

文章编号: 0253-4339(2023) 06-0029-07

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2023.06.029

电动汽车引射热泵空调系统性能实验研究

刘俊君 郭宪民 杜晓录

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

摘要 针对已提出的电动汽车引射热泵空调(EHPAC)系统进行改进,将车内、外侧换热器设计成前后排分离的形式,并加设引射器,形成梯级蒸发并回收膨胀功,从而提高系统的性能。实验研究了夏季及冬季工况下车内、外温度对 EHPAC 系统制冷及制热性能的影响,验证了引射器的使用可大幅提高汽车热泵系统的制热性能。将 EHPAC 系统与传统热泵系统(THPAC)进行对比,结果表明:对不同的车内、外温度工况,EHPAC 系统的制冷及制热性能均优于 THPAC 系统,制冷量提高约 21.5%~35.7%、制冷 COP 提高约 13.1%~21.7%、制热量提高约 4.4%~14.5%、制热 COP 提高约 11.3%~18.3%。同时表明车内温度的改变对 EHPAC 系统性能的影响比车外温度的影响更大。

关键词 电动汽车;热泵空调系统;引射器;变工况性能

中图分类号: TB657.5; U463.85⁺1

文献标识码: A

Experimental Study on Performance of Ejector Heat Pump Air Conditioning System for Electric Vehicle

Liu Junjun Guo Xianmin Du Xiaolu

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

Abstract To improve the existing ejector heat pump air conditioning (EHPAC) system for electric vehicles, indoor and outdoor heat exchangers were designed to be separated from the front and rear rows, and ejectors were added to achieve cascade evaporation and recover the expansion work. The performance of the system was thus improved. The influences of the indoor and outdoor temperatures of the vehicle on the cooling and heating performances of the EHPAC system under summer and winter conditions were experimentally studied. The verification results show that the use of ejectors can significantly improve the heating performance of heat pump systems in vehicles. Compared with the traditional heat pump air conditioning (THPAC) system for electric vehicles, the cooling and heating performances of the EHPAC system are better at different vehicle indoor and outdoor temperature conditions. The cooling capacity increases by approximately 21.5%~35.7%. The cooling coefficient of performance (COP) increases by approximately 13.1%~21.7%. The heating capacity increases by approximately 4.4%~14.5%, and the heating COP increases by approximately 11.3%~18.3%. This also indicates that the performance of the EHPAC system is more sensitive to the indoor temperature of the vehicle than the outdoor temperature.

Keywords electric vehicle; heat-pump air conditioning system; ejector; variable operating characteristics

电动汽车无需消耗化石燃料,对环境污染小,近年来得到迅速发展和应用,但增加续航里程是当前新能源汽车发展急需解决的问题之一^[1]。在冬季,电动汽车电池输出功率随环境温度的降低而减小,采用传统 PTC 元件对车内加热,会消耗大量电能,导致电动汽车的续航里程大幅降低。采用热泵系统可大幅提高加热效率,降低空调子系统能耗,增加电动汽车的续航里程,且兼具夏季制冷需求,因此在电动汽车中得到了广泛应用。空调系统作为电动汽车能耗最大的辅助子系统,其性能直接影响电动汽车的续航里

程^[2]。因此提高电动汽车热泵空调系统的制冷及制热性能对减小汽车空调在使用过程中的能量消耗、提高新能源汽车续航里程具有重要意义。

目前应用于电动汽车的热泵系统主要为三换热器系统,该系统通过阀门及风门进行制冷、制热及除湿模式的切换,系统 COP 高于传统的两换热器系统^[3]。为进一步提高该系统的性能,国内外学者进行了广泛研究。在低温环境下,补气是提高热泵系统性能的有效方法。Han Xinxin 等^[4]对带经济器循环的空气源热泵系统进行实验研究,发现该系统与无补

气循环系统相比,制热量和 COP 分别提高 12.6% 和 19.3%。I. Y. Cho 等^[5]对带经济器的热泵系统进行实验研究,发现在最佳喷射比的制热模式下,带经济器的系统比无补气系统的制热量和 COP 分别提高 7.5% 和 7.0%。Xu Shuxue 等^[6]在准二级闪蒸器热泵系统的基础上加入一个中间换热器,对其进行测试,结果表明,该系统在-20℃的蒸发温度工况下仍可运行,与基本的准二级闪蒸器系统相比,该系统的排气温度降低 6~8℃。Wang Jijin 等^[7]对比了闪蒸罐系统和经济器系统,发现闪蒸罐系统具有更好的性能。

