

文章编号: 1671-6612 (2024) 03-337-08

太阳能 PV/T+相变能与直蒸式水源热泵 供热(冷)系统特性分析

杨国栋^{1,2} 张昌建^{1,2} 罗景辉^{1,2} 彭磊^{1,2} 姜钊乐^{1,2} 李沛源^{1,2}

(1. 河北工程大学 邯郸 056038; 2. 河北省暖通空调工程技术创新中心 邯郸 056038)

【摘要】 为解决河北农村建筑清洁供暖问题和太阳能利用具有不稳定性问题, 设计了太阳能 PV/T+相变能与直蒸式水源热泵供热(冷)系统进行实验研究。实验结果表明, 冬季典型日系统发电量为 4.453kWh, 制热系数 COP 平均值 3.41; 夏季典型日系统发电量为 5.945kWh, 制冷系数 EER 平均值 3.2; 将发电量用于系统运行, 制热系数 COP 为 4.22, 制冷系数 EER 为 4.19, 分别提高了 23.75% 和 30.12%; 夏季单纯 PV/T 太阳能电池发电量 5.537kWh, 本系统的发电量提高了 7.37%。该系统经济效益高, 运行稳定, 是一种实现河北农村清洁供暖有效途径。

【关键词】 太阳能 PV/T; 发电效率; 直蒸式水源热泵; 相变能; 系统性能系数
中图分类号 TU831.6 文献标志码 A

Characteristics Analysis of the Heating (Cooling) System of Direct Evaporation Water Source Heat Pump Coupled with Solar PV/T and Phase Change Energy

Yang Guodong^{1,2} Zhang Changjian^{1,2} Luo Jinghui^{1,2} Peng Lei^{1,2} Jiang Zhaole^{1,2} Li Peiyuan^{1,2}

(1. Hebei University of Engineering, Handan, 056038;

2. Hebei HVAC Engineering Technology Innovation Center, Handan, 056038)

【Abstract】 In order to solve the problem of clean heating and the instability of solar energy utilization in rural buildings in Hebei province, solar PV/T+ phase change energy and direct evaporation water source heat pump heating (cooling) system were designed for experimental research. The experimental results show that the typical daily power generation in winter is 4.453kWh, and the average heating coefficient COP is 3.41. The typical daily power generation of the system in summer is 5.945kWh, and the average value of the cooling coefficient EER is 3.2. The heating coefficient COP and cooling coefficient EER are 4.22 and 4.19 respectively, which are increased by 23.75% and 30.12% respectively. In summer, the power generation of pure PV/T solar cells is 5.537kWh, and the power generation of this system is increased by 7.37%. The system has high economic benefit and stable operation, and is an effective way to realize clean heating in rural areas of Hebei Province.

【Keywords】 Solar PV/T; Power generation efficiency; Direct steam water source heat pump; Phase change energy; System coefficient of performance

0 引言

在“碳达峰, 碳中和”节能减排的时代背景下,

太阳能在替代传统化石能源方面不仅在中国异军突起, 而且在全世界范围内都备受青睐。太阳能作

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(236Z4310G); 河北省重大科技成果转化项目(2284102Z);
河北省暖通空调技术创新中心绩效补助项目(22567691H)

作者(通讯作者)简介: 杨国栋(1998-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1402855402@qq.com

收稿日期: 2023-10-27

为清洁能源的优异表现主要体现在：（1）太阳能、相变能的角色逐步转变，由辅助能源变为主要能源^[1]；（2）得益于光伏光热组件技术的快速发展，太阳能光伏发电成本显著降低，太阳能光伏光热（photovoltaic-thermal, PVT）+相变能技术得到广泛应用^[2,3]；（3）乡村振兴战略和双碳目标^[4]要求高质量发展、降低能耗、提高能源利用率，按下了绿色能源发展的加速键，太阳能光伏发电取热技术是目前最具有发展前景的可再生能源应用技术^[5]。

随着时间和技术的发展传统太阳能供暖系统的弊端也逐渐暴露出来，太阳能系统存在的主要问题有：（1）太阳能利用率低，输出不稳定^[5,6]；（2）太阳能板背面温度过高，废热无法利用且抑制发电导致发电效率低^[7]；（3）太阳的辐照度^[8]受季节、天气、地理位置等自然条件影响大，存在不稳定性和间歇性；（4）末端设备对水的温度要求高导致太阳能板每天的有效工作时间短。

