

面向永磁同步电机负载转矩观测的 自抗扰改进滑模控制

邵保领^{1,2}, 刘凌^{1,2}, 胡铭遥^{1,2}

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统永磁同步电机滑模控制中存在的滑模抖振大及响应速度慢的问题,设计了一种新型趋近律,在传统指数趋近律的基础上加入可变比例系数并引入系统状态变量和滑模面的幂次项,减小抖振的同时提高了趋近速率。随后,为了避免引入转速误差的微分项,减小系统高频抖振,采用积分滑模面,设计了永磁同步电机改进滑模速度控制器。针对控制策略中负载扰动波动会导致系统控制精度降低、抖振增大的问题,设计了一种基于新型饱和函数的扩张状态观测器估计负载扰动,并将扰动估计值前馈至改进滑模控制器中,进一步提高了系统的抗扰性能。数值仿真结果表明:所提出的控制策略可显著提高电机动态性能和抗扰性。在电机受负载转矩波动影响时,比PI控制电机超调量减小约23.1%,响应速度提高62.5%,比传统滑模控制电机超调量减小约15.3%,响应速度提高50%。新型滑模趋近律还可以有效降低滑模抖振,与传统滑模控制器相比,采用改进滑模控制器电机抖振降低约50%。

关键词: 永磁同步电机;滑模控制;新型趋近律;扩张状态观测器;扰动前馈补偿

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202403019 **文章编号:** 0253-987X(2024)03-0204-08

Improved Sliding Mode Control with Disturbance Rejection for Load Torque Observation of Permanent Magnet Synchronous Motors

SHAO Baoling^{1,2}, LIU Ling^{1,2}, HU Mingyao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address issues like large chattering and slow response in traditional sliding mode control of permanent magnet synchronous motors (PMSMs), a new type of reaching law is designed. This approach incorporates a conventional exponential reaching law with an adaptable proportionality coefficient, system state variables, and the power term of the sliding mode surface to mitigate chattering while enhancing convergence speed. To avoid introducing differential terms of speed error and reduce high-frequency chattering in the system, an integral sliding mode surface is used to design an improved PMSM speed controller. To address the issue of reduced control accuracy and increased chattering in the control system caused by load disturbance fluctuations, a novel saturation function-based extended state observer (ESO) is devised. This ESO is utilized to

收稿日期: 2023-09-15。 作者简介: 邵保领(1999—),男,硕士生;刘凌(通信作者),男,副教授,博士生导师。

基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(51977173)。

网络出版时间: 2023-10-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231026.0925.002>

estimate the load disturbance and the estimated disturbance value is fed forward to the improved sliding mode controller to further enhance the system's disturbance rejection capability. The numerical simulation results demonstrate that the proposed control strategy substantially improves the dynamic performance and disturbance rejection of the motor. When the motor is affected by load torque fluctuations, compared to PI control, the proposed control strategy reduces overshoot by about 23.1% and increases response speed by 62.5%. Compared to traditional sliding mode control, the proposed control strategy reduces overshoot by about 15.3% and increases response speed by 50%. The new sliding mode reaching law can effectively reduce sliding mode chattering. Compared to traditional sliding mode controllers, the improved sliding mode controller reduces motor chattering by about 50%.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; sliding mode control; new reaching law; extended state observer; disturbance rejection feedforward compensation

永磁同步电机(PMSM)由于体积小,可靠性高等特点,在电动汽车、轨道交通等新兴领域得到了广泛应用。这就要求对PMSM有高性能和高精度的控制,然而PMSM是一种高度非线性的系统,其动态性能受到诸多因素的影响,传统PI控制策略容易受内部参数变化和外部负载扰动的影响,在很多场合不能满足控制精度的要求^[1-3]。因此,为了提高系统鲁棒性,增强系统动态性能,诸多非线性控制方法被应用在PMSM调速系统中,包括滑模控制^[4-13]、自适应控制^[14-15]、预测控制^[16-17]和模糊控制^[18]等。

