

文章编号:0253 – 4339(2018) 03 – 00058 – 07
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2018. 03. 058

R32 变频滚动转子压缩机变工况模型及运行特性

虞中旻 陶乐仁 何俊 袁朝阳

(上海理工大学制冷与低温工程研究所 上海 200093)

摘 要 本文研究了 R32 变频滚动转子式制冷系统,实验分析了压缩机运行频率、吸排气压比、蒸发温度对不同吸气状态下压缩机电效率变化规律的影响,并以此建立了适用于吸气过热和吸气带液的压缩机电效率模型。结果表明:1)在相同压比、相同蒸发温度下,压缩机电效率均随电子膨胀阀开度的变大呈线性下降趋势,且吸气带液段斜率大于吸气过热段,即压缩机吸气带液时,压缩机电效率下降程度更大;2)相同压比下,蒸发温度越高,电效率越小;相同蒸发温度下,压缩机压比越高,电效率越小。同时,压缩机压比越高,蒸发温度对压缩机电效率的影响越大;3)验证工况下模型计算值与实际值最大相对误差为 1.83%,最小相对误差为 0.03%,具有较好的可靠性;4)压缩机在低频率下运行时性能会恶化,此时模型的准确性会降低,因此模型适用于压缩机频率高于额定频率、吸气干度大于 0.88 的工况。

关键词 变频压缩机;电效率;模型;两相

中图分类号:TB61⁺1; TB652 **文献标识码:** A

Operation Performance and Modeling for R32 Variable Frequency Rotary Compressor under Varied Operating Conditions

Yu Zhongyang Tao Leren He Jun Yuan Zhaoyang

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

Abstract To model the electrical efficiency of a compressor that can apply a suction refrigerant state under both superheated and two-phase conditions, the performance of an R32 variable frequency rotary compressor, which varies with the compressor frequency, pressure ratio, and evaporating temperature, is analyzed in this paper. The results show that when the system is at a fixed pressure ratio and evaporating temperature, the electrical efficiency linearly decreases with the declining superheated temperature and an increase in suction vapor quality. Moreover, the slope under two-phase suction is above that under superheated suction. In addition, the electrical efficiency of the system at a fixed pressure ratio is inversely proportional to the evaporating temperature, and that of the system at a fixed evaporating temperature is also inversely proportional to the pressure ratio. The more the pressure ratio varies, the smaller the influence of the evaporating temperature. To demonstrate the precision of the model, the theoretical value is compared with the experiment results in this paper. The maximum of relative error is 1.83%, and the minimum is 0.03%. The performance of a compressor at low frequency will deteriorate, which leads to the inaccuracy of the model, and therefore the model is suitable for operating conditions with a frequency higher than the rated frequency and a suction vapor quality higher than 0.88.

Keywords variable frequency compressor; electrical efficiency; modeling; two phase

直流变转速压缩机(以下简称变频压缩机)因频率调节范围大、工作效率高等特点,逐渐得到推广使用。在变频压缩机实际运行过程中,压缩机频率及吸气口制冷剂状态变化较为复杂,导致在不同运行工况下压缩机性能的多变性。对此进行特性分析并建立压缩机模型是研究的热点。

林恩新等^[1]建立了变吸气状态的准动态压缩机模型。结果表明稳定工况时,模型计算所得的质量流

量和输入功率与实验数据误差小于 5%;开机非稳定工况时,误差小于 10%。沈希等^[2]分析了实验结果,采用灰箱方法,将控制模型中的主要参数多项式化,建立压缩机制冷量和功耗与吸排气压力之间的函数关系,表明模型吻合性较好。任峰等^[3]提出用蒸发温度和冷凝温度的二元二次方程建立压缩机性能模型,并通过样机测试验证了模型的可靠性。

马一太等^[4]对几种容积式制冷压缩机进行了计

算,分析了在相同冷凝温度、不同蒸发温度下压缩机电效率的变化规律。结果表明,随着蒸发温度的增大,即压缩机吸排气压比减小时,压缩机电效率总是呈先上升后下降的趋势,并以此建立了压缩机电效率关于压比的四次多项式,但并未研究相同蒸发温度、不同冷凝温度下压缩机电效率。谭峰等^[5]研究了压缩机吸排气压比、排气压力和频率对滚动转子式压缩机电效率的影响,并建立了带频率修正系数的压缩机模型。结果表明,相同压比下,排气压力对电效率的影响较小,运行频率对电效率的影响较大。

