

文章编号: 2095-2163(2021)01-0094-04

中图分类号: TK519; TP274+.2

文献标志码: A

太阳能与空气能双热源热泵系统实验平台设计

朱宸威¹, 蔡颖玲¹, 林志坚²

(1 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2 上海博阳新能源科技股份有限公司, 上海 201611)

摘要:为解决太阳能和空气能利用中存在的能量转换效率低的问题,设计了太阳能与空气能双热源热泵系统实验平台。实验平台主要由变频压缩机、PV/T蒸发器、风冷蒸发器、蓄热水箱、电子膨胀阀、数据采集与控制系统等组成,以太阳能和空气能作为热源,R134a作为制冷工质,通过控制电磁阀和电子膨胀阀,实现3种运行模式。利用PLC和组态软件实现实验参数采集与监控,并能开展一系列综合性、创新性实验,满足科研与专业教学的需要。

关键词: 太阳能; 空气能; 双热源热泵; 数据采集

Design of comprehensive experimental platform for solar/air energy dual heat source heat pump system

ZHU Chenwei¹, CAI Yingling¹, LIN Zhijian²

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2 Shanghai Boyang New Energy Technology Co. Ltd., Shanghai 201611, China)

【Abstract】 In order to solve the problem of low energy conversion efficiency in the use of solar energy and air source, a comprehensive experimental platform for solar energy and air source dual heat source heat pump system is designed. The experimental platform consists of variable frequency compressor, PV/T evaporator, air source heat exchanger, hot water storage tank, electronic expansion valve, a data acquisition and control system, etc. The experimental platform uses solar energy and air source as heat source and R134a as a refrigerant. By controlling solenoid valves and electronic expansion valves, three different operating modes are realized. PLC and configuration software are used to collect and monitor experimental parameters, and a series of comprehensive and innovative experiments can be carried out to meet the needs of scientific research and professional teaching.

【Key words】 solar energy; air source; dual heat source heat pump; data acquisition

0 引言

目前,能源成为国内外学者讨论的焦点^[1-2]。太阳能资源成为世界各国可持续发展战略的重要组成部分^[3-4]。《可再生能源发展“十三五”规划》中也明确提出要大力推广太阳能热利用的多元化发展^[5]。

太阳能作为可再生能源的代表,围绕其研究内容包括太阳能光热利用系统^[6-7],太阳能光伏、光热一体化系统^[8-9]和太阳能复合热源系统^[10-11]等方面。由于太阳能的能量密度低、波动性较大等缺点,存在转换效率低等问题。推广应用空气能热泵系统^[12-13]时,也存在供热量不足等问题。因此,本文研制了一套太阳能与空气能双热源热泵系统实验平台(以下简称实验平台)。在直膨式太阳能热泵系统的基础上,结合太阳能光电技术和空气源热泵技术的特点,形成太阳能与空气源双热源热泵系统。

通过实验平台,解决太阳能和空气能利用中存在的问题,为太阳能复合热源系统的设计与应用提供一种新思路。

1 实验平台组成

1.1 实验平台工作原理

太阳能与空气源双热源热泵系统的工作原理如图1所示。在此系统中,光伏电池层直接压在直膨式太阳能热泵系统蒸发器表面上,利用制冷工质的蒸发吸热对光伏电池进行冷却^[14]。实验系统可根据不同太阳能辐射强度和不同环境温度,通过控制电磁阀和电子膨胀阀,实现3种运行模式,其具体运行过程如下。

(1)太阳能热源热泵模式:关闭电磁阀2、4,开启电磁阀1、3,即电子膨胀阀2和风冷蒸发器不运行。在太阳辐射强度很高的工况下,部分太阳能通过逆变器转换成电能输出,其余大部分太阳能转换

作者简介: 朱宸威(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:可再生能源应用与节能技术;蔡颖玲(1964-),女,博士,教授,主要研究方向:可再生能源应用与节能技术。

通讯作者: 蔡颖玲 Email: caiyingling963@126.com

收稿日期: 2020-09-22

成热能被流经并联的 PV/T 蒸发器的制冷工质直接吸收而蒸发, 以低温低压的过热气体状态进入变频压缩机。升温升压后的过热气体进入冷凝器, 将热量释放给蓄热水箱内部的水, 在冷凝器出口成为高压液体状态, 经电磁阀 1 进入电子膨胀阀 1。制冷工质在电子膨胀阀 1 节流压降后变成两相状态, 通过分叉管分别进入 PV/T 蒸发器 1 和 2, 完成一次循环。

