

doi: 10.7690/bgzd.2016.09.018

## 自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制

李雪恺<sup>1</sup>, 陈勇<sup>1</sup>, 张鑫彬<sup>2,3</sup>, 鲜亚平<sup>2,3</sup>

(1. 电子科技大学能源科学与工程学院, 成都 611731; 2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;  
3. 上海伺服系统工程技术研究中心, 上海 201109)

**摘要:** 为准确获取永磁同步电机转速与转子的位置信息, 提出一种自适应滑模观测器对电机的转子位置和速度进行估算。通过对自适应切换函数、自适应低通滤波器、转子角度估算误差补偿等改进滑模观测器。仿真分析表明: 该方法能快速和准确地跟踪电机转子的位置和速度, 系统性能良好。

**关键词:** 永磁同步电机; 滑模观测器; 自适应; 无传感器控制

**中图分类号:** TP273+2 **文献标志码:** A

## Adaptive Slidingmode Observer for Position Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

Li Xuekai<sup>1</sup>, Chen Yong<sup>1</sup>, Zhang Xinbin<sup>2,3</sup>, XianYaping<sup>2,3</sup>

(1. School of Energy Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China;  
2. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;  
3. Shanghai Servo System Engineering Research Center, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** To accurately obtain the speed and rotor position of permanent magnet synchronous motor, an adaptive sliding mode observer for rotor position and speed estimating is proposed. The sliding mode observer is improved by using adaptively switching function, adaptive low-pass filter, the rotor angle estimation error compensation. Simulation results show that the proposed method can both quickly and accurately track rotor position and speed, have good system performance.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; sliding mode observer; adaptive; sensorless control

### 0 引言

永磁同步电动机因其尺寸小、效率高和噪声低, 在交流电机应用中备受欢迎, 已经被广泛应用于机床、机器人、家电等各种电器中。实现永磁同步电机高精度控制的关键在于准确获取电机转速与转子位置信息; 然而, 由编码器或旋变器作为位置传感器会增加成本和质量, 并且对电机使用环境有一定的限制, 例如对振动和温度非常敏感。基于以上原因, 用低成本、高效率无位置传感器控制技术代替电机机械位置传感器具有极其重要的实际意义。

无传感器控制技术一般是指在调速系统中, 不安装机械传感器直接测量电机的转子位置和速度, 而是利用电机可测量的电信号, 通过算法估算转子的速度和位置信息。滑模观测器具有响应快和抗干扰能力强的特点, 不需要实时估计被控对象的参数, 实现较为简单, 具有很好的鲁棒性, 已被广泛用于永磁同步电机无传感器控制系统研究<sup>[1-3]</sup>。但是, 由于采用了高频切换的开关函数, 会导致系统不断地

抖动, 不利于系统的精确控制。文献[4]提出了把滑模算法与锁相环结合的永磁同步电机无传感器技术, 在一定程度上提高了系统精度; 文献[5]把Sigmoid函数作为观测器控制函数来消除滑模抖振, 同时连续函数的引入也使系统不再需要滤波环节和相位补偿, 但是其算法较为复杂; 文献[6]使用了一种带自适应的陷波滤波器的滑模观测器, 估算结果较为准确。因此, 笔者提出一种自适应滑模观测器对电机的转子位置和速度进行估算。

### 1 永磁同步电机自适应滑模观测器设计

永磁同步电机在 $\alpha\text{-}\beta\text{-}o$ 的电流状态方程为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_\alpha}{dt} &= -\frac{R_s}{L_s}i_\alpha + \frac{1}{L_s}u_\alpha - \frac{1}{L_s}e_\alpha \\ \frac{di_\beta}{dt} &= -\frac{R_s}{L_s}i_\beta + \frac{1}{L_s}u_\beta - \frac{1}{L_s}e_\beta \\ e_\alpha &= -\varphi_f\omega\sin\theta \\ e_\beta &= \varphi_f\omega\cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中:  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  为定子电流在 $\alpha\beta$ 轴上的分量;  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$

收稿日期: 2016-05-06; 修回日期: 2016-06-15

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2013GZ0054; 2013GZX0152); 上海航天科技创新基金项目(SAST2015080)资助

作者简介: 李雪恺(1990—), 男, 河北人, 在读硕士, 从事电气工程, 电机控制, 伺服系统研究。

为定子电压在  $\alpha$ 、 $\beta$  轴上的分量； $e_\alpha$ 、 $e_\beta$  为反电势在  $\alpha$ 、 $\beta$  轴上的分量； $R_s$  为定子电阻； $L_s$  为定子电感； $\varphi_f$  为转子磁链； $\omega$  为转子角速度； $\theta$  为转子角度。

