一种永磁同步电机自适应观察器的仿真研究*

顾光旭[1],王德良[2]
(1.盐城工学院 电子信息工程学院,江苏 盐城　224003;2.盐城民航站,江苏 盐城　224002)

摘　要 在模型参考自适应控制理论的基础上,介绍了一种永磁同步电机自适应转速观测器,通过 MATLAB 语言中的 Simulink/Power System Block 模块建立了控制系统的仿真模型,对选用的转速观测器的动态性能、稳定性等问题进行了仿真研究。

关键词:永磁同步电动机;无速度传感器;矢量控制;自适应观测器;仿真
中图分类号:TM351　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671 – 5322(2004)04 – 0043 – 04

无速度传感器矢量控制系统的基本原理是利用直接计算、参数辨识、状态估计、间接测量等手段,从定子边较易测量的量如定子电压、定子电流中提取出与速度有关的量,从而得出转子速度,并将它应用到速度反馈控制系统中。运用系统辨识理论构造观测器来估计电机的转速和位置是无速度传感器矢量控制系统研究中的一个重要途径,这种方法具有稳定性能好、鲁棒性强、适用面广的特点。

本文在研究模型参考自适应控制理论的基础上,针对一种适合于永磁同步电机的自适应转速观测器进行了计算机仿真研究。

1　模型参考自适应控制系统

由于电机本身是一个多变量、非线性、强耦合的控制对象,经典控制器在参数匹配良好条件下能取得较好的性能,一旦系统参数发生变化及负载转矩的扰动,将导致性能变差,而且动态响应和干扰力不能很好地兼顾,自适应控制是解决上述问题的一个有效方法。

模型参考自适应控制系统的原理如图 1 所示。由图中可以看出,模型参考自适应控制系统是在常规的反馈控制系统的基础上再附加一个参考模型和控制器参数的自动调节回路[1]。其中,参考模型的输出 $ym(t)$ 代表系统希望的动态响应,当被控对象因外界环境或工作状态的改变使其运行特性偏离了最优轨线,则被控对象的输出 $y(t)$ 与理想模型的输出 $ym(t)$ 相比,产生广义误差 $e(t)$,$e(t)$ 驱动自适应机构,产生反馈作用去修正调节器参数,从而促使可调系统的输出 $y(t)$ 与参考模型的输出 $ym(t)$ 一致,$e(t)$ 趋向与零。

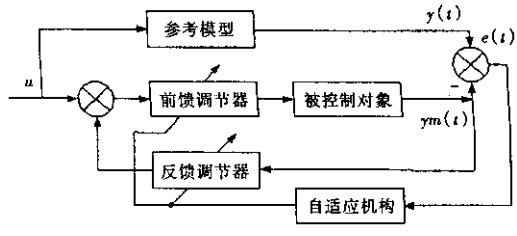


图 1　典型的模型参考自适应控制系统

Fig.1　Typical Model Reference Control System

采用状态方程描述的模型参考自适应控制可表述如下:

式(1)中 X_m 是 n 维状态向量,u 是 m 维输入向量,A_m 和 B_m 分别是 $n \times n$ 和 $n \times m$ 维常数矩阵。参考模型须是稳定的,且完全可控和可观察。

参考模型:　$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m u \qquad (1)$$

可调系统的状态方程为:

$$\dot{X}_p = A_p(e,t) + B_p(e,t)\,u \qquad (2)$$

式中 X_p 是可调系统的 n 维状态向量,$A_p(e,t)$ 和 $B_p(e,t)$ 分别是 $n \times n$ 和 $n \times m$ 维时变矩阵,它依

* 收稿日期:2004 – 09 – 30
作者简介:顾光旭(1967 –),女,江苏大丰市人,盐城工学院副教授、硕士,主要研究方向为电力电子技术与电力传动。
万方数据

赖于广义误差向量：

$$e = X_m - X_p \tag{3}$$

模型参考自适应控制系统的设计任务是依据广义误差向量确定一个特定的自适应规律来调节参数矩阵 $A_p(e,t)$ 和 $B_p(e,t)$，使系统在稳定的情况下，广义误差趋向于零。自适应规律一般选择为比例加积分的形式。