解决低温环境下热泵系统性能及制热量衰减的另一个有效方法是利用引射器回收部分膨胀功并提高系统的蒸发温度。李浩等^[8]对车用 CO₂ 喷射制冷空调系统进行实验研究,结果表明,使用引射器可将传统系统 COP 提升 1.65%~12.60%。Zou Huiming 等^[9]对使用双引射器和单引射器的车用 CO₂ 热泵系统性能进行优化,结果表明,相比于传统跨临界 CO₂ 热泵系统,双引射器热泵系统制热 COP 提升 18%~19.79%。任立乾等^[10]将两段式喷嘴引射器应用于引射制冷系统,结果表明,制冷系统 COP 提高约 12%。郭宪民等^[11]在双级节流 CO₂ 跨临界制冷系统中用引射器代替第二膨胀阀,结果表明,引射器的应用提高了系统 COP。李敏霞等^[12]在准二级压缩制冷

系统中用引射器代替节流阀,结果表明,引射器的应用可大幅提升系统性能。Y. M. Alkhulaifi 等^[13]用引射器构建了电动汽车空调热管理的双温制冷系统,结果表明,引射器的应用可大幅降低系统焓损失及成本。徐瀚洲等^[14]将引射器用于液体再循环驱动装置,结果表明,利用引射器可大幅提高系统 COP 约 14%。

本课题组提出的新型电动汽车喷射式热泵系统使用了两个喷射器,在制冷及制热工况下均可利用制冷剂膨胀功提高系统 COP。同时,将车内换热器设计成前后排分离形式,形成梯级换热增大传热温差。张丹丹等^[15-16]对上述系统性能进行了模拟及实验研究,研究表明,引射热泵空调系统的制冷性能优于传统系统。本文对上述电动汽车引射热泵系统进行了改进,并对不同工况下的制冷、制热性能进行实验研究,并与传统热泵空调系统进行对比。

1 实验系统

实验系统装置包括电动汽车引射热泵空调系统 (ejector heat pump air conditioning, EHPAC)、环境室和数据测控系统 3 部分。其中,电动汽车引射热泵空调系统如图 1 所示。引射热泵空调系统的车内、外侧机组分别置于焓差法空调器性能实验台的室内、外侧环境间内,以提供实验的工况环境。

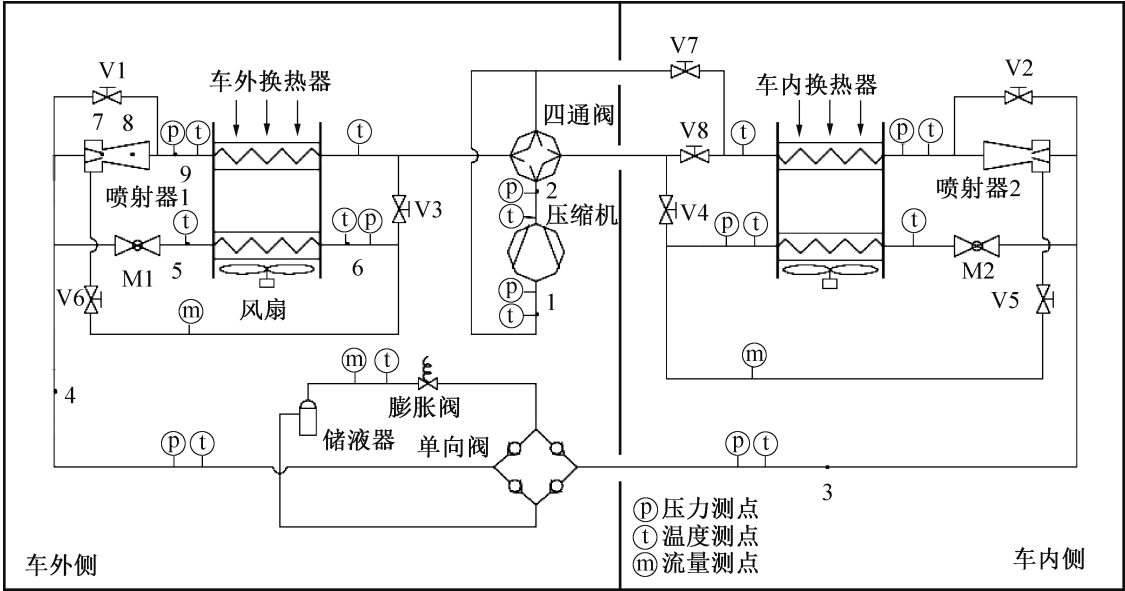


图 1 电动汽车引射热泵空调实验系统
Fig.1 Experimental system and measuring points of EHPAC system for electric vehicle

