

文章编号:0253-4339(2015)05-0074-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.05.074

强化补气技术应用于空气源热泵的研究进展

齐亚茹 刘妮 张亚楠 闫凯

(上海理工大学制冷与低温工程研究所 上海 200093)

摘要 在研究空气源热泵产品的低温制热性能时,发现引入基于准二级压缩循环的强化补气(EVI)技术可使热泵应用于低温工况的性能得到明显改善。本文论述了准二级压缩循环的压缩模型和不同强化补气系统的工作原理,比较了强化补气系统与其它系统的差异。从数学模型、实验研究和创新优化三个方面分析了强化补气技术在低温空气源热泵领域的研究现状与进展。总结不同学者对强化补气系统在提高低温制热性能、降低压缩机排气温度等方面的研究结果和实际应用成果后得出,即使在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温环境下,强化补气系统可使系统 COP 提高 7.7%~25.0%,排气温度降低 6.37~20.36 $^{\circ}\text{C}$ 。最后,对强化补气系统今后的研究方向进行了展望。

关键词 空气源热泵;强化补气;准二级压缩;经济器

中图分类号:TQ051.5

文献标识码:A

Development of Research on Application of Enhanced Vapor Injection Technology in Air-source Heat Pump

Qi Yaru Liu Ni Zhang Yanan Yan Kai

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract It was found that the introduction of enhanced vapor injection(EVI) technology can significantly improve the performance of air-source heat pump products under low-temperature condition. This technology is based on quasi two-stage compression cycle. The present paper expounded quasi two-stage compression cycle model and different EVI principles. A comparison among EVI system and other systems was made to find their advantages and disadvantages. The paper provides a literature review on heat pump systems with EVI technology from three aspects; mathematical model, experimental study and optimization. The review summarized the research and application achievement of EVI system in improving heating performance, reducing exhaust temperature and other aspects. The results show that even at $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ low temperature, EVI systems can increase COP 7.7% - 25.0%, and decrease exhaust temperature 6.37 - 20.36 $^{\circ}\text{C}$. It also prospects the future research direction of EVI system.

Keywords air-source heat pump; enhanced vapor injection; quasi two-stage compression; economizer

在能源、资源日益紧张的当今世界,空气源热泵由于其安装要求低、节能效果突出、对使用地区的污染作用小等特点,在众多型式的热泵中具有很明显的竞争优势,应用也最为广泛。近些年来,空气源热泵趋于向寒冷地区扩展^[1]。然而,研究发现在极端气候条件下使用空气源热泵时会出现制热量不能满足要求、压缩机排气温度过高等一系列问题,研究人员针对这些问题提出了许多解决办法,如增设辅助加热系统、利用双级或多级压缩循环、采用强化补气(EVI)技术等,这些研究对拓宽空气源热泵的使用范

围起到了一定的促进作用。尤其是 EVI 技术,以良好的综合性能成为该领域的研究热点^[2-3],文章对其发展历史和研究现状做出了分析和评述。

1 空气源热泵存在的问题及对策

空气源热泵的应用受气候条件的约束,在寒冷地区,冬季采暖期相对较长且室外气温低,用户对热量的需求很大。当室外气温降至很低时,制冷剂的吸气比容增大,吸气量急剧减少,制热量不能满足采暖要求。同时,系统制热量和 COP 持续下降,排气温度却

大幅升高,甚至在极低的温度下,压缩难以维持正常工作。根据供热空调设计规范,空气源热泵应确保在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度环境中仍长期安全可靠地运行,而传统热泵系统无法保证。如果热泵在初始设计时仅注重极端温度工况下的运行性能,不仅会使设备的初投资增加,而且会使热泵长期在偏离设计工况下运行,造成资源浪费现象。同时,在这种情况下压缩机会频繁地开启、关闭来减少制热量,降低系统使用寿命。

寒冷地区使用空气源热泵的可行性和替代性研究是国际制冷学会提出的应优先研究的问题^[4]。针对温度局限性,国内外专家学者纷纷提出了不同的改进方案,主要方向为:1) 增设辅助加热设备;2) 优化压缩机结构和内部工作过程;3) 选用可适应宽工况温度范围的制冷剂;4) 增加低温工况下制冷工质的循环量。如研制出可利用燃油、燃气、电加热器辅助

