

光伏直驱空气源热泵双介质暖风机运行实验研究

刘卓^{1,2}, 颜丽娟^{1,2*}, 蔡琼瑜^{1,2}, 岳晋辉^{1,2}, 马志军³, 刘璋⁴, 马坤茹^{1,2}

¹河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄

²河北省岩土与结构体系防灾减灾技术创新中心, 河北 石家庄

³国家电投集团河北电力有限公司, 河北 石家庄

⁴建投河北热力有限公司, 河北 石家庄

收稿日期: 2023年12月4日; 录用日期: 2023年12月21日; 发布日期: 2024年2月19日

摘要

随着“双碳”愿景的提出, 太阳能光伏直驱空气源热泵的研究在不断深入。为验证太阳能光伏直驱空气源热泵与热水供暖、制冷系统联合运行的可行性, 搭建了具有双介质暖风机的光伏直驱空气源热泵系统, 对石家庄市鹿泉区某独立建筑进行供暖、制冷, 实时记录系统能耗。利用DeST软件模拟该建筑全年冷、热负荷, 阐述系统运行模式及性能评价方法, 与其他供暖、制冷方式进行能耗对比。研究得出该系统较电暖气采暖节省运行费用79.66%, 较普通空气源热泵、光伏直驱空气源热泵全年运行能耗降低15.45%, 市电消耗量分别降低57.77%、26.79%。搭载双介质暖风机的光伏直驱空气源热泵系统可行、节能效果明显、经济效益显著, 双介质系统避免室外循环管路受低温影响冻结, 并具有进一步提升效率的可行性。

关键词

通风与空调工程, 光伏, 空气源热泵, 供暖, 供冷, 节能

Experiment Study of a Photovoltaic Direct-Drive Air Source Heat Pump with Two Fans Using Different Media

Zhuo Liu^{1,2}, Lijuan Yan^{1,2*}, Qiongyu Cai^{1,2}, Jinhui Yue^{1,2}, Zhijun Ma³, Zhang Liu⁴, Kunru Ma^{1,2}

¹College of Architectural Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei

²Hebei Geotechnical and Structural System Disaster Prevention and Mitigation Technology Innovation Center, Shijiazhuang Hebei

³State Power Investment Group Hebei Electric Power Co. Ltd., Shijiazhuang Hebei

*通讯作者。

文章引用: 刘卓, 颜丽娟, 蔡琼瑜, 岳晋辉, 马志军, 刘璋, 马坤茹. 光伏直驱空气源热泵双介质暖风机运行实验研究[J]. 电力与能源进展, 2024, 12(1): 15-26. DOI: 10.12677/aepe.2024.121003

Abstract

With the introduction of the goals of carbon peaking and carbon neutrality, research on photovoltaic direct-drive air source heat pumps has been expanding. To investigate the feasibility of photovoltaic direct-drive air source heat pumps for simultaneous heating, cooling, and hot water provision, a new system with heaters having two different heat transfer media was built in a separate building in Luquan District, Shijiazhuang City. The real-time energy consumption of the system was recorded. Simulate the annual cooling and heating loads of this building using DeST software; describe the operation mode and performance evaluation method of the new system; compare the energy consumption with other heating and cooling methods. The study concludes that the system reduces operating costs by 79.66% compared to electric heating. The new system reduces annual operating energy consumption by 15.45% compared to ordinary air source heat pumps and photovoltaic direct-drive air source heat pumps, and reduces grid consumption by 57.77% and 26.79%, respectively. The feasibility of the new system is evident with a significant energy-saving impact and noticeable economic benefits. The new system effectively prevents outdoor circulating pipelines from freezing due to low temperatures thereby increasing efficiency.

Keywords

Ventilation and Air Conditioning Engineering, Photovoltaics, Air Source Heat Pumps, Heating, Cooling, Energy-Saving

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

习近平总书记在 2022 年 6 月 24 日举行的全球发展高层对话会上提出中国将在能源领域推动建立全球清洁能源合作伙伴关系, 举办国际能源变革论坛, 探索建立国际能源变革联盟[1]。展现了我国坚定不移推进能源变革、扩大高水平对外开放、积极同世界分享发展机遇的决心。在“双碳”愿景下, 我们必须重视供暖工程在清洁能源领域的发展创新才能够更好的改变我国的能源利用现状[2] [3] [4]。清洁供热产业正处于快速发展阶段, 现如今热源结构加速调整, 零碳热源开发进程加快, 供热企业要想提升竞争力, 必须重视供热系统的不断优化。

