

# 基于电阻估计的 PMSM 模型参考自适应系统<sup>①</sup>

孙旭霞, 李志权

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

**摘要:** 在无速度传感器交流伺服系统中, 估计转速受电机定子电阻不确定性影响较大, 本文针对该问题进行了研究, 提出了改进的 MRAS 方法. 利用永磁同步电机的电流模型作为可调模型, 设计了 MRAS 的自适应律, 在传统方法的基础上加入了对定子电阻的估计, 并利用控制方法的特点对估计算法进行了简化. 最后, 在 Matlab/Simulink 环境下对改进方案进行了仿真研究, 结果表明该算法使得转速的估计对电阻的不确定性有较强的鲁棒性, 并且使电机能够在较宽的速度范围内正常运行.

**关键词:** 永磁同步电机; 模型参考自适应控制; 无速度传感器; 电阻估计; 矢量控制

## MRAS with Resistance Estimation in PMSM

SUN Xu-Xia, LI Zhi-Quan

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** For the inaccurate speed estimation in speed sensorless servo system which is caused by the uncertainty of the stator resistance, an improved model reference adaptive system (MRAS) method is proposed in this paper. In this method, the current model of PMSM is regarded as adjustable model. Moreover MRAS' adaptive laws which add resistance estimation are designed. And then a simplified model is achieved according to the control strategy. Finally the simulation model is built under the Matlab/Simulink. The result shows that the speed estimation with resistance estimation has strong robustness in the effect of the uncertainty of the stator resistance in a wide range of speeds.

**Key words:** PMSM; model reference adaptive control; speed sensorless; resistance estimation; vector control

近年来, 为了克服机械传感器给交流伺服系统带来的成本高、抗干扰能力低、不易维护等问题, 交流伺服系统无速度传感器技术成为研究的热点.

目前, 常用的速度估计方法有扩展卡尔曼滤波法(EKF)、模型参考自适应法(MRAS)、高频信号注入法以及基于人工智能的方法等<sup>[1,2]</sup>. 其中, MRAS 以其算法简单, 抗干扰能力强等优点, 得到广泛应用<sup>[3-5]</sup>. 然而, 在电机运行过程中, 由于各种因素引起的电机定子电阻、定子电感等参数变化导致速度估计不准确<sup>[6]</sup>, 尤其是电机低速运行时, 这种影响尤为严重. 针对该问题, 很多学者提出了解决方法. 文献[7]利用 PI 电阻估计器实现定子电阻的在线估计, 但是并未考虑无速度传感器技术实现的问题; 文献[8]利用 MRAS 和模糊控制的混合算法实现了对低速时转速的准确估计, 然

而该算法复杂, 对硬件要求高; 文献[9]通过反电动势方法对转速进行估计, 并利用李雅普诺夫稳定性理论建模估计定子电阻, 获得了较好的效果; 文献[10]以 PMSM 的磁链模型作为可调模型对电机的转速和电阻进行了估计, 获得了良好的动静态性能.

本文针对定子电阻不确定引起的速度估计不准确问题, 提出了一种改进的 MRAS 方案. 以表贴式永磁同步电机本身的数学模型作为参考模型, 电流模型作为可调模型, 在传统 MRAS 基础上加入了对定子电阻的估计, 并利用矢量控制方法的特点对估计算法进行了简化, 通过对电阻的在线估计, 实时调整可调模型, 使得可调模型的输出跟踪参考模型的输出, 当二者的误差趋近于零时, 即达到了模型参考自适应控制的目的. 该控制算法简单, 克服了电阻变化引起的转速估计不准确, 提高了

<sup>①</sup> 收稿时间:2012-12-17;收到修改稿时间:2013-02-05

速度估计的精度, 具有良好的动静态性能.

## 1 基于MRAS的速度估计原理

### 1.1 MRAS 的速度估计原理

表贴式永磁同步电机在 d-q 坐标系下的电压模型为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p & -\omega_r \\ \omega_r & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

定子磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $L_d$ 、 $L_q$  分别为 d 轴和 q 轴电感;  $\psi_m$  为转子永磁磁链. 对于表贴式永磁同步电机有  $L_d=L_q=L$ ,  $R_s=R$ .

