

文章编号: 0253-4339(2012)01-0028-04

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.01.028

适用于制冷系统动态仿真的全封闭式压缩机准动态模型

林恩新 丁国良 赵丹 胡海涛

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘要 制冷系统动态仿真中要求压缩机模型能够适用于吸入制冷剂状态从两相到气相的宽变化范围, 并且能够快速反映其关键的动态特性, 为了解决这个问题, 提出了可覆盖进口状态从气相到两相制冷剂的准动态压缩机模型。此模型按其热力过程分解为吸入气相或两相制冷剂与腔内制冷剂混合过程的动态模型、壳体换热过程的动态模型和气缸内制冷剂压缩过程的稳态模型。此压缩机模型克服了通常压缩机模型中忽略腔内制冷剂混合过程所导致预测的流量大于实际流量的缺点, 以及全部采用动态模型导致计算复杂的问题。通过某压缩机厂生产的全封闭式压缩机的稳态实验数据和模型预测值的比较, 结果表明: 模型预测的稳定工况时的质量流量和输入功率与实验数据误差小于5%; 开机过程质量流量和输入功率与实验测量值趋势一致, 误差小于10%。

关键词 热工学; 仿真计算; 封闭式压缩机; 模型; 准动态; 两相

中图分类号: TK124; TH45; TP391.9

文献标识码: A

Quasi-dynamic Hermetical Compressor Model Suitable for Dynamic Simulation of Refrigeration System

Lin Enxin Ding Guoliang Zhao Dan Hu Haitao

(Inst. of Refrigeration and Cryogenics Eng., Shanghai Jiao Tong Univ., Shanghai, 200240, China)

Abstract The compressor model used in the dynamic simulation of refrigeration system should not only be applicable in the case that the state of the sucked refrigerant varies in a wide range of vapor to two-phase, and also be quick enough in predicting the major dynamic characteristics of the compressor. In order to meet these requirements, a quasi-dynamic hermetic compressor model covering the suction state from vapor to two-phase was presented in this paper. According to its thermodynamic process, the compressor model includes, a dynamic model for the mixing process of refrigerant inside compressor and sucked two-phase or vapor refrigerant, a dynamic model for the compressor shell heat transfer model, and a steady state model for the polytropic compression. The compressor model overcomes the flaw of unreasonable mass flow of the existing models caused by neglecting the mixing process of refrigerant inside of compressor. The maximum differences of steady state mass flow rate and input power of a hermetic compressor between the experimental data and the predicted results are less than 5%, while the deviations of the predicted transient mass flow rate and input power from the experimental data are within 10%.

Keywords Pyrology; Simulation; Hermetical compressor; Models; Quasi-dynamic; Two-phase

全封闭式压缩机是小型制冷装置的常用压缩机, 其数学模型是制冷装置动态仿真模型重要组成部分^[1]。现有的压缩机模型可分为四类^[2]: 1) 全动态压缩机模型^[3]; 2) 压缩机性能系数拟合模型^[4]; 3) 全稳态压缩机模型^[5]; 4) 准动态压缩机模型^[6]。对于制冷装置动态仿真来说, 既要求压缩机模型能够反映系统的主要动态特性, 同时又要克服动态模型相对于稳态模型的求解速度较慢的问题, 因此需要开发合适的准动态的压缩机模型^[6]。在准动态的压缩机模型中, 将时间常数与整个系统的时间常数处于相近量级的环节采用动态模型, 而对于时间常数远小于整个系统的时间常数的环节则采用稳态形

式, 从而可达到比全动态模型更快的仿真速度^[1]。适用于制冷系统动态仿真的全封闭式压缩机的准动态模型, 需要反映实际系统工作过程中所有的制冷剂吸入工况, 包括进口为两相与过热气相。虽然一个设计良好的制冷系统在大多数的工况下, 压缩机入口的制冷剂为气体状态, 但是进口为两相制冷剂的状态也属于必须考虑的范围。全封闭压缩机吸入两相制冷剂的情况包括: 1) 处于开停周期中的冰箱, 在停机后再开机时, 蒸发器中积聚较多液体, 容易导致压缩机吸入两相制冷剂; 2) 当运行冷冻循环过程中, 低温两相制冷剂流出冷冻蒸发器直接流入吸气管, 将可能出现两相制冷剂被吸入压缩机;

