

基于改进趋近律和扰动观测器的PMSM滑模控制

鲁本恒

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12月10日; 录用日期: 2025年1月3日; 发布日期: 2025年1月13日

摘 要

为了提高永磁同步电机转速控制的响应性能及鲁棒性, 同时解决传统滑模控制中趋近模态存在的趋近时间和系统抖震幅值之间的固有矛盾, 提出了一种基于改进自适应趋近律和扰动观测器的滑模控制方法。设计一种改进自适应趋近律, 引入复合函数项并结合积分滑模面构造速度环滑模控制器。同时设计积分终端滑模扰动观测器, 用于实时监测系统内部参数的变化及外部扰动, 并将估计值前馈补偿给滑模控制器以抑制扰动的影响。仿真实验表明, 提出的滑模控制方法有效提高了响应速度, 突增负载时, 转速波动小, 恢复时间短。结果表明提出的滑模控制方法, 可以有效改善永磁同步电机转速控制的动态性能, 提高鲁棒性, 抑制抖震现象, 为实现高精度稳定的速度控制提供了切实可行的方案。

关键词

永磁同步电机, 滑模控制, 自适应趋近律, 扰动观测器

Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Improved Reaching Law and Disturbance Observer

Benheng Lu

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

Received: Dec. 10th, 2024; accepted: Jan. 3rd, 2025; published: Jan. 13th, 2025

Abstract

In order to enhance the response performance and robustness of the speed control for permanent magnet synchronous motor (PMSM), and to address the inherent contradiction between the approach time and the system's oscillation amplitude in the sliding mode control, an improved sliding mode control method based on an adaptive approach law and a disturbance observer has been proposed. This method introduces a composite function item and combines it with an integral sliding surface to construct a sliding mode controller for the speed loop. Additionally, an integral terminal sliding mode disturbance observer is designed to monitor the changes in internal parameters and external disturbances in real-time, and the estimated values are used to compensate the sliding mode controller to suppress the effects of disturbances. Simulation experiments have shown that the proposed sliding mode control method effectively improves the response speed, with minimal speed fluctuations and short recovery times when sudden loads are applied. The results indicate that the proposed sliding mode control method can significantly improve the dynamic performance of PMSM speed control, enhance robustness, suppress oscillation phenomena, and provide a feasible solution for achieving high-precision and stable speed control.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor, Sliding Mode Control, Adaptive Reaching Law, Disturbance Observer

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(PMSM)具有效率高、结构简单、成本低等优点,在轨道交通、航空航天、装备制造、新能源等领域被广泛应用[1]。然而,PMSM是一个具有多变量、强耦合、非线性和变参数特性的复杂系统,PI控制器无法满足PMSM对高性能控制的要求,且PI控制器对系统模型的精确性依赖较高,容易受到外部扰动和内部参数变化的影响[2][3]。针对这些问题,国内外学者提出了各种控制策略,如自抗扰控制[4]、自适应控制[5]、模糊控制[6]和滑模控制[7](Sliding Mode Control, SMC)。其中,由于滑模控制对模型精度的要求较低,对参数变化不敏感,并且能够有效克服系统参数变化和内部扰动的影响,因此在PMSM控制系统中得到了广泛应用。

然而,SMC存在的抖震现象会影响控制的精确性。目前,为了消除系统抖振,国内外学者提出了许多解决方法,例如高阶滑模[8],趋近律[9]方法,分数阶滑模[10]。其中因为趋近律与系统状态到达滑模面的过程密切相关,合理设计趋近率可以有效改善响应速度并减少系统的抖振现象。

Fallaha C J [11]提出自适应趋近律(Adaptive Reaching Law, ARL),使切换增益随系统状态变量与滑模面的距离自适应变化,有效减少了系统的抖振现象并缩短了响应时间,从而显著改善了系统性能。Guo X [12]提出一种复合趋近律,结合了指数函数和幂项分段函数,成功缩短了响应时间,并减小了抖振现象。Han H [13]提出了一种基于时变滑模面的自适应趋近律,实现高跟踪精度的快速收敛,同时减小了抖振现象。Yu X [14]提出一种快速趋近律,结合具有系统状态变量初始位置的自适应项,克服了传统趋近率趋近滑模面时固定抖震幅值的缺陷,实现了快速的动态响应和较小的抖振。

此外, 由于 PMSM 控制系统存在外部干扰和内部参数变化, 将 SMC 和扰动观测器结合可以有效提升系统的鲁棒性。Nguyen T H [15]提出一种基于改进降阶比例积分观测器的自适应滑模控制方法, 克服了在速度突变过程中对未知干扰的不正确估计导致的速度响应过冲问题。Xiong J [16]提出一种扩展双状态观测器, 设计控制输入增益和集总扰动两个扩展状态, 从而改善了 PMSM 的速度跟踪性能。Qi G [17]提出一种积分补偿函数观测器, 有效克服了扩张状态观测器的固有缺陷, 提高了估计精度。

