

1-8-2019

## Permanent Magnet Synchronous Motor Fuzzy Forgetting Factor Recursive Least Squares Parameter Identification

Yanxia Shen

*Jiangnan University Internet of Things Engineering College Institute of Electrical Automation, Wuxi 214122, China;*

Baolong Jin

*Jiangnan University Internet of Things Engineering College Institute of Electrical Automation, 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.

---

# Permanent Magnet Synchronous Motor Fuzzy Forgetting Factor Recursive Least Squares Parameter Identification

## Abstract

**Abstract:** In order to improve the stability and convergence rate of permanent magnet synchronous motor (PMSM) on-line identification, this paper proposes a fuzzy forgetting factor least squares algorithm based on the least squares algorithm with forgetting factor. *The linear regression model of permanent magnet synchronous motor is established by using the linearization technique of Pade approximation method. A fuzzy controller is designed by using the current error and the forgetting factor can be adjusted adaptively. The proposed method is applied to the field of on-line identification of permanent magnet synchronous motor stator resistance, which solves the contradiction between the result stability and the convergence rate of the forgetting factor least squares algorithm.* Finally, the simulation results show the effectiveness of the proposed method.

## Keywords

forgetting factor, RLS, fuzzy control, parameter identification, PMSM

## Recommended Citation

Shen Yanxia, Jin Baolong. Permanent Magnet Synchronous Motor Fuzzy Forgetting Factor Recursive Least Squares Parameter Identification[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3404-3410.

## 永磁同步电机模糊遗忘因子最小二乘法参数辨识

沈艳霞, 靳保龙

(江南大学物联网工程学院电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 电机节能控制中损耗模型法要求电机参数尽可能稳定准确, 为提高永磁同步电机参数在线辨识的稳定性及收敛速度, 基于带遗忘因子的最小二乘算法, 提出一种模糊遗忘因子最小二乘算法。首先利用帕德逼近法线性化技术建立永磁同步电机线性回归数学模型, 根据电流误差设计模糊控制器, 进行遗忘因子的自适应调整, 并将其应用于永磁同步电机定子电阻的在线辨识中, 较好地解决了遗忘因子最小二乘算法中结果稳定性和收敛速度相互矛盾的问题, 最后仿真验证了该方法的有效性。

**关键词:** 遗忘因子; 最小二乘; 模糊控制; 参数辨识; 永磁同步电机

中图分类号: N945.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 09-3404-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809022

## Permanent Magnet Synchronous Motor Fuzzy Forgetting Factor Recursive Least Squares Parameter Identification

Shen Yanxia, Jin Baolong

(Jiangnan University Internet of Things Engineering College Institute of Electrical Automation, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** In order to improve the stability and convergence rate of permanent magnet synchronous motor (PMSM) on-line identification, this paper proposes a fuzzy forgetting factor least squares algorithm based on the least squares algorithm with forgetting factor. *The linear regression model of permanent magnet synchronous motor is established by using the linearization technique of Pade approximation method. A fuzzy controller is designed by using the current error and the forgetting factor can be adjusted adaptively. The proposed method is applied to the field of on-line identification of permanent magnet synchronous motor stator resistance, which solves the contradiction between the result stability and the convergence rate of the forgetting factor least squares algorithm.* Finally, the simulation results show the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** forgetting factor; RLS; fuzzy control; parameter identification; PMSM

## 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motors, PMSMs)具有结构简单、运行可靠、较高的功率转矩密度等优点, 在混合动力汽车、数控机

床、风力发电等领域得到越来越广泛的应用。电机最优电流控制、电机故障诊断等都需要电机参数为参照, 获得准确的电机参数对电机在线故障诊断及高性能控制非常重要。为了得到准确的电机参数值, 国内外学者提出了很多辨识算法<sup>[1-2]</sup>, 包括卡尔曼滤波算法、最小二乘算法、智能算法等<sup>[2]</sup>。

最小二乘算法凭借其原理简单、计算量小、结果准确广泛用于电机参数在线辨识<sup>[3]</sup>。电机运行时温度、负载的变化以及磁场饱和效应会导致电机参



收稿日期: 2016-11-03 修回日期: 2017-01-06;  
基金项目: 国家自然科学基金(61573167, 61572237),  
江苏省自然科学基金(BK20141114);  
作者简介: 沈艳霞(1967-), 女, 江苏无锡, 博士, 教授, 博导, 研究方向为运动控制系统; 靳保龙(1990-), 男, 山东曲阜, 硕士, 研究方向为电机参数辨识。