3) 对于某些特定工质, 为了降低压缩机的排气温度, 设计中故意让两相制冷剂进入全封闭压缩机的壳体, 以达到冷却效果。

已有的全封闭式压缩机模型^[1,3-6], 都假定压缩机进口为气相制冷剂, 不适用于进口为两相制冷剂的情况。到目前为止还没有模型能够反映实际冰箱全封闭式压缩机运行过程中可能吸入高干度两相制冷剂的情况。已有的对于涡旋式压缩机模型^[7]研究表明, 吸入两相制冷剂与吸入气相制冷剂压缩机的流量明显不同, 可以通过采用吸入点的两相比容, 来预测压缩机的流量。封闭式压缩机首先将吸入气相或两相制冷剂先在压缩机腔内混合, 然后再被吸入压缩气缸并压缩, 与涡旋式压缩机直接将吸入制冷剂在压缩缸内压缩的工作状况不同。当封闭式压缩机吸入两相制冷剂时, 如果直接将涡旋式压缩机模型^[7]扩展应用于全封闭式压缩机, 所预测的全封闭式压缩机流量远大于实际流量。

在此, 将建立适用于制冷系统动态仿真用的压缩机模型, 即可适用于吸入制冷剂状态从气相到两相的全封闭压缩机准动态模型。

1 数学模型

制冷装置动态仿真过程只关注于压缩机的热力性能, 同时压缩机的转速远大于压缩机换热速率, 因此, 即使对封闭式压缩机的开机特性来说, 也可以忽略其流量的间歇性和压差的建立过程, 只需考虑其内部热平衡建立动态过程^[1]。

基于如图1所示全封闭式压缩机的热力过程, 将压缩机分解为以下几个过程: 吸入气相或两相制冷剂与压缩机腔内制冷剂混合过程, 压缩机壳体动态换热过程和压缩机气缸压缩过程, 并分别建立它们对应的控制方程。

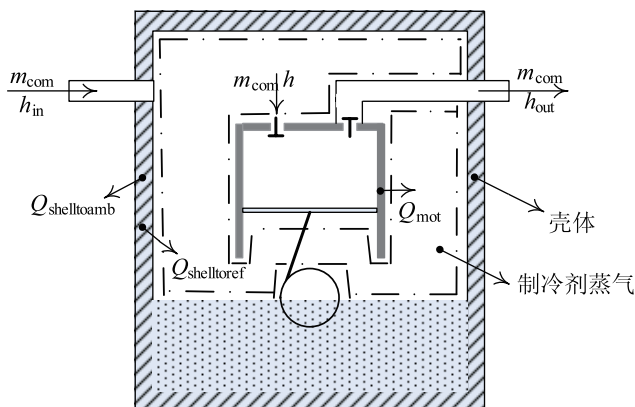


图1 压缩机热力过程简图

Fig.1 Schematic of compressor thermal process

为了简化压缩机模型, 对模型做了如下假设: 1) 忽略吸气管和排气管的压降; 2) 压缩机腔内制冷剂状态均匀; 3) 压缩过程为多变过程。

1.1 吸入气相或两相制冷剂与压缩机腔内制冷剂混合过程

压缩机腔内制冷剂能量守恒方程可用式(1)描述。

$$C_{\text{ComRef}} \frac{dT_{\text{ComRef}}}{d\tau} = m_{\text{com}} h_{\text{in}} - m_{\text{com}} h + Q_{\text{shelltoref}} \quad (1)$$

