

补气增焓对电动客车变频空调性能的影响

李敬恩 许兵兵 栾庆坤 尚 锋 孙鲁鲁 史长奎 辛 伟 苏 勇 张素丽

(山东朗进科技股份有限公司, 266071, 青岛//第一作者, 工程师)

摘 要 不同的试验工况下, 针对带经济器的电动客车空调, 分别测试了补气前后的空调系统制热性能参数, 并在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 外部环境温度下, 测试了压缩机运行频率不同时的空调机组补气前后性能参数。试验结果表明: 外部环境温度越低, 补气对制热量、能效比的提升效果越大; $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时补气效果最佳, 机组制热量提高 26%, 能效比提高 14.9%; 压缩机运行频率低于一定频率时, 补气对空调机组制热量的影响可以忽略不计。

关键词 电动客车; 变频空调性能; 补气

中图分类号 U270.38⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.12.032

Influence of Vapor Injection Enthalpy Increase on Performance of Electric Bus Frequency Conversion Air-conditioner

LI Jing'en, XU Bingbing, LUAN Qingkun, SHANG Feng, SUN Lulu, SHI Changkui, XIN Wei, SU Yong, ZHANG Suli

Abstract Under various operating conditions, targeting electric bus air-conditioner with economizer, the heating performance parameters of the air-conditioning system before and after vapor injection are tested. Under condition of $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ambient environment temperature, the performance parameters of air-conditioning unit before and after vapor injection with compressor operating at different frequencies are tested. Experiment results show that the lower the ambient temperature, the better the effect of vapor injection on improvement of heating capacity and energy efficiency ratio. The effect of vapor injection is the best at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, where heating capacity of the unit increases by 26% and energy efficiency ratio increases by 14.9%. When the compressor operating frequency is lower than certain level, the impact of vapor injection on air-conditioning unit heating capacity can be overlooked.

Key words electric bus; performance of frequency conversion air-conditioner; vapor injection

Author's address Shandong Longertek Technology Co., Ltd., 266071, Qingdao, China

传统的燃油或燃气客车可利用发动机余热进行冬季采暖, 而电力驱动客车只能通过空调或电加热设备等为车厢内提供热量。虽然电加热制热在整个冬季均可以使用, 但是其能效较低, 能耗大, 严重制约了纯电动客车的续航里程。而普通热泵空调在环境温度低于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的制热量衰减明显, 存在制热量不足、压缩机排气温度过高等问题^[1], 既影响客车的舒适度, 也容易造成空调压缩机的损坏。目前, 客车常规制热在温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或者更低温度时仅使用 PTC(热敏电阻)电加热制热^[2]方式, 能耗大, 能效低, 因此研究电动客车超低温热泵空调高效制热技术, 降低客车空调制热能耗, 不仅有助于扩大电动客车的续航里程, 而且有利于节能环保。

目前, 对补气空调系统原理和试验性研究较多。文献[5-6]主要研究带经济器的涡旋压缩机制冷循环。文献[7-9]对涡旋压缩机闪发器系统性能进行了热力循环分析和试验研究。文献[4]构建了电动汽车空调准双级涡旋式压缩机性能测试试验台, 研究了闪发器准二级压缩空调系统相对普通单级压缩系统在排气温度、制冷剂流量和能效比上面的变化。文献[10]在电动客车热泵空调系统上研究了准二级压缩热泵系统对排气温度、制热量、能效比的影响, 以及车内外风量的变化对准二级压缩热泵系统的影响。目前针对纯电动客车空调尤其是变频空调领域里研究很少。本文在纯电动客车变频空调上进行了试验研究, 对不同环境温度下补气对空调系统性能的影响进行了试验和分析, 并对不同压缩机频率下补气对低温制热性能的影响进行试验和分析, 为纯电动客车热泵的开发和运行提供参考。

1 试验装置及试验方法

本试验将某变频客车空调机组整改为试验样机。样机采用有补气增焓功能的某品牌卧式涡旋压缩机; 经济器采用板式换热器; 蒸发器及冷凝器

均采用波纹铝翅片管换热器;主阀与补气阀均采用电子膨胀阀,并由手动控制开度;在补气阀前设置电磁阀,用于控制补气回路的通断。在压缩机吸、排气口和经济器的进、出口管路上分别布置热电偶以测量其温度,在经济器出口管、压缩机排气管、压缩机吸气管上布置压力测量接口,并连接 WK-6889 压力表以检测压力。试验室测量设备经过检测校准均合格,测量精度如表 1 所示。试验样机的原理图如图 1 所示。

