

# 电机参数辨识技术研究

郝振翔<sup>1,2</sup>

(1. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076; 2. 航天伺服驱动与传动技术实验室, 北京 100076)

**摘要:** 在电机实际运行的过程中, 电机的参数会受到温度和磁路饱和程度等因素的影响而发生变化, 从而导致伺服系统控制效果降低, 甚至可能损坏电机; 因此需要通过参数辨识获取电机的参数, 以保证控制效果; 通过离线辨识获取静止状态下和稳定运行状态下的电机参数, 并将其作为在线辨识的初值使用; 基于模型参考自适应算法在线辨识电机参数; 以旋转坐标系下直交轴电流方程作为参考模型, 通过采集的电压、电流和转速等参数辨识电机的电阻和电感; 在 Matlab 中搭建可实时改变参数的电机模型, 并用模型参考自适应模块进行在线辨识, 通过仿真验证了该方法的有效性。

**关键词:** 永磁同步电机; 参数辨识; 离线辨识; 在线辨识; 模型参考自适应

## Research on Parameter Identification Technology of Motor

HAO Zhenxiang<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China;

2. Laboratory of Aerospace Servo Actuation and Transmission, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In actual process of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the parameters of motor change by the influence of temperature and magnetic circuit, which reduce the control effect of servo system and even probably damage motor. Therefore, it is necessary to obtain the motor parameters through parameter identification and ensure the control effect. The motor parameters in the static and stable operation state are obtained through off-line identification, and used as the initial value of online identification. the online identification of motor parameters is based on model reference adaptive method. Taking the direct axis and quadrature axis current equation in the rotating coordinate system as the reference model, the resistance and inductance of the motor are identified by the collected parameters such as voltage, current and speed. The motor model which can change parameters in real time is built in MATLAB simulation platform, and the model reference adaptive module is built for on-line identification. The effectiveness of this method is verified by simulation.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; parameter identification; offline identification; online identification; model reference adaptive system

## 0 引言

永磁同步电机 (PMSM, permanent magnet synchronous motor) 具有结构简单、体积小、功率密度高、效率高、响应速度快等特点, 广泛应用于高性能伺服系统<sup>[1]</sup>。永磁材料性能的提高和控制技术的发展也促使 PMSM 伺服系统得到越来越多的应用。PMSM 被广泛应用于家电、数控机床、机器人以及

航空航天等领域。

PMSM 控制系统具有多变量和时变的特点, PMSM 的很多控制策略依靠数学模型, 而数学模型的建立需要电机定子电阻、交直流电感、转子磁链等参数。电机参数大多为设计阶段的设计参数, 在电机实际运行过程中, 受不同因素的干扰电机参数会发生变化, 例如温度的变化会导致电阻与磁链的变化<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-12-06。

作者简介: 郝振翔(1997-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事永磁同步电机参数辨识方向的研究。

引用格式: 郝振翔. 电机参数辨识技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(2): 192-200.

电机参数在实际运行过程中的变化会导致与模型参数不匹配影响控制系统的性能甚至可能损坏电机。获取准确的电机参数可以改善电机的控制性能,例如电阻与电感可以用于比例积分控制参数的整定计算。因此需要通过参数辨识获取电机的参数从而保证电机的控制性能。

PMSM 参数辨识方法分为离线辨识和在线辨识。离线辨识相对容易实现,但无法获得电机运行过程中变化的参数。文献 [3] 利用传统伏安法辨识了定子电阻,并优化了参数辨识流程,提高了电机零位、定子电阻、永磁体磁链和交直流电感多参数辨识流程的效率。文献 [4] 分别利用伏安法、阶跃响应法和  $i_d = 0$  矢量控制算法空载试验离线辨识了定子电阻、交直流电感和磁链。文献 [5] 通过离线辨识获取了控制所需的模型参数从而实现了控制器参数的自整定。在线辨识是在系统运行的时候实时检测电压、电流、转速等信息,再按照公式计算电阻、电感和磁链等电机参数。常用的在线辨识算法包括最小二乘法<sup>[6]</sup>、模型参考自适应<sup>[7-9]</sup>、扩展卡尔曼滤波等。文献 [10] 对比了基于遗忘因子递推最小二乘法和模型参考自适应辨识惯量的结果,遗忘因子递推最小二乘法的时变跟踪能力强,适合惯量变化较快速的场合,但误差整体高于模型参考自适应,且对噪声敏感,辨识结果抖动大。文献 [11] 基于模型参考自适应辨识电感参数,通过提高离散化方法的阶数保证可调模型准确性,但磁链的轻微变化对电感辨识结果影响严重。文献 [12] 利用级联模型参考自适应辨识模型解决了多参数在线辨识中的欠秩问题。文献 [13] 分别用李雅普诺夫函数和波波夫超稳定性理论设计了自适应律并对比了参数辨识的效果,得出了波波夫超稳定性理论设计自适应律具有更好的设计效果的结论。文献 [14] 利用模型参考自适应辨识了定子电阻、定子电感和永磁体磁链,并验证了该方法的实时性和跟踪性能。文献 [15] 通过死区补偿增强了辨识算法的稳定性和准确性,减小了辨识结果的误差。文献 [16] 通过分步辨识方法解决方程欠秩问题,可以较快实现辨识。文献 [17] 将遗忘因子递推最小二乘法与模型参考自适应相结合进行在线辨识,可以辨识出全部所需的电气参数,具有较强的抗干扰能力。

伏安法和阶跃响应法是常用的离线辨识方法,模型参考自适应是常用的在线辨识方法。本文将利用这

些算法对 PMSM 的参数进行辨识。

## 1 永磁同步电机数学模型

PMSM 具有非线性、多变量、强耦合、参数时变等特点,数学模型复杂,为将 PMSM 作为理想电机简化分析,需先做以下假设<sup>[18]</sup>:

- 1) 定子绕组为 Y 形接法,三相绕组对称分布且各绕组轴线在空间互差  $120^\circ$ 。
- 2) 转子永磁体在定转子气隙内产生正弦分布主磁场,转子没有阻尼绕组,假设磁路不饱和。
- 3) 忽略定子铁心与转子铁心的涡流损耗和磁滞损耗。
- 4) 忽略电机参数变化。

建立在三相静止坐标系上的 PMSM 数学模型经坐标变换后可变换到任意两相坐标系中,从而简化耦合情况。因为表贴式 PMSM 的直轴电感和交轴电感相等,所以在数学模型中可以统一用  $L$  表示。PMSM 在旋转坐标系下的电压方程为:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L}i_d + \omega_e i_q + \frac{u_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} &= -\omega_e i_d - \frac{R}{L}i_q + \frac{u_q}{L} - \frac{\omega_e \psi_f}{L} \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $u_d$ 、 $u_q$  分别表示直交轴的电压分量,  $i_d$ 、 $i_q$  分别表示直交轴的电流分量,  $\omega_e$  表示转子电角速度,  $R$  为电机的定子电阻,  $L = L_d = L_q$  表示电机的直交轴电感,  $\psi_f$  表示永磁体磁链。

根据机电能量的转换和电机统一理论的原则,电机的电磁转矩方程可以表示为:

$$T_e = \frac{3}{2} P_n \psi_f i_q \quad (2)$$

其中:  $P_n$  表示 PMSM 的极对数。

电机的转子机械运动方程为:

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_e}{dt} = T_e - T_l - B\omega_e \quad (3)$$

其中:  $T_e$  表示 PMSM 的电磁转矩,  $T_l$  表示 PMSM 的电磁转矩,  $B$  表示粘滞摩擦系数,  $J$  表示转动惯量。

PMSM 的控制受到定子电阻、直交轴电感、转子磁链等参数的影响,这些参数在电机运行过程中会受到各种因素的影响发生变化,所以需要进行辨识。但旋转坐标系下的电流方程为二维方程,对多个未知量求解时不能保证结果唯一,所以在辨识时需要固定

某一参数进行辨识或添加新的线性无关方程。

## 2 离线参数辨识

常用的离线辨识方法主要包括有限元分析和实验测定法。有限元分析需要进行较多的计算, 主要应用于电机的设计。传统的实验测定是让电机在保持静止的状态下用特定回路对电机施加直流激励或交流激励, 通过记录电机的状态响应离线辨识电阻和电感, 但静止的电机无法辨识磁链<sup>[19]</sup>。

使用伏安法辨识定子电阻时, 电机处于锁死状态, 通入励磁电压后, 电机不转动。给电机三相绕组通入较低的直流电压, 定子电流达到稳态后转速为 0, 可得:

$$u_d = R_1 i_d \quad (4)$$

PMSM 电枢回路可等效为 Y 型连接的电阻与电感的电路, 电压稳定时等效为电阻电路。定子电阻辨识用的直流电压由逆变器产生, 通过控制逆变器开关管的通断使通电辨识时电机仅有两相导通, 得到定子电阻为:

$$R = \frac{U}{2i} \quad (5)$$

在使用伏安法辨识定子电阻时, 可同步利用脉冲电压法辨识电感。施加固定电压并持续一段时间后, 对电机  $d$  轴进行定位, 电机保持静止不动, 永磁体磁链与  $d$  轴方向重合。此时电机的  $d$  轴电压表达式变为:

$$u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} \quad (6)$$

当给电机施加固定电压时, 定子电流逐渐上升至稳态, 此时定子电流为与时间相关的函数, 电流表达式为:

$$i_d(t) = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \tau = \frac{L_d}{R} \quad (7)$$

采集到电流上升至稳态电流的 0.632 倍时的时间, 可计算电感:

$$I_i = 0.632 * I, L_d = R * t_{0.632} \quad (8)$$

电阻由伏安法离线辨识得到, 因此只需要得到  $t_{0.632}$  即可计算电感值。因为所用电机为表贴式 PMSM, 直轴电感和交轴电感相等, 因此可直接看作所需辨识的电感。

磁链辨识常采用电机拖动法测量, 即在电机空载时依靠电机反电动势与转速的线性关系获得电机磁

链。当电机空载时, 通过拖动电机将待测电机拖至目标速度, 再测量待测电机任意两端子间的线电压, 则可以求出电机磁链。但这种方法需要额外的拖动电机和电压测量设备。

采用  $id=0$  矢量控制, 当电机运行至稳态时, 由 PMSM 的数学模型得:

$$u_q = Ri_q + \omega_e \psi_f \quad (9)$$

所以可以得到永磁体磁链的计算公式为:

$$\psi_f = \frac{u_q - Ri_q}{\omega_e} = \frac{30(u_q - Ri_q)}{P_n \pi n} \quad (10)$$

其中:  $u_q, i_q$  分别表示  $q$  轴电压和  $q$  轴电流,  $R$  表示电机定子电阻,  $P_n$  表示 PMSM 的极对数,  $n$  表示电机转速。

由此可得, 在进行矢量控制空载实验的时候, 在保证  $id=0$  的条件下, 当电机运行到稳态时, 通过测量  $q$  轴电流、 $q$  轴电压和电机转速等数值, 即可计算得到永磁体磁链。这种方法可以在无其他外界条件的情况下辨识出永磁体磁链。

离线辨识一般比较简单容易实现, 获得的电机初始参数也比较准确。但离线辨识不适合辨识电机运行过程中的动态电机参数, 因此针对离线辨识结果设置的控制器参数在电机参数变化时控制性能会受到影响。离线辨识获得的参数有一定的局限性, 其主要应用于初始参数的获取。

