面	钢筋混凝土	205	0.399
	保温砂浆		
	外墙保温聚氨酯		
	石灰石膏砂浆		
	沥青防水卷材		
地面	碎石混凝土	180	0.777
	聚氨酯硬泡沫塑料		
	多孔混凝土		
外墙	石灰石膏砂浆	270	0.581
	混凝土多孔砖		
	外墙保温聚氨酯		
外窗	中空玻璃	—	1.08

149.295 MWh，占 89.6%，最大热负荷为 98.5 kWh，出现在第 176 h，即 1 月上旬。

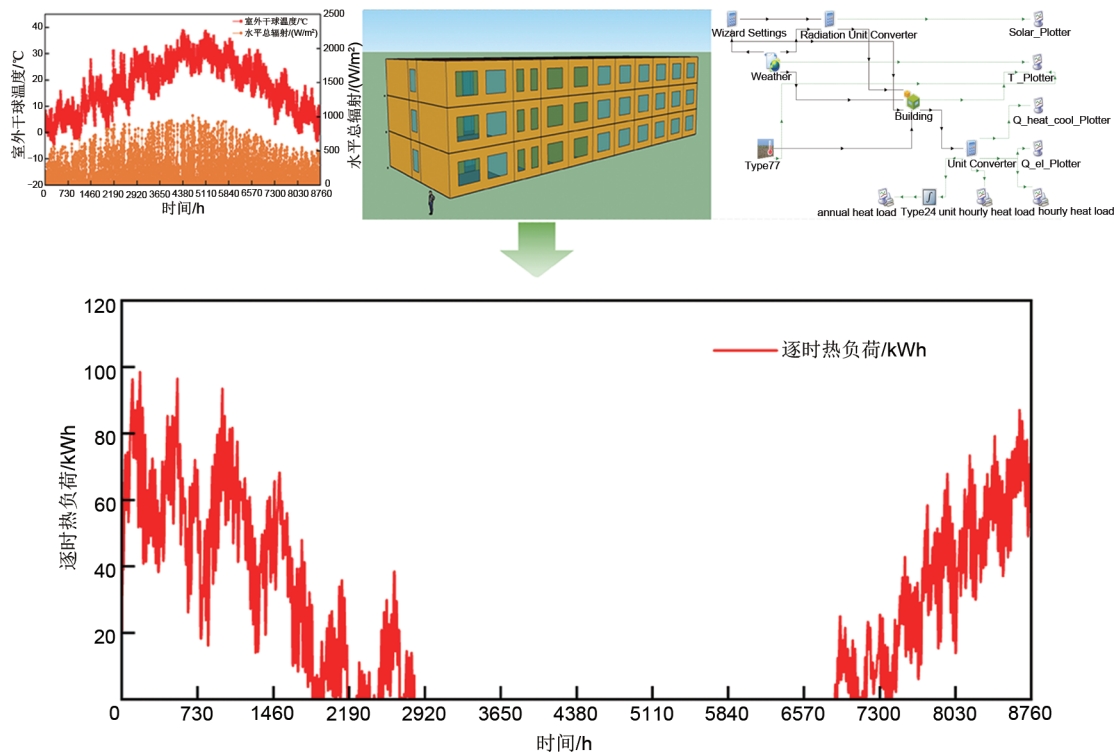


图 2 建筑逐时热负荷计算

Fig. 2 Hourly heating load calculation

2.2 数学模型

2.2.1 PV/T 组件

PV/T 组件为光-电-热协同转换单元，光电转换部分即光伏电池，其发电效率为：

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} [1 - C(T_{cell} - T_{ref})] \quad (1)$$

式中， T_{cell} 为光伏电池实际工作温度，℃； T_{ref} 为光伏电池性能测试的参考温度，取 25℃； η_{PV} 为光伏电池在 T_{cell} 下的发电效率； η_{ref} 为光伏电池在 T_{ref} 下的额定发电效率； C 为光伏电池温度系数，取 0.0032℃⁻¹。

PV/T 组件吸收的太阳能中, 未转化为电能的部分以热能的形式被冷却流体吸收, 形成可利用的集热量 Q_u , 计算公式为:

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

式中, $\dot{m}$ 为流经组件的冷却流体(水)的质量, kg; c_p 为水的定压比热容, 取 $4.19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T_{out} 为冷却流体流出组件的温度, $^\circ\text{C}$; T_{in} 为冷却流体流入组件的温度, $^\circ\text{C}$ 。

初始设计时, PV/T 组件的面积需综合考虑建筑供暖热负荷、当地太阳辐照强度等因素确定, 其设计公式为:

$$A_c = \frac{3600 Q_f}{J_a \eta_{cd} (1 - \eta_L)} \quad (3)$$

式中, A_c 为 PV/T 组件面积, m^2 ; Q_f 为建筑全年供暖总热负荷, kWh; f 为太阳能保证率, 取 0.7; J_a 为武汉市全年太阳辐照量, 由天气文件得出为 $4.6 \times 10^6 \text{ kJ}/\text{m}^2$; η_{cd} 为 PV/T 组件的热效率, 取 0.4; η_L 为 PV/T 集热系统热损失率(含管道散热、水箱热损失等), 取 0.25。