表 1 试验室测量精度

Tab.1 Laboratory test accuracy

参数	测试范围	测量精度
温度/℃	-50~200	0.3
湿度/℃	-50~200	0.3
压差/Pa	0~1 000.0	0.5
直流电压/V	0.5~800.0	800.0×0.1%
电流/A	0~40	40×0.2%
压力/MPa	0~4	40×0.5%

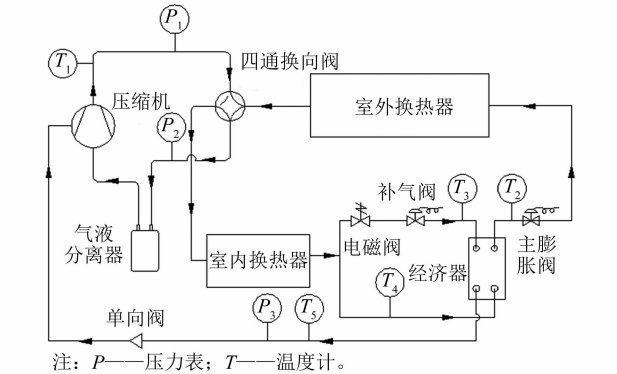


图 1 试验样机系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of test sample system

试验样机在本公司空气焓差法试验室中进行各项试验数据测试,试验室可以采集环境室内干湿球温度、空调机组各温度点和压力点的数据,以及空调机组制热量、功率等参数。试验工况为室内环境干球温度 20℃、湿球温度 15℃,外部环境温度分别设定为 7℃、-5℃、-10℃、-15℃、-20℃。在各个工况下,压缩机以额定频率运行时,调整主阀开度使机组性能达到最优(即制热量最大),测得空调机组补气前的性能数据,然后开启补气电磁阀并调整主阀与补气阀开度,测得补气后的空调机组最优性能数据,并记录数据。

2 补气增焓对于空调系统热力性能的影响

2.1 补气对空调系统排气温度的影响

不同外部环境温度下补气前后的排气温度对

比如图 2 所示。

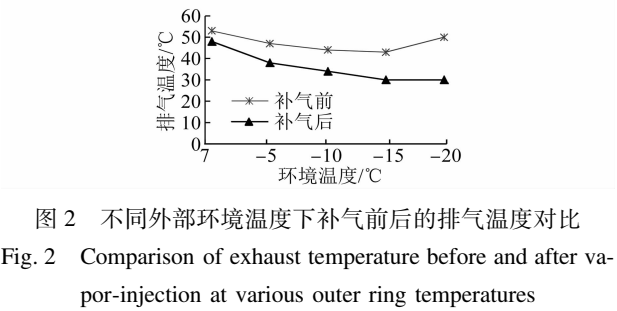


图 2 不同外部环境温度下补气前后的排气温度对比

Fig. 2 Comparison of exhaust temperature before and after va-
por-injection at various outer ring temperatures

补气前,排气温度随着外部环境温度的降低先减小再增大;补气后,排气温度随外部环境温度的降低单调减小,且减小量越来越少,变化趋于平坦。补气后的排气温度比补气前的排气温度明显降低:外部环境温度为 7℃时排气温度降幅最小,为 9.4%;外部环境温度为 -20℃时排气温度降幅最大,为 40.0%;而且,外部环境温度越低,补气对排气温度降低的作用就越大。

一般来说,当外部环境温度降低时,一方面压缩机的吸气温度降低,相应的排气温度趋于最低值;另一方面压缩机输气量减少,使全封闭式涡旋压缩机的电机冷却效果变差,排气温度趋于升高。随着外部环境温度降低,压缩机输气量的影响越来越占主导地位,因此补气前的压缩机排气温度先降后升。

2.2 补气对空调系统制热能力的影响

不同外部环境温度下,补气前后的制热量情况如图 3 所示,补气后的制热量提升幅度见图 4。

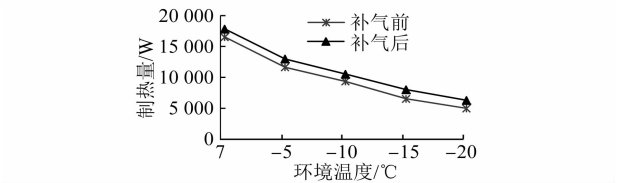


图 3 不同外部环境温度下补气前后的制热量对比

Fig. 3 Comparison of heating capacity before and after va-
por-injection at various outer ring temperatures

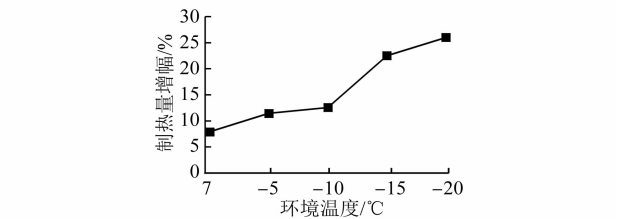


图 4 不同外部环境温度下补气对制热量提升幅度

Fig. 4 Increase of heating capacity by vapor-injection at vari-
ous outer ring temperatures

