

基于分数阶动态滑模自抗扰的 PMSM 调速控制

施昕昕, 姜卓玮*

(南京工程学院 自动化学院, 南京 211167)

Speed Control of PMSM Based on Fractional-Order Dynamic Sliding Mode Active Disturbance Rejection

SHI Xinxin, JIANG Zhuowei*

(School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: [Objective] To address the issues of low control precision, slow convergence, and strong chattering in permanent magnet synchronous motor (PMSM) under rapid acceleration/deceleration and load changes, this paper proposes a fractional-order dynamic boundary layer super-twisting sliding mode active disturbance rejection control (FO-DBL-STSM-ADRC) strategy. [Methods] Firstly, the ADRC was integrated with the STSMC algorithm to enhance adaptability under complex operating conditions. Next, a novel DBL sliding mode surface was designed, which dynamically adjusted the boundary layer structure to improve the system's dynamic response speed and load disturbance rejection capability. Then, fractional-order calculus was introduced to effectively suppress the inherent high-frequency chattering of traditional sliding mode control, significantly enhancing the system's ability to inhibit steady-state errors and chattering. Finally, the superiority and robustness of the proposed FO-DBL-STSM-ADRC strategy were verified through simulation and experiment under various complex operating conditions. [Results] The simulation and experiment results showed that, compared to the other three strategies, the proposed FO-DBL-STSM-ADRC strategy demonstrated significant advantages in terms of response speed, steady-state control precision, load disturbance rejection capability, and overall system robustness. [Conclusion] The proposed FO-DBL-STSM-ADRC strategy not only provides an effective solution for the high-performance operation of PMSM, but also offers technical support for demanding engineering

applications such as electric vehicle drives and rail transit door control systems.

Key words: permanent magnet synchronous motor; fractional-order; dynamic boundary layer; super-twisting sliding mode control; active disturbance rejection control

摘要: [目的]针对永磁同步电机(PMSM)在急加减速和负载突变时控制精度低、收敛慢、抖振强的问题,本文提出了一种分数阶动态边界层超螺旋滑模自抗扰控制(FO-DBL-STSM-ADRC)策略。【方法】首先,融合ADRC-STSMC算法,提升复杂工况下的适应能力。其次,设计新型DBL滑模面,通过动态调整边界层结构,提升系统动态响应速度与抗负载扰动能力。然后,引入分数阶微积分,有效抑制传统滑模的高频抖振,显著增强对稳态误差和抖振的抑制效果。最后,通过仿真和试验验证了所提FO-DBL-STSM-ADRC策略在多种复杂工况下的优越性与鲁棒性。【结果】仿真和试验结果表明,相较于其他3种策略,本文所提FO-DBL-STSM-ADRC策略在响应速度、稳态控制精度、抗负载扰动能力及整体系统鲁棒性等方面均表现出显著优势。【结论】本文所提FO-DBL-STSM-ADRC策略不仅为PMSM的高性能运行提供了有效解决方案,还为电动汽车驱动、轨道交通门控等严苛工程应用提供了技术支撑。

关键词: 永磁同步电机;分数阶;动态边界层;超螺旋滑模控制;自抗扰控制

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有能效高、功率密度大、结构紧凑、运行平稳且噪音低、响应迅速以及维护便捷等优势^[1]。由于PMSM是强耦合非线性系统,传统比例-积分-微分(Proportional-

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61873120);南京工程学院科研基金创新基金重大项目(CKJA201903)

General Program of National Natural Science Foundation of China (61873120); Major Project of Innovation Fund of Nanjing Institute of Technology (CKJA201903)

Error Feedback, SEF) 控制律^[14-16], 如图 2 所示。图中, y 为系统的输出响应; ω_r 为电机转速指令值; v^* 为 ω_r 的过渡跟踪值; u 为速度环输出量; u_0 为系统控制变量; b 为扰动补偿增益; ω_m 为转速反馈值; z_1 为系统的状态变量; z_2 为系统总扰动的实时估计值。

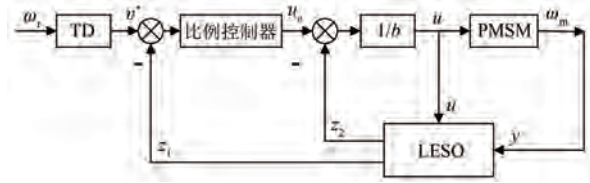


图 2 ADRC 结构

Fig. 2 ADRC structure

(1) TD 设计:

$$\begin{cases} e_0 = \omega_r - v^* \\ v^* = k_0 \cdot fal(e_0, \alpha_0, \delta_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_0 为速度跟踪因子; α_0 为非线性因子; δ_0 为滤波因子; fal 为非线性最优控制函数, 如式 (7) 所示:

$$fal(e, \alpha_0, \delta_0) = \begin{cases} |e|^{\alpha_0} \operatorname{sgn}(e), & |e| > \delta_0 \\ \frac{e}{\delta_0^{1-\alpha_0}}, & |e| \leq \delta_0 \end{cases} \quad (7)$$

(2) ESO 设计:

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - \omega_m \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e + bu \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e \end{cases} \quad (8)$$

式中: β_1, β_2 为 ESO 的增益系数。

(3) SEF 及扰动补偿设计:

$$\begin{cases} u_0 = K_p(v^* - z_1) \\ u = \frac{(u_0 - z_2)}{b} \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_p 为比例增益。

3 STSM-ADRC 控制器设计

3.1 STSMC 算法

STSMC 算法是一种基于滑模原理的非线性控制策略, 广泛应用于复杂工程控制领域^[17-18]。定义 STSMC 的滑模面函数 S_ω 为

$$S_\omega = \omega_m^* - \omega_m \quad (10)$$

式中: ω_m^* 为转速指令值。

STSMC 的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{u}_\omega = k_{p1} |S_\omega|^r \operatorname{sgn}(S_\omega) + u_s \\ \frac{d}{dt} u_s = k_{i1} / \operatorname{sgn}(S_\omega) \end{cases} \quad (11)$$

