

## 热泵系统四通换向阀特性研究(四)

热泵四通换向阀动态换向过程的仿真及测试<sup>\*</sup>

上海交通大学 宋徐辉 葛宏明 于 兵 陈芝久 阙雄才 静 波  
浙江三花集团公司 卢英明 胡梅宴 汪钦尧

**摘 要** 提出了描述四通换向阀换向动态特性的数学模型,对四通换向阀换向过程的压力、温度变化及活塞运动规律等动态特性进行了仿真研究;采用激光多普勒频移测试技术,对密闭高压小空间内瞬间多变的活塞运动过程进行了测试;分析了在换向过程中的活塞速度变化及气源压力对换向时间的影响,对于合理确定换向过程最小压差有重要意义。

**关键词** 热泵 四通换向阀 换向 激光测试 数学模型

## 1 概述

四通换向阀是热泵式空调器的重要组成部分,其性能的好坏直接影响到空调器的性能和使用寿命。以往学者就换向阀对热泵系统的性能影响作了一定的研究<sup>[1-3]</sup>,但对换向阀本身换向性能的研究尚未见报道。四通换向阀实现换向功能时,需要一定的压差来推动活塞及滑块。确保换向阀可靠换向的最小换向压差如果偏大的话,会导致空调在低冷凝蒸发压差的工况下出现换向阀无法换向或换向不到位,从而产生诸如系统故障之类的严重后果。由于换向阀内部结构较小,且为密封高压空间,无法对活塞运动进行直接测量;另外换向过程时间非常短,对传感器的响应能力要求非常之高,很难找到合适的位移、速度和加速度传感器。对于换向阀换向过程所需时间,以往一般都是根据经验估计,而没有确切的数据。本文根据热力学的基本原理建立热泵系统换向阀的动态换向特性模型,在此基础上进行了仿真计算,并利用激光多普勒频移测试技术对四通换向阀换向动态特性进行了测试。

## 2 数学模型的建立

热泵四通换向阀的内部结构形状比较复杂多样,因此在建立换向特性的数学模型时进行了必要的简化,忽略了对换向过程动态特性影响较小的因素。

在建立数学模型时,特作如下的假定:

- (1) 用作高压气源的压缩氮气为理想气体;
- (2) 换向阀及管路元件的有效流通面积为一定值;
- (3) 换向阀无内外泄漏;
- (4) 由于换向阀动作时间很短,故忽略换向阀与环境的热交换;
- (5) 气源和大气的压力在换向过程中恒定;
- (6) 在换向过程中 4 根连接管中的压力对换向特性的影响暂不考虑;
- (7) 换向过程中的摩擦力保持不变。

四通换向阀换向过程开始前如图 1 所示,此时活塞左端顶死毛细管 1 口。当  $t=0$  时导阀切换,毛细管 1 与高压端连通,毛细管 2 与低压端连通,于是 B 腔开始降压,其热力过程为一绝热

\* 本文研究得到上海交通大学科技发展基金资助。  
收稿日期:1997-12-15

放气过程。当降至某一压力后,活塞开始向右运动,直至活塞另一头顶死毛细管 2 口为止,其间 A 腔绝热充气,B 腔绝热放气。

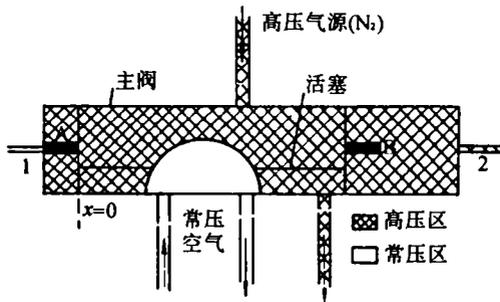


图 1 换向过程开始前的结构及坐标

下面给出其中较复杂的活塞开始运动的分过程的数学模型。

### 2.1 活塞运动方程

按牛顿定律运动,有:

$$m \frac{dW}{dt} = (P_1 - P_2)A - F \quad (1)$$

式中  $m$ ——换向阀活塞的质量

$P_1, P_2$ ——A、B 腔内压力

$A$ ——活塞环面积

$W$ ——运动速度

$F$ ——滑动摩擦力

位移方程为:

$$dx = W dt \quad (2)$$

### 2.2 A 腔室压力变化方程

根据前面的假定,在忽略换向阀与环境热交换的条件下,利用热力学基本定律,换向阀 A 腔室的压力变化方程为:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{Kf_1P_0}{A(S_{10}+x)} \sqrt{\frac{2KRT_0}{K-1}} \varphi\left(\frac{P_1}{P_0}\right) - \frac{KP_1}{S_{10}+x} \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