2 自适应转速观察器的构造

运用模型参考自适应观察器的构造方法，可以建立无速度传感器永磁同步电机矢量控制系统中的自适应转速观察器。其方法如下：

同步旋转 $d,q,0$ 坐标系的永磁同步电机状态方程为：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/L_d & \omega L_q/L_d \\ -\omega L_d/L_q & -r/L_q \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d/L_d \\ (u_q - \omega\Psi_a)/L_q \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中，状态变量为同步旋转直轴、交轴电流 $[i_d \quad i_q]^T$。以次状态方程为基础，可以构造永磁同步电机的自适应转速观测器。

永磁同步电机作为图 1 中的参考模型，则参考模型状态方程为：$\dot{X} = AX + Bu$ (5)

其中：$X = [i_d \quad i_q]^T$；

$$A = \begin{bmatrix} -r/L_d & \omega L_q/L_d \\ -\omega L_d/L_q & -r/L_q \end{bmatrix};$$

$$Bu = \begin{bmatrix} u_d/L_d \\ (u_q - \omega\Psi_a)/L_q \end{bmatrix}$$

在图 1 中，并联估计模型的可调参数为估计转速 $\tilde{\omega}$，构造的时变矩阵为 $\tilde{A}$，和 $\tilde{B}$，由此可以得到并联估计模型的状态方程：$\dot{\tilde{X}} = \tilde{A}\tilde{X} + \tilde{B}u$ (6)

其中，$\tilde{X} = [\tilde{i}_d \quad \tilde{i}_q]^T$；

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -r/L_d & \tilde{\omega} L_q/L_d \\ -\tilde{\omega} L_d/L_q & -r/L_q \end{bmatrix};$$

$$\tilde{B}u = \begin{bmatrix} u_d/L_d \\ (u_q - \tilde{\omega}\Psi_a)/L_q \end{bmatrix}$$

将参考模型与并联估计模型相减，得到一个广义误差系统的状态方程：

$$\dot{\varepsilon} = A\varepsilon + (A - \tilde{A})\tilde{X} + (Bu - \tilde{B}u) \tag{7}$$

其中，广义误差 $\varepsilon = [(i_d - \tilde{i}_d),(i_q - \tilde{i}_q)]^T$，为参考模型状态变量与估计模型状态变量之差。

运用正实性原理和超稳定性理论可得到自适应转速观测器的最终转速自适应速率为[2]：

$$\tilde{\omega} = K_p h(t) + K_i \int_0^t h(t)\,dt \tag{8}$$

其中，$K_p = k_1 \times k_p, K_i = k_1 \times k_i$ (9)

$$h(t) = (L_d/L_q)\,\tilde{i}_q\,(i_d - \tilde{i}_d) - [(L_d/L_q)\,\tilde{i}_d + \Psi_a/L_q](i_q - \tilde{i}_q) \tag{10}$$