式中: k_{p1}, k_{i1} 分别为比例系数、积分系数; r 为待设计参数; u_ω 为系统控制量; u_s 为中间变量。

STSMC 采用双曲正切函数 \tanh 来替代 sign 函数, 更有利于减少系统抖振^[19], 其表达式为

$$\begin{cases} \dot{S}_\omega = k_p |S_\omega|^r \tanh(S_\omega) + u_s \\ \frac{d}{dt} u_s = k_i \tanh(S_\omega) \end{cases} \quad (12)$$

3.2 STSM-ADRC 控制器设计

STSMC 可更好地抑制系统抖振, 控制效果远好于比例控制器^[20]。因此, 采用 STSMC 代替 ADRC 中的比例控制器, 建立 STSM-ADRC, 其数学模型如式 (11) 所示, ESO 和 TD 与 ADRC 设计相同。

$$\begin{cases} e_\omega = v^* - z_1 \\ S_1 = fal(e_\omega, \alpha_0, \beta_0) \\ u_0 = -k_{p2} |S_1|^K \tanh(S_1) - k_{i2} \int_0^t \tanh(S_1) dt \\ u = T_e^* = \left(u_0 - \frac{z_2}{b} \right) \end{cases} \quad (13)$$

式中: k_{p2}, k_{i2} 分别为比例系数、积分系数; $K = 0.5$ 为指数项; S_1 为 STSM-ADRC 的滑模面; e_ω 为跟踪误差。

STSM-ADRC 需要整定的参数有 $\beta_1, \beta_2, k_p, k_i$ 和 b , 采用带宽法整定参数可设计为

$$\begin{cases} k_p = \omega_c^2 \\ k_i = 2\omega_c \\ \beta_1 = 2\omega_0 \\ \beta_2 = \omega_0^2 \\ b = 1/J \end{cases} \quad (14)$$

式中: ω_0 为观测器带宽; ω_c 为控制器带宽; J 为转动惯量。

4 DBL 滑模控制器设计与分析

传统 STSMC 的滑模面仅依赖单一转速误差, 导致响应滞后, 在负载或转速突变时易出现超调、振荡、稳态精度下降及抖振加剧等问题^[21-22]。为

此,本文设计了一种新型 DBL 微积分滑模面,如式(13)~(14)所示:

$$S_2 = k_0 e + k_1 \int_0^t \phi(e) dt + k_2 \dot{e} \quad (15)$$

$$\phi(e) = \begin{cases} -\tau, & e < -\tau \\ |e|^\gamma \tanh(e), & |e| \leq \tau \\ \tau, & e > \tau \end{cases} \quad (16)$$

式中: $k_0=1$ 为误差增益系数; $\tau=5$ 为边界层的界限值; $\gamma=0.4$ 为指数项。

当误差较大时,上下边界层可限制误差峰值,缩小误差范围、平滑控制信号,有利于系统趋稳;误差较小时,指数项抑制误差波动,减轻滑模抖振,使系统快速收敛至指令值。

将新型 DBL 滑模面引入 STSM-ADRC,得到 DBL-STSM-ADRC 策略。

DBL-STSM-ADRC 的数学模型如式(17)所示,其 TD 和 ESO 与 ADRC 设计相同。

$$\begin{cases} e = fal(v^* - z_1, \alpha_0, \beta_0) \\ S_2 = k_0 e + k_1 \int_0^t \phi(e) dt + k_2 \dot{e} \\ u_0 = -k_{p3} |S_2|^K \tanh(S_2) - k_{i3} \int_0^t \tanh(S_2) dt \\ u = T_e^* = \left(u_0 - \frac{z_2}{b} \right) \end{cases} \quad (17)$$

式中: k_{p3} 、 k_{i3} 分别为比例系数、积分系数。

5 基于 FO-DBL-STSM-ADRC 控制器设计与分析

5.1 分数阶微积分理论

定义分数阶微积分操作算子 ${}_\alpha D_\beta^\rho$ 如式(18)所示:

$${}_\alpha D_\beta^\rho = \begin{cases} \frac{d^\rho}{dt^\rho}, & R(\rho) > 0 \\ 1, & R(\rho) = 0 \\ \int_0^t (d\tau)^{(-\rho)}, & R(\rho) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: α 、 β 分别为上、下限; ρ 为分数阶阶次; $R(\rho)$ 为 ρ 的实部^[23-24]。

分数阶微积分的 Caputo 定义为

$${}_{t_0} D_t^\theta f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\theta)} \int_{t_0}^t \frac{f^n(\tau)}{(t-\tau)^{1+\theta-n}} d\tau \quad (19)$$

式中: $n-1 < \theta \leq n$; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; λ 为阶数。

分数阶微积分的优势在于快速收敛与抖振抑制^[25]。其全局性(依赖历史信息)在早期对误差更敏感,加速初始收敛;稳态时,误差衰减更快,信号波动更小,从而有效抑制抖振。

5.2 FO-DBL-STSM-ADRC 设计

采用分数阶控制有利于加快 PMSM 稳态的收敛速度,有效抑制误差抖振。因此,构建 FO-DBL-STSM-ADRC 控制器。

定义分数阶动态边界层滑模面 S_3 为

$$S_3 = k_3 e + k_4 D^{-\eta} \phi(e) + k_5 D^\xi e \quad (20)$$

式中: η 为分数阶积分的阶数; ξ 为分数阶微分的阶数; k_3 、 k_4 、 k_5 为待设计的参数。

FO-DBL-STSM-ADRC 的控制律如式(21)所示,其 TD 和 ESO 与 ADRC 设计相同。

$$\begin{cases} u_0 = -k_{p4} |S_3|^K \tanh(S_3) - k_{i4} D^{-\varepsilon} \tanh(S_3) \\ u = T_e^* = \left(u_0 - \frac{z_2}{b} \right) \end{cases} \quad (21)$$

式中: ε 为分数阶积分的阶数; S_3 为新型动态边界层滑模面。

FO-DBL-STSM-ADRC 输出的电磁转矩为

$$T_e^* = J \left[k_4 D^{-(\eta-1)} \phi(e) + k_5 D^{\xi+1} e + k_{p4} |S_3|^K \tanh(S_3) + k_{i4} D^{-\varepsilon} \tanh(S_3) + \frac{T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_m \right] \quad (22)$$

