文章编号:0253 - 4339(2018) 06 - 0109 - 06
doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2018. 06. 109

热泵型纯电动汽车空调系统特性

张文嵘　刘丽娜　钱 程　楼 军

(浙江盾安人工环境股份有限公司　杭州　310051)

摘　要　本文以 R134a 为制冷剂并采用三换热器设计了热泵汽车空调系统,搭建了热泵系统台架,并在制冷和制热 5 种工况下进行了性能测试,研究了压缩机转速、风量及环境工况对系统的影响,分析了该系统用于电动汽车的可行性。测试结果表明:温度越低,系统效率越低。 -20 ℃压缩机转速为 3 000 r/min 时,系统性能系数 COP 约为 1. 5;相同工况下,系统 COP 随压缩机转速的增加而先增大后减小;相同工况下,系统 COP 随换热器风量的增加而增加。压缩机采用热泵系统,可以节约电能从而提高电动汽车续航里程。

关键词　热泵系统;低温制热;制冷剂;纯电动汽车
中图分类号:TB61$^+$1; TQ051. 5; U469. 72　　**文献标识码**: A

Performance of Heat Pump Air-conditioning System for Pure Electric Vehicle

Zhang Wenrong　Liu Lina　Qian Cheng　Lou Jun

(Zhenjiang Dun′an Artificial Environment Co., Ltd., Hangzhou, 310051, China)

Abstract　In the study, a heat pump system with three heat exchangers was applied on an air-conditioning system of an electric vehicle, in which R134a is the refrigerant. The bench of the heat pump system was constructed, and performance were tested in five conditions with respect to cooling and heating, and the effects of compressor speed, air volume, and ambient conditions on the system performance were examined. The tested performances under various operation conditions were used to analyze the feasibility of the system for electric vehicles. The experimental results indicate that when compressor speed corresponds to 3 000 r/min at -20 ℃, 1) the coefficient of performance (COP) of the system is approximately 1. 5; 2) with the increases in the compressor speed, the COP initially increases and subsequently decreases; 3) the COP of the system increases with increases in the amount of air of the heat exchanger. Thus, the results reveal that the heat pump system saves electricity and improves the cruising range of vehicle mileage.

Keywords　heat pump system; low temperature heating; refrigerant; pure electric vehicle

全球气候变暖、大气污染及能源成本高涨等问题日益严峻,大力发展清洁能源汽车已成为普遍共识。电动汽车具有低排放、经济性好、不依靠石油资源等优点,已成为未来汽车领域的一个重要发展方向,但电动汽车由于使用电池作为动力来源,没有内燃机,现有电动汽车热泵系统技术,大多采用单冷系统加 PTC 加热,纯粹的 PTC 加热会消耗电池大量电能,进而减少电动汽车的续航里程。

阙雄才等[1]指出,新能源汽车在冷却系统和加热系统启动时,汽车的续航里程减少比例从 16. 7% 上升至 50%,表明冷却和加热系统对新能源汽车的续航里程的影响较大。B. Torregrosa 等[2]研究发现,现有纯电动车几乎都使用 PTC 加热,PTC 加热一般都大于 2 kW,且效率均小于 1,电池满负荷时,PTC 加热器能使电动汽车的续航里程减少 24%。D. Clodic 等[3]测试结果表明,新能源汽车的能量损耗中汽车空调系统占了很大比例,在低温环境下,纯电动汽车的热泵空调系统能使汽车续航里程减少 8%。R. Farrington 等[4]的研究表明,电动汽车的续航里程能达到 200 kW,但加热和冷却系统运行时,其续航里程会缩减至 40% 左右。

因此,采用高效的热泵汽车空调系统对提高纯电动汽车的续航里程起着至关重要的作用。李丽等[5]设计了一套适用于电动汽车的蒸气压缩式冷暖双模式热泵空调系统,系统的制热/制冷转换由四通换向阀完成,以 R134a 作为运行工质。结果表明,外界环境对热泵空调的性能影响较大,随着车室外环境温度的降低,系统压力降低,压缩机排气温度降低,单位时间内制热量减少。M. Hosoz 等[6]研究发现,R134a 热泵空调系统,在常温下加热性能