加热的热泵空调;使用非共沸制冷剂;采用喷液冷却系统、带润滑油冷却的热泵系统、多级压缩系统、复叠式压缩系统等。

在热泵系统的设计工作中,应优先保证系统在普通工况下运行的经济性,其次尽量满足在极端工况下仍能保持正常工作的要求。根据这一标准,基于准二级压缩循环的 EVI 热泵系统被认为是切实可行的有效方案。

2 EVI 系统

1976 年, A B bbIKOB 第一次提出准二级压缩循环的概念。表 1 总结了单级压缩、二级压缩和准二级压缩循环各方面的特点,可以看出,准二级压缩循环的综合性能有更优越的表现。

表 1 三种压缩循环的特点

Tab. 1 Characteristics of three compression cycles

压缩级数	制热量和 COP	排气温度	特点
单级	低,不可调	高	结构简单、廉价,功耗大、效率低
准二级	高,可调节	低	工作模式灵活,但除霜受到限制
二级	高,可调节	低	压比小、效率高,系统复杂

准二级压缩系统的压缩机上设有中间补气口,与系统中的闪发器或过冷器相配合形成补气环节,压缩过程可以描述为:准低压压缩-补气-准二级压缩-等容压缩。其工作原理和带中间冷却器的双级压缩循环比较相似,都采用了中间冷却,使压缩机的排气温度降低,系统 COP 提高^[5]。

2.1 EVI 系统特点

EVI 系统的结构特点主要有:1) 需采用带补气口的压缩机,否则难以实现强化补气技术;2) 在常规系统上增加经济器(过冷器或闪发器),并将气态制冷剂喷入压缩机中;3) 增加一个节流装置,实现二次节流。经济器在此有两个重要作用:一是在节流前对主循环回路中的制冷剂进行预冷,以此增大制冷剂焓差;二是对辅助回路中节流后的制冷剂进行适当的气液分离,达到合适的中间压力(高于压缩机补气口处的压力),使制冷剂顺利喷入压缩机。喷入压缩机的此部分制冷剂不再进入蒸发器吸收热量,直接参与压缩机的压缩过程。

2.2 EVI 系统原理

EVI 系统可根据所带有的经济器不同分为闪发器循环(FTC)系统和过冷器循环(SCC)系统,其中

FTC 系统根据节流装置位置的不同可分为前节流系统和后节流系统。三种系统的原理图分别如图 1 ~ 图 3 所示。

以前节流闪发器系统为例,其原理为:从冷凝器流出的制冷剂(状态 4)经膨胀阀 A 节流为气液两相(状态 4')进入闪发器后被分为两部分,因持续闪发而处于闪发器下部的过冷液(状态 5),经膨胀阀 B 二次节流(状态 5')后依次进入蒸发器和压缩机被压缩(状态 2),构成主回路;位于上部的闪发蒸汽通过喷气口(状态 6)被压缩机吸入,构成辅助回路,与原有已压缩气体相混合(状态 2')经进一步压缩后排出。

3 EVI 系统研究进展

关于 EVI 系统的研究可归纳为数学模型分析、实验研究和创新优化三个方面,下面分别从这三个角度来综述 EVI 技术的发展状况。

3.1 EVI 系统数学模型分析

1984 年, 邬志敏^[6]根据最大制冷系数原则提出了 SCC 系统中压缩机补气孔和排气孔的设计计算方法,并对其进行校核得到了较好的吻合度。但该算法只适用于螺杆压缩机。

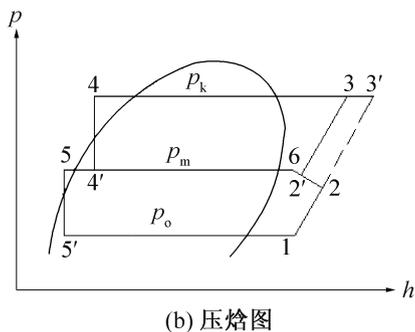
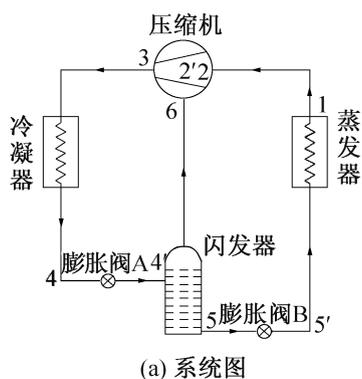