基于以上研究, 本文设计了一种改进自适应趋近律(Improving Adaptive Reaching Law, IARL), 解决了系统趋近滑模面时增益快速减少导致响应时间增加的缺点, 有效提高了系统的动态性能。此外, 设计了积分终端滑模扰动观测器(Integrated Terminal Sliding Mode Disturbance Observer, ITSMDO), 能够快速准确的估计负载转矩和内部参数变动, 并将观测值前馈补偿到速度控制器, 以增强系统的抗扰能力。仿真实验验证了 IARL + ITSMDO 的有效性, 结果表明提出的方法加快了系统响应, 有效减少了抖振, 有效提高了控制系统的鲁棒性。

2. PMSM 数学模型

为简化分析, 假设 PMSM 是理想电机, 且忽略永磁体磁滞和涡流损耗、忽略磁路饱和、忽略电感参数等变化。则 PMSM 在 d - q 轴坐标系中的电压方程如下:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega_e i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d \omega_e i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

PMSM 电磁转矩方程为:

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

PMSM 机械运动方程为:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (3)$$

式中: u_d 、 i_d 和 L_d 分别是 d 轴的电压、电流和电感; u_q 、 i_q 和 L_q 分别是 q 轴的电压、电流和电感; R 为定子电阻, ω_e 是转子的电角速度; T_e 是电磁转矩; T_L 是负载转矩; P_n 是转子极对数; Ψ_f 为永磁体磁链; J 是转动惯量; ω_m 是转子的机械角速度; B 是粘性摩擦系数; T_L 是负载转矩。

当采用表贴式 PMSM 作为被控对象时, 有 $L_d = L_q$, 式(2)简化为:

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

3. 滑模趋近率设计

3.1. 传统趋近率分析

常数趋近率为:

$$\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s) \quad (5)$$

式中: k 是增益, $k > 0$ 。

对式(5)进行积分可获得响应时间为:

$$t_r = \frac{|s_0|}{k} \quad (6)$$

由式(6)分析可知, 增大增益 k 可以减小响应时间 t_r , 但也会增大抖振, 反之亦然。

指数趋近率(Exponential Reaching Law, ERL)是常数趋近率的改进形式, 其表达式为:

$$\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s) - \varepsilon s \quad (7)$$

式中: k 和 ε 是增益, $k > 0$, $\varepsilon > 0$ 。

对式(5)进行积分可获得响应时间为:

$$t_r = \frac{1}{k} \ln \left[\frac{k + \varepsilon |s(0)|}{k} \right] \quad (8)$$

由式(8)分析可知, 指数趋近率通过引入负反馈项 $-\varepsilon s$ 来加速系统状态变量的收敛速度, 以实现更快的系统响应, 但增益 k 和响应时间 t_r 的矛盾仍然存在。因此传统趋近率在响应速度和抖振幅值之间存在着不可调和的矛盾。

3.2. 改进自适应趋近率设计

基于上述分析, 为解决传统趋近率的缺点, 结合 ERL 和文献[11], 本文提出改进自适应趋近率(IARL)。其表达式为:

$$\begin{cases} \dot{s} = -f(s) \operatorname{sat}(s) - K_2 s \left(\gamma_1 |s|^\nu + \frac{\gamma_2}{|s|^\nu} \right) \\ f(s) = \frac{|s| K_1}{(|s| + \beta) (\delta_0 + (1 - \delta_0) e^{-\alpha |s|^p})} \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_1 为切换项增益, K_2 为指数项增益, $K_1, K_2 > 0$; $0 < \delta_0 < 1$, $\alpha > 0$, $\beta > 2$, $p > 0$, $1 > \nu > 0$, $\gamma_1 > \gamma_2 > 0$;

在 IARL 中自适应项系数 $f(s)$ 的值随系统从远离滑模面到趋近滑模面的过程中由较大值逐渐减小, 使趋近速度合理变化, 增强了系统的动态响应性能, 降低了抖震。其次, 传统趋近律中比例项 $-ks$ 在趋近过程中逐渐收敛到 0, 并且越靠近滑模面, 趋近速度越小, 使系统响应时间增加。因此在 IARL 中, 将比例项 $-K_2 s$ 与复合函数 $\gamma_1 |s|^\nu + \frac{\gamma_2}{|s|^\nu}$ 结合, 当系统远离滑模面时, 即 $|s| > 2\sqrt{\frac{\gamma_2}{\gamma_1}}$, 比例项的系数随 s 的增大而

