

基于 MRAS 的异步电机无速度传感器应用研究

包广清, 祁武刚

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 针对异步电机基于转子磁链模型参考自适应(MRAS)速度观测器中的积分直流偏置和PI自适应率参数不能在线修正的问题,将转子磁链的电压模型进行改进,并提出一种自适应线性神经元(ADALINE)速度观测器。通过一阶惯性环节代替了电压模型中的纯积分环节,消除了积分直流偏置和误差积累,利用ADALINE算法对MRAS观测器中的自适应率进行改进,实现了在中高速情况下对电机转速的准确观测。仿真结果表明,改进后的MRAS速度观测器对速度的辨识度较高,动态性能良好,验证了该控制策略的正确性与可行性。

关键词: 异步电机; 速度观测器; 无速度传感器; 自适应线性神经元; 模型参考自适应系统

中图分类号: TM343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7018(2020)03-0043-05

Application Research of Speed Sensorless Asynchronous Motor Based on MRAS

BAO Guang-qing, QI Wu-gang

(College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the problem that the integral DC bias and PI adaptive rate parameters of speed observer based on rotor flux model reference adaptive (MRAS) can not be corrected online, the voltage model of rotor flux was improved and an adaptive linear neuron (ADALINE) speed observer was proposed. The first-order inertia link replaced the pure integral link in the voltage model, eliminating the DC bias and error accumulation. The ADALINE algorithm was used to improve the adaptive rate of MRAS observer and realize the accurate observation of motor speed at medium and high speed. The simulation results showed that the improved MRAS speed observer has high speed identification and good dynamic performance, which verifies the correctness and feasibility of the control strategy.

Key words: asynchronous motor, speed observer, speed sensorless, adaptive linear neuron (ADALINE), model reference adaptive system (MRAS)

0 引言

在自动化装配领域中,工业机械臂是最常见的形式。异步电机无速度传感器矢量控制技术由于成本低、可靠性高的特点,被广泛应用于机器人的关节驱动控制系统中。目前,已经有多种方法实现了对异步电机的速度辨识,如扩展Kalman^[1-2]、线性矩阵不等法^[3]、滑模观测器^[4]、全阶观测器^[5]和模型参考自适应法^[6]等。

模型参考自适应(以下简称MRAS)由于算法简单、稳态精度较高已被广泛应用于电机的控制,但仍存在一定的缺陷。

基于转子磁链模型的MRAS观测器,在低速时检测精度差,且存在积分误差和误差积累的问题^[7];文献[8]将无功功率与MRAS相结合,收敛速度较快,鲁棒性也有所提高,但未考虑电机参数变化时的转速辨识问题;文献[9]利用反电动势的MRAS

转速观测器,成功地避开了纯积分的问题,但是此方法在低速时估计值误差值较大;文献[10]将滑模控制策略作为MRAS结构中的自适应机制,但电压参考模型中依然存在纯积分的问题;文献[11]采用一种可以同时进行转速和定子电阻辨识的双参数的MRAS模型,此方法对电机的定子电阻辨识度较高,却增加了系统的复杂性;文献[13]提出以模糊逻辑作为MRAS结构中的PI自适应率,此方法改善了传统PI参数不能在线更新的问题,却忽略了电压参考模型中的积分问题。

本文在基于转子磁链模型的MRAS速度观测器的基础上,采用一阶惯性环节代替电压模型中的纯积分环节,以消除积分直流偏置的问题,同时设计了一种自适应线性(以下简称ADALINE)神经元PID控制器,ADALINE可以根据电机磁链、转速的变化情况对自身的参数进行在线权值修正,该控制器改善了传统的PI控制器不能根据电机的实际情况进行在线参数修正的问题,提高了速度观测的精度。仿真结果验证了该算法的可行性。

收稿日期: 2019-07-08

基金项目: 甘肃省教育厅科技成果转化项目(2017D-05)

