

动磁直线电机驱动压缩机的建模与仿真

张金权, 畅云峰

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 通过控制三端双向可控硅的导通时间来控制活塞位移的方法,建立了动磁直线电机驱动的压缩机的机械系统、热力系统及电磁系统数学模型. 用该模型分析了压缩机的动态性能,得出了不同导通时间的电机线圈电压、电流及活塞行程和上死点位置. 结果表明:仿真与实验结果吻合较好,表明该模型是行之有效的,控制及求解方法是正确的. 由于考虑了等效阻尼系数的可变性、电机参数的准确性及算法对仿真结果的影响,使得仿真与实验结果误差小于10%,完全可以满足工程设计的需求. 该模型具有可靠性好、准确性高、应用方便等特点,为压缩机系统参数的优化设计提供了新的途径,可以作为设计开发直线压缩机的一个有效工具.

关键词: 压缩机;动磁直线电机;仿真;数学模型;导通时间

中图分类号: TH457; TB652 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0820-05

Modeling and Simulation of Compressor Driven by Moving-Magnet Linear Motor

Zhang Jinqun, Chang Yunfeng

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

Abstract: The mathematical models of mechanical system, thermodynamic system and electromagnetic system of a compressor driven by moving-magnet linear motor were established on the basis of the control method that piston's displacement is changed by changing the triac's time of flow. The dynamic performance of the linear compressor was simulated. The voltage and current curves of the motor coil, and the stroke and top dead center of the piston were presented at different time of flow. The simulation results are in good agreement with experimental data. Considering influence of equivalent damping coefficient's changeability, motor parameter's veracity and algorithm, the deviation of the simulation results from the experimental data is less than 10%.

Keywords: compressor; moving-magnet linear motor; simulation; mathematical model; time of flow

动磁直线电机驱动的压缩机是一种新型直线压缩机,其与动铁式、动圈式驱动的压缩机相比,具有单位推力大、动子质量小、结构简单、容易调控、效率高等特点,有着广泛的应用前景^[1-3]. 目前,国外已经将该技术应用于军用和民用领域^[4-5].

直线压缩机是典型的机电一体化系统,由于其结构的特殊性,对其性能特性的研究不能套用传统的往复电动机驱动的活塞式压缩机的分析方法. 为了研究其整体特性及性能,开发高效经济的压缩机及控制系统,对其进行建模和仿真就显得十分必要.

目前,国内外对直线压缩机及其控制系统进行仿真时,主要集中在动圈直线电机驱动的压缩机的单自由度弹簧共振系统、非线性系统及电磁系统的数值模拟方面^[6-12],在仿真研究时,很少考虑压缩机行程及上死点的控制方法及等效阻尼系数的可变性对理论模型的影响程度,对于所建压缩机模型的正确性和准确性缺乏实验验证. 为了验证理论模型的正确性和准确性,实验结果与仿真结果的比较及分析研究就显得非常重要.

本文主要通过控制可控硅开关的导通时间来控

制活塞位移的方法,建立了动磁式直线压缩机的机械系统、热力系统及电磁系统模型.在实验结果的基础上,通过合理选取电机参数、等效阻尼系数及启动电容等参数完成压缩机的仿真研究.

1 机械系统模型

动磁式直线压缩机的结构如图1所示,动磁式直线电机的动子在交变的磁场中受到周期性的交变力作用,带动活塞组件做往复直线运动,从而完成压缩-排气-膨胀-吸气的周期性过程.

由于机械运动部分的质量与静态部分的质量相比要小得多,因此在这里可以不考虑机体的振动.这样,机械系统可以简化为如图2所示的单质量、单自由度的受迫阻尼振动模型.

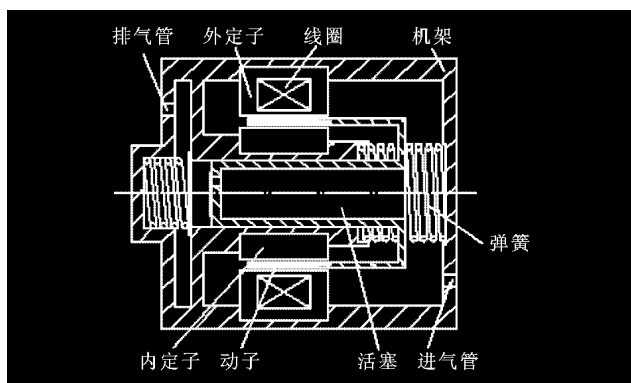


图1 直线压缩机结构简图

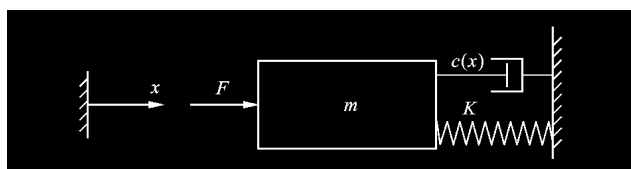


图2 机械系统简化模型

当压缩机工作时,其活塞组件主要受到以下各力的作用:电机推力 F_m 、气体力 F_g 、弹簧力及阻尼力.

