嵌入式永磁同步电机自适应在线参数辨识

陈振锋， 钟彦儒， 李洁
(西安理工大学 自动化与信息工程学院,陕西 西安 710048)

摘 要: 针对嵌入式永磁同步电机参数辨识问题,提出一种自适应在线参数辨识方法,可在同一模型中对定子电阻、d轴电感、q轴电感和永磁体磁链进行辨识。该方法基于模型参考自适应系统,在同步旋转 d-q坐标系下,构造出 q轴电流自适应观测器,利用 q轴电流观测误差,借助 Lyapunov超稳定理论建立参数的辨识模型并推导出待辨识参数的自适应律,保证了特定条件下系统的稳定性和辨识参数的收敛性,解决了参数在线辨识算法的鲁棒性差、算法复杂等问题。仿真和实验结果表明,辨识参数能够在较短的时间内收敛到真实值附近,并且具有较小的误差。

关键词:永磁同步电机; 嵌入式永磁同步电机; 模型参考自适应系统; 在线参数辨识
中图分类号: TM 346 **文献标志码**: A **文章编号**: 1007- 449X(2010)04- 0009- 05

Online adaptive parameter identification for interior permanent magnet synchronous motor drive

CHEN Zhen-feng, ZHONG Yan-ru, LI Jie
(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: An adaptive on-line parameter identification method for interior permanent magnet synchronous motor (PMSM) is presented in the paper. The rotor resistance, d-axis inductance, q-axis inductance and permanent magnet flux are achieved at the same time in the presented model. Based on model reference adaptive system, an adaptive q-axis current estimator for interior permanent magnet synchronous motor is put forward in the rotor reference frame. And the q-axis current error is used to obtain the adaptive laws of parameters. Lyapunov's hyper-stability theory guarantees stability of the system and convergence of the identified parameters under certain conditions. This method also improves the robustness and makes the algorithm easy. The parameter identification algorithm has been verified by simulation and experimentation. The results show that the algorithm provides excellent accuracy and fast convergence.

Key words: permanent magnet synchronous motors; interior permanent magnet synchronous motors; model reference adaptive system; on-line parameter identification

0 引 言

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM)参数受温度、定子电流和磁通饱和等影响而变化很大,造成磁链观测不准确和 d、q轴电流无法彻底解耦,给控制系统带来很大难度,降低了系统运行的可靠性和动静态性能,为此人们提出了很多能在线实时辨识永磁同步电机参数的方法[1-7]。文献[1]采用扩展卡尔曼滤波对电机参数进行在线辨识,但 P、Q矩阵很难确定且与系统状态

收稿日期: 2009-07-12
作者简介: 陈振锋 (1973—),男,博士研究生,研究方向为现代交流传动系统与感应电机参数辨识;
钟彦儒 (1950—),男,教授,博士生导师,研究方向为新型电力电子装置与系统;
李 洁 (1976—),女,博士,副教授,研究方向为矩阵变换器、异步电机高性能控制、软开关电源。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

关系密切。文献[2]提出了永磁同步电机的递归参数辨识方法,在线追踪电机的定子电阻、交直轴电感和转子永磁体磁链,提高了扩展卡尔曼滤波器无位置控制系统的鲁棒性,但存在着模型复杂、收敛慢及误差大等缺点。文献[3]给出了基于解耦控制的在线参数辨识方法,但存在着计算复杂,适应性差等缺点。文献[4]给出了考虑铁损电阻时永磁同步电机电磁参数和机械参数的自适应辨识方法,定子电阻和交直轴电感的辨识模型建立在静态条件下,为保证模型收敛,施加在模型输入端的交直轴电压为相互正交的正弦量,限制了辨识方法的在线应用,并且转子磁链和定子电阻、交直轴电感分别建立在不同的辨识模型中,增加了系统的复杂性。文献[5-7]根据模型参考自适应理论提出了不同的模型参考自适应参数在线辨识方法,但都是针对面装式永磁同步电机的。

