

# 光伏-太阳能热泵在不同冷凝水温下的特性\*

裴刚, 季杰, 刘可亮, 何汉峰, 陆剑平, 韩崇巍, 何伟

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

**摘要:**提出了光伏-太阳能热泵(PV-SAHP)的系统原理,建立了PV-SAHP系统试验台.在不同的冷凝水温工况下,对PV-SAHP系统的动态性能进行了实验和分析,同时也就不同冷凝水温对PV-SAHP系统性能的影响进行了对比. PV-SAHP系统平均性能系数为5.4,最高COP可达10.4,平均光电效率为13.4%.结果表明PV-SAHP系统具有优越的热泵性能和光电转换效率.

**关键词:**太阳能热泵;光电/光热;综合利用;冷凝水温;性能系数

**中图分类号:**TK513      **文献标识码:**A

## Performance of PV-SAHP under different condensing water temperatures

PEI Gang, JI Jie, LIU Ke-liang, HE Han-feng, LU Jian-ping, HAN Chong-wei, HE Wei

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China)

**Abstract:** A novel photovoltaic/thermal solar assisted heat pump (PV-SAHP) system was proposed. Under different condensing water temperatures, outdoor tests were conducted on the PV-SAHP system. The dynamic behavior of PV-SAHP was analyzed and the influence of different condensing temperatures was compared. The coefficient of performance (COP) can reach 10.4 and the average value is about 5.4. The average photovoltaic efficiency is around 13.4%. Results indicate that the PV-SAHP system has superior coefficient of performance (COP) and photovoltaic efficiency.

**Key words:** solar assisted heat pump; photovoltaic/thermal; combined utility; condensing water temperature; coefficient of performance

## 0 引言

Sporn 于 1955 年通过初步的实验研究,提出太阳能热泵(SAHP)具有明显高于普通热泵的性能系数(COP)<sup>[1]</sup>. 1980 年以后,SAHP 系统引起了更多人的关注,Chaturvedi 对 SAHP(R12 工质)系统进行了系列的试验研究,其试制出的 SAHP 系统蒸发器温度一般高于环境温度 0~10 °C,具有优越的热

泵循环性能<sup>[2~4]</sup>. Badescu 以他自己开发的气象模型为基础,对 SAHP 系统进行了性能模拟和系统优化的理论研究<sup>[5]</sup>. Huang 和 Morrison 分别开发了接近于商业应用的一体化 SAHP 系统,并各自在我国台湾和澳大利亚进行了长期的实用试验研究<sup>[6~7]</sup>. 近年来,在国内,上海交通大学<sup>[8~9]</sup>、哈尔滨工业大学<sup>[10]</sup>、东南大学<sup>[11~12]</sup>等高校的研究者也有关于 SAHP 系统的试验和理论在太阳能光热利

\* 收稿日期:2006-02-24;修回日期:2006-05-16

基金项目:国家自然科学基金(50478023),中国科学技术大学青年基金(KA134000001),教育部光伏系统工程研究中心开放基金资助.

作者简介:裴刚,男,1975年生,博士生.研究方向:制冷,热泵,太阳能. E-mail: peigang@ustc.edu.cn

通讯作者:季杰,教授. E-mail: jijie@ustc.edu.cn; Tel:0551-3601652

用中的成果发表。

随着光电材料技术的发展,太阳能电池的光电转换效率在逐年提高,同时成本不断降低,这给太阳能光电应用的大面积推广奠定了基础<sup>[13]</sup>。但是,在光伏电池的实际应用中,照射到光伏电池表面的太阳能有 80% 以上并未转化为电能,而是转化为热能,使电池温度升高,特别是太阳辐照较强时,会导致电池效率急剧下降。如果在电池组件的背面,铺设流道,通过流体(水)带走热量,降低电池温度,可以提高电池发电效率。倘若流体带走的热量通过某种形式加以利用,那么这种系统在产生电能的同时还可以提供热能,这种系统被称之为光电/光热综合利用一体化(PV/T)系统。