滑模控制具有鲁棒性强、响应迅速等特点,越来越多的研究采用滑模变结构理论设计PMSM控制系统,然而由于滑模固有的抖振问题,使得其应用于控制系统时会给控制系统带来高频抖振。因此,目前针对滑模变结构控制的研究主要集中在降低滑模抖振上。文献[19]设计了一种采用可变边界层的非奇异快速终端滑模面,在不影响跟踪精度的前提下降低了系统抖振,但是没有考虑外部扰动变化对控制系统的影响,导致系统鲁棒性较差。文献[20]设计了一种负载转矩扩展滑模观测器,将观测到的负载转矩进行前馈补偿,提高了滑模控制系统的抗扰性,但由于滑模控制器中存在转速的微分项,导致系统受高频噪声干扰较大,存在较大的抖振现象。文献[21-22]采用积分滑模面设计滑模控制器,避免了转速微分对控制系统性能的影响,减小了系统稳态误差。文献[23]设计了一种自适应快速终端滑模面,并采用Luenberger观测器估计系统扰动量的大小,将扰动估计值前馈至滑模控制器,增强了系统抗扰能力,减小了抖振现象。文献[24]设计了一种模糊滑模速度控制器,降低了控制系统对电机参数的依赖,并在一定程度上减小了系统抖振。

在上述文献的基础上,为了进一步提高PMSM控制系统性能,减小滑模抖振,本文设计了一种新型滑模趋近律,在传统指数趋近律中结合可变比例系数,并加入系统状态变量和滑模面的幂次项,减小控制系统抖振的同时增大了系统状态趋近滑模面的速度。采用积分滑模面设计了滑模速度控制器,减小稳态误差,提升控制系统精度。此外,为了减小负载扰动对系统控制性能的影响,设计了基于新型饱和函数的扩张状态观测器(ESO)观测扰动变化,将观测器前馈至滑模控制器,增强了系统抗扰性,并对设计的滑模控制器进行稳定性证明。仿真结果表明,本文提出的控制策略响应速度快、系统抖振小,并且可以有效抑制负载扰动对系统的影响。

1 新型趋近律设计

针对传统滑模控制方法响应速度慢、抖振大等问题,可以通过设计趋近律的方法增大系统响应速度,减小滑模抖振。常用的指数趋近律为

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \quad \epsilon, k > 0 \quad (1)$$

式中: k, ϵ 均为控制器参数; $-\epsilon \operatorname{sgn}(s)$ 代表等速趋近项; $-ks$ 代表指数趋近项; s 为滑模面。当系统状态远离滑模面时,指数项发挥主要作用,以提高趋近速度;而当系统状态接近滑模面时,等速项对趋近速度的影响较为显著,这在一定程度上减小了抖振。

由于含指数趋近项的趋近律不能保证有限时间到达滑模面,因此需要结合等速趋近项。但是,系统到达滑模面的速度由 k 决定,增加系统响应速度必然会增大滑模抖振。在等速趋近项中增大的 ϵ 可以加快系统到达滑模面的时间,增强系统动态性能,但是 ϵ 过大又会导致系统抖振增加。

在传统指数趋近律的基础上,设计了一种新型

趋近律如下

$$\dot{s} = -K |s|^a \operatorname{sgn}(s) - k_2 |s|^{b \operatorname{sgn}(|s|-1)} s$$

$$K = \frac{k_1}{\epsilon_1 + (1 - \epsilon_1) e^{-\delta |s|}} \quad (2)$$

式中: s 为滑模面; $k_1 > 0$; $k_2 > 0$; $0 < \epsilon_1 < 1$; $\delta > 0$; $0 < a < 1$; $0 < b < 1$ 。

