

# 一种新的异步电机离线参数辨识方法

杨景明<sup>1,2</sup>, 杨波<sup>1,2</sup>, 王亚超<sup>1,2</sup>, 李明煜<sup>1,2</sup>

(1.燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004;  
2.燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**针对传统离线参数辨识中存在易受干扰及误差累计等问题,提出一种新的异步电机离线参数辨识方法。该辨识方法采用折息递推算法,克服了传统递推最小二乘法存在的“数据饱和”问题;选择能够充分激励系统的伪随机序列作为输入信号,提高系统的抗干扰性。仿真分析和实验结果表明,参数辨识结果与设置的电机参数之间的误差均在3%以内,且通过折息递推方法得到的参数辨识结果相比于传统单相实验的辨识结果更稳定,证明了该辨识方法的实用性。

**关键词:**三相异步电机; 离线参数辨识; 折息递推算法; 伪随机序列

**DOI:** 10.12067/ATEEE1806073      **文章编号:** 1003-3076(2019)10-0074-07      **中图分类号:** TM343

## 1 引言

交流异步电机由于其制造成本低、可靠耐用等优点在传动系统中得到广泛的应用,但异步电机高性能控制效果都严重依赖于电机参数的准确性。因此,离线参数辨识成为当前传动系统研究中的一个热点<sup>[1]</sup>。

离线参数辨识能够为系统控制器提供精确的电机参数初值<sup>[2]</sup>。传统的异步电机离线参数辨识采用堵转实验和空载实验实现,这种方法的辨识精度较低且对实验环境的要求较为苛刻。针对上述问题国内外专家和学者进行了大量的异步电机离线参数辨识研究。N. R. Klaes 提出并证明了在线性范围内,向电机中通入单相交流信号不仅能实现堵转效果,还能产生与通入三相交流信号相同的电磁响应<sup>[3]</sup>。但是在饱和区受三相谐波的影响,三相堵转时的互感要大于单相堵转的互感。在此基础上 Gastli 提出用单相实验代替堵转实验和空载实验<sup>[4]</sup>,证明了当改变输入信号频率时,通过反 $\Gamma$ 等效电路计算的转子电阻和漏感能得到更准确的辨识结果。

文献[5]将神经网络应用到电机静态参数辨

识,在低频和高频近似成两个一阶微分方程,利用人工神经网络识别方程的系数,但是这种方法是对电机模型简化较严重,且辨识时间过长。文献[6]采用递推最小二乘法进行离线参数辨识,由于实验数据增多导致的“数据饱和”问题,参数辨识结果偏离真实值。

单相实验由于操作简单,可靠性较高而被广泛应用<sup>[7,8]</sup>。用改进的单相实验辨识电机的初始参数,引入死区补偿机制,虽然易受环境干扰,但是仍代替了传统的堵转实验和空载实验,成为没有变频器工业场合中最常使用的辨识方法。所以本文将以单相实验为主要对比实验。

为了得到准确的电机参数辨识结果,建立了三相异步电机递推形式的辨识模型,将伪随机序列( $m$ 序列)作为输入激励信号,利用折息递推算法离线辨识电机参数。通过仿真验证了该辨识方法的准确性,并对370W的三相异步电机进行了多次折息递推辨识实验和单相实验,将实验结果与参考值进行比较,证明了提出的离线辨识方法的可行性和实用性。

## 2 异步电机递推辨识模型

三相异步电机在两相静止坐标系下的数学模型

收稿日期: 2018-06-27  
基金项目: 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心开放课题(2012006)、河北省高等学校创新团队领军人才培养计划(LJRC013)、河北省自然科学基金项目(F2016203249)  
作者简介: 杨景明(1957-),男,黑龙江籍,教授,博士,研究方向为轧制过程控制、交流电机控制等;  
杨波(1994-),女,河北籍,硕士研究生,研究方向为交流异步电机的参数辨识。

通过适当的变换可以得到三相异步电机递推最小二乘形式的辨识模型<sup>[9]</sup>,推导过程如下。

两相静止坐标系下的数学模型为:

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = -\xi i_{s\alpha} + \frac{\eta}{T_r} \psi_{r\alpha} + \eta \omega \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha} \quad (1)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = -\xi i_{s\beta} + \frac{\eta}{T_r} \psi_{r\beta} + \eta \omega \psi_{r\alpha} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta} \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\alpha} - \omega \psi_{r\beta} \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\beta} + \omega \psi_{r\alpha} \quad (4)$$

式中,  $\xi = \frac{R_1}{\sigma L_1} + \frac{L_m^2}{\sigma L_1 L_2 T_r}$ ;  $\eta = \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2}$ ;  $R_1$ 、 $R_2$  分别为定子电阻、转子电阻;  $L_1$ 、 $L_2$  分别为定子漏感、转子漏感;  $T_r = L_r/R_2$ 、 $T_s = L_s/R_1$  分别为转子时间常数和定子时间常数;  $L_s$ 、 $L_r$ 、 $L_m$  分别为定子电感、转子电感、互感;  $\psi_{r\alpha}$ 、 $\psi_{r\beta}$  分别为  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴的转子磁链;  $\sigma = 1 - L_m^2/(L_s L_r)$  为电机漏磁系数。

由于式(1)和式(2)中含有未知的转子磁链项  $\psi_{r\alpha}$  和  $\psi_{r\beta}$ , 经过代数运算消掉转子磁链项, 并且在电机静态辨识过程中,  $\omega = 0$ ,  $d\omega/dt = 0$ , 电机的模型可以简化为式(5)和式(6):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} = & \left( \frac{\eta L_m}{T_r^2} - \frac{\xi}{T_r} \right) i_{s\alpha} + \frac{1}{\sigma L_s T_r} u_{s\alpha} + \\ & \frac{1}{\sigma L_s} \frac{du_{s\alpha}}{dt} - \left( \xi + \frac{1}{T_r} \right) \frac{di_{s\alpha}}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha}(k) \\ i_{s\beta}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s\alpha}(k-1) & i_{s\alpha}(k-2) & u_{s\alpha}(k-1) & u_{s\alpha}(k-2) \\ i_{s\beta}(k-1) & i_{s\beta}(k-2) & u_{s\beta}(k-1) & u_{s\beta}(k-2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$i_{s\alpha}(k) + a_1 i_{s\alpha}(k-1) + a_2 i_{s\alpha}(k-2) = b_1 u_{s\alpha}(k-1) + b_2 u_{s\alpha}(k-2) \quad (9)$$

式中,  $a_1 = -(2 + k_4 T)$ ,  $a_2 = -(k_1 T^2 - k_4 T - 1)$ ,  $b_1 = k_3 T$ ,  $b_2 = k_2 T^2 - k_3 T$ 。当得到  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  即可计算出待辨识参数。

### 3 折息递推算法

利用递推最小二乘法辨识电机参数, 不需要计算转子磁链值, 能够消除参数计算和磁链观测之间的耦合<sup>[10]</sup>, 但是随着实验数据的不断增加, 会出现“数据饱和”的现象而使参数偏离真实值。本文在递推最小二乘法的基础上加入了遗忘因子和加权因

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_{s\beta}}{dt^2} = & \left( \frac{\eta L_m}{T_r^2} - \frac{\xi}{T_r} \right) i_{s\beta} + \frac{1}{\sigma L_s T_r} u_{s\beta} + \\ & \frac{1}{\sigma L_s} \frac{du_{s\beta}}{dt} - \left( \xi + \frac{1}{T_r} \right) \frac{di_{s\beta}}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

令  $k_1 = \frac{\eta L_m}{T_r^2} - \frac{\xi}{T_r}$ ,  $k_2 = \frac{1}{\sigma L_s T_r}$ ,  $k_3 = \frac{1}{\sigma L_s}$ ,  $k_4 = -(\xi + \frac{1}{T_r})$ 。电机的定子电阻  $R_1$ , 转子电阻  $R_2$ , 定子电感  $L_s$ , 转子时间常数  $T_r$ , 互感  $L_m$ , 漏磁系数  $\sigma$  由  $k_1 \sim k_4$  参数表示为:

$$\begin{aligned} R_1 = & -\frac{k_1}{k_2}, R_2 = \frac{k_1 k_3 - k_2 k_4}{k_2 k_3}, L_s = \frac{k_1 k_3 - k_2 k_4}{k_2^2}, \\ T_r = & \frac{k_3}{k_2}, L_m = L_s \sqrt{(1-\sigma)}, \sigma = \frac{k_2^2}{k_3(k_1 k_3 - k_2 k_4)} \end{aligned}$$

