

基于模糊 PI 模型参考自适应的 高速永磁同步电机转子位置检测

张洪帅¹, 王平¹, 韩邦成²

(1. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东省 青岛市 266580;
2. 惯性技术国防科技重点实验室(北京航空航天大学), 北京市 海淀区 100191)

Rotor Position Measurement for High-speed Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Fuzzy PI MRAS

ZHANG Hongshuai¹, WANG Ping¹, HAN Bangcheng²

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong Province, China;

2. Science and Technology on Inertial Laboratory (Beihang University), Haidian District, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: On account of the features of the high speed permanent magnet synchronous motor which has a high speed and a wide speed range, this paper proposes a kind of rotor position observer which is model reference adaptive system (MRAS) based on fuzzy PI self-adaptive regulator. This method uses the fuzzy controller regulate the proportion and the integration ratio of the PI regulator, so that the PI regulator has a perfect performance in a wide speed range of the HSPMSM. This method improves the precision of the rotor's position which is observed by MRAS. In the end, simulations and experiments for a 4 kW HSPMSM with an air blower are carried out for this method. It realizes the position estimation. The error is analyzed and a compensation method is proposed. The results demonstrate that the Fuzzy PI MRAS Observer can effectively estimate the rotor position of the HSPMSM in a wide speed range.

KEY WORDS: high speed permanent magnet synchronous motor; model reference adaptive system (MRAS); fuzzy PI; proportion and integration ratio; rotor position

摘要: 针对高速永磁同步电机转速高、调速范围宽的特点, 该文提出了一种模糊 PI 模型参考自适应(model reference adaptive system, MRAS)观测器, 实现了永磁同步电机转子位置检测。此方法将模糊 PI 调节器应用于模型参考自适应观测器, 通过模糊控制器调整 PI 调节器的比例积分系数, 以使 PI 调节器能在电机很宽的速度范围内都具有良好的动稳态性能, 提高了模型参考自适应观测器对高速永磁同步电

机转子位置的检测精度。最后, 以带有风机负载的 4 kW 磁悬浮轴承高速永磁同步电机为研究对象进行了 Matlab 仿真和实验, 实现了基于此方法的转子位置检测和速度估计, 并分析了转子位置误差产生的来源以及补偿方式, 证明所提方法适用于高速永磁同步电机的转子位置检测。

关键词: 高速永磁同步电机; 模型参考自适应; 模糊 PI; 比例积分系数; 转子位置

0 引言

高速永磁同步电机 (high speed permanent magnet synchronous motor, HSPMSM) 具有体积小、效率高、功率密度大、转动惯量小、动态响应快、调速范围宽、机械振动和噪声小, 以及相对高速无刷直流电机转矩脉动小等优点, 其转速可以达到每分钟几万转, 在大功率压缩机、鼓风机、新能源飞轮储能等领域均有应用, 可以省去机械提速装置, 提高了整个系统的运行效率。矢量控制技术是永磁同步电机常用的驱动方式, 要实现电机高精度高效率控制, 必须对电机转子位置进行检测。常用的机械转子位置传感器加大了系统的体积和转子的转动惯量, 增加了系统成本, 且降低了系统可靠性。因此有必要对高速永磁同步电机无位置传感器的转子位置检测方法进行研究^[1]。

目前, 常用的无位置传感器转子位置检测方法主要有利用电机凸极效应的高频信号注入法, 但该方法对电机的结构有一定的要求, 需要电机转子有一定的凸极性, 不适用于隐极式永磁同步电机^[2-5]。

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ040235)。

The National Major Project for the Development and Application of Scientific Instrument Equipment of China Under Grant (2012YQ040235).

第二类方法则利用反电动势或者磁链估算转子位置，常用的方法有模型参考自适应法(model reference adaptive system, MRAS)、滑模观测器法(sliding mode observer, SMO)、扩展卡尔曼滤波法(extended Kalman filter, EKF)等。滑模观测器法的鲁棒性好，但其存在低速抖振^[6-11]，对于反电动势系数小的高速永磁同步电机尤为严重，扩展卡尔曼滤波法需要矩阵的求逆运算，计算复杂，对CPU的性能要求较高^[12]，实时性较差。模型参考自适应系统常用的PI自适应调节器的动稳态性能只能在某一速度区域调整为最佳^[13-15]，当转速低于该速度域时易引起检测的转子位置振荡，高于该速度域时易导致检测的转子位置有较大的延迟，而高速永磁同步电机的调速范围宽(从0到几万r/min)，基于传统PI的模型参考自适应观测器(PI-MRAS)性能不再满足要求。为此，本文提出了一种基于模糊PI模型参考自适应观测器(以下简称模糊PI-MRAS)的高速永磁同步电机的转子位置检测方法，把模糊PI作为模型参考自适应观测器的反馈调节器，应用模糊控制器调整PI调节器的比例积分系数，使PI自适应调节器在电机很宽的速度范围内都有良好的动稳态性能^[16-20]，从而使观测器在低速时可以抑制检测的转子位置角度的小幅振荡，高速时减小其角度的相位延迟，提高了转子位置的检测精度。通过仿真分析和实验证明了该方法的有效性和实用性。

