

文章编号:0253-4339(2014)02-0054-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2014.02.054

电动汽车空调热泵型涡旋压缩机结构分析

唐景春 左承基

(合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009)

摘 要 为了解决电动汽车空调系统冬季采暖问题,针对冬季空调工况下压缩机单级压比增大的运行特性,以涡旋压缩机制热性能系数为热力学优化目标函数,确定了制冷剂循环系统中的最佳补气压力,优化了涡旋压缩机静涡旋盘上的中间补气口的几何位置和形状,使其具备了准双级压缩功能。将研发的热泵型电动涡旋压缩机安装于电动汽车空调系统,利用空气焓差法对系统进行了制热、制冷性能实验。实验结果表明,静涡旋盘结构优化后的热泵型电动涡旋压缩机,其制热和制冷能力可以满足 5 人座电动汽车司乘人员的冬季和夏季舒适性要求,并且具有较高的制热和制冷性能系数,从而提升了汽车空调系统热泵循环和制冷循环的热经济性,达到了节能的目的。

关键词 电动汽车空调;涡旋压缩机;热泵;优化;性能实验

中图分类号:TB652;U270.38⁺3

文献标识码:A

Structural Analysis of Heat Pump Scroll Compressor for Electric Automobile Air-conditioning

Tang Jingchun Zuo Chengji

(School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China)

Abstract The pressure ratio of compressor operating in winter is much greater than that in summer, which makes the heating by electric vehicle air conditioning system in winter a problem. In order to solve it, the coefficient of heating performance was taken as the thermodynamic optimization objective function of scroll compressor. The optimal middle pressure of refrigerant injection in the scroll compressor orifice was determined accordingly. The geometric position and shape of refrigerant injection orifice have been built, which makes the system working in a quasi two-stage compression. Based on the method of air enthalpy difference, the heating and refrigerating performance of heat pump type scroll compressor which was installed on the electric vehicle air conditioning system, had been conducted in refrigeration laboratory. After optimizing the structure of static scroll plate, the experimental results show that the capability of heating and cooling for the heat pump type electric scroll compressor could be met the comfort requirements of 5 seat electric vehicle in summer and winter, and the performance coefficients of heating and cooling have been improved accordingly.

Keywords electric automobile air-conditioning; scroll compressor; heat pump; optimization; performance experiment

电动汽车已发展为重要的道路交通工具之一,其空调系统的压缩机动力源以及冬季采暖方式与普通内燃机汽车相比,有着本质的区别。对于现有的电动汽车空调系统,使用普通型电动压缩机也有其局限性:制冷系统仅在夏季运行以满足车室内空气降温的要求,而冬季主要采用 PTC 加热模式来满足采暖要求,其制热效率相对较低,对车载蓄电池的电能消耗较大,严重缩短了电动汽车的续行里程,制约了电动汽车推广和普及。而目前热泵型空调压缩机主要应用于家用及商用空调装置,其外形尺寸较大,整机重量较重,很难适用于电动汽车空调系统。同时,汽车空调的工作环境有其特殊性:承受频繁的震动和冲

击,空调的热负荷大,压缩机的安装结构空间有限。因此,急需开发一种新型的冷暖两用式(热泵型)电动汽车空调压缩机,并且要求开发的热泵型电动汽车空调压缩机具有结构紧凑、小型轻量化、制冷和制热性能良好等优点^[1-5]。

以电动汽车空调热泵型涡旋压缩机为研究对象,针对冬季空调工况下压缩机单级压比增大的运行特性,优化压缩机的静涡旋盘结构使其具备准双级压缩功能,并通过空气焓差实验法对样机的制热和制冷性能进行验证,以期提高压缩机的排气量,并降低压缩机的排气温度,从而提升汽车空调系统在低温环境下的制热能力。

