

基于自适应非奇异快速终端滑模观测器的PMSM无传感器控制策略

杨 威

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年1月25日; 录用日期: 2025年2月18日; 发布日期: 2025年2月28日

摘 要

对于永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM), 高性能的控制策略依赖于传感器来获取转子位置和速度的精确信息。然而, 由于传感器引入的成本、安装误差以及可能的传感器故障等问题, 逐渐发展出了无速度传感器控制技术。其中, 基于滑模观测器(Sliding Mode Observer, SMO)的无传感器控制方法因其结构简单且鲁棒性强, 受到了广泛关注。然而, 在使用滑模观测器进行永磁同步电机位置观测时, 常会出现抖振现象及观测速度较慢的问题。为了解决这一问题并提升永磁同步电机控制系统的性能与控制精度, 本文提出了以下改进方案: 首先, 研究了一种积分非奇异快速终端滑模观测器, 旨在提高观测器的响应速度。其次, 设计了一种自适应滑模控制律, 进一步减少非奇异快速终端滑模观测器的抖振, 最后根据上述改进提出一种自适应非奇异快速终端滑模观测器(Adaptive Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Observer, ANFTSMO), 并用李亚普诺夫稳定性理论对系统进行了严格分析, 证明了该观测器的稳定性。

关键词

永磁同步电机, 非奇异快速终端滑模观测器, 自适应趋近律, 抖振抑制

PMSM Sensorless Control Strategy Based on Adaptive Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Observer

Wei Yang

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 25th, 2025; accepted: Feb. 18th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

For Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM), high-performance control strategies rely on sensors to obtain accurate rotor position and speed information. However, due to issues such as the cost of sensors, installation errors, and potential sensor failures, sensorless control techniques have gradually been developed. Among these, sensorless control methods based on Sliding Mode Observers (SMO) have gained widespread attention due to their simple structure and strong robustness. However, when using SMO for position estimation in PMSM, problems such as chattering and slow observation speed often occur. To address these issues and enhance the performance and control accuracy of the PMSM control system, the following improvements are proposed: First, an Integral Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Observer is designed to improve the observer's response speed. Second, an adaptive sliding mode control law is designed to further reduce chattering in the Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Observer. Finally, based on these improvements, an Adaptive Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Observer (ANFTSMO) is proposed. The stability of the observer is rigorously analyzed using Lyapunov stability theory, proving the stability of the system.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor, Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Observer, Adaptive Reaching Law, Chattering Suppression

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)属于交流同步电机,不同于异步电机的转子与定子磁场存在速度差,永磁同步电机的永磁体转子和定子磁场变化方向一致,避免了异步电机中转子励磁的能量损耗,PMSM 可以做到更高的功率密度。此外 PMSM 避免了直流电机中的电刷和换向器等部件,PMSM 的结构相比直流电机具有故障率低,维护容易,可靠性强的优势。永磁同步电机凭借这些优点,在轨道交通、航空航天、伺服控制等领域得到了广泛应用[1]。

为了实现永磁同步电机的高性能控制都需要实时获取准确的电机转速以及转子位置信息。传统获得转速和转子位置信息的方法是在转子轴上安装传感器,目前多采用霍尔传感器、光电编码器、旋转变压器等机械式传感器来实时检测电机转速和转子位置信息。因为位置传感器的存在不仅增加了硬件成本及后期维护成本,同时还降低了永磁同步电机控制系统的可靠性[2][3]。因此,无位置传感器技术已成为一个热门的研究课题。位置观测器是无线传感器控制的核心。目前,常用的闭环估算法有以下几种:模型参考自适应控制[4]、滑模观测器[5]、扩展卡尔曼滤波法[6]。其中 SMO 由于其鲁棒性强、对参数不敏感、设计复杂度较低等特性成为 PMSM 最流行的无感控制方法之一。但是不连续控制产生的抖振现象和线性滑模面引起的无限时间收敛,限制了 SMO 的广泛应用。国内外的学者们针对这两个问题,提出了很多方法。针对抖振问题,学者们提出使用连续切换函数来替换不连续的符号函数,用以消除抖振[7][8],例如饱和函数或者 Sigmoid 函数,在边界层内,切换函数由线性反馈增益近似,而不是不连续函数;使用高阶滑模观测器,通过将电流和扩展反电动势(Expand Electromotive Force, EEMF)都作为状态变量来构造二阶 SMO。这样,只需要将滑模增益设置为高于 EEMF 的最大估计误差,这意味着滑模增益较小,可以减

