

多太阳能集热蒸发器并联热泵系统的实验研究

蒋绿林¹, 胡 静¹, 侯亚祥¹, 姜钦青², 胡 松³

(1. 常州大学热能工程系, 常州 213016; 2. 江西省建筑科学研究院, 南昌 330013; 3. 江西水利职业学院, 南昌 330013)

摘 要: 建立多太阳能集热蒸发器并联热泵系统的实验装置, 分析在正常和恶劣工况下, 太阳能热泵集热蒸发器的热性能。结果表明, 在相同太阳辐照量的条件下, 各太阳能集热蒸发器出口处过热度与压缩机进口处过热度基本一致, 且均能正常工作; 不论在正常工况还是恶劣工况下, 蒸发器阵列的整体性能均可满足要求; 通过比较多太阳能集热蒸发器并联热泵热水系统与空气源热泵热水系统 COP 可知, 多太阳能集热蒸发器并联热泵热水系统 COP 基本维持在 5.0~6.0 之间, 相比于空气源热泵热水系统 COP 在 2.0~3.0 之间有明显优势; 证明多太阳能集热蒸发器并联形成一个大的太阳能热泵系统是可靠的。

关键词: 多太阳能集热蒸发器; 直膨式; 太阳能热泵; 实验研究

中图分类号: TK114

文献标识码: A

0 引 言

太阳能作为清洁可再生能源, 一直受到广泛关注。太阳能热利用的先驱者 Jodan 等^[1]、Sporn 等^[2]首先对太阳能与热泵的联合供暖系统进行研究, 提出该系统在美国大部分地区进行供暖的技术和经济可行性。20 世纪 80 年代初, Chaturvedi 等^[3]对直膨式太阳能热泵在稳定工况下的性能进行了初步理论研究。2014 年刘睿盈等^[4]采用 Fluent 软件对太阳能热泵集热蒸发器 3 种不同流道形式的结构单元进行数值分析, 获得了蒸发器表面温度场分布, 并对流道单元换热特性进行分析。以上文献对太阳能热泵蒸发器进行了研究分析, 是对太阳能与热泵的初步探索。

随着直膨式太阳能热泵研究的深入, 市面上已出现一些适合小热负荷的直膨式太阳能热泵产品, 但由于建筑面积的扩大、区域式能源的发展、太阳能集热蒸发器数量上的限制, 小型热负荷的直膨式太阳能热泵产品已无法满足用户要求, 因此在一定程度上影响了其应用。为了解决这种局限性, 必须考虑采用多集热蒸发器并联以满足不同用户的供热要求。然而, 多集热蒸发器并联在增大系统规模的同时, 也带来了制冷剂流经的管道增长、流量分

配不均匀以及制冷剂蒸发吸热不均匀等问题。本文通过实验对多太阳能集热蒸发器并联在不同工况下的热性能进行研究。

1 实验装置及测试系统

对于大型的直膨式太阳能热泵系统, 其蒸发器必然由多个太阳能集热蒸发器联接而成, 因此多太阳能集热蒸发器的联接方式对整个系统的性能有很大影响。本文采用并联方式, 且保证每条支路的管路长度都相等, 即制冷剂 R134a 流过每块集热板所需的管路长度相等。制冷剂 R134a 在太阳能集热蒸发器内吸收热量, 经压缩机压缩后变为高温高压过热蒸汽, 再经冷凝器(即热水箱内盘管)冷凝为液态制冷剂, 然后进入膨胀阀节流为低温低压气液两相混合物, 最后回到太阳能集热蒸发器吸热蒸发变为气态制冷剂, 如此完成 1 个循环过程。图 1 为直膨式多太阳能集热蒸发器并联热泵实验系统流程图, 压缩机选用上海日立 WHP09800DCV-C9EU 型转子式压缩机, 其额定制热量为 9.97 kW, 额定功率 2.46 kW。集热蒸发器共由 10 块常州海卡太阳能热泵有限公司生产的 1000 mm×2000 mm×80 mm 单太阳能集热蒸发器组成, 为了方便阐述, 将 1#~5#太阳能集热蒸发器并联成 A 组蒸发器, 将 6#~10#

收稿日期: 2016-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51308077)