1 涡旋压缩机中间补气压力的确定

对于热泵型电动汽车空调系统,夏季制冷循环时,车室内换热器为蒸发器,通过吸热降低车室内空

气温度至 24 ~ 27 ℃;冬季制热循环时,车室内换热器为冷凝器,通过放热提高车室内空气温度至 18 ~ 20 ℃,从而满足车内人员的舒适性要求。热泵型电动汽车空调系统的工作原理如图 1 所示。

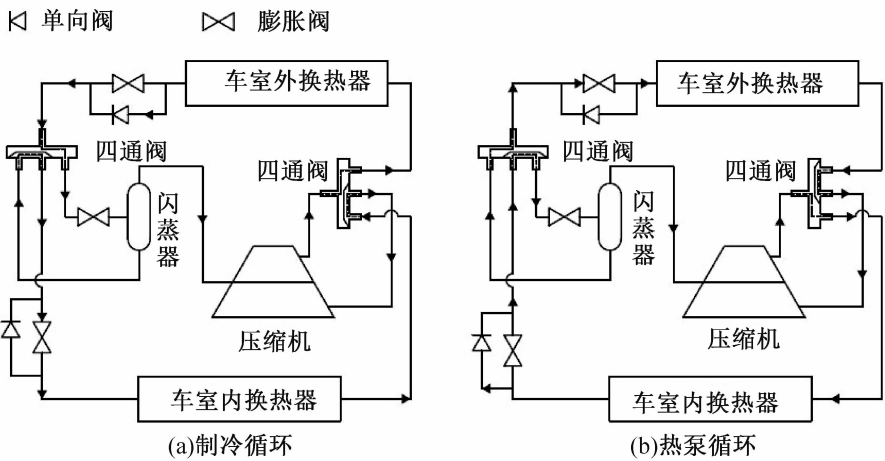


图 1 热泵型电动汽车空调系统的工作原理
Fig. 1 The working principle of heat pump type air conditioning system for electric automobile

根据热力学过程方程可知,压缩机排气温度 T_d (K)与吸气温度 T_s (K)的关系为:

$$T_d = T_s (p_d/p_s)^{1-1/m_t}$$
 (1)

式中: m_t 为温度多方指数; p_s 、 p_d 分别为压缩机的吸气压力和排气压力,MPa。

相对于制冷循环,制热循环时压缩机的吸气压力变低,因此压比 p_d/p_s 将提高,由式(1)可知,压缩机的排气温度也升高,这会导致空调系统中制冷剂分解、密封及绝缘材料老化、润滑油结碳,严重时还会使节流阀和干燥过滤器发生堵塞。所以,为了降

低压缩机的排气温度 T_d ,增加热泵循环时系统中制冷剂的质量流量,需要在系统的组成元件中引入闪蒸器的同时,相应地改变涡旋压缩机内部的静涡旋盘零件结构,使压缩机的单级压缩过程转换为准双级压缩过程,即将 p_d/p_s 分解为 p_m/p_s 和 p_d/p_m 两个压缩阶段,并利用从闪蒸发器过来的中温中压(T_m , p_m)制冷剂气体冷却低压级压缩机的排气。此时,制热循环时制冷剂的热力过程及与其对应的压 - 焓图如图 2 所示。

