

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.06.006

电动汽车空调系统中的电子膨胀阀性能研究

刘登辉, 王芳, 王秋实, 汪青青, 王宇翔, 何泽辉

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:为了对比研究电子膨胀阀与H型热力膨胀阀对电动汽车空调性能的影响,课题组搭建了电动汽车空调性能试验台。在制冷工况下对采用2种膨胀阀的空调系统进行了变工况、变压缩机转速试验。结果表明:在不同的工况下,采用电子膨胀阀能使空调系统获得更低的出风温度,且在高温工况下,电子膨胀阀有更佳的调节性能;对过热度的控制方面,采用电子膨胀阀过热度稳定更快且波动范围小;系统采用电子膨胀阀时制冷量更大,且环境温度越高对制冷量影响越显著;变压缩机转速下,采用电子膨胀阀的系统制冷量和能效比 C_{COP} 均高于采用H型热力膨胀阀的系统,且在低转速时效果更加显著。电子膨胀阀结合变转速压缩机,能够提高系统制冷量和能效比 C_{COP} ,使系统更加高效运转。

关键词:电动汽车空调;电子膨胀阀;H型热力膨胀阀;过热度;能效比

中图分类号:TB657 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)06-0027-06

Performance Research of Electronic Expansion Valve in Electric Vehicle Air Conditioning System

LIU Denghui, WANG Fang, WANG Qiushi, WANG Qingqing, WANG Yuxiang, HE Zehui

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

Abstract: In order to compare the influence of the electronic expansion valve and the H-type thermal expansion valve on the air conditioning performance of electric vehicles, a test bench for the air conditioning performance of electric vehicles was built. Under refrigeration conditions, the air conditioning system with different expansion valves was tested under variable conditions and variable compressor speed. The result shows that under different working conditions, the use of electronic expansion valve can enable the air conditioning system to obtain lower air output temperature, and under high temperature conditions, the electronic expansion valve shows better regulation performance; for the control of the superheat degree, the superheat degree of the system using electronic expansion valves stabilizes faster with small fluctuation range; when the system uses an electronic expansion valve, the cooling capacity is larger, and the effect on the cooling capacity is more significant with the higher ambient temperature; at variable compressor speed, the system cooling capacity and coefficient of performance (C_{COP}) of the system using electronic expansion valve are both higher than that using H-type thermal expansion valve, and the effect is more significant at low speed. The combination of electronic expansion valve and variable speed compressor can improve the cooling capacity and C_{COP} of the system, and make the system operate more efficiently.

Keywords: electric vehicle air conditioning; electronic expansion valve; H-type thermal expansion valve; superheat; COP (coefficient of performance)

随着新能源汽车技术的发展进步,汽车由传统的燃油动力逐渐向混油动力和纯电驱动发展。电动汽车空调被认为是车辆上的第二大耗能设备^[1-2],严重影响

电动汽车的续航里程,因此开发高效的空调系统意义重大。节流元件作为汽车空调制冷系统的重要部件之一,研究节流元件对空调系统的影响,对于实现制冷行

收稿日期:2020-06-09;修回日期:2020-09-05

第一作者简介:刘登辉(1994),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为制冷技术。通信作者:王芳(1966),女,上海人,副教授,主要研究方向为制冷设备测试及优化。E-mail:wang1996930@163.com

业的节能减排有重要意义^[3]。

在汽车空调中,主要应用的节流元件有热力膨胀阀和电子膨胀阀。华若秋等^[4]研究了电子膨胀阀开度变化对电动汽车热泵空调系统性能的影响,改变电子膨胀阀开度能有效调节热泵出风温度,在开度较小时增加开度对提高能效比(C_{COP})有显著效果。Wang等^[5]研究了寒冷气候下电子膨胀阀开度对电动汽车 CO_2 热泵系统性能的影响,指出了电子膨胀阀开度需通过压缩机排气温度及过热度综合控制,合理的开度是保证系统具备高效综合性能的重点。郑国胜等^[6]搭建整车试验平台,安装不同参数的平行充注式热力膨胀阀,测试膨胀阀最大运行压力与系统流量、蒸发器出口温度变化之间的关系,分析得出:降温特性与该压力相关,合理的最大运行压力能够使系统降温迅速。Zhang等^[7]在汽车空调中对比电子膨胀阀与热力膨胀阀2种不同流量节流装置,结果表明:电子膨胀阀在制冷剂的合理分布方面具有显著优势;在空调的出风方面,热力膨胀阀控制下出口的温度波动高达 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,而电子膨胀阀调节的系统温度波动较小;在同等条件下较热力膨胀阀节约20%的功耗。通过搭建风冷热泵机组台架,谈磊等^[8]采用热力膨胀阀和电子膨胀阀分别进行实验,实验表明:在15%以上范围内,电子节流阀不仅能够实现精确调节,同时具备远大于热力膨胀阀的调节范围,相比之下,电子膨胀阀可以应用在宽泛的运行工况中。