式中  $f_1$ ——小孔 1 的有效流通面积

$K$ ——气体绝热指数,  $K=1.4$

$\varphi(y)$ ——气体流量函数,当  $0 < y < b$  时为

壅塞流动,  $\varphi(y) = 0.2588$ ; 当  $b$

$\leq y \leq 1$  为非壅塞流动,  $\varphi(y) =$

$$\sqrt{y^{2/K} - y^{(K+1)/K}}$$

$b$ ——临界压力比,  $b=0.528$

$$S_{10} = V_{10}/A_1$$

$V_{10}$ —— $x=0$  时 A 腔室的容积

### 2.3 四通换向阀 B 腔室压力变化方程

通过应用热力学基本方程可得到四通换向阀 B 腔室内的压力变化方程:

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{-Kf_2P_2^{3K-1/2K}}{A(S_{20}-x)P_0^{K-1/2}} \sqrt{\frac{2KRT_0}{K-1}} \varphi\left(\frac{P_2}{P_0}\right) + \frac{KP_2}{S_{20}-x} \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

式中  $f_2$ ——小孔 2 处的有效流通面积

$$S_{20} = V_{20}/A$$

$V_{20}$ —— $x=0$  时 B 腔室的容积

### 2.4 活塞运动分过程动态特性模型

通过前面的推导,得到描述四通换向阀换向过程中的活塞运动的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{dW}{dt} = [(P_1 - P_2)A - F]/m \\ \frac{dx}{dt} = W \\ \frac{dP_1}{dt} = \frac{-Kf_1P_0}{A(S_{10}+x)} \sqrt{\frac{2KRT_0}{K-1}} \varphi\left(\frac{P_1}{P_0}\right) - \frac{KP_1}{S_{10}+x} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{-Kf_2P_2^{3K-1/2K}}{A(S_{20}-x)P_0^{K-1/2}} \sqrt{\frac{2KRT_0}{K-1}} \varphi\left(\frac{P_2}{P_0}\right) + \frac{KP_2}{S_{20}-x} \frac{dx}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

该方程组的初始条件为:

$$\begin{cases} x=0 \\ W=0 \\ \frac{dW}{dt}=0 \quad t=0 \\ P_1=P_{10}=P_0 \\ P_2=P_{20} \end{cases} \quad (6)$$

当  $x=L$  时运动结束。

### 3 换向动特性控制方程的计算方法

上面建立的活塞运动数学模型为非线性微分方程组,采用自适应变步长的四阶 Runge-Kutta 方法求其在初始条件下的解。采用自适应变步长积分方法能根据截断误差调整步长和提

高精度,可以减少计算时间。

图 2 给出了整个动态换向过程模型的求解框图。

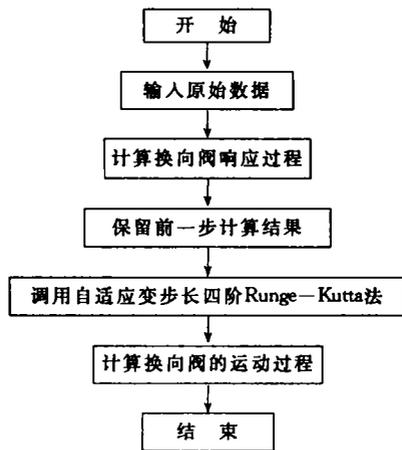


图 2 换向阀换向动态过程计算流程

#### 4 实验测试

由于四通换向阀内部结构空间较小,无法直接安装位移、速度或加速度传感器。本文采用激光多普勒频移测试技术对四通换向阀换向过程中活塞的运动特性进行测量,该测试方法具有非接触测量以及测量动态响应快的特点。

激光测试技术以激光干涉和激光多普勒频移效应为基本原理,采用低功率可见光氦氖激光器为光源,其多普勒频移和测试物体的速度有如下关系:

$$f_d = 2v/\lambda \quad (7)$$

最后通过处理将多普勒频移  $f_d$  以电压输出。由于激光的波长极小,因此激光干涉测量仪能测出极小的速度,速度分辨率达到  $0.5\mu\text{m/s}$ 。

本文中的激光干涉测量系统由主机(OFV-3000)、干涉仪(OFV-502)、光学头(OFV-100)、激光发生器(He-Ne 光源)及信号处理系统等组成。该系统具有精度高、动态响应快的特点,输出信号为电压。通过 CF350 双通道信号分析仪对输出的速度信号进行微分处理可以得到加速度变化的信号。换向阀换向过程中活塞两端腔室内的压力变化可用压力传感器测得。图 3 给出了实际测量系统的示意。

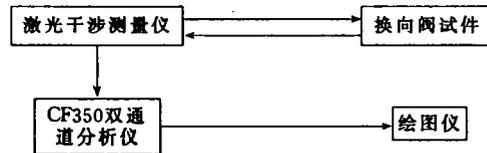


图 3 测量与信号分析系统示意

实验用四通换向阀经特殊处理,即在端盖上烧结密封透明玻璃,在活塞端盖上贴上激光反射薄膜,在两端分别接入高灵敏度的压力传感器,如图 4 所示。

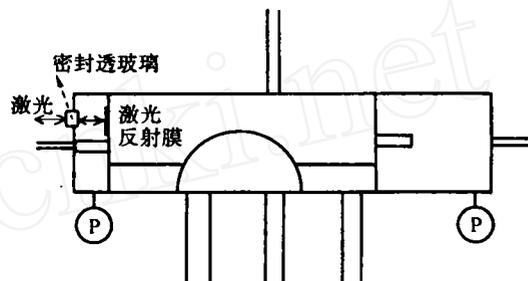


图 4 四通换向阀测量试件示意

#### 5 计算机仿真与实验结果比较

根据数学模型,利用计算机进行数值仿真,求出了四通换向阀在换向过程中活塞的运动参数变化和换向时间。为了验证仿真结果的正确性,把仿真结果和实验结果进行了比较。图 5 和

