

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.05.010

# 带有前置和后置滤波器的滑模观测器仿真研究

彭志香, 陈卫兵, 成传柏, 尹康

(湖南工业大学 计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为了减小电流噪声对于滑模观测器的影响以及降低滑模观测器控制算法对于硬件的要求, 设计了带有前置滤波器和后置滤波器的滑模观测器, 并利用李雅普诺夫稳定性理论推导了滑模控制系统的稳定性条件。通过仿真实验证明了该滑模观测器能实时地跟踪到准确的转子角度信息, 控制系统具有较强的鲁棒性, 运行稳定可靠。

**关键词:** 滑模观测器; 前置滤波器; 后置滤波器; 李雅普诺夫稳定性理论

**中图分类号:** TM301.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2013)05-0044-05

## A Simulation Research of Sliding Mode Observer with Pre-Filter and Post-Filter

Peng Zhixiang, Chen Weibing, Cheng Chuanbo, Yin Kang

(School of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In order to reduce the impact of current noises to sliding mode observer and the requirements of sliding mode observer control algorithm to hardware, proposes a new sliding mode observer with pre-filter and post-filter and derives the stable condition of sliding mode control system by Lyapunov stability theory. The simulation experiments indicate that the sliding mode observer real-time tracks the rotor angle information accurately, and the control system has strong robustness and operates stably and reliably.

**Keywords:** sliding mode observer; pre-filter; post-filter; Lyapunov stability theory

## 0 引言

随着现代社会对能源需求的不断增加, 各国政府对节能减排越来越重视。永磁同步电机具有重量轻、损耗小、效率高、结构简单且容易维护、运行稳定可靠等特点, 在中小功率机电产品应用中能起到明显的节能效果, 引起了人们的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。永磁同步电机的精确控制需要可靠的电机转子位置信息, 目前控制系统多采用光电编码器、旋转变压器等位置传感器获取电机反馈的转子位置。但是高性能位置传感器不仅价格昂贵, 安装困难, 且易受环

境因素的影响, 因而限制了其应用。因此, 无位置传感器控制算法成为了人们研究的热点<sup>[3-4]</sup>。

在无位置传感器算法研究中, 变结构控制系统得到了人们的广泛关注。文献[5]中的滑模观测器采用 sigmoid 函数代替传统滑模切换函数, 因而减小了系统抖动, 并设计了反电势观测器提取反电势信息计算角度, 通过仿真实验证明了该控制系统具有较强的鲁棒性和抗干扰能力。文献[6]结合 T-S 模型和滑模技术设计一种自适应模糊滑模控制器, 改善了系统的跟踪性能和鲁棒性。文献[7]中的位置环采用

收稿日期: 2013-07-04

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(12JJ3072), 科技部国家国际科技合作专项基金资助项目(2013DFG52740)

作者简介: 彭志香(1988-), 男, 湖北武汉人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为嵌入式系统,

E-mail: 619516494@qq.com

自适应滑模观测器,速度环采用模糊滑模观测器,通过仿真实验证明了系统具有良好的动态性能和稳态性能。文献[8]采用新型电流观测模型,构造自适应滑模观测器,并通过实验证明了系统具有良好的鲁棒性和稳定性。文献[9]在滑模观测器中采用锁相环系统提取反电势信息,有效地降低了反电势中高频分量对角度估量的影响。文献[10]采用高频电压信号注入法对转子位置及转子速度进行估算,并用实验证明了该系统在很宽的调速范围内都有很好的动态性能和稳态性能。文献[11]提出两种滑模观测器控制策略,一种是根据速度设计相位补偿,减小因反电势滤波造成的相位差,以获取准确的角度信息;另外一种提出新的滑模观测器结构(iterative sliding mode observer, I-SMO),有效地减小了输入信号以及反电势干扰,使信号更加平滑。

已有研究都能从某一方面改善控制系统的性能,但对硬件要求较高,且没能很好地消除电流噪声的影响。为此,在仔细分析电流噪声的基础上,本文提出了一种对硬件要求较低、能有效减小反馈电流噪声影响的带有前置滤波器和后置滤波器的滑模观测器模型,并推导了系统渐进稳定性条件。仿真实验结果表明,系统具有较强的鲁棒性、实时性、稳定性和可靠性。