图 1 前节流闪发器系统

Fig. 1 Flash-tank at the fore system

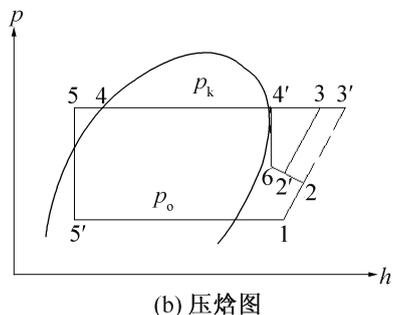
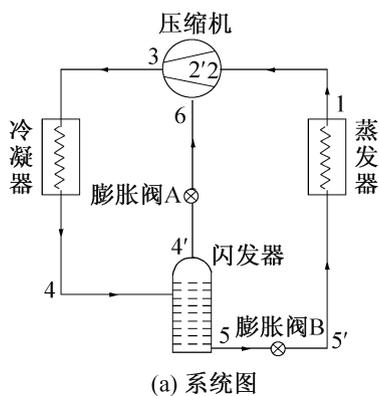


图 2 后节流闪发器系统

Fig. 2 Flash-tank in the rear system

Zhang Jianyi 等^[7]使用 R12 和 R22 研究了 COP 和流量比随过冷器中蒸发温度 (TIS) 的变化规律,建立了 TIS 的相关计算方程,并指出 TIS 存在一个最佳值,此时对应系统的 COP 为最大,据此讨论了准二级

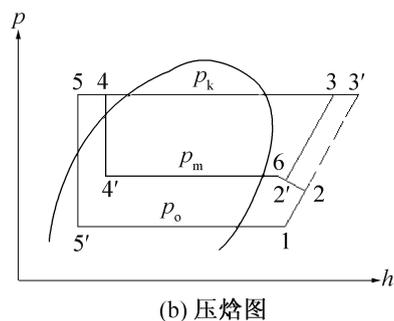
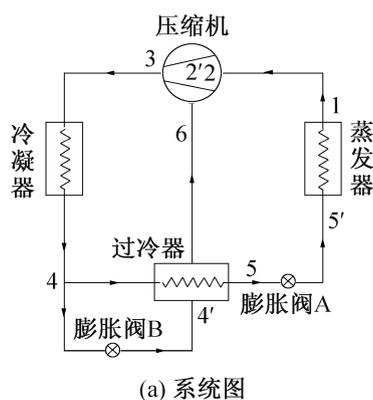


图 3 过冷器系统

Fig. 3 Sub-cooler system

压缩循环在不同环境下的运行特性。

郑祖义等^[8]分析了补气-压缩过程的能量耗散并建立了绝热压缩数学模型,尽可能多地获得该过程的焓效率,降低不可逆损失,以此完善和改进系统的节能特性。

Park Y C 等^[9]设计了带补气口的变转速涡旋压缩机的模型,研究制冷剂流量、功耗、补气量等随压缩机转速的变化规律,得到模型计算误差在 10% 以内。通过研究补气口位置对系统性能的影响发现,较小的补气量能使压缩机的排气温度明显降低,实质上也是对系统补气的主要作用。而补气口的位置和补气量对系统的制热量和 COP 影响不大,且补气比存在一个最优值,但文章并没有给出最优补气比的计算方法。

柴沁虎等^[10]建立了过冷器系统的数学模型,根据系统中热力膨胀阀、压缩机补气口开孔位置和涡旋压缩机实际工作过程,讨论了不同情况下辅助回路的动态特性,得出了吸气腔刚刚闭合处是压缩机最合理的开孔位置。同时指出这些结论适用于涡旋压缩机和螺杆压缩机系统,不适用于使用非热力式膨胀阀来调节辅助回路制冷剂流量的系统。

Singer E 等^[11]提出了一种实地测量 EVI 系统制热量和 COP 的新方法,允许对已经安装的系统进行实际分析和长期观测。该方法采用了较为苛刻的假

设前提,因此在实际应用时并不准确,还有待做进一步研究。

3.2 EVI 系统实验研究

上世纪 80 年代初期,日本学者荒井信胜等^[12]尝试将闪发器与涡旋压缩机结合,发现系统制热性能提升了约 15%。进入 90 年代,Jonsson S^[13]将带有闪发器的补气技术应用在螺杆机上。