空气能与太阳能在当今新型供暖研究中备受关注, 太阳能联合空气源热泵的供暖模式已有一定的发展规模, 国内外一些学者在光伏控制器设计与容量匹配[5]、太阳能 PV/T 光储直驱热电联产[6]、直流压缩机热泵运行策略[7]、光伏直驱太阳能跨季节储热[8]等多种方面对光伏直驱空气源热泵技术做了研究。闪锦淮[9]针对光伏直驱空调在冬夏季运行情况进行研究, 使用 PV/T 板优化系统并在四种典型地区进行全年运行模拟, 发现采用多晶硅光伏板最高光电转换效率为 17.42%, 系统优化后发电能力提高了 13.03%。彭胜男[10]提出并网型光伏空气源热泵联合供热系统, 以费用年值最小为优化目标对不同地区联合供热系

统进行情景模拟, 计算得出联合供热系统在典型独立民居一个供暖季可节约煤炭 5.48 t。刘家琦[11]对太阳能和空气源热泵联合供热系统常见的两种类型及其运行操作进行了全面的归纳总结, 提出了系统各部分评价指标的计算方法。王良等[12]构建了光伏能源直接驱动变频压缩机运行的空气源热泵供暖系统, 探究了光伏直驱空气源热泵系统在冬季的供暖性能和构建匹配特性, 得出了太阳辐射照度和制热量间的线性关系。Sterling 等[13]通过对太阳能辅助空气源热泵系统进行数值模拟, 发现用太阳能来辅助空气源热泵运行最节能, 年运行成本最低。贡静宝[14]提出了一种太阳能-空气源双热源复合热泵系统并优化了系统热源的切换方法, 对系统的设备参数和控制策略进行优化, 并进行了实验与模拟数据对比分析。王满鹏[15]开展了太阳能辅助空气源热泵供暖系统的动态模拟, 确定了太阳能辅助空气源热泵供暖系统的最优参数。耿秀等[16]对太阳能与空气源热泵耦合供热系统的运行特性进行分析, 对比不同耦合形式的供热效果和运行特性。马坤茹等[17]提出了可同时吸收太阳能和空气能的新型太阳能/空气能直膨式热泵机组, 把太阳能集热器和热泵蒸发器合二为一, 使室外机结霜得到有效缓解。A. James 等[18]对变频驱动压缩机光伏热泵展开研究, 发现反馈控制的变频调速压缩机提升了系统 20% 的输出功率。Sheng Zhang 等[19]发现板管蒸发器的冷却效果更好, 可提高 25% 的光电转换效率。

目前国内外对光伏空调的研究多为运行方式的优化及光伏市电耦合供能, 对于供暖末端复合式系统的研究较少。为进一步提高光伏热泵供热制冷效率, 本文提出一种具有双介质暖风机的光伏直驱空气源热泵供暖、制冷系统, 采用空气源 + 复合末端的形式, 研究此系统在河北石家庄某农村独立建筑供暖、制冷的应用实例, 通过实际运行数据分析其应用效果和经济学性。

2. 工程概况

2.1. 建筑信息

所选建筑为河北省石家庄市某独立办公建筑, 建筑主体为单层砖混结构, 房屋层高 3.1 m。建筑维护结构未设置保温材料, 单层铝合金门窗。其建筑平面图如图 1 所示, 围护结构及热工参数见表 1。

