

基于新型负载观测器的PMSM控制

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: 2024年10月7日; 录用日期: 2024年10月31日; 发布日期: 2024年11月7日

摘 要

针对传统滑模观测器(Traditional Sliding Mode Observer, TSMO)固定增益和符号函数导致系统出现的抖振和稳定性问题, 本文提出一种变结构改进型滑模观测器(Variable Structure-Improved Sliding Mode Observer, ISMO)用于观测负载转矩的变化。本文先是提出一种自适应增益趋近律, 在此基础上设计了一种改进滑模观测器(Improved Sliding Mode Observer, ISMO), 实现削减传统趋近律中因符号函数不连续性所引起的抖振现象的同时提高收敛速度, 为消除抖振信号在其中加入解耦项, 设计了一种用于负载转矩观测的变结构改进滑模控制器, 这样不仅可以消除估计负载转矩中的抖振信号, 还可以消除待估计参数与转速估计误差导数之间的耦合关系。实验结果表明, 该方法具有估计精度高、收敛速度快、辨识值不含抖振信号等优点。

关键词

永磁同步电机, 滑模观测器, 负载转矩, 抖振抑制

PMSM Control Based on Improved Load Observer

Wei Yang

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

Received: Oct. 7th, 2024; accepted: Oct. 31st, 2024; published: Nov. 7th, 2024

Abstract

A Variable Structure-Improved Sliding Mode Observer (ISMO) is proposed to observe the change of load torque in order to solve the chattering and stability problems caused by the fixed gain and symbolic function of traditional sliding mode observers. An Adaptive Gain Sliding Mode Law (AGSML) is designed, based on which an Improved Sliding Mode Observer (ISMO) is designed. In

文章引用: 杨威. 基于新型负载观测器的 PMSM 控制[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 5791-5799.

DOI: 10.12677/mos.2024.136527

order to reduce the chattering phenomenon caused by the discontinuity of the symbolic function in the traditional approach law, and improve the convergence speed, a variable structure modified sliding mode controller for load torque observation is designed to eliminate the coupling relationship between the parameters to be estimated and the error derivative of the speed estimation and the chattering signal in the load torque estimation. The experimental results show that the proposed method has the advantages of high estimation accuracy, fast convergence speed and no buffering signal.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor, Sliding Mode Observer, Load Torque, Chattering Suppression

Copyright © 2024 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

由于科学技术的飞速发展, 永磁同步电动机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)已显示出结构简单、功率密度高、效率高等显著性能。由于这些优点, 它被广泛应用于各个工业领域, 如电动汽车、智能机器人、工业自动化等[1]-[4], 同时永磁同步电机也是一个具有非线性、强耦合和多变量的控制对象, 容易受到未建模动力学、参数变化和负载扰动的影响[5]。

在实际应用中, 永磁同步电机需要面对频繁变速、变负载的运行工况[6], 尤其是负载扰动不仅对永磁同步电机稳态精度有影响, 而且影响着整个控制系统的精度、动态性能和调速范围等性能指标[7]。因此, 研究一种永磁同步电机抗负载扰动方案具有现实意义。传统的转速控制器在设计时一般会假定负载转矩扰动为零或者为一个固定值, 但对于负荷变化且不确定的条件下, 这个控制器并不能很好地抑制负载扰动。如何使控制系统在负载扰动的情况下保证响应快且无超调是高性能调速系统的关键[8]。因此, 研究者构建了许多扰动估计方法, 如模糊控制[9]、自适应控制[10]、扩张状态观测器[11]、滑模观测器[12]等。其中, 滑模观测器因其对参数变化不敏感、结构简单、对扰动具有鲁棒性等优点, 已成为前沿的负载转矩估计方法。然而, 滑模观测器应用的最大困难是对抖振的抑制。在现有文献中, 针对抖振的抑制提出了许多不同的解决方案。文献[13]设计了一个超扭转滑模观测器(Super-Twisting Sliding Mode Observer, STSMO)来估计系统的扰动并将估计的扰动补偿到控制器, 从而提高了系统的抗干扰能力; 文献[14]根据传统滑模观测器中的固定增益与符号函数所引起的抖振与稳定性问题, 提出一种自适应增益的新型滑模观测器, 减少了抖振的同时, 也加快了收敛速度。