## 3 模型参考自适应在线辨识

### 3.1 模型参考自适应系统

电机辨识所需的主要电机参数有定子电阻、直轴电感、转子磁链等。在线辨识电机参数需要的输入信号包括直交轴电流、直交轴电压和电角速度, 经坐标变换获得电压与电流等数据后, 利用辨识算法在线辨识参数。

模型参考自适应由可调模型、参考模型和自适应律三部分组成, 如图 1 所示。模型参考自适应具有较高的精度, 其主要过程是根据辨识差值设计自适应律辨识待辨识参数。把不含待辨识参数的物理系统也就是 PMSM 本身作为参考模型, PMSM 在旋转坐标系下的电流状态方程中含有待辨识参数, 可以作为可调模型。电机和状态方程都以直交轴电压作为输入, 输出结果分别为电机的直交轴电流和经电压方程计算得到的直交轴电流。当可调模型输出电流逼近于电机输出的实际电流时, 则可认为可调模型中的参数即为要

辨识出的实际参数。

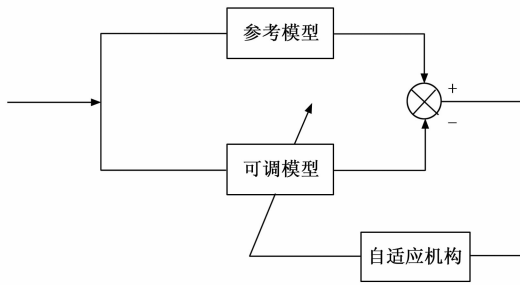


图 1 模型参考自适应结构框图

常用的自适应律设计方法主要有局部参数最优化设计法、李雅普诺夫稳定性理论设计法和波波夫超稳定性理论设计法。局部参数最优法在早期自适应控制中应用较多，但这种方法不考虑系统稳定性，因此稳定性较差而在当前设计中较少采用。利用李雅普诺夫稳定性理论设计得到的系统具有很好的稳定性，但李雅普诺夫函数求解难度较高，寻找合适的函数推导方式较为困难，对使用者要求较高。波波夫超稳定性理论可以解决系统稳定性问题，并且在设计自适应律的时候能结合实际情况。波波夫超稳定性理论在应用时较为简单，相较于李雅普诺夫函数更容易求解，较为适合确定模型参考自适应的自适应律。

### 3.2 基于模型参考自适应的在线辨识

对表贴式 PMSM 直交轴电感相等。当电机稳态运行时，电流微分量为 0。由于定子电阻、直交轴电感和转子磁链相互影响，且稳态方程欠秩，而磁链较小影响电流环，因此假设磁链为固定值以辨识电阻和电感，PMSM 在旋转坐标系下的状态方程可表示为：

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L}i_d + \omega_e i_q + \frac{u_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} &= -\omega_e i_d - \frac{R}{L}i_q + \frac{u_q}{L} - \frac{\omega_e \psi_f}{L} \end{aligned} \quad (11)$$

令  $a = R/L, b = 1/L$ ，求得  $a, b$  则可得到电阻与电感，上式可以化为：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & \omega_e \\ -\omega_e & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q - \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (12)$$

写成向量形式为：

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i} = \mathbf{A} \mathbf{i} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (13)$$

其中： $\mathbf{i}$  表示输出向量和状态向量， $\mathbf{u}$  表示输入的电压向量， $\mathbf{A}$  表示状态向量的系数矩阵， $\mathbf{B}$  表示输

入向量的系数矩阵。

以实际运行的电机作为参考模型，则基于该状态方程得到的可调模型为：

$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{i}} = \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{i}} + \hat{\mathbf{B}} \mathbf{u} \quad (14)$$

采用波波夫超稳定性理论设计待辨识参数自适应律需要将系统化为标准非线性反馈系统。将电机实际输出的电流和可调模型估计得到的电流作差，误差模型如下：

$$\frac{d}{dt} (\mathbf{i} - \hat{\mathbf{i}}) = \mathbf{A} \mathbf{i} - \hat{\mathbf{A}} \hat{\mathbf{i}} + (\mathbf{B} - \hat{\mathbf{B}}) \mathbf{u} \quad (15)$$

定义广义状态误差  $e = \mathbf{i} - \hat{\mathbf{i}}$ ，则：

$$\frac{d}{dt} e = \mathbf{A} e + \Delta \mathbf{A} \hat{\mathbf{i}} + \Delta \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (16)$$

令  $\omega_1 = -\omega = \Delta \mathbf{A} \hat{\mathbf{i}} + \Delta \mathbf{B} \mathbf{u}$ ，可得：

$$\frac{d}{dt} e = \mathbf{A} e + \mathbf{I} \omega_1 = \mathbf{A} e - \mathbf{I} \omega \quad (17)$$

由上式组成的非线性时变反馈系统，只有在等价的非线性反馈通道满足波波夫不等式且等价的线性前向通道传函严格正实的条件下才系统稳定。若满足线性部分传函严格正实，必须使传函的分子分母阶次差小于等于 1，若大于 1 则需要引入线性补偿器使线性部分传函严格正实。

假设需要引入补偿器  $D$ ，则线性前向通道的输出为：

$$v = D e$$

则线性前向通道的方程描述为：

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \mathbf{A} e + \mathbf{I} \omega_1 \\ v &= D e \end{aligned} \quad (18)$$

传递函数矩阵为  $H(s) = D(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{I}$ ，其中  $\mathbf{I}$  为单位阵， $\mathbf{A}$  为满秩的参考模型状态向量系数矩阵。 $D$  为待设计的补偿器，所以  $(\mathbf{A}, \mathbf{I})$  可控， $(\mathbf{A}, D)$  可观。

依据波波夫正实定理， $H(s)$  严格正实需要存在正定对称阵  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{Q}$  满足下式：

$$\begin{aligned} \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} &= -\mathbf{Q} \\ \mathbf{P} \mathbf{I} &= D \end{aligned} \quad (19)$$

