

直线电机参数对活塞位移自传感器输出的影响

畅云峰, 张金权, 邢子文

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 通过分析直线压缩机的直线电机的等效电路和活塞位移自传感器的模拟电路, 得出了模拟电路参数与直线电机参数之间的关系. 对直线电机参数和活塞位移自传感器的输出特性进行了实验研究. 结果表明: 推力系数在一定的动子行程内是基本恒定的, 在上死点附近, 推力系数有减小趋势; 等效电感和电阻在一定的工作电流内是基本恒定的; 直线电机等效电阻及电感的波动对活塞位移自传感器的输出几乎无影响, 推力系数的波动影响活塞位移自传感器输出幅值的大小; 若要提高直线压缩机活塞位移自传感器的输出精度, 需要对模拟电路参数进行微调, 以确保输出不失真, 同时需要在活塞上死点附近对自传感器的输出进行修正.

关键词: 直线压缩机; 直线电机; 自传感器; 推力系数

中图分类号: TH457; TB652 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1382-04

Effect of Linear Motor Parameters on Output of Piston Displacement Self-Sensor

CHANG Yunfeng, ZHANG Jinquan, XING Ziwen

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

Abstract: The relations between the simulation circuit parameters and the linear motor parameters were achieved by analyzing the equivalent circuit of the linear motor and the simulation circuit of piston displacement self-sensor. The experimental study on the linear motor parameters was carried out. The results show that the force coefficient, the equivalent inductance and resistance are constant when the moving magnets oscillate in an operating region. The force coefficient decreases slightly when the moving magnet is close to the top dead position(TDP). The equivalent inductance and resistance of the linear motor are constant in a certain current range. The experiment was conducted to investigate the output characteristics of the self-sensor. The results show that the output waveform is hardly influenced by the fluctuating of the equivalent inductance and resistance, and the output amplitude is influenced by the force coefficient. In order to improve the output precision of the self-sensor, it is suggested that the parameters of the self-sensor' circuit should be slightly adjusted to avoid the output waveform distortion, and the output of the self-sensor should be corrected when the piston is close to TDP.

Keywords: linear compressor; linear motor; self-sensor; force constant

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, 其具有机械效率高、结构紧凑、易变容量控制等优点^[1]. 作为直线压缩机的驱动部分, 直线电机按动子类型可分为动圈

式、动铁式及动磁式. 美国 Sunpower 公司的研究结果表明^[2]: 动圈式直线电机设计容易, 行程易控制, 但其磁路气隙小, 驱动力较小, 效率低, 适于小型制冷压缩机; 动铁式直线电机的运动铁芯在气隙中是

旋转、不稳定的,容易偏离气隙中心轴线,在活塞上产生很大的径向力;动磁式直线电机具有效率高、驱动力大、动子质量小、结构紧凑等优点.近年来,高能永磁材料的发展使得动磁式直线电机得到飞速的发展,国外已成功应用于冰箱压缩机、空调压缩机、空气压缩机、斯特林制冷机及脉管制冷机等领域.

动磁直线电机驱动的压缩机虽然具有众多优点,但其活塞处于自由运动状态,为了有效地控制活塞运动及防止活塞撞击缸盖,必须对活塞位移进行检测和控制.韩国 LG 公司研究了一种利用动磁直线电机作为活塞位移传感器的控制装置^[3-4].西安交通大学对一种冰箱用动磁式直线压缩机活塞位移的自传感技术进行了研究,结果表明:利用动磁直线电机作为活塞位移的传感器是可行的,但由于传感器的输出特性受到直线电机自身参数(推力系数、等效电感及等效电阻)的影响,使得自传感器的电路参数及输出需要进行优化处理^[5].

本文主要对动磁式直线电机的等效电路进行了分析,得出了活塞位移自传感器的输出与电机参数之间的关系,在实验研究电机参数的稳定特性的基础上,通过调节活塞位移自传感器模拟电路参数及其输出特性,得出模拟电路参数及输出的优化处理方法.

1 直线电机等效电路分析

在考虑铁损后,动磁式直线电机的等效电路如图 1 所示,将电机线圈的直流电阻 R_c 与铁损 R_l 的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,其等效电阻和电感分别为

$$R_e = R_c + \frac{\omega^2 L_c^2 R_l}{R_l^2 + \omega^2 L_c^2}, \quad L_e = \frac{L_c^2 R_l}{R_l^2 + \omega^2 L_c^2} \quad (1)$$

式中: ω 为线圈电压的角频率.