收稿日期:2017 年 1 月 19 日

良好,但在环境温度较低时,其加热能力迅速下降,需要辅助加热设备来维持所需热量。L. P. Scherer 等[7]研发了 R134a 及 R152a 的电动汽车热泵空调系统,该系统采用三通阀来控制系统制热及制冷模式的切换。T. Suzuki 等[8]对比了传统汽车和电动汽车的空调系统,并提出了一套电动汽车空调系统,包括四通阀、两个热力膨胀阀及多个单向阀,该系统能实现冷却、加热、除雾、除湿等功能,采用 R134a 制冷剂,在 40 ℃及 -10 ℃工况下实验测得其 COP 分别为 2.9 和 2.3。

为避免四通阀两换热器系统在制冷/制热模式切换时,行车视线可能会被挡风玻璃上产生的水雾阻碍,影响驾驶安全[9],本系统加装内部热交换器促使水雾蒸发,避免空调系统干扰行车安全。采用电磁阀对系统的制冷及制热模式进行切换,保证汽车空调的抗震性。本研究采用三换热器热泵系统,实现冷却、加热、除雾、除湿等功能,目前该系统已完成开发阶段,进入验证阶段。

1 纯电动汽车热泵空调系统

电动汽车热泵空调实验系统及实验室布置如图 1 所示。制热循环过程为:压缩机对低温低压的气态工质做功,使其被压缩成高温高压气体,工质流入内部冷凝器,经冷凝器冷凝后变为中温高压的液体,并向车内散热,经电磁阀 4 后进入膨胀阀节流降压变为低温低压的气液混合物,最后工质在外部冷凝器内蒸发变为低温低压气体,并从环境中吸收热量,低温低压气体经过电磁阀进入气液分离器,最后回到压缩机,完成一次循环。制冷循环过程为:压缩机对低温低压的气态工质做功,使其被压缩成高温高压气体,工质流经内部冷凝器及电磁阀 5,进入外部冷凝器,经冷凝后变为中温高压的液体,并向环境中散热,流经电磁阀 1 后进入膨胀阀节流降压变为低温低压的气液混合物,接着工质在车内换热器内蒸发变为低温低压气体,并从车内吸收热量,低温低压气体进入气液分离器后回到压缩机,完成一次循环。

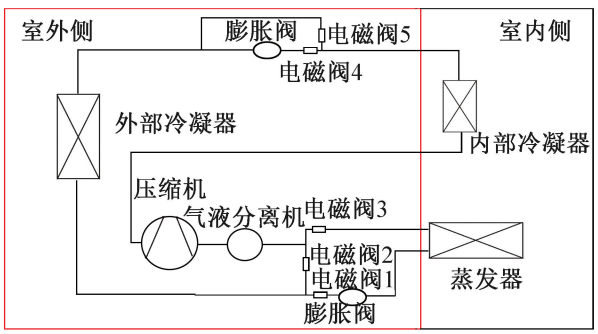


图 1 电动汽车热泵空调系统及实验室布置

Fig. 1 The principle and the equipment figure of heat pump air-conditioning system for electric vehicle

在制冷循环下,内部冷凝器只作为通道,制冷剂流经内部冷凝器,并不进行换热。

为测试纯电动汽车热泵空调系统的性能,本文搭建了热泵系统台架,并进行了台架实验测试。为模拟电动汽车的真实冷热负荷,台架搭建分为室内侧及室外侧,其中内部换热器和蒸发器安装在室内侧台架,其余部件安装在室外侧台架。对压缩机进出口温度压力,内部冷凝器进出口温度压力、外部冷凝器进出口温度压力、蒸发器进出口温度压力进行监测。

