

文章编号:1005-7277(2004)03-0013-03

# 基于 MATLAB 的同步电机步进运动数字仿真

陶彩霞, 胡彦奎

(兰州交通大学 信息与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 应用电机的矩阵分析方法建立了同步电机步进运动的数学模型, 在此基础上, 基于 MATLAB 中的仿真工具 Simulink 搭建了系统的动态仿真模型, 仿真结果可确定系统运动的最佳参数。

关键词: 同步电机; 步进运动; 动态过程; 数字仿真

中图分类号: TM341

文献标识码: A

## Digital simulation of step motion of synchronous motor based on MATLAB

TAO Cai-xia, HU Yan-kui

(Institute of Information and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on matrix analysis of motor, a mathematical model for step motion of synchronous motor is proposed. The new model is simulated by the Simulink tool of MATLAB. The optimal parameters for this model are obtained by simulation results.

Key words: synchronous motor; step motion; dynamic process; digital simulation

## 1 引言

电机参数对于电机运行性能的影响, 可以通过实验的方法获得, 但只能是模型试验, 若采用直流衰减法则对初值考虑不周, 因此, 其影响多是采用仿真的方法得到。在以往的仿真研究中, 有的是把系统中各环节用简化传递函数来表示, 但很多细节会被忽略, 造成结果不准确; 也有采用 PSPICE 进行仿真的, 但这种仿真主要是基于电子电路的; 也有利用计算机语言来编制仿真软件的, 但软件编程序较长, 算法设计较难, 交互性差, 修改较麻烦。如何准确而快速地对电路以及电气系统进行仿真, 对电气工作者来说是极为困扰的问题<sup>[1]</sup>。1984年开发的 MATLAB 是一个高级的数学分析与运算软件, 可用作动态系统的建模与仿真。其中的仿真软件 Simulink 最大的特点是非常直观, 直接面向方框图, 它可完成系统模型输入与仿真分析, 其菜单对于交互式工作非常方便, 建完模型可立即仿真出结果, 仿真中可自动提供和相应数学模型对应的求解器。

## 2 系统组成

步进电机由于其位置误差无积累、系统不存在不稳定问题等优点, 在计算机的外围设备以及数字控制系统中应用较广泛。由于普通步进电机组合电

磁铁的结构, 使得输出功率、效率都较低。对于大功率步进电机的研究, 国内起步较晚, 若用普通电动机代替广为应用的步进电动机, 将其设计思想从组合电磁铁提高为旋转磁场, 使旋转磁场离散化作步进运动, 进而使步进传动的容量和效率都会向前发展一大步。微电子学、电力电子学和同步电动机的结合, 可将交流电动机的气隙磁动势由连续的旋转磁动势转换为离散的步进磁动势<sup>[2]</sup>, 具备普通同步电动机的优点, 同步电动机的效率与损耗比最高。基于此, 本文研究一种无阻尼绕组的感应式同步电动机步进运动系统, 系统由一台感应式同步电机和一个逆变器组成<sup>[3]</sup>, 如图1所示。

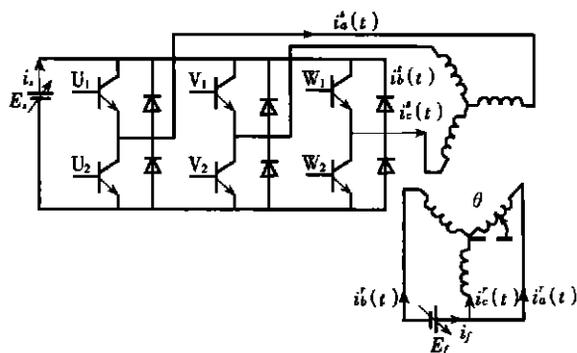


图1 系统示意图

这种感应式步进电机由绕线式转子感应电机来代替, 励磁部分由可调电压源  $E_f$  来激励。逆变器

由 6 个新型可关断器件 GTO、GTR 或 IGBT 及 6 个续流二极管 (认为是理想换接的) 组成三相桥路输出, 供给同步电机。逆变器按 180 导电方式工作, 同一桥臂的上下元件交替导通, 相位相差 180°。各开关元件的导通规律见表 1。

