

文章编号:0253-4339(2021)01-0053-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.01.53

电动汽车热泵系统低温工况的制热性能实验研究

杨忠诚 苏林 于荣 方奕栋 李康 穆文杰

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘 要 为研究低温时电动汽车热泵空调系统的制热性能,本文通过搭建空气源热泵空调系统实验台,实验研究了电动汽车热泵空调系统在环境温度为-10~0℃的低温工况下的制热性能,分析了压缩机转速(2 000~5 000 r/min)、HVAC 总成进风量(300~400 m³/h)和环境温度对该热泵系统性能的影响,最后通过推导公式,估算电动汽车在使用空调系统后的续航里程。实验结果表明:随着压缩机转速的增加,压缩机排气温度、排气压力和系统制热量均增加,而 COP 下降;当保持压缩机转速和环境温度不变时,HVAC 总成进风量从 300 m³/h 增至 400 m³/h,制热量增加约 13.3%~26.0%,COP 增加约 0.03~0.80;在其他条件不变时,当环境温度从-10℃升至 0℃,热泵空调系统的制热量增加约 60.9%~71.0%,COP 增加约 0.51~0.63;通过公式进行计算,当环境温度为-10~0℃时,在达到相同制热量条件下,热泵空调系统可在 PTC 加热器的基础上使续航里程提高 13.5%~20.8%。

关键词 电动汽车;热泵;续航里程;制热性能;能效系数

中图分类号:TB61⁺1;TK172;U469.72

文献标识码:A

Experimental Research on Heat Pump Heating Performance at Low Temperature for Electric Vehicles

Yang Zhongcheng Su Lin Yu Rong Fang Yidong Li Kang Mu Wenjie

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract To investigate the heating performance of an electric vehicle heat pump air conditioning system at low temperature, an experimental platform for the air source heat pump air conditioning system was set up in this study to experimentally determine the heating performance of an electric vehicle heat pump air conditioning system with ambient temperature of -10℃ to 0℃. The influences of the compressor speed (2 000-5 000 r/min), air inlet volume (300-400 m³/h), and ambient temperature on the performance of the system were analyzed. Finally, a formula was derived to estimate the range of the electric vehicle after using the air conditioning system. The results show that with an increase in compressor speed, the compressor discharge pressure and temperature, as well as the heat produced by the compressor, somewhat increase; however, the COP of the system decreases. When the compressor speed and ambient temperature are kept unchanged, the inlet air volume of the air conditioning box increases from 300 m³/h to 400 m³/h, heat production increases by 13.3%-26.0% and the COP increases by 0.03-0.80. Under other constant conditions, when the ambient temperature rises from -10℃ to 0℃, the heat produced by the heat pump air-conditioning system increases by 60.9%-71.0% and the COP increases by 0.51-0.63. According to the formula, when the ambient temperature is -10℃ to 0℃, the range of the heat pump air conditioning system can be improved by 13.5%-20.8% compared with the condition of same heating capacity, using a PTC heater.

Keywords electric vehicle; heat pump; driving range; heating performance; coefficient of performance

近年来,电动汽车的销量在全球范围内逐渐增加,但其销量仍不到新车总销量的 1%^[1]。根据目前市场上电动汽车的表现,可靠性和行驶里程是两个主要问题。汽车空调作为保障成员舒适性及安全驾驶的必要设备,目前已经得到广泛的普及。作为汽车中

能耗最大的辅助设备,空调的开启会对电动汽车的续航里程造成极大的影响^[2]。电动汽车采用 PTC (positive temperature coefficient,正温度系数)加热器制热,具有改造简单、可靠性高的优势^[3]。但在冬季使用 PTC 取暖将会使得续航里程下降 20.1%~

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51906158)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation for Youth (No. 51906158).)

收稿日期:2020-07-28;修回日期:2020-10-20

56.4%,而使用热泵将明显增加续航里程,当热泵效率达到 1.7 时,续航里程增加 7.4%~13.2%,因此在电动汽车上采用热泵系统成为研究与应用的热点^[4-5]。

电动汽车的热泵空调系统主要用于制冷、供暖、通风、挡风玻璃的除霜、除雾和车外换热器除霜等^[6]。在不同环境温度下,使用热泵替代 PTC,可节省 17%~52% 的能耗^[7]。李丽等^[8]设计了一款蒸气压缩式热泵空调系统用于电动汽车,通过四通阀的转换来实现制冷和制热模式的切换,分别在环境温度为 35℃和-15℃下进行了实验测试,测得系统的制冷量和制热量分别为 2.95 kW 和 2.63 kW。Qin Fei 等^[9]设计了一款三换热器蒸气压缩式热泵系统,研究了其在低温环境下的制热性能表现。基于车内挡风玻璃水汽凝结除雾的需求,在全新风和-20、-15、-10℃三种低温工况条件下进行了测试,结果表明,在环境温度-20℃工况下,COP 最高超过了 1.7。