1 模糊PI-MRAS转子位置观测器

1.1 隐极式永磁同步电机数学模型

隐极式高速永磁同步电机在 α - β 坐标系下的定子电压方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + L_s D \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega \psi_f \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： u_α 、 u_β 、 i_α 、 i_β 分别为高速永磁同步电机在 α 、 β 轴上的定子电压和定子电流； R_s 、 L_s 分别为定子电阻和电感； D 为微分算子； ω 为转子电角速度； ψ_f 为转子磁链。

1.2 基于MRAS的转子位置观测器设计

根据隐极永磁同步电机在 α - β 坐标系下的定子电压方程(1)，可得其在 α - β 坐标系下定子电流状态方程：

$$D \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{\omega}{L_s} \psi_f \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

即：

$$\frac{di_s}{dt} = Ai_s + Bu_s + Be_s \quad (3)$$

式中： $i_s = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ ； $A = (-R_s/L_s)I$ ； $B = (1/L_s)I$ ； $u_s = [u_\alpha \ u_\beta]^T$ ； $e_s = -\omega \psi_f [-\sin \theta \ \cos \theta]^T = -[e_\alpha \ e_\beta]^T$ 。其中 I 为 2×2 阶单位矩阵。

将式(3)所示定子电流模型作为模型参考自适应的可调模型，把实际的电机本体作为参考模型。可得如式(4)所示的参数可调的估计模型，其中反电动势 \hat{e}_s 作为估计模型中的可调参数。

$$\frac{di_s}{dt} = A\hat{i}_s + Bu_s + B\hat{e}_s \quad (4)$$

定义状态误差：

$$e = \hat{i}_s - i_s \quad (5)$$

则式(4)减去式(3)可得误差状态方程：

$$\frac{de}{dt} = Ae + B(\hat{e}_s - e_s) \quad (6)$$

通过模糊PI自适应调节器的反馈调节，当 $e = [0 \ 0]^T$ 、 $de/dt = [0 \ 0]^T$ 时，可得 $e_s = \hat{e}_s$ 。根据波波夫(Popov)超稳定性理论可以证明，此反馈系统是稳定系统，这里不在赘述。从而可得转子估计位置：

$$\hat{\theta} = -\tan^{-1} \left(\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta} \right) \quad (7)$$

1.3 模糊PI自适应调节器设计

模型参考自适应观测器需要一个自适应调节器来调节可调参数。本文采用模糊PI作为模型参考自适应观测器的调节器，通过模糊PI自适应调节器来调节可调模型的可调参数，即反电动势 \hat{e}_s 。图1为模糊PI-MRAS转子位置观测器的原理图。

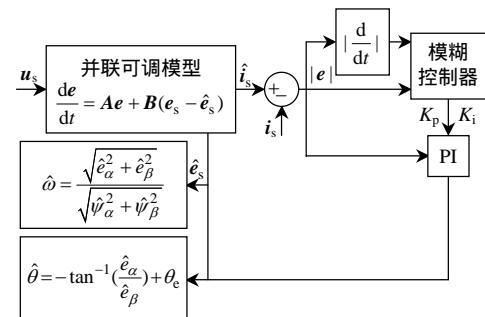


图1 模糊PI-MRAS转子位置观测器的原理图

Fig. 1 Schematic of the fuzzy PI MRAS observer

如图1所示模糊控制器的输入变量为 e 和 e_p 的

绝对值(e 为系统状态偏差, e_p 为系统状态偏差的变化率, $e_p = de/dt$), 输出变量为 PI 自适应调节器的比例积分系数 K_p 、 K_i 。其中,

$$e = \hat{i}_s - i_s = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

这种方法应用模糊控制器来调整 PI 自适应调节器的比例积分系数, 使 PI 自适应调节器在电机不同的速度域都有良好的动稳态性能。为提高观测器稳态性能, 还可以在模糊控制器的输出端加入一个低通滤波器。

