

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-10

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260716001

太阳能光热与天空辐射冷却辅助热泵的制热性能研究

杨雨涵¹ 高健¹ 曹静宇^{1,2,5} 赵密升³ 钟惠安³ 田真⁴ 彭晋卿^{1,5}

(1 湖南大学土木工程学院 长沙 410082; 2 湖南大学大湾区创新研究院 广州 511300; 3 广东纽恩泰新能源科技股份有限公司 广州 511300; 4 湖南大学建筑与规划学院 长沙 410082; 5 建筑安全与节能教育部重点实验室 长沙 410082)

摘要 为提升太阳能设备的利用率并提高热泵运行能效,本文提出一种太阳能光热与天空辐射冷却辅助的热泵系统(PT/RC-HP),构建了太阳能光热与天空辐射制冷的数学模型,并通过 TRNSYS-MATLAB 对该系统进行联合仿真用于其制热性能表征。系统性研究了 PT-RC 面积和蓄热水箱容积对系统制热性能的影响,并采用江苏常州典型气象年数据评价系统的制热季长期运行性能。仿真结果显示:PT-RC 面积为 30 m² 组合 2 m³ 的蓄热水箱容积为系统合理配置,在该配置下制热季长期运行时,系统累计集热量 3 256.89 kW·h,热泵平均 COP 为 3.43,相比传统空气源热泵,热泵 COP 提升了 9.6%,节约能耗 160.45 kW·h。该系统能够有效改善制热季热泵运行工况,具有一定节能潜力,可为清洁能源的应用提供技术路线。

关键词 多源热泵;太阳能光热;辐射冷却;制热性能

中图分类号: TU833;TK515

文献标识码: A

Investigation of Heating Performance of a Photothermal and Sky Radiative Cooling-Assisted Heat Pump System

Yang Yuhan¹ Gao Jian¹ Cao Jingyu^{1,2,5} Zhao Misheng³ Zhong Huian³
Tian Zhen⁴ Peng Jinjing^{1,5}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Greater Bay Area Institute for Innovation, Hunan University, Guangzhou 511300, China; 3. Guangdong New Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 511300, China; 4. School of Architecture and Planning, Hunan University, Changsha 410082, China; 5. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract We creatively proposed a heat pump system (PT/RC-HP) supported by photothermal and radiative cooling to increase the utilization rate of solar equipment and improve the energy efficiency of heat pumps. Using TRNSYS-MATLAB, we jointly simulated the system to assess its heating performance and created mathematical models of photothermal and radiative cooling. The effects of PT-RC area and thermal storage tank volume on system heating performance were systematically investigated, and typical meteorological year data for Changzhou, Jiangsu Province, China, were used to evaluate its long-term heating-season performance. The simulation results indicate that the optimal system configuration comprises a photothermal and radiative cooling collector with an area of 30 m² coupled with a 2 m³ thermal storage tank. Under this configuration, the system cumulatively collected 3 256.89 kW·h of heat, achieving an average COP of 3.43 for the heat pump. This represents a 10% COP improvement relative to that of conventional air-source heat pumps, corresponding to an energy saving of 160.45 kW·h. The proposed system effectively improves the operational conditions of heat pumps during the heating season, demonstrating both significant energy-saving potential and robust operational stability. Thus, it offers a promising technical pathway for the integration and application of clean energy in building heating systems.

收稿日期:2026-07-16;修回日期:2026-08-13;录用日期:2026-09-22 责任编辑:田甜

基金项目:国家重点研发计划(2023YFE0106700)和国家自然科学基金(52578124)资助项目。(The project was supported by the National Key R&D Program of China (No. 2023YFE0106700) and the National Natural Science Foundation of China (No. 52578124).)



移动阅读

Keywords multi-source coupled heat pump; photothermal; radiative cooling; heating performance

能源危机已成为当今世界面临的共同挑战,建筑领域作为能源消费和碳排放的主力之一,其绿色低碳转型刻不容缓^[1]。中国建筑行业的运行能耗占全国总能源消耗的21.9%,其中,暖通空调系统能耗约占建筑总能耗的30%~40%^[2-3]。现阶段暖通空调系统虽已开始聚焦可再生能源的挖掘,但单一可再生能源作为冷热源均存在难以克服的局限:太阳能具有间歇性和不稳定性;地热能的开发受地质条件限制;空气源热泵易出现冬季结霜问题等^[4-6]。在该背景下,通过多源耦合突破单一冷热源的局限,成为减少建筑能耗和碳排放的关键^[7]。

在多源耦合技术路线中,太阳能与热泵集成是目前研究最广泛、应用最成熟的方案之一^[8-9]。F. Aguilar等^[10]提出热泵同时由电网和光伏板供电,相比传统锅炉CO₂排放减少82%。Jiang Jiatong等^[11]针对工业园区供暖需求,构建了4种太阳能辅助的电气工业供暖,结果表明,太阳能辅助热泵相比燃气锅炉CO₂减排最高达80%。Zhang Xuedan等^[12]进一步将相变储能引入太阳能辅助热泵系统,并在以单元系统COP(性能系数,coefficient of performance)成本为优化目标时,系统平均COP提高48.5%。上述研究表明,太阳能辅助热泵在改善热泵运行条件和降低能源消耗方面具有显著优势,但太阳辐射具有间歇性,太阳能设备在夜间长时间闲置,其综合利用率仍有进一步提升的空间。

为提高太阳能设备的利用率,近年来兴起的辐射制冷(radiative cooling, RC)技术提供了新思路。辐射制冷与太阳能具有天然的时间互补性,可利用同一组件实现日间太阳能集热和夜间天空辐射冷却^[13-14]。Xu Feiyang等^[15]开发了一种与建筑屋顶集成的PT-RC(光热-辐射制冷,photothermal and radiative cooling)系统,能够有效满足建筑的供暖制冷需求并显著改善室内空气质量。Lu Kegui等^[16]提出了一种整合光热和辐射冷却的自适应策略,达到0.56的太阳波段吸收率和0.82的中红外发射率,对应辐射加热和制冷模式。Guo Jiangfeng等^[17]开发了一种太阳能供暖与辐射冷却的双功能系统,集成热储存、加热空气、冷储存和冷却空气4种功能,展现出巨大的应用潜力。上述研究表明,辐射制冷与太阳能系统的整合能够有效克服太阳能设备的间歇性,但已有研究主要关注PT-RC系统,其与多源热泵及储能装置的协同运行仍有待进一步研究。