本系统设计负荷为制冷量 3 kW,制热量 3 kW,压缩机选用南京奥特佳 26 mL/r 排量的涡旋电动压缩机,压缩机转速为 1 500 ~ 6 500 r/min。热泵系统 3 个换热器均采用微通道换热器,其中蒸发器尺寸为 260 mm × 40 mm × 265 mm,内部冷凝器尺寸为 266 mm × 32 mm × 226 mm,外部冷凝器尺寸为 624 mm × 25.4 mm × 293 mm,膨胀阀为 5.28 kW H 型热力膨胀阀,压缩机进出口、蒸发器进出口、内部冷凝器进出口采用软管连接,热泵空调系统其余各部件均采用铜管连接,并采用保温材料对铜管进行包裹,以保证系统管路的保温性能。尤其是蒸发器出口到压缩机进口段,防止高温环境下,蒸发器出口制冷剂吸收环境温度,温度升高,导致压缩机进口温度过高,进而影响压缩机正常工作及系统性能。选用安全、不易燃、不破坏臭氧层、溶油性良好的 R134a 作为制冷剂。

实验地点为浙江盾安人工环境股份有限公司实验中心(简称实验中心)2 号性能实验室,实验所使用焓差室、多点温度计、相对湿度计、压力计、传感器、数据采集仪等由浙江盾安人工环境股份有限公司实验中心提供。实验室采用的压力传感器量程为 0 ~ 6 MPa,精度为 ± 1.5%;温度传感器采用 T 型热电偶,量程为 -200 ~ 350 ℃。实验台由盾安人工环境实验室测试人员搭建,根据电动车汽车空调的标准进行风管布置,将换热器接入实验室风管,通过实验室软件计算,实时监测换热器的换热量。

2 实验结果与分析

实验测试开始之前,对该系统进行制冷剂量的标定,考虑目前汽车空调制冷剂的充注量约为 500 g,该系统为热泵空调系统,且为台架系统,系统管路较长,因此实验中系统制冷剂的充注量从 500 g 开始,逐次增加 25 g,待系统稳定,最终确定 650 g 为最佳充注量。在后续不同工况的测试中均采用 650 g 制冷剂

的充注量。

对该空调系统进行 5 个工况的测试,其测试工况如表 1 所示。

表 1 实验工况

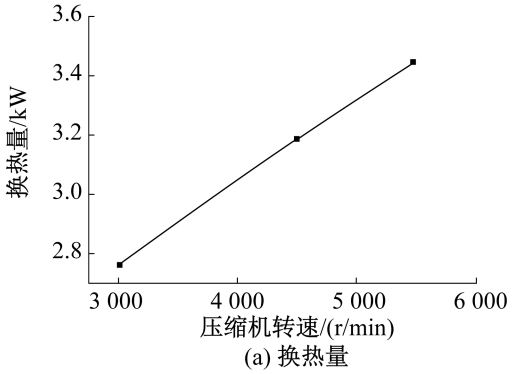
Tab. 1 Experimental conditions

实验条件		室内温度		室外温度	
		干球温度/℃	湿球温度/℃	干球温度/℃	湿球温度/℃
制冷运行	名义制冷	27	19.5	35	—
	最大负荷	32.5	26	50	—
制热运行	名义制热	20	15	7	6
	低温制热	20	15	−7	−8
	超低温制热	20	15	−20	—

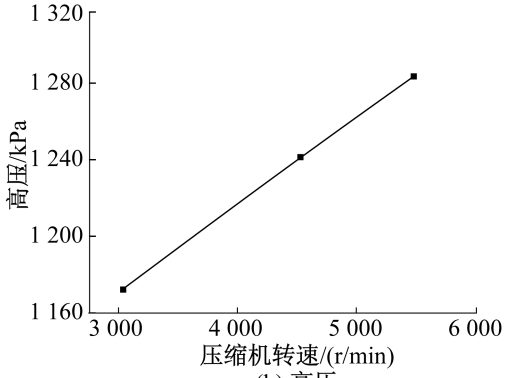
2.1 压缩机转速对系统性能的影响

在不同环境工况,压缩机转速分别为 3 000、4 500、5 500 r/min 的条件下,进行电动汽车空调系统制冷制热工况的实验,并对实验数据进行采集和分析。分析不同工况下,不同压缩机转速对系统的吸排气温度、高低压力及换热量等的影响。