5.3 控制器稳定性证明

构建李雅普诺夫函数,如式(23)所示:

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (23)$$

对式(23)求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = S\dot{S} &= S \left[k_3 \dot{e} + k_4 D^{-(\eta-1)} \phi(e) + k_5 D^{\xi+1} e \right] = \\ &= S \left[k_3 \left(-\frac{1}{J} T_e + \frac{T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_m \right) + \right. \\ &\quad \left. k_4 D^{-(\eta-1)} \phi(e) + k_5 D^{\xi+1} e \right] = \\ &= S \left\{ \frac{k_3}{J} \left[-J \left[k_4 D^{-(\eta-1)} \phi(e) + k_5 D^{\xi+1} e + \right. \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & k_{p4} |S_3|^K \tanh(S_3) + \\
 & \left. k_{i4} D^{-\mu} \tanh(S_3) + \frac{T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_m \right] + \\
 & \left. k_4 D^{-(\eta-1)} \phi(e) + k_5 D^{\xi+1} e + \frac{T_L}{J} + \frac{B}{J} \omega_m \right\} = \\
 & -S \left[k_{p4} |S_3|^K \tanh(S_3) + k_{i4} D^{-\mu} \tanh(S_3) \right] = \\
 & -k_{p4} |S_3|^K - k_{i4} D^{-\mu} |S_3| \quad (24)
 \end{aligned}$$

当满足 $k_{p4} > 0$ 和 $k_{i4} > 0$ 时, $\dot{V} < 0$ 。因此, 该控制器稳定。

6 仿真结果与试验分析

在 Matlab/Simulink 平台上搭建 PMSM DTC 的带载运行仿真试验, 对比分析 4 种控制算法的速度控制效果。设置采样周期 $T_s = 1 \times 10^{-5}$ s。PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 参数

Tab. 1 PMSM parameters

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	1.25
定子电感 L/mH	0.004 77
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.010 5
永磁体磁链 ψ/Wb	0.129 2
粘滞系数 $B/(N \cdot m \cdot s)$	0.000 1
极对数 p	4

为验证本文设计的 FO-DBL-STSM-ADRC 的优越性, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建仿真模型, 设置大负载扰动与多级变速工况, 对比分析 4 种不同控制策略下 PMSM 的调速性能。基于 FO-DBL-STSM-ADRC 的 PMSM 控制系统结构如图 3 所示。

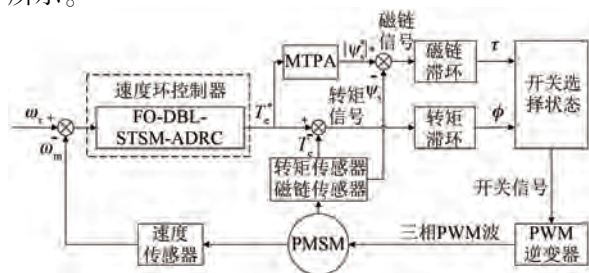


图 3 基于 FO-DBL-STSM-ADRC 的 PMSM 控制系统结构

Fig. 3 Control system structure of PMSM based on FO-DBL-STSM-ADRC

6.1 PI 与 ADRC 的 PMSM 仿真测试对比

为验证 ADRC 的有效性, 设计如下对比试验: 速度环分别采用 ADRC 和传统比例-积分 (Proportional-Integral, PI) 控制器, 其余部分完全一致。设置 ADRC 参数: $k_p = 1\ 200$, $b = 0.002$, $b_0 = 500$, $\omega_0 = 3\ 000$; PI 参数: $k_p = 0.1$, $k_i = 5$ 。仿真时间设为 1 s, 电机空载起动, 初始给定转速为 800 r/min; 0.3 s 时突加 5 N·m 负载, 0.7 s 卸除。PI 和 ADRC 控制下, PMSM 转速响应曲线和稳态误差曲线分别如图 4~6 所示, 对比如表 2、3 所示。

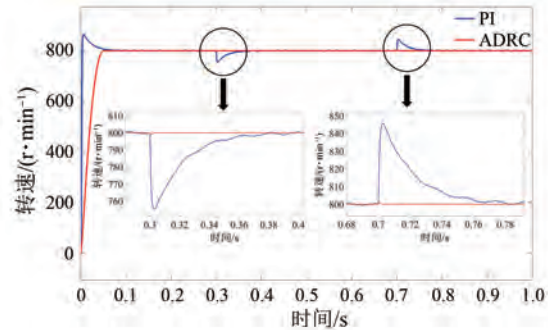


图 4 PI 与 ADRC 的速度响应曲线

Fig. 4 Speed response curves of PI and ADRC

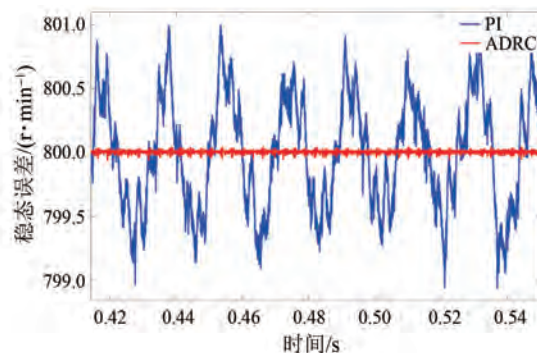


图 5 PI 与 ADRC 的带载稳态误差曲线

Fig. 5 Steady-state error curves of PI and ADRC under load

由图 4~6 和表 2、3 可知, ADRC 在空载起动、突加负载及突卸负载工况下的表现均优于传统 PI 控制; 其调节时间更短且未发生超调现象; 稳态抖振更低; 抗干扰能力更强。

