文章编号:0253 - 4339(2013) 06 - 0001 - 05
doi:10.3969/j.issn.0253 - 4339.2013.06.001

单机双腔并联压缩式制冷/热泵系统的性能模拟研究

许树学　马国远　刘 琦　刘中良

(北京工业大学　北京　100124)

摘　要　为提升普通蒸汽压缩式制冷/热泵系统的性能,提出了一种单机双腔并联压缩式系统。通过建立系统循环的理论模型,分析出制冷和制热性能随着从级吸气压力,主、从级容积比的变化规律。结果显示,与普通单级压缩系统相比,双工作腔并联系统的制冷量、制热量分别提高 29.6% 和 29.2%;制冷 EER、制热 COP 分别提高 8.0% 和 2.8%;排气温度降低 3 ~ 4℃。最佳从、主级容积比的范围为 0.08 ~ 0.12。

关键词　双级压缩;并联;容积比;性能系数;热泵

中图分类号:TB61 + 2　　**文献标识码**:A

Simulation Study on Single-machine Two-chamber In-parallel Compression Refrigeration/Heat Pump System

Xu Shuxue　Ma Guoyuan　Liu Qi　Liu Zhongliang

(Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China)

Abstract　In order to improve the working performance of vapor compression refrigeration/heat pump system, a new system named single machine two-chamber in-parallel compression refrigeration/heat pump system was provided. An analysis model was set according to the theory of thermodynamics. The variation of cooling and heating performance with side-stage suction pressure and the most favorable volume ratio of side-stage to main-stage have been calculated. The results show that, compared with conventional single-stage compression system, cooling and heating capacity can increase 29.6% and 29.2%; cooling EER and heating COP can increase 8.0% and 2.8%; the discharge temperature decrease 3 ~ 4℃. The most favorable volume ratio of side-stage to main-stage is 0.08 ~ 0.12.

Keywords　double-stage compression; parallel; volume ratio; cooling/heating performance; heat pump

从热力学基本原理可知,提高蒸汽压缩式制冷系统的性能系数,主要是降低压缩功或提高单位工质的制冷量[1-2]。除采用对压缩机腔内补气的准二级压缩循环[3-5]之外,双级串联压缩中间补气也是提升系统性能的有效措施。文献[6]搭建了以 R410A 为工质的双级压缩一级节流空气源热泵实验台,在 -30℃ 温度下 COP 为 2.1。文献[7-8]提出一种双级压缩两级节流低温热泵热水器系统,该系统在环境温度 -20℃ 时,性能系数能达到 2.0。在循环方式及操作参数优化方面,文献[9] 采用效率优先和制热量优先的双控制模式,研究了最佳中间压力表达式。文献[10]认为,要在不同低温工况下 COP 保持最高,最佳相对补气量不是一个特定值而是在一个范围之内。文献[11]选择一级节流中间不完全冷却的方式,理论计算出最佳中间温度和两级压缩机配比的合理值。从结构型式看,双级压缩中间补气系统为压缩机两工作腔串联,从主路分离出来的气体在压差的推动下补入到高、低压级之间,但对于已经加工好的压缩机,容积比已经固定导致补气质量与状态不能随意,而是被限制在一个很小的范围内,因为容积比低于某值后气体将补不进去。因此,本文提出了一种单机双腔并联式机型,并优化出最佳的从级吸气压力、容积比等关键参数的范围,以期探索出一个提高蒸汽压缩式制冷/系统性能的有效方法。

1 工作原理

单机双腔并联式系统的原理如图 1 所示。与双级压缩中间补气系统不同,压缩机为单个电机带动并联的主、从两个压缩腔的结构,两工作腔排气口共用,但吸气口分开。节流过程为两级节流,处于

基金项目:国家自然科学基金(51076003)和中国博士后科学基金(71005014201102)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 51076003) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 71005014201102).)

