

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202102042



太阳能空气能热泵中电子膨胀阀受 太阳辐射影响下的运行特性分析

王永帅, 田琦, 徐振, 李兆函

(太原理工大学 土木工程学院, 太原 030024)

摘要: 为了解决太阳能空气能热泵(SIASHP)系统中电子膨胀阀(EEV)的开度受太阳辐射影响,导致热泵系统无法稳定、高效运行的问题,运用实验和 TRNSYS 软件模拟的方法,对 SIASHP 系统中 EEV 受太阳辐射影响下的运行特性进行研究.结果表明:SIASHP 机组性能与 EEV 的开度不成正相关,存在某个峰值;相较于常规机组,SIASHP 机组的 EEV 阈值更大,根据此特性,当 EEV 在较大的开度区间内调节时,SIASHP 机组仍可保持正常运行;为保证 SIASHP 机组的安全稳定运行,自控装置应综合过热度和太阳辐射强度对电子膨胀阀进行调节.

关键词: 太阳能空气能热泵; 电子膨胀阀; 太阳辐射; 运行特性; TRNSYS 模拟

中图分类号: TK 513.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2022)01-0074-07

Analysis on Operation Characteristics of Electronic Expansion Valve of Solar Integrated Air Source Heat Pump Under Influence of Solar Radiation

WANG Yongshuai, TIAN Qi, XU Zhen, LI Zhaoan

(Department of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to solve the problem that the opening of electronic expansion valve (EEV) in the solar integrated air source heat pump (SIASHP) system is affected by solar radiation, which leads to the unstable and inefficient operation of the heat pump system, the operation characteristics of the EEV under the influence of solar radiation in SIASHP system are studied by methods of experiment and TRNSYS software simulation. The results show that there is no positive correlation between the performance of the SIASHP unit and the opening of the EEV, and there is a peak value; the EEV threshold of the SIASHP unit is higher than the threshold of the conventional unit, according to this characteristic, when the EEV is adjusted in a large opening range, the SIASHP unit can still maintain normal operation, and in order to ensure the safe and stable operation of the SIASHP unit, the automatic control device should integrate superheat and solar radiation intensity to adjust the electronic expansion valve.

Keywords: solar integrated air source heat pump; electronic expansion valve; solar radiation; operating characteristics; TRNSYS simulation

随着建筑技术的迅速发展,我国建筑能耗已占社会总能耗的 $1/3^{[1]}$,并预计在 2030 年将上升至

收稿日期: 2021-02-28

通信作者: 田琦(1966-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事可再生能源应用与建筑节能的研究. E-mail: 412559908@qq.com.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ04B02); 科技部国际合作项目(2013DFA61580)

40%^[2], 其中, 暖通空调的能耗占建筑能耗的 50%^[3]. 太阳能辅助空气源热泵(SAHP)系统是一种高效且节能的系统, 针对该系统中电子膨胀阀(EEV)的研究已取得了一定的成果. 文献[4-8]采用变频磁力泵和制冷剂 R134a, 通过近似实际工况的方案, 详细阐述测试设备的设计细节、测量参数、控制参数. Sun 等^[9]采用实际传感器代替虚拟传感器, 通过实际压力测量取代电子膨胀阀控制, 提升了电子膨胀阀调控的灵敏度和精度. Al-Badri 等^[10]采用 3 种方法控制变速压缩机和冷水机组电子膨胀阀, 分析对比后发现, 具有自适应 EEV 开路的单控制环路减小了过热度的波动, 提升了机组的稳定性. Del-Valle 等^[11]将加热元件缠绕在感温包上, 通过控制提供给加热装置的功率来控制蒸发器出口处的过热度, 减小了过热振荡, 从而防止低负荷下蒸发器中的振荡. 何俊等^[12]研究电子膨胀阀开度与压缩机频率变化对过热度及压比的影响, 并通过质量流量一致建立电子膨胀阀开度和压缩机频率两者的关系, 从而减少不必要的调节, 使系统在某一工况下迅速达到平衡. 周兴禧等^[13]通过分析膨胀阀开度对蒸发器入口压力、干度(过热度)、制冷剂流量和温度的影响, 得到两膨胀阀之间的最佳处理关系. 虞中畅等^[14]研究压缩机低频率下运行时的机组制冷量和机组性能, 提出可以提高冷冻水温度或室内温度使电子膨胀阀的控制比例带变宽. 国内外学者对电子膨胀阀的调控进行了大量研究, 但目前还没有针对 EEV 受太阳辐射影响的运行特性的研究, 而 EEV 由于受太阳辐射的影响又会对开度调节产生影响, 从而导致机组性能下降甚至损害机组的正常运行.