针对上述太阳能利用方式存在的弊端和问题本文设计了太阳能 PV/T+相变能与直蒸式水源热泵协同供暖系统。搭建实验平台，对太阳能 PV/T+相变能与直蒸式水源热泵协同供暖系统的工作原理和运行结果进行分析，希望能用一种新型的供暖方式解决河北村镇建筑清洁供暖问题。

1 系统原理与工艺

太阳能 PV/T+相变能与直蒸式水源热泵协同供暖系统原理是 PV/T 太阳能板可以将太阳辐射能转化为电能和热能，直蒸式水源热泵消耗少量电能可以将太阳能板产生热能以及水箱中水的显热和水—冰相变的潜热低品位热能转化成高品位热能向房间供暖。

系统工艺主要有 4 个过程。PV/T 太阳能板发电过程：太阳辐射能太阳能板正面发电—逆变器—储能电池—电用户；乙二醇溶液取热过程：（白天）蒸发器—循环水泵—太阳能板背面换热器—水源热泵蒸发器（蓄热水箱融冰）—循环水泵—蒸发器，（晚上）蒸发器—循环水泵—集水器—盘管换热器—分水器—循环水泵—蒸发器；制冷剂循环过程：蒸发器—压缩机—冷凝器—膨胀阀—蒸发器；用户侧循环过程：冷凝器—热用户—冷凝器（末端）。系统经过以上工作过程最终将热和电为用户所用。系统原理与工艺如图 1 所示。

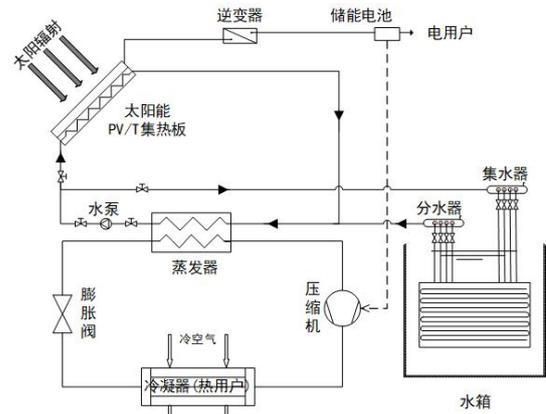


图 1 系统原理与工艺

Fig.1 System principle and technology

2 实验设备及测试内容

2.1 实验平台的组成

实验平台由（1）4 块 PVT 太阳能板；（2）逆变器；（3）蓄电池；（4）直蒸式水源热泵；（5）含有换热盘管的蓄热水箱；（6）水泵；（7）管道和阀门组成。

2.2 实验设备

2.2.1 PVT 太阳能板

本实验 PV/T 技术是通过太阳能板背面换热管中的循环介质带走 PV 组件产生的热能，降低 PV 组件的工作温度，提高发电效率的同时有效回收热能，实现高效的太阳能热电联产。实验选用 4 块 2000mm×1000mm×40mm 的 PV/T 太阳能集热板，面积为 8.0m²，由胶膜保护层、PV 组件层、导热硅胶层、换热管道层、保温层、基础框架组成，PV/T 太阳能板结构^[9]和实物安装图如图 2 所示。



图 2 PVT 太阳能板结构与实物安装图

Fig.2 PVT solar panel structure and physical installation diagram

2.2.2 蓄热水箱

本实验的蓄热水箱^[10]设计尺寸为 1m×1m×1.1m，有效容积为 1m³，外部做保温处理。蓄热水箱内部有与热泵机组连接的盘管换热器，盘管内循

环的是冰点为 -6°C 的乙二醇溶液, 用来吸收水-冰相变潜热能。盘管换热器用的是铝塑管, 管径 DN15, 管长 180m, 有效换热面积 8.48m^2 , 螺旋布置在水箱内且盘管间留有相变结冰的间隙, 盘管换热器进出口安装分集水器便于供回水的流量调节与控制。实验装置如图 3 所示。



图 3 蓄热水箱

Fig.3 Heat storage water tank

2.2.3 其他设备

其他实验设备参数如表 1 所示。

表 1 其他设备参数表
Table 1 Other device parameters

设备	数量	技术参数
直蒸式水源热泵	1 台	压缩机功率 0.6kW, 制冷剂 R410a
逆变器	1 台	型号 FSY-Smart30204-40A, 功率 3000W, 输入电压 155-264VAC 50Hz, 输出电压 220VAC 50Hz, 电池电压 48VAD
储能电池	4 块	型号 6-DZF-12.3(单只), 尺寸 $151\times 99\times 97(\pm 2\text{mm})$, 电压 12V, 容量 12.2AH
循环水泵	1 台	功率 0.1kW