2.2.2 水箱

蓄热水箱与供水水箱均采用分层水箱, 结构如图3所示。模型采用多节点建模方法——沿水箱高度方向将其划分为 N 个节点(假设每个节点内流体充分混合), 以此描述水箱内温度分布及能量传递过程。多节点模型的核心假设为: 工质流入水箱时, 自动汇入温度最接近且略低于其自身温度的节点。

图中参数说明: m_h 为热源与水箱间流体的质量

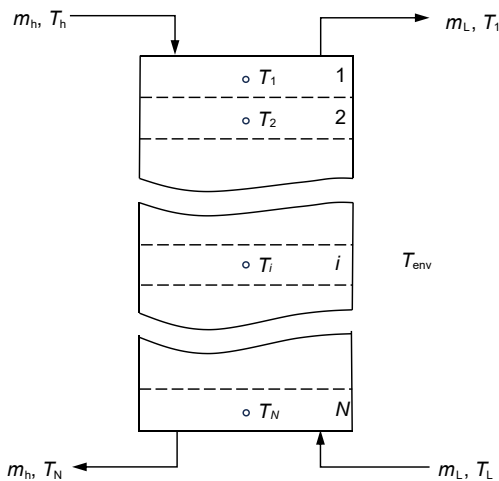


图3 分层水箱

Fig. 3 Schematic diagram of a stratified water tank

流量, kg/s; T_h 为热源侧流体流入水箱的温度, $^\circ\text{C}$; T_N 为水箱第 N 段的流体温度, $^\circ\text{C}$; m_L 为水箱与负载间流体的质量流量, kg/s; T_L 为负载侧流体流回水箱的温度, $^\circ\text{C}$; T_i 为水箱第 i 段的流体温度, $^\circ\text{C}$; T_{env} 为水箱周围环境温度, $^\circ\text{C}$ 。

为实现多节点模型对热源侧和负载侧的精准控制, 需分别定义两侧的控制函数。为保证函数的通用性, 假设存在一个远高于 T_h 的温度 T_0 , 当系统运行时, 所有节点中有且仅有一个节点的控制函数非零, 具体定义如下:

热源侧控制函数为:

$$F_i^{col} = \begin{cases} 1, & \text{若 } i = 1 \text{ 且 } T_h > T_1 \\ 1, & \text{若 } T_{i-1} \geq T_h > T_i \\ 0, & \text{若 } i = 0 \text{ 或 } i = N + 1 \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (4)$$

负载侧控制函数为:

$$F_i^{load} = \begin{cases} 1, & \text{若 } i = 1 \text{ 且 } T_L > T_N \\ 1, & \text{若 } T_{i-1} \geq T_L > T_i \\ 0, & \text{若 } i = 0 \text{ 或 } i = N + 1 \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (5)$$

定义 m_i 为在 m_h 和 m_L 共同作用下节点 i 与 $i-1$ 之间的净流量, 则 m_i 的计算公式为:

$$m_i = \begin{cases} 0, & \text{若 } i = 1 \\ m_h \sum_{j=1}^{i-1} F_j^{col} - m_L \sum_{j=i}^N F_j^{load}, & \text{若 } 1 < i \leq N \\ 0, & \text{若 } i = N + 1 \end{cases} \quad (6)$$

节点 i 的动态温度由能量平衡方程描述, 考虑热源侧与负载侧的换热及向环境的散热, 公式为:

$$m_i \frac{dT_i}{dt} = \left(\frac{UA_i}{c_p} \right)_i (T_{env} - T_i) + F_j^{col} m_{col} (T_h - T_i) + F_j^{load} m_{load} (T_L - T_i) + \begin{cases} m_i (T_{i-1} - T_i), & \text{若 } m_i > 0 \\ m_i (T_{i+1} - T_i), & \text{若 } m_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, T_i 为水箱第 i 段的流体温度, $^\circ\text{C}$; U 为水箱的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; A_i 为水箱第 i 段的表面积, m^2 。

从系统整体角度, 水箱的能量变化由总输入热量、总输出热量及总热损失决定, 公式为:

$$Mc_p \frac{d\bar{T}}{dt} = Q_{in} - Q_{out} - Q_{env} \quad (8)$$

其中, 总输入热量 Q_{in} 由热源侧流体换热决定:

$$Q_{in} = m_h c_p (T_h - T_N) \quad (9)$$

总输出热量 Q_{out} 由负载侧流体换热决定:

$$Q_{out} = m_L c_p (T_1 - T_L) \quad (10)$$

果与前人的同类实验及模拟结果进行对比, 主要参数设置参考文献[14]。需说明的是, 对比模型同样采用双水箱-水源热泵辅助结构, 且验证工况统一为冬季典型晴天。验证结果如图5所示, 蓄热水箱和供热水箱的温度变化趋势基本一致, 平均相对误差分别为11.25%和7.87%。综合温度变化趋势的一致性与相对误差水平, 可表明本研究搭建的模型是有效且可行的。

