

直线冰箱压缩机活塞位移的模糊控制

张金权, 畅云峰, 邢子文

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了有效地控制直线冰箱压缩机的活塞位移, 提出了一种以活塞上死点位移为控制目标的可自调整规则的模糊控制系统. 基于模糊控制模型和活塞运动模型, 开发了模糊控制系统的硬件和软件, 控制系统主要由位移测量模块、中央处理器模块、功率驱动模块、电源模块及上位机等组成. 为了研究模糊控制系统的性能, 实验测量了其响应曲线, 实验结果表明: 模糊控制系统在无需压缩机系统模型的前提下, 可以成功地控制直线压缩机的活塞位移, 其在上死点附近几乎无超调, 稳态误差小于 0.25 mm. 这种新型的模糊控制系统对于冰箱、空调、斯特林制冷机及气体等领域的直线压缩机活塞位移控制具有很大的应用前景.

关键词: 直线压缩机; 冰箱; 活塞位移; 模糊控制

中图分类号: TH457; TB652 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0038-05

Fuzzy Control of Piston Displacement of a Linear Refrigerator Compressor

ZHANG Jinquan, CHANG Yunfeng, XING Ziwen

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to effectively control the piston displacement of a linear refrigerator compressor, a new fuzzy control system based on self-adjusting was proposed. The hardware and software of the fuzzy control system were developed with the piston motion model and the fuzzy control model. The control system is mainly composed of a displacement measurement unit, a DSP, a power driver unit, an electricity source unit, and a computer. The response curve of the fuzzy control system was measured. The experimental results show that the present control system can effectively measure and control the piston stroke and the top clearance distance of the linear compressor. The steady-state error of the top clearance distance is smaller than 0.25 mm, and there is almost no overshoot nearby the top dead center.

Keywords: linear compressor; refrigerator; piston displacement; fuzzy control

压缩机是制冷系统的核心, 现在的冰箱用压缩机都是由旋转电机驱动曲轴带动活塞或通过曲轴连杆机构带动活塞做往复直线运动, 由于其存在多处摩擦副, 使得摩擦损耗大, 机械效率低, 进一步提高其效率已非常有限. 直线压缩机是一种由直线电机直接驱动活塞做往复直线运动的新型高效压缩机. 文献[1-3]指出, 在相同的测试工况下, 直线压缩机的效率要比目前最高效的往复式压缩机效率高 20%~30%, 其性能系数 COP 可达到 2.0 以上 (标准

工况).

由于直线压缩机没有曲柄连杆机构, 其活塞行程和上死点位置不受限制, 与所加给系统的能量大小有关, 因此活塞位移是可变的. 为了保证冰箱压缩机高效、高可靠性地运行, 必须对活塞位移进行有效控制, 以避免活塞撞击缸盖, 特别是在余隙非常小的时候. 对压缩机活塞行程进行有效控制, 必须知道活塞的位移及上死点位置. 早期的系统中安装了位移传感器进行活塞位移检测, 但位移传感器的引

入不仅增加了系统的成本, 而且使得压缩机的结构变得复杂, 一旦出现故障, 则冰箱压缩机系统就无法正常工作. 因此, 国内外各大研究机构致力于研究开发一种简单可靠、性能稳定、经济性的无传感器的控制系统.

文献[4]介绍了一种用于斯特林制冷机的直线压缩机模糊控制系统. 文献[5]介绍了一种利用直线电机本身作为位移传感器的模式识别冰箱压缩机控制系统. 文献[6]介绍了一种利用直线电机作为压缩机活塞位移的传感器技术.

本文主要对电冰箱用直线压缩机的模糊控制系统进行理论和实验研究, 并开发了用于冰箱的直线压缩机活塞位移的模糊控制系统.

1 活塞运动模型

直线压缩机的结构如图 1 所示, 由直线电机、活塞、机械弹簧、吸气阀、排气阀及机体组成. 直线电机动子在内外定子间交变磁场的作用下带动活塞做往复直线运动, 从而完成压缩机的吸气-压缩-排气过程. 图 2 为压缩机活塞的运动示意图, 活塞的上死点位移可表示为

$$x_t = A_0 + x_0 - S/2 \quad (1)$$

式中: A_0 为活塞的初始平衡位置, 由压缩机的设计及装配决定; x_0 为活塞平衡位置偏移量, 与压缩机的排气压力有关; S 为活塞的运动行程.

