

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.007

基于电子膨胀阀调节的制冷系统湿压缩特性研究

何俊, 陶乐仁, 虞中旻

(上海理工大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200093)

摘要: 为了对压缩机热力性能进行优化,改善排气温度,提升VRF制冷系统循环稳定性,基于电子膨胀阀的调节特性,通过在变频工况下改变电子膨胀阀的开度进行了压缩机的不完全湿压缩循环试验研究。实验结果表明:较低频率下的电子膨胀阀可调范围较小,但压缩机少量吸气带液可对调节难度略有改善;此外,吸气带液阶段的压缩机电效率与容积效率仅下降约0.1%,而排气温度改善效果显著。

关键词: 电子膨胀阀;压缩机;湿压缩;排气温度;电效率;容积效率

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2018)05-0034-06

Study of Wet Compression Characteristics of Refrigeration System Based on Electronic Expansion Valve Adjustment

HE Jun, TAO Leren, YU Zhongyang

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

Abstract: In order to optimize the thermodynamic performance of the compressor, improve the discharge temperature and the cycle stability of the VRF refrigeration system, the compressor's incomplete wet compression cycle test was carried out by changing the opening degree of the electronic expansion valve under variable frequency condition on the basis of the adjustment characteristics of the electronic expansion valve. The experimental results show that the electronic expansion valve at lower frequencies has a smaller adjustable range. However, a small amount of the liquid in the suction process of the compressor can slightly improve the adjustment difficulty. In addition, the electrical efficiency and volumetric efficiency of the compressor at the suction stage only decrease by about 0.1% but the effect of improving compressor discharge temperature is remarkable.

Keywords: electronic expansion valve; compressor; wet compression; exhaust temperature; electrical efficiency; volumetric efficiency

随着经济的迅猛发展和生活水平提高,能源与环境成为人们日益关注的问题,其中制冷空调的能源消耗已成为人类重点关注的问题之一^[1-2]。电子膨胀阀作为一种通过施加电信号来控制电压(电流),进而实现调节进入制冷装置的制冷剂流量的电子元件,在变制冷剂流量(variable refrigerant flow, VRF)制冷系统中的节能效果显著。由于电信号调节响应迅速,控制工况范围宽等优势,电子膨胀阀被大量应用于制冷(热泵)工业^[3-4]。

压缩机的吸气量是电子膨胀阀控制回路的关键变量^[5],通过对压缩机进行变吸气量调节可展现压缩机

不同的热力性能,继而再对整个制冷系统的循环性能产生影响。实际上,制冷循环的多变压缩过程总是存在不稳定性振荡及各种不可逆的损失^[6],为了减小此类损失实现压缩机的高效运转,同时优化压缩机的排气温度,研究者们基于电子膨胀阀的优化调节,进行了大量的实验。王海涛等^[7]在电子膨胀阀不同开度下对PV/T-SAHP系统的动态性能进行了实验,发现随着电子膨胀阀开度增加,压缩机功率出现振动,并由此提出了该系统的稳定性原理;平良繁治等^[8]针对制冷系统的湿压缩能力对R32涡旋式压缩机进行了可靠性研究,研究结果表明:当压缩机吸气干度为0.75以上