太阳能空气能热泵(solar integrated air source heat pump, SIASHP)系统的核心部件为室外太阳能集热蒸发器, 与常规空气源热泵相比, SIASHP 主要通过蒸发器翅片表面覆盖的一层太阳能薄膜, 同时吸收太阳辐射中的热能和空气能^[15]. 这一变化可以有效提升太阳辐射时系统的蒸发温度及蒸发压力, 但同时 EEV 的控制也受到太阳辐射变化的影响. 基于此, 本文使用实验和 TRNSYS 模拟的方法, 对 EEV 的运行特性进行探究.

1 系统组成及工作原理

SIASHP 实验系统由室内机和室外机组成. 采用对照法, 同时测试实验机组(SIASHP)和对照机组(常规空气源热泵)在相同环境条件下的能效比. 两个机组的室内换热器、压缩机和电子膨胀阀等主要部件均完全相同. 两个机组的室内机, 如图 1 所示. 实验机组的室外机, 如图 2 所示.



图 1 两个机组的室内机

Fig. 1 Indoor unit of two units



图 2 实验机组的室外机

Fig. 2 Outdoor unit of experimental unit

1.1 实验机组系统

主要部件. 1) 直流变频压缩机. 压缩机排量为 $10.8\text{ cm}^3 \cdot \text{r}^{-1}$, 额定输入功率为 835 W, 转速范围为 $12 \sim 120\text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$. 2) 室外换热器. 室外机翅片涂有铬原子层积吸热采暖膜, 采用强磁凝聚的方法附着在翅片表面, 太阳能吸收膜吸收率为 0.95, 红外发射率为 0.10; 蒸发器翅片为单排样式, 共 5 路, 每路含 6 个通道, 材质为紫铜管, 铜管间距为 25 mm, 换热管外径为 9.52 mm, 翅片厚度为 0.2 mm, 铝翅片间距为 2 mm, 安装角度为 90° . 室外换热器采用变频风机, 额定功率为 350 W, 额定风量为 $5\,000\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. 3) 室内换热器. 室内机材质为铜管套铝翅片, 采用变频风机, 额定功率为 250 W, 额定风量为 $1\,000\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. 4) 膨胀阀. 膨胀阀为电子膨胀阀, 开度控制受过热度影响, 过热度增大, 开度增大, 过热度减小, 开度减小; 开度范围为 15%~120%, 对应脉冲步数为 100~1 000.

气流组织. 装置将传统气流组织进行改进, 成为正压吹风的气流组织形式, 该气流组织形式的风机位于室外换热器后端, 减少了对室外换热器接收太阳能的阻挡, 提高了太阳能的利用率. 然而, 与吸风形

式相比,吹风形式的气流更加集中,造成换热器表面气流中部大、两端小的不均匀分布,严重影响了换热,因此,采用表面有不均匀开孔的孔板(中间开孔稀疏、两侧开孔密集)对气流进行导流,以达到气流组织均匀的目的(图 2)。

1.2 SIASHP 机组工作原理

SIASHP 机组的制热原理图,如图 3 所示.该机组室外换热器与室内换热器均为管翅式换热器,在换热时由制冷剂直接进行相变,换热器铜管翅片与空气直接换热.系统的节流装置采用电子膨胀阀.电子膨胀阀可通过控制面板调节开度,便于实验系统测试及实验数据分析.此外,压缩机采用涡旋压缩机.涡旋压缩机体积小,常用作家用设备制冷,与此装置结构特性较为匹配.此机组的制冷剂为 R410A,制冷剂经过室外机蒸发器换热,同时吸收太阳辐射热量,之后经过压缩机成为高温高压的气体进入室内机,通过冷凝器换热后成为低温高压液体进入膨胀阀及室外蒸发器,转换为低温低压的蒸汽后再次进入压缩机,完成一个制热循环.