本文应用 Matlab 的模糊控制工具箱, 对模糊控制器进行了分析, 其中图 2 为系统输入偏差的绝对值 $|e|$ 以及偏差变化率的绝对值 $|e_p|$ 的隶属函数, 图 3 为输出变量 K_p 以及 K_i 的隶属函数。其模糊推理规则如表 1、2 所示, 其推理规则由经验和实验

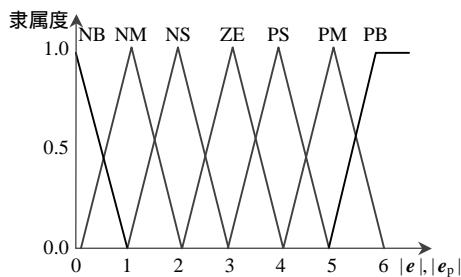


图 2 系统输入偏差 $|e|$ 以及 $|e_p|$ 的隶属函数

Fig. 2 Membership function of $|e|$ and $|e_p|$

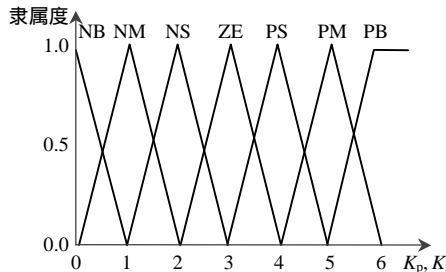


图 3 输出变量 K_p 以及 K_i 的隶属函数

Fig. 3 Membership function of K_p and K_i

表 1 K_p 的模糊控制规则表

Tab. 1 Rules of the fuzzy control for K_p

| $ e_p $ | $ e $ | | | | | | |
|---------|-------|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| NB | NB | NB | NM | NS | NS | ZE | ZE |
| NM | NB | NB | NM | NS | ZE | ZE | ZE |
| NS | NM | NM | NS | NS | ZE | PS | PS |
| ZE | NS | NS | NS | ZE | PS | PS | PS |
| PS | NS | NS | ZE | PS | PS | PM | PM |
| PM | NS | ZE | ZE | PS | PM | PB | PB |
| PB | ZE | ZE | PS | PM | PM | PB | PB |

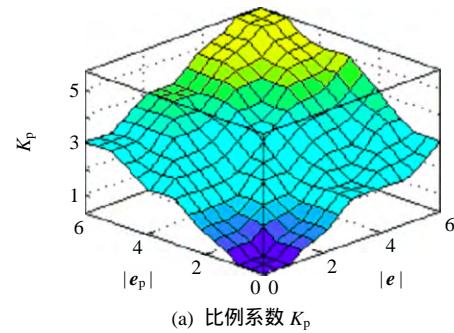
表 2 K_i 的模糊控制规则表

Tab. 2 Rules of the fuzzy control for K_i

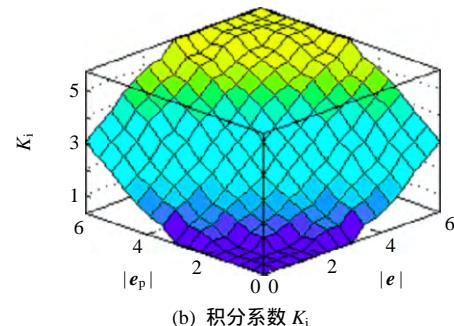
| $ e_p $ | $ e $ | | | | | | |
|---------|-------|----|----|----|----|----|----|
| | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| NB | NB | NB | NB | NB | NM | NS | ZE |
| NM | NB | NB | NB | NM | NM | NS | ZE |
| NS | NB | NB | NM | NS | ZE | PS | PM |
| ZE | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
| PS | NM | NS | ZE | PS | PM | PM | PB |
| PM | NS | ZE | PS | PM | PM | PB | PB |
| PB | ZE | PS | PM | PM | PB | PB | PB |

分析获得。

图 4 为由以上推理规则获得的模糊控制器的输入输出关系的 3D 效果图。从图 4 可以看出, 模糊控制器根据系统输入偏差及其变化率的绝对值来调整 PI 调节器的比例积分系数, 从而使 PI 调节器在电机不同的速度域都具有良好的动稳态性能。



(a) 比例系数 K_p



(b) 积分系数 K_i

图 4 模糊控制器的输入输出关系

Fig. 4 Relationship of the output and input for fuzzy controller

1.4 转速估计

已知 $\hat{e}_\alpha = -A \sin(\hat{\omega}t)$, $\hat{e}_\beta = A \cos(\hat{\omega}t)$, 经积分可得:

$$\begin{bmatrix} \hat{\psi}_\alpha \\ \hat{\psi}_\beta \end{bmatrix} = \frac{A}{\hat{\omega}} \begin{bmatrix} \cos(\hat{\omega}t) \\ \sin(\hat{\omega}t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

