

文章编号:0253-4339(2019)05-0136-07  
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.05.136

# 变流量双级压缩制冷系统实验研究

杨永安 蒋春艳 武传志 罗建成

(天津商业大学 冷冻冷藏技术教育部工程研究中心 天津市制冷技术工程中心 天津 300134)

**摘要** 为改善变工况条件下,定频双级压缩制冷系统不能达到最佳状态运行的现状,本文搭建变流量双级压缩制冷系统实验台,分析了变工况条件下,低高压级压缩机输气量比对一次节流中间不完全冷却制冷系统性能的影响。结果表明:当冷凝温度为30℃,蒸发温度为-35~-20℃,低高压级压缩机输气量比由1.25增至3.33时,系统制冷量随着低高压级压缩机输气量比的增加逐渐减少,性能系数COP最大为2.37;当蒸发温度从-20℃降至-35℃,每降低5℃,最佳COP下的低高压压缩机输气量比依次增大22.10%、12.52%、14.29%。故实际系统设计时,可参考实验数据,根据不同蒸发温度和制冷量需求,调节合适的低高压级压缩机输气量比,使系统运行达到最佳状态。

**关键词** 双级压缩;变流量;输气量比;COP

中图分类号:TB657; TB61<sup>+1</sup>

文献标识码:A

## Experimental Study on Variable-flow Two-stage Compression Refrigeration System

Yang Yongan Jiang Chunyan Wu Chuanzhi Luo Jiancheng

(Tianjin Refrigeration Engineering Technology Center, Refrigeration Engineering Research Center of Ministry of Education, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300134, China)

**Abstract** The constant-frequency double-stage compression refrigeration system fails to run in the best state at the working or load changing conditions. To improve its performance, maintain the maximum performance coefficient, and achieve rapid and accurate cooling, a variable-flow double-stage compression experimental bench was set up. The proposed method was able to control the refrigerant gas flow rate of the low-pressure compressor and change the refrigerant mass flow rate. Therefore, the experimental study of two-stage compression cooling was conducted. Results showed that the refrigeration capacity of the system was decreased with an increase in the ratio of input gas of low- and high-pressure compressors (in the range of 1.25 to 3.33) at the condensation temperature of 30℃, evaporation temperature of -35~-20℃. The cooling capacity of the system gradually was decreased with the increase of the ratio of input gas of low- and high-pressure compressors and the maximum coefficient of performance (COP) is 2.37. The ratio of input gas of low- and high-pressure compressor under the optimum COP was increased with the decrease of evaporation temperature. Considerably, as the evaporation temperature decreased by 5℃ with the evaporation temperature of -35~-20℃, the ratio of the input gas of the low- and high-pressure compressors under the optimal COP was increased by 22.10%, 12.52%, and 14.29%, respectively. Therefore, for the actual system design, the experimental data can be used to adjust the ratio of input gas of low- and high-pressure compressors according to the different evaporation temperatures and refrigeration demands.

**Keywords** two-stage compression; variable flow; ratio of input gas; COP

在低温领域,双级压缩制冷循环因具有较小的系统压力比、较高的可靠性和经济性等特点而广泛应用<sup>[1-3]</sup>。而实际工程中,双级压缩制冷系统常使用定频压缩机,固定排气量之比和中间压力<sup>[4]</sup>,使系统不能维持在最佳性能系数(coefficient of performance,

COP)情况下进行无级调节,导致COP减小。为了提高双级压缩制冷系统运行性能,国内外学者通过研究发现,合理选择中间压力<sup>[5-7]</sup>可使双级压缩循环COP得到提高并存在最佳值。因此中间压力的选择对系统循环性能的提升有显著影响<sup>[8-10]</sup>。中间补气技术

基金项目:国家科技支撑计划(2014BAK17B02)和国家自然科学基金(11572223)资助项目。(The project was supported by the National Science and Technology Support Program (No. 2014BAK17B02) and the National Natural Science Foundation of China (No. 11572223).)