文献[15]根据转速估计误差与动力学参数之间存在耦合关系, 会影响观测器的观测效果, 通过在负载转矩的自适应律中加入解耦项, 从而消除了负载转矩与转速估计误差之间的耦合关系, 并消除了负载转矩估计误差中的抖振信号。

为提高 PMSM 的性能并可以在抑制抖振的同时快速收敛, 确保系统在各种情况下的稳定性, 本文提出一种变结构改进型滑模观测器(VS-ISMO), 并搭建 PMSM 矢量控制模型进行仿真证明, 仿真结果表明, 本文所设计的负载观测器控制策略的有效性。

2. PMSM 的数学模型

为了简化分析, 假设三相 PMSM 为理想电机, 且满足以下假设条件: ① 忽略电机铁芯的饱和。②

不计电机中的涡流和磁滞损耗。③ 电机定子中的电流为三相对称正弦波电流。由此，三相 PMSM 在同步旋转坐标系下的定子电压方程为：

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_s \frac{d}{dt} i_d - \omega_e \varphi_q \\ u_q = Ri_q + L_s \frac{d}{dt} i_q + \omega_e \varphi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程：

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)，更新后公式：

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (3)$$

电磁转矩方程：

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q [i_d (L_d - L_q) + \varphi_f] \quad (4)$$

机械运动方程：

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (5)$$

上式中 R 为定子电枢电阻； L_d, L_q 为定子绕组的 d, q 轴电感； u_d, u_q 为定子绕组的 d, q 轴电压； φ_d, φ_q 为 d, q 轴的磁链； p_n 为转子极对数； ω_e 为转子电角度； T_e 为电磁转矩。

本文针对表贴式永磁同步电机进行设计：

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q \varphi_f \quad (6)$$

采用矢量控制中的 $i_d = 0$ 的控制方案，将式(6)代入式(5)，更新后公式：

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3p_n \varphi_f}{2J} i_q - \frac{T_L}{J} - \frac{B}{J} \omega_m \quad (7)$$

3. 新型滑模观测器设计

假设一段时间内负载变化缓慢：

$$\dot{T}_L = 0 \quad (8)$$

定义转速误差 $e_1 = \hat{\omega}_m - \omega_m$ ，定义滑动面： $S = e_1 = \hat{\omega}_m - \omega_m$ ，由电机转子的机械运动方程得：

$$\begin{cases} \dot{\omega}_m = \frac{1}{J} (T_e - \hat{T}_L - B\omega_m) \\ \dot{T}_L = 0 \end{cases} \quad (9)$$

得出以下估计方程：

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}}_m = \frac{1}{J} (T_e - \hat{T}_L - B\omega_m) + k u_{smo} \\ \dot{\hat{T}}_L = g u_{smo} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\hat{\omega}_m$ 和 $\hat{T}_L$ 分别是转速 ω_m 和负载转矩 T_L 的估计值, k 和 g 分别表示开关增益和反馈增益, u_{smo} 表示滑模控制率。