增大。当系统接近滑模面时, 即 $|s| < 2\sqrt{\frac{\gamma_2}{\gamma_1}}$, 在复合函数 $\frac{\gamma_2}{|s|^\nu}$ 项的作用下, 使比例项系数减缓减小趋势, 加快趋近速度。同时传统趋近律以不连续的符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$ 作为控制函数不利于在整体上抑制抖振, 因此 IARL 采用式(10)所示饱和函数代替符号函数以进一步抑制抖震。

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} -1 & s < -\Delta \\ \frac{s}{\Delta} & |s| \leq \Delta \\ 1 & s > \Delta \end{cases} \quad (10)$$

式中: Δ 为边界层厚度, $1 > \Delta > 0$ 。

4. 滑模速度控制器设计

取 PMSM 系统的状态变量为:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \\ x_2 = \frac{dx_1}{dt} = -\frac{d\omega_m}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

式中： ω_{ref} 为给定转速， ω_m 为实际转速。

由式(3)，(4)可得：

$$\dot{\omega}_m = \frac{3p_n\psi_f}{2J}i_q - \frac{T_L}{J} - \frac{B\omega_m}{J} \quad (12)$$

滑模面的设计决定了滑动模态的运动品质，线性滑模面对非线性特性和状态估计误差敏感，且鲁棒性有限。而积分型滑模面通过引入积分项，有效消除了稳态误差并提高系统的跟踪精度，减少了抖震，提高了系统鲁棒性，因此取如下积分型滑模面：

$$s = x_1 + K_3 \int_0^t x_1 dt \quad (13)$$

式中： K_3 为增益， $K_3 > 0$ 。

对式(13)求导可得

$$\dot{s} = \dot{x}_1 + K_3 x_1 = x_2 + K_3 x_1 \quad (14)$$

结合式(9)，(12)，(14)可得滑模控制器的输出方程为：

$$i_q^* = \frac{1}{D} \left[f(s) \text{sat}(s) + K_2 s \left(\gamma_1 |s|^\nu + \frac{\gamma_2}{|s|^\nu} \right) + K_3 x_1 + \frac{T_L}{J} + \frac{B\omega_m}{J} \right] \quad (15)$$

式中： $D = \frac{3p_n\psi_f}{2J}$ 。

为证明滑模控制器的稳定性，定义 Lyapunov 函数：

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (16)$$

结合式(9)、式(10)，对式(16)求导可得：

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \cdot \dot{s} = s \left[-f(s) \text{sat}(s) - K_2 s \left(\gamma_1 |s|^\nu + \frac{\gamma_2}{|s|^\nu} \right) \right] \\ &= -f(s) \cdot s \cdot \text{sat}(s) - K_2 s^2 \left(\gamma_1 |s|^\nu + \frac{\gamma_2}{|s|^\nu} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

由式(10)知 $s \cdot \text{sat}(s) \geq 0$ ， $e^{-\alpha|s|^p} \geq 1$ ，又由各参数取值范围可知：

$$\begin{cases} -\frac{|s|K_1}{(|s| + \beta)(\delta_0 + (1 - \delta_0)e^{-\alpha|s|^p})} \cdot s \cdot \text{sat}(s) < 0 \\ -K_2 s^2 \left(\gamma_1 |s|^\nu + \frac{\gamma_2}{|s|^\nu} \right) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

因此 $\dot{V} = s \cdot \dot{s} \leq 0$ ，根据 Lyapunov 稳定性理论，所设计的控制系统是稳定的。

5. 扰动观测器设计

为了克服扩展状态观测器(Extended State Observer, ESO)的缺点, 提高系统的抗扰动性能。设计了积分终端滑模扰动观测器(ITSMDO)。由式(3), (4)可知, 考虑系统参数变化、负载突变和未建模动态的影响, 令 f_ω 表示由系统参数变化、负载突变和未建模动态引起的集总扰动, 式(3)可以重写为:

$$\dot{\omega}_m = \frac{3p_n\psi_f}{2J}i_q - \frac{B\omega_m}{J} + \frac{f_\omega}{J} \quad (19)$$

在 PMSM 控制系统中, 由于系统集总扰动的变化率很小, 其一阶导数可视为零, 即 $\dot{f}_\omega = 0$ 。取机械角速度 ω_m 、系统总扰动 f_ω 作为状态变量, 机械角速度 ω_m 为系统输出, 构建扰动下系统状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_m = \frac{3p_n\psi_f}{2J}i_q - \frac{B\omega_m}{J} + \frac{f_\omega}{J} \\ \dot{f}_\omega = 0 \\ y = \omega_m \end{cases} \quad (20)$$