令正定对称阵  $\mathbf{P}$  为  $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix}$ ， $k > 0$ ，则：

$$\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} = \begin{bmatrix} -2ak & 0 \\ 0 & -2ak \end{bmatrix} \quad (20)$$

则任何正实数  $k$  均满足条件使线性部分传递函数严格正实, 取  $k=1$ , 可得补偿器  $D$  为二阶单位阵, 模型参考自适应可保证全局渐进稳定。

线性部分条件满足后, 根据波波夫积分不等式设计待辨识参数自适应律:

$$\eta(0, t_1) = - \int_0^{t_1} e^T (\Delta \mathbf{A} \hat{i} \Delta \mathbf{B} u) dt \geq -r_0^2, \quad \forall t_1 \geq 0 \quad (21)$$

分解为:

$$\eta(0, t_1) = - \int_0^{t_1} e^T \Delta \mathbf{A} \hat{i} dt = \int_0^{t_1} (a - \hat{a})(e_d \hat{i}_d + e_q \hat{i}_q) dt \geq -r_a^2 \quad (22)$$

$$\eta(0, t_1) = - \int_0^{t_1} e^T \Delta \mathbf{B} u dt =$$

$$\int_0^{t_1} (\hat{b} - b)m[e_d u_d + e_q(u_q - \omega_e \psi_f)] dt \geq -r_b^2 \quad (23)$$

电流误差向量  $e$  趋近于 0 时, 对参数起调节作用需要自适应律含有记忆功能的积分环节, 因此待辨识参数自适应律设计为 PI 形式:

$$\hat{a} = \int_0^t f_1(\tau) d\tau + f_2(t) + a(0) \quad (24)$$

$$\hat{b} = \int_0^t g_1(\tau) d\tau + g_2(t) + b(0) \quad (25)$$

自适应律的设计即是确定  $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 、 $g_1(t)$ 、 $g_2(t)$  的具体形式。

以  $\hat{a}$  自适应律设计为例得:

$$\eta_a(0, t_1) =$$

$$\int_0^{t_1} (-a + \int_0^t f_1(\tau) d\tau + a(0))[-(e_d \hat{i}_d + e_q \hat{i}_q)] dt + \int_0^{t_1} f_2(t)[- (e_d \hat{i}_d + e_q \hat{i}_q)] dt \geq -r_a^2 \quad (26)$$

分为两个不等式得:

$$\eta_{a1}(0, t_1) = \int_0^{t_1} (-a + \int_0^t f_1(\tau) d\tau + a(0))[-(e_d \hat{i}_d + e_q \hat{i}_q)] dt \geq -r_{a1}^2 \quad (27)$$

$$\eta_{a2}(0, t_1) = \int_0^{t_1} f_2(t)[- (e_d \hat{i}_d + e_q \hat{i}_q)] dt \geq -r_{a2}^2 \quad (28)$$

对于不等式  $\eta(0, t_1) = \int_0^{t_1} f(t)(\varphi(0) + \int_0^t \varphi(\tau) d\tau) dt \geq -r_0^2$ , 如果  $\varphi(t, \tau) = k(t, \tau)f(\tau)$ ,  $k(t, \tau)$  是正定标量积分核, 对应的拉普拉斯变换是一个在  $s=0$  处有一个极点的正实传递函数, 则不等式成立。由

该引理可知, 当  $f_1(t) = k_{a1}[-(e_d \hat{i}_d + e_q \hat{i}_q)]$  时,  $\eta_{a1}(0, t_1) \geq -r_{a1}^2$  成立。当  $f_2(t) = k_{a2}[-(e_d \hat{i}_d + e_q \hat{i}_q)]$  时,  $\eta_{a2}(0, t_1) \geq -r_{a2}^2$  成立。

因此参数  $a$  自适应律为:

$$\hat{a} = (\frac{k_{a1}}{s} + k_{a2})[-e_d \hat{i}_d - e_q \hat{i}_q] + a(0) \quad (29)$$

同理参数  $b$  自适应律为:

$$\hat{b} = (\frac{k_{b1}}{s} + k_{b2})[e_d u_d + e_q(u_q - \omega_e \psi_f)] + b(0) \quad (30)$$

在可调模型输出电流与电机实际输出电流近乎相等时,  $a$  与  $b$  的值也保持稳定, 可由其分别求得定子电阻和直交轴电感的辨识值。

### 3.3 方程离散化

模型参考自适应参数辨识的可调模型和自适应律均为连续方程, 在电机控制过程中需要编程实现。在电机电流空间状态方程的基础上得到的可调模型方程包含微分运算。因为 DSP 无法计算微分, 因此需要离散化方程, 得到的离散化后的可调模型方程为:

$$\hat{id}(k) = T_s[-\hat{a}(k-1)\hat{id}(k-1) + \omega_e(k-1)\hat{iq}(k-1) + \hat{b}(k-1)u_d(k-1)] + \hat{id}(k-1) \quad (31)$$

$$\hat{iq}(k) = T_s[-\omega_e(k-1)\hat{id}(k-1) - \hat{a}(k-1)\hat{iq}(k-1) + \hat{b}(k-1)u_q(k-1) - \hat{b}(k-1)\psi(k-1)\omega_e(k-1)] + \hat{iq}(k-1) \quad (32)$$

其中:  $\hat{id}(k)$ 、 $\hat{iq}(k)$  为可调模型在第  $k$  时刻输出的直交轴电流,  $T_s$  为开关周期,  $\hat{a}(k-1)$ 、 $\hat{b}(k-1)$  为第  $k-1$  时刻由自适应率计算得到的包含待辨识参数的可调变量,  $u_d(k-1)$ 、 $u_q(k-1)$  为第  $k-1$  时刻的电机直交轴电压,  $\omega_e(k-1)$  为第  $k-1$  时刻的电机电角速度。