少抖振[9]-[11]。使用自适应增益,为了减少恒定高增益引起的抖动,近年来提出了不同的自适应 SMO 设计方法。文章[12]提出 EEMF 的上限可以根据机器参数和操作点直接计算。然而,该方法的精度具有很强的参数依赖性。在不知道不确定性界限的情况下,文章[13]提出在永磁同步电机无位置传感器控制的自适应 SMO 设计中引入了自适应控制算法概念,以减少抖振;针对有限时间收敛问题,有人提出终端滑模方法,终端滑模(Terminal Sliding Mode, TSM)的概念首次在[14]中提出,以保证状态的有限时间收敛。然而,传统的 TSM 存在奇异性问题,这意味着在状态空间的某些区域,为了保持理想的 TSM 运动,控制输入可能需要无限大。由于这种奇异性问题, TSM 理论在实际应用中不能直接应用于基于 SMO 的位置观测器。为了解决这个问题,提出了非奇异终端滑模观测器[15]-[18],该方法可以提供有限的收敛时间,同时避免奇异性。但是非奇异终端滑模中的一阶导数含有不连续切换函数,依然会有较大的抖振影响,因此为了同时实现抖振的抑制和有限时间的收敛,提出了高阶终端滑模(High Order Terminal Sliding Observer, HOTSMO)方法。通过将不连续控制转化为二阶控制律的导数来实现抖振抑制,并通过设计终端滑动面实现有限时间内的收敛。尽管 HOTSMO 可以同时实现抖振抑制和有限时间收敛,由于 HOTSMO 中的算法复杂,在处理器中实现时, HOTSMO 的计算时间很长,因此 HOTSMO 的实际设计仍然是一个挑战[19]。

综上所述,本文设计了一种积分快速终端滑模面,以提高观测器的位置观测速度。同时,在趋近律中加入自适应函数,可以更好地调整收敛速度与抖振之间的关系。当误差较大时,提高收敛速度,当误差较小时,抑制抖振。最后,对本文研究的传统滑模观测器控制系统和自适应非奇异快速终端滑模控制器控制进行了比较和分析。ANFTSMO 可以有效地改善控制信号中的抖动,位置反馈估计更准确,收敛速度更快。

2. 传统滑模观测器设计

在 PMSM 的控制中,该方法是基于给定电流与反馈电流之间的误差来设计滑模观测器的,并由该误差来重构电机的反电动势、估算转子速度,传统滑模观测器的实现过程如图 1 所示。静止坐标系下的电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & \omega_e(L_d - L_q) \\ -\omega_e(L_d - L_q) & R + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, R 为定子电阻; L_d 、 L_q 为定子电感; ω_e 为转子电角速度; p 为微分算子, $\begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \end{bmatrix}^T$ 为定子电压; $\begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix}^T$ 为定子电流; $\begin{bmatrix} E_\alpha & E_\beta \end{bmatrix}^T$ 为扩展反电动势(EMF):

$$\begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_d - L_q)(\omega_e i_d - p i_q) + \omega_e \varphi_f \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

将电压方程改写为电流方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{式中, } A = \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} -R & -\omega_e(L_d - L_q) \\ \omega_e(L_d - L_q) & -R \end{bmatrix}$$

SMO 的设计:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} Z_\alpha \\ Z_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4)~(3)，得到定子电流误差方程：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha - Z_\alpha \\ E_\beta - Z_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

设计滑模律：

$$\mathbf{Z}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} Z_\alpha \\ Z_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \cdot \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\alpha) \\ k \cdot \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\beta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中， $k > \max \left\{ -R|\tilde{i}_\alpha| + E_\alpha \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\alpha), -R|\tilde{i}_\beta| + E_\beta \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\beta) \right\}$