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

• 3404 •

数剧烈的变化,因此能够及时在线跟踪参数变化非常必要<sup>[4]</sup>。普通最小二乘法收敛速度慢,不能及时跟踪参数变化。有学者提出带遗忘因子最小二乘法<sup>[5]</sup>,遗忘因子可以提高结果收敛速度及时跟踪参数变化。遗忘因子的引入提高了最小二乘算法的收敛速度,但是辨识结果标准差、误差等都随之变大导致结果的不稳定。带遗忘因子最小二乘辨识算法中遗忘因子设置过小会导致结果出现比较大的波动,不利于控制系统的稳定性;遗忘因子过大会导致算法收敛速度过慢,辨识结果不能及时跟随真实值变化,从而影响控制性能。目前遗忘因子的选取更多的是依照经验。通常做法是取若干个经典参数,经过试验对比来选择一个对稳定性及收敛速度适中的遗忘因子。

基于此,本文针对永磁同步电机参数辨识问题,提出一种模糊遗忘因子最小二乘算法。第一步通过帕德逼近法建立永磁同步电机线性回归数学模型。综合考虑提高辨识结果稳定性及算法收敛速度,根据辨识结果及永磁同步电机电压模型设计模糊控制器实现遗忘因子大小的自适应选择,解决了遗忘因子最小二乘算法中结果稳定性和收敛速度相互矛盾的问题。最后以永磁同步电机定子电阻阶跃、渐变两种变化的在线辨识为例,试验验证了算法的有效性。

## 1 永磁同步电机线性回归数学模型

永磁同步电机在 d-q 轴旋转坐标系下的电压方程为<sup>[6]</sup>

$$u_d = R_s i_d + L_{sd} \rho i_d - \omega_l L_{sq} i_q \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + L_{sq} \rho i_q + \omega_l L_{sd} i_d + \omega_l \psi_r \quad (2)$$

式中各量都是瞬时值,  $u_q$ 、 $u_d$ 、 $i_q$ 、 $i_d$  为定子绕组 d、q 轴电压以及电流;  $\omega_l$  为电角速度;  $L_{sd}$ 、 $L_{sq}$  为定子绕组 d、q 轴电感;  $R_s$  为定子相电阻;  $\psi_r$  永磁体产生的磁链;  $\rho$  表示微分算子即  $\rho = d/dt$ 。

采用帕德逼近法线性化电机在 d-q 轴转子坐标系下的电压方程得

$$i_d(k) = a_d i_d(k-1) + b_d w_r(k) i_q(k) + b_d w_r(k-1) i_q(k-1) + c_d [u_d(k) + u_d(k-1)] \quad (3)$$

$$i_q(k) = a_q i_q(k-1) + b_q [w_r(k) i_d(k) + w_r(k-1) i_d(k-1)] + c_q [u_q(k) + u_q(k-1)] + d_q [w_r(k) + w_r(k-1)] \quad (4)$$

式中:  $a_d = \frac{2L_{sd} - T_s R_s}{2L_{sd} + T_s R_s}$ ;  $b_d = \frac{L_{sq} T_s}{2L_{sd} + T_s R_s}$ ;  $c_d = \frac{T_s}{2L_{sd} + T_s R_s}$ ;  $a_q = \frac{2L_{sd} - T_s R_s}{2L_{sd} + T_s R_s}$ ;  $b_q = -\frac{L_{sd} T_s}{2L_{sd} + T_s R_s}$ ;  $c_q = \frac{T_s}{2L_{sd} + T_s R_s}$ ;  $d_q = -\frac{\psi_r T_s}{2L_{sd} + T_s R_s}$  等都是由  $R_s$ 、 $L_{sd}$ 、 $L_{sq}$ 、 $\psi_r$ 、 $T_s$  计算得到。

一般地,永磁同步电机矢量控制采用  $i_d=0$  的控制策略,并且选择 q 轴电压方程对电机参数进行辨识。因此把电机 q 轴电压线性方程转化为线性回归模型<sup>[7]</sup>

$$y(t) = \varphi^T(t) \theta + v(t) \quad (5)$$

$$y(t) = i_q(k) \quad (6)$$

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} i_d(k-1) \\ w_r(k) i_q(k) + w_r(k-1) i_q(k-1) \\ u_d(k) + u_d(k-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} a_d \\ b_d \\ c_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