自从 1978 年 Kern 和 Russell 首次提出使用水作为载热介质的光伏/光热一体化(PV/T)系统的主要概念后<sup>[14]</sup>,世界上已有许多研究者对 PV/T 系统进行了理论分析和实验研究。结果表明,PV/T 系统单位面积对太阳能的综合效率明显高于单独的光电或者光热利用系统。但是,PV/T 系统的光电效率却没有提升,反而可能降低。这是因为,流体必须升温到较高的最终温度才能被加以利用,而高温流体会提高光电温度导致光电效率的降低<sup>[15~17]</sup>。如果将热泵循环的蒸发工质作为 PV/T 模块的冷却流体,制冷工质直接在 PV/T 模块内蒸发吸热,得到的热量通过热泵循环在冷凝端以高温输出,那么,在光电/光热综合利用的过程中,使 PV/T 模块一直处于低温环境中,就可以同时提高太阳能的光电效率和光热效率。

基于上述思想,我们将光伏转换与热泵循环有机结合在一起,形成了光伏-太阳能热泵系统(photovoltaic solar assisted heat pump, PV-SAHP)。在 PV-SAHP 系统中,光伏电池和太阳能热泵系统的蒸发器有机地结合在一起,形成 PV 蒸发器。PV 蒸发器接收到的太阳辐照中,短波辐照被光伏电池通过光电转换形成电流输出,长波辐照通过光热转换来作为热泵的蒸发热源。一方面,由于热泵工质的蒸发作用,PV 蒸发器工作在较低温度范围,得到有效冷却,光电效率和光热效率同时得以提高;另一方面,太阳辐射通过光热转换来作为热泵热源,提高了热泵循环的蒸发温度和蒸发压力,使得热泵性能系数得以提高。

Itō 在 1997 年进行了带有光伏电池 SAHP 系统的试验研究,其内容主要是关于光伏电池对

SAHP 系统热泵性能的单方面影响,对系统的光电转换性能、光电/光热综合利用效率等关键问题却没有进行研究<sup>[18~19]</sup>。另外,由于其实验装置不完善,使用的是老化光伏电池,导致  $2.46 \text{ m}^2$  光伏电池的最大光伏功率仅为 120 W,因而可推算出该系统的光电效率很不理想。

我们建立了性能完善的 PV-SAHP 系统综合试验台,并以此为基础对 PV-SAHP 系统的热泵循环、光电转换、光电/光热综合利用以及热泵循环和光电转换之间的相互影响等问题进行研究。

## 1 PV-SAHP 试验系统及测试装置

### 1.1 PV-SAHP 系统的热泵装置

PV-SAHP 试验系统的原理如图 1 所示,PV-SAHP 系统主要包括图中所示的 PV 蒸发器、风冷蒸发器、变频压缩机、风冷冷凝器、水冷冷凝器、电子膨胀阀等主要部件,还包括过滤器、储液器、四通阀、消音器、辅助毛细管等附件。系统充注 R22 作为循环工质。