文献[6]介绍了直线压缩机活塞上死点位移的求取方法, 其通过检测直线电机的线圈电压及电流得出活塞行程, 本文中活塞的运动行程采用上述方法求取.

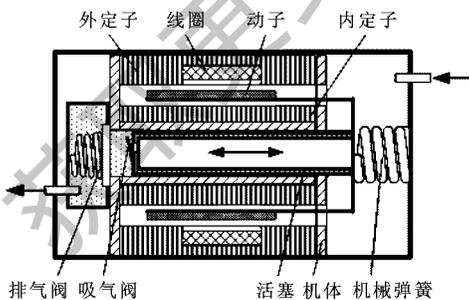


图 1 直线压缩机结构

2 模糊控制器原理

直线压缩机是一个典型的非线性、多场耦合的振动系统, 其活塞处于自由运动状态, 活塞的行程和上死点位移主要受压缩机的排气压力、驱动电压值、

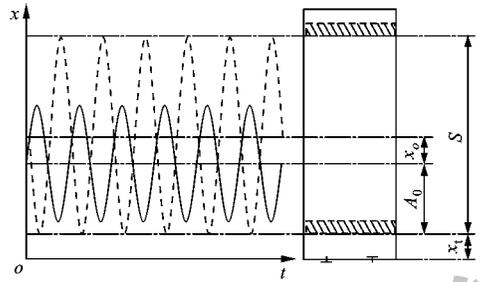


图 2 活塞运动示意图

工作频率及环境温度等影响. 因此, 活塞位移的精确控制需要大量精确的数学模型及实验数据, 而且压缩机系统的传递函数会随压缩机工况的改变而改变, 具有很大的不确定性, 而模糊控制是一种不需要系统模型, 以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的非线性智能控制.

冰箱压缩机的性能受余隙容积的影响很大, 文献[7]对直线压缩机余隙容积调节法进行了研究. 结果表明: 在活塞达到满行程前, 制冷量和 C_{OP} 与行程成正比, 但当活塞超过满行程时, 制冷量略有增加, C_{OP} 值略有减小. 为了保证直线压缩机高效运行, 余隙容积应尽量小, 余隙容积与活塞上死点位移有关, 因此控制系统应该以活塞上死点位移为控制目标, 当压缩机满负荷运行时, 上死点位移应为 0.

模糊控制系统采用定频、变电压的控制方式来调节供给压缩机的能量, 通过控制可控硅的导通时间来调整活塞上死点位移. 文献[8]研究了直线冰箱压缩机的频率特性, 结果表明压缩机的工作频率是恒定的, 与其控制系统的电源频率相同. 当压缩机系统固有频率接近工作频率时, 效率最高, 工作最可靠稳定. 因此, 在设计压缩机时, 应保证额定运行工况下的固有频率与模糊控制系统的电源频率相等.

模糊控制器采用双输入-单输出结构, 输入变量为活塞上死点位移的变化和变化率, 输出变量为可控硅的导通时间变化量. 当给定压缩机上死点位移命令值为 x_{tc} 时, 上死点位移的误差为

$$e(k) = x_t(k) - x_{tc} \quad (2)$$

其误差的变化率为

$$ec(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{t_s} \quad (3)$$

式中: t_s 为活塞上死点位移的采样时间.

为了进行模糊化处理, 必须将输入变量从基本论域转化到相应的模糊集的论域, 这中间须将输入变量乘以量化因子 K_e 和 K_{ec} , 量化因子的大小直接

影响着上死点位移的超调量和响应时间。

设经过模糊化处理后的误差 E 、误差变化率 E_c 及控制量 U 的论域选取为

$$\{E\} = \{E_c\} = \{U\} = \{-N, \dots, -1, 0, 1, \dots, N\} \quad (4)$$

为了适应不同被控对象的要求,引入一个调整因子 a (加权因子),则可以得到一种在全论域范围内带有自调整因子的模糊控制规则为

$$\left. \begin{aligned} U &= -\{aE + (1-a)E_c\} \\ a &= \frac{1}{N}(a_s - a_0) |E| + a_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $0 \leq a_0 \leq a_s \leq 1, a \in [a_0, a_s]$ 。

