

基于磁场定向控制的永磁同步电机参数测量

陈 荣, 邓智泉, 刘日宝, 严仰光

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于矢量控制原理, 介绍永磁同步电机参数测量的一种新方法. 该方法借助于同步伺服系统实现电机相关参数的测量, 不需要特殊的仪器, 也没有特别的测试要求, 适用于永磁同步电机参数的现场测量. 利用矢量控制情况下电机启动制动过程中速度的线性变化过程, 测量电机转子的转动惯量, 为电机控制系统的数学建模与仿真分析奠定基础.

关键词: 永磁同步电机; 伺服; 电机参数现场测量

中图分类号: TM351 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2004)06-0684-05

永磁同步电机没有励磁绕组, 励磁由永磁体产生, 因而电路结构简单. 尤其是新型永磁材料的出现, 使电机单位体积的功率密度大大提高, 从而人们非常重视对永磁同步电机的研究开发. 在伺服驱动领域, 由于永磁同步电机的定位精度高、调速范围宽、转子不发热而影响传动精度, 使得永磁同步电机成为伺服驱动领域普遍看好的对象. 在研究和应用过程中, 不可避免地需要掌握电机的相应参数, 如电机电枢绕组电阻、直轴和交轴电感、主极磁通、电机转动惯量等, 目前, 国内外已有多篇文献^[1-2]介绍永磁同步电机参数的估计方法. 至于电机参数的检测, 对普通电励磁同步电机, 文献^[3]介绍其参数测试方法, 而对永磁同步电机, 由于永磁体的存在, 测试相应参数比较复杂, 原因是永磁磁场对测试过程的影响. 虽然文献^[4]也介绍了永磁同步电机的参数测试方法, 但是方法的实施比较困难, 在纯电感负载时只能测量直轴电抗. 在电机电枢绕组加直流电流(直流衰减法)的测试方法中^[4-5], 需要将电机转子旋转到直轴或者交轴位置, 但由于直流电流所产生磁场的影响, 转子很难到达指定位置(电压积分法也存在这样的问题), 并且在使用该法测试时, 需要瞬时断开电路开关, 这在实施时很困难. 本文根据具体的工程实践, 借助于转子磁场定向控制原理, 讨论永磁同步电机的参数测试方法.

1 永磁同步电机的参数测试原理

对永磁同步电机, 尽管其三相之间相互耦合在一起, 但是经过坐标变换可以得到比较简单的数学模型^[6]. 在同步坐标系(dq 轴系)中, 在适当的简化条件下, 选择定子正弦波磁动势与永磁体基波励磁磁场间正交, 此时的控制方式即为转子磁场定向的矢量控制, 电机电枢电流只有交轴分量, 即 $I_s = I_q$, $I_d = 0$. 根据电机数学模型, 可以画出在磁场定向矢量控制下电机电动运行的矢量图, 如图 1 所示. 由图 1 得电机的电参量与电机参数间存在以下关系:

$$U_s^2 = (I_s X_q)^2 + (E_0 + I_s R_s)^2$$

由上式得电机的交轴电感为

$$L_q = \frac{X_q}{2\pi f} = \frac{\sqrt{U_s^2 - (E_0 + I_s R_s)^2}}{I_s 2\pi f} \quad (1)$$

式中: U_s ——电机相电压; I_s ——相电流; E_0 ——反电势; R_s ——电枢电阻; X_q ——交轴电抗; L_q ——交轴电感; f ——电机运行频率.

从式(1)可见, 要测量电机的交轴电感, 需要知道电机的反电势、端电压、电枢电阻、运行频率(速度)和电枢

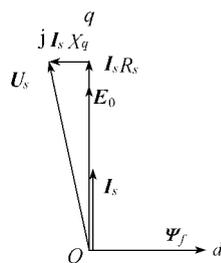


图 1 同步电机工作矢量图
Fig. 1 Phasor diagram for operation of PMSM

电流. 电机电枢电阻可以通过电阻电桥测试. 电机运行频率可以通过测试电机运行速度得到, 电机速度: $n = 60f/p_n$ (p_n 为极对数). 在矢量控制下, 电机电流为正弦波电流, 可以用电流表测量电流有效值. 电机端口电压为脉冲宽度调制 (PWM) 波形, 不能用电磁系列电表测量电机的端电压, 只能使用电动系列电表测量电机端口电压. 于是通过测试可以得到式 (1) 中除反电势之外的各量. 为测量电机反电势, 用另一台电机带动所测电机旋转, 在被测电机空载情况下测量电机端口电压, 因电流为零, 电机无电枢反应, 所测电压即为电机反电势.