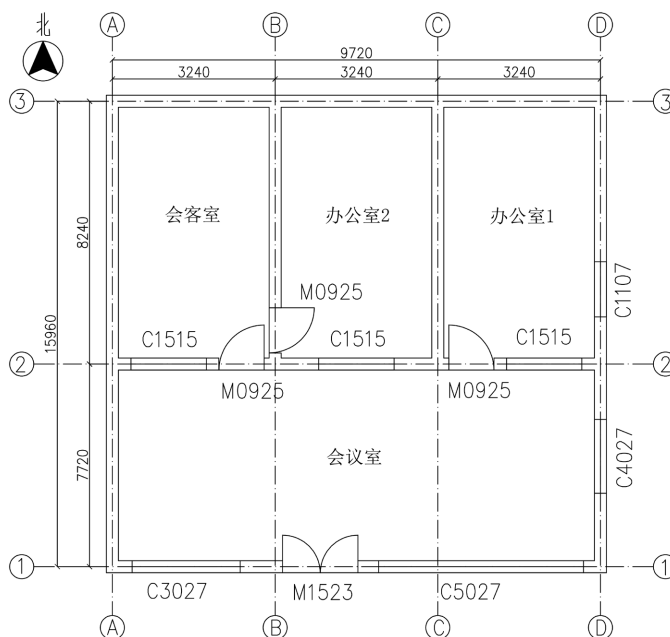


Figure 1. Architectural floor plan

图 1. 建筑平面图

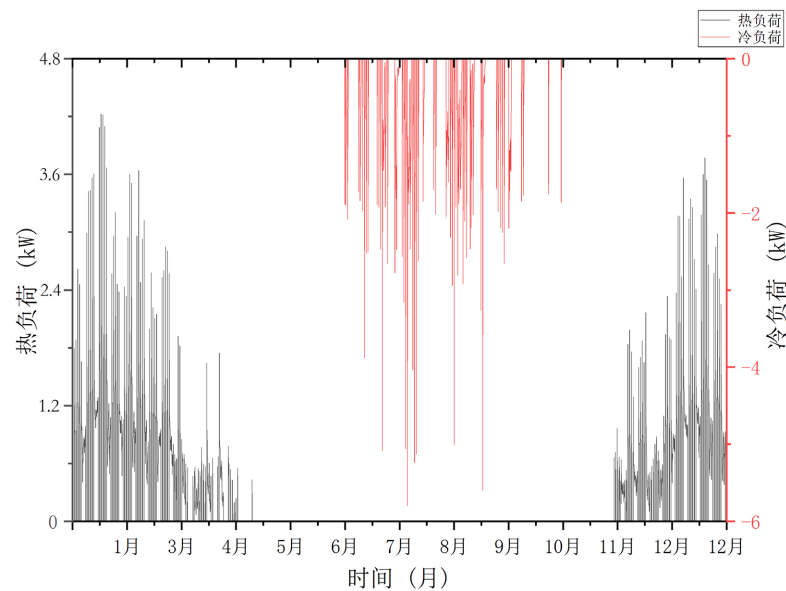


Figure 2. The building's cooling and heating loads are computed hour by hour
图 2. 建筑全年逐时冷、热负荷

Table 1. The envelope and thermal parameters of the building
表 1. 建筑的围护结构及热工参数

项目	构造	传热系数(W/m ² ·K)	备注
外墙 整体情况	240 mm 砖墙	1.99	外墙水泥压光、无外保温
	20 mm 水泥砂浆		
	10 mm 石灰抹白		
内墙 整体情况	240 mm 砖墙	2.42	墙体两侧白灰砂浆抹面、刷涂料
外窗 玻璃类型	单层铝合金门窗	4.5	距地 1.2 米
大门 整体类型	带窗铝合金门(外门)	5	内门为木门
屋顶 建筑材料	20 mm 水泥砂浆	6.7	平屋顶, 无保温
	120 mm 钢筋混凝土		
	15 mm 水泥砂浆		
地面 整体情况	20 mm C20 水泥面层	—	地面敷设有瓷砖
	100 mm C10 混凝土垫层		

2.2. 建筑冷、热负荷

该独立建筑的供能房间为办公室 1、办公室 2，供能设定条件见表 2。利用 DeST 软件对该建筑全年动态冷、热负荷进行计算，通过将围护结构的热工参数输入到软件中，得到该建筑的全年逐时冷、热负荷如图 2 所示。

Table 2. Building energy supply setup parameters
表 2. 建筑供能设定参数

供能阶段	供能时间	设定温度	Dest 设置参数
供暖季 (11 月 1 日~次年 4 月 1 日)	8:00~17:30	22℃	室温上/下限: 28/18℃ 空调启动温度上/下限: 26/22℃
制冷季 (6 月 1 日~10 月 1 日)		26℃	办公室 1 最多人数: 2 办公室 2 最多人数: 1

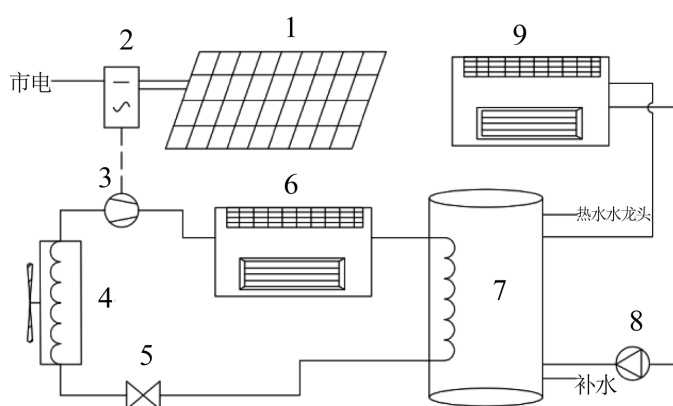
由建筑全年逐时冷、热负荷图像可知,建筑的热负荷在 11 月份呈上升趋势,2 月、3 月逐渐下降;冷负荷在 6~8 月份呈上升趋势,9 月份呈下降趋势。该建筑的最大逐时热负荷出现在 1 月份为 4.22 kW,平均热负荷为 2.78 kW,供暖期间建筑的采暖总负荷为 3336 kWh;最大逐时冷负荷出现在 8 月份为 5.73 kW,平均冷负荷为 4.18 kW,制冷期间建筑的总负荷为 5016 kWh。