将式(5)、式(6)写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} \\ \frac{d^2 i_{s\beta}}{dt^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & u_{s\alpha} & \frac{du_{s\alpha}}{dt} & \frac{di_{s\alpha}}{dt} \\ i_{s\beta} & u_{s\beta} & \frac{du_{s\beta}}{dt} & \frac{di_{s\beta}}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)为三相异步电机最小二乘法形式的连续辨识模型, 当采样周期为  $T$  时, 利用欧拉方法得到离散化模型用式(8)表示。由式(8)可知, 对于模型中的  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴, 均可单独作为一个单输入单输出系统计算电机参数。所以在本文的仿真及实验研究中, 设置  $\alpha$  轴的输入激励为伪随机信号,  $\beta$  轴输入为 0, 根据式(8)将待辨识系统的模型表示为式(9)形式。

$$\begin{bmatrix} 2 + k_4 T \\ k_1 T^2 - k_4 T - 1 \\ k_3 T \\ k_2 T^2 - k_3 T \end{bmatrix} \quad (9)$$

子, 提出折息递推最小二乘法消除数据饱和的影响。

遗忘因子能够减弱旧数据的影响而增强新数据在算法中的作用, 加权因子能够对不同可信度的数据进行加权, 遗忘因子和加权因子可以设置为常数和随时间变化的变量, 在本文的异步电机参数静态辨识研究中, 加入输入激励后将系统看成是参数缓慢变化的稳定系统。采用常数的遗忘因子和加权因子, 通常情况下遗忘因子选择范围是 0.95~1, 加权因子选择范围是 0.2~1。在实际应用中要通过实验选择适合的折息因子, 会使得递推最小二乘法的辨

识精度得到显著的提高。

折息递推最小二乘法模型的推导过程如下。

最小二乘法的辨识模型为：

$$z(k) = \mathbf{h}^T(k)\boldsymbol{\theta} + e(k) \tag{10}$$

式中,  $z(k)$  为系统的输出;  $\mathbf{h}(k)$  为可观测的数据向量;  $\boldsymbol{\theta}$  为待辨识的参数向量;  $k$  取  $1, \cdots, N, N$  为数据长度。

$$\mathbf{h}(k) = [-z(k-1), \cdots, -z(k-n_a), \\ u(k-1), \cdots, u(k-n_b)] \tag{11}$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1, a_2, \cdots, a_{n_a}, b_0, b_1, \cdots, b_{n_b}] \tag{12}$$

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^k \Gamma(k,i) [z(i) - \mathbf{h}^T(i)\boldsymbol{\theta}]^2 \tag{13}$$

式中,  $n_a, n_b$  分别为待辨识参数  $a, b$  的个数;  $\Gamma(k,i)$  为折息因子; 与加权因子  $\Lambda(i)$  和遗忘因子  $\mu(j)$  关系为：

$$\Gamma(k,i) = \Lambda(i) \prod_{j=i+1}^k \mu(j) \tag{14}$$

通过极小化  $J(\boldsymbol{\theta})$ , 求得的模型参数  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  可以最接近真实值。在  $k$  时刻的参数估计值为：

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = [\sum_{i=1}^k \Gamma(k,i) \mathbf{h}(i) \mathbf{h}^T(i)]^{-1} [\sum_{i=1}^k \Gamma(k,i) \mathbf{h}(i) z(i)] \\ \mathbf{K}(k) = \Lambda(k) \mathbf{P}(k) \mathbf{h}(k) \\ \mathbf{P}(k) = [\sum_{j=1}^k \Gamma(k,i) \mathbf{h}(i) \mathbf{h}^T(i)]^{-1} \end{cases} \tag{15}$$

式中,  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$  为  $k$  时刻参数的估计值;  $\mathbf{K}(k)$  为增益矩阵;  $\mathbf{P}(k)$  为协方差矩阵。推导出如下的折息递推最小二乘法：