通过调整 a 值的大小,可以改变对误差和误差变化率的不同加权程度。当被控对象阶次较低时,对误差的加权值应该大于对误差变化率的加权值。相反,当被控对象阶次较高时,对误差变化率的加权值大于对误差的加权值。调整因子 a 在 a_s 至 a_0 之间随着误差绝对值 E 的大小呈线性变化,因 N 为量化等级,故 a 有 N 个可能的取值。

经过模糊算法得出的控制量要通过输出比例因子 K_u 转化为实际控制量 $u(t)$,其输出比例因子的大小影响着上死点位移的响应时间, K_u 选择过大会导致系统振荡。控制可控硅导通时间的控制输出为

$$T_r(k) = T_r(k-1) + u(k) \quad (6)$$

3 模糊控制系统的硬件设计

直线压缩机以活塞上死点位移及活塞行程为控制目标,图3为模糊控制系统的结构图,主要由位移测量模块、中央处理器模块、功率驱动模块、电源模块及上位机等组成。位移测量模块主要检测直线压缩机的活塞位移,通过A/D传送给中央处理器单元。中央处理模块是控制系统的核心,整个中央处理模块是以DSP芯片(TMS320F2812)为核心,将位移测量模块输出的电压信号采集和处理之后,通过模糊控制算法产生控制信号,将产生的控制信号输出给功率驱动模块,实现对直线压缩机的控制,同时DSP还要完成与上位机的通讯任务。功率驱动模块选用三端双向可控硅为功率器件,通过控制可控硅的导通时间来控制加给直线压缩机的能量。由于可控硅的制造工艺决定了可控硅会存在寄生电容,在可控硅由导通到关断时,在电容的两端会出现等效电流,也就是出现了触发电流,会导致可控硅的误触发。为了避免误触发现象的发生,在可控硅两端加如图4所示的滤波电路。

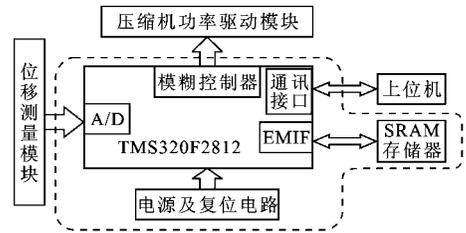


图3 模糊控制系统基本结构图

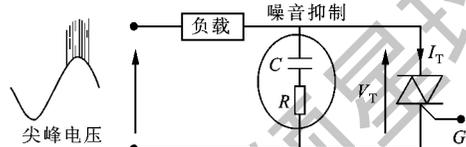


图4 可控硅滤波电路

4 模糊控制系统软件设计

系统软件的主要任务是实现对直线压缩机活塞上死点的控制,它包括初始化程序、模糊控制程序及中断服务程序。中断服务程序包括串口中断服务程序、捕获中断程序及定时器中断程序,其主要完成参数设定和数据上传等人机交互功能、电压零点检测和三相双向可控硅导通时间的控制,以及启动ADC模块进行数据采集处理等功能。图5为软件的系统流程图。

