

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-346-06

复合型光伏光热 一体化 (PVT) 热泵系统热电性能研究

王祥达 范 满 徐建伟 桑文虎 左瑞旺
(河北工业大学能源与环境工程学院 天津 300401)

【摘 要】 因地制宜推广太阳能、空气热能等可再生能源分布式多能互补应用的新型供热模式, 对建筑节能减排具有重要意义。提出一种复合型太阳能光伏光热 (PVT) 热泵系统, 将 PVT 蒸发器与风冷式蒸发器有机结合, 利用热泵对非连续的太阳能进行补偿, 同时利用太阳能提高热泵蒸发温度, 改善系统热力性能。对该 PVT 热泵冬季热电性能进行实验测试, 并利用 EES 热力学软件分析不同参数对系统性能的影响。结果表明, 在制冷剂流量为 0.015kg/s, 太阳辐射照度、室外空气温度和冷凝温度分别在 100~500W/m²、-5~15℃和 55~65℃之间变化时, 该热泵相比于风冷式热泵可提高蒸发温度-2.7~7.1℃, 同时光伏板发电量 26.5~183.6W, 可节约系统耗电量-26.7~288.6W, 热泵系统性能系数 (COP) 提高-0.6%~38.8%, 太阳辐射较强时热电联产效果显著。

【关键词】 PVT 蒸发器; 热泵系统; 蒸发温度; 性能系数

中图分类号 TK519 文献标识码 A

Research on Thermoelectric Performance of Photovoltaic/Thermal-Assisted Heat Pump System

Wang Xiangda Fan Man Xu Jianwei Sang Wenhui Zuo Ruiwang

(School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, 300401)

【Abstract】 According to local conditions, promoting the new heating mode of distributed and complementary application of renewable energy, such as solar energy and air thermal energy, is of great significance for building energy conservation and emission reduction. In this study, a hybrid solar photovoltaic/thermal (PVT) heat pump was proposed, which combined the PVT evaporator with the air-cooled evaporator. The heat pump was used to compensate the discontinuous solar energy, and solar energy was used to increase the evaporation temperature of the heat pump, so as to improve the thermal performance of the system. The thermoelectric performance of the hybrid PVT heat pump in winter was tested, and the influence of different parameters on the system performance was analyzed by using EES thermodynamic software. When the refrigerant flow rate, solar irradiance, outdoor air temperature and condensation temperature were 0.015kg/s, 100~500W/m², -5~15℃ and 55~65℃ respectively, the evaporation temperature of the hybrid PVT heat pump compared with the air-cooled heat pump could be increased by -2.7~7.1℃, the power generation of photovoltaic panels was between 26.5~183.6W and the power consumption was reduced by -26.7~288.6W. Consequently, the COP of the heat pump system was increased by -0.6%~38.8%, indicating that the heat and power cogeneration effect was significant under a higher solar irradiance.

【Keywords】 PVT evaporator; heat pump system; evaporation temperature; coefficient of performance

基金项目: 建筑安全与环境国家重点实验室暨国家建筑工程技术研究中心开放课题基金资助 (BSBE2019-02)

作者简介: 王祥达 (1999.03-), 男, 本科, E-mail: 181215@stu.hebut.edu.cn

通讯作者: 范 满 (1992.08-), 女, 博士, 讲师, E-mail: fanman@hebut.edu.cn

收稿日期: 2021-06-30

0 引言

随着化石燃料耗量的增加以及环境污染和全球气候变暖现象的加剧, 作为清洁能源的太阳能和高效节能的热泵技术得到极大的关注^[1,2]。据统计, 住宅和商业建筑的空调系统耗电量占全国能源消耗总量约 45% 左右^[3]。故因地制宜推广太阳能、空气热能等可再生能源分布式多能互补应用的新型供热模式, 对建筑节能减排具有重要意义^[4,5]。目前太阳能光热利用和热泵型空调在我国已得到广泛应用, 但两者的结合应用还比较少, 两者的结合应用可以克服太阳能受天气条件影响的缺点, 也有利于提高系统稳定性, 因此国内学者对太阳能热泵技术展开了积极研究^[1,2,6,7]。直膨式光伏光热一体化 (PVT) 热泵, 作为一种新兴的热电联供系统, 既可以利用热泵及时将光伏组件的发电余热带走, 缓解光伏组件温度过高而引起的发电效率降低现象; 也可以利用太阳能提高热泵的蒸发温度, 改善系统热力性能, 从而实现清洁能源的优势互补与梯级利用^[8,9]。

