

1-2-2019

## Parameter Identification for PMSM Based on Multi-innovation Approximate Least Absolute Deviation Identification Algorithm

Dinghui Wu

*Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Jianyu Zhang

*Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Yanxia Shen

*Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Zhicheng Ji

*Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Parameter Identification for PMSM Based on Multi-innovation Approximate Least Absolute Deviation Identification Algorithm

## Abstract

*Abstract: In view of the problem that the results of traditional identification algorithm are not accurate caused by the peak noise signal in the environment, a new algorithm based on the forgetting factor multi-innovation approximate least absolute deviation (MIALAD) identification algorithm is proposed.*

Combined with the system voltage equation of permanent magnet synchronous motor (PMSM), a discrete identification model is constructed. By using vector control method, the input and output data of the identification model are obtained to identify the rotor resistance and inductance. The simulation results show that this identification algorithm can obtain the accurate parameters of the PMSM model in the peak noise environment.

## Keywords

permanent magnet synchronous motor (PMSM), SVPWM vector control, forgetting factor, multi-innovation approximate least absolute deviation algorithm, parameter identification

## Recommended Citation

Wu Dinghui, Zhang Jianyu, Shen Yanxia, Ji Zhicheng. Parameter Identification for PMSM Based on Multi-innovation Approximate Least Absolute Deviation Identification Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1001-1007.

# 基于多新息近似最小一乘算法 PMSM 参数辨识

吴定会, 张建宇, 沈艳霞, 纪志成

(江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 针对永磁同步电机受工作环境尖峰噪声信号的影响导致的传统辨识算法辨识结果不精确的问题, 提出了多新息近似最小一乘算法。结合永磁同步电机系统电压方程, 构建离散辨识模型。采用矢量控制方法控制电机, 获得辨识模型输入输出数据, 对转子电阻和电感参数进行辨识。仿真结果表明, 该算法能够实现在尖峰噪声环境下对永磁同步电机参数的精确辨识。

**关键词:** 永磁同步电机; SVPWM 矢量控制; 遗忘因子; 多新息近似最小一乘; 参数辨识

中图分类号: TP2

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1001-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803029

## Parameter Identification for PMSM Based on Multi-innovation Approximate Least Absolute Deviation Identification Algorithm

Wu Dinghui, Zhang Jianyu, Shen Yanxia, Ji Zhicheng

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** In view of the problem that the results of traditional identification algorithm are not accurate caused by the peak noise signal in the environment, a new algorithm based on the forgetting factor multi-innovation approximate least absolute deviation (MIALAD) identification algorithm is proposed. Combined with the system voltage equation of permanent magnet synchronous motor (PMSM), a discrete identification model is constructed. By using vector control method, the input and output data of the identification model are obtained to identify the rotor resistance and inductance. The simulation results show that this identification algorithm can obtain the accurate parameters of the PMSM model in the peak noise environment.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); SVPWM vector control; forgetting factor; multi-innovation approximate least absolute deviation algorithm; parameter identification

## 引言

在风力发电和伺服系统领域中, 永磁同步电机因为其自身性能优越, 越来越受到人们的关注和得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。永磁同步电机转子内嵌永磁体, 相比异步电机省略了励磁结构, 物理结构简单, 所

以电机的稳定性高, 不易出现故障, 同时控制方法也相对简单。也正因为这些优势, 永磁同步电机经常工作于需要高精度作业或者条件恶劣的环境当中, 比如高精度伺服系统和风力发电系统中等。

永磁同步电机的稳定运行离不开精准的电机控制方法, 如直接转矩控制, 矢量控制, 模型参考自适应控制等<sup>[2-5]</sup>。精准的控制方法可以通过不断修正控制器的参数来适应电机参数的变化, 从而跟精准的控制电机运行。所以永磁同步电机的精确控制离不开精确的参数辨识。



收稿日期: 2016-03-17 修回日期: 2016-06-28;  
基金项目: 国家自然科学基金(61572237, 61573167);  
作者简介: 吴定会(1970-), 男, 安徽合肥, 博士, 副教授, 研究方向为系统辨识; 张建宇(1992-), 男, 山东济宁, 硕士, 研究方向为永磁同步电机参数辨识; 沈艳霞(1973-), 女, 山东淄博, 博士, 教授, 博导, 研究方向为电力电子与电气传动。

