

直膨式太阳能热泵供暖系统运行控制策略

孔祥强, 徐 显, 张 鹏, 闫循正, 李 瑛

(山东科技大学机械电子工程学院, 青岛 266590)

摘 要: 针对直膨式太阳能热泵用于建筑供暖时稳定性差、效率低等问题, 该研究基于构建的直膨式太阳能热泵地板辐射供暖试验平台, 提出了一种基于环境参数的系统运行控制策略。热泵采用环保工质丙烷, 集热/蒸发器和冷凝器均采用微通道结构, 通过蓄热水箱与水循环管路相连, 将热量输送到地板辐射供暖系统。基于大量试验数据与分析, 拟合得到满足室内热舒适前提下不同环境温度下的供水温度下限, 根据实际的太阳辐射强度将水箱内部水温提升至相应设定值以满足蓄热需求。试验结果表明: 基于所提出的控制策略, 系统能够及时响应环境工况变化, 在多种工况都能保证较优的性能并满足舒适供暖需求, 系统平均性能系数在 2.02~3.58 之间, 压缩机入口工质过热度稳定保持在 7~11 °C, 压缩机排气温度保持在 90 °C 以内。所提出的运行控制策略有助于直膨式太阳能热泵供暖系统安全稳定高效运行。

关键词: 太阳能; 热泵; 供暖; 控制策略

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.005

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-08-0038-07

孔祥强, 徐显, 张鹏, 等. 直膨式太阳能热泵供暖系统运行控制策略[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 38-44. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.005 <http://www.tcsae.org>

Kong Xiangqiang, Xu Xian, Zhang Peng, et al. Operation control strategy of direct-expansion solar-assisted heat pump system for heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 38-44. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.005 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

随着城市化进程的发展, 建筑能耗呈现出数量庞大、增长迅速趋势^[1]。热泵能够规模化利用低品位热能实现高效清洁供热, 进而提升建筑能效, 助力实现建筑碳中和。直膨式太阳能热泵是低温太阳能热转换技术^[2], 是太阳能热利用技术和热泵应用的重要扩展, 目前已应用于热水供应、建筑供暖、太阳能光伏/热等领域^[3-8]。陈道川等^[9]对与喷气增焓循环耦合的低温型直膨式太阳能热泵系统进行了冬季工况试验研究, 结果表明环境温度为-10 °C 时, 系统性能系数(COP, Coefficient Of Performance)可达到 3.79; 环境温度为-20 °C 时, 系统 COP 可达到 3.69。蒋绿林等^[10]试验分析了太阳辐射强度对直膨式太阳能热泵系统性能影响, 发现辐射强度每增加 200 W/m², COP 值将升高 0.8~1.2。Huang 等^[11]模拟研究了在寒冷气候条件下太阳辐射、环境温度和相对湿度对裸板集热/蒸发器的直膨式太阳能热泵性能的影响。Cai 等^[12]提出了一种新型空气源耦合直膨式太阳能热泵系统并建立了系统数学模型, 研究表明系统可以在各种工况下高效运行, 在太阳辐射为 100 W/m² 和环境温度为 10 °C 时, 系统平均 COP 为 2.71。

太阳辐射的间歇不稳定特性导致系统运行可靠性和

太阳能利用效率降低。对于复杂多变的环境工况, 合理的运行控制策略能够有效提升热泵供暖系统的热力性能和稳定性。徐昭炜^[13]在空气源热泵供暖系统的基础上提出了一种基于供需匹配的动态回差控制策略, 在建筑供暖需求得到保障的前提下有效降低运行水温并明显减少启停循环次数。Zhou 等^[14]提出了一种新型温度和水力平衡控制策略用于空气源热泵供暖系统, 发现该策略不仅可以实现更舒适的室内温度, 且节约 31.5% 的电力消耗。Dongellini 等^[15]通过控制供水或回水温度调节机组运行状态与供热量。热泵供暖系统的控制策略研究主要集中在空气源热泵, 根据环境温度调节供水温度降低运行能耗。目前针对直膨式太阳能热泵供暖系统的控制策略研究鲜有报道, 直膨式太阳能热泵需要考虑太阳辐射及其间歇不稳定性, 应针对其热源不稳定特性研究确定相应的运行控制策略。鉴于此, 本文构建了直膨式太阳能热泵地板辐射供暖试验平台, 将环保碳氢化合物自然工质丙烷应用于热泵系统。针对冬季环境参数变化导致热源不稳定和建筑热需求波动, 在大量试验数据的基础上, 提出一种响应环境参数变化改变供水温度的运行控制策略, 并通过试验验证该策略在实现热泵供暖系统高效、稳定和安全运行方面的有效性。

1 系统介绍

1.1 系统组成

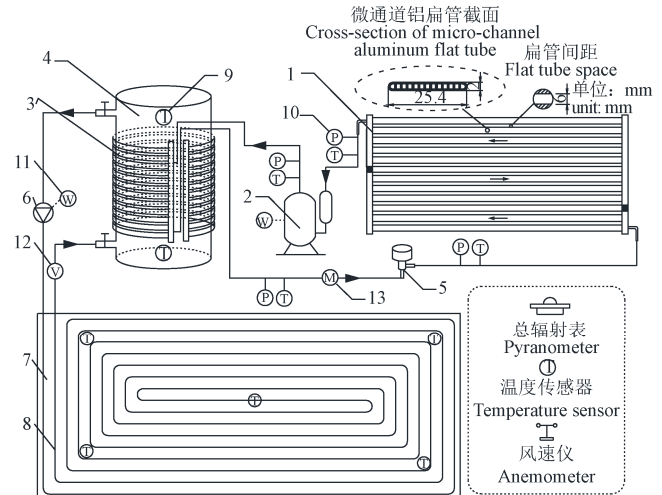
直膨式太阳能热泵供暖试验系统主要由集热/蒸发器、压缩机、冷凝器、电子膨胀阀、蓄热水箱、循环水泵、地板供暖盘管、供暖小室和数据采集控制系统等组成