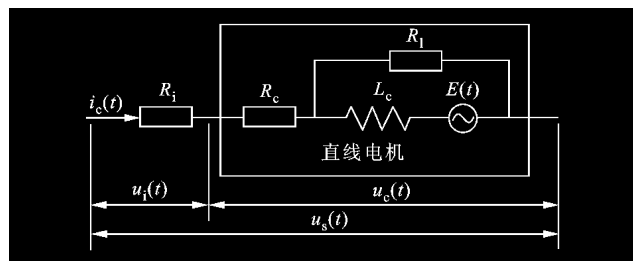


图 1 直线电机线圈等效电路

直线电机的感应电动势为

$$E(t) = \alpha x'(t) \quad (2)$$

式中: α 为直线电机的推力系数.

由图 1 可知, $E(t)$ 还可以表示为

$$E(t) = u_c(t) - R_e i_c(t) - L_e \frac{di_c(t)}{dt} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得出压缩机活塞位移为

$$x(t) = \frac{1}{\alpha} \int \left(u_c(t) - R_e i_c(t) - L_e \frac{di_c(t)}{dt} \right) dt \quad (4)$$

由式(4)可知,压缩机活塞位移可以通过检测直线电机线圈两端的电压及电流,然后通过运算得出.为了获得活塞的位移,采用模拟电路实现其运算过程^[5],活塞位移自传感器模拟电路的输出为

$$u_x = \int \left(\frac{R_2}{R_1 R_3 C_5} u_c(t) - \frac{R_i}{R_4 C_5} i_c(t) - \frac{R_i C_4}{C_5} \frac{di_c(t)}{dt} \right) dt \quad (5)$$

式中: R_i 为电机线圈电流采样电阻; $R_1 \sim R_4$ 、 C_4 及 C_5 为模拟电路的参数.

采用类比的方法,从式(4)和式(5)可以得出

$$\frac{R_2}{R_1 R_3 C_5} = 1 \quad (6)$$

$$\frac{R_i}{R_4 C_5} = R_e \quad (7)$$

$$\frac{C_4 R_i}{C_5} = L_e \quad (8)$$

直线压缩机的活塞位移还可表示为

$$x = S \sin(\omega t) \quad (9)$$

式中: S 为活塞行程.

当采用位移传感器测量直线压缩机活塞的位移时,活塞位移自传感器模拟电路输出的活塞行程为

$$S_x = k S_{lv} \quad (10)$$

式中: S_{lv} 为位移传感器测得的活塞行程,即为活塞实际行程; k 为比例因子,与直线电机推力系数及模拟电路参数有关.

直线电机的等效电阻和电感可采用实验测量的方法得出,再由式(6)~式(8)得出活塞位移自传感器模拟电路的理论参数($R_1 \sim R_4$ 、 C_4 及 C_5).当自传感器模拟电路的参数一定时,等效电阻、等效电感及推力系数的变化会直接影响自传感器的输出特性.

2 直线电机参数的实验研究

直线电机参数包括了等效电阻、等效电感及推力系数,为了研究其在不同的活塞行程及线圈电流下的变化情况,设计了如图 2 所示的推力系数测量装置和图 3 所示的等效电阻和电感测量装置.

如图 2 所示,机架将直线电机的内定子、外定子和线圈联为一体,置于机械螺旋弹簧上.弹簧固定在

动子活塞组件上,并一同置于测试平台上.通过调节电阻 R 可以改变线圈电流,从而改变直线电机的电磁推力.万用表用来测量线圈的电流,游标卡尺用来测量电机定子的位移.不同活塞位移时的电机推力系数为

$$\alpha = \frac{K(x_m - x_{m0})}{i} \quad (11)$$

式中: x_m 为定子的位移; x_{m0} 为定子的初始位移; i 为定子线圈的电流; K 为弹簧的刚度系数.