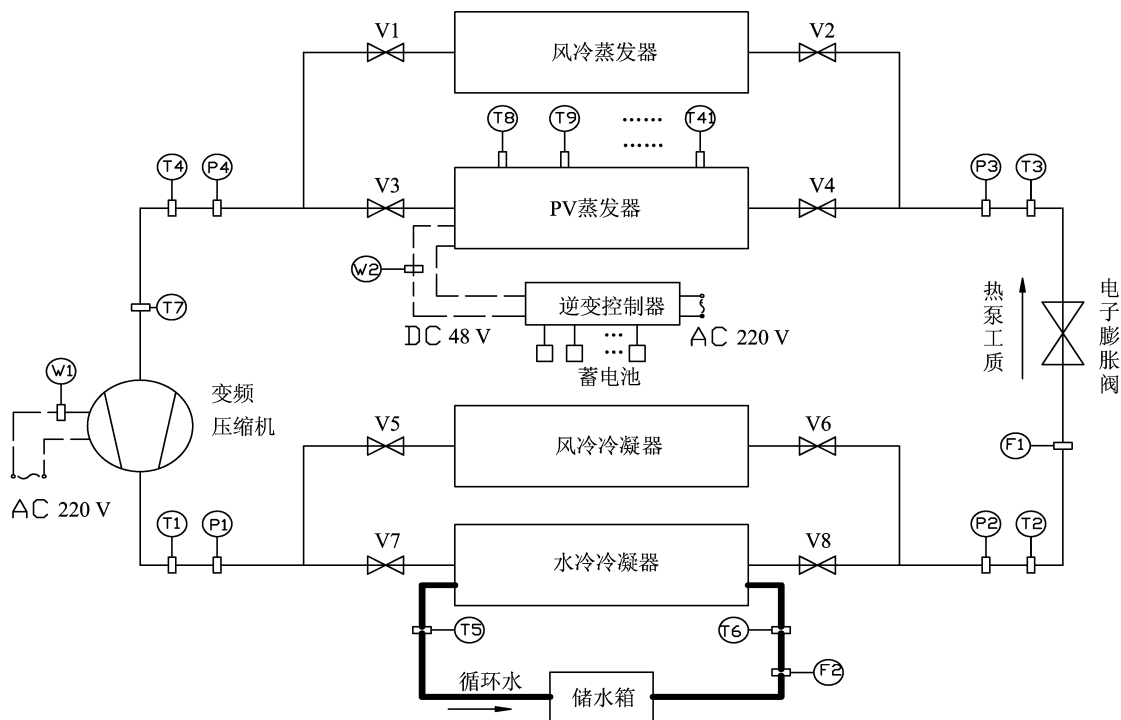
风冷蒸发器与 PV 蒸发器并联,辐照正常时,风冷蒸发器关闭;当辐照不足,蒸发温度低于环境温度时,风冷蒸发器启动,从环境空气中吸收热量,作为 PV 蒸发器的补充。风冷冷凝器和水冷冷凝器并联,两者一般不同时开启。水冷冷凝器得到热量后,可以通过循环水,间接向房间供暖或者供生活热水,风冷冷凝器启动时可以直接向房间供暖。通过电磁阀和四通阀的切换,系统还可以完成风冷制冷、风冷制热、风冷制热水等多种功能。

系统采用松下变频压缩机,型号为  $2C \times 123 \times 7AA02$ ,频率为  $15 \sim 120 \text{ Hz}$ ,输入功率为  $150 \sim 1\,300 \text{ W}$ ,电子膨胀阀根据压缩机频率自行调整相应开启度。

系统运行时,压缩机吸入完全蒸发后的过热工质,压缩升压、升温后进入冷凝器,工质冷凝成过冷液体,同时输出热量。液态工质经电子膨胀阀节流降压后,进入蒸发器,在 PV 蒸发器中吸收辐照能量,蒸发汽化,在过热状态下进入压缩机压缩,完成热泵循环。PV 蒸发器在阳光的直接辐照下,使得蒸发温度和蒸发压力高于普通热泵,即使在寒冷的冬季,性能系数也有明显提高。同时还可以避免普通热泵在冬季严重的结霜现象。

### 1.2 PV-SAHP 系统的光伏组件

光伏部分由晶硅电池、逆变器、控制器、蓄电池、



P1~P4—压力传感器 T1~T4—热电偶 W1,W2—功率传感器 F1,F2—流量计

图 1 PV-SAHP 系统试验台原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the PV-SAHP experimental setup

电器柜、导线、负载等组成。光伏电池和热泵蒸发器采用真空层压技术压合成一体,成为 PV 蒸发器。

PV 蒸发器由 9 个 PV 蒸发器模块构成,辐照总面积  $5.49 \text{ m}^2$ ,光伏电池总面积  $4.59 \text{ m}^2$ 。每个 PV 蒸发器模块长  $1.01 \text{ m}$ ,高  $0.73 \text{ m}$ 。PV 蒸发器朝向正南,倾角  $38^\circ$ 。PV 蒸发器的截面结构如图 2 所示。

PV 蒸发器以  $1.5 \text{ mm}$  厚的铝合金板为基板,将光伏电池置于两层透明 TPT 之间,层间均匀涂满

EVA,整体置于基板上表面,在保证光伏电池与基板的电绝缘和热传导的前提下,用真空层压机层压成型。工质盘管采用紫铜管(直径  $D_i=6 \text{ mm}$ ),用折弯机折弯成蛇形盘管(管间距  $W=130 \text{ mm}$ ),卡在专用粘胶铝板(厚为  $0.5 \text{ mm}$ )的  $\Omega$  型槽中,然后把粘胶铝板与基板下表面密封粘结在一起,工质盘管被密封在两者中间,确保盘管与两层铝板之间的导热。整个 PV 蒸发器模块固定在铝制边框内,边框上部