相对于普通太阳能辅助空气源热泵机组,SIASHP 机组在室外机换热器翅片侧涂有铬原子层太阳能选择吸收膜,该吸收膜通过强磁聚的方法附着于翅片表面,目的是在冬季制热时吸收太阳辐射并转换为热量,从而提高蒸发温度,使冬季制热时机组性能更好.

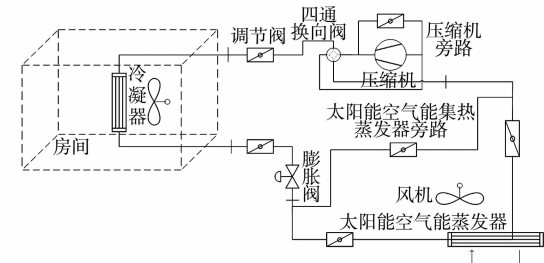


图 3 SIASHP 机组的制热原理图
Fig. 3 Heating schematic diagram of SIASHP unit

2 实验方法

实验从 2019 年 11 月 24 日进行至 2019 年 12 月 24 日,测试时间为 8:00—18:00,地点为山西省晋中市榆次区,经、纬度分别为 112.732 032,37.758 899,实验在一层楼地面进行.通过 TBQ-DL 型总辐射表对太阳辐射进行测试.选取这一个月气候条件达到实验要求(全天辐射范围在 50~500 W·m⁻²内)的时间进行测量,测试间隔为 30 min,以保证机组在室外气候条件变化时可达到稳定.测量的室外气象参数包括太阳总辐射量,空气温、湿度及风速.太阳总辐射量测量仪置于室外机外壳顶部.室外温度采用 Pt100 测量探头测量,并在探头外表面裹上铝箔反射层,避免太阳辐射对温度测量的影响.采用手持式湿度仪在机组吸风侧附近测量室外湿度.

表 1 实验仪器参数

实验设备分为主体设备和测试设备.主体设备包括太阳能空气能热泵及常规空气源热泵;测试设备包括太阳能总辐射仪、手持式温湿度仪、计时器、32 路无纸型温度记录仪和配套 Pt100 热电阻、手持风速仪、单相式电能表、电功率计.实验仪器参数,如表 1 所示.

实验过程中,调节 EEV 开度范围为 20%~80%,以 4%为调节间隔,在相同室外环境影响下,记录 SIASHP 机组和常规机组的太阳辐射强度、室内出风温度、室内温度、室内机组出风点风速及机组功率.

Tab.1 Parameters of experimental instruments

仪器名称	精度/参数
TBQ-DL 型太阳总辐射仪	波段 280~3 000 nm
FLUKE971 型手持式温湿度仪	相对湿度 2.5%/ 温度 0.1 ℃
计时器	0.01 s
Pt100 测量线	0.1 ℃
AZ8908 型手持风速仪	0.1 m·s ⁻¹
2 kW/10 A 电功率计	0.1 W
EMERSON PT4-30S 型压力传感器	0~3.0 MPa

3 实验模拟

根据 2019 年 11 月 24 日至 2019 年 12 月 24 日采集的气象参数及 SIASHP 机组的具体规格和热力学参数,应用加载 Fortran 编程的 TRNSYS 能耗模拟软件,对基于 SIASHP 的 EEV 与太阳辐射强度匹配特性进行模拟.对比实验机和对照机两组热泵装置的能效比(COP)、制热量.

3.1 数学模型的建立

使用 TRNSYS 软件对设备运行进行模拟时,需要将系统部件导入模拟平台.由于太阳能空气能热泵装置与常规空气源热泵的差异主要在于室外换热器,因此,需要建立室外换热器的数学模型.