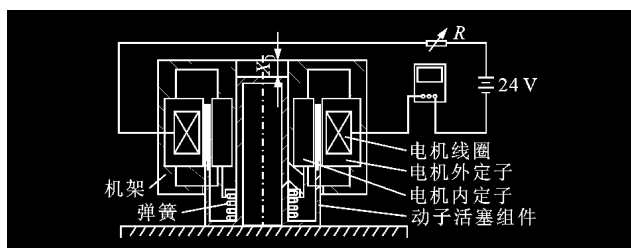


图2 直线电机推力系数测量系统图

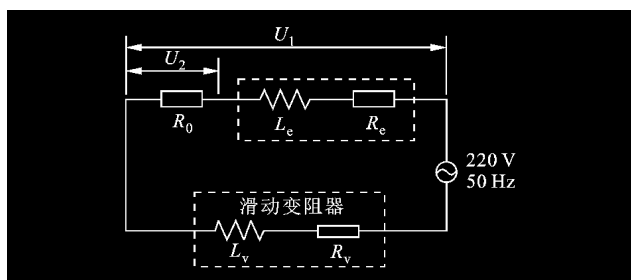


图3 直线电机等效电阻电感测量电路图

如图3所示,直线电机线圈等效为等效电阻 R_e 和等效电感 L_e ,滑动变阻器等效为等效电阻 R_v 和等效电感 L_v ,使用 TDS2014 型数字存储示波器记录标准电阻 R_0 及与直线电机线圈两端的电压 U_2 和 U_1 . U_1 和 U_2 之间存在的相位差为

$$\varphi = \arctan \frac{U_1}{U_2} = \arctan \frac{2\pi f L_e}{R_0 + R_e} \quad (12)$$

式中: f 为电源频率.

直线电机线圈的等效电感为

$$L_e = \frac{(R_0 + R_e) \tan \varphi}{2\pi f} \quad (13)$$

在测量直线电机线圈的等效电阻 R_e 时,假设直流电阻 R_c 为 R_e ,可直接用数字万用表测量.

图4为直线电机动子处于不同位置时的推力系数,从图中可知,在直线电机动子运动行程内推力系数基本保持恒定,在定子边缘附近,推力系数有减小趋势.

图5为不同电流时直线电机线圈的等效电感,

从图中可知,在直线电机工作电流内等效电感基本保持恒定.

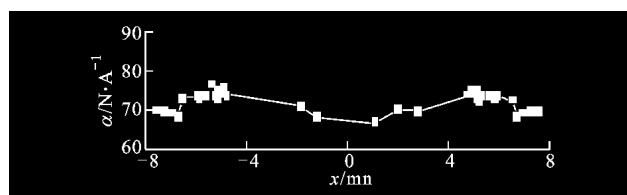


图4 不同动子位置时的直线电机推力系数

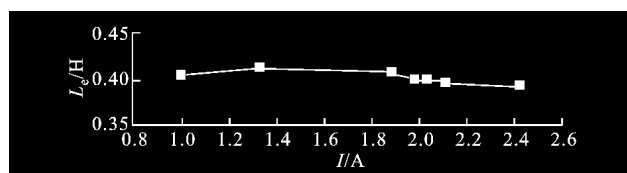


图5 不同电流时的直线电机等效电感

3 电机参数对自传感器输出的影响

忽略直线电机自身参数(α 、 R_e 和 L_e)的变化取其平均值时,可初步确定自传感器模拟电路的理论参数($R_1 \sim R_4$ 、 C_4 、 C_5 及 k),如表1所示.

表1 直线电机及模拟电路参数

R_e/Ω	L_e/H	$\alpha/N \cdot A^{-1}$	$R_1/k\Omega$	$R_2/k\Omega$	$R_3/k\Omega$
6.6	0.405	72.06	360	6	166.7
$R_4/k\Omega$	R_i/Ω	$C_4/\mu F$	$C_5/\mu F$	$k/mV \cdot mm^{-1}$	
151.5	0.1	0.4	0.1	9.11	

当线圈电流采样电阻 R_1 、电容 C_5 及电阻 R_1 和 R_2 取定后,直线电机线圈的等效电阻 R_e 影响着电阻 R_4 ,电阻 R_3 与直线电机参数无关,其受到自传感器本身特性的影响,直线电机线圈的等效电感 L_e 影响着电容 C_4 .直线电机的推力系数影响着自传感器输出的活塞位移与实际活塞位移之间的比例因子 k .

在直线压缩机运行时,直线电机线圈的等效电阻和电感的波动会导致活塞位移自传感器模拟电路的参数偏离理论设计值.在上死点附近时,推力系数的减小会导致自传感器输出的活塞位移大于实际活塞位移.因此,为了提高活塞位移自传感器的输出精度,需要对模拟电路参数进行微调,同时对自传感器的输出进行修正.