将 ω_m 和 f_ω 作为观测对象, 定义观测器状态变量 $z_1 = \omega_m$, $z_2 = f_\omega$, 以估计 PMSM 控制系统的集总扰动 f_ω , 设计 ITSMDO 状态空间方程如下:

$$\begin{cases} e_\omega = \omega_m - \hat{\omega}_m \\ \dot{z}_1 = \frac{3p_n\psi_f}{2J}i_q - \frac{B}{J}\hat{z}_1 + \frac{\hat{z}_2}{J} - U(e_\omega) \\ \dot{z}_2 = -\theta U(e_\omega) \end{cases} \quad (21)$$

式中: θ 是观测器的可调参数; $U(e_\omega)$ 表示对应于转速观测误差 $e_\omega = \omega_m - \hat{\omega}_m$ 的滑模控制律。

由式(28)减式(29)可得 ITSMDO 的误差方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_\omega = -\frac{B}{J}e_\omega - \frac{e_f}{J} - U(e_\omega) \\ \dot{e}_f = -\theta U(e_\omega) \end{cases} \quad (22)$$

设计积分型终端滑模面:

$$s_\omega = e_\omega + c_1 \int_0^t e_\omega dt + c_2 \int_0^t |e_\omega|^\lambda \operatorname{sgn}(e_\omega) dt \quad (23)$$

式中: $c_1 > 0$, $c_2 > 0$, $1 > \lambda > 0$ 。

对式(31)求导得:

$$\dot{s}_\omega = \dot{e}_\omega + c_1 e_\omega + c_2 |e_\omega|^\lambda \operatorname{sgn}(e_\omega) \quad (24)$$

选取幂次趋近率:

$$\dot{s}_\omega = -K_4 |s_\omega|^q \operatorname{sgn}(s_\omega) \quad (25)$$

式中: $K_4 > 0$, $q > 0$ 。

结合式(30), 式(32), 式(33), 将 $-e_f$ 项作为扰动观测器的扰动项, 得到如下扰动观测器的控制率:

$$U(e_\omega) = K_4 |s_\omega|^q \operatorname{sgn}(s_\omega) + c_1 e_\omega + c_2 |e_\omega|^\lambda \operatorname{sgn}(e_\omega) - \frac{B}{J} e_\omega \quad (26)$$

定义 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (27)$$

结合式(15)、式(16)对式(17), 根据 Lyapunov 稳定性理论, 滑模面存在和可达的条件为:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s_\omega \cdot \dot{s}_\omega \\ &= s_\omega \left[-\frac{B}{J} e_\omega - \frac{e_f}{J} - U(e_\omega) + c_1 e_\omega + c_2 |e_\omega|^\lambda \operatorname{sgn}(e_\omega) \right] \\ &= s_\omega \left[-\frac{e_f}{J} - K_4 |s_\omega|^q \operatorname{sgn}(s_\omega) \right] < 0\end{aligned}\quad (28)$$

为使扰动观测器稳定, 克服 e_f 引起的影响, 确保式(28)始终成立, 控制律参数 K_4 应选择得足够大且满足:

$$K_4 > \max \left(\frac{e_f}{|s_\omega|^q} \right) \quad (29)$$

将上述扰动观测值 $\hat{f}_\omega$ 带入式(25)中可得滑模控制器的控制律:

$$i_q^* = \frac{1}{D} \left[f(s) \text{sat}(s) + K_2 s \left(\gamma_1 |s|^\nu + \frac{\gamma_2}{|s|^\nu} \right) + K_3 x_1 + \frac{B \omega_m}{J} + \frac{\hat{f}_\omega}{J} \right] \quad (30)$$

根据式(30),在控制器中引入系统扰动的观测值作为补偿,可加快控制系统的响应速度,提高控制系统的抗扰动性能。

6. 仿真验证与分析

基于 MATLAB/simulink 仿真平台搭建永磁同步电机矢量控制系统, 验证提出的改进自适应趋近率和 ITSMDO 的结合的可行性。控制结构框图如图 1 所示, 设置 PMSM 参数如表 1 所示。