则可得估计转速:

$$\hat{\omega} = \frac{\sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2}}{\sqrt{\hat{\psi}_\alpha^2 + \hat{\psi}_\beta^2}} \quad (10)$$

此方法可以消除电机使用或运行过程中磁链的变化对转速估计的影响,但由于积分容易产生偏置分量,因此要对所估计的磁链进行高通滤波,以滤除偏置分量,高通滤波器导致在低速时所估计的转速偏大。为弥补低速时这种方法的不足,本文在低速时采用如式(11)的方法对转速进行估计,而在高速时对磁链常量 ψ_f 进行修正,这样就能提高低速时的转子速度估计精度。

$$\hat{\omega} = \frac{\sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2}}{\psi_f} \quad (11)$$

1.5 转子位置误差来源分析及补偿

模糊 PI-MRAS 观测器转子位置的误差来源主要有:1)为提高电流电压信号的检测精度,去除高频噪声信号,在信号检测电路中设置了低通滤波器,当电流电压信号通过低通滤波器时会产生相位延迟,设其产生的相位延迟误差为 θ_{ef} ;2)系统响应时间(所采用的算法在控制器运行中所占用的时间周期)导致的相位延迟误差 θ_{es} ;3)模糊 PI-MRAS 观测器的估计误差与上述两个误差相比已经变的很小,可以忽略。系统输出的估计转子位置角度为

$$\hat{\theta} = \theta - \theta_{ef} \quad (12)$$

则真实转子位置角度为

$$\theta = \hat{\theta} + \theta_{ef} \quad (13)$$

其中,

$$\theta_{ef} = \theta_{es} + \theta_{ef} \quad (14)$$

低通滤波器的相位延迟误差为

$$\theta_{ef} = \arctan\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \quad (15)$$

式中: ω 为转子电角速度; ω_c 为低通滤波器的截止角频率。

系统响应时间导致的相位延迟误差为

$$\theta_{es} = \frac{\Delta T}{T_\omega} \times 2\pi \quad (16)$$

式中: ΔT 为系统响应时间常数; T_ω 为转子旋转一个电角度周期所用的时间。

2 仿真分析

本文选取4kW纯电磁磁轴承表贴式高速永磁同步电机来验证基于模糊 PI-MRAS 观测器的可行性,搭建了系统 Simulink 仿真模型,并进行了仿真

研究。电机在20时的参数如表3所示。仿真参数设为固定步长,步长取0.00002,算法为ode3,图5为系统的矢量控制原理图。

表3 样机参数

Tab. 3 Prototype parameters

| 参数 | 取值 |
|--------------------------|--------------------|
| 相电阻 $R/m\Omega$ | 40 |
| 交直轴电感 L/mH | $L_d = L_q = 0.17$ |
| 反电势系数 $K_e/(mV/(r/min))$ | 4.15 |
| 相磁链峰值 ψ_f/Wb | 0.04 |
| 极对数 P | 1 |
| 额定转速 $n/(r/min)$ | 30000 |

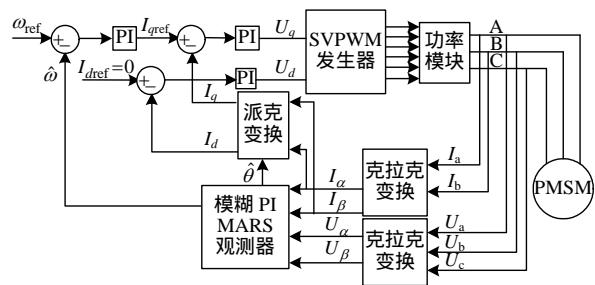


图5 系统的矢量控制原理图

Fig. 5 Schematic of the vector control

图6为基于模糊 PI-MRAS 观测器以及常用的基于 PI-MRAS 观测器对高速永磁同步电机低速区域(500 r/min)转子位置检测的仿真波形。从仿真结果来看,低速时,模糊 PI-MRAS 观测器能有效抑制振荡,可实现转子位置的较高精度检测;而 PI-MRAS 观测器所估计的转子位置在平衡点有小幅振荡,使转子位置的估计精度降低。

