

直线冰箱压缩机活塞位移的自传感技术研究

张金权¹, 畅云峰¹, 牛元君², 郭福田²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 通过对直线冰箱压缩机的动磁直线电机的等效电路进行分析,建立了活塞位移自传感器的数学模型,得出了压缩机活塞位移的检测及控制方式.为了研究自传感器的性能,设计了一套基于虚拟仪器的活塞位移测控系统,分别对变电压驱动和变可控硅的导通时间驱动方式下的自传感器特性进行了实验研究.实验研究结果表明,利用直线电机作为位移传感器的方法是行之有效的,在活塞行程范围内,变电压和变导通时间驱动方式下的稳态误差分别小于4.4%和7.3%,在上死点附近,最大稳态误差分别为1%和3%,完全可以满足直线冰箱压缩机的控制要求.

关键词: 直线压缩机;冰箱;自传感;直线电机;控制

中图分类号: TH457 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1049-04

Study on Self-Sensing Technique of Linear Refrigerator Compressor's Piston Displacement

Zhang Jinquan¹, Chang Yunfeng¹, Niu Yuanjun², Guo Futian²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A mathematic model of a self-sensor was established by analyzing the moving-magnet linear motor of a linear refrigerator compressor, and measurement and control methods of piston displacement were achieved. For studying the performance of a self-sensor in the driving mode of variable-voltage control and variable time of flow control, a piston displacement measurement and control software based on LabVIEW (version 7.0) was designed, and the experimental study was carried out. The results show that using the linear motor as a self-sensor is effective. Its steady-state error is smaller than 4.4% in variable-voltage control and 7.3% in variable time of flow control in the range of piston stroke, and its maximum steady-state error is 1% in variable-voltage control and 3% in variable time of flow control near the top clearance distance. The self-sensor can be applied in the linear refrigerator compressor satisfactorily.

Keywords: linear compressor; refrigerator; self-sensor; linear motor; control

直线冰箱压缩机是一种新型的高效制冷压缩机,其没有传统活塞压缩机所具有的曲柄连杆机构,直接由直线电机驱动活塞做往复直线运动.由于没有曲柄连杆机构,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的控制,特别是在余隙非常小的时候,要避免活塞撞击缸盖.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.在早期的系统中,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,而且使得压缩机结构变得复杂.由于位移传感器的自身性能的差异,封装到冰箱压缩机壳体内后,容易受到电磁干扰,影响了整机的可靠性,一旦出现故障,则冰箱压缩机系统无法正常工作.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、经济的无传感器的控制系统。

自传感是一种利用直线电机本身作为位移传感器的技术,不同于传统的位移传感器,具有结构简单、成本低、鲁棒性强及易于维修等优点。美国 Sun-power 公司研究开发了一种测量自由活塞式压缩机活塞位置的方法和设备^[1]。韩国 LG 也开发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^[2]。Hanson 等人^[3]采用直线电机本身作为传感器,开发了一套振动筛控制系统。

本文主要对直线冰箱压缩机的自传感技术进行研究,得出一套具体的活塞位移控制方法。对动磁式直线电机的等效电路进行分析,得出自传感器的数学模型,在此基础上开发了自传感器位移检测电路。为了研究自传感器的性能,设计了一套基于虚拟仪器的活塞位移测控系统,对自传感器进行了实验研究。

1 数学模型

图1为直线冰箱压缩机活塞运动示意图,图中 x_T 为活塞上死点位置, x_0 为活塞运动中心位置偏移量, A_s 为活塞初始位置, A_x 为活塞运动行程。

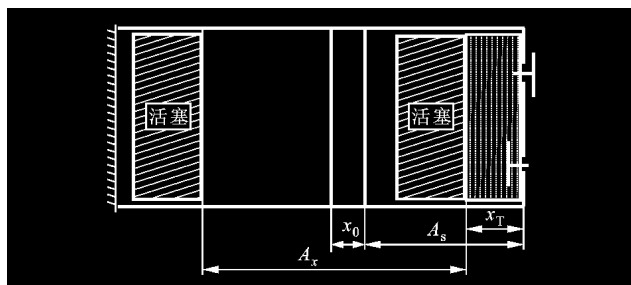


图1 压缩机活塞运动示意图

由图1可知,活塞上死点位置为

$$x_T = A_s + x_0 - A_x/2 \quad (1)$$

x_T 的大小直接影响着直线冰箱压缩机的效率,需要对其进行精确控制,其值可通过活塞行程、活塞运动中心偏移量及活塞初始位置计算得出。活塞初始位置在压缩机设计时就可以确定,而活塞运动中心偏移量与排气压力有关,可以通过实验测得, x_0 与排气压力 p_d 之间的关系如图2所示, x_0 与 p_d 之间的关系为