式(1)预测压缩机腔内制冷剂状态, 即吸入压缩缸内制冷剂状态, 从而反映吸入气相或者两相制冷剂对压缩机腔内制冷剂影响。式(1)中进口制冷剂焓值 h_{in} 可反应压缩机吸入气相或两相制冷剂状况, 并可用式(2)表示:

$$h_{\text{in}} = \begin{cases} x_{\text{suc}} h_g + (1 - x_{\text{suc}}) h_f & \text{吸入两相制冷剂} \\ h(P_{\text{eva}}, T_{\text{suc}}) & \text{吸入气相制冷剂} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)中腔内制冷剂焓值 h 反应腔内制冷剂状态。由于压缩机流量小和压缩机腔内制冷剂与壳体的热交换, 混合后腔内制冷剂处于气相状态, 并可用式(3)表示。

$$h = h(P_{\text{eva}}, T_{\text{ComRef}}) \quad (3)$$

式(1)中压缩机壳体与腔内制冷剂换热量可用下式表示:

$$Q_{\text{shelltoref}} = \alpha_{\text{shelltoref}} A_{\text{shelltoref}} (T_{\text{shell}} - T_{\text{ComRef}}) \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: A —换热表面积; C_{comref} —压缩机壳体内制冷剂总热容; h_f 、 h_g 和 h_{in} —饱和和液相制冷剂焓, 饱和气相制冷剂焓和压缩机腔内制冷剂焓值、压缩机吸入制冷剂焓值; m_{com} 、 P_{eva} 、 Q 和 T —压缩机流量、蒸发压力、换热量、温度时间; α 是换热系数, 其计算过程将压缩机当作圆柱体来处理^[8]。

下标 ComRef, shell, suc, shelltoamb 分别为腔内制冷剂, 壳体, 吸气, 壳体与腔内制冷剂间。

1.2 压缩机壳体动态换热过程

压缩机壳体能量守恒方程可用式(5)描述。

$$C_{\text{shell}} \frac{dT_{\text{shell}}}{d\tau} = Q_{\text{shelltoamb}} - Q_{\text{shelltoref}} + Q_{\text{mot}} \quad (5)$$

其中

$$Q_{\text{mot}} = \frac{W_{\text{com}}}{\eta_{\text{mot}}} - W_{\text{com}} \quad (6)$$

$$Q_{\text{shelltoamb}} = \alpha_{\text{shelltoamb}} A_{\text{shelltoamb}} (T_{\text{shell}} - T_{\text{amb}}) + \sigma \varepsilon A_{\text{shelltoamb}} (T_{\text{shell}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (7)$$

式(5)~式(7)中: C_{shell} 、 η_{mot} 、 σ 和 ε —压缩机壳体总热容、压缩机电机效率、黑体辐射常数和发射率。下标shelltoamb代表壳体与环境间。

1.3 压缩机气缸压缩过程

压缩机气缸压缩过程是全封闭式压缩机气缸吸入腔内制冷剂的多变压缩过程。压缩机的流量可用式(8)和(9)计算,压缩机功率可用式(10)计算。

$$m_{\text{com}} = c_m \lambda \frac{u_{\text{com}} V_{\text{th}}}{v_{\text{cylinder}}} \quad (8)$$

$$v_{\text{cylinder}} = v(P_{\text{eva}}, T_{\text{ComRef}}) \quad (9)$$

$$W_{\text{com}} = c_w \lambda V_{\text{th}} u_{\text{com}} P_{\text{eva}} \frac{n}{n-1} \left[\left(\frac{P_{\text{con}}}{P_{\text{eva}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] / \eta \quad (10)$$

式(8)~式(10)中: c_m 和 c_w —压缩机流量修正系数和压缩机功率修正系数; n —压缩机多变压缩指数; P_{con} —冷凝压力; V_{th} 、 u_{com} 、 v_{cylinder} 、 W_{com} 、 λ 和 η —压缩机理论排气容积、压缩机转速、压缩腔内制冷剂比容、压缩机输入功率、压缩机输气系数和压缩机效率。

通过分别建立上面三个过程的控制方程描述吸入气相或两相制冷剂的封闭式压缩机工作过程,并预测封闭式压缩机性能。

2 模型验证

为了验证压缩机模型的正确性和准确性,将分别进行吸入气相制冷剂的压缩机的稳态实验数据验证、吸入气相制冷剂的压缩机动态实验数据验证。由于缺少全封闭式压缩机吸入两相制冷剂实验数据,将分析压缩机吸入气相制冷剂状态阶跃到两相制冷剂过程,压缩机模型预测的流量、壳体温度和腔内制冷剂温度变化趋势。