收稿日期:2018-09-06;修回日期:2018-11-25

可以实现系统对中间压力的控制,在补气开始时,存在最佳压缩腔内压强和补气压强值,使系统 COP 达到最大值<sup>[11]</sup>。中间压力还主要受系统输气量比<sup>[12~15]</sup>的影响,故可通过适当调节系统输气量来改变系统中间压力,进而提高系统性能。在双级压缩热泵循环的相关研究<sup>[16~19]</sup>发现,为满足实际应用中运行工况广泛特性<sup>[20~21]</sup>,系统的低高压级输气量比需根据实际工况进行调节<sup>[22~23]</sup>。研究高低压级流量比对双级压缩热泵系统的影响表明,系统 COP 随高低压级流量比增加而减小<sup>[24~26]</sup>。在工况固定时,低高压级压缩机理论输气量比由 1.13 增至 5.08 时,系统制热 COP 显著提升<sup>[27]</sup>。

因此可通过改变系统低高压级压缩机输气量比(简称输气量比),来改变系统中间压力,进而提升变工况下双级压缩制冷循环的性能,使系统保持最佳运行状态的前提下,实现快速降温、精确控温。

本文以 R410A 为制冷剂,搭建变流量双级压缩制冷系统实验台,在冷凝温度为 30 °C,蒸发温度为 -35~ -20 °C 时,保持低温级压缩机频率不变,通过调节高温级压缩机频率(30~80 Hz,每隔 5 Hz 调节一次),来改变低高压级压缩机输气量比(3.33~1.25),分析其对一次节流中间不完全冷却制冷系统性能的影响。

## 1 变流量双级压缩制冷系统实验台

### 1.1 实验装置

图 1 所示为变流量双级压缩制冷系统原理。系统采用一级节流中间不完全冷却的循环方式,使用

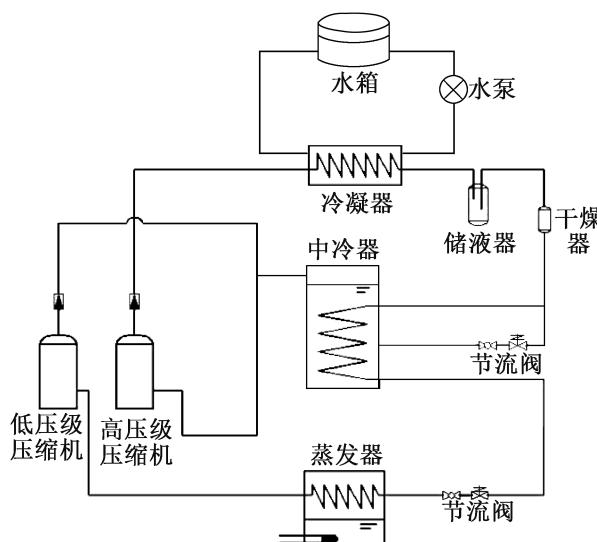


图 1 变流量双级压缩制冷系统原理

Fig.1 The principle of variable flow two-stage compression refrigeration system

R410A 作为制冷剂。由蒸发器出来的低温低压的饱和制冷剂蒸气进入低压级压缩机后,压缩到中间压力,随之同中间冷却器出来的制冷剂蒸气混合,进入高压级压缩机压缩,之后经水冷式冷凝器冷凝为高压液体,流经储液器和干燥过滤器之后分为两路,一路在节流阀节流后进入中间冷却器蒸发,之后与低压级压缩机排气混合一起进入高压级压缩机;另一路直接进入中间冷却器内的盘管过冷,经过电子膨胀阀节流,成为低温低压的制冷剂液体,进入蒸发器内蒸发吸热,蒸发后的低温低压的制冷剂气体回到低压级压缩机,完成整个循环。

表 1 所示为实验台主要设备参数。

表 1 实验台主要设备参数

Tab.1 The main equipment parameters of experiment bench

设备	选型	参数
R410A 压缩机	双转子压缩机	DA250S2C-30MT
变频器	压缩机变频器	A500
冷凝器	套管式换热器	$n=5$ 根
膨胀阀	R410A 电子膨胀阀	E2V-11
蒸发器	自制蛇形盘管	$A=0.72 \text{ m}^2$

系统自主设计蒸发器为带端盖的冷冻水箱,在装置内放入载冷剂乙二醇(浓度为 64%, 低温下不结冰),蒸发器底部为载冷剂液体和电加热棒直接接触,蒸发器上部是载冷剂饱和气与蒸发器内走制冷剂的螺旋铜管直接接触,同时外部接入小精灵温度控制器,如此来控制蒸发温度。系统冷凝温度的恒定通过调节冷凝器水流量阀门的开度实现。系统制冷量采用热平衡法测量,依靠电加热产生的热量平衡冷量。