为了进一步分析热力膨胀阀及电子膨胀阀在电动汽车空调系统中的性能差异,课题组搭建采用不同膨胀阀的汽车空调测试系统,对2种节流阀进行试验,着重对比研究H型热力膨胀阀与电子膨胀阀在汽车空调应用中的性能特点,以及过热度与系统的匹配,以期今后的研究工作提供借鉴。

1 实验原理

1.1 试验装置

本实验利用空气焓差法对采用不同膨胀阀的电动汽车空调系统进行性能测试,焓差实验室及在内搭建的实验系统如图1所示。焓差实验室分为室内侧和室外侧2部分,通过独立的制冷系统、加热加湿系统模拟车内和车外环境。实验时,换热器安装在风洞上,利用喷嘴前后的压差间接测量流过室外换热器和车内蒸发器的空气流量;室外换热器和车内蒸发器前后均有空气采集设备,测量换热器前后的空气干湿球温度。空调系统所选用的压缩机为电动涡旋压缩机,排量 13 mL ,转速范围 $1\ 000\sim 4\ 000\text{ r/min}$;换热器均为微通道换热器,其中车外换热器为单排,车内蒸发器为双排;所选用的热力膨胀阀为H型,容量为 3.5 kW ,电子膨胀阀为步进电机型,系统采用 R134a 制冷剂。图1中虚线箭头为热力膨胀阀模式时的部分系统管路,此时电磁阀4、电磁阀1关闭,电磁阀2、电磁阀3开启;实线箭头为电子膨胀阀模式时的部分系统管路,此时电磁阀2、电磁阀3关闭,电磁阀1、电磁阀4开启。

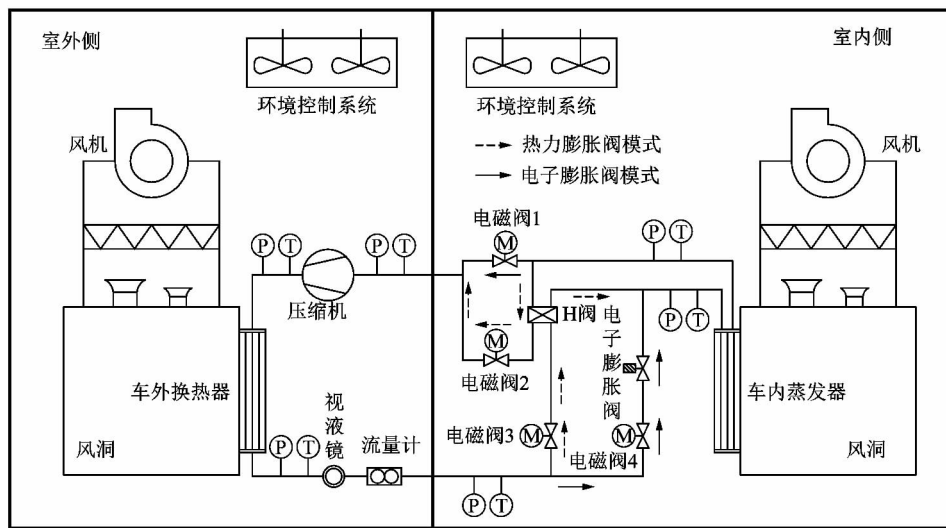


图1 试验装置及测试系统

Figure 1 Test device and test system

汽车空调系统利用铂电阻与压力传感器测量制冷剂的温度和压力,科式质量流量计用来测量制冷剂流

量,功率计测量压缩机的功率,使用安捷伦数据采集仪,采用LabVIEW编写的软件实现数据的采集和测试

系统的控制。所有测量参数范围及精度如表 1 所示。

表 1 测量参数精度

Table 1 Measurement parameters and precision

铂电阻 温度/℃	制冷剂侧 压力/kPa	喷嘴前后 压差/Pa	制冷剂质量 流量/(kg·h ⁻¹)	功率/W
±0.1	±10	±5	±0.5	±6

1.2 计算公式

由试验台测量仪表所测数据结合 Refprop9.0 物性软件,通过计算得到所需数据。

1) 系统制冷量

$$Q_{\text{tci}} = \frac{q_{\text{mi}}(h_{\text{a1}} - h_{\text{a2}})}{V'_n(1 + W_n)} \quad (1)$$

式中: Q_{tci} 为总制冷量,W; q_{mi} 为室内侧送风量,m³/s; h_{a1} 为室内侧蒸发器回风焓值,J/kg; h_{a2} 为室内侧蒸发器出风焓值,J/kg; V'_n 为室内侧风道喷嘴处比体积,m³/kg; W_n 为室内侧风道喷嘴处含湿量,kg/kg。