## 1 滑模控制器的设计

### 1.1 永磁同步电机数学模型

表面式永磁同步电机 ( $L_d=L_q=L_s$ ) 模型:

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_s + \frac{1}{L_s} V_s - \frac{1}{L_s} e_s, \quad (1)$$

$$e_\alpha = -w_r \psi_f \sin \theta, \quad (2)$$

$$e_\beta = w_r \psi_f \cos \theta, \quad (3)$$

式(1)~(3)中:  $i_s = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ ,  $i_\alpha$  为  $\alpha$  轴电流,  $i_\beta$  为  $\beta$  轴电流;

$V_s = [V_\alpha \ V_\beta]^T$ ,  $V_\alpha$  为  $\alpha$  轴电压,  $V_\beta$  为  $\beta$  轴电压;

$e_s = [e_\alpha \ e_\beta]^T$ ,  $e_\alpha$  为  $\alpha$  轴反电势,  $e_\beta$  为  $\beta$  轴反电势;

$R_s$  为定子绕组电阻,  $L_s$  为定子绕组电感;

$w_r$  为转子电角速度;

$\psi_f$  为永磁体磁链;

$\theta$  为转子电角度。

### 1.2 滑模观测器的数学模型及稳定性推导

由电机数学模型可以看出,可以通过电机反馈的电流信息获取转子角度信息,因此,根据电机数学模型,定义滑模面  $S(X) = \hat{i}_s - i_s = \bar{i}_s = 0$ , 构造滑模观测器如式 4 所示:

$$\frac{d\hat{i}_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_s + \frac{1}{L_s} V_s - K \text{sign}(\hat{i}_s - i_s), \quad (4)$$

其中:  $\hat{i}_s = [\hat{i}_\alpha \ \hat{i}_\beta]^T$ ,  $\hat{i}_\alpha$  为  $\alpha$  轴预估电流,  $\hat{i}_\beta$  为  $\beta$  轴预估电流;

$$\bar{i}_s = [\hat{i}_\alpha - i_\alpha \ \hat{i}_\beta - i_\beta]^T;$$

$K$  为切换增益。

为了研究系统的稳定性,构造李雅普诺夫函数

$$V(X) = S(X)^T S(X). \quad (5)$$

将式(1)~(4)代入式(5),可得

$$V(X) = (\hat{i}_\alpha - i_\alpha)^2 + (\hat{i}_\beta - i_\beta)^2, \quad (6)$$

即有  $V(X)$  正定。

对  $V(X)$  求导有

$$\dot{V}(X) = 2 \left( \hat{i}_\alpha - i_\alpha \right) \left[ -\frac{R_s}{L_s} (\hat{i}_\alpha - i_\alpha) - K \text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) + \frac{1}{L_s} e_\alpha \right] + 2 \left( \hat{i}_\beta - i_\beta \right) \left[ -\frac{R_s}{L_s} (\hat{i}_\beta - i_\beta) - K \text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta) + \frac{1}{L_s} e_\beta \right]. \quad (7)$$

为了保证滑模运动的存在性和可达性以及系统的渐进稳定性,令  $\dot{V}(X)$  负定, 即有:

$$\text{当 } \hat{i}_\alpha - i_\alpha > 0, \hat{i}_\beta - i_\beta > 0 \text{ 时, } K > \frac{1}{L_s} e_\alpha, K > \frac{1}{L_s} e_\beta;$$

$$\text{当 } \hat{i}_\alpha - i_\alpha < 0, \hat{i}_\beta - i_\beta < 0 \text{ 时, } K < \frac{1}{L_s} e_\alpha, K < \frac{1}{L_s} e_\beta;$$

当  $\hat{i}_\alpha - i_\alpha = 0, \hat{i}_\beta - i_\beta = 0$  时,  $V(X) = \dot{V}(X) = 0$ , 系统达到滑模状态。

即当  $K > \max \left( \left| \frac{1}{L_s} e_\alpha \right|, \left| \frac{1}{L_s} e_\beta \right| \right)$  时, 系统将做滑模