对于电机转动惯量, 理论上讲可以将电机转子拆下, 然后按照转子实际尺寸计算其转动惯量. 然而, 电机转子并不是很规则的, 且密度不一, 尤其是电机转子贴上磁钢后, 为了获得正弦分布的磁通, 以及要消除谐波, 其转子实际外形是很复杂的, 因此计算转子转动惯量并不现实. 查看电机的数学模型可见, 电机的运动方程和转动惯量密切相关, 这就要测试电机动态过程中相关参数, 以求得转动惯量. 假定电机在启动和制动时速度均按线性规律变化, 则对电机的启动过程有

$$T_e - T_l = J \frac{d(\omega_r/p_n)}{dt} + R_\Omega(\omega_r/p_n)$$

如果考虑空载启动, $T_l = 0$, $\omega_r = 2\pi np_n/60 = np_n/9.55$, $T_e = J\alpha/9.55 + nR_\Omega/9.55$, 由能量守恒定律得

$$T_e = J\alpha/9.55 + 2R_\Omega\alpha t_r / (3 \times 9.55) \tag{2}$$

$$\alpha = dn/dt$$

式中: α ——电机启动过程的加速度; t_r ——电机加速上升时间; T_e ——电磁力矩; T_l ——负载力矩; J ——转动惯量; p_n ——极对数; ω_r ——角频率; R_Ω ——摩擦阻力矩系数.

假定制动时电机电磁力矩和启动时相同, 则对制动过程, 也有

$$T_e = J\beta/9.55 - 2R_\Omega\beta t_f / (3 \times 9.55) \tag{3}$$

式中: β ——电机制动过程加速度; t_f ——电机制动减速的下降时间.

由式 (2) 和式 (3) 式得 $J = (2 T_e \times 9.55) / (\alpha + \beta) \tag{4}$

$$R_\Omega = (3 T_e \times 9.55 / (\beta - \alpha)) / [2\alpha t_r (\alpha + \beta)] \tag{5}$$

2 电机参数测量的工程实践

为了测试永磁同步电机的相应参数, 必须要构成磁场定向的矢量控制系统, 且要知道电机在启动和制动动态过程中的电磁转矩. 根据矢量控制原理, 构成具有电流和速度双环的同步伺服系统^[7], 其电流环具有实时动态跟踪能力, 响应见图 2, 可以实现 $i_d = 0$ 的转子磁场定向控制. 其速度环动态响应见图 3. 由图 3 可见, 系统具有良好的速度阶跃响应性能, 电机的速度上升和下降基本具有线性特性, 可以用来测试电机的有关参数.