同理, 自适应律中存在积分计算, DSP 中无法进行连续积分运算, 需要将积分计算转化为离散增量运算, 则自适应律的中间变量为:

$$f(k) = -\hat{id}(k)e_d(k) - \hat{iq}(k)e_q(k) \quad (33)$$

$$g(k) = e_d(k)u_d(k) + e_q(k)u_q(k) - e_q(k)\psi(k)\omega_e(k) \quad (34)$$

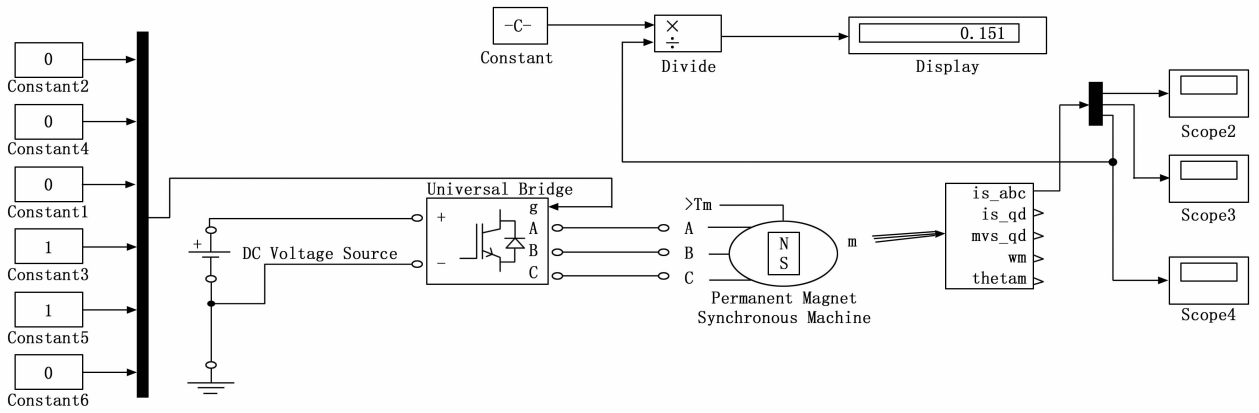


图 2 伏安法仿真模型

则经过离散化处理后的自适应律为：

$$\hat{a}(k) = k_{pa}f(k) + \sum k_{ia}T_s f(k) + \hat{a}(0) \quad (35)$$

$$\hat{b}(k) = k_{pb}g(k) + \sum k_{ib}T_s g(k) + \hat{b}(0) \quad (36)$$

## 4 仿真结果分析

### 4.1 离线辨识仿真

利用 Matlab 仿真验证离线辨识的辨识模型。电机电阻设置为 0.15 Ω，电机电感设置为 400 μH，永磁体磁链设置为 0.1 Wb，仿真模型及结果如图 2、3 所示。