2.2.4 实验测试仪器

实验测试仪器如表 2 所示。

表 2 实验测试仪器

Table 2 Experimental test instruments

仪器	测试范围	精度	厂家
电能综合测试仪	50—70V 0.5—500A	—	上海华盛自动化仪表有限公司
温度自记仪	-20—80 $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$	北京天建华仪科技发展有限公司
温湿度自记仪	温度 -40—100 $^{\circ}\text{C}$ 湿度 0—100%RH	温度 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 湿度 0.1%RH	北京天建华仪科技发展有限公司
无线功率记录仪	—	$\pm 0.05\%$	北京天建华仪科技发展有限公司
液体涡轮流量计	0—20 m^3/h	$\pm 0.5\%$	南京搏声自动化技术有限公司

2.3 实验测试内容

PV/T 太阳能板背板温度、太阳能侧循环介质的供回温度、热泵循环水进出口温度、盘管换热器进出口温度、水箱内水的温度、冷凝器(末端设备)进出风口空气的温度和湿度、出风口风量、热泵机组压缩机和循环水泵功率、PV/T 太阳能电池发电量, 根据测试数据分析准确掌握系统的发电量、取热量以及系统的性能特性。

3 实验测试及数据分析

3.1 实验测试

根据系统原理及工艺流程结合现场实际情况在实验设备相应位置安装温度自记仪、温湿度自记仪、电能综合测试仪、无线功率记录仪。完成实验系统的搭建, 对实验系统进行 3 种不同工况的测试, 采集实验数据并分析不同工况下系统性能参数。

工况 1: 冬季太阳能 PV/T+相变能与直蒸式水源热泵协同供暖系统供暖及发电量测试。实验于 2023 年 1 月 7 日 19:30 开始, 利用水源热泵和蓄热水箱向面积为 60m^2 实验房间供暖, 温度自记仪每 5 分钟记录一次热泵进出口处循环水的温度、盘管换热器进出口处水的温度、蓄热水箱内水的温度, 温湿度自记仪每 5 分钟记录一次冷凝器(末端设备)进出口处空气的温度和湿度, 每 15 分钟手抄记录一次流量计和无线功率记录仪读数。实验运行到 1 月 8 日 8:00 开启太阳能侧循环阀门, 在记录上述数据的基础上温度自记仪每 5 分钟记录一次太阳能侧循环介质供回温度。8:00 打开逆变器, PV/T 太阳能电池开始向储能电池内输入电能, 储能电池通过负载末端设备、循环水泵、热泵机组压缩机、室内照明等方式将电能输出。观察逆变器显示屏, 通过增加和减少储能电池负载始终让电池电

量保持在 70%—80%，最后将储能电池内电量放完，用电能综合测试仪记录储能电池放电量。17:30 无太阳辐射能可用，关闭太阳能侧阀门，继续水源热泵和蓄热水箱供暖。实验进行到 1 月 8 日 19:30，完成 24 小时连续向实验房间供暖。

工况 2：2023 年 7 月 15 日，天气晴，最高气温 36℃。待系统调试运行稳定，8:00 开始测试夏季 PV/T 太阳能电池+蓄热水箱循环水发电量，打开蓄热水箱与太阳能侧循环的阀门，开启逆变器，储能电池开始有电能输入，通过工况 1 改变负载的方式将电能输出，用电能综合测试仪记录储能电池放电量，数据记录方式同实验 1。18:00PV/T 太阳能电池不在有电能生成，实验测试结束，关闭实验系统。2023 年 7 月 16 日，天气晴，最高气温 35℃。待系统调试运行稳定，8:00 开始测试夏季单纯 PV/T 太阳能电池发电量，关闭蓄热水箱与太阳能侧循环的阀门，开启逆变器，储能电池开始有电能输入，通过工况 1 改变负载的方式将电能输出，用电能综合测试仪记录储能电池放电量。直到 PV/T

太阳能电池不在有电能生成，实验测试结束，关闭实验系统。

工况 3：夏季直蒸式水源热泵+蓄热水箱系统供冷测试。利用水源热泵和蓄热水箱向面积为 60m² 实验房间供冷，实验与 2023 年 7 月 17 日 9:00 开始，开启热泵机组和循环水泵，冷凝器（末端设备）调成夏季制冷模式，运行系统，温度等数据记录方式同工况 1。系统运行到 16:00 制冷结束，关闭系统。