3. 系统原理

3.1. 主要组成

如图 3 所示,系统由光伏直驱空气源热泵系统与储热水箱供热、制冷系统两部分组成,光伏直驱空气源热泵系统由太阳能光伏板 1、光伏逆控一体机 2、交流变频压缩机 3、蒸发器 4、膨胀阀 5 和冷媒暖风机 6 组成,储热水箱系统包括储热水箱 7、循环水泵 8 和水系统暖风机 9。

系统实物图如图 4 所示,图中 1~6 分别为太阳能光伏板、低温热泵室外机、冷媒暖风机、储热水箱、循环水泵和水系统暖风机。设备详细参数见表 3,系统整体安装费用约为 1000 元。



1.光伏板 2.光伏逆控一体机 3.交流变频压缩机 4.蒸发器 5.膨胀阀
6.冷媒暖风机 7.储热水箱 8.供暖循环水泵 9.水系统暖风机

Figure 3. The main components of the system

图 3. 系统主要组成



Figure 4. Physical diagram of the system

图 4. 系统实物图

Table 3. Device parameter table for the system
表 3. 系统设备参数表

设备名称	参数	数值	价格(元)
太阳能光伏直驱空气源热泵	额定电压	220 V	6900
	额定频率	50 Hz	
	制热量	4 000 W	
储热水箱	额定容量	150 L	2300
	保温材料/厚度	聚氨酯/42 mm	
	额定压力	0.70 MPa	
水系统暖风机	室内循环风量	650 m ³ /h	1200
光伏板	—	LG450	4500

3.2. 系统工作原理

系统使用光伏电 + 市电联合供能, 太阳能光伏板将接收到的太阳能转化为直流输出的电能, 直流电流经过光伏逆控一体机转变为具有稳定功率的交流电流, 当太阳光强度较小时主动接入市电, 以保证设备输出交流电压稳定且满足后端低温变频室外机正常工作的用电需求。

供暖时交流变频压缩机将流经的气态工质 R410a 压缩升温, 高温高压的工质进入位于办公室 1 的暖风机, 暖风机带动室内空气流过盘管进行间接式换热。工质流出暖风机后进入设置于办公室 2 的储热水箱, 通过套管换热器加热水箱中的水。最后通过膨胀阀到达蒸发器, 蒸发器风扇带动室外空气与工质进行热量交换, 吸收室外空气的热量, 完成第一级的供热循环。水系统供热环路的循环水泵将暖风机中的低温水抽出, 注入储热水箱, 低温水在水箱中吸收套管换热器散出的热量升温, 高温水从储热水箱上端流至暖风机内的盘管, 风机带动室内空气进行换热, 吹出热风, 完成第二级的供热循环。制冷时系统的运行模式与供热时相反。

双介质系统避免室外循环管路受低温影响冻结, 并可在非供暖、制冷季节供应热水, 提高经济效益。

3.3. 系统性能评价指标

本系统虽增设二级供热循环, 但整体性能参数可按照太阳能光伏直驱空气源热泵供暖系统评价方式进行计算, 包括光电转换效率、热泵机组制热效率。

其中光电转换效率 η_{pv} 可由式(1)表示:

$$\eta_{pv} = \frac{Q_e}{Q_{sun}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, Q_e ——压缩耗电量, kJ; Q_{sun} ——光伏组件接收到的太阳能的量, kJ; 热泵机组制热效率 COP_{hp} 可由式(2)表示:

$$COP_{hp} = \frac{Q_h}{Q_e} \quad (2)$$

式中, Q_h ——热泵机组制热量, kJ; Q_e ——压缩机耗电量, kJ; 光伏组件接收到的太阳能的量 Q_{sun} 是将逐时接收量累计得到, 可由式(3)得出:

$$Q_{sun} = \int I(t) A dt \quad (3)$$

式中, I ——瞬时太阳辐照度, W/m²; t ——系统运行时间, h; A ——光伏板面积, m²。

4. 运行效果分析

本文分别于1月1日~1月6日、7月24日~7月30日在该建筑进行了温度测试,室内温度设定如前文所述,室内外温度测试数据见图5所示(机组未运行时间段不记录)。由图5可知,1月1日~1月6日中环境最低温度出现在2日8时为 -5°C ,7月24日~7月30日中环境最高温度出现在25日15时为 34.9°C 。室内温度基本维持稳定,光伏直驱空气源热泵双介质暖风机供暖、制冷系统可以满足严寒期、高温期的供热、制冷需求。