本文提出了一种嵌入式永磁同步电机自适应在线参数辨识方法,它可在同一模型中对定子电阻、d轴电感、q轴电感和永磁体磁链进行辨识。该方法基于模型参考自适应系统(model reference adaptive system, MRAS),在同步旋转的d-q坐标系下,构造出q轴电流自适应观测器,利用q轴电流观测误差,借助Lyapunov超稳定理论建立参数的辨识模型并推导出待辨识参数的自适应律,保证了特定条件下系统的稳定性和参数的收敛性。仿真和实验结果验证了该方法的有效性和实用性。

1 基于模型参考方法的电流自适应观测

1.1 基本原理

由于转速相对于其他状态(电流和磁链)变化缓慢,因而可以把转速作为常数处理,嵌入式永磁同步电机的模型可以用一个线性的二阶状态方程来描述。若已知嵌入式永磁同步电机的端电压(输入),并且电机的转速已知,则嵌入式永磁同步电机的电流(输出)可以根据状态方程由当前和历史时刻的输入输出值计算或观测出来。如果电机模型中使用的各项参数是准确的,在不考虑测量误差和模型误差的情况下,观测的输出电流应该准确等于电机的实际电流,其他状态(如磁链)也将准确等于电机的实际状态。但是电机的参数在电机运行的过程中会受到温度、磁路饱和程度及定子电流大小的影响而发生改变,这样导致观测的输出电流和真实的输出电流产生了误差。在电机运行的过程中,如果以永磁同步电机为参考模型、以观测模型为可调模型建立一个模型参考自适应系统,利用电流的观测误差来实时调整可调模型使用的电机参数,使电流误差逐渐收敛到零,其他状态的误差也将收敛到零,电机的参数也将准确收敛到其真实值[8-9]。自适应系统的结构如图1所示。

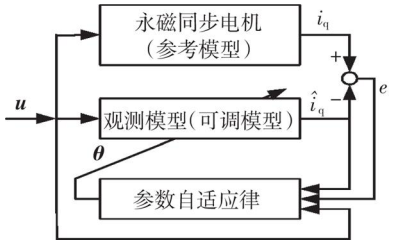


图1 模型参考自适应系统

Fig. 1 Model reference adaptive system

1.2 观测模型的设计及误差模型的建立

永磁同步电机在旋转坐标系下的定子电流数学模型[10-12]为

$$\left.\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}i_d}{\mathrm{d}t} &= -\frac{R_s}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}\omega_r i_q + \frac{u_d}{L_d},\\ \frac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} &= -\frac{R_s}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}\omega_r i_d + \frac{u_q - \omega_r\psi_f}{L_q}。\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中:i_d、i_q为定子电流在d、q轴上的分量;u_d、u_q为定子电压在d、q轴上的分量;R_s为定子一相绕组电阻;ω_r为电机的电角速度;ψ_f为永磁体在定子上耦合的磁链;L_d、L_q为电机d、q轴电感。

在转速已知的情况下,从电机的状态方程出发,永磁同步电机在时刻t的定子电流可以由t_0到t期间的实测电压、电流的历史值观测出来。可以选取d轴和q轴电流的观测误差中的任意一个,以此作为参数调整的依据,由于q轴电流方程中含有将要辨识的所有电机参数,因此选取q轴电流观测误差来调整参数。根据式(1)设计q轴电流观测模型为

$$\dot{\hat{i}}_q = \theta_1(t)i_q + \theta_2(t)\omega_r i_d + \theta_3(t)u_q + \theta_4(t)\omega_r - k(\hat{i}_q - i_q), \quad (2)$$

式中k为正常数。引入误差负反馈是为了使观测模型具有负的特征根,这样就保证了初始误差(静态误差)的收敛。k值的大小决定了初始误差的收敛速度,k越大,初始误差收敛越快。但过大的k值也会掩盖由于参数不准确而造成的观测误差,从而引起辨识参数的收敛变得缓慢,甚至不收敛[8]。为此需要选择合适的k值,以保证参数辨识的速度和精确度。因为参数的辨识值在自适应的过程中是不断被调整的,所以应看成是时间t的函数,即有

$$\theta^T(t) = [\theta_1(t) \quad \theta_2(t) \quad \theta_3(t) \quad \theta_4(t)], \quad (3)$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中:$\theta_1(t) = -\frac{R_s}{L_q}$;$\theta_2(t) = -\frac{L_d}{L_q}$;$\theta_3(t) = \frac{1}{L_q}$;$\theta_4(t) = -\frac{\psi_f}{L_q}$。