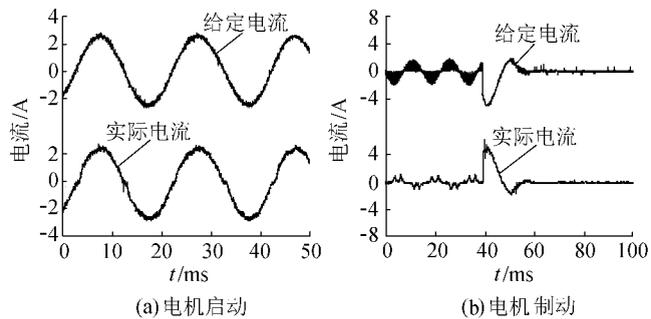


图 2 电流环动态跟随响应

Fig.2 Dynamic step response of current loop

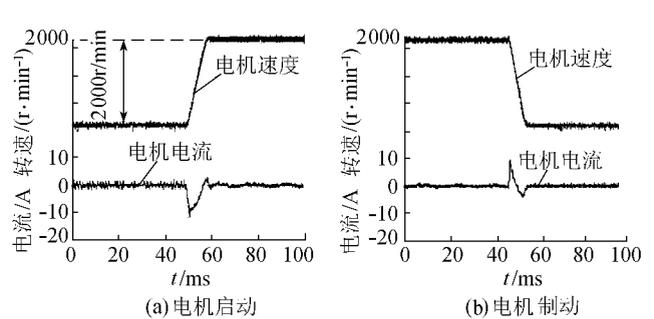


图 3 速度环速度阶跃响应

Fig.3 Dynamic step response of speed loop

2.1 电机的 R_s, Ψ_f, L_q 等参数测量

2.1.1 电机电阻的测量

用 QJ23 直流电桥可以测得电机相绕阻冷态电阻 $R_s = 1.4 \Omega$, 热态电阻 $R_s = 1.535 \Omega$. 所谓热态就是电机额定负载工作 1 h 后, 断电测量所得的电阻值.

2.1.2 电机反电势的测量

被测电机在拖动电机带动下, 在不同转速运行时, 可以测得电机反电势, 其测试曲线见图 4. 电机电势为

$E_0 = 4.44fK_W W \Phi = 0.148 \Psi_f n$, 磁链 $\Psi_f = K_W W \Phi$ (其中 K_W 为电机等效绕组匝数), 电势系数为 $0.0356 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$, 磁链为 $\Psi_f = 0.2405 \text{ Wb}$.

2.1.3 电机交轴电感的测量

在不同运行速度情况下,由空载到额定负载测得电机相电流、相电压,按照式(1)求得电机交轴电感见图5.由图5可知,电机交轴电感与电机的工作状态有关,随着电机饱和程度的加深,电感下降并稳定在一饱和值.图中本电机交轴饱和电感 $L_q = 20 \text{ mH}$.

2.2 电机转动惯量的测量

观察式(3)和式(4),利用电机的过渡过程测量电机转动惯量,必须知道电机在线性加减速过程中电磁力矩,且需获得电机在过渡过程中所经历的时间.

2.2.1 电机电磁力矩的测量

电机的电磁转矩是电机的电枢电流产生的磁场和永磁体磁场间所形成的电磁力,由于这些磁场均不能准确测量,因此电机电磁力矩是不可测的.但是,如果不能测出电磁力矩,测试电机转动惯量就无法实现.为此,笔者采取用电机带动轮盘提升重物的方法来测试电磁力矩,电机的运行速度较低为 1 r/min .测试结果见图6.

图6中纵坐标为电机电流幅值,有效值为其坐标除以1.414.横坐标为悬挂重物的重量,悬挂半径为 0.0533 m ,则力矩为坐标值乘以 $0.0533 \times 9.8 = 0.52234$ 即为悬挂重物所产生的外力矩.图6中两条直线的区别主要为电机及连轴机构的摩擦阻力矩,在重物上行时为阻力矩,在重物下行时也为阻力矩,这两条曲线间差别就是2倍的摩擦阻力矩.经过曲线拟合,形成电机电流与电磁力矩之间的函数关系(图7),关系式为

$$T_e = 0.681313I - 0.1271783(\text{N} \cdot \text{m}) \tag{6}$$

只要在动态过程中测得电机电流幅值,就可以知道电机在该过程中的电磁力矩.实际上,电机电流是由速度环设定的,电流环具有很快的动态响应性能,只要速度调节器设定好电机动态过程中的电流幅值,电机的实际电流就为设定值.