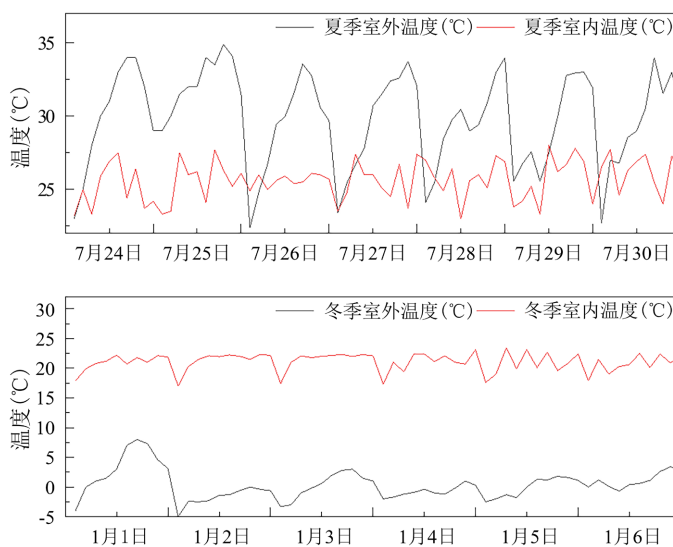


Figure 5. Temperature test results

图5. 温度测试结果

4.1. 实验用能结果

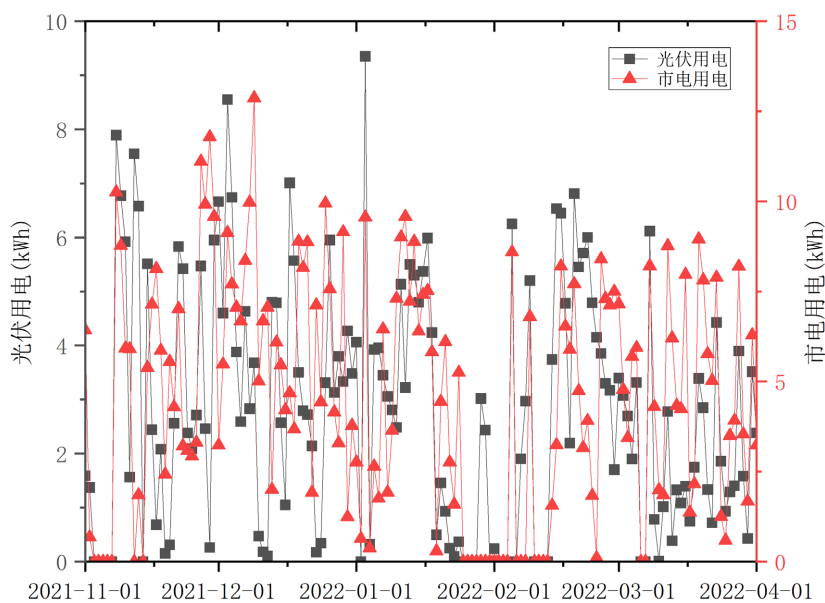


Figure 6. The power consumption of the system during heating

图6. 供暖期间系统用电情况

该建筑位于石家庄市鹿泉区，供暖期为 2021 年 11 月 1 日~次年 4 月 1 日，其中因使用需求有 32 天未进行供暖，总采暖天数为 120 天。总电耗包含主机耗电与水泵耗电，经系统逐时统计光伏、市电用电量，将此供暖期间逐日光伏、市电用电量情况绘制如图 6 所示。经统计，冬季供暖期间总耗电量 1116.37 kWh，其中市电消耗 692.31 kWh，占比 62.01%，光伏供电 424.06 kWh，占比 37.99%。根据前文所计算建筑热负荷，可得系统冬季平均制热效率 COP_{hp} 为 2.99。

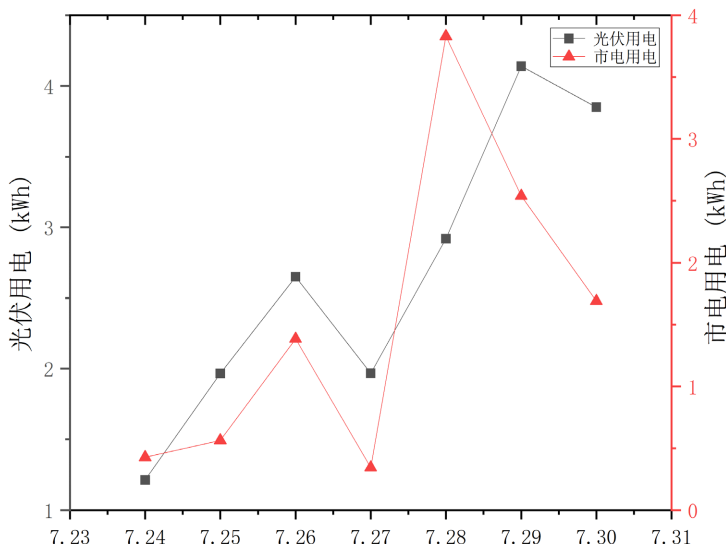


Figure 7. The power consumption of the system during the experiment
图 7. 实验期间系统用电情况