系统自主设计的蒸发器在实验过程中存在一定程度的漏冷,漏冷系数 K 计算公式为:

$$K = \frac{Q}{\Delta t} \quad (1)$$

式中:K 为漏冷系数,W/°C;Q 为总负荷(包括搅拌器功耗),W;Δt 为载冷剂与室外环境温差,°C。

$$\text{COP}' = K \text{COP}' \quad (2)$$

式中:COP' 为实验测得性能系数;COP 为实际性能系数。

对一次节流中间不完全冷却系统进行监控。各个测点的温度、压力等相关参数可实时在屏幕中显示,具体实验数据有:压缩机吸气口和排气口的温度、压力,冷凝器内制冷剂进出口温度、冷却水进出口温度,中间冷却器、蒸发器以及载冷剂的温度等,以上实

验数据均可调用。该监控图设置了手动更改选项,简化实验的操作。程序可以根据监控系统测得的数据变化,自动或者手动调节实验设备。数据采集系统利用数据采集仪进行温度和压力的信息采集,并通过OPC传送到双级压缩实验台机组控制系统中,控制系统可自动储存于本地计算机硬盘数据库。

## 2 实验数据分析

### 2.1 输气量比对高低压级压缩比的影响

高低压级压缩比计算如式(3)所示:

$$\zeta = \frac{p_k}{p_m} / \frac{p_m}{p_0} = \frac{p_k p_0}{p_m^2} \quad (3)$$

式中: $\zeta$ 为高低压级压缩比; $p_0$ 、 $p_k$ 、 $p_m$ 分别为蒸发压力、冷凝压力、中间压力, MPa。

图2所示为不同蒸发温度下,高低压级压缩比随输气量比的变化。由图2可知,随着输气量比的增加,高低压级压缩比不断降低。蒸发温度 $T_0 = -35$  °C,输气量比由1.25升至3.33时,高低压级压缩比总体降低42.55%。这与式(3)所得趋势一致,当蒸发温度和冷凝温度确定后,随着高压级压缩机频率的降低,输气量比增大,高压级压缩机吸气量减少,吸气压力降低,导致中间压力减小,而蒸发压力和冷凝压力不变,故高低压压缩机的压缩比增大。

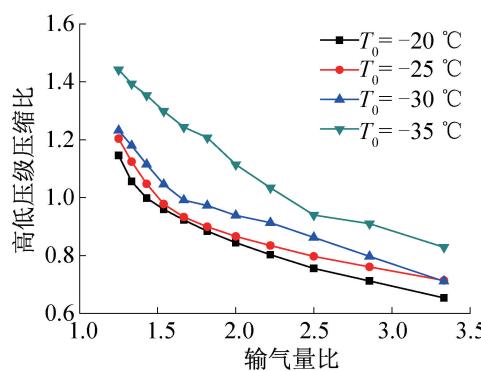


图2 高低压压缩比随输气量比的变化

Fig.2 High and low pressure compression ratio changes with the ratio of input gas

### 2.2 输气量比对中间压力和中间温度的影响

图3所示为不同蒸发温度下,中间压力 $p_m$ 和中间温度 $T_m$ 随输气量比的变化。由图3可知,当 $T_0 = -30$  °C,输气量比由1.25升至3.33时,中间压力由6.46 MPa增加到8.5 MPa,增幅为31.58%,中间温度增幅为68.52%;当输气量比=2.0时, $T_0$ 从-35 °C开始,每升高5 °C,中间压力依次上升21.09%、17.08%、11.26%。