3.2 数据采集

工况 1：系统参数表示：热泵进出口温差 t_1 ，热泵流量 L_1 ，盘管换热器进口温度 t_2 ，盘管换热器出口温度 t_3 ，冷凝器（末端设备）出风口温度 t_4 ，冷凝器（末端设备）进风口温度 t_5 ，冷凝器（末端设备）出风口湿度 RH_1 ，冷凝器（末端设备）进风口湿度 RH_2 ，风量 L_2 ，太阳能侧循环介质进出口温差 t_6 ，太阳能侧循环流量 L_3 ，太阳能板发电量 E 。鉴于数据量大本文将各参数测试数据从实验开始到结束每 4 小时取一次数据列表如表 3。

表 3 工况 1 实验测试数据

Table 3 Experimental test data of working condition 1

时间	$t_1/^\circ\text{C}$	$L_1/\text{m}^3/\text{h}$	$t_2/^\circ\text{C}$	$t_3/^\circ\text{C}$	$t_4/^\circ\text{C}$	$t_5/^\circ\text{C}$	$RH_1/\%\text{RH}$	$RH_2/\%\text{RH}$	$L_2/\text{m}^3/\text{h}$	$t_6/^\circ\text{C}$	$L_3/\text{m}^3/\text{h}$	E/kWh
19:30	1.10	1.08	4.325	5.25	30.36	7.68	18.25	44.6	234	---	---	---
23:30	0.88	1.052	-0.28	0.06	28.05	7.57	17.83	39.32	235	---	---	---
3:30	0.89	1.047	-0.71	0.59	28.06	7.26	16.47	35.88	235	---	---	---
7:30	0.99	1.10	-0.24	0.2	26.91	7.83	16.25	31.36	251	---	---	---
11:30	1.26	1.12	2.58	1.25	29.28	10.01	14.34	26.95	336	2.6	0.50	238.4
15:30	1.15	1.12	3.74	4.01	30.01	11.09	15.51	29.36	332	1.8	0.46	96.0
19:30	1.00	1.128	1	0.9	26.55	9	18.25	35.35	332	---	---	---

工况 2：系统参数表示：夏季 PV/T 太阳能电池+蓄热水箱循环水发电量 E_1 ，太阳能循环介质进出口温差 t_1 ，循环介质流量 L_1 ，太阳能板背面温度 t_2 ；夏

季单纯 PV/T 太阳能电池发电量 E_2 ，太阳板背面温度 t_3 。鉴于数据量大本文将各参数测试数据从实验开始到结束每 2 小时取一次数据列表如表 4 所示。

表 4 工况 2 实验测试数据

Table 4 Experimental test data of working condition 2

时间	E_1/kWh	$t_1/^\circ\text{C}$	$L_1/(\text{m}^3/\text{h})$	$t_2/^\circ\text{C}$	E_2/kWh	$t_3/^\circ\text{C}$
8:30	0.085	1.3	0.921	29.1	0.074	29.7
10:30	0.268	2.300	0.948	35.200	0.243	38.775
12:30	0.436	2.900	0.980	42.117	0.416	61.275
14:30	0.445	2.575	1.000	44.692	0.407	65.075
16:30	0.252	1.600	1.010	43.642	0.230	61.050
18:30	0.065	0.200	1.011	38.625	0.069	50.925

工况 3：系统参数表示：冷凝器（末端设备）

出风口温度 t_1 ，冷凝器（末端设备）进风口温度 t_2 ，

冷凝器(末端设备)出风口湿度 RH_1 , 冷凝器(末端设备)进风口湿度 RH_2 , 风量 L_2 , 压缩机功率 P 。鉴于数据量大本文将各参数测试数据从实验开始到结束每 1 小时取一次数据列表如表 5 所示。

表 5 工况 3 实验测试数据

Table 5 Experimental test data of working condition 3

时间	t_1 °C	RH_1 %RH	T_2 °C	RH_2 %RH	L_2 m ³ /h	P W
9:00	17.8	81.9	29.3	55.3	546	745
10:00	16.4	86.4	29.8	52.4	534.8	786
11:00	16.2	86.1	30.3	47.3	541.3	823
12:00	16.5	86.3	30.7	46.8	545.8	857
13:00	16.8	86.0	31.5	43.7	540.5	890
14:00	17.1	85.4	31.9	42.0	547.8	923
15:00	17.7	85.1	32.6	40.7	547.5	948
16:00	18.2	84.3	32.8	41.0	557.0	970