如果系统状态离滑模面较远, 即 $|s|$ 较大, 则 $(1 - \epsilon_1) e^{-\delta |s|}$ 趋于 0, 且 $\operatorname{sgn}(|s| - 1) = 1$, 此时系统状态以变系数趋近律 $k_1 |s|^a / \epsilon_1$ 和指数趋近律 $k_2 |s|^b$ 到达滑模面。随着系统状态靠近滑模面, $|s|$ 减小, $\epsilon_1 + (1 - \epsilon_1) e^{-\delta |s|}$ 趋近于 1, 且 $k_2 |s|^{b \operatorname{sgn}(|s|-1)}$ 趋近于 k_2 , 滑模面的趋近律可简化为 $-k_1 \operatorname{sgn}(s) - k_2 s$ 。因此, 新型趋近律的设计可以在远离滑模面时加快系统的收敛速度, 在靠近滑模面时降低收敛速度, 减小抖振, 在增大系统响应速度的同时减小系统抖振。

2 基于新型趋近律的滑模控制器

2.1 永磁同步电机数学模型

为简化分析, 采取如下假设: 忽略磁路饱和; 忽略磁滞与涡流损耗; 转子上无阻尼绕组。则 PMSM 在 d - q - o 旋转坐标系下的定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = R_s i_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为定子电压在 d 、 q 轴上的分量; i_d 、 i_q 分别为定子电流在 d 、 q 轴上的分量; L_d 、 L_q 为电机的 d 、 q 轴电感; ω 为电角速度; ψ_f 为转子磁链。

对于表贴式永磁同步电机, 电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_q \quad (4)$$

运动方程为

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

式中: T_e 为电机电磁转矩; n_p 为电机极对数; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量。

2.2 扩张状态观测器设计

电机实际运行时, 负载扰动和电机参数等都会随时间变化, 为了保证系统稳定, 滑模控制的开关增益需要给定一个大于扰动上界的值。在扰动未知的情况下, 滑模增益一般要选取一个较大的值, 这会造成系统的抖振增大。为了减小抖振, 提出利用扩张状态观测器观测电机总扰动, 并将观测值前馈至滑模控制器, 考虑参数不确定性影响的情况, 可将永磁同步电机的运动方程表示为

$$\dot{\omega} = \alpha i_q - \beta T_L + r(t) = \alpha i_q + d(t) \quad (6)$$

式中: $\alpha = 3n_p^2 \psi_f / 2J$; $\beta = n_p / J$; $r(t)$ 为其余外部扰动; $d(t) = -\beta T_L + r(t)$ 。

根据式(6), 建立扩张状态观测器^[25]

$$\begin{cases} \dot{s} = \hat{\omega} - \omega \\ \dot{\hat{\omega}} = \alpha i_q + \hat{d}(t) \\ \dot{\hat{d}}(t) = -\lambda F(s) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\hat{\omega}$ 为角速度 ω 的估计值; $\hat{d}(t)$ 为外部扰动 $d(t)$ 的估计值; $F(s)$ 为新型饱和函数, 表达式为

$$F(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta \\ (s/\Delta)^{1/\mu}, & |s| \leq \Delta \\ -1, & s < -\Delta \end{cases} \quad (8)$$

式中: Δ 为边界层厚度; μ 为自适应幂次数, 为正奇数。

2.3 滑模速度控制器设计

取 PMSM 系统的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega^* - \omega \\ x_2 = \int_{-\infty}^t x_1 dt = \int_{-\infty}^t (\omega^* - \omega) dt \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω^* 和 ω 分别为电机给定转速和实际转速。

由式(4)、式(5)和式(9), 可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega} = -\frac{n_p}{J} \left(\frac{3}{2} n_p \psi_f i_q - T_L \right) \\ \dot{x}_2 = x_1 = \omega^* - \omega \end{cases} \quad (10)$$

为避免速度误差的微分带来的高频噪声干扰, 本文采用积分滑模面减小高频噪声干扰, 提升系统动态性能。选取滑模面为

$$s = x_1 + c x_2 \quad (11)$$

式中: c 为常数且 $c > 0$ 。

对式(11)求导, 得

$$\dot{s} = \dot{x}_1 + c \dot{x}_2 = -\dot{\omega} + c x_1 \quad (12)$$

结合式(2)、式(6)和式(12), 可得滑模控制器输出为

$$i_q^* = \frac{1}{\alpha} (K \operatorname{sgn}(s) + k_2 |s|^{b \operatorname{sgn}(|s|-1)} s + c x_1 - \hat{d}(t)) \quad (13)$$