近年来,R32 作为 R22 的替代制冷剂,备受关注。R32 具有单位体积制冷量大、系统充注量小等优点,但也存在排气压力和排气温度较高等缺点^[6]。杨丽辉等^[7-8]提出通过压缩机少量吸气带液来降低压缩机排气温度的方法。张利等^[9]研究了吸气干度与润滑油黏度的关系,结果表明:随着吸气干度的降低,润滑油黏度相应减小,影响压缩机的可靠性。因此,研究 R32 压缩机吸气带液时的运行特性及其模型建立尤为重要。

孙帅辉等^[10]模拟研究了 R32 涡旋式压缩机在不同吸气状态下的运行性能,得出当吸气口处于两相态时,性能参数的变化趋势与过热态相比显著不同,但并未进行实验研究。王超等^[11]对 R32 滚动转子式制冷系统进行了实验,得出压缩机吸气态为两相态和过热态时,压缩机电效率随压比的变化规律相同,均与压比成反比。

综上所述,目前针对压缩机变吸气状态时的模型建立与研究较少。本文通过实验,分析压缩机频率、吸气过热度、蒸发温度及吸排气压比对 R32 变频滚动转子式压缩机电效率的影响,研究电效率的变化规律,建立适用于吸气带液段和吸气过热段的稳态电效率模型,并通过实验验证模型的准确性。

1 实验原理及方法

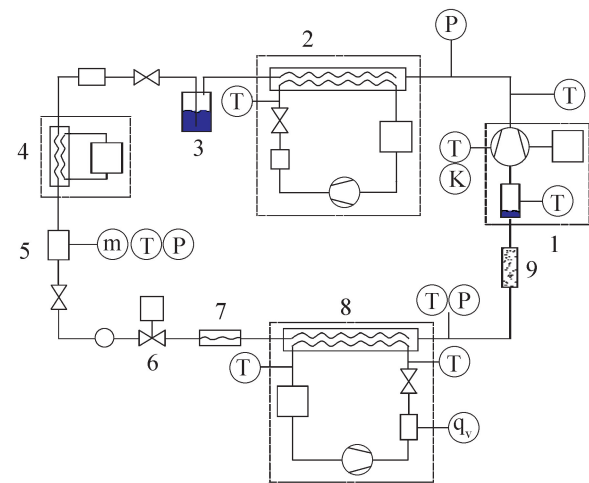
1.1 实验装置

变频滚动转子式制冷系统实验装置如图 1 所示。压缩机选用变频滚动转子式压缩机,自带气液分离器。压缩机频率可由一台通用型变频器设定,频率 f 可调范围为 16.6 ~ 120 Hz,理论排气量 V 为 10.2 mL,制冷剂为 R32。通过数字功率表测量压缩机功耗 W 。安装科氏力流量计测量制冷剂质量流量 m ,精度为 $\pm 0.1\%$ 。

蒸发器与冷凝器为板式换热器,制冷剂在其中与水换热。水循环中装有电加热器,通过调压调功器可控制其加热量。以冷冻水和冷却水出水温度为目标

值,或蒸发温度和冷凝温度为目标值进行自动调控。同时,冷冻水循环和冷却水循环分别装有一个浮子流量计,用来测取水循环体积流量 $q_{v,w}$ 。蒸发器出口装有可视管,可观察蒸发器出口制冷剂流型。电子膨胀阀由步进电机控制器驱动,阀开度可调。

图 1 中 T、P 分别为温度和压力测点。采用内置式铂电阻测量冷冻水出水温度 $T_{w,o}$ 、冷冻水进水温度 $T_{w,i}$ 、压缩机排气温度 T_d 和压缩机吸气温度 T_{suc} ,℃。采用压力变送器测量蒸发器出口压力 p_e 和冷凝器出口压力 p_c ,kPa。



1 变频滚动转子式压缩机(自带气液分离器);2 冷凝器及冷却水循环系统;3 高压储液罐;4 过冷装置;
5 科氏力质量流量计;6 电子膨胀阀;7 可视管 1;
8 蒸发器及冷冻水循环系统;9 可视管 2。