高压级压缩机频率随着输气量比的增大而减小,

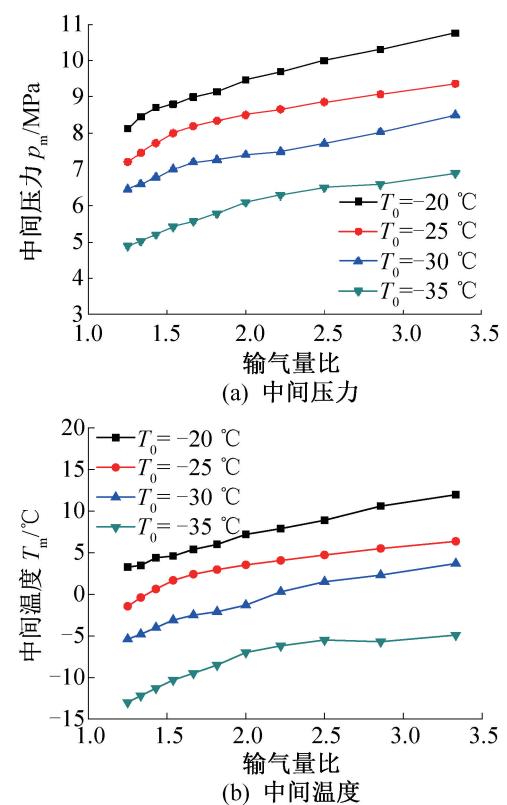


图3 中间压力和中间温度随输气量比的变化

Fig.3 Medium pressure and medium temperature change with the ratio of input gas

高压级压缩机排气量减少,系统的制冷剂质量流量减少,而低压级压缩机输气量不变,排往中间冷却器的冷却剂过热蒸气减少,使中间冷却器的压力升高。从中间冷却器排气口排出的是制冷剂饱和蒸气,所以中间压力和中间温度的参数相对应,中间压力上升,中间温度也上升。因此,输气量比对中间压力和中间温度的影响较大,呈正相关趋势。当输气量比不变时,随着蒸发温度的降低,蒸发压力也降低,由式(3)可知,系统压缩比增大,进而容积效率降低,输气量减小,中间温度与中间压力降低。

### 2.3 输气量比对压缩机功耗的影响

图4所示为不同蒸发温度下,压缩机功耗随输气量比的变化。当蒸发温度 $T_0$ 在-35~ -20 °C以5 °C为公差变化时,压缩机总功耗依次下降了21.65%、25.59%、24.49%、26.74%;当输气量比为1.25时,随着蒸发温度的下降,压缩机总功耗依次上升0.03%、2.46%、7.14%;当输气量比为2.0时,随着蒸发温度的下降,压缩机总功耗依次上升3.47%、6.47%、14.70%;当输气量比为3.0时,随着蒸发温度的下降,压缩机总功耗依次上升3.41%、4.07%、14.59%。原因是当蒸发温度一定时,此时输气量比增大,意味着高压级压缩机输气量减小,压缩机频率减小,转速

降低,系统中间压力升高,蒸发温度也随之升高,为维持蒸发温度的恒定,需调节膨胀阀开度,减少制冷剂质量流量,并且随着输气量比的增大,系统高压级压缩机单位比功快速减小,低压级压缩机单位比功缓慢增加,因此系统功耗减小。当输气量比和冷凝温度不变时,系统蒸发温度降低,制冷剂质量流量减小,低高压级压缩机的单位比功增加,蒸发温度对系统功耗的影响要大于制冷剂质量流量对功耗的影响,因此蒸发温度越低,系统功耗增加越快。

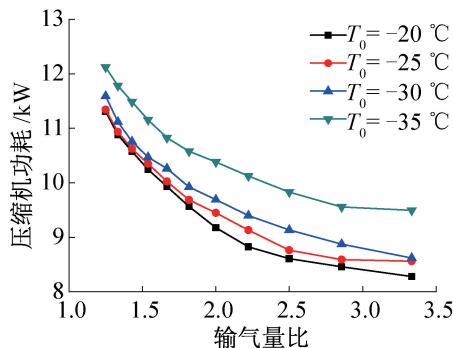


图4 压缩机功耗随输气量比的变化

Fig.4 Compressor power consumption changes with the ratio of input gas

## 2.4 输气量比对系统制冷量的影响

图5所示为不同蒸发温度下,系统制冷量随输气量比的变化。由图5可知,当系统冷凝温度不变,蒸发温度  $T_0$  在 $-35\sim-20^\circ\text{C}$ ,以 $5^\circ\text{C}$ 为公差变化时,随着输气量比的增大,系统制冷量减小的幅度依次为 $18.86\%、11.24\%、11.19\%、9.63\%$ ,且减小的速度下降。这是由于随着输气量比的增大,高压级压缩机的频率减小,制冷剂流速降低,高压级压缩机输气量减少,进而系统的制冷剂质量流量降低。确定系统运行的蒸发温度和冷凝温度后,在不改变单位质量制冷量的情况下,系统制冷剂质量流量的减少,使系统的制冷量减小。