收稿日期: 2022-02-07 修订日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51776115); 山东省研究生导师指导能力提升项目(SDY17037); 山东科技大学研究生导师指导能力提升计划项目(KDYC17009)

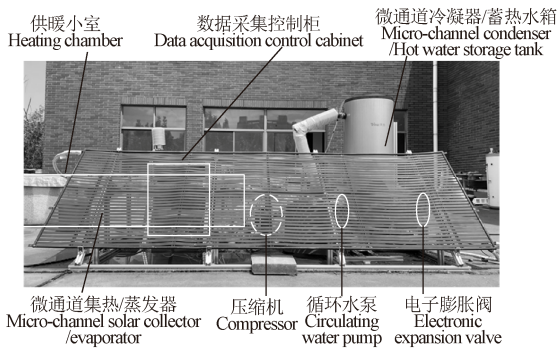
作者简介: 孔祥强, 教授, 博士生导师, 研究方向为热泵技术和新能源利用等。Email: kxqiangly@126.com

成, 如图 1 所示。为有效降低丙烷工质充注量, 热泵的集热/蒸发器和冷凝器均采用微通道结构^[16-17]。其中, 微通道集热/蒸发器表面涂有选择性吸收涂层, 有效集热面积为 2.93 m², 采用三流程排列方式, 每流程管数依次为 5、7 和 11 根, 整体尺寸为 3 500 mm×1 018.2 mm, 正南方向安置, 与地平线成 45°角, 微通道铝扁管直径尺寸为 25.4 mm×2 mm, 管间距为 6 mm, 具体微通道铝扁管参数详见文献[18]。系统选用定频旋转式压缩机, 理论排气量为 16.4 cm³/转, 额定功率为 732 W。微通道冷凝器单面有效换热面积为 0.83 m², 采用六流程排列方式, 每流程管数依次为 7、6、5、4、3 和 3 根, 展开整体尺寸为 1 190 mm×1 000 mm, 具体微通道铝扁管参数亦详见文献[18]。电子膨胀阀作为系统节流机构用来控制热泵工质流量。蓄热水箱有效容积为 0.2 m³, 采用不锈钢内胆, 微通道冷凝器紧密缠绕在内胆外侧。为了减少热量损失, 水箱采用聚氨酯作为隔热材料。地暖盘管采用回折型铺设方式, 以获得较好的辐射性能^[19], 供暖面积为 12.96 m², 循环水泵额定功率为 46 W。



1.微通道集热/蒸发器 2.压缩机 3.微通道冷凝器 4.蓄热水箱 5.电子膨胀阀 6.循环水泵 7.供暖小室 8.地暖盘管 9.温度传感器 10.压力传感器 11.单相功率表 12.涡轮流量计 13.质量流量计
1. Micro-channel collector/evaporator 2. Compressor 3. Micro-channel condenser 4. Hot water storage tank 5. Electronic expansion valve 6. Circulating water pump 7. Heating chamber 8. Radiant floor heating coil 9. Temperature sensor 10. Pressure sensor 11. Single-phase wattmeter 12. Turbine flowmeter 13. Mass flowmeter

a. 系统组成示意图
a. System composition diagram



b. 试验平台
b. Test platform

图 1 直膨式太阳能热泵供暖系统

Fig.1 Direct-expansion solar-assisted heat pump system for heating

数据采集控制系统主要由总辐射表、风速仪、温度传感器、压力传感器、质量流量计、涡轮流量计和单相功率表等组成。测量仪器规格如表 1 所示。控制系统包括压缩机启停控制、循环水泵启停控制、电子膨胀阀开度控制等。平台采用组态王 (KingView) 软件实现数据通信和控制。测量数据每隔 5 s 采集一次并传输至计算机进行存储并用于分析。

表 1 测量仪器规格
Table 1 Specifications of the measuring instruments

测量仪器 Measuring instruments	型号 Model	工作参数范围 Operating parameters range	误差 Errors
温度传感器 Temperature sensor	PT100	-50~150 °C	±0.2% FS
压力传感器 Pressure sensor	CYYZ11-H	-0.1~3 MP	±0.1% FS
总辐射表 Pyranometer	TBQ-2	0~2 000 W·m ⁻²	±2% FS
风速仪 Anemometer	HS-FS01	0~30 m·s ⁻¹	±0.1 m·s ⁻¹
单相功率表 Single-phase power meter	TED-2WBD	0~1 100 W	±0.5% FS
涡轮流量计 Turbine flowmeter	GTLWGY	0.1~0.6 m ³ ·h ⁻¹	±0.5% FS
质量流量计 Mass flowmeter	DMF-1-1B	0~100 kg·h ⁻¹	±0.2% FS

1.2 工作原理

构建的直膨式太阳能热泵供暖试验平台分为热泵循环子系统和地暖水循环子系统。在热泵循环中, 丙烷在集热/蒸发器内部通过集热板表面直接吸收太阳辐射热能而蒸发, 而且, 如果集热板面温度低于环境温度, 丙烷还将同时吸收环境空气中的热量, 最终形成低温低压的过热蒸气状态。然后经压缩机压缩后, 在冷凝器内将热量释放给蓄热水箱内部的水, 然后进入电子膨胀阀节流降压降温后返回至集热/蒸发器, 完成一次热泵循环^[17]。在地暖水循环中, 蓄热水箱中的热水经循环水泵驱动进入地暖盘管, 将热量经地板表面释放给供暖小室, 循环回水重新流入蓄热水箱内部被热泵循环加热, 满足持续供暖需求。