(2) 空气源热源热泵模式: 关闭电磁阀 1、3, 开启电磁阀 2、4, 即 PV/T 蒸发器 1、2 和电子膨胀阀 1 不运行。此模式与太阳能热源热泵模式相似, 不同之处在于, 制冷工质从冷凝器流出, 经电磁阀 2 和电子膨胀阀 2 进入风冷蒸发器, 制冷工质从周围环境中的空气吸收热量, 并在风冷蒸发器内直接转变成过热气体, 经电磁阀 4 后进入变频压缩机。但此模式是在太阳辐射强度很弱或阴雨天气的工况下才运行。

(3) 太阳能—空气源复合热源热泵模式: 同时开启电磁阀 1、2、3、4, 同时开启电子膨胀阀 1 和 2, 风冷蒸发器和 PV/T 蒸发器 1 和 2 同时运行。此模式同上述两种运行模式相同, 电子膨胀阀 1 和 2 分别控制 PV/T 蒸发器 1、2 和风冷蒸发器, 此时风冷蒸发器作为辅助热源。此模式在太阳辐射强度较弱的工况下运行。

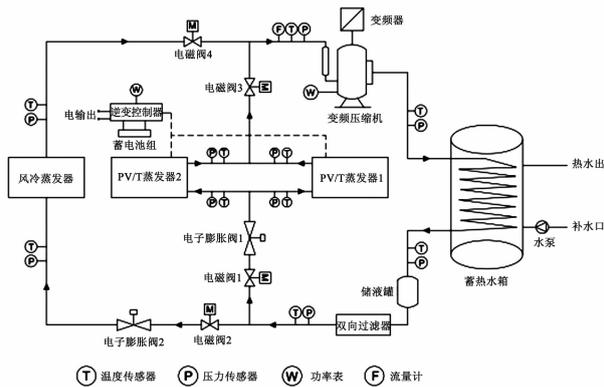


图 1 太阳能与空气能双热源热泵系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of solar/air energy dual heat source heat pump system

1.2 实验平台主要装置

实验平台采用 R134a 为制冷工质, 热泵循环系统主要由 PV/T 蒸发器、风冷蒸发器、变频压缩机、蓄热水箱、电子膨胀阀等主要部件以及储液罐和双向过滤器等辅助部件组成。光伏发电系统包括多晶硅电池板、逆变器及相关配套设备组成。对此拟做研究阐述如下。

1.2.1 PV/T 蒸发器和风冷蒸发器

PV/T 蒸发器是整个实验系统核心部件之一。光伏电池层通过导热胶与吹胀铝板层相粘合, 并在吹胀铝板层背部铺设绝热材料(保温层), 形成 PV/T 蒸发器。实验系统使用 2 块 PV/T 板作为蒸发器, 以并联形式相连。光伏电池层采用多晶硅电池板(合计功率为 580 W)。吹胀铝板层采用单面吹胀法, 外部尺寸为 1.74 m×0.9 m, 有效集热面积为 1.5 m²。2 个 PV/T 蒸发器不同之处在于吹胀铝板层采用 2 种不同流道形式, 一种为蜂窝结构, 另一种为树形结构。同时, 每个 PV/T 蒸发器内预留了 10 个热电偶温度计测点孔。风冷蒸发器作为热泵系统热源之一^[15], 具有自动除霜功能, 能够满足实验台需求。

1.2.2 变频压缩机

为了更好地适应太阳辐射强度的变化, 实验平台采用变频压缩机, 主要性能参数见表 1。

表 1 变频压缩机性能参数

Tab. 1 Performance parameters of variable frequency compressor

项目	参数
型号	WHP04000VRKQA6JT6
适用制冷剂	R410A/R134a
额定输入功率/W	412
额定频率/Hz	50
排气量/(ml·rev ⁻¹)	10.2
转速范围/rpm	1 000~7 200
运行频率范围/Hz	16.7~120.0
制冷剂充注允许量/g	1 200.0

1.2.3 电子膨胀阀

电子膨胀阀具有过热度调节范围广、执行动作迅速以及精确性高等优点, 因此被广泛使用。本实验平台采用 2 个电子膨胀阀, 其规格均为 DPF (TS1) 1.3C-01, 主要性能参数见表 2。

表 2 电子膨胀阀性能参数

Tab. 2 Performance parameters of electronic expansion valve

项目	参数
阀口公称口径	1.3
适用制冷剂	R134a
适用环境温度/°C	-30~60
适用流体温度/°C	-30~70
使用压力/MPa	0~4.2
全开脉冲	500

1.2.4 蓄热水箱和冷凝器

冷凝器采用沉浸式结构, 即冷凝器盘管直接安

装在蓄热水箱内。冷凝盘管为单螺旋管结构,其盘管直径采用规格为12×1 mm的紫铜管。蓄热水箱采用承压式不锈钢内胆设计,内胆厚度为1.2 mm。水箱净容量为200 L,直径为540 mm,高1 500 mm。蓄热水箱的外桶材质为镀锌板,厚度为0.55 mm,其保温层厚度为50 mm。水箱下部设有冷水补水接管,与自来水管相连;水箱上部设有热水出水接管。