<http://www.china-simulation.com>

• 1001 •

现在已经出现了相当多的参数辨识算法<sup>[6-7]</sup>, 如最小一乘算法<sup>[8-9]</sup>, 最小二乘算法<sup>[10-11]</sup>, 随机梯度算法, 模型参考自适应算法<sup>[12-13]</sup>, 神经网络算法<sup>[14]</sup>和智能算法等, 以及算法相互之间的结合衍生出的新算法。随着多新息理论的提出, 并与基本算法的结合产生的新算法, 在原有算法优点的基础上做了改进缺点。产生了一批优秀的算法, 如多新息最小一乘, 多新息最小二乘<sup>[15]</sup>, 多新息随机梯度等<sup>[16]</sup>。

虽然最小二乘类算法已经发展的相当成熟而且应用十分广泛, 算法的优点是步骤简单, 精度高, 而且基于最小二乘算法也衍生出很多其他算法。但是当随机噪声不满足正态分布, 而且噪声中存在异常点或者经过滤波后噪声仍然无法过滤掉时, 采取最小二乘类算法辨识效果不理想。因为其准则函数中存在平方和项, 会在噪声尖峰处将误差放大, 最小一乘算法的运算过程可以弥补这一缺点。但是最小一乘算法的最大缺点就是准则函数不可微, 不能采取传统梯度搜索原理进行求解。所以提出用一个可微的函数对准则函数做近似代替<sup>[17]</sup>, 避免了传统最小一乘算法无法用梯度搜索原理求解的问题。同时在改进算法中引入多新息理论, 提出基于近似最小一乘准则的多新息辨识算法, 其辨识精度高、收敛速度快, 还能有效的克服无序尖峰序列噪声或大幅度干扰的影响, 具有很好的稳定性。

仿真结果表明, 基于多新息近似最小一乘算法对永磁同步电机进行参数辨识, 得到的辨识结果精度高, 抵抗噪声能力强, 具有较高的应用价值。

## 1 多新息近似最小一乘算法

对于下面线性回归模型:

$$y(t) = \boldsymbol{\varphi}^T(t)\boldsymbol{\theta} + v(t) \quad (1)$$

式中:  $y(t) \in R^1$  为模型输出;  $\boldsymbol{\varphi}(t) \in R^n$  为输入输出数据构成的回归信息向量;  $\boldsymbol{\theta} \in R^n$  为待辨识的参数;  $v(t) \in R^1$  为系统的噪声向量。

令目标函数为  $J(\boldsymbol{\theta}) = |y(t) - \boldsymbol{\varphi}^T(t)\boldsymbol{\theta}|$ , 由于该目标函数不可微, 所以无法用传统的梯度方法进行

最小化求解。为了解决这一问题, 用一个可微确定函数近似代替该目标函数, 通过传统梯度算法对可微确定函数求解近似算出最小一乘算法的求解方法。

定义准则函数为(2), 该函数是一可微确定函数:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \beta \ln \cosh \left[ \frac{y(t) - \boldsymbol{\varphi}^T(t)\boldsymbol{\theta}}{\beta} \right] \quad (2)$$

当  $\beta$  取较小时, 式(2)可以近似等效为(3), 从而实现近似处理。

$$J(\boldsymbol{\theta}) = |y(t) - \boldsymbol{\varphi}^T(t)\boldsymbol{\theta}| \quad (3)$$

根据梯度搜索原理得近似最小一乘算法:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) + \frac{\boldsymbol{\varphi}(t)}{r(t)} \tanh \left( \frac{e(t)}{\beta} \right) \quad (4)$$

$$e(t) = y(t) - \boldsymbol{\varphi}^T(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) \quad (5)$$

$$r(t) = r(t-1) + \frac{1}{e(t)} \left[ \boldsymbol{\varphi}^T(t)\boldsymbol{\varphi}(t) \tanh \left( \frac{e(t)}{\beta} \right) \right] \quad (6)$$

$$r(0) = 1$$

其中  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 、 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1)$  分别是  $\boldsymbol{\theta}$  当前时刻和上一时刻的估计值,  $e(t)$  为单新息量,  $r(t)$  定义为协方差阵的逆的迹。