3.3 实验数据处理与分析

工况 1: 对 PV/T 太阳能板发电量和循环水温度数据进行处理可以得到发电量及循环水温度和流量曲线图如图 4、图 5 所示。

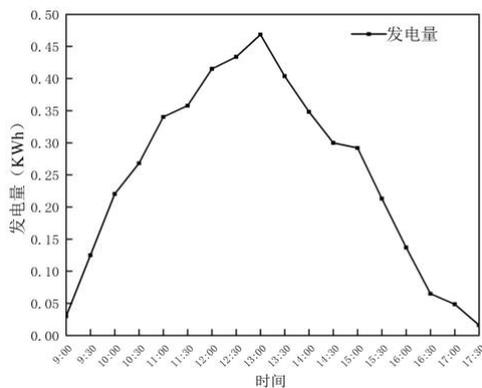


图 4 发电量

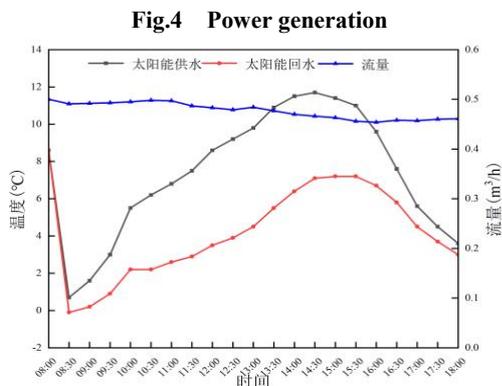


图 5 太阳能回水温度、流量

Fig.5 Temperature and flow rate of solar water supply and return

经计算冬季一个典型日 4 块 PV/T 太阳能板的发电量为 4.45kWh, 发电期间从太阳能板背面取热量为 66401.18kJ。

根据 PV/T 太阳能集热器的发电效率和集热效率公式^[11]:

$$\eta_e = \frac{Q_e}{A_c G} \quad (1)$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A_c G} \quad (2)$$

式中: η_e 为发电效率; η_{th} 为集热效率; A_c 为集热器的面积, m²; G 为入射的太阳辐射能, kJ/m²。

根据邯郸市 1 月份太阳辐射能辐照强度为 15081kJ/m², 计算可得本实验中冬季 PV/T 太阳能板的发电效率为 13.29%, 集热效率为 55.04%, 太阳能综合利用率为 68.33%。

对直蒸式水源热泵和蓄热水箱实验测得的数据进行处理计算可以得到蒸发器吸热量、冷凝器放热量、系统 COP 和蓄热水箱内温度变化曲线图如图 6、图 7 所示。

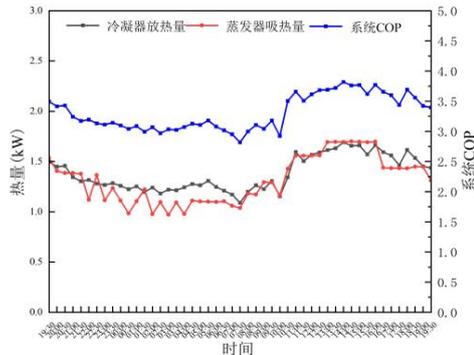


图 6 热量变化、系统 COP 曲线图

Fig.6 Heat change and COP curve of the system

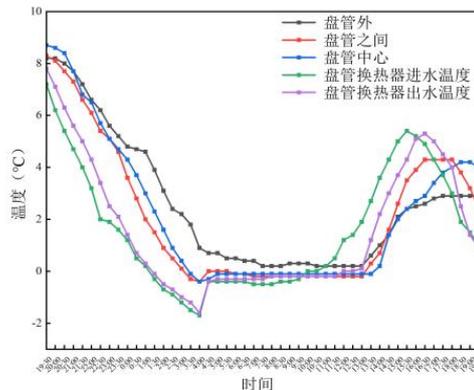


图 7 蓄热水箱内温度变化曲线图

Fig.7 Temperature change curve of the hot water storage tank

经计算实验测试期间冷凝器（末端设备）向房间供热量为 239337kJ 满足冬季房间供热需求，系统 COP 的平均值为 3.41。将系统的发电量用于供热泵机组运行系统 COP 为 4.22。从图 7 中可以看出蓄热水箱的工作特点为显热量可以供系统运行 7 个小时，水—冰相变潜热能供系统运行 4 个小时，盘管换热器 4 个小时完成融冰，蓄热水箱设计尺寸可以满足本系统的供暖需求。