2) 蒸发器出口过热度

$$T_{\text{sh}} = T_{\text{e}} - T_{\text{e,sat}} \quad (2)$$

式中: T_{sh} 为蒸发器出口过热度,K; T_{e} 为吸气温度,K; $T_{\text{e,sat}}$ 为蒸发压力下的饱和温度,K。

3) 能效比

$$C_{\text{COP}} = Q_{\text{tci}}/W_1 \quad (3)$$

式中: C_{COP} 为能效比; Q_{tci} 为总制冷量,W; W_1 为压缩机功耗,W。

2 实验及结果分析

结合 GB/T 21361—2017《汽车用空调器》^[9]和 QC/T 657—2000《汽车空调制冷装置实验方法》^[10]选取试验工况,如表 2 所示。

表 2 汽车空调性能测试工况

Table 2 Automotive air conditioning performance test conditions

工况	车室内侧 干球温度/℃	相对 湿度/%	风量/ (m ³ ·s ⁻¹)	车室外侧 干球温度/℃	风速/ (m·s ⁻¹)
I	38	45	350	38	4.0
II	27	45	350	35	3.5
III	27	45	250	30	2.5

2.1 不同工况下 2 种膨胀阀的控制性能对比

图 2 为 3 种工况下采用 2 种类型阀的出风温度降温曲线。控制压缩机以 50% 转速运行,电子膨胀阀步数 270 步。由图可知,在工况 I 下,采用电子膨胀阀的系统出风温度稳定时间快,能够达到 23.2℃ 的出风温度,热力膨胀阀系统出风温度经过较长时间后稳定至 27.3℃,低于电子膨胀阀调节的出风温度约 17.7%;

在工况 II 下,电子膨胀阀能够达到 18.3℃,热力膨胀阀系统降温曲线平衡后,出口平均温度为 19.1℃,高于电子膨胀阀约 1℃,降温效果劣于电子膨胀阀约 4.7%;在工况 III 下,采用电子膨胀阀的系统降温温度能够达到 15.2℃,而热力膨胀阀在稳定后仅能达到 16.3℃,高于热力膨胀阀约 7.2%。在 3 种工况下,采用电子膨胀阀均能获得更低的出风温度,且在高温工况下,热力膨胀阀的调节能力明显不如电子膨胀阀。降温速率方面,电子膨胀阀能在短时间内达到稳定;而热力膨胀阀前半段降温迅速,后半段有所放缓,整体降温稳定时间较长。

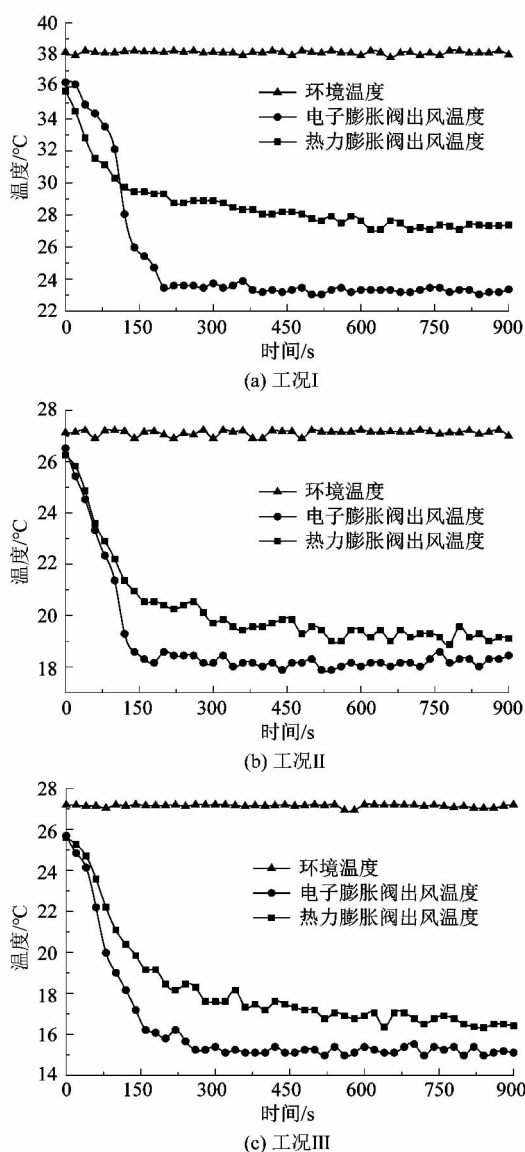


图 2 3 种工况下降温曲线

Figure 2 Temperature drop curves under three working conditions

图3为工况Ⅱ下使用热力膨胀阀和电子膨胀阀时车内蒸发器出口过热度随时间的变化曲线。对比图3(a)和图3(b),可知2种阀在过热调节时,H型热力膨胀阀的过热稳态比电子膨胀阀要慢,过热度的波动在 1°C 左右;电子膨胀阀改变开度后,过热度刚开始受到一定的波动,但能够在较短时间内恢复到新的稳定状态,并且在稳定后过热度的波动更小,波动范围在 0.5°C 左右。随着阀门开度的降低,过热度有所上升,是因为阀门的关小使得工质流量降低,制冷剂在换热器内换热更加充分。