当系统到达滑模面时，即 $\tilde{i}_\alpha = 0$ ， $\tilde{i}_\beta = 0$ 之后，观测器将一直保持在滑模面上，根据等效控制原理，此时的控制量可以看作等效控制量：

$$\mathbf{E}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} Z_\alpha \\ Z_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \cdot \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\alpha) \\ k \cdot \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\beta) \end{bmatrix}_{eq} \quad (7)$$

由于实际控制量是不连续的高频切换信号，为了提取连续的扩展反电动势估计值，通常需要外加一个低通滤波器：

$$\hat{\mathbf{E}}_{\alpha\beta} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \mathbf{Z}_{\alpha\beta} \quad (8)$$

式中， ω_c 为低通滤波器的时间常数。

通过下式获得估计的转子位置与转速信息：

$$\hat{\theta} = -\arctan\left(\hat{E}_\alpha / \hat{E}_\beta\right) \quad (9)$$

$$\hat{\omega}_e = \frac{d\hat{\theta}}{dt} \quad (10)$$

然而，通过滤波处理得到的通过式(8)滤波处理得到的反电动势估算分量会引发相位延迟，该延迟会影响转子位置估算的准确性，较小的滤波截止频率将会引发较大的相位延迟，在实际应用中解决该问题，通常需要在式(9)计算转子位置的基础上再加上一个角度补偿，用来弥补由于低通滤波器的延迟效应所造成的位置角度估算误差：

$$\hat{\theta}_e = \hat{\theta} + \arctan(\hat{\omega}_e / \omega_c) \quad (11)$$

式中， ω_c 为低通滤波器的截止频率。

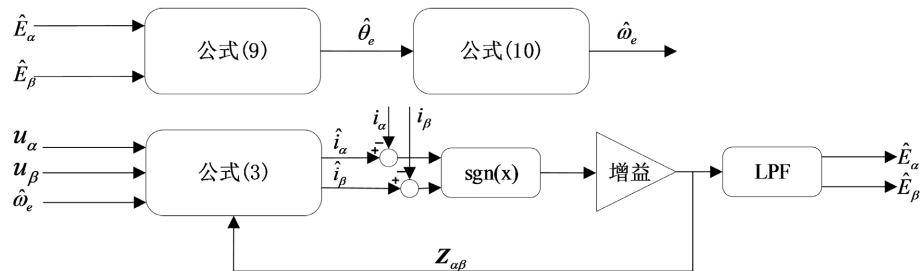


Figure 1. Block diagram of SMO
图 1. 滑模观测器框图

3. 非奇异快速终端滑模观测器设计

改进后的 SMO 的反电动势估计值方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} H_\alpha \\ H_\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, H_α , H_β 为非奇异快速终端滑模观测器的到达律, 为了使系统误差更快到达滑动面, 提高系统的观测精度, 本文研究了一种改进的非奇异快速终端滑模观测器。滑动面选择如下:

$$s = \mathbf{x}_1 + \int j \mathbf{x}_1 + \int k \mathbf{x}_1^{\frac{p}{q}} \quad (13)$$

式中 p 和 q 为正奇数, 且 $p < q$ 。因为在积分中, 不存在奇点问题。 j 和 k 是大于 0 的数。此时, s 对时间的导数为:

$$\dot{s} = \mathbf{x}_2 + j \mathbf{x}_1 + k \mathbf{x}_1^{\frac{p}{q}} \quad (14)$$

式中, $\mathbf{x}_1$ 为当前误差, $\mathbf{x}_2$ 为当前误差的导数, 表示当前误差的变化率。

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{x}}_1 = \begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_\alpha \\ \dot{\tilde{i}}_\beta \end{bmatrix} = -\frac{R}{L_d} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha - H_\alpha \\ E_\beta - H_\beta \end{bmatrix} \quad (16)$$

当 $\dot{s} = 0$ 时, 误差变化率的方程如下:

$$\mathbf{x}_2 = -j \mathbf{x}_1 - k \mathbf{x}_1^{\frac{p}{q}} \quad (17)$$

简要分析: 当系统状态变量远离平衡点时, 当误差较大时, 误差收敛速度主要由公式中的非线性项 $-k \mathbf{x}_1^{\frac{p}{q}}$ 决定。当系统状态接近平衡点时, 当误差较小时, 方程中的线性项 $-j \mathbf{x}_1$ 对误差的收敛速度起主要作用。结合式(5)和式(7), $\dot{s}$ 可得:

$$\dot{s} = -\frac{R}{L_d} \mathbf{x}_1 + \mathbf{E} - \mathbf{H} + j \mathbf{x}_1 + k \mathbf{x}_1^{\frac{p}{q}} \quad (18)$$