电动汽车上应用热泵系统具有一定的优势,越来越多的学者对影响电动汽车热泵系统性能的因素进行了研究。J. M. Saiz Jabardo 等^[10]研究了工质充注量对 R134a 空调系统的流量、换热量和 COP 的影响,指出系统存在最佳的工质充注量。Tian Changqing 等^[11]通过建立稳态数学模型,研究了压缩机转速、环境温度和进风量对 R134a 热泵空调系统的性能影响,结果表明较高的压缩机转速、较高的环境温度和较大的进风量能更好的发挥热泵的性能。张耘等^[12]研究了 R134a/R32 混合制冷剂对电动汽车空调系统制热性能的影响,结果表明,相对于 R134a 系统,混合制冷剂空调系统制热量增加约 14.0%~17.1%,COP 提升 4.3%~14.0%。武卫东等^[13]研究了压缩机转速对电动汽车热泵空调的制冷性能的影响,结果表明较,高转速虽然能达到较快降温的效果,但不利于整体能效的提高。华若秋等^[14]研究了 EXV 开度对纯电动汽车热泵空调性能的影响,结果表明,冷凝

器出口过冷度较大时,通过改变 EXV 开度可有效调节热泵出风温度,且在开度较小时增大 EXV 开度有利于获得较高的 COP。

综上所述,电动汽车使用热泵空调系统相比于 PTC 加热器具有提高续航里程的优势,但热泵空调系统的制热性能受到多种因素影响,因此本文通过实验研究了压缩机转速、HVAC 总成进风量以及环境温度对热泵系统性能的具体影响,并对电动汽车开启空调系统后的续航里程进行了估算,对热泵空调系统相比于 PTC 加热器对于电动汽车续航里程的影响进行具体分析。

1 实验装置和方法

本文设计的热泵系统为三换热器热泵系统,包括一个电动涡旋压缩机、三个微通道换热器、一个电子膨胀阀、一个带截止功能的热力膨胀阀、一个气液分离器、两个电磁阀和两个质量流量计。各部件的具体参数如表 1 所示。该系统实验在汽车空调焓差室中进行,焓差室由室内和室外两部分构成,通过独立的环境控制系统来控制室内换热器和室外换热器的入口参数。系统原理如图 1 所示,系统具有冷却和加热的基本功能,通过切换两个电磁阀(SV1 和 SV2)的通断来改变制冷剂流向,调整电子膨胀阀(EXV)与热力膨胀阀(TXV)状态来保证制冷制热回路的正常工作。在制冷模式时,打开 SV1,关闭 SV2。制冷剂从压缩机进入室外换热器,再通过 TXV 进入室内蒸发器。热空气在室内蒸发器中被冷却,被冷却后的气体流向乘员舱内,达到冷却乘员舱的目的。在制热模式时,打开 SV2,关闭 SV1,同时,完全关闭 TXV。制冷剂从压缩机排出后进入室内冷凝器,冷空气通过室内冷凝器表面与高温制冷剂完成换热,形成一个温暖的客舱。然后制冷剂通过质量流量计 m2、EXV、室外换热器和气液分离器,再返回压缩机。该系统中仍然使用 R134a 作为制冷剂。

表 1 系统部件规格
Tab.1 Specification of system components

设备名称	具体参数
压缩机	电动涡旋式,27 cm ³ /r,1 000~6 000 r/min
室外换热器	微通道平行流,4 流程,W×H×D=372 mm×322 mm×20 mm,管数 51
室内冷凝器	微通道平行流,4 流程,W×H×D=136 mm×194 mm×32 mm,管数 52
室内蒸发器	微通道平行流,4 流程,W×H×D=202 mm×195 mm×40 mm,管数 50
电子膨胀阀	最大质量流量:0.055 kg/s