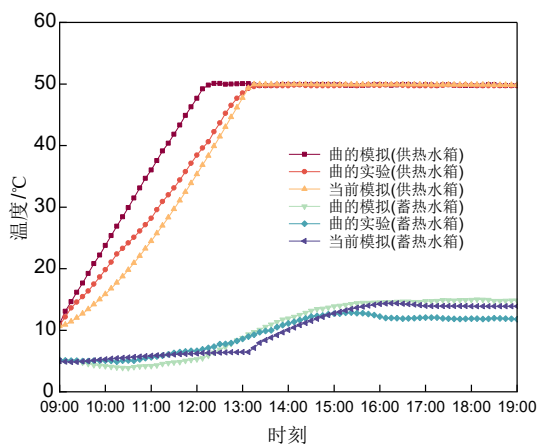


图5 模型验证

Fig. 5 Model validation

3 运行结果分析

3.1 储热特性

系统储热特性可由蓄热水箱水温变化表征, 图6展示了3种方案中蓄热水箱的全年水温变化。在非采暖季, 3种方案的温度变化趋势一致, 均从20°C逐步上升, 在10月17日达到全年峰值92.8°C, 随后受环境温度降低与水箱散热的双重影响缓慢下降。在供暖季初期, 水箱出口水温高于45°C, 因此3种方案运行模式一致。在供暖中后期, 当水箱出口水温低于45°C时, 运行结果呈现显著分化: 方案A中, 因冬季太阳辐射低, PV/T转化的热能无法弥补供热消耗及散热损失, 水箱水温持续降低, 至次年3月1日降至最低值31.2°C, 后续随气温升高与供暖负荷减小而逐渐回升; 方案B中, 当水温低于45°C时, 启动电锅炉直接加热, 最低水温为42°C; 方案C中, 在水温低于45°C后, 启动水源热泵, 以蓄热水箱中的水作为低温热源来加热供热水箱中的水, 该能量转移过程导致蓄热水箱中的水温以更快的速度下降, 于次年2月17日降至最低值30.3°C。

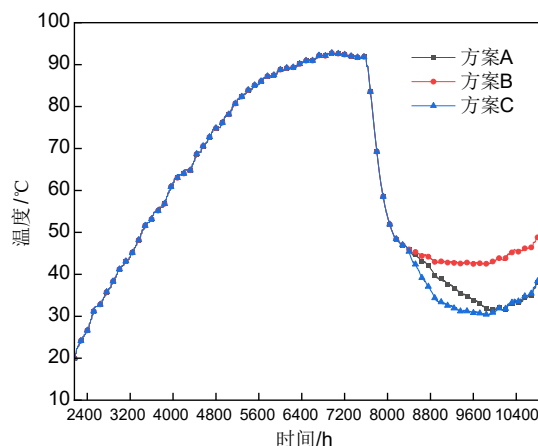


图6 蓄热水箱平均水温

Fig. 6 Average water temperature in thermal storage tank

以方案C为例探究蓄热水箱的动态能量特性, 其全年运行周期内的能量变化结果如图7所示。水箱的有效得热量直接体现为其内能变化, 当水箱中的平均水温上升时为正, 下降时为负, 这与图6所示的水温变化曲线一致。根据式(11)可知, 水箱热损失取决于水箱平均温度与环境温度的差值, 10月份热损失达最大值是因为经过夏季蓄热, 水箱水温处于高位, 而秋季环境温度显著降低, 使温差达到极值。集热系统全年运行, 充热量始终为正, 但当水温上升至80°C后, 热饱和效应导致集热效率显著下降, 充热量减少, 表现为图6中该时段水温上升变缓。进入采暖季后, 水箱开始放热, 11~12月期间放热量达到峰值, 表现为图6所示的水温骤降。

3.2 供暖特性

图8展示了3种方案下供暖季用户侧负载端的

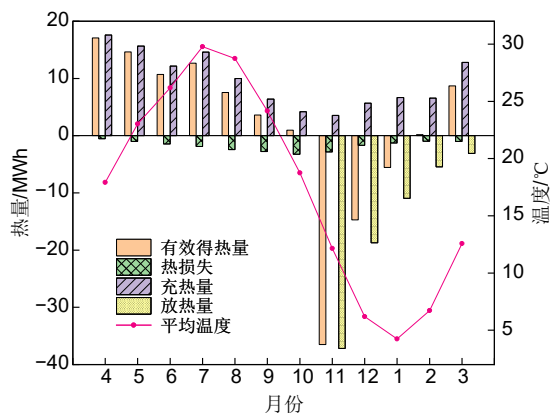


图7 蓄热水箱能量变化

Fig. 7 Energy change of hot water storage tank

进/回水温度波动特性。供暖前期,3种方案均依赖蓄热水箱中夏季存储的高温水直接供暖,因此进水温度可稳定维持在设定值48℃;供暖中期,方案A因无辅助热源,蓄热水箱内热水经持续放热后温度逐渐衰减,而冬季环境低温导致PV/T集热效率大幅下降,系统补热不足以弥补热量缺口,到供暖后期进水温度降至30℃左右,显著低于供暖要求温度,这充分体现出了增设辅助热源的必要性。而方案B、C在蓄热水箱水温低于阈值时,分别启动电锅炉直接加热和水源热泵的热泵循环补热,均能将供水温度维持在45℃附近,与设计的控制策略相符。

