

文章编号:1671-251X(2011)06-0050-03

DOI:CNKI:32-1627/TP.20110523.1752.012

# 圆筒型永磁动圈式直线电动机动态特性仿真

方明, 王淑红

(太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**分析了永磁动圈式直线电动机的工作原理,给出了用于驱动电液比例阀的永磁动圈式直线电动机的数学模型,并采用 Matlab/Simulink 软件建立了该电动机的仿真模型。仿真结果表明,该电动机在位移指令为 5 mm 时的阶跃响应调节时间小于 30 ms,具有较好的高频动态响应特性。

**关键词:**永磁动圈式直线电动机;动态特性;动态响应;电液比例阀

中图分类号:TD614.3

文献标识码:A

网络出版时间:2011-05-23 17:52

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20110523.1752.012.html>

## Simulation of Dynamic Characteristics of Tubular Permanent Magnet Linear Motor with Moving Coil

FANG Ming, WANG Shu-hong

(College of Electrical and Power Engineering of Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The paper analyzed working principle of permanent magnet linear motor with moving coil, gave mathematical model of permanent magnet linear motor with moving coil which is used to drive electro-hydraulic proportional valve, and built simulation model of the motor with Matlab/Simulink software. The simulation result showed that regulating time of step response of the motor is less than 30 ms when displacement instruction is 5 mm, which has good dynamic response characteristics of high-frequency.

**Key words:** permanent magnet linear motor with moving coil, dynamic characteristic, dynamic response, electro-hydraulic proportional valve

## 0 引言

永磁动圈式直线电动机是一种将电信号直接转换为直线机械运动的伺服电动机,它采用永久磁铁作为磁通源,通电动圈在气隙磁场作用下产生电磁力,从而推动线圈位移,实现直线运动。该电动机通过改变电动机结构调节动圈运动行程,通过调节动圈电流的大小和方向确定输出力的大小和方向。圆筒型永磁动圈式直线电动机以其动子质量轻、机械惯性小、动态性能好等特点广泛应用于液压系统、航天系统等高频直线运动领域。本文主要研究电液比例阀用永磁动圈式直线电动机的动态响应特性。

## 1 永磁动圈式直线电动机工作原理

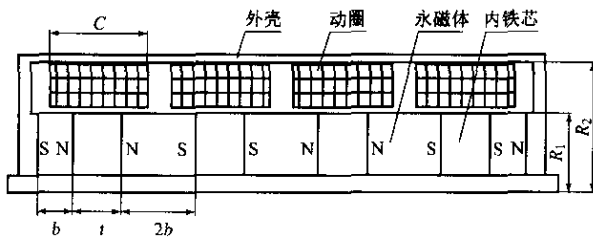
圆筒型轴向充磁的永磁动圈式直线电动机结构如图 1 所示。该电动机采用动圈型永磁式结构,由轴向磁化圆环形永磁体、动子、内铁芯及外壳组成。轴向磁化圆环形永磁体与内铁芯结合,在圆柱气隙空间产生磁场,当线圈中通入直流电时,载有电流的导体在磁场中就会受到电磁力的作用。该力的方向由 Fleming 左手定则来确定,即沿轴向方向。在电磁力的作用下,动子只要克服液压阻力以及动子存在的静摩擦阻力,动子即可沿轴向作直线运动。改变电流方向,动子的移动方向也随之发生改变。这种结构的电动机在电流大小不变时能产生随位移变化恒定不变的电磁力<sup>[1]</sup>。

永磁动圈式直线电动机的工作原理:将输入的电能转换为直线运动的机械能,即由输入动子线圈

收稿日期:2011-02-15

基金项目:山西省自然科学基金资助项目(2008012005-1)

作者简介:方明(1984-),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为电机与电器。E-mail:kisshoney@163.com



C—线圈长度；2b—永磁体厚度；l—内铁芯长度；  
R<sub>1</sub>—内铁芯外径；R<sub>2</sub>—外壳内径

图1 圆筒型轴向充磁的永磁动圈式直线电动机结构的电压  $u(t)$  在线圈回路中产生电流  $i(t)$ ，再由电流  $i(t)$  与磁场相互作用产生电磁推力<sup>[2-3]</sup>，从而实现动子的直线运动。所以，直线电动机的运行方程由电系统的电压平衡方程式、电磁力方程式和机械系统的力平衡方程式组成。

电压平衡方程式为

$$u(t) = e(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

式中： $u(t)$  为线圈电压； $e(t)$  为线圈移动时产生的反电动势； $i(t)$  为线圈电流； $R$ 、 $L$  分别为线圈回路的电阻、电感。