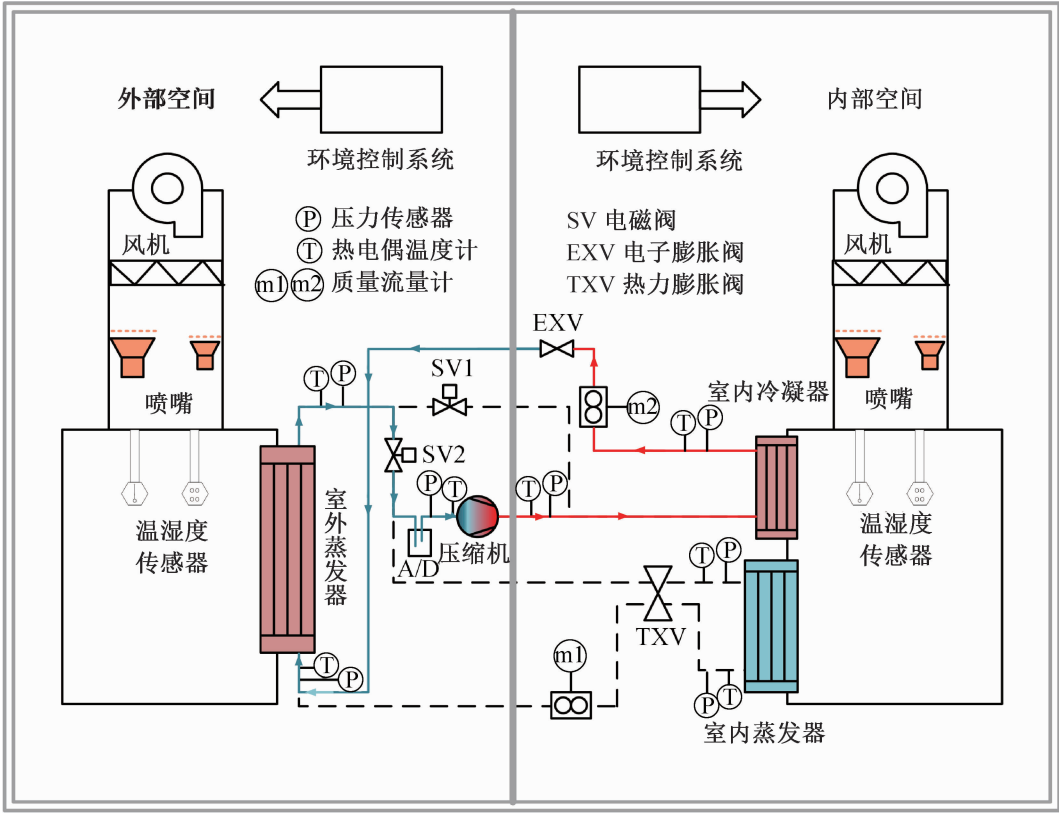


图 1 空气源热泵系统实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the air source heat pump system

本次实验系统运行制热模式,实验时,打开 SV2,关闭 SV1,完全关闭 TXV。图 1 中压缩机出口至电子膨胀阀进口的管道内流动高压制冷剂,电子膨胀阀出口至压缩机进口的管道内流动低压制冷剂。箭头指向代表制冷剂流动方向,虚线代表管路中无制冷剂流过。实验工况如表 2 所示。

表 2 实验工况
Tab.2 Test conditions

项目	参数
进风温度/℃	-10/-7/-3/0
进风湿度/%	50
进风体积流量/(m ³ /h)	300/350/400
室外环境温度/℃	-10/-7/-3/0
室外空气体积流量/(m ³ /h)	1 600
压缩机转速/(r/min)	2 000/3 000/3 500 /4 000/5 000

实验过程中,在压缩机、室内冷凝器、室外换热器的制冷剂侧布置压力传感器和热电偶温度计,用于测量制冷剂的温度和压力,采用功率计测量压缩机功

耗,采用质量流量计测量制冷剂质量流量。测量装置精度如表 3 所示。

表 3 测量装置精度
Tab.3 Measuring device accuracy

测量参数	测量精度
制冷剂侧温度/℃	±0.2
制冷剂侧压力/MPa	±0.010
空气侧温度/℃	±0.2
制冷剂质量流量/(kg/h)	±0.5

2 实验结果分析

2.1 压缩机转速及进风量对制热性能影响

图 2 和图 3 所示为在环境温度为-10℃时该热泵系统压缩机吸/排气温度和吸/排气压力随压缩机转速的变化。由图 2 和图 3 可知,随着压缩机转速增加,压缩机的吸气压力和吸气温度均降低,压缩机排气温度和排气压力逐渐上升。且压缩机转速对压缩机的排气压力和排气温度的影响很大,对压缩机的吸气温度和压力影响较小。压缩机转速增加每 1 000 r/min,排气温度升高 11.8~25.1℃,排气压力升高

0.065~0.166 MPa。这是因为压缩机的排量随转速逐渐增加,且在高转速运行时,压缩效率较高,压比较大,导致排气温度较高^[15]。压缩机转速达到 4 000 r/min 之后,压缩机排气温度上升速度降低,这是由于压缩机的控制保护传感系统发挥作用,及时将压缩机的工作强度降低,避免压缩机排气温度过高,保护压缩机。压缩机在低转速时,HVAC 总成进风量从 300 m³/h 增至 400 m³/h,压缩机吸/排气温度和压力变化较小。压缩机转速达到 5 000 r/min,HVAC 总成进风量从 300 m³/h 增至 400 m³/h,压缩机排气温度升高约 5.6 ℃,吸气温度和吸排气压力变化较小,总体变化趋势均很小,这说明 HVAC 总成进风量对压缩机吸排气温度和压力影响较小。