针对上述问题,本文提出一种太阳能光热与天

空辐射冷却辅助的热泵(photothermal and sky radiative cooling assisted heat pump, PT/RC-HP)系统。与传统太阳能辅助热泵相比,该系统采用具有光热集热和辐射冷却功能的PT-RC模块,并集成蓄热水箱、蓄冷水箱、热泵和空气备用热源;与独立PT-RC双功能系统相比,该系统进一步实现了PT-RC模块、储能装置和热泵之间的协同运行。此外,目前的研究尚未揭示PT-RC系统设计参数对制热性能的影响规律,所以本文主要研究制热工况下系统的参数优化与特性^[18]。采用MATLAB建立PT-RC分布参数模型,并通过TRNSYS调用该模型进行动态联合仿真,分析PT-RC面积和蓄热水箱容积对系统制热性能的影响,并评价系统在主要制热季的长期运行性能。结果显示,新型热泵系统表现出一定节能潜力,为暖通空调系统的深度脱碳提供了一种新思路。

1 系统描述

1.1 PT/RC-HP 系统描述

本文提出的PT/RC-HP系统结构如图1所示,主要包括PT-RC模块、蓄热水箱、蓄冷水箱、空气-水换热器和热泵单元。PT-RC模块具有太阳能集热与天空辐射冷却2种功能,本文主要研究该系统的制热工况,所以主要介绍该系统的制热部分,RC功能不产生直接的制热贡献,其意义主要在于同一PT-RC组件在制冷季的功能复用。制热模式下,PT-RC与蓄热水箱构成太阳能集热回路。太阳辐射充足时,PT-RC组件吸收太阳辐射,并通过循环水将获得的热量储存于蓄热水箱。热泵根据水箱热源与空气热源的切换条件,选择蓄热水箱或经空气-水换热器获取的环境空气热量作为热源,向建筑负荷侧供热。

1.2 PT-RC 数学描述

PT-RC模块作为系统的核心模块,包括太阳辐射吸收、长波辐射制冷、多介质对流传热、固体导热等多物理场耦合的复杂热力过程,直接决定了系统集热与制冷的仿真性能。本研究采用分布参数法对耦合模块进行精细化数学建模,将模块拆解为3个核心部分:透明盖板、集热/制冷复合板、铜管及内部换热工质。其中,单块PT-RC模块尺寸为2 m×1 m,倾角为32°,由5 mm透明盖板、40 mm空气层、0.4 mm铝制基板、9根外径/内径为9 mm/7 mm的并联铜管及38 mm保温层组成。盖板透过率、反射率和发射率分别为0.92、0.03和0.10,复合板太阳吸收率和长波发射率分别为0.92和0.80。组件上表面考虑环境对流

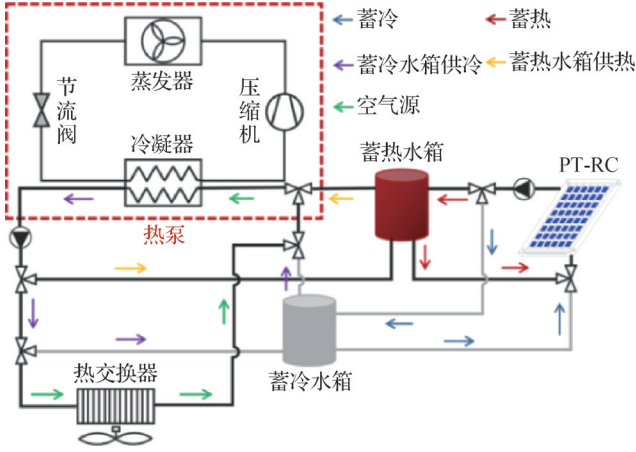


图1 PT/RC-HP系统

Fig.1 PT/RC-HP system

和天空辐射,背部考虑保温层传热,四周按绝热边界处理,相关传热系数按式(2)~式(4)计算。天空光谱辐射参照 Hu Mingke 等^[19]的方法,根据露点温度确定大气可降水量并进行分波段积分。复合板采用 19×20 二维离散,9 根流道按等流量处理;当各温度最大偏差小于 10⁻³ K 时认为收敛。各部分的计算过程如下:

1)透明盖板。

透明盖板能量平衡方程:

$$h_{ac}(T_a - T_c) + h_{sc}(T_s - T_c) + h_{pc}(T_p - T_c) + \alpha_c G = 0 \quad (1)$$

与环境的对流传热系数:

$$h_{ac} = 2.8 + 3.0u_a \quad (2)$$

与天空的辐射传热系数:

$$h_{sc} = \varepsilon_c \sigma (T_s^2 + T_c^2)(T_s + T_c) \quad (3)$$

与复合板的总传热系数:

$$h_{pc} = h_{pc,rad} + h_{pc,conv} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} + \frac{Nu \cdot k_a}{d_{pc}} \quad (4)$$

2)复合板。

二维稳态导热方程:

$$k_p d_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + k_p d_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} + h_{pc,conv}(T_c - T_p) + u_{ap}(T_a - T_p) + (\tau\alpha)_p G - Q_{pt} - Q_{rad,net} = 0 \quad (5)$$

与天空辐射换热的净辐射换热量为:

$$Q_{rad,net} = \varphi(Q_{rad,p} - Q_{rad,s}) \quad (6)$$

自身向外辐射的热量为:

$$Q_{rad,p} = \int_0^\infty \left[\frac{E_{b,\lambda}(T_p)(1 - \rho_{c,\lambda}) - \varepsilon_{c,\lambda} E_{b,\lambda}(T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_{p,\lambda}} - \frac{(1 - \varepsilon_{p,\lambda})\rho_{p,\lambda}}{\rho_{c,\lambda}}} \right] d\lambda \quad (7)$$

吸收的辐射热量:

$$Q_{rad,s} = 2 \int_0^\infty \int_0^{\pi/2} \varepsilon_{s,\lambda}(\lambda, \theta) E_{b,\lambda}(\lambda, T_a) \alpha_{p,\lambda}(\lambda, \theta) \tau_{c,\lambda}(\lambda, \theta) \sin \theta \cos \theta d\theta d\lambda \quad (8)$$

3)铜管及内部换热工质。

铜管能量平衡方程:

$$\pi \frac{D_o + D_i}{2} - \frac{D_o - D_i}{2} k_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial y^2} + \pi D_i h_{fi}(T_f - T_t) + \frac{T_p - T_t}{R_{pt} \cdot dy} = 0 \quad (9)$$

内部工质能量平衡方程:

$$\dot{m}_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial y} = A_i k_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + P_t h_{fi}(T_t - T_f) \quad (10)$$

上述 PT-RC 模块各部件数学模型,涵盖了模块从太阳辐射捕获、长波辐射释放到各部件间热量传递、工质换热的全流程热力规律,可实现对不同气象条件、运行工况下模块集热与制冷性能的精准计算。