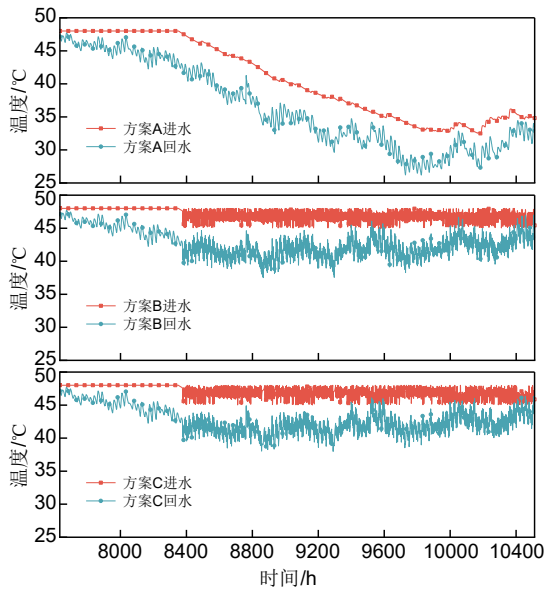


图8 供暖季进回水温度

Fig. 8 Supply/return water temperature during heating season

3.3 能耗特性

3种方案在供暖季的逐月能耗如图9所示。供暖前期,室外温度较高、建筑供暖热负荷较小,3种方案均采用蓄热水箱直接供暖,无须辅助设备运行,因此能耗相同且处于低位。供暖中期,室外温度骤降,供暖热负荷达到峰值,方案A因无辅助热源,仅依靠蓄热水箱剩余热量供暖,能耗变化幅度较小,而方案B、C需开启辅助热源以维持稳定的供水温度:方案B采用的电锅炉加热过程是电能到热能的直接转换,能效比通常 ≤ 1 ,因此需要消耗大量电能弥补热量缺口;方案C采用水源热泵并以蓄热水箱作为水源热泵的蒸发端热源,依靠热泵循环

从蓄热水箱中取热,COP一般为3~5,仅需少量电能即可实现热量“放大”供应,因此相同热负荷下方方案C的能耗显著低于方案B。供暖后期,室外温度回升,热负荷降低,辅助热源运行时长减少,系统能耗随之下降。

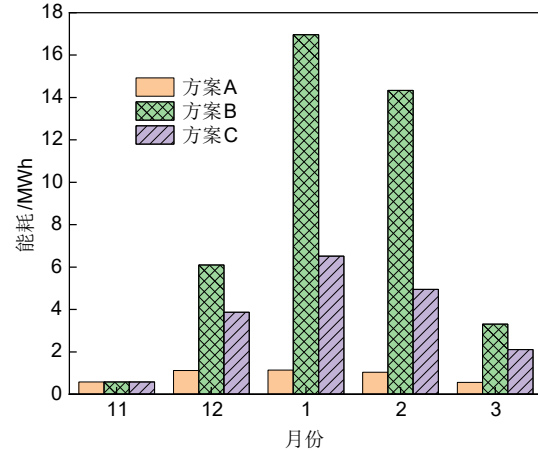


图9 能耗统计

Fig. 9 Energy consumption statistics

4 系统性能评价

为全面评估并选取更适配武汉乡镇卫生院的供暖方案,本研究从能效比、经济性和供暖稳定性3个维度对3种供暖方案开展对比分析。

4.1 能效比

能效比是衡量供暖系统能源利用效率的重要指标,本研究采用系统能效比^[15](SSER)对系统的能效性进行评价。系统能效比反映了系统在整个运行周期内供热量与总能耗的比值:

$$SSER = \frac{\int Q_s d\tau}{W_s} \quad (15)$$

式中, Q_s 为系统瞬时供热量,kW; W_s 为系统总能耗,kWh。

基于热力学第一定律,系统瞬时供热量由进回水温差及流量决定^[15]:

$$Q_s = c_p m_w (t_{in} - t_{out}) / 3600 \quad (16)$$

式中, m_w 为供暖进水的质量流量,kg/h; t_{in} 为供热进水温度,℃; t_{out} 为供暖回水温度,℃。

系统总能耗由多个部分组成,包括所有循环水泵的能耗 W_p 、电锅炉能耗 W_b 以及水源热泵能耗 W_{hp} ,具体表达式为^[15]:

$$W_s = W_p + W_b + W_{hp} \quad (17)$$

4.2 经济性指标

对于乡镇卫生院，在满足基本供暖需求的同时，还需充分考虑供暖系统在整个生命周期内的投资与运行成本。全生命周期成本^[16](LCC)指目标系统在整个使用寿命期间所产生的所有与之相关的成本：

$$LCC = \left[\frac{i(1+i)^m}{(1+i)^m - 1} \times C_i + C_o \right] \times m \quad (18)$$