工况 2：通过 7 月 15、16 日对两组实验的测试，得出两种不同系统太阳能板的发电量、太阳能背板温度变化、取热量曲线图如图 8、图 9、图 10 所示。

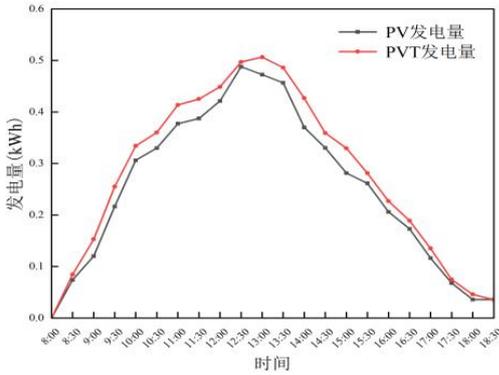


图 8 发电量

Fig.8 Power generation

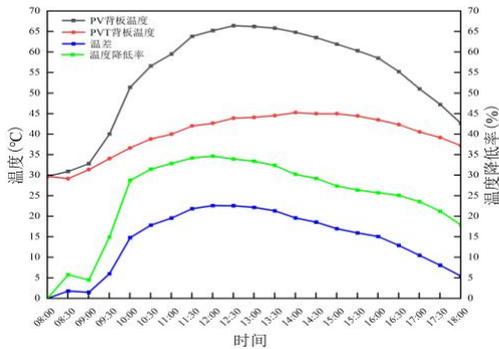


图 9 背板温差

Fig.9 Backplate temperature difference

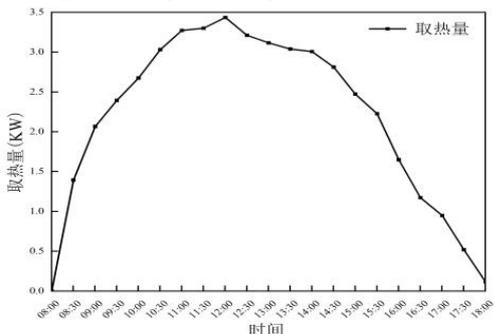


图 10 取热量

Fig.10 Heat intake

两组实验的测试时间同为 8:00—18:00，经计算实验结果为 PV/T 太阳能电池+蓄热水箱系统的发电量为 5.945kWh，太阳能电池背板温度波动 15.5℃，循环水从太阳能电池背板取热量为 82218.71kJ；单纯 PV/T 太阳能电池发电量为 5.537kWh，太阳能板背面温度波动 36.9℃。

根据邯郸市 7 月份太阳能辐照强度为 16215kJ/m²，利用公式（1）（2）可以计算 PV/T 太阳能电池+蓄热水箱系统中 PV/T 太阳能板夏季的发电效率为 16.5%，集热效率为 63.38%，太阳能综合利用率为 79.88%。单纯 PV/T 太阳能板发电效率为 15.37%。通过对比，PV/T 太阳能电池+蓄热水箱系统的发电效率提升了 7.37%。

从图 9 中可以看出通过循环水带走太阳能电池产生的热能可以将太阳能电池发电时的最高工作温度从 66.6℃降至 43.8℃，最大工作温度降低了 34.2%，提升了 PVT 太阳能板的发电效率。实现 PVT 太阳能板在发电的同时取热，提高了对太阳能的综合利用率。利用 Origin 软件对背板温差和发电增益进行拟合得到两者的函数关系式为：

$$y = -0.5485 + 3.87987E(-9)e^{\frac{(x+36.887)}{4.093}} + 0.5194e^{\frac{(x+36.887)}{624.398}}$$

温差和发电增益的函数关系曲线如图 11 所示。

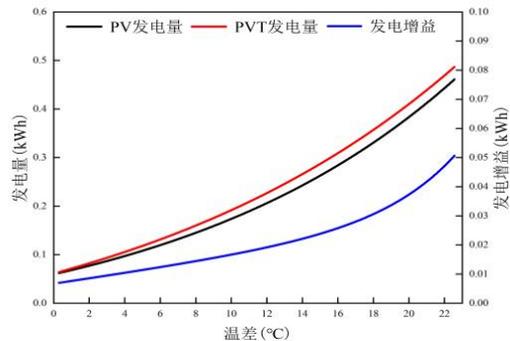


图 11 温差和发电增益关系曲线图

Fig.11 Relationship between temperature difference and generation gain

工况 3：通过 7 月 17 日实验测试数据处理计算，实验期间直蒸式水源热泵+蓄热水箱系统向房间的供冷量为 139405kJ，满足夏季（9:00—16:00）房间的供冷需求。水源热泵机组制冷系数 EER 平均值为 3.2，将系统发电量用于热泵机组运行系统制冷系数 EER 为 4.19。系统的制冷量及制冷系数曲线与如图 12 所示。