运动, 系统状态最终收敛于滑模面。

### 1.3 滑模观测器的设计

为了获得准确的转子位置信息,常采用较为复杂的滑模观测器结构算法,因而需要高性能的数字信号处理芯片(digital signal processor, DSP),但这类高性能芯片价格一般较为昂贵,并且根据实际电机控制需求,也会导致芯片大多数功能用不上,造成资源浪费。另外,出于成本考虑,电流采样常采用三电阻采样的方式去获得反馈电流信息,但是一般电流信号噪声较大。基于低成本实际应用考虑设计了带有前后滤波器的滑模观测器,结构如图1。

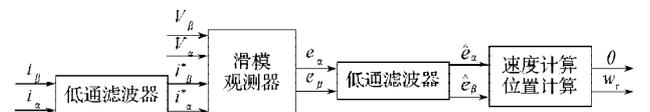


图1 改进的滑模观测器模型

Fig. 1 Improved sliding mode observer model

反馈的三相电流经过 CLARKE 变换之后得到  $i_\alpha$  和  $i_\beta$ ，它们经过前置滤波器后，减小了反馈电流信号噪声的干扰，获得平滑的电流信号  $i_\alpha^*$  和  $i_\beta^*$ 。同时，经过滑模观测器 (sliding mode observer, SMO) 的计算，获得反电势  $e_\alpha$  和  $e_\beta$ ，此时反电势信号含有大量的高次谐波信号，采用后置滤波器提取反电势信息并且滤除高次谐波的干扰，最后，通过位置速度计算模块，获得转子位置信息  $\theta$  和转速信息  $w_r$ ：

$$\theta = -\arctan\left(\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}\right), \quad (8)$$

$$w_r = \frac{\sqrt{(\hat{e}_\alpha)^2 + (\hat{e}_\beta)^2}}{\psi_f}, \quad (9)$$

式(8)~(9)中： $\hat{e}_\alpha$ 为 $\alpha$ 轴滤波之后的反电势；  
 $\hat{e}_\beta$ 为 $\beta$ 轴滤波之后的反电势。