6.2 本文策略与其他控制策略效果对比

为进一步验证本文设计策略的有效性, 将本文所提 FO-DBL-STSM-ADRC 策略与文献 [26] 提出的动态正弦积分滑模自抗扰控制 (Dynamic

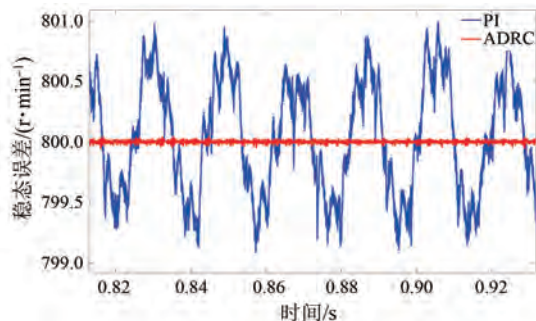


图6 PI与ADRC的空载稳态误差曲线
Fig. 6 Steady-state error curves of PI and ADRC under no-load

Sinusoidal Integral Sliding Mode ADRC, DSI-SM-ADRC)策略进行对比仿真试验,结果如图7和表4所示。

表2 PI与ADRC的速度响应对比

Tab. 2 Comparison of speed response between PI and ADRC

工况	试验指标	PI	ADRC
空载起动	超调量/(r·min ⁻¹)	65	0
	恢复时间/ms	86	50
突加负载	转速突变/(r·min ⁻¹)	44.8	1.1
	恢复时间/ms	81	3.4
突卸负载	转速突变/(r·min ⁻¹)	45.7	1.11
	恢复时间/ms	83	4.2

表3 PI与ADRC的稳态误差峰值对比

Tab. 3 Comparison of steady-state error peaks between PI and ADRC

稳态误差峰值/(r·min ⁻¹)	PI	ADRC
带载	1.2	0.05
空载	1	0.033

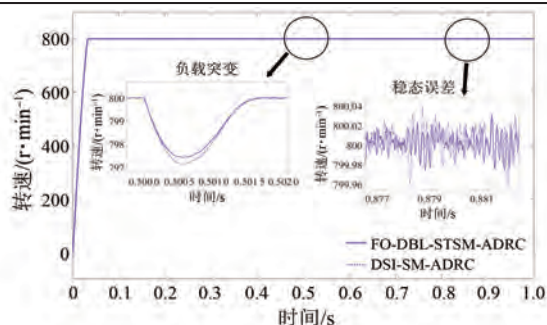


图7 FO-DBL-STSM-ADRC与DSI-SM-ADRC转速响应对比

Fig. 7 Comparison of speed response between FO-DBL-STSM-ADRC and DSI-SM-ADRC

表4 FO-DBL-STSM-ADRC与DSI-SM-ADRC对比

Tab. 4 Comparison between FO-DBL-STSM-ADRC and DSI-SM-ADRC

工况	FO-DBL-STSM-ADRC	DSI-SM-ADRC
负载突变/(r·min ⁻¹)	2.55	2.9
恢复时间/ms	1.6	1.8
稳态误差峰值/(r·min ⁻¹)	0.033	0.04

DSI-SM-ADRC所设计的动态边界层滑模面如式(25)、(26)所示,其余控制部分的参数与本文策略参数保持一致。

$$\Theta = e_\omega + C_1 D^{-\alpha_1} \phi_1(e_\omega) \quad (25)$$

$$\phi(e) = \begin{cases} -\sigma, & e < -\sigma \\ \sigma \sin\left(\frac{\pi}{2\sigma} e\right), & |e| \leq \sigma \\ \sigma, & e > \sigma \end{cases} \quad (26)$$

式中: e_ω 为电机转速误差; $C_1 = 0.1$; $\sigma = 5$; $\alpha_1 = 0.5$ 。

仿真时长为1s,PMSM空载起动,给定转速为800r/min,0.5s时突加10N·m负载,PMSM后0.5s带载运行,在该试验条件下,比较两种控制策略的优劣。

由图7和表4可知,与DSI-SM-ADRC相比,本文策略FO-DBL-STSM-ADRC在空载起动时响应更快,负载突变下转速波动更小,恢复更快,稳态抖振和误差也更低;动态边界层积分项的设计更合理,进一步提升了控制性能。

6.3 PMSM多级变速与变负载仿真

多级变速与变负载仿真工况设置如下:0~0.5s给定转速1000r/min;0.5~0.7s给定转速500r/min;0.7~0.9s给定转速0r/min;0.9~1.1s给定转速-500r/min;1.1~1.5s给定转速-1000r/min,0.1s时施加10N·m负载;1.2s时施加-10N·m负载。

为了保证测试结果的公平性,本文策略与其他策略对比时,PMSM系统其他参数完全一致,仅速度环策略不同。每种策略的参数均通过多次重复测试优化确定。

4种控制策略采用式(14)所述的带宽法整定参数。设置ADRC参数: $k_p = 1200$, $b = 0.002$, $b_0 = 500$, $\omega_0 = 3000$;STSM-ADRC参数: $k_{p2} = 6000$, $k_{i2} = 5000$, $b = 0.001$, $b_0 = 1200$, $\omega_0 = 3000$;DBL-STSM-ADRC参数: $k_0 = 1$, $k_1 = 0.1$, $k_2 = 0.05$, $k_{p3} =$

6 000, $k_{i3} = 5 000$, $b = 0.001$, $b_0 = 1 000$, $\omega_0 = 3 000$; FO-DBL-STSM-ADRC 参数: $k_3 = 1$, $k_4 = 0.15$, $k_5 = 0.1$, $k_{p4} = 7 000$, $k_{i4} = 5 000$, $b = 0.001$, $b_0 = 1 000$, $\omega_0 = 3 000$ 。

4 种策略 PMSM 调速输出结果如图 8 所示, 其不同工况下响应曲线、响应时间分别如图 9~12、表 5 所示。其中, 为方便在表格中表示: ADRC 简称为策略 1, STSM-ADRC 简称为策略 2, DBL-STSM-ADRC 简称为策略 3, FO-DBL-STSM-ADRC 简称为策略 4。