图 1 实验装置原理

Fig. 1 Principle of the experimental installation

1.2 实验方法

滚动转子式压缩机电效率主要与压缩机频率、吸气比体积、吸排气压比、吸气过热度等参数有关,因此通过控制变量法设定实验工况。定压缩机频率 50 Hz 实验工况如表 1 所示,工况 II, $Pr = 3.20$ 时变频实验参数为:蒸发温度为 3℃,蒸发压力为 894.1 kPa,频率分别为 40、50、60、65 Hz。

在各实验工况下,调节电子膨胀阀并观察蒸发器出口可视管内制冷剂流动状态,同时监控数据采集界面,使压缩机吸气过热度由 10 K 变为吸气带液干度 0.90。每个开度下稳定运行 60 min 后,记录 10 min 内数据并取平均值,以保证数据的准确性。

1.3 计算公式

根据实验测得数据,并通过 Rrefprop9.0 软件可以得到蒸发器出口压力 p_e 对应的制冷剂饱和和液态焓 $h_{e,l}$ 、饱和气态焓 $h_{e,v}$ 和蒸发温度 T_e ,电子膨胀阀前焓

值 h_v , 焓值单位均为 kJ/kg。通过以上数据可以算出所需参数。

表 1 定压缩机频率 50 Hz 实验工况

Tab. 1 Experimental condition for compressor frequency at 50 Hz

工况	蒸发温度/℃	蒸发压力/kPa	冷凝温度/℃	冷凝压力/kPa	压比 Pr
I	0	813.1	29	1 878.0	2.30
II	3	894.1	33	2 081.9	
III	5	951.5	35	2 189.8	
I	0	813.1	35	2 189.8	2.70
II	3	894.1	39	2 418.4	
III	5	951.5	42	2 601.4	
I	0	813.1	42	2 601.4	3.20
II	3	894.1	46	2 861.6	
III	5	951.5	48	2 998.9	

压缩机吸排气压比:

$$Pr = p_c/p_e \tag{1}$$

水侧制冷量:

$$Q = q_{v,w} \rho_w c_w (T_{w,i} - T_{w,o}) \tag{2}$$

式中: ρ_w 为水的密度, 由于流经蒸发器内的水温变化较小, 取 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。 c_w 为水的比热容, 取 $4.2 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{℃)}$ 。

系统 COP:

$$COP = Q/W \tag{3}$$

压缩机吸气口焓值:

$$h_{suc} = 1\,000Q/m + h_v \tag{4}$$

压缩机吸气口比熵, kJ/(kg · K):

$$s_{suc} = f(h_{suc}, p_e) \tag{5}$$

等熵压缩排气焓值:

$$h_{dis,is} = f(s = s_{suc}, p_c) \tag{6}$$

吸气干度:

$$x = (h_{suc} - h_v)/(h_{e,v} - h_{e,l}) \tag{7}$$

当吸气干度 $x > 1$ 时, 吸气状态为过热状态。

吸气过热度:

$$T_{sh} = T_{suc} - T_e \tag{8}$$

压缩机电效率:

$$\eta_{el} = (h_{dis,is} - h_{suc})/W \tag{9}$$

2 实验结果分析

图 2 所示为频率 50 Hz 时不同工况下电效率的变化。由图 2 可知, 在各个实验工况下, 压缩机电效

率 η_{el} 均随着电子膨胀阀开度的变大而逐渐减小, 即压缩机吸气状态从过热态至两相态的过程中, η_{el} 不断减小。在压缩吸气过热段, η_{el} 基本呈线性变化, 随着 T_{sh} 的减小而减小; 在吸气带液段, η_{el} 同样呈线性下降趋势, 且斜率大于过热度段斜率, 即压缩机吸气带液时, η_{el} 下降程度更大。对于相同压缩机吸排气压比, 蒸发温度 T_e 越大, η_{el} 越小; 对于相同 T_e , Pr 越大, η_{el} 越小。同时发现, 在相同压缩机吸气状态下, 当 Pr 较高为 3.20 时, 工况 I 的 η_{el} 高于工况 III 的 η_{el} 约 5.8%; 而当 Pr 较低为 2.30 时, 工况 I 的 η_{el} 高于工况 III 的 η_{el} 约 2.8%。即 Pr 越高, T_e 对 η_{el} 的影响越大。