式中， i 为年利率，取4%； m 为系统寿命期限，取15年； C_i 为系统的初始投资成本，元； C_o 为系统的运行成本，元。

其中，初始投资成本 C_i 由多个部分构成，具体表达式为：

$$C_i = p_c A_c + p_s V_s + p_D V_D + p_{aux} Q_{aux} + C_z \quad (19)$$

式中， p_c 为PV/T组件的成本，800元/m²； A_c 为PV/T组件面积，m²； p_s 为蓄热水箱成本，900元/m³； V_s 为蓄热水箱体积，m³； p_D 为供热水箱成本，800元/m³； V_D 为供热水箱体积，m³； p_{aux} 为辅助加热设备成本，水源热泵按额定制热量2000元/kW，电锅炉按额定制热量500元/kW； Q_{aux} 为辅助加热设备额定制热量，kW； C_z 为管路、水泵等成本，取10000元；以上成本均包含安装费。

系统运行成本的计算则考虑了系统的总能耗与PV/T组件中光伏电池的总发电量，表达式为：

$$C_o = q_e (W_s - E_g) \quad (20)$$

式中， q_e 为武汉市电价，0.838元/kWh； E_g 为PV/T组件中光伏电池总发电量，kWh。当系统能耗小于发电量时，运行成本取0。

通过计算与分析全生命周期成本，可全面评估系统在经济层面的可行性与合理性。

4.3 供暖稳定性指标

供暖稳定性是衡量系统性能的关键指标之一，直接影响室内环境的舒适度。本研究选取实际供暖进水温度与要求供暖温度48℃的均方根误差(RMSE)来评估系统供暖稳定性：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - 48)^2}{n}} \quad (21)$$

式中， t_i 为第*i*个时刻的实际供暖进水温度，℃； n 为测量的总时刻数。

RMSE越小，表明系统的供暖进水温度越接近要求，供暖稳定性越好。通过对该指标的计算和分

析，可以准确评估系统在供暖过程中的稳定性和可靠性。

4.4 结果对比

根据仿真结果，对3种供暖方案展开全面评价，对比如图10所示。

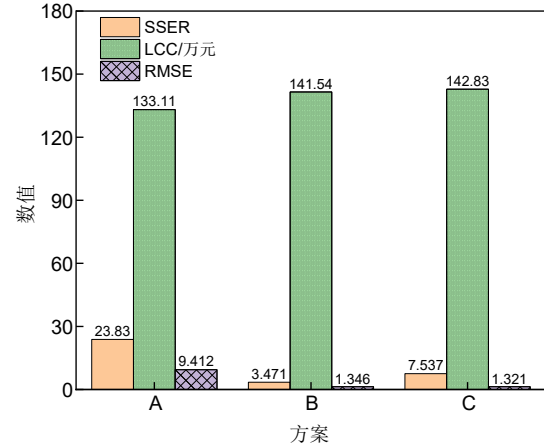


图10 3种系统对比

Fig. 10 Performance comparison of three systems

从能效看，方案A的系统季节能效比为23.83，远高于其他方案，该优势源于方案A的系统能耗较低。但其供暖进水温度的均方根误差为9.412，供暖稳定性差。若通过扩大PV/T组件面积和蓄热水箱的体积(各需增加约50%)，使其RMSE降至与方案B(1.346)、C(1.321)的相近水平，不仅会增加系统占地面积，还会导致系统投资和维护成本提高到200万元以上，因此该方案工程可行性较低，应排除。

对比方案B、C：能效方面，方案C的季节能效比为方案B的2.2倍；稳定性上，其供暖进水温度的均方根误差降低了2%，稳定性更优；经济性上，虽方案B的全生命周期成本略低，但该方案中光伏发电无法完全覆盖系统能耗，需依赖市电，增加工程复杂度，而方案C仍有2万度电结余，可出售给市电以回收部分成本。因此，方案C具有更为明显的优势。

综合以上分析，PV/T耦合水源热泵的跨季节水体储热供热系统兼顾了能效、经济性和工程可行性，是最具有实际应用价值的方案。

5 参数优化

基于前述分析，方案C在初始参数下已展现出良好的供暖性能；为进一步提升系统能效并改善经

济性，还需构建多目标优化模型对关键参数进行协同优化。

5.1 优化目标及变量

针对乡镇卫生院的预算约束与能效需求，建立全生命周期成本与系统能效比双目标优化模型。由于全生命周期成本和系统能效比这 2 个评价指标量纲不同，且数值差异大，为便于统一分析和优化处理，需将二者转化为取值范围在 0~1 之间的无量纲数值。同时，为确保优化方向的一致性，对系统能效比数据进行取负处理。同时，太阳能跨季节储热供热系统的核心目标是满足建筑供暖需求，需通过约束条件保障供暖的充足性与稳定性，因此目标函数中引入惩罚因子 P 。当系统供暖季实际供热量总和 Q_a 低于建筑供暖季设计热负荷，或实际供暖进水温度与设定温度的均方根误差 RMSE 超过 2(参考工程经验，取值不高于设计温度的 5%)时，惩罚因子会向目标函数反馈惩罚信号，使目标函数增大。这一设计既能确保优化过程中系统供暖的稳定性，也能使核心设备的参数维持在合理区间内。最终，该优化过程的目标函数可表示为：

$$f(x) = \alpha \times \frac{LCC - \min(LCC)}{\max(LCC) - \min(LCC)} + \beta \times \frac{-SSER - \min(-SSER)}{\max(-SSER) - \min(-SSER)} + P \quad (22)$$