室外换热器在运行时与空气进行热交换且吸收太阳辐射能量. 在建模过程中, 如果可以有效地将太阳能与空气能分离, 分别构建太阳能及空气能对系统的影响的数学模型, 那么, 整个系统就可以简化为常规空气源热泵与具有一定效率的太阳能供热装置并联, 从而大大简化模型建立时的工作量, 且所建立模型具有通用性, 将为其他太阳能辅助空气源热泵模型的简化提供依据.

3.1.1 室外换热器太阳能利用数学模型 系统太阳能辐射有效吸收量 Q_s 可以表示为

$$Q_s = SI - Q_{lo} - Q_{lh}. \tag{1}$$

式(1)中: S 为有效太阳能集热面积; Q_{lo} 为太阳能辐射损耗量; Q_{lh} 为空气热能辐射损耗量; I 为太阳辐射强度, 表达式为

$$I = \sigma T_{sky}^4 (R_0/R)^2. \tag{2}$$

式(2)中: σ 为斯蒂芬·玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$; T_{sky} 为天空有效温度; R_0 为太阳半径; R 为天空有效温度点与地球表面的距离.

3.1.2 SIASHP 室外换热器总换热量 室外换热器热交换过程包括换热器铜管与翅片吸收太阳能过程和室外换热器与空气换热过程. 以冬季为例, 翅片吸收太阳能使翅片温度上升, 系统太阳辐射换热量增加; 但翅片温度上升减小了翅片与周围环境的温差, 对流换热量减小. 室外换热器总换热量 Q 表示为

$$Q = Q_c + Q_s = Q_{c,o} - \Delta Q_c + Q_s. \tag{3}$$

式(3)中: Q_c 为对流换热量; $Q_{c,o}$ 为无太阳辐射时的对流换热量; ΔQ_c 为在除太阳辐射强度外的相同环境条件下, 有、无太阳辐射时的对流换热量差值.

根据式(3)可知, ΔQ_c 反映了太阳辐射对对流换热的影响, 与翅片温度和环境温度有关, 而翅片温度和换热器铜管导热相关, 因此, 需要从微元角度分析. 室外换热器截面示意图, 如图 4 所示. 图 4 中: x 为截面边界长度; dx 为截面微元长度; Φ_s 为截面太阳能辐射有效吸收量; Φ_x 为 x 部分的对流换热量; Φ_{x-dx} 为 $x-dx$ 部分的对流换热量; δ 为截面翅片厚度; L 为截面翅片宽度; H 为截面翅片长度.

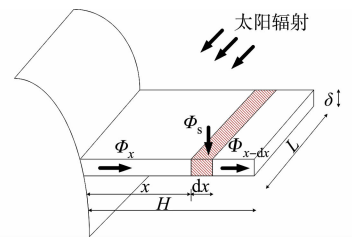


图 4 室外换热器截面示意图
Fig. 4 Section of outdoor heat exchanger

为了便于研究, 做以下 3 点假设: 1) 翅片上对流换热系数 h 及导热系数 λ 均为常数; 2) 翅片沿 L 方向的温度恒定; 3) 翅片表面对流换热热阻 $1/h$ 远大于导热热阻 δ/λ , 因此, 翅片在厚度方向的温度恒定.

3.2 SIASHP 系统的 TRNSYS 模型

为了更好地模拟太阳辐射影响下的系统性能, 利用 TRNSYS 仿真软件对 SIASHP 系统进行仿真. 由于 TRNSYS 软件中的 HVAC Library 没有系统所需求的太阳能空气能集热蒸发器, 因此, 基于 TRNSYS 开源的源代码编程, 使用 Fortran 编辑 SIASHP 系统.

通过该程序可以研究系统在静态工况下机组的性能参数. 模拟得到机组在静态工况下的匹配特性较好; 再接入 TRNSYS 室外天气参数, 研究系统在受太阳辐射影响下电子膨胀阀的运行特性及机组的动态匹配特性. SIASHP 机组和常规机组的 TRNSYS 模型, 如图 5 所示.