表 1 工作方式

Mbde	1	2	3	4	5	6
Switch on	U <sub>1</sub>			U <sub>2</sub>		
	V <sub>2</sub>		V <sub>1</sub>		V <sub>2</sub>	
	W <sub>1</sub>		W <sub>2</sub>		W <sub>1</sub>	

为研究电机的动态性能, 分析电机参数的影响, 可利用矩阵分析方法建立数学模型, 然后就模型仿真求解, 获得动态响应曲线。

### 3 基于微分方程的数学模型

#### 3.1 矩阵方程

根据电机统一理论, 三相电机均可用两相电机等效, 讨论气隙均匀对称的且无阻尼绕组的同步电机, 在定子和转子上都有对称两相绕组的感应电动机式的两极机<sup>[4-5]</sup>。其等效电机原理如图 2 所示。

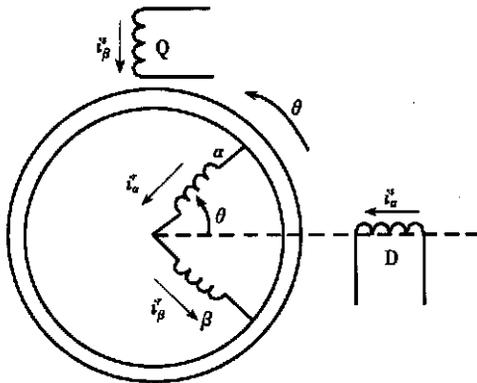


图 2 等效两相电机

定子绕组用 D、Q 表示, 转子绕组用  $\alpha$ 、 $\beta$  表示,  $i^s(t)$ 、 $i^r(t)$  分别代表两个定子绕组电流,  $i^{\alpha}(t)$ 、 $i^{\beta}(t)$  分别代表两个转子绕组电流,  $R^s$ 、 $L^s$  代表定子每相绕组电阻和电感,  $R^r$ 、 $L^r$  代表转子每相电阻和电感,  $L^{sr}$  是定子与转子间最大互感。相绕组的轴线与 D 绕组的轴线间的夹角为  $\theta$  角, 当转子反时针方向旋转时,  $\theta$  角将增大, 因此,  $\theta$  角是时间的函数。 $\omega_m$  是机械角速度,  $\dot{\theta} = d\theta / dt$ ,  $P$  代表微分算子, 根据图 2 可列出电压矩阵方程如下:

$$\begin{bmatrix} u^s(t) \\ u^t(t) \\ u^{\alpha}(t) \\ u^{\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^s + pL^s & 0 & pL^{sr} \cos \theta & -pL^{sr} \sin \theta \\ 0 & R^s + pL^s & pL^{sr} \sin \theta & pL^{sr} \cos \theta \\ pL^{sr} \cos \theta & pL^{sr} \sin \theta & R^r + pL^r & 0 \\ -pL^{sr} \sin \theta & pL^{sr} \cos \theta & 0 & R^r + pL^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^s(t) \\ i^t(t) \\ i^{\alpha}(t) \\ i^{\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

#### 3.2 两相电机的实用仿真模型

将两相电机模型电压矩阵方程式 (1) 化成标准状态方程形式:  $X(t) = A(t) X(t) + B(t) \mu(t)$ ,

可得到一个四阶状态方程组, 由于电机需要做步进运动, 所以要建立数学模型, 还需研究角位移和角速度  $\omega_m$  随时间的变化规律, 故再补充角速度与角加速度两个方程如下:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad \dot{\omega}_m = \frac{T_e}{J} \quad (2)$$

其中:  $T_e$  是电磁转矩,  $J$  是转动惯量, 电磁转矩关系式为:

$$T_e = nL^{sr} [ - (i^{\alpha} i^{\beta} + i^{\beta} i^{\alpha}) \sin \theta + (i^{\alpha} i^{\beta} + i^{\beta} i^{\alpha}) \cos \theta ] \quad (3)$$