$e(t)$  的大小与磁场强度及移动速度成正比，方向与  $u(t)$  相反，即

$$e(t) = k_b B_s l N \frac{dx(t)}{dt} = k_E \frac{dx(t)}{dt} \quad (2)$$

式中： $k_b$  为结构系数； $B_s$  为线圈导体所在空间的磁感应强度； $l$  为线圈导体每匝在磁场中的平均有效长度； $N$  为线圈匝数； $k_E$  为与速度有关的反电动势系数<sup>[4]</sup>； $x(t)$  为动子行程位移。

电磁力方程式为

$$F(t) = k_b B_s l N i(t) = k_m i(t) \quad (3)$$

式中： $k_m$  为直线电动机的力常数，代表电磁力和电枢电流之比。

永磁动圈式直线电动机的反电动势系数与直线电动机的力常数在数值上是相等的。从永磁动圈式直线电动机的工作原理可知，电磁力只有克服了摩擦力和弹簧的弹性阻力才能使动子产生直线运动。在实际工作中，往往需要直线电动机的动子做加、减速运动，以加快完成一定的直线位移，所以必须考虑要求电磁力克服电动机动子部分因加、减速运动而产生的惯性力。因此，作用在永磁动圈式直线电动机动子上的力有电磁力、摩擦力、黏性阻力、负载力、惯性力。

力平衡方程式为

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F(t) - K_c f_c - K_v \frac{dx(t)}{dt} - F_L \quad (4)$$

式中： $F(t)$  为电磁力； $K_c$  为阻尼系数； $f_c$  为摩擦力； $K_v$  为黏滞阻尼系数； $F_L$  为负载力。

## 2 电液比例阀用永磁动圈式直线电动机数学模型

由永磁动圈式直线电动机驱动的电液比例阀工作原理如图2所示<sup>[5]</sup>。

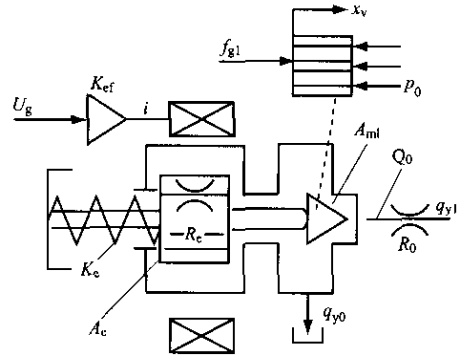


图2 由永磁动圈式直线电动机驱动的电液比例阀工作原理

阀芯上的力平衡方程为

$$f_{g1} - p_0(t) A_{m1} = m_{1e} \frac{d^2 x_v}{dt^2} + B_{1e} \frac{dx_v}{dt} + K_{1e} x_v \quad (5)$$

式中： $f_{g1}$  为作用在阀芯上的电磁推力，N； $p_0(t)$  为作用在阀侧面上的油压力，N/m<sup>2</sup>； $A_{m1}$  为阀端面液压力的作用面积，m<sup>2</sup>； $m_{1e}$  为阀芯与动子的质量和，kg； $x_v$  为阀芯行程位移量，m； $B_{1e}$  为等效阻尼系数； $K_{1e}$  为稳态液动力刚度系数。

阀口上的压力—流量方程为

$$q_{v0}(t) = K_{q1} x_v - K_{c1} p_0(t) \quad (6)$$

式中： $q_{v0}(t)$  为通过阀口的流量，m<sup>3</sup>/s； $K_{q1}$  为阀口的流量增益，m<sup>2</sup>/s； $K_{c1}$  为阀口的流量—压力系数，m<sup>5</sup>/(N·s)。

固定节流孔(阻尼孔)液阻  $R_0$  上的压差—流量方程为

$$\begin{cases} \Delta p_1(t) = R_0 q_{y1}(t) \\ \Delta p_1(t) = p_{s1}(t) - p_0(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\Delta p_1(t)$  为  $R_0$  上的进出口压力差，N/m<sup>2</sup>； $q_{y1}(t)$  为通过  $R_0$  的流量，m<sup>3</sup>/s； $p_{s1}(t)$  为  $R_0$  上的进口压力，N/m<sup>2</sup>。

容腔  $Q_0$  的流量平衡方程为

$$q_{y1}(t) = q_{v0}(t) + \frac{V_0}{E} \frac{dp_0(t)}{dt} + A_{m1} \frac{dx_v(t)}{dt} \quad (8)$$

式中： $q_{y1}(t)$  为容腔  $Q_0$  的流量，m<sup>3</sup>/s； $V_0$  为容腔  $Q_0$  的体积，m<sup>3</sup>； $E$  为油液体积弹性模量，N/m<sup>2</sup>。

容腔  $Q_1$  的流量平衡方程为

$$q_{s1}(t) = q_{l1} + \frac{V_1}{E} \frac{dp_{s1}(t)}{dt} + c_{l1} p_{s1}(t) \quad (9)$$