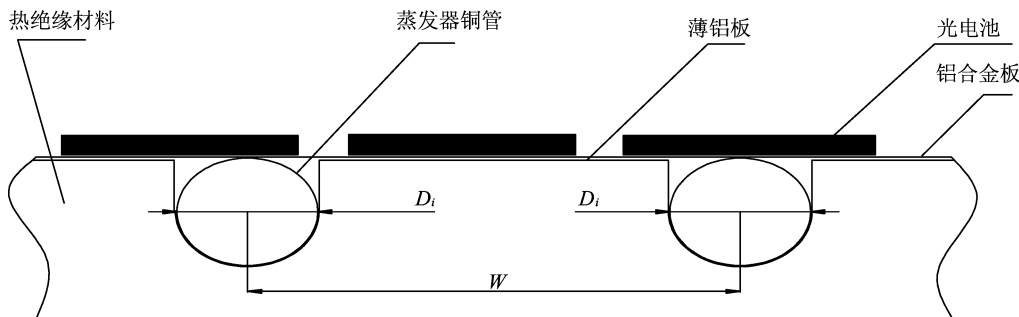


图 2 PV 蒸发器结构剖面图

Fig. 2 Section of a PV evaporator module

装可拆卸高透玻璃盖板,背部设有绝热材料。

系统用单晶硅光伏电池的特性如下:开路电压 0.63 V;短路电流 5.12 A;最大功率 2.40 W;最大功率点电压 0.53 V;最大功率点电流 4.58 A;单片电池效率 15.4%。测试电池面积 156.25 cm<sup>2</sup>;测试辐照强度 1 000 W/m<sup>2</sup>;测试环境温度 25 ℃。光伏模块输出 48 V 直流电,通过逆变控制器转换成 220 V、50 Hz 交流电,直接供负载使用或并入公共电网。

### 1.3 PV-SAHP 系统的测试装置

试验台测试装置主要包括以下部件,见图 1。

(a) 压力传感器:规格,0 ~ 3.0 MPa (Huba506, Sweden);数量,4 个;位置,蒸发器进口、蒸发器出口、冷凝器进口、冷凝器出口;

(b) 功率传感器:规格,WBP112S91 和 WBI022S(四川维博);数量,2 个;位置,压缩机输入(交流)、PV 模块输出(直流);

(c) 质量流量计:规格,R025S116N (MicroMotion, USA);数量,1 个;位置,电子膨胀阀入口;

(d) 日照辐射仪:规格,TBQ-2(锦州,阳光);数量,1 个;位置:PV 蒸发器;

(e) 铜-镍铜热电偶:规格,0.2 mm;数量,42 个;位置,PV 蒸发器、蒸发器进口、蒸发器出口、冷凝器进口、冷凝器出口、储水箱进口、储水箱出口、压缩机进口、压缩机出口、百叶箱等;

(f) 风速仪:规格,EC21A(上海,维天);数量,1 个;位置,PV 蒸发器;

(g) 其他:数据采集仪 Agilent34970A,测试电脑,导线等。

## 2 PV-SAHP 系统的测试及分析

### 2.1 主要性能参数

PV-SAHP 系统的热泵性能系数 COP 表示如下

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W_{\text{com}}}, \quad (1)$$

式中, $Q_c$ 为热泵冷凝供热功率; $W_{\text{com}}$ 为压缩机功率。其中,

$$Q_c = mc(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}). \quad (2)$$

式中, $m/(kg \cdot s^{-1})$ 为循环水流量; $T_{\text{in}}/^\circ\text{C}$ , $T_{\text{out}}/^\circ\text{C}$ 分别为循环水进、出口水温; $c/(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ 为水热容。