根据牛顿第二定律可得到力平衡方程

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c(x) \frac{dx}{dt} + K(x - x_0) = F_m + F_g \quad (1)$$

式中: x 为活塞的位移,坐标原点为气缸端面的位置; x_0 为直线压缩机未加电时活塞的平衡位置; m 为运动活塞组件的质量; K 为弹簧的等效刚度系数; c 为系统的等效阻尼系数,实验研究表明其值随着活塞行程 s 的变化而变化,可通过实验的方法测得^[13].图3为系统的等效阻尼系数与活塞行程之间的关系图,模型中将其拟合成位移的一次函数.

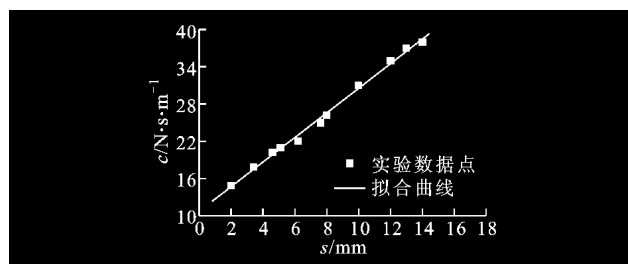


图3 阻尼与活塞行程之间的关系

2 热力系统模型

为了分析活塞部件的基本运动规律,对压缩机的进排气过程作如下假设:

- (1) 忽略进排气阀片的运动惯性,认为阀片瞬时开闭;
- (2) 气体的压缩和膨胀过程视为2个等熵过程,忽略其他传热因素影响,其绝热指数相等;
- (3) 忽略气体泄漏的影响及气体流动中的能量损失.

因此,作用于活塞上的气体力为

$$\left. \begin{aligned} F_g &= (p_{i+1} - p_s)A \\ p_{i+1} &= \left(\frac{x_i}{x_{i+1}} \right)^n p_i \quad p_s \leq p_{i+1} \leq p_d \\ p_{i+1} &= p_s \quad p_{i+1} < p_s \\ p_{i+1} &= p_d \quad p_{i+1} > p_d \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

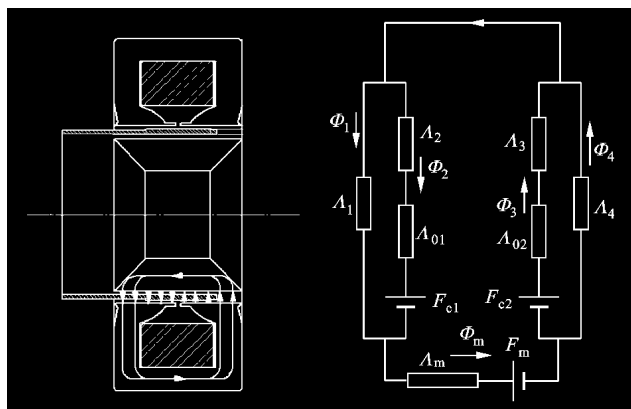
式中: A 为活塞的有效面积; p_{i+1} 为气缸内某一时刻的气体压力; p_s 为压缩机的吸气压力; p_d 为压缩机的排气压力.

3 电磁系统模型

3.1 动磁式直线电机的数学模型

动圈式直线电机由永磁体产生气隙磁场,载流线圈在稳恒磁场中受到安培力的作用,从而带动活塞组件做往复直线运动.动磁式直线电机的载流线圈在内外定子气隙之间产生交变的气隙磁场,径向充磁的永磁体动子处于内外定子形成的气隙之间,受到交变的电磁力,从而推动活塞组件做往复直线运动.电磁力的产生依赖于电流励磁磁场和永磁体磁场的相互作用,其表达式没有动圈式直线电机那么简单.由于磁场涉及到2个场的叠加,因此其磁路、力、电特性要相对复杂.通过磁电类比原理,将动磁式直线电机(见图4)的磁路抽象如图4b所示(Φ 为磁通, Δ 为磁导, F 为磁动势).图中将分布的气隙和磁轭磁阻参数等价为集总参数,假设不存在漏磁通及麦克斯韦方程中的位移电流项^[14],麦克斯韦方

程中的磁准静态形式使得磁场与产生磁场的电流相关联^[15].