$$x_0 = 5.36p_d^2 - 7.33p_d - 0.07 \quad (2)$$

图3为直线冰箱压缩机使用的直线电机线圈的等效电路,图中 R_i 为电流采样电阻, $u_i(t)$ 为采样电阻两端的电压, $u_c(t)$ 为电机线圈两端的电压。在考虑铁损后,将电机线圈的直流电阻 R_c 与铁损 R_l 的

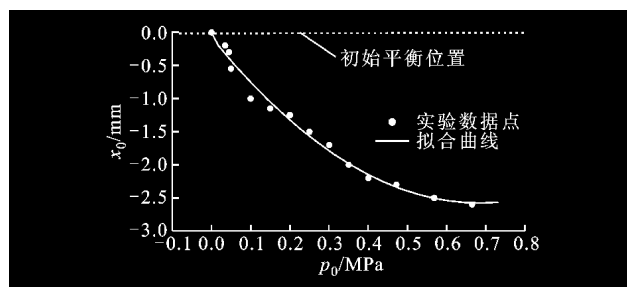


图2 活塞运动中心偏移量与排气压力的关系

影响合并为等效电阻 R_e , 同样将电感 L_c 由等效电感 L_e 来代替, 实验研究表明^[4-5], 其值与电流和电压的大小无关, 保持恒定, 可用实验的方法测量。等效电阻和电感为

$$R_e = R_c + \frac{\omega^2 L_c^2 R_l}{R_l^2 + \omega^2 L_c^2}, L_e = \frac{L_c R_l}{R_l^2 + \omega^2 L_c^2} \quad (3)$$

式中: ω 为线圈电压的角频率。

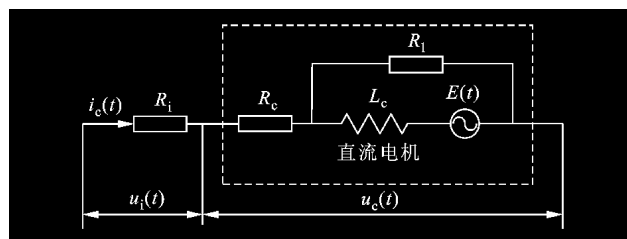


图3 直线电机线圈等效电路

直线电机的感应电动势为

$$E(t) = \alpha x'(t) \quad (4)$$

式中: α 为直线电机的机电转化常数, 对于动磁式直线电机而言, 其值与动子位置无关, 保持恒定, 可用实验的方法测量^[4-7]。

$E(t)$ 不能直接从电机线圈中测量, 但可以由直线电机线圈两端的电压 $u_c(t)$ 及电流 $i_c(t)$ 得出

$$E(t) = u_c(t) - R_e i_c(t) - L_e \frac{di_c(t)}{dt} \quad (5)$$

则压缩机活塞的速度和位移为

$$x'(t) = \frac{1}{\alpha} \left[u_c(t) - R_e i_c(t) - L_e \frac{di_c(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

$$x(t) = \int x'(t) dt \quad (7)$$

$i_c(t)$ 可通过检测电流采样电阻 R_i 两端的电压得出, 其值为

$$i_c(t) = \frac{u_i(t)}{R_i} \quad (8)$$

则活塞行程

$$A_x = |x_{\max}(t) - x_{\min}(t)| \quad (9)$$

由以上分析可知, 直线冰箱压缩机活塞位移的自传感器可通过检测线圈两端的电压及电流, 对其

进行运算后,再进行幅值检测,即可得出活塞的行程。

图4为直线冰箱压缩机活塞位移的自传感系统结构示意图,由电流检测单元、电压检测单元、位移计算单元、活塞行程计算单元及上死点计算单元组成, R_i 大约为 $0.1\ \Omega$ 。活塞运动中心偏移量与压缩机的排气压力有关,在冰箱控制系统中,由于压力传感器的成本较高,一般采用较低成本的温度传感器来检测压缩机的工况,而压缩工质的压力与温度有一定的对应关系,因此考虑到控制系统的经济性,实际应用中通过检测压缩机的排气温度得出该工况下的活塞运动中心的偏移量。