收稿日期:2012 年 11 月 16 日

中间压力状态的闪发器分离出气体,作为从级的吸气被压缩至排气压力。闪发器底部的液态制冷剂经过二级节流后,经过蒸发器吸热后被主级工作腔吸入后压缩。

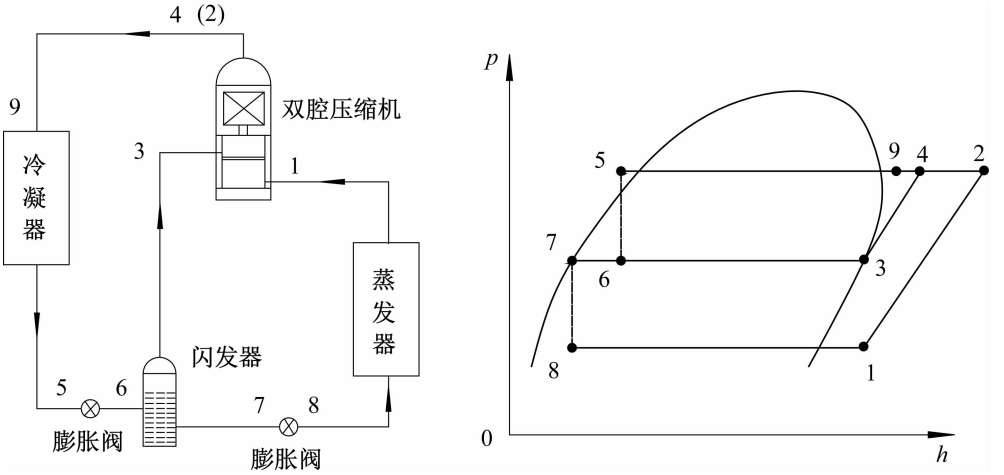

图 1 单机双腔并联式制冷/热泵系统

Fig. 1 Single machine two stage in-parallel compression refrigeration/heat pump system

2 计算模型

主级吸气 1kg 的制冷量:

$$q_o = h_1 - h_7 \tag{1}$$

式中:h_1 为状态点 1 的焓值,kJ/kg;h_7 为状态点 7 的焓值,kJ/kg。

从、主级吸气质量比:

$$\varepsilon = \frac{m_3}{m_1} \tag{2}$$

式中:m_3 为状态点 3 的工质质量流量,kg/s;m_1 为状态点 1 的工质质量流量,kg/s。

主级吸气 1kg 的制热量:

$$q_k = (h_9 - h_5)(1 + \varepsilon) \tag{3}$$

式中:h_9 为状态点 9 的焓值,kJ/kg;h_5 为状态点 5 的焓值,kJ/kg。

主级吸气 1kg 的从级压缩功:

$$w_{3-4} = \varepsilon \frac{h_{4s} - h_3}{\eta_{i,3-4}\eta_m\eta_{mo}} \tag{4}$$

式中:h_{4s}为过程 3-4 按照等熵压缩末点的状态焓值,kJ/kg;h_3 为状态点 3 的焓值,kJ/kg;$\eta_{i,3-4}$为压缩过程 3-4 的等熵效率;η_m为机械效率;η_{mo}为电机效率。

主级吸气 1kg 的压缩功:

$$w_{1-2} = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{i,1-2}\eta_m\eta_{mo}} \tag{5}$$

式中:h_{2s}为压缩过程 1-2 按照等熵压缩末点的状态焓值,kJ/kg;$\eta_{i,1-2}$为压缩过程 1-2 的等熵效率。

制冷 EER:

$$\mathrm{EER} = \frac{q_o}{w_{1-2} + w_{3-4}} \tag{6}$$

制热 COP:

$$\mathrm{COP} = \frac{q_k}{w_{1-2} + w_{3-4}} \tag{7}$$

依据质量守恒原理计算出从、主级容积比:

$$\delta = \frac{\varepsilon v_3}{v_1} \tag{8}$$

式中:v_3 为状态点 3 的气态工质比容,m^3/kg;v_1 为状态点 1 的气态工质比容,m^3/kg。

3 计算结果与分析

根据式(1)~式(8)的计算表达式,以一台额定冷量 5kW 的压缩机为例进行计算,计算工况列在表 1 中,其结果如图 2~图 5 所示。图中 DS 表示双腔并联式系统,SS 表示普通单级系统。

表 1 计算工况

Tab. 1 Calculation working condition

工质	机械效率×电机效率	等熵效率	蒸发温度	冷凝温度	吸气过热度	过冷度
R410A	0.72	1	制冷 7℃ 制热 -5℃	制冷 45℃ 制热 40℃	10℃	5℃

图 2 表示制冷性能随从级吸气压力的变化。图 2(a)为制冷量 Q_o 及压缩机功率 P 随从级吸气压力的变化关系,图 2(b)为制冷 EER 随从级吸气压力的变化关系。由图 2 可知,从级吸气压力越低,制冷量及压缩机功率越大,相比较单级制冷量最大可提高 29.6%,功率提高 25.4%。其原因主要是:从级吸气压力越低,一级节流的干度越大,导致补气量增大时压缩机功率上升。同时,较大的补气量造成二级节流前饱和液体的焓值更低,进而使制冷量呈相同程度的提高。制冷 EER 随从级吸气压力先增大后减小,R410A 的最大值出现在 1.5 ~ 1.6MPa 范围内,较单级系统提高 8.0%;R22 的最大值出现在 0.9 ~ 1MPa 范围内,相对于单级压缩系统提高 5.6%。