为了进一步改善直膨式 PVT 热泵系统性能, Tsai^[10,11]设计了光电自给自足的 PVT 热泵系统, 热泵 COP 达 7.09, 光电光热综合效率达 86%。Xu 等^[12]和 Pei 等^[13,14]研究发现, PVT 热泵系统的冬季制热 COP 在 3.8 左右, 夏季制冷 COP 在 4.7 左右, 光电转换效率比单独的光伏组件高 16.3%, 光电光热综合效率可达 84.7%。Chen 等^[15]、Zhou 等^[16,17]和 Xu 等^[18]分别研发了玻璃真空管 PVT 蒸发器、微通道 PVT 蒸发器和聚光型 PVT 蒸发器, 将上述三种蒸发器应用于 PVT 热泵系统中, 均取得了较好的热电联产性能。然而在冬季太阳辐射较弱或无太阳辐射时, PVT 组件不具备发电和产热的作用, 此时 PVT 组件作为蒸发器的性能不如常规的风冷式蒸发器。根据 Sun 等^[19]的研究结果, PVT 热泵的 COP 比空气源热泵在阴天夜间低约 14.3%, 而在晴天夜间低约 46.7%。

针对如何保证直膨式 PVT 热泵系统在制热工况下的连续高效运行难题, 本研究提出一种复合型太阳能光伏光热一体化 (PVT) 热泵系统, 将 PVT 蒸发器与风冷式蒸发器有机结合, 进行清洁能源的

优势互补与梯级利用。搭建 PVT 热泵系统实验测试平台, 利用 EES 热力学计算软件分析太阳辐射照度、室外空气温度和冷凝温度等参数对系统性能的影响, 并将该 PVT 热泵系统制热性能与常规风冷式热泵系统进行对比, 进而为提升 PVT 热泵系统热力性能并拓展多能互补应用提供参考。

1 实验方法

1.1 实验装置

PVT 热泵系统实验测试在天津 (117°E, 39°N) 进行, 其中复合型 PVT 蒸发器的结构如图 1 所示。室外机部分被整合在三棱柱结构内, 斜面上铺放光伏板, 倾角为 45°, 光伏板背板上铺设铝板, 两者通过高导热 EVA 胶进行粘合, 在铝板背部铺设制冷剂盘管, 该盘管主要与光伏板背板进行热交换; 在三棱柱内部与光伏板平行铺设两排铝板, 铝板上铺放风冷式蒸发盘管, 铝板与盘管组成翅片式换热器, 与空气进行热交换。侧面放置风机, 用于增强空气扰动, 强化换热。

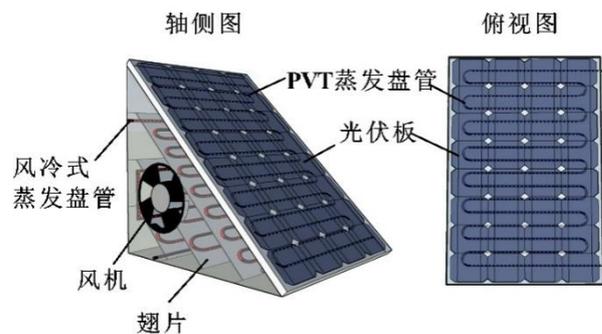


图 1 复合型 PVT 蒸发器结构示意图

Fig.1 The Schematic diagram of composite PVT evaporator structure

在日间, 光伏板在太阳辐射下发电发热, 光伏板温度高于周围环境空气温度, 此时利用 PVT 蒸发盘管制热相比于风冷式蒸发盘管可以提高蒸发温度; 在夜间, 光伏板与低温天空长波辐射换热使得光伏板温度降低, 若利用 PVT 蒸发盘管进行制热会降低蒸发温度, 可能导致盘管结霜甚至不能正常工作, 此时利用风冷式蒸发盘管进行制热, 保证系统运行的稳定性与高效性。制热循环系统如图 2 所示, 制冷剂为 R410A, 主要设备参数如表 1 所示。