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \mathbf{K}(k) [z(k) - \mathbf{h}^T(k) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)] \\ \mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k-1) \mathbf{h}(k) [\mathbf{h}^T(k) \mathbf{P}(k-1) \mathbf{h}(k) + \mu(k)/\Lambda(k)]^{-1} \\ \mathbf{P}(k) = 1/\mu(k) [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \mathbf{h}^T(k)] \mathbf{P}(k) \end{cases} \tag{16}$$

式中,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

4 辨识方法仿真研究

在 Simulink 环境中基于三相异步电机的开环矢量控制模型对提出的离线辨识方法进行验证。 $\alpha$  轴输入为 11 阶  $m$  序列,  $m$  序列的码元时间与采样时间为  $300\mu\text{s}$ 。对  $U_\alpha, I_\alpha$  采样 2~3 周期信号, 根据式 (9)、式 (16) 利用折息递推算法进行离线参数辨识。

运用折息递推算法的关键步骤之一在于确定合适的遗忘因子和加权因子。通常情况下遗忘因子选

择范围是 0.95~1, 加权因子选择范围是 0.2~1。选择一组遗忘因子  $\mu$  为 0.95、0.97、0.98、0.982, 加权因子  $\Lambda$  为 0.2、0.3, 以定子电阻的辨识结果为例, 分析遗忘因子和加权因子对辨识结果的影响。

图 1、图 2 分别为加权因子  $\Lambda = 0.2, \Lambda = 0.3$  时, 不同遗忘因子定子电阻  $R_1$  的递推结果对比图。由图 1、图 2 分析可知, 遗忘因子较大时, 递推过程更平稳, 但递推曲线收敛速度较慢。适当地减小遗忘因子能增强算法的跟踪能力, 但会使振荡幅度增大, 对噪声更敏感。遗忘因子太小会降低系统鲁棒性影响辨识结果。

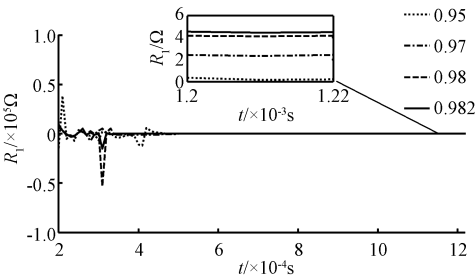


图 1  $\Lambda = 0.2$  时  $R_1$  辨识结果

Fig.1 Identification of  $R_1$  at  $\Lambda = 0.2$

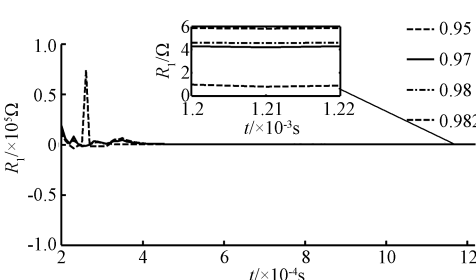


图 2  $\Lambda = 0.3$  时  $R_1$  辨识结果

Fig.2 Identification of  $R_1$  at  $\Lambda = 0.3$

选择合适的加权因子是对系统平均特性的调节。经过大量实验, 最终选择遗忘因子为  $\mu = 0.972$ , 加权因子为  $\Lambda = 0.3$ , 得到的原系统输出与递推拟合输出曲线如图 3 所示, 将参数  $a_1, a_2, b_1, b_2$  合称为参数  $g, g$  辨识结果如图 4 所示。

由图 3、图 4 可见, 利用折息递推算法估计电机模型的输出与实际电流基本吻合, 证明了选择合适的遗忘因子和加权因子使算法能够很好地跟踪系统输出。能够在较短时间内得到稳定的参数值 Parameter。