1.3 直膨式太阳能热泵供暖系统热性能指标

直膨式太阳能热泵供暖系统的热性能主要用制热性能系数 (Coefficient of Performance, COP) 表示, 数值上等于系统有效制热量与输入电能的比值, 即:

$$COP = \frac{Q_{heat}}{\sum_{i=1}^n \tau_i (W_{com,i} + W_{pump,i})} \quad (1)$$

式中 Q_{heat} 为系统有效制热量, J; W_{com} 为压缩机电功率, W; W_{pump} 为循环水泵电功率, W; τ 为时间步长, s; 下标 i 为第 i 个时间步长; n 为系统运行时间内的时间步长总数。

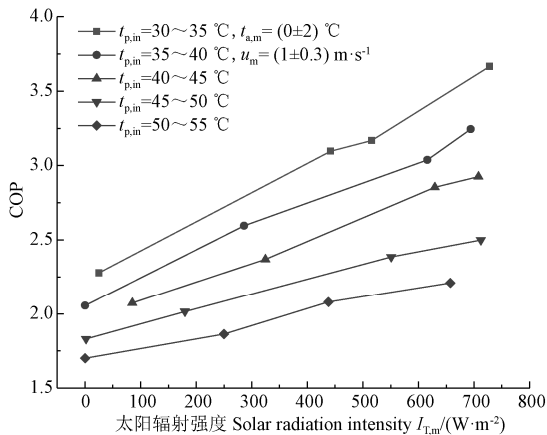
其中, 系统有效制热量 Q_{heat} 包括蓄热水箱蓄热量和地暖水供热量, 即:

$$Q_{heat} = C_p \sum_{i=1}^n [M_w \Delta t_i + m_w \tau_i (t_{p,in} - t_{p,out})] \quad (2)$$

式中 C_p 为水的等压比热容, J/(kg·°C); M_w 为水箱内部水的总质量, kg; Δt 为水箱内部水温升, °C; m_w 为地暖水质量流量, kg/s; $t_{p,in}$, $t_{p,out}$ 分别为地暖水循环的供水温度和回水温度, °C。

2 系统性能影响因素分析

为了研究在寒冷气候下使用丙烷作为工质的直膨式太阳能热泵供暖系统热力性能和运行特性, 课题组在青岛地区冬季工况下进行了大量试验测试。考虑到供暖对供水温度的要求, 在不同工况下将 30~55 °C 的水温平均分为 5 个水温区间段进行试验并分析系统性能。太阳辐射强度、环境温度和供水温度对直膨式太阳能热泵供暖系统的热性能有显著影响。如图 2 所示, 相同供水温度下随着太阳辐射强度的降低, COP 逐渐降低, 而相同太阳辐射强度下随着供水温度的降低, COP 逐渐升高。零太阳辐射下供水温度 35~40 °C 的性能要高于太阳辐射强度 400 W/m² 下供水温度 50~55 °C 的性能。太阳辐射强度较低时, 应降低供水温度以提高系统性能。



注: $t_{a,m}$ 为平均环境温度, °C; u_m 为平均风速, m·s⁻¹; $t_{p,in}$ 为供水温度, °C。
Note: $t_{a,m}$ is average ambient temperature, °C; u_m is average wind speed, m·s⁻¹; $t_{p,in}$ is supply water temperature, °C.

图 2 不同供水温度下太阳辐射强度对系统制热性能系数的影响
Fig.2 Effects of solar radiation intensity on system Coefficient of Performance (COP) at different supply water temperatures

不同供水温度下环境温度对系统性能的影响如图 3 所示, 随着环境温度升高, 系统性能不断升高, 但其对系统性能的影响程度低于太阳辐射强度对系统性能的影响, 环境温度大约每升高 8 °C 能抵消供水温度提高 5 °C 带来的性能衰减。结合图 2、图 3 可以得出相同环境工况下, 供水温度越低, 系统性能越好, 供水温度每降低 1 °C, 系统性能提升 1.8%~2.2%。而不同环境工况下则要根据实际供暖情况确定最佳供水温度。

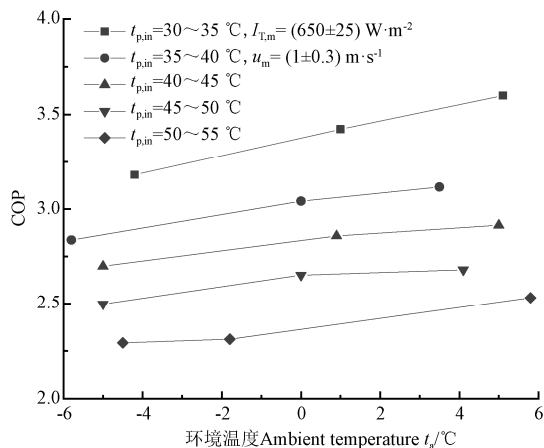


图 3 不同供水温度下环境温度对系统 COP 的影响
Fig.3 Effects of ambient temperature on system COP at different supply water temperatures

3 系统运行控制策略

如图 4 所示, 在整个冬季供暖期间, 青岛地区大约有 30% 的多云阴雨工况 (平均太阳辐射强度 350 W/m² 以下) 和 70% 的晴天工况。因此, 运行控制策略对直膨式太阳能热泵供暖系统在不同工况下的适应性至关重要。

