

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.10.019

# 基于滑模观测器的无速度传感器 技术在 PMSM 中的应用

解佳鹏

(中船重工 715 研究所,浙江 杭州 310010)

**摘要:**针对传统速度传感技术在工程应用中存在的安装精度、应用环境、成本等问题,提出了滑模观测器的无速度传感器技术,设计了基于电机模型的滑模观测器用于估算电机的转子位置和速度,针对传统的滑模变结构中采用切换开关引入的抖振问题,提出了使用饱和函数消弱抖振。在 Simulink 中进行了建模和仿真,并在基于 TMS320F2812 的实验平台上进行了算法实现。研究结果表明:基于滑模观测器的无传感器技术可精确地估算出电机转速,替代传统传感器进行双闭环矢量控制,从而提高系统的可靠性。

**关键词:**永磁同步电机;滑模观测器;无速度传感器;DSP

**中图分类号:**TH39;TP273

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2015)10-1362-04

## Based on the sliding mode observer without speed sensor technology in the application of PMSM

XIE Jia-peng

(715th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation Hangzhou 310010, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of the traditional speed sensing technology in engineering applications such as the installation precision, the application environment, the cost and so on, a sliding mode observer for the speed sensorless technology was presented. Based on the model of the motor, the sliding mode observer used for motor rotor position and speed estimation was designed, in view of the traditional sliding mode variable structure by introducing switching the chattering problem, using saturation function weakened the chattering. Modeling the SMO in Simulink, the proposed method was demonstrated on the basis of TMS320F2812. The results indicate that sensorless technique based on sliding mode observer can estimate the speed of the motor, and can replace the traditional sensor in the FOC control system, and improve the reliability of the system.

**Key words:** PMSM; sliding mode observers(SMO); speed sensorless; DSP

## 0 引 言

永磁同步电机以其体积小、重量轻、功率密度大、功率因数高、效率高等优点,在高性能电力传动系统及工业自动化中占据了重要的地位,被广泛地应用于工农业生产、电动汽车、航天技术等领域。在高性能的传动系统中,需要对传动系统的速度及位置进行精确控制,常用的做法是使用位置速度传感器<sup>[1]</sup>,如光电编码器、旋转变压器等,不仅增加了硬件成本,而且降低传动系统的可靠性,为此无速度传感器技术得到迅速发展。

无速度传感器技术的电机转速辨识的方法经过多

年的研究及发展,已经取得了很大的进展,并在工业自动化中得到了广泛的应用。目前运用较多的方法为模型参考自适应方法,其算法复杂,且低速的辨识能力易受电机参数变化的影响,鲁棒性较差。近几年来,基于滑模观测器的速度辨识引起了人们的兴趣,滑模观测器不仅在宽的调速范围内有良好的动态性能,并且对电机的参数有较好的鲁棒性,具有良好的发展前景。

基于滑模观测器的无速度传感器技术是将滑模变结构控制理论在电机速度辨识中的应用,本研究首先进行滑模观测器建模<sup>[2-4]</sup>,随后解决滑模变结构由于开关函数的频繁切换而引起的抖动问题<sup>[5-7]</sup>。经过仿

真验证滑模观测器的正确性<sup>[8-9]</sup>,通过实验证明其在工程应用中可行性。

## 1 滑模观测器

PMSM 电机模型是一个耦合非线性的系统,通常采用坐标变化(CLACK 变换与 PARK 变换)对其进行解耦分析。滑模观测器通过对定子模型建立观测器,间接观测出与速度相关的参数。

### 1.1 基于滑模观测器的 PMSM 数学模型

本研究讨论的电机模型是基于隐性 PMSM 电机的。根据 PMSM 在静止坐标系  $\alpha-\beta$  的下的数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{i}_\alpha = -\frac{R}{L}i_\alpha - \frac{1}{L}e_\alpha + \frac{1}{L}u_\alpha \\ \dot{i}_\beta = -\frac{R}{L}i_\beta - \frac{1}{L}e_\beta + \frac{1}{L}u_\beta \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} e_\alpha = -\omega_e \psi_f \sin\theta_e \\ e_\beta = \omega_e \psi_f \cos\theta_e \end{cases} \quad (2)$$

式(2)又被称为动生反电势。式中: $R$ —定子电阻, $L$ —相电感, $\psi_f$ —永磁体磁链。

从式(2)可知,永磁同步电机的转子位置和转速与反电势有关,通过建立对反电势的观测器,间接提取转子的速度和位置信息。

根据传统的滑模观测器理论建立针对反电势的滑模观测器状态方程:

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_\alpha = -\frac{R}{L}\hat{i}_\alpha - \frac{1}{L}H_\alpha + \frac{1}{L}u_\alpha \\ \dot{\hat{i}}_\beta = -\frac{R}{L}\hat{i}_\beta - \frac{1}{L}H_\beta + \frac{1}{L}u_\beta \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} H_\alpha = k_{sw} \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ H_\beta = k_{sw} \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta - i_\alpha, i_\beta$  的估计值; $H_\alpha, H_\beta$ —切换信号; $k_{sw}$ —滑模系数。

在变结构控制系统中,滑动模态设计很关键,但目前非线性系统的滑模面设计没有比较有效的方法,通常采用能产生稳定的滑模动态的滑模面,本研究定义滑模面为:

$$S = \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 1.2 稳定性的证明及滑模系数 $k_{sw}$ 的选择

变结构控制系统的稳定性是指,在正常运动阶段保证系统状态趋近并进入滑动模态,且滑动模态运动阶段保证滑动运动稳定。稳定性的关键在于设计出适

当的变结构规律,使得系统状态在有限时间内进入滑动模态,这可通过李雅普诺夫稳定性理论来分析解决。

因此,构造李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} S^T \cdot S \quad (6)$$

当  $\dot{V} = S^T \cdot \dot{S} < 0$  时,就将滑动模态的存在条件统一起来。

$$S = \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(1,2)代入式(7),得:

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) + \frac{1}{L}e_\alpha - \frac{1}{L}H_\alpha \\ -\frac{R}{L}(\hat{i}_\beta - i_\beta) + \frac{1}{L}e_\beta - \frac{1}{L}H_\beta \end{bmatrix},$$

$$\dot{V} = [S_\alpha \quad S_\beta] \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} = S_\alpha S_\alpha + S_\beta S_\beta$$

因此在设计参数时,只需满足下式:

$$S_\alpha S_\alpha < 0, S_\beta S_\beta < 0$$

$$S_\alpha S_\alpha = (\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \left[ -\frac{R}{L}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) + \frac{1}{L}e_\alpha - \frac{1}{L}H_\alpha \right] =$$

$$-\frac{R}{L}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)^2 + \frac{1}{L}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)(e_\alpha - H_\alpha)$$

使  $H_\alpha > e_\alpha$ , 同理  $H_\beta > e_\beta$ ,

即  $k_{sw} > \max(|e_\alpha|, |e_\beta|)$ , 则可保证观测器收敛,一般采用  $k_{sw} = 1.5\psi_f|\omega_e|$ 。

当系统在滑模面上运动时,系统满足  $S = \dot{S} = 0$ ,因此:

$$\begin{cases} e_\alpha = H_\alpha = k_{sw} \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ e_\beta = H_\beta = k_{sw} \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (8)$$

### 1.3 防抖措施

由于开关函数的频繁切换而引起的抖动会引起比较大的转矩脉动,在低速下运行时,会使系统不稳定,这是滑模变结构控制的固有缺陷。在实际应用中,常使用饱和函数代替开关函数,以减小抖振。饱和函数的表达式如下:

$$\operatorname{sat}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) = \begin{cases} 1 & \hat{i}_\alpha - i_\alpha > \varepsilon \\ \frac{\hat{i}_\alpha - i_\alpha}{\varepsilon} & |\hat{i}_\alpha - i_\alpha| \leq \varepsilon \\ -1 & \hat{i}_\alpha - i_\alpha < -\varepsilon \end{cases} \quad (9)$$

通过调节  $\varepsilon$  的值,有效地减小滑模变结构系统的运动点在运动时的抖振,饱和函数如图 1 所示。

## 2 转子位置和速度的计算

由电机的数学模型式(2)可以知道,从反电势中可以提取出转子的速度和位置:

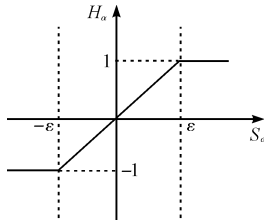


图 1 饱和函数图

$$\hat{\theta}_e = -\arctan \frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta} \quad (10)$$