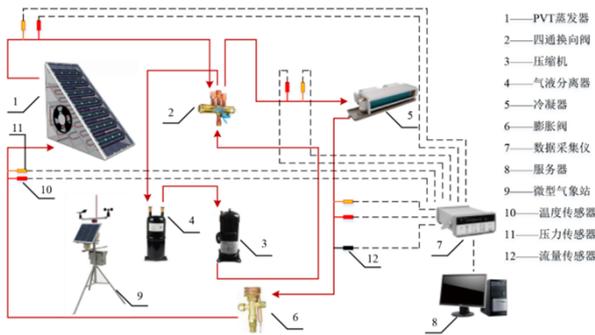


图 2 制热循环实验系统图

Fig.2 System diagram of heating experiment

表 1 PVT 热泵系统主要参数

Table 1 Main parameters of PVT heat pump system

光伏组件（在标准试验条件下）			
类型	单晶硅	最大功率点电 流 (A)	1.66
最大功率 (W)	300	开路电压 (V)	43.2
模块效率 (%)	20	短路电流 (A)	1.79
最大功率点电 压 (V)	36	有效尺寸 (mm×mm)	1300×1000
压缩机			
型号	QXA-A091z E190	气缸数量	单缸
功率 (W)	980	适用频率 (Hz)	15~120

1.2 测量装置和测点位置

实验测试参数包括：太阳辐射照度、蒸发及冷凝盘管进出口压力和温度、制冷剂流量、光伏板背板温度以及系统耗电量等，各参数的测量时间间隔为 5s，测量装置如表 2 所示。其中 T 型热电偶用来测量光伏板背板温度，其布置位置如图 3 所示。考虑到光伏组件温度分布的不均匀性，9 个测温点且沿板面长度和宽度方向均匀布置，取其平均值分析光伏板背板温度变化规律。

表 2 实验中主要测量装置

Table 2 The main measuring devices in the experiment

测量装置	型号	测量范围 (精度)
温湿度 传感器	TH20R	-20~70℃ (±0.2℃) 0~100% rh (±2.0% rh)
压力 变送器	PT1100-7/16	0~5MPa (±0.25%)
太阳总 辐射表	TBQ-28	0~2000W/m ² (±2%)

续表 2 实验中主要测量装置

测量装置	型号	测量范围 (精度)
T 型 热电偶	TT-T-30-SLE	-120~150℃ (±0.5℃)
质量 流量计	DMF-1-1A	0~40kg/h (±0.2%)
电能表	ELE-3D6Y	000000.00~999999.99kWh (±0.5%)

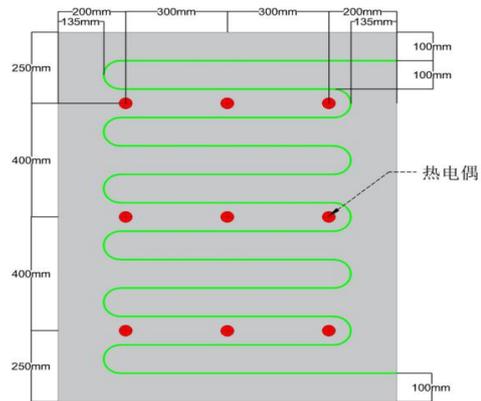


图 3 光伏板背板温度测点布置图

Fig.3 Temperature measurement points location of PV panel backplane

2 模拟计算

复合型 PVT 热泵系统压焓图如图 4 所示，据此可得热泵制热量如式 (1)：

$$Q_c = m_r \times (h_3 - h_6) \tag{1}$$

式中， m_r 为制冷剂流量，kg/s； h_3 、 h_6 分别为冷凝器进出口制冷剂焓值，kJ/kg。

压缩机耗功量如式 (2)：

$$W_c = m_r \times (h_3 - h_2) / \eta_{com} \tag{2}$$

式中， η_{com} 为压缩机等熵效率，取 0.75； h_2 为蒸发器出口制冷剂焓值，kJ/kg。

光伏板温度可由式 (3) 进行估算^[20,21]：

$$t_{PV} = 30 + 0.0175 \times (I - 300) + 1.14 \times (t_a - 25) \tag{3}$$

式中， t_a 是室外环境空气温度，℃。

光伏板发电效率及发电量分别如式 (4) 和 (5) 所示：

$$\eta_{PV} = \eta_{PV0} - (t_{PV} - 25) \times 0.005 \tag{4}$$

$$W_{PV} = I \times A \times \eta_{PV} / 1000 \tag{5}$$

式中, I 为太阳辐射照度, W/m^2 ; A 为光伏板面积, m^2 ; η_{PV0} 和 η_{PV} 分别为光伏板在标准测试工况下的发电效率和实际发电效率; W_{PV} 为光伏板发电量, kW 。

PVT 热泵制热工况下性能系数 (COP) 如式 (6) :