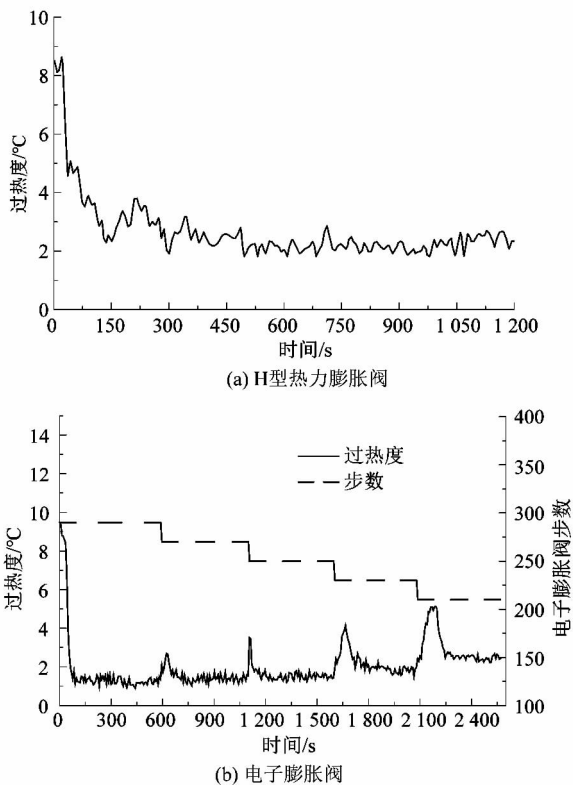


图3 H型热力膨胀阀与电子膨胀阀控制的过热度对比

Figure 3 Comparison of superheat degree controlled by H-type thermal expansion valve and electronic expansion valve

2.2 不同工况下2种膨胀阀制冷性能对比

图4~5所示为3种工况下保持压缩机转速一定时系统采用2种阀的制冷量、功耗以及 C_{COP} 值对比分析。在3种工况下,采用电子膨胀阀的系统的制冷量随着开度的增加呈现先增加后减小的趋势,在某个开度下存在制冷量最高值。H型热力膨胀阀在3种工况下制冷量分别仅为电子膨胀阀开度为240步时制冷量的86.8%,94.6%和96.0%;在相同的工况及其他条

件下,采用电子膨胀阀调节,可以得到比H型热力膨胀阀更高的制冷量,且在高温工况下,对系统制冷量的影响更加显著。在阀门开度改变时,系统的吸排气压力变化平稳,因而压缩机功率随电子膨胀阀开度的改变变化较小,而H型热力膨胀阀功率略高于前者的功率。在 C_{COP} 值方面,其值也随制冷量的变化趋势而呈现先增后减的现象;由图所示在电子膨胀阀开度为240步时, C_{COP} 值存在最高值,在3种工况下分别高于H型热力膨胀阀调节的制冷系统19.5%,8.2%和11.6%。由此得出,采用电子膨胀阀代替H型热力膨胀阀完成节流降压,可以得到更高的制冷量及 C_{COP} 值,系统性能更佳。

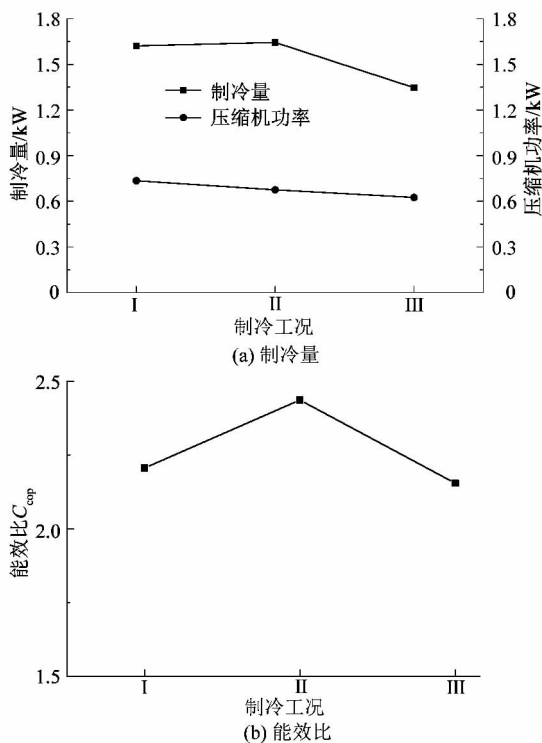
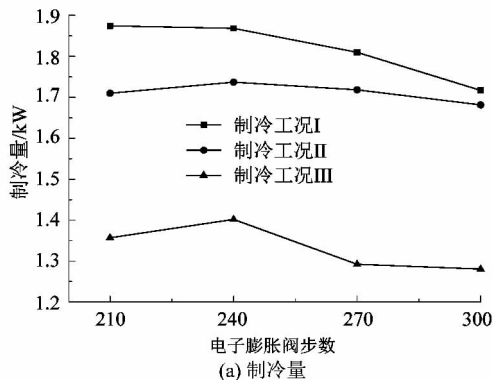