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

由于采用了滑模控制,计算所得到的  $H$  信号中有大量的开关信号,信号需要低通滤波后才能得到连续的反电势。

滑模观测器的结构框图如图 2 所示。

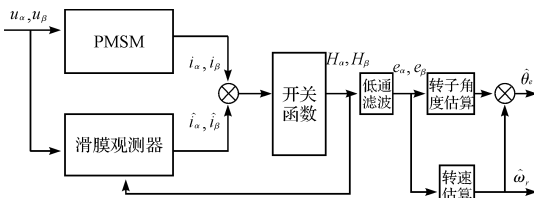


图 2 滑模观测器结构图

由于引入低通滤波器,即引入了惯性环节,会导致相位延迟,为了提高算法的实时性,需要进行角度补偿。

### 3 仿真分析

本研究在 Matlab2009a/Simulink 平台下建立仿真模型。滑模观测器的仿真框图如图 3 所示。

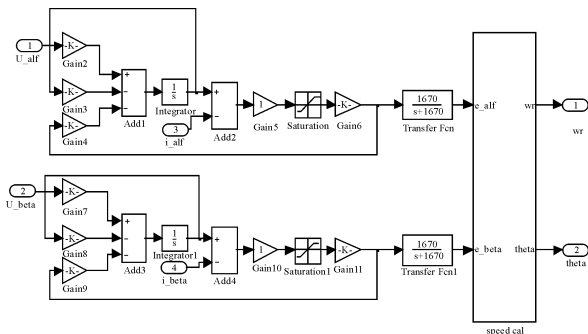


图 3 为滑模观测器的仿真框图

仿真参数:额定功率为 1.6 kW,电机的定子电阻  $R_s = 0.9585 \Omega$ ,电感为 5.25 mL,极对数为 4,转矩常数为  $1.096 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$ ,转动惯量为  $0.00063 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。滑模参数为: $k_{sw} = 100, \epsilon = 1$ ,低通滤波器的截止频率为 1670。

仿真结果如下:

电机实际转速与 SMO 估计转速如图 4 所示,可以看出 SMO 可以辨识出电机的转速,对于电机转速具有很宽的辨识范围。

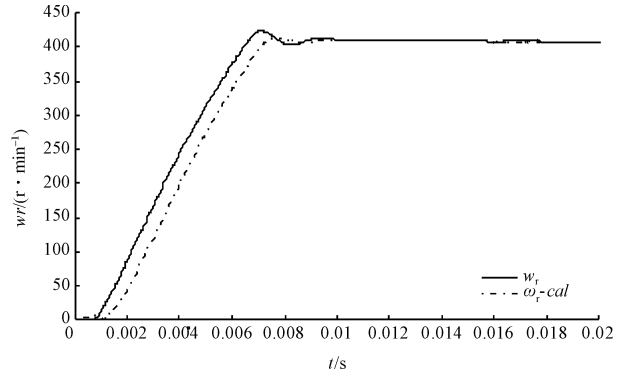


图 4 转子的实际转速与 SMO 估计转速

$\omega_r$ —电机实际转速,  $\omega_r\_cal$ —SMO 估算出的电机转速

SMO 辨识出的转子磁链位置与电机转子磁链实际位置的比较如图 5 所示。在 SMO 模型中由于引入低通滤波器,即引入了惯性环节,这样导致了估计出的转子位置对于实际转子位置有一个相位延迟,因此在实际应用中时要对 SMO 估算出的转子位置进行角度补偿。

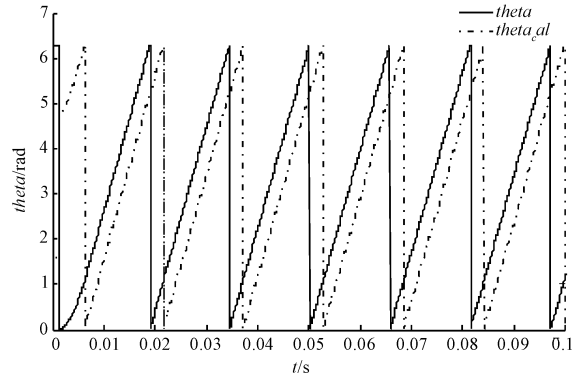


图 5 转子磁链的估计位置与实际位置

$\theta$ —电机转子磁链的实际位置,  $\theta\_cal$ —SMO 辨识出的电机转子磁链位置

电机转子磁链位置

### 4 实验分析

实验内容主要通过将 SMO 算法数字化,在 DSP 中进行编程,验证 SMO 算法,并替带速度传感器进行双闭环矢量控制。硬件原理框图如图 6 所示。

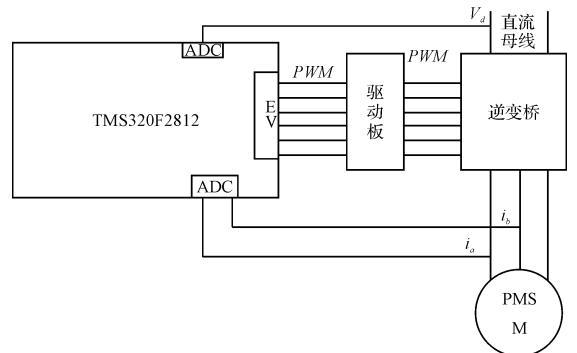


图 6 系统原理框图

从图 6 可以看出需要对电机的两相电流和直流母

线电压进行采样,对 6 路输出信号进过驱动板放大隔离控制逆变桥。

电机的参数: $R_s=0.9, L_s=4.35 \text{ mH}$ ,极对数  $P=8$ 。

速度辨识图如图 7 所示。纵坐标为转速的标么值(单位 1 为  $750 \text{ r/min}$ ),通过 DSP 中的 SMO 算法可以估算出电机稳态时的速度。

