

电动汽车用二氧化碳热泵空调系统性能分析*

吕然¹ 王儒金² 宋占卓³ 刘冬³ 王一铭¹ 李明¹

(1. 吉林大学, 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 中国第一汽车集团有限公司, 长春 130013; 3. 一汽奔腾轿车有限公司, 长春 130022)

【摘要】为提高电动汽车的热管理性能、解决制冷剂碳排放问题,以天然工质CO₂为制冷剂,提出一种适用于电动汽车的跨临界CO₂热泵空调系统,并进行了性能分析。结果表明:该系统在-20℃环境条件下仍可保证制热量5kW且出风温度36℃;随着压缩机转速提高,制热量提高,但性能系数(COP)降低;适当提高室内换热器风量可以有效提高制热量和COP,但过大的风量会导致出风温度过低而不利于制热;40℃环境温度和7000r/min压缩机转速条件下系统制冷量为4.2kW,COP为1.1;制冷量和COP随着室内蒸发器风量升高而提高,适当提高风量可以有效提升制冷性能。

关键词:电动汽车 跨临界CO₂热泵空调系统 性能分析

中图分类号:U469.72 文献标志码:A DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230406

Performance Analysis of CO₂ Heat Pump Air Conditioning System for Electric Vehicle

Lü Ran¹, Wang Rujin², Song Zhanzhuo³, Liu Dong³, Wang Yiming¹, Li Ming¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022; 2. China FAW Group Co., Ltd., Changchun 130013; 3. FAW Car Co., Ltd., Changchun 130022)

【Abstract】To improve the thermal management performance and solve the refrigerant carbon emissions issue of electric vehicle, this article proposed a transcritical CO₂ heat pump air conditioning system suitable for electric vehicle with natural CO₂ as refrigerant, and performance analysis was conducted. The results show that: this system can still ensure a heating capacity of 5 kW and 36 °C at the outlet in an environment of -20 °C. As the compressor speed increases, the heating capacity increases, but Coefficient Of Performance (COP) decreases. The appropriate increment in the air volume of the internal gas cooler can effectively increase the heating capacity and COP, but excessive air volume will lead to low outlet air temperature, which is not conducive to heating. At ambient temperature of 40 °C and compressor speed of 7 000 r/min, the cooling capacity is 4.2 kW and the COP is 1.1. As the air volume of the internal evaporator increases, the cooling capacity and COP increase, indicating that the appropriate increment in air volume can effectively improve cooling performance.

Key words: Electric vehicle, Transcritical CO₂ heat pump air conditioning system, Performance analysis

【引用格式】吕然,王儒金,宋占卓,等.电动汽车用二氧化碳热泵空调系统性能分析[J].汽车工程师,2023(12):1-8.

LÜ R, WANG R J, SONG Z Z, et al. Performance Analysis of CO₂ Heat Pump Air Conditioning System for Electric Vehicle[J]. Automotive Engineer, 2023(12): 1-8.

1 前言

随着能源与环境问题日益严重,以纯电动汽车为代表的新能源汽车已成为汽车的主流发展趋

势^[1]。与传统汽车不同,新能源汽车没有发动机余热来满足制热需求,存在低温条件下制热困难和制热效率较低的问题^[2-3],同时,温室效应与碳排放问题对制冷剂提出了更高的要求^[4]。因此,汽

*基金项目:吉林省科学技术厅技术攻关项目(20210201136GX)。

通讯作者:李明(1976—),教授,博士,主要研究方向为汽车热管理与控制,limingtiger@jlu.edu.cn。

车热管理系统的改进对新能源汽车的发展格外重要。

相比于传统的R134a空调系统,以R1234yf为制冷剂的电动汽车超低温热泵空调系统在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温环境中制热量和性能系数(Coefficient Of Performance, COP)分别提升30%和14%^[5]。Wu等^[6]假定 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为乘员舱舒适温度,对R134a、R32、R1234yf、 CO_2 等多种制冷剂的低温制热性能进行对比,结果表明,仅 CO_2 热泵空调系统可以在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温环境下可独立满足制热需求,而R134a热泵空调系统在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下已无法独立满足制热需求。 CO_2 作为天然制冷剂,具有零污染、无毒、制热性能强等优点,因此 CO_2 热泵空调系统在新能源汽车领域极具发展前景^[7-9]。武悦等^[10]通过道路试验分析了 CO_2 热泵空调系统的低温采暖能力和对整车续航里程的影响,结果表明: CO_2 热泵空调系统低温采暖能力可与传统燃油车相近;在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下,采用 CO_2 热泵空调系统的电动汽车续航里程比采用正温度系数(Positive Temperature Coefficient, PTC)热敏电阻采暖系统的电动汽车续航里程高23.6%。Dong等^[11]通过试验研究发现: CO_2 热泵空调系统与R134a空调系统具有相似的制冷能力和COP,但 CO_2 热泵空调系统具有更高的制热能力和COP;在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下, CO_2 热泵空调系统的制热能力较R134a空调系统的制热能力提升83%。