由(1)(2)可得 PMSM 在 d-q 轴下的电流方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q - \psi_m \omega_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

令:  $\dot{i}'_d = i_d + \frac{\psi_r}{L}$ ,  $\dot{i}'_q = i_q$ ,  $u'_d = u_d + \frac{R\psi_m}{L}$ ,  $u'_q = u_q$ , 则有:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{i}'_d \\ \dot{i}'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}'_d \\ \dot{i}'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(4)表示成估计值, 则有:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\dot{i}}'_d \\ \hat{\dot{i}}'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{R}}{L} & \hat{\omega}_r \\ -\hat{\omega}_r & -\frac{\hat{R}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\dot{i}}'_d \\ \hat{\dot{i}}'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} \hat{u}'_d \\ \hat{u}'_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

定义广义误差  $e = \dot{i}' - \hat{\dot{i}}$ , 则式(4)-(5), 可得:

$$\frac{de}{dt} = Ae - Iw \quad (6)$$

其中  $A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$ ,  $w = \begin{pmatrix} \hat{\omega}_r - \omega_r \end{pmatrix} J \begin{bmatrix} \hat{\dot{i}}'_d \\ \hat{\dot{i}}'_q \end{bmatrix} + \frac{\hat{R}-R}{L} \begin{bmatrix} \psi_m - \hat{\dot{i}}'_d \\ -\hat{\dot{i}}'_q \end{bmatrix}$ ,

$$e = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

等价的非线性时变反馈系统, 由对象和模型所组成的前向模块和具有非线性时变特性的自适应机构的等价反馈模块所组成. 按照超稳定性理论, 要求等价前向模块严格正实, 同时还要求等价反馈模块满足波波夫积分不等式.

#### 1) 前向模块严格正实

为了使前向方块严格正实, 要求前向模块的传递函数分子和分母的阶数差不大于 1, 如果阶差大于 1, 要引入补偿器

$$v = De \quad (7)$$

这里取  $D=I$ , 即  $v=e$ , 易证得前向模块严格正实.

#### 2) 反馈模块满足波波夫积分不等式

当  $t_0 \geq 0$ ,  $\gamma_0^2$  为任意有限整数时, 均满足不等式

$$\eta(0, t_0) = \int_0^{t_0} v^T w dt \geq -\gamma_0^2 \quad (8)$$

则有模型参考自适应系统是渐进稳定的.

将  $v$  和  $w$  带入不等式有

$$\eta(0, t_0) = \int_0^{t_0} e^T \begin{pmatrix} \hat{\omega}_r - \omega_r \end{pmatrix} J \begin{bmatrix} \hat{\dot{i}}'_d \\ \hat{\dot{i}}'_q \end{bmatrix} dt + \int_0^{t_0} e^T \frac{\hat{R}-R}{L} \begin{bmatrix} \psi_m - \hat{\dot{i}}'_d \\ -\hat{\dot{i}}'_q \end{bmatrix} dt \geq -\gamma_0^2 \quad (9)$$

所以分别满足

$$\eta_1(0, t_0) = \int_0^{t_0} e^T \begin{pmatrix} \hat{\omega}_r - \omega_r \end{pmatrix} J \begin{bmatrix} \hat{\dot{i}}'_d \\ \hat{\dot{i}}'_q \end{bmatrix} dt \geq -\gamma_1^2 \quad (10)$$

$$\eta_2(0, t_0) = \int_0^{t_0} e^T \frac{\hat{R}-R}{L} \begin{bmatrix} \psi_m - \hat{\dot{i}}'_d \\ -\hat{\dot{i}}'_q \end{bmatrix} dt \geq -\gamma_2^2 \quad (11)$$

即可使得波波夫积分不等式成立.