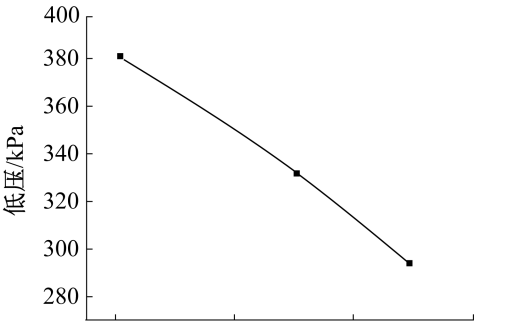
图 2 所示为名义制冷工况下,蒸发器风量为 420 m^3/h 时系统参数随压缩机转速的变化。由图 2 可知,名义制冷工况下,随着压缩机转速的升高,系统的高压和排气温度均升高,而系统的低压和低温均降



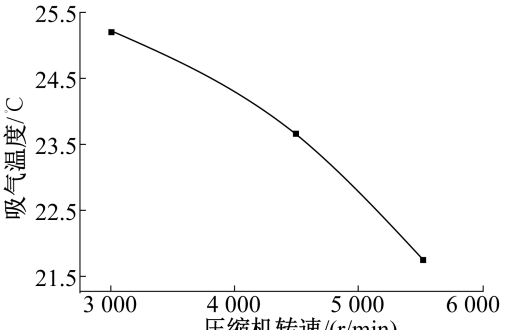
(a) 换热量



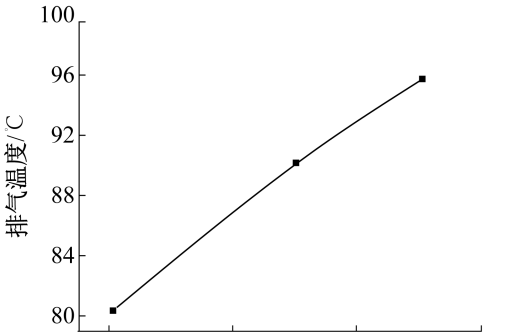
(b) 高压



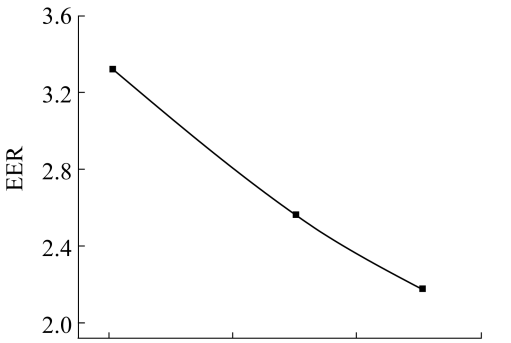
(c) 低压



(d) 吸气温度



(e) 排气温度



(f) 系统EER

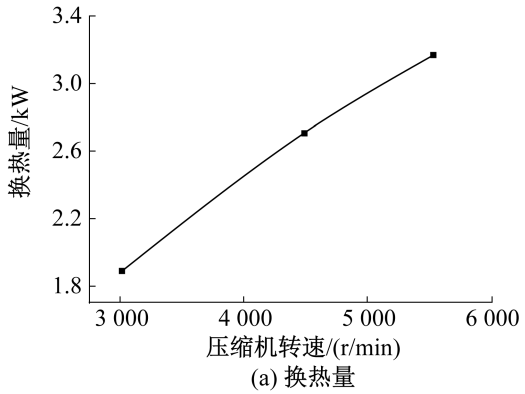
图 2 名义制冷工况下,蒸发器风量为 420 m^3/h 时系统参数随压缩机转速的变化