则电机参数可由上述向量  $\theta$  中  $a_d$ 、 $b_d$ 、 $c_d$  间接计算得到

$$R_s = \frac{1-a_d}{2c_d}, L_{sd} = \frac{b_d}{2c_d}, L_{sq} = \frac{1+a_d}{4c_d} T_s \quad (9)$$

## 2 永磁同步电机参数辨识算法

电机内部温度、定子电流、转子负载发生剧烈变化会导致电机参数出现较大改变,为实现精确控制,需要对电机的参数进行精确在线辨识。一般地,电机参数在线辨识的实时性受到辨识算法收敛速度的影响较大,因此可选择收敛速度较快的带遗忘因子最小二乘辨识算法。

## 2.1 带遗忘因子的最小二乘参数辨识算法

考虑线性回归模型式<sup>[8]</sup>

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + v(t) \quad (10)$$

其中  $\theta$  为参数向量、 $\varphi^T(t)$  为信息矩阵、 $v(t)$  为噪声向量、 $y(t)$  为系统输出向量。

构建目标函数<sup>[8]</sup>:

$$J(\theta) = (y(t) - \varphi^T(t)\theta)^2 \quad (11)$$

当  $\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} = 0$  时求得最小二乘算法为<sup>[8]</sup>

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + L(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \quad (12)$$

$$L(t) = P(t-1)\varphi(t)[1 + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)] \quad (13)$$

$$P(t) = P(t-1)[I - L(t)\varphi^T(t)], P(0) = p_0I \quad (14)$$

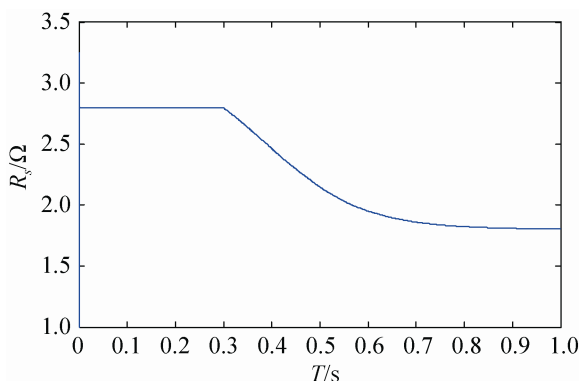
由于最小二乘算法的结果收敛速度非常慢,文献[2]根据数据加权的概念引入遗忘因子,得到带遗忘因子的最小二乘算法如下<sup>[9]</sup>

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + L(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \quad (15)$$

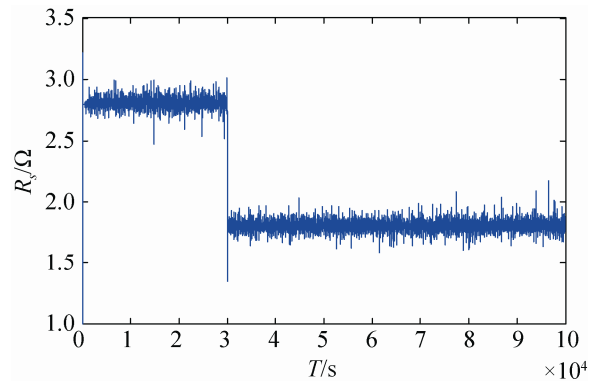
$$L(t) = P(t-1)\varphi(t)[\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)] \quad (16)$$

$$P(t) = \frac{1}{\lambda}P(t-1)[I - L(t)\varphi^T(t)], P(0) = p_0I \quad (17)$$

遗忘因子增加了新采集数据的权值,降低了旧数据对信息矩阵的影响。当遗忘因子  $\lambda$  取值为 1 的时候算法退化成普通最小二乘算法见图 1。带遗忘因子最小二乘算法收敛速度比普通最小二乘算法有明显提高。但是带遗忘因子最小二乘算法得到辨识结果波动变大、误差变大、稳定性降低<sup>[10-17]</sup>,如表 1 所示。