图4 H型热力膨胀阀系统性能

Figure 4 Performance of H-type thermal expansion valve system



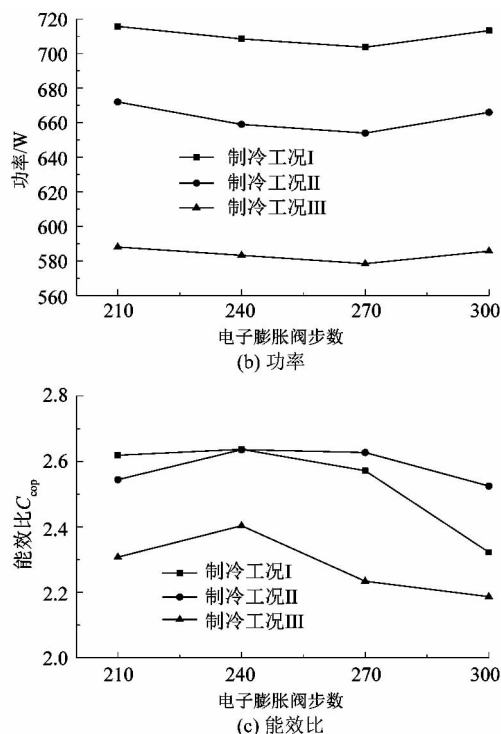


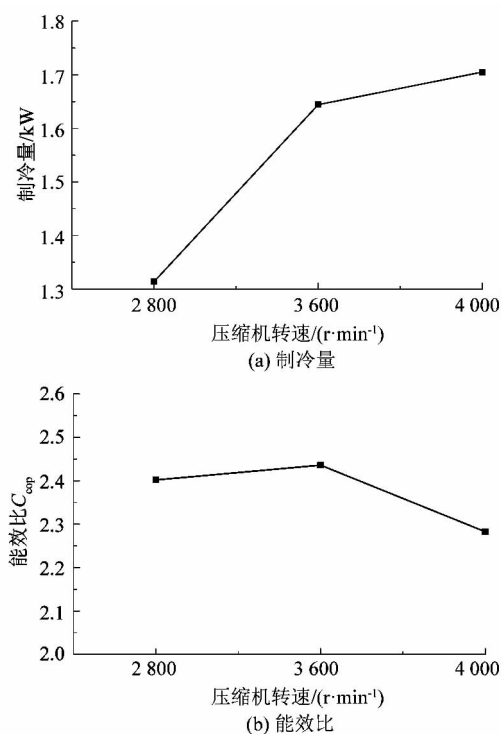
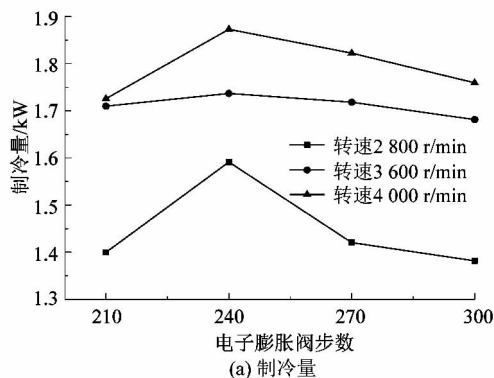
图5 电子膨胀阀系统性能

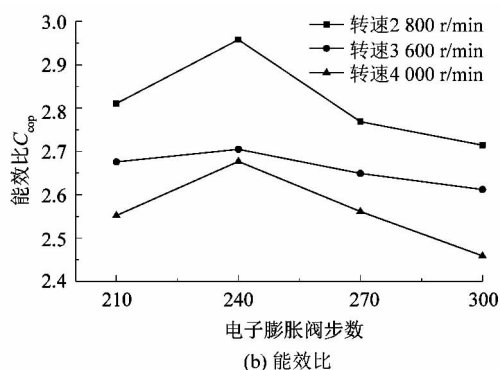
Figure 5 Performance of electronic expansion valve system