若以 $\theta^T = [\theta_1^* \quad \theta_2^* \quad \theta_3^* \quad \theta_4^*]$ 表示各参数的真实值,定义参数误差

$$e_\theta = \begin{bmatrix} e_{\theta_1}(t) \\ e_{\theta_2}(t) \\ e_{\theta_3}(t) \\ e_{\theta_4}(t) \end{bmatrix} = \theta(t) - \theta^* = \begin{bmatrix} \theta_1(t) - \theta_1^* \\ \theta_2(t) - \theta_2^* \\ \theta_3(t) - \theta_3^* \\ \theta_4(t) - \theta_4^* \end{bmatrix}。 \tag{4}$$

如果参数没有误差,电流的观测值即等于真实值,即

$$\hat{i}_q(t)|_{\theta(t)=\theta^*} = i_q(t)。 \tag{5}$$

则有

$$\hat{i}_q = \theta_1^* i_q + \theta_2^* \omega_r i_d + \theta_3^* u_q + \theta_4^* \omega_r。 \tag{6}$$

定义输出误差为 $e_{i_q} = \hat{i}_q - i_q$,则有

$$\dot{e}_{i_q} = \dot{\hat{i}}_q - \dot{i}_q = -ke_{i_q} + e_{\theta_1} i_q + e_{\theta_2}\omega_r i_d + e_{\theta_3} u_q + e_{\theta_4}\omega_r。 \tag{7}$$

式(7)即为 q轴电流观测的误差模型。

1.3 参数自适应律的设计及收敛性证明

实际上,参数的自适应律取积分律可以保证误差的收敛[8],即可取

$$\left.\begin{aligned} \dot{\theta}_1(t) &= \dot{e}_{\theta_1}(t) = -g_1 e_{i_q} i_q, \\ \dot{\theta}_2(t) &= \dot{e}_{\theta_2}(t) = -g_2 e_{i_q}\omega_r i_d, \\ \dot{\theta}_3(t) &= \dot{e}_{\theta_3}(t) = -g_3 e_{i_q} u_q, \\ \dot{\theta}_4(t) &= \dot{e}_{\theta_4}(t) = -g_4 e_{i_q}\omega_r。 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式中 g_1、g_2、g_3、g_4 为自适应律的增益,是正的常数。

选取一个 Lyapunov函数为

$$V(e_{i_q}, e_\theta) = \frac{e_{i_q}^2(t)}{2} + \frac{e_{\theta_1}^2}{2g_1} + \frac{e_{\theta_2}^2}{2g_2} + \frac{e_{\theta_3}^2}{2g_3} + \frac{e_{\theta_4}^2}{2g_4}。 \tag{9}$$

对式(9)的 Lyapunov函数求导,并将式(8)的自适应律代入,有

$$\dot{V}(e_{i_q}, e_\theta) = e_{i_q}\dot{e}_{i_q} + \frac{e_{\theta_1}\dot{e}_{\theta_1}}{g_1} + \frac{e_{\theta_2}\dot{e}_{\theta_2}}{g_2} + \frac{e_{\theta_3}\dot{e}_{\theta_3}}{g_3} + \frac{e_{\theta_4}\dot{e}_{\theta_4}}{g_4} = -ke_{i_q}^2 \le 0。 \tag{10}$$

根据 Lyapunov的基本理论,平衡点 $e_{i_q}(t) = 0$ 是渐近稳定的,即误差是逐渐收敛到零的。又根据参数与误差的关系(自适应律),参数也会收敛到其真实值。当参数收敛到其真实值时,由式(3)可得

$$\left.\begin{aligned} R_s &= -\theta_1^* L_q, \\ L_d &= -\theta_2^* L_q, \\ L_q &= \frac{1}{\theta_3^*}, \\ \psi_f &= -\theta_4^* L_q。 \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