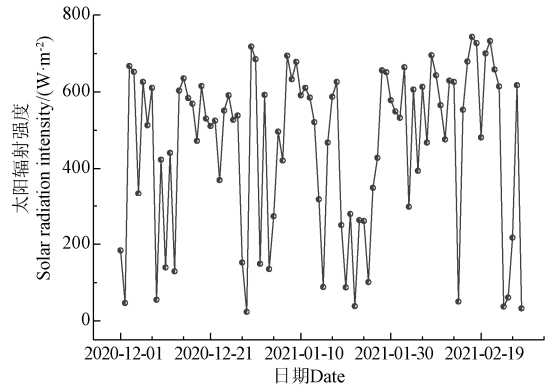
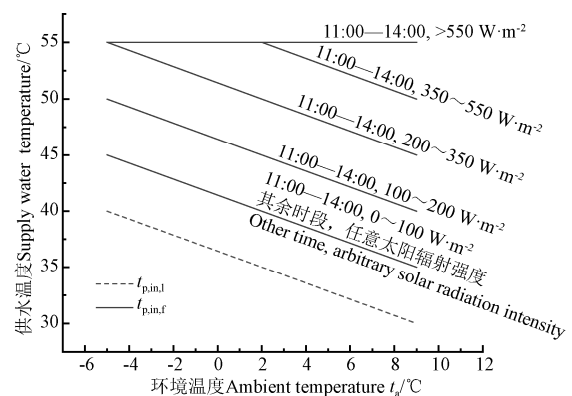


图 4 青岛地区供暖季日平均太阳辐射强度
Fig.4 Daily average solar radiation intensity of heating season in Qingdao

首先根据环境温度确定供水温度下限, 以保证室内供暖效果, 因为随着环境温度的提高, 建筑热负荷逐渐降低, 供水温度也应相应降低以提高系统性能。供水温度上限应视太阳辐射强度、环境温度共同决定。较高太阳辐射工况下, 供水温度上限较低会造成太阳能的浪费, 进而达不到水箱储能的最佳效果, 但也不宜过高, 过高的供水温度会造成室内温度超调及地板过热, 造成不必要的能量浪费; 而在较低太阳辐射工况下, 供水温度上限较高会造成系统性能下降且不利于系统稳定运行。受限于水箱容积, 每次机组运行时间较短, 为避免太阳能的高峰浪费, 提高太阳能利用率, 在 11:00—14:00 时段可以根据实际太阳辐射强度状况将水箱内部水温提升至相应设定值, 其余时段机组在低温段运行, 具体供水温度上下限如图 5 所示。



注: $t_{p,in,l}$ 为供水温度下限, °C; $t_{p,in,f}$ 为供水温度上限, °C。
Note: $t_{p,in,l}$ is lower limit of supply water temperature, °C; $t_{p,in,f}$ is upper limit of supply water temperature, °C.

图 5 不同工况下供水温度上下限

Fig.5 Upper and lower limits of supply water temperature under different conditions

需要指出的是, 供水温度下限根据在不同环境温度下保证室内热舒适温度的最低供水温度多次试验数据线性拟合

得出，供水温度上限则是考虑当前环境工况与下次启动时环境工况对比决定的。举例来说，当前时刻 12:00，太阳辐射强度 50 W/m^2 ，环境温度 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，供水温度加热到 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ，判断是否继续加热，根据建筑热负荷确定供水温度跌至下次热泵启动大约 2 h，统计两个月内不同时刻环境温度的平均值，用统计的 14:00 时的平均值代替当天 14:00 的环境温度，比较两者的性能：①太阳辐射强度 50 W/m^2 ，环境温度 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，供水温度从 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热到 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ②太阳辐射强度 12 W/m^2 ，环境温度 $1.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，供水温度从 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 加热到 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 。②的性能要好于①的性能，此时压缩机停机，不再继续加热。

本文提出的系统运行控制策略包括变供水温度下装置的启/停机控制、集热/蒸发器的过热度控制和排气温度超标报警共 3 个模块，可以使系统在环境参数不断变化的干扰下，将热力性能维持在较高水平，同时实现长期安全稳定运行。运行策略控制程序采用 C 语言编写，主程序流程如图 6 所示。

热泵和地暖系统运行独立控制。当压缩机和水泵同时开启运行时，水箱的作用为制热-蓄热-供热；当压缩机开启而水泵关闭时，水箱的作用为制热-蓄热；当压缩机关闭而水泵开启时，水箱的作用为供热。热泵机组方面，在蓄热水箱供水处中设置一个温度传感器，直膨式太阳能热泵供暖系统的控制器根据采集到的水温是否达到预先设定的供水温度来控制压缩机的启停，考虑到压缩机启动损失和启动次数，水温每变化 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为一个启/停控制单位，控制器则根据当前环境参数判断是否继续加热。伴随着水箱里的热水与地暖循环进行换热，供水温度逐渐下降到供水温度下限，此时压缩机重新启动，并重复上述操作。另一方面，集热/蒸发器的过热度需控制在合理安全的范围内，保证系统运行的安全性和高效性，在大量试验的基础上，过热度的目标范围设定为 $7 \sim 11 \text{ }^\circ\text{C}$ ，通过电子膨胀阀调整开度实现，调整周期为 80 s ，具体开度控制规则参考课题组之前的研究^[20]。为保证安全运行，排气温度 t_{dis} 超过 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，压缩机应立即关闭。

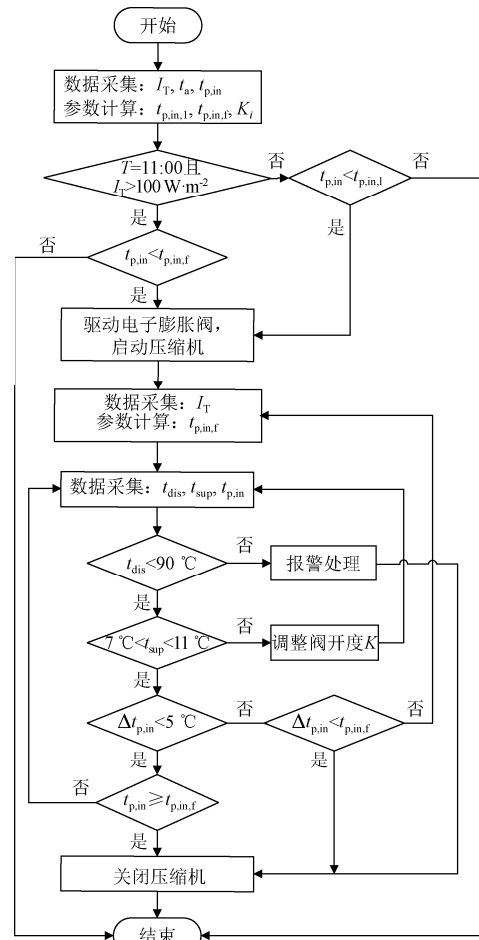
地板供暖方面，由于蓄热水箱的水温受外界参数和建筑热负荷影响，地暖供水温度不能保持稳定。故系统采用室温双位控制的方式，既可以保证室内人员的舒适感受，又可以降低运行能耗。现通过监控室内温度和供水温度，室温低于 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 时水泵启动，地暖循环开始，当供水温度低于 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，室内温度高于 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时水泵关闭；当供水温度高于 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，室内温度高于 $19 \text{ }^\circ\text{C}$ 时水泵关闭，这种方式可以减少供水温度过高引起地板辐射供暖系统的时滞现象，此时地暖循环结束。重复上述循环，使得室内温度在一天的变化范围尽量在 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内。