2.3 不同压缩机转速下2种膨胀阀的制冷性能对比

如图6~7所示为不同压缩机转速下,采用H型热力膨胀阀及电子膨胀阀系统制冷量及性能系数。由图可知,2种不同节流机构下系统的制冷量均随压缩机转速的升高而持续增加,在压缩机转速达到4000 r/min时存在制冷量峰值。采用H型热力膨胀阀的系统,在压缩机转速4000 r/min时制冷量分别高于2800 r/min和3600 r/min时制冷量29.8%和3.7%。由图7可知,电子膨胀阀系统制冷量随阀门开度增加先升后降,在步数为240步时有最高制冷量,此时,压缩机转速为4000 r/min,制冷量分别高于2800 r/min和3600 r/min时制冷量17.7%和7.8%。在变转速下,电子膨胀阀对系统的控制效果更好。电子膨胀阀开度为240步时,对比各个转速下H型热力膨胀阀系统及电子膨胀阀系统的制冷量,后者高出前者分别为21.1%,5.6%和9.8%,且在低转速下,效果更加显著。随着压缩机转速的增加,系统的 C_{COP} 值先增后降, C_{COP} 值在压缩机转速由2800 r/min向3600 r/min改变后增加的原因是随着压缩机转速的提高,系统制冷能力提高,制冷量不断增加,虽然功率有所增加,但此时制冷量的增加主导了 C_{COP} 值的趋势;伴随着压缩机转速的进一步提高,此时制冷量虽然仍有涨幅,但功率

进一步增加,导致 C_{COP} 值降低。对电子膨胀阀系统,在同一压缩机转速下, C_{COP} 值随电子膨胀阀节流能力的增加先增加后下降,在240步时最高,此时 C_{COP} 值随着转速的增加逐渐降低,由2800 r/min时的最高2.95降低至4000 r/min时的2.67,降幅达到9.5%。就H型热力膨胀阀而言,当转速2800 r/min增加至4000 r/min时, C_{COP} 由2800 r/min时的2.40降至4000 r/min时的2.28,降幅为5.3%。在电子膨胀阀开度为240步时,对比2个不同的节流元件系统,在不同的压缩机转速下,电子膨胀阀的性能系数高于H型热力膨胀阀系统20.0%,11.2%和17.1%,汽车空调能够得到更佳的性能表现。

图6 H型热力膨胀阀制冷量及 C_{COP} Figure 6 H-type thermal expansion valve cooling capacity and C_{COP} 

图7 电子膨胀阀系统制冷量及 C_{COP} Figure 7 Electronic expansion valve
Cooling capacity and C_{COP}

3 结论

课题组对采用热力膨胀阀的制冷系统和采用电子膨胀阀的制冷系统进行了实验对比,分析了2种膨胀阀在不同工况、不同压缩机转速下对系统性能的影响,得到如下结论:

1) 在3种工况下,采用电子膨胀阀能够获得更低出风温度,且在高温工况下,热力膨胀阀的调节能力明显不如电子膨胀阀。并且电子膨胀阀降温迅速,能够在短时间内达到稳定;而热力膨胀阀整体稳定时间较长。

2) 2阀对过热度的控制方面,电子膨胀阀在更短的时间内达到过热调节的相对稳定状态,并且在稳定后过热度的波动更小,波动范围在0.5℃左右,而H型热力膨胀阀的波动在1℃左右。

3) 3种工况下采用H型热力膨胀阀系统制冷量分别仅为电子膨胀阀开度为240步时制冷量的86.8%,94.6%和96.0%;在相同的工况及其他条件

下,采用电子膨胀阀调节,可以得到比H阀更高的制冷量,且在高温工况下,对系统制冷量的影响更加显著。

4) 压缩机转速分别为2800,3600和4000 r/min下,电子膨胀阀开度为240步时,采用电子膨胀阀的制冷系统制冷量比采用热力膨胀阀时的系统高21.1%,5.6%和9.8%; C_{COP} 值高20%,11.2%和17.1%。且在低转速时,效果更加显著。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] PAN Leyan, LIU Cichong, ZHANG Ziqi, et al. Energy-saving effect of utilizing recirculated air in electric vehicle air conditioning system[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 102: 122.
- [3] 田怀璋,朱瑞琪. 电子膨胀阀在制冷装置控制中的应用[J]. 流体工程, 1992(8): 57-60.
- [4] 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.
- [5] WANG Dandong, YU Bingbing, HU Jichao, et al. Heating performance characteristics of CO₂ heat pump system for electrical vehicle in a cold climate[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 85: 27-41.
- [6] 郑国胜,葛如炜. 热力膨胀阀参数对定排量汽车空调系统影响的研究[J]. 流体机械, 2015, 43(2): 80-84.
- [7] ZHANG Rongrong, STANKE E J, ZHANG Genxiang, et al. Benefits investigation of electronic expansion valve in electric vehicle thermal system as compared to thermal expansion valve with shut-off valve[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 100: 404-413.
- [8] 谈磊,陆震,范林. 风冷式热泵机组应用中电子膨胀阀与热力膨胀阀的比较[J]. 制冷技术, 2001(4): 22-24.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. 汽车用空调器: GB/T 21361—2017[S]. 北京: 中国标准化出版社, 2017.
- [10] 国家机械工业局. 汽车空调制冷装置试验方法: QC/T 657—2000[S]. 北京: 中国标准化出版社, 2000.