(a)电机结构 (b)电机等效磁路

图4 动磁直线电机磁路分析

通过电机等效磁路分析^[16]可知,电机推力与线圈绕组的电流、永磁体的特性及电机的结构尺寸有关,其表达式为

$$F_m = \frac{\partial \omega_n}{\partial x} = H_c l_p \frac{d\psi}{dx} = B(i) l_p H_c \quad (3)$$

式中: H_c 为永磁体的磁感应矫顽力; l_p 为永磁体的磁路长度; $B(i)$ 为气隙的磁场磁通密度,其大小与直线电机的结构尺寸及线圈电流有关,其结构如图4(a)所示.

动磁直线电机的绕组线圈的等效电路如图5所示,图中 R 为直线电机线圈的等效电阻, L 为直线电机线圈的等效电感, αv 为电机线圈的感应电动势, v 为活塞运动的速度, U 为直线电机线圈两端的电压.

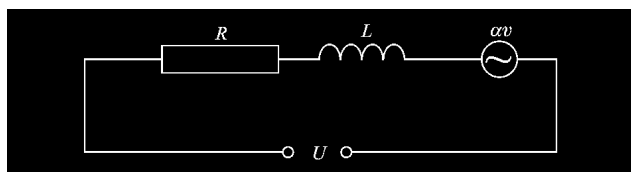


图5 动磁直线电机线圈等效电路

对于动磁直线电机驱动的压缩机而言,仿真必需的参数有电阻、电感和机电转化常数.图6为动磁直线电机机电转化常数与电机动子位置的实验结果.实验研究^[3,10,17]表明,Redlich型动磁式直线电机的等效电阻、等效电感和机电转化常数在一定的动子行程内是保持恒定的,其值可以通过实验的方法^[13,17]求得.因此,其电机推力表达式可简化为

$$F_m = \alpha i \quad (4)$$

式中: α 为直线电机的机电转化常数; i 为直线电机

中流经线圈的电流.

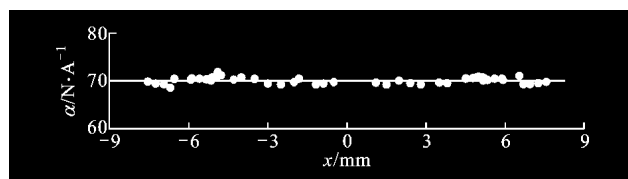


图6 机电转化常数与电机动子位置的关系

3.2 可控硅的数学模型

在直线压缩机的运行过程中,三端双向可控硅作为控制元件,具有导通和断开2种状态,在仿真时,应对这2种状态分别进行讨论,图7为仿真时判断可控硅导通与否的流程图.

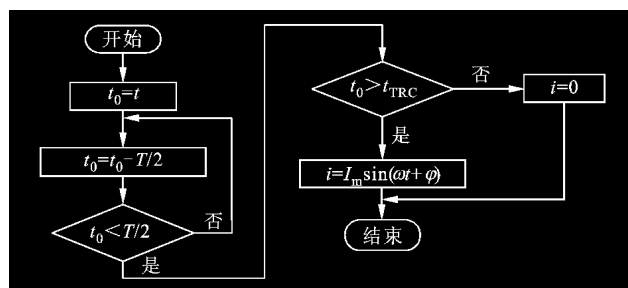


图7 可控硅工作逻辑

三端双向可控硅可简化为开关模型,其数学表达式为

$$\begin{cases} U = 0 & t = t_0 = nT/2 \\ i = I_m \sin(\omega t + \varphi) & t = t_0 + t_{TRC} \\ i = 0 & t = t_0 + t_{TRC} + \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中: T 为电压的周期; t_0 为电压过零点的时刻; t_{TRC} 为从过零时刻起可控硅导通的时间; Δt 为可控硅从导通至断开的.

3.3 控制方案

由图5可知,直线电机线圈两端的电压为

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + \alpha v \quad (6)$$

则直线压缩机的活塞位移为

$$x = \frac{1}{\alpha} \int (U - iR - L \frac{di}{dt}) dt \quad (7)$$

由于动磁直线电机本身的电阻、电感和机电转化常数在一定的动子行程内是保持恒定的,因此可作为控制系统中的位移传感器.通过检测直线电机线圈两端的电压及电流,对压缩机活塞的上死点位置及行程进行运算^[3],并与预定冲程进行比较,根据比较结果调整三端双向可控硅的导通时间来控制活塞的行程及上死点位置^[17],从而进行容量调节及避免活塞撞缸.