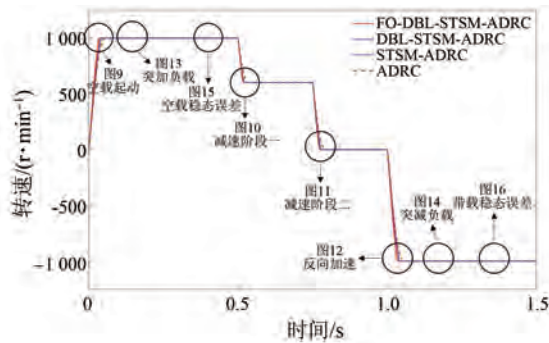


图 8 多级变速和变负载响应仿真曲线

Fig. 8 Simulation curves of multi-speed and variable load response

由图 9~12 和表 5 可知, 空载启动阶段, 4 种控制策略均无超调。ADRC 调节时间较长, 响应缓慢; STSM-ADRC 较 ADRC 提升了响应速度; DBL-STSM-ADRC 进一步提升了 PMSM 的启动响应速度; FO-DBL-STSM-ADRC 通过引入分数阶, 响应速度最快, 并缩短了调节时间, 优化了动态性能。减速和反向加速阶段, FO-DBL-STSM-ADRC 的调节时间最短, 响应最快, 动态性能最佳。

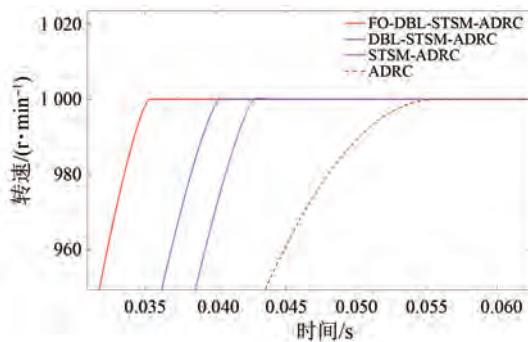


图 9 空载启动响应曲线

Fig. 9 No-load startup response curves

突加、突减负载转速响应曲线如图 13、14 所示, 对应的数据如表 6、7 所示。由图 13、14 和表

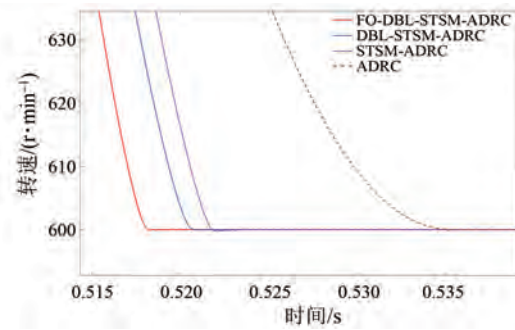


图 10 减速阶段一响应曲线

Fig. 10 Response curves in deceleration phase 1

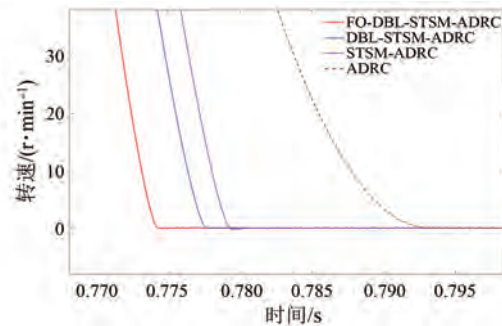


图 11 减速阶段二响应曲线

Fig. 11 Response curves in deceleration phase 2

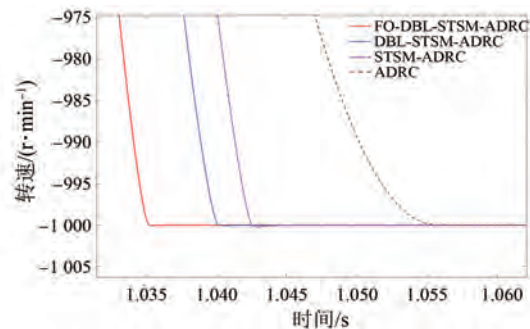


图 12 反向加速响应曲线

Fig. 12 Reverse acceleration response curves

表 5 PMSM 加减速响应时间数据

Tab. 5 PMSM acceleration and deceleration response time data

工况/ms	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4
空载启动	58	44.5	40	36
减速阶段一	36	24	21	18.5
减速阶段二	44	31	27	24
反向加速	57	44	41	35.2

6、7 可知, 突加、突减负载 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, ADRC 转速突变最大, 恢复最慢; STSM-ADRC 有所改善; DBL-STSM-ADRC 进一步优化; FO-DBL-STSM-

ADRC 表现最佳,转速突变最小,恢复最快。由此可得,分数阶微积分显著提升了系统的抗扰能力,抑制扰动效果最优。

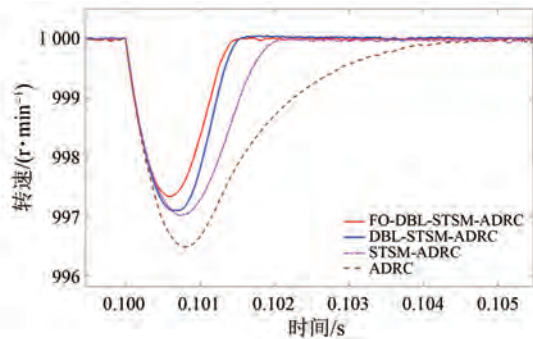


图 13 突加负载转速响应曲线

Fig. 13 Speed response curves under abrupt load increase

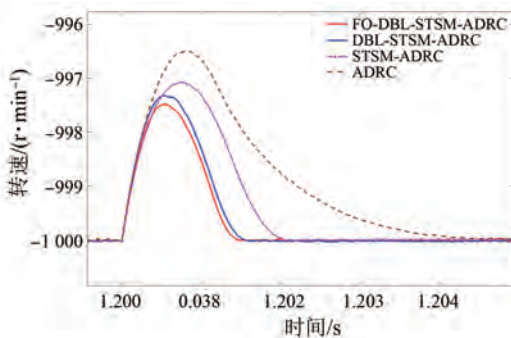


图 14 突减负载转速响应曲线

Fig. 14 Speed response curves under abrupt load reduction

表 6 突加负载 PMSM 响应

Tab. 6 PMSM response under abrupt load increase

参数名称	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4
转速突升/($r \cdot \min^{-1}$)	3.5	3.1	2.9	2.6
调节时间/ms	4.5	2.1	1.65	1.5