Wang Xudong 等^[14]分别测试了 EVI 系统的高温制冷和低温制热性能,得出季节供暖能效系数提高 7% 左右。进一步分析认为与 FTC 系统相比,SCC 系统更具有可控性。原因在于过冷器是一个换热器,能简单高效地控制主回路和辅助回路的膨胀阀,能更方便快捷地调节补气过热度,而 FTC 系统则需要蒸发入口配置更大的膨胀阀。

Roh C W 等^[15-16]采用 R410A 进行 SCC 系统的研究实验,不同于常规的 SCC 系统的是在冷凝器出口处增设了一个膨胀阀,用以控制中间压力。通过改变压缩机频率,研究不同补气率下中间压力对系统性能的影响,分析发现中间压力对最大补气率有很大影响,较高的中间压力会产生较好的初始制热能力和 COP,但是它会使得补气量的变化限制在一个狭窄的范围。由此看出,对于 EVI 系统,需要找到适当的运行策略才能发挥最大的作用。

随着关于寻找替代制冷工质研究工作的不断深入,有学者尝试在 EVI 系统中开展。Xu Xing 等^[17]将 EVI 系统中的制冷工质 R410A 替换为 GWP 值较小的 R32,分别研究了两种工质在同一 FTC 系统中的表现特性,认为 R32 是一种可供选择的制冷剂替代物。但在极高温或极低温环境下 R32 并没有表现出优越性,且压缩机排气温度较高。若对系统的组成部件做出优化使其与 R32 更匹配,或许能够有效解决这一问题。

马国远等^[18-20]用使用补气技术和涡旋压缩机的试样机组证明了补气可以增大系统 COP,原因在于虽然机组的制热量和功耗同时增大,制热量的增大速率高于功耗增大速率,但随着环境温度的升高,补气对增大 COP 的作用效果减弱。此外,指出对于最佳补气压力值的选取,若主要目的是提高制冷量,相对补气压力值取 1.2 较为合适;若想最大程度降低压缩机的排气温度和制热量,补气压力应选用较大值^[21-22]。

赵会霞等^[23-25]将 FTC 系统和 SCC 系统进行对比,发现低温时,FTC 系统制热效果更好,更适用于小型热泵系统,并指出涡旋压缩机 FTC 系统中间压力设 0.95 ~ 1 MPa 为宜。

此后,许多学者对 EVI 系统的低温制热性能进行了实验研究,并将其与传统的热泵系统对比。由于各研究工况有所差异,为便于比较,现在在蒸发温度为 -15 °C、各学者认为的最佳补气工况下得到的结果对比普通热泵系统列于表 2 中。

由表 2 中数据可以得出:虽然各个参数的变化量差距较大,但从任一组数据都能看出 EVI 系统相较于普通热泵系统的优势。出现此差距是因为各个研究者所使用的机组容量、制冷剂种类和机组的运行工况有所不同。此外,还可以发现在蒸发温度为 -15 °C 的工况下,EVI 系统可使 COP 提高 7.7% ~ 25.0%,排气温度降低 6.37 ~ 20.36 °C,且多数结果表明 SCC 系统的制热性能要稍好于 FTC 系统。

表 2 部分研究结果总结

Tab. 2 summary of some research results

作者	系统类型	制热量变化/%	COP 变化/%	排气温度变化/°C
孟登居等 ^[26]	过冷器	+27.8	+10.1	-9.54
李园园等 ^[27]	过冷器	+9.0	+7.72	-20.36
郝玉影等 ^[28]	过冷器	+21.7	+12.5	-6.37
李艳 ^[29]	过冷器	+22.2	+25.0	-18.5
周东民等 ^[30]	闪发器	+18.8	+9.7	—
	闪发器	+15.2	+19.5	—
邓荣基等 ^[31]	闪发器	+17.5	+12.0	—

另有一些学者将 EVI 系统与其它形式的系统进行对比,如翅片管换热器改进系统、喷液系统等,进一步证明了 EVI 技术的优越性。

3.3 EVI 系统创新优化

随着 EVI 技术的逐渐成熟,更多应用此技术的商用及家用热泵空调和热泵热水器出现在市场上,并在一些实际工程中得到了令人满意的结果^[32-33]。为了使 EVI 系统更加满足用户需求,许多学者将研究重心转入对 EVI 系统的优化研究。

2003 年,美国谷轮公司^[34]介绍了其研发的数码涡旋技术,并阐述了该新技术与强化补气相结合形成数码涡旋 EVI 的发展可能。此后,艾默生环境优化技术有限公司^[5]介绍了此技术在超低温领域的发展前景,并通过实验证明即便在 -25 °C 的环境温度下,系统能效比也远超国内外标准。