当输气量比为1.25时,蒸发温度每降低 $5^\circ\text{C}$ ,系统制冷量依次减少 $13.97\%、2.76\%、1.44\%$ ;当输气量比为2.0时,系统制冷量依次减少 $9.98\%、4.37\%、0.89\%$ ;当输气量比为3.0时,系统制冷量依次减少 $5.88\%、2.70\%、0.73\%$ 。当输气量比和冷凝温度不变时,蒸发温度的降低,引起饱和液相和气相线之间焓差减小,吸气比体积增大,系统单位质量制冷量减小,而质量流量不变,则相应的系统制冷量减少。

## 2.5 中间温度和中间压力对 COP 的影响

图6所示为不同蒸发温度下,COP随中间温度和中间压力的变化。由图6可知,当确定蒸发温度和

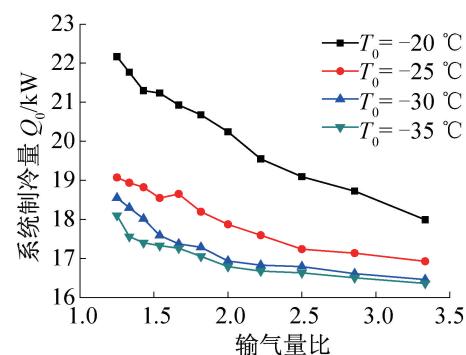


图5 系统制冷量随输气量比的变化

Fig.5 The cooling capacity of system changes with the ratio of input gas

冷凝温度后,蒸发温度  $T_0 = -20、-25、-30、-35^\circ\text{C}$  时,随着中间压力和中间温度的上升,双级压缩制冷系统的COP升高了 $17.98\%、20.59\%、19.89\%、16.50\%$ ,对应最大COP分别为 $2.34、2.09、1.93、1.79$ 。说明蒸发温度不变时,合理选择中间压力,可使一次节流中间不完全双级压缩制冷系统存在最佳运行状态。这为制冷机组设计提供了依据,在满足设计制冷要求的前提下,尽可能提高蒸发温度。

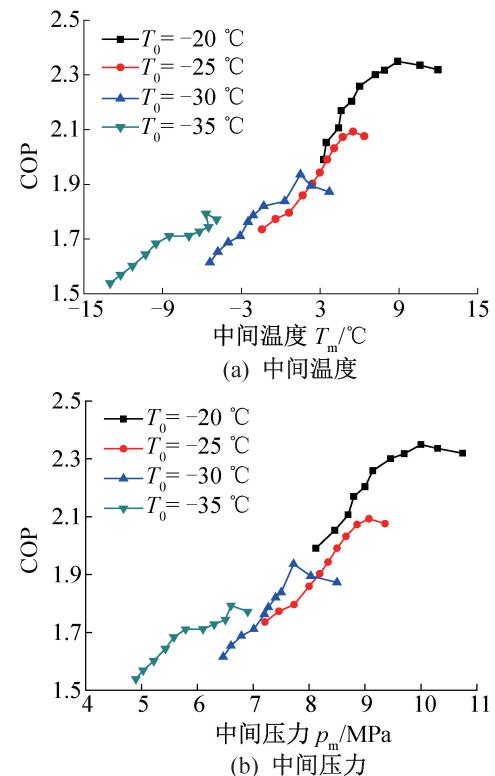


图6 COP 随中间温度和中间压力的变化

Fig.6 The COP changes with the medium temperature and medium pressure

## 2.6 输气量比对 COP 的影响

图7所示为不同蒸发温度下COP随输气量比的变化。

变化。由图 7 可知,当输气量比不变时,COP 随蒸发温度的下降而减小。当蒸发温度和冷凝温度不变,输气量比在 1.25~3.33 范围内增大,蒸发温度  $T_0$  分别为 -20、-25、-30、-35 ℃ 时,COP 先增大后减小,最大值依次为 3.374、2.092、1.997、1.823,最大增加 20.59%,最大 COP 对应的输气量比分别为 1.819、2.221、2.499、2.856。当蒸发温度不变时,输气量比随着高压级压缩机频率的减小而增大。系统制冷量、压缩机排气压力、吸气压力以及热交换器的面积均对系统制冷量有影响。当高压级压缩机频率减小时,系统吸、排气压力先逐渐达到最佳的平衡状态,同时换热器换热效果逐渐上升,使系统运行工况达到最佳点,即 COP 达到最大值,随后系统吸、排气压力以及换热器换热效果脱离此最佳状态,COP 又缓慢减小。