通过直流电源施加直流电压 311 V，此时 BC 相导通，可以看到施加直流电压后定子电流上升至稳态值，稳态时的电流为 1 030 A，电流达到 0.632 倍的

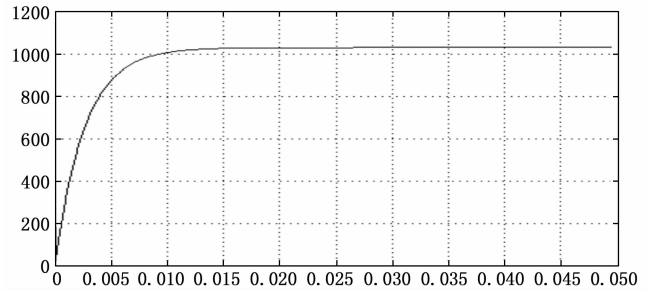


图 3 仿真波形图

时间为 0.002 64 s，辨识结果为：

$$R = 0.151\Omega$$

$$L = 398.64 \mu\text{H}$$

相对误差分别为：

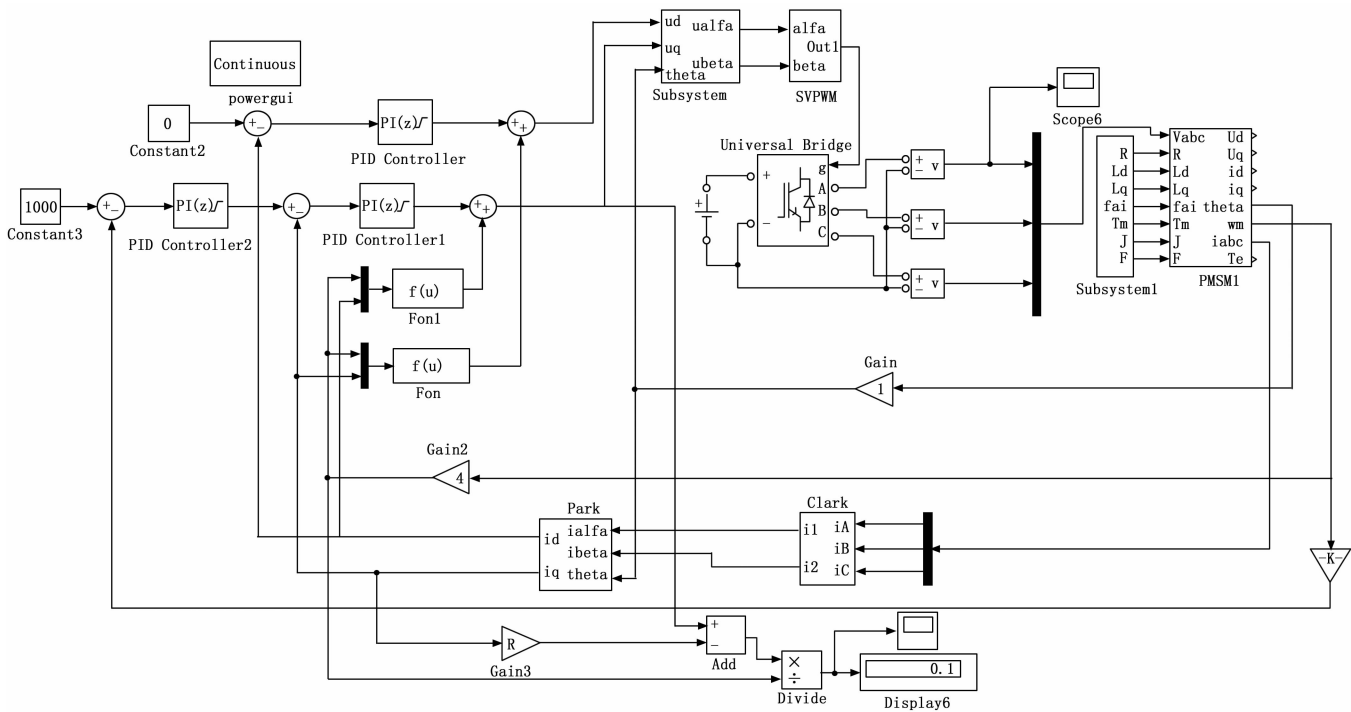


图 4 磁链辨识仿真模型

$$\eta = (0.151 - 0.15) \div 0.15 \times 100\% = 0.67\%$$

$$\eta = (398.64 - 400) \div 400 \times 100\% = -0.34\%$$

辨识磁链时采用  $i_d=0$  矢量控制, 设定直轴电流环给定指令为 0, 速度指令为 1 000。当电机运行到稳态的时候, 分别测量交轴电流, 电机转速和交轴电压, 代入计算公式后得到永磁体磁链。磁链辨识仿真模型和波形如图 4、5 所示。

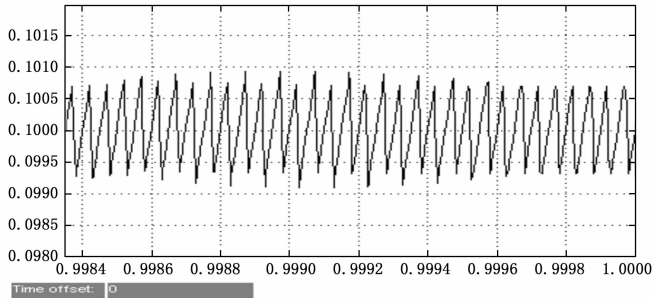


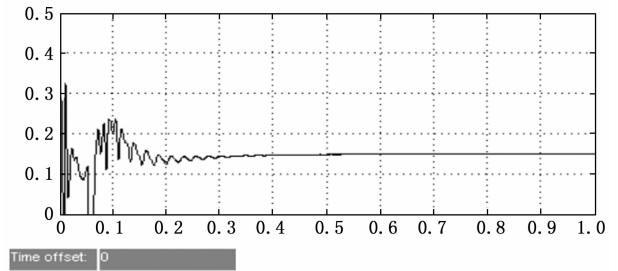
图 5 磁链辨识波形图

由于辨识结果有波动, 取一段数据后得平均值为 0.1 Wb, 由仿真结果可得, 能够辨识出永磁体磁链。

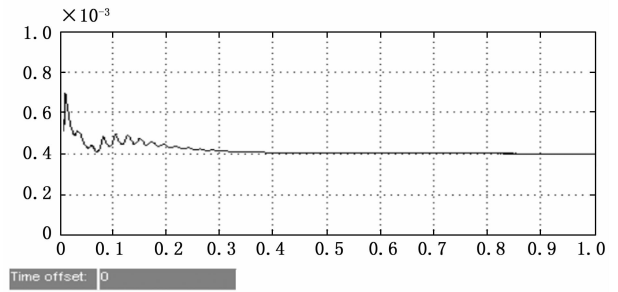
#### 4.2 在线辨识仿真

利用 Matlab 仿真验证在线辨识模型。Matlab/Simulink 自带的电机模块一般是在仿真开始前设置参数, 但在对时变系统进行仿真时需要参数动态变化, 例如电阻值随温度变化发生改变时属于变参数仿真。系统集成的电机模块不支持参数在线修改而难以验证辨识算法对变化量的辨识效果。另一方面, 集成的电机模块定义的坐标变换角与国内常规定义不同, 在仿真过程中会带来不便。因此需在 Matlab 中搭建更具有泛用性的电机模型<sup>[20]</sup>。根据 PMSM 数学模型, 在 PMSM 的直交轴等效方程的基础上搭建不受 Matlab 自带模型限制的电机模型, 从而模拟电机运行过程中电机参数的变化。当电机运行趋于稳定时, 等效模型在直交轴电流、电压信号为直流量, 更有利于参数辨识的进行<sup>[21]</sup>。

在线辨识时采用  $i_d=0$  矢量控制, 将离线辨识得到的磁链值视为定值, 对电阻与电感进行辨识。将离线辨识得到的电阻值与电感值作为初值设置在自适应律中。电机电感设置为  $400 \mu\text{H}$ , 电阻设置为  $0.15 \Omega$ , 磁链设置为 0.1 Wb。将直交轴电流、直交轴电压、转速作为输入, 在线辨识仿真波形如图 6 所示。由图可知, 辨识结果分别为  $0.15 \Omega$  和  $399.9 \mu\text{H}$ , 可以看出辨识收敛速度较快, 且精度较高。