为保证系统在任意初始状态都能到达滑模面, 定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (14)$$

对式(14)求导, 结合式(6)、式(12), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{s} s &= s(-\alpha i_q - d(t) + c x_1) = \\ &= s(-K |s|^a \operatorname{sgn}(s) - k_2 |s|^{b \operatorname{sgn}(|s|-1)} s) \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

由 Lyapunov 稳定性判据可知, 本文所提出的

基于新型趋近律的滑模控制器是稳定的,并且在有限时间内误差会收敛于 0。

本文提出的改进控制策略的系统控制框图如图 1 所示。

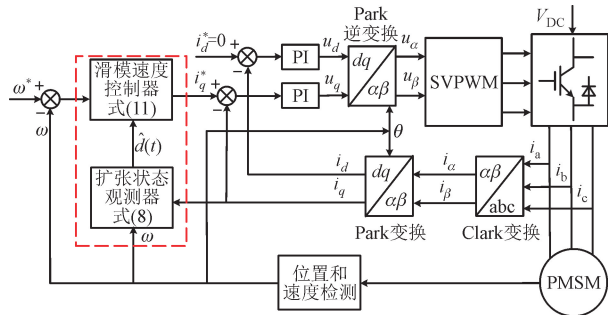


图 1 本文提出的改进控制策略的系统控制框图
Fig.1 System control diagram of the proposed improved control strategy

3 数值仿真分析

本节通过仿真验证所提出的控制策略的有效性。仿真所用 PMSM 参数如表 1 所示,采样频率为 10 kHz。为确保仿真结果对比的公平性,首先调节基于指数趋近律的滑模控制器性能至最佳,控制参数为 $\epsilon = 23, k = 5$ 。随后控制改进滑模控制器参数 $k_1 = 23, k_2 = 5$,调节其余参数确保改进滑模控制器性能至最佳,所用参数如表 2 所示。PI 控制器参数为 $k_p = 0.07, k_i = 31.42$ 。

表 1 永磁同步电机参数

Table 1 Parameters of the PMSM

参数	数值
额定功率 P_N/W	750
额定电流 I_N/A	4
额定转速 $n_N/(r \cdot \min^{-1})$	1 500
极对数	5
永磁体磁链 Ψ_f/Wb	0.07
定子电阻 R_s/Ω	6.11
$d、q$ 轴电感 L/H	0.008 26

表 2 基于 ESO 的改进滑模控制器所用参数

Table 2 Parameters of improved sliding mode controller based on ESO

参数	数值
k_1	23
k_2	5
ϵ_1	0.01
δ	0.05
a	0.5
b	0.2
λ	1
μ	3

电机起动时转速给定为 1 000 r/min,在第 1 s 转速给定变为 1 500 r/min。电机负载转矩在第 3 s 阶跃增加 1 N·m,在第 5 s 阶跃减小 1 N·m。PI 控制器仿真结果如图 2 所示,基于等速趋近律的滑模控制器仿真结果如图 3 所示,基于新型趋近律的滑模控制器仿真结果如图 4 所示。