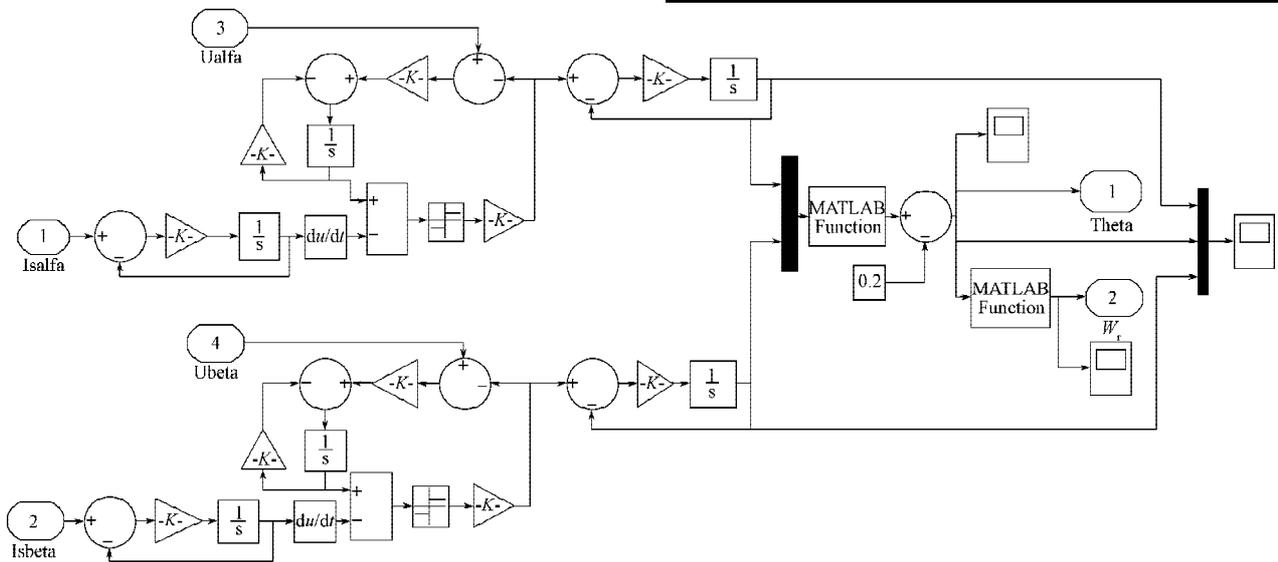


图2 滑模观测器的仿真模型

Fig. 2 The simulation model for sliding mode observer

根据上述仿真模型及电机参数，设置滑模观测器模型中的前置滤波器截止频率为  $f=2\ 400\ \text{Hz}$ ，切换增益为  $K=100$ ，后置滤波器截止频率为  $f=100\ \text{Hz}$ ，然后进行仿真实验。电机初始给定转速  $w_r=100\ \text{rad/s}$ ，初始负载转矩为  $T_o=2\ \text{N}\cdot\text{m}$ ；在  $0.04\ \text{s}$  时给定转速  $w_r$  由  $100\ \text{rad/s}$  跃变为  $150\ \text{rad/s}$ ，负载转矩不变；在  $0.1\ \text{s}$  时，给定转速不变，负载转矩  $T_o$  由  $2\ \text{N}\cdot\text{m}$  跃变为  $6\ \text{N}\cdot\text{m}$ ，系统仿真结果如图 3~5 所示。

图 3 是前置滤波器作用下的电流波形。从图 3 中可以看出：由三相电流进行 CLARKE 变换得到的  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴电流纹波较大，电流纹波峰峰值接近  $0.4\ \text{A}$ ；经过前置滤波器，得到较为平滑的  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴电流信号，几乎看不到纹波，减小了电流噪声对于反电势估算的影响。

## 2 仿真实验及结果分析

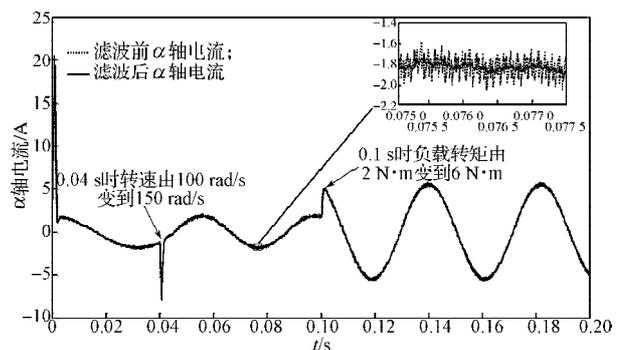
基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了带有前置滤波器和后置滤波器的滑模观测器仿真模型，如图 2 所示。表 1 为表面式永磁同步电机模型参数。

表1 永磁同步电机参数表

Table 1 Parameters of permanent magnet synchronous motor

参 数	数 值
额定电压 $V/\text{V}$	300
额定负载转矩 $T_o/\text{N}\cdot\text{m}$	8
额定转速 $n_N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	2 000
定子电阻 $R_s/\Omega$	0.958 5
定子电感 $L_s/\text{H}$	0.005 25
永磁体磁链 $\psi_f/\text{Wb}$	0.182 7
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 632 9
极对数 $p$	4