包广清等 基于MRAS的异步电机无速度传感器应用研究

43

1 异步电机数学模型

三相异步电机在两相静止坐标系 $\alpha \beta$ 下的电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega\psi_{r\beta} \\ -\omega\psi_{r\alpha} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $u_{s\alpha} \mu_{s\beta}$ 为定子绕组电压在 $\alpha \beta$ 轴分量; $u_{r\alpha} \mu_{r\beta}$ 为转子绕组电压在 $\alpha \beta$ 轴分量; $i_{s\alpha} i_{s\beta}$ 为定子绕组电流在 $\alpha \beta$ 轴分量; $i_{r\alpha} i_{r\beta}$ 为转子绕组电流在 $\alpha \beta$ 轴分量; $\psi_{s\alpha} \psi_{s\beta}$ 为定子绕组磁链在 $\alpha \beta$ 轴分量; $\psi_{r\alpha} \mu_{r\beta}$ 为转子绕组磁链在 $\alpha \beta$ 轴分量; $R_s R_r$ 为定、转子单相绕组电阻; ω 为转子角速度。

磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $L_s L_r$ 为 $\alpha \beta$ 坐标系上定、转子绕组自感; L_m 为 $\alpha \beta$ 坐标系上同轴定、转子绕组间的互感。

转矩方程:

$$T_e = pL_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (3)$$

式中: T_e 为电磁转矩; p 为异步电动机的极对数。

运动方程:

$$T_e = T_L + \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中: J 为机组的转动惯量; T_L 为包括摩擦阻转矩的负载转矩。

2 无速度传感器的速度观测模型

2.1 MRAS 速度观测器的原理

转子磁链观测器有两种不同的模型: 电压模型和电流模型。

电压模型:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{r\alpha}^* &= \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt - \sigma L_s i_{s\alpha} \right] \\ \psi_{r\beta}^* &= \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt - \sigma L_s i_{s\beta} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: 漏感系数 $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$; $\psi_{r\alpha}^* \mu_{r\beta}^*$ 为电压模型输出转子的磁链。

电流模型:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\psi}_{r\alpha} &= \frac{1}{T_r p + 1} (L_m i_{s\alpha} - \omega T_r \psi_{r\beta}) \\ \hat{\psi}_{r\beta} &= \frac{1}{T_r p + 1} (L_m i_{s\beta} + \omega T_r \psi_{r\alpha}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: 转子电磁时间常数 $T_r = L_m / R_r$; p 为微分算子; $\hat{\psi}_{r\alpha} \hat{\psi}_{r\beta}$ 为电流模型输出的转子磁链。

由式(5)和式(6)可知 ω 是待辨识的参数。如图1所示的速度辨识系统中, 可调模型和参考模型分别为转子磁链的电流模型和电压模型。

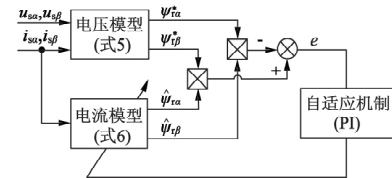


图1 MRAS 速度辨识框图

根据 Popov 超稳性定律, 该 MRAS 系统是渐进稳定的。在图1中取广义误差 e 作为 MRAS 自适应律的输入值, 定义广义误差 e :

$$e = \psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}^* - \psi_{r\beta} \psi_{r\alpha}^* \quad (7)$$

式中: $\psi_{r\alpha} \mu_{r\beta} \mu_{r\alpha}^* \mu_{r\beta}^*$ 为电流模型和电压模型输出的转子磁链。

以 PI 为 MRAS 自适应率, 计算电动机转速 ω_r :

$$\omega_r = (K_p + \frac{K_i}{s}) (\psi_{r\alpha} \psi_{r\beta}^* - \psi_{r\beta} \psi_{r\alpha}^*) \quad (8)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数。

2.2 改进的 MRAS 转速估算方法

由式(5)可知, 电压模型中含有纯积分环节, 容易产生误差积累和直流漂移, 从而影响系统的稳定性和系统的测量精度。改进的方法是用一阶惯性滤波 $\frac{T_c}{1+T_c p}$ 代替纯积分环节。

转子的反电动势:

$$e_r = \frac{L_r}{L_m} (u_s - R_s i_s - \delta L_s p i_s) \quad (9)$$

转子磁链估计的动态方程:

$$\begin{aligned} \hat{\psi} &= e_r \frac{T_c}{1+T_c} + \psi_r^* \frac{T_c}{1+T_c p} = \\ &= \psi_r \frac{T_c p}{1+T_c p} + \psi_r^* \frac{T_c}{1+T_c p} = \\ &= \psi_r + (\psi_r - \psi_r^*) \frac{1}{1+T_c p} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\psi_r^* = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sd}$ 。