通信作者: 胡 静(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事太阳能热泵及地源热泵应用方面的研究。929763169@qq.com

太阳能集热蒸发器并联成B组蒸发器,将A组蒸发器与B组蒸发器并联成蒸发器阵列。由于是太阳能集热蒸发器数量较多,在太阳能集热蒸发器进出口处设有流量分配器,保证每块太阳能集热蒸发器制冷剂流量均匀。

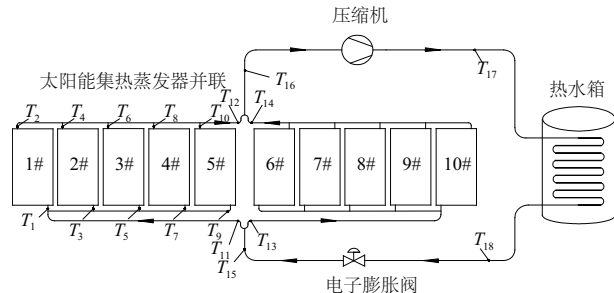


图1 直膨式多太阳能集热蒸发器并联热泵实验系统流程图

Fig. 1 Experiment system flow chart of direct expansion more solar collector evaporator parallel heat pump

实验测试记录的数据包括:太阳辐照强度、单个集热蒸发器的进/出口温度以及多集热蒸发器并联的整体进/出口温度等,分别对太阳辐照强度、1#~5#蒸发器对应进/出口处制冷剂温度(图1中 T_1/T_2 、 T_3/T_4 、 T_5/T_6 、 T_7/T_8 、 T_9/T_{10})、A组蒸发器总进/出口处制冷剂温度(图1中 T_{11}/T_{12})、B组蒸发器总进/出口处制冷剂温度(图1中 T_{13}/T_{14})以及蒸发器阵列总进/出口处制冷剂温度(图1中 T_{15}/T_{16})进行数据记录。系统测点位置如图1。所用的试验仪器包括:测温仪(常州市金艾联电子科技有限公司,JK-16U多路温度巡检仪),太阳辐射强度测量仪(北京中西远大科技有限公司,辐照量采集仪),压力表(YZ系列压力真空表)。

2 实验结果分析

实验内容包括正常工况(指太阳辐照良好,各单元集热蒸发器受到均匀太阳辐照)和恶劣工况(指太阳辐照较差,各单元集热蒸发器受到不均匀太阳辐照)2部分。

2.1 正常工况下实验

实验测试的平均环境温度为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于在实验时间段内,环境温度在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内波动,变化极小,因此忽略其对蒸发器性能的影响。图2给出了1#蒸发器进/出口制冷剂温度随辐照强度的变化曲线。从图2可看出:辐照强度在 $300\sim 600\text{ W/m}^2$ 间波动且较为剧烈;1#蒸发器进/出口处制冷剂温度波动也较大,

其中进口温度在 $5\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间波动,出口温度在 $7\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间波动;在系统启动初始阶段,由于太阳能集热蒸发器中积累了一定的热能,制冷剂在蒸发器内的蒸发温度较高,反映为进/出口温度也较高。随着系统的正常运行,制冷剂在蒸发器内的蒸发温度随辐照强度的变化而变化,达到动态平衡状态。但由于集热蒸发器具有一定的热容量,蒸发温度不会出现像辐照强度一样的剧烈变化。

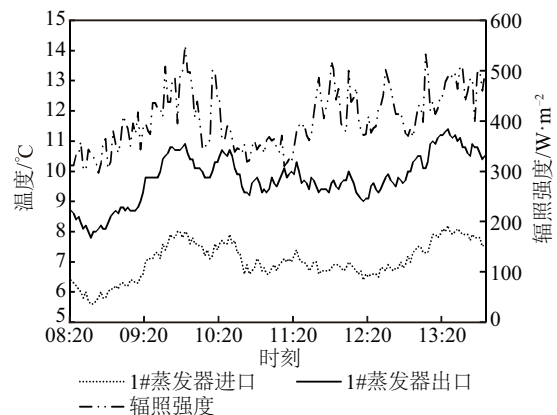


图2 辐照强度与1#蒸发器进/出口处制冷剂的温度曲线

Fig. 2 Graph of radiation intensity and 1 # evaporator inlet/outlet coolant temperature