为提高电动汽车的热管理性能、解决制冷剂碳排放问题,本文在现有研究基础上,以天然工质 CO_2 作为制冷剂,提出一种适用于电动汽车的跨临界 CO_2 热泵空调系统,并通过AMESim软件进行制冷和制热性能分析。

2 理论与方法

CO_2 与氟利昂制冷剂物性参数相差较大,制冷和制热状态下 CO_2 热泵空调系统与R134a空调系统的压焓图如图1所示。跨临界 CO_2 热泵空调系统压力更高,高压 CO_2 处于超临界态,与R134a空调系统的定温放热过程不同,超临界状态的 CO_2 放热时存在巨大的温度滑移,换热温差更大,可以有效提高换热效率^[12-13]。在低温制热模式下,R134a因为蒸发温度限制导致室外蒸发换热温差有限,进而导致制热困难,而 CO_2 制冷剂在1 MPa压力下蒸发温度可达 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,可保证较大的换热温差。

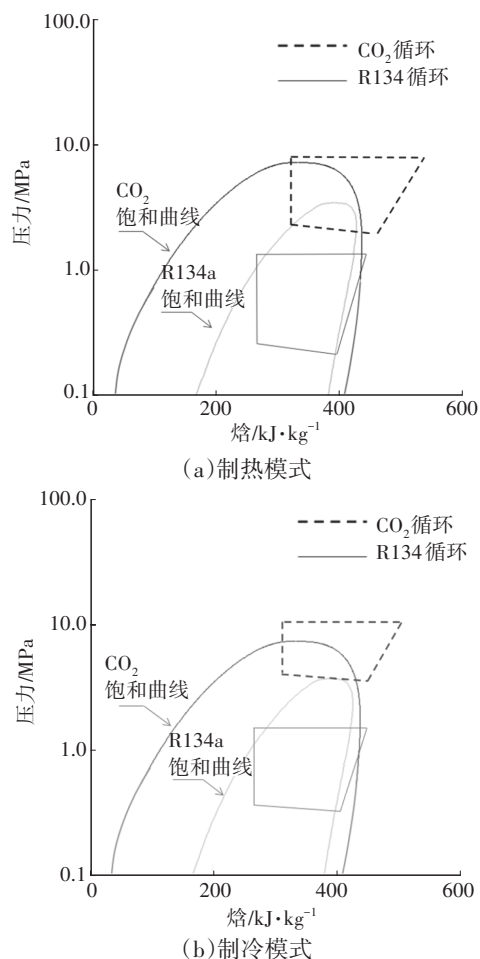


图1 CO_2 热泵空调系统与R134a空调系统压焓图

本文所搭建的 CO_2 热泵空调系统仿真平台如图2所示,包括压缩机、气液分离器、室内换热器、膨胀阀、室外换热器、鼓风机、风扇、4个三通阀、4个截止阀、4个传感器以及若干管路。该 CO_2 热泵空调系统可通过截止阀的开关调制冷剂的流向,从而实现制冷模式与制热模式的转换。截止阀1~截止阀4在制冷模式下的开关信号为0101,在制热模式下的开关信号为1010(0代表关闭,1代表开启)。

采用的压缩机为滚动转子压缩机,因本文研究的重点为系统性能而非压缩机结构特性,所以忽略压缩机结构特性,采用等效的压缩机排气容积、排气效率、等熵效率和机械效率建立简化数学模型,压缩机效率随转速与压比变化而变化;采用的膨胀阀为电子膨胀阀,与热力膨胀阀相比,电子膨胀阀具有响应快、控制精确等优点^[14-15];室内换热器和室外换热器均采用微通道平行流换热器,该类换热器具有结构紧凑、换热效果强、质量轻等优点而广泛应用于汽车热管理领域^[16];为简化计算,忽略鼓风机和风扇工作特性,采用给定温度、压力、相对湿度和