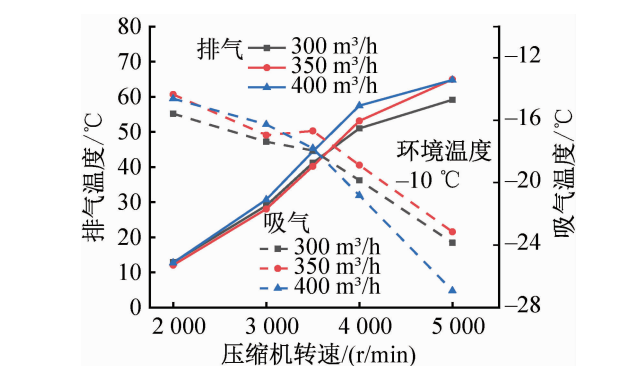


图 2 不同进风量下,压缩机吸/排气温度随压缩机转速的变化
Fig. 2 Compressor suction and discharge temperature change with compressor speed under different air inlet volume

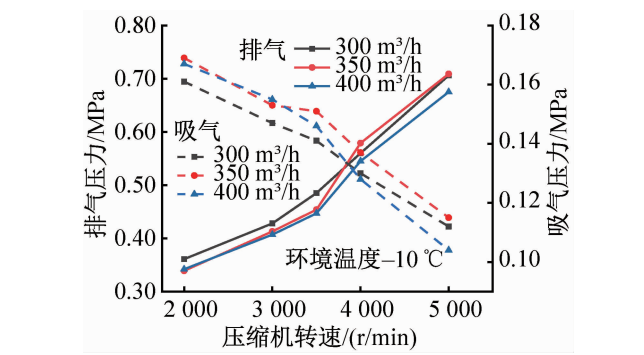


图 3 不同进风量下,压缩机吸/排气压力随压缩机转速的变化
Fig. 3 Compressor suction and discharge pressure change with compressor speed under different air inlet volume

图 4 和图 5 所示为该热泵系统在环境温度为-10 ℃下的制热量和 COP 随压缩机转速的变化。由图 4 和图 5 可知,随着压缩机转速的增加,制热量不断增加,COP 却不断下降。这是因为随着压缩机转速的增加,压缩机的功耗也随之增大。压缩机转速每增加 1 000 r/min,制热量增加 4.8%~22.0%,COP 降低 0.06~1.48。从变化幅度分析,当压缩机转速从

2 000 r/min 增至 3 000 r/min 时,COP 降幅最大,这是因为在低转速下,压缩机功耗过低,系统不匹配导致即使在换热量不高的条件下,COP 达到很高,随着压缩机转速的增加,COP 降幅越来越小。保持压缩机转速不变,HVAC 总成进风量从 300 m³/h 增至 400 m³/h,制热量增加约 13.3%~26.0%,COP 增加约 0.03~0.80。这是因为此时压缩机转速不变,HVAC 总成进风量的增加导致对流换热加强,制热量随之增加,此时压缩机耗电变化不明显,导致 COP 增加。

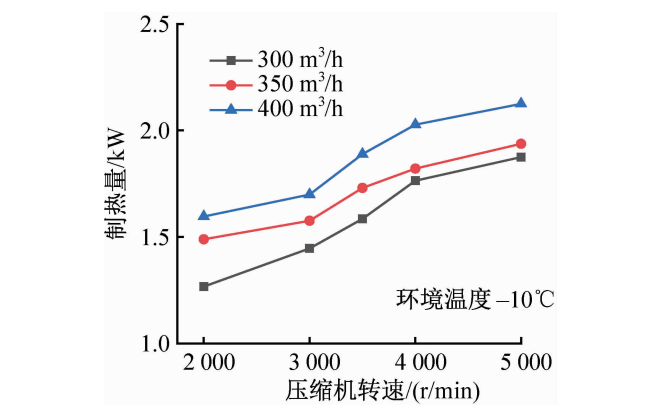


图 4 不同进风量下,制热量随压缩机转速的变化
Fig. 4 Heating capacity change with compressor speed under different air inlet volume

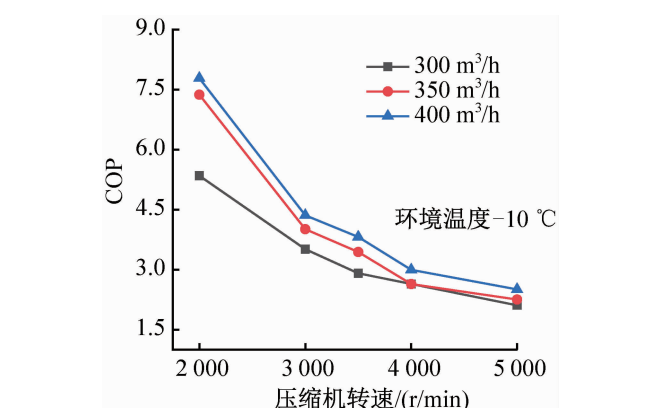


图 5 不同进风量下,COP 随压缩机转速的变化
Fig. 5 COP change with compressor speed under different air inlet volume