图3给出了2#~5#和A组蒸发器进/出口制冷剂温度随辐照强度的变化曲线。从图3可看出:2#~5#和A组蒸发器进/出口处制冷剂温度波动较大,其中进口温度均在 $5\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间波动,出口温度均在 $7\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间波动;2#~5#蒸发器的进/出口处制冷剂温度的变化趋势一致且数值上差异甚小;A组蒸发器的总进/出口处制冷剂温度变化趋势与单个蒸发器的进/出口处制冷剂温度变化趋势一致,且数值大小相当。由以上分析可得:1#~5#蒸发器均能正常工作,而且由它们组成的小阵列运行正常,满足系统要求。

图4分别给出了A、B组以及蒸发器阵列总进/出口制冷剂温度及辐照强度的变化曲线。从图4可看出:辐照强度在 $300\sim 600\text{ W/m}^2$ 间波动且较为剧烈;A、B组以及蒸发器阵列总进/出口处制冷剂温度波动较大,其中进口温度均在 $5\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间波动,出口温度均在 $7.5\sim 13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间波动;图4中进口温度的波动趋势一致、数值大小相等,出口温度的波动趋势一致,但在温度数值大小上存在 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的差距,考虑到仪器探头的误差,认为这种出口温度的差距在允许范围内。由此可得:在吸收相同辐照量的情况下,B

组蒸发器的性能与 A 组蒸发器的性能相当。

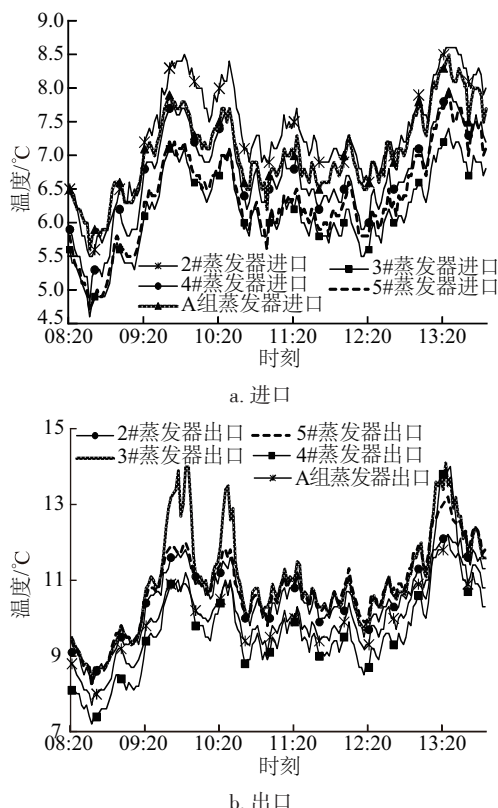


图3 2#~5#和A组蒸发器进/出口处制冷剂的温度曲线图
Fig. 3 Graph of 2#-5# and A evaporator inlet and outlet coolant temperature

取实验当天 10:00 数据进行具体数值分析,此时压缩机吸气压力为 0.47 MPa,对应的饱和温度 4.3 °C,则 1#~5#蒸发器出口处制冷剂的过热度分别为 6.3、7.1、6.5、7.0 和 6.4 °C,A 组蒸发器的总出口处制冷剂过热度为 6.8 °C,B 组蒸发器的总出口处制冷剂过热度为 7.2 °C,压缩机进气口处制冷剂的过热度为 7.1 °C,考虑到仪器探头的误差,各集热蒸发器间存在的差距在允许范围内。由此可得:各太阳能集热蒸发器出口处过热度与压缩机进口处过