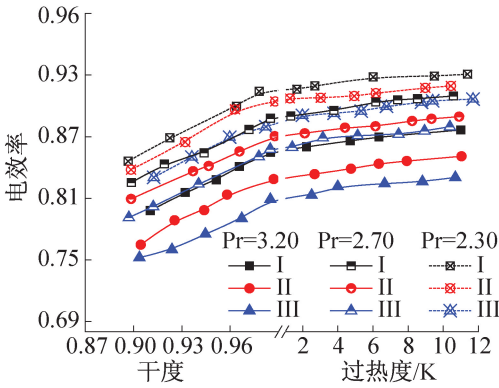


图 2 频率 50 Hz 时不同工况下电效率的变化

Fig. 2 The tendency of electrical efficiency for different conditions at 50 Hz

由于指示效率对电效率的影响较大, 因此各工况参数与指示效率的变化关系可以解释上述实验现象和结果。文献[12]中提出一种滚动转子式压缩机的电效率模型, 指示效率的计算式为:

$$\eta_i = \frac{\lambda_T \lambda_D}{1 - \frac{1.5 \Delta p_{dm} Pr^{-1/k} v_{suc}}{h_{dis} - h_{suc}}} \tag{10}$$

式中: λ_T 为温度系数; λ_D 为泄漏系数; Δp_{dm} 为排气阀平均压力降, kPa; Pr 为压缩机吸排气压比; k 为工质绝热指数; v_{suc} 为压缩机吸气比体积, m^3/kg ; h_{dis} 和 h_{suc} 分别为压缩机排气比焓和吸气比焓, kJ/kg。从式(10)中可以看出, η_i 与 Pr 成反比, 与 v_{suc} 成正比。因此在图 2 中, 在各个工况下压缩机吸气过热时, 当过热度减小, v_{suc} 相应减小, 压缩机电效率 η_{el} 也随之减小。在吸气带液时, 随着干度的降低, v_{suc} 继续减小; 同时, 由于制冷剂液滴进入压缩机腔内, 使部分润滑油溶入其中, 加剧了轴承、轴封的磨损, 因此机械效率减小。在上述两个因素的共同作用下, η_{el} 随吸气干度的降低而减小, 且斜率要大于过热段的变化斜率。在相同压比下, T_e 越大, 蒸发压力越大, v_{suc} 越小, η_{el} 越

小;在相同 T_e 下,即相同蒸发压力下,Pr 与 η_{el} 成反比,这与式(10)中压比与指示效率的关系相吻合。

图 3 所示为 $Pr = 3.20$ 、工况 II 时,不同压缩机频率下 η_{el} 的变化趋势。由图 3 可知,各频率下 η_{el} 的变化趋势相似,且在压缩机吸气过热段和吸气带液段的变化斜率基本相同。同时可知,压缩机频率越高, η_{el} 越低。

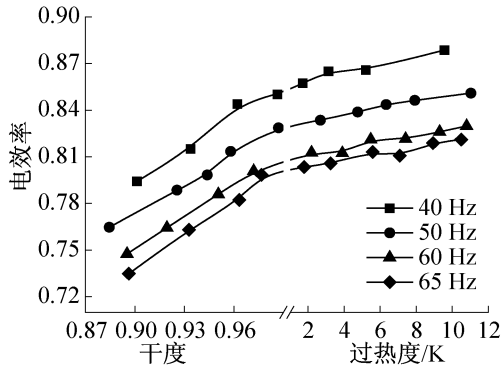


图 3 工况 II, $Pr = 3.20$ 时不同频率电效率的变化

Fig.3 The tendency of electrical efficiency for condition II, $Pr = 3.20$ with different compressor frequency

图 4 所示为压缩机额定频率 50 Hz 运行时不同工况下系统 COP 的变化趋势。由图 4 可知,在相同 Pr 下, T_e 越大,系统 COP 越小;在相同 T_e 下, Pr 越大,系统 COP 越小。这与压缩机电效率的变化规律相同。同时,与 T_e 相比, Pr 对系统 COP 的影响更大。