所构造的永磁同步电机自适应转速观测器结构如图 2 所示。

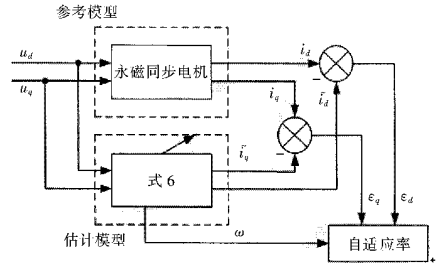


图 2 永磁同步电机自适应转速观测器的结构

Fig. 2 Structure of the Adaptive Speed Observer for PMSM

3 自适应转速观察器的仿真研究

图 3 为永磁同步电机定子三相电压测量模块的仿真模型。

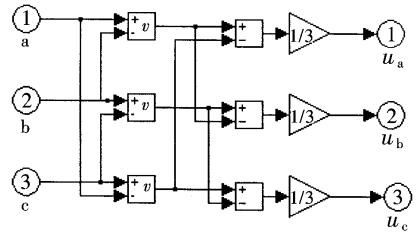


图 3 永磁同步电机定子三相电压测量模块

Fig. 3 Measurement Model of PMSM Stator Three – phase Voltage

将此自适应速度观测器用于无速度传感器矢量控制系统中[4]（见图 4），该系统采用了位置和速度环叠加的串极控制结构。转速观测器的输出是速度参考值 ω_r^*，ω_r^* 与实际值 ω_r 比较后，将其作为速度调节器的输入。速度调节器是个比例积分调节器，当直轴电流 i_d^* 为零时，转矩 T_e 与交轴电流 i_q^* 成正比，所以速度调节器的输出是 i_q^*。ω_r^* 经过一积分器输出转子位置值 θ_r^*。由 i_d^*，i_q^* 和转子位置值 θ_r^* 通过 dq 轴系到 ABC 轴系的坐标变换，便得到定子电流参考值 i_A^*，i_B^* 和 i_C^*，将其输入到电流控制逆变器，使得实际电流跟踪给定电流，从而得到需要的输出转矩。

万方数据

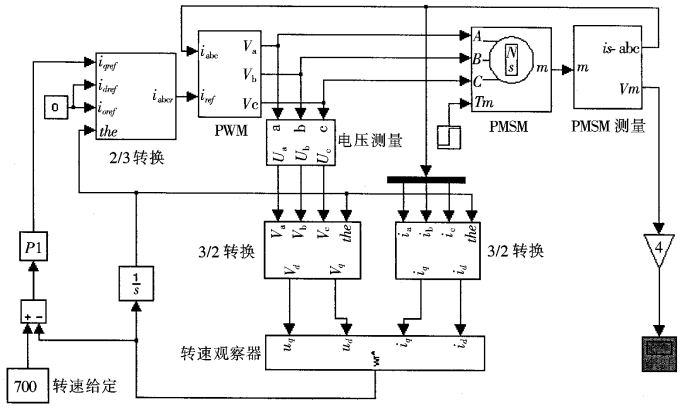


图 4　基于自适应速度观测器的无速度传感器矢量控制系统

Fig. 4　The Speed Sensorless Vector ControlSystem Based on the Adaptive Speed Observer

图 5 给出了转速给定时电机起动过程的观察器的速度估计值以及估计值与真实转速的误差(其中，$K_i = 3 \times 10^3$　$K_p = 30$)。

由仿真结果可以看出：①自适应转速观察器在电机动态转速变化和稳态运行过程中都具有较好的动态特性，转速估计误差也较小；②自适应转速观察器在电机转速突变的过程中估计误差较大，以电机在刚起动和刚要进入稳态运行时刻误差尤为突出，这是由转速观察器中采用的比例积分自适应率决定的。

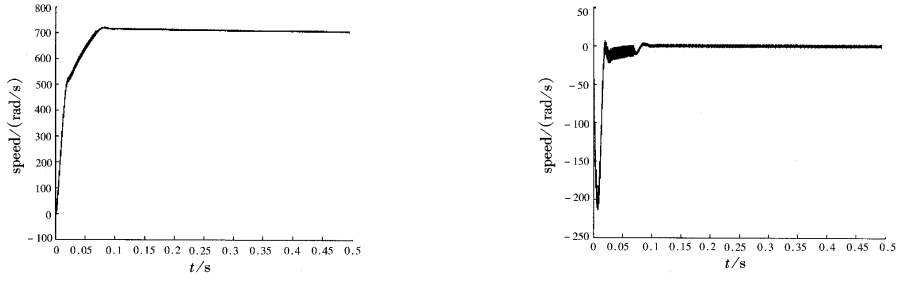


图 5　$n = 700$rad/s 启动过程转速观察器仿真

Fig. 5　Simulation of Starting Process of the Speed Observer ($n = 700$rad/s)