图 4 是反电势和转子角度波形。从图 4 中可以看出：经由后置滤波器滤波之后的反电势信号较为平滑，高次谐波干扰很少，且可以获得较为准确的转子位置角度。



a)  $\alpha$ 轴电流波形

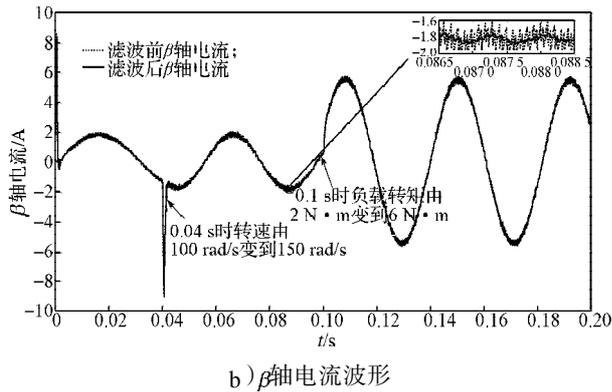


图3 前置滤波器作用电流波形

Fig. 3 Current waveforms with pre-filter

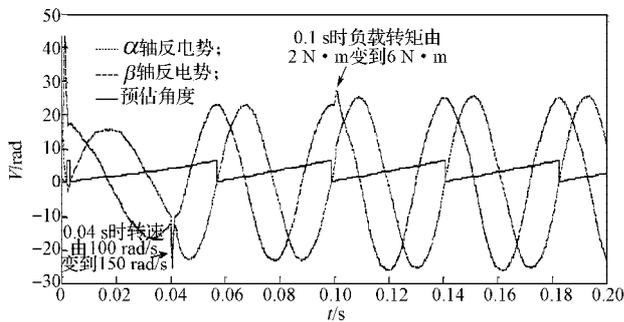


图4 反电势和转子角度波形

Fig. 4 The waveforms of back electromotive force and rotor angle

图5是系统状态响应波形。从图5中可以看出：仿真实验主要分为电机启动、转速改变、负载扰动3个阶段。

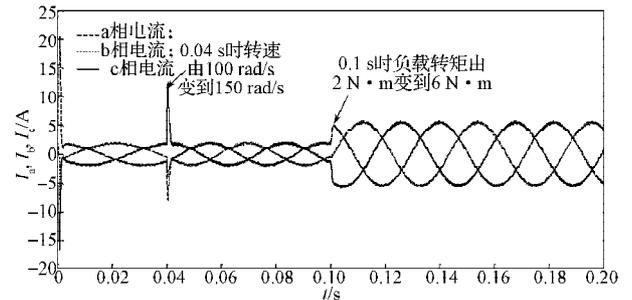
1) 电机启动。初始给定速度  $w_r=100 \text{ rad/s}$ ，负载转矩  $T_o=2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。从图5a, 5c可以看出，电机启动时，三相电流增大，转速增加；当转速接近给定转速时，电流开始减小；之后转子转速稳定在  $w_r=100 \text{ rad/s}$ ，系统稳定运行。从图5b可以看出，由于电机启动电流较大，预估角度有小幅误差，但系统能够很快地达到稳定工作状态，及时地跟踪到较准确的转子位置信息。

2) 转速改变。电机启动之后运行稳定，为在  $t=0.04 \text{ s}$  时，改变给定转速  $w_r=150 \text{ rad/s}$ ，负载转矩仍为  $T_o=2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。从图5a, 5c可以看出，给定转速增加，三相电流增大，转速增加；实际转速接近给定转速时，三相电流减小；之后，转子转速有小幅超调并很快稳定在  $w_r=150 \text{ rad/s}$ 。从图5b可以看出，此阶段转速改变导致电流变化较大，但转子角度预估受到较小影响，同时角度变化斜率发生明显改变并准确跟踪到实际转子角度，这表明系统能够及时地跟踪到转子位置信息。

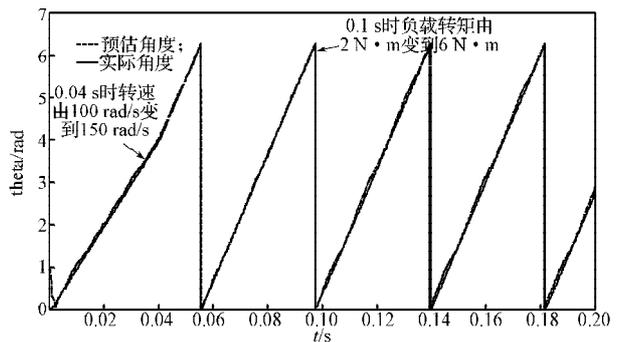
3) 负载扰动。在  $t=0.04 \text{ s}$  到  $t=0.1 \text{ s}$  之间，系统稳定运行，转速稳定在  $150 \text{ rad/s}$ 。在  $t=0.1 \text{ s}$  时，保持给

定速度  $w_r=150 \text{ rad/s}$ ，改变负载转矩为  $T_o=6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。从图5a, 图5c可以看出，负载转矩增加，三相电流幅值增大，转速出现小幅度降低，在较短时间内转速恢复到  $w_r=150 \text{ rad/s}$ ，系统继续稳定运行。从图5b可以看出转子角度预估受到的影响很小，系统能在较短时间内恢复稳定运行。