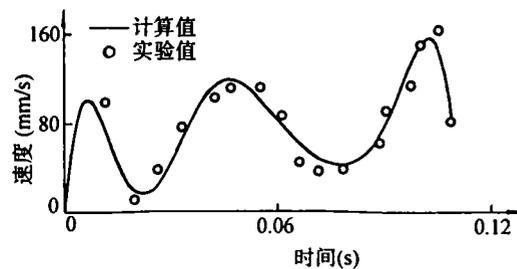


图 5 换向过程中活塞的速度变化曲线

图 6 是某一四通换向阀在气源压力为  $6.9 \times 10^5 \text{Pa}$  时活塞的运动速度、加速度随时间变化的曲线图。图 7 是该换向阀的换向时间和气源压力的变化关系曲线。从图 5~7 可以得出,仿真结果能比较准确地反映热泵四通换向阀换向时的动态变化特性。但计算结果和实验结果之间尚有一

定的误差,主要是由于建立模型的一些假设和实际情况不完全符合。

## 6 结 论

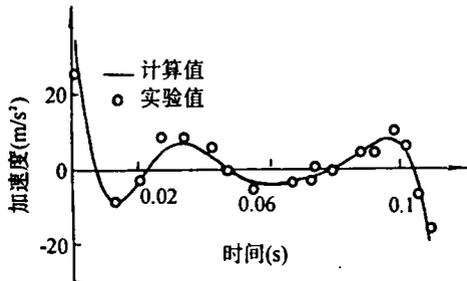


图 6 换向过程中活塞的加速度变化曲线

本文建立的热泵四通换向阀换向过程动态特性数学模型是合理可行的,所提出的激光测试方法能够准确有效地测试换向过程中活塞的运动过程。本文给出某一四通换向阀动态特性的仿真和实验测试结果,两者能够较好地吻合,表明作者建立的数学模型是正确的。由于激光测试系统比较贵重且使用费用高,测试样品阀需作专门处理,而采用仿真方法则比较容易实现,并且改变阀的参数和工况也比较方便。因此,本文提出

的仿真方法可以作为研究分析热泵四通换向阀动态换向特性的一种有效工具。

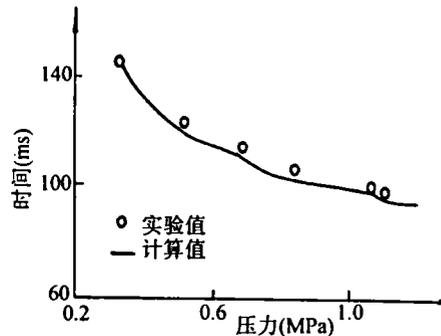


图 7 换向过程的运动时间和气源压力关系曲线

## 参 考 文 献

- 1 Damasceno G, Lee W, Goldschmidt V. Heat transfer, pressure drop and mass leakage in reversing valves; characterizing parameters. ASHRAE Trans, 1986; 92, Pt 2B: 61~70
- 2 Krishnan R. Evaluating reversing valve performance in heat pump systems. ASHRAE Trans, 1986; 92, Pt 2B: 71~80
- 3 Damasceno G, Rooke S, Goldschmidt V. Effect of reversing valves in heat pump performance. Int Journal of Refrigeration, 1991; 14: 93~97

陈芝久(联系人) 200030 上海交通大学制冷与低温工程系

(上接第 30 页)

实现故障自诊断和智能控制。

(6)集散控制系统合理地吸收了仪表控制系统和计算机控制系统的长处,充分利用 4C (CONTROL、COMPUTER、CTR、COMMUNICATION)技术,构成横向分散、纵向分层的体系结构,实现了信息操作管理集中化而控制分散化的目的。特别是数据通讯网络技术的应用,将各分散装置有机的结合在一起,使整个系统的信息沟通起来,非常适用于石油、化工、冶金、电力等部门的过程控制。

(7)在压缩机上充分利用交流变频调速技术,以节约能源。

## 5 结 束 语

随着基础研究工作的深入和控制技术的发展,压缩机自动化技术的进一步发展是从设计、制造到运行管理都运用计算机和微电子技术,使之从设计制造到控制运行都是最优的,从而实现计算机对整个系统的最佳控制。

可以相信,伴随微电子和智能技术的发展,通过压缩机行业厂家和学者的共同努力,压缩机自动化技术将有更辉煌的前景。

曹 锋 710049 西安交通大学压缩机教研室