1.2.5 其他辅助设备

为保障实验平台安全、有效地运行,还需安装其他辅助设备。冷凝器出口安装储液器和干燥器,一方面能够储存制冷剂和吸收制冷剂中的水分,另一方面能有效防止“冰堵”以及“脏堵”。变频压缩机设置高低温和高压保护装置,当温度和压力超出一定范围时,压缩机将自动停机保护。PV/T蒸发器设有可调配支架板,保证最大限度收集太阳辐射。

2 实验平台数据采集与监控

2.1 实验平台功能模块

为了对实验平台的运行特性进行全面研究,需要真实的测试系统的实际运行数据,才能合理地分析实验得出的结论。图2显示了实验平台的功能模块,包括:传感器标定模块、系统原理模块、系统设定模块、运行模式选择模块、数据采集处理模块、实时数据显示模块、实验记录查询模块和报警功能模块。在每个模块中有相对应的界面以及相应的控制功能,既能够清晰地显示系统运行状态,同时保证了系统安全、稳定地运行。实验平台设有自动和手动两种模式,操作人员可以设置不同参数对实验台进行相应的优化。

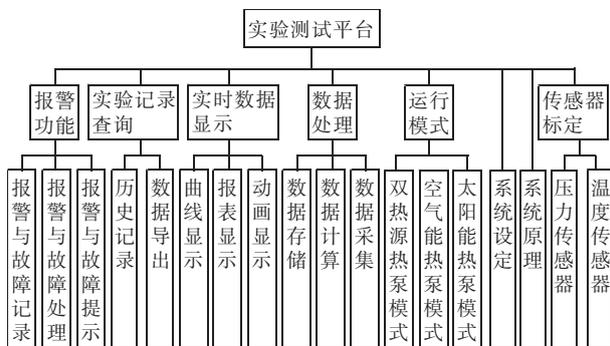


图2 实验平台功能图

Fig. 2 Function diagram of experimental platform

2.2 实验平台主要参数测量

实验平台待测参数主要有:各部件进口和出口的温度和压力、制冷剂流量、压缩机功率及光伏组件发电功率等,相应传感器和测量设备的主要测点布

置如图1所示。实验平台所使用的测量设备以及相应的测量精度见表3。

表3 测量设备和测量精度

Tab. 3 Measurement equipment and measurement accuracy

测量设备名称	测量参数	测量精度
温度传感器	温度	测量范围:-50 °C ~ 100 °C (A级) 精度等级:±0.1 °C
压力传感器	压力	量程:0 ~ 25 bar 测量精度:0.3%
气体质量流量计	制冷剂流量	量程:0.05 ~ 120 m/s 精度:1%的度数±满量程
功率表	功率	测量精度:±0.1%

为了对外界气象参数进行实时的测量,采用便携式自动气象站,其测量参数包括太阳辐射强度、环境风速、风向、大气温度、大气湿度和大气压力。表4给出了测量上述六种气象参数所要求设备的测量精度。

表4 待测参数和测量精度

Tab. 4 Parameters to be measured and measurement accuracy

测量设备	测量参数	测量精度
	太阳辐射强度	±2%
	环境风速/(m·s ⁻¹)	±(0.3+0.03 V)
便携式自动气象站	风向/(°)	±3
	大气温度/°C	±0.3
	大气湿度/(% RH)	±3
	大气压力/hPa	±0.3

为了实时控制压缩机运行频率,选用了与之配套的变频器,额定输入电压为220 V AC,最大输入功率为2 kVA,运行频率范围为15 ~ 150 Hz。该变频器支持2线RS485通信,通信协议采用Modbus-RTU协议,用户可以实现遥控、遥信和遥测功能。通信信息里包含了电机运行的实时参数,如电压、电流、转速以及报警信息等。为了实时控制电子膨胀阀,选用了与之配套的型号为SEC601-00的控制器,其中温度和压力传感器的型号分别是NTC 5 KΩ和YCQB02H01,其接线图如图3所示。

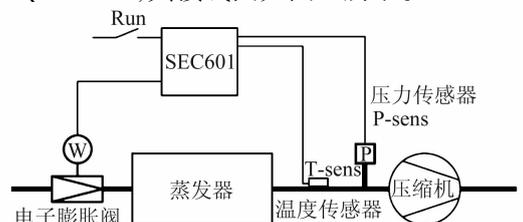


图3 电子膨胀阀控制器接线图

Fig. 3 Wiring diagram of electronic expansion valve controller

实验平台上位机采用组态王程序,下位机采用PLC,对系统进行数据采集、监控和调控。上述各测量仪器将检测到的信号转化为电信号并传输至数据采集控制器,数据采集控制器与计算机通过相应的通讯接口连接。计算机通过组态王程序的处理将数据采集控制器传来的数据实时地显示出来,实现在线监视功能。同时,数据采集控制器的数据信号经上位机处理转换成电压信号对电磁阀、电子膨胀阀进行调控。