[信息·简讯]

· 行业简讯 西门子通过 MindSphere App 进一步扩展 Sinumerik Edge 平台的应用程序 Analyze MyMachine/Condition

西门子正在通过补充相应的 MindSphere 应用来扩展其边缘应用程序 Analyze MyMachine/Condition, 以完美诠释边缘计算与云计算的智能组合。Analyze MyMachine/Condition 由西门子在 2019 欧洲国际机床展(EMO)上展出,其可利用高频数控数据创建机床的机器指纹。通过使用这一应用程序,用户能够借助可灵活配置的测量系列,来实时采集和评估诸如刚度、摩擦和背隙等具体轴上的各种参数,这些测量结果将被可视化,并可实现与参考数据的比较。

扩展后的 Analyze MyMachine/Condition 应用程序已经可以实现跨机床的数据比较与评估,能够为每台机床设备单独显示告警和运维阈值,这为用户检测偏差及不同机床的异常提供了更为充分的时间。因此,对于 Sinumerik Edge 和 MindSphere, Analyze MyMachine/Condition 应用程序有助于客户尽早发现关键偏差,避免因维修需求而导致的生产中断,从而显著提高机床可用性及生产率。

(梁秀璟)

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.06.007

电动汽车 HVAC 模块制热模式风量分配特性研究

朱信达, 苏林, 高浩, 李康, 方奕栋, 刘明康

(上海理工大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200093)

摘要:针对某款电动汽车空调 HVAC 模块风量测试实验时制热吹脚模式各出风口风量分配不均匀的现象,课题组应用计算流体动力学(CFD)的数值模拟方法,并引入多孔介质理论对 HVAC 模块内部微通道换热器做简化处理,对该款汽车空调 HVAC 模块制热吹脚模型进行计算模拟,分析制热吹脚模式 HVAC 内部流场及各吹脚出风口的风量,同时引入无量纲数 E_i 和 S 对风量分配的均匀性进行评估。课题组根据仿真分析结果,对吹脚风道底部结构进行优化以及验证分析。验证结果表明:优化后的汽车空调 HVAC 模块吹脚风道内部涡旋现象减少,相较于原模型,各吹脚出风口不均匀度 E_i 减小了 2% ~ 57%,总不均匀度 S 降低了 5.2% ~ 34.3%,提高了风量分配均匀性。

关键词:汽车空调 HVAC 模块;微通道换热器;多孔介质理论;风量分配

中图分类号:TB657;TH48 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)06-0033-08

Air Flow Distribution Research on Heat Mode of Automotive HVAC Module

ZHUXinda, SU Lin, GAO Hao, LI Kang, FANG Yidong, LIU Mingkang

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

Abstract: In order to solve the problem of uneven distribution of air flow at each outlet of the foot mode in the test of an Automotive HVAC module, a numerical simulation method based on the computational fluid dynamics was applied. The porous medium theory was introduced to simplify the microchannel heat exchanger in the HVAC module, and the foot mode of the HVAC module was simulated to analyze the flow field inside the HVAC module and the air flow rate of each outlet. At the same time, two dimensionless numbers E_i and S were introduced to evaluate the uniformity of air distribution. According to the simulation results, the bottom structure of HVAC is optimized and verified. The verification results show that the vortex phenomenon in HVAC module is reduced. Compared with the original model, the uneven degree E_i of each outlet is reduced by 2% ~ 57%, and the total uneven degree S is reduced by 5.2% ~ 34.3%, which improves the uniformity of the air flow distribution.

Keywords: automotive HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning) module; microchannel heat exchanger; porous medium theory; air flow distribution

汽车供热通风与空气调节 (heating ventilation and air conditioning, HVAC) 模块主要负责调节车内空气的温度、湿度以及洁净度,直接影响乘车的舒适性。近年来,驾乘人员对乘员舱舒适性的要求越来越高^[1],这就对汽车 HVAC 模块的性能和标准提出了更高的要求。

热泵空调系统各出风口风量分配是影响空调系统性能的重要因素之一,风量分配的均匀性直接影响乘车的舒适性^[2],这就使得研究汽车空调 HVAC 模块出风口风量的分配情况更加具有实际意义。吴金玉等^[3]模拟了吹面和吹脚模式下 HVAC 模块内部的流场,研究了风道结构对风量分配的影响,并给出了优化

收稿日期:2020-06-13;修回日期:2020-09-20

基金项目:上海市动力工程多相流动与传热重点实验室项目(1N-15-301-101)。

第一作者简介:朱信达(1995),男,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向为新能源汽车热泵空调。E-mail:Zhuxindawhalefall@163.com