表 7 突减负载 PMSM 响应

Tab. 7 PMSM response under abrupt load reduction

参数指标	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4
转速突降/($r \cdot \min^{-1}$)	3.5	2.95	2.68	2.51
调节时间/ms	4.5	2.0	1.6	1.45

由图 15~16 和表 8 可知,ADRC 的稳态误差较大,抖振较为明显;STSM-ADRC 较 ADRC 削弱了系统抖振;DBL-STSM-ADRC 通过新型动态边界层滑模面进一步改善了抖振;FO-DBL-STSM-ADRC 采用分数阶控制,极大减弱了转速抖振,提高了系统的控制精度。

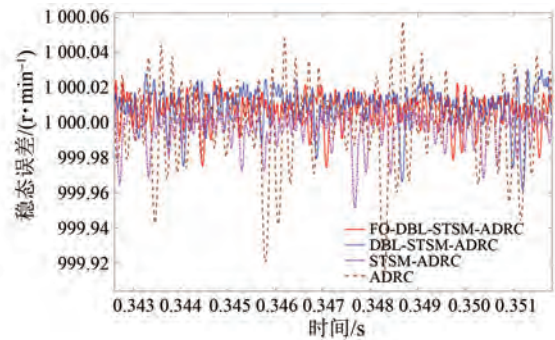


图 15 电机带载稳态误差曲线

Fig. 15 Steady state error curves of motor under load

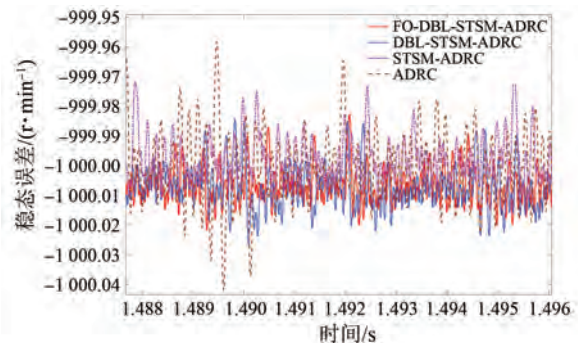


图 16 电机空载稳态误差曲线

Fig. 16 Steady state error curves of motor under no-load

由图 17 可知,本文所提 FO-DBL-STSM-ADRC 策略的收敛速度更快,且电磁转矩波动更小,具有更好的鲁棒性。

表 8 PMSM 稳态误差峰值对比

Tab. 8 Comparison of steady-state error peak values of PMSM

稳态误差峰值/($r \cdot \min^{-1}$)	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4
带载	0.09	0.062	0.044	0.032
空载	0.045	0.036	0.03	0.024

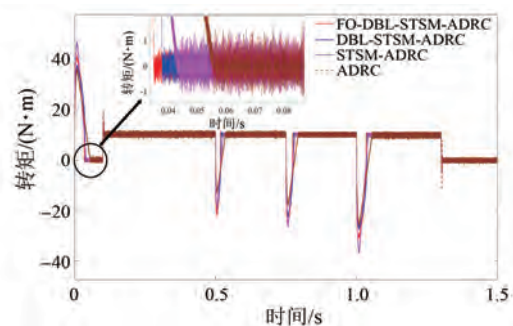


图 17 电磁转矩输出曲线

Fig. 17 Electromagnetic torque output curves

仿真平台设置为:Core i9-14900HX 处理器,

16 GB 内存, Matlab R2023b, 时长 1.5 s。ADRC、STSM-ADRC、DBL-STSM-ADRC 及 FO-DBL-STSM-ADRC 的计算时间分别为 3 s、4.8 s、6.5 s、8 s。FO-DBL-STSM-ADRC 控制性能最优, 计算时间可接受, 适合高精度伺服系统。如需嵌入式部署, 可研究算法轻量化。

综上所述, FO-DBL-STSM-ADRC 控制策略响应速度快、抗干扰能力强, 并且能有效减弱系统抖振, 在复杂工况下仍具有良好的鲁棒性。

6.4 实物试验验证

为了验证本文所提 FO-DBL-STSM-ADRC 策略的优越性和可靠性, 搭建了 PMSM 调速控制系统, 如图 18 所示。



图 18 PMSM 实物试验平台

Fig. 18 PMSM physical experiment platform

试验过程如下: PMSM 空载启动, 初始转速为 1 000 r/min。在 $t=2$ s 时突加 5 N·m 负载, 持续运行至 $t=4$ s 时突卸负载。随后, 转速在 $t=7$ s 时降至 500 r/min, 试验总时长为 10 s。对比分析了 4 种不同控制策略下的转速动态响应波形, 如图 19~24 所示。

由于传感器的测量噪声、PMSM 的模型误差、元器件的线路损耗等非线性干扰, 导致试验数据与仿真结果相比存在一定的偏差, 且试验误差相对更大。

由图 20、21 可知, 空载启动稳定过程中, ADRC 所需 0.65 s > STSM-ADRC (0.43 s) > DBL-STSM-ADRC (0.35 s) > FO-DBL-STSM-ADRC (0.3 s)。减速调节过程中, FO-DBL-STSM-ADRC 仅需 0.21 s, 而 DBL-STSM-ADRC、STSM-ADRC 和 ADRC 则分别需要 0.25 s、0.29 s 和 0.46 s。表明本文所提 FO-DBL-STSM-ADRC 策略动态收敛性能最优。