引入多新息理论: 扩展  $e(t)$ 、 $y(t)$ 、 $\boldsymbol{\varphi}(t)$  由单新息到多新息:

$$\boldsymbol{E}(p, t) = \begin{bmatrix} y(t) - \boldsymbol{\varphi}^T(t)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) \\ y(t-1) - \boldsymbol{\varphi}^T(t-1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) \\ \vdots \\ y(t-p+1) - \boldsymbol{\varphi}^T(t-p+1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\Phi}(p, t) = [\boldsymbol{\varphi}(t) \quad \boldsymbol{\varphi}(t-1) \quad \cdots \quad \boldsymbol{\varphi}(t-p+1)] \in R^{1 \times p} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{Y}(p, t) = [y(t) \quad y(t-1) \quad \cdots \quad y(t-p+1)] \in R^{1 \times p} \quad (9)$$

其中  $y(t-i)$ 、 $\boldsymbol{\varphi}(t-i)$ :  $i=1, 2, \dots, p-1$  表示过去时刻的值。

式(7)可以表示为:

$$\boldsymbol{E}(p, t) = \boldsymbol{Y}(p, t) - \boldsymbol{\Phi}^T(p, t)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) \quad (10)$$

根据最小一乘算法便可写出多新息近似最小一乘算法, 同时, 实际应用中, 收敛速度并不理想, 所以在更新公式中加入遗忘因子  $\lambda$  来提高收敛速

度, 便得到遗忘因子多新息近似最小一乘算法 (multi-innovation approximate least absolute deviation algorithm, MIALAD):

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{\varphi(p, k)}{r(t)} \tanh\left(\frac{E(p, k)}{\beta}\right) \quad (11)$$

$$E(p, k) = Y(p, k) - \varphi^T(p, k)\hat{\theta}(k-1) \quad (12)$$

$$r(t) = \lambda r(t-1) + \frac{1}{e(k)} \left[ \varphi^T(k)\varphi(k) \tanh\left(\frac{e(k)}{\beta}\right) \right] \quad (13)$$

$$r(0) = 1$$

## 2 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机之所以应用广泛, 是因为它相对简单的结构。其转子中通过嵌入永磁体产生稳定的磁场, 相对于异步电机转子结构是由三相励磁电流激励产生励磁磁场, 永磁同步电机结构得到了简化。其定子侧与异步电机一样, 接入三相对称电流产生旋转磁场, 旋转磁场与转子侧的稳定磁场相互作用带动转子旋转。

为了更好的控制电机运转, 忽略一些影响不大的因素, 比如定子铁心饱和、永磁体的阻尼作用等情况。并将在此基础上建立的永磁同步电机的数学模型等效变换为直流电机形式的模型, 即将数学模型由三相 ABC 静止坐标系转换到 d-q 旋转坐标系下。所以永磁同步电机在 d-q 轴旋转坐标系下的数学模型为(14)<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d p i_d - \omega_r L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q p i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $u_d$ ,  $u_q$  分别为 d, q 轴电压;  $i_d$ ,  $i_q$  分别为 d, q 轴电流;  $R_s$  为定子相电阻;  $L_d$ ,  $L_q$  分别为 d, q 轴电感;  $\omega_r$  为电气角速度;  $\psi_f$  为转子磁链;  $p$  是微分算子。

选取转子结构为凸装式的永磁同步电机作为实验对象, 它的特点是 d, q 轴同步电抗近似相等, 即  $L_d = L_q = L$ 。

对式(14)中的微分算子  $p$  进行离散化处理:

$$\begin{aligned} p i_d &= \frac{i_d(k) - i_d(k-1)}{T} \\ p i_q &= \frac{i_q(k) - i_q(k-1)}{T} \end{aligned} \quad (15)$$