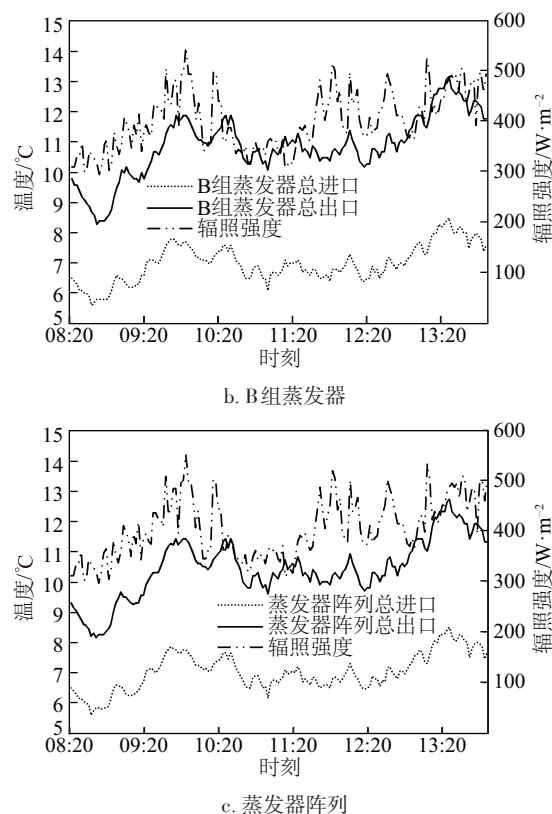
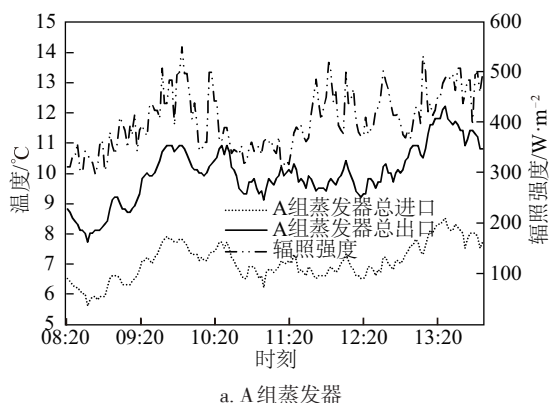


图4 辐照强度与A、B、蒸发器及蒸发器阵列总进/出口制冷剂的温度曲线图
Fig. 4 Graph of radiation intensity and A、B evaporator and C evaporator array total inlet/outlet coolant temperature

热度基本一致,在相同辐照量的情况下,各太阳能集热蒸发器均可正常工作,并且阵列而成的一个大蒸发器组的性能满足系统要求。

2.2 恶劣工况下实验

该工况的平均环境温度为 7.0 °C,为了测试在太阳辐照不均匀的情况下,多太阳能集热蒸发器的热性能,将 1#~5#太阳能集热蒸发器用硬纸板覆盖,使其集热面积为原来的一半。

图 5 给出了 A、B 组以及蒸发器阵列总进/出口制冷剂温度及辐照强度的变化曲线。从图 5 可看出:在 09:00~10:00,辐照强度在 400~500 W/m² 间波动且波幅较小,10:00 以后辐照强度曲线呈上升趋势且波动极小,最高约达 720 W/m²;在 09:00~10:00,A、B 组以及蒸发器阵列总进口处制冷剂温度在 6~8 °C 间波动,10:00 以后进口温度平缓升高,最高约达 11 °C;由于 A、B 组蒸发器的工况不同,导致它们出口温度相差较大,B 组蒸发器总出口温度比 A 组蒸发器的高 10~16 °C;蒸发器阵列总出口温度介于 A、B 组