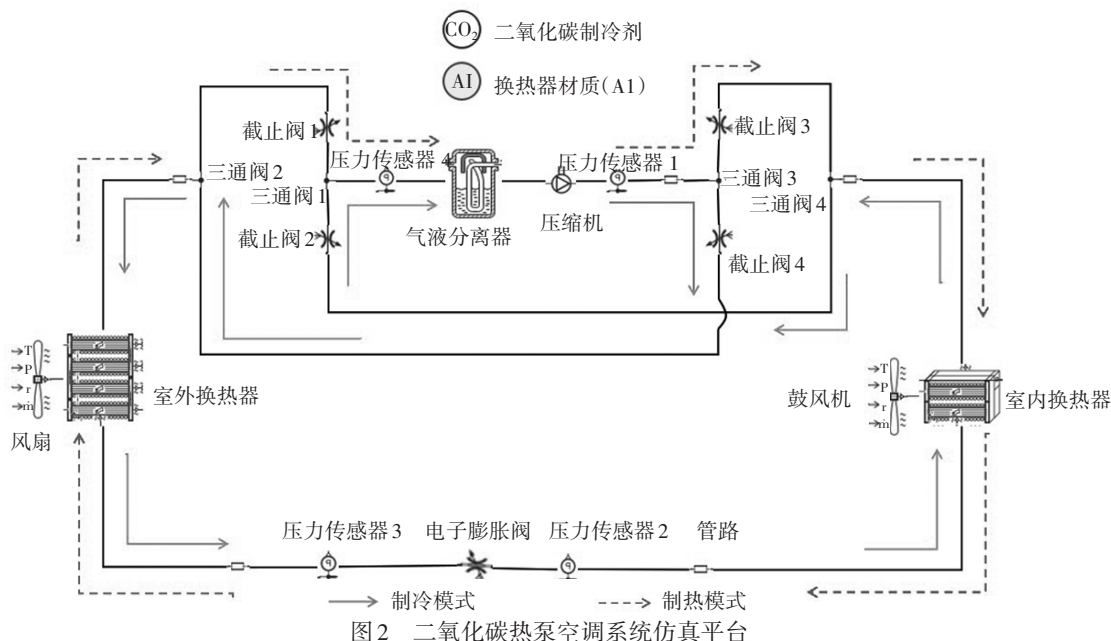


图2 二氧化碳热泵空调系统仿真平台

流量的方式代替鼓风机和风扇,并且假设换热器表面各处空气流速相同。系统关键零部件的规格参数如表1所示。其中室内换热器采用双层、4流程分布,每层2个流程,每层流程冷却管数量分别为20根和14根;室外换热器采用单层、4流程分布,各流程冷却管数量分别为16根、13根、13根和10根。

表1 关键零部件规格

零部件名称	参数	取值
压缩机	排气容积/mL	6
	容积效率	0.62~0.91
	等熵效率	0.64~0.89
	机械效率	0.73~0.89
	转速范围/r·min ⁻¹	2 000~10 000
电子膨胀阀	最大流通面积/mm ²	1.54
	最大开度直径/mm	1.4
室内换热器	宽度×高度×厚度/mm×mm×mm	275×230×35
	流程分布	双层(管数:20根-14根; 20根-14根)
室外换热器	宽度×高度×厚度/mm×mm×mm	540×322×12.5
	流程分布	单层(管数:16根-13根-13根-10根)

电子膨胀阀开度直接影响蒸发器出口过热度,从而对系统性能产生影响,在极端情况下,会导致系统性能下降明显。本文采用比例积分(Proportion Integral, PI)控制方法控制电子膨胀阀开度,控制逻辑如图3所示。以蒸发器出口过热度与期望过热度

的差值 $e(t)$ 作为 PI 控制器的输入,计算并在增益系数 G 的作用下输出控制量:

$$v(t) = [K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt] \cdot G \quad (1)$$

$$e(t) = c(t) - r(t) \quad (2)$$

式中, $v(t)$ 为电子膨胀阀开度输出值; $r(t)$ 为出口过热度期望值、 $c(t)$ 为出口过热度反馈值; $K_p=0.1$ 为比例系数; $K_i=0.01$ 为积分系数。

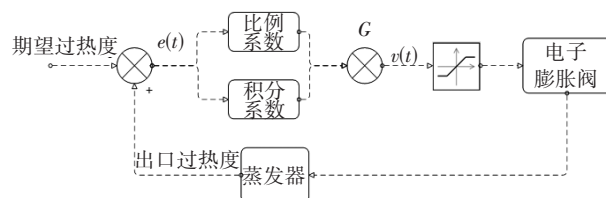


图3 电子膨胀阀控制逻辑

在饱和限制下输出结果至电子膨胀阀模块实现开度控制。本文系统控制蒸发器出口过热度为10℃。

制热量 Q 和系统 COP 计算公式为:

$$Q = \dot{m} (h_i - h_o) \quad (3)$$

$$S_{\text{COP}} = \frac{Q}{W} \quad (4)$$

式中, \dot{m} 为制冷剂质量流量; h_i 、 h_o 分别为室内冷凝器制冷剂进、出口焓值; W 为压缩机功耗。

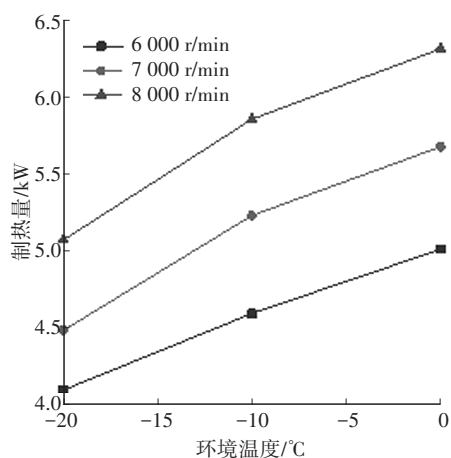
制冷模式计算同理。

3 结果与分析

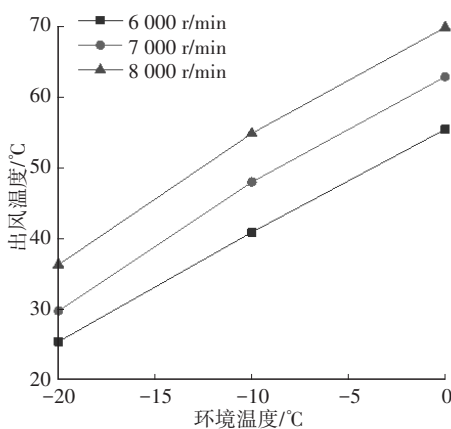
3.1 制热性能分析

为研究低温环境下 CO₂ 热泵空调系统的制热性能,在室内换热器风量为 250 m³/h 的工况下,分析不

同压缩机转速条件下的低温制热性能,结果如图4所示:随着环境温度的降低,系统制热量降低,同时出风温度降低,这是由于环境温度降低导致蒸发温度与环境温度之间的温差降低,蒸发器吸热能力下降,进而导致系统制热性能下降。在压缩机转速不变的条件下,随着环境温度从0℃下降到-20℃,制热量下降22.5%~27.0%,出风温度降低30.0~33.6℃。由图4可知:当环境温度较高时,采用低转速即可满足制热需求;当环境温度较低时,可以通过提高压缩机转速达到提升制热量的目的,在环境温度为-20℃时,仍可通过提高压缩机转速使出风温度达到36℃,满足制热要求。



(a)制热量



(b)出风温度

图4 CO₂热泵空调系统低温制热性能

为研究压缩机转速对CO₂热泵空调系统制热性能的影响,在-10℃环境温度和250 m³/h室内换热器风量条件下,改变压缩机转速,分析制热量、COP和出风温度的变化,结果如图5所示。由图5可知,随着压缩机转速的提高,系统制热量和出风温度升高,但COP降低。随着压缩机转速

从2000 r/min提高至7000 r/min,制热量从2.0 kW增大至5.2 kW,出风温度从12.4℃提高至48.0℃,COP由4.4降至1.6,说明适当提高压缩机转速可以提升制热能力,但过高的压缩机转速会引起系统效率过低而造成能耗过大。

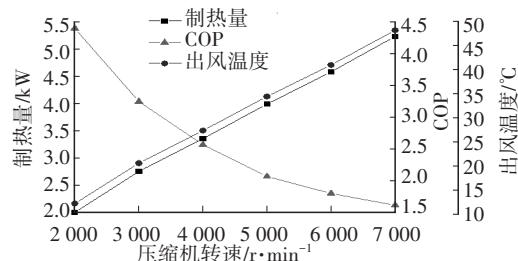
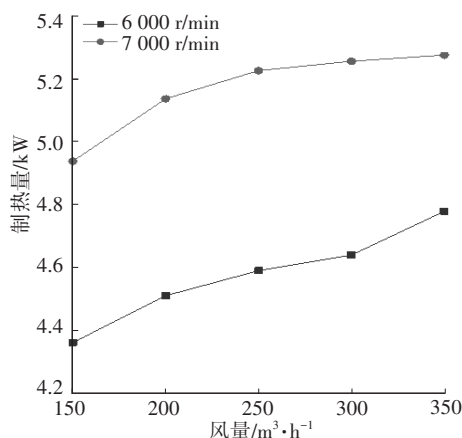
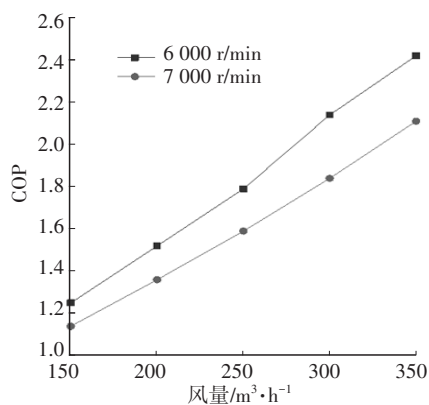


图5 压缩机转速对制热性能的影响

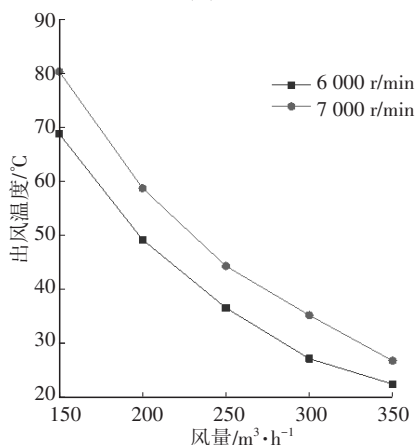
为研究室内换热器(室内气冷器)风量对二氧化碳热泵空调系统制热性能的影响,在环境温度为-10℃,压缩机转速为6000 r/min和7000 r/min的条件下,分析风量对制热量、COP和出风温度的影响,结果如图6所示。由图6可知,制热量和系统COP随着风量的提高而提高,这是由于风量提高导致空气流速增大,使室内换热器和空气的对流换热增强,从而提高制热量,在其他条件不变时,系统COP升高。随着风量从150 m³/h增至350 m³/h,制热量提高6.9%~9.6%,系统COP增大85.1%~93.6%。热泵系统采暖出风温度随着室内换热器风量的升高而降低,尽管风量提高导致换热量增大,但因空气质量流量增大,单位热量所引起的温升降低,从而导致出风温度反而降低。同时,由图6可知,在压缩机转速为6000 r/min和7000 r/min条件下,当风量分别超过250 m³/h和300 m³/h后,采暖出风温度将低于40℃。由此可知,适当增加风量可以有效提升制热性能,但过大的风量会导致制热系统出风温度过低,反而不利于制热。