(a)  $\lambda=0.9999$



(b)  $\lambda=0.9$

图 1 参数辨识结果

Fig. 1 Parameter identification results

表 1 参数辨识结果

Tab. 1 Parameter identification results		
遗忘因子	平均方差	平均误差
1	6.2E-06	0.000 01
0.999	1.6E-04	0.000 1
0.99	2.3E-03	0.002 0
0.9	3.5E-02	0.006 1

## 2.2 基于模糊控制的遗忘因子选择策略

带遗忘因子最小二乘算法虽然提高了辨识结果的收敛速度,但是遗忘因子导致辨识结果稳定性下降。通常遗忘因子与辨识结果稳定性成正比,与辨识结果收敛速度成反比。本文利用模糊控制器自适应改变遗忘因子,可以在参数发生变化的时候调节遗忘因子变小使得算法快速收敛;当参数稳定不变时调节遗忘因子变大甚至设置遗忘因子为 1 极大的提高了算法稳定性,解决了定遗忘因子算法中稳定性及收敛速度的问题。基于此本文根据电机的电流和电压信号,设计模糊遗忘因子最小二乘算法,利用模糊控制自适应改变遗忘因子大小。

电机运行中电流受输入电压以及电机参数的影响,电机参数改变电流随即发生变化,受算法收敛速度影响参数估计值滞后于测量值。取模糊控制器的输入为误差信号  $E = i_q - \bar{i}_q$ , 其中  $i_q$  是通过电流传感器得到的电流测量值、 $\bar{i}_q$  ( $\bar{i}_q = \frac{R_s \bar{i}_d - u_d}{\omega_l L_{sq}}$ )

是通过电机 d-q 轴旋转坐标系下的电压方程(1)得

到的电流估计值。模糊控制器的输出  $u$  是遗忘因子大小, 遗忘因子直接受模糊控制器输出控制控制。

模糊控制器输入信号  $e$  (误差  $E$  的子集) 的论域为

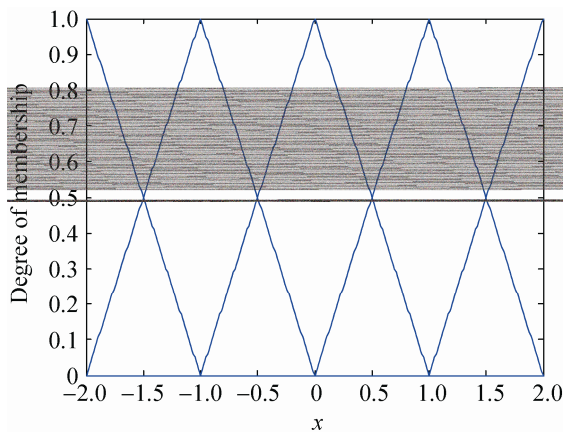
$$e = \{\text{负大, 负小, 零, 正小, 增大}\} = \{\text{NB, NS, ZO, PS, PB}\} \quad (18)$$

模糊控制器输出信号  $u$  的论域为

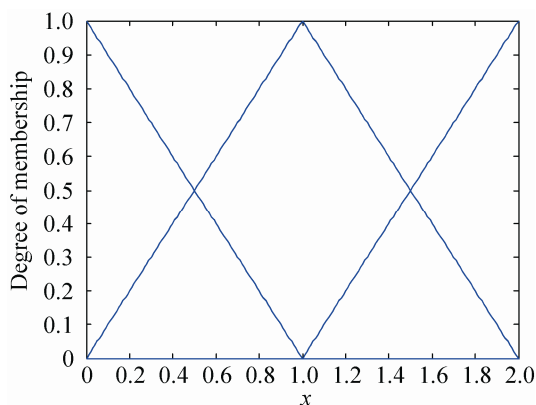
$$u = \{\text{正小, 正中, 正大}\} = \{\text{PS, PM, PB}\} \quad (19)$$

输入、输出隶属度函数选择三角形隶属度函数如图 2 所示。

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad (20)$$



(a) 输入  $e$  的隶属度函数图



(b) 输出  $u$  的隶属度函数图

图 2 隶属度函数图

Fig. 2 Membership functions

输入误差  $e$  与输出  $u$  的关系: 当输入  $e$  越大则  $u$  越小, 当输入  $e$  越小  $u$  越大, 可以建立模糊规则表。