Fig. 2 The variation of system parameters with compressor speed under nominal cooling condition when the evaporator air amount is 420 m^3/h

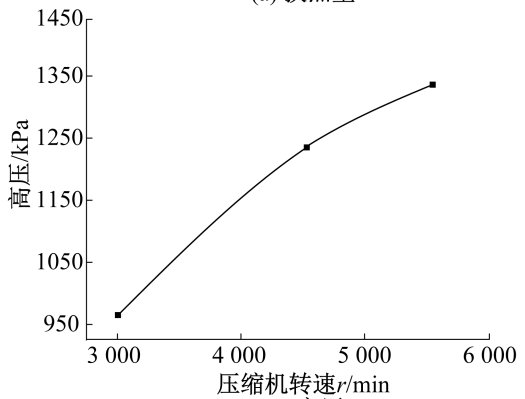
低,系统的风侧换热量随压缩机转速的升高而增加,系统 EER 随压缩机转速的升高而降低。系统压缩机转速增加,风侧换热量增加,压缩机功率也增加,压缩机功率增加的幅度大于风侧换热量的增加幅度,故系统 EER 降低。

图 3 所示为名义制热工况下,蒸发器风量为 420 m^3/h 时系统参数随压缩机转速的变化。由图 3 可知,名义制热工况下,系统的高压和排气温度均随压缩机转速的升高而升高,而系统的低压和吸气温度均降低,系统的风侧换热量随压缩机转速的升高而增加,系统 EER 随压缩机转速的升高而降低。

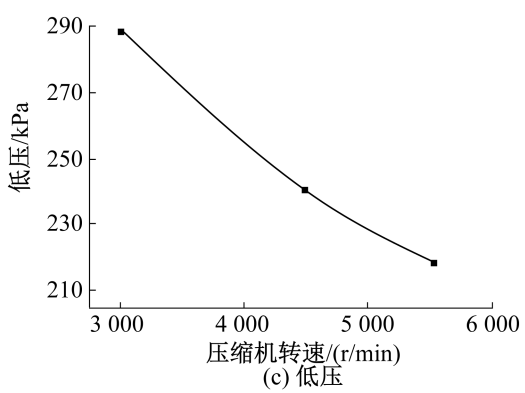
由图2、图3 可知,无论是制冷工况还是制热工况,压缩机转速对各参数的影响是一致的,压缩机的转速直接影响系统的循环体积流量,该涡轮压缩机排量为 26 mL/r,转速越高压缩机出口工质的体积流量越高,单位时间内热泵空调的制冷量及制热量就越高。