1.3 TRNSYS-MATLAB 协同仿真模型构建

基于 TRNSYS 搭建了 PT/RC-HP 系统的模型,模型使用的主要模块包括:PT-RC 模块、储能水箱、空气-水换热器、水源热泵、水泵等,如图 2 所示。

其中,循环水泵额定流量为 1 400 kg/h,额定功率为 0.054 5 kW;蓄热水箱热损失系数为 0.6 W/(m²·K);水源热泵额定制热量为 12 kW;热源端水泵额定流量为 1 114.7 kg/h,额定功率为 0.088 5 kW;负荷侧水泵额定流量为 968.5 kg/h,额定功率为 0.094 5 kW;风机额定流量为 4 035.6 kg/h,额定功率为 0.153 6 kW,基于 MATLAB 搭建的 PT-RC 模块通过 Type155 模块在 TRNSYS 模拟过程中实时调用,实现了系统不同工况下动态运行过程的模拟。

1.4 模型验证

本文采用的 TRNSYS 热泵模型在已发表研究^[20]中得到验证,故主要对 MATLAB 中建立的 PT-RC 模型进行验证。采用 Hu Mingke 等^[21]开展的光热集热和辐射冷却组件的日间集热和夜间辐射冷却实验数据,将实验测得的气象数据、进口水温和质量流量作为模型边界条件,对 PT-RC 模型进行验证,验证指标包括日间和夜间出口水温、日间集热效率以及夜间辐射冷却功率。将模型预测结果与文献实验结果进行对比,统计结果如表 1 所示。其中,出口水温的预测结果与实验数据吻合较好,日间集热和夜间辐射

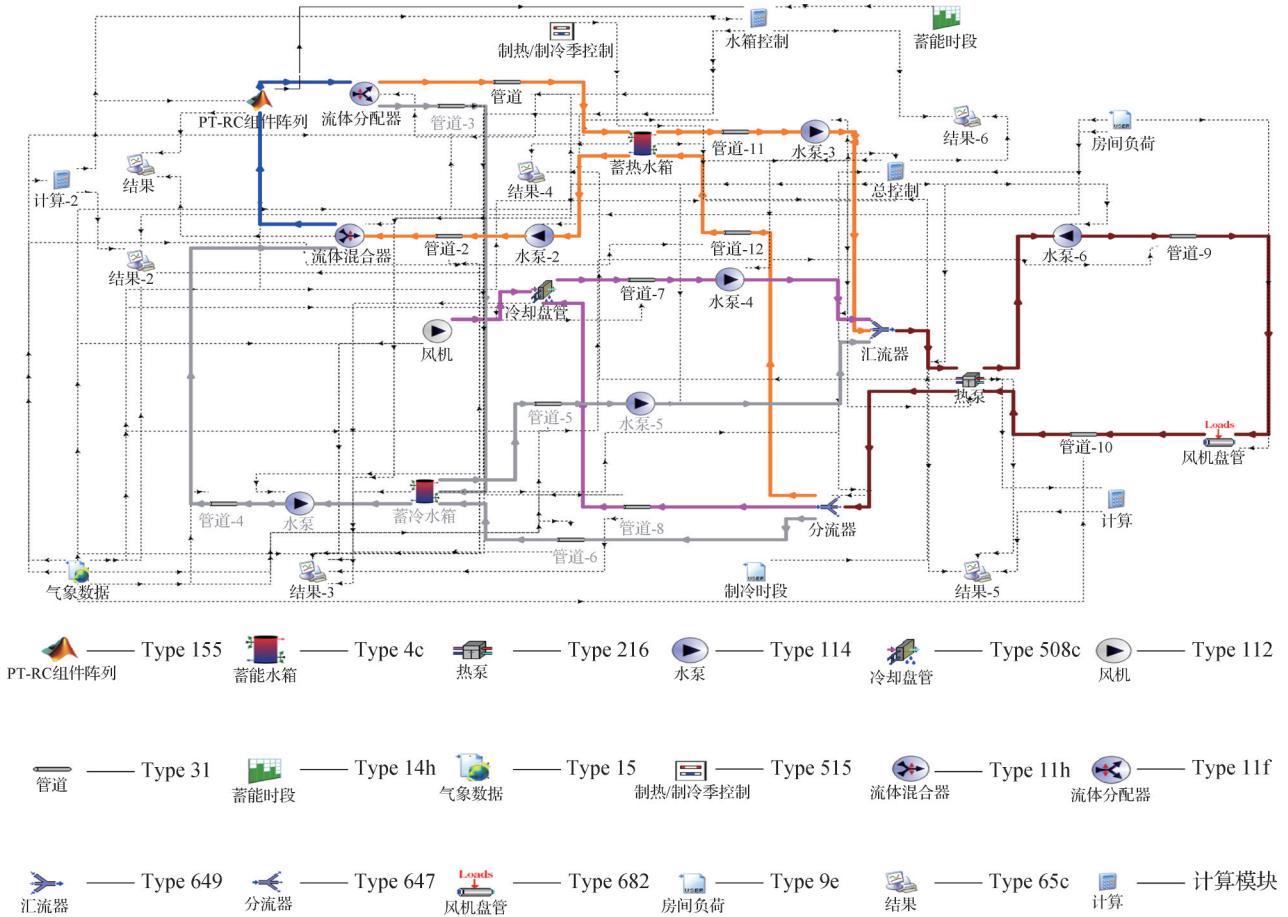


图2 PT/RC-HP系统TRNSYS仿真模型图

Fig.2 TRNSYS simulation model of the PT/RC-HP system

冷却工况下的MAPE(平均绝对百分比误差, mean absolute percentage error)分别为0.19%和0.09%, CV(RMSE)(均方根误差, root mean square error)分别为0.21%和0.13%, Willmott一致性指数d分别达到0.997和0.983。相比之下, 日间集热效率和夜间辐射冷却功率对气象条件波动和计算误差影响更为敏感, 其MAPE分别为4.17%和11.23%, CV(RMSE)分别为4.63%和13.74%, 但Willmott一致性指数d仍达到0.892和0.866。总体而言, 模型能够较准确地预测组件出口水温, 并合理表征PT-RC组件的日间集热与夜间辐射冷却性能, 可用于后续系统联合仿真。

表1 模型验证统计结果

Tab.1 Statistical results of model validation

运行模式	指标	MAPE/%	CV(RMSE)/%	一致性指数d
日间制热	出口温度/K	0.19	0.21	0.997
	热效率/%	4.17	4.63	0.892
夜间制冷	出口温度/K	0.09	0.13	0.983
	制冷功率/(W/m ²)	11.23	13.74	0.866