将以上两个方程与已得到的四阶状态方程组联立, 得到一个六阶状态方程组, 此即为所求的电机数学模型, 如果确定了控制初值, 即可求解。

另外, 系统运动过程中, 功率转换关系可表示为:

$$P_{ei} = P_{el} + \frac{dW_f}{dt} + P_m \quad (4)$$

式中:  $P_{ei}$  是输入功率,  $P_{el}$  是铜损,  $W_f$  是存储的磁能,  $P_m$  是电能转换为机械能的部分。效率可表示为:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{ei}} \times 100\% \quad (5)$$

#### 3.3 控制初值的确定

根据表 1 中的工作方式, 由图 1 求出各相电流的稳态值, 方式 1 中的稳态值即为过渡到方式 2 的电流初值, 在方式 1 中开关  $U_1$ 、 $V_2$ 、 $W_1$  导通, 而同一桥臂上的相应开关  $U_2$ 、 $V_1$ 、 $W_2$  则处于截止状态, 可得:

$$\begin{aligned} i_a^s(t) &= E / 3R_a^s, i_b^s(t) = -2E / 3R_a^s, i_c^s(t) = E / 3R_a^s \\ i_a^r(t) &= E_r / 3R_a^r, i_b^r(t) = -2E_r / 3R_a^r, i_c^r(t) = E_r / 3R_a^r \end{aligned} \quad (6)$$

定子控制电压也即三相桥式逆变器各个工作阶段的输出电压, 转子控制电压始终保持不变为:

$$U_f^r = \left[ \frac{E_r}{3} \quad \frac{-2E_r}{3} \quad \frac{E_r}{3} \right]^T \quad (7)$$

此电压即为方式 1 下加到电机的励磁电压, 在其他方式下该电压大小保持恒定不变。

### 4 动态仿真模型与仿真分析

建立了基于微分方程的数学模型以后, 可搭建动态仿真模型, 由于是电机步进运动系统, 故主要采用 PSB 库。在 Simulink 仿真环境下搭建的动态仿真模型如图 3 所示:

搭建好仿真模型以后, 根据系统特征、所选实

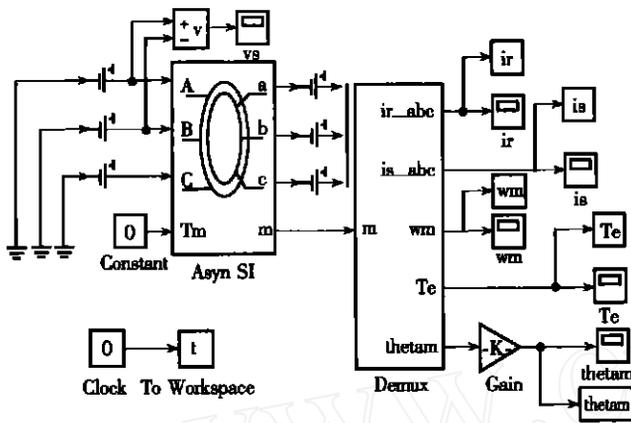
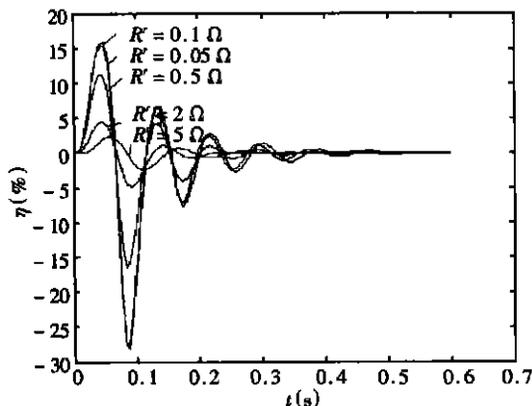