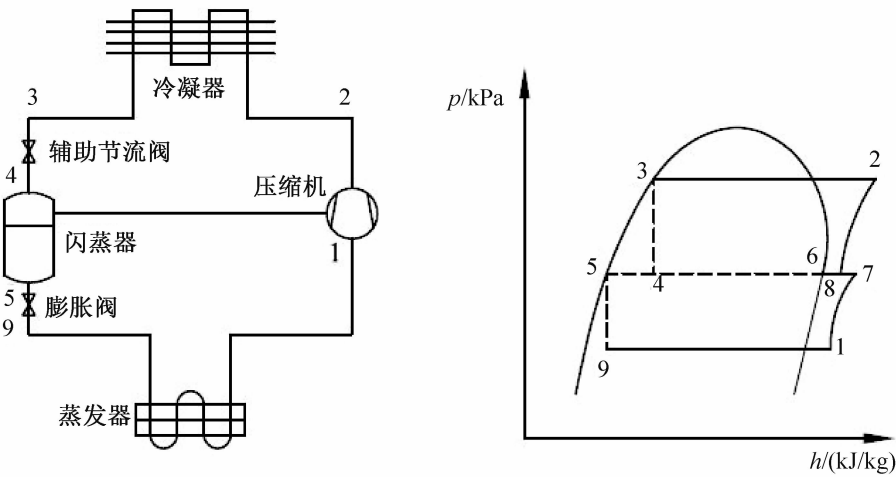


图 2 制热循环热力过程及其压 - 焓图
Fig. 2 The thermodynamic process of heat pump cycle and its pressure-enthalpy diagram

汽车空调系统冬季循环的制热性能系数如式(2)所示。

$$\begin{aligned} \text{COP}_h &= \frac{h_2 - h_3}{(h_2 - h_8) + \frac{G_d}{G_g}(h_7 - h_1)} \\ &= \frac{h_2 - h_3}{(h_2 - h_8) + (1 - x)(h_7 - h_1)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$x = \frac{G_g - G_d}{G_g} = \frac{C_1}{r_m}(t_k - t_m) \quad (3)$$

式中: h_i 为热力循环状态点 i 的比焓, kJ/kg ; G_g 、 G_d 分别为高压级和低压级制冷剂的流量, kg/s ; x 为制冷剂经过辅助节流阀节流后的干度; C_1 为与冷凝温度 t_k 相对应的制冷剂液体比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; r_m 为与中间温度 t_m 相对应的制冷剂汽化潜热, kJ/kg 。

由式(2)、(3)可知,最高的 $\text{COP}_{h\max}$ 对应着最佳的中间温度 t_{mopt} ,即存在着最佳中间压力 p_{mopt} 。本文采用的优化方法为:1)根据热泵循环设计工况给定的冷凝压力 p_k 和蒸发压力 p_o 值,按公式 $p_m = (p_k p_o)^{0.5}$ 求取一个中间压力初值,并利用制冷剂的热力学性质表查出它对应的中间温度初值;2)在中间温度初值的上下按 2°C 的间隔选取 $5 \sim 6$ 个中间温度值;3)进行 $5 \sim 6$ 次热力计算,并将计算结果绘制成 $\text{COP}_{h\text{-}t_m}$ 曲线图,图中曲线的顶点所对应的中间温度即为最佳中间温度 t_{mopt} ,与之相对应的压力即为最佳中间压力 p_{mopt} 。

2 压缩机中间补气口结构的优化

根据涡旋压缩机的热力学过程方程和涡旋型线

几何学可得中间压缩腔的内容积比 V_{i2} 及中间补气口所处的位置展角 Φ_m ,如公式(4)、(5)所示^[6]。联立式(4)、(5),将最佳中间压力 p_{mopt} 代入,即可求出中间补气口所处位置展角的最佳值 Φ_{mopt} 。

$$V_{i2} = \frac{2N - 1}{3 - \frac{\theta_m}{\pi}} = \left[\frac{p_m}{p_s} \right]^{\frac{1}{m_1}} \quad (4)$$

$$\phi_m = \frac{3}{2}\pi + \alpha - \theta_m \quad (5)$$

式中: N 为涡旋压缩机压缩腔对数; α 为涡旋型线起始展角, r/min ; θ_m 为涡旋压缩机中间压缩腔所对应的曲轴转角, r/min 。

为了避免涡旋压缩机中间腔补气回流至吸气腔现象的发生,要求在压缩机运行过程中,当静涡旋盘中间补气口位于吸气腔的瞬间,其必须能被动涡旋盘的涡旋齿顶部覆盖^[7-8]。所以,中间补气口的半径 r 及其圆心距离最近涡旋壁的垂直距离 d 必须满足条件式(6)。

$$\begin{cases} 0 \leq r \leq \alpha r_b \\ r \leq d \leq 2\pi r_b - 2\alpha r_b - r \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: r_b 为涡旋壁渐开线的基圆半径, mm 。