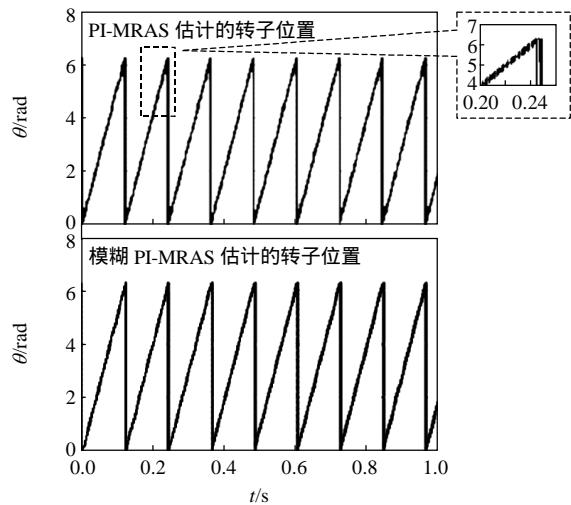


图6 低速区域(500 r/min)HSPMSM 位置检测仿真波形

Fig. 6 Simulation curve of the HSPMSM rotor's position in low speed region (500 r/min)

图 7 为基于模糊 PI-MRAS 观测器以及常用的基于 PI-MRAS 观测器对高速永磁同步电机中低速区域(2 000 r/min)转子位置检测的仿真波形。从仿真结果来看, 模糊 PI-MRAS 观测器与 PI-MRAS 观测器在中低速时都有较好的动稳态性能, 可以很好的跟踪转子的实际位置。

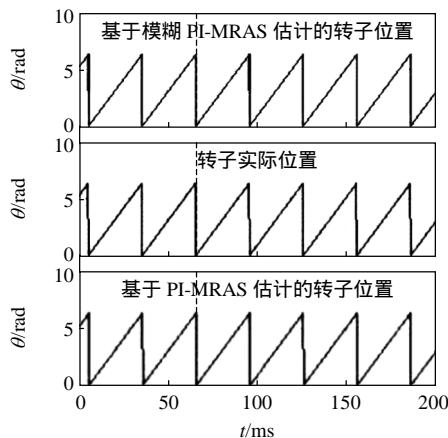


图 7 中低速区域(2 000 r/min)HSPMSM 位置检测仿真波形

Fig. 7 Simulation curve of the HSPMSM rotor's position in middle low speed region (2 000 r/min)

图 8 为基于模糊 PI-MRAS 观测器以及常用的基于 PI-MRAS 观测器对 HSPMSM 高速区域(21 000 r/min)时转子位置检测的仿真波形。从仿真结果来看, 模糊 PI-MRAS 观测器在高速区域仍有良好的动态性能, 可以很好的跟踪转子实际位置, 而 PI-MRAS 观测器所观测到的转子位置则有较大的延迟。

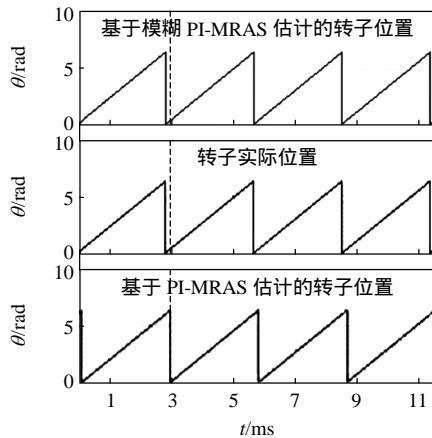
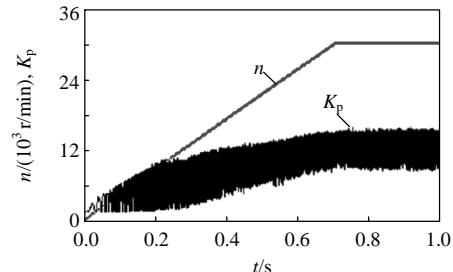


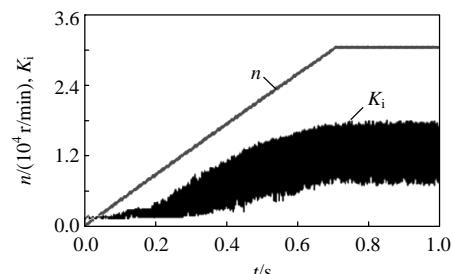
图 8 高速区域(21 000 r/min)HSPMSM 位置检测仿真波形

Fig. 8 Simulation curve of the HSPMSM rotor's position in low speed region (21 000 r/min)