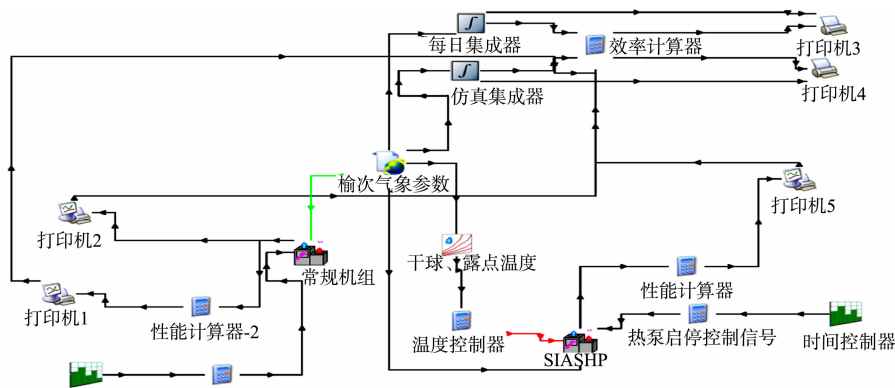


图 5 SIASHP 机组和常规机组的 TRNSYS 模型

Fig. 5 TRNSYS model of SIASHP unit and conventional unit

4 实验结果与分析

4.1 模拟验证

室外机除去压缩机动力部分的尺寸(长×宽×高)为 1.3 m×0.6 m×0.8 m;流体比热为 1.727 1 kJ·(kg·K)⁻¹;集热器翅片的效率系数为 69.5%;太阳能空气能集热蒸发器中的太阳能选择吸收膜的发射率为 6%,吸收率为 97%;室外机组外壳为透明钢化玻璃,透明板的可见光透过率为 90%,反射率为 10%,因此,折射率 $n=1.925$ 。

冬季工况不同太阳辐射强度下,机组的系统能效比 COP 表示为

$$\text{COP}=\frac{\dot{m}(h_1-h_2)}{P}.$$
 (4)

式(4)中: \dot{m} 为风机入口处质量流量; h_1 为室内机空气入口处空气焓值; h_2 为室内机空气出口处空气焓值; P 为机组运行总功率,包括压缩机、室内外风机及控制电路的总功率。

为了验证模拟结果的可靠性,将 SIASHP 机组 COP 的实验值和模拟值进行对比,如图 6 所示。图 6 中: t 为运行时间。

相较于实验值,模拟值的最大误差为 8.52%,最小误差为 2.70%。由此可以看出,SIASHP 机组的模拟结果和实验数据吻合较好,验证了建立模型的准确性。

4.2 太阳能空气能热泵系统性能分析

使用 TRNSYS 软件对电子膨胀阀开度进行无级调节,计算 SIASHP 机组的性能系数。

4.2.1 SIASHP 机组和常规机组性能对比 在电子膨胀阀开度为 12%时,模拟 SIASHP 机组和常规机组,并对其 COP 进行对比,如图 7 所示。

由图 7 可知:常规机组的 COP 最大值比 SIASHP 机组低 12.4%,并且其 COP 受室外温度影响较大;而 SIASHP 机组的 COP 随着室外太阳辐射强度的增大而增大。

4.2.2 SIASHP 机组在不同 EEV 开度下的机组性能 选取 2019 年 11 月 24 日至 2019 年 12 月 24 日之间平均太阳辐射强度最大的一天,即 2019 年 12 月 15 日,通过 TBQ-DL 型太阳总辐射仪实测太阳辐射强度(I),结果如图 8 所示。通过 TRNSYS 软件进行模拟,得到 SIASHP 机组的 COP 随电子膨胀阀开度(α)的变化,如图 9 所示。