3 实验平台性能评价指标

评价太阳能与空气能双热源热泵系统的性能指标主要有系统平均制热量、系统平均供热性能系数、系统综合光电光热效率等。对此可做阐释如下。

(1)系统平均制热量。对应数学公式可写为:

$$Q_w = \frac{c_{pw}\rho_w V_w(t_{w,2} - t_{w,1})}{\tau}, \quad (1)$$

其中, Q_w 表示系统平均制热量(W); c_{pw} 表示水的定压比热容($J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$); ρ_w 表示水的密度(kg/m^3); V_w 表示蓄热水箱容积(m^3); $t_{w,1}$, $t_{w,2}$ 表示实验开始/结束时蓄热水箱的初始/终止水温($^\circ C$); τ 表示热水加热时间(s)。

(2)系统平均供热性能系数(COP)。对应数学公式可写为:

$$COP = \frac{Q_w}{W_{com}}, \quad (2)$$

其中, W_{com} 表示整个热水加热过程中压缩机的耗功量(W)。

(3)系统光热效率(η_{th})。对应数学公式可写为:

$$\eta_{th} = \frac{Q_w}{A_c I}, \quad (3)$$

其中, A_c 表示集热器有效面积(m^2); I 表示太阳辐射强度(W/m^2)。

(4)系统光电效率(η_{pv})。对应数学公式可写为:

$$\eta_{pv} = \frac{Q_{pv}}{A_{pv} I}, \quad (4)$$

其中, Q_{pv} 表示光伏组件实际输出功率(W); A_{pv} 表示光伏电池有效面积(m^2)。

(5)系统综合热效率($\eta_{pv/t}$)。对应数学公式可写为:

$$\eta_{pv/t} = \eta_{th} + \eta_{pv}. \quad (5)$$

4 结束语

太阳能与空气能双热源热泵系统实验平台的研制,综合了太阳能光热和光电利用技术、热泵技术等多项内容,通过PLC监控系统对实验平台数据进行实时收集、处理、显示和反馈,形成了被控量的智能控制体系,使得实验操作简便易控,实验数据稳定可靠。

由于制冷工质的直接吸热蒸发,一方面提高了系统的蒸发温度,从而提高光热转换效率以及系统性能系数;另一方面,保证光伏电池始终工作在较低的温度范围之内,提高光电转换效率,延长电池使用寿命。

参考文献

- [1] 王卓宇. 世界能源转型的漫长进程及其启示[J]. 现代国际关系, 2019(7):51-59,28.
- [2] 张锐, 寇静娜. 全球清洁能源治理的兴起:主体与议题[J]. 经济社会体制比较, 2020(2):182-191.
- [3] 李俊峰. 可再生能源应成我国能源发展战略重点[J]. 能源研究与利用, 2020(1):6-8.
- [4] 任林昌. 太阳能光热利用的应用与发展[J]. 科技经济导刊, 2019,27(32):93.
- [5] 国家发展改革委员会. 可再生能源发展“十三五”规划(上)[J]. 太阳能, 2017(2):5-11,37.
- [6] KONG Xiangqiang, SUN Penglong, DONG Shandong, et al. Experimental performance analysis of a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater with R134a in summer [J]. International Journal of Refrigeration, 2018,91:12-19.
- [7] KONG Xiangqiang, YANG Yimeng, ZHANG Maoyuan, 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.
- [8] 徐亮, 李舒宏, 张小松, 等. 不同型式PV/T一体化系统的对比研究[J]. 建筑热能通风空调, 2017,36(9):1-7,81.
- [9] 陈剑波, 于海照, 岳畏畏. 太阳能光伏光热一体化组件的应用特性实验研究[J]. 太阳能学报, 2015,36(1):154-161.
- [10] 佟建南, 全贞花, 赵耀华, 等. 太阳能与空气源双蒸发器热泵复合供能系统性能实验研究[J]. 建筑科学, 2018,34(4):58-65.
- [11] DENG Weishi, YU Jianlin. Simulation analysis on dynamic performance of a combined solar/air dual source heat pump water heater [J]. Energy Conversion and Management, 2016,120:378-387.
- [12] 王超, 陶乐仁, 申玲, 等. 空气源热泵热水器系统性能优化研究[J]. 轻工机械, 2016,34(5):85-89.
- [13] 刘馨, 吴玥, 梁传志, 等. 寒冷地区绿色建筑土壤源-空气源双源热泵运行特性分析[J]. 建筑科学, 2020,36(2):19-27,37.
- [14] 季杰, 裴刚, 何伟, 等. 太阳能光伏光热综合利用研究[M]. 北京:科学出版社, 2018.
- [15] 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.