图 8 为动磁直线压缩机的等效电路及控制系统图,图中 C 为启动电容,电容的合理配置可以增加直线电机的功率因数,提高压缩机效率, R_i 为电流检测电阻。

对于等效电路,由基尔霍夫电压定律得出电压平衡方程

$$U_s = i(R + R_i) + L \frac{di}{dt} + \alpha v + \frac{q}{C} \quad (8)$$

式中: U_s 为电源电压; q 为电容两极板间储存的电荷量。

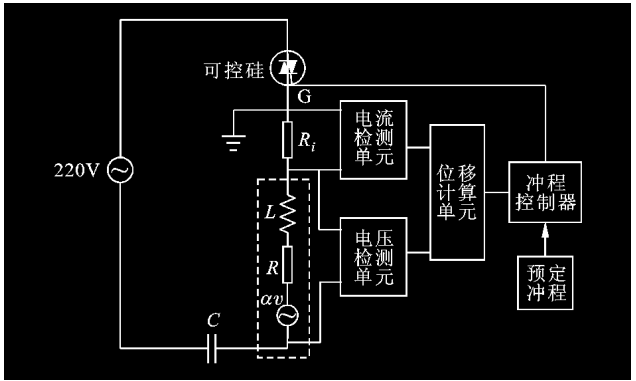


图 8 直线压缩机等效电路及控制系统图

4 仿真结果讨论

本文中动磁直线电机驱动压缩机的主要技术及工作参数如表 1 所示,为了验证仿真结果的准确性,将仿真结果与实验数据^[17]进行了比较。

表 1 直线压缩机主要技术及工作参数

项目	符号	参考值
等效电阻/ Ω	R	6.6
等效电感/H	L	0.347
机电转化常数/ $N \cdot A^{-1}$	α	70
活塞组件质量/kg	m	0.62
弹簧刚度系数/ $N \cdot m^{-1}$	K	69 370
电容/ μF	C	15
进气压力/MPa	p_s	0.112 34
排气压力/MPa	p_d	0.2
过程指数	n	1.38
电源频率/Hz	f	60

从图 9 可以看出:活塞行程随着导通时间的延长而减小;活塞上死点位移随着导通时间的延长而增大。因为导通时间越长,加给系统的能量越少,活

塞行程也就越小,活塞位移的仿真结果与实验结果有小于 5% 的误差,这是由于模型忽略了压缩机进排气的压力损失和压力脉动以及等效阻尼系数随活塞位移的可变性等因素,使得仿真值与实验值之间产生误差。

由图 10 可以看出,电流随着导通时间的增大而减小,仿真结果与实验结果有小于 10% 的误差,这主要由于仿真中的电机参数为常数,而实际运行过程中电机参数的波动导致实验值小于仿真值。

图 11 为压缩机的电流和电压特性。导通时间 t_{TRC} 的仿真结果与实验结果有小于 10% 的误差,这主要是由于三端双向可控硅导通时间的实验标定误差所致。电压峰值的仿真结果与实验结果有小于 7% 的误差,这是由于导通时间的误差导致电压峰值的误差所致。