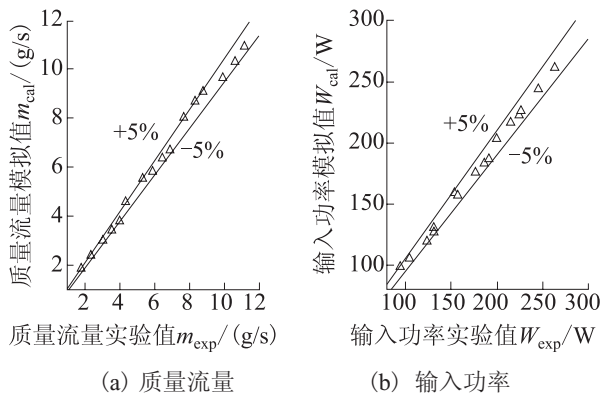
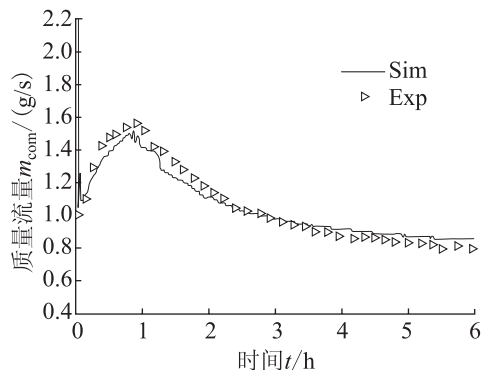


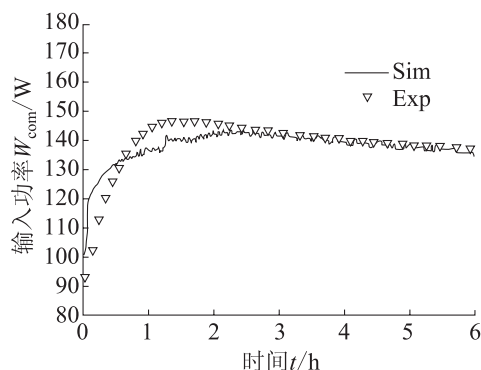
图2 压缩机稳态实验数据验证压缩机模型

Fig.2 Compressor model validated by its steady experimental data

某压缩机厂生产的全封闭式压缩机的稳态实验数据和模型预测值比较见图2。从图2可知模型预测的压缩机流量和输入功率与实验值误差小于5%,这表明所开发的吸入压缩机数学模型具有较好的精度。



(a) 质量流量



(b) 输入功率

图3 压缩机开机运行实验数据验证压缩机模型

Fig.3 Compressor model validated by dynamic experimental data after compressor runs

在此,对某型号压缩机进行实验测量,测试压缩机流量和功率,并用实验数据验证开发准稳态压缩机模型的准确性。实验在焓差实验台进行。温度测量采用铜-康铜T型热电偶,精度为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$;压力测量采用HBM压力变送器,精度为 $\pm 0.2\%$;功率测量采用Yokogawa/WT230功率计,精度为0.1%。模型验证过程,将实验测量的蒸发压力、冷凝压力和吸入压缩机温度作为压缩机模型的已知条件,预测压缩机流量和输入功率。图3给出了模型预测压缩机流量和输入功率与实验值比较。模型预测趋势与实验趋势一致,同时它们之间的误差小于10%。

对于两相制冷剂入口情况下的压缩机模型验证,考虑到封闭式压缩机生产厂家还不能提供吸入两相制冷剂的实验数据和吸入两相制冷剂测量困难,这里将只对吸入两相制冷剂压缩机模型进行趋

势变化预测。图4(a)给出了现有压缩机模型和文中压缩机模型预测吸入干度为0.99两相制冷剂的压缩机流量变化。由于现有模型忽略了压缩机腔内制冷剂与吸入两相制冷剂混合过程,直接采用吸入制冷剂状态预测压缩机流量,所以已有的压缩机模型预测远大于实际流量,结果明显错误。图4(b)给出考虑压缩机腔内制冷剂与吸入两相制冷剂混合过程的模型预测的吸入干度0.99两相制冷剂的压缩机腔内制冷剂温度和壳体温度变化趋势。其中压缩机腔内制冷剂温度影响了吸入两相制冷剂压缩机的流量,同时腔内制冷剂温度也受到壳体温度影响。图4说明压缩机模型不仅仅可以预测吸入单相制冷剂的压缩机性能,也可以预测吸入两相制冷剂的压缩机性能。