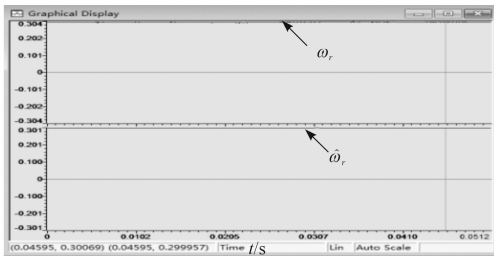


图 7 速度估算图

$\omega_r$ —电机实际转速; $\hat{\omega}_r$ —SMO 估算出的电机转速

转子磁链位置估算图如图 8 所示,纵坐标为角度的标么化值(单位 1 为  $360^\circ$ ),从图 8 中可以看出实际应用与仿真结果类似,SMO 估算出的转子磁链位置滞后于实际转子磁链位置,需要进行角度补偿。加入角度补偿后的转子磁链估算图如图 9 所示。

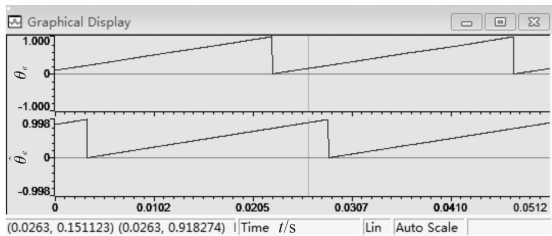


图 8 转子磁链位置估算图

$\theta_r$ —电机转子磁链的实际位置, $\hat{\theta}_r$ —SMO 辨识出的电机转子磁链位置

当电机在启动过程中,反电势很小,很难通过 SMO 估算出电机的转速及位置,因此在电机的启动过程中,往往采用爬坡软启动的方式,让电机转速缓慢启动,使电机在低速状态下运行在开环状态下,当电机转速达到 SMO 可以估算出来的下限时在切换到闭环模式运行。

## 5 结束语

本研究对基于 SMO 的无速度传感器技术进行了建模仿真和实验研究。研究结果表明,滑模观测器可

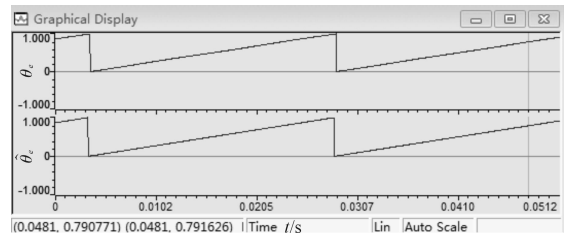


图 9 加入角度补偿后的转子磁链位置估算图

以估算出 PMSM 电机的速度和转子磁链位置,基于滑模观测器的无速度传感器技术可以替代传统的传感器技术应用于电机的控制中,构建双闭环矢量控制系统。基于滑模观测器的无速度传感器技术不仅解决了传统传感器技术带来的种种工程瓶颈,而且进一步降低了传动系统的成本,具有很大的工程应用前景。

## 参考文献 (References):

- [1] 阮毅,陈维钧. 运动控制系统[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [2] 张群,李宏,郑勇. 一种新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 微特电机,2010.
- [3] JIANG Dong, ZHAO Zheng-ming, WANG Fei. A Sliding Mode Observer for PMSM Speed and Rotor Position Considering Saliency [C]. Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. Rhodes: [s. n.], 2008:809-814.
- [4] ZHANG Yan, Vadim Utkin. Sliding Mode Observers for Electric Machines-An Overview [C]. Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference. Seville: [s. n.], 2002:1842-1847.
- [5] 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.
- [6] 高仁璟,李希伟. PMSM 无传感器控制的新型滑模观测器设计[J]. 电机与控制应用,2014(11):12-18.
- [7] 苏义鑫,何国星,张婷. 基于滑模观测器的 PMSM 控制系统研究[J]. 工业控制计算机,2010(5):63-64.
- [8] 毛文杰,范坚坚,吴建华,等. 交流伺服 PMSM 系统模糊 PI 矢量控制设计[J]. 轻工机械,2013,31(3):43-46.
- [9] 金树强,南余荣. 基于改进滑模观测器的 PMSM 无位置传感器矢量控制系统[J]. 微特电机,2013(3):46-49.

[编辑:洪炜娜]

## 本文引用格式:

解佳鹏. 基于滑模观测器的无速度传感器技术在 PMSM 中的应用[J]. 机电工程,2015,32(10):1362-1365.

XIE Jia-peng. Based on the sliding mode observer without speed sensor technology in the application of PMSM [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(10):1362-1365.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>