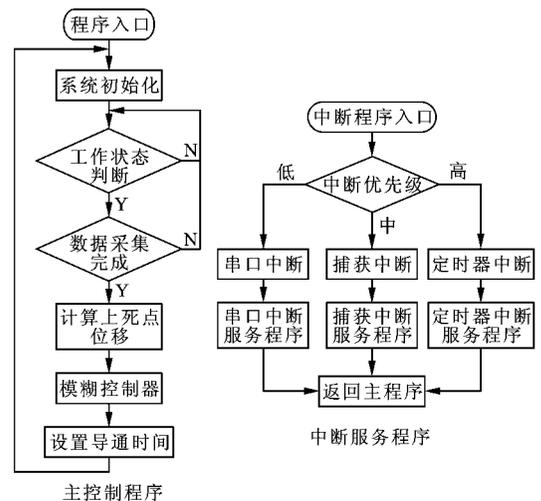


图5 软件系统流程图

5 实验结果

为了研究模糊控制系统的性能,对图6所示的模糊控制系统电路板进行了以空气为压缩机工作介

质的实验研究. 如图 6 所示, 压力传感器测量压缩机的排气压力信号, 活塞位移测量模块经过测量直线电机的电压和电流输出活塞行程信号, 同时模糊控制电路板的中央处理器模块采集压力信号和活塞行程信号计算出对应的活塞上死点位移. Labview 数据采集系统采集和处理安装在直线压缩机上的差动电压式位移传感器测量的直线压缩机活塞位移信号, 得出压缩机活塞的真实上死点位移信号, 同时通过 RS232 串口通讯对模糊控制电路板发送活塞上死点位移的控制指令. 存储示波器显示和存储直线电机的驱动电压、电流及可控硅控制信号.

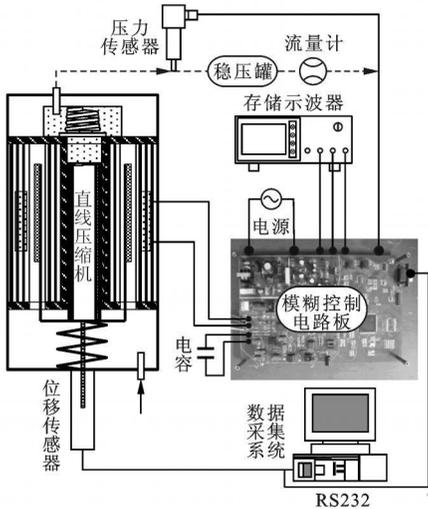


图 6 模糊控制的实验系统

功率驱动模块的控制信号与直线电机的负载电压 U 和电流 I 信号如图 7 所示, 可控硅的导通时间 T_f 控制负载电压和电流的大小, 从而控制压缩机的活塞位移. 当可控硅处于关断状态时, 负载电流为 0, 负载电压为线圈中的感应电动势.

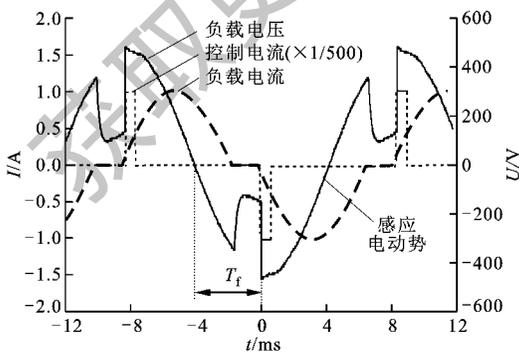


图 7 控制信号与负载电压、电流的关系

经过对模糊控制系统的量化因子和输出比例因子进行实验优化, 得出了直线压缩机活塞上死点位移的最优响应曲线, 见图 8. 由图 8 可见, 系统几乎

无超调, 响应时间大约为 12 s, 稳态误差约为 0.2 mm. 表 1 为模糊控制系统的主要技术参数.

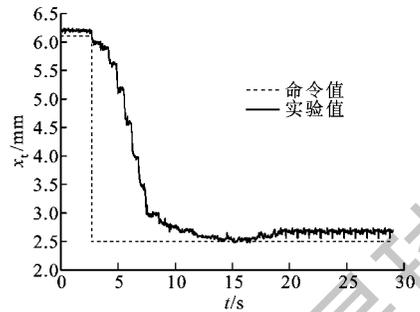


图 8 模糊控制系统的响应曲线

表 1 模糊控制系统主要技术参数

K_e	K_{ec}	K_u	t_s/s	N	a_0	a_s
6	0.12	6.67	0.02	3	0.45	0.75

图 9 为直线压缩机在不同工况下, 模糊控制系统的响应曲线, 在上死点附近几乎无超调, 稳态误差小于 0.25 mm. 模糊控制系统的稳态误差主要来源于活塞位移测量模块的电磁干扰, 误差会导致计算的活塞位移偏离真实的活塞位移^[9].