(a) 电阻辨识结果

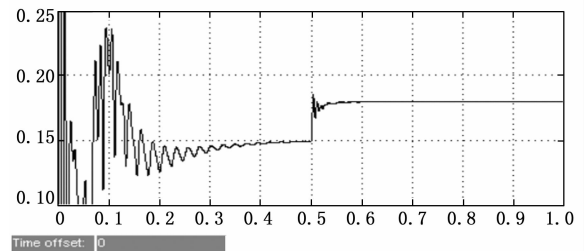


(b) 电感辨识结果

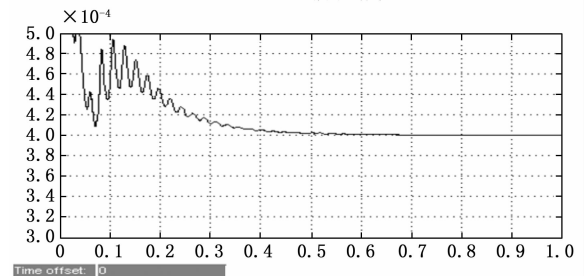
图 6 在线辨识仿真结果

为验证辨识算法在参数发生变化时能否辨识出变化的实际参数, 分别在仿真过程中使电阻与电感以不同方式在一定范围内发生变化, 以验证跟随性与可靠性, 并通过参数波形图观察结果。

图 7 为定子电阻突变时的波形, 在 0.5 s 的时候定子电阻由  $0.15 \Omega$  突变为  $0.18 \Omega$ , 1 s 时的电阻辨识结果和电感辨识结果分别为  $0.1799 \Omega$  和  $399.9 \mu\text{H}$ , 从图中可以看出定子电阻的辨识值可以跟上突变的实际值。



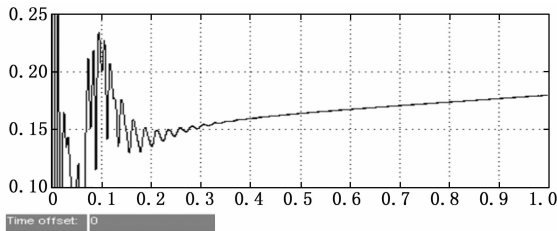
(a) 电阻辨识结果



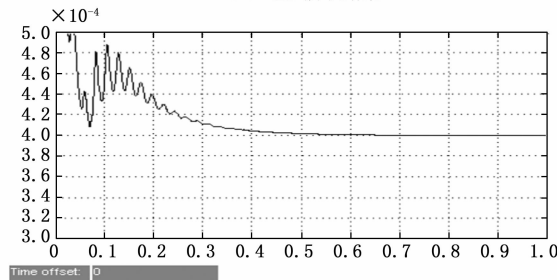
(b) 电感辨识结果

图 7 电阻突变时在线辨识仿真结果

图8为定子电阻以 $0.03\ \Omega/\text{s}$ 速率上升时的辨识值,经1s后由 $0.15\ \Omega$ 升至 $0.18\ \Omega$ 。1s时的电阻辨识结果和电感辨识结果分别为 $0.1798\ \Omega$ 和 $399.9\ \mu\text{H}$ ,从图中可以看出定子电阻的辨识值可以跟上持续变化的实际值。



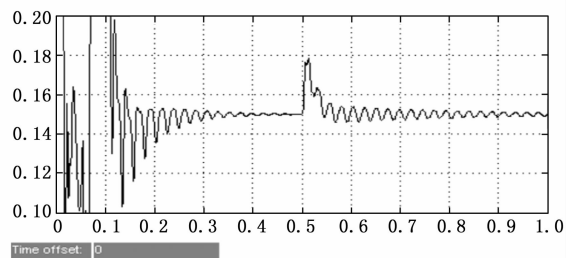
(a) 电阻辨识结果



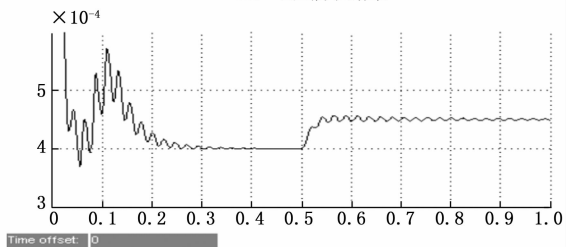
(b) 电感辨识结果

图8 电阻持续上升时在线辨识仿真结果

图9为电感突变时的波形。在 $0.5\ \text{s}$ 的时候电感由 $400\ \mu\text{H}$ 突变为 $450\ \mu\text{H}$ ,1s时的电阻辨识结果和电感辨识结果分别为 $0.1506\ \Omega$ 和 $449.4\ \mu\text{H}$ ,从图中可以看出电感的辨识值可以跟上突变的实际值。



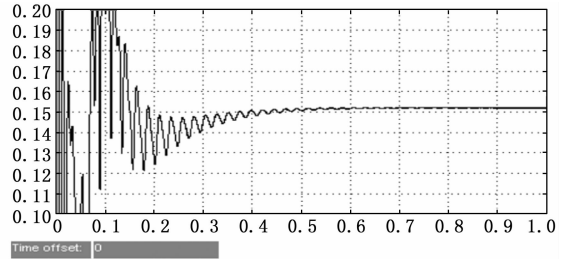
(a) 电阻辨识结果



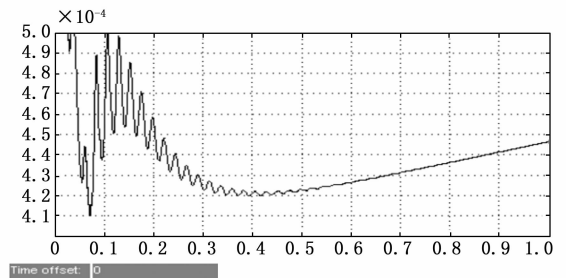
(b) 电感辨识结果

图9 电感突变时在线辨识仿真结果

经1s后由 $400\ \mu\text{H}$ 升至 $450\ \mu\text{H}$ 。1s时的电阻辨识结果和电感辨识结果分别为 $0.1519\ \Omega$ 和 $446.4\ \mu\text{H}$ ,从图中可以看出电感的辨识值可以跟上持续变化的实际值。