则:

$$\begin{cases} U_d(k) = R_s i_d(k) + L \frac{i_d(k) - i_d(k-1)}{T} - \omega_r(k) L i_q(k) \\ U_q(k) = R_s i_q(k) + L \frac{i_q(k) - i_q(k-1)}{T} + \omega_r(k) L i_d(k) + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (16)$$

于是可以得到永磁同步电机的自回归型:

$$\begin{bmatrix} U_d(k) \\ U_q(k) - \omega_r \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d(k) & \frac{i_d(k) - i_d(k-1)}{T} - \omega_r(k) i_q(k) \\ i_q(k) & \frac{i_q(k) - i_q(k-1)}{T} + \omega_r(k) i_d(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s \\ L \end{bmatrix} \quad (17)$$

此处仅考虑 d 轴的电流电压情况, 即:

$$U_d(k) = \begin{bmatrix} i_d(k) & \frac{i_d(k) - i_d(k-1)}{T} - \omega_r(k) i_q(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s \\ L \end{bmatrix} \quad (18)$$

所以永磁同步电机的自回归模型为

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta(k) \quad (19)$$

其中:

$$y(k) = U_d(k) \quad (20)$$

$\varphi(k) =$

$$\begin{bmatrix} i_d(k) & \frac{i_d(k) - i_d(k-1)}{T} - \omega_r(k) i_q(k) \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

$$\theta = [R_s \quad L]^T \quad (22)$$

## 3 实验仿真

为了得到遗忘因子多新息近似最小一乘算法在电机实际运行过程中的辨识效果, 在 simulink 中搭建永磁同步电机运行的矢量控制模型来模拟电机在真实环境中的运行情况, 通过电机正常运行情况下采集参数辨识所需的数据, 利用遗忘因子多新息近似最小一乘算法辨识电机参数。电机的矢量控制模型如图 1 所示, 电机参数如表 1 所示。

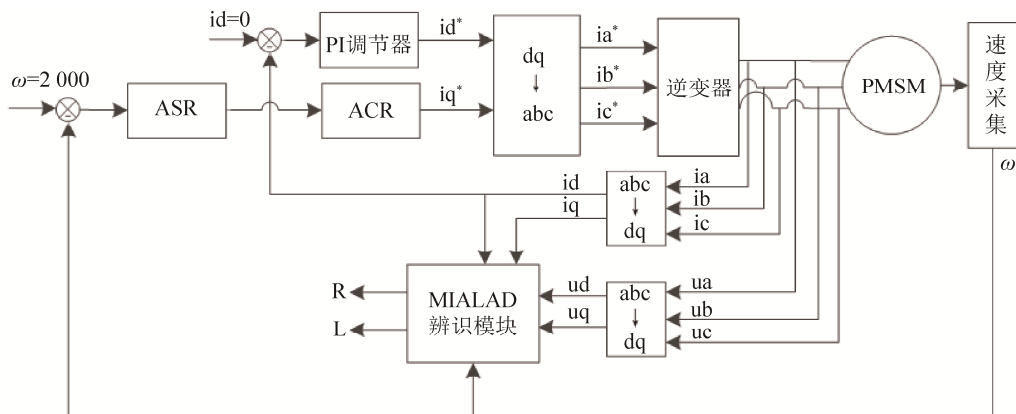


图1 永磁同步电机矢量控制系统  
Fig. 1 Vector control system of PMSM

表1 永磁同步电机参数

Tab. 1 parameters of permanent magnet synchronous

参数	量值
转子电阻/Ω	2.875 0
转子电感 L/H	0.008 5
转动惯量 J/(kg·m <sup>2</sup> )	0.008 0
转子永磁体/Wb	0.175 0
磁极对数 p	2

矢量控制方法是将三相交流电机等效为直流电机，用控制直流电机的方法控制交流电机。将定子侧三相电流正交分解为磁链方向和磁链正交方向两个电流分量，可以通过分别独立控制两个分量改变电流矢量的幅值和方向来调节转速，简化了控制方法，大大提高了电机的调速性能。