由式 (1) 可看出，反电势  $e_\alpha$ 、 $e_\beta$  包含了电机的速度  $\omega$  和位置  $\theta$  信息，速度  $\omega$  与反电势幅值成正比，位置  $\theta$  与反电势的相位相关。为了从实际应用中提取观测反电势信息，构造如下的传统滑模观测器：

定义滑模面为  $s_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha$ ， $s_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta$ ，其中  $\hat{i}_\alpha$ 、 $\hat{i}_\beta$  为永磁同步电机定子电流观测值，以符号函数  $u = k_{\text{smo}} \text{sign}(x)$  为滑模切换函数，构造滑模观测器：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} &= -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s} u_\alpha - \frac{k_{\text{smo}}}{L_s} \text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} &= -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s} u_\beta - \frac{k_{\text{smo}}}{L_s} \text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中  $k_{\text{smo}}$  为滑模观测器的切换增益，取值要满足滑模存在性、可达性和稳定性。由式 (1) 和式 (2) 得到动态误差方程：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\bar{i}_\alpha)}{dt} &= -\frac{R_s}{L_s} (\bar{i}_\alpha) - \frac{k_{\text{smo}}}{L_s} \text{sign}(\bar{i}_\alpha) + \frac{1}{L_s} e_\alpha \\ \frac{d(\bar{i}_\beta)}{dt} &= -\frac{R_s}{L_s} (\bar{i}_\beta) - \frac{k_{\text{smo}}}{L_s} \text{sign}(\bar{i}_\beta) + \frac{1}{L_s} e_\beta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $\begin{cases} \bar{i}_\alpha = (\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \bar{i}_\beta = (\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases}$  为观测器观测电流误差。

### 1.1 自适应切换函数设计

为了降低不连续函数造成的抖动问题，采用一种自适应的变饱和函数  $\text{Asat}(x)$  代替符号函数， $\delta$  即为饱和函数的边界层，其取值为一个与转速控制值相关的变量，可随电机转速控制变化自适应的变化，此时切换函数的边界层也会相应的自适应变化，这样即可对抖振进行自适应地削弱。其数学表达式为：

$$\text{Asat}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq \delta \\ x/\delta & -\delta \leq x < \delta \\ -1 & x < -\delta \end{cases} \quad (4)$$

### 1.2 变截止低通滤波器设计

在电机转速变化时，观测器观测到的观测值中含有的高频分量也会实时变化，很难达到较好的滤

波效果。笔者设计一个截止频率可调的自适应低通滤波器，其截止频率可随转速控制自适应变化，该滤波器可在转速变化时保持良好的滤波性能，能够更好地滤除包含反电势估算信息的电流误差开关信号中的高频分量，得到更为光滑的反电势估算信号。

新型低通滤波器变截止频率设计如下：

$$\omega_c = k_f \omega_{\text{ref}} + k_e \quad (5)$$

其中： $k_f$  与转速有关，且  $k_f$  为正数； $k_e$  为正常数； $\omega_{\text{ref}}$  为转速控制值； $\omega_c$  为低通滤波器截止频率。为了避免在电机启动或极低速下的变截止频率过低，导致滤波后的反电势估算信号延迟太大，使系统不能正常启动，设置  $k_e$  为一个较小的正数。

### 1.3 自适应相位补偿

在传统滑模观测器中， $\Delta\theta$  通常为定值，这使得在不同转速下，相位滞后存在补偿误差，直接导致了位置估计的不准确。笔者提出一种自适应相位滞后补偿，自适应调节不同速度和截止频率时的转子角度估算误差补偿。

自适应转子角度估算误差补偿设计为

$$\Delta\bar{\theta} = \arctan \frac{\omega_{\text{ref}}}{\omega_c} \quad (6)$$

此时，补偿后的转子位置估计值为

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}_c + \Delta\bar{\theta} \quad (7)$$

### 1.4 转子位置和速度信息估算

根据上述理论，设计自适应滑模观测器：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\bar{i}_\alpha)}{dt} &= -\frac{R_s}{L_s} (\bar{i}_\alpha) - \frac{k_{\text{smo}}}{L_s} \text{Asat}(\bar{i}_\alpha) + \frac{1}{L_s} e_\alpha \\ \frac{d(\bar{i}_\beta)}{dt} &= -\frac{R_s}{L_s} (\bar{i}_\beta) - \frac{k_{\text{smo}}}{L_s} \text{Asat}(\bar{i}_\beta) + \frac{1}{L_s} e_\beta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由滑模电流观测得出电流误差开关信号经变截止低通滤波器后，得到光滑的反电势估计信号  $\hat{e}_\alpha$ 、 $\hat{e}_\beta$ ，此时电机转速观测值由反电势幅值得到：

$$\hat{\omega}_c = \frac{\sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2}}{\varphi_f} \quad (9)$$