对于转子的反电动势经过一阶惯性作用产生磁链的相位偏差, 采用转子磁链的滤波信号进行补偿, 该转子磁链由励磁电流计算而来。当 $\psi_r = \psi_r^*$ 时, 转子磁链实现了正确的观测, 同时也降低了电机参数

对模型的影响。改进后的电压模型如图 2 所示。

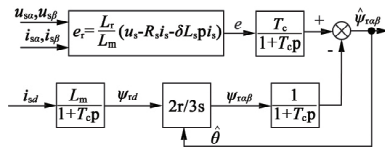


图 2 改进后的电压模型原理图

2.3 基于 ADALINE 的并联双模型速度辨识

传统的基于转子磁链的 MRAS 转速辨识方法中,PI 调节器不能根据电机磁链、转速的变化进行在线修正,因此其误差较大。本文将 ADALINE 作为 MRAS 的自适应机构,其权重参数在线修正,所以使得速度观测更加准确。

由式(7)采用 PI 调节器对磁链的广义误差进行处理,但 PI 参数的选取受制于异步电机的数学模型,事先选取适合的 PI 参数存在一定的困难。而 ADALINE 可根据外界的输入和期望响应,其权值进行动态的调整,因此采用 ADALINE 代替传统 MRAS 中的 PI 自适应率。ADALINE 模型如图 3 所示。

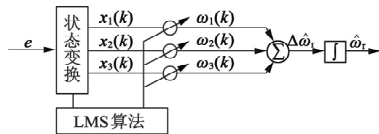


图 3 ADALINE 结构模型

图 3 中: $x_1(k)$, $x_2(k)$ 和 $x_3(k)$ 为输入信号; $\omega_1(k)$, $\omega_2(k)$, $\omega_3(k)$ 输入信号的权重。根据转子的广义误差 e , 定义状态变量:

$$\left. \begin{aligned} x_1(k) &= e(k) \\ x_2(k) &= e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) &= e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

第 k 次的转速估计值 $\hat{\omega}_r(k)$ 与第 $k-1$ 的转速估计值存在如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\omega}_r(k) &= \Delta \hat{\omega}_r(k) + \hat{\omega}_r(k-1) \\ \Delta \hat{\omega}_r(k) &= \sum_{i=1}^3 x_i(k) \omega_i(k) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

为了保证系统的收敛性,采用最小均方差算法(以下简称 LMS)来修正 ADALINE 的加权系数。定义目标函数:

$$J(k) = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (13)$$

式中: $e(k) = \hat{\psi}_{r\alpha}(k) \hat{\psi}_{r\beta}^*(k) - \hat{\psi}_{r\beta}(k) \hat{\psi}_{r\alpha}^*(k)$ 。

LMS 算法是一种特殊的梯度估计算法,其权重系数采用反梯度向量进行反复迭代更新。根据梯度法,其权值系数的修正公式如下:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \omega_i(k) &= -\eta_i \frac{\partial J(k)}{\partial \omega_i(k)} \\ \frac{\partial J(k)}{\partial \omega_i(k)} &= \frac{\partial J(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial \omega_i(k)} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将式(12)和式(13)代入求偏导,可得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial J(k)}{\partial e(k)} &= e(k) \\ \frac{\partial \omega_i(k)}{\partial \omega_i(k)} &= x_i(k) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

为了简化 $e(k)$ 与 $\omega_r(k)$ 的关系,采用差分近似处理得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e(k)}{\partial \omega_r(k)} &= [\hat{\psi}_{r\alpha}(k) \hat{\psi}_{r\beta}(k) - \hat{\psi}_{r\alpha}(k-1) \hat{\psi}_{r\beta}(k-1) - \\ &\quad \hat{\psi}_{r\beta}(k) \hat{\psi}_{r\alpha}(k) + \hat{\psi}_{r\beta}(k-1) \hat{\psi}_{r\alpha}(k-1)] / \\ &\quad [\omega_r(k) - \omega_r(k-1)] = \lambda(k) \end{aligned} \quad (16)$$