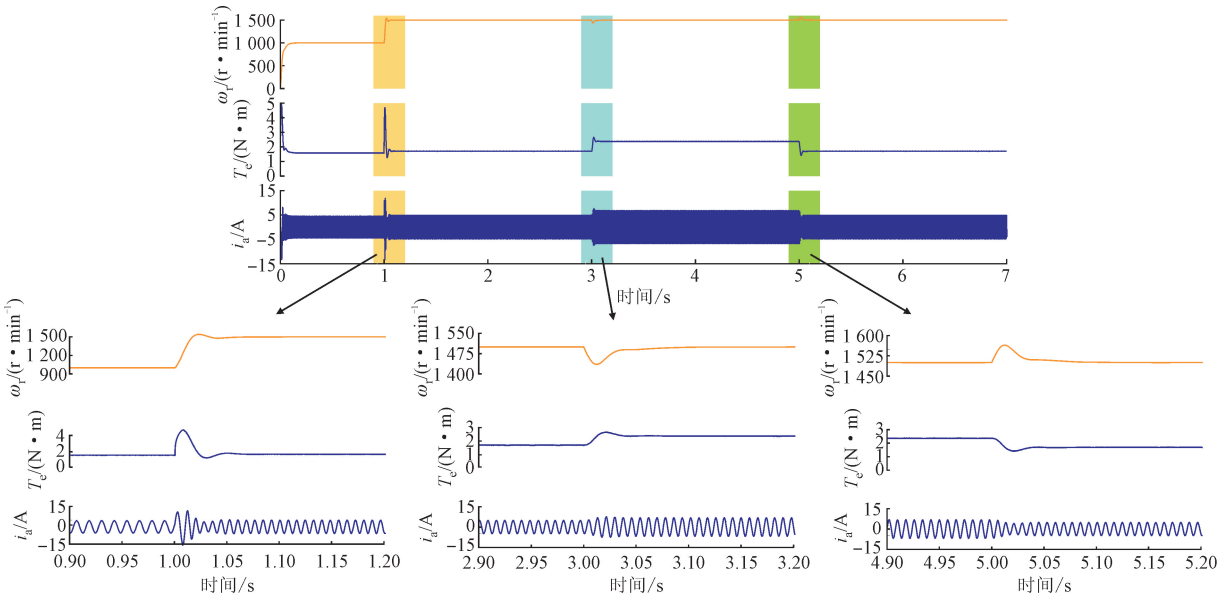


图 2 PI 控制器仿真结果
Fig. 2 Simulation results of PI controller

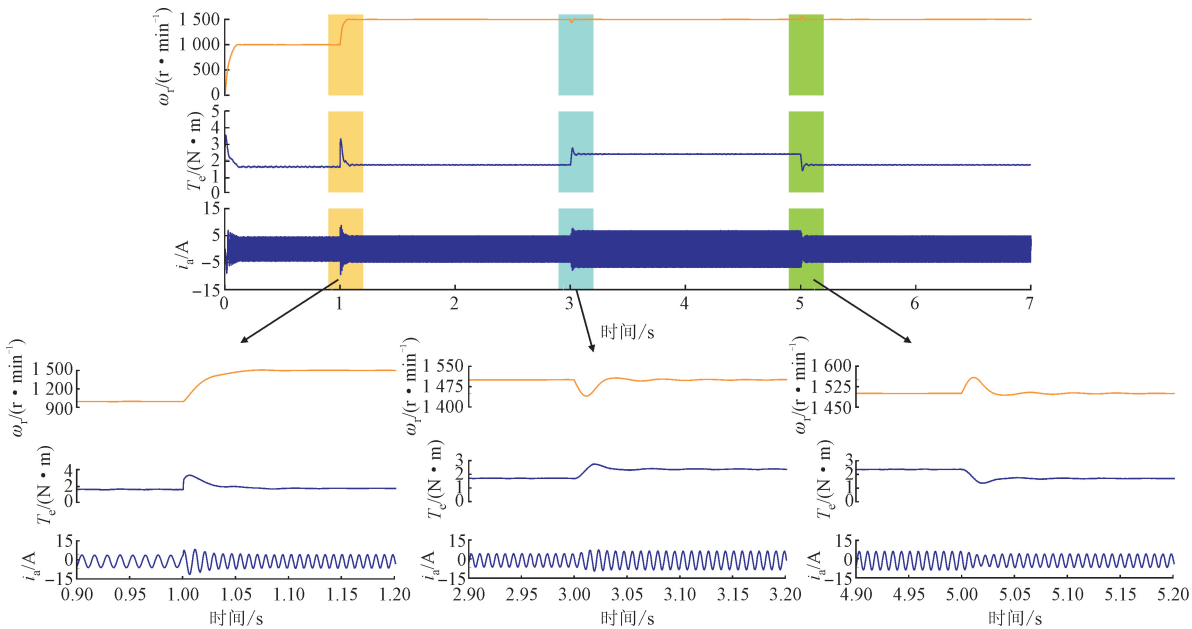


图 3 基于指数趋近律的滑模控制器仿真结果

Fig. 3 Simulation results of sliding mode controller based on exponential reaching law