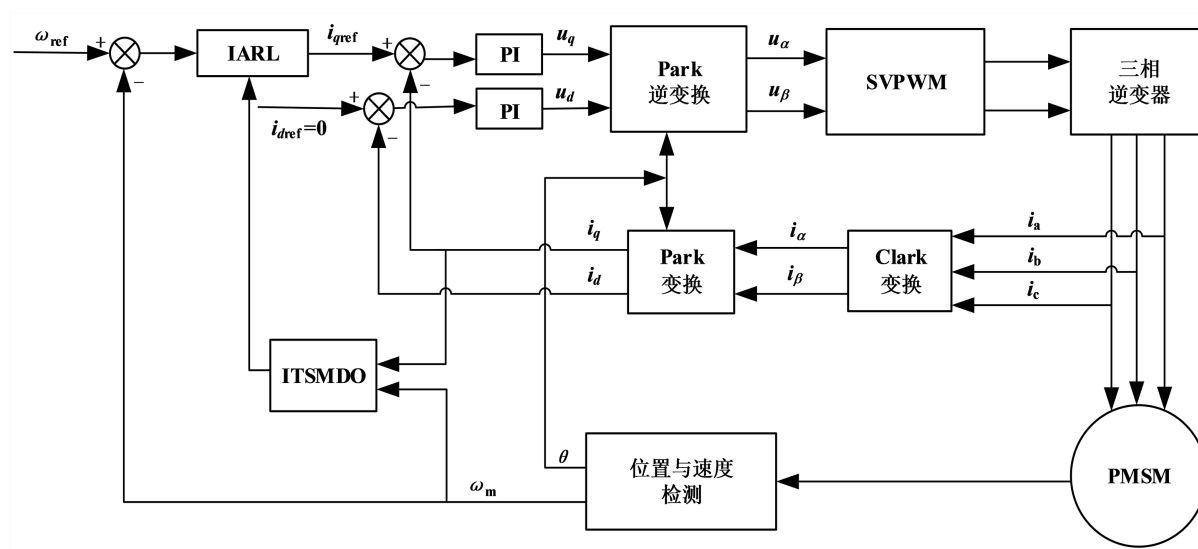


Figure 1. PMSM sliding mode control system block diagram

图 1. PMSM 滑模控制系统框图

Table 1. PMSM parameters
表 1. PMSM 参数

参数	质量
定子电阻 R/Ω	2.875
定子 d - q 轴电感 L/mH	8.5
磁极对数 p	4
永磁体磁链 Ψ_f/Wb	0.175
转动惯量 $J/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	0.003
粘性摩擦系数 $B/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	0.008

6.1. 负载转速突变仿真实验

为验证系统在负载 $10\text{ N}\cdot\text{m}$ 时的启动性能和转速突变时速度跟踪性能，设置初始给定转速为 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，在 0.2 s 时由 $500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $1000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，仿真时间设置为 0.5 s 。图 2 为 PMSM 转速响应曲线，表 2 为转速突变时转速变化数据。

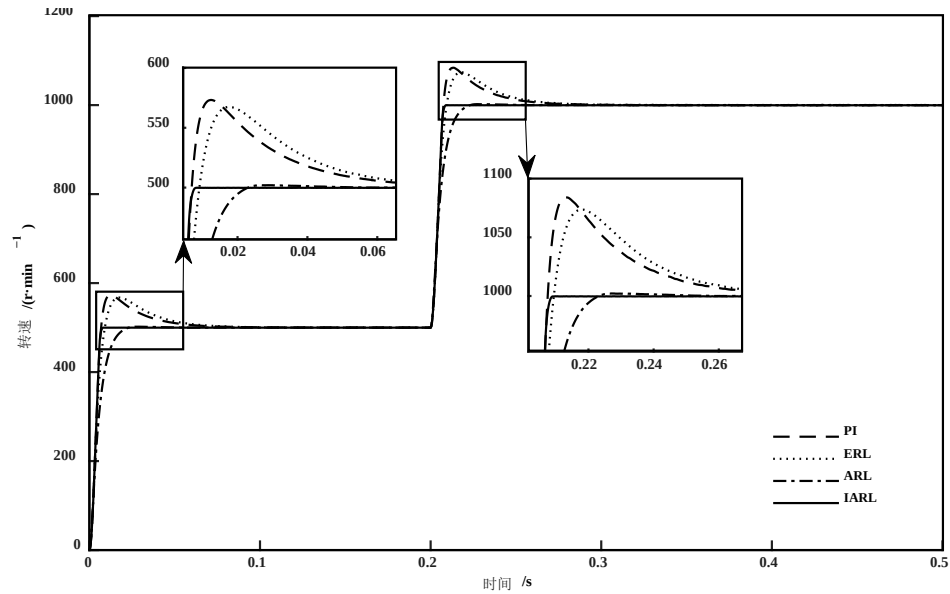


Figure 2. Speed response curve of PMSM under sudden speed change
图 2. 转速突变时 PMSM 转速响应曲线

Table 2. Speed response analysis table of PMSM under sudden speed change
表 2. 转速突变时 PMSM 转速响应分析表

控制算法	响应时间 (s)	扰动量 ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	超调量 (%)
PI	0.1	80	8
ERL	0.1	73	7.3
ARL	0.05	2	0.2
IASMRL	0.01	0.4	0.04