收稿日期:2018-05-12;修回日期:2018-07-12

基金项目:上海市动力工程多相流动与传热重点实验室项目(13DZ2260900)。

第一作者简介:何俊(1993),男,四川梓潼人,硕士研究生,主要研究方向为制冷系统的优化。E-mail:735353105@qq.com

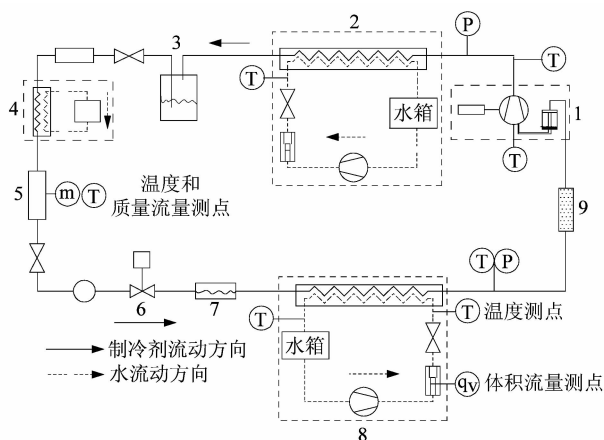
时,压缩机能较好的运转。张利等^[9-10]研究了湿压缩对压缩机润滑油的影响,并在此基础上提出了吸气带液降低压缩机排气温度的方法。杨丽辉等^[11]通过对电子膨胀阀的调节,研究了转子式压缩机在不完全湿压缩时的系统性能,实验结果表明:R22 制冷剂的理论压缩效率提高,且在一定的空调工况下,压缩机少量吸气带液时的系统制冷量和制冷性能系数(coefficient of performance, COP)平均可提高 2%~4%,但并未深入研究电子膨胀阀调节下的压缩机热力性能的优劣。陶宏等^[12]利用第二制冷剂热量法,通过对电子膨胀阀的开度控制,进行了压缩机性能的不完全湿压缩研究,结果表明:在压缩机负吸气过热时,容积效率有所降低,但未研究吸气状态与压缩机效率的对应关系。

课题组通过调节电子膨胀阀的开度对压缩机进行不同吸气状态的控制,在变吸气状态下分析了压缩机容积效率及电效率的性能及其对应关系,在降低排气温度的同时,实现压缩机平稳、高效的运行,并将电子膨胀阀的调节效益最大化。

1 实验装置及方法

1.1 实验装置

VRF 制冷循环实验装置如图 1 所示。



1—变频滚动转子式压缩机(自带气液分离器);2—冷凝器及其冷却水循环系统;3—储液罐;4—低温恒温反应浴及其过冷循环系统;5—科氏力质量流量计;6—电子膨胀阀;7—可视管 I;8—蒸发器及其冷冻水循环系统;9—可视管 II。

图 1 实验装置图

Figure 1 Experimental installation schematic diagram

图 1 中制冷剂为 R32,压缩机 1 为变频滚动转子式压缩机。采用科氏力质量流量计测定制冷剂质量流量 q_m ,同时也可以测出流量计中制冷剂侧的温度 T_v 和压力 P_v 。压缩机吸气口前置了可视管 II,石英玻璃管材质,方便观察记录压缩机吸入时制冷剂的状态,以

判别是否吸气带液。装置 6 为直动式电子膨胀阀,其通过步进电机提供的逻辑数字信号来控制内部的螺纹,从而驱动阀针运动,实现对阀门流量的控制。由于电机转子全部封闭在阀体内部,减少制冷剂的泄露损失,而电机的定子卡套在阀体外部,安装和拆卸更为方便。电子膨胀阀的驱动控制电路如图 2 所示。

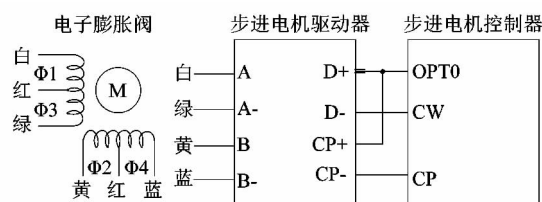


图 2 电子膨胀阀的驱动控制电路

Figure 2 Driving control diagram of electronic expansion valve

1.2 实验方法

VRF 制冷系统可通过改变电子膨胀阀开度来改变系统循环制冷剂流量,于是模拟常规空调运行工况进行实验。设定外部工况,根据电子膨胀阀的调节特性,通过调节阀开度来实现压缩机吸气状态的变化,期间实时记录压缩机的 2 个主要性能指标——容积效率和电效率,及其他参数,并以不同压缩机频率的实验工况对照以保证结论的完整性。具体实验工况如表 1 所示。

表 1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

工况	冷冻水出水 温度/℃	冷却水出水 温度/℃	过冷度/℃
1#	7	37	7
2#	11	37	7

1.3 计算公式

图 2 中可测参数有:R32 制冷剂循环流量 q_m 、蒸发器出口温度 T_{ex} 、压缩机耗功 W_{in} 、压缩机排气压力 P_d 及吸气压力 P_{suc} 。此外,由压缩机技术手册可查得该压缩机理论排量 V 与额定频率 f 。以上测点值通过 Prefprop 9.0 物性软件调用,继而得到进气压力 P_{suc} 下的饱和制冷剂温度 $T_{ex,sat}$,压缩机进气比焓 h_{suc} ,排气比焓 $h_{d,is}$,比焓 s_{ex} 及进气比容 v_{suc} 等参数:

$$\text{压比 } P_r = P_d / P_{suc}; \quad (1)$$

$$\text{过热度 } T_{sh} = T_{ex} - T_{ex,sat}; \quad (2)$$

$$\text{吸气比焓 } h_{suc} = f(P_{suc}, T_{ex}); \quad (3)$$

$$\text{吸气比焓 } s_{ex} = f(P_{suc}, T_{ex}); \quad (4)$$

$$\text{等熵压缩排气比焓 } h_{d,is} = f(P_d, s_{ex}); \quad (5)$$

$$\text{电效率 } \eta_{is} = q_m \cdot (h_{d,is} - h_{suc}) / W_{in}; \quad (6)$$

$$v_{\text{suc}} = f(P_{\text{suc}}, h_{\text{suc}}); \quad (7)$$

$$\eta_v = q_m \cdot v_{\text{suc}} \cdot 1\,000 / (V \cdot f)。 \quad (8)$$

2 实验结果与分析

2.1 电子膨胀阀的调节特性

图3和图4反映了VRF制冷系统中电子膨胀阀的调节特性。可以看到,2种工况下随着电子膨胀阀开度的增加,吸气状态的变化趋势大体一致,电子膨胀阀开度均随着压缩机运行频率的增大而递增;随着吸气状态由过热逐渐变为吸气带液,1#工况较低频率时的阀开度调节范围明显小于较高频率。40 Hz时的阀开度控制范围为0.1%~0.2%,较高频率时的阀开度控制范围为0.1%~0.7%。故对于整个吸气状态的改变过程来说,较低频率下的电子膨胀阀控制对系统参数影响更大。此外,吸气过热较大时,电子膨胀阀可调范围较大,随着过热减小,可调范围迅速减小,这对制冷系统的流量控制是不利的,受控范围越小,越难控制,容易产生超调现象。而当吸气状态转为吸气带液的初始阶段时,电子膨胀阀可调范围再一次增大,意味着该区间的操控性再次增强,宜进行少量吸气带液的实验探究。

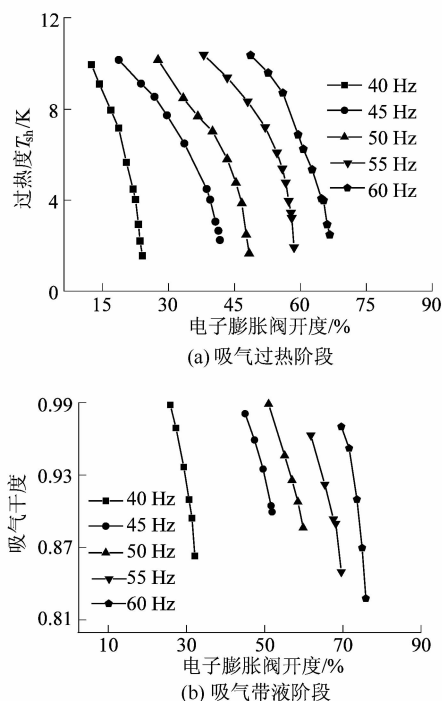


图3 1#工况吸气过热阶段和吸气带液阶段电子膨胀阀的开度变化情况

Figure 3 Under condition 1#, opening trend of electronic expansion valve in suction overheating stage and in inhaling liquid stage

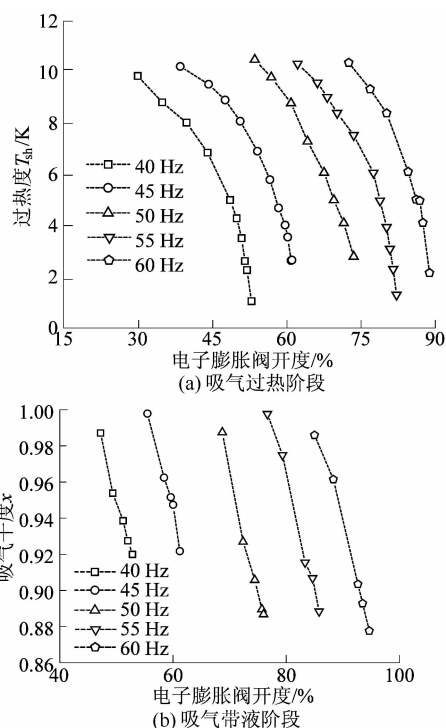


图4 2#工况吸气过热阶段和吸气带液阶段电子膨胀阀的开度变化情况

Figure 4 Under condition 2#, opening trend of electronic expansion valve in suction overheating stage and in inhaling liquid stage