遗忘因子  $\lambda$  取值范围为  $0 < \lambda < 1$ 。当输出  $u$  越大遗忘因子  $\lambda$  越大; 当输出  $u$  越小遗忘因子  $\lambda$  越小。反模糊化使用最大隶属度法, 即  $v_0 = \max \mu_v(v), v \in V$ 。

模糊遗忘因子最小二乘算法综合考虑遗忘因子对结果稳定性及收敛速度的影响, 算法根据电流估计值与真实值之间的误差改变遗忘因子大小, 能有效提高辨识结果的稳定性与收敛速度。

### 3 模糊遗忘因子最小二乘永磁同步电机参数辨识

在 MATLAB 中 Simulink 平台下搭建 PMSM 矢量控制系统见图 3。仿真采样时间为  $T_s=0.00001$  s, PWM 调制频率设为 10 kHz, 负载为 2 N\*m。实际中电机定子电阻变化较大, 因此仿真实验中以电阻参数阶跃、渐变两种情况为例验证辨识算法有效性。永磁同步电机模型的参数如表 2 所示。

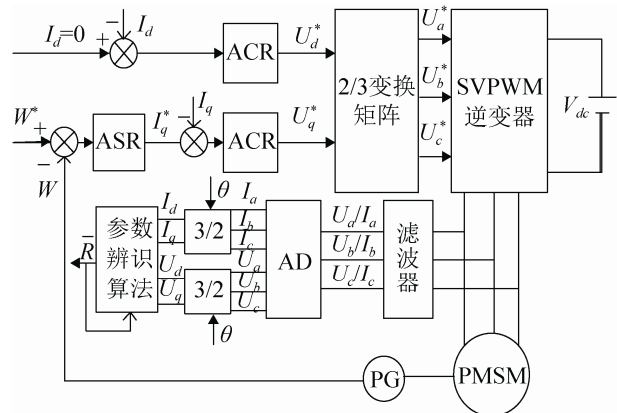


图 3 永磁同步电机参数在线辨识仿真原理图

Fig. 3 Simulation schematic diagram of PMSM parameter online identification

表 2 PMSM 电机仿真参数

Tab. 2 PMSM motor simulation parameters

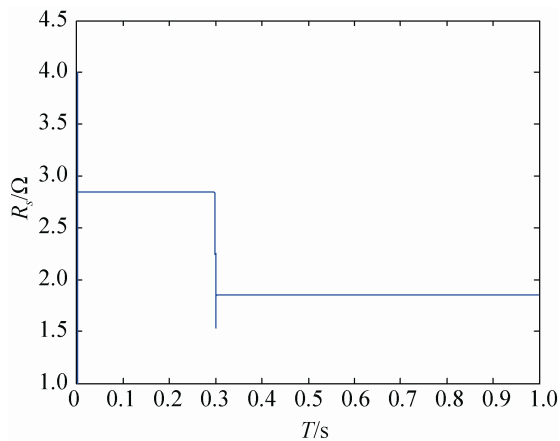
参数	取值
定子电阻 $R_s/\Omega$	1.85
q 轴电感/H	0.002
d 轴电感/H	0.00285
永磁体磁链/Wb	0.175
转动惯量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	$0.8\text{e}-3$
极对数/P	2

### 3.1 PMSM 电机电阻阶跃

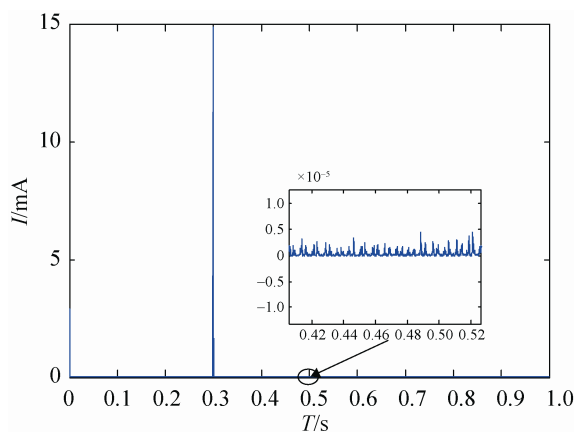
电机定子绕组发生短路故障导致定子电阻突然减小, 模拟绕组短路故障电阻突然降低随之参数重新稳定的情况, 假定电感值恒定不变。实验旨在验证, 模糊遗忘因子最小二乘算法在电机定子电阻跃变时辨识结果。电机参数变化如式(21)。

$$R_s(t) = \begin{cases} 2.85 & t < 0.3s \\ 1.85 & 0.3s < t \end{cases} \quad (21)$$