由图 2 及表 2 可知，启动时 PI 和 ERL 的转速响应有较大的超调和较长的响应时间，在 0.2 s 速度突

变时, 仍有较大的超调和较长的恢复时间。而 ARL 和 IARL 的转速响应几乎没有超调且响应时间较短, 在 0.2 s 速度突变时仍具有良好的速度跟踪性能并快速恢复稳定。在四种控制策略的整体比较中, IARL 的启动响应性能最好, 响应速度最快, 且几乎无超调, 在转速突变过程中, 具有最好的速度跟踪性能。IARL 显著的性能提升主要归功于自适应项参数 δ_0 和复合函数项参数 v 调整, 通过对这些参数进行精确的优化和调整, 可以显著提升控制策略的整体性能, 使得 IARL 在面对不同的运行条件和速度突变时, 保持较小的超调和快速恢复稳定。

6.2. 负载突变时的仿真实验

为验证系统在负载突变时的转速响应性能, 电机在无负载时启动, 设置给定转速为 $1000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 电机运行至 0.2 s 时突加 $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的负载, 仿真时间设置为 0.5 s。图 3 为负载突变时系统响应曲线, 图 4 负载突变时 PMSM 转矩响应曲线, 表 3 为突加负载时转速变化数据。

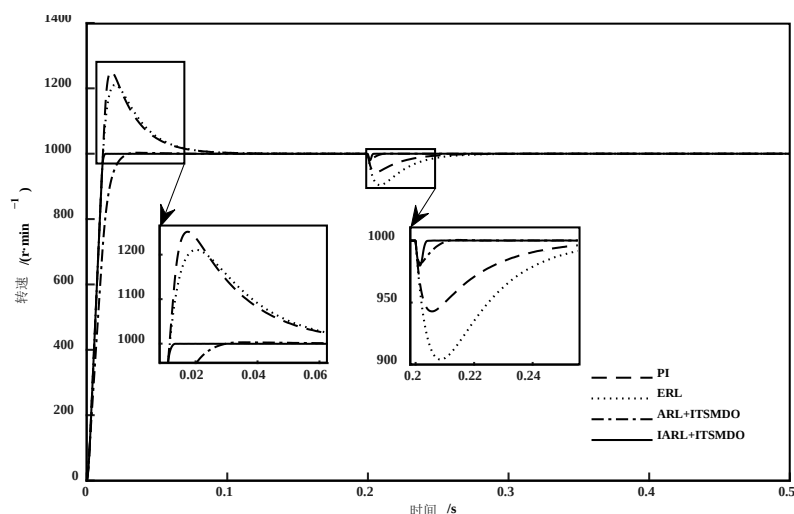


Figure 3. Speed response curve of PMSM under sudden load change

图 3. 负载突变时 PMSM 转速响应曲线

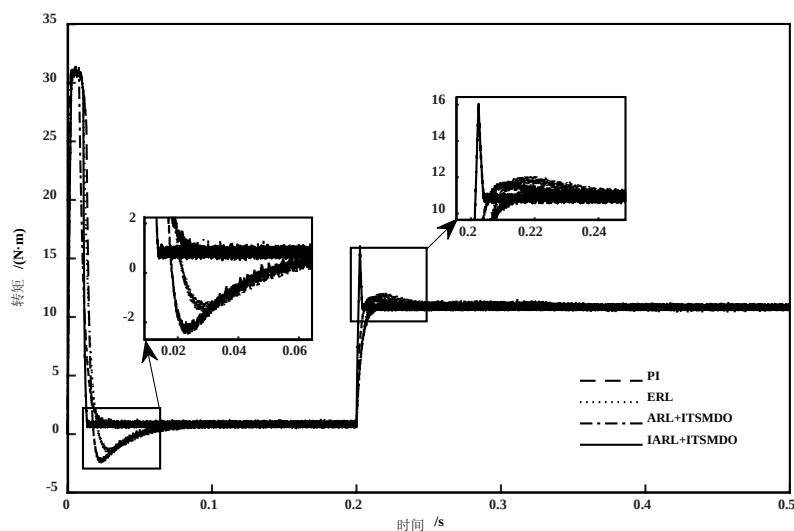


Figure 4. Torque response curve of PMSM under sudden load change

图 4. 负载突变时 PMSM 转矩响应曲线

Table 3. Speed response analysis table of PMSM under sudden load change
表 3. 负载突变时 PMSM 转速响应分析表

控制算法	转速波动值 ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	恢复稳定时间 (s)
PI	55	0.08
ERL	95	0.08
ARL + ITSMDO	18	0.015
IARL + ITSMDO	20	0.004