图 9 为模糊控制器对 K_p 、 K_i 的调节作用随电机转速的变化趋势, 可以看出其输出的 K_p 、 K_i 的变化趋势为随电机转速的升高而增大。



(a) K_p 随转速的变化趋势



(b) K_i 随转速的变化趋势

图 9 PI 调节器的比例积分系数 K_p 、 K_i 随电机转速的变化趋势

Fig. 9 Variation tendency of the K_p and K_i following the speed of the motor

3 实验结果分析

为了验证本文所提方法的实用性, 本文选取与仿真参数相同的永磁同步电机进行实验, 搭建高速永磁同步电机控制系统的实验平台。采用的控制策略为 $I_d=0$ 矢量控制, 电机所带负载为风机负载, 功放模块采用三菱 IPM(PM25RLA120), 设定其开关频率为 10 kHz, 所估计的转子位置通过外接的 DA(TLV5614) 芯片输出到示波器。图 10 为系统实物图。图 11 为控制系统的硬件结构框图。



图 10 系统实物图

Fig. 10 Photo of the system

图 12 为模糊 PI-MRAS 观测器估计的两相静止定子坐标系下的反电动势波形。

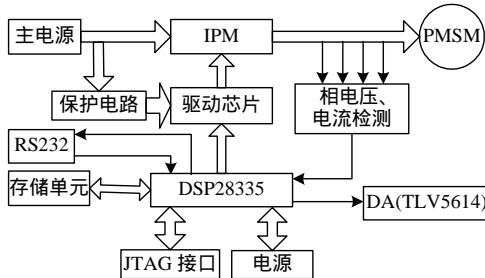


图 11 控制系统硬件结构框图

Fig. 11 Schematic of the hardware structure

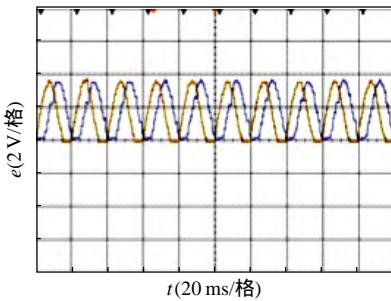


图 12 模糊 PI-MRAS 观测器估计的两相定子坐标系下的反电动势波形

Fig. 12 Experimental curve of the e.m.f. for the fuzzy PI MRAS

图 13 为低速(500 r/min)时基于模糊 PI-MRAS 观测器以及基于传统 PI-MRAS 观测器的实验波形图(图中的矩形波为电机安装的离散霍尔传感器的信号,其上升沿延迟于电机 A 相反电动势 30°电角度)。从图 13 可以看出,在低速时,模糊 PI-MRAS 观测器所检测的转子位置角度的振荡幅度远小于 PI-MRAS 观测器检测的转子位置角度的振荡幅度。

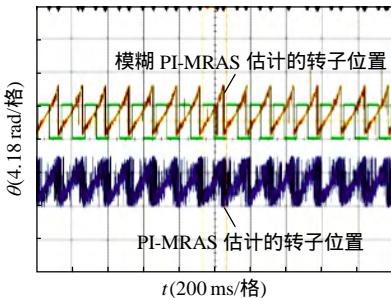
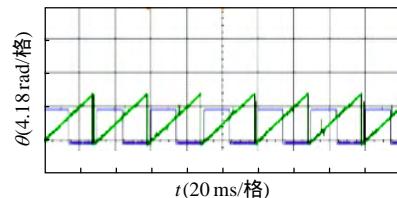


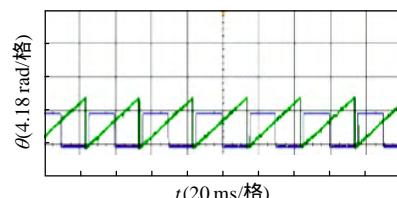
图 13 低速(500 r/min)时模糊 PI-MRAS 以及 PI-MRAS 观测器的转子位置估计波形

Fig. 13 Experimental curve of the HSPMSM rotor's position in low speed region (about 500 r/min) for fuzzy PI MRAS and PI MRAS

图 14 给出中低速(2 000 r/min)时基于模糊 PI-MRAS 观测器以及基于传统 PI-MRAS 观测器的实验波形图。从图 14 可以看出,在中低速时,模糊 PI-MRAS 观测器与 PI-MRAS 观测器都可以较好



(a) 模糊 PI-MRAS 估计的转子位置



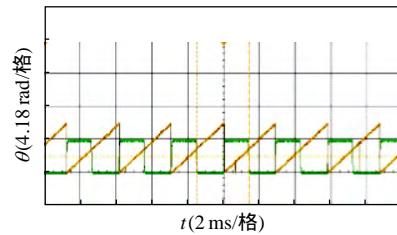
(b) PI-MRAS 估计的转子位置

图 14 中低速(2 000 r/min)时模糊 PI-MRAS 以及 PI-MRAS 的转子位置估计波形

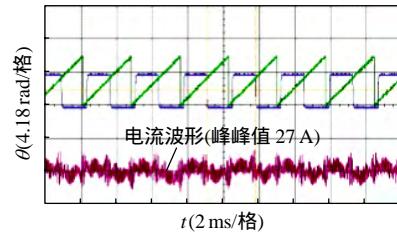
Fig. 14 Experimental curve of the HSPMSM rotor's position in middle low speed region (2 000 r/min) for fuzzy PI MRAS and PI MRAS