传统滑模观测器中, $u_{smo} = \text{sgn}(e_1) = \text{sgn}(\hat{\omega}_m - \omega_m)$ 。

3.1. 新型趋近律

传统功率型趋近律:

$$\dot{s} = -\varepsilon |s|^\alpha \text{sgn}(s) \quad (11)$$

式中, $\varepsilon > 0$, $0 < \alpha < 1$ 。根据上式, 当 $s \neq 0$ 趋近率的到达时间可以通过对上式从 0 到 t 积分获得, 假设初值为 $s(0) = s_0$ 到达滑模面时 $s = 0$, 则到达时间为:

$$t_1 = \frac{|s_0|^{1-\alpha}}{(1-\alpha)\varepsilon} \quad (12)$$

然而, 根据上式, 如果控制系统的初始状态远离平衡点, 则传统功率型趋近率的收敛速度较慢, 导致收敛时间较长, 影响动态性能。基于上述趋近律, 并结合自适应增益的思想, 提出了一种改进型趋近律。这种新的功率趋近律保持了传统功率趋近律的优点, 并进一步加快了全局收敛速度, 提高了系统收敛速度:

$$\begin{cases} \dot{s} = -\varepsilon |s|^\alpha f(s) - l \cdot s \\ f(s) = \begin{cases} \text{sgn}(s) & |s| \geq \rho \\ \left(\frac{|s|}{\rho + (1-\rho)e^{-\delta|s|}} \right)^\rho \cdot \text{sgn}(s) & |s| < \rho \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\varepsilon > 0$, $l > 0$, $0 < \alpha < 1$, $0 < \alpha + \rho < 1$, 前者为功率项, 后者为指数项。

简要分析:

当系统远离滑模面时, 功率项和指数项共同作用, 收敛速度快, 收敛时间短; 当系统接近滑模面时, 指数项趋近于零, 系统运动状态收敛到滑模面的速度主要由功率项决定, 可以削弱指数项引起的抖动问题, 同时保证全局收敛速度。

转速与负载转矩估计方程:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}}_m = \frac{1}{J} (T_e - \hat{T}_L - B\omega_m) + ku_{ismo} \\ \dot{\hat{T}}_L = gu_{ismo} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $u_{ismo} = -\varepsilon |s|^\alpha f(s) - ls$ 。

3.2. 变结构滑模观测器设计

由式(10)减去式(9)可得传统滑模观测器的估计误差方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\frac{1}{J} e_2 + ku_{smo} \\ \dot{e}_2 = gu_{smo} \end{cases} \quad (15)$$

对式(15)进行分析可得:

$$\dot{e}_2 - \frac{g}{kJ} e_2 - \frac{g}{k} \dot{e}_1 = 0. \quad (16)$$

对式(16)进行求解可得:

$$e_2 = Ce^{\frac{g}{kJ}t} + \frac{g}{k} \left(\int e^{-\frac{g}{kJ}t} \dot{e}_1 dt \right) e^{\frac{g}{kJ}t}. \quad (17)$$

可见,传统滑模观测器的负载转矩估计误差可以分为两个分量。式中第二项是与速度估计误差相关的耦合项。假设传统滑模观测器已进入稳态并绕滑模曲面滑动时,即 $S = \dot{S} = 0$, 则式中的第二项为零。然而,传统的滑模观测器不能在启动后立即达到稳态。即使在传统的滑模观测器达到稳态时,由于观测器的控制不能达到理想状态,PMSM的速度估计误差值也会在滑模表面上下波动,所以负载转矩估计与 e_1 耦合。

在式(15)中加入解耦项,得到变结构滑模观测器的估计误差方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\frac{1}{J}e_2 + ku_{ismo} & (a) \\ \dot{e}_2 = gs_{ismo} - \frac{g}{k}\dot{e}_1 & (b) \end{cases} \quad (18)$$

通过在转矩估计误差的导数中加入解耦项,便可以消除由于负载转矩估计与转速误差估计之间的耦合关系,同时也可以进一步消除因符号函数带来的抖振信号。

将式(18)中(a)式代入(b)式可得:

$$\dot{e}_2 = gu_{ismo} - \frac{g}{k} \left(-\frac{1}{J}e_2 + ku_{ismo} \right) = -\frac{g}{kJ}e_2 \quad (19)$$