2.2 环境温度对制热性能影响

图 6 所示为在压缩机转速为 5 000 r/min 时,压缩机吸/排气温度随环境温度的变化。由图 6 可知,随着环境温度的增加,不同 HVAC 总成进风量下的压缩机吸/排气温度均逐渐升高。环境温度从-10 ℃升至 0 ℃,三档 HVAC 总成进风量下的压缩机排气温度分别增加 29.9、24.8、21.2 ℃,压缩机吸气温度分别增加 13.9、13.1、17.3 ℃。维持环境温度不变,HVAC 总成进风量与压缩机吸/排气温度没有明显变

化,说明压缩机吸/排气温度受 HVAC 总成进风量影响较小。

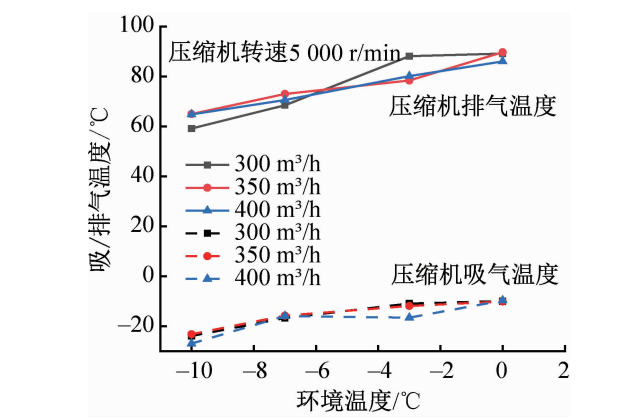


图 6 不同进风量下,压缩机吸/排气温度随环境温度的变化
Fig. 6 Compressor suction and discharge temperature change with ambient temperature under different air inlet volume

图 7 所示为压缩机吸/排气压力随环境温度的变化。随着环境温度的增加,压缩机吸气压力逐渐升高,排气压力总体呈增加趋势,但当温度从 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增至 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,排气压力变化较小,当 HVAC 总成进风量为 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 时,排气压力甚至出现降低,这可能是由于数据采取误差造成的。

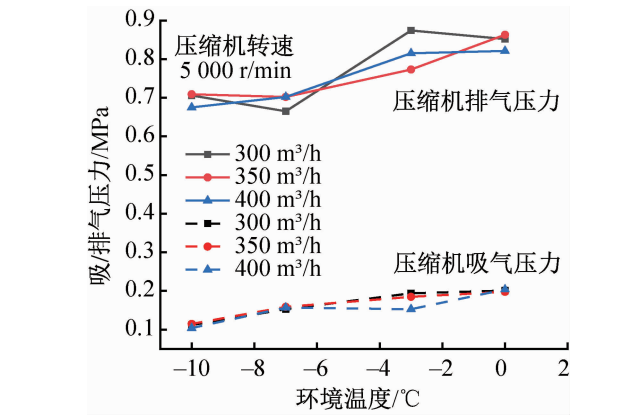


图 7 不同进风量下,压缩机吸/排气压力随环境温度的变化
Fig. 7 Compressor suction and discharge pressure change with ambient temperature under different air inlet volume

图 8 和图 9 所示分别为在压缩机转速为 $5\text{ }000\text{ r/min}$ 时,该热泵系统的制热量和 COP 随环境温度的变化。由图 8 和图 9 可知,随着环境温度从 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,制热量和 COP 总体呈增加趋势。环境温度上升 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, HVAC 总成进风量不变,制热量增加 $60.9\%\sim71.0\%$,COP 增加 $0.28\sim0.54$ 。图 9 中,当环境温度从 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,COP 降幅最大,这是因为当环境温度低于 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,蒸发器的吸热量下降明显加快,而此时压缩机功耗变化不明显,因此在热泵

系统的制热量中蒸发器吸热所占比例开始减少,而压缩机功耗占比增加^[16]。在 HVAC 总成进风量为 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 和 $350\text{ m}^3/\text{h}$ 时,随着环境温度的升高,COP 出现小幅降低,这是可能是因为实际实验过程中,压缩机转速达到 $5\text{ }000\text{ r/min}$ 时,压缩机在高转速下性能不稳定或数据采集出现误差,导致压缩机功耗数值偏高。

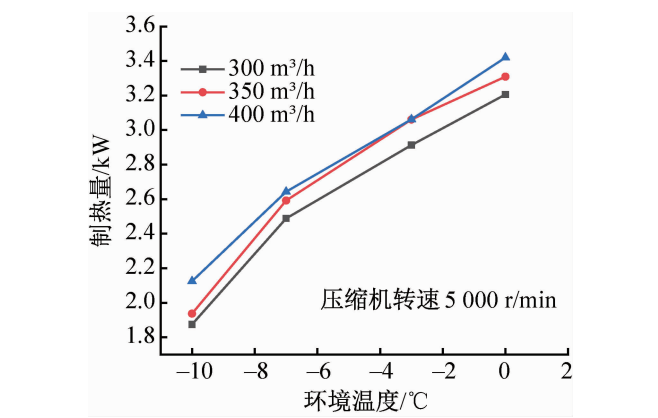


图 8 不同进风量下,制热量随环境温度的变化
Fig. 8 Heating capacity at various ambient temperatures under different air inlet volume