夏季制冷实验测试期为 7 月 24 日~7 月 30 日，为期 7 天，测试期间光伏、市电用电情况如图 7 所示。经统计，试验期间总耗电量 29.49 kWh，其中市电消耗 10.78 kWh，占比 36.55%，光伏供电 18.71 kWh，占比 63.45%。由夏季实验期间制冷数据得出光伏直驱空气源热泵双介质暖风机制冷系统整个夏季制冷耗电约为 1005.54 kWh，其中市电消耗 367.52 kWh，光伏供电 638.02 kWh。根据前文所计算建筑冷负荷，可得系统夏季平均制冷效率 COP_{hp} 为 4.99。

4.2. 同电暖气供暖方式对比

Table 4. Hebei province electricity price ladder charging standard
表 4. 河北省电价阶梯式收费标准

用电分类	电压等级	电度电价(元/千瓦时)			
		平段	高峰	低谷	
一户一表	不满 1 千伏	第一档	0.52	0.55	0.30
		第二档	0.57	0.60	0.35
		第三档	0.82	0.85	0.60

鹿泉区居民生活用电电压处于 1~10 千伏之间，河北省电价阶梯式收费标准见表 4，该建筑供暖时间处于白天 8:00~18:00 之间，若使用电暖气采暖方式，设电暖气转化率为 0.98，可计算出耗电量为 3404.08 kWh，单位电价为 0.52 元/kWh，计算得出供暖期间采用电暖气供暖，费用为 1770.12 元，即

36.88 元/m²。若采用光伏直驱空气源热泵双介质暖风机供暖系统，由实验结果可知供暖费用为 360 元，即 7.5 元/m²。

4.3. 能耗对比

为直观展示光伏直驱空气源热泵双介质暖风机供冷、暖系统的耗能情况，本节将该系统同普通空气源热泵系统、光伏直驱空气源热泵系统的能耗进行理论计算对比。在对比系统选型时考虑了以下几点：普通空气源热泵选用市场现有规格，需满足建筑供能需求；光伏直驱空气源热泵在满足建筑供能需求前提下选用与普通空气源热泵系统参数相同的配置；为简化计算，视光伏直驱空气源热泵系统光伏供电量与双介质系统相同。三种系统的详细参数见表 5。

Table 5. Parameters of three air source heat pump energy supply systems

表 5. 三种空气源热泵供能系统的参数

参数		普通空气源热泵	光伏直驱空气源热泵	光伏直驱空气源热泵双介质暖风机系统
室外机	制热量	4500 W	4500 W	4000 W
	输入功率	1000 W	1000 W	1100 W
室内机	水系统暖风机	650 m ³ /h	650 m ³ /h	650 m ³ /h
	冷媒暖风机	—	—	650 m ³ /h
光伏板	规格型号	—	LG450	LG450
储热水箱	额定容量	120 L	120 L	150 L

三种系统对目标建筑供暖、制冷的能耗见表 6 和图 8 所示，对比图、表数据可知：普通空气源热泵总耗电量为 2509.69 kWh；光伏直驱空气源热泵总能耗与普通空气源热泵系统相同，市电消耗量为 1447.61 kWh；双介质系统主机能耗略高于其他系统，而水泵能耗显著低于其他系统。较双介质暖风机系统，普通空气源热泵及光伏直驱空气源热泵供暖、制冷市电消耗量分别高出 57.77%、26.79%。