1.5 系统研究方法

为研究制热工况下PT/RC-HP系统的特性, 本文为系统制热工况设定了以下3种运行模式:

1) 蓄热模式。当 $Q>0$ 时, PT-RC与蓄热水箱之间的循环泵启动, 集热循环系统开始工作; 当 $Q<0$ 时, 循环泵关闭, 防止RC冷却蓄热水箱。

2) 水箱供热模式。当建筑负荷 <0 且 $T_{hlo}>T_a-0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开启蓄热水箱与热泵之间的循环水泵, 将蓄热水箱中的热水作为热泵热源进行供热。当 $T_{hlo}\leq T_a-0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时结束。在本文热泵模型的标准制热工况下, 保持负荷侧条件相同, 分别模拟采用蓄热水箱热源和空气热源时的热泵性能。当2种热源工况的热泵COP相等时, 水源与空气源温差为 $-0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此将其作为本文模型的热源切换基准, 以该温度作为控制指标, 相比其他控制变量更为简单直观。为避免温度在切换基准附近波动引起热源模式及循环泵频繁启停, 以 $-0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为中心设置宽度为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的滞回死区。

3) 空气源供热模式。制热季蓄热源不足时使用室外空气为热泵提供热源。

本文选取江苏常州典型气象年 (typical meteorological year, TMY) 数据,环境温度在 12、1、2 月达到最低,因此选择 12、1、2 月为主要制热季。主要制热季环境温度、太阳辐射量和建筑动态负荷如图 3 所示。

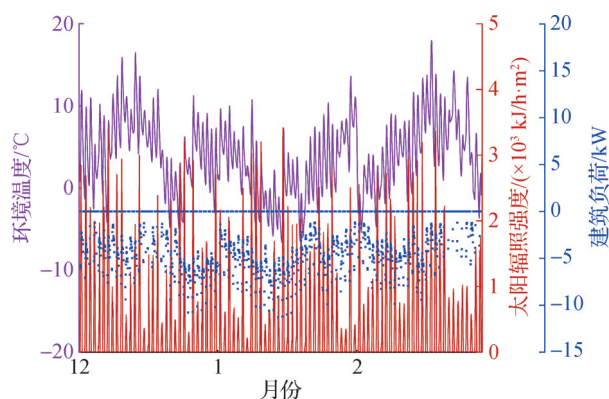


图 3 主要制热季部分气象参数与建筑负荷

Fig.3 Partial meteorological parameters and building loads during the main heating season

为在统一边界条件下对比不同 PT-RC 面积和蓄热水箱容积对系统性能的影响,本研究将常州典型气象年主要制热季的环境温度、太阳辐射强度及建筑动态热负荷按 15 min 的时间步长进行离散,并对同一时刻的 3 个月数据取算术平均值,从而得到制热季典型日气象参数和建筑负荷变化特性,如图 4 所示。上述方法获得的气象参数与建筑负荷能够较为真实地反映制热季的平均运行工况,降低单日气象波动对仿真结果的影响。蓄热水箱初始温度设为典型日初始环境温度 4.27 °C。图 4 所示典型日用于不同参数方案的对比,图 3 所示连续建筑热负荷用于推荐配置的制热季长期性能评价。需要指出的是,典型日仅用于分析参数的相对影响,不能表征连续阴天和跨日蓄热过程。

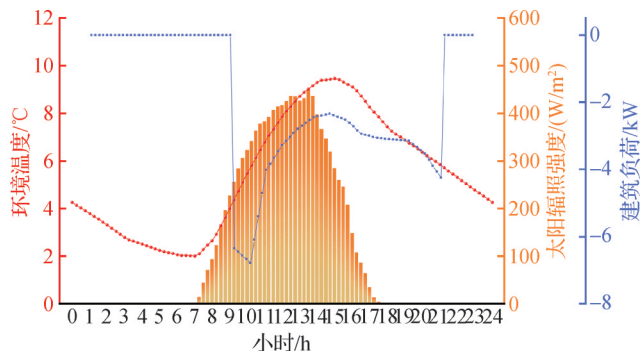


图 4 制热季典型日部分气象参数与建筑负荷

Fig.4 Partial meteorological parameters and building loads on the typical day of the main heating season

2 结果与讨论

2.1 参数分析

在制热工况下,日间太阳能光热集热效率较高,能够显著提升系统制热性能,为确定制热工况下系统合理制热性能配置,有必要分析 PT-RC 复合板面积对系统制热性能的影响。与此同时,考虑到储能容积对热负荷的缓冲与削峰作用,需对不同蓄热水箱容积开展参数对比分析,考察其对系统热量储存能力及运行稳定性的影响,并据此确定本文比较范围内的推荐配置。

2.1.1 PT-RC 面积对系统性能的影响

PT 作为太阳能光热集热的载体,其集热效率远高于 RC 冷却效率,PT-RC 面积变化直接决定了制热季热泵蒸发侧热源的温度。本文采用的单个 PT-RC 组件面积为 2 m²,实际应用中可通过多个标准组件形成模块化阵列,构成不同的 PT-RC 总面积。本文按照每档增加 5 个标准组件,即面积间隔为 10 m²,选取 PT-RC 面积为 10、20、30、40、50 m² 进行对比分析。

不同 PT-RC 面积下蓄热水箱出水温度如图 5 所示,不同 PT-RC 面积下系统集热过程呈现明显差异。蓄热水箱初始温度为典型日初始环境温度 4.27 °C,夜间虽未开启集热循环回路,但复合板仍向外辐射热量,因此水温由于热传导及环境温度的影响逐渐降低,且 PT-RC 面积越大水温降低程度越明显。日间随着太阳辐射的出现,蓄热水箱出水温度明显提高,峰值逐渐增大。50 m² 工况下最高达到 32.23 °C,其余 40、30、20、10 m²,分别达到 29.65、26.36、22.09、16.43 °C,表明扩大集热面积能够有效增强系统的太阳能获取能力。然而可以观察到,当 PT-RC 面积由 30 m² 进一步增至 40 m² 及 50 m² 时,曲线差异明显减小,说明系统对太阳能的利用已接近饱和状态,继续增加面积对温度的改善减弱。

不同 PT-RC 面积下系统性能如图 6 所示,不同 PT-RC 面积条件下,热泵 COP 与 PT-RC 单位面积制热功率呈相反的变化趋势。随着 PT-RC 面积增加, COP 逐渐升高,而单位面积制热功率逐渐降低。在 PT 运行时段内,热泵 COP 随水箱供水温度的变化呈现先升高后降低的趋势,且随 PT-RC 面积增加而整体提高。10 m² 和 20 m² 工况中,由于热源温度提升幅度较小, COP 整体水平偏低,平均 COP 为 3.34 和 3.48。30 m² 工况中, COP 整体水平较高且变化较为平缓,平均 COP 为 3.56,峰值可达 3.82,在保证较高峰值的同时具有良好的稳定性,表现出较优的综合性能。40 m² 和 50 m² 工况中,虽然 COP 最高可达 3.87