图 5 所示为 $Pr = 3.20$ 、工况 II 时,不同频率系统 COP 的变化。由图 5 可知,系统 COP 在压缩机不同运行频率下的变化趋势相似,且系统 COP 随着压缩机频率的增大而减小。这与图 3 中压缩机电效率与频率的关系相同。

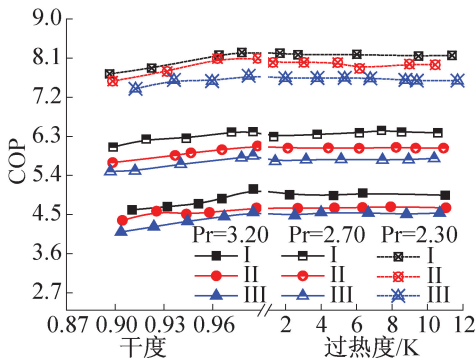


图 4 频率 50 Hz 时不同工况下系统 COP 的变化

Fig.4 The tendency of COP for different conditions at 50 Hz

3 滚动转子式压缩机电效率模型

压缩机电效率 η_{el} 是指等熵效率理论功率与电功

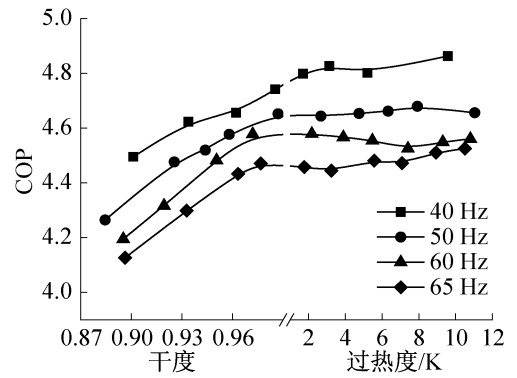


图 5 工况 II, $Pr = 3.20$ 时不同频率系统 COP 的变化

Fig.5 The tendency of COP for condition II, $Pr = 3.20$ with different compressor frequency

率之比,用以评定利用电动机输入功率的完善程度^[4]。 η_{el} 与指示效率 η_i 、加热效率 η_h 、泄漏效率 η_l 、机械效率 η_m 有关^[12]。

指示效率 η_i 用于考虑实际循环与理论循环的输入功率差别。由式(10)可知, η_i 与 λ_T 、 λ_D 、Pr、 v_{suc} 等参数有关。其中, λ_T 与 Pr 有关^[13], v_{suc} 可由蒸发温度 T_e 与吸气过热度 T_{sh} 确定。在压缩机吸气口为过热态时,泄漏系数 λ_D 主要与压比 Pr 有关。综上所述, η_i 与 Pr、 T_e 和 T_{sh} 有关。

加热效率 η_h 表示吸气过程的加热损失,近似取 $\eta_h = \lambda_T$ 。

泄漏效率 η_l 表示气缸泄漏引起的能量损失,近似取 $\eta_l = \lambda_D$ 。压缩机吸气过热时与 Pr 有关。

机械效率 η_m 用于考虑摩擦功率的影响,主要取决于润滑油和制冷剂的黏性,即与混合物的温度和浓度有关。在吸气过热度段,润滑油几乎不溶于气态制冷剂中,因此 η_m 可视为定值。

通过分析并结合图 2 和图 3 可知,在相同压缩机频率下,当压缩机吸气过热时, η_{el} 可近似等于 T_e 、 T_{sh} 和 Pr 的函数,即:

$$\eta_{el} = f(T_e, T_{sh}, Pr) \quad (11)$$

由图 2 可知,压缩机电效率与吸气过热度基本呈线性关系,即当 T_e 与 T_{sh} 为定值时,式(11)可简化为:

$$\eta_{el} = a + bT_{sh} \quad (12)$$

式中: a、b 为常数。当 T_e 与 T_{sh} 不为定值时,式(12)中常数 b 化为与 T_e 、 T_{sh} 有关的二次多项式:

$$\eta_{el} = a_0 + T_{sh}(a_1 + a_2T_e + a_3Pr + a_4T_e^2 + a_5Pr^2 + a_6T_ePr) \quad (13)$$