引射热泵空调系统的车内、外侧换热器均采用前、后排分离形式,在前后排换热器中间各设置一个引射器,并用调节阀 M1、M2 作为节流阀调节后排换

热器蒸发压力。系统采用截止阀 V1~V6 切换制冷、制热工况,用电磁阀 V7 (常闭)、V8 (常开) 切换除湿工况。在制热工况下,截止阀 V2、V4、V6 及调节阀

M2 全开,截止阀 V1、V3、V5 关闭,经电子膨胀阀降压后的制冷剂一部分经调节阀 M1 节流后进入后排蒸发器,另一部分进入引射器 1,在喷嘴中降压加速,并引射后排换热器出口蒸气,二者混合并在扩压室升压后进入前排蒸发器。工作过程压焓图如图 2 所示。其中状态点标号与图 1 相对应,1-2 为压缩机绝热压缩过程、2-3 为室内前后排并联换热器中的冷凝过程、3-4 为电子膨胀阀节流过程、4-5 为调节阀 M1 节流降压过程、5-6 为后排蒸发器等压吸热过程、4-7 为引射器喷嘴内的降压加速过程、8 点为引射器混合室出口状态点、8-9 为引射器扩压室的升压过程、9-1 为前排蒸发器等压吸热过程。在制冷工况下截止阀 V1、V3、V5 及调节阀 M1 全开,车外换热器前后排并联作为冷凝器,截止阀 V2、V4、V6 关闭,调节阀 M2 作为节流阀调节车内换热器前后排蒸发压力差,用引射器 2 引射室内换热器后排出蒸气。在制冷及制热工况下将截止阀 V1~V4 及调节阀 M1、M2 全开,截止阀 V5、V6 关闭,可将系统切换为传统热泵空调

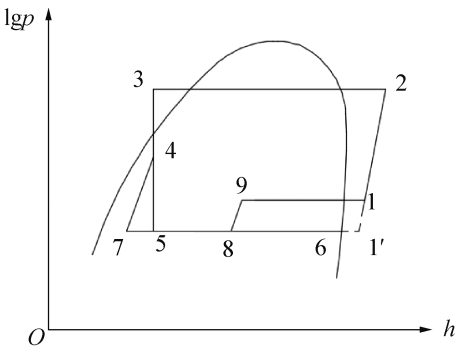


图 2 引射热泵空调系统 $\lg p$ - h 图
Fig.2 $\lg p$ - h of EHPAC system

系统(traditional heat pump air conditioning, THPAC),可与 EHPAC 系统的性能进行对比。THPAC 系统循环如图 2 中 1'-2-3-4-5-1' 所示。

图 1 中各测点温度采用 T 型热电偶测量,该热电偶精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,制冷剂侧压力传感器精度为 $\pm 0.1\%$ FS,制冷剂流量采用质量流量计测量,该质量流量计精度为 $\pm 0.1\%$ FS。实验过程中环境温度及湿度由焓差法空调实验台控制系统调节,可保持所设定的实验工况,并自动采集记录热泵系统功率等参数,系统制冷量根据换热器的制冷剂质量流量及进出口焓差计算。换热器前后排蒸发压力差通过调节阀调节,引射器的喉部面积可通过可调喷针进行微调。引射器喷嘴喉部直径为 1.3 mm、喷嘴入口收缩角度为 30° 、喷嘴扩张角为 8° 、混合室直径为 16 mm、混合室长度为 112 mm、扩压室扩张角为 3° ,实验系统其他部件参数参见文献[16]。