蒸发器出口温度之间;图5中进口温度的波动趋势一致、数值大小相近,出口温度的波动趋势一致。

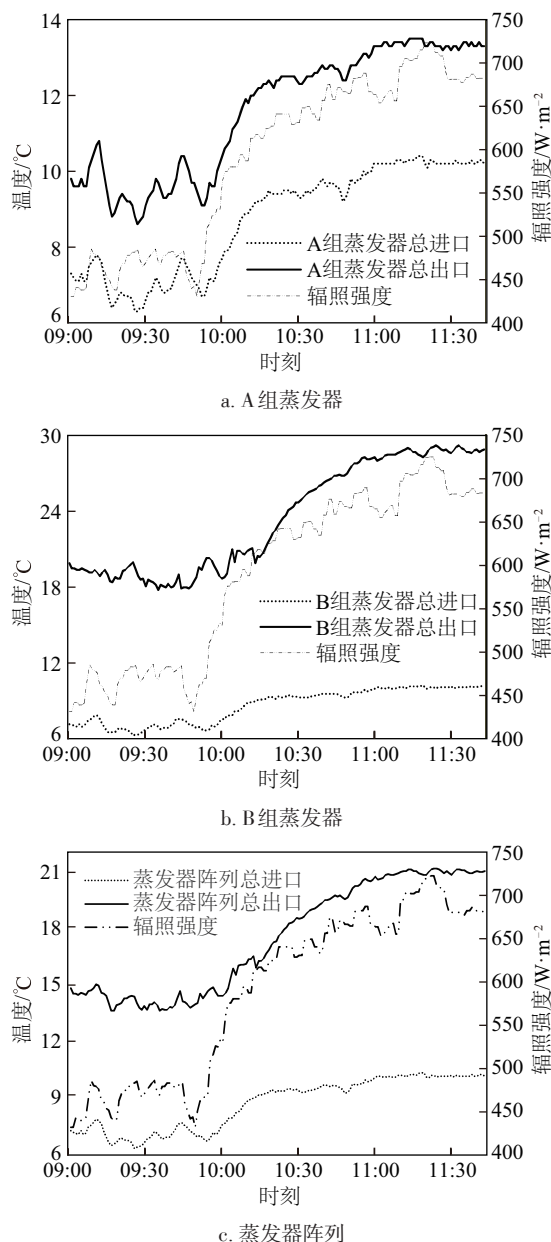


图5 辐照强度与A、B组蒸发器及蒸发器阵列总进/出口制冷剂温度的曲线图

Fig. 5 Graph of radiation intensity A、B evaporator and evaporator array total inlet/outlet coolant temperature

在系统运行过程中,由于A、B组蒸发器中的制冷剂在压缩机进口处(蒸发器阵列总出口处)汇流,A、B组蒸发器的热性能(如温度、焓值等)也因此中和,中和后的温度就是蒸发器阵列总出口温度,故蒸发器阵列总出口温度介于其他两者之间。

由于A组蒸发器一半被硬纸板遮挡,其集热面

积为原来的一半,吸热量也减少一半,而B组蒸发器的吸热量不变,则系统的整体吸热量减少为原来的四分之一,此时电子膨胀阀自动减小其开度,制冷剂质量流量随之减小,由于系统控制器控制进入A、B组蒸发器的制冷剂质量流量相等,从而进入B组蒸发器的质量流量偏小,又因B组蒸发器的吸热量不变,故其出口温度升高,而此时A组蒸发器因减少的吸热量与其制冷剂质量流量不匹配,导致其出口温度降低,从而造成了A、B组蒸发器总出口温度相差很大的现象,但2组集热器通过混合调节达到动态平衡;具有一定过热度的蒸汽进入压缩机以满足正常运行。

取实验当天11:00数据进行具体数值分析,此时压缩机吸气压力为0.54 MPa,对应的饱和温度8.5℃,A组蒸发器总出口处制冷剂过热度为6.8℃,B组蒸发器总出口处制冷剂过热度为19.7℃,压缩机进气口处制冷剂的过热度为12.2℃。由以上分析可得:A组蒸发器与B组蒸发器的吸热量不同,导致出口处制冷剂温度及过热度不等,即吸热量较多的B组蒸发器,其出口处制冷剂温度及过热度较高;虽然由于A、B组蒸发器的吸热量存在差异而导致两者的热性能相差较大,但蒸发器阵列的整体性能依然满足要求,不影响系统的运行。

2.3 不同运行方式COP比较

多太阳能集热蒸发器并联热泵热水系统加热1 t热水,与现有空气源热泵热水系统加热1 t热水数据比较,由图6可知多太阳能集热蒸发器并联热泵热水系统COP基本维持在5.0~6.0之间,相比于空气源热泵热水系统COP在2.0~3.0之间有明显的优势,系统的能源利用率较高。

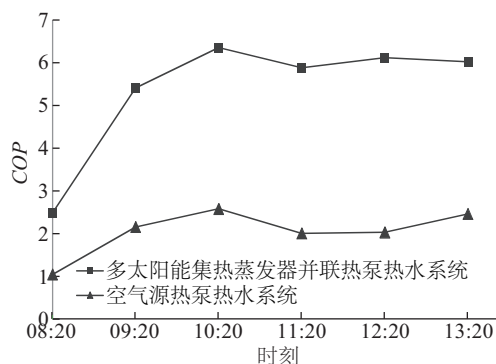


图6 多太阳能集热蒸发器并联热泵热水系统与空气源热泵热水系统COP比较

Fig. 6 Comprison COP of more solar collector evaporator parallel with heat pump hot water system and air source hot water syste