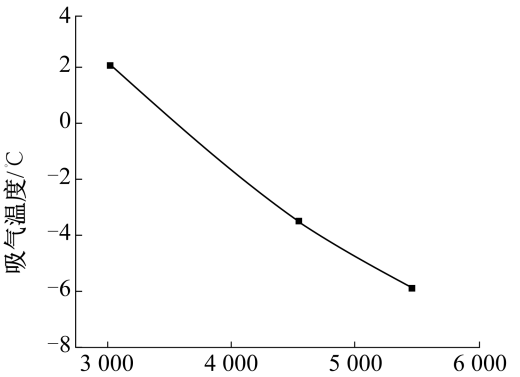
(a) 换热量



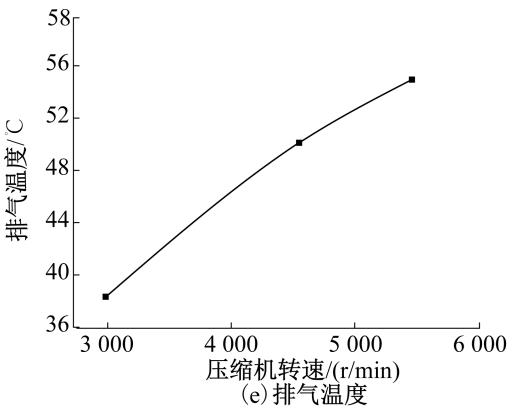
(b) 高压



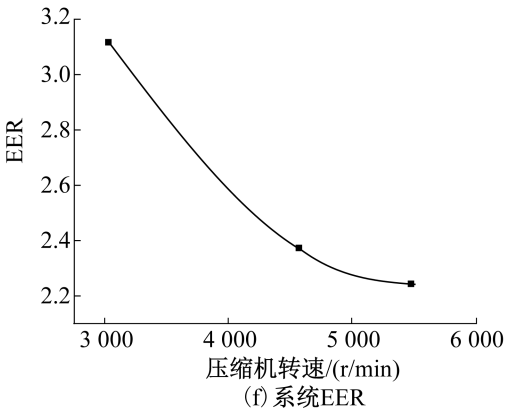
(c) 低压



(d) 吸气温度



(e) 排气温度



(f) 系统EER

图 3 名义制热工况下,蒸发器风量 420 m^3/h 时系统参数随压缩机转速的变化

Fig. 3 The variation of system parameters with compressor speed under nominal heating condition when the evaporator air amount is 420 m^3/h

2.2 风量对系统性能的影响

该汽车空调热泵系统的换热器为微通道平行流换热器,风机安装在换热器背面且风量可调,风量的大小对于换热器的换热量大小影响显著。风量越大,换热器的换热效果越好,系统的风侧换热量越大,压缩机及风机的功率越大。实验测试了不同蒸发器风量和压缩机转速对系统参数的影响。

图 4 所示为名义制冷工况下,压缩机不同转速

下,系统的风侧换热量及 COP 随蒸发器风量的变化。由图 4 可知,压缩机转速变化时,风侧换热量及系统 COP 随风量变化的趋势是一致的。当风量增加时,系统的风侧换热量及系统 COP 均增加,系统效率提升。

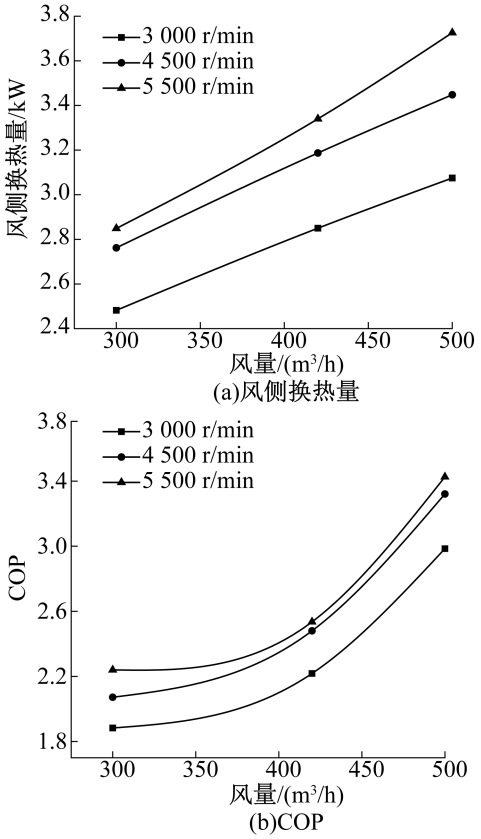


图 4 名义制冷工况下,系统参数随蒸发器风量的变化

Fig. 4 The variation of system parameters with different evaporator air amount under nominal cooling condition

图 5 所示为名义制热工况下,压缩机不同转速下,系统的风侧换热量及 COP 随蒸发器风量的变化。由图 5 中可知压缩机转速变化时,风侧换热量及系统 COP 随风量变化的趋势是一致的。当风量增加时,系统的风侧换热量及系统 COP 均增加,系统效率提升。