按照模型参考自适应参数的普遍结构, 将估计的转速和电阻取为下式的比例积分形式, 即:

$$\hat{\omega}_r = \int_0^t F_1(v, \tau) d\tau + F_2(v, t) + \hat{\omega}_r(0) \quad (12)$$

$$\hat{R} = \int_0^t H_1(v, \tau) d\tau + H_2(v, t) + \hat{R}(0) \quad (13)$$

将式(12)、(13)分别带入(10)、(11)即可分别求得  $\hat{\omega}_r$  和  $\hat{R}$  为

$$\hat{\omega}_r = \int_0^t k_i \left( \dot{i}'_d \hat{\dot{i}}'_q - \dot{i}'_q \hat{\dot{i}}'_d \right) d\tau + k_p \left( \dot{i}'_d \hat{\dot{i}}'_q - \dot{i}'_q \hat{\dot{i}}'_d \right) + \hat{\omega}_r(0) \quad (14)$$

$$\hat{R} = \int_0^t k_i \left[ \left( \dot{i}'_d - \hat{\dot{i}}'_d \right) \left( \frac{\psi_m}{L} - \hat{\dot{i}}'_d \right) - \left( \dot{i}'_q - \hat{\dot{i}}'_q \right) \hat{\dot{i}}'_q \right] d\tau \quad (15)$$

$$+ k_p \left[ \left( \dot{i}'_d - \hat{\dot{i}}'_d \right) \left( \frac{\psi_m}{L} - \hat{\dot{i}}'_d \right) - \left( \dot{i}'_q - \hat{\dot{i}}'_q \right) \hat{\dot{i}}'_q \right] + \hat{R}(0)$$

由式(6)可知:

$$\frac{de}{dt} = Ae \left\{ \begin{bmatrix} \frac{R-\hat{R}}{L} & \hat{\omega}_r - \omega_r \\ \omega_r - \hat{\omega}_r & \frac{R-\hat{R}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \frac{\hat{R}-R}{L} \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (16)$$

当  $e$  趋近于 0 时,  $\dot{e}$  也趋近于 0, 于是有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \frac{R-\hat{R}}{L} & \hat{\omega}_r - \omega_r \\ \omega_r - \hat{\omega}_r & \frac{R-\hat{R}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \frac{\hat{R}-R}{L} \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (17)$$

因为  $\begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix}^T$  和  $\begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix}^T$  是线性无关的, 只有当

$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{R} = R$  和  $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\omega} = \omega$  同时成立时才有式(6)成立, 保证了参数估计的唯一性。

### 1.2 MRAS 的速度估计简化算法

对于永磁同步电机, 采用  $i_d=0$  控制, 系统稳定后  $i_d$  和  $\dot{i}_d$  近似等于 0, 因此可以得到简化的模型。

$$\hat{\omega}_r = \int_0^t k_i \frac{\psi_m}{L} (\hat{i}_q - i_q) d\tau + k_p \frac{\psi_m}{L} (\hat{i}_q - i_q) + \hat{\omega}_r(0) \quad (18)$$

$$\hat{R} = \int_0^t k_i (\hat{i}_q - i_q) \hat{i}_q d\tau + k_p (\hat{i}_q - i_q) \hat{i}_q + \hat{R}(0) \quad (19)$$

### 1.3 PMSM 无速度传感器矢量控制系统的实现

利用 MRAS 得到的 PMSM 无速度传感器矢量控制系统的原理框图如图 1 所示。该方法利用定子实际电压和电流来估计电机转速, 速度估计算法原理框图如图 2 所示。它利用定子实际电压、估计速度和估计电阻值得到估计电流, 与实际电流构成估计器的自适应律, 得到估计的电阻和转速, 并将它们反馈到可调模型, 来不断调整可调模型, 使估计速度趋向于实际转速。