该模型中包含3个比例积分控制器，电机运行中采集的数据经过坐标变换反馈与设定值运算后，经过三个控制器的调节在通过坐标变换和逆变器施加到电机中。该控制框图所展示的基本原理是基于磁场定向控制，采用 SVPWM 矢量控制方法<sup>[18-19]</sup>， $i_d=0$  和电流环与速度环双闭环控制策略。 $i_d=0$  控制方法是调节永磁同步电机 d-q 轴等效模型中的 d 轴电流，通过反馈信号将 d 轴电流不断修正，使其恒为零。当  $i_d=0$  时，电机的电磁转矩只与 q 轴电流相关，便可以通过控制 q 轴电流大小控制电机电磁转矩进而控制电机运行。同时不考虑 d 轴电流进一步简化了永磁同步电机的数学模型。

图2为永磁同步电机启动后速度持续上升达

到设定速度( $\omega=2000$  r/min)后保持恒速运行的过程，通过调节控制器参数，可以改变永磁同步电机启动过程的响应速度。

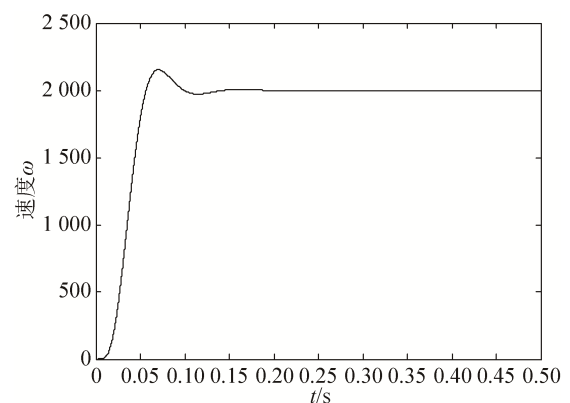


图2 速度响应( $\omega=2000$  r/min)  
Fig. 2 Speed response( $\omega=2000$  r/min)

图3为遗忘因子多新息最小一乘算法估计误差  $\delta$  的收敛曲线。通过计算每一次迭代过程中估计参数和实际参数的差的绝对值得到每一次的估计误差，每一条曲线代表不同的新息长度下算法估计误差的收敛情况，由上至下分别是新息长度 p 逐渐增加的过程。可以看出，当  $p=1$  时也就是基本的最小一乘算法的收敛曲线，响应速度较慢，逐渐增大新息长度 p，响应速度和精度都有显著提升，经过试验，当  $p=8$  时，在收敛速度和收敛精度上已经十分接近递推最小二乘的收敛曲线。所以遗忘因子多新息最小一乘算法便是效果符合比较理想。接下来会在抵制噪声的能力上作比较。

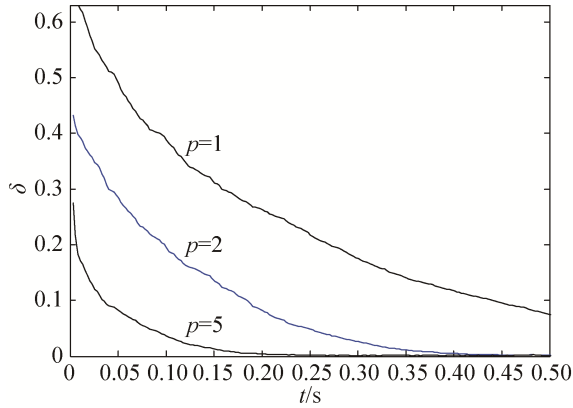


图3 MIALAD 算法不同  $p$  下估计误差曲线  
Fig. 3 Estimate error ( $\delta$ ) of MIALAD algorithms

### 3.1 与 RLS 算法比较

多新息近似最小一乘算法的优势体现在当有尖峰噪声存在时, 算法能够有效的避免噪声对运算精度的影响。在电机实际运行过程中受噪声的影响, 为了体现出该算法的优势, 在仿真时加入概率为 20%, 幅值为 3 倍于白噪声的随机尖峰噪声, 模拟电机运行过程中, 周围环境中无法过滤掉的噪声。仿真结果如图 4 所示。