2.3 环境工况对系统性能的影响

制冷剂在不同环境温度下,其制冷性能会产生很大的变化,主要与制冷剂的物理性质有关。本实验采用 R134a 制冷剂,在定比容条件下,制冷剂的压力随温度的降低而降低,且制冷剂处于气液两相时,压降对温降的敏感程度更明显。因此低温环境(如 -20 ℃)下,压缩机进口温度及压力都非常低,导致系统的制热效率很低(基本为 1)。

图 6 所示为压缩机转速为 3 000 r/min 时,不同工况下,变风量时系统 COP 的变化。由图 6 可知,不

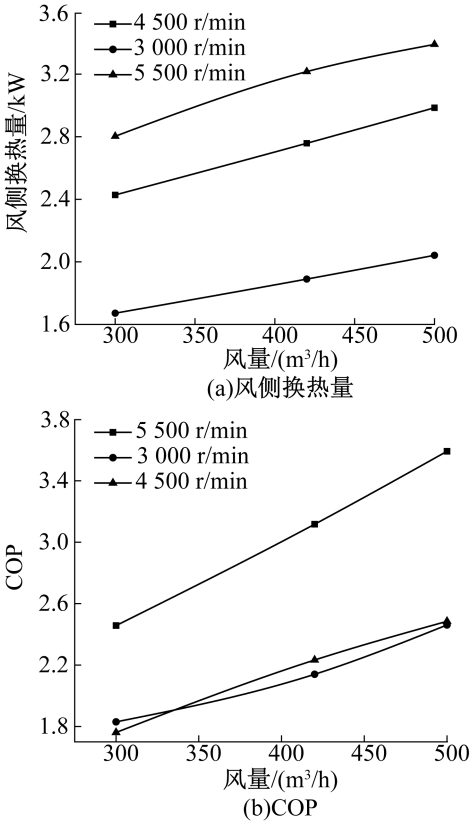


图 5 名义制热工况下,系统参数随蒸发器风量的变化

Fig. 5 The variation of system parameters with different evaporator air amount under nominal heating condition

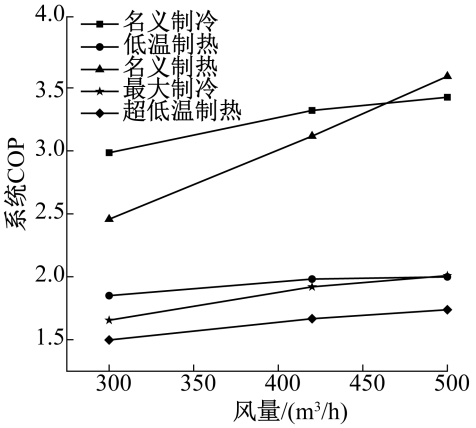


图 6 压缩机转速为 3 000 r/min 时,不同工况下变风量时系统 COP 的变化

Fig. 6 The variation of system COP under various conditions with different air amount when the compressor speed is 3 000 r/min

同工况下,系统 COP 差异明显。制热时,随着温度的降低下,尤其 0 ℃以下,系统 COP 下降很快。压缩机转速为 3 000 r/min 时,名义制冷工况下,系统 EER 能达到 3,而最大制冷 COP 小于 2;名义制热的 COP 能达到 3,而低温制热及超低温制热的 COP 均小于 2。由此可见,环境温度对于 R134a 制冷的运行影响