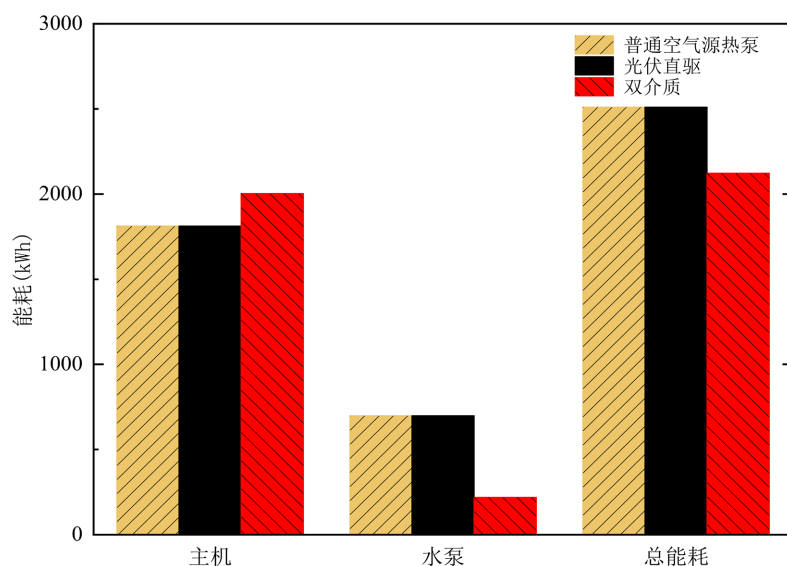


Figure 8. System energy consumption of three types of air source heat pumps

图 8. 三种空气源热泵供能系统能耗

Table 6. System energy consumption of three types of air source heat pumps (Unit: kWh)
表 6. 三种空气源热泵供能系统能耗(单位: kWh)

机组设备	普通空气源热泵	光伏直驱空气源热泵	光伏直驱空气源热泵双介质暖风机系统
主机	1856	1856	2003.29
水泵	653.69	653.69	118.62
总能耗	2509.69	2509.69	2121.91

测试中, 总电耗包含主机耗电与水泵耗电, 故总能耗与主机能耗差值为水泵能耗。双介质系统在结构上使用“冷媒 + 水介”暖风机, 因此较其他两种系统的输配能耗显著降低, 即利用“大温差、小流量”与“冷媒暖风机替代部分暖风机”两种方式降低水泵能耗。双介质系统中的冷媒经过蓄热水箱传热, 温度发生了变化, 使主机冷凝温度提高, 故主机的能耗高于其它系统, 但通过降低输配能耗, 使得系统整体能耗较其他系统降低了 15.45%。

Table 7. Economic benefits of three cooling and heating methods (Unit: yuan)
表 7. 三种制冷、供暖方式的效益分析(单位: 元)

对比项目	普通空气源热泵	光伏直驱空气源热泵	光伏直驱空气源热泵双介质暖风机系统	对比结果
初投资	9790	14,290	15,900	6110/1610
15 年运行费用	19575.58	11291.36	8266.67	11308.91/3024.68
残值	979	1429	1590	611/161
静态费用值	28386.58	24152.36	22576.67	5809.91/1575.68
动态费用值	2313.04	2224.10	2188.22	124.82/35.88

4.4. 经济性分析

为更好地分析光伏直驱空气源热泵双介质暖风机供冷、暖系统的经济性, 对前节所述三种模式进行对比计算。所选用的普通空气源热泵设备及安装成本为 9790 元, 光伏直驱空气源热泵设备及安装成本为 14,290 元, 光伏直驱空气源热泵双介质暖风机供冷暖系统的设备及安装成本为 15,900 元。根据前节所得使用三种系统对目标建筑进行供暖、制冷的总耗电量分别为 2509.69 kWh、2509.69 kWh、2121.91 kWh, 其中总市电消耗量分别为 2509.69 kWh、1447.61 kWh、1059.83 kWh, 结合石家庄地区的用电费用, 假设三种供能方式的热泵均能够供能 15 年, 系统残值为 10%, 则三种供能方式的动态费用可通过式(4)计算,

$$F = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \times K + C \quad (4)$$

式中, F ——系统动态费用年值, 元/年; K ——系统初投资, 元; C ——系统 15 年运行费用, 元; i ——利率, %, 取 6%; n ——系统使用寿命, 年。

通过上述计算可得出三种供暖、制冷方式运行 15 年的经济效益对比情况, 结果见表 7。由表 7 中各项的对比结果可知, 在相同使用年限下, 光伏直驱空气源热泵双介质暖风机供冷暖系统的经济效益更为良好, 较普通空气源热泵系统能够产生约 18,150 元的经济效益, 较光伏直驱空气源热泵系统能够产生约 4900 元的经济效益, 并且在节能效果上更具有优势。

5. 结论

1) 通过实际测量, 得出使用光伏直驱空气源热泵双介质暖风机供暖、制冷系统为某独立建筑供暖总耗电 1116.37 kWh, 其中光伏电占比 37.99%, 整个供暖期采暖费用为 7.5 元/m²; 制冷总耗电 1005.54 kWh, 其中光伏电占比 63.45%, 整个制冷期制冷费用为 3.98 元/m²。冬季平均制热效率 COP_{hp} 为 2.99, 夏季平均制冷效率 COP_{hp} 为 4.99, 该系统可以满足严寒期、高温期的供热、制冷需求。