如图 1 所示，得到改进后的基于变饱和函数滑模观测器由滑模电流观测、自适应切换函数、自适应截止频率低通滤波器、转子位置估算、转子速度估算和自适应滞后补偿等模块组成。

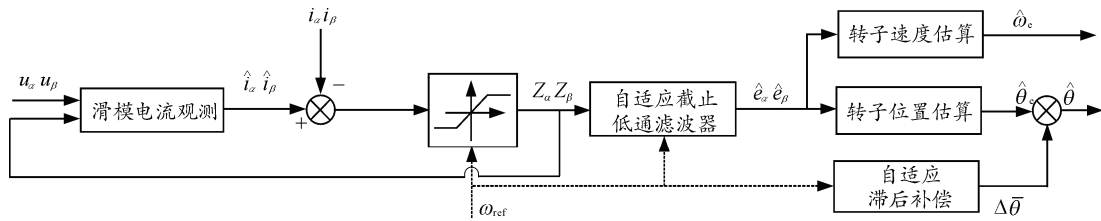


图1 自适应滑模观测器结构

## 2 自适应滑模观测器仿真分析

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系统框图如图2所示。

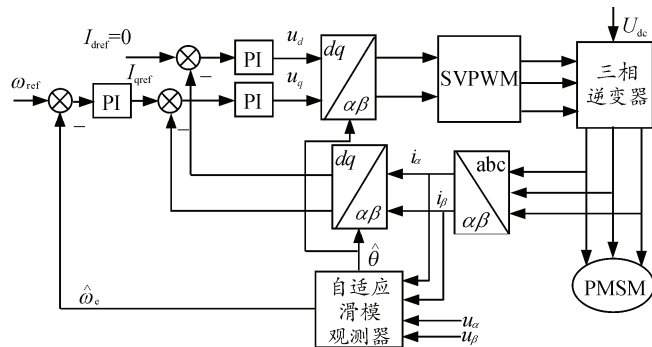


图2 基于自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制系统框图

采用双闭环电流控制算法。其滑模观测器估算电机当前转速  $\hat{\omega}_e$ ，与速度环设定值  $\omega_{ref}$  的差，经过速度PI调节得到内环  $q$  轴电流设定值  $I_{qref}$ 。 $d$  轴电流  $I_{dref}=0$ ，作为  $I_d=0$  的控制策略。 $d, q$  轴电流经过PI

调节后通过 Park 变换转换成  $\alpha, \beta$  坐标系下的电压给定分量，最后通过 SVPWM 调制，输出六路 PWM 波控制逆变器功率管的开通和关断。在系统中，坐标变换时所需位置信号亦由滑模观测器估算得到。

文中采用的电机模型参数如表1所示。

表1 永磁同步电机模型参数

模型	参数	模型	参数
定子电阻/ $\Omega$	$R=2.23$	永磁磁链/Wb	$\Psi_f=0.2865$
$d$ 轴电感/mH	$L_d=22.5$	转动惯量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	$J=0.01087$
$q$ 轴电感/mH	$L_q=22.5$	极对数	3

### 2.1 滑模观测器反电势观测分析

为了验证在不同转速下，自适应滑模观测器的速度与位置观测能力，系统空载启动，速度初值设定为 500 r/min，在 0.2 s 改变设定值为 700 r/min，在 0.35 s 变为 500 r/min。仿真结果如图 3、图 4 所示。