式(13)即为相同压缩机频率下,吸气过热时压缩机电效率模型。

由图 2 和图 3 可知,在吸气带液段,压缩机电效率与吸气干度成线性关系,且在不同频率下斜率基本

相同,因此建立压缩机吸气带液时压缩机电效率模型:

$$\eta_{el,x} = \eta_{el,x=1} - a(1 - x) \tag{14}$$

文献[14]提出了变频压缩机性能模型的建立方法。它以压缩机某一频率为标准频率,将压缩机电效率和频率标准化,该模型大大减少了实验次数。

$$\eta_{el,o}/\eta_{el,ref} = b_0 + b_1(N/N_{ref}) + b_2(N/N_{ref})^2 \tag{15}$$

结合式(13)~式(15),可以得到滚动转子式压缩机电效率模型。其中, a 、 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 、 b_0 、 b_1 和 b_2 为常数; x 为压缩机吸气干度; $\eta_{el,x=1}$ 为吸气干度为1时的电效率; $\eta_{el,x}$ 为吸气带液时的电效率; N_{ref} 为标准频率,本文取为额定频率50 Hz; N 为目标频率; $\eta_{el,ref}$ 为标准频率下的电效率; $\eta_{el,o}$ 为目标频率下的电效率。

将图2和图3中的数据进行拟合,得到各拟合系数数值如表2所示。

表 2 拟合系数值	
Tab. 2 Fitted value of coefficients	
拟合系数	数值
a_0	8.677×10^{-1}
a_1	1.977×10^{-3}
a_2	4.246×10^{-4}
a_3	9.989×10^{-3}
a_4	-4.963×10^{-5}
a_5	-3.272×10^{-3}
a_6	-3.890×10^{-4}
a	7.205×10^{-1}
b_0	1.178
b_1	-2.230×10^{-1}
b_2	4.478×10^{-2}

4 拟合结果实验验证

为验证滚动转子式电效率模型的准确性,设计验证工况。设定冷冻水出水温度为7℃,冷却水出水温度为40℃,过冷度为5℃。当压缩机频率为40、50、60 Hz时,分别调节电子膨胀阀开度,使压缩机吸气口制冷剂状态由过热态变为两相态,即过热度从10 K至吸气干度为0.88左右。

由图6可知,在验证工况下,在压缩机吸气过热段,吸排气压比随吸气过热度的减小(电子膨胀阀开

度的增大)而减小;在压缩机吸气带液段,压缩机吸排气压比基本不变。式(14)压缩机吸气带液时压缩机电效率模型,是在压比不变的情况下得出的,在验证工况下,压缩机吸气带液段压比不变,因此压缩机电效率模型可以适用于验证工况。

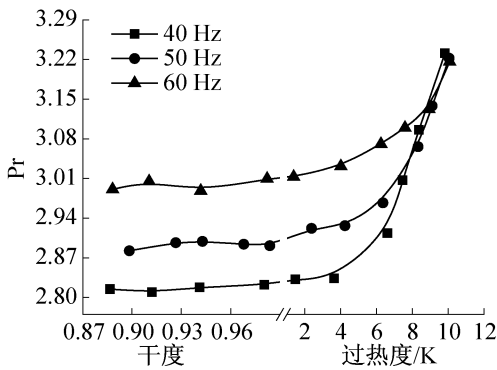


图 6 验证工况不同频率下压缩机吸排气压比的变化
Fig. 6 The tendency of pressure ratio for verification condition at different compressor frequency

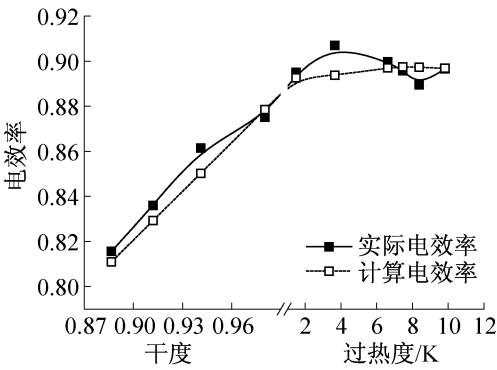


图 7 压缩机频率 40 Hz 时实际与计算电效率
Fig. 7 The electrical efficiency of simulation compared with that of verification condition at 40 Hz