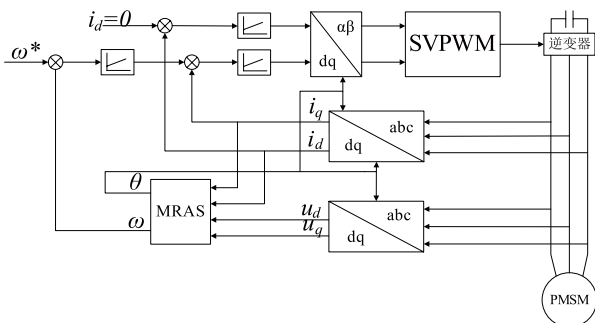


图 1 PMSM 无速度传感器矢量控制系统的原理框图

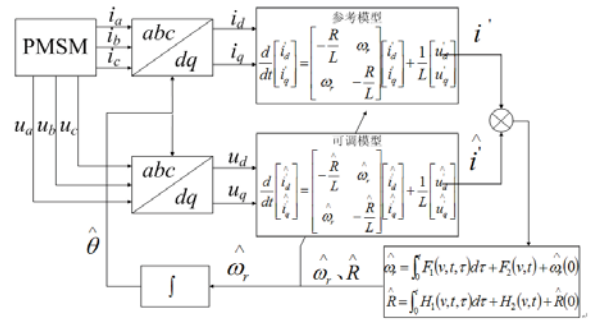


图 2 MRAS 估计速度原理框图

## 2 仿真研究

利用 Matlab/Simulink 对提出的方案进行仿真, 仿真所选电机参数为  $L_d=L_q=0.0085H$ ,  $p=4$ ,  $R=2.875 \Omega$ ,  $\psi_m=0.175Wb$ ,  $J=0.0008Kg \cdot m^2$ 。

实验一: 给定转速 2000r/min, 空载启动, 0.2s 时突加  $3N \cdot m$  的负载

图 3、图 4 分别为未加电阻估计和加入电阻估计的转速波形及其局部放大图, 由图可以看出加入电阻估计超调较小, 估计转速能够较好的跟踪实际转速, 经过 0.05s 的调整时间, 转速收敛于给定值。0.2s 时突加负载后, 转速有一个较小的波动, 0.05s 后趋于稳定。由转速的局部放大图可知, 系统稳定之后, 改进方案的转速震荡较小。图 5 为位置误差波形, 从图中可以看出, 系统稳定之后, 加入电阻估计的误差较小。

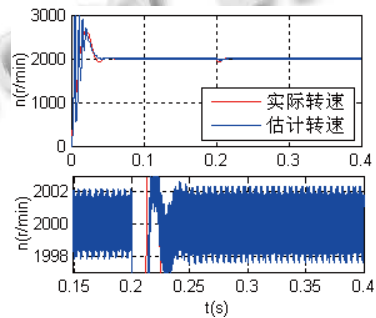


图 3 未加电阻估计 2000r/min 时的转速波形

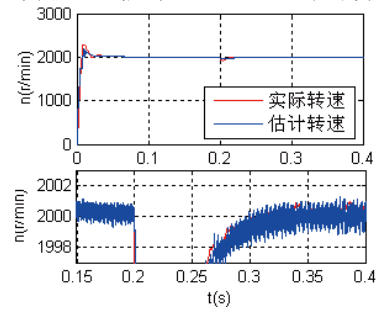


图 4 加入电阻估计 2000r/min 时的转速波形

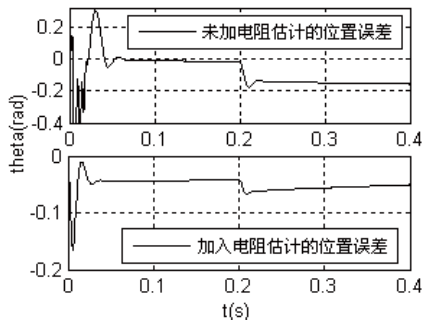


图 5 2000r/min 时的位置误差波形

实验二: 给定转速 50r/min,空载启动, 0.4s 时突加 3N\*m 的负载

图 6、7 分别为未加电阻估计和加入电阻估计的转速波形及其局部放大图, 从图中可以看出未加电阻估计的超调较大, 突加负载时速度震荡剧烈, 并且稳态误差也较大. 而加入电阻估计的转速波形几乎没有超调, 在大约 0.1s 的时候, 估计转速与实际转速趋于平稳. 0.4s 时突加 3N\*m 的负载, 转速出现波动, 但波动较小, 经过 0.1s 趋于稳定. 图 8 为位置误差波形, 由图可知未加电阻估计的误差有增大的趋势, 这是由于存在的速度误差造成的, 而改进后的算法误差能够稳定在 0.1rad.