3 结 论

1) 考虑到多蒸发器串联模式下管路加长引起制冷剂流动阻力增大、流量分配不均匀以及制冷剂蒸发吸热不均匀等问题,提出多太阳能集热蒸发器并联模式,可避免管道过长导致阻力过大的问题,以保证系统更优地运行。

2) 在相同辐照强度下, A 组蒸发器的总进/出口处制冷剂温度变化趋势与单个蒸发器的进/出口处制冷剂温度变化趋势一致,且数值大小相当。1#~5#蒸发器均能正常工作,而且由它们组成的一个小阵列运行正常,满足系统要求。

3) 在正常工况下, A、B 组蒸发器的性能相当,蒸发器阵列的整体性能满足要求。在恶劣工况下,虽然由于 A、B 组蒸发器的吸热量存在差异而导致这两者的进/出口处制冷剂温度相差较大,但通过自身调节(混合),蒸发器阵列的整体性能仍满足要求,不影响系统的正常运行。

4) 不论在正常工况还是恶劣工况下,各太阳能集热蒸发器出口处过热度与压缩机进口处过热度基本一致,多太阳能集热蒸发器并联的直膨式太阳能热泵系统均能正常运行,并且阵列而成的一个大

蒸发器组的性能满足系统要求。

5) 多太阳能集热蒸发器并联热泵热水系统的 COP 较高,基本维持在 5.0~6.0 之间,相比于空气源热泵热水系统 COP 在 2.0~3.0 之间有明显优势,系统的能源利用率较高。

[参考文献]

- [1] Jordan R C, Threlkeld J L. Design and economics of solar energy heat pump system [J]. *Piping and Air Conditioning*, 1954, 26(1): 120—130.
- [2] Sporn P, Ambrose E R. The heat pump and solar energy [J]. *Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy*, 1955, 30(1): 26—31.
- [3] Chaturvedi S K, Roberts A S, Mei V. Solar collector as heat pump evaporator [A]. *Proceedings of 13th Intersociety Energy Conversion Conference [C]*, 2000, 34(2): 286—297.
- [4] 刘睿盈, 吴静怡, 孙晓琳. 直膨式太阳能热泵热水器集热/蒸发器流道结构分析与实验 [J]. *制冷技术*, 2014, 34(2): 1—6.
- [4] Liu Ruiying, Wu Jingyi, Sun Xiaolin. Analysis of collector/evaporator for direct expansion solar assisted heat pump water heater [J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2014, 34(2): 1—6.

EXPERIMENTAL STUDY ON MORE SOLAR COLLECTOR EVAPORATOR PARALLEL WITH HEAT PUMP SYSTEM

Jiang Lulin¹, Hu Jing¹, Hou Yaxiang¹, Jiang Qinqing², Hu Song³

(1. Department of Thermal Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China;

2. Jiangxi Academy of Building Research, Nanchang 330013, China;

3. Jiangxi Water Conservancy Vocational College, Nanchang 330013, China)

Abstract: It established a experimental device about direct expansion more solar collector evaporator parallel with heat pump system, in the normal and poor working conditions, the thermal performance of solar heat pump is analyzed. It shows that each of solar collector evaporators outlet superheat is basically identical to compressor inlet superheat, and it works well under the condition of the same amount of solar irradiance; No matter in normal or bad working conditions, the overall performance of the evaporator array can meet the requirements; By comparing COP of more solar collector evaporator parallel with heat pump hot water system and air source heat pump hot water system, we can know that COP of more solar collector evaporator parallel with heat pump hot water system maintained between 5.0 to 6.0, compared with COP of air source heat pump hot water system maintained between 2.0 to 3.0, there are obvious advantages; It Proves that more solar collector evaporator in parallel to form a large direct expansion solar heat pump system is reliable.

Keywords: more solar collector evaporator; direct expansion; solar heat pump; experimental study