2 实验结果及分析

为研究电动汽车引射热泵空调系统的变工况性能,固定压缩机转速为 3 200 r/min,对不同车内、外工况的 EHPAC 系统制冷及制热性能进行实验测试。过冷度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、过热度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、前后排蒸发温差为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,车内车外干湿球温度如表 1 所示。制冷 1、制冷 2 工况分别用于研究车内、外温度变化对系统制冷性能的影响,制热 3、制热 4 工况分别用于研究车内、外温度对系统制热性能的影响。为将引射热泵系统性能与传统热泵系统进行对比,在表 1 对应的每一个工况均测试了传统热泵空调系统性能。

表 1 车内车外干湿球温度

Tab.1 Temperature of wet and dry bulb inside and outside the vehicle

实验工况	车外干球温度/ $^{\circ}\text{C}$	车外湿球温度/ $^{\circ}\text{C}$	车内干球温度/ $^{\circ}\text{C}$	车内湿球温度/ $^{\circ}\text{C}$
制冷 1	35~48	—	27	19.5
制冷 2	35	26.15	20~30	—
制热 3	-5~7	—	20	15
制热 4	7	6	17~27	—

2.1 车内、外温度对制冷性能的影响

图 3 所示为车外温度对系统 COP 及系统总制冷量的影响。由图 3 可知,随着车外温度的升高,系统 COP 及总制冷量下降。车外温度每升高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,系统 COP 平均下降约 3.78%,系统总制冷量平均下降约 0.96%。随着车外温度的升高,系统冷凝温度升高,虽然引射器的引射比也随之升高,使车内后排蒸发器

质量流量有所增加,缓解了质量流量下降幅度,但系统总质量流量随环境温度的升高仍呈下降的趋势(图 4),使总制冷量依然随环境温度的升高而降低。同时,随着车外温度的升高,压缩机压缩比也随之升高,功耗增大,造成系统 COP 降低。

图 5 所示为车内温度对系统 COP 及系统总制冷量的影响。由图 5 可知,随着车内温度的升高,系统

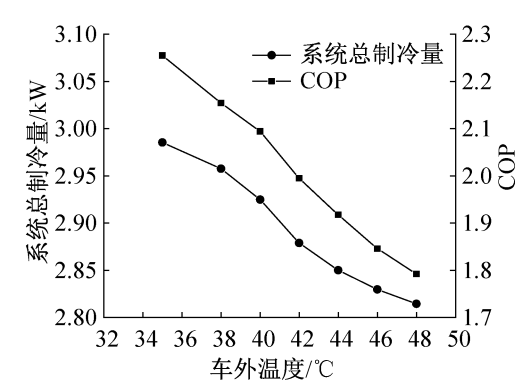


图 3 车外温度对系统总制冷量及 COP 的影响
Fig.3 Effect of outdoor temperature on total cooling capacity and COP

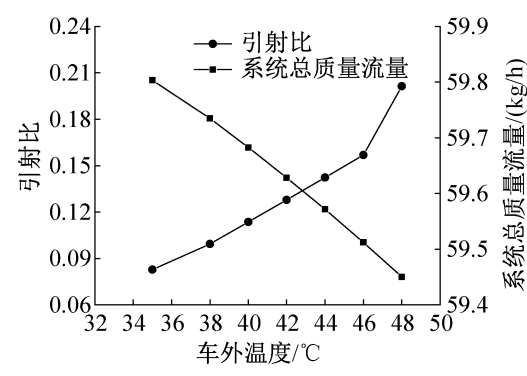


图 4 车外温度对引射比及系统总质量流量的影响
Fig.4 Effect of outdoor temperature on ejection ratio and total mass flow rate

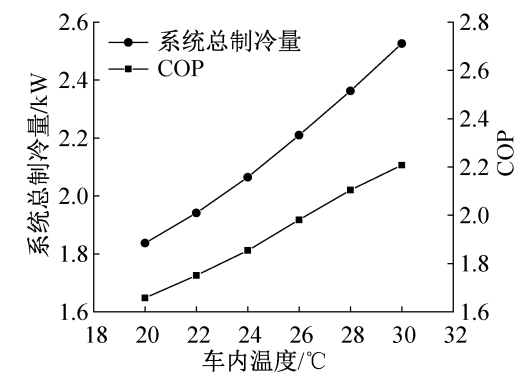


图 5 车内温度对系统总制冷量及 COP 的影响
Fig.5 Effect of indoor temperature on total cooling capacity and COP