图4(a)和图5(a)中电机电阻参数在0.3s改变, 变化后两种辨识算法都能够及时收敛到电机参数的真实值, 收敛速度差别不大。



(a) 模糊遗忘因子最小二乘算法辨识结果



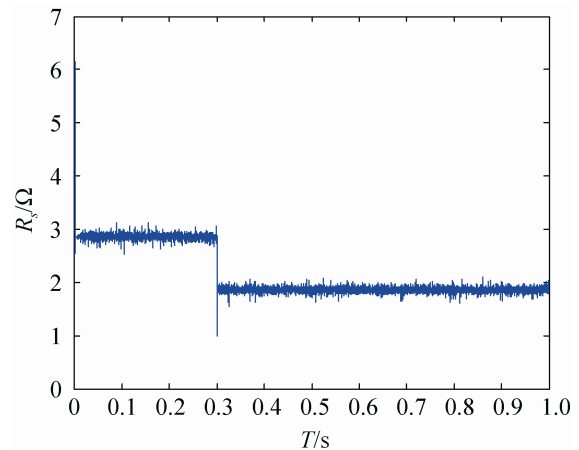
(b) 误差信号 E

图4 模糊遗忘因子辨识结果及误差信号

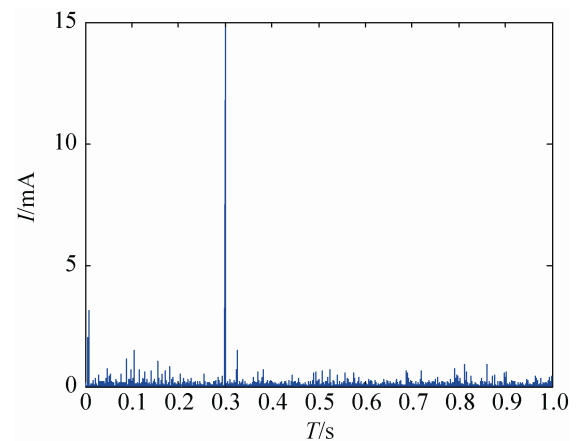
Fig. 4 Fuzzy forgetting factor identification result and error signal

参考表3中的平均方差及平均误差可知模糊遗忘因子最小二乘算法比遗忘因子最小二乘算法

的结果更加稳定、误差更小、图中曲线更平滑, 但算法收敛速度无太大差别。图4(b)和图5(b)为输入误差信号E表明模糊遗忘因子最小二乘算法(图3b)的误差更小辨识结果更平滑。



(a) 遗忘因子最小二乘算法辨识结果



(b) 误差信号 E

图5 遗忘因子  $\lambda=0.9$  辨识结果及误差信号

Fig. 5 Identification results with forgetting factor  $\lambda=0.9$  and error signal

表3 PMSM 电阻辨识结果

Tab. 3 PMSM resistance identification results

方法	平均误差	平均方差
遗忘因子 $\lambda=0.9$	0.006 4	1.5E-03
模糊遗忘因子	0.000 4	3.351E-05

### 3.2 PMSM 电机电阻渐变

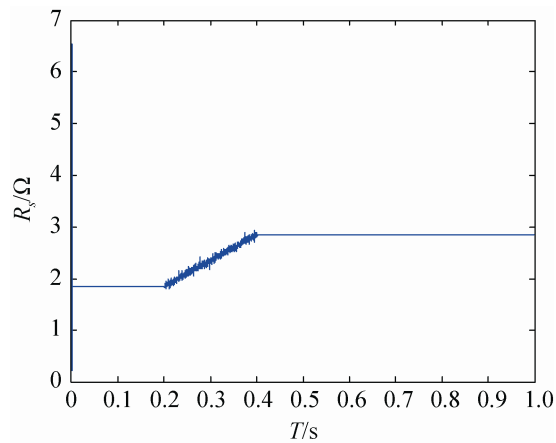
从静止到启动, 从空载到负载电机内部温度改变是连续的。模拟绕组受电机内部温度变化影响电阻数值发生连续变化并最终稳定的情况, 假定电感