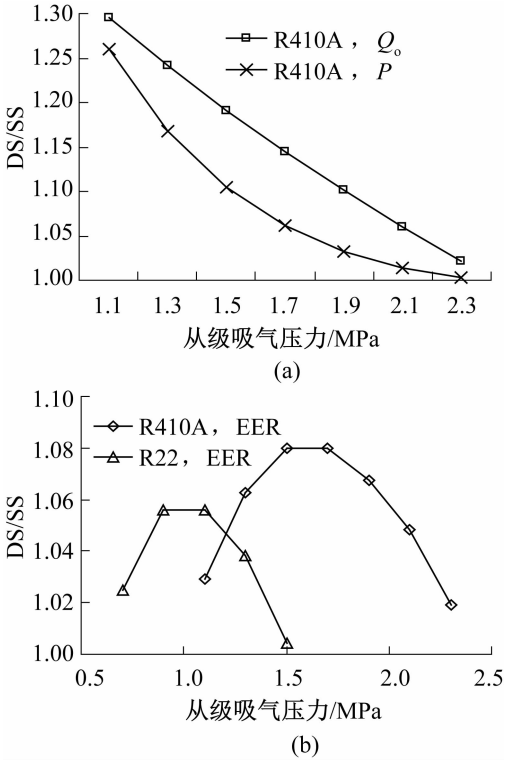

图 2 制冷性能随从级吸气压力的变化

Fig. 2 The variation of cooling performance with side-stage vapor suction pressure

图 3 表示制热性能随从级吸气压力的变化。制热量、压缩机功率及制热 COP 随从级吸气压力的变化规律与制冷基本相同,不同之处体现在具体数值上。原因主要是:补气量的增加理所当然地提高了主、从级的总排气量,制热量及压缩机功率得以大幅度提高,相比较单级制热量最大可提高 29.2%。制热 COP 随从级吸气压力呈先增大后减小的趋势。R410A 的最大值出现在 1.5 ~ 1.6MPa,较单级系统提高 6.8%,而 R22 出现在 0.9 ~ 1 MPa 的水平,相对于单级压缩系统的 COP 最大可提高 4.8%。

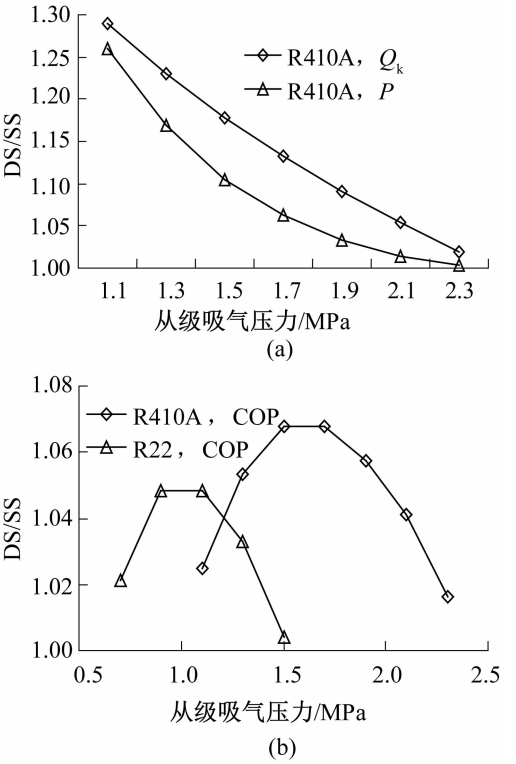

图 3 制热性能随从级吸气压力的变化

Fig. 3 The variation of heating performance with side-stage vapor suction pressure

图 4 表示排气温度随从级吸气压力的变化。由图可知,排气温度随从级吸气压力的降低而降低。制冷工况下,压缩机排气温度最大能降低 3℃,制热工况降低约 2.2℃。原因是从级压缩的排气温度低于主级,因此当从级吸气压力较低时,从级的吸气量大引起从级更低的排气温度,造成从、主级的混合排气温度的降低。