PV 蒸发器的光电效率表示如下

$$\eta_p = \frac{W_p}{IA}. \quad (3)$$

式中, $W_p/W$ 为光伏输出功率; $I/(W \cdot m^{-2})$ 为辐照强度; $A/m^2$ 为光伏电池面积。

### 2.2 试验方案

试验分 4 种工况进行测试,每种工况的冷凝进口水温分别为 20,30,40,50 ℃,单个工况的测试过程中冷凝水温恒定。在不同工况的测试对比中,仅改变冷凝水温,其他参数不作改变,气象条件尽可能相似。在试验过程中,阀 1、阀 2、阀 5、阀 6 关闭,阀 3、阀 4、阀 7、阀 8 开启,工质流动方向如图 1 所示。压缩机定频(40 Hz)运行,由公共电网供电。PV 电流输出,经逆变器逆变后,由外界负载消耗。测试期间,通过冷水掺混,保持储水箱内的水温恒定,去除 PV 蒸发器玻璃盖板,水冷换热器循环水流速为 0.217 kg/s。

测试在合肥市(北纬 31°53', 东经 117°15')进行,每次测试针对一种工况,从 8:00 开始,到 16:00 结束。测试过程进行多日,从中选取气象条件比较接近的 4 次试验数据(2005.11.25~2005.11.29)作为我们分析的样本。测试期间的气象数据参见图 3。

4 种工况测试过程中,平均辐照介于 606.0 ± 31.6 W/m<sup>2</sup>之间,平均环温介于 13.72 ± 2.41 ℃之间,平局风速介于 3.2 ± 0.7 m/s 之间。各种工况的气象数据比较接近,有利于相互之间的对比分析。

### 2.3 测试结果及分析

#### 2.3.1 冷凝供热功率的变化

从图 4 和图 5 可以看出,冷凝供热功率随辐照强度的升高而加大。以 30 ℃ 进口水温的工况进行分析,在 8:00 时,辐照为 228 W/m<sup>2</sup>,这时的冷凝供热功率 1 105 W;在 12:00,辐照上升到 830 W/m<sup>2</sup>,冷凝供热功率也升为 2 481 W;在 16:00,辐照降到 245 W/m<sup>2</sup>左右,这时冷凝供热功率降为 1 625 W。可以看出,辐照强度是影响 PV-SAHP 系统的首要因素,辐照强度升高,冷凝功率增大。

影响冷凝供热功率的次要因素是环境温度,8:00 和 16:00 的辐照强度分别为 228 W/m<sup>2</sup> 和 245 W/m<sup>2</sup>,辐照相差很小,但是两时间点的冷凝供热功率分别为 1 105 W/m<sup>2</sup> 和 1 625 W/m<sup>2</sup>,16:00 的冷凝供热功率却比 8:00 有明显增大。这主要是因为下午的环境温度和相比有 7 ℃ 左右的升高。环境温度的升高,减小了 PV 蒸发器的热损,提高了蒸发温

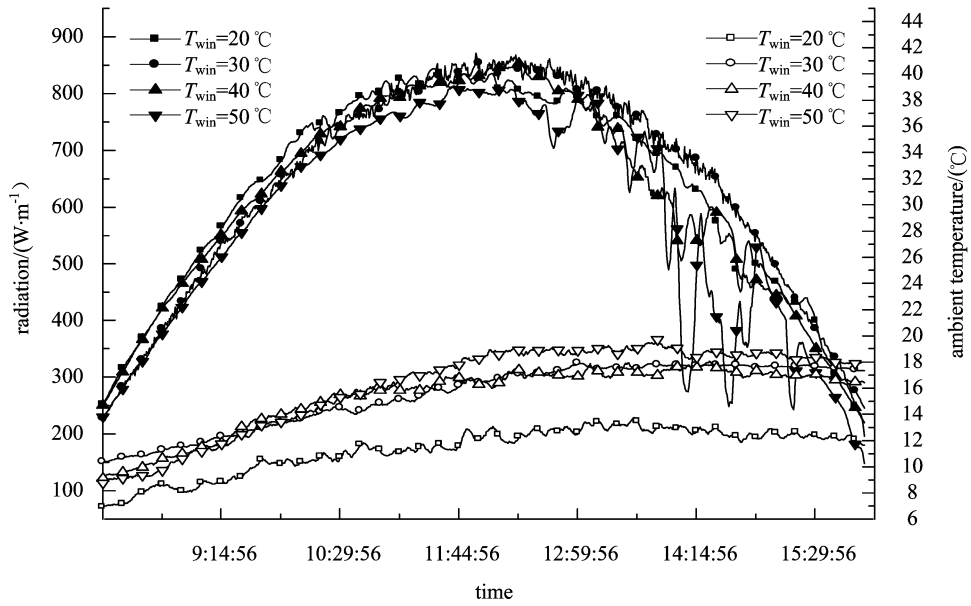


图 3 测试过程中的气象参数

Fig. 3 Daily variation of solar radiation and ambient temperature during the experiment period