下面对永磁同步电机电阻和转子永磁磁链的变化对构造的转速观察器的影响进行仿真研究。

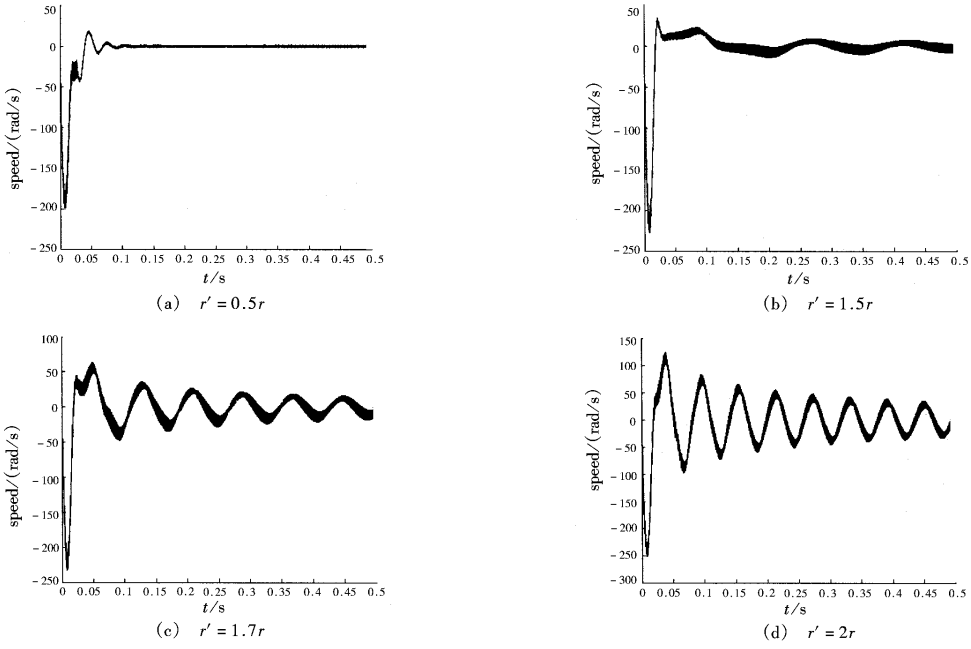
图 6 为转速恒定时，电机电阻参数突变时的转速估计误差仿真结果。图 7 为电机转子磁链参数突变时转速观察器转速估计误差仿真结果。

从仿真实验结果可以看出，当系统中电机的参数突变时，转速观察器的估计转速出现了较为剧烈的动态过程，估计误差较大，经过一段动态过程后，转速观察器的估计转速仍能够较快地收敛于真实转速。这说明构造的自适应转速观察器在参数发生突变性变化时，性能受到较大的影响，出现较大的估计误差。在实际控制系统中，电机的参数会随着电机的运行状态发生变化，而这种变化常常是缓慢的，一般不存在参数的突变或剧烈的变化，因此对于这样的实际系统，本文的自适应转速观察器能够保持动态性能和稳态精度，转速的估计误差很小。

4　结论

本文在研究模型参考自适应控制理论的基础上，运用同步旋转 dq 坐标系的永磁同步电机状态方程，针对一种模型参考自适应永磁同步电机转速观察器进行了仿真研究。证明了该转速观察器在不同参数，运行条件下稳态和动态性能较好。在永磁同步电机参数发生变化时，本文的自适应转速观察器仍能保持较好的稳态精度和动态响应速度，具有较强的鲁棒性。