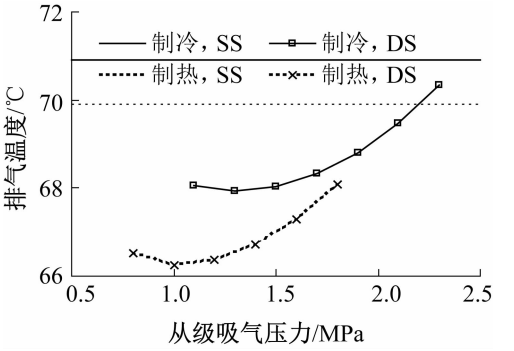

图 4 排气温度随从级吸气压力的变化

Fig. 4 The variation of discharge temperature with side-stage vapor suction pressure

图 5 表示制冷 EER 及制热 COP 随从、主级容积比的变化。制冷 EER 和制热 COP 随从、主级容积比呈先增大后减小的趋势。如,对于 R22 的系统,双级的制冷 EER 及制热 COP 较单级分别可提高 5.6% 和

4.8%;对于 R410A 系统,制冷 EER 及制热 COP 较单级分别可提高 8.0% 和 6.8%。同样是制冷或制热工况,性能最佳时对应的从、主容积比的范围,因工质不同而具体数值不同。如制冷时,R22 为 0.05 ~ 0.12,而 R410A 为 0.08 ~ 0.12。但无论是制热还是制冷,工质相同时最佳值的范围相同。如无论是制冷还是制热工况,R22 都取在 0.05 ~ 0.12 范围内,R410A 取值范围为 0.08 ~ 0.12。

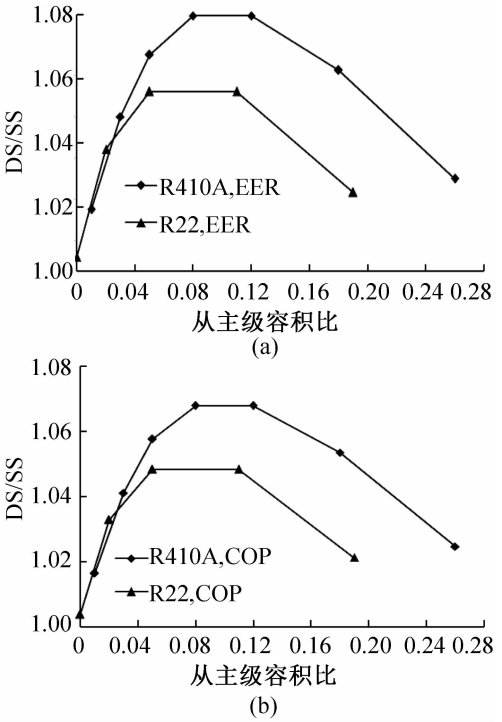

图 5 制冷 EER 及制热 COP 随从主级容积比的变化

Fig. 5 The variation of cooling EER and heating COP with volume ratio of side-stage to main-stage

4 结论

本文建立了单机双腔压缩并联式制冷/热泵系统的热力学分析模型,研究了系统的制冷和制热性能随从级吸气压力,从、主容积比的变化规律,结论如下:

1)双腔并联压缩式制冷/热泵系统的制冷量较普通单级可提高 29.6%,制冷 EER 提高 8.0%。制热量可提高 29.2%,制热 COP 提高 2.8%。

2)双腔并联压缩式制冷/热泵系统的排气温度较单级系统降低 3 ~ 4℃。

3)无论制冷还是制热工况,双腔并联式系统的最佳从、主级容积比的范围均为 0.08 ~ 0.12,但随着选用工质的不同而不同。

参考文献

[1] Torrella E, Llopis R, Cabello R. Experimental evaluation of the inter-stage conditions of a two-stage refrigeration cycle using a compound compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 307-315.

[2] E Torrella, J A Larumbe, R Cabello, et al. A general methodology for energy comparison of intermediate configurations in two-stage vapour compression refrigeration systems[J]. Energy, 2011, 36(7): 4119-4124.

[3] Honghyun Cho, Jin Taek Chung, Yongchan Kim. Influence of liquid refrigerant injection on the performance of an inverter-driven scroll compressor[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 87-94.

[4] Wang Xudong, Hwang Yunho, 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.

[5] 许树学, 马国远, 赵博, 等. 以 R32 为工质的准二级压缩热泵系统实验研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(5): 12-14. (Xu Shuxue, Ma Guoyuan, Zhao Bo, et al. Experimental research on quasi two-stage compression heat pump using R32[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(5): 12-14.)