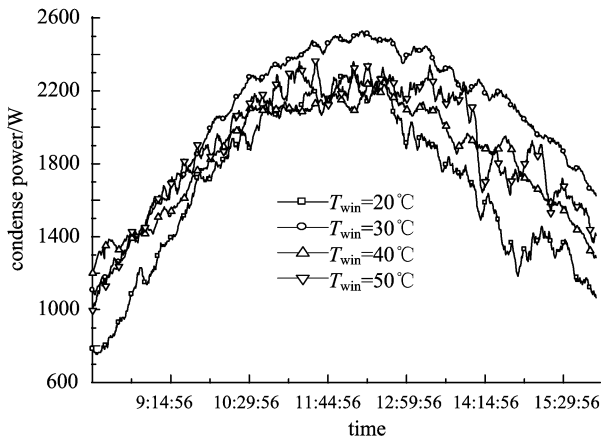


图 4 冷凝供热功率的变化曲线

Fig. 4 Daily variation of condenser capacity for different condenser supply water temperature

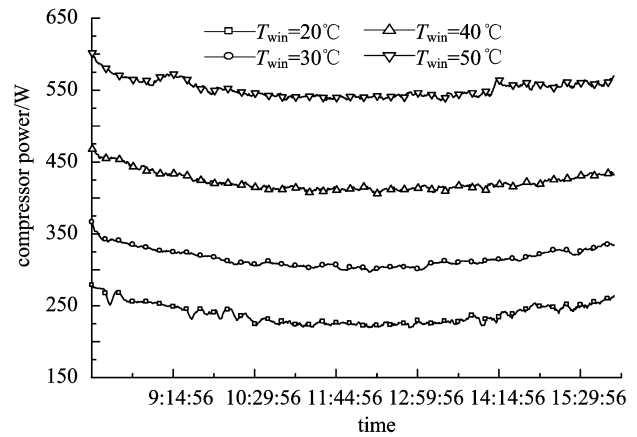


图 5 压缩机功率的变化曲线

Fig. 5 Daily variation of compressor power consumption for different condenser supply water temperature

度和蒸发压力,缩小了蒸发温度和冷凝温度之间的温差,有助于 PV-SAHP 冷凝供热功率的提升。

### 2.3.2 压缩机功率的变化

在本次试验中,压缩机在 40 Hz 频率下定频运行.压缩机功率主要受冷凝水温的影响,冷凝水温越高,压缩机功率越大(图 5).对应于 20, 30, 40, 50 °C 4 种冷凝水温,相应的平均压缩机功率分别为 238, 316, 422, 552 W.冷凝水温升高,导致冷凝温度和冷凝压力相应升高,使得系统压缩比增大,压缩机输入功率升高。

观察压缩机功率变化的单条曲线,以 40 °C 冷凝水温的压缩机功率曲线为例,我们可以发现:辐照强度越高,压缩机功率越小.辐照强度的提高可以减小压缩机的压缩比,对压缩机运行有明显的有利影响.但是,水温对冷凝温度和冷凝压力的影响更为直接和剧烈,因此与冷凝水温对压缩机功率的影响相比,辐照强度的影响是次要的。

### 2.3.3 热系性能系数 COP 的变化

试验结果显示,在冷凝水温各为 20, 30, 40, 50 °C 时,系统平均 COP 分别为 7.1, 6.6, 4.4, 3.5

(见图 6). 当冷凝水温 20 °C 时, 中午时的 COP 最高可以达到 10.4. 和普通风冷热泵相比, 不论是在高冷凝水温还是在低冷凝水温, 热泵 COP 都有显著的提高. 在水温变化时, 热泵 COP 随着冷凝水温的升高而降低; 当水温恒定时, 热泵 COP 随辐照的变化而变化. 辐照加强, 蒸发温度、蒸发压力提高, 热泵循环的性能系数就会提高. 反之, 辐照减弱, 蒸发压力下降, COP 就会降低.