式中， α 和 β 分别为 LCC 和 SSER 在目标函数中所占权重。考虑到乡镇卫生院作为基层医疗建筑，同时面临预算有限的成本控制需求与长期运行的能效提升需求，二者无明显优先级偏向，采用等权重分配可实现双目标的均衡优化。因此，本研究中 α 和 β 均取 0.5。在实际应用中，可根据具体场景的需求倾向对权重进行灵活调整。惩罚因子 P 通常应与目标函数的其他项处于同一量级，考虑到 LCC 和 SSER 已通过归一化处理，惩罚因子 P 可由式 (23) 进行计算。

$$P = It(Q_a, 149295) + It(2, RMSE) \quad (23)$$

其由 2 个条件判断函数 $It(A, B)$ 组成，若 $A > B$ ， $It(A, B) = 0$ ，否则， $It(A, B) = 1$ 。

本研究以 PV/T 组件面积、倾斜角、蓄热水箱容积以及水源热泵额定制热量这 4 个参数作为优化变量，各优化变量的取值范围及步长设置如表 3 所示。

5.2 优化方法及结果

以前期搭建的仿真模型为基础，使用 TRNSYS

表 3 优化变量取值范围

Table 3 Value ranges of optimization variables

优化变量	PV/T 面积 /m ²	PV/T 倾角 /(°)	蓄热水箱容积 /m ³	热泵额定制热量 /(kJ/h)
初始值	270	30	800	36
最大值	370	40	1100	60
最小值	170	10	500	25
步长	2	0.5	10	0.5

中的 TRNOPT 模块开展优化求解工作。在算法选择上，Hooke-Jeeves 算法因具备收敛速度快、精度较高且适应性强的优势，成为求解优化问题的常用方法，其核心逻辑是通过交替执行探测移动与模式移动 2 个关键步骤，动态调整各优化变量的取值并进行迭代计算，直至搜索到满足需求的最优参数组合。

优化过程如图 11 所示，迭代至第 196 次时，成功得到目标函数最小值，优化前后各个参数的对比如表 4 所示。

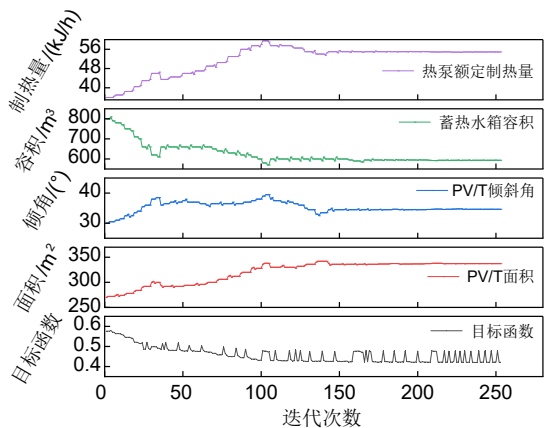


图 11 优化过程

Fig. 11 Schematic diagram of optimization process

表 4 优化前后的参数变量

Table 4 Parameter values before and after optimization

优化变量	PV/T 面积 /m ²	PV/T 倾角 /(°)	蓄热水箱容积 /m ³	热泵额定制热量 /(kJ/h)
初始值	270	30	800	36
优化值	337.25	34.625	593.75	54.875

将优化后的参数输入原 TRNSYS 模型开展模拟，获取对应参数设置下的系统性能，优化前后对比如图 12 所示：生命周期成本降至 130.13 万元，相较于初始值降低了 8.89%；系统能效提升至

7.883，较初始值提升了4.59%。由此可见，优化效果显著，契合乡镇医疗机构兼顾供暖系统成本与性能的需求。

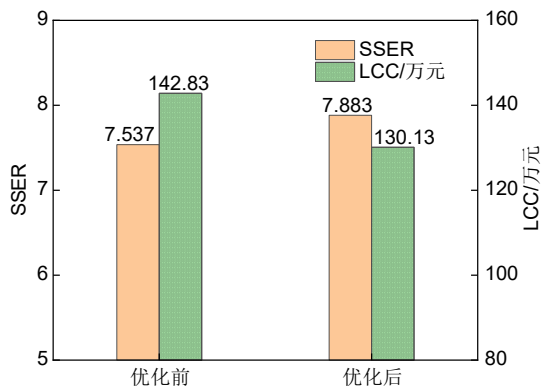


图 12 优化前后对比
Fig. 12 Comparison before and after optimization

5.3 同类系统横向对比分析

为进一步确认优化效果，选取夏热冬冷地区同类研究中 Xu 等^[10]提出的水源热泵辅助太阳能跨季节储热供暖系统开展对比。相较于该系统，本研究优化后的系统的核心优势体现在采用 PV/T 组件代替传统真空管式集热器，实现热电联供，光伏产电可直接驱动设备运行，不仅减少外购电消费，还能通过多余电能并网进一步抵消成本；另一方面，通过多参数协同、能效和成本双目标协同优化，显著提升系统适配性。为消除场景规模差异，基于系统能效比、单位热负荷成本以及单位热负荷能耗 3 个核心指标开展横向对比，结果如表 5 所示。由表 5 可知，相比于 Xu 等^[10]的系统，本研究优化后的系统能效比提升了 22.6%，单位热负荷成本降低了 61.8%，单位热负荷能耗降低了 18.0%，表现更优。