(a)制热量



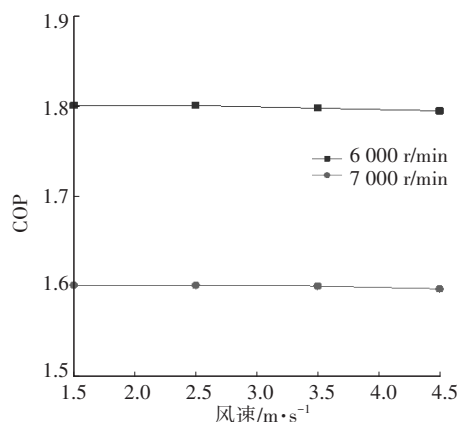
(b)COP



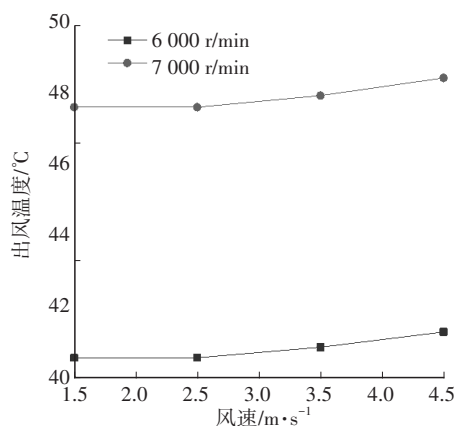
(c)出风温度

图6 室内换热器风量对制热性能的影响

为研究室外换热器(室外蒸发器)风速对 CO_2 热泵空调系统制热性能的影响,在环境温度为 $-10^{\circ}C$,压缩机转速为6000 r/min和7000 r/min的条件下,分析风速对制热量、COP和出风温度的影响,结果如图7所示。由图7可知:随着室外换热器风速的提高,制热量和出风温度逐渐升高,而风速对COP的影响几乎可以忽略;随着风速从1.5 m/s提高至4.5 m/s,系统性能变化在3%以内,说明室外换热器风速对本文的 CO_2 热泵空调系统制热性能影响极小。



(b)COP

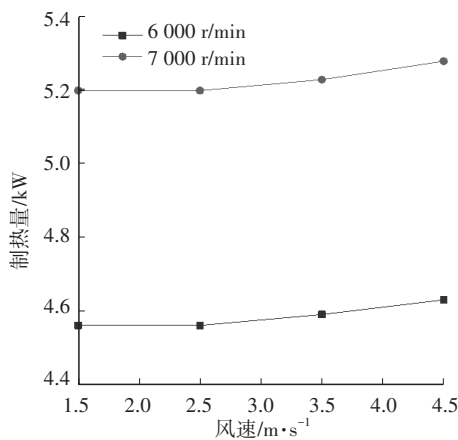


(c)出风温度

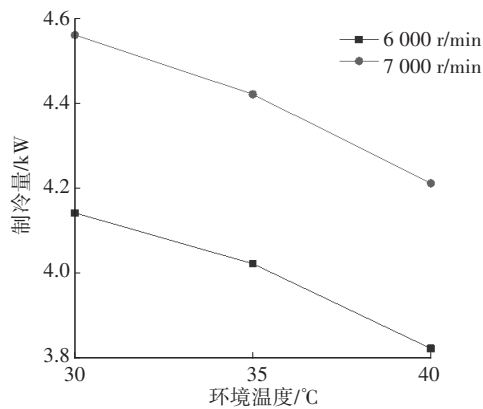
图7 室外换热器风速对制热性能的影响

3.2 制冷性能分析

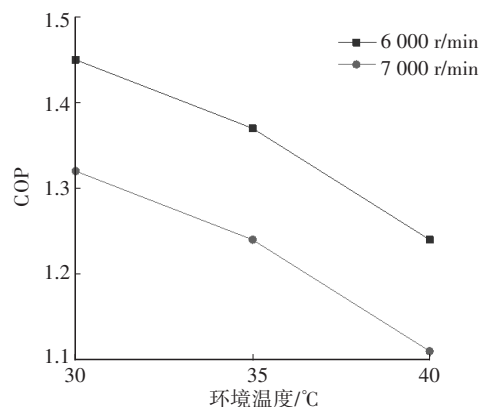
为研究高温环境下 CO_2 热泵空调系统的制冷性能,在室内换热器风量为 $350 m^3/h$ 的工况下,分析不同压缩机转速条件下的高温制冷性能,结果如图8所示。由图8可知:相同条件下,随着环境温度的升高,系统制冷量和COP降低,这是由于,随着环境温度升高,在压缩机转速不变的情况下,蒸发器进风温度提高,进而使出风温度提高,制冷剂向外界放热效果减弱;出风温度与环境温度近似于线性关系。