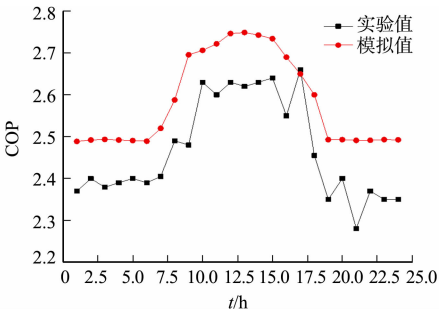


图 6 实验值和模拟值的对比
Fig. 6 Comparison between experimental and simulation values

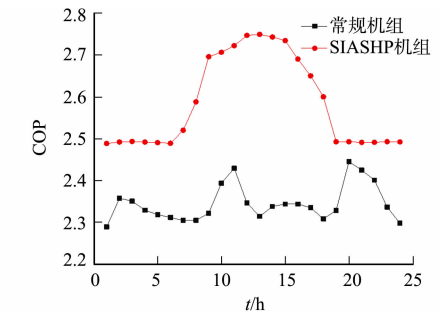


图 7 SIASHP 机组和常规机组的 COP 对比
Fig. 7 Comparison of COP between SIASHP unit and conventional unit

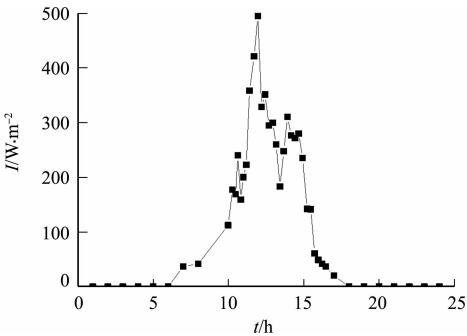


图 8 太阳辐射强度随时间的变化
Fig. 8 Variation of solar radiation intensity with time

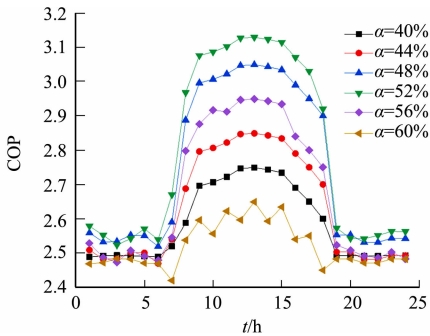


图 9 SIASHP 机组 COP 随电子膨胀阀开度的变化
Fig. 9 Variation of COP of SIASHP unit with opening of electronic expansion valve

由图 8,9 可知:SIASHP 机组的 COP 随着太阳辐射强度的增强而增强,当太阳辐射强度达到最大时,机组能效比最大,当太阳辐射强度减弱时,机组能效比下降;机组 COP 的最大值由高到低对应的

EEV 开度为 $52\% > 48\% > 56\% > 44\% > 40\% > 60\%$, 在开度为 $40\% \sim 52\%$ 的调节区间内, 随着 EEV 开度的增大, 机组 COP 也随之升高; 相较于开度为 40% , EEV 开度为 52% 时机组的 COP 最大值增大了 13.8% , 之后随着开度的增大 (52% 调节至 56% 时), 机组 COP 最大值由 3.13 下降至 2.95 , 下降了 6.1% , 当 EEV 开度为 60% 时, 机组 COP 最大值下降了 18.1% 。

造成这种现象的原因是在电子膨胀阀开度较小时, 随着开度的增大, SIASHP 机组的制热量增大, 功率相对增大, 机组的 COP 也逐渐提高, 但由于电子膨胀阀的控制比例带 ζ 较小, 受控参数变化灵敏, 系统过调严重, 导致进入热泵集热蒸发器中的制冷剂流量超出其运行负荷, 使制冷剂进入压缩机中没有完全气化, 液体或湿蒸汽被吸入压缩机, 导致压缩机发生液击, 机组性能下降。

4.2.3 EEV 开度阈值对比 为了探究 SIASHP 机组和常规机组运行时 EEV 开度的阈值, 在图 8 所示的太阳辐射强度情况下进行模拟, 比较不同 α 下两个机组的均值 COP (COP_{av}), 如图 10 所示。

由图 10 可知: 当 $\alpha = 52\%$ 时, SIASHP 机组的 COP_{av} 达到最大, 在压缩机安全运行范围之内, 当 α 达到 84% 后, 机组性能达到稳定, 可见 SIASHP 机组的 EEV 开度阈值为 84% ; 相较于 SIASHP 机组, 常规机组的 EEV 开度受室外环境的影响较小, 因此受过热度的影响较小, 其 COP_{av} 最大值对应的 EEV 开度为 60% , 在压缩机安全运行范围之内, 当 EEV 开度为 76% 时, 机组性能达到稳定, 常规机组的 EEV 开度阈值为 76% 。可见 SIASHP 机组的 EEV 调节区间相较于常规机组提高了 12.5% , 这是由于 SIASHP 机组受太阳辐射影响, 进入蒸发器中的制冷剂换热充分。