(a) 电阻辨识结果



(b) 电感辨识结果

图10 电感持续上升时在线辨识仿真结果

从仿真结果看,基于波波夫超稳定性理论设计的自适应律可以跟随变化的参数,辨识结果较好地跟随实际值,可以看出这种算法可以在线辨识电机参数。

## 5 结束语

本文分别验证了离线辨识和在线辨识算法。通过仿真与实验验证,证实了离线参数辨识的可行性。以波波夫超稳定性理论为基础设计了基于模型参考自适应的PMSM在线辨识方法,并通过仿真进行了验证。通过仿真可以验证算法的稳定性,具有较快的辨识速度和较高的辨识精度,实现了对定子电阻和电感的在线辨识,是一种可行的PMSM参数辨识方法。

在线辨识是在将磁链视为定值的情况下进行的,在实际运行过程中磁链值会发生变化并因此影响辨识效果,需将磁链的变化加以考虑并改进辨识算法。

## 参考文献:

- [1] 蒋若愚,余锦华,刘振焘,等.基于模型参考自适应的永磁同步电机参数辨识[C]//第37届中国控制会议论文集,2018:1860-1863.
- [2] 刘伟,王俊.永磁同步电机参数辨识研究综述[J].电气技术,2020(8):1-5.

图10为电感以 $50\ \mu\text{H}/\text{s}$ 速率上升时的辨识值,



- [3] 孔庆乐. 基于参数辨识的永磁同步电机矢量控制方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [4] 吴家彪. 电机伺服驱动系统及其参数辨识研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [5] 程 静, 蔡华祥, 陈 强, 等. 永磁同步电机参数自整定及参数辨识技术研究 [J]. 微电机, 2020, 53 (1): 101-105.
- [6] 石建飞, 戈宝军, 吕艳玲, 等. 永磁同步电机在线参数辨识方法研究 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (3): 17-24.
- [7] 杨宗军, 王莉娜. 表贴式永磁同步电机的多参数在线辨识 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (3): 111-118.
- [8] PEI G J, LIU J X, LI L Y, et al. MRAS based online parameter identification for PMSM considering VSI non-linearity [C] //2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shenzhen, China, 2018.
- [9] ZHANG Y Q, YIN Z G, SUN X D, et al. On-line identification methods of parameters for permanent magnet synchronous motors based on cascade MRAS [C] //9th International Conference in Power Electronics and ECCE Asia. Seoul, Korea, 2015: 345-350.
- [10] 张桂芳. 永磁交流伺服系统参数辨识的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [11] 宛 野. 内置式永磁同步电机参数辨识技术研究 [D]. 武汉: 中国舰船研究院, 2018.
- [12] 朱 雅, 贺昱曜, 许宇豪, 等. 基于级联 MRAS 的 PMSM 参数在线辨识算法 [J]. 西北工业大学学报, 2017, 35 (3): 486-493.
- [13] LIU K, ZHANG Q, ZHU Z Q, et al. Comparison of two novel MRAS based strategies for identifying parameters in permanent magnet synchronous motors [J]. International Journal of Automation and Computing, 2010, 7 (4): 516-524.
- [14] 张瑞峰, 于森林, 刘 婷, 等. 基于模型参考自适应的永磁同步电机在线参数辨识方法研究 [J]. 机车电传动, 2015 (2): 71-76.
- [15] 范惊京, 刘 莹, 程善美. 考虑死区补偿的永磁同步电机在线参数辨识 [J]. 微电机, 2018, 51 (8): 38-43.
- [16] 李垣江, 董 鑫, 魏海峰, 等. 基于改进模型参考自适应系统的永磁同步电机参数辨识 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (9): 1983-1988.
- [17] 石有计. 一种改进的永磁同步电动机参数在线辨识方法 [J]. 电气技术, 2017 (11): 91-95.
- [18] 袁登科, 徐延东, 李秀涛. 永磁同步电动机变频调速系统及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [19] 李红梅, 陈 涛. 永磁同步电机参数辨识研究总论 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29 (5): 638-647.
- [20] 王莉娜, 杨宗军. SIMULINK 中 PMSM 模型的改进及在参数辨识中的应用 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16 (7): 77-82.
- [21] 曹 杨. 永磁同步电机参数辨识研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [14] 李 博. 基于视觉传达的多帧图像高分辨率重建仿真 [J]. 计算机仿真, 2021, 38 (3): 113-116, 121.
- [15] 张 迅, 李建胜, 王安成, 等. 无人平台视觉导航算法验证仿真系统的设计与实现 [J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38 (1): 9-14, 20.
- [16] 白梓璇, 高 强, 于 晓, 等. 基于补体免疫聚类的电力设备红外图像目标提取算法 [J]. 激光杂志, 2020, 41 (3): 107-112.
- [17] VERMA A, MEENPAL T, ACHARYA B. Multiperson interaction recognition in images: a body keypoint based feature image analysis [J]. Computational Intelligence, 2020, 37 (1): 461-483.
- [18] 宋廷强, 李继旭, 张信耶. 基于深度学习的高分辨率遥感图像建筑物识别 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56 (8): 26-34.
- [19] WANG X, LIU M, RAYCHAUDHURI D S, et al. Learning person re-identification models from videos with weak supervision [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 3017-3028.
- [20] KUMAR R, GRAFF M, VASCONCELOS I, et al. Target-oriented imaging using extended image volumes—a low-rank factorization approach [J]. Geophysical Prospecting, 2019, 67 (5): 1312-1328.
- [21] 刘 娜, 付苗苗. 深度学习理论的激光全息成像图像重构研究 [J]. 激光杂志, 2021, 42 (4): 126-129.
- [22] 陈善雄, 彭茂玲, 钱仁飞, 等. 数字 PCR 仪成像系统的自动对焦算法研究 [J]. 重庆大学学报, 2019, 42 (9): 34-43.

(上接第 191 页)