地检测转子位置。

图 15 为 21 000 r/min 时基于 PI-MRAS 观测器以及基于 PI-MRAS 观测器的实验波形图。从图 15 可以看出,当转速升高时,由于 PI-MRAS 观测器的动态性能不再满足系统的要求,其所检测的转子位置有一定的延迟,而模糊 PI-MRAS 观测器动态特性较好,仍然能较好的跟踪转子的实际位置。



(a) PI-MRAS 估计的转子位置



(b) 模糊 PI-MRAS 估计的转子位置

图 15 约 21 000 r/min 时模糊 PI-MRAS 观测器及 PI-MRAS 观测器的波形图

Fig. 15 Experimental curve of the HSPMSM rotor's position in high speed region (21 000 r/min) for fuzzy PI MRAS and PI MRAS

4 结论

针对高速永磁同步电机的特点,本文提出了一

种基于模糊 PI 自适应调节器的模型参考自适应观测器，通过仿真和实验实现了高速永磁同步电机在高、中、低速度域内的转子位置检测，并与传统的基于 PI 自适应调节器的模型参考自适应观测器进行了比较，得到如下结论：

1) 传统的基于 PI 自适应调节器的模型参考自适应观测器对电机转子的位置检测只在电机某一转速区域拥有较好的动稳态性能，所检测角度在低速时有小幅振荡，高速时存在延迟；

2) 模糊 PI 模型参考自适应观测器在高中低速时都有良好的动稳态性能，抑制了角度的低速振荡并减小了高速延迟，提高了高速永磁同步电机较宽速度域内的转子的位置检测精度；

3) 理论和实验证明，与传统 PI 模型参考自适应观测器相比，本文所提出的方法更适合转速高、调速范围宽、反电动势系数小的高速永磁同步电机转子位置检测。

致 谢

本文中实验方案的制定和实验数据的测量记录工作是在北京海斯德电机技术有限公司陈彦鹏、王鹏、冯锐等工作人员的大力支持下完成的，在此向他(她)们表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Mohamed A S ,Zaky M S ,Ashraf S Z ,et al .Comparative study of sensorless control methods of PMSM drives[J] . Innovative Systems Design and Engineering ,2011 ,2(5) : 44-67 .
- [2] Agarlita S C . High frequency injection assisted “active-flux”-based sensorless vector control of reluctance synchronous motors , with experiments from zero speed[J] . IEEE Transactions on Industry Applications , 2012 , 48(6) : 1931-1939 .
- [3] 胡家冰,贺益康,年珩,等.基于磁饱和凸极效应的面贴式 PMSM 零速下无传感器技术[J].中国电机工程学报, 2006 , 26(10) : 152-157 .
Hu Jiabing ,He Yikang ,Nian Heng ,et al .The zero-speed sensorless control for surface mounted PMSM based on the magnetic-saturation saliency-effect[J] . Proceedings of the CSEE , 2006 , 26(10) : 152-157(in Chinese) .
- [4] 王子辉,陆凯元,叶云岳.基于改进的脉冲电压注入永磁同步电机转子初始位置检测方法[J].中国电机工程学报, 2011 , 31(36) : 95-101 .
Wang Zihui ,Lu Kaiyuan ,Ye Yunyue . Initiaik position estimation method for permanent magnet synchronous motor based on improved pulse voltage injection[J] . Proceedings of the CSEE , 2011 , 31(36) : 95-101(in Chinese) .
- [5] 万山明,吴芳,黄声华.基于高频电压信号注入的永磁同步电机转子初始位置估计[J].中国电机工程学报, 2008 , 28(33) : 82-86 .
Wan Shanming ,Wu Fang ,Huang Shenghua . Initial rotor position estimation of permanent magnet synchronous motor based on high frequency voltage signal injection method[J] . Proceedings of the CSEE , 2008 , 28(33) : 82-86(in Chinese) .
- [6] 苏健勇,杨贵杰,李铁才.PMSM 扩展状态滑模观测器及转子位置和速度估算[J].电机与控制学报, 2008 , 12(5) : 524-528 .
Su Jianyong ,Yang Guijie ,Li Tiecai . Extended state sliding mode observer of PMSM and estimation of rotor position plus speed[J] . Electric Machines and Control , 2008 , 12(5) : 524-528(in Chinese) .
- [7] Qiao Zhaowei , Shi Tingna , Wang Yindong . New sliding-mode observer for position senseless control of permanent-magnet synchronous motor[J] . IEEE Transactions on Industry Electronics , 2013 , 60(2) : 710-719 .
- [8] 丁文,梁得亮,罗战强.两级滤波滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J].电机与控制学报, 2012 , 16(11) : 1-10 .
Ding Wen ,Liang Deliang ,Luo Zhanqiang . Position sensorless control of PMSM using sliding mode observer with two-stage filter[J] . Electric Machines and Control , 2012 , 16(11) : 1-10(in Chinese) .
- [9] Kim H ,Son J ,Lee J .A high-speed sliding-mode observer for the sensorless speed control of a PMSM[J] . IEEE Transactions on Industrial Electronics , 2011 , 58(9) : 4069-4077 .
- [10] 苏健勇,李铁才,杨贵杰.基于四阶混合滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J].中国电机工程学报, 2009 , 29(24) : 98-103 .
Su Jianyong ,Li Tiecai ,Yang Guijie . PMSM sensorless control based on four-order hybrid sliding mode observer[J] . Proceedings of the CSEE , 2009 , 29(24) : 98-103 .
- [11] 尚喆,赵荣祥,窦汝振.基于自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制研究[J].中国电机工程学报, 2007 , 27(3) : 23-27 .
Shang Zhe ,Zhao Rongxiang ,Dou Ruzhen . Research on sensorless control method of PMSM based on an adaptive sliding mode observer[J] . Proceedings of the CSEE , 2007 , 27(3) : 23-27(in Chinese) .
- [12] 尹忠刚,张瑞峰,钟彦儒,等.基于抗差扩展卡尔曼滤波器的永磁同步电机转速估计策略[J].控制理论与应用, 2012 , 29(7) : 921-927 .