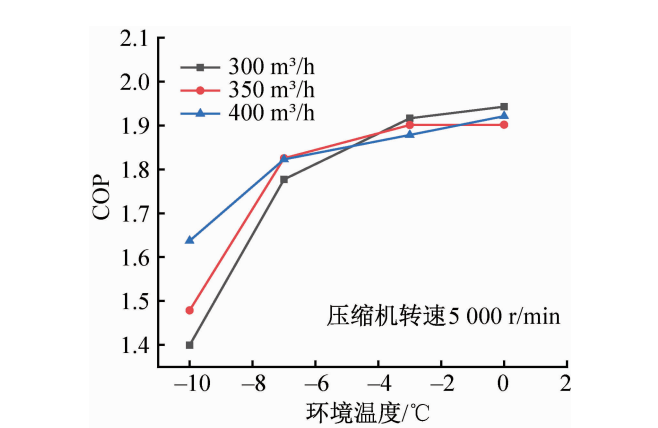


图 9 不同进风量下,COP 随环境温度的变化
Fig. 9 COP at various ambient temperature under different air inlet volume

2.3 续航里程估算对比

为验证热泵空调系统相比于 PTC 加热对于续航里程的提升效果,计算对比在达到相同制热量条件下,热泵系统和 PTC 各自对续航里程的影响。选取实验工况为压缩机转速 $5\text{ }000\text{ r/min}$, HVAC 总成进风量 $350\text{ m}^3/\text{h}$ 时的制热量,作为 PTC 加热器所需要达到的标准功耗,设 PTC 加热器的加热效率为 0.95 。在 $-10\sim0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下,空调功耗如表 4 所示,其中压缩机功耗和开启 PTC 加热器的电耗作为最后计算的空调能耗。

表 4 不同环境温度下的空调功耗

Tab.4 Air conditioning power consumption at different ambient temperatures

环境温度/℃	制热量/kW	压缩机功耗/kW	PTC 功率/kW	开启 PTC 电耗/kW
-10	1.94	0.86	1.94	2.04
-7	2.59	0.95	2.59	2.73
-3	3.06	1.09	3.06	3.22
0	3.31	1.20	3.31	3.48

电动汽车相对续航里程计算式^[17]：

$$R_{rang} = \frac{W_d}{(W_d + W_{AC})} \tag{1}$$

式中： R_{rang} 为相对续航里程； W_d 为汽车能耗，kW； W_{AC} 为空调能耗，kW。为对电动汽车使用空调系统后的续航里程进行估算，假设：电动汽车的电池能量只供给空调和驱动汽车；电池能量驱动汽车行驶效率为 1；电动汽车始终匀速行驶，电动汽车空调始终处于稳态。根据式（1）推导出估算具体续航里程式：

$$R_1 = \frac{Ahv}{\frac{Ahv}{R} + W_{AC}} \tag{2}$$

式中： R_1 为开启空调后的续航里程，km； Ah 为电池容量，kW·h； v 为行驶速度，km/h； R 为汽车不开启空调时的续航里程，km。

对市场上的电动汽车进行调查，选取一款电池容量为 47.5 kW·h 的电动汽车，续航里程达 300 km。根据 NEDC (new European driving cycle, 新欧洲标准行驶循环) 测试工况下车速与时间的关系，理论实验距离为 11.02 km，时间为 19 min，如图 10 所示^[18]，因此平均车速选取为 34.8 km/h。

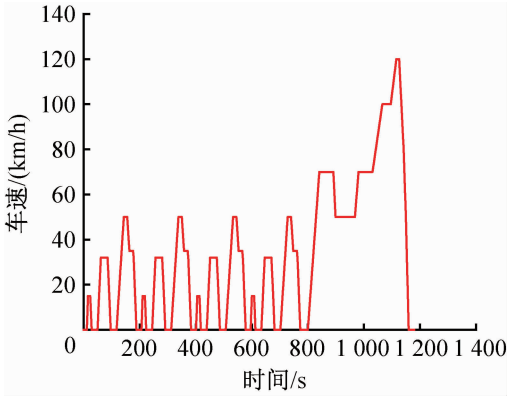


图 10 NEDC 测试工况车速-时间关系图

Fig. 10 Speed-time diagram of NEDC test condition

根据式（2）和表 4，估算出在满足同样制热量条件下，该款电动汽车开启空调系统后的续航里程，采

用该热泵空调系统和采用 PTC 加热器后该车的续航里程对比结果如图 11 所示。

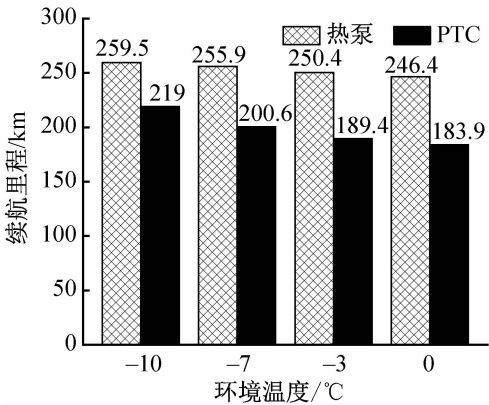


图 11 续航里程对比

Fig. 11 Comparison of vehicle driving range

由计算结果可知，开启空调使电动汽车的续航里程明显减小。在制热量相同的情况下，使用热泵空调系统的续航里程高于使用 PTC 加热器。在制热量相同的条件下，热泵空调系统可在 PTC 加热器的基础上，使续航里程提高 13.5%~20.8%。