式中, $\mathbf{E} = \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha & E_\beta \end{bmatrix}$, $\mathbf{H} = \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} H_\alpha & H_\beta \end{bmatrix}$ 。设计滑模面趋近律:

$$\dot{s} = -k_1 s - f(s) \cdot \text{sgn}(s) \quad (19)$$

最后到达率:

$$\mathbf{H} = -\frac{R}{L_d} \mathbf{x}_1 + \mathbf{E} + j \mathbf{x}_1 + k \mathbf{x}_1^{\frac{p}{q}} + k_1 s + f(s) \cdot \text{sgn}(s) \quad (20)$$

3.1. 自适应增益

设计一种自适应趋近率来调整符号函数的幅值:

$$f(s) = m |s| \frac{1 + \delta}{\delta + e^{-\varepsilon |s|}} \quad (21)$$

其中 $0 < \delta < 1$, $\varepsilon > 0$, $m > 0$ 。当系统轨迹远离滑动面时, $|s|$ 增大, 且 $m(1 + \delta) / (\delta + e^{-\varepsilon |s|})$ 大于 m , 因此

$f(s)$ 在此阶段增大,使其更快地接近滑动面。因此,当系统轨迹靠近滑模表面时, $f(s)$ 会随着 $|s|$ 的减小而逐渐减小,以限制抖动。当系统轨迹到达滑动面时, $m(1+\delta)/(\delta+e^{-\varepsilon|s|})$ 等于 m 。自适应函数中参数的选择可以根据系统的需要和重点确定 m 的大小。如果系统更关注观测的瞬态响应,更关注其观测收敛速度的性能,则 m 的值应该更大。如果系统对稳态性能的抖振抑制要求较高,则 m 的值不宜过大。 $m(1+\delta)/(\delta+e^{-\varepsilon|s|})$ 主要增大了 m 的自适应函数,其 δ 和 ε 在取值范围内可起相应的作用。

3.2. 稳定性证明

将自适应增益代入滑模面趋近律,替代 k_2 :

$$\dot{s} = -k_1 s - \left(m |s| \frac{1+\delta}{\delta+e^{-\varepsilon|s|}} \right) \text{sgn}(s) \tag{22}$$

设计 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2} s^2$, V 的导数为:

$$\dot{V} = s \dot{s} = -k_1 s^2 - \left(m \frac{1+\delta}{\delta+e^{-\varepsilon|s|}} \right) s^2 \tag{23}$$

由于 $k_1 > 0$, $0 < \delta < 1$, $m > 0$ 所以 $\dot{V} \leq 0$, 因此满足 Lyapunov 稳定性理论,故系统是稳定的。

4. 仿真分析

为验证本文所设计观测器性能,基于 MATALB/Simulink 仿真平台搭建了 PMSM 的矢量控制模型,电机详细参数见表 1,图 2 是本文 PMSM 控制系统的原理框图,其中,外环为转速控制,采用 PI 控制,内环为电流控制,同样采用 PI 控制。