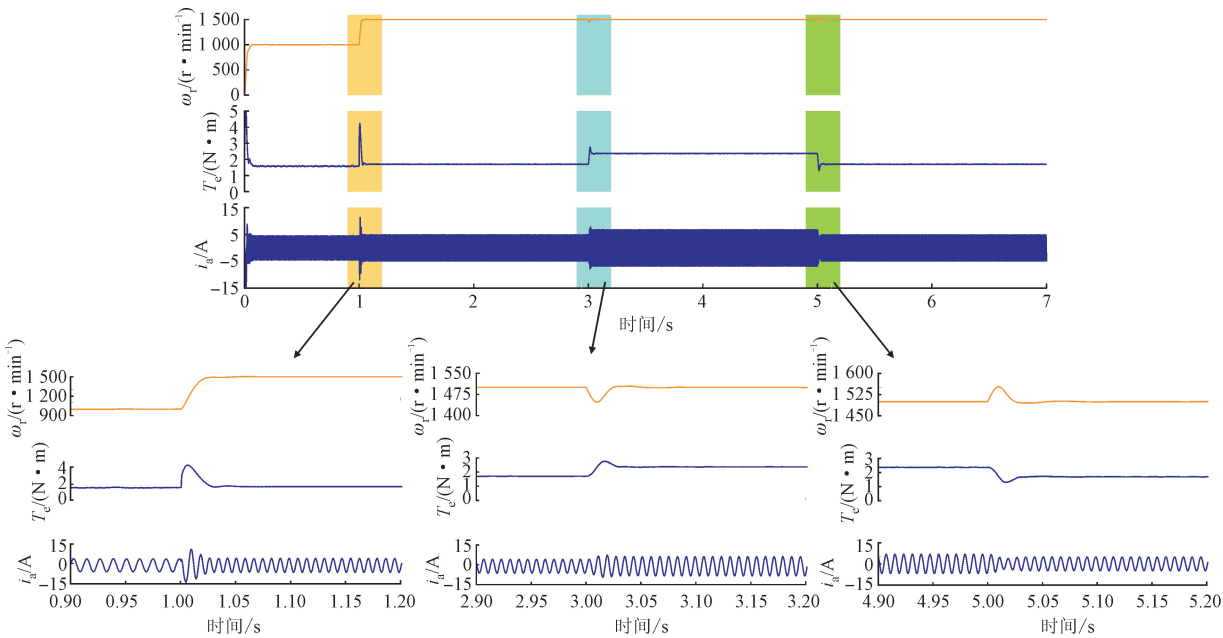


图 4 基于新型趋近律的滑模控制器仿真结果

Fig. 4 Simulation results of sliding mode controller based on a new reaching law

由图 2 可知,采用传统 PI 控制,电机存在响应速度慢、抗扰性较差等问题。电机转速由 1 000 r/min 升至 1 500 r/min 时,存在约 40 r/min 的超调量,并且电机转速经过 0.07 s 才趋于稳定。电机突增负载时,电机转速下降了 65 r/min;电机突卸负载时,电机转速增加 64 r/min,经过 0.08 s 电机转速趋于稳定。

由图 3 可知,采用基于指数趋近律的传统滑模控制时,电机响应速度和抗扰能力都得到一定提升。电机转速由 1 000 r/min 升至 1 500 r/min 时,电机转速经过 0.06 s 达到给定转速;电机突增负载时,电机转速下降 59 r/min,电机突卸负载时,电机转速增加 58 r/min,经过 0.06 s 电机转速趋于稳定。

由图 4 可知,采用基于新型趋近律的滑模控制

时,电机响应速度和抗扰能力得到明显提升。电机转速由 1 000 r/min 升至 1 500 r/min 时,电机转速经过 0.02 s 达到给定转速,比 PI 控制响应速度提高了 71.4%,比传统滑模控制响应速度提高 66.6%。电机突增负载时,电机转速下降了 50 r/min,电机突卸负载时,电机转速增加了 51 r/min,经过 0.03 s 电机转速即趋于稳定,比 PI 控制电机超调量减小约 23.1%,响应速度提高 62.5%,比传统滑模控制电机超调量减小约 15.3%,响应速度提高 50%。