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W_c - W_{PV}} \quad (6)$$

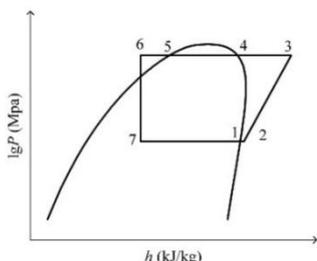


图 4 PVT 热泵系统 $\lg P-h$ 图

Fig.4 $\lg P-h$ diagram of PVT heat pump

3 结果与讨论

3.1 实验结果分析

在太阳辐射照度约为 $100\text{W}/\text{m}^2$ 时, 光伏板背板温度与翅片温度对比如图 5 所示。实验过程中, 制冷剂流量稳定在 $0.015\text{kg}/\text{s}$ 左右, 当室外温度处于最高值 17.5°C 时, 光伏板背板温度可达到 10°C 。而当室外空气温度在 $16\sim 17.5^\circ\text{C}$ 之间变化时, 风冷式翅片和光伏板背板的温度分别在 7°C 和 8°C 左右波动。图 6 所示为 PVT 热泵系统蒸发温度、冷凝温度与 COP 随时间的变化曲线。在该时段内, PVT 热泵的蒸发温度在 $0\sim 1^\circ\text{C}$ 之间变化, 比风冷式热泵系统高 $1\sim 3^\circ\text{C}$; PVT 热泵的 COP 在 $3.4\sim 3.6$ 之间, 相比于风冷式热泵提高 $6.3\%\sim 12.5\%$, 能效提升效果显著。

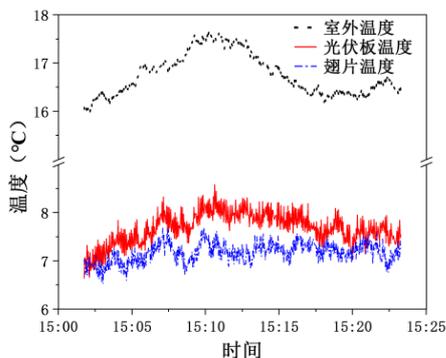


图 5 光伏板背板与内部翅片温度对比图

Fig.5 Temperature comparison of the photovoltaic panel

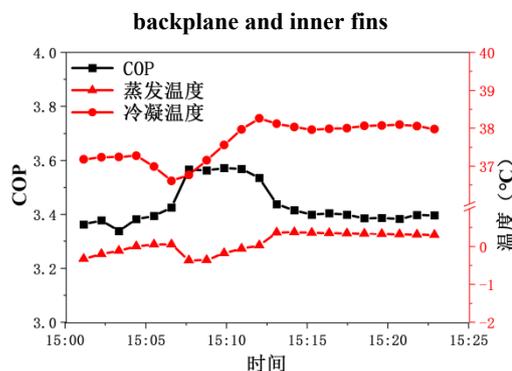


图 6 PVT 热泵性能随时间变化曲线

Fig.6 PVT heat pump performance curve with time

3.2 模拟结果分析

本节利用 EES 热力学计算软件模拟不同太阳辐射强度、室外空气温度及冷凝温度下 PVT 热泵的热电性能, 并将其与风冷式热泵在相同室外工况下的制热性能进行对比分析。

3.2.1 太阳辐射照度的影响

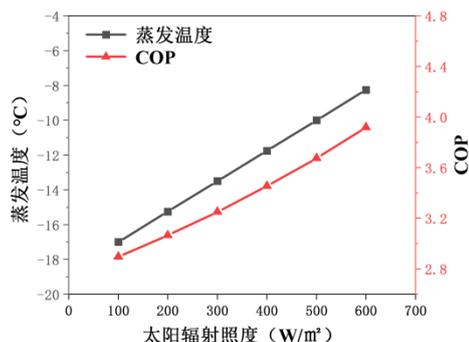


图 7 PVT 热泵制热性能随太阳辐射照度变化曲线

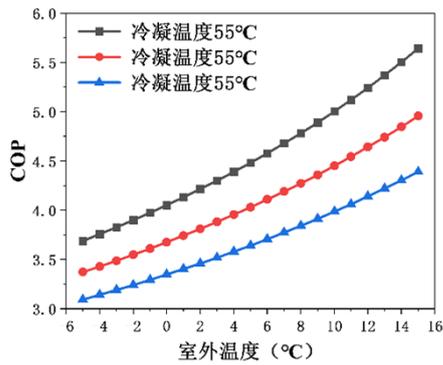
Fig.7 Variation curve of PVT heat pump heating performance with solar irradiance