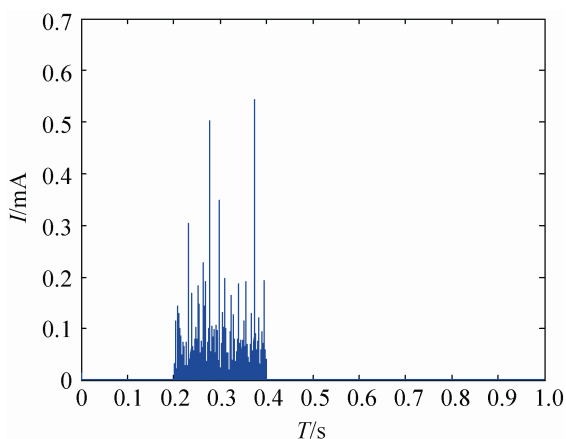
值恒定。实验旨在验证模糊遗忘因子最小二乘算法在电机电阻渐变时辨识结果。电机参数变化如式

$$R_s(t) = \begin{cases} 1.85 & 0 < t < 0.2s \\ 1.85 + 5(t - 0.2) & 0.2s < t < 0.4s \\ 2.85 & 0.4s < t \end{cases} \quad (22)$$

图6(a)和7(a)中可以看到电阻辨识结果在0.2s时开始增大直至0.4s,与实验电机定子电阻设定相吻合,两种算法在电阻渐变时收敛速度相近。但是图6(a)和7(a)辨识结果的整个曲线及表4中的数据可以看出两种辨识算法的区别,模糊遗忘因子最小二乘算法(图6(a))要比遗忘因子最小二乘算法(图7(a))的曲线波动小得多,尤其是在电阻参数平稳阶段优势非常明显。



(a) 模糊遗忘因子最小二乘算法辨识结果

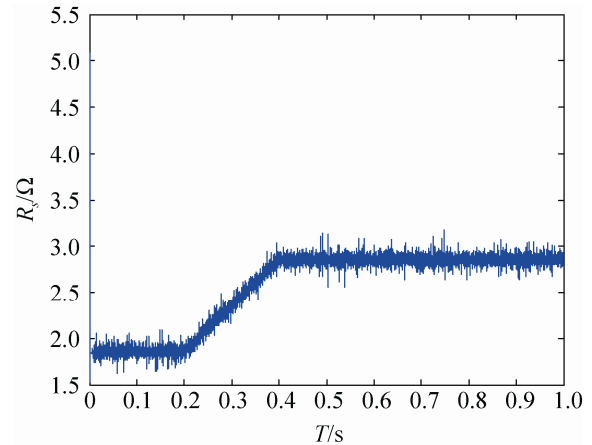


(b) 误差信号 E

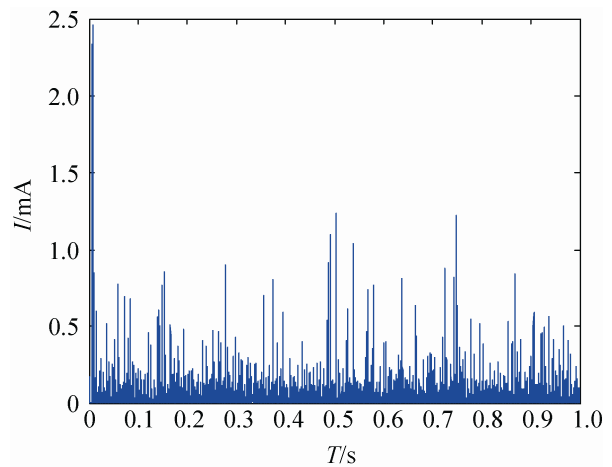
图6 模糊遗忘因子辨识结果及误差信号

Fig. 6 Fuzzy forgetting factor identification result and error signal

图6(b)和7(b)中输入误差E的曲线可以看出,在电阻变化的时候模糊遗忘因子最小二乘算法的误差才有所增加,但是小于遗忘因子最小二乘算法误差信号(图7(b))。在参数渐变的情况下,模糊遗忘因子最小二乘算法相较于遗忘因子最小二乘辨识结果更加平滑稳定可靠。结果的稳定更加有利于系统控制的稳定。