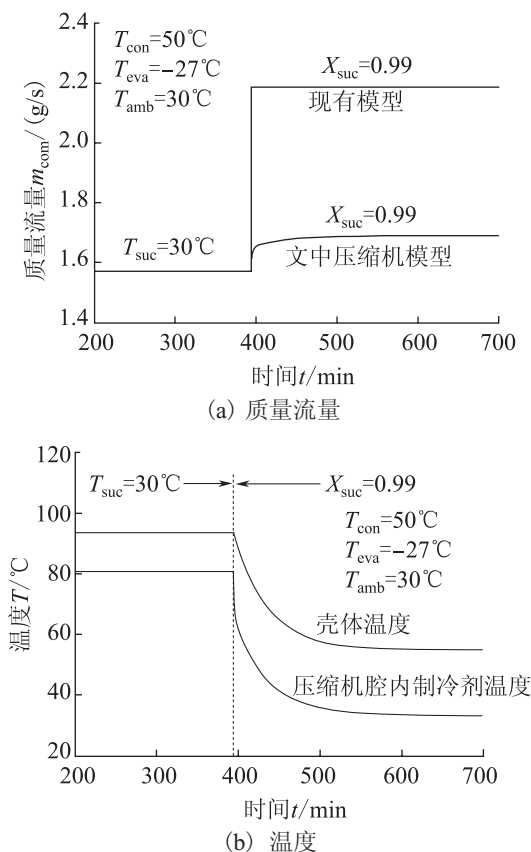


图4 吸入两相制冷剂压缩机模型

Fig.4 Compressor performance sucking two phase refrigerant

3 结论

1) 开发的准动态压缩机模型可预测吸入气相和两相制冷剂的压缩机性能。此模型包括吸入气相或两相制冷剂与腔内制冷剂混合过程的动态模型、壳体换热过程的动态模型和气缸内制冷剂压缩过程

的稳态模型。

2) 压缩机模型预测的流量和功耗与压缩机厂家提供的稳态实验数据误差在5%之内。模型预测压缩机开机过程流量和输入功率趋势与实验动态趋势一致,且误差小于10%。

参考文献

- [1] 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, 8-18.
- [2] Ding G L. Recent developments in simulation techniques for vapour-compression refrigeration systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30 (7): 1119-1133.
- [3] Hermes C J L, Melo C. A first-principles simulation model for the start-up and cycling transients of household refrigerators [J]. International Journal of refrigeration, 2008, 31 (8): 1341-1357.
- [4] ANSI. ARI 540-1999: Positive displacement refrigerant compressors and compressor units [S]. USA: ANSI, 1999.
- [5] 汤志远, 丁国良. 涡旋式水源热泵系统性能仿真 [J]. 制冷学报, 2011, 32 (1): 33-37. (Tang Zhiyuan, Ding Guoliang. Performance simulation of scroll water source heat pump system [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32 (1): 33-37.)
- [6] 卢智利. 直冷式多路循环冰箱特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2006.
- [7] Shen B, Braun J E, Groll E A. A method for tuning refrigerant charge in modeling off-design performance of unitary equipment[J]. Journal of HVAC&R Research, 2006, 12 (3): 429-449.
- [8] Holzbecher M, Steiff A. Laminar and turbulent free convection in vertical cylinders with internal heat generation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38 (15): 2893-2903.

通讯作者简介

丁国良, 男(1966-), 教授, 博导, 上海市东川路800号上海交通大学机械与动力工程学院制冷所, 200240, (021) 34206378, E-mail: glding@sjtu.edu.cn. 研究方向: 制冷空调装置的仿真、优化与新工质应用。

About the corresponding author

Ding Guoliang (1966-), male, Ph. D./Professor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 800#, Dongchuan Road, Minhang District, Shanghai, China, 200240, (021) 34203278, E-mail: glding@sjtu.edu.cn. Research fields: Simulation and optimization research for room air conditioner and utilization of new refrigerant.