此时,电机各参数收敛到其真实值。

2 仿真和实验结果

永磁同步电机矢量控制系统框图如图 2所示。仿真时采用的永磁同步电机参数:额定功率 $P = 120$ kW,额定电压 $U = 380$ V,定子电阻 $R_s = 0.044\,\Omega$; d轴电感 $L_d = 4.4$ mH; q轴电感 $L_q = 15.4$ mH;永磁体磁链 $\psi_f = 1.592$ Wb;极对数 $p = 2$。

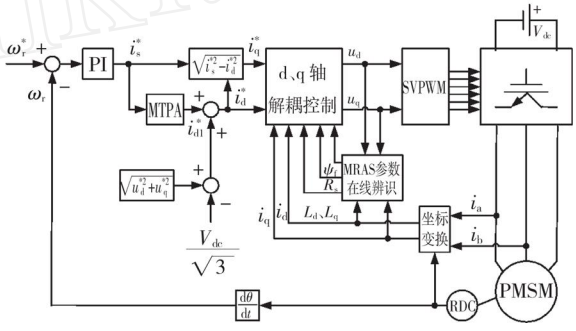


图 2　永磁同步电机矢量控制系统框图

Fig. 2　Control system configuration for vector control system of PMSM

由仿真参数计算各参数的匹配值(真值)为

$\theta_1^* = -2.857$, $\theta_2^* = -0.286$,

$\theta_3^* = 64.935$, $\theta_4^* = -103.376$。

参数自适应的初始值选取为

$\theta_1(0) = \theta_2(0) = \theta_4(0) = 0$, $\theta_3(0) = 500$。

为了避免在计算 L_q 时出现无解情况,$\theta_3(0)$不为零。

各参数的自适应律增益和反馈系数取为

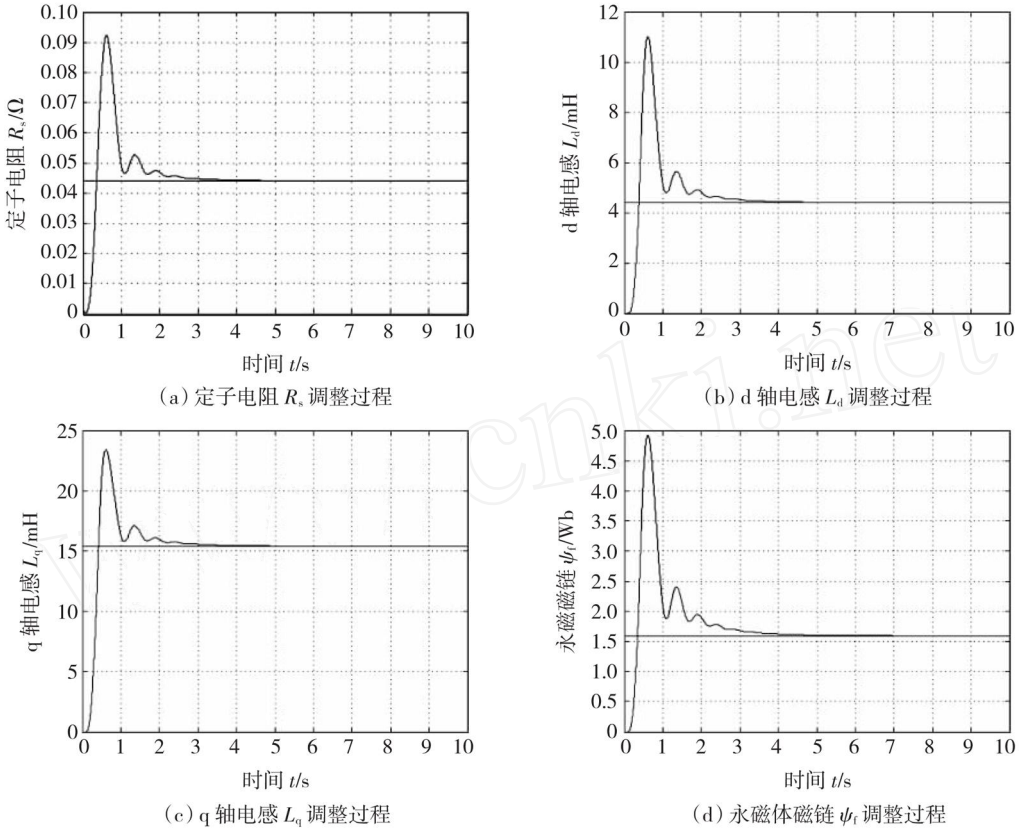
$g_1 = 120$, $g_2 = 280$, $g_3 = 350$, $g_4 = 70$, $k = 80$。