4 结果与分析

4.1 供暖效果分析

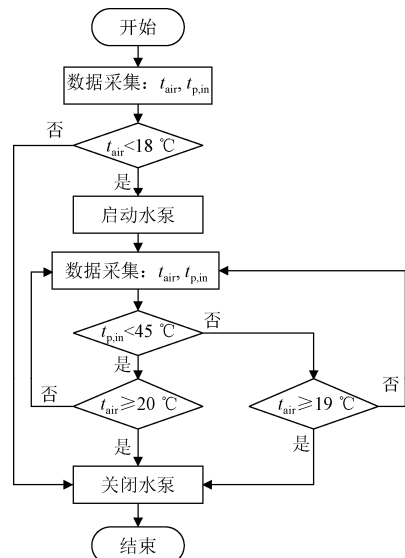
为了验证该运行控制策略在不同工况下的供暖效果，依托构建的实验平台，课题组在青岛地区冬季供暖期内对供暖系统进行了全工况性能测试，本文选取 2021 年 12 月 24 日、2022 年 1 月 7 日的试验数据进行分析。图 7 为室内温度 t_{air} 、地板温度 t_f 、水箱温度 t_w 、太阳辐射强度 I_T 、环境温度 t_a 随时间的变化。其中，07:00—09:00

为预热阶段，室温持续上升；9:00—20:00 时段为稳定阶段，室温维持在控制范围内。



a. 热泵循环控制程序流程图

a. Flow chart of control program for heat pump cycle



b. 地暖供水循环控制程序流程图

b. Flow chart of control program for floor heating supply water cycle

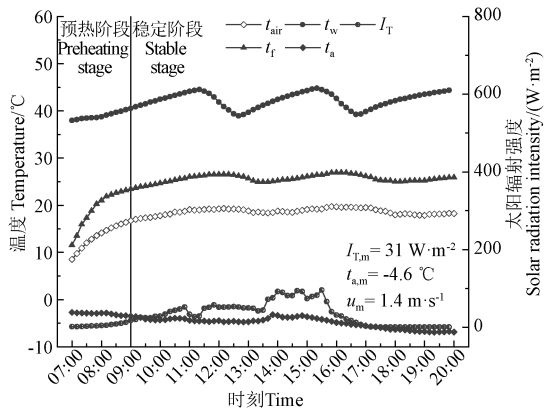
注： T 为时刻，hh:mm； t_{dis} 为压缩机排气温度， $^\circ\text{C}$ ； t_{sup} 为过热度， $^\circ\text{C}$ ； K 为电子膨胀阀开度，脉冲； t_{air} 为室内温度， $^\circ\text{C}$ 。

Note: T is moment, hh:mm; t_{dis} is discharge temperature of compressor, $^\circ\text{C}$; t_{sup} is degree of superheat, $^\circ\text{C}$; K is opening of electronic expansion valve, Pulse; t_{air} is indoor temperature, $^\circ\text{C}$.

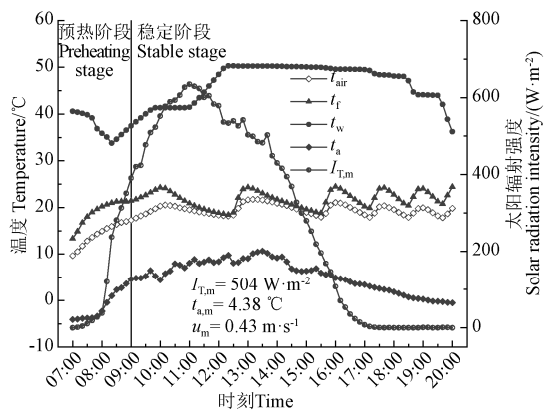
图 6 控制系统主程序流程图

Fig.6 Main program flow chart of control system

2021年12月24日为低辐射低环温工况,在08:40时室内温度达到 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足最低供暖标准^[21],10:05—20:00时段室内温度一直稳定在 $18\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,地板温度在 $23.4\sim 26.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,室内热舒适性良好。系统在07:00—11:11、12:27—13:18和16:40—19:45时段运行时,压缩机和水泵同时开启,水箱温度逐渐上升,水箱作用为制热-蓄热-供热;其余时段运行时,压缩机关闭,水泵运行,水箱作用为供热。2022年1月7日为晴天工况,稳定阶段室内温度在 $18\sim 21.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,中午室内温度超调 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,主要是因为房屋受太阳辐射照射影响,地板温度在 $18.4\sim 24.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,室内热舒适度良好。在07:00—08:19时段,压缩机关闭,水泵开启,水箱作用为供热,直至供水温度降至下限;在08:19—09:40时段,压缩机和水泵同时开启,水箱作用为制热-蓄热-供热;在11:00—12:10时段压缩机开启,水泵关闭,水箱作用为制热-蓄热;在12:10—20:00时段,压缩机始终关闭,水泵依据室内温度实现启停控制,水箱也随之处于供热或停止供热状态。



a. 2021年12月24日试验结果(低辐射低环温工况)
a. Test results on December 24, 2021 (Low radiation and low ambient temperature conditions)



b. 2022年1月7日试验结果(晴天工况)
b. Test results on January 7, 2022 (Sunny condition)