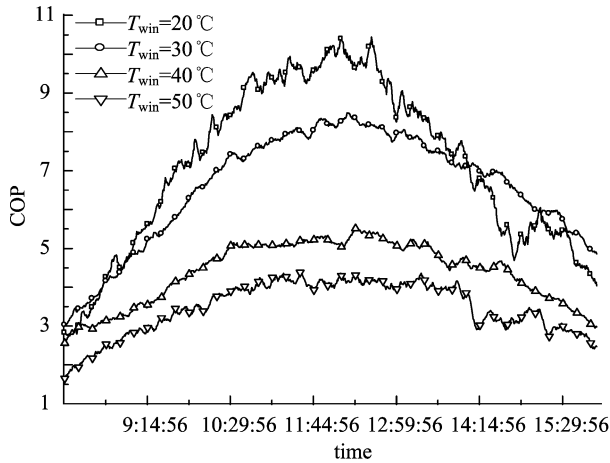


图 6 热泵 COP 的变化曲线

Fig. 6 Daily variation of heat pump COP for different condenser supply water temperature

2.3.4 光伏功率和光伏效率的变化

水温分别为 20, 30, 40, 50 °C 的工况时, 平均辐照分别为 633.6, 637.2, 617.7, 575.4 W/m<sup>2</sup>, 对应

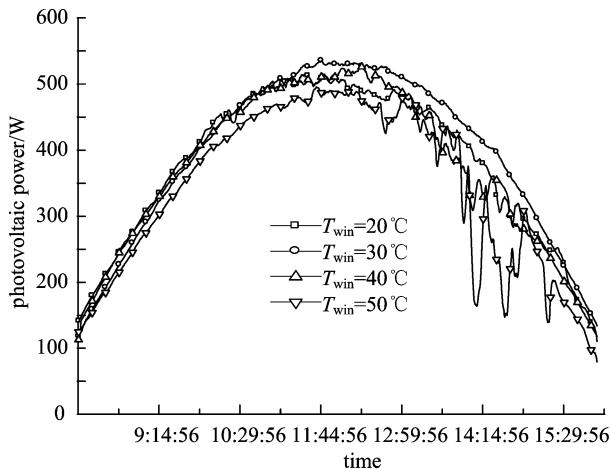


图 7 光伏功率的变化曲线

Fig. 7 Daily variation of PV electricity output for different condenser supply water temperature

的平均光伏功率分别是 381, 393, 375, 343 W (见图 7). 可以看出, 光伏功率与辐照强度直接相关, 辐照越强, 光伏功率越大.

光伏模块的光电效率主要与电池温度和辐照入射角有关, 见图 8, 在早晨和下午时段, 阳光斜射时, 效率偏低; 在中午时段, 阳光直射, 效率偏高. 说明阳光入射角的减小, 可以导致光电效率的提高.

详细分析图 8 的效率曲线还可以发现, 在 12:00 前后, 入射角最小, 可是此时的光伏效率却有局部下降. 这种现象要综合考虑入射角和温度同时对光电效率的影响. 中午时, 入射角减小有利于光电效率的提高; 另一方面, 由于此时辐照强度的增强, 电池温度也逐渐升高. 当电池温度升高到一定程度, 温度升高对光伏电池的负面影响超过入射角减小的正面影响时, 光伏效率就会有局部降低.

3 结论

我们提出了 PV-SAHP 的系统原理, 建立了 PV-SAHP 的样机和测试实验台, 对 PV-SAHP 系统进行了冷凝水温为 20, 30, 40, 50 °C 4 种工况下的试验研究. 结果表明, PV-SAHP 系统在平均辐照介于 606.0±31.6 W/m<sup>2</sup> 之间, 平均环温介于 13.72±2.41 °C 之间, 平均风速介于 3.2±0.7 m/s 之间的气象条件下, 4 种工况的平均 COP 为 5.4, 最高 COP 可达 10.4, 平均光电效率为 13.4%. 显示出 PV-SAHP 系统同时具有优越的热泵循环性能和光电转换效率.