结合式(11)、式(14)、式(15)、式(16),得到速度观测器中权值自学习的差分表达式:

$$\left. \begin{aligned} \omega_1(k+1) &= \omega_1(k) - \eta_1 e(k) \lambda(k) x_1(k) \\ \omega_2(k+1) &= \omega_2(k) - \eta_2 e(k) \lambda(k) x_2(k) \\ \omega_3(k+1) &= \omega_3(k) - \eta_3 e(k) \lambda(k) x_3(k) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

根据每次转子磁链估计误差计算此时的状态变量,由式(17)进行权值更新,由式(11)得到电机的转速估计。

3 仿真与结果分析

改进后的 MRAS 速度观测器的控制系统如图 4 所示,并在 MATLAB/Simulink 环境下对此控制模型进行仿真分析。

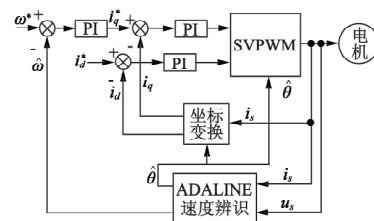


图 4 基于改进的 MRAS 速度观测器控制框图
电机的仿真参数如表 1 所示。

表 1 电机的参数

参数	数值	参数	数值
额定电压 u/V	66	额定频率 f/Hz	50
定子电阻 R_s/Ω	0.007 1	转子电阻 R_r/Ω	0.008 4
互感 L/H	0.012	极对数	2

电机给定转速为 1 000 r/min,空载启动,0.08 s 时转速上升至 2 200 r/min,仿真结果如图 5 所示。图 5(a) 为电机定子间的线电压;图 5(b) 为转速辨识与电机实测转速的仿真图,从图 5(b) 中可知,辨识转速的波动较小,较好地跟随电机的实际转速;图 5(c) 为转速的误差图,由图 5(c) 可知,电机的在稳态时误差很小,响应速度快;图 5(d) 为电机的输出转矩;图 5(e) 为定子电流;图 5(f) 为转子磁链运行轨迹图。

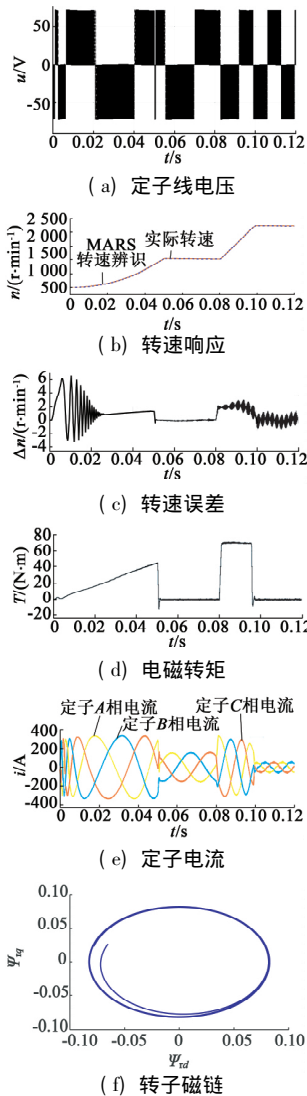
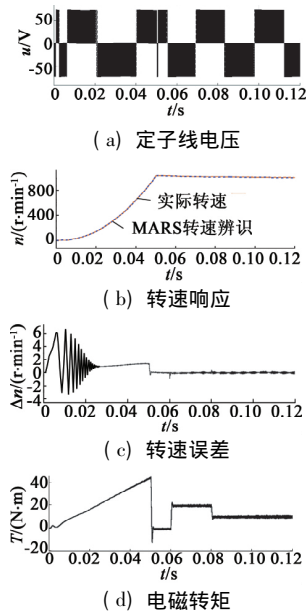


图5 转速给定突变时仿真结果

图6 给定电机转速为1 000 r/min,在0.06 s 突加负载20 N·m,0.08 s 时负载减至10 N·m 的仿真结果。从图6 中可知,突加负载后转速略有下降,但立即恢复。