表 5 同类研究对比
Table 5 Comparison of similar studies

对比指标	系统能效比	单位热负荷成本 /(万元/MWh)	单位热负荷能耗 /(kWh/MWh)
Xu 等 ^[10] 系统	6.43	151.5	154.7
当前优化系统	7.883	57.9	126.9
相对变化	+22.6%	-61.8%	-18.0%

6 结 论

为克服传统跨季节水体储热供暖系统存在的输出温度调控困难及供暖中后期温度下降等问题，本研究将 PV/T 热电联产、跨季节水体储热与水源热

泵等技术集成为一种新型的低碳供热系统，并提出了多源多组件耦合的“集热-跨季节储热-升热/供热”的协同机制；进一步地，以武汉地区高热负荷医疗建筑为供暖对象，通过建立全年动态仿真模型，从能效比、经济性及供暖稳定性等多个维度对所构建系统的性能与其他跨季节储热供暖系统进行了深入对比分析，并采用引入惩罚因子的多参数协同优化策略，在保障供暖充足性以及供暖稳定性的基础上，进一步提升了系统能效并降低了综合成本。本研究获得的具体结论如下：

(1) 系统性能对比表明，单一 PV/T 的跨季节水体储热供暖系统虽能效比较高，但供暖中后期无法保持稳定的供暖温度，稳定性差；PV/T 耦合电锅炉的跨季节水体储热供暖系统虽能维持水温稳定，但其系统能效比最低仅为 3.471；PV/T 耦合水源热泵的跨季节水体储热供热系统综合性能最优，其 SSER 为 7.537，LCC 为 142.83 万元，供暖进水温度均方根误差仅为 1.321，兼顾能效、经济性与稳定性。

(2) 对 PV/T 耦合水源热泵的跨季节水体储热供热系统中的 PV/T 组件面积、倾斜角、蓄热水箱容积、热泵额定制热量 4 个关键参数采用 Hooke-Jeeves 算法优化后，系统性能显著提升：优化后系统全生命周期成本降低至 130.13 万元，降低了 8.89%，系统季节能效比提升至 7.883，提升了 4.59%，验证了多参数协同优化对系统性能的改善作用。

综上，本研究不仅从多能耦合利用与能量品位提升角度拓展了太阳能跨季节储热理论，也为夏热冬冷地区大型高热负荷建筑提供了一种可复制的零碳供暖范式，并形成了一套关于“PV/T-水源热泵-跨季节水体储热”耦合系统的低成本-高效协同优化设计方法，可为清洁供暖领域提供重要的技术参考。

符 号 说 明

- A_c —— PV/T 组件面积， m^2
- A_i —— 水箱第 i 段的表面积， m^2
- C —— 光伏电池温度系数
- C_i —— 初始投资成本，元
- C_o —— 运行成本，元
- c_p —— 水的定压比热容， $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
- E_g —— 光伏电池总发电量， kWh

f ——太阳能保证率
 I_s ——武汉市非供暖季太阳辐照量, kJ/m^2
 i ——年利率
 J_a ——武汉市全年太阳辐照量, kJ/m^2
 M ——水箱内水的质量, kg
 m ——寿命年限
 $\dot{m}$ ——流经 PV/T 组件的冷却流体(水)的质量, kg
 m_h ——热源与水箱间流体的质量流量, kg/s
 m_L ——水箱与负载间流体的质量流量, kg/s
 m_w ——水的质量流量, kg/h
 P_b ——电锅炉的额定功率, kW
 P_{hp} ——热泵的额定功率, kW
 p_{aux} ——辅助加热设备成本, 元/ kW
 p_c ——PV/T 组件成本, 元/ m^2
 p_D ——供水水箱成本, 元/ m^3
 p_S ——蓄热水箱成本, 元/ m^3
 Q_a ——供暖季实际供热量总和, kWh
 Q_{aux} ——辅助加热设备额定制热量, kW
 Q_j ——建筑全年供暖总热负荷, kWh
 Q_S ——系统瞬时供热量, kW
 Q_u ——PV/T 有效集热量, kJ
 q_e ——电价, 元/ kWh
 $\bar{T}$ ——水箱内水的平均温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_{cell} ——光伏电池实际工作温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_{env} ——水箱周围环境温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_h ——热源侧流体流入水箱的温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_i ——水箱第 i 段的流体温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_{in} ——冷却流体流入 PV/T 组件的温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_L ——负载侧流体流回水箱的温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_N ——水箱第 N 段的流体温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_{out} ——冷却流体流出 PV/T 组件的温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_{ref} ——光伏电池性能测试的参考温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_i ——第 i 个时刻的实际供暖进水温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_{in} ——供热进水温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_{out} ——供暖回水温度, $^{\circ}\text{C}$
 U ——水箱的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
 V_D ——供水水箱体积, m^3
 V_S ——蓄热水箱体积, m^3
 W_b ——电锅炉能耗, kWh
 W_{hp} ——热泵能耗, kWh
 W_p ——水泵能耗, kWh
 W_S ——系统总能耗, kWh
 α ——全生命周期成本在优化目标函数中所占权重
 β ——系统能效比在优化目标函数中所占权重
 η_b ——电锅炉的热效率
 η_{cd} ——PV/T 组件的热效率