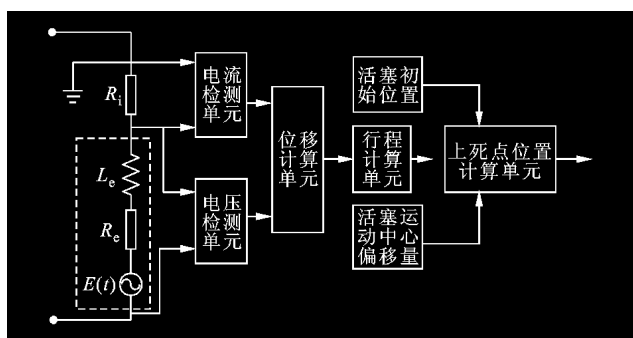


图4 自传感系统结构简图

图5为自传感系统位移计算单元的模拟电路图,图中 R_5 为滤波电阻, C_6 为滤波电容,其输出为

$$u_x = \int \left(\frac{R_2}{R_1 R_3 C_5} u_c(t) - \frac{R_i}{R_4 C_5} i_c(t) - \frac{R_i C_4}{C_5} \frac{di_c(t)}{dt} \right) dt \quad (10)$$

u_x 与 $x_{lv}(t)$ 之间呈线性关系,其表达式为

$$u_x = k x_{lv} \quad (11)$$

式中: k 为比例系数,由自传感器本身的参数决定,实验系统中的 k 值为9.375; $x_{lv}(t)$ 为差动式位移传感器测得的压缩机位移。

2 实验方法

为了研究自传感器的性能,设计了图6所示的实验装置,功率驱动模块主要为压缩机提供能量,位

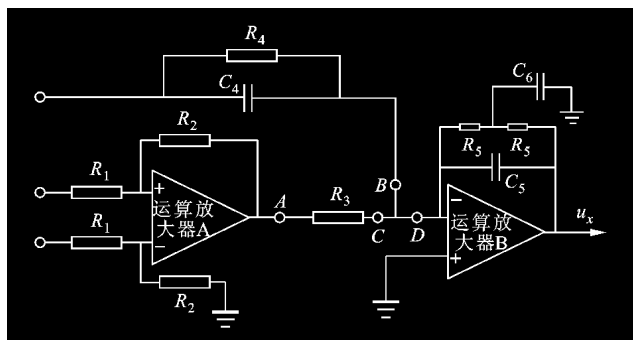


图5 位移计算单元电路图

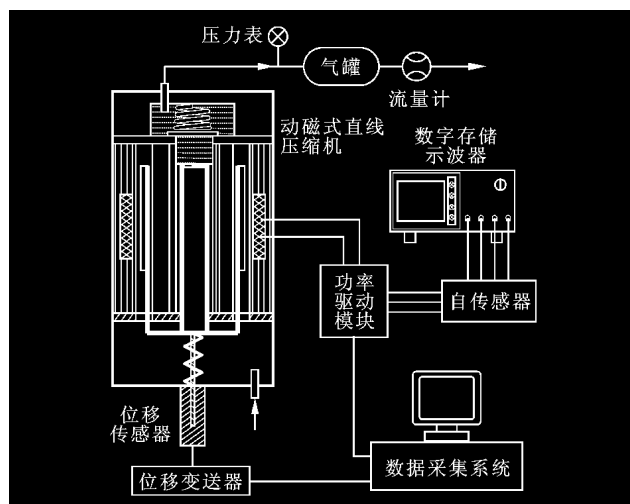


图6 直线冰箱压缩机自传感系统实验装置

移传感器为差动变压式结构,其量程为 $\pm 15\text{ mm}$,精度为 0.1% ,位移传感器的磁性铁芯固定在压缩机活塞运动部件上,传感器线圈部分固定在压缩机机架上,完成对压缩机活塞位移的测量。基于虚拟仪器的测控系统对位移传感器的信号进行采集处理,从而得出压缩机活塞的行程和上死点位置,同时可以向功率驱动模块发出控制指令,以调整输入给压缩机的能量,从而调整压缩机活塞位移。压力表测量压缩机的排气压力,流量计测量压缩机的排气量。由于自传感器的输出没有进行光电隔离,不能直接与数据采集系统相连,但可以通过TD2000型数字存储示波器对线圈两端的电压、电流及输出的活塞位移 $x(t)$ 进行采集,数字存储示波器采集的电压、电流及位移的信号分别为 u_v 、 u_i 及 u_x ,其与线圈两端的电压、电流之间的关系为