基于 Matlab/SIMULINK的仿真结果如图 3所示。图 3(a)、图 3(b)、图 3(c)、图 3(d)分别为永磁同步电机的定子电阻、d轴电感、q轴电感以及永磁体磁链等参数仿真时的自适应调整过程的收敛波形,直线是各参数的真实值。由仿真结果可知,各个参数逐渐收敛到其真实值。

实验装置主要由一台 120 kW 的嵌入式永磁同步电机和一台逆变器构成,永磁同步电机的参数与仿真时的电机参数相同,逆变器开关频率为 1 kHz。控制系统电流、电压采样频率为 1 kHz,电流检测模

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

拟通道采用二阶巴特沃思低通滤波器,截止频率为 2 kHz,电压检测通道采用四阶巴特沃思低通滤波器,截止频率为 250 Hz。在以 TMS320F2812为核心控制器的电机控制平台上实现了嵌入式永磁同步电机的矢量控制,并用自适应 q轴电流观测器和电机参数辨识方法编写了参数的自适应辨识软件模块。由于实验过程中很难制造出电机参数瞬间变化的条件,仅给出电机参数不变时的辨识波形。



(a) 定子电阻 R_s 调整过程 (b) d 轴电感 L_d 调整过程

(c) q 轴电感 L_q 调整过程 (d) 永磁体磁链 ψ_f 调整过程

图 3 仿真时各参数收敛过程

Fig 3 Convergence process of parameters for simulation

图 4~图 6为实验波形。图 4为电机启动时的电流响应曲线,其中显示了电机 A相电流、q轴电流以及 q轴观测电流;图 5为定子电阻和永磁体磁链自适应在线辨识曲线;图 6为直轴电感和交轴电感自适应在线辨识曲线。由图 4可以看出,q轴电流的观测值能够很好地跟踪 q轴电流的真实值。由图 5和图 6可以看出,每一个待辨识的参数都能够在较短的时间内收敛到其真实值附近,并且具有较小的误差。