2#工况在较低频率时的阀开度控制范围明显增大,这是因为冷冻水出口温度提升了,蒸发温度及压力升高,吸气比容随之降低,制冷剂质量流量减小,则为了平衡蒸发器的热负荷,电子膨胀阀增加了其控制区间,于是阀开度范围增大,电子膨胀阀的调控被优化。

2.2 基于电子膨胀阀调节的压缩机性能分析

图5所示为1#和2#工况下,压缩比随压缩机吸气口制冷剂状态变化的趋势。保持冷冻水与冷却水循环水温不变,逐渐增大电子膨胀阀的开度,过热度随之下降。如图所示,1#工况不同频率下的压缩比变化参数与2#工况一致,随着过热度逐渐减小,压缩比均呈整体下降趋势,且在湿压缩阶段仍有小幅下降。这是因为随着电子膨胀阀的开度不断增大,系统内循环的制冷剂流量增加,从而使得蒸发器内两相区增长,换热加剧,制冷剂侧与水侧换热温差迅速减小,同时蒸发压力升高,压比相应下降。在湿压缩($0.8 < x < 1.0$)阶段,压缩机吸气口已出现少量液滴,此时蒸发器内几乎呈液相,随着电子膨胀阀开度的持续增加,蒸发压力仅略有上升,于是可见,压缩比在吸气带液状态仍有下降趋势,由此带来的理论压缩率提高也将对系统性能产

生潜在助益。此外可以看到,1#和2#工况在较高过热度运行下,压缩机频率几乎对压比不造成影响;而在湿压缩阶段,频率越高,系统压缩比越高,显然,较低频率运行也将降低压比,优化系统循环性能。

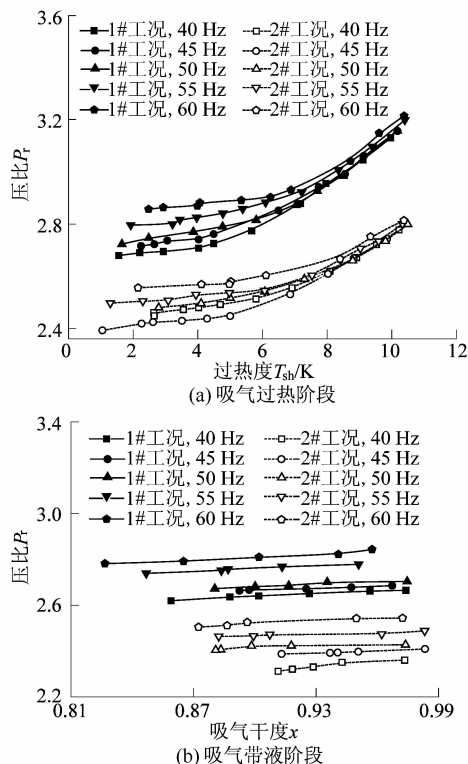


图5 1#和2#工况吸气过热阶段和吸气带液阶段的压比变化情况

Figure 5 Under condition 1# and 2#, trend of pressure ratio in suction overheating stage and in inhaling liquid stage

图6所示为1#和2#工况下,排气温度随压缩机吸气口制冷剂状态变化的趋势。在1#和2#工况下,压缩机排气温度均随着电子膨胀阀开度的增大而减小,且在湿压缩阶段,排气温度有更加明显的下降趋势,较过热阶段约提升30%,这一能力减缓了压缩机腔体内各类产物的化学反应速率,从而极大地提升了压缩机的运行性能与寿命;同时不同吸气状态的排气温度随压缩机频率变化趋势一致,均随之增大而增大,这是因为频率越高,压缩机运转速度越快,所产生的功耗就越大;由图5可知,压缩机频率越大,压缩比越大,而根据排气温度的理论计算式可知,压缩机吸气温度越高,压比越大,则排气温度越大。因此综合以上两点,该趋势便能够被较好地理解,同时也能为实际工程运作提供参考。

$$T_d = T_{suc} P_r^{\frac{k-1}{k}} \quad (9)$$

式中: T_d 为排气温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{suc} 为吸气温度, $^{\circ}\text{C}$; k 为气体的绝热指数。