$$u_v = 0.006 u_c(t); u_i = 0.1 i_c(t) \quad (12)$$

3 实验结果与分析

实验研究了变电压驱动及变可控硅导通时间驱动下自传感器的性能,将自传感测得的活塞位移 u_x 与位移传感器测得的位移 $x_{lv}(t)$ 进行比较分析,得出了其稳态特性。

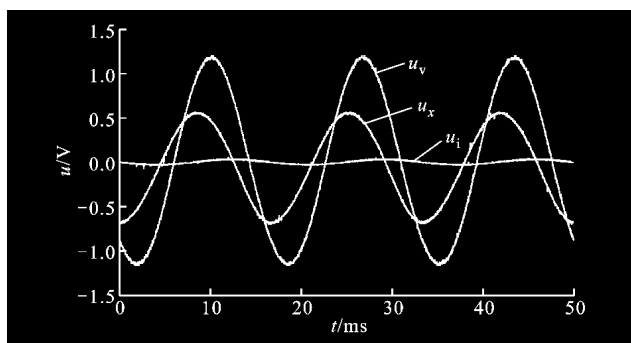
3.1 变电压驱动

变电压驱动方式是通过改变电源电压幅值来改变功率驱动模块供给直线压缩机的能量。图7为变电压下自传感器的 u_v 、 u_i 及 u_x 的波形, u_x 与 u_v 之间存在相位差, u_x 可表达为

$$u_x = x_m \sin(\omega t + \theta) \quad (13)$$

式中: x_m 为活塞位移幅值; θ 为相位差。

图8为不同排气压力和电压下,自传感器及位

图7 变电压下自传感器的 u_v 、 u_i 及 u_x 波形

移传感器的检测位移比较. 当压缩机处于不同排气压力下时, 同一活塞位移下的自传感器的稳态误差为

$$e = \frac{u_x/k - x_{lv}}{x_{lv}} \quad (14)$$

在活塞行程范围内, 其稳态误差值小于 4.4%, 在上死点附近 ($15 \text{ mm} < x_{lv} < 16 \text{ mm}$), 稳态误差值最大为 1%.

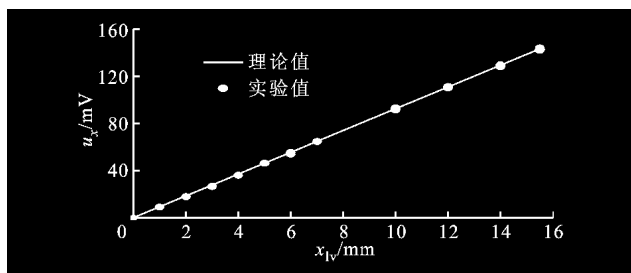
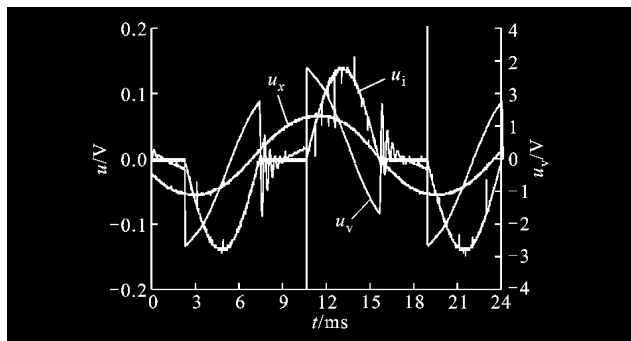


图8 变电压下自传感器与位移传感器的检测位移

3.2 变导通时间驱动

三端双向可控硅为开关元件, 可以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, 从而控制活塞运动的行程及上死点位置, 完成冰箱的冷量调节及避免活塞撞击排气阀片, 保证压缩机高效稳定地运行. 图9为变导通时间下自传感器的 u_v 、 u_i 及 u_x 的波形, u_x 与 u_v 之间存在相位差, 可表达为式(13). 由于采用变导通时间的驱动方式, 会出现高频高次谐波的干扰, 但通过在自传感器中加入

图9 变导通时间下自传感器的 u_v 、 u_i 及 u_x 波形

滤波单元, 可减小外界的干扰, 使 u_x 不会失真.