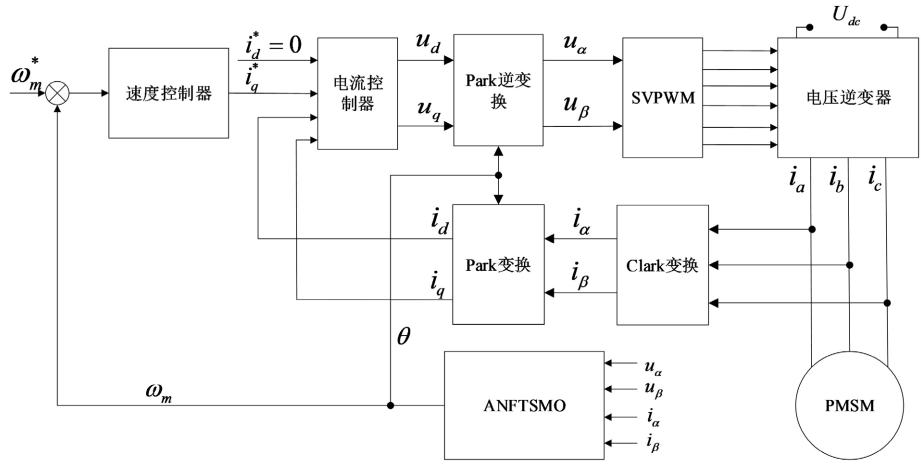


Figure 2. PMSM control model
图 2. PMSM 控制系统

Table 1. The parameters of PMSM
表 1. 电机参数

参数名称	参数值
直流母线电压 U_{dc}/V	311
采样时间 T_s/s	0.00001
定子电阻 R/Ω	2.875

续表

q 轴电感 L_q/H	0.0085
d 轴电感 L_d/H	0.0085
转子磁链 φ_f/Wb	0.175
电机极对数 Pn	4
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.003
阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.008