经过计算得到电机参数辨识结果见表 1, 由表 1 可知, 电机参数辨识结果与设定的真实值之间误差均在 3% 以内, 理论验证了提出的辨识参数的准确性。

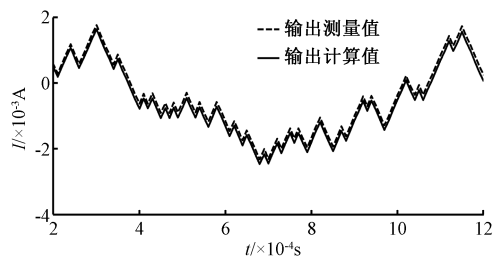


图3 输出响应曲线拟合

Fig.3 Output response curve fitting

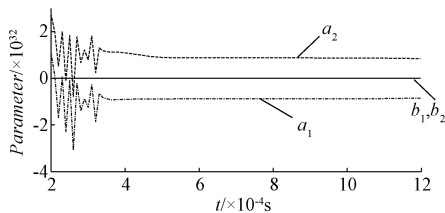


图4 系统模型参数辨识结果

Fig.4 Parameter identification results of the system model

表 1 折息递推算法的仿真辨识结果

参数	真实值	辨识结果	误差 (%)
$R_1/\Omega$	4.26	4.29	0.71
$R_2/\Omega$	3.24	3.31	2.16
$L_1/\text{mH}$	19	18.5	2.63
$L_m/\text{mH}$	651	668.1	2.62

5 折息递推算法辨识实验研究

为了验证提出的离线参数辨识方法的可行性,在以 TMS320F28335 (DSP28335) 为核心的控制平台进行实验验证。并利用同一实验平台实现单相实验,将两种方法得到的辨识结果进行对比研究。

5.1 实验平台介绍

本文利用图 5 所示的实验平台完成直流实验、单相实验、折息递推方法的离线参数辨识实验,为了验证参数辨识结果的准确性及提出的辨识方法的实用性,进行了无速度传感器矢量控制实验。

本实验中的所有控制算法及实验中所用到的激励信号都是通过 TI 公司的 DSP28335 实现的。实验平台硬件结构框图如图 6 所示,包括三相异步电机 (370W),核心控制器 DSP28335,IPM 模块,PWM 驱动模块、电流温度显示屏,电流检测模块,以及定子电压隔离检测模块。

实验所用电机为 370W 的三相异步电机,其铭

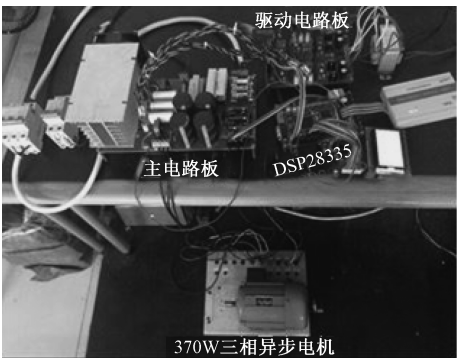


图5 实验平台

Fig.5 Experimental platform

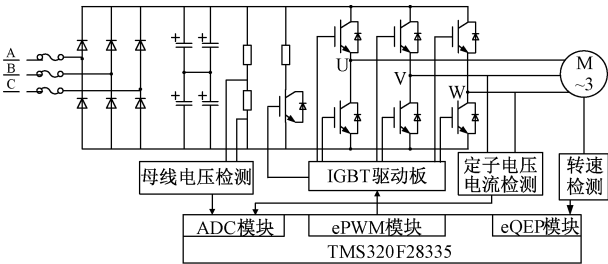


图6 实验平台硬件结构框图

Fig.6 Hardware structure block diagram of experimental platform

牌参数为:额定电压  $U_N = 220\text{V}$ , 额定电流  $I_N = 1.05\text{A}$ , 额定转速  $n_N = 1475\text{r/min}$ , 极对数  $p = 2$ 。实验设置死区时间为  $4\mu\text{s}$ , 采用输出的分辨率为 1024 脉冲/转的光电编码器测速获得电机的实际转速用来与估计转速比较。

5.2 伪随机序列的选择

伪随机序列作为激励信号辨识系统模型时,只有当被测系统的频带远窄于伪随机序列的频带时,  $m$  序列才能被看成是白噪声。在实际辨识应用中,选择合适的  $m$  序列才能保证被辨识系统被充分激励,得到良好的辨识效果。

伪随机序列的周期  $T_m = N\Delta t$ , 其中  $N$  为  $m$  序列中含有码元的个数,  $\Delta t$  为每个码元持续的时间,  $m$  序列的幅值为  $a$ 。  $m$  序列选择规则如下<sup>[11]</sup>:

(1)  $m$  序列的周期  $T_m$  要大于系统的过渡时间  $T_s$ 。

$$T_m = N\Delta t = (1.2 \sim 1.5) T_s \tag{17}$$

(2)  $m$  序列每个码元的宽度  $\Delta t$  要根据系统的上限截止频率  $f_m$  选择。  $m$  序列的有效频谱范围:

$$1/(N\Delta t) \leq f \leq 1/(3\Delta t) \tag{18}$$

$m$  序列最大频率  $f_m$  大于系统的上限截止频率。



$$1/(3\Delta t) \geq f_M \tag{19}$$

(3)  $m$  序列的幅值  $a$  过大会导致过程进入非线性区域影响实验进程及可靠性,同时也要保证一定的信噪比。通过系统的阶跃响应估计过渡时间。得到  $\alpha$  轴的阶跃响应如图 7 所示。

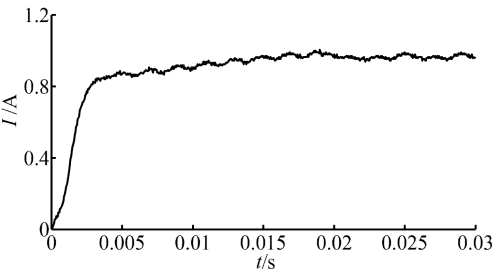


图 7 阶跃响应曲线  
Fig.7 Step response curve

确定系统的上限截止频率。将频率逐渐增大的方波电压信号作为  $\alpha$  轴的输入,直到输出电流响应为 0 时,此时的方波频率就确定为系统的上限截止频率。

由图 7 的阶跃响应曲线可以估计系统的过渡时间为 20ms,通过高频方波注入法确定系统的截止频率为 1.1kHz。根据伪随机序列参数设置的规则确定为 7 阶  $m$  序列,码元个数  $N = 127, \Delta t = 200\mu s, a = 1$ 。系统的采样时间  $T = 200\mu s$ 。

5.3 折息递推算算法参数辨识实验

本文所提出的离线辨识方法是基于开环矢量控制模型实现的,程序功能框图如图 8 所示。

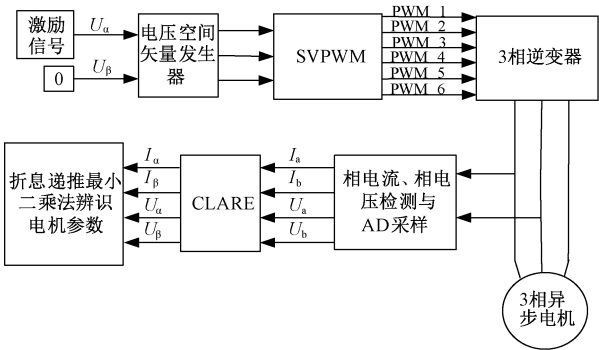


图 8 程序实现框图  
Fig.8 Block diagram of program implementation

由异步电机递推最小二乘待辨识模型式(9)可知,实验将伪随机信号作为  $\alpha$  轴的输入信号, $\beta$  轴输入信号为零。实时同步采样  $\alpha$  轴的输入电压及输出电流响应序列,采样周期与伪随机序列码元时间相同  $T = \Delta t = 200\mu s$ ,  $\alpha$  轴电流响应检测波形如图 9 所示。

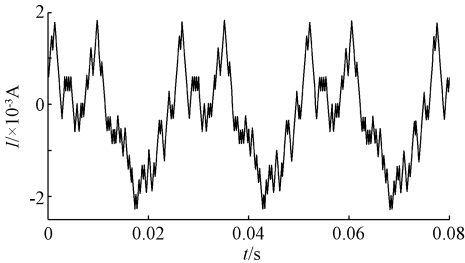


图 9 电流响应曲线  
Fig.9 Current response curve

5.4 实验结果分析

为了验证本文提出的折息递推离线辨识方法的辨识效果,在同一台电机进行了直流实验和单相实验。考虑到逆变器死区时间的影响,本文在单相实验中加入了对相对误差在 1% 以内的电压隔离检测模块。分别将折息递推辨识实验及单相实验的 6 次辨识结果绘制成参数与实验次数的曲线,如图 10、图 11 所示。