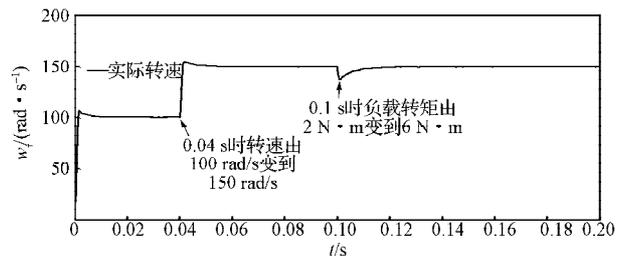
仿真结果证明了由该滑模观测器构成的永磁同步电机控制系统具有及时的响应速度和较强的鲁棒性，系统运行稳定可靠。



a) 三相电流波形



b) 预估转子角度和实际转子角度



c) 速度响应波形

图5 系统状态响应波形

Fig. 5 System status response waveforms

### 3 结语

基于永磁同步电机空间电压矢量控制算法，设计了带有前置滤波器和后置滤波器的滑模观测器，以获取反馈的转子位置信息，实现了永磁同步电机的无位置控制。仿真结果表明：带有前置滤波器和后置滤波器的滑模观测器能及时地获取较为准确的转子角度，系统对转速变化和负载扰动具有较强的

鲁棒性,且运行稳定可靠,表现出良好的动态特性和抗干扰能力。控制算法简单易实现,对于硬件要求较低,具有较高的实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 秦灿华,刘连根,曹洋,等. MW级永磁同步电机无速度传感器矢量控制研究[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(1): 37-40.  
Qin Canhua, Liu Liangen, Cao Yang, et al. Research on Sensorless Vector Control of MW Turbine Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(1): 37-40.
- [2] 周国栋,张墩利. 基于协议的智能永磁同步电机控制从站研制[J]. 湖南工业大学学报, 2011, 25(1): 98-100.  
Zhou Guodong, Zhang Dunli. Study on Controller Node of Intelligent PMSM Based on CANopen Protocol[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2011, 25(1): 98-100.
- [3] 丁炜,狄可可,齐冬莲,等. 基于SMO的PMSM无位置传感器算法研究[J]. 电测与仪表, 2009, 46(8): 8-12.  
Ding Wei, Di Keke, Qi Donglian, et al. Research on Sensorless Algorithm of PMSM Based on an Adaptive Sliding Mode Observer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(8): 8-12.
- [4] 曾光华,陈卫兵,邹豪杰,等. 基于STM32的无位置传感器无刷直流电机控制系统[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(1): 41-44.  
Zeng Guanghua, Chen Weibing, Zou Haojie, et al. Sensorless Brushless DC Motor Control System Based on STM32[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(1): 41-44.
- [5] Qiao Zhaowei, Shi Tingna, Wang Yindong. New Sliding-Mode Observer for Position Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 710-719.
- [6] 张细政,王耀南,袁小芳. 永磁同步电机自适应模糊滑模变结构控制[J]. 中国机械工程, 2010, 21(2): 206-211.  
Zhang Xizheng, Wang Yaonan, Yuan Xiaofang. Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Control for PM Synchronous Motor[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2010, 21(2): 206-211.
- [7] 王巍,汪玉凤,郭凤仪. 基于滑模观测器的PMSM模糊滑模控制[J]. 维特电机, 2010(8): 40-43.  
Wang Wei, Wang Yufeng, Guo Fengyi. Fuzzy Sliding Mode Control Strategy of PMSMs Based on Sliding Mode Observer[J]. Small & Special Electrical Machines, 2010(8): 40-43.
- [8] Guo Shuai, He Jinbao. Sensorless Control of PMSM Based on Adaptive Sliding Mode Observer[J]. International Journal of Modeling, Identification and Control, 2009, 7(4): 321-324.
- [9] 张蒙. 基于滑模观测器的PMSM驱动系统建模与仿真[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.  
Zhang Meng. Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Sliding Mode Observer[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011.
- [10] Foo Gilbert, Rahman M F. Sensorless Sliding-Mode MTPA Control of an IPM Synchronous Motor Drive Using a Sliding-Mode Observer and HF Signal Injection[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1270-1278.
- [11] Kang Kye-Lyong, Kim Jang-Mok. Sensorless Control of PMSM in High Speed Range with Iterative Sliding Mode Observer[C]//APEC04. Nineteenth Annual IEEE, 2004, New Jersey: IEEE, 2004: 1111-1116.

(责任编辑: 申剑)