3 结论

本文基于设计的热泵空调系统，在焓差室内搭建了实验台，对电动汽车热泵空调系统在室外环境温度为-10~0℃工况下的制热性能进行了全新风实验研究。测量了制热循环中压力、温度和换热量的变化。并分析了压缩机转速、HVAC 总成进风量和环境温度对热泵系统制热性能的影响，最后推导估算电动汽车开启空调后续航里程公式，对比达到相同制热量条件下，热泵系统相比于 PTC 加热器对于续航里程的提升。得到如下结论：

- 1) 压缩机转速对热泵系统性能影响较大。压缩机转速每增加 1 000 r/min，制热量增加 4.8%~22.0%，COP 降低 0.06~1.48，排气温度升高 11.8~25.1℃，排气压力升高 0.065~0.166 MPa。
- 2) 较大的 HVAC 总成进风量可显著提升热泵系

统性能。在压缩机转速和环境温度不变的情况下, HVAC 总成进风量从 $300 \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $400 \text{ m}^3/\text{h}$, 制热量增加约 13.3%~26.0%, COP 增加约 0.03~0.80。

3) 较高的环境温度能更好发挥热泵系统性能。环境温度从 -10°C 升至 0°C , 在 HVAC 总成进风量不变的情况下, 制热量增加 60.9%~71.0%, COP 增加 0.28~0.54。

4) 在达到相同制热量条件下, 使用该热泵空调系统, 可在 PTC 加热器的基础上使续航里程提高 13.5%~20.8%。

参考文献

- [1] ZHUGE Chengxiang, WEI Binru, DONG Chunjiao, et al. Exploring the future electric vehicle market and its impacts with an agent-based spatial integrated framework: a case study of Beijing, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 221: 710–737.
- [2] QI Zhaogang. Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 754–764.
- [3] 尹立春. 浅谈新能源汽车空调系统的现状与发展趋势[J]. 科技经济导刊, 2018(1): 102. (YIN Lichun. On the current situation and development trend of new energy automobile air conditioning system[J]. Technology and Economic Guide, 2018(1): 102.)
- [4] ZHANG Ziqi, WANG Dandong, ZHANG Chengquan, et al. Electric vehicle range extension strategies based on improved AC system in cold climate—a review[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88: 141–150.
- [5] 张子琦, 李万勇, 张成全, 等. 电动汽车冬季负荷特性研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(5): 39–44. (ZHANG Ziqi, LI Wanyong, ZHANG Chengquan, et al. A study on heat load character of EV in cold climate[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(5): 39–44.)
- [6] 李夔宁, 邝锡金, 荣正壁, 等. 电动汽车热管理系统的研究现状及展望[J]. 制冷与空调(北京), 2020, 20(5): 60–70. (LI Kuining, KUANG Xijin, RONG Zhengbi, et al. Research status and prospect of electric vehicle thermal management system[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2020, 20(5): 60–70.)
- [7] BELLOCCHI S, LEO GUIZZI G, MANNO M, et al. Reversible heat pump HVAC system with regenerative heat exchanger for electric vehicles: analysis of its impact on driving range[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129(1): 290–305.
- [8] 李丽, 魏名山, 彭发展, 等. 电动汽车用热泵空调系统设计及实验[J]. 制冷学报, 2013, 34(3): 60–63. (LI Li, WEI Mingshan, PENG Fazhan, et al. Design and experiment of heat pump air-conditioning system for electric vehicles[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(3): 60–63.)
- [9] QIN Fei, XUE Qingfeng, ALBARRACIN VELEZ G M, et al. Experimental investigation on heating performance of heat pump for electric vehicles at -20°C ambient temperature[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 102: 39–49.
- [10] SAIZ JABARDO J M, GONZALES MAMANI W, IANELLA M R. Modeling and experimental evaluation of an automotive air conditioning system with a variable capacity compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(8): 1157–1172.
- [11] TIAN Changqing, LI Xianting. Numerical simulation on performance band of automotive air conditioning system with a variable displacement compressor[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(17): 2718–2738.
- [12] 张耘, 李万勇, 陈亮, 等. R134a/R32 混合制冷剂电动汽车空调系统制热性能的实验研究[J]. 制冷技术, 2017, 37(5): 36–40. (ZHANG Yun, LI Wanyong, CHEN Liang, et al. Experimental investigation on heating performance of electric vehicle air conditioning system using mixed refrigerant of R134a/R32[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(5): 36–40.)
- [13] 武卫东, 余强元, 吴佳玮, 等. 压缩机转速对新能源汽车空调制冷性能的影响[J]. 流体机械, 2017, 45(11): 61–65, 57. (WU Weidong, YU Qiangyuan, WU Jiawei, et al. Influence of compressor speed on air conditioning performance of new energy vehicle[J]. Fluid Machinery, 2017, 45(11): 61–65, 57.)
- [14] 华若秋, 武卫东, 余强元, 等. EXV 开度对纯电动汽车热泵空调性能的影响[J]. 流体机械, 2019, 47(6): 56–61. (HUA Ruoqiu, WU Weidong, YU Qianqian, et al. Effects of EXV opening on performance of electric automotive heat pump air conditioning system[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(6): 56–61.)
- [15] 刘明康, 苏林, 方奕栋, 等. 电动汽车热泵空调系统冬季采暖性能实验研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(4): 45–51. (LIU Mingkan, SU Lin, FANG Yidong, et al. Experimental investigation on heating performance of heat pump air-conditioning system for electric vehicle in winter[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(4): 45–51.)
- [16] 王智兴. 提高电动汽车热泵空调系统低温制热性能的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017. (WANG Zhixing. Research on improving low-temperature heating performance of electric vehicle heat pump air conditioning system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.)