图 5 为基于扩张状态观测器的负载转矩估计结果。由图 5 可知,观测器可以较为准确地估计负载转矩,在电机突增和突卸负载时也可以快速跟踪负载转矩的变化,响应速度较快。

图 6 为分别采用传统滑模控制器和基于新型趋近律的滑模控制器电机稳定运行时转速抖振情况。可以看到,采用新型滑模控制器可以有效降低抖振,相比传统滑模控制器,电机抖振降低约 50%。

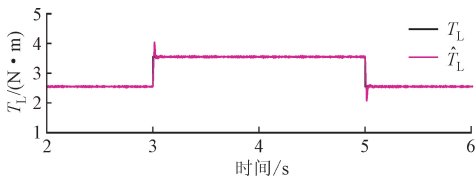
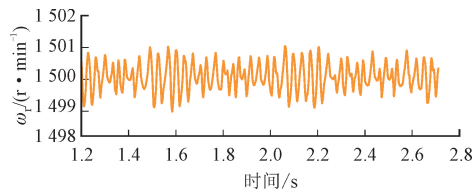
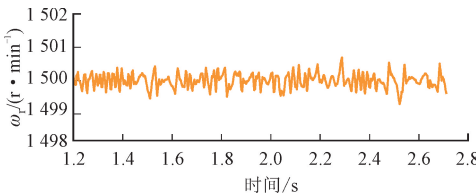


图 5 基于扩张状态观测器的负载转矩估计结果
Fig. 5 Estimated load torque based on extended state observer



(a)传统滑模控制器



(b)改进滑模控制器

图 6 传统滑模控制器和改进滑模控制器转速抖振对比
Fig. 6 Comparison of speed chattering between traditional sliding mode controller and improved sliding mode controller

4 结 论

本文提出了一种基于负载转矩观测的永磁同步

电机改进滑模控制策略。针对传统滑模控制中存在的滑模抖振及响应速度慢的问题,在传统指数趋近律的基础上加入可变比例系数并引入系统状态变量和滑模面的幂次项,设计了一种新型趋近律;结合扩张状态观测器实时估计负载转矩,将负载转矩的估计值前馈至滑模控制器,提高了系统的抗扰性。通过数值仿真分析,将本文提出的控制策略与传统 PI 控制、基于传统指数趋近律的滑模控制进行了对比,结果表明,本文所提出的控制策略可以有效提高电机动态性能和抗扰性能,电机负载转矩波动时转速恢复时间短,超调量小,电机稳定运行时也可以有效削弱系统抖振。

参考文献:

[1] 李政,胡广大,崔家瑞,等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 431-437.
LI Zheng, HU Guangda, CUI Jiarui, et al. Sliding-modevariable structure control with integral action for permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 431-437.

[2] 汪海波,周波,方斯琛. 永磁同步电机调速系统的滑模控制 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 71-77.
WANG Haibo, ZHOU Bo, FANG Sichen. A PMSM sliding mode control system based on exponential reaching law [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 71-77.

[3] JUNEJO A K, XU Wei, MU Chaoxu, et al. Adaptive speed control of PMSM drive system based a new sliding-mode reaching law [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12110-12121.

[4] WANG Yaoqiang, FENG Yutao, ZHANG Xiaoguang, et al. A new reaching law for anti-disturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35 (4): 4117-4126.

[5] QU Lizhi, QIAO Wei, QU Liyan. Active-disturbance-rejection-based sliding-mode current control for permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 751-760.

[6] LIN Qilian, LIU Ling, LIANG Deliang. Hybrid active flux observer to suppress position estimation error for sensorless IPMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 872-886.