在 0.2 s 时，负载突加 10 N·m 导致的转速波动及数值分析如图 3 及表 3 所示，IARL + ITSMDO 相较于 PI、ERL 和 ARL + ITSMDO 能以最短的时间恢复稳定且转速波动较小，从以上分析可以看出，IARL + ITSMDO 具有更快的响应速度，更强的抗干扰能力。在突加负载时转矩响应曲线如图 4 所示，可以看出 IARL + ITSMDO 相比于 PI、ERL 和 ARL + ITSMDO 具有更快的转矩响应。

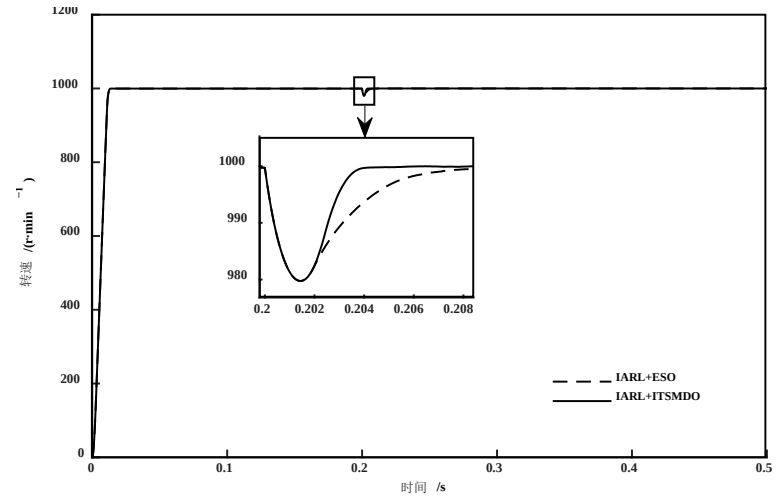


Figure 5. Torque response curve of PMSM under sudden load change
图 5. 负载突变观测曲线

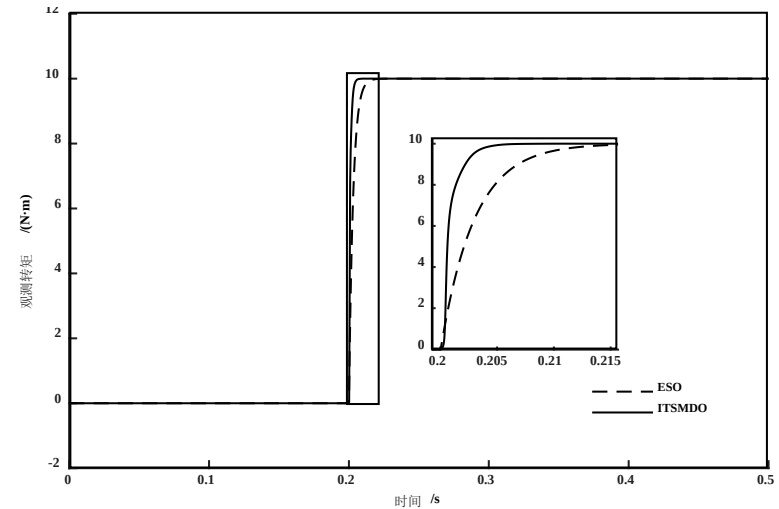


Figure 6. Speed response curves under different observers
图 6. 不同观测器下转速响应曲线

6.3. 扰动观测器仿真实验

为验证扰动观测器的准确性和快速性, 分别将 ESO 和 ITSMDO 与 IARL 结合, 在 PMSM 以给定转速稳定运行时突增 10 N·m 负载, 观察不同观测器性能对系统抗扰动性能的影响。图 5 为突增负载时负载转矩观测曲线, 图 6 为 IARL 结合不同观测器时转速响应曲线。

由图 5 可知, 在 0.2 s 时负载突加 10 N·m, ITSMDO 和 ESO 都能准确地观测负载转矩的值, 其中 ITSMDO 具有更快的响应速度, 可以在较短的时间内准确的估计出负载转矩的值。如图 6 所示, IARL + ITSMDO 具有最快的恢复速度, 由此可见, 基于 IARL 的滑模控制器结合 ITSMDO 可以有效提高动态性能和抗干扰能力。

7. 结论

本文提出了一种基于改进自适应趋近率(IARL)的滑模控制器, 成功克服了传统滑模趋近律在响应时间和转速超调方面的不足。结合设计的积分终端滑模扰动观测器(ITSMDO), 有效增强了系统的抗扰动能, 提升了控制系统的整体性能。在转速突变和负载突变的情况下, IARL + ITSMDO 控制策略展现出快速的响应速度和较小的转速波动, 几乎无超调, 表现出优异的动态性能。仿真结果表明, ITSMDO 能够快速准确地估计负载转矩和内部参数变动, 并将观测值前馈补偿到速度控制器, 以增强系统的抗扰能力, IARL 结合 ITSMDO 的控制策略显著缩短了系统响应时间, 降低了系统抖震, 提高了系统的鲁棒性。综上所述, 本文的研究成果为 PMSM 控制系统的设计提供了有效的理论依据和实践指导, 在动态响应和抗扰能力方面具有显著优势。