对式(19)进行求解可得:

$$e_2 = Ce^{\frac{g}{kJ}t} \quad (20)$$

式中, C 是常数,可见负载转矩估计误差 e_2 随时间呈指数收敛,且速度由反馈增益 g 决定。

根据广义滑模可达性条件:

$$S\dot{S} = e_1\dot{e}_1 = e_1 \left(-\frac{1}{J}e_2 + ku_{ismo} \right) \leq 0 \quad (21)$$

从式(21)中可以得出,开关增益 $k \leq -\left| \frac{e_2}{J} \right|$, 则 k 的值选为 $k = -a \left| \frac{e_2}{J} \right|$, $a \geq 1$ 。

4. 速度环控制器设计

速度环的作用是保证系统存在内部参数扰动与外部未知扰动影响下,保持良好的性能,即快速、准确地跟踪给定信号。

定义系统的速度误差:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega_m \\ \dot{x}_1 = x_2 = \dot{\omega}_{ref} - \dot{\omega}_m \end{cases} \quad (22)$$

式中, ω_{ref} 为给定值; ω_m 为实际值。将上式代入式(7):

$$x_2 = \dot{\omega}_{ref} - \frac{3p_n\phi_f}{2J}i_q + \frac{T_L}{J} + \frac{B}{J}\omega_m \quad (23)$$

滑模面选取文献[16]中的改进型非奇异快速终端滑模面,其滑模面函数为

$$s = x_1 + p \int_0^t x_1(\tau) d\tau + q \int_0^t |x_1(\tau)|^2 \operatorname{sgn}(x_1(\tau)) d\tau \quad (24)$$

根据文献[17][18]设计一种自适应增益滑模趋近律:

$$\dot{s} = -k_s \operatorname{sign}(s) - k_i s, \quad (25)$$

式中:

$$k_s = \frac{k}{\mu + (1 - \mu)e^{-\chi|s|}} + k_t |s|^\alpha$$

(26)

式中: $k > 0$, $k_t > 0$, $\chi > 0$, $1 > \mu > 0$, $2 > \alpha > 0$, k_t 为线性增益, k_s 为切换增益。

将趋近律代入到滑模面函数, 可以得到如下控制律:

$$i_q = \frac{1}{D} \left[\frac{T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_m + p x_1 + q |x_1|^\lambda \operatorname{sgn}(x_1) + k_s \operatorname{sgn}(s) + k_t s \right]$$

(27)

加入负载补偿后控制器输出:

$$i_q = \frac{1}{D} \left[\frac{\hat{T}_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_m + p x_1 + q |x_1|^\lambda \operatorname{sgn}(x_1) + k_s \operatorname{sgn}(s) + k_t s \right]$$

(28)

5. 仿真分析

为验证本文所设计观测器以及控制器性能, 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 1 是本文 PMSM 控制系统的原理框图, 其中, 外环为转速控制, 内环为电流控制, 本文所设计滑模观测器将观测到的负载变化补偿到速度控制器之中。

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
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 $J/(kg \cdot m^{-2})$	0.003
阻尼系数 $B/(N \cdot m \cdot s)$	0.008