由图 22、23 可知, 突加负载时, FO-DBL-STSM-ADRC 产生的转速波动为 6.5 r/min, 明显

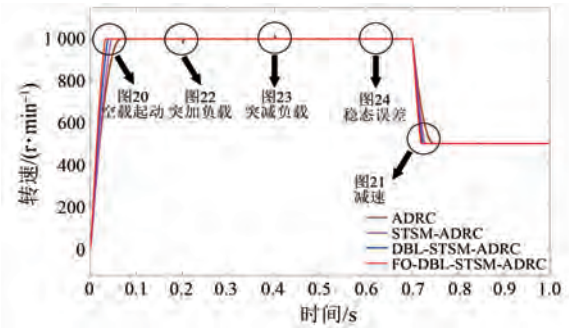


图 19 试验速度响应曲线

Fig. 19 The experiment speed response curves

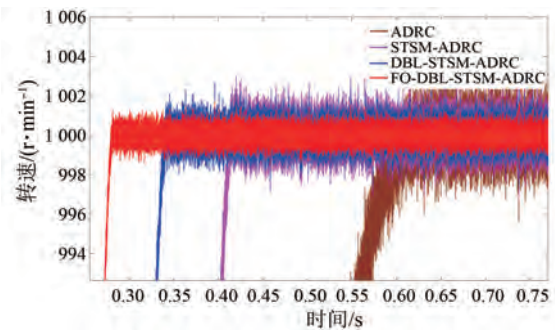


图 20 启动响应曲线

Fig. 20 The start-up response curves

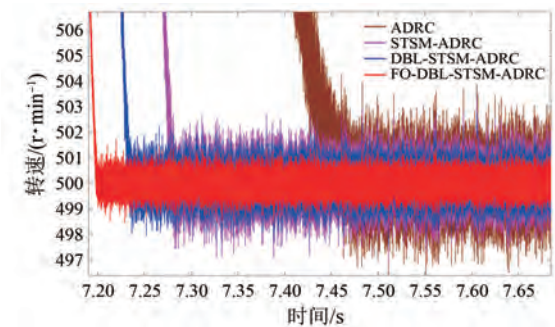


图 21 减速响应曲线

Fig. 21 The deceleration response curves

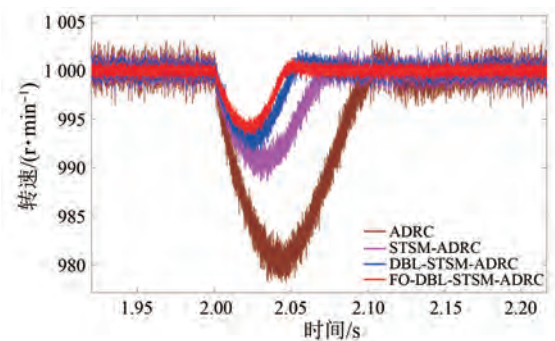


图 22 突加负载响应曲线

Fig. 22 Response curves under abrupt load increase

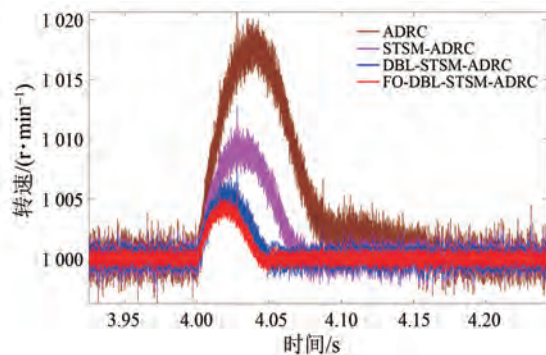


图 23 突减负载响应曲线

Fig. 23 Response curves under abrupt load reduction

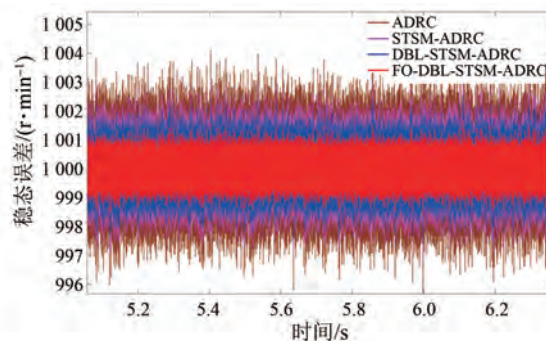


图 24 实物试验速度稳态误差曲线

Fig. 24 Steady-state error curves of speed in physical experiment

低于 DBL-STSM-ADRC 的 8.5 r/min、STSM-ADRC 的 10.5 r/min 以及 ADRC 的 21 r/min。同时,负载突减时,FO-DBL-STSM-ADRC 对应的转速波动为 5.2 r/min,亦优于 DBL-STSM-ADRC 的 6.5 r/min、STSM-ADRC 的 10 r/min 和 ADRC 的 20 r/min。由此可见,负载变化时,FO-DBL-STSM-ADRC 的转速波动更小,恢复稳态最快,抗干扰能力更强。

由图 24 可知,FO-DBL-STSM-ADRC 的稳态误差峰值最低为 1.2 r/min,显著优于 DBL-STSM-ADRC 的 1.7 r/min、STSM-ADRC 的 2.5 r/min 以及 ADRC 的 4 r/min。试验结果验证了本文所提 FO-DBL-STSM-ADRC 策略能够有效抑制误差抖振,并表现出更优越的系统可靠性。

7 结语

针对 PMSM 的非线性及易受外部干扰的特性,本文基于 STSMC 算法,设计了一种新型 DBL 滑模面,并结合了分数阶的优势,优化了 ADRC 的

控制效果,提升了系统的响应速度和抗扰能力,进一步降低了系统稳态误差。通过仿真与试验研究,对比分析了 4 种不同控制策略在变速变载的运行条件下的性能。结果表明,本文所提 FO-DBL-STSM-ADRC 策略不仅响应迅速,且在稳定性与抗干扰能力方面表现优异,能够有效满足 PMSM 在工业应用与试验研究中对高精度与高性能的控制需求。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

姜卓玮进行了方案设计、仿真、试验验证、内容总结与论文撰写。施昕昕阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, simulation, experimental verification, content summary, and paper writing were conducted by Jiang Zhuowei. The final manuscript was read and approved for submission by Shi Xinxin.