式中： $q_{s1}(t)$ 为容腔  $Q_1$  的流量， $m^3/s$ ； $q_{l1}$ 为从受控容腔流向负载的流量， $m^3/s$ ； $V_1$ 为容腔  $Q_1$  的体积， $m^3$ ； $c_{l1} p_{s1}(t)$ 用于控制容腔泄漏掉的流量与压差成正比， $c_{l1}$ 为泄漏系数。

对式(6)~(9)在初始条件为零的条件下进行拉氏变换得

$$p_o(s) = q_{s1}(s) - q_{l1}(s) - K_{q1} x_v(s) \left( 1 + \frac{V_1}{E} s R_0 \right) - A_{m1} s x_v(s) \left( 1 + \frac{V_1}{E} s R_0 \right) / \left[ \frac{V_1}{E} s - \left( K_{c1} + \frac{K_{c1} V_1}{E} s R_0 \right) + \left( \frac{V_0}{E} s + \frac{V_0 V_1}{E^2} s^2 R_0 \right) \right] \quad (10)$$

### 3 仿真分析

根据式(10)，利用 Matlab/Simulink 软件搭建了电液比例阀用永磁动圈式直线电动机仿真模型，如图3所示。仿真参数：额定电压为 12 V，反电动势系数为 14.2，动子线圈电阻为 41.277  $\Omega$ ，动子线圈电感为 9.81 mH，动子质量为 0.065 kg。

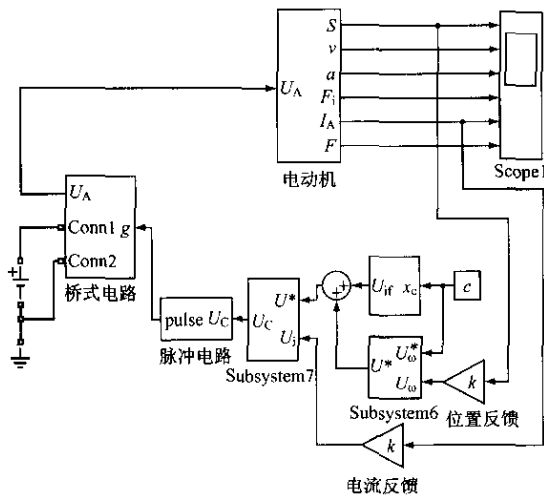


图3 电液比例阀用永磁动圈式直线电动机仿真模型

电液比例阀永磁动圈式直线电动机的阶跃响应仿真结果如图4所示。从图4可看出，位移指令为

5 mm时的阶跃响应调节时间小于30 ms，表明永磁动圈式直线电动机具有较好的动态响应特性；力、电流波形在开始的一段时间有微小波动，这是绕组电阻产生的感应电势影响所致。

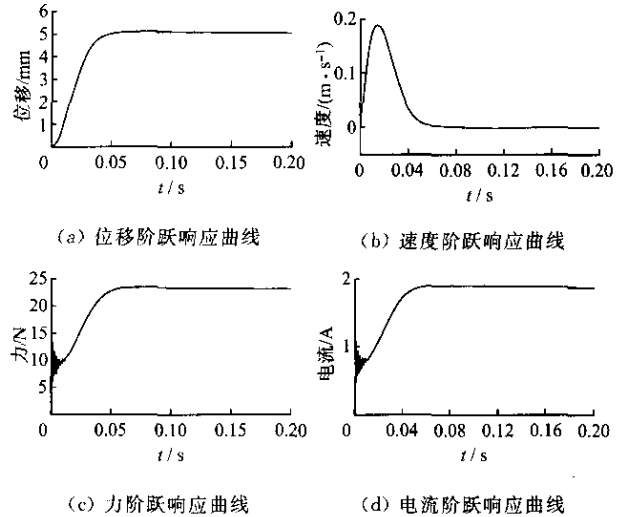


图4 阶跃响应仿真结果

### 4 结语

给出了电液比例阀用永磁动圈式直线电动机数学模型的设计过程，采用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了该电动机的仿真模型。仿真结果表明，永磁动圈式直线电动机在位移指令为5 mm时的阶跃响应调节时间小于30 ms，具有较好的高频动态响应特性。

### 参考文献：

- [1] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2000.
- [2] 王旭平，王淑红，熊光煜. 动圈式直线振动电机动态分析[J]. 微电机，2005，38(4)：41-43.
- [3] 王淑红，熊光煜. 用于液压系统的直线电机静特性分析[J]. 微电机，2005，38(4)：44-46.
- [4] 陈幼平，杜志强，艾武，等. 一种短行程直线直流电动机的数学模型及其实验研究[J]. 中国电机工程学报，2005，25(7)：131-136.
- [5] 徐益民. 电液比例控制系统分析与设计[M]. 北京：机械工业出版社，2005.