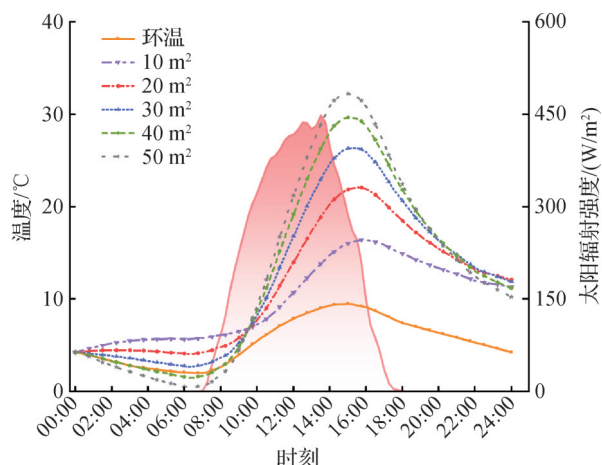


图5 不同PT-RC面积下蓄热水箱出水温度

Fig.5 Thermal storage tank outlet temperature under different PT-RC areas

和3.89,平均COP为3.60和3.62,但由于集热面积过大使系统热量供给超过实际需求,提升幅度有限。此外,PT-RC单位面积制热功率与太阳辐射强度同步变化,随面积增加而降低,主要原因在于随着PT-RC面积增大,系统总集热量虽增加,但被更大的换热面积分摊,导致单位面积瞬时制热功率降低。因此,10、20、30、40、50 m²工况下的单位面积制热功率依次降低,分别为167.24、146.51、133.92、119.72、111.38 W/m²,表现为单位面积制热功率曲线随面积增加而整体下移。

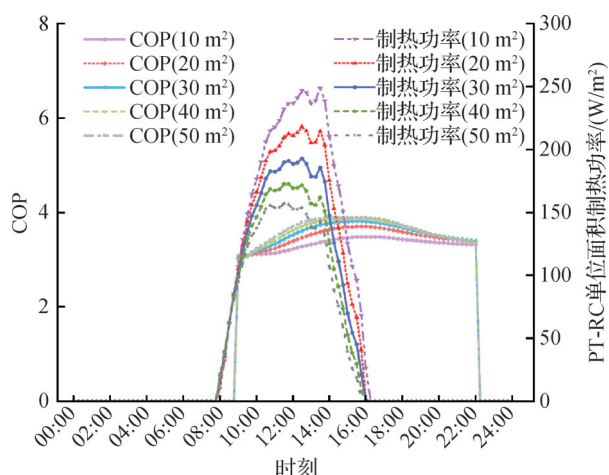


图6 不同PT-RC面积下系统性能

Fig.6 System performance under different PT-RC areas

PT-RC面积增大可提升热泵COP,但会降低单位面积制热功率。10 m²和20 m²工况存在热源温度提升不足的问题,而40 m²和50 m²工况的COP提升有限,单位面积制热功率下降较为显著。30 m²工况在热泵COP与PT-RC单位面积制热功率之间取得了较好平衡,有效规避了小面积热源不足以及大面积边

际收益减弱和资源冗余的问题,故在本文所比较的参数范围内确定30 m²为系统合理配置。

2.1.2 蓄热水箱容积对系统性能的影响

在确定PT-RC面积为30 m²的基础上,进一步分析蓄热水箱容积对系统性能的影响。保持其余运行参数不变,分别选取水箱容积为1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m³的5种工况进行对比分析。

蓄热水箱不同容积下的出水温度如图7所示。随着水箱容积的增大,水箱日间初始温度由3.64 °C逐渐升至4.26 °C,而最高温度由33.2 °C逐步降至21.99 °C,整体温度波动范围明显缩小。这是因为水箱容积增大,热容量随之增大,水箱最高温度下降,同时较大的热容量使系统在非供热阶段的蓄热能力增强,使得日间初始温度有所提高。这表明较大容积水箱具有更强的热惰性和热容量,能够有效削弱水温波动。

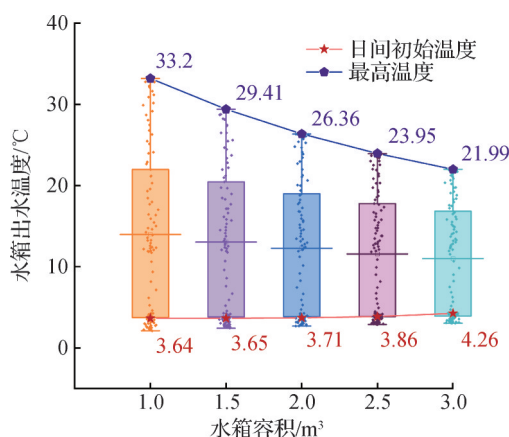


图7 蓄热水箱不同容积下的出水温度

Fig.7 Thermal storage tank outlet temperature under different tank volumes

水箱温度特性的变化会进一步影响热泵运行性能,如图8所示。从箱线图可以看出,随着水箱容积增加,热泵COP整体呈下降趋势,其平均水平逐步降低,分别为3.65、3.60、3.56、3.51、3.47。这是由于水箱容积增大导致出水温度降低,热泵COP下降。同时折线图显示PT-RC单位面积制热功率随水箱容积的增加而逐渐升高,且升高程度越来越不明显,分别为114.57、124.33、133.92、140.93、141.84 W/m²。这是因为水箱温度降低使PT集热器运行温度下降,其与环境之间的对流与辐射热损失减少,进而使PT-RC单位面积制热功率提升。