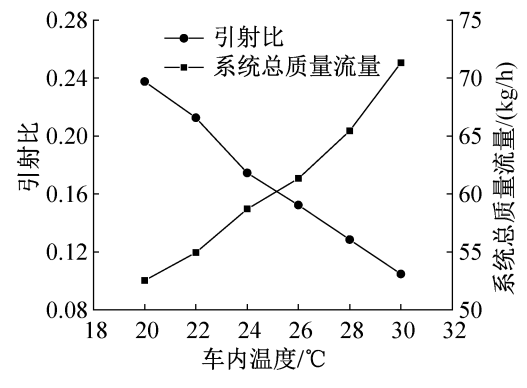


图 6 车内温度对引射比及系统总质量流量的影响
Fig.6 Effect of indoor temperature on ejection ratio and total mass flow rate

高,系统总质量流量增大,压缩机功耗增大,但系统总制冷量的增幅远大于压缩机功耗的增加,所以系统 COP 逐渐增大。

2.2 车内、外温度对制热性能的影响

图 7 所示为车外温度对系统 COP 及系统制热量的影响。由图 7 可知,随着车外温度的升高,系统 COP 及制热量均增大,这是系统蒸发压力升高所致。车外温度每升高 2 °C,系统 COP 平均增大大约 4. 25%,系统总制热量平均增大大约 8. 06%。图 8 所示为车外温度对引射器引射比及系统质量流量的影响,由图 8 可知,随着车外温度的升高,引射比随之减小,但由于系统中质量流量随车外温度的升高而增加,造成车外换热器后排流量呈先增加后减小的趋势,特别在车外温度较高的工况下迅速减小,后排换热器传热面积未能得到充分利用。后续的研究中可考虑用调节前后排压差的方式调节前后排换热器的流量比,以使系统性能达到最佳。

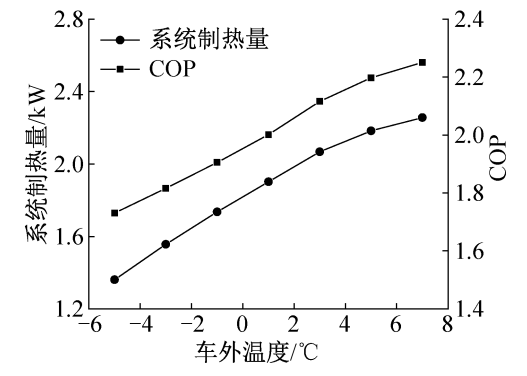


图 7 车外温度对系统制热量及 COP 影响
Fig.7 Effect of outdoor temperature on heating capacity and COP

图 9 所示为车内温度对系统 COP 及系统制热量的影响。由图 9 可知,随着车内温度升高,系统 COP 及制热量减小。车内温度每升高 2 °C,系统 COP 平

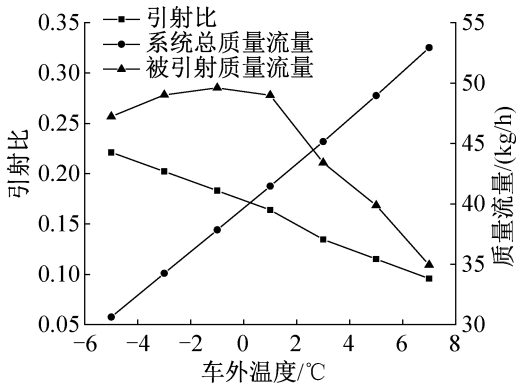


图 8 车外温度对引射比及质量流量的影响
Fig.8 Effect of outdoor temperature on ejection ratio and mass flow rate

均减小 5.32%，系统总制热量平均减小 4.29%。这是因为随着车内温度升高，虽然车外换热器后排流量增大，但其所占比例较小，总体上系统总质量流量随着车内温度升高而减小(图 10)，造成系统制冷量减小，而车内温度越高，压缩机功率越大，所以系统 COP 及制热量随车内温度的升高而下降。

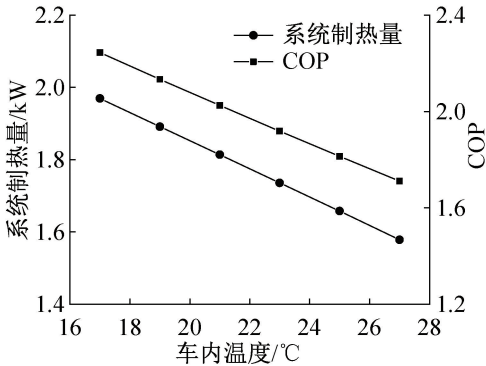


图 9 车内温度对系统制热量及 COP 影响
Fig.9 Effect of indoor temperature on heating capacity and COP