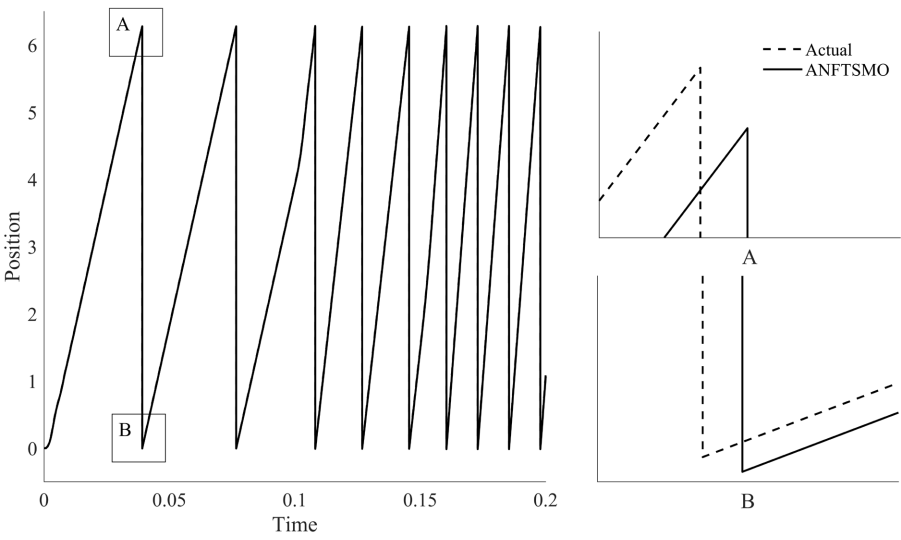


Figure 3. ANFTSMO position curve
图 3. ANFTSMO 位置曲线

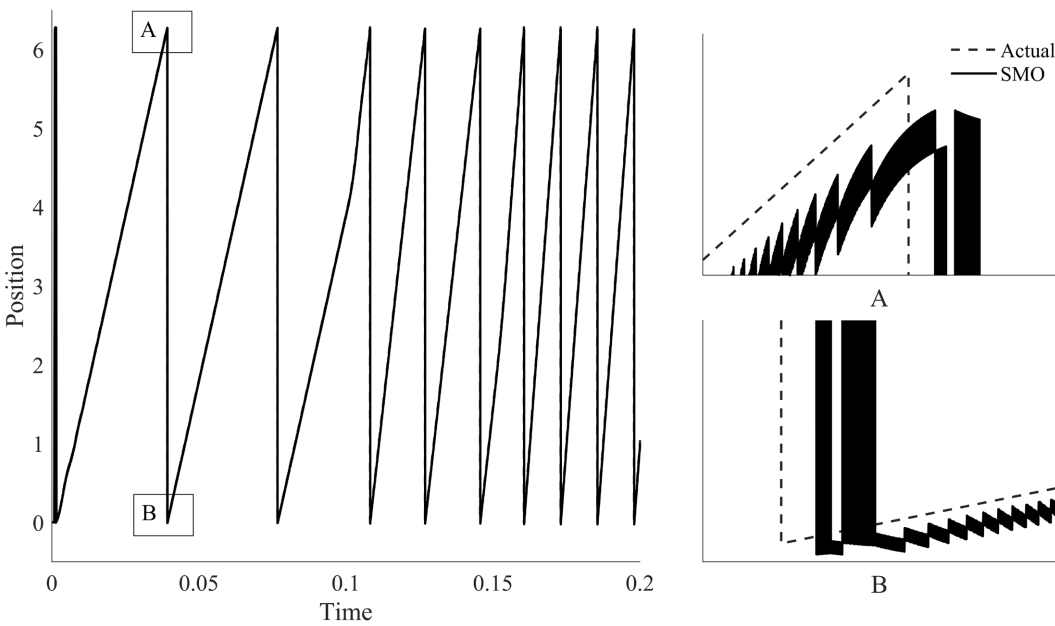


Figure 4. SMO position curve
图 4. SMO 位置曲线

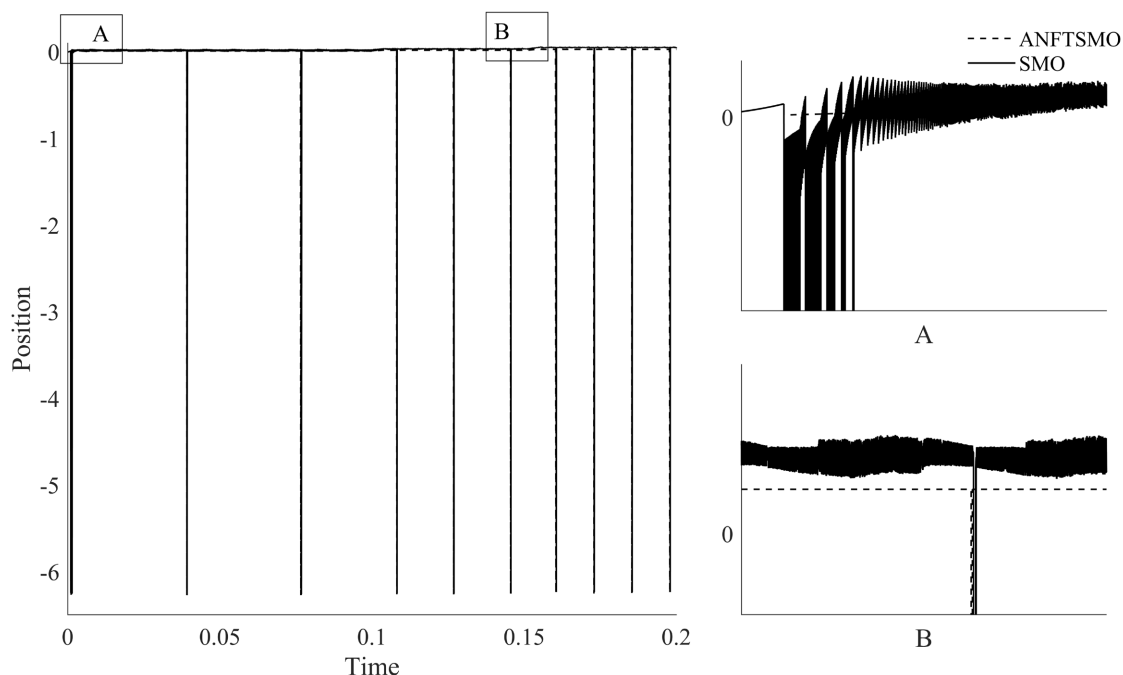


Figure 5. Position error curve
图 5. 位置误差曲线

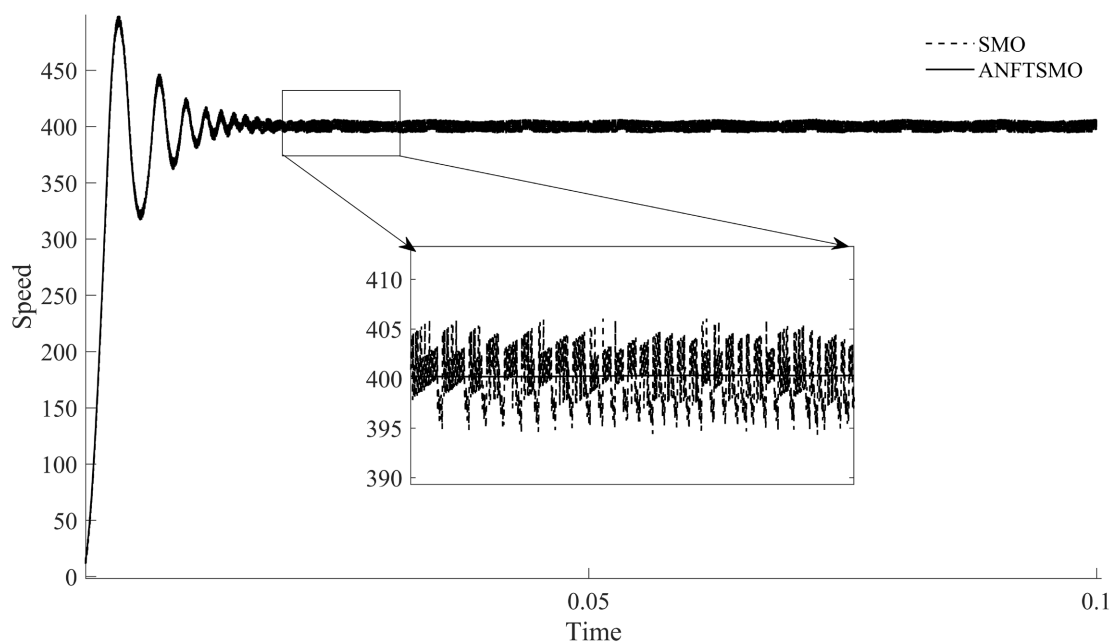


Figure 6. Speed curve
图 6. 速度响应曲线

比较 SMO 和 ANFTSMO 的位置观测曲线和误差曲线如图 3、图 4、图 5，在位置观测曲线上，ANFTSMO 可以较好地跟踪实际值，而 SMO 由于其抖振问题导致无法很好地跟踪实际值，在位置误差曲线上，SMO 的位置误差曲线存在较大波动，ANFTSMO 的观测误差曲线接近 0，误差比 SMO 更稳定。这也验证了 ANFTSMO 观测的位置更接近真实位置值。瞬态速度观测性能效应的验证。在空载的情况下，

电机转速从 0 r/min 增加到 300 r/min, SMO 和 ANFTSMO 的瞬时观测速度曲线如图 6 所示。从速度的观测可以看出, 与传统的 SMO 相比, 本文所提出的 ANFTSMO 在相同转矩的观测值波动较小。

5. 结论

针对传统滑模观测器的收敛速度和抖振等问题, 本文提出了一种自适应非奇异快速终端滑模观测器。首先通过积分型非奇异终端滑模观测器来提高观测速度, 设计自适应函数来削弱抖振现象。最后, 利用李亚普诺夫函数证明了观测器的稳定性。最后进行仿真实验验证本文所设计 ANFTSMO 的可行性, 通过对比两种观测器所估计的转子位置、转子位置误差等信息得出, ANFTSMO 可以更好地跟踪实际位置, 削弱抖振带来的不利影响, 提高观测速度, 因此 ANFTSMO 较 SMO 可以更好地提高系统的整体控制性能。