万方数据

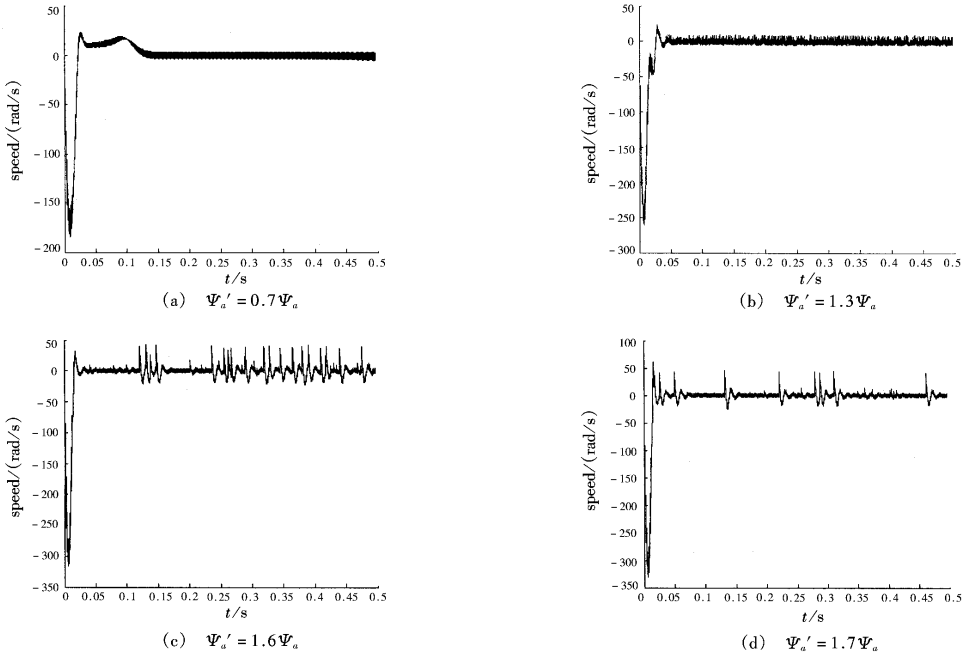


(a) $r' = 0.5r$ (b) $r' = 1.5r$

(c) $r' = 1.7r$ (d) $r' = 2r$

图 6 电机电阻参数突变时转速观察器转速估计误差

Fig.6 Speed Performance Degradation Caused by the suddenly changed Motor Resistance



(a) $\Psi_a' = 0.7\Psi_a$ (b) $\Psi_a' = 1.3\Psi_a$

(c) $\Psi_a' = 1.6\Psi_a$ (d) $\Psi_a' = 1.7\Psi_a$

图 7 电机转子磁链参数突变时转速观察器转速估计误差

Fig.7 Speed Performance Degradation Caused by the suddenly changed Rotor flux

参考文献：

[1] 许强,贾正春,李朗如.永磁同步电动机的模型参考自适应速度控制[J].电气传动,1998,(5):21 – 25.

[2] 曾朝晖.永磁同步电机矢量控制策略研究[D].南京:东南大学,1996.

[3] 程卫国.MATLAB5.3 应用指南[M].北京:人民邮电出版社,1999.

[4] 王成元.矢量控制交流伺服驱动电动机[M].北京:机械工业出版社,1995.

(下转第 38 页)

万方数据

试卷的预先评估,然后由系统自动根据同一试卷编号的所有用户成绩给出其实际的评估,并且都有一个难度等级,把两次评估进行比较得出该卷的难易程度以及更详细的评估情况。

2.3.8 删除模块

在整个系统中,只有系统管理员具有此权限。管理员通过复选按钮选择要删除的用户、试卷及科目,而对于数量较大的试题库则通过输入或选择条件,就可达到删除那些过时的无用的试题,当然,对于那些恶意破坏系统的用户,管理员有权删除他,以示惩罚。这样就可确保数据库不至于十分庞大和其安全性。

3 结论

此系统从研究设计到我校金工实习厂投入实际应用历时几个月,通过多次细致的测试及鉴定,证明系统完全具有可行性与可扩充性,收到较好的教学效果。该题库与在线考试系统可允许全校学生通过校园网在线考试,改变了传统考试的模式。

参考文献:

[1] 汪永明.基于 B/S 模式的在线考试系统[J].微机发展,2004,(1):59 – 60.
[2] 吕俊.关于在线考试系统设计中的苦干问题探讨[J].现代计算机,2000,(2)77 – 79.

Design of Online Test System of The Metal Working Practising

MA Ru – hong[1], LI Li – yao[2]
(1. Department of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, China
2. College of Management, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The paper introduces the design of question database and online examination system of the metal working practicing. The function of the system designed is fairly all – round and it can meet the basic requirements for examinees to take the online examination. This system is linked to a database. The WebPages can display the content in the database dynamically. Besides, student subsystem has good interaction.

Keywords: ASP; question database in network; online test

(上接第 46 页)

Simulation of One Kind Adaptive Speed Observer for Permanent Magnet Synchronous Motors

GU Guang – xu[1], WANG De – lang[2]
(1. College of Electronics and Information Engineering, Yancheng Technology Institute, Jiangsu Yancheng 224003, China
2. Yancheng Civil Aviation Station, Jiangsu Yancheng 224002, China)

Abstract: By studying the theory of Model Reference Control System (MRAS), this paper has a brief introduction to adaptive speed observer and makes a report of the dynamic performance, and stability of the adaptive speed observer simulated by MATLAB/SIMULINK software.

Keywords: permanent magnet synchronous motors; speed sensorless; vector control; adap

万方数据