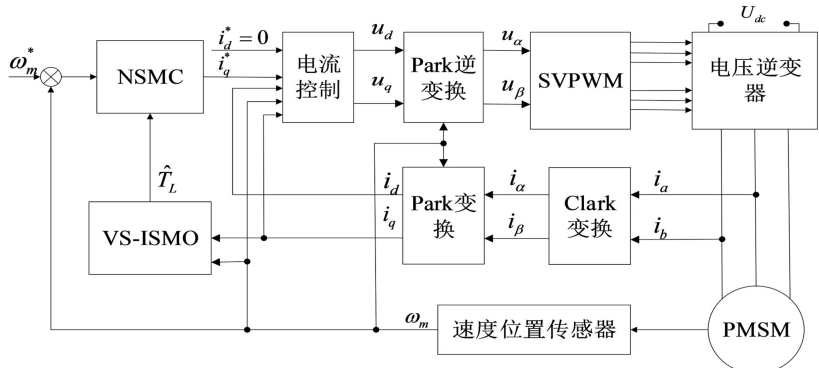


Figure 1. PMSM control model
图 1. PMSM 控制系统

变负载仿真

图 2 所示, 通过将本文观测器与传统滑模观测器、改进滑模观测器以及参考输入进行对比, 验证本文所设计负载观测器的性能。为了模拟实际电机运行过程中可能出现的负载转矩变化情况, 突然装载与突然卸载等工况, 从而评估和对比不同观测器在应对快速变化负载时的性能表现。实验设定: 分别在 0.1 s 和 0.2 s 时使负载转矩发生变化, 在 0.1 s 时突增负载至 15 N·m 模拟电机带载的工况, 而后在 0.2 s 时突减负载至 0 N·m 模拟电机卸载的工况, 观察参考输入波形与三组观测器的观测波形。

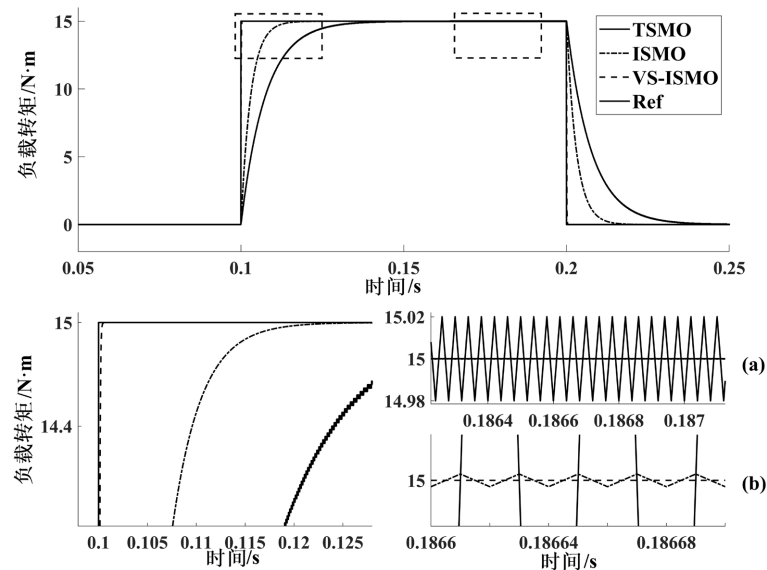


Figure 2. Load torque change
图 2. 负载转矩变化

图 2 可以看出, 本文所设计观测器的观测结果收敛速度最快, 传统观测器抖振现象明显, 并且收敛速度慢, 虽然改进滑模观测器的抖振效果相较传统滑模观测器有一定优化, 但是仍然存在抖振现象, 加入解耦项, 本文所设计的变结构滑模观测器消除了抖振信号。

图 3 是对三组观测器在给定电机转速 1000 r/min, 稳定运行后, 在 0.2 s 时突增负载至 10 N·m, 对转速与转矩的变化的对比试验, 验证加入扰动补偿后控制系统的抗干扰能力。