由图5可知,直线电机线圈的等效电感波动范围为 $-0.012 \sim 0.014$ H,则电容 C_4 的变化范围为 $-0.012 \sim 0.014 \mu F$,实验中改变电容 C_4 (0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 μF),结果发现输出波形无变化.实验

中改变电阻 R_3 ($100 \sim 300 \text{ k}\Omega$) 和 R_4 , 结果发现 R_4 在 $100 \sim 200 \text{ k}\Omega$ 范围内时输出波形无变化, R_3 对输出结果影响很大. 图 6 为不同 R_3 时自传感器输出的活塞位移波形, 当 R_3 偏离理论值较大时, 自传感器输出的活塞位移失真, 在理论值附近时, 其输出可视为正弦波.

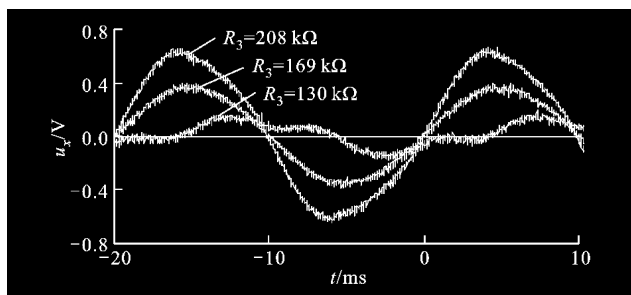


图 6 不同 R_3 时自传感器输出的活塞位移波形

直线电机的推力系数影响着活塞位移自传感器输出幅值的大小, 其与输出波形无关. 当压缩机活塞余隙容积较小时, 直线电机定子处于定子边缘附近, 其值小于平均值, 为了提高压缩机活塞运动的控制精度, 在上死点附近需要对活塞位移传感器的输出进行修正, 修正后的输出为

$$S'_x = S_x + \delta S \quad (14)$$

式中: δS 为修正值, 可通过实验的方法测得为

$$\delta S = S_x - kS_{lv} \quad (15)$$

图 7 为不同活塞位移下传感器的输出, 由图 4 和图 7 可知, 当直线电机的定子行程在 $8 \sim 16 \text{ mm}$ 范围内时, 直线电机推力系数发生波动, 而活塞行程 S_{lv} 在 $8 \sim 16 \text{ mm}$ 范围内时, 自传感器输出的活塞行程 S_x 偏离理论值并波动, 其与真值的偏差为 $-4.2 \sim 5.2 \text{ mV}$.

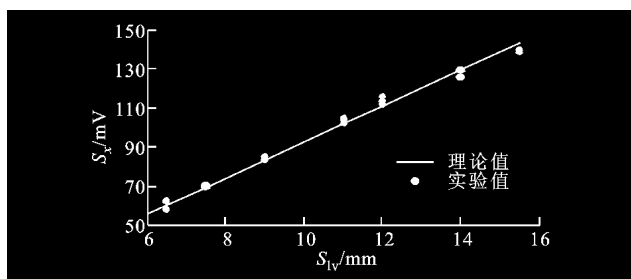


图 7 活塞位移传感器的输出

4 结 论

(1) 直线电机定子在其运动行程内推力系数基本保持恒定, 在定子边缘附近, 推力系数减小并波动. 在直线电机工作电流内等效电感基本保持恒定.

(2) 在忽略直线电机自身参数的变化取其平均值时, 可确定直线压缩机活塞位移自传感器模拟电路的理论参数.

(3) 直线电机等效电阻及电感的波动对活塞位移传感器的输出几乎无影响. 模拟电路参数 R_3 对活塞位移传感器的输出影响很大, 为了提高传感器的输出精度, 需要对模拟电路参数 R_3 进行微调. 直线电机的推力系数的波动影响着活塞位移传感器的输出幅值大小, 在上死点附近时, 应该对自传感器输出进行修正.

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 Lafayette, Indiana, USA; Purdue Univ. School of Mechanical Engineering, 2000;31-38.
- [2] REDLICH R. A summary of twenty years experience with linear motors and alternators [C]//Proceedings of Linear Drives for Industry Applications Conference (LDIA'95). Tokyo, Japan; Musashi Institute of Technology. Department of Electrical and Electronic Engineering, 1995;64-71.
- [3] 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, 818510.7[P]. 2003-06-18.
- [4] 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.
- [5] 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.

(编辑 王焕雪)