图7 室内温度 t_{air} 、地板温度 t_f 、水箱温度 t_w 、环境温度 t_a 和太阳辐射强度 I_T 随时间的变化

Fig.7 Variations of indoor temperature t_{air} , floor temperature t_f , water tank temperature t_w , ambient temperature t_a and solar radiation intensity I_T with time

图8为使用和不使用控制策略下室内温度对比,可以看出,不使用控制策略下预热阶段室内温度升温缓慢,在10:05时室内温度仅为 $11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,在11:40时室内温度才达到 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,无法满足供暖需求,这主要是由于未设置

供水温度下限导致供热功率较低,在12:25—20:00时段室内温度在 $17.4\sim 20.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动。而使用控制策略下在08:40时室内温度即达到 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,相比不使用控制策略提前2h,且稳定阶段室内温度波动较小。

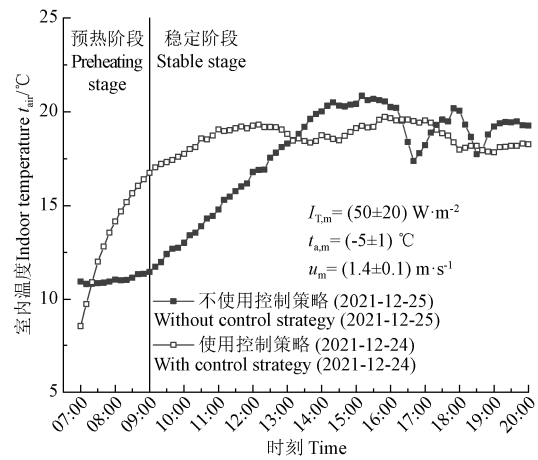
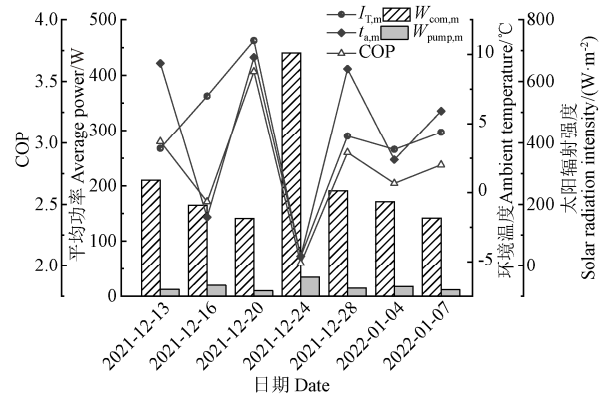


图8 使用和不使用控制策略下的室内温度对比

Fig.8 Comparison of indoor temperature with or without control strategy

4.2 系统热力性能分析

图9为使用本文运行控制策略下不同冬季运行工况下直膨式太阳能热泵供暖系统热力性能整体情况。在平均环境温度为 $-4.6\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均太阳辐射强度为 $31\sim 678\text{ W/m}^2$ 的条件下,系统平均COP在 $2.02\sim 3.58$ 之间。在平均环境温度 $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均太阳辐射强度 31 W/m^2 下,COP仍能达到2.02。压缩机平均功率在 $141\sim 440\text{ W}$ 之间,水泵平均功率在 $9.9\sim 34.3\text{ W}$ 之间,水泵功率占总功率的 $5.5\%\sim 10.7\%$ 。



注: $W_{\text{com,m}}$ 为压缩机平均功率,W; $W_{\text{pump,m}}$ 为水泵平均功率,W。
Note: $W_{\text{com,m}}$ is average power of compressor, W; $W_{\text{pump,m}}$ is average power of water pump, W.

图9 不同冬季运行工况下直膨式太阳能热泵供暖系统热力性能
Fig.9 Thermal performance of direct-expansion solar-assisted heat pump for heating system under different operating conditions in winter

为了更直观地体现运行控制策略的重要性,尤其在低辐射低环温工况下的性能提升,将使用和不使用控制策略下的功率进行对比,如图10所示,需要指出的是,这里的平均功率为当天供暖期间的平均功率,供暖时长相同。相同环境工况下,不使用控制策略的压缩机平均功率为 487 W ,水泵平均功率为 30.9 W ,总功率为 517.9 W 。使用控制策略的压缩机平均功率为 440 W ,水泵平均功率为 34.3 W ,总功率为 474.3 W ,相比不使用控制策略的总功率减少 8.5% 。

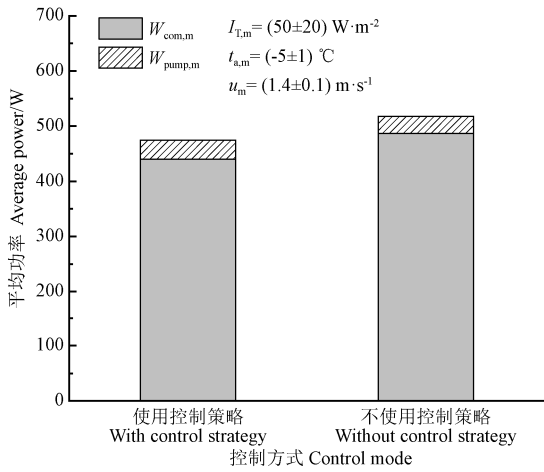
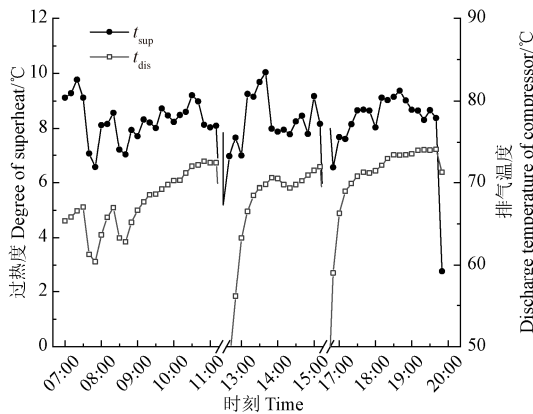