参考文献

- [1] Xu, W., Junejo, A.K., Liu, Y. and Islam, M.R. (2019) Improved Continuous Fast Terminal Sliding Mode Control with Extended State Observer for Speed Regulation of PMSM Drive System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **68**, 10465-10476. <https://doi.org/10.1109/tvt.2019.2926316>
- [2] Zhang, X., Sun, L., Zhao, K. and Sun, L. (2013) Nonlinear Speed Control for PMSM System Using Sliding-Mode Control and Disturbance Compensation Techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**, 1358-1365. <https://doi.org/10.1109/tpel.2012.2206610>
- [3] Xu, W., Junejo, A.K., Liu, Y., Hussien, M.G. and Zhu, J. (2021) An Efficient Antidisturbance Sliding-Mode Speed Control Method for PMSM Drive Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **36**, 6879-6891. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.3039474>
- [4] Qu, L., Qiao, W. and Qu, L. (2021) Active-Disturbance-Rejection-Based Sliding-Mode Current Control for Permanent-Magnet Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **36**, 751-760. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.3003666>
- [5] Hou, H., Yu, X., Xu, L., Rsetam, K. and Cao, Z. (2020) Finite-Time Continuous Terminal Sliding Mode Control of Servo Motor Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67**, 5647-5656. <https://doi.org/10.1109/tie.2019.2931517>
- [6] 于艳君, 崔明恺, 陈叹辞, 等. 基于模糊自适应转速调节器的绕组切换型电机控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8708-8718.
- [7] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.
- [8] Teja, A.V.R., Chakraborty, C. and Pal, B.C. (2018) Disturbance Rejection Analysis and FPGA-Based Implementation of a Second-Order Sliding Mode Controller Fed Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **33**, 1453-1462. <https://doi.org/10.1109/tec.2018.2808325>
- [9] Junejo, A.K., Xu, W., Mu, C., Ismail, M.M. and Liu, Y. (2020) Adaptive Speed Control of PMSM Drive System Based a New Sliding-Mode Reaching Law. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **35**, 12110-12121. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.2986893>
- [10] Kuang, Z., Gao, H. and Tomizuka, M. (2020) Precise Linear-Motor Synchronization Control via Cross-Coupled Second-Order Discrete-Time Fractional-Order Sliding Mode. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **36**, 358-368. <https://doi.org/10.1109/tmech.2020.3019883>

-
- [11] Fallaha, C.J., Saad, M., Kanaan, H.Y. and Al-Haddad, K. (2011) Sliding-Mode Robot Control with Exponential Reaching Law. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**, 600-610. <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2045995>
 - [12] Guo, X., Huang, S., Lu, K., Peng, Y., Wang, H. and Yang, J. (2023) A Fast Sliding Mode Speed Controller for PMSM Based on New Compound Reaching Law with Improved Sliding Mode Observer. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **9**, 2955-2968. <https://doi.org/10.1109/tte.2022.3213562>
 - [13] Han, H., Wu, X. and Qiao, J. (2020) Design of Robust Sliding Mode Control with Adaptive Reaching Law. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, **50**, 4415-4424. <https://doi.org/10.1109/tsmc.2018.2852626>
 - [14] Yu, X., Zhou, B., Xiong, L. and Jiang, S. (2023) Composite Sliding Mode Speed Control for Sinusoidal Doubly Salient Electromagnetic Machine Drives Using Fast Reaching Law and Disturbance Compensation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **70**, 6563-6573. <https://doi.org/10.1109/tie.2022.3201307>
 - [15] Nguyen, T.H., Nguyen, T.T., Nguyen, V.Q., Le, K.M., Tran, H.N. and Jeon, J.W. (2022) An Adaptive Sliding-Mode Controller with a Modified Reduced-Order Proportional Integral Observer for Speed Regulation of a Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **69**, 7181-7191. <https://doi.org/10.1109/tie.2021.3102427>
 - [16] Xiong, J. and Fu, X. (2024) Extended Two-State Observer-Based Speed Control for PMSM with Uncertainties of Control Input Gain and Lumped Disturbance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **71**, 6172-6182. <https://doi.org/10.1109/tie.2023.3292850>
 - [17] Qi, G., Hu, J., Li, L. and Li, K. (2024) Integral Compensation Function Observer and Its Application to Disturbance-Rejection Control of QUAV Attitude. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **54**, 4088-4099. <https://doi.org/10.1109/tcyb.2023.3344217>