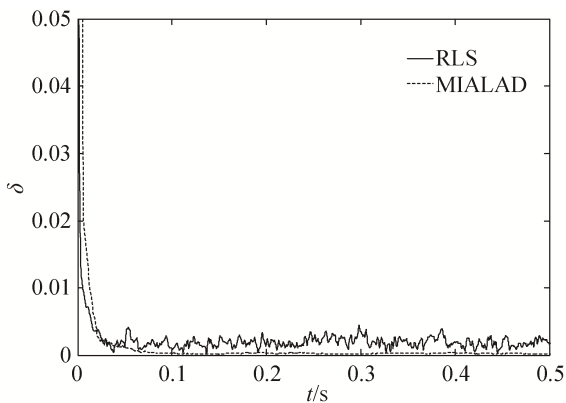


图4 MIALAD( $p=8$ )算法与 RLS 算法误差曲线  
Fig. 4 Estimate error ( $\delta$ ) of MISG and RLS algorithms  
(when  $p=8$ )

如图 4 中所示为遗忘因子多新息最小一乘算法与递推最小二乘算法的收敛曲线的对比图, 在环境中存在尖峰噪声的影响下, 遗忘因子多新息最小一乘算法当新息长度  $p=8$  时和递推最小二乘算法都收敛于很低的相对误差。基于递推最小二乘算法的辨识效果在辨识初期误差下降迅速, 快速性上略

快于遗忘因子多新息最小一乘算法, 但由于受尖峰噪声的影响, 辨识结果稳定性明显比后者差, 主要表现在曲线在误差较小的情况下并没有趋于收敛, 而是在很小的范围内上下波动。而遗忘因子多新息最小一乘算法的收敛曲线则在达到较小的误差后趋于收敛并保持平滑的曲线, 体现了基于遗忘因子多新息最小一乘算法的抑制尖峰噪声的优势, 在稳定性方面明显强于递推最小二乘算法。

### 3.2 电机参数辨识结果

图 5~6 分别为用遗忘因子多新息最小一乘算法当新息长度  $p=8$  时, 电阻和电感的辨识结果, 并与递推最小二乘算法收敛效果作比较。

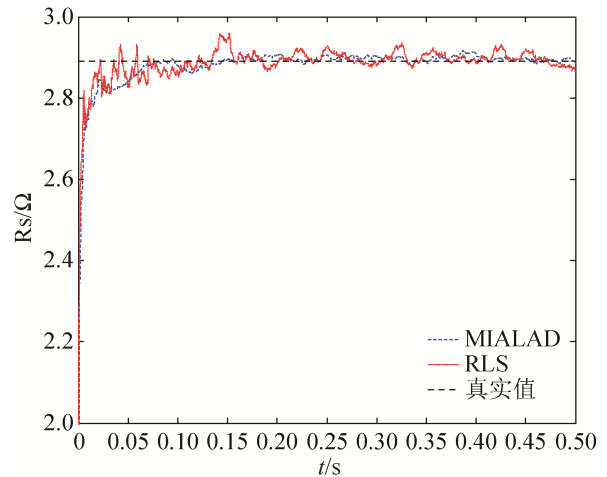


图5 电阻辨识结果  
Fig. 5 Identification result of  $R_s$

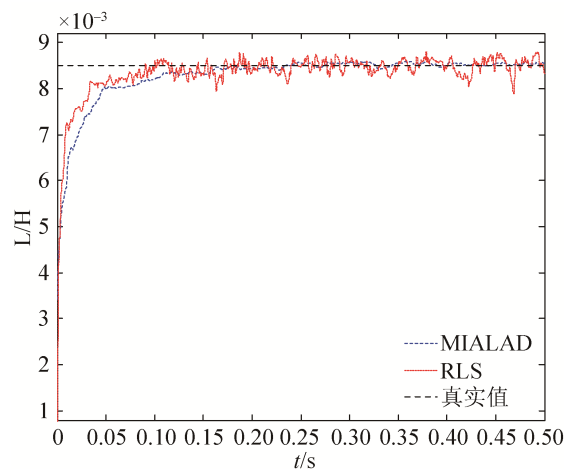


图6 电感辨识结果  
Fig. 6 Identification result of  $L$

从图 5~6 中可以看出,电阻与电感的收敛曲线在仿真初期递推最小二乘算法的收敛速度快于多新息近似最小一乘算法,当算法逐渐收敛后,递推最小二乘算法波动比较大,多新息近似递推最小二乘则比较平稳,收敛精度较高。