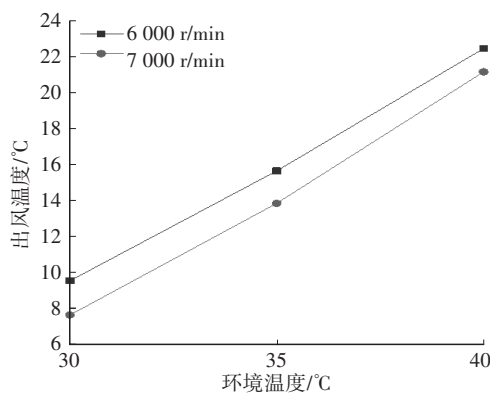
(a)制热量



(a)制冷量



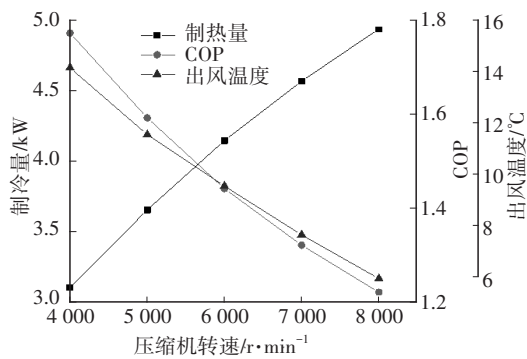
(b) COP



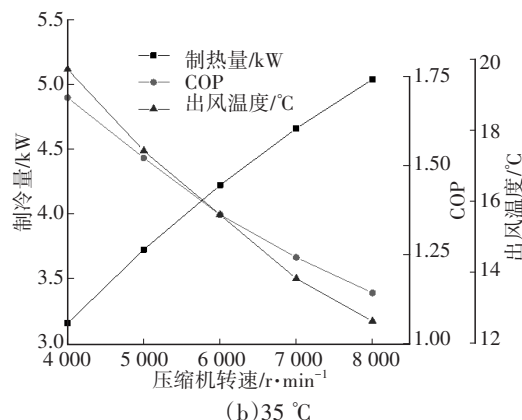
(c) 出风温度

图8 二氧化碳热泵空调系统高温制冷性能

为研究压缩机转速对CO₂热泵空调系统制冷性能的影响,在室内换热器风量为350 m³/h和不同环境温度条件下改变压缩机转速,分析制冷量、COP和出风温度的变化,结果如图9所示。由图9可知,随着压缩机转速的提高,系统制冷量增大,出风温度降低,制冷性能提升,但同时会导致COP降低。这是由于压缩机转速提高引起制冷剂质量流量升高,导致压缩机功耗增大的同时制冷量增大,从而引起制冷系统出风温度降低,又因为压缩机功耗提高幅度大于制冷量提高幅度,所以COP降低。



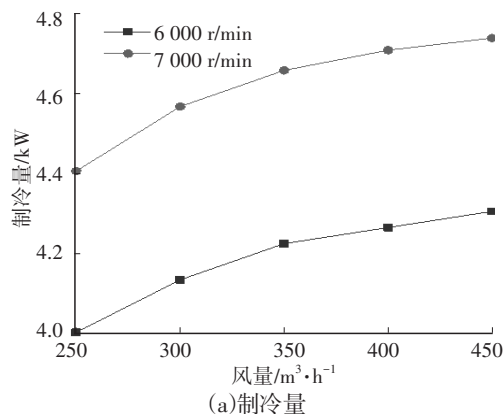
(a) 30 °C



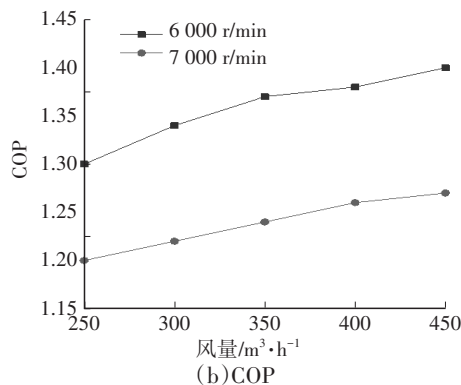
(b) 35 °C

图9 不同环境温度条件下压缩机转速对制冷性能的影响

为研究室内换热器(室内蒸发器)风量对CO₂热泵空调系统制冷性能的影响,在环境温度为35 °C,压缩机转速为6 000 r/min和7 000 r/min的条件下,分析风量对制冷量、COP和出风温度的影响,结果如图10所示。由图10可知,制冷量和COP随着室内换热器风量的提高而增大,这是由于随着风量的提高,室内蒸发器空气侧换热能力增强,制冷量提高,进而导致COP增大。风量由250 m³/h增至450 m³/h时,制冷量提高7.3%~7.5%,COP增大5.8%~7.7%。但随着风量的提高,空气质量流量升高,单位制冷量所引起的空气温降减小,从而导致制冷系统出风温度升高,风量由250 m³/h增至450 m³/h,出风温度升高7.8~8.6 °C。