补气前后的制热量均随着外部环境温度的降低而逐渐下降;补气后制热量比补气前制热量明显提高,且环境温度越低,补气后制热量的提升幅度就越大(外部环境温度为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时制热量提升 7.9% ,外部环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时制热量提升 26%)。

补气前后制热能效比随环境温度下降均逐渐降低(见图5)。如图6所示,环境温度越低,则补气后能效比的相对增幅越大。 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,补气后能效比增幅为 14.9% 。

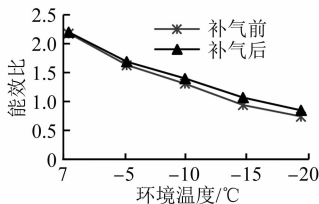


图5 各外部环境温度下补气前后能效比

Fig. 5 Comparison of energy efficiency ratio before and after vapor-injection at various outer ring temperatures

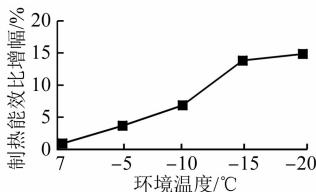


图6 各外部环境温度下补气对制热能效比提升幅度

Fig. 6 Increase of heating energy efficiency ratio by vapor-injection at various outer ring temperatures

2.3 补气对空调系统压力的影响

如图7及图8所示:补气前后,空调系统内高压与低压的压力均随环境温度降低而减小;与补气前相比,补气后高压压力略有增大(外部环境温度为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时高压压力增幅为 6%),补气后低压压力变化始终不明显。可见,若空调机组不补气,则低压压力已经超出压缩机安全运行范围,即使开启补气,也无法使其在安全压力范围内运行。

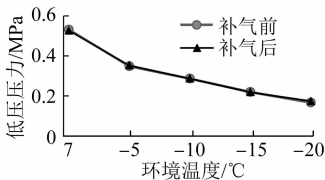


图7 各外部环境温度下补气前后低压压力对比

Fig. 7 Comparison of low pressure before and after vapor-injection at various outer ring temperatures

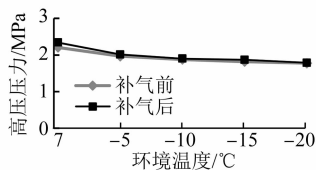


图8 各外部环境温度下补气前后高压压力对比

Fig. 8 Comparison of high pressure before and after vapor-injection at various outer ring temperatures

3 系统参数调整时补气空调系统热力性能的变化特性

3.1 典型工况下补气阀开度对空调系统参数的影响

本文设定的典型工况为:外部环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、室内干球温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、室内湿球温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,机组压缩机按额定频率运行,主阀开度固定为116。由图9可知:在典型工况下,随着补气阀开度的增大,制热量和能效比先增大后减小,其中制热量最大增幅为 22.0% ,能效比最大增幅为 12.5% ;当补气阀开度为320时,制热量与能效比均达最大值;如补气阀开度超过320并继续开大,则制热量和能效比均开始下降。这说明特定主阀开度下,在补气阀开度增大的过程中制热量和能效比存在最优值。

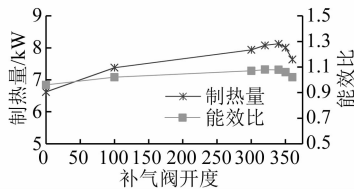


图9 补气阀开度对制热量及能效比的影响

Fig. 9 Influence of vapor-injection opening degree on heating capacity and energy efficiency

在图10中可以发现:当补气阀开度增至100时,排气温度开始大幅下降;当补气阀开度为 $100\sim 340$ 时,排气温度变化很小;当补气阀开度超过340并继续

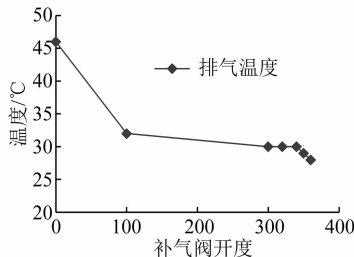


图10 补气阀开度对排气温度的影响

Fig. 10 Influence of vapor-injection opening degree on exhaust temperature

续开大后,排气温度下降明显加快。经分析,当补气阀开启过大之后,补气制冷剂不能完全汽化,使得进入压缩机补气口的冷媒带有微小液滴,从而使排气温度快速下降。可见,补气阀开度存在最优值。