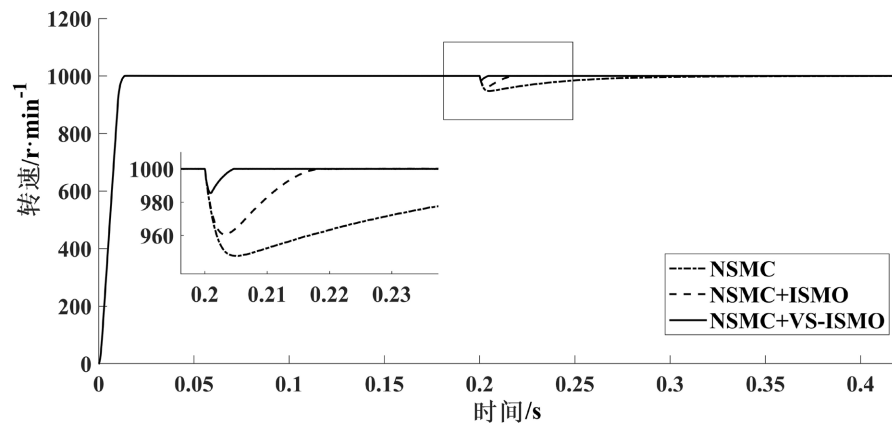


Figure 3. Speed change
图 3. 转速变化

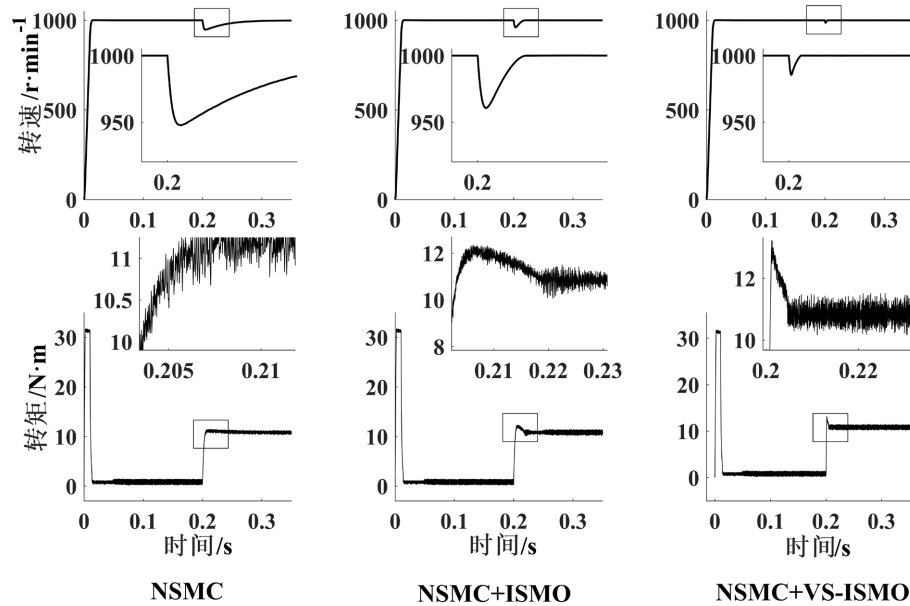


Figure 4. Speed and torque change
图 4. 转速与负载变化

图 4 所示, 在受到干扰后, 由于观测器的加入, 两组加入观测器负载补偿系统的转速可以在负载突变后较无观测器组更快地将转速恢复到给定速度, 而且结合本文所设计观测器控制系统的抗干扰性能优于其他两组。

6. 结论

为解决滑模观测器存在抖振问题的同时加快收敛速度, 在传统滑模观测器的基础上, 设计了一种变结构改进型负载扰动观测器。VS-ISMO 相比于传统滑模观测器具有不包含抖振信号, 观测精度高, 收敛速度快等优点, 通过与速度环控制器结合, 将观测到的扰动信号补偿到控制器中, 改善电机的控制效果、提升控制性能。通过仿真对比实验验证了本文所设计观测器的有效性。