由图 3 可以看出：所设计的滑模观测器在电机稳定运行和速度变化时都能很好地观测出电机当前的实际速度，抖振现象不明显，电机运行较为平稳，有很好的速度观测效果。

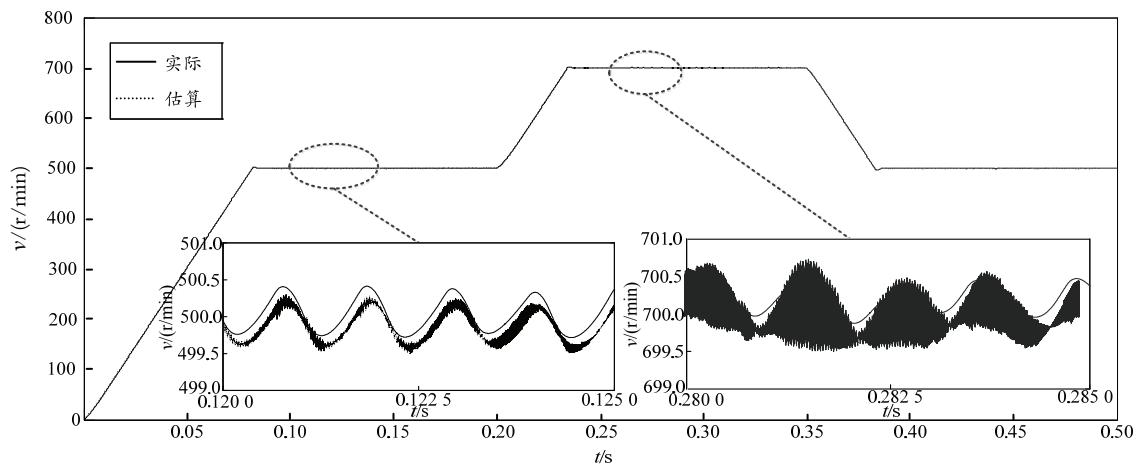


图3 自适应滑模观测器速度估算

由图 4 可以看出：在电机稳定和速度变化时，位置估算值的扰动很小，可以很好地跟随电机当前

实际位置变化；由于加了自适应的滞后补偿，位置估算误差也很小，有很好的位置观测效果。

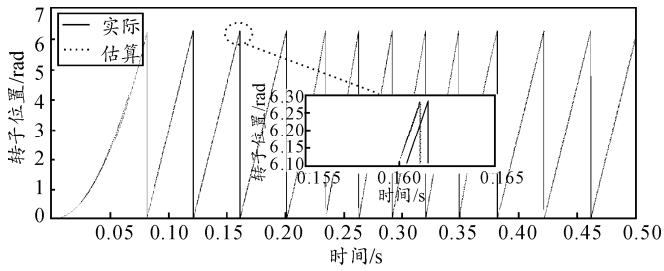


图 4 自适应滑模观测器转子位置估算

### 2.2 负载变化分析

为了验证系统在负载变化时的观测能力，系统在 0.15 s 时突加 5 N·m 的负载，在 0.25 s 时撤除负载。

由图 5、图 6 可以看出：在负载扰动时，滑模观测器的速度和位置估算值也很好地跟随了电机实际的速度和位置，电机受到的扰动很小，有很好的观测效果。

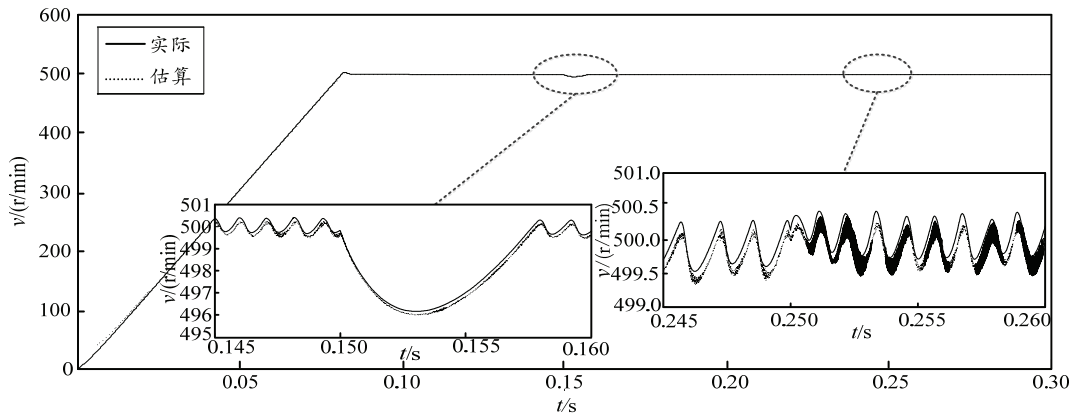


图 5 负载变化时的速度估算

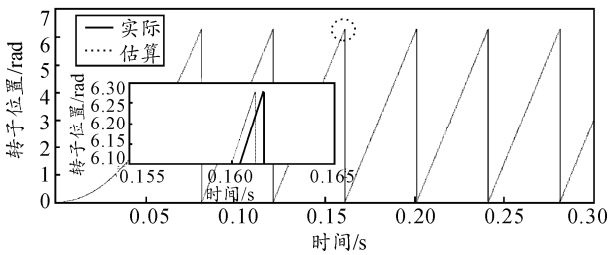


图 6 负载变化时的转子位置估算

### 2.3 电机参数变化分析

为了验证系统在电机参数变化时的观测能力，把系统的定子电阻值由 2.23 Ω 调整到 2.4 Ω，滑模观测器里的参数保持不变。系统空载启动，速度初值设定为 500 r/min，在 0.2 s 改变设定值为 700 r/min，在 0.35 s 变为 500 r/min。仿真结果如图 7、图 8 所示。