(a) 制冷量



(b) COP

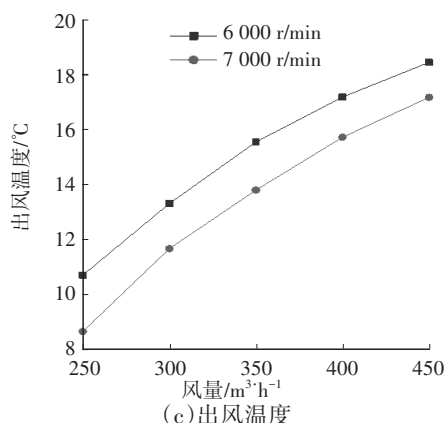
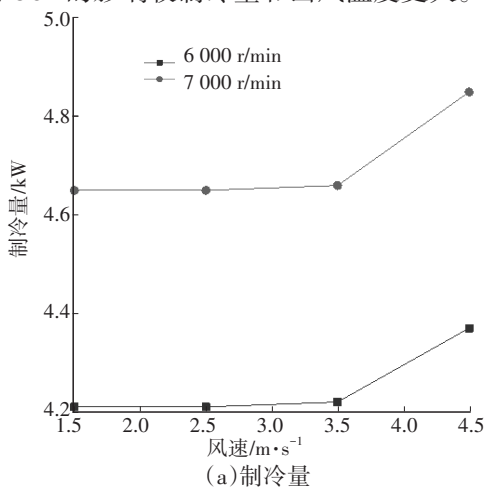
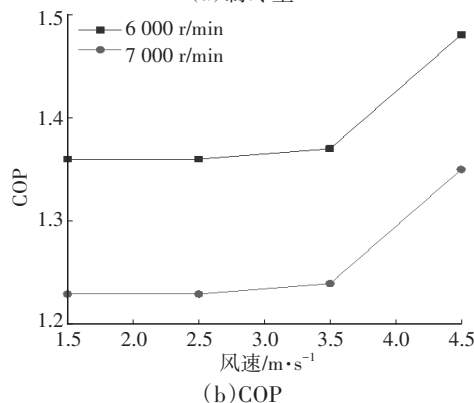


图10 室内换热器风量对制冷性能的影响

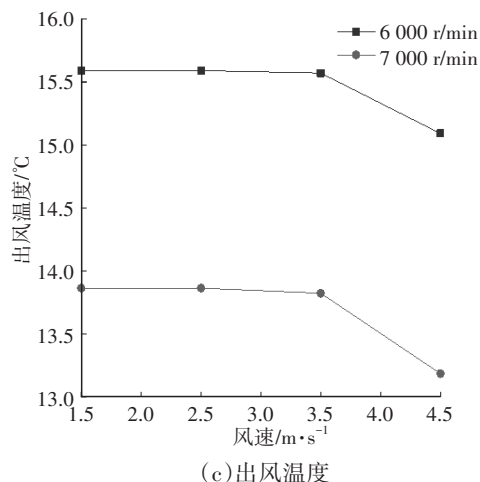
为研究室外换热器(室外气冷器)风速对CO₂热泵空调系统制冷性能的影响,在环境温度为35℃,压缩机转速为6000 r/min和7000 r/min的条件下,分析风速对制冷量、COP和出风温度的影响,结果如图11所示。由图11可知,随着室外换热器风速的提高,系统制冷量和COP均逐渐增大,并且风速较大时升高较快,风速较小时出风温度相对稳定,风速较大时出风温度略有降低。随着风速从1.5 m/s提高至4.5 m/s,制冷量、COP和出风温度分别变化3.8%~4.3%、8.8%~9.7%和3.2%~4.9%,由此可见,风速对COP的影响较制冷量和出风温度更大。



(a) 制冷量



(b) COP



(c) 出风温度

图11 室外换热器风速对制冷性能的影响

4 结束语

本文以CO₂为制冷剂,提出一种适用于电动汽车的跨临界CO₂热泵空调系统,并进行了制热和制冷性能分析,主要结论如下:

a. 制热模式下,跨临界状态下CO₂热泵空调系统制热量和出风温度随着环境温度的降低而降低,低温工况可以通过提高压缩机转速提升制热能力;随着压缩机转速的升高,制热量升高,出风温度升高,但系统COP下降;室外蒸发器风速对系统制热性能的影响较小;室内气冷器风量提高可以有效提升制热量和COP,但过大的风量会导致制热系统出风温度过低,反而不利于制热,适当提高室内气冷器风量是提升制热能力的有效手段。

b. 制冷模式下,随着环境温度从30℃升高至40℃,跨临界状态下CO₂热泵空调系统制冷量降低7.6%~7.7%,COP降低14.5%~15.9%;随着压缩机转速升高,系统制冷量升高,出风温度降低,但会导致系统COP降低;室外气冷器风速对系统COP影响大于对制冷量和出风温度的影响;室内蒸发器风量升高可以有效提升制冷量和COP,但过大风量会导致出风温度偏高,不利于制冷。