(d) 电磁转矩

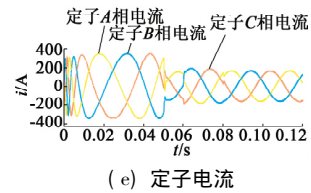


图6 突加负载时仿真结果

4 结 语

本文以转子磁链的电压模型和电流模型作为MRAS 速度观测器的参考模型和可调模型,采用了一阶惯性滤波环节消除电压模型中的纯积分问题,利用 ADALINE 在线权值修正的特点,设计了一种自适应神经元 PID 控制器,并将此控制器作为MRAS 结构中的自适应机制。最后在转速为1 000 r/min 和2 200 r/min 的情况下进行了仿真验证,其结果表明,电机速度辨识精度较高,动态性能也得到了改善。

参考文献

- [1] 韦文祥, 刘国荣. 基于扩展状态观测器模型与定子电阻自适应的磁链观测器及其无速度传感器应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6194-6202.
- [2] 尹忠刚, 李国银, 张延庆, 等. STEKF 协同残差归一化的感应电机转速辨识方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 86-96.
- [3] NIAN X, DING R, WANG J, et al. An LMI approach with the adaptive observer for speed and resistances identification of IM drives[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2012, 32(12): 126-135.
- [4] 黄进, 赵力航, 刘赫. 基于二阶滑模与定子电阻自适应的转子磁链观测器及其无速度传感器应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 54-61.
- [5] SUN W, YU Y, WANG G, et al. Design method of adaptive full order observer with or without estimated flux error in speed estimation algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2609-2626.
- [6] 赵海森, 杜中兰, 刘晓芳, 王庆. 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.
- [7] XU L, YI R, CHAOYI Z, et al. On speed sensorless vector control system for induction motor based on estimating speed by torque current differential[C]//2008 27th Chinese Control Conference. IEEE, 2008: 169-173.
- [8] 车海军, 王亮亮, 霍丽娇, 等. 改进的无功功率模型参考自适应异步电机转速辨识[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(10): 40-46, 53.
- [9] YANG G, CHIN T H. Adaptive-speed identification scheme for a vector-controlled speed sensorless inverter-induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(4): 820-825.
- [10] 王庆龙, 张崇巍, 张兴. 交流电机无速度传感器矢量控制系统变结构模型参考自适应转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 70-74.

[11] 尹忠刚,刘静,钟彦儒等.基于双参数模型参考自适应的感应电机无速度传感器矢量控制低速性能[J].电工技术学报,2012,27(7):124-130.

[12] YE B ,CIRRINCIONE M ,PUCCI M ,et al. Sensorless control of induction motors by the MSA based MUSIC technique [C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE ,2015.

[13] GLENN J A ,SNEHA J A ,VICTOR V B J ,et al. Sensorless control of induction motor drives at low speed using fuzzy logic control[J]. International Journal of Advanced Research in Electrical , Electronics And Instrumentation Engineering , 2014 ,8(3):10939-10944.

[14] CHEN J Q ,HUANG S G ,HONG J F ,et al. Research on Speed Identification Methods of Asynchronous Motor Control Based on Speed Sensorless[J]. Coal Mine Machinery ,2015 ,36(1):121-124.

[15] 苗轶如,刘和平,杜俊秀等.一种异步电机自适应线性神经元速度观测器[J].电机与控制学报,2018,22(11):52-57,66.

[16] DENG X M ,WANG L ,GUO Q F. Identification of synchronous

motor parameters based on self-sensor technology [J]. Experimental Technology and Management ,2014 (3):7-10.

[17] 许良,赵吉文,宋俊材等.基于ALE-MRAS磁链观测器的永磁同步直线电机均匀退磁诊断研究[J].中国电机工程学报,39(24):7347-7356.

[18] ACCETTA A ,CIRRINCIONE M ,PUCCI M ,et al. Neural sensorless control of linear induction motors by a full-order Luenberger observer considering the end effects [J]. IEEE Transactions on Industry Applications ,2013 ,50(3):1891-1904.

[19] CHEN Z F ,ZHONG Y R ,LI J ,et al. Speed Identification for Induction Motor Based on Improved Flux Observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society ,2012 ,27(4):42-47.