η_L ——PV/T 集热系统热损失率
 η_{PV} ——光伏电池在 T_{cell} 下的发电效率
 η_{ref} ——光伏电池在 T_{ref} 下的额定发电效率
 ρ ——水的密度, kg/m^3

参 考 文 献

- [1] LI W Y, YANG Z X, QIU X Z, et al. A study of capacity demands for heat pumps intermittent heating of China's residences[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 319: 118925. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118925.
- [2] WANG Z, DE DEAR R, LIN B R, et al. Rational selection of heating temperature set points for China's hot summer-cold winter climatic region[J]. Building and Environment, 2015, 93: 63-70. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.07.008.
- [3] SHI Y, YAN Z F, LI C Y, et al. Energy consumption and building layouts of public hospital buildings: A survey of 30 buildings in the cold region of China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74: 103247. DOI:10.1016/j.scs.2021.103247.
- [4] MAHON H, O'CONNOR D, FRIEDRICH D, et al. A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops[J]. Energy, 2022, 239: 122207. DOI:10.1016/j.energy.2021.122207.
- [5] CHEN Y W, QUAN M C, WANG D J, et al. Optimization and comparison of multiple solar energy systems for public sanitation service buildings in Tibet[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 267: 115847. DOI:10.1016/j.enconman.2022.115847.
- [6] LU S X, LI Y K, ZHANG J L, et al. Matching analysis between the heating/cooling capacity of PVT heat pumps and the heating/cooling demand of residential buildings across various regions in China[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 98: 111135. DOI: 10.1016/j.jobee.2024.111135.
- [7] AGUILAR F, CRESPI-LLORENS D, QUILES P V. Environmental benefits and economic feasibility of a photovoltaic assisted heat pump water heater[J]. Solar Energy, 2019, 193: 20-30. DOI: 10.1016/j.solener.2019.09.032.
- [8] FU H L, LI J X, WANG X Y, et al. Performance analysis of water source heat pump air-conditioning system for Haihe River as heat source[J]. International Journal of Refrigeration, 2025, 171: 38-50. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2024.12.020.
- [9] HAN C, KIM J, CHO W, et al. Annual performance analysis of solar-assisted raw-water source heat pumps at low water temperatures[J]. Energy, 2024, 291: 130386. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130386.
- [10] XU B, ZHANG T T, WANG S M, et al. Dynamic characteristics and energy efficiency evaluation of a novel solar seasonal thermal storage-heating system[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 234: 121223. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.121223.
- [11] DONG B, HE M F, HUANG B, et al. Impact analysis of different auxiliary heat sources on the dynamic performance of a solar seasonal heat storage and heating system[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 276: 126966. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126966.

- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能与可再生能源利用通用规范: GB 55015—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General code for energy efficiency and renewable energy application in buildings: GB 55015—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 热泵和冷水机组能效限定值及能效等级: GB 19577—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Minimum allowable values of the energy efficiency and energy efficiency grades for heat pumps and water chillers: GB 19577—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [14] 曲明璐, 闫楠楠, 王海洋, 等. 光伏光热-热泵系统供热水箱与蓄热水箱匹配研究[J]. 上海理工大学学报, 2022, 44(4): 381-387. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20211101004.
- QU M L, YAN N N, WANG H Y, et al. Matching of heating water tank and thermal storage tank in photovoltaic thermal-heat pump system [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2022, 44(4): 381-387. DOI:10.13255/j.cnki.jusst.2021 1101004.
- [15] LI J P, SUN X H, ZHU J J, et al. Performance comparison of air source heat pump coupling with solar evacuated tube water heater and that with micro heat pipe PV/T[J]. Energy, 2024, 300: 131600. DOI:10.1016/j.energy.2024.131600.
- [16] 闫秀英, 夏宇. 太阳能-空气源热泵热水系统新型组合优化设计[J]. 分布式能源, 2024, 9(4): 33-42. DOI:10.16513/j.2096-2185.DE.2409404.
- YAN X Y, XIA Y. New combination optimization design of solar-air source heat pump hot water system[J]. Distributed Energy, 2024, 9(4): 33-42. DOI:10.16513/j.2096-2185.DE.2409404.