参考文献

- [1] HUANG Q. Analysis of Global Policy and Impact on Automobile Industry under Carbon Neutrality[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 308.
- [2] 杨忠诚, 苏林, 于荣, 等. 电动汽车热泵系统低温工况的制热性能实验研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(1): 53-59.
YANG Z C, SU L, YU R, et al. Experimental Research on Heat Pump Heating Performance at Low Temperature for Electric Vehicles[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(1):

- 53-59.
- [3] 汪琳琳,焦鹏飞,王伟,等. 新能源电动汽车低温热泵空调系统研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(12): 1744-1750+1757.
WANG L L, JIAO P F, WANG W, et al. Research on Low Temperature Heat Pump Air Conditioning System in New Energy Electric Vehicle[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(12): 1744-1750+1757.
- [4] 王从飞,曹锋,李明佳,等. 碳中和背景下新能源汽车热管理系统研究现状及发展趋势[J]. 科学通报, 2021, 66(32): 4112-4128.
WANG C F, CAO F, LI M J, et al. Research Status and Development Trend of Thermal Management System for New Energy Vehicles in the Context of Carbon Neutrality [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(32): 4112-4128.
- [5] 刘雨声,李万勇,张立,等. 采用R1234yf制冷剂的汽车超低温强化补气热泵空调性能[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(10): 1108-1116.
LIU Y S, LI W Y, ZHANG L, et al. Performance of Automotive Ultra-Low Temperature Economized Vapor Injection Heat Pump Air Conditioning Using R1234yf Refrigerant[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2020, 54(10): 1108-1116.
- [6] WU J, ZHOU G L, WANG M Y. A Comprehensive Assessment of Refrigerants for Cabin Heating and Cooling on Electric Vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 174.
- [7] PENG X, WANG D B, WANG G H, et al. Numerical Investigation on the Heating Performance of a Transcritical CO₂ Vapor-Injection Heat Pump System[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166.
- [8] CHEN Y Y, ZOU H M, DONG J Q, et al. Experimental Investigation on the Heating Performance of a CO₂ Heat Pump System with Intermediate Cooling for Electric Vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182.
- [9] 俞彬彬,王丹东,向伟,等. 跨临界CO₂电动汽车空调系统性能分析[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(7): 866-872.
YU B B, WANG D D, XIANG W, et al. Performance Analysis of a Trans-Critical CO₂ Air Conditioning System for Electric Vehicle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(7): 866-872.
- [10] 武悦,郑铭铸,杨坚,等. 电动汽车CO₂热泵系统采暖实验研究及模拟分析[J]. 制冷技术, 2019, 39(5): 33-38.
WU Y, ZHENG M Z, YANG J, et al. Experimental Study and Simulation Analysis on Heating Performance of CO₂ Heat Pump System for Electric Vehicles[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2019, 39(5): 33-38.
- [11] DONG J Q, WANG Y B, JIA S W, et al. Experimental Study of R744 Heat Pump System for Electric Vehicle Application[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183(11).
- [12] 彭旭. 纯电动汽车用跨临界CO₂热泵空调系统仿真优化及实验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
PENG X. Simulation Optimization and Experimental Research of Transcritical CO₂ Heat Pump and Air-Conditioning System for Pure Electric Vehicle[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [13] WANG D D, YU B B, LI W Y, et al. Heating Performance Evaluation of a CO₂ Heat Pump System for an Electrical Vehicle at Cold Ambient Temperatures[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 656-664.
- [14] 李海军,张中来,苏之勇,等. 电子膨胀阀对客车用空调器制冷性能影响[J]. 低温与超导, 2020, 48(9): 54-59.
LI H J, ZHANG Z L, SUN Z Y, et al. Influence of Electronic Expansion Valve on Refrigeration Performance of Bus Air Conditioners[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2020, 48(9): 54-59.
- [15] GARCIA-DEL-VALLE J, QUINATO A, QUINATO K J, CASTRO RUIZ F. Experimental Study of the Static and Dynamic Behavior of a Novel Heat Driven Electronic Controlled Expansion Valve[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 168.
- [16] 巫江虹,谢方,刘超鹏,等. 电动汽车热泵空调系统微通道换热器适应性研究[J]. 机械工程学报, 2012(14): 141-147.
WU J H, XIE F, LIU C P, et al. Adaptability Research on Micro-Channel Heat Exchanger Applied to Heat Pump Air Conditioning System for Electrical Vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012(14): 141-147.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2023年10月22日。