图 7 所示 PVT 热泵制热性能随太阳辐射照度的变化曲线, 随着太阳辐射照度的增大, PVT 热泵蒸发温度与 COP 均增大。当室外温度为 0°C , 太阳辐射照度为 200 、 400 、 $600\text{W}/\text{m}^2$ 时, PVT 热泵的蒸发温度分别为 -15.3 、 -11.8 和 -8.3°C , COP 分别为 3.1 、 3.5 、 3.9 ; 而同种工况下风冷式热泵的蒸发温度与 COP 为定值, 分别为 -15°C 和 2.9 。由此可见, 太阳辐射照度对改善 PVT 热泵蒸发温度和制热性能影响较大。

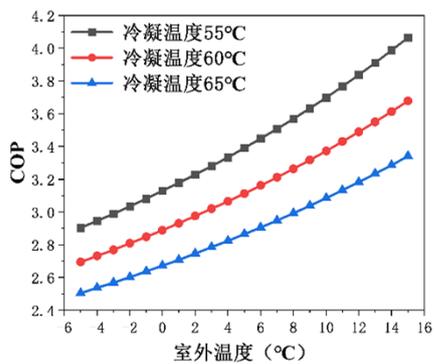
3.2.2 室外空气温度和冷凝温度的影响

冷凝温度和室外温度对 PVT 热泵 COP 的影响如图 8 所示。当室外温度为 0°C 、制冷剂流量为 $0.015\text{kg}/\text{s}$ 、太阳辐射照度为 $500\text{W}/\text{m}^2$ 、冷凝温度为

55、60、65℃时，PVT 热泵的 COP 分别为 4.1、3.7、3.3，表明冷凝温度越低，热泵的 COP 越大，这是因为在蒸发温度相同的情况下，冷凝温度越低，压缩机耗功越少。而在相同冷凝温度下，随着室外温度的升高，蒸发温度升高，热泵 COP 增大。当冷凝温度为 60℃，同时室外空气温度由-5℃增加到 15℃时，PVT 热泵 COP 可由 3.4 提高至 5.0，分别比风冷式热泵高 25.9%和 35.1%。



(a)



(b)

图 8 室外空气温度和冷凝温度对(a)PVT 热泵和(b)风冷式热泵制热性能的影响

Fig.8 Influence of ambient temperature and condensing temperature on the heating performance of (a) PVT heat pump and (b) air-cooled heat pump

3.2.3 PVT 热泵与风冷式热泵热力性能比较

在日间制热工况下，当室外温度为 0℃、太阳辐射照度为 500W/m²、制冷剂流量为 0.015kg/s 时，PVT 热泵与风冷式热泵的 lg P-h 如图 9 所示，其中 PVT 热泵的热力参数变化过程为 1-2-3-4-5- 6-7，风冷式热泵的热力参数变化过程为 1'-2'-3'-4'-5'-6'-7'。相比于风冷式热泵，PVT 热泵的蒸发温度可提高 5.0℃，蒸发压力升高 92.1kPa，蒸发器出口焓值为 419.03kJ/kg。同时制热量降低

0.086kW，光伏组件发电量为 165W，系统耗电量降低 279W。综上，PVT 热泵的 COP 为 3.7，比风冷式热泵 COP 提高 27.6%。

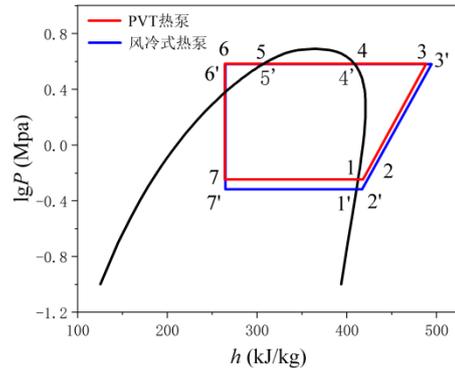


图 9 PVT 热泵与风冷式热泵的 lg P-h 图

Fig.9 lg P-h diagram of PVT heat pump and air-cooled heat pump

4 结论

该研究将 PVT 蒸发器与风冷式蒸发器有机结合，提出一种复合型太阳能光伏光热一体化（PVT）热泵系统，既可以高效利用太阳能，又能保证系统连续制热运行的稳定性。对系统的热电性能进行实验测试与模拟分析，得出主要结论如下：

(1) PVT 组件可以充分利用太阳能，当太阳辐射照度在 100~500W/m²，光伏板温度上升，可使蒸发温度提高 -2.7~7.1℃，系统 COP 提高 -0.6%~38.8%，太阳辐射较强时热电联产效果显著。