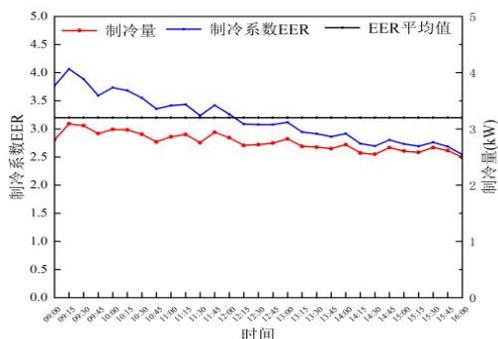


图 12 制冷量及制冷系数曲线图

Fig.12 Refrigeration capacity and refrigeration coefficient curves

对本实验系统在供暖季 1 月 3 日到 1 月 22 日进行为期 20 天和供冷季 7 月 10 日到 7 月 24 日为期 15 天的跟踪监测。供暖季实验房间典型日逐时温度变化曲线图和 20 天每日房间平均温度变化曲线图如图 13、图 14 所示。供冷季实验房间典型日逐时温度变化曲线图和 15 天每日房间平均温度变化曲线图如图 15、图 16 所示。

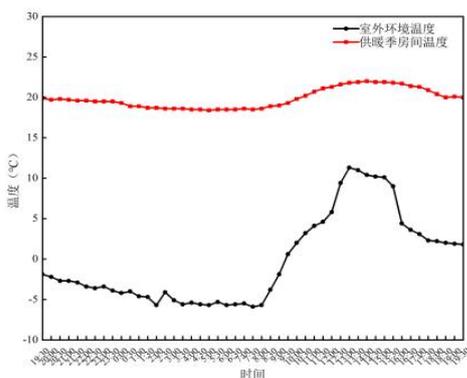


图 13 供暖季房间逐时温度变化曲线图

Fig.13 Hourly temperature variation curve of room in heating season

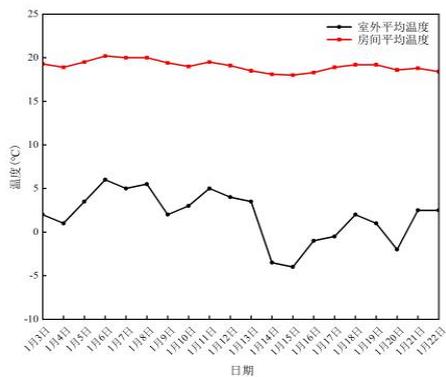


图 14 供暖季 20 天每日房间温度变化曲线图

Fig.14 Daily room temperature variation curve for 20 days in heating season

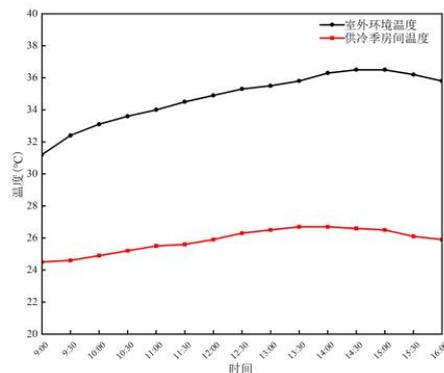


图 15 供冷季房间逐时温度变化曲线图

Fig.15 Hourly temperature variation curve of the room in the cooling season

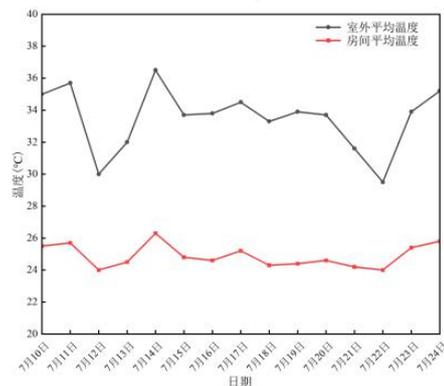


图 16 供冷季 15 天每日房间温度变化曲线图

Fig.16 Daily room temperature variation curve for 15 days in the cooling season

从图 13 至图 16 可以发现房间的逐时温度和每日平均温度的变化曲线的变化趋势都跟室外环境温度的变化趋势基本一致,原因是实验房间南向一面朝阳且有门窗受到环境温度波动影响较大。图 13 中供暖季典型日房间逐时温度最低点是 18.4℃出现在凌晨 5:00,此时环境温度也达到最低-5.7℃。图 14 中 20 天监测期内每日房间平均温度在 18—20.2℃之间波动均满足房间供暖温度的要求,最低为 18℃出现在 1 月 15 日,当日室外环境平均温度最低为-4℃室外最低温度为-9℃房间温度受到室外环境温度的影响。图 15、图 16 可以看出供冷季典型日房间 9:00—16:00 温度在 24.5—26.5℃之间波动,15 天监测期内每日 9:00—16:00 房间平均温度基本在 24—26℃之间波动均满足房间供冷温度的要求。