## 4 结论

本文介绍了基于多新息近似最小一乘算法的永磁同步电机参数辨识。将永磁同步电机数学模型转换为自回归模型,通过采集定子电流、电压和电机转速等数据,利用多新息近似最小一乘算法,精确辨识出定子电阻和定子电感。并且当所采集的数据经过滤后仍然有尖峰噪声存在的情况下,电阻电感辨识结果相对于其他传统算法精确度较高。综合以上结论,多新息近似最小一乘算法能够通过梯度法进行求解,并且得到的参数辨识结果相比传统算法有较大优势,在精度上基本可以和递推最小二乘算法相媲美。

## 参考文献:

- [1] 殷战稳, 司纪凯. 永磁直线同步电机应用现状综述[J]. 微电机, 2012, 45(1): 76-80.  
Yin Zhanwen, Si Jikai. Application Status Reviews of PLLSM[J]. Micro Motors, 2012, 45(1): 76-80.
- [2] 柏建勇, 滕青芳, 杜永栋, 等. 永磁同步电机控制策略比较研究[J]. 控制工程, 2015, 22(3): 490-494.  
BAI Jian-yong, TENG Qing-fang, DU Yong-dong, et al. Comparison of Control Strategies for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Control Engineering of China, 2015, 22(3): 490-494.
- [3] 孔小兵, 刘向杰. 永磁同步电机高效非线性模型预测控制[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1958-1966.  
Kong Xiaobing, Liu Xiangjie. Efficient Nonlinear Model Predictive Control for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(9): 1958-1966.
- [4] Rongmin C, Huixing Z, Zhongsheng H, et al. Low-speed Performance Research for Permanent Magnet Synchronous Linear Motor Based on Nonparametric Model-learning Adaptive Control[C]. Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on. IEEE, 2011: 1-5.
- [5] 邱鑫, 黄文新, 杨建飞, 等. 一种基于转矩角的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 56-62.  
Qiu Xin, Huang Wenxin, Yang Jianfei, et al. A Direct Torque Control Strategy Based on Torque Angle for Permanent Synchronous Motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 56-62.
- [6] 曹杨. 永磁同步电机参数辨识研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.  
Cao Yang. Research on Parameter Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.
- [7] 汤斯. 永磁同步电机参数辨识的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.  
Tan Si. The Research on Parameter Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.
- [8] Wu R. Least absolute deviation estimation for general fractionally integrated autoregressive moving average time series models[J]. Statistics & Probability Letters (S0167-7152), 2014, 94: 98-112.
- [9] Xu B C, Zhang Y D. New identification method for Hammerstein models based on approximate least absolute deviation[J]. International Journal of Systems Science (S0020-7721), 2016, 47(9): 2201-2213.
- [10] Yousefi I, Ghanbari M. Parameter Estimation of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Orthogonal Projection and Recursive Least Squares Combinatorial Algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering (S1024-123X), 2015, 2015(1): 1-7.
- [11] Xu Y, Lei Y, Sha D. Backstepping direct torque control of permanent magnet synchronous motor with RLS parameter identification[C]. Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on. IEEE, 2015: 573-578.
- [12] 赵海森, 杜中兰, 刘晓芳, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5386-5394.  
ZHAO Haisen, DU Zhonglan, LIU Xiaofang, et al. An On-line Identification Method for Rotor Resistance of Squirrel Cage Induction Motors Based on Recursive Least Square Method and Model Reference Adaptive System[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5386-5394.
- [13] 王庆龙, 张兴, 张崇巍. 永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J]. 中国电机工程学报