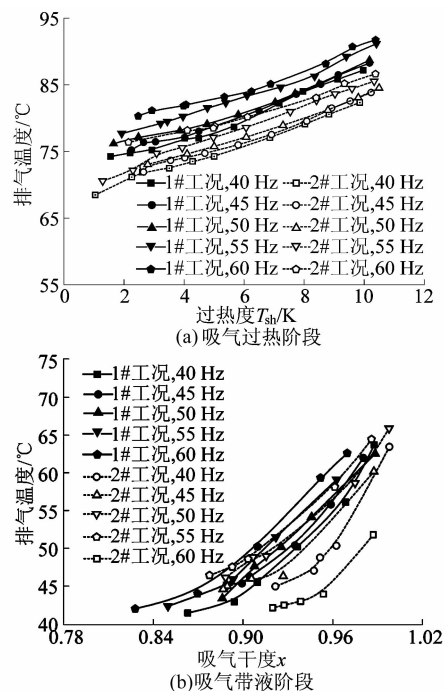


图6 1#和2#工况下吸气过热阶段和吸气带液阶段的排气温度变化情况

Figure 6 Under condition 1# and 2#, trend of discharge temperature in suction overheating stage and in inhaling liquid stage

图7和图8所示为1#和2#工况下,电效率随压缩机吸气口制冷剂状态变化的趋势。在不同频率下,各工况电效率均呈先增大后减小的趋势,且频率愈低,压缩机电效率愈高。随着过热度降低至“0”,压缩机电效率缓慢上升,并在相应的过热区间存在极值点,而自压缩机吸气带液伊始,电效率便迅速下降,且较高频率下的趋势更加明显。这是因为随着湿压缩量的增加,压缩机吸气比容持续减小,同时,进入压缩腔内的微量液滴稀释了部分润滑油,影响了正常的润滑和密封作用,从而在运行中增加了轴承、转子的磨损,加剧了压缩机震动^[13],一定程度上降低了机械效率,也降低了电效率;当压缩机处于较高频率运行时,系统不可逆损失增加,降低了等熵压缩效率,因此在额定频率以上(50和60 Hz)运行时,湿压缩段的电效率下降趋势近乎线性。此外,低频率时的电效率降幅绝对值甚至超过了过热段增幅绝对值的51%,但对于微量湿压缩阶段($0.98 < x < 1$)来说,其电效率仅下降了0.1%,若运行在对电效率要求不太严苛的情况下,考虑到吸气带液方法降低排气温度的优越性及可靠性,湿压缩不失

为综合之下的一个提升系统性能的较好选择。

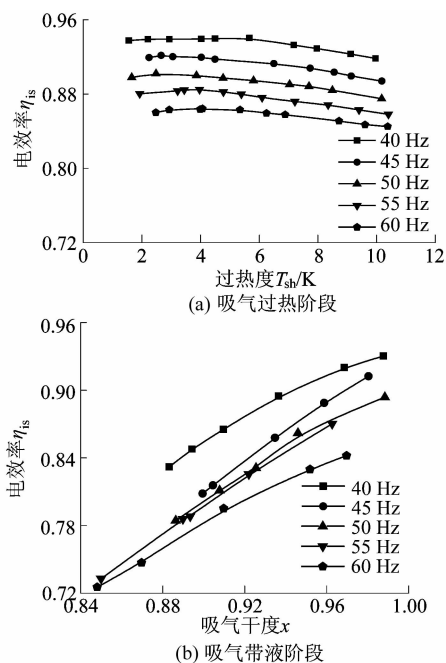


图7 1#工况下吸气过热阶段和吸气带液阶段的电效率变化情况

Figure 7 Under condition 1#, trend of electrical efficiency in suction overheating stage and in inhaling liquid stage

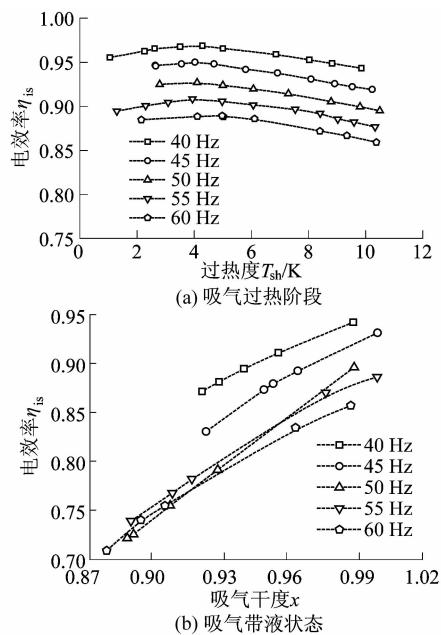


图8 2#工况下吸气过热阶段和吸气带液阶段的电效率变化情况

Figure 8 Under condition 2#, trend of electrical efficiency in suction overheating stage and in inhaling liquid stage