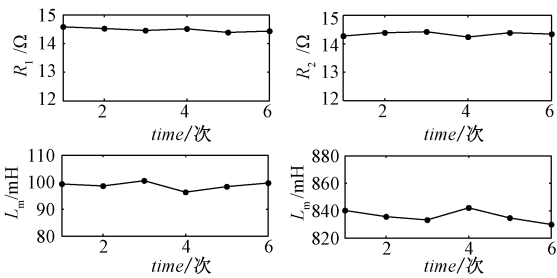


图 10 折息递推算算法参数辨识结果  
Fig.10 Parameter identification results of discount and recurrence calculation method

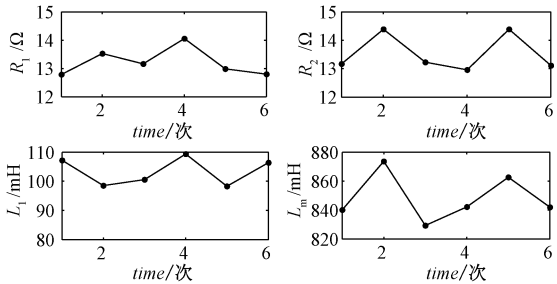


图 11 单相实验参数辨识结果  
Fig.11 Identification results of single phase experimental parameters

由图 10 可知,利用本文提出的折息递推离线辨识方法得到的定子电阻和转子电阻值基本保持不变,辨识得到的定子漏感、互感参数具有小的波动,但能够在一定范围内稳定。将图 10、图 11 参数辨识结果曲线比较,利用折息递推离线辨识方法得到

的参数辨识结果相对于单相实验得到的辨识结果波动较小,稳定性更好。

大多数的电机厂家不会提供电机的参数值。文献[12]中介绍,西门子变频器在伺服驱动等控制领域占有举足轻重的位置,在实际工业现场,通过实验进行离线参数辨识,得到的结果如果与西门子变频器的静态辨识参数基本一致时,就证明结果符合实际要求。本文选择西门子变频器 S120 对同一台电机进行静态参数辨识实验,并将辨识结果作为参考值。将折息递推辨识实验及单相实验的 6 次辨识结果取平均值,三组辨识结果见表 2。

表 2 折息递推算算法实验辨识结果平均值

Tab.2 Average value of experimental identification results of rate of interest recurrence method

参数	辨识结果		
	折息实验	单相实验	S120 静态
$R_1/\Omega$	14.48	13.21	14.98
$R_2/\Omega$	14.33	13.53	14.86
$L_1/\text{mH}$	98.78	103.40	96.72
$L_m/\text{mH}$	835.95	848.28	829.27

为了进一步证明提出的折息递推算算法能得到良好的辨识效果,将表 2 中的电机参数直接应用到异步电机无速度传感器矢量控制当中,验证提出方法的准确性和实用性。

在异步电机负载为额定负载时,速度指令为 540r/min 阶跃变化为 675r/min。电机的实际转速和估计转速的检测拟合曲线(纵坐标  $v$  表示转速)如图 12 所示。可以看出,电机的估计转速与实际转速相吻合,具有良好的转速跟踪效果,证明了离线辨识参数的准确性和折息递推离线辨识方法的实用性。

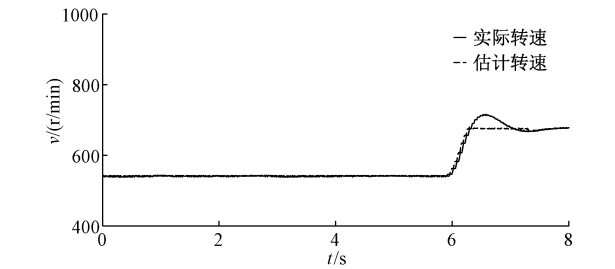


图 12 加速实验波形

Fig.12 Accelerated experimental waveform

6 结论

本文提出利用折息递推最小二乘法对电机进行

离线参数辨识,通过选择合适的遗忘因子和加权因子,克服了传统递推最小二乘法的“数据饱和”问题,并通过模型仿真,得到参数辨识结果与设定值之间的误差在 3%以内,证明了该方法的准确性。