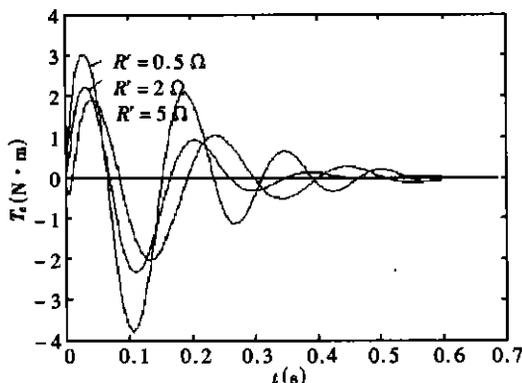
图3 同步电机步进运动仿真模型

际电机的铭牌以及各方式下的仿真初值, 设置合适的仿真参数, 选取相应的求解器 (由于此系统为刚性系统, 故选用 ode15s 求解器), 就可以对该系统进行仿真研究。在分析中, 讨论随着电机电气参数的变化, 系统动态特性受到的影响。这些电气参数分别是场阻  $R'$  (转子每相电阻)、定子电阻  $R^s$ 、定子自感  $L^s$ 、转子自感  $L^r$ 、互感  $L^{sr}$ 。仿真中保持电流  $i^s$ 、 $i^r$  为稳态值不变, 为此输入电压  $E_s$  和  $E_r$  必须在  $R^s$  和  $R^r$  变化的情况下调整。

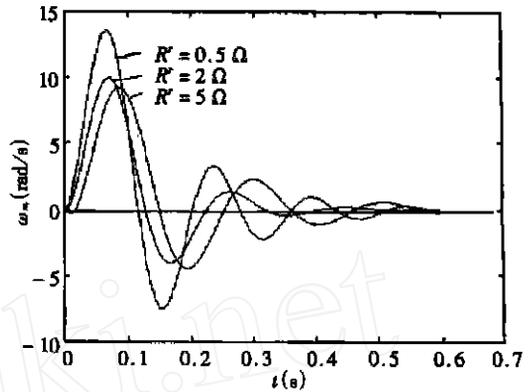
为进行试验和仿真, 选用  $P = 0.75 \text{ kW}$  的一台



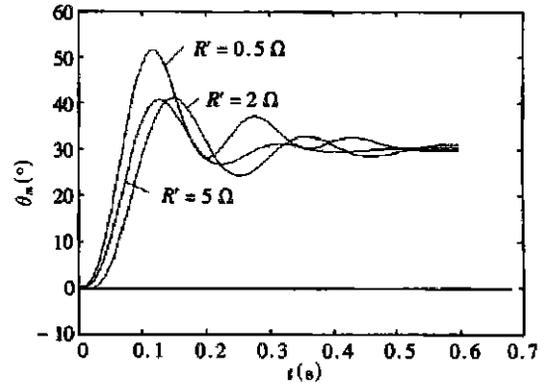
(a) 效率  $\eta$  随场阻的变化



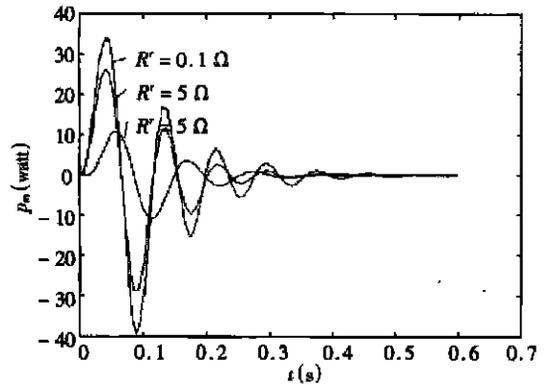
(b) 转矩  $T_r$  随场阻的变化



(c) 转子速度  $\omega_m$  随场阻的变化



(d) 转子角位移  $\theta_m$  随场阻的变化



(e) 机械功率  $P_m$  随场阻的变化

图4  $R^s = 4.3 \Omega$  时, 随场阻变化的各动态波形

电机, 主要铭牌数据为: 极数 = 4,  $U = 200 \text{ V}$ ,  $L^s = 78.27 \text{ mH}$ ,  $L^r = 22.15 \text{ mH}$ ,  $L^{sr} = 37.99 \text{ mH}$ ,  $J = 0.01 \text{ kgm}^2$ ,  $i_f = 6 \text{ A}$ , 假定稳态电流  $i_s$  也为  $6 \text{ A}$ ,  $J$  是转子和负载转动惯量总和。图4是在定子电阻  $R^s = 4.3$ , 各电感为以上数据时, 随着场阻的变化从方式1过渡到方式2时各动态波形的变化。

### 5 结论

从图4中可以清楚的看出各动态量随时间的变化规律, 随着电阻  $R^r$  的减小, 最大转矩值  $T_r$  值增

(下转第28页)