综合来看,水箱容积对系统性能具有显著耦合影响,较大水箱有利于提升PT-RC单位面积制热功率并增强系统稳定性,但会削弱系统COP;较小水箱

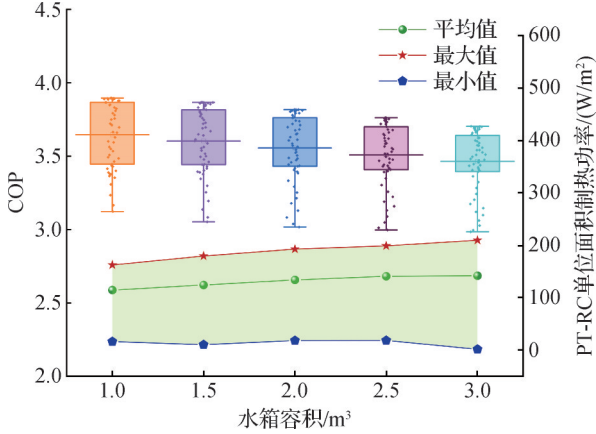


图8 蓄热水箱不同容积下系统性能

Fig.8 System performance under different tank volumes

则有利于维持较高COP,但系统抗波动能力较弱。为降低水箱容积选择的主观性,本文以热泵COP和PT-RC单位面积集热功率为等同考虑的正向评价指标,采用极差归一化方法计算比较范围内各工况与理想性能点之间的综合距离:

$$D_i = \sqrt{\left(\frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max} - C_{\min}} \right)^2 + \left(\frac{P_{\max} - P_i}{P_{\max} - P_{\min}} \right)^2} \quad (11)$$

式中: C_i 和 P_i 分别为第 i 种工况下的热泵平均COP和PT-RC平均单位面积制热功率(); $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$ 、 $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别为各评价指标在全部水箱容积工况中的最大值和最小值; D_i 为第 i 种工况与理想性能点之间的综合距离,其值越小表示工况越接近理想性能点。

1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m³工况的 D_i 分别为1.000、0.700、0.578、0.778、1.000,其中2.0 m³工况的综合距离最小。因此,在本文比较范围及2项指标等同考虑的条件下,将2.0 m³作为系统合理蓄热水箱容积。

2.2 制热季系统长期性能

现基于设定的3种运行模式以及优化好的参数进行系统主要制热季(12月至次年2月)的长期模拟,以评估其在连续运行条件下的稳定性及能效水平。模拟过程中各时间步的系统状态连续传递,不在每日开始时重置蓄热水箱温度,从而考察推荐配置在连续气象变化及跨日蓄热条件下的运行性能。制热季热泵日均COP如图9所示,制热季热泵日均COP整体在2.81~3.87区间内波动,不同月份之间差异相对较小。12、1、2月热泵日均COP分别为3.49、3.34、3.47。此外,COP高值区域通常对应连续晴天阶段,表明系统具有一定的热量累积作用,可在短时间内缓冲气象波动对热泵性能的影响。

制热季蓄热累计运行时间及PT-RC平均制热功

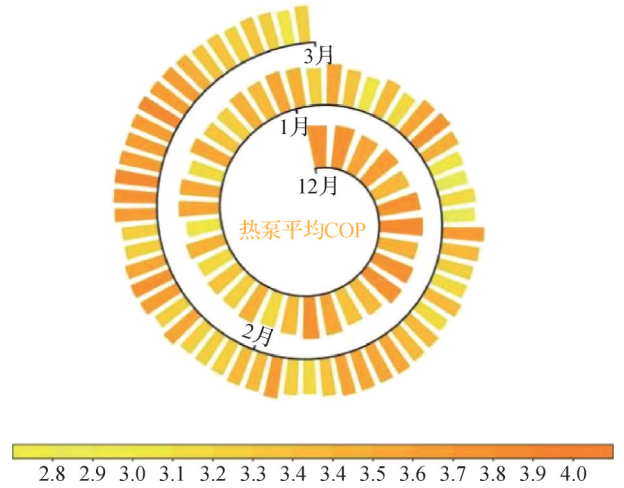


图9 制热季热泵日均COP

Fig.9 Daily average COP of heat pump during heating season

率如图10所示。PT日累计蓄热时间为0~9 h,平均为6.66 h,整体有一定的波动,能真实表征PT在复杂气象条件下的实际运行能力。PT-RC平均制热功率呈现出显著的波动特征,体现出和太阳辐射强度的高度关联性,其中,1月15日PT-RC平均制热功率最高为377.12 W/m²。在部分日期中,虽然蓄热时间较长,但制热功率仍然偏低,如12月27日蓄热时间为6.5 h,但PT-RC平均制热功率仅为64.64 W/m²,PT-RC制热量仅为12.6 kW·h,该类工况通常对应弱辐射天气,其特点是辐射持续时间长但强度不足,导致热量获取能力有限。相反,在晴天条件下,如12月26日,虽然蓄热时间相较于12月27日仅提升1 h,但由于辐射强度较高,PT-RC平均制热功率显著提升达310.1 W/m²,PT-RC制热量提升4.54倍达69.77 kW·h。

制热季PT-RC日制热量及制热量如图11所示,PT-RC日制热量在1月15日达到最高为98.99 kW·h,对应的可将1.86 t水从4.3℃加热至50℃。制热季PT-RC总制热量为3256.89 kW·h,相应可将61.09 t水从4.3℃加热至50℃。太阳能制热直接转化为可利用热水量的增加,不仅提高了能源利用效率,还使系统兼具供热与生活热水供应能力,提升系统综合利用价值。

进一步将提出的PT/RC-HP系统在主要制热季的长期运行性能与传统空气源热泵进行对比,结果如图12所示。在采用蓄热源工况下,热泵平均COP为3.43,相比空气源工况下的3.13提升约10%。同时,系统总能耗由空气源工况下的1580.59 kW·h降至1420.14 kW·h,耗电量减少160.45 kW·h,降低10.15%。此外,在低环境温度下,空气源热泵性能显著下降,而PT蓄热源可通过热量储存与调节作用,削弱环境温度波动对系统的影响,使热泵运行更加稳

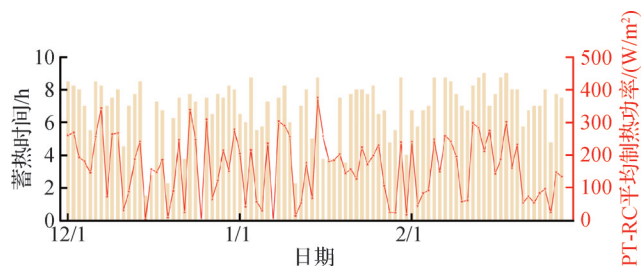


图 10 制热季蓄热累计运行时间及 PT-RC 平均制热功率
Fig.10 Cumulative operation time of thermal storage and average heating power of PT-RC during heating season

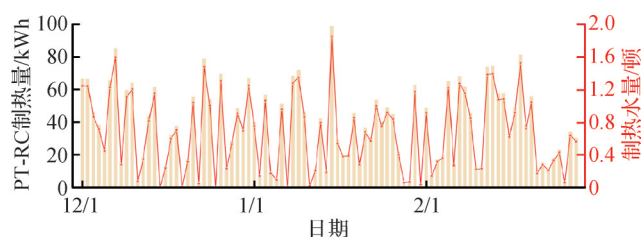


图 11 制热季 PT-RC 日制热量及制热量
Fig.11 Daily heating capacity and hot water yield of PT-RC during heating season