经过上述分析可知,本系统能够适用于北方地区农村建筑供暖、供冷季的需求,且系统运行稳定能源利用率较高。

4 经济性分析

本系统冬季每日发电量为 4.453kWh，取热量为 66401.18kJ，冬季供暖期为 120 天。夏季每日发电量为 5.945kWh，取热量为 83318.7kJ，夏季供冷期为 90 天。春秋季节既不供暖也不制冷，只用来发电

和从 PV/T 太阳能板背面取热，经过测试春秋季节每日平均发电量为 5.199kWh，取热量为 74309.94kJ，春秋季节为 155 天。邯郸市电价为 0.52 元/kWh，经计算^[12]本系统的经济性分析如表 6 所示。

表 6 系统经济分析

Table 6 Systematic economic analysis

供暖/冷方式	系统投资/ 元	运行费用/ (元/年)	发电量收益/ (元/年)	取热量收益/ (元/年)	经济效益/ (元/年)	投资回收期/ 年
太阳能 PV/T 与相变能耦合直蒸式水源热泵协同供暖/冷系统	18000	1278	1112.19	4439.59	5551.78	3.97

5 结论

根据对太阳能 PV/T+相变能与直蒸式水源热泵协同供暖系统的实验测试及分析，得出以下结论。

(1) 太阳能 PV/T+相变能与直蒸式水源热泵协同供暖系统比单纯 PV 太阳能电池的发电效率提高了 7.37%，背板的最大工作温度降低了 34.2%，提高了太阳能的综合利用率。本系统延长了太阳能板的有效工作时长，有效的改善了传统太阳能系统不稳定性 and 间歇性的弱点，可以实现 24 小时全天候供暖。

(2) 本系统冬季制热系数 COP 平均值为 3.41，夏季制冷系数 EER 平均值为 3.2，将发电量用于系统运行系统制热系数 COP 为 4.22，制冷系数 EER 为 4.19，分别提高了 23.75%和 30.12%。可以实现能源的高效利用和有效的降低 CO₂ 等温室气体的排放量，具有较高的环保效益。

(3) 本系统经济效益高，投资回收期短，对河北地区村镇建筑具有普遍适用性。

参考文献:

[1] 王轶辰. “十四五” 可再生能源发展提速[N]. 经济日报, 2022-06-08(006).
 [2] 王祥达, 范满, 徐建伟, 等. 复合型光伏光热一体化(PVT) 热泵系统热电性能研究[J]. 制冷与空调, 2022, 36(3): 346-351.
 [3] CIRÉS E, MARCOS J, DE LA PARRA I, et al. The potential of forecasting in reducing the LCOE in PV plants under ramp-rate restrictions[J]. Energy, 2019, 188:

116053
 [4] 中华人民共和国国家能源局, 农业农村部, 国家乡村振兴局. 加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见[A/OL]. [2021-12-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/content_5666809.htm.
 [5] WANG Y, ZHOU S, HUO H. Cost and CO₂ reductions of solar photovoltaic power generation in China: perspectives for 2020[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 39: 370-380.
 [6] 代彦军. 太阳能 PVT 热泵供热技术及应用[R]. 上海: 第二届国际可再生能源供热技术大会, 2022-04-12.
 [7] 宗琦. 小型太阳能—热泵耦合系统供暖应用研究[J]. 制冷与空调, 2020, 20(9): 71-73.
 [8] FU Huide, ZHAO Xuxin, MA Lei, et al. A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovol-taic/thermal systems[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 140: 1-13.
 [9] 王炳忠. 中国太阳能资源利用区划[J]. 太阳能学报, 1983, (3): 221-228.
 [10] 肖瑶, 钮文泽, 魏高升, 等. 太阳能光伏/光热技术研究现状与发展趋势综述[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 392-404.
 [11] 刘艳峰, 王登甲. 太阳能地面采暖系统蓄热水箱容积分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(12): 1636-1639.
 [12] 王宝群, 姚强, 宋蕾, 等. 光伏/光热(PVT)系统概况与评价[J]. 太阳能学报, 2009, 30(2): 193-200.
 [13] 马江燕, 邓保顺, 侯卫华, 等. 太阳能耦合空气源—水源热泵复合供暖系统性能分析[J]. 暖通空调, 2023, 53(7): 22-27.