传统的热力膨胀阀不适用于 FTC 系统,因此多数关于 FTC 系统的研究选用电子膨胀阀作为节流元件,需要增设液位传感器配合电子膨胀阀控制制冷剂

的充注量,会显著增加系统的投资。有学者提出一种使用三个电子膨胀阀的 FTC 系统,分别用于闪发器前、后的节流过程和补气过程,然而该方法并没有在减小投资方面取得明显成效^[35]。

Heo J 等^[36]在 FTC 和 SCC 系统基础上创新性地提出了两种新型强化补气系统:一种是将闪发器过冷器耦合形成 FTSC 系统,另一种是应用双级膨胀过冷器循环形成 DESC 系统,发现 FTC 系统的制热能力最好。但四种系统 COP 相差不大,在质量流率方面,FTSC 和 DESC 系统在质量流率方面表现更为出色。文中给出了各系统的最佳补气系数范围,并指出在系统设计时,从稳定性和精确控制这两方面考虑,FTSC 系统是一个可供选择的方案。

Roh C W 等^[15-16]提出了另一种新颖的补气系统,即在蒸发器出口与压缩机入口之间的管路上增设气液分离器,使之与补气回路相连接,过冷器出口的蒸气可以选择性进入气液分离器或压缩机。进入气液分离器的蒸气量取代了压缩机从蒸发器吸入的部分蒸气量。还指出了虽然补气直接进入压缩机可更有效增加制热量,但是进入气液分离器的蒸气更能降低压缩机的排气温度。

陈文俊等^[37]指出若能把 EVI 技术、增大蒸发器和冷凝器换热面积以及优化闪发器与进出口管道节流部件的匹配这三个方法相结合,调整冷媒最佳注入量,将会取得更好的效益。

4 结论

在空调行业日渐强调低温制热的趋势下,EVI 技术可以保证压缩机在低温工况下的稳定制热,应用前景广阔。针对以上分析和目前的发展状况,可以发现:1)在众多理论研究中,鲜有关于使用计算流体力学(CFD)的方法对 EVI 系统进行分析的报道,其中两相流模型对系统组件的设计,尤其是对闪发器的设计极有帮助。因此,可将 CFD 模拟分析作为今后研究工作的方向之一。2)在 EVI 技术商业化的进程中,系统经济性仍是值得特别关注的因素。所以,制冷、制热工况下不同补气量的控制策略问题以及系统工作模式的切换问题应给予深入研究。

EVI 技术的应用为热泵存在的问题提供了一个简单有效的解决方案,对拓宽热泵运行范围,增强可靠性和经济性有显著效果,经过进一步优化,必将推动节能型热泵和低温热泵的快速发展。

本文受上海市教委科研项目(12YZ106)资助。(The project was supported by the Scientific Research Innovation Program

of Shanghai Municipal Education Commission (No. 12YZ106).)

参考文献

- [1] 马最良,杨自强,姚杨,等. 空气源热泵冷热水机组在寒冷地区应用的分析[J]. 暖通空调,2001,31(3):28-31. (Ma Zuiliang, Yang Ziqiang, Yao Yang, et al. Analysis of using air-source heat pump water chiller-heater units in the cold regions [J]. Journal of HV&AC, 2001, 31(3):28-31.)
- [2] Wang Xudong, Hwang Y, Radermacher R. Performance investigation of refrigerant vapor-injection technique for residential heat pump systems [C]// International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, 2008.
- [3] Navarro E, Redón A, González-Macia J, et al. Characterization of a vapor injection scroll compressor as a function of low, intermediate and high pressures and temperature conditions [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(7):1821-1829.
- [4] 谢如鹤,刘广海. 国际制冷学会关于制冷领域应优先研究的问题列表[J]. 制冷学报,2006,27(3):59-62. (Xie Ruhe, Liu Guanghai. IIR list of priority research problems in refrigeration field [J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(3):59-62.)
- [5] 杨宁,苏晓耕. 艾默生环境优化技术有限公司超低温数码涡旋(喷汽增焓)技术[J]. 暖通空调,2006,36(Suppl.):329-332. (Yang Ning, Su Xiaogeng. Digital heating (enhanced vapor injection) technology [J]. Journal of HV&AC, 2006, 36(Suppl.):329-332.)
- [6] 郭志敏. 经济器螺杆制冷压缩机补气和排气孔口的确定[J]. 制冷学报,1984,5(2):10-17. (Wu Zhimin. Determination of the position of the intermediate charge and discharge ports in the screw refrigerating compressor with economizer [J]. Journal of Refrigeration, 1984, 5(2):10-17.)
- [7] Zhang Jianyi, Hu Weiping, Hashmi M S J. Super-sub cooling with R12 & R22 refrigeration plants using reciprocating compressors [J]. Applied Energy, 1993, 45(2):157-166.
- [8] 郑祖义,彦启森,江亿. 二次进气螺杆机补气-压缩过程的热力学分析[J]. 华中理工大学学报,1995,23(5):113-116. (Zheng Zuyi, Yan Qisen, Jiang Yi. A thermodynamic analysis of the suction and compression of a screw compressor with secondary suction [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 1995, 23(5):113-116.)
- [9] Park Y C, Kim Y, Cho H. Thermodynamic analysis on the performance of a variable speed scroll compressor with refrigerant injection [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(8):1072-1082.
- [10] 柴沁虎,马国远,江亿,等. 带经济器的涡旋压缩机制冷