同时,为了降低补气过程中制冷剂气体的流动阻力损失和噪声,应尽量扩大中间补气口的流通截面,本文研制的静涡旋盘中间补气口由两个半圆弧和一个矩形所组成,其具体结构形式如图3所示。

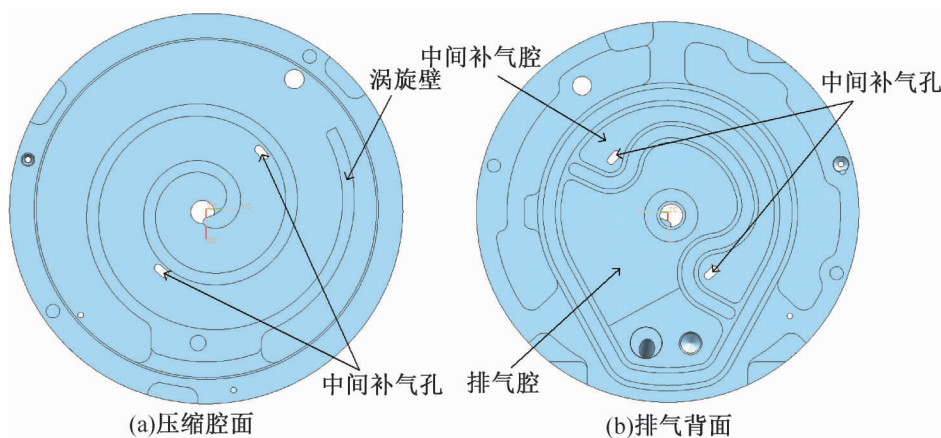


图3 热泵型涡旋压缩机静盘的结构

Fig. 3 The structure of heat pump type static scroll

3 制热和制冷性能实验

本文研制的热泵型电动涡旋压缩机的几何排量为 28 mL ,转速为 6000 r/min ,汽车空调系统使用的制

冷剂为 R134a ,压缩机的驱动电源为 DC336V 。将开发的热泵型电动涡旋压缩机安装于5人座轿车空调系统,利用空气焓差法对汽车空调系统进行制热、制冷性能实验,实验结果分别如表1和表2所示^[9-11]。

根据表 1 和表 2 中的实验结果数据可以看出,被测电动涡旋压缩机所提供的 2.734 kW 制热量和 4.187 kW 制冷量,可以满足小型汽车空调系统的冬季热负荷及夏季冷负荷要求。由于冬季空调的工况条件比夏季空调制冷循环的工况条件恶劣,热泵循环

时蒸发器内部制冷剂的蒸发温度更低,压缩机在相同的转速条件下,其内部制冷剂的体积流量虽然不变,但是随着吸气比容的变大,制冷剂的质量流量将会减少,从而导致了热泵循环的制热量低于制冷循环的制冷量。

表 1 制热循环实验
Tab. 1 Heat pump cycle experiment

测 试 工 况			
项 目	设 定	实 测	偏 差
车内空气干球温度/℃	20.000	19.903	-0.097
车内空气湿球温度/℃	15.000	14.864	-0.136
室外空气干球温度/℃	7.000	7.086	0.086
室外空气湿球温度/℃	6.000	5.797	-0.203
测 试 结 果			
被测汽车空调制热量/kW	2.743	被测压缩机的驱动电机输入电功率/kW	1.523
车室内送风量/(m ³ /s)	0.106	被测压缩机制热性能系数 COP _h	1.801

表 2 制冷循环实验
Tab. 2 Refrigerating cycle experiment

测 试 工 况			
项 目	设 定	实 测	偏 差
车内空气干球温度/℃	27.000	26.916	-0.084
车内空气湿球温度/℃	19.000	19.525	0.025
室外空气干球温度/℃	35.000	34.966	-0.034
室外空气湿球温度/℃	24.000	23.979	-0.021
测 试 结 果			
被测汽车空调制冷量/kW	4.187	被测压缩机的驱动电机输入电功率/kW	2.424
车室内送风量/(m ³ /s)	0.106	被测压缩机制冷性能系数 COP _e	1.727