对 370W 的三相异步电机进行了多次折息递推辨识实验和单相实验,实验结果表明利用提出的折息递推算算法得到的辨识结果波动较小,稳定性更高。并以西门子 S120 的离线辨识参数结果作为参考值,折息递推算算法的辨识实验得到的参数与参考值相差在 5%以内。将折息递推离线辨识方法得到的参数应用到无速度传感矢量控制中进行加速度实验,实验结果证明了折息递推离线辨识方法的实用性。

参考文献 (References):

[1] 陆海峰,瞿文龙,张磊,等 (Lu Haifeng, Qu Wenlong, Zhang Lei, et al.). 异步电机的非线性建模与仿真 (Nonlinear modeling and simulation of asynchronous motor) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2005, 27 (3): 31-34, 62.

[2] 王明渝,洗成渝,惠娅倩 (Wang Mingyu, Xian Chengyu, Hui Yaqian). 感应电动机矢量控制参数离线辨识技术 (Off-line identification technology of induction motor vector control parameters) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2006, 21 (8): 90-96.

[3] Depenbrock M, Klaes N R. Determination of the induction machine parameters and their dependencies on saturation [A] Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting [C]. 1989. 17-22.

[4] Gastli A. Identification of induction motor equivalent circuit parameters using the single-phase test [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14 (1): 51-56.

[5] 何晋伟,史黎明 (He Jinwei, Shi Liming). 一种基于静态特性的直线感应电机参数辨识方法 (A parameter identification method for linear induction motor based on static characteristics) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2009, 28 (4): 50-53, 70.

[6] Lee S H, Yoo A, Lee H J, et al. Identification of induction motor parameters at standstill based on integral calculation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53 (3): 2130-2139.

[7] 赵海森,杜中兰,刘晓芳,等 (Zhao Haiseng, Du Zhonglan, Liu Xiaofang, et al.). 基于递推最小二乘法

- 与模型参考自适应法的鼠笼式异步电机转子电阻在线辨识方法 (On-line rotor resistance identification of squirrel cage induction motor based on recursive least square method and model reference adaptive method) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (30): 5386-5394.
- [ 8 ] 王孝峰, 王英 (Wang Xiaofeng, Wang Ying). 异步电机参数的离线辨识方法仿真研究 (Simulation research on off-line identification method of asynchronous motor parameters) [J]. 变频器世界 (The World of Inverters), 2016(1): 94-96.
- [ 9 ] Bechouche A, Sediki H, Abdeslam D O, et al. Identification of induction motor at standstill using artificial neural network [A] IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society [C]. 2010. 2908-2913.
- [10] 王勇 (Wang Yong). 基于 PLS 的建模与控制在热工过程中的应用研究 (Application of PLS based modeling and control technology in thermal process) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2008.
- [11] Sonnaillon M O, Bisheimer G, De Angelo C, et al. Automatic induction machine parameters measurement using standstill frequency-domain tests [J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1 (5): 833-838.
- [12] 覃海涛 (Tan Haitao), 交流伺服系统自调整技术研究 (Research on self adjusting technology of AC servo system) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology), 2011.

## A new off-line parameter identification technique for asynchronous motors

YANG Jing-ming<sup>1,2</sup>, YANG Bo<sup>1,2</sup>, WANG Ya-chao<sup>1,2</sup>, LI Ming-yu<sup>1,2</sup>

(1. National Cold Rolling Strip Equipment and Technology Research Center of Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Key Laboratory of Hebei Province, Industrial Computer Control Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of interference and accumulative error in the traditional off-line parameter identification method, a static off-line parameter identification method for asynchronous motor is introduced in detail. The method uses the recursive algorithm to overcome the problem of “data saturation” in the traditional recursive least square method. And the pseudo random sequence that can fully stimulates the system is selected as the input signal to improve the anti-interference ability of the system. In this paper, the simulation study of the proposed method is carried out at first. The error between the parameters identification results and the parameters of the set motor is less than 3%, which proves the accuracy of the identification method. At last, a series of experiments are carried out on the three-phase asynchronous motor of 370W. The identification results of the method proposed in this paper are more stable than the identification results of the traditional single phase experiment, and the error between the reference values is less than 5%, which proves the feasibility of the identification method.

**Key words:** three-phase asynchronous motor; off-line parameter identification; discount recursive algorithm; pseudorandom sequence