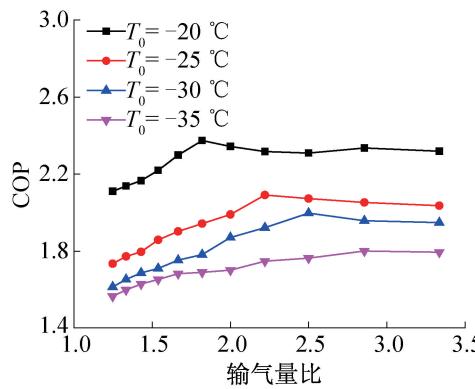


图 7 性能系数 COP 随输气量比的变化

Fig.7 The system coefficient of performance (COP) changes with the ratio of input gas

图 8 所示为系统最佳 COP 情况下,输气量比随蒸发温度的变化。由图 8 可知,蒸发温度每降低 5 ℃,对应的输气量比不断增大,增幅依次为 22.10%、12.52%、14.29%。这是因为随着蒸发温度的降低,蒸发压力也降低,此时压缩机频率不变,制冷剂质量流量减小,故高压级压缩机输气量减小,中间压力降低,使高压级蒸发压力降低,吸气量和转速均下降,输气量减小的幅度降低,所以输气量比随蒸发温度的降低而增大。综上所述,在变工况情况下,蒸发温度和输气量比对系统 COP 均有较大影响,由于蒸发温度不易调节,故可根据不同蒸发温度和制冷量需求,调节合适的输气量比,使系统运行达到最佳状态。实际工程中,可参考以上数据进行系统设计,以达到性能最优化。

### 3 结论

本文在冷凝温度为 30 ℃,蒸发温度在 -35~ -20 ℃ 时,保持低压级压缩机频率不变,通过调节高压级

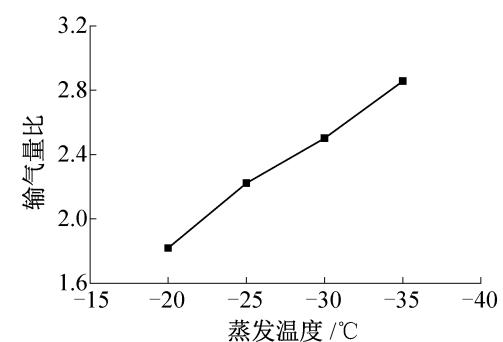


图 8 最佳 COP 下输气量比随蒸发温度的变化

Fig.8 The ratio of input gas changes with evaporating temperature under the optimal COP

压缩机频率(30~80 Hz,每隔 5 Hz 调节一次),来改变低高压级压缩机输气量比(3.33~1.25),分析输气量比对双级压缩制冷系统运行特性的影响,得到如下结论:

- 1) 固定工况下,制冷系统的中间压力(中间温度)持续增加,系统制冷量减小,性能系数 COP 先升高后减小,最大可增加 20.59%,且存在最佳值。
- 2) 变工况下,当输气量比不变时,中间温度(中间压力)随蒸发温度的降低而下降,压缩机功耗增加,系统制冷量减少,COP 减少。系统在最佳 COP 下运行时,输气量比最佳值随蒸发温度的减小而增大。
- 3) 分析输气量比与系统 COP 的影响可知,不同工况下,均存在最佳输气量比,使系统 COP 达到最大值。实际工程中,可根据不同工况和制冷量需求,及时调节合适的输气量比,使系统运行达到最佳状态,实现制冷系统性能的优化。

### 参考文献

- [1] BERTSCH 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.
- [2] JEKEL T, REINDL D. Single or two-stage compression [J]. ASHRAE Journal, 2008, 50(8): 46~51.
- [3] 原惠惠. 双级压缩制冷系统设计及实验研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016. (YUAN Huihui. Design and experimental research on two-stage compressive refrigerating system [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.)
- [4] 蒋爽. 建筑供暖用双级压缩空气源热泵系统节能的关键问题研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017. (JIANG Shuang. Study on the key issues of heating energy savings for two-stage vapor compression air source heat pumps in buildings [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.)