- Yin Zhonggang, Zhang Ruirong, Zhong Yanru, et al. Speed estimation for permanent magnet synchronous motor based on robust extended Kalman filter[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(7): 921-927(in Chinese).
- [13] 吕华芬, 叶云岳. 基于 MRAS 的低速永磁电机的无位置传感器控制[J]. *机电工程*, 2012, 29(3): 307-310. Lü Huafen, Ye Yunyue. Sensor-less control of low-speed PMSM based on MRAS[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2012, 29(3): 307-310(in Chinese).
- [14] 齐放, 邓智泉, 仇志坚, 等. 基于 MRAS 的永磁同步电机无速度传感器[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(4): 53-58. Qi Fang, Deng Zhiqian, Qiu Zhijian, et al. Sensorless technology of permanent magnet synchronous motors based on MRAS[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(4): 53-58(in Chinese).
- [15] 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. Adaptive flux estimation and parameters identification of induction motors based on model reference approach[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(1): 65-69(in Chinese).
- [16] 申忠宇, 赵瑾, 顾幸生, 等. 基于 T-S 模型的鲁棒模糊滑模观测器 LMI 设计方法[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2009, 40(1): 43-47. Shen Zhongyu, Zhao Jin, Gu Xingsheng, et al. Design of robust fuzzy sliding-mode observer based on T-S model by LMI approach[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2009, 40(1): 43-47(in Chinese).
- [17] 李聪, 尹文庆, 冯学斌, 等. 基于模糊自适应 PI 控制的无刷直流电机无级调速系统[J]. *机电工程*, 2012, 29(1): 49-52. Li Cong, Yin Wenqing, Feng Xuebin, et al. Brushless DC motor stepless speed regulation system based on fuzzy adaptive PI controller[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2012, 29(1): 49-52(in Chinese).
- [18] Lee J H. On methods for improving performance of pi-type fuzzy logic controllers[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, 1(4): 298-301.
- [19] Rajani K M, Nikhil R P. A self tuning fuzzy PI controller[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 115(2): 327-338.
- [20] 王耀南, 张细政, 杨民生. 永磁同步电机的 T-S 模型模糊变结构鲁棒控制[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(27): 75-82. Wang Yaonan, Zhang Xizheng, Yang Minsheng. Robust fuzzy variable structure control of T-S model based for permanent magnet synchronous motor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(27): 75-82(in Chinese).



收稿日期: 2013-09-04。

作者简介:

张洪帅(1988), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动;
王平(1956), 男, 教授, 研究方向为电力传动与控制系统;

张洪帅 韩邦成(1974), 男, 副教授, 研究方向为磁悬浮技术及应用、多学科设计优化。

(责任编辑 李婧妍)