双向可控硅瞬时关断,随即跳开控制回路。

### 3.2 软件流程

根据过载继电器的热模拟算法,单片机的软件分为主程序、采集和计算中断子程序等模块。主程序主要完成初始化、过载判断和脱扣控制输出,流程图如图4所示。中断子程序完成负载电流采样和热量计算。

中断服务子程序完成三相电流的采样、滤波,计算一次三相的热量,然后返回主程序。其流程图如图5所示。

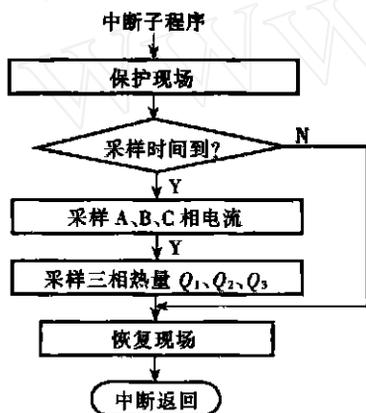


图 5 采样中断子程序

## 4 结论

(上接第 15 页)

加,转子速度  $m$  值增加,效率也是增加的,在  $R^r = 0.1$  时达到最大值,之后效果不明显,输出机械功率  $P_m$  也是增加的,在转子电阻较小时 ( $0.1 < R^r < 2$ ) 系统的步进运动特性得到改善。而此效率与输出功率远远超出常用步进电动机,故可用感应式同步电动机代替常用步进电动机,输出较大的步进功率。

而在场阻或电感一定时,改变其它的参数,各动态特性可同样得出,对各参数下的动态波形进行分析比较,即可根据功率、效率等动态指标来确定和修正参数,以获得较满意的动态特性,根据仿真结果可进行电机最佳参数的选择,对于仿真中选用的这台电机,各参数分别为:  $L^s = 78.27$  mH,  $L^r = 22.15$  mH,  $L^{sr} = 37.99$  mH,  $R^s = 4.3$ ,  $R^r = 0.1$  时动态特性最佳。此仿真结果与实验结果相吻合,在电机的设计与实际应用时有较高的参考价值。对于不同型号的电机,各动态特性的变化趋势同上,通过同样的仿真方法可得到其最佳性能参数。

参考文献:

该过载继电器由于采用了 LPC767 低功耗单片机,使系统的结构简单、无外加电源、无触点。经有关厂家和测试机构对样机进行性能测试达到了 GB - 981 的要求,电磁兼容性 (EMC) 试验合格。

参考文献:

- [1]刘重轩.论我国电机保护的现状与未来[J].西北纺织工学院学报,1998,12(1).
- [2]朱桂荣.交流异步电机保护的可靠性及抗干扰设计[J].苏州丝绸工学院学报,2000,20(4).
- [3]周航慈等.PHILIPS 51PC 系列单片机原理及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2001.
- [4]孙嘉宁.大中型异步电动机综合保护理论与实现[J].继电器,2000,28(12).
- [5]Theodore Wildi. Electrical machines, drives and power systems[M]. Pearson Education Fifth Edition, 2002.

作者简介:



李生民 (1962 - ),男,硕士,讲师,主要从事工业控制、过程控制和微机运动控制的 Teaching 和研究。

收稿日期: 2003 - 09 - 18

- [1]韦荣,许镇琳.电气传动系统仿真的新工具—MATLAB5.2 电气系统模块库[J].电气传动,2000,(1).
- [2]孙鹤旭.交流步进传动系统[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [3]胡彦奎.一种功率步进电机的瞬态分析[J].动态分析与测试技术,1993,11(20),19-27.
- [4]李发海译.电机的矩阵分析[M].北京:科学出版社,1980.
- [5]唐任远译.交流电机统一理论—在实际问题上的应用[M].北京:机械工业出版社,1980.

作者简介:



陶彩霞 (1972 - ),女,硕士,兰州交通大学讲师,主要研究方向为电机及其控制。



胡彦奎 (1950 - ),男,兰州交通大学副教授,主要研究方向为电气传动及控制。

收稿日期: 2003 - 08 - 08