图9和图10所示为1#和2#工况下,容积效率随压缩机吸气口制冷剂状态变化的趋势。可以看到,1#和2#工况下压缩机容积效率均有相似的变化。在吸气过热阶段,容积效率呈先增大后减小的基本趋势,但整体观之,容积效率在此阶段基本保持平稳。由容积效率定义式可知,其主要与容积系数 λ_v 、压力系数 λ_p 、温度系数 λ_T 、泄漏系数 λ_l 及回流系数 λ_h 有关。故可由此分析得:由于滚动转子式压缩机相对余隙容积较小,且整个膨胀过程是在极短的时间内完成的,加之制冷工况下压力较高,可以认为膨胀过程是绝热的,温度系数虽略有微增,但变化也依然不大;滚动转子式压缩机不具有吸气阀,减小了压缩过程中的吸气压力损失,压力系数近似为1;同时,由于造成吸气回流的主要因素——吸气孔口前边缘角,其大小仅有 $30^\circ \sim 35^\circ$,基本不造成其间的容积变化,固可近似认为回流系数为1。而在湿压缩阶段,容积效率呈现大幅下降趋势,但当湿压缩量较小($0.98 < x < 1$)时,下降仅约0.1%。压缩机吸入的微量液滴密度相对较大,其在压缩机腔体内汽化闪发会引起非常态的容积膨胀,降低容积系数;同时由于润滑油得到稀释,其密封和润滑作用有一定程度的降低,从而增加了压缩机的泄漏量。虽然部

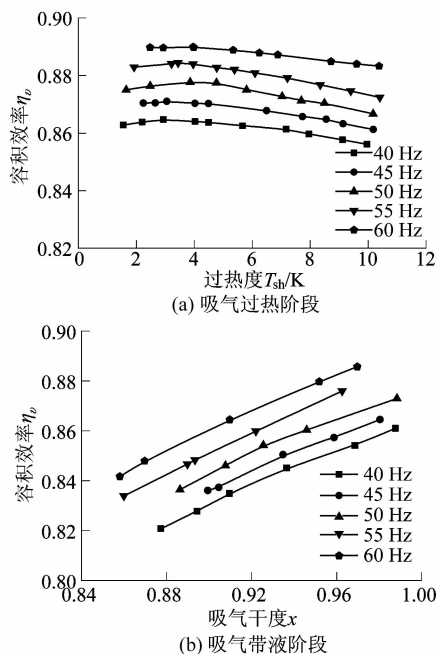


图9 1#工况下吸气过热阶段和吸气带液阶段的容积效率变化情况

Figure 9 Under condition 1#, trend of volumetric efficiency in suction overheating stage and in inhaling liquid stage

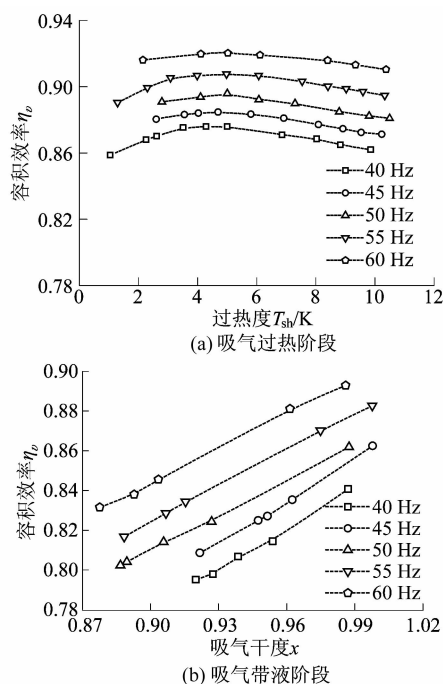


图 10 2#工况下吸气过热阶段和吸气带液阶段的容积效率变化情况

Figure 10 Under condition 2#, trend of volumetric efficiency in suction overheating stage and in inhaling liquid stage