[7] XU Bo, ZHANG Lei, JI Wei. Improved non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on

- Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2753-2762.
- [8] HOU Qiankang, DING Shihong, YU Xinghuo. Composite super-twisting sliding mode control design for PMSM speed regulation problem based on a novel disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 2591-2599.
- [9] 刘颖, 周波, 方斯琛. 基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 80-85.
- LIU Ying, ZHOU Bo, FANG Sichen. Sliding mode control of PMSM based on a novel disturbance observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 80-85.
- [10] XU Wei, JUNEJO A K, LIU Yi, et al. An efficient anti-disturbance sliding-mode speed control method for PMSM drive systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6879-6891.
- [11] 陈思溢, 皮佑国. 基于滑模观测器与滑模控制器的永磁同步电机无位置传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 108-117.
- CHEN Siyi, PI Youguo. Position sensorless control for permanent magnet synchronous motor based on sliding mode observer and sliding mode controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 108-117.
- [12] 刘凌, 司杰文, 林起联. 支持向量机预测可变参数的永磁同步电机快速终端滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(6): 53-60.
- LIU Ling, SI Jiewen, LIN Qilian. A fast terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motor with variable parameters predicted by SVM [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(6): 53-60.
- [13] 毛亮亮, 周凯, 王旭东. 永磁同步电机变指数趋近律滑模控制 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20(4): 106-111.
- MAO Liangliang, ZHOU Kai, WANG Xudong. Variable exponent reaching law sliding mode control of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(4): 106-111.
- [14] 鲁文其, 胡育文, 梁骄雁, 等. 永磁同步电机伺服系统抗扰动自适应控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 75-81.
- LU Wenqi, HU Yuwen, LIANG Jiaoyan, et al. Anti-disturbance adaptive control for permanent magnet synchronous motor servo system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 75-81.
- [15] JUNG J W, LEU V Q, DO T D, et al. Adaptive PID speed control design for permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 900-908.
- [16] 靳东松, 刘凌. 永磁同步电机的改进无差拍预测抗扰前馈控制 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(7): 38-46.
- JIN Dongsong, LIU Ling. Improved control strategy combining deadbeat predictive current control with disturbance rejection feedforward compensation for permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(7): 38-46.
- [17] ZHANG Yongchang, JIN Jialin, HUANG Lanlan. Model-free predictive current control of PMSM drives based on extended state observer using ultra local model [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 993-1003.
- [18] WANG Chao, ZHU Z Q. Fuzzy logic speed control of permanent magnet synchronous machine and feedback voltage ripple reduction in flux-weakening operation region [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1505-1517.
- [19] 常雪剑, 刘凌, 崔荣鑫. 永磁同步电机非奇异快速终端可变边界层滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 53-59.
- CHANG Xuejian, LIU Ling, CUI Rongxin. A nonsingular fast terminal sliding mode controller with varying boundary layers for permanent magnet synchronous motors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 53-59.
- [20] 张晓光, 孙力, 赵克. 基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 111-116.
- ZHANG Xiaoguang, SUN Li, ZHAO Ke. Sliding mode control of PMSM based on a novel load torque sliding mode observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 111-116.
- [21] 陈振, 耿洁, 刘向东. 基于积分时变滑模控制的永磁同步电机调速系统 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 56-61.
- CHEN Zhen, GENG Jie, LIU Xiangdong. An integral and exponential time-varying sliding mode control of permanent magnet synchronous motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 56-61.
- [22] GUO Xin, HUANG Shoudao, PENG Yu, et al. An improved integral sliding mode control for PMSM drives based on new variable rate reaching law with adaptive reduced-order PI observer [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3):

4503-4516.

[23]

CHEN Long, ZHANG Hongming, WANG Hai, et al. Continuous adaptive fast terminal sliding mode-based speed regulation control of PMSM drive via improved super-twisting observer [J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023: 1-10 [2023-08-22]. <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3288147>.

[24]

LEU V Q, CHOI H H, JUNG J W. Fuzzy sliding mode speed controller for PM synchronous motors with a load torque observer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1530-1539.

[25]

韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器 [J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.
HAN Jingqing. The "extended state observer" of a class of uncertain systems [J]. Control and Decision, 1995, 10(1): 85-88.

(编辑 杜秀杰)