图 10 使用和不使用控制策略下的功率对比

Fig.10 Comparison of power with or without control strategy

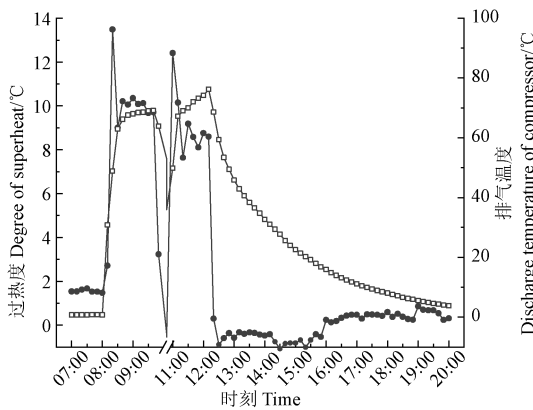
4.3 安全稳定性分析

图 11 为过热度 t_{sup} 和压缩机排气温度 t_{dis} 随时间的变化。可以看出低辐射低环温工况和晴天工况下过热度都被稳定控制在 $7\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内，最大超调量 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，控制效果良好。压缩机排气温度在供暖期间随着供水温度升高而升高，但全程未超过 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，压缩机运行正常，系统运行的安全性和稳定性良好。



a. 2021 年 12 月 24 日试验结果 (低辐射低环温工况)

a. Test results on December 24, 2021 (Low radiation and low ambient temperature conditions)



b. 2022 年 1 月 7 日试验结果 (晴天工况)

b. Test results on January 7, 2022 (Sunny condition)

图 11 过热度 t_{sup} 和压缩机排气温度 t_{dis} 随时间的变化
Fig.11 Variations of degree of superheat t_{sup} and discharge temperature of compressor t_{dis} with time

5 结论

本文针对直膨式太阳能热泵供暖系统的热力性能，设计并构建了以丙烷为工质的直膨式太阳能热泵驱动地板辐射供暖试验平台，基于冬季运行工况，提出了基于环境参数的系统运行控制策略。试验结果表明：

1) 低辐射低环温工况或晴天工况下，室内温度基本稳定在 $18\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，地板温度不超过 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，供暖效果良好。在低辐射低环温工况下相比不使用控制策略，室内温度达到 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间提前了 2 h ，且稳定阶段室内温度波动较小。

2) 在平均环境温度为 $-4.6\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均太阳辐射强度为 $31\sim 678\text{ W/m}^2$ 的条件下，系统平均性能系数为 $2.02\sim 3.58$ 之间，水泵功率占比为 $5.5\%\sim 10.7\%$ 。在低辐射低环温工况下相比不使用控制策略的总功率减少 8.5% 。

3) 压缩机入口工质过热度稳定在 $7\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，同时压缩机排气温度在安全范围内，系统的安全稳定性较高。

[参 考 文 献]

- [1] Liang Y, Cai W G, Ma M D. Carbon dioxide intensity and income level in the Chinese megacities' residential building sector: Decomposition and decoupling analyses[J]. Science of the Total Environment, 2019, 677: 315-327.
- [2] Sporn P, Ambrose E R. The heat pump and solar energy proceedings of the world symposium on applied[J]. Solar Energy, 1955, 11: 1-5.
- [3] 蒋澄阳, 代彦军. 基于肋片式集热板的直膨式太阳能热泵[J]. 化工学报, 2016, 67(S2): 318-325.
Jiang Chengyang, Dai Yanjun. Direct expansion solar heat pump using novel fin-tube collector/evaporator[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2016, 67(S2): 318-325. (in Chinese with English abstract)
- [4] Chen J H, Zhang Z Y, Zhang G J, et al. Energy, exergy, economic and environmental analysis of a novel direct-expansion solar-assisted flash tank vapor injection heat pump for water heater[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115239.
- [5] Duarte W M, Paulino T F, Pabon J J G, et al. Refrigerants selection for a direct expansion solar assisted heat pump for domestic hot water[J]. Solar Energy, 2019, 184: 527-538.
- [6] Kuang Y H, Wang R Z. Performance of a multi-functional direct-expansion solar assisted heat pump system[J]. Solar Energy, 2005, 80(7): 795-803.
- [7] Huang W Z, Ji J, Xu N, et al. Frosting characteristics and heating performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump for space heating under frosting conditions[J]. Applied Energy, 2016, 171: 656-666.
- [8] 姚剑, 彭浩, 寿春晖, 等. 直膨式太阳能 PV/T 热泵系统性能分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12): 35-40.
Yao Jian, Peng Hao, Shou Chunhui, et al. Performance analysis of direct expansion solar assisted heat pump system based on PV / T panel[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(12): 35-40. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈道川, 姚剑, 赵耀, 等. 直膨式太阳能热泵集热/蒸发器性能优化及其低温适应性研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 190-197.
Chen Daochuan, Yao Jian, Zhao Yao, et al. Research on optimization of evaporator of direct expansion solar heat pump and its low temperature characteristics[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(9): 190-197. (in Chinese with English abstract)
- [10] 蒋绿林, 侯亚祥, 姜钦青, 等. 辐照强度对直膨式太阳能热泵性能影响的研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(6): 839-842.
Jiang Lulin, Hou Yaxiang, Jiang Qinqing, et al. Research of irradiation intensity on the performance of a direct expansion solar assisted heat pump[J]. Renewable Energy Resources,