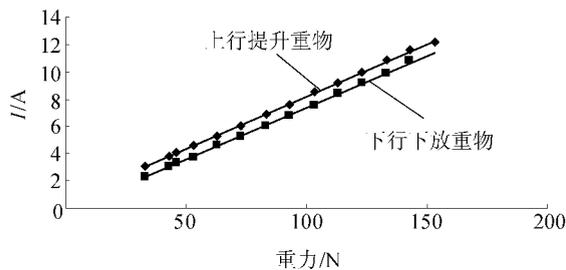


图6 电机悬挂重物与电机电流的关系

Fig.6 Relation of hung weight and current of motor

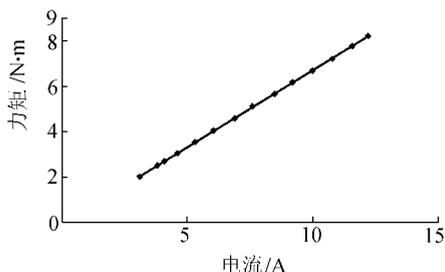


图7 电机负载重量与电流间的拟合关系

Fig.7 Fitting relation of torque and current

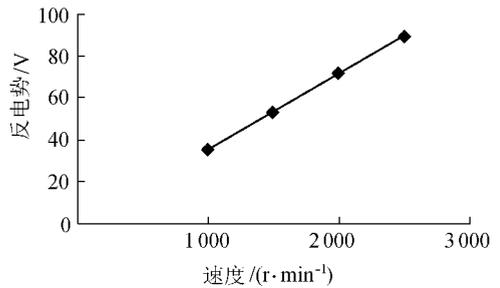


图4 电机速度与反电势关系

Fig.4 Relation of speed and EMF

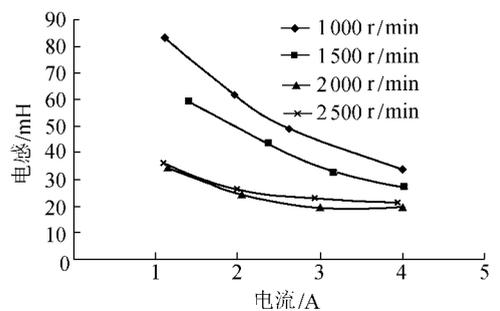


图5 电机交轴电感与电流及运行频率间关系

Fig.5 Relation between q axes inductance, current and operation frequency

速度环设定的,电流环具有很快的动态响应性能,只要速度调节器设定好电机动态过程中的电流幅值,电机的实际电流就为设定值.

2.2.2 转动惯量的测量

对电机做空载启动与制动实验,启动制动过程曲线见图8(a).启动过程电流幅值设置为 6.79 A ,由式(6)得电磁力矩为 $T_e = 8.61 \times 0.0533 \times 9.8 = 4.4973 \text{ N} \cdot \text{m}$,启动时间为 18.4 ms ,制动时间为 17 ms ,则 $\alpha = 2500/0.0184 = 135869.57 \text{ r}/(\text{min} \cdot \text{S})$, $\beta = 2500/0.017 = 147058.824 \text{ r}/(\text{min} \cdot \text{S})$.

由式(4)和式(5)求得电机转动惯量 $J = 3.036 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,摩擦系数 $R_Q = 10.1913 \times 10^{-4}$.

将2台同型号同容量的永磁同步电机轴联,假定2台同步电机的转子完全相同,则转子转动惯量相同.联轴器转动惯量为 $J_1 = 5.887987 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,见图8(b),启动时间为 42 ms ,制动时间为 38 ms .则 $\alpha = 59523.81 \text{ r}/(\text{min} \cdot \text{S})$; $\beta = 65789.47 \text{ r}/(\text{min} \cdot \text{S})$; $J = 3.133 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $R_Q = 12.8848 \times 10^{-4}$.