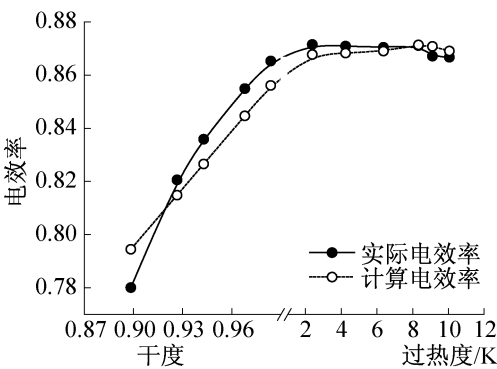


图 8 压缩机频率 50 Hz 时实际与计算电效率
Fig. 8 The electrical efficiency of simulation compared with that of verification condition at 50 Hz

图7~图9为验证工况下压缩机分别在40、50、60 Hz 3个频率运行时实际电效率与模型计算电效率

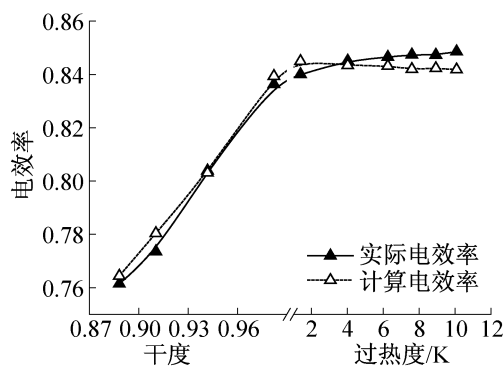


图 9 压缩机频率 60 Hz 时实际与计算电效率

Fig. 9 The electrical efficiency of simulation compared with that of verification condition at 60 Hz

的对比。结果表明,压缩机电效率模型计算值与实际值最大相对误差为 1.83%,最小相对误差为 0.03%。因此压缩机电效率模型较为可靠。

分析以上数据可知,最大相对误差出现在压缩机频率为 40 Hz 时,最小相对误差出现在压缩机频率为 60 Hz 时,表明该模型在频率较高时较为准确。在低频率运行时,压缩机腔内制冷剂流速较低,压缩机底部油池内润滑油不能随着制冷剂有效的进入轴承中,导致漏气严重,磨损加剧。综上所述,滚动转子式压缩机电效率模型适用于压缩机频率高于额定频率、吸气干度大于 0.88 的工况。

5 结论

本文通过 R32 滚动转子式压缩机实验台,研究了压缩机频率、吸排气压比、吸气过热度 and 蒸发温度与压缩机电效率之间的关系,并建立了变吸气状态下滚动转子式压缩机电效率模型,得到如下结论:

1) 在相同压比、相同蒸发温度下,压缩机电效率均随着电子膨胀阀开度的变大呈线性下降趋势,且吸气带液段斜率大于吸气过热段,即压缩机吸气带液时,压缩机电效率下降程度更大。

2) 相同压比下,蒸发温度越大,电效率越小;相同蒸发温度下,压缩机压比越大,电效率越小。且压缩机压比越高,蒸发温度对压缩机电效率的影响越大。

3) 通过验证工况检验滚动转子式压缩机电效率模型的准确性。结果表明计算值与实际值最大相对误差为 1.83%,最小相对误差为 0.03%。因此提出的压缩机电效率模型较为可靠。

4) 当压缩机低频率运行时,压缩机底部油池内润滑油不能随着制冷剂有效的进入轴承中,导致实际压缩机性能与模型计算值差距变大。因此,滚动转子

式压缩机电效率模型适用于压缩机频率高于额定频率、吸气干度大于 0.88 的工况。

本文对滚动转子式压缩机在额定频率附近运行的工况进行了分析和建模,但在实际过程中,压缩机可能在极低或极高频率下运行,此时压缩机性能变化更为复杂,这在今后的研究中需要重点关注。

本文受上海市动力工程多相流动与传热重点实验室(13DZ2260900)资助。(The project was supported by the Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Shanghai Power Engineering (No. 13DZ2260900).)