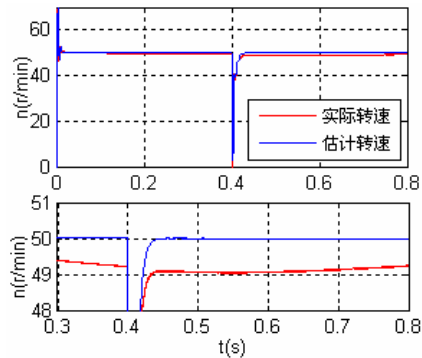


图 6 未加电阻估计 50r/min 时的转速波形

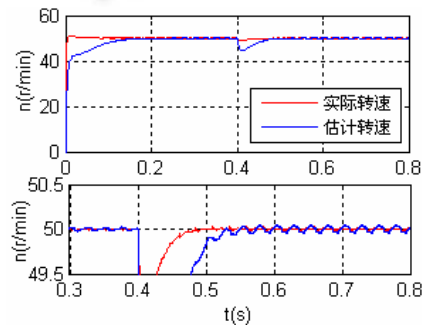


图 7 加入电阻估计 50r/min 时的转速波形

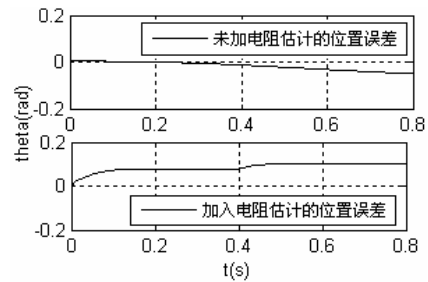


图 8 50r/min 时的位置误差波形

实验三: 定子电阻变为 4Ω, 给定转速 2000r/min, 空载启动, 0.2s 时突加 3N\*m 的负载

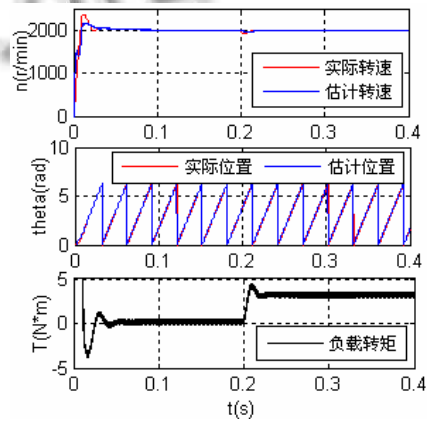


图 9 电阻变化、给定转速 2000r/min 时的仿真波形

实验四: 定子电阻变为 4Ω, 给定转速 50r/min,空载启动, 0.4s 时突加 3N\*m 的负载

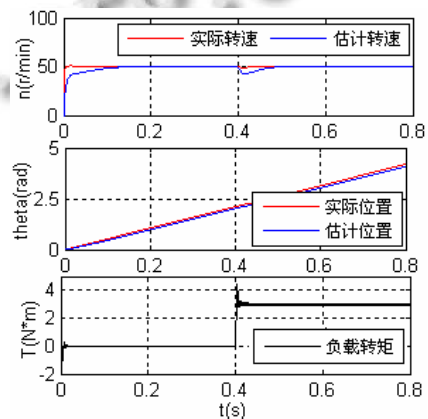


图 10 给定电阻 4Ω、转速 50r/min 时的仿真波形

从图 9、10 不同转速下的转速、位置和转矩的仿真波形可知, 电阻变化后, 系统仍旧能够达到稳定状态, 转速可以较快地收敛于给定值.

从以上仿真结果可以看出无论高速还是低速、电

阻有无变化,利用本文提出的方案,电机稳定运行后均能稳定在给定的转速,负载突变,引起转速的震荡也较小,并且能够较快的恢复稳定状态.由此可见,加入电阻估计后,系统能够在较宽的速度范围内正常工作,并且有效地抑制了定子电阻的不确定性带来的影响.

### 3 结语

针对定子电阻的不确定性给电机转速估计造成的影响,本文对传统的 MRAS 方法进行了改进,加入了对定子电阻的估计,并在 Matlab/Simulink 环境下搭建了永磁同步电机矢量控制系统的仿真模型,对电机在高速、低速、负载突变和电阻变化等情况下的运行状况进行了仿真研究,并与未加电阻估计的仿真波形进行了比较,结果表明转速的估计对电阻的不确定性具有较强的鲁棒性,并且使电机能够在一个较宽的速度范围内正常工作.