定。而且在连续晴天条件下,水箱温度可维持在较高水平,为热泵提供持续稳定的热源,进一步增强系统整体能效优势。综合来看,相较于传统空气源热泵系统,PT/RC-HP 系统通过 PT 蓄热与蓄热水箱调节的协同作用,在制热季能够有效改善热泵运行工况,实现 COP 提升与能耗降低的双重优化。

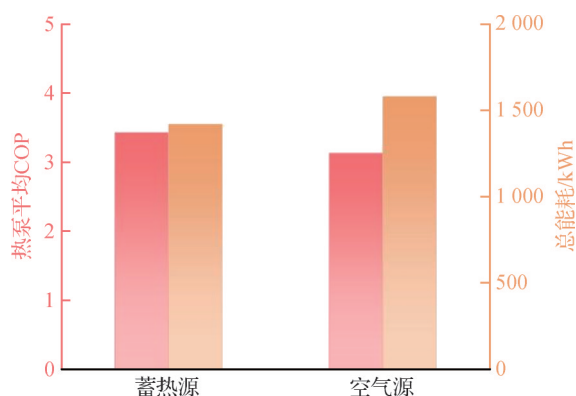


图 12 制热季系统与传统空气源热泵 COP 及能耗对比
Fig.12 Comparison of COP and total energy consumption between the proposed system and conventional Air-source Heat Pump during heating season

对 PT/RC-HP 系统进行初步经济性讨论。从增量成本角度看,与传统空气源热泵相比,本系统增加了 PT-RC 组件和蓄热水箱,初投资相应提高;但与传统太阳能辅助热泵相比,PT-RC 组件可在原有太阳能集热结构基础上增加辐射冷却功能,板体、流道和支架能够跨季节复用,无需另设独立的辐射冷却组件,

因此新增 RC 功能的边际成本相对有限。需要指出的是,本文制热季耗电量降低 160.45 kW·h 是以未考虑结霜除霜的理想化空气源热泵为对照得到的,且尚未计入 PT-RC 组件在制冷季的节能收益,仅依据该结果计算投资回收期可能低估系统的全年收益。PT/RC-HP 系统经济性的关键在于 PT-RC 组件的成本控制、已有太阳能设施的复用程度以及全年综合节能收益。

3 结论

本文提出了一种新型 PT/RC-HP 系统,通过分析 PT-RC 面积和蓄热水箱容积对系统性能的影响,确定了本文比较参数范围内的推荐配置,并评价了系统在制热季的长期运行性能,得到如下结论:

1)合理配置系统参数,能够有效提高系统能效。经典型日模拟分析,30 m²的 PT-RC 面积组合 2 m³的水箱容积为合理配置,在典型日能使热泵平均 COP 达到 3.56,PT-RC 平均单位面积制热功率达到 133.92 W/m²,在保证较高 PT-RC 单位面积制热功率和系统稳定性的同时,显著提升热泵能效,并有效避免了资源冗余。

2)整个制热季系统累计集热量为 3 256.89 kW·h,可将 61.09 t 水从 4.3 °C 加热至 50 °C。12、1、2 月热泵日均 COP 分别为 3.49、3.34、3.47,体现出系统在制热季长期运行时也具有较高的能效与稳定性,并且在一定程度上能够削弱短期环境温度波动对系统的影响。

3)在制热季的长期运行中,系统日间能够利用太阳辐射进行蓄热,有效改善运行工况。相比传统空气源热泵,系统热泵 COP 提升了 9.6%,耗电量减少 160.45 kW·h,表现出一定的性能提升与节能效果。

本文开展了 PT-RC 辅助热泵系统制热季运行特性研究,可为多源辅助热泵系统的方案设计与运行调控提供参考,对清洁能源技术的工程应用与推广具有一定参考价值。

但本研究仍存在一定局限性,当前结果主要基于常州典型气象年数据的 TRNSYS-MATLAB 联合仿真,尚未充分考虑云量、空气备用热源结霜问题,缺乏系统级实验验证及全年制冷-制热联合运行评价。后续工作将结合实验完善模型,并通过连续制热季数据开展多参数联合优化,研究不同气候区的全年运行性能和经济性。

符号说明

A_t ——铜管流道的截面积, m^2
 c_f ——换热工质的比热容, $J/(kg \cdot K)$
 d_p ——集热/制冷复合板的厚度, m
 d_{pc} ——盖板与复合板芯间的空气夹层高度, m
 D_i ——铜管的内径, m
 D_o ——铜管的外径, m
 $E_{b,\lambda}$ ——黑体的单色辐射强度, $W/(m^2 \cdot \mu m)$
 G ——太阳辐照强度, W/m^2
 h_{ac} ——盖板与环境的对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{fi} ——铜管与工质的对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{pc} ——盖板与复合板的总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 $h_{pc,rad}$ ——盖板与复合板的辐射传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 $h_{pc,conv}$ ——盖板与复合板的对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 h_{sc} ——盖板与天空的辐射传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 k_a ——空气导热系数, $W/(m \cdot K)$
 k_p ——复合板的导热系数, $W/(m \cdot K)$
 k_t ——铜管的导热系数, $W/(m \cdot K)$
 $\dot{m}_f$ ——换热工质的流量, kg/s
 Nu ——努赛尔数
 P_t ——铜管内表面的周长, m
 Q ——复合板的净热通量, W/m^2
 Q_{pt} ——复合板与铜管的导热热流密度, W/m^2
 $Q_{rad,p}$ ——复合板向外辐射的热量, W/m^2
 $Q_{rad,s}$ ——复合板吸收的辐射热量, W/m^2
 $Q_{rad,net}$ ——复合板的净辐射换热量, W/m^2
 R_{pt} ——复合板与铜管之间的热阻, $(m^2 \cdot K)/W$
 T_a ——环境温度, K
 T_c ——透明盖板温度, K
 T_f ——内部换热工质温度, K
 T_p ——复合板温度, K
 T_t ——铜管温度, K
 T_s ——天空温度, K
 T_{hlo} ——蓄热水箱负荷侧出水温度, K
 u_a ——环境风速, m/s
 u_{ap} ——复合板与环境的总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 α_c ——透明盖板对太阳辐照的吸收率
 $\alpha_{p,\lambda}$ ——复合板的定向单色吸收率
 ε_c ——透明盖板发射率
 ε_p ——复合板的发射率
 $\varepsilon_{c,\lambda}$ ——透明盖板的单色发射率
 $\varepsilon_{p,\lambda}$ ——复合板的单色发射率
 θ ——辐射方向与表面法线的夹角, rad
 λ ——波长, μm
 $\rho_{c,\lambda}$ ——透明盖板的单色反射率
 $\rho_{p,\lambda}$ ——复合板的单色反射率
 σ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$
 $(\tau\alpha)_p$ ——复合板对太阳辐照的有效吸收率
 $\tau_{c,\lambda}$ ——透明盖板的定向单色透过率
 φ ——集热/制冷复合装置的倾角系数