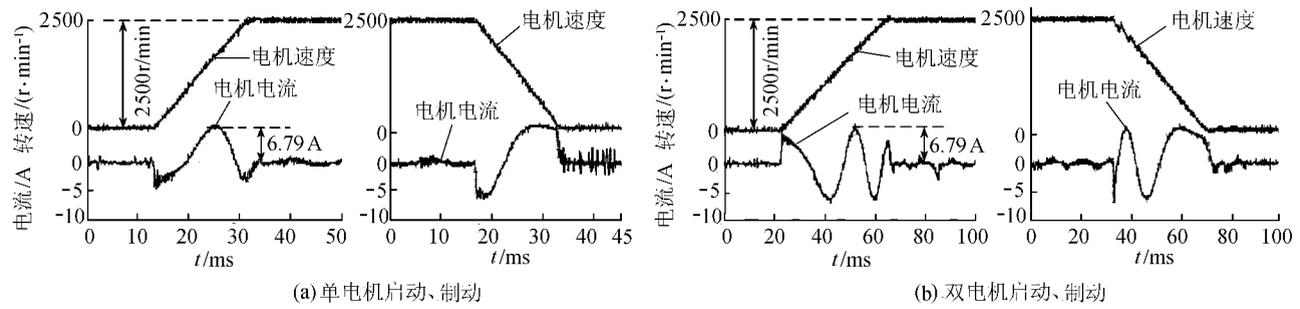


图 8 电机启动、制动过程速度及电流波形

Fig. 8 Waveforms of motor speed and current for starting and braking processes

由此可知,该永磁同步电机的参数为 $R_s = 1.4 \Omega$, 电势系数为 $0.0356 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$, 磁链 $\Psi_f = 0.2405 \text{ Wb}$, 交轴饱和电感为 $L_q = 20 \text{ mH}$, 电机转动惯量为 $J = 3.13 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 摩擦阻力系数是变化的, 与电机的工况有关, 对本例约为 $R_\Omega = 10 \times 10^{-4} \sim 13 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s})$.

用同样方法, 测得另一同型号同容量电机的有关参数为: $R_s = 1.375 \Omega$, 电势系数为 $0.0354 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$, 磁链 $\Psi_f = 0.2392 \text{ Wb}$, 交轴饱和电感 $L_q = 20 \text{ mH}$, 电机转动惯量 $J = 3.11 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 摩擦阻力系数也是变化的, 对该电机约为 $R_\Omega = 10 \times 10^{-4} \sim 12 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s})$, 两电机参数接近。

利用已测量的电机参数, 建立永磁同步伺服系统的数学模型, 在 Simulink 仿真环境中对系统的启动、制动、负载(突增、减)进行仿真, 其电压、电流、速度波形与实际运行相同^[7,8], 说明所测参数与实际情况吻合。

2.2.3 对电机转动惯量的测试校验

为验证测量转动惯量是否和实际值相近, 为电机做了一个形状规则的标准惯性飞轮, 该轮为半径 53.3 mm , 厚 10 mm 的圆盘, 按照理论计算该惯性轮的转动惯量为 $10.0563 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 带惯性轮启、制动的加速度分别为: $\alpha = 30864.1975 \text{ r}/(\text{min} \cdot \text{s})$, $\beta = 34246.575 \text{ r}/(\text{min} \cdot \text{s})$, 则电机转动惯量 $J = 3.136 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

由此可知, 所测电机转动惯量接近实际值. 在实验过程中, 为低速实验做了一驱动盘, 该轮盘尺寸已知, 计算所得转动惯量为 $J = 46.7675 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 使用本方法测量所得的值为 $J = 47.3698 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 误差小于 1.3% , 说明该法测量旋转负载转动惯量十分合适. 三种测量过程所得电机转动惯量见表 1.

表 1 三种测量过程所得的电机转动惯量及摩擦系数

Table 1 Rotational inertia and friction coefficient of motors under three measurement conditions

测试条件	电机转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	电机摩擦系数 ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
单台电机	3.036×10^{-4}	10.1913×10^{-4}
两台电机	3.133×10^{-4}	12.8848×10^{-4}
带标准惯性飞轮	3.136×10^{-4}	13.3860×10^{-4}

3 测试误差分析

对于电机相绕阻电阻的测量其测量误差取决于测量仪表的测量精度, 并随着运行过程中绕阻温度的提高, 电阻将逐步提高, 但从测试情况来看, 电阻的变化不是很大。

电机电势为 $E_0 = 4.44fK_W W \Phi = 0.148 \Psi_f n$, 则电机电势系数及磁链测量误差主要来自电机空载电压及电机速度的测量。

由电机的饱和交轴电感公式(1)得交轴电感的检测误差为

$$\Delta L_q = \left(\frac{\partial L_q}{\partial U_s} \right) \Delta U_s + \left(\frac{\partial L_q}{\partial E_0} \right) \Delta E_0 + \left(\frac{\partial L_q}{\partial I_s} \right) \Delta I_s + \left(\frac{\partial L_q}{\partial R_s} \right) \Delta R_s + \left(\frac{\partial L_q}{\partial n} \right) \Delta n \approx$$

$$\left[U_s \left((2\pi p_n n I_s / 60) \left(U_s^2 - (E_0 + I_s R_s)^2 \right) \right) \right] \left[U_s - \Delta E_0 + R_s \Delta I_s - I_s \Delta R_s \right]$$