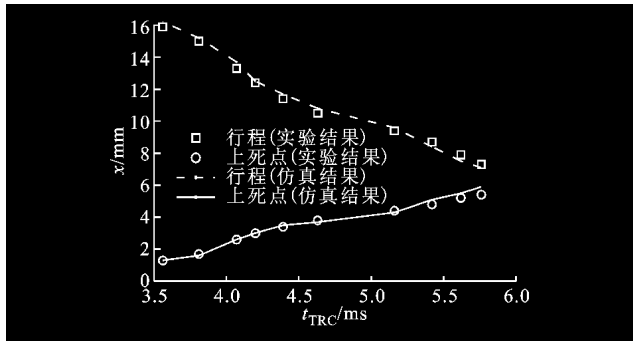


图 9 不同导通时间下活塞的位移

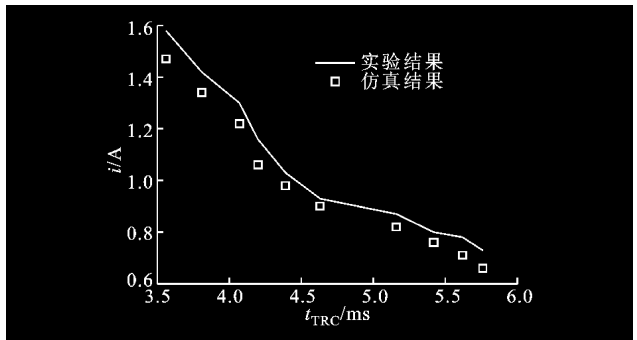
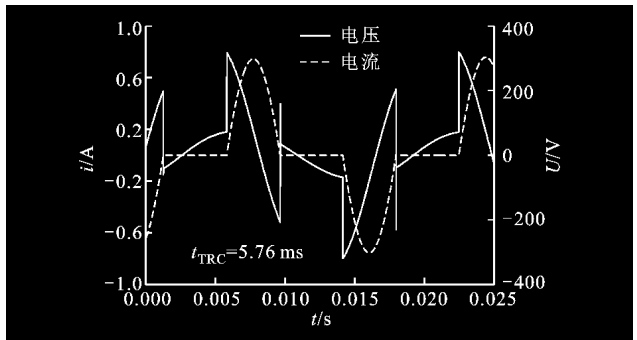
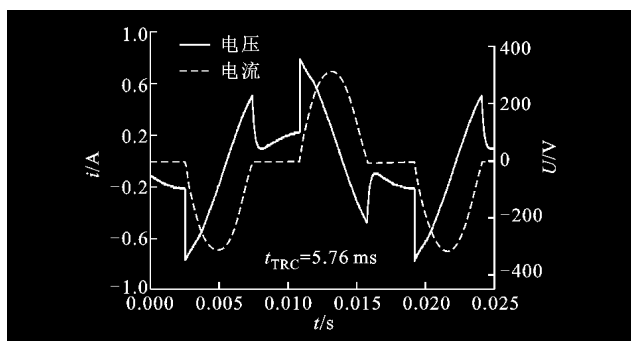


图 10 不同导通时间下电机线圈的电流



(a) 仿真结果



(b) 实验结果

图 11 压缩机的电压和电流波形

由于直线压缩机运行过程中各种因素的干扰,使得理论模型的仿真结果与实际情况产生误差,但可以满足产品优化设计的要求,可利用该模型对直线压缩机进行参数的优化设计及性能的评估。

5 结 论

(1) 由于考虑等效阻尼系数的可变性、电机参数的准确性及算法对仿真结果的影响,使得仿真与实验结果有小于 10% 的误差,这主要是由电机参数的波动性、进排气的压力损失和脉动及可控硅导通时间的标定误差产生的。

(2) 仿真结果与实验数据吻合较好,说明该模型是行之有效的,求解方法是正确的,控制方案是可行的。该模型可以模拟不同工况下压缩机的特性及性能,为压缩机参数的合理选取及控制系统的优化设计提供了理论依据,可作为设计开发直线压缩机的有效工具。

参考文献:

- [1] 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, USA: Purdue Univ., 1996: 68-74.
- [2] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2000: 19-21.
- [3] Park K, Hong E, Lee H K. Linear motor for linear compressor [C]// 16th International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, USA: Purdue Univ., 2002: 31-38.
- [4] Lee H K, Song G. Development of the linear compressor for household refrigeration[C]// 15th International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, USA: Purdue Univ., 2000: 31-38.
- [5] 谢洁飞, 金涛, 童水光. 直线压缩机的研究现状与发展趋势[J]. 流体机械, 2004, 32(12): 31-35.
Xie Jiefei, Jin Tao, Tong Shuiguang. Researching status and developing trend of linear compressor[J]. Fluid Machinery, 2004, 32(12): 31-35.
- [6] 何志龙. 永磁直线电机驱动的压缩机理论分析及实验研究[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2003.
- [7] Choe G S, Kim K J. Theoretical and experimental analysis of nonlinear dynamics in a linear compressor [J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 2002, 124(1): 152-154.
- [8] Choe G S, Kim K J. Analysis of nonlinear dynamics in a linear compressor [J]. JSME International Journal Series C, 2000, 43(3): 545-552.
- [9] Minas C. Nonlinear dynamics of an oilless linear drive reciprocating compressor [J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 1994, 116(1): 79-84.
- [10] 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.
- [11] 王建生. 直线电动活塞式压缩机的理论与试验研究[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院, 1998.
- [12] 马振飞. 冰箱用直线压缩机原理样机的研制[D]. 杭州:浙江大学材料与化工学院, 2005.
- [13] 王昕. 动磁式直线压缩机的数值模拟[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2005.
- [14] Poomima K A, Hsu T S. Moving magnet loudspeaker system with electronic compensation [J]. IEE Proc Circuits Devices Syst, 2001, 148(4): 211-216.
- [15] Fitzgerald A E, Kingsley C. Electric machinery [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [16] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- [17] 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)