2.3 EHPAC 系统与 THPAC 系统性能对比

图 11、图 12 所示为不同车外、内温度下 EHPAC 系统与 THPAC 系统制冷性能的对比。由图 11、图 12 可知，所有实验工况下，EHPAC 系统的制冷性能均优于 THPAC 系统。在车外温度为 35~48 °C 范围内，EHPAC 系统的制冷量及 COP 分别提升约 21.5%~26.4%及 15.4%~19.6%，且在环境温度较低的工况下制冷 COP 提升较大。而在车内温度 20~30 °C 范围内，EHPAC 系统的制冷量及 COP 分别提高约 25.7%~35.7%及 13.1%~21.7%，且在车内温度较高的工况下热泵性能提升较大。

图 13、图 14 所示为不同车外、内温度下 EHPAC

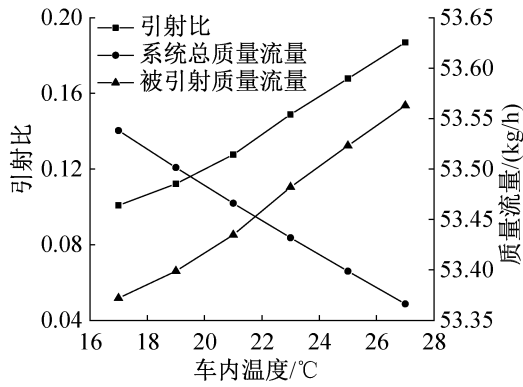


图 10 车内温度对引射比及质量流量的影响
Fig.10 Effect of indoor temperature on ejection ratio and mass flow rate

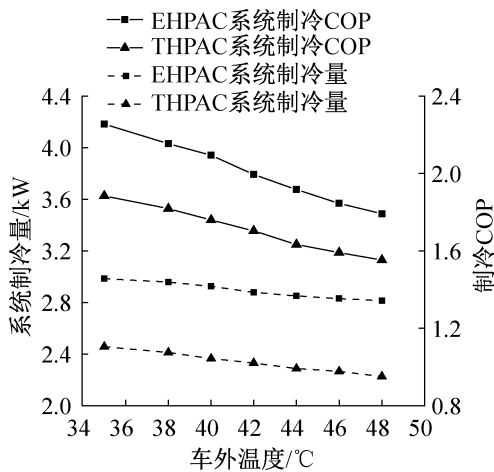


图 11 不同车外温度下 EHPAC 系统制冷量及 COP 与 THPAC 系统的对比
Fig.11 Comparison of refrigerating capacity and COP of EHPAC and THPAC systems under different outdoor temperature condition

系统与 THPAC 系统制热性能的对比。由图 13、图 14 可知，所有实验工况下，EHPAC 系统的制热性能均优于 THPAC 系统。在车外温度为 -5~7 °C 范围内，EHPAC 系统的制热量及 COP 分别提高约 5.6%~14.5%及 11.3%~18.3%，且在车外温度较低工况下系统性能改善较大。而在车内温度 17~27 °C 范围内，EHPAC 系统的制热量及 COP 分别提高约 4.4%~5.4%及 12.3%~13.9%，在车内温度较低工况下系统性能改善较大。

3 结论

本文对电动汽车引射热泵空调(EHPAC)系统制冷及制热性能进行实验研究,验证了引射器的应用可大幅提高汽车热泵系统的制热性能,并分析了不同车内、外温度对电动汽车引射热泵空调系统制冷及制热

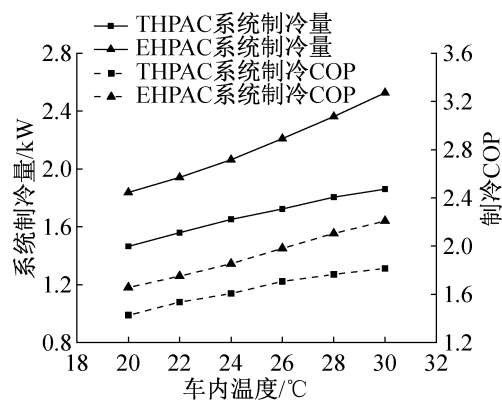


图 12 不同车内温度下 EHPAC 系统制冷量及 COP 与 THPAC 系统的对比

Fig.12 Comparison of refrigeration capacity and COP of EHPAC and THPAC systems under different indoor temperature condition