[20] 陆海峰,瞿文龙,张磊等.一种基于无功功率的异步电机矢量控制转子磁场准确定向方法[J].中国电机工程学报,2005(16):116-120.

作者简介:包广清(1972—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电机本体制造与控制。

(上接第37页)

[14] 李学军,李平,蒋莉莉等.基于异类信息特征融合的异步电机故障诊断[J].仪器仪表学报,2013,34(1):227-233.

[15] 韩丽,史丽萍.基于信息融合技术的异步电机故障诊断研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(2):178-184.

[16] 荀旭丹.基于Hilbert模量与改进BP神经网络的电机转子断条故障诊断[J].电测与仪表,2018,55(3):55-58.

[17] 钱华明,王雯升.遗传小波神经网络及在电机故障诊断中的应用[J].电子测量与仪器学报,2009,23(3):81-86.

[18] 乔维德,萤火虫粒子群优化神经网络的异步电机转子断条故障诊断[J].电机与控制应用,2017,44(1):83-88.

[19] 史丽萍,王攀攀,胡泳军等.基于骨干微粒群算法和支持向量机的电机转子断条故障诊断[J].电工技术学报,2014,29(1):147-155.

[20] 邱阿瑞,张龙照.鼠笼式异步电动机转子导条及端环故障时的稳态运行分析[J].电工技术学报,1987(3):7-13.

[21] 辜承林,陈乔夫,熊永前.电机学[M].武汉:华中科技大学出版社,2010:393-395.

[22] 黄开胜,童怀,郑泰胜等.遗传算法在异步电动机动态模型参数识别中的应用[J].中国电机工程学报,2000,20(8):37-41,55.

[23] 李洁,杜茜,宋海军等.考虑铁损的异步电机参数辨识实验研究[J].电工技术学报,2014,29(3):95-101.

[24] 黄宇,韩璞,刘长良等.改进量子粒子群算法及其在系统辨识中的应用[J].中国电机工程学报,2011,31(20):114-120.

作者简介:李楷然(1995—),男,硕士研究生,研究方向为电机参数辨识和电机故障诊断。

(上接第42页)

[8] 李平.基于模糊PID的多电机同步控制[D].沈阳:东北大学,2010:31-40.

[9] 刘艳.多电机同步控制系统控制策略研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2013:21-33.

[10] 范志龙.基于永磁同步电机的多电机同步控制系统的研究[D].长沙:湖南大学,2012:35-41.

[11] 姜晓平,朱奕,伞冶.大功率随动试验台多永磁同步电机同步控制[J].电机与控制学报,2014,53(4):88-95.

[12] 马星河,张少辉,李自强等.一种用于矩阵变换器的简化非线性自抗扰控制策略[J].电力系统保护与控制,2018,46(10):48-54.

[13] 肖洪昌,董家鹏,余涛.微型燃气轮机发电系统的自抗扰控制方法研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(13):7-12.

[14] 朱昊,韦钢,吴万禄等.自抗扰技术在微电网下垂控制策略中的应用[J].电力系统保护与控制,2014,42(9):61-67.

[15] 孙亮,吴根忠.自抗扰控制器优化设计及其应用[J].电机与控

制应用,2010,37(3):26-30.

[16] 周涛.永磁同步电机调速系统的自抗扰控制[J].光学精密工程,2016,24(3):582-589.

[17] 韩京清.自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术[M].北京:国防工业出版社,2008.

[18] 刘星桥,胡建群,周丽.自抗扰控制器在三电机同步系统中的应用[J].中国电机工程学报,2010,30(12):80-85.

[19] 徐迎辉.基于自抗扰的三电机同步控制平台研制[D].镇江:江苏大学,2016:8-25.

[20] 刘星桥,唐琳,周丽.二阶自抗扰控制器在三电机同步系统中的应用[J].电工技术学报,2012,27(2):179-184.

[21] 李慧,刘星桥,李景.三电机同步系统的二阶模糊免疫自抗扰控制[J].江苏大学学报,2015,36(2):201-208.

作者简介:陈阳(1993—),男,硕士研究生,研究方向为控制理论及应用。