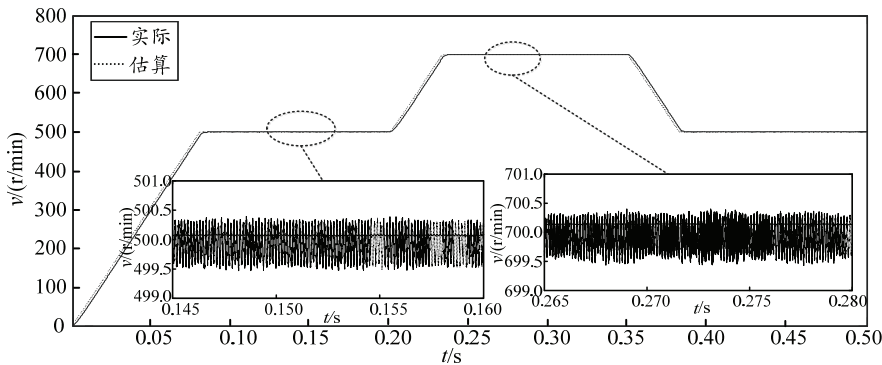


图 7 电机参数变化时的速度估算

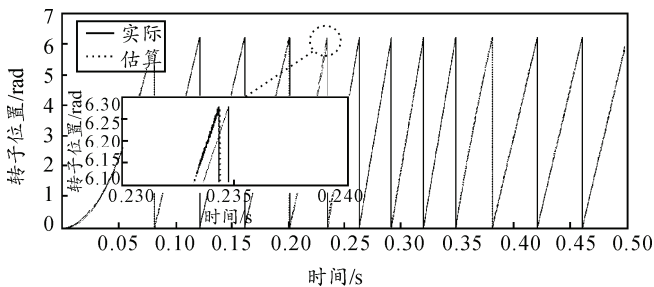


图 8 电机参数变化时的转子位置估算

由图 7 和图 8 可以看出：在电机定子电阻变化时，滑模观测器的速度观测在稳定时效果良好，可以很好地控制电机在预定速度上稳定运行，抖振现象被很好地抑制；位置估算值会在转速变化和系统稳定时都没有明显的突变，很好地跟随了实际的转子位置值，有较好的观测效果。

### 3 结论

笔者提出了一种自适应滑模观测器对电机的转

子位置和速度进行估算。

1) 所提出的边界层自适应变化的切换函数, 在很大程度上削弱了传统滑模观测器控制带来的“抖振”现象, 使观测器得出更加准确的转子位置信息。

2) 所提出的截止频率自适应变化的低通滤波器, 能够更好地滤除包含反电势估算信息的电流误差开关信号中的高频分量, 得到更为光滑的反电势估算信号。

3) 所提出的自适应相位滞后补偿方法, 可自适应调节不同速度和截止频率时的转子角度估算误差补偿。

通过分别对自适应滑模观测器位置和速度估算、负载变化和电机参数变化进行仿真分析, 验证了该自适应滑模观测器能够快速和准确地跟踪电机转子的位置和速度。该方法在一定程度上克服了基于电机模型的无位置传感器控制对电机参数的依赖性, 在负载变化和电机参数变化时仍有较好的观测效果, 具有较强的鲁棒性, 系统性能良好。

#### 参考文献:

[1] Lee H, Lee J. Design of iterative sliding mode observer for

sensorless PMSM control[J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 2013, 21(4): 1394-1399.

[2] Wang G, Yang R, Xu D. DSP-based control of sensorless IPMSM drives for wide-speed-range operation[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2013, 60(2): 720-727.

[3] 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.

[4] Wang G, Li Z, Zhang G, et al. Quadrature PLL-based high-order sliding-mode observer for IPMSM sensorless control with online MTPA control strategy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 214-224.

[5] Qiao Z, Shi T, Wang Y, et al. New sliding-mode observer for position sensorless control of permanent-magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 710-719.

[6] Zhang G, Wang G, Ni R, et al. Adaptive notch filter based harmonic self-compensated sliding-mode observer for position sensorless IPMSM drives[C]//2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia(ICPE-ECCE Asia), Korea: 2015: 1123-1128.