- [5] OUADHA A, ENNACER M, ADJLOUT L, et al. Exergy analysis of a two-stage refrigeration cycle using two natural substitutes of HCFC22[J]. International Journal of Exergy, 2005, 2(1): 14–30.
- [6] 孙刚, 陈汝东. A. C. Cleland 公式在氨制冷循环最佳中间温度求解中的应用[J]. 流体机械, 2004, 32(2): 56–58. (SUN Gang, CHEN Rudong. Application of A. C. Cleland polynomials for calculation of optimal middle-temperature in ammonia refrigeration[J]. Fluid Machinery, 2004, 32(2): 56–58.)
- [7] 刘圣春, 马一太, 刘秋菊. CO<sub>2</sub> 跨临界循环双级压缩系统最优中间压力分析[J]. 流体机械, 2008, 36(4): 16–18, 44. (LIU Shengchun, MA Yitai, LIU Qiuju. Analysis about optimal intermediate pressure of CO<sub>2</sub> transcritical two-stage compression system[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(4): 16–18, 44.)
- [8] 万锦康, 张青, 曹广荣, 等. 半封闭单机双级压缩机制冷系统的经济性与可靠性分析[J]. 流体机械, 2008, 36(6): 80–82, 49. (WAN Jinkang, ZHANG Qing, CAO Guangrong, et al. Analysis of economization and reliability of two-stage compression refrigeration system[J]. Fluid Machinery, 2008, 36(6): 80–82, 49.)
- [9] 费继友, 王英邗, 张文强, 等. 基于中间补气压缩机的地暖系统制热性能实验研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(5): 57–62. (FEI Jiyou, WANG Yinghan, ZHANG Wenqiang, et al. Experimental investigation on heating performance of under-floor heating system based on vapor-injection compressor[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(5): 57–62.)
- [10] 孙晋飞, 朱冬生, 尹应德, 等. 单缸补气转子式压缩机在热泵系统中制热性能[J]. 化工学报, 2017, 68(9): 3551–3557. (SUN Jinfei, ZHU Dongsheng, YIN Yingde, et al. Heating performance of single cylinder vapor injection rotary compressor applying in air-source heat pump system[J]. CIESC Journal, 2017, 68(9): 3551–3557.)
- [11] 王国梁, 姜培学. 具有补气特性的跨临界二氧化碳制冷系统理论研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008(2): 224–227. (WANG Guoliang, JIANG Peixue. Theoretical investigation of trans-critical carbon dioxide refrigeration system with a compressor economizer[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008(2): 224–227.)
- [12] 金旭, 王树刚, 张腾飞, 等. 变工况双级压缩中间压力及其对系统性能的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(1): 96–102. (JIN Xu, WANG Shugang, ZHANG Tengfei, et al. Intermediate pressure and its effect on performance of two-stage compression system with variable operating mode[J]. CIESC Journal, 2012, 63(1): 96–102.)
- [13] 金旭, 蒋爽, 王树刚. 双级压缩中间压力与变工况参数关系的理论分析[J]. 流体机械, 2014, 42(12): 29–33. (JIN Xu, JIANG Shuang, WANG Shugang. Theoretical analysis on the relations between intermediate pressure and off-design parameters of two-stage compression system[J]. Fluid Machinery, 2014, 42(12): 29–33.)
- [14] ERIC B, RATT S, STEVEN B. A generalized analysis for cascading single fluid vapor compression refrigeration cycles using an entropy generation minimization method[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23(5): 353–365.
- [15] 乔亦圆, 杨东方, 曹锋, 等. R134a/R23 复叠制冷系统级间容量比的优化分析[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 104–110. (Qiao Yiyuan, YANG Dongfang, CAO Feng, et al. Optimization of compressors displacement ratio in R134a/R23 cascade refrigeration system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 104–110.)
- [16] 金旭. 双级压缩空气源热泵采暖系统实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (JIN Xu. Experimental research of a two-stage air-source heat pump for residential heating[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.)
- [17] 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.)
- [18] 霍猛. 双级压缩空气源热泵供暖系统实验及研究模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (HUO Meng. Experimental research and simulation of a two-stage air source heat pump for residential heating[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.)
- [19] 刘雄, 姜乔乔, 郭浩波. CO<sub>2</sub> 双级压缩制冷热泵循环性能研究[J]. 流体机械, 2011, 39(8): 69–73. (LIU Xiong, JIANG Qiaojiao, GUO Haobo. Performance analysis of CO<sub>2</sub> two-stage compression refrigeration heat pump cycle[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(8): 69–73.)
- [20] 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): 21–24, 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): 21–24, 29.)
- [21] 王沣浩, 王志华, 郑煜鑫, 等. 低温环境下空气源热泵的研究现状及展望[J]. 制冷学报, 2013, 34(5): 47–54. (WANG Fenghao, WANG Zhihua, Zheng Yuxin, et al. Research progress in low and prospect of air source heat pump temperature environment[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(5): 47–54.)
- [22] 陈孚江, 张云, 姜钦青, 等. 低温环境下运行参数对两级压缩空气源热泵性能的影响[J]. 流体机械, 2017, 45(1): 141–145.