3.2 压缩机频率对空调系统补气效果的影响

典型工况下,在压缩机运行频率不同时,分别测试补气前后的空调系统制热量及能效比,如图 11 及图 12 所示。

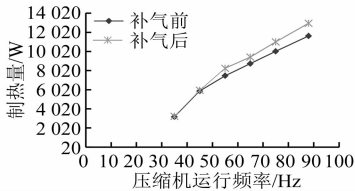


图 11 不同压缩机运行频率下补气前后制热量
Fig. 11 Heating capacity before and after vapor-injection at different frequencies of the compressor

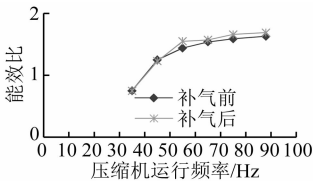


图 12 不同压缩机运行频率下补气前后能效比
Fig. 12 Energy efficiency ratio before and after vapor-injection at different frequencies of the compressor

由图 11 及图 12 可见,当压缩机运行频率降低时,补气前后制热量及能效比都下降,且变化趋势类似。当压缩机运行频率降至 45 Hz 以下时,补气对制热量和能效比的增加量已不明显,可见低频时补气对热泵制热量没有明显的提升效果。

分析表 2 数据可知,当压缩机运行频率较低时,

表 2 压缩机不同频率时系统补气前后性能测试数据
Tab. 2 System performance testing data before and after vapor-injection at different frequencies of the compressor

频率/Hz	补气	高压压力 (表压)/MPa	低压压力 (表压)/MPa	补气压力 (表压)/MPa
88	否	1.967	0.349	
88	是	2.014	0.353	1.110
75	否	1.837	0.363	
75	是	1.912	0.377	1.078
65	否	1.810	0.379	
65	是	1.801	0.393	1.048
55	否	1.739	0.394	
55	是	1.804	0.403	0.969
45	否	1.679	0.424	
45	是	1.643	0.448	1.179
35	否	1.539	0.476	
35	是	1.554	0.485	1.281

高压压力较低,低压压力较高,压差减小,导致补气回路制冷剂流量也大大减少,而补气主要通过增加冷凝器内制冷剂流量来提高制热量^[3],因此低频时补气对制热量的提升作用很小。由此可知,若低频时的排气温度在允许范围内,则没有必要开补气阀。

4 结语

综合以上试验数据来看,本文对于补气增焓技术在电动客车空调尤其是电动客车变频空调上的低温制热应用和推广具有参考意义。测试结果表明:

- 1) 电动客车变频空调应用补气增焓技术在室外环境温度-20℃时依然可以稳定运行,而且补气增焓技术后空调机组制热量、能效比等性能显著提高。
- 2) 补气后可有效降低排气温度,外部环境温度-20℃时降幅最大,降幅为 40%。补气后制热量明显提高,且外部环境温度越低,补气对系统制热量增益越大,但补气并不能明显的影响系统低压压力。
- 3) 主阀开度固定时,随着补气阀开度增大制热量和能效比均先增大再减小,主阀和补气阀存在最优的开度组合。
- 4) 对于给定的变频空调系统,存在一个临界频率,当压缩机运行频率低于该值时,补气对系统制热量、功率、压力等热力性能影响可以忽略不计。

参考文献

[1] 王文毅,毛晓倩,胡斌,等. 中间补气量对经济器热泵系统性能的影响[J]. 制冷学报,2013(4):40.
WANG Wenyi, MAO Xiaoqian, HU Bin, et al. Effects of the intermediate gas injection on the performance of heat pump with an economizer[J]. Journal of Refrigeration,2013(8):40.

[2] 杜玉清,丛悦鹏. 电动客车空气源热泵采暖方案优化探讨[J]. 制冷与空调,2016(2):83.
DO Yuqing, CONG Nipeng. Discussion on optimal heating solution to air source heat pump used for electric vehicle[J]. Refrigeration and Air-conditioning,2016(2):83.

[3] 张科,吴兆林,周志钢,等. 涡旋压缩机经济器系统的数学模型研究与性能分析[J]. 制冷技术,2009(5):52.
ZHANG Ke, WU Zhaolin, ZHOU Zhigang, et al. Research on simulation and performance of scroll compressor with economizer[J]. Refrigeration,2009(5):52.

[4] 唐景春,李晨凯,叶斌,等. 采用涡旋压缩机的电动汽车空调准双级压缩热泵性能试验研究[J]. 制冷学报,2018(1):34.
TANG Jingchun, LI Chenkai, YE Bin, et al. Experimental study on performance of heat pump cycle of quasi two-stage compression for electric vehicle air-conditioning with scroll compressor[J]. Journal of Refrigeration,2018(1):34.