意见。祁照岗等^[4]依托 CFD 对某款汽车空调风道进行模拟,而后对后风道结构进行优化后,改善了风量分配不均的现象。贾传林等^[5]通过 FLUENT 模拟分析了引起风量分配不均的影响因素,认为风量分配不均是由风道本身结构和风道入口处的风速分布综合影响的结果。陶其铭等^[6]运用 CFD 方法对某款汽车的除霜风道进行了模拟,通过分析仿真结果指出扰流板的结构不合理造成了出风口的风量不均匀,改善结构后验证了之前的仿真结果。Jokar A 等^[7]将空调 HVAC 模块划分为鼓风机至蒸发器段、蒸发器段至暖风芯体段以及出风段 3 块区域进行仿真模拟,实验与仿真数据相吻合。Chen Y 等^[8]通过仿真和实验对空调箱的除霜、吹脚和吹面 3 个模式的风量分配优化结果进行了验证。

目前,开发优化 HVAC 模块的焦点为 HVAC 模块各模式风量分配情况,风道结构的合理性直接影响乘员舱的舒适性,但未提出一个指标或者无量纲数衡量不均匀性。课题组在对一款电动汽车 HVAC 模块制热吹脚模式进行风量测试实验时,发现该款 HVAC 模块制热吹脚模式各出风口的风量分配极其不均匀,这将无法满足乘员舱舒适性要求。因此课题组对 HVAC 模块制热吹脚模式内部流场进行分析,研究风道结构、气流速度与风量分配之间的关系,引入无量纲数 E_i 和不均匀度 S 来衡量各吹脚出风口的风量分配均匀度,并与实验结果进行比对,验证仿真的可靠性。

1 建模及边界条件

1.1 物理模型

为了计算流体域提取的准确性,采取三维激光扫描仪对空调箱模块进行扫描,得到空调箱的整体数模,如图 1(a)所示。

图 1(b)所示为吹脚模式时空调箱内部结构示意图,当空调箱切换到吹脚模式时,温度风门、吹面风门和除霜风门均关闭,车内或车外的空气经过蒸发器后全部经过冷凝器和 PTC 加热,而后通过吹脚风道送至乘员舱。

1.2 模型的简化及网格划分

为了研究吹脚模式下的内部流动特性,课题组综合考虑计算精度和计算时间,在 HVAC 模块的实际结构基础上进行简化,简化后的吹脚模式网格模型如图 2 所示,主要包含鼓风机、蒸发器、冷凝器、PTC 电加热器以及壳体。

1.3 控制方程

即使在工作模式和工作条件固定时,空调箱内的

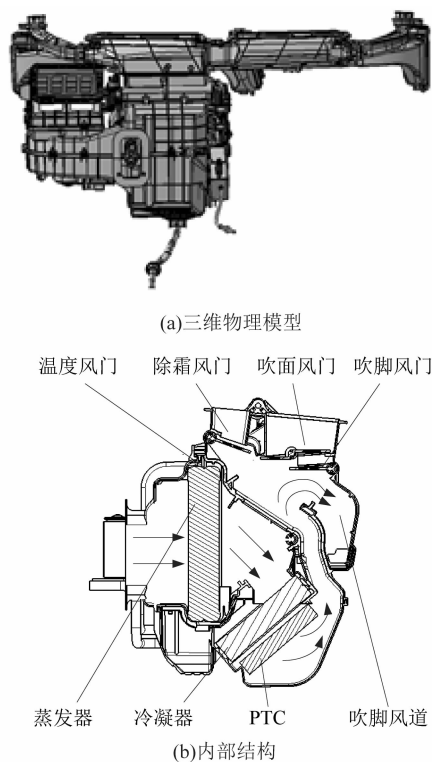


图 1 汽车空调 HVAC 模块的几何模型
Figure 1 Geometric model of HVAC module

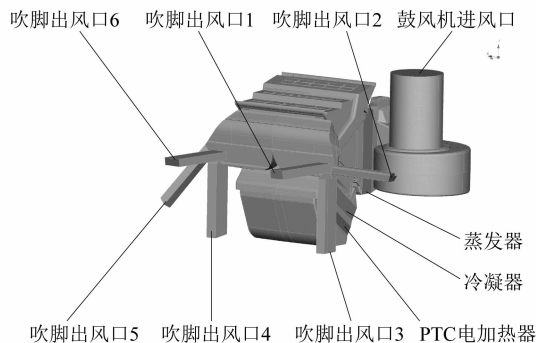


图 2 带风道的吹脚模式网格模型

Figure 2 Mesh model of foot mode with ducts

压力场和速度场依然是非定常的,因此为了简化计算建立了稳态的传质数学模型,综合考虑了微通道换热器和 PTC 电加热器内部的强制对流情形,并且忽略重力等影响因素。以下为控制方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right]. \quad (2)$$