### 参考文献

- 1 李永东,朱昊.永磁同步电机无速度传感器控制综述.电气传动,2009,39(9):3-10.
- 2 李永东.交流电机数字控制系统.北京:机械工业出版社,2002.
- 3 王庆龙,张崇巍,张兴.基于变结构模型参考自适应系统的永磁同步电机转速辨识.中国电机工程学报,2008,28(9):71-75.
- 4 林森,申群太.基于 MRAS 的无速度传感器矢量控制系统研究.控制理论与应用,2008,27(4):5-8.
- 5 Wang ZF, Teng QZ, Zhang CN. Speed Identification about PMSM with MRAS. Power Electronics and Motion Control Conference, 2009.
- 6 金孟加,邱建琪,史涔激,林瑞光.永磁同步发电机直接转矩控制中定子电阻预测算法研究.中国电机工程学报,2007,27(6):17-20.
- 7 徐艳平,钟彦儒等.永磁同步电机的直接转矩控制的定子电阻的在线估计.电气传动,2006,36(4):24-26.
- 8 Fan SC, Luo WQ. A Hybrid Speed Sensorless Control Strategy for PMSM Based on MRAS and Fuzzy Control. Power Electronics and Motion Control Conference.2012.
- 9 Mobarakeh BN, Meibody-Tabar F, Sargos FM. Mechanical sensorless control of pmsm with online estimation of stator resistance. Industry Applications, 2004.
- 10 齐放,邓智泉,仇志坚,王晓琳.一种永磁同步电机无速度传感器的矢量控制.电工技术学报,2007,22(10):30-34.
- 11 李永东,朱昊.永磁同步电机无速度传感器控制综述.电气传动,2009,39(9):3-10.
- 12 李永东.交流电机数字控制系统.北京:机械工业出版社,2002.
- 13 王庆龙,张崇巍,张兴.基于变结构模型参考自适应系统的永磁同步电机转速辨识.中国电机工程学报,2008,28(9):71-75.
- 14 林森,申群太.基于 MRAS 的无速度传感器矢量控制系统研究.控制理论与应用,2008,27(4):5-8.
- 15 Wang ZF, Teng QZ, Zhang CN. Speed Identification about PMSM with MRAS. Power Electronics and Motion Control Conference, 2009.
- 16 金孟加,邱建琪,史涔激,林瑞光.永磁同步发电机直接转矩控制中定子电阻预测算法研究.中国电机工程学报,2007,27(6):17-20.
- 17 徐艳平,钟彦儒等.永磁同步电机的直接转矩控制的定子电阻的在线估计.电气传动,2006,36(4):24-26.
- 18 Fan SC, Luo WQ. A Hybrid Speed Sensorless Control Strategy for PMSM Based on MRAS and Fuzzy Control. Power Electronics and Motion Control Conference.2012.
- 19 Mobarakeh BN, Meibody-Tabar F, Sargos FM. Mechanical sensorless control of pmsm with online estimation of stator resistance. Industry Applications, 2004.
- 20 齐放,邓智泉,仇志坚,王晓琳.一种永磁同步电机无速度传感器的矢量控制.电工技术学报,2007,22(10):30-34.

(上接第 132 页)

- with a multi ant colony system. European Journal of Operational Research, 2008,185(3): 1174-1191.
- 4 李琳,刘士新,唐加福.B2C 环境下带预约时间的车辆路径问题及多目标优化蚁群算法.控制理论与应用,2011,28(1): 87-93.
  - 5 Mavrovouniotis M, Yang SX. Ant Colony Optimization with Immigrants Schemes for the Dynamic Vehicle Routing Problem. Computer Science, 2012, 7248: 519-528.
  - 6 Gajpal Y, Abad P. An ant colony system (ACS) for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup. Computers & Operations Research, 2009,36(12): 3215-3223.
  - 7 Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Positive feedback as a search strategy. Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, Tech.Rep. 1991: 91-106.
  - 8 Stützle T, Hoos HH. MAX - MIN Ant System, Future Generation Computer Systems, 2000,16(8): 889-914.
  - 9 Gambardella LM, Dorigo M. Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies. In: Baeck T, et al. eds. Proc. 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'96). IEEE Press, 1997: 622-627.
  - 10 章春芳,业宁.基于信息素的多种反馈作用的并行蚁群算法.计算机与信息技,2012(3).
  - 11 Dethloff J. Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up. OR Spektrum, 2001,23:79-96.
  - 12 项乔君.城市交通系统汽车燃油消耗研究.南京:东南大学,2000.