4.2.4 EEV 开度随太阳辐射强度的变化 为了探究 SIASHP 机组和常规机组运行时 EEV 开度的变化, 在图 8 所示的太阳辐射强度情况下进行模拟, 研究 EEV 开度随太阳辐射强度的变化, 如图 11 所示。

由图 11 可知: 随着太阳辐射强度的增大, SIASHP 机组的 EEV 开度逐渐增大, 这是因为随着太阳辐射强度的增大, 过热度逐渐增大, 从而使 EEV 的开度增大; 当太阳辐射强度达到 $350\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, SIASHP 机组的 EEV 开度逐渐稳定, 随着太阳辐射强度继续增大至 $450\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 后, EEV 开度先下降后升高。这是由于太阳辐射增强使蒸发温度升高, 蒸发压力增大, 制冷剂流速增大, 与另一侧换热时间减少, 换热不充分, 造成蒸发器出口制冷剂温度下降, 过热度减小, 而随着过热度的降低, EEV 开度也逐渐减小。当换热充分时, 随着太阳辐射强度的增大, 过热度又逐渐增大, EEV 开度也随之增大。

当 SIASHP 机组性能不稳定时, 可以采用自动控制装置调节 EEV 开度, 使其在 $20\% \sim 80\%$ 范围内运行, 从而使进入压缩机的制冷剂完全气化, 保证压缩机安全运行。而常规机组的 EEV 开度虽也受过热度影响, 但其过热度只受室外干球温度影响, 因此, 在干球温度达到峰值后, 常规机组的 EEV 开度趋于稳定。

5 结论

- 通过实验和 TRNSYS 模拟, 对 SIASHP 机组的 EEV 运行特性进行研究, 得出以下 3 个结论。
- 1) 在室外环境条件相同的工况下, 当 EEV 开度为 52% 时, SIASHP 机组 COP 达到最大值, 为保证机组高效运行, 在 EEV 调控过程中, 不可一味增大开度, 应尽量使其保持在临界值处, 且在 EEV 设计时, 应注意会出现的超调等现象。
 - 2) 受太阳辐射影响, SIASHP 机组的 EEV 调节区间相较于常规机组提高了 12.5% 。根据此特性,

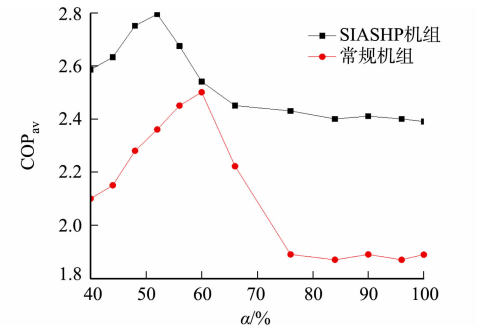


图 10 不同 α 下两个机组的 COP_{av} 对比
Fig. 10 Comparison of COP_{av} of two units under different α

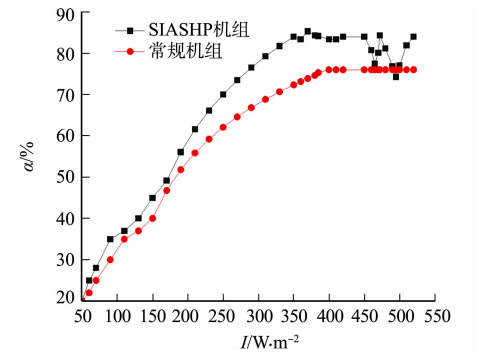


图 11 EEV 开度随太阳辐射强度的变化
Fig. 11 Variation of EEV opening with solar radiation intensity