参考文献

- [1] Park, C., Kim, J., Park, S. and Lim, M. (2023) Effect of Electromagnetic Force Caused by PMSM on the Vibration/Noise of Reciprocating Compressors. *IEEE Access*, **11**, 56324-56335. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3283144>
- [2] Liu, Z., Wei, H., Li, X., Liu, K. and Zhong, Q. (2018) Global Identification of Electrical and Mechanical Parameters in PMSM Drive Based on Dynamic Self-Learning PSO. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **33**, 10858-10871. <https://doi.org/10.1109/tpe.2018.2801331>
- [3] Liu, K., Hou, C. and Hua, W. (2019) A Novel Inertia Identification Method and Its Application in PI Controllers of PMSM Drives. *IEEE Access*, **7**, 13445-13454. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2894342>
- [4] Chen, Y., Yang, M., Long, J., Qu, W., Xu, D. and Blaabjerg, F. (2019) A Moderate Online Servo Controller Parameter Self-Tuning Method via Variable-Period Inertia Identification. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **34**, 12165-12180. <https://doi.org/10.1109/tpe.2019.2909439>
- [5] Jiao, T., Zheng, W.X. and Xu, S. (2016) On Stability of a Class of Switched Nonlinear Systems Subject to Random Disturbances. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, **63**, 2278-2289. <https://doi.org/10.1109/tcsi.2016.2620994>
- [6] 付国伟, 朱虎. 基于负载转矩滑模观测器的永磁同步电机转速复合 PI 控制[J]. 微电机, 2023, 56(11): 60-65.
- [7] 李天云, 张志华, 等. 基于 ESO 的积分 Terminal 滑模励磁系统控制[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(1): 32-35+42.
- [8] 刘清, 王太勇, 董靖川, 等. 基于 ESO 的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(1): 35-38.

-
- [9] Yu, D., Chen, C.L.P. and Xu, H. (2022) Fuzzy Swarm Control Based on Sliding-Mode Strategy with Self-Organized Omnidirectional Mobile Robots System. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, **52**, 2262-2274. <https://doi.org/10.1109/tsmc.2020.3048733>
- [10] Ye, H. and Wang, S. (2020) Trajectory Tracking Control for Nonholonomic Wheeled Mobile Robots with External Disturbances and Parameter Uncertainties. *International Journal of Control, Automation and Systems*, **18**, 3015-3022. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0643-y>
- [11] Yang, H., Wang, S., Zuo, Z. and Li, P. (2020) Trajectory Tracking for a Wheeled Mobile Robot with an Omnidirectional Wheel on Uneven Ground. *IET Control Theory & Applications*, **14**, 921-929. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2019.1074>
- [12] Zhang, X. and Hou, B. (2016) Novel Reaching Law-Based Sliding-Mode Load Torque Observer for PMSM. 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, Chiba, 13-16 November 2016, 1-5.
- [13] Dong, M., Peng, H., Zhang, Y., Wu, J., Wang, Z. and Yang, Y. (2024) Trajectory Tracking Control for Intelligent Wheel-chairs Based on Super-Twisting Sliding Mode Observer. 2024 5th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology, Nanjing, 29-31 March 2024, 83-89. <https://doi.org/10.1109/ainit61980.2024.10581442>
- [14] Zhang, Y., Min, W., Yin, Z. and Zhang, Y. (2024) Adaptive Gain Sliding Mode Observer for Sensorless Control of Brushless DC Motors. 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference, Harbin, 10-12 May 2024, 3597-3602. <https://doi.org/10.1109/cieec60922.2024.10582986>
- [15] Tang, S., Shi, T., Cao, Y., Lin, Z., Wang, Z. and Yan, Y. (2024) Simultaneous Identification of Load Torque and Moment of Inertia of PMSM Based on Variable Structure Extended Sliding Mode Observer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **39**, 8585-8596. <https://doi.org/10.1109/tpe.2024.3386931>
- [16] 陈瑛, 刘军, 姚仲安. 基于扰动观测器和新型非奇异快速终端的 PMSM 滑模控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(3): 84-87.
- [17] Hu, M., Ahn, H., Park, J. and You, K. (2024) A Modified Exponential Reaching Law for Sliding Mode Control and Its Applications. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, **34**, 9783-9796. <https://doi.org/10.1002/rnc.7492>
- [18] 刘京, 李洪文, 邓永停. 基于新型趋近律和扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 工程科学学报, 2017, 39(6): 933-944.