参考文献

- [1] Douglas, H., Schmid, F., Roberts, C. and Hillmansen, S. (2016). Evaluation of Permanent Magnet Motor Energy Saving Technology for Different Types of Railways. 2016 *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, Birmingham, 23-25 August 2016, 123-129. <https://doi.org/10.1109/icirt.2016.7588721>
- [2] Xie, W., Wang, X., Wang, F., Xu, W., Kennel, R.M., Gerling, D., *et al.* (2015) Finite-Control-Set Model Predictive Torque Control with a Deadbeat Solution for PMSM Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **62**, 5402-5410. <https://doi.org/10.1109/tie.2015.2410767>
- [3] Pacas, M. (2011) Sensorless Drives in Industrial Applications. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, **5**, 16-23. <https://doi.org/10.1109/mie.2011.941125>
- [4] Kashif, M. and Singh, B. (2023) Modified Active-Power MRAS Based Adaptive Control with Reduced Sensors for PMSM Operated Solar Water Pump. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **38**, 38-52. <https://doi.org/10.1109/tec.2022.3197564>
- [5] Ding, H., Zou, X. and Li, J. (2022) Sensorless Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Fuzzy Sliding Mode Observer. *IEEE Access*, **10**, 36743-36752. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3164519>
- [6] Quang, N.K., Hieu, N.T. and Ha, Q.P. (2014) FPGA-Based Sensorless PMSM Speed Control Using Reduced-Order Extended Kalman Filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61**, 6574-6582. <https://doi.org/10.1109/tie.2014.2320215>
- [7] Chi, S., Zhang, Z. and Xu, L. (2009) Sliding-Mode Sensorless Control of Direct-Drive PM Synchronous Motors for Washing Machine Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **45**, 582-590. <https://doi.org/10.1109/tia.2009.2013545>
- [8] Zhang, X. (2013) Sensorless Induction Motor Drive Using Indirect Vector Controller and Sliding-Mode Observer for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **62**, 3010-3018. <https://doi.org/10.1109/tvt.2013.2251921>
- [9] Yin, Z., Zhang, Y., Cao, X., Yuan, D. and Liu, J. (2022) Estimated Position Error Suppression Using Novel PLL for IPMSM Sensorless Drives Based on Full-Order SMO. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **37**, 4463-4474. <https://doi.org/10.1109/tpe.2021.3125024>
- [10] Wang, G., Li, Z., Zhang, G., Yu, Y. and Xu, D. (2013) Quadrature PLL-Based High-Order Sliding-Mode Observer for IPMSM Sensorless Control with Online MTPA Control Strategy. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **28**, 214-224. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2228484>
- [11] Xu, W., Qu, S., Zhao, J., Zhang, H. and Du, X. (2021) An Improved Full-Order Sliding-Mode Observer for Rotor Position and Speed Estimation of SPMSM. *IEEE Access*, **9**, 15099-15109. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3052085>
- [12] Zhao, Y., Qiao, W. and Wu, L. (2013) An Adaptive Quasi-Sliding-Mode Rotor Position Observer-Based Sensorless Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**, 5618-5629. <https://doi.org/10.1109/tpe.2013.2246871>
- [13] Chen, Z., Dawara, A.A., Zhang, X., Zhang, H., Liu, C. and Luo, G. (2022) Adaptive Sliding Mode Observer-Based Sensorless Control for SPMSM Employing a Dual-PLL. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **8**, 1267-1277. <https://doi.org/10.1109/tte.2021.3112123>
- [14] Venkataraman, S.T. and Gulati, S. (1992) Control of Nonlinear Systems Using Terminal Sliding Modes. 1992 *American Control Conference*, Chicago, 24-26 June 1992, 891-893. <https://doi.org/10.23919/acc.1992.4792209>
- [15] Li, S., Zhou, M. and Yu, X. (2013) Design and Implementation of Terminal Sliding Mode Control Method for PMSM

-
- Speed Regulation System. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **9**, 1879-1891. <https://doi.org/10.1109/tii.2012.2226896>
- [16] Feng, Y., Zheng, J.F., Yu, X.H. and Vu Truong, N. (2009) Hybrid Terminal Sliding-Mode Observer Design Method for a Permanent-Magnet Synchronous Motor Control System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**, 3424-3431. <https://doi.org/10.1109/tie.2009.2025290>
- [17] Feng, Y., Yu, X. and Han, F. (2013) On Nonsingular Terminal Sliding-Mode Control of Nonlinear Systems. *Automatica*, **49**, 1715-1722. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.051>
- [18] Yang, L. and Yang, J. (2010) Nonsingular Fast Terminal Sliding-mode Control for Nonlinear Dynamical Systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, **21**, 1865-1879. <https://doi.org/10.1002/rnc.1666>
- [19] Yu, S., Yu, X., Shirinzadeh, B. and Man, Z. (2005) Continuous Finite-Time Control for Robotic Manipulators with Terminal Sliding Mode. *Automatica*, **41**, 1957-1964. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2005.07.001>