图10为不同排气压力和导通时间下, 自传感器及位移传感器的检测位移比较. 当压缩机处于不同排气压力下时, 同一活塞位移下的自传感器的稳态误差 e 可由式(14)得出, 在活塞行程范围内, 其稳态误差值小于 7.3%, 在上死点附近 ($15 \text{ mm} < x_{lv} < 16 \text{ mm}$), 稳态误差值最大为 3%.

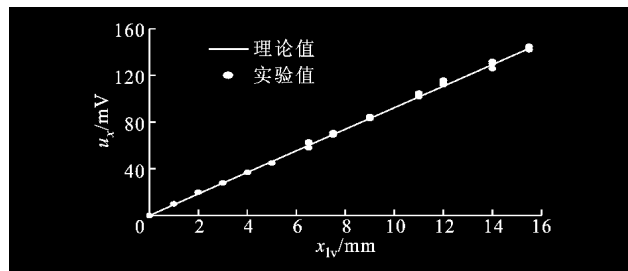


图10 变导通时间下自传感器与位移传感器的检测位移

对于直线冰箱压缩机而言, 希望活塞位移的控制精度在上死点附近越高越好, 因为余隙容积对压缩机的效率影响很大. 但是, 当冰箱压缩机进行容量调节时, 即活塞行程变小, 上死点增大, 对位移的控制精度要求不高. 因此, 在开发自传感器时, 重点在于提高上死点附近的位移检测精度. 自传感器的稳态误差主要来源于外界对位移检测电路的高频干扰及活塞行程的检测算法误差, 因此优化设计滤波单元及行程检测算法是提高自传感器精度的关键.

4 结 论

对直线电机进行分析, 得出了自传感器的数学模型. 对自传感器的特性进行了变电压和变导通时间驱动方式下的实验研究, 结果表明: 利用直线电机作为位移传感器的方法是行之有效的, 在活塞行程范围内, 变电压和变导通时间驱动方式下的稳态误差分别小于 4.4% 和 7.3%, 在上死点附近 ($15 \text{ mm} < x_{lv} < 16 \text{ mm}$), 最大稳态误差值分别为 1% 和 3%, 完全可以满足直线冰箱压缩机的控制要求.

相对于传统的位移传感器而言, 自传感器具有结构简单、成本低、抗干扰性强及运行可靠等优点, 对于直线冰箱压缩机、直线空调压缩机及直线空气压缩机的发展应用及商业化, 具有重大意义.

参考文献:

- [1] Sunpower. Method and apparatus for measuring piston position in a free piston compressor: USA, 5342176 [P]. 1994-08-30.
- [2] LG 电子株式会社. 用于控制线性压缩机活塞位置的装

- 置和方法:中国,00 818510.7[P]. 2003-06-18.
- [3] Hanson B M, Levesley M. Self-sensing application for electromagnetic actuators [J]. *Sensors and Actuators*, 2004, 116:345-351.
- [4] Redlich R, Unger R Z, van der Walt N R. Linear compressor: motor configuration, modulation and system [C]// 13th International Compressor Engineering Conference. Purdue, USA: School of Mechanical Engineering, Purdue Univ. , 1996, 68-74.
- [5] Park K, Hong E, Lee H. Linear motor for linear compressor [C]// 16th International Compressor Engineering Conference. Purdue, USA: School of Mechanical Engineering, Purdue Univ. , 2002, 31-38.
- [6] 卢琴芬,叶云岳. 动磁式直线振动电机的特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(19): 135-139.
Lu Qinfen, Ye Yunyue. A study on characteristic of moving magnet type linear oscillatory motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(19): 135-139.
- [7] 张金权. 动磁式直线压缩机试验研究[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2005.
- (编辑 王焕雪)