参考文献

- [1] 丁志雄, 隋云任, 吴伟. 吸收式储能研究进展[J]. 制冷学报, 2025, 46(3): 11–23. (Ding Zhixiong, Sui Yunren, Wu Wei. Research progress in absorption thermal energy storage[J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(3): 11–23.)
- [2] 中国建筑节能协会, 重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J]. 建筑, 2024(02): 46–59. (China Association of Building Energy Efficiency, Institute of Urban-Rural Construction and Development, Chongqing University. China's building energy consumption and carbon emissions research report (2023) [J]. Construction and Architecture, 2024 (02): 46–59.)
- [3] 孙洪鹏, 陈晨, 张广智. 国内大型公共建筑空调系统运行管理现状调查研究[J]. 建筑节能, 2020, 48(10): 8–13. (Sun Hongpeng, Chen Chen, Zhang Guangzhi. Investigation on the operation and management of air-conditioning system for large public buildings in China [J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(10): 8–13.)
- [4] 王芸, 端木琳, 李祥立, 等. 独立双埋管太阳能辅助土壤源热泵系统模型建立与影响因素分析[J]. 制冷学报, 2022, 43(3): 121–132. (Wang Yun, Duanmu Lin, Li Xiangli, et al. Model and parametric analysis of solar-assisted ground-source heat pump system with dual independently buried tubes [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(3): 121–132.)
- [5] 毕伟蔷, 韩宗伟, 张雪平, 等. 埋管地源热泵长度设计影响因素及其敏感性分析[J]. 制冷学报, 2025, 46(2): 120–128. (Bi Weiqiang, Han Zongwei, Zhang Xueping, et al. Analysis of influencing factors and sensitivity analysis of the design length of buried pipe ground-source heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(2): 120–128.)
- [6] 梁士民, 王哲, 高学锋, 等. 空气源热泵阵列“冷湿岛效应”与结除霜现象相互影响实测研究[J]. 制冷学报, 2026, 47(2): 26–34. (Liang Shimin, Wang Zhe, Gao, Xuefeng, et al. Field test on the interactions between "cold and wet island effect" and frosting-defrosting phenomenon for air-source heat pump array [J]. Journal of Refrigeration, 2026, 47(2): 26–34.)
- [7] Zhang Lei, Feng Guohui, Li Ainong, et al. Comprehensive evaluation and analysis of a nearly zero-energy building heating system using a multi-source heat pump in severe cold region [J]. Building Simulation, 2023, 16 (10): 1949–1970.
- [8] 龚赞, 刘益才, 邓炎, 等. 太阳能热泵系统配置形式及其研究进展[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 506–515. (Gong Zan, Liu Yicai, Deng Yan, et al. Configuration

- forms and research progress of solar assisted heat pump system[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2023, 44(4): 506–515.)
- [9] Zhan Chenxuan, Xu Yi, Fan Jianhua, et al. Validation and optimization of a solar heating plant with a large-scale heat pump[J]. *Energy*, 2025, 319: 134898.
- [10] 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.
- [11] Jiang Jiatong, Liu Lei, Song Jian, et al. Solar-assisted high-temperature heat pumps to achieve off-grid zero-carbon heating in industrial parks [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 226: 116412.
- [12] Zhang Xuedan, Dai Zeyu, Zhang Tiantian, et al. Solar assisted heat pump system with phase change energy storage for severe cold regions of China: an innovative optimization approach [J]. *Energy and Buildings*, 2026, 351: 116666.
- [13] 郭晨玥, 潘浩丹, 徐琪皓, 等. 天空辐射制冷技术发展现状与展望[J]. *制冷学报*, 2022, 43(3): 1–14. (Guo Chenyue, Pan Haodan, Xu Qihao, et al. Current status and future perspectives of radiative sky cooling[J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(3): 1–14.)
- [14] 齐典伟, 饶博闻, 徐凤, 等. 严寒干热地区集热冷却联用系统试验研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(1): 102–108. (Qi Dianwei, Rao Bowen, Xu Feng, et al. Experimental study on combined heat collection and cooling system in severe cold and dry hot areas [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2024, 45(1): 102–108.)
- [15] Xu Feiyang, Wu Huabo, Zhao Bin, et al. A novel solar photothermal/radiative cooling-thermal catalytic (PT/RC-TC) hybrid system for improving indoor environment by a broadband absorber/emitter with thermal catalysts [J]. *Energy and Buildings*, 2025, 327: 115097.
- [16] Lu Kegui, Chen Guang, Zhang Wenshuo, et al. Synergetic integration of solar heating and radiative cooling for self-adaptive thermal regulation [J]. *Cell Reports Physical Science*, 2025, 6(7): 102661.
- [17] Guo Jiangfeng, Wu Zhiwei, Zhang Fenghua, et al. Theoretical studies on a dual-function system integrating solar heating and radiative cooling for year-round energy saving[J]. *Solar Energy*, 2025, 288: 113293.
- [18] 程归, 陈晓明, 李兴友. 耦合天空辐射制冷的微通道分离式热管系统性能研究[J]. *太阳能学报*, 2026, 47(4): 782–790. (Cheng Gui, Chen Xiaoming, Li Xingyou. Study on performance of microchannel separated heat pipe system coupled with radiative sky cooling [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2026, 47(4): 782–790.)
- [19] Hu Mingke, Zhao Bin, Ao Xianze, et al. Performance assessment of a trifunctional system integrating solar PV, solar thermal, and radiative sky cooling [J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114167.
- [20] Chen Haifei, Li Xulei, Gao Jian, et al. Comparative study on a solar-assisted ground source heat pump with CPC solar collector and phase change heat storage [J]. *Renewable Energy*, 2025, 239: 122065.
- [21] Hu Mingke, Zhao Bin, Ao Xianze, et al. Numerical study and experimental validation of a combined diurnal solar heating and nocturnal radiative cooling collector [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 145: 1–13.

通信作者简介

曹静宇,男,副教授,湖南大学土木工程学院,0731-88822610, E-mail:jycao@hnu.edu.cn。研究方向:制冷及设备节能技术。

About the corresponding author

Cao Jingyu, male, associate professor, College of Civil Engineering, Hunan University, 86-731-88822610, E-mail: jycao@hnu.edu.cn. Research fields: refrigeration and equipment energy-saving technology.