分液滴在腔体内蒸发会带走机壳热量,提升温度系数,但相较于前两者效果甚微。因此,容积效率在湿压缩阶段呈显著下滑态势。

$$\eta_v = \lambda_v \lambda_p \lambda_T \lambda_l \lambda_h \quad (10)$$

容积系数 λ_v 主要表征了余隙容积对输气量的影响,且有:

$$\lambda_v = 1 - c \left[P_r^{\frac{1}{k'}} - 1 \right] \quad (11)$$

式中 k' 为膨胀过程指数。

此外,在同一吸气状态下,压缩机频率越高,容积效率越大,这是因为压缩机的较高频率运行会带动更快速度的制冷剂流动,从而提高了蒸发器内热交换速率,改善了温度系数^[14];同时系统内制冷剂循环流速的增大优化了压缩机回油,减小了泄漏系数,因此,容积效率随频率的增大而增大。

3 结论

笔者基于电子膨胀阀的调节特性,通过调节阀开度来改变滚动转子式压缩机的吸气状态,研究了 VRF 制冷系统中不同吸气状态下压缩机的效率极其运行特性,并得到如下结论:

1) 在吸气过热段,电子膨胀阀的可调范围随过热度减小而减小,而笔者所研究的吸气带液循环可增加调节范围,并大幅改善排气温度,这将为压缩机的运行效率优化及使用寿命的延长带来的潜在的助益。

2) 在吸气带液阶段时,电子膨胀阀开度虽有增加,但增加幅度尚小,且较低频率下的电子膨胀阀可调范围更小,操控难度增加,容易导致超调失稳,文中提出通过提高冷冻水出口水温来改善这一状况,但效果仍然差强人意,往后可对此进行更为深入的研究。

3) 文中基于前人对吸气过热时压缩机的热力性能分析,加入了吸气带液循环,研究发现,该阶段容积效率与电效率有明显下降趋势,但在微量湿压缩阶段 ($0.98 < x < 1$),二者下降仅约 0.1%。故在对压缩机运行效率要求不太严苛的情况下,可运用湿压缩降低排气温度,优化系统性能。

参考文献:

- [1] 邱京昊. 浅谈大型数据中心制冷节能与控制[J]. 智能建筑与智慧城市, 2018(4): 56-58.
- [2] 张朝晖, 陈敬良. 新的十年, 关于节能环保发展方向的思考[J]. 制冷与空调, 2011, 11(1): 1-8.
- [3] 彦启森. 空气调节用制冷技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 25-28.
- [4] 江明旒, 王如竹, 吴静怡, 等. 电子膨胀阀的应用领域及关键技术[J]. 制冷与空调, 2009, 9(1): 100-104.
- [5] 沈希. 制冷压缩机制冷量测控系统若干理论问题与实践[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2006: 8-9.
- [6] 王超, 陶乐仁, 杨丽辉, 等. 制冷系统湿压缩时吸气干度控制方法的实验研究[J]. 制冷学报, 2017, 38(2): 34-39.
- [7] 王海涛, 季杰, 裴刚, 等. 电子膨胀阀开度对 PV/T-SAHP 系统性能的影响[J]. 太阳能学报, 2009, 30(2): 202.
- [8] 平良繁治, 田中顺一郎, 芝池幸治. 冷冻设备: 1379854A [P]. 2002-11-13.
- [9] 张利, 陆颖翀. 吸气干度对 R32 压缩机可靠性影响研究[J]. 电器, 2013(增刊1): 705.
- [10] 张利, 杨敏, 张蕾. 滚动转子式 R32 压缩机开发[J]. 制冷与空调, 2015, 15(2): 78.
- [11] 杨丽辉, 陶乐仁, 李芳芹, 等. 压缩机少量吸气带液对制冷系统性能的影响[J]. 制冷学报, 2014, 35(5): 87.
- [12] 陶宏, 杨军, 刘春慧, 等. 吸气过热度对滚动转子压缩机性能影响的实验研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(6): 29.
- [13] 田茂诚, 林颐清, 程林, 等. 汽-水换热器内流体诱导振动强化传热试验[J]. 化工学报, 2001, 52(3): 257-261.
- [14] 陈华俊, 马国远, 石文星, 等. 变频滚动转子压缩机容积效率的频率修正方法[J]. 流体机械, 2001, 29(10): 12-19.