显著,且 R134a 制冷剂的低温制热特性并不是很优,但优于 PTC 制热。

由测试数据可知,热泵空调系统在低温下效率大于传统 PTC 加热,可以节省电能,进而提高电动汽车续航里程。

3 结论

1)当换热器风机风量及环境工况恒定时,压缩机转速越高,空调热泵系统的风侧换热量越大,但系统 COP 超过某一峰值后,会随压缩机转速的升高而减小。

2)压缩机转速及环境工况恒定时,换热器风机风量越大,空调热泵系统的风侧换热量越大,系统 COP 越高,系统效率越高。

3)压缩机转速及换热器风机风量恒定,制冷时,环境温度越高,系统 COP 越低;制热时,环境温度越低,系统 COP 越低。

4)制冷系统使用 R134a 制冷剂,在低温环境工况下,制热效果较差,后期可以考虑使用 R410A 等新型制冷剂。

5)该热泵系统的 COP 在极端工况下均大于 1,较传统 PTC 加热效率高,节约电能,可应用于电动汽车,提高电动汽车续航里程。

参考文献

[1] 阙雄才, 陈江平. 汽车空调实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003:134 - 151. (QUE Xiongcai, CHEN Jiangping. Practical technology of automobile air conditioning [M]. Beijing:China Machine Press, 2003:134 - 151.)

[2] TORREGROSA B, PAYÁ J, CORBERÁN J M. Modelling of mobile air conditioning systems for electric vehicles [C]//Proceedings of the 4th European Workshop—Mobile Air Conditioning and Vehicle Thermal Systems. 2011.

[3] CLODIC D, ZGHEIB E, MORTADA S. Impacts of heating and cooling on electrified vehicles[C]//Proceedings of the 4th European Workshop—MAC and Vehicle Thermal Systems. 2011.

[4] FARRINGTON R, RUGH J. Impact of vehicle air-conditioning on fuel economy, tail pipe emissions, and electric vehicle range[C]//Earth Technologies Forum. Washington: NREL, 2000: 1 - 6.

[5] 李丽, 魏名山, 彭发展, 等. 电动汽车用热泵空调系统设计与实验[J]. 制冷学报, 2013, 34(3): 60 - 63. (LI Li, WEI Mingshan, PENG Fazhan, et al. Design and experiment of a heat pump air-condition system for electric vehicle[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(3): 60 - 63.)

[6] HOSOZ M, DIREK M. Performance evaluation of an integrated automotive air conditioning and heat pump system [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(5): 545 - 559.

[7] SCHERER L P, GHODBANE M, BAKER J A, et al. On-vehicle performance comparison of an R-152a and R-134a heat pump system[R]. SAE Technical Paper, 2003.

[8] SUZUKI T, ISHII K. Air conditioning system for electric vehicle[C]//International Congress & Exposition. Warrendale: SAE Technical Paper, 1996.

[9] 曹中义. 电动汽车空调系统解决方案[J]. 汽车电器, 2008(3):1 - 4. (CAO Zhongyi. Solution to air condition on EVs[J]. Auto Electric Parts, 2008(3):1 - 4.)

[10] ZENG Xiaohua, MIN Haitao, XU Xing, et al. Parameter design for power train and performance simulation of electrical city bus[C]//2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin: IEEE, 2008.

[11] TIE S F, TAN C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20: 82 - 102.

[12] CHAN C C, CHAU K T. An overview of power electronics in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(1): 3 - 13.

[13] UMEZU K, NOYAMA H. Air-conditioning system for electric vehicles (i-MiEV)[C]//SAE Automotive Refrigerant & System Efficiency Symposium. Tokyo: Society of Automotive Engineers of Japan, 2010.

[14] ABERSFELDER G, GRANTZ H, ODEBRECHT W. Device for air-conditioning the passenger compartment and for cooling the drive system of electric vehicles: 5483807[P]. 1996-01-16.

[15] HOTTA Y, TAJIRI A. Air conditioning system suitable for use in a electric vehicle:5305613[P]. 1994-04-26.

[16] EMADI A, LEE Y J, RAJASHEKARA K. Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2237 - 2245.

通信作者简介

张文嵘, 男, 学士, 浙江盾安人工环境股份有限公司, 15968567152, E-mail:zhangwr@dunan.cn。研究方向: 新能源汽车空调系统。

About the corresponding author

Zhang Wenrong, male, bachelor, Zhenjiang Dun'an Artificial Environment Co., Ltd., + 86 15058184126, E-mail: zhangwr@dunan.cn. Research fields: air-conditioning system of new energy vehicles.