对照 GB21360—2008(汽车空调用制冷压缩机)中的测试结果要求,从表 1、表 2 中的实验结果数据还可以看出,电动涡旋压缩机的静涡旋盘结构经过优化设计后,具有较高的制热和制冷性能系数,从而达到了产品节能的目的。

4 结论

为了满足电动汽车空调系统的冬季制热要求,对涡旋压缩机的静涡旋盘结构进行了改型设计,使压缩机对制冷剂气体的压缩热力过程由单级压缩演变为准双级压缩。理论和实验研究结果表明:

1)在冬季汽车空调系统的热泵循环名义工况

下,以压缩机的制热性能系数为热力学优化目标函数,制冷剂循环系统中存在着一个最佳补气压力。与此相对应,涡旋压缩机静涡旋盘上的中间补气口有一个最佳几何位置。

2)静涡旋盘结构优化后的热泵型电动涡旋压缩机,其空调系统的制热和制冷能力,可以满足 5 人座电动汽车司乘人员的冬季和夏季舒适性要求。

3)采用中间补气的热泵型电动涡旋压缩机,降低了压缩机的排气温度,增加了热泵循环时汽车空调系统中制冷剂的质量流量,从而提升了汽车空调系统热泵循环和制冷循环的热经济性,实现了节能的目的。

本文受江苏省动力机械清洁能源与应用重点实验室开放基金 (QK09001) 项目资助。(The project was supported by open fund of the Jiangsu province key laboratory of power mechanical to clean energy and application(No. QK09001).)

参考文献

- [1] Xudong Wang, Yunho Hwangb, Reinhard Radermacher. Two-stage heat pump system with vapor-injected scroll compressor using R410A as a refrigerant [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(6): 1442-1451.
- [2] Baolong Wang, Linjun Han, Wenxing Shi, et al. Modulation method of scroll compressor based on suction gas bypass[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 37: 183-189.
- [3] Wang Baolong, Shi Wenxing, Li Xianting. Numerical Analysis on the Effects of Refrigerant Injection on the Scroll Compressor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(1): 37-46.
- [4] Baolong Wang, Xianting Li, Wenxing Shi, et al. Design of experimental bench and internal pressure measurement of scroll compressor with refrigerant injection [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2007, 30(1): 179-186.
- [5] Baolong Wang, Wenxing Shi, Linjun Han, et al. Optimization of refrigeration system with gas-injected scroll compressor[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(7): 1544-1554.
- [6] Qiang Jianguo. Study on Basic Parameters of Scroll Fluid Machine Based on General Profile [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(2): 212-223.
- [7] Liu Yangguang, Hung Chinghua, Chang Yuchoung, et al. Mathematical Model of Bypass Behaviors Used in Scroll Compressor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5/6): 1058-1066.
- [8] Cui M M. Comparative Study of the Impact of the Dummy Port in a Scroll Compressor [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2007, 30(5): 912-925.
- [9] Cao Feng, Fei Jiyong, Xing Ziwen, et al. Study on performance of a heat pump water heater using suction stream liquid injection[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(14/15): 2942-2948.
- [10] B Blunier, G Cirrincione, Y Herve, et al. A new analytical and dynamical model of a scroll compressor with experimental validation [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(5): 874-891.
- [11] Qiu Tu, Kaijun Dong, Deqiu Zou, et al. Experimental study on multi-split air conditioner with digital scroll compressor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(14/15): 2449-2457.

作者简介

唐景春,男(1966-),副教授,合肥工业大学,13965051951, E-mail: tangjch@126.com。研究方向:制冷压缩机热动力学研究。

About the author

Tang Jingchun(1966-), male, Associate Professor, Hefei University of Technology, 13965051951, E-mail: tngjch@126.com. Research fields: Study on the heat dynamics of refrigeration compressor.