(a) 遗忘因子最小二乘算法辨识结果



(b) 误差信号 E

图7 遗忘因子λ=0.9辨识结果及误差信号

Fig. 7 Identification results with forgetting factor λ=0.9 and error signal

表4 PMSM电阻辨识结果

Tab. 4 PMSM resistance identification results

方法	平均误差	平均方差
遗忘因子λ=0.9	0.006 7	1.7E-03
模糊遗忘因子	0.001 3	6.3572E-04



以上两种情况下,模糊遗忘因子最小二乘辨识算法对比遗忘因子最小二乘算法,辨识结果表现出相同的收敛速度、更高的稳定性。

## 4 结论

本文针对永磁同步电机遗忘因子最小二乘算法参数在线辨识中存在问题,提出一种模糊遗忘因子最小二乘算法。根据辨识结果和电机电压模型设计模糊控制器输入信号,实现了模糊控制器对遗忘因子的选择。模糊遗忘因子最小二乘算法不同于带遗忘因子最小二乘辨识算法,实现了参数稳定时选择较大的遗忘因子以提高结果稳定性,参数变化时选择较小的遗忘因子以提高结果收敛速度。论文以永磁同步电机定子电阻阶跃、渐变两种状况下的辨识结果为例,试验验证了算法的有效性。改进后的算法辨识结果更加稳定可靠、误差小、收敛迅速,达到了实验的预期。

## 参考文献:

- [1] 李红梅, 陈涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 638-647.  
Li Hongmei, Chen Tao. Review of Research on Parameter Identification of PMSM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(5): 638-647.
- [2] 曹杨. 永磁同步电机参数辨识研究[D]. 威海: 山东大学, 2014.  
Cao yang. Research on Parameter Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor[D]. Weihai: Shandong University, 2014.
- [3] 杨立永, 张云龙, 陈智刚, 等. 基于参数辨识的 PMSM 电流环在线自适应控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 86-91.  
Yang Liyong, Zhang Yunlong, Chen Zhigang, et al. On-line Adaptive Control of PMSM Current-Loop Based on Parameter Identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 86-91.
- [4] Xu W, Yan X, Yan L, et al. Speed-Sensorless Direct Torque Control System of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of Northeastern University (S1008-3758), 2012, 33(5): 618-621.
- [5] Lin F J. Robust Speed-controlled Induction-motor Drive Using EKF and RLS Estimators[J]. IEE Proceedings - Electric Power Applications (S1350-2352), 1996, 143(3): 186-192.
- [6] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.  
Chen Boshi. Electric Drag Automatic Control System [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [7] He Y, Feng Y, Wang Y. Estimating the Electrical Parameters of Induction Motors at Standstill Using RLS Method[C]// International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, Anhui, China: PEDG, 2010: 358-363.
- [8] 丁锋. 系统辨识(6): 多新息辨识理论与方法[J]. 南京信息工程大学学报: (自然科学版), 2012, 4(1): 1-28.  
Ding Feng. System identification. Part F: Multi-innovation Identification Theory and Methods[J]. Nanjing: Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: (Natural Science Edition), 2012, 4(1): 1-28.
- [9] Zhang H, Gong S J, Dong Z. On-line Parameter Identification of Induction Motor Based on RLS Algorithm[C]// International Conference on Electrical Machines and Systems. Busan, South Korea: ICEMS, 2013: 2132-2137.
- [10] 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.  
Yang Zongjun, Wang Lina. Online Multi-Parameter Identification for Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 111-118.
- [11] 黄邵刚, 洪剑峰, 赵鲁. 一种基于变频器驱动的异步电机参数辨识方法[J]. 电力电子技术, 2015, 49(1): 50-53.  
Huang Shaogang, Hong Jianfeng, Zhao Lu. A Parameter Identification Method for Induction Motor Driven by Inverter[J]. Power Electronics, 2015, 49(1): 50-53.
- [12] Yang L, Peng X, Li Z. Induction Motor Electrical Parameters Identification using RLS Estimation[C]// International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Wuhan, China: MACE, 2010. 3294-3297.
- [13] Nahid-Mobarakeh B, Meibody-Tabar F, Sargos F M. Mechanical Sensorless Control of PMSM with Online Estimation of Stator Resistance[J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S0093-9994), 2004, 40(2): 457-471.

(下转第 3419 页)