- (3): 56–60, 74. (CHEN Fujiang, ZHANG Yun, JIANG Qinling, et al. Influence of operating parameters on performance of two-stage compression air source heat pump system at low temperature [J]. *Fluid Machinery*, 2017, 45 (3): 56–60, 74.)
- [23] HEO J, JEONG M W, KIM Y. Effects of flash tank vapor injection on the heating performance of an inverter driven heat pump for cold regions [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(4): 848–855.
- [24] TORRELLA E, LARUMBE J A, CABELLO R, 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.
- [25] 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*, 2008, 32(2): 307–315.
- [26] 武传志. 定流量与变流量双级压缩制冷系统的实验研究 [D]. 天津: 天津商业大学, 2016. (WU Chuanzhi.

(上接第135页)

- [17] FENG Pengming, WANG Wenwu, DLAY S, et al. Social force model-based MCMC-OCSVM particle PHD filter for multiple human tracking [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, 19(4): 725–739.
- [18] SCHÖLKOPF B, PLATT J C, SHAWE-TAYLOR J, et al. Estimating the support of a high-dimensional distribution [J]. *Neural Computation*, 2014, 13(7): 1443–1471.
- [19] HU Yunpeng, CHEN Huanxin, XIE Junlong, et al. Chiller sensor fault detection using a self-adaptive principal component analysis method [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 54: 252–258.
- [20] 胡云鹏. 基于主元分析的传感器故障检测盲区预测 [J]. *化工学报*, 2017, 68(4): 1509–1515. (HU Yunpeng. Blind zone prediction for PCA-based sensor fault detection [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(4): 1509–1515.)
- [21] HU Yunpeng, CHEN Huanxin, LI Guannan, et al. A statistical training data cleaning strategy for the PCA-based chiller sensor fault detection, diagnosis and data reconstruc-

Comparative study on two-stage compression refrigeration system with constant flow and variable flow [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2016.)

- [27] 金旭. 变容量双级压缩热泵级间匹配耦合特性 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013. (JIN Xu. Inter stage matching and coupling characteristics in a two-stage compression heat pump system with variable capacity [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.)

### 通信作者简介

杨永安,男,高级工程师,天津商业大学机械工程学院,+86 13323322332,E-mail:yyan@tjcu.edu.cn。研究方向:制冷系统节能及优化。

### About the corresponding author

Yang Yongan, male, senior engineer, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, +86 13323322332, E-mail: yyan@tjcu.edu.cn. Research fields: energy saving and optimization of refrigeration system.

tion method [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 112: 270–278.

- [22] XIAO Yingchao, WANG Huangang, ZHANG Lin, et al. Two methods of selecting Gaussian kernel parameters for one-class SVM and their application to fault detection [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 59: 75–84.

### 通信作者简介

李冠男,男,博士,武汉科技大学城市建设学院,13545221926, E-mail:leegna@163.com。研究方向:暖通空调制冷系统数据挖掘和性能分析。

### About the corresponding author

Li Guannan, male, Ph. D., School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, +86 13545221926, E-mail: leegna@163.com. Research fields: data mining and performance analysis for heating, ventilating, air-conditioning and refrigeration (HVAC & R) systems.