37-40.)

[10] 冯云. 数据中心空调解决方案优化探讨[J]. 科技致富向导, 2012 (6): 390. (FENG Yun. Discussion on optimization of air conditioning solutions in data center[J]. Guide of Sci-tech Magazine, 2012(6):390.)

[11] MOAZAMIGOODARZI H, TSAI P J, PAL S, et al. Influence of cooling architecture on data center power consumption[J]. Energy, 2019, 183: 525-535.

[12] ZHAN Binfei, SHAO Shuangquan, ZHANG Hainan, et al. Simulation on vertical microchannel evaporator for rack-backdoor cooling of data center[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 164: 114550.

[13] MOAZAMIGOODARZI H, PAL S, DOWN D, et al. Performance of a rack mountable cooling unit in an IT server enclosure[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2020, 17:100395.

[14] NEMATI K, ALISSA H A, PUVVADI U, et al. Experimental characterization of the rear door fans and heat exchanger of a fully-enclosed, hybrid-cooled server cabinet [C]//2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Las Vegas, IEEE, 2016: 710-719.

[15] 罗浩文,丁云飞. 单元式数据机柜冷却系统性能研究[J]. 节能,2018,37(7):82-87. (LUO Wenhao, DING Yunfei. Study on the performance of a unitary data cabinet cooling system [J]. Energy Conservation, 2018, 37 (7): 82-87.)

[16] 韩宗伟,付琪,白晨光. 一种自带温控装置且服务器竖直排列的数据中心机柜: 109152300 [P]. 2019-02-22. (HAN Zongwei, FU Qi, BAI Chenguang. A data center cabinet with temperature control device and servers arranged vertically: 109152300 [P]. 2019-02-22.)

[17] 数据中心设计规范:GB 50174—2017 [S]. 北京:中国标准出版社, 2008. (Code for design of date centers: GB 50174—2017 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.)

通信作者简介

韩宗伟,男,副教授,东北大学冶金学院,15040168696,E-mail: hanzongwei_neu@ 163.com。研究方向:制冷与热泵理论与关键技术,可再生能源和工业余热高效利用,高精度控温技术。

About the corresponding author

Han Zongwei, male, associate professor, School of Metallurgy, Northeastern University, +86 15040168696, E-mail: hanzongwei_neu@ 163.com. Research fields: theory and key technology of refrigeration and heat pump, efficient utilization of renewable energy and industrial waste heat, high precision temperature control technology.

(上接第 59 页)

[17] 张子琦.电动汽车热泵空调系统及降能耗策略研究[D]. 上海:上海交通大学, 2018. (ZHANG Ziqi. Study on electric vehicle heat pump air conditioning system and energy consumption reduction strategy [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.)

[18] 电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法: GB/T18386—2017 [S]. 北京:中国标准出版社, 2017. (Electric vehicles—Energy consumption and range—Test procedures: GB/T18386—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China,2017.)

通信作者简介

苏林,男,教授,上海理工大学能源与动力工程学院,制冷与低温工程研究所,021-55272376,E-mail: linsu@ usst.edu.cn.研究方向:汽车热管理技术、车用空调热泵技术、汽车热管理系统与零部件设计及优化。

About the corresponding author

Su Lin, male, professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 21-55272376, E-mail: linsu@ usst.edu.cn. Research fields: automobile thermal management technology, automobile air conditioning heat pump technology, automobile thermal management system and parts design and optimization.