- 2015, 33(6): 839-842. (in Chinese with English abstract)
- [11] Huang W Z, Zhang T, Ji J, et al. Numerical study and experimental validation of a direct-expansion solar-assisted heat pump for space heating under frosting conditions[J]. *Energy & Buildings*, 2019, 185: 224-238.
- [12] Cai J Y, Li Z H, Ji J, et al. Performance analysis of a novel air source hybrid solar assisted heat pump[J]. *Renewable Energy*, 2019, 139: 1133-1145.
- [13] 徐昭炜. 部分负荷下空气源热泵供暖性能评价与系统运行策略研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2021.
Xu Zhaowei. Research on Heating Performance Evaluation and System Operation Strategy of Air Source Heat Pump Under Partial Load[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [14] Zhou C H, Ni L, Li J, et al. Air-source heat pump heating system with a new temperature and hydraulic-balance control strategy: A field experiment in a teaching building[J]. *Renewable Energy*, 2019, 141: 148-161.
- [15] Dongellini M, Morini G L. On-off cycling losses of reversible air-to-water heat pump systems as a function of the unit power modulation capacity[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 196: 966-978.
- [16] Kong X Q, Zhang M Y, Yang Y M, et al. Comparative experimental analysis of direct-expansion solar-assisted heat pump water heaters using R134a and R290[J]. *Solar Energy*, 2020, 203: 187-196.
- [17] Kong X Q, Yang Y M, Zhang M Y, et al. Experimental investigation on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater using R290 with micro-channel heat transfer technology during the winter period[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 113: 38-48.
- [18] Kong X Q, Ma S L, Ma T D, et al. Mass flow rate prediction of direct-expansion solar-assisted heat pump using R290 based on ANN model[J]. *Solar Energy*, 2021, 215: 375-387.
- [19] 蔺洁, 陈超, 李清清. 回折型布置方式低温热水地板辐射换热器传热性能[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(10): 1570-1575.
Lin Jie, Chen Chao, Li Qingqing. Heat transfer properties of hot water floor heat exchanger with a two-pass style system[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2012, 38(10): 1570-1575. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孔祥强, 董山东, 姜开林, 等. 基于电子膨胀阀开度的直膨式太阳能热泵过热度智能控制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 230-235.
Kong Xiangqiang, Dong Shandong, Jiang Kailin, et al. Intelligent control of degree of superheat for direct-expansion solar-assisted heat pump based on electronic expansion valve opening[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(12): 230-235. (in Chinese with English abstract)
- [21] 国家市场监督管理总局检验检疫总局. 室内空气质量标准: GB/T 18883—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

Operation control strategy of direct-expansion solar-assisted heat pump system for heating

Kong Xiangqiang, Xu Xian, Zhang Peng, Yan Xunzheng, Li Ying

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Revolutionary changes can take place in the energy field in the context of the dual carbon strategy. In particular, the energy conversion chain can be changed from the “heat generation by fuel and power generation by heat” to the “green power production and heat generation by electricity”, indicating the significant electrification trend of terminal energy consumption. Fortunately, the solar energy can be used to heat the refrigerant in the evaporator of a heat pump (called a direct-expansion solar-assisted heat pump system, DX-SAHP), where a solar collector can be employed as the evaporator. The heat pump system can be applied for the building heating to reduce the consumption of conventional fossil energy and pollution. But the intermittent and unstable characteristics of solar radiation have led to the reduction of solar energy utilization efficiency and operational reliability of the system. As a result, a control strategy can be widely expected for the safe, efficient, and stable operation of the system using the environmental parameters. In this study, a DX-SAHP operation control of the system was developed for the radiant floor heating platform with propane as the working medium in Qingdao, Shandong Province, China. The system was mainly composed of a micro-channel heat collector/evaporator with an area of 2.93 m², a constant frequency rotary compressor with the rated power of 732 W, an electronic expansion valve, a micro-channel condenser with a single surface area of 0.83 m² surrounding a 200 L water tank, a circulating water pump with a rated power of 46 W, and a radiant floor heating chamber with the heating area of 12.96 m². The hot-water storage tank was directly connected with the radiant floor heating coil to transfer the heat into the heating chamber. The data of the control system was collected, including the solar radiation intensity, temperature, pressure, wind speed, flow rate, and power at the 5-second interval. The function of the control system was realized, including the start-stop control of the compressor, the start-stop control of the circulating water pump, and the opening control of the electronic expansion valve. An experiment was conducted to clarify the effects of solar irradiation intensity, ambient temperature, and supply water temperature on the thermal performance of the DX-SAHP for the radiant floor heating system. The operation control strategy was then proposed under the premise of indoor thermal comfort. The linear fitting of experimental data was utilized to obtain the lower limit of supply water temperature under various ambient temperatures. The water temperature inside the water tank increased to the set value, according to the actual demand for the heat storage of solar radiation. The superheat and discharge temperature of the compressor were controlled in a certain range for the safe operation of the system. The two-position control of indoor temperature was modified for the indoor thermal comfort condition with reduced energy consumption. The experimental results show that the DX-SAHP control strategy for the radiant floor heating system performed stable and efficiently under various working conditions, indicating a fully comfortable heating demand. The average coefficient for the performance of the system was between 2.02-3.58, the superheat of the working medium at the inlet of the compressor was stably maintained at 7-11 °C, and the discharge temperature of the compressor was lower than 90 °C. A comparison was given for the indoor temperature and power consumption of the system with/without the control strategy. The heating effect of the system with the control strategy performed better than that of the without one, where the power consumption was reduced by 8.5%. The new control strategy was greatly conducive to the DX-SAHP system for the radiant floor heating system.

Keywords: solar energy; heat pump; heating; control strategy