- 循环热力学分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(10): 1401-1404. (Chai Qinhu, Ma Guoyuan, Jiang Yi, et al. Thermodynamic analyses of scroll refrigeration system with economizer[J]. Journal of Tsinghua University of Science & Technology, 2003, 43(10): 1401-1404.)
- [11] Singer E, Tran C T, Rivière P. On-field measurement method of vapor injection heat pump system [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 41: 147-156.
- [12] 荒井信勝, 小谷純久, 内川直志, 等. スクロール圧縮機とそのパッケージ形空調機への適用[J]. 日立評論, 1983, 65(6): 415-420. (Nobukatsu Arai, Sumihisa Kotani, Naoshi Uchikawa, et al. Scroll compressor and its application to packaged air-conditioner [J]. Hitachi's Comments, 1983, 65(6): 415-420.)
- [13] Jonsson S. Performance simulations of twin-screw compressors with economizer [J]. International Journal of Refrigeration, 1991, 14(6): 345-350.
- [14] Wang Xudong, Hwang Y, Radermacher R. 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.
- [15] Roh C W, Kim M S. Effects of intermediate pressure on the heating performance of a heat pump system using R410A vapor-injection technique [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(8): 1911-1921.
- [16] Roh C W, Kim M S. Comparison of the heating performance of an inverter-driven heat pump system using R410A vapor-injection into accumulator and compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(2): 434-444.
- [17] Xu Xing, Hwang Y, Radermacher R. Performance comparison of R410A and R32 in vapor injection cycles [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 892-903.
- [18] 马国远, 邵双全. 寒冷地区空调用热泵的研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(1): 17-21. (Ma Guoyuan, Shao Shuangquan. Research on heat pump for air-conditioner in cold regions [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2002, 23(1): 17-21.)
- [19] 马国远. 低温空气源热泵的研究[J]. 流体机械, 2002, 30(Suppl.): 41-44. (Research on air-source heat pump in low temperature [J]. Fluid Machinery, 2002, 30(Suppl.): 41-44.)
- [20] Ma Guoyuan, Chai Qinhu, Jiang Yi. Experimental investigation of air-source heat pump for cold regions [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 12-18.
- [21] 马国远, 彦启森. 涡旋压缩机经济器系统的性能分析[J]. 制冷学报, 2003, 24(3): 20-24. (Ma Guoyuan, Yan Qisen. Thermodynamic behavior of scroll compressor with economizer for heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(3): 20-24.)
- [22] Ma Guoyuan, Chai Qinhu. Characteristics of an improved heat-pump cycle for cold regions [J]. Applied Energy, 2004, 77(3): 235-247.
- [23] 赵会霞, 刘思光, 马国远, 等. 涡旋压缩机闪发器热泵系统的试验研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(4): 377-381. (Zhao Huixia, Liu Siguang, Ma Guoyuan, et al. Experimental research on economizer system coupled with scroll compressor [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(4): 377-381.)
- [24] Ma Guoyuan, Zhao Huixia. Experimental study of a heat pump system with flash-tank coupled with scroll compressor [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(5): 697-701.
- [25] 赵会霞, 马国远. 涡旋压缩机闪发器系统性能的模拟分析[J]. 流体机械, 2006, 34(9): 15-20. (Zhao Huixia, Ma Guoyuan. Performance simulation on economizer system coupled with scroll compressor [J]. Fluid Machinery, 2006, 34(9): 15-20.)
- [26] 孟登居, 黄虎, 陆春林, 等. 提高空气源热泵热水器低温环境性能理论分析[J]. 中国建设信息供热制冷, 2007(8): 26-29. (Meng Dengju, Huang hu, Lu Chunlin, et al. Theory analysis on improving performance of air source heat pump water heater at low temperature [J]. China Construction Heating & Refrigeration, 2007(8): 26-29.)
- [27] 李园园, 马麟. 低温热泵用涡旋压缩机性能的试验研究[J]. 制冷与空调(北京), 2008, 8(2): 63-67. (Li Yuanyuan, Ma Lin. Experimental research on performance of dcroll compressor for low temperature heat pump [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2008, 8(2): 63-67.)
- [28] 郝玉影, 吴兆林, 唐华杰. 带经济器涡旋压缩机系统的研究[J]. 制冷, 2009, 28(3): 8-12. (Hao Yuying, Wu Zhaolin, Tang Huajie. Research of the refrigerators rate in three-stage auto cascade refrigeration [J]. Refrigeration, 2009, 28(3): 8-12.)
- [29] 李艳. 空气源热泵机组低温运行特性研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2011.
- [30] 周东民, 胡浩, 李义. 美国艾默生公司压缩机应用技术讲座第三十一讲: 高效强热商用涡旋技术在热泵空调中的应用[J]. 制冷技术, 2009, 29(3): 57-61. (Zhou Dongmin, Hu Hao, Li Yi. Emerson compressor application engineering (31): application of EVI technology in heat pump air conditioning [J]. Refrigeration Technology, 2009, 29(3): 57-61.)
- [31] 邓荣基, 陈波. 带闪蒸器的家用变频空气源热泵试验研究[J]. 制冷与空调(北京), 2012, 12(6): 73-75. (Deng Rongji, Chen Bo. Experimental study on residential variable frequency air source heat pump with flash-tank [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2012, 12(6): 73-75.)
- [32] 司鹏飞, 戎向阳, 侯余波, 等. 高海拔严寒地区暖通工程