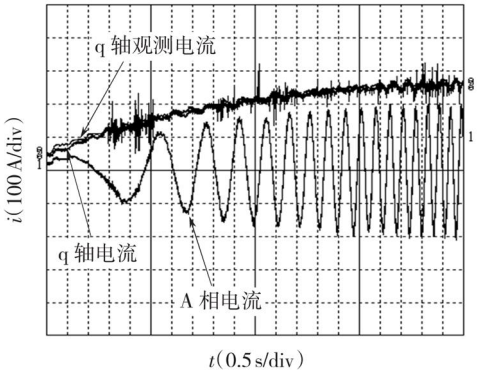


图 4 电流响应波形

Fig 4 Response waveform of current

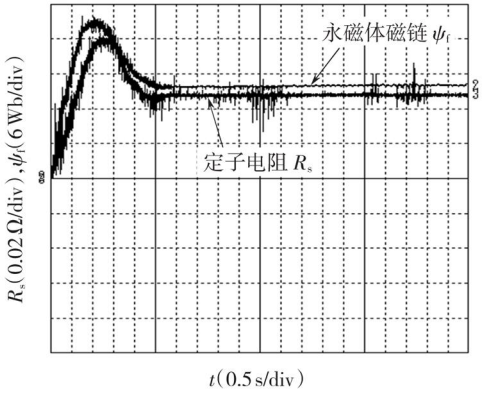


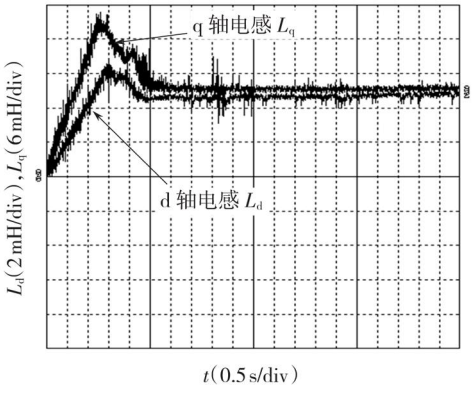
图 5 定子电阻和永磁体磁链在线自适应辨识

Fig 5 On-line identification of stator resistance and permanent magnet flux

图 6 d轴电感和 q轴电感在线自适应辨识

Fig 6 On-line identification of d-axis inductance and

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



q-axis inductance

3 结　语

由仿真结果和实验结果可以看出,基于模型参考自适应系统的 q轴电流自适应观测器几乎不需要电机的任何先验知识,可以快速自适应地、准确地观测定子的 q轴电流,从而方便地辨识出嵌入式永磁同步电机的定子电阻、d轴电感、q轴电感和永磁体磁链。所提出的算法鲁棒性强,算法简单,控制参数容易选择,非常适合实际控制系统。但值得一提的是,该方法需要首先获得永磁同步电机的转速,因而不适用于无速度传感器系统。

参 考 文 献:

[1] BOILEAU T, NAHID-MOBARAKEH B, MEIBODY-TABAR F. On-line identification of PMSM parameters: model-reference vs EKF[C]//*IEEE* 2008 *Industry Application Society Annual Meeting*, October 5 - 9, 2008, Edmonton, Canada. 2008: 1 - 8.

[2] BOLOGNANI S, ZIGLIOTTO M, UNTERKOFLER K. On-line parameter commissioning in sensorless PMSM drives[C]//*Proceedings of the* 1997 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, July 7 - 11, 1997, Guimaraes, Portugal. 1997, 2: 480 - 484.

[3] NAHID-MOBARAKEH B, MEIBODY-TABAR F, SARGOS F M. On-line Identification of PMSM electrical parameters based on decoupling control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, 3(3): 266 - 273.

[4] SENJYU T, KINJO K, URASAKI N, *et al*. Parameter measurement for PMSM using adaptive identification[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, 3(3): 711 - 716.

[5] LIU L, CARTES D A. Synchronisation based adaptive parameter identification for permanent magnet synchronous motors[J]. *IET Control Theory Application*, 2007, 1(4): 1015 - 1022.

[6] KIM K H, CHUNG S K, MOON G W, *et al*. Parameter estimation and control for permanent magnet synchronous motor drive using model reference adaptive technique[C]//*Proceedings of the* 1995 *IEEE IECON* 21*st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, November 6 - 10, 1995, Orlando, USA. 1995, 1: 387 - 392.

[7] 安群涛,孙力,赵克. 一种永磁同步电动机参数的自适应在线辨识方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 31 - 36.
AN Quntao, SUN Li, ZHAO Ke. An adaptive on-line identification method for the parameters of permanent magnet synchronous motors[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(6): 31 - 36.

[8] 金海,黄进. 基于模型参考方法的感应电机磁链的自适应观测及参数辨识[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 65 - 69.
JIN Hai, HUANG Jin. An adaptive on-line identification method for the parameters of permanent magnet synchronous motors[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(1): 65 - 69.

[9] 侯利民,张化光,刘秀翀,等. 永磁同步电机转子磁位自检测复合方法[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 498 - 503.
HOU Limin, ZHANG Huaguang, LIU Xiuchong, *et al*. Compound rotor position self-sensing method of PMSM[J]. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(5): 498 - 503.

[10] 王宏,于泳,徐殿国. 永磁同步电动机位置伺服系统[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 151 - 155.
WANG Hong, YU Yong, XU Dianguo. The position servo system of PMSM[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(7): 151 - 155.

[11] 刘家曦,李铁才,杨贵杰. 永磁同步电机转子位置与速度预估[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(5): 690 - 694.
LIU Jiaxi, LI Tiecai, YANG Guijie. Rotor position and speed estimation for PMSM[J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(5): 690 - 694.

[12] 曲智勇,姚郁,韩俊伟. 基于改进型平方根 UKF算法的永磁同步电机状态估计[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(3): 452 - 457.
QU Zhiyong, YAO Yu, HAN Junwei. State estimation of permanent magnet synchronous motor using modified square-root UKF algorithm[J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(3): 452 - 457.

(编辑:张诗阁)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net