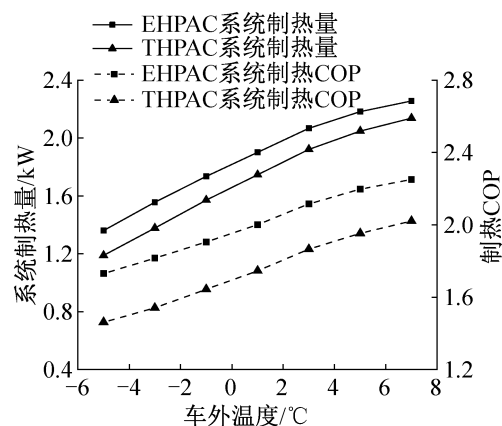


图 13 不同车外温度下 EHPAC 系统制热量及 COP 与 THPAC 系统的对比

Fig.13 Comparison of heating capacity and COP of EHPAC and THPAC systems under different outdoor temperature condition

性能的影响,并将其与传统热泵空调(THPAC)系统性能进行对比,得到如下结论:

1)在夏季及冬季工况下,EHPAC 系统性能均优于 THPAC 系统;在本文实验工况范围内,EHPAC 系统制冷量比 THPAC 系统提高约 21.5%~35.7%,制冷 COP 提高约 13.1%~21.7%;EHPAC 系统制热量比 THPAC 系统提高约 4.4%~14.5%,制热 COP 提高约 11.3%~18.3%。

2)在制冷工况下,随着车内温度降低或环境温度的升高,EHPAC 系统的引射器引射比增大,部分弥补了由于系统蒸发温度降低或冷凝温度升高引起的系统总质量流量的减少,但系统性能仍呈下降趋势,而在制热工况下,EHPAC 系统的性能则随着环境温度的降低或车内温度的升高而下降。

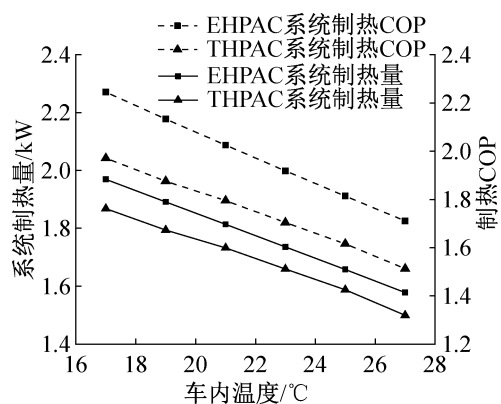


图 14 不同车内温度下 EHPAC 系统制热量及 COP 与 THPAC 系统的对比

Fig.14 Comparison of heating capacity and COP of EHPAC and THPAC systems under different indoor temperature condition

3)在夏季,车外温度每升高 2℃,EHPAC 系统总制冷量平均下降约 0.96%,系统 COP 平均下降约 3.78%,车内温度每升高 2℃,系统总制冷量平均增大 6.61%,系统 COP 平均增大 5.91%;而在冬季,车外温度每升高 2℃,系统总制热量平均增大 8.06%,系统 COP 平均增大 4.25%,车内温度每升高 2℃,系统总制热量平均减小 4.29%,系统 COP 平均减小 5.32%。

参考文献

- [1] 罗志华. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策探究[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(5): 158-162. (LUO Zhihua. China's new energy vehicle industry and technology development status and countermeasures[J]. Automobile Applied Technology, 2022, 47(5): 158-162.)
- [2] ZHANG Ziqi, LIU Cichong, CHEN Xiaoning, et al. Annual energy consumption of electric vehicle air conditioning in China[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 125: 567-574.
- [3] 严瑞东. 基于部件优化的电动汽车热泵系统性能提升研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015. (YAN Ruidong. Development of heat pump system for electrical cars[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.)
- [4] HAN Xinxin, ZOU Huiming, KANG Wei, et al. Experimental investigation on vapor injection ASHP for electric rail vehicles in cold region[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153: 473-482.
- [5] CHO I Y, SEO H, KIM D, et al. Performance comparison between R410A and R32 multi-heat pumps with a sub-cooler vapor injection in the heating and cooling modes[J]. Energy, 2016, 112: 179-187.