因为与速度有关的误差项太小, 式中忽略不计。

由此可知, 影响交轴电抗测量误差的因素较多, 有电压表测量电压与电动势的误差, 有电流表测量电流的误差, 有计算机转速测量误差(很小, 已略), 以及随着温度升高、电阻的变化对交轴电抗测量值的影响. 由于误差项前的系数远小于 1, 因此, 尽管后 4 项的误差有可能取绝对值相加, 但是所产生的偏差还是很小的. 本例中假定所有误差项均按绝对值相加, 测量出 L_q 的相对误差也仅为 5.9% , 满足实际工程需要。

综上所述, 电机转动惯量及电机摩擦阻力系数的测量误差来自电磁力矩及电机加减速时间的测量, 电磁

力矩的测量误差是电机转动惯量测量误差的主要来源.对于单机及两台电机启制动时所测转动惯量数值的差别,是因为在单电机启、制动过程中,非线性加速时间(电机启动的电流建立时间、电机速度接近设定速度时进入稳定运行的调整时间、电机制动时电流减流时间、反向电流建立时间、制动接近完成时的速度调整与能耗制动时间这几部分时间的总和)占据整个制动时间的份额比双电机启制动时间所占份额要大.因此,双电机测量时所得的转动惯量更接近实际情况.

由于电磁力矩是在低速情况下测量的,在速度变动过程中磁路的饱和程度在发生变化,因而,电机的实际电磁力矩在电机电枢电流恒定情况下并不能保持恒定^[9],它的测量误差对转动惯量值的影响很大.但是,由于本系统在实际测试时,最大电流只到达额定电流的1.7倍,电机并未过分饱和,因而在整个测试过程中,电机电磁力矩基本保持恒定.

4 结 论

本文提出的永磁同步电机参数的检测方法,较好地解决了永磁磁场的存在对电机参数测试过程影响的问题,可以满足理论分析与实际工程需要,并且使用该检测方法,不需要对电机的转子实施对位,所使用的仪器设备均为常规仪器,对测试过程的操作没有特殊要求,因而实施起来十分方便.

在测量电机参数过程中,由于电枢电流所产生的磁势与永磁体产生的磁势垂直,即电机只有交轴电枢反应,没有直轴电枢反应,因而,该法不能测量电机的直轴电抗.要测量直轴电抗,可以采用纯电感负载法^[5].

参考文献:

- [1] FIDEL Fernandez-Bemal, AURE Lio Garcia-Cerrada, ROBERTO F. Determination of parameters in interior permanent-magnet synchronous motors with iron losses without torque measurement[J]. IEEE Trans on IA, 2001, 37(5): 1265—1272.
- [2] 高波,沈靖,王炎.永磁同步电机的参数及状态估计[J].哈尔滨工业大学学报,1997(1):30—36.
- [3] 郑治同.电机实验[M].北京:机械工业出版社,1992.56—59.
- [4] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.424—444.
- [5] 李国丽,王群京.无传感器交流伺服系统中永磁电机的参数测试[J].微特电机,1997(1):6—8.
- [6] 李崇坚,王祥珩,李发海,等.磁场定向控制交变变频同步电机系统的数学模型[J].清华大学学报(自然科学版),1995,35(4):1—8.
- [7] 陈荣,邓智泉,严仰光.永磁同步伺服系统电流环的设计[J].南京航空航天大学学报,2004,36(2):220—225.
- [8] 陈荣,邓智泉,严仰光.永磁同步伺服系统的启动过程分析[J].西南交通大学学报,2004,19(7):203—208.
- [9] 符曦.高磁场永磁式电动机及其驱动系统[M].北京:机械工业出版社,1997.66—77.

Parameter measurement for permanent magnetic synchronous motors based on field-oriented vector control

CHEN Rong, DENG Zhi-quan, LIU Ri-bao, YAN Yang-guang

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aero. and Astro., Nanjing 210016, China)

Abstract: With the help of the synchronous servo system, a new method was presented for measurement of parameters for permanent magnetic synchronous motors based on the field-oriented vector control principle. According to the linear variation of the velocity of motors during their starting and breaking processes, the rotational inertia of motors was measured under the condition of vector control, providing a basis for modeling and simulation of the motor control system. Without requirement of special instruments and conditions for measurement, the method is suitable for field measurement of permanent magnetic synchronous motors.

Key words: permanent magnetic synchronous motor; servo; parameter; measurement