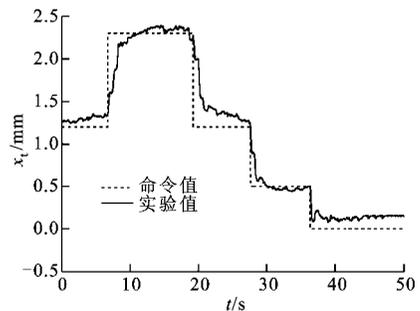


图 9 变工况下模糊控制系统的响应曲线

6 结论

直线冰箱压缩机是一种典型的多场耦合机械振动系统, 本文的模糊控制系统在无需压缩机系统模型的前提下, 成功地控制了直线压缩机的活塞位移, 在上死点附近几乎无超调, 稳态误差小于 0.25 mm, 这对于冰箱、空调及斯特林制冷机等领域的直线压缩机控制具有很大的应用前景.

参考文献:

[1] LEE H K, SONG G. Development of the linear compressor for household refrigeration [C] //15th International Compressor Engineering Conference, West Lafa-

- ette, Indiana, USA; Purdue Univ. School of Mechanical Engineering, 2000; 31-38.
- [2] PARK K, HONG E, LEE H. Linear motor for linear compressor [C] // 16th International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, Indiana, USA; Purdue Univ. School of Mechanical Engineering, 2002; 31-38.
- [3] REDLICH R, UNGER R Z, VAN DER WALT N R. Linear compressor: motor configuration, modulation and system [C] // 13th International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, Indiana, USA; Purdue Univ. School of Mechanical Engineering, 1996; 68-74.
- [4] YANG Y P, HUANG B J. Fuzzy control on the phase and stroke of a linear compressor of a split-Stirling cryocooler [J]. Cryogenics, 1998, 38(2): 231-238.
- [5] Sunpower, Inc. Method and apparatus for measuring piston position in a free piston compressor; USA, 5496153 [P]. 1996-03-05.
- [6] 张金权, 畅云峰, 牛元君, 等. 直线冰箱压缩机活塞位移的自传感器技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(9): 1049-1053.
- ZHANG Jinquan, CHANG Yunfeng, NIU Yuanjun, et al. Study on self-sensing technique of linear refrigerator compressor's piston displacement [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(9): 1049-1053.
- [7] HEO K B, LEE C W, SONG G Y, et al. Capacity modulation of linear compressor for household refrigerator [C] // 17th International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, Indiana, USA; Purdue Univ. School of Mechanical Engineering, 2004; 1-8.
- [8] 张金权, 畅云峰, 邢子文. 直线冰箱压缩机的频率特性 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(3): 277-280.
- ZHANG Jinquan, CHANG Yunfeng, XING Ziwen. Study on frequency characteristics of linear refrigerator compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(3): 277-280.

(编辑 王焕雪)

(上接第 37 页)

线并非采用外转子角度参数进行描述, 因此几何意义明确. 在研究复杂的型线问题时, 可简化研究的难度. 通过计算短幅外摆线的曲率和曲率半径, 比较简单地得到了内转子型线上各点的曲率和曲率半径, 并以短幅外摆线为参考, 得到了型线上出现极值点时的发生角, 将其分为 3 种情况加以讨论, 最终得到了内转子型线无过切的条件. 最后, 选取了 2 个计算实例对本文所推导的无过切条件进行了验证.

研究结果表明, 当采用内外转子齿数、基圆半径和齿顶圆半径作为自由变量时, 通过本文推导得到的公式, 可将内外转子间的偏心距的取值限制在一定合适的范围内. 在该范围所选取的偏心距可保证内转子型线光滑连续, 且所推导的公式为显式表达, 无需进行复杂的数值计算或迭代.

参考文献:

- [1] MIMMI G C, PENNACCHI P E. Non-undercutting conditions in internal gears [J]. Mechanism and Machinery Theory, 2000, 35(4): 477-490.
- [2] YE Zhonghe, ZHANG Wei, HUANG Qinghai, et al. Simple explicit formulae for calculating limit dimensions to avoid undercutting in the rotor of a cycloid rotor pump [J]. Mechanism and Machinery Theory, 2006, 41(9): 405-414.
- [3] 郁永章, 张旭东. 一种新型全平衡高强度转子式压缩机的几何关系 [J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(11): 1193-1197.
- YU Yongzhang, ZHANG Xudong. Geometry relations of a new rotary compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(11): 1193-1197.
- [4] 苏步青, 华宣积, 忻元龙. 实用微分几何引论 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.

(编辑 王焕雪)