- 报, 2014, 34(6): 897-902.
- Wang Qinglong, Zhang Xing, Zhang Chongwei. Double Sliding-mode Model Reference Adaptive System Speed Identification for Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Proceedings of the SCEE, 2014, 34(6): 897-902.
- [14] 刘英玉, 申东日, 陈义俊, 等. 基于前向神经网络的多新息随机梯度辨识算法[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2006, 22(2): 83-86.
- LIU Yingyu, SHEN Dongri, CHEN Yijun, et al. Multi-innovation stochastic gradient identification algorithm based on feedforward neural networks[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2006, 22(2): 83-86.
- [15] 李洪宇, 王群京, 李国丽, 等. 基于扩展卡尔曼滤波器的电机参数辨识算法[J]. 电气工程学报, 2015, 10(5): 34-42.
- Li Hongyu, Wang Qunjing, Li Guoli, et al. Electromagnetic Parameter Identification Algorithm of AC Motor Based on Extended Kalman Filter[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(5): 34-42.
- [16] Ding F, Chen H, Li M. Multi-innovation Least Squares Identification Methods Based on The Auxiliary Model for MISO Systems[J]. Applied Mathematics and Computation (S0096-3003), 2007, 187(2): 658-668.
- [17] 徐宝昌, 张瀛丹. 基于近似最小一乘准则的多新息辨识算法[J]. 控制工程, 2015, 22(1): 60-65.
- XU Baochang, ZHANG Yingdan. Multi-innovation identification algorithm based on approximate least absolute deviation [J]. Control Engineering of China, 2015, 22(1): 60-65.
- [18] 王成波, 朱焜秋, 吉裕晖. 基于 SVPWM 的无轴承永磁同步电机转子磁场定向控制系统研究[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(2): 48-52.
- Wang Chengbo, Zhu Huangqiu, Ji Yuhui. Study on rotor field oriented control system of bearingless PMSM based on SVPWM [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 29(2):48-52
- [19] Hemalatha G, Chinnaiyan V K. Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Using SVPWM Technique[C]. Green Computing Communication and Electrical Engineering (CGCCEE), 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 1-5.

(上接第 1000 页)

- [8] Bekit B W, Whidborne J F, Seneviratne L D. Fuzzy sliding mode control for a robot manipulator[C]// IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 1997. Cira'97. Proceedings. IEEE, 2008: 320-325.
- [9] Yuzheng Guo, Peng-Yung Woo. An Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Robotic Manipulators [J]. IEEE transaction on systems, man and cybernetics (S2168-2216), 2003, 33(2): 149-159.
- [10] 陈志勇, 郭益深, 陈力. 柔性关节双臂空间机器人的滑模神经网络控制[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(12): 2950-2956.
- Chen Zhiyong, Guo Yishen, Chen Li. Sliding-mode Neural Network Control of Flexible-joint Dual-arm Space Robot [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(12): 2950-2956.
- [11] Chen J S, Liu C S, Wang Y W. Control of robot manipulator using a fuzzy model-based sliding mode control scheme[C]//Proc. 33rd IEEE Int. Conf. Decision Control, IEEE, 1994: 3506-3511.
- [12] Seong I Han, Jang M Lee. Precise Positioning of Nonsmooth Dynamic Systems Using Fuzzy Wavelet Echo State Networks and Dynamic Surface Sliding Mode Control[J]. IEEE Transaction on industrial electronics(S0278-0046), 2013, 60(11): 5124-5236.
- [13] Amer F, Sallam E A, Elawady W M. Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory fuzzy control for 3 DOF planar robot manipulators [J]. Appl. Soft Computer(S1568-4946), 2011, 11(8): 4943-4953.
- [14] Himada N, Ohishi K, Kumagai S, et al. Smooth touch and force control to unknown environment without force sensor for industrial robot [C]//The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, IEEE, 2010: 21-24.
- [15] 龙亿, 杜志江, 王伟东. 基于人体运动意图卡尔曼预测的外骨骼机器人控制及实验[J]. 机器人, 2015, 37(3): 304-309.
- Long Yi, Du Zhijiang, Wang Weidong. Control and Experiment for Exoskeleton Robot Based on Kalman Prediction of Human Motion Intent [J]. Robot, 2015, 37(3): 304-309.