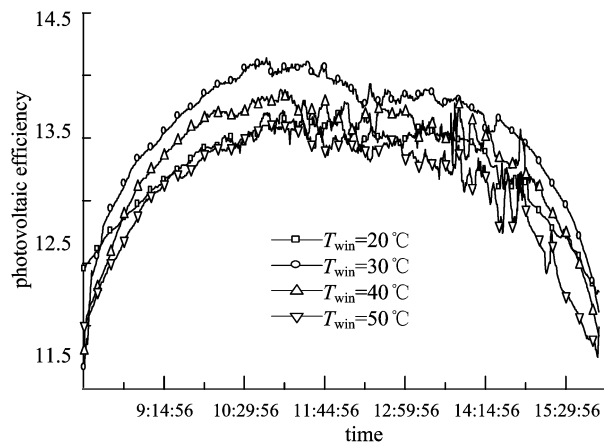


图 8 光电效率的变化曲线

Fig. 8 Daily variation of photovoltaic efficiency for different condenser supply water temperature

**致谢** 感谢青岛海信有限公司研发中心张磊高级工程师和刘永工程师在试验过程中给与的无私帮助。

#### 参考文献(References)

- [1] Sporn P, Ambrose E R. The heat pump and solar energy[C]// Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy. Menlo Park, Calif.: Stanford Research Insititute, 1955.
- [2] Gorozabel F B, Chata, Chaturvedi S K. Analysis of a direct expansion solar assisted heat pump using different refrigerants [J]. Energy Conversion & Management, 2005, 46: 2 614-2 624.
- [3] Chaturvedi S K, Chiang Y F, Roberts A S. Analysis of two-phase flow solar collector with application to heat pumps[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1982, 104: 358-365.
- [4] Chaturvedi S K, James Y F, Shen Y. Thermal performance of a direct expansion solar-assisted heat pump[J]. Solar Energy, 1984, 33: 155-162.
- [5] Badescu V. First and second law analysis of a solar assisted heat pump based heating system[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43: 2 539-2 552.
- [6] Morrison G L. Simulation of packaged solar heat-pump water heaters[J]. Solar Energy, 1994, 53: 249-257.
- [7] Huang B J, Chyng J P. Performance characteristic of integral type solar-assisted heat pump [J]. Solar Energy, 2001, 71: 403-414.
- [8] KUANG Yu-hui, WANG Ru-zhu, XU Yu-xiong. Studies on the performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump water heating system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(5): 737-740.  
旷玉辉, 王如竹, 许煜雄. 直膨式太阳能热泵供热水系统的性能研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(5): 737-740.
- [9] 旷玉辉, 王如竹. 直膨式太阳能热泵热水器的试验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 379-381.
- [10] 余延顺, 廉乐明. 寒冷地区太阳能—土壤源热泵系统运行方式的探讨[J]. 太阳能学报, 2003, 24(1): 111-115.
- [11] 李舒宏, 武文彬, 张小松, 等. 太阳能热泵热水装置试验研究与应用分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(1): 82-85.
- [12] 杨卫波, 施明恒, 董华. 太阳能土壤源热泵系统联合供暖运行模式的探讨[J]. 暖通空调, 2005, 35(8): 25-31.
- [13] 林伟, 曾祖勤, 沈辉, 等. 深圳首个户用太阳能示范系统分析[J]. 太阳能学报, 2005, 26(2): 174-182.
- [14] Tripanagonstopoulos Y, Nousia T, Souliotis M. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems[J]. Solar Energy, 2002, 72: 217-234 .
- [15] Bergene T, Løvvik O M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells [J]. Solar Energy, 1995, 55: 453-462.
- [16] Huang B J. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems[J]. Solar Energy, 2001, 70: 443-448.
- [17] JI Jie, JIANG Bin, LU Jian-ping, et al. Experimental study on a novel PV-Trombe wall [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(4): 349-354.  
季杰, 蒋斌, 陆剑平, 等. 新型 PV-Trombe 墙的实验[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(4): 349-354.
- [18] Ito Sddasuke, Nakatsu Miura. Heat pump using a solar collector with photovoltaic modules on the surface [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1997, 119: 147-151.
- [19] Ito Sddasuke, Nakatsu Miura, Yasushi Takano. Studies of Heat pumps using direct expansion type solar collectors [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127: 60-64.