2) 与电暖气采暖方式相比, 更具有环保性与经济性。若使用光伏直驱空气源热泵双介质暖风机进行供暖, 供暖费用降低 79.66%。

3) 同普通空气源热泵、光伏直驱空气源热泵系统相比, 光伏直驱空气源热泵双介质暖风机供暖、制冷系统在运行能耗上降低了 15.45%, 在市电消耗量上分别降低 57.77%、26.79%, 具有更优异的经济效益。

4) 双介质系统避免室外循环管路受低温影响冻结, 并可在非供暖、制冷季节供应热水, 提高经济效益。

综合来看, 在光伏直驱空气源热泵系统中搭载双介质暖风机、利用储热水箱增大冷冻侧温差的供暖、制冷方式是可行的、有明显节能效果和经济性效益的, 对于北方农村独立建筑的清洁采暖有着一定的帮助。该系统的控制策略还有优化的空间, 非供暖、制冷季节若将光伏电用于驱动各类生活电器形成户内微型电网, 该系统的经济效益会进一步提高。

基金项目

河北省建设科技研究指导性计划项目“河北省集中供热系统储热应用研究”2021~2002; 中央引导地方科技发展资金项目“农村集中式清洁供热集成调控技术优化与示范”216Z4505G。

参考文献

- [1] 熊兴. “双碳”目标下全球能源治理改革的中国方案[J]. 社会主义研究, 2022(1): 155-162.
- [2] 陈健勇, 李浩, 陈颖, 等. 空气源热泵空调技术应用现状及发展前景[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 25-39.
- [3] Yao, J., Dou, P.B., *et al.* (2022) Co-Generation Ability Investigation of the Novel Structured PVT Heat Pump System and Its Effect on the “Carbon Neutral” Strategy of Shanghai. *Energy*, **239**, Article 121863. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121863>
- [4] Zhang, Y.C., Xia, J.J., Fang, H., Jiang, Y. and Liang, Z.W. (2020) Field Tests on the Operational Energy Consumption of Chinese District Heating Systems and Evaluation of Typical Associated Problems. *Energy and Buildings*, **224**, Article 110269. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110269>
- [5] 徐向宇, 徐政, 李光明. 光伏空气源热泵的研究与开发[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1): 356-361.
- [6] 张东, 刘鹏飞, 刘春阳, 等. 太阳能 PV/T 光储直驱热电联产系统性能[J]. 化工进展, 2023, 42(6): 2895-2903. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1467>
- [7] 张思亮, 祁麟童, 曲浩维, 等. 光伏发电辅助空气源热泵供暖系统研究[J/OL]. 综合智慧能源, 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1461.TK.20230901.1840.004.html>, 2023-12-17.
- [8] 王恩宇, 程永昌, 张学友, 等. 光伏直驱的太阳能跨季节储热系统试验研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(9): 1181-1187. <https://doi.org/10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2023.09.009>
- [9] 闪锦淮. 光伏直驱空调系统性能的理论及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2021. <https://doi.org/10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.003739>
- [10] 彭胜男. 适用于北方农村独立民居的光伏——空气源热泵联合供热系统研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [11] 刘家琦. 太阳能和空气源热泵联合供热系统[J]. 洁净与空调技术, 2022(2): 81-83.
- [12] 王良, 李明, 韩友华, 等. 光伏直驱空气源热泵储能供暖性能分析[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 159-166.
- [13] Sterling, S.J. and Collins, M.R. (2012) Feasibility Analysis of an Indirect Heat Pump Assisted Solar Domestic Hot Water System. *Applied Energy*, **93**, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.050>

- [14] 贡静宝. 太阳能-空气源双热源复合热泵系统运行特性及优化控制研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [15] 王满鹏. 太阳能辅助空气源热泵系统的 TRNSYS 动态模拟[J]. 甘肃科技纵横, 2022, 51(5): 29-32.
- [16] 耿秀, 胥小龙, 刘馨, 等. 太阳能与空气源热泵耦合供热系统运行特性分析[J]. 建设科技, 2022(10): 82-85.
- [17] 马坤茹, 李雪峰, 李思琦, 等. 新型太阳能/空气能直膨式热泵与空气源热泵供热性能对比[J]. 化工学报, 2020, 71(S1): 375-381.
- [18] James, A., Srinivas, M., *et al.* (2021) Experimental Studies on Photovoltaic-Thermal Heat Pump Water Heaters Using Variable Frequency Drive Compressors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **45**, Article 101152. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101152>
- [19] Zhang, S., He, W., *et al.* (2022) Field Experimental Investigation on Electricity and Thermal Performances of a Large Scale Photovoltaic Solar-Thermal Direct Expansion Heat Pump System. *Energy Conversion and Management*, **267**, Article 115941. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115941>