在太阳辐射强度为 $0 \sim 450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 区间内,SIASHP 机组的 EEV 开度较大时,也可保持稳定运行而不出现故障。

3) 在太阳辐射强度达到 $450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,SIASHP 机组 EEV 开度会出现波动,导致机组运行不稳定,因此,在太阳辐射强度大于 $450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,可通过自控检测太阳辐射强度,自动调节 EEV 开度在 $20\% \sim 80\%$ 范围内运行。在设计机组时,自控装置应综合过热度和太阳辐射强度对 EEV 开度进行调节,当太阳辐射强度低于 $450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,可通过检测过热度进行调节;当太阳辐射强度大于 $450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,需检测太阳辐射强度来调控 EEV 开度。

参考文献:

- [1] 江亿.我国建筑节能战略研究[J].中国工程科学,2011,13(6):30-38. DOI:10.3969/j.issn.1009-1742.2011.06.005.
- [2] AL-ABIDI A A,MAT S B,SOPHAN K,*et al.* Review of thermal energy storage for air conditioning systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2012,16(8):5802-5819. DOI:10.1016/j.rser.2012.05.030.
- [3] 史丹.中国能源利用效率问题研究[M].北京:经济管理出版社,2011.
- [4] NILPUENG K,WONGWISES S. Experimental investigation of two-phase flow characteristics of HFC-134a through short-tube orifices[J]. International Journal of Refrigeration,2008,32:854-864. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2008.12.003.
- [5] LAZZARIN R,NARDOTTO D,NORO M. Electronic expansion valves vs. thermal expansion valves[J]. ASHRAE Journal,2009,51(2):34-38.
- [6] CHINNARAJ C,GOVINDARAJAN P. Performance analysis of electronic expansion valve in 1 TR window air conditioner using various refrigerants[J]. International Journal of Engineering Science and Technology,2010,2(9):4020-4025.
- [7] LIU Changhai,HOU Yu,MA Juanli,*et al.* Experimental study on the CO_2 flow characteristics through electronic expansion valves in heat pump[J]. International Journal of Refrigeration,2016,69:106-113. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2016.05.005.
- [8] CAO Xiang,LI Zeyu,SHAO Liangliang,*et al.* Refrigerant flow through electronic expansion valve: Experiment and neural network modeling[J]. Applied Thermal Engineering,2016,92:210-218. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.09.062.
- [9] SUN Jian,DONG Jin,SHEN Bo,*et al.* Virtual pressure sensor for electronic expansion valve control in a vapor compression refrigeration system[J]. Energies,2020,13(18):4917(1-13). DOI:10.3390/en13184917.
- [10] AL-BADRI A R,AL-HASSANI A H. A control method using adaptive setting of electronic expansion valve for water chiller systems equipped with variable speed compressors[J]. International Journal of Refrigeration,2020,119:102-109. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2020.06.008.
- [11] DEL-VALLE J G,QUINATO A K J Q,RUIZ F C. Experimental study of the static and dynamic behavior of a novel heat driven electronic controlled expansion valve[J]. Applied Thermal Engineering,2020,168:114718. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2019.114718.
- [12] 何俊,陶乐仁,胡鹏荣.变流量制冷系统中频率与电子膨胀阀开度的协同控制研究[J].制冷学报,2019,40(4):95-100. DOI:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.04.095.
- [13] 周兴禧,武永强,邵渊,等.双联变频空调系统建模与特性分析[J].上海交通大学学报,2002,36(11):1675-1679. DOI:10.3321/j.issn:1006-2467.2002.11.033.
- [14] 虞中畅,陶乐仁,王超,等.低频率下电子膨胀阀调节对制冷系统性能的影响[J].制冷学报,2016,37(6):91-96. DOI:10.3969/j.issn.0253-4339.2016.06.091.
- [15] 董旭.太阳能/空气能蒸发集热器一体化热泵冷剂直热供暖装置性能及效益的研究[D].太原:太原理工大学,2018.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:刘源岗)