- 应用——文成公主纪念馆暖通设计[J]. 暖通空调, 2013, 43(6): 38-41. (Si Pengfei, Rong Xiangyang, Hou Yubo, et al. HVAC application case in high altitude and severe cold region: HVAC design for Wencheng Princess Memorial[J]. Journal of HV&AC, 2013, 43(6): 38-41.)
- [33] 唐景春, 左承基. 电动汽车空调热泵型涡旋压缩机结构分析[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 54-58. (Tang Jingchun, Zuo Chengji. Structural analysis of heat pump derol compressor for electric automobile air-conditioning [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(2): 54-58.)
- [34] 王贻任, Majumdar A. 美国谷轮公司压缩机应用技术讲座第九讲: 数码涡旋技术[J]. 制冷技术, 2003, 23(1): 35-38. (Wang Yiren, Majumdar A. Copeland compressor application engineer 9 digital scroll technology[J]. Refrigeration Technology, 2003, 23(1): 35-38.)
- [35] Xu Xing, Hwang Y, Radermacher R. Refrigerant injection for heat pumping/air conditioning systems: literature review and challenges discussions[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(2): 402-415.
- [36] Heo J, Jeong M W, Baek C, et al. Comparison of the heating performance of air-source heat pumps using various types of refrigerant injection[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(2): 444-453.
- [37] 陈文俊, 闫志恒, 卢志敏. 空气源热泵系统低温制热量改善途径实验分析[J]. 制冷学报, 2009, 30(2): 49-54. (Chen Wenjun, Yan Zhiheng, Lu Zhimin. Experimental study on improving capacity of air-source heat pump at low outdoor temperature[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(2): 49-54.)

通信作者简介

刘妮, 女, 博士/副教授, 上海理工大学能源与动力工程学院, (021)55271619, E-mail: liu_ni@163.com。研究方向: 制冷空调节能技术。

About the corresponding author

Liu Ni, female, Ph. D./associate professor, Institute of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 21-55271619, E-mail: liu_ni@163.com. Research fields: energy conservation technology for refrigeration and air conditioning.