参考文献

- [1] 林恩新,丁国良,赵丹,等. 适用于制冷系统动态仿真的全封闭式压缩机准动态模型[J]. 制冷学报, 2012, 33(1): 28-31. (LIN Enxin, DING Guoliang, ZHAO Dan, et al. Quasi-dynamic hermetical compressor model suitable for dynamic simulation of refrigeration system[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(1): 28-31.)
- [2] 沈希,王晓燕,黄跃进,等. 制冷压缩机变工况运行的热力性能研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(6): 15-19. (SHEN Xi, WANG Xiaoyan, HUANG Yuejin, et al. Thermodynamic performance of refrigeration compressor running at variable condition[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(6): 15-19.)
- [3] 任峰,石小雷. 滚动转子式压缩机的性能拟合方程的建立和实验验证[J]. 制冷与空调(北京), 2009, 9(6): 50-53. (REN Feng, SHI Xiaolei. Building and validation performance fitted equations establishment of rolling piston type rotary compressor[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2009, 9(6): 50-53.)
- [4] 马一太,刘忠彦,李敏霞. 容积式制冷压缩机电效率分析[J]. 制冷学报, 2013, 34(3): 1-7. (MA Yitai, LIU Zhongyan, LI Minxia. Analysis of electrical efficiency for positive displacement refrigerant compressor[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(3): 1-7.)
- [5] 谭峰. 滚动转子式变频压缩机的特性分析及简化模型[J]. 家用电器, 2015(8): 118-120. (TAN Feng. Characteristic analysis and simplified model of inverter-driven rolling piston rotary compressor[J]. Electrical Appliances, 2015(8): 118-120.)
- [6] 吴建华,胡杰浩,陈昂,等. 全封闭 R32 滚动活塞压缩机的热分析[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 14-18. (WU Jianhua, HU Jiehao, CHEN Ang, et al. Thermal analysis for hermetic R32 rolling piston compressor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 14-18.)
- [7] 杨丽辉,陶乐仁,陶宏,等. 滚动转子式压缩机吸气状态与排气温度的实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35

- (2): 49-53. (YANG Lihui, TAO Leren, TAO Hong, et al. Experimental study on suction refrigerant state and discharge temperature for rolling piston compressor[J]. *Journal of Refrigeration*, 2014, 35(2): 49-53.)
- [8] 矢岛龙三郎, 吉见敦史, 朴春成, 等. 降低 R32 压缩机排气温度的方法[J]. 制冷与空调(北京), 2011, 11(2): 60-64. (RUZABURO Yajima, ATUSHI Yoshimi, PIAO Chunchen. Measures to reduce the discharge temperature of R32 compressor[J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2011, 11(2): 60-64.)
- [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): 703-706. (ZHANG Li, LU Yingchong. Research on reliability of R32 compressor with wet suction[J]. *China Appliance*, 2013(Suppl. 1): 703-706.)
- [10] 孙帅辉, 郭鹏程, 孙龙刚, 等. 变吸气工况 R32 涡旋压缩机湿压缩过程模拟研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(3): 282-288. (SUN Shuaihui, GUO Pengcheng, SUN Longgang, et al. Simulation research on wet compression process in R32 scroll compressor under different suction operational conditions[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015, 31(3): 282-288.)
- [11] 王超, 陶乐仁, 黄理浩, 等. R32 制冷系统湿压缩的最佳吸气干度范围[J]. 化工进展, 2017, 36(1): 100-106. (WANG Chao, TAO Leren, HUANG Lihao, et al. The optimal of suction refrigerant quality for R32 wet compression refrigeration system[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(1): 100-106.)
- [12] 丁国良, 张春路. 制冷空调装置仿真与优化[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (DING Guoliang, ZHANG Chunlu. *Simulation and optimization of refrigeration and air conditioning devices*[M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [13] 虞中旸, 陶乐仁, 王超, 等. 变频滚动转子式压缩机变吸气状态实验研究与模型建立[J]. 化工进展, 2017, 36(3): 832-837. (YU Zhongyang, TAO Leren, WANG Chao, et al. The experiment and modeling for variable frequency rotary compressor with different suction status[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(3): 832-837.)
- [14] LI Wenhua. Simplified steady-state modeling for variable speed compressor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 318-326.

通信作者简介

陶乐仁,男,教授,上海理工大学能源与动力工程学院,制冷与低温工程研究所,13916356948, E-mail: cryo307@usst.edu.cn。研究方向:低温制冷系统,低温生物医学技术。

About the corresponding author

Tao Leren, male, professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 13916356948, E-mail: cryo307@usst.edu.cn. Research fields: low temperature refrigeration system, cryobio-medical technology.