- [6] XU Shuxue, NIU Jianhui, CUI Zengyan, et al. Experimental research on vapor-injected heat pump using injection subcooling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 136: 674–681.
- [7] WANG Jijin, QU Dehu, YAO Yang, et al. The difference between vapor injection cycle with flash tank and intermediate heat exchanger for air source heat pump: an experimental and theoretical study [J]. *Energy*, 2021, 221: 119796.
- [8] 李浩, 张振宇, 宋霞, 等. 带喷射器的跨临界 CO₂ 车用空调系统实验研究[J]. *上海交通大学学报*, 2021, 55(2): 179–187. (LI Hao, ZHANG Zhenyu, SONG Xia, et al. Experimental study of a trans-critical CO₂ mobile air conditioning system with an ejector [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(2): 179–187.)
- [9] ZOU Huiming, YANG Tianyang, TANG Mingsheng, et al. Ejector optimization and performance analysis of electric vehicle CO₂ heat pump with dual ejectors [J]. *Energy*, 2022, 239: 122452.
- [10] 任立乾, 郭宪民, 李添龙. 两段式喷嘴引射器及其引射制冷系统性能实验研究[J]. *制冷学报*, 2014, 35(4): 21–24. (REN Liqian, GUO Xianmin, LI Tianlong. Experimental study on performance of dual-serial-throat nozzle ejector and two-phase ejector refrigeration cycle system[J]. *Journal of Refrigeration*, 2014, 35(4): 21–24.)
- [11] 郭宪民, 孔进笑, 史耀广. 采用双节流装置的 CO₂ 引射制冷系统的变工况性能实验研究[J]. *热科学与技术*, 2018, 17(5): 403–408. (GUO Xianmin, KONG Jinxiao, SHI Yaoguang. Experimental investigation on the performance of CO₂ ejector refrigeration system with two throat devices under variable operating conditions [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2018, 17(5): 403–408.)
- [12] 李敏霞, 詹浩森, 王派, 等. 一种带引射器和经济器的 CO₂ 跨临界制冷系统[J]. *化工学报*, 2021, 72(增刊 1): 146–152. (LI Minxia, ZHAN Haomiao, WANG Pai, et al. A CO₂ transcritical refrigeration system with ejector and economizer [J]. *CIESC Journal*, 2021, 72 (Suppl. 1): 146–152.)
- [13] ALKHULAIFI Y M, QASEM N A A, ZUBAIR S M. Exergoeconomic assessment of the ejector-based battery thermal management system for electric and hybrid-electric vehicles[J]. *Energy*, 2022, 245: 123252.
- [14] 徐瀚洲, 郭宪民, 张鲁梦. 液体再循环方式引射制冷系统性能研究[J]. *制冷学报*, 2020, 41(5): 102–107. (XU Hanzhou, GUO Xianmin, ZHANG Lumeng. Study on the performance of ejection refrigeration system with liquid recirculation[J]. *Journal of Refrigeration*, 2020, 41(5): 102–107.)
- [15] 张丹丹, 郭宪民, 吴琦琦. 电动汽车引射热泵系统性能模拟研究[J]. *流体机械*, 2021, 49(6): 79–85. (ZHANG Dandan, GUO Xianmin, WU Qiqi. Simulation study on performance of heat pump system with ejector for electric vehicle[J]. *Fluid Machinery*, 2021, 49(6): 79–85.)
- [16] 杜晓录, 郭宪民, 张丹丹. 电动汽车引射空调系统性能实验研究[J]. *制冷学报*, 2022, 43(1): 53–58. (DU Xiaolu, GUO Xianmin, ZHANG Dandan. Experimental study on performance of air conditioning system with ejector for electric vehicle[J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(1): 53–58.)

通信作者简介

郭宪民, 男, 博士, 教授, 天津商业大学机械工程学院, 13821309202, E-mail: xmguo@tjcu.edu.cn。研究方向: 制冷系统节能及优化。

About the corresponding author

Guo Xianmin, male, Ph. D., professor, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, 86–13821309202, E-mail: xmguo@tjcu.edu.cn. Research fields: refrigeration system energy saving and optimization.