[6] Bertch S S, Groll E A. Two-stage air-source heat pump for residential heating and cooling applications in northern U. S. climates[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(7): 1282-1292.

[7] 王伟,金苏敏,陈建中. 空气源热泵热水器双级压缩循环研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(9): 63-66. (Wang Wei, Jin Sumin, Chen Jianzhong, et al. Two-stage compression cycle for water heaters in air source heat pumps[J]. HV&AC, 2006, 36(9): 63-66.)

[8] 王伟, 金苏敏, 陈建中. 用于低温环境下的双级压缩风冷热泵热水器[J]. 流体机械, 2005, 33(9): 62-66. (Wang Wei, Jin Sumin, Chen Jianzhong. Two-stage compression air source heat pump water heater used in low temperature environment[J]. Fluid Machinery, 2005, 33(9): 62-66.)

[9] 田长青, 石文星, 王森. 用于寒冷地区双级压缩变频空气源热泵的研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(3): 388-393. (Tian Changqing, Shi Wenxing, Wang Sen. Research on two-stage compression variable frequency air source heat pump in cold regions[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2004, 25(3): 388-393.)

[10] 盛健, 吴兆林, 周志钢, 等. 高低压级流量比对双级压缩热泵影响[J]. 低温与超导, 2011, 39(4): 39-43. (Sheng Jian, Wu Zhaolin, Zhou Zhigang, et al. Research on the effect of refrigeration quality flow rate of the high and low pressure system on the performance of two-stage compressor air-source heat pump[J]. Cryo. &. Supercond, 2011, 39(4): 39-43.)

(下转第 34 页)

Engineering of Chinese Universities, 2010, 24(1): 10-15.)

[9] Chan Woo Park, Sung Soo Kim, Hyun Churl Cho, et al. Experimental correlation of falling film absorption heat transfer on micro-scale hatched tubes[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(3): 758-763.

[10] Kyongmin Kwon, Siyoung, Jeong. Effect of vapor flow on the falling-film heat and mass transfer of the ammonia/water absorber[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(8): 955-964.

[11] P G Vicente, A Garcia, A Viedma. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(6): 671-681.

[12] 李洪亮,柳坤. 横纹管强化吸收器的传热传质实验研究[J]. 化学工程,2011,39(1):14-18. (Li Hongliang, Liu Kun. Experimental study on heat and mass transfer enhancement by grooved tube of absorber[J]. Chemical Engineering, 2011, 39(1): 14-18.)

[13] 牛晓峰,杜垲,胡智慧,等. 磁场影响氨水吸收的实验研究[J]. 工程热物理学报,2008,29(6):919-922. (Niu Xiaofeng, Du Kai, Hu Zhihui, et al. Experimental analysis on the effect of magnetic field on ammonia-water falling film absorption[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(6): 919-922.)

[14] 阎建民,刘辉. 化工传递过程导论[M]. 北京:科学出版社,2009:196-197.

[15] Jesse D Killion, Srinivas Garimella. A critical review of models of coupled heat and mass transfer in falling-film absorption[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(8): 755-797.

作者简介

陈小砖,男(1979 -),博士生,讲师,河南理工大学机械学院,15639168358,E-mail:chenxiaozhuan@hpu.edu.cn。研究方向:工程热物理,制冷空调。

About the author

Chen Xiaozhuan (1979 -), male, Doctoral student, Instructor, School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, 15639168358, E-mail: chenxiaozhuan@hpu.edu.cn. Research fields: Engineering thermophysics; Refrigeration and Air conditioning.

(上接第 4 页)

[11] 张华,徐世林. R410A 双级压缩热泵空调器的特性分析[J]. 制冷学报,2008,29(6): 21-29. (Zhang Hua, Xu Shilin. Analysis on characteristics of two-stage compression heat pump air-conditioner with R410A[J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(6): 21-29.)

作者简介

许树学,男(1981 -),助理研究员,北京工业大学制冷实验室,(010)67391613,E-mail: xsx@bjut.edu.cn。研究方向:新型蒸汽压缩式制冷、热泵循环,自然工质制冷剂,制冷系统测试技术。

About the author

Xu Shuxue (1981 -), male, Research assistant, Lab of Refrigeration, Beijing University of Technology, (010)-67391613, E-mail: xsx@bjut.edu.cn. Research fields: New type of vapor compression refrigeration and heat pump cycle, Natural refrigerants, Testing technology for refrigeration system.