(2) 当太阳辐射照度为 500W/m²时，随着室外空气温度在 -5~15℃、冷凝温度在 55~65℃之间变化，PVT 热泵的 COP 在 3.1~5.6 之间，均高于同种工况下风冷式热泵的 COP。

(3) 当室外温度为 0℃、太阳辐射照度为 500W/m²、制冷剂流量为 0.015kg/s 时，PVT 热泵的制热量虽然比风冷式热泵低 86W，但光伏组件发电量为 165W，系统耗电量比风冷式热泵小 279W，PVT 热泵 COP 比风冷式热泵高 27.6%。

参考文献：

[1] 贾少刚,张五一,刘培陶,等.中央式冷采暖三联供太阳能热泵系统设计与运行模式分析[J].制冷与空调,2020,34(4):432-435,441.
 [2] 魏翠琴,王丽萍,贾少刚,等.太阳能热泵应用现状与性能分析[J].制冷与空调,2017,31(2):159-163.

- [3] Kalkan N, Young EA, Celiktas A. Solar thermal air conditioning technology reducing the footprint of solar thermal air conditioning[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012,16:6352-6383.
- [4] 财政部,住房和城乡建设部,环境保护部,等.《关于开展中央财政支持北方地区冬季清洁取暖试点工作的通知》.财建[2017]238号.
- [5] 生态环境部,国家发展和改革委员会,工业和信息化部,等.《京津冀及周边地区2019-2020年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》.环大气[2019]88号.
- [6] 魏翠琴,贾少刚,问朋朋,等.双热源温室太阳能热泵供暖装置测控系统研究[J]. *制冷与空调*,2019,33(2):143-147.
- [7] 靳晓钊,秦红,刘重裕.太阳能-空气能双源一体热泵制冷剂充注量研究[J].*制冷与空调*,2014,28(1):102-106.
- [8] Vaishak S, Bhale P V. Photovoltaic/thermal-solar assisted heat pump system: Current status and future prospects [J]. *Solar Energy*, 2019,189:268-284.
- [9] Mi P, Ma L, Zhang J. Integrated Optimization Study of Hot Water Supply System with Multi-heat-source for the Public Bath Based on PVT Heat Pump and Water Source Heat Pump[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020,115:146.
- [10] Tsai H L. Design and Evaluation of a Photovoltaic/Thermal-Assisted Heat Pump Water Heating System[J]. *Energies*, 2014,7:3319-3338.
- [11] Tsai H L. Modeling and validation of refrigerant-based PVT-assisted heat pump water heating (PVT-HPWH) system[J]. *Solar Energy*, 2015,122:36-47.
- [12] Xu G, Zhang X, Deng S. A simulation study on the operating performance of a solar-air source heat pump water heater[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006,26(11-12):1257-1265.
- [13] Pei G, Ji J, Liu K, et al. Numerical study of PV/T-SAHP system[J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2008,9(7):970-980.
- [14] 裴刚,季杰,何伟,等.PV/T 太阳能热泵系统的性能研究[J].*中国工程科学*,2006,8(9):49-56.
- [15] Chen H, Riffat S B, Fu Y. Experimental study on a hybrid photovoltaic/heat pump system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011,31(17-18):4132-4138.
- [16] Zhou J, Zhao X, Ma X, et al. Experimental investigation of a solar driven direct-expansion heat pump system employing the novel PV/micro-channels- evaporator modules[J]. *Applied Energy*, 2016,178:484-495.
- [17] Zhou J, Zhao X, Ma X, et al. Clear-days operational performance of a hybrid experimental space heating system employing the novel mini-channel solar thermal & PV/T panels and a heat pump[J]. *Solar Energy*, 2017,155:464-477.
- [18] Xu G, Zhang X, Deng S. Experimental study on the operating characteristics of a novel low-concentrating solar photovoltaic/thermal integrated heat pump water heating system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011,31(17-18):3689-3695.
- [19] Sun X, Dai Y, Novakovic V, et al. Performance comparison of direct expansion solar-assisted heat pump and conventional air source heat pump for domestic hot water[J]. *Energy Procedia*, 2015,70:394-401.
- [20] 杨晓辉,刘康.不同类型太阳能辅助三联供系统的评价与案例分析[J].*实验技术与管理*,2021,38(3):51-56, 60.
- [21] ARBIERI E S, DAI Y J, MORINI M, et al. Optimal sizing of a multi-source energy plant for power heat and cooling generation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014,71(2):736-750.