参考文献

- [1] Song Z, Yang J, Mei X S, et al. Harmonic current suppression method with adaptive filter for permanent magnet synchronous motor [J]. International Journal of Electronics, 2021, 108(6): 983-1013.
- [2] Huang W T, Zhu X F, Zhang H L, et al. Generalized fault-tolerant model predictive control of five-phase PMSM drives under single/two open switch faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8): 7569-7579.
- [3] Huang W T, Du J C, Hua W, et al. A hybrid model-based diagnosis approach for open-switch faults in PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3728-3732.
- [4] Song Z F, Wang Y Q, Shi T N. A dual-loop predictive control structure for permanent magnet synchronous machines with enhanced attenuation of periodic disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(1): 760-774.
- [5] Liu J L, Zhang Y C. Current pulsation suppression

- method based on power current closed-loop control for a PMSM under fluctuating DC-link voltage [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(1): 761-770.
- [6] 高志强. 线性自抗扰控制[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(1): 1-9.
Gao Z Q. Linear active disturbance rejection control [J]. *Control Theory and Applications*, 2013, 30(1): 1-9.
- [7] Hu J, Lu H C, Zheng B, et al. Predictive control of permanent magnet synchronous motor based on super-twisting sliding mode [J]. *Energy Science & Engineering*, 2023, 11(9): 3173-3184.
- [8] Fan J S, Zhang H X, Su J, et al. A continuous and smooth sliding mode control algorithms design [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(6): 8-10.
- [9] 王晓东, 马强, 冯占雄, 等. 永磁同步电机的分数阶协同控制器设计[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2021(10): 97-100.
Wang X D, Ma Q, Feng Z X, et al. Design of fractional-order coordinated controller for permanent magnet synchronous motors [J]. *Combination Machine Tools and Automated Machining Technology*, 2021(10): 97-100.
- [10] 任志玲, 张文凯. 基于 ESO 的 PMSM 无模型快速超螺旋滑模预测控制[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(2): 16-25.
Ren Z L, Zhang W K. Model-free fast super twisting sliding mode predictive control for PMSM based on ESO [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(2): 16-25.
- [11] 沈威, 冉全, 赵世平. 自抗扰与改进 ESO 并联的永磁同步电机矢量控制[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2023(9): 77-81.
Shen W, Ran Q, Zhao S P. Active disturbance rejection control and improved ESO parallel permanent magnet synchronous motor vector control [J]. *Combination Machine Tool and Automated Processing Technology*, 2023(9): 77-81.
- [12] Wang W J, Yan H, Wang X J. Analysis and compensation of sampling-delay error in single current sensor method for PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(5): 5918-5927.
- [13] 郭昕, 黄守道, 彭是, 等. 基于改进型双幂次趋近律与全局快速终端滑模观测器的 IPMSM 调速系统滑模控制[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(1): 190-203.
Guo X, Huang S D, Peng S, et al. Sliding mode control of IPMSM speed regulation system based on an improved double power reaching law and global fast terminal sliding mode observer [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(1): 190-203.
- [14] 许令亮, 陈桂明, 李乔扬. 基于 ESO 的超局部无模型 PMSM 转速预测控制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(11): 2204-2214.
Xu L L, Chen G M, Li Q Y. Ultra-local model-free speed predictive control based on ESO for PMSM [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(11): 2204-2214.
- [15] 恩大凯, 王贞艳, 何延昭. 基于改进 SMO 的 PMSM 无传感器控制[J]. *微电机*, 2024, 57(1): 42-47.
En D K, Wang Z Y, He Y Z. Sensorless control of PMSM based on improved SMO [J]. *Micromotors*, 2024, 57(1): 42-47.
- [16] 张会林, 林新才, 张建平. 基于分数阶扩展滑模扰动观测器的 PMSM 转速环无模型递归非奇异终端滑模控制[J]. *信息与控制*, 2024, 53(2): 261-272.
Zhang H L, Lin X C, Zhang J P. Model-free recursive nonsingular terminal sliding mode control of PMSM speed loop based on fractional-order extended sliding mode disturbance observer [J]. *Information and Control*, 2024, 53(2): 261-272.
- [17] 赵凯辉, 刘文昌, 刘智诚, 等. 一种永磁同步电机无模型高阶滑模控制算法[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(6): 1472-1485.
Zhao K H, Liu W C, Liu Z C, et al. Model free high sliding mode control for permanent magnet [J]. *Transactions of China Synchronous Motor Electrotechnical Society*, 2023, 38(6): 1472-1485.
- [18] 马雨新, 雷子奇, 顾萍萍, 等. 基于改进型超螺旋滑模线性自抗扰的永磁同步电机速度控制研究[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(9): 103-112.
Ma Y X, Lei Z Q, Gu P P, et al. Research on PMSM speed control based on improved super-twisting sliding mode linear active disturbance rejection [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(9): 103-112.

- [19] 陈勇志, 张立嘉, 刘旭东. 基于时变扰动观测器的永磁同步电机预设性能滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 148-158.
Chen Y Z, Zhang L J, Lu X D. Preset performance sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on time-varying disturbance observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 148-158.
- [20] 蔡舒迟, 张志锋. 基于非线性扩张状态观测器的低参数敏感度 PMSM 无模型控制研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 192-200.
Cai S C, Zhang Z F. Research on model-free control of PMSM with low parameter sensitivity based on nonlinear extended state observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 192-200.
- [21] Ma Y X, Li D. A novel discrete compound integral terminal sliding mode control with disturbance compensation for PMSM speed system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(1): 549-560.
- [22] Wang Y O, Feng Y T, Zhang X G, et al. A new reaching law for ant disturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4147-4126.
- [23] Apte A, Joshi VA, Mehta H. et al Disturbance-observer-based sensorless control of PMSM using integral state feedback controller [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6082-6090.
- [24] Xu L L, Chen G M, Li Q Y. Ultra-local model-free predictive current control based on nonlinear disturbance compensation for permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Access, 2020, 8: 127690-127699.
- [25] Yu Y X, Liu X D. Model-free fractional-order sliding mode control of electric drive system based on nonlinear disturbance observer [J]. Fractal and Fractional, 2022, 6(10): 603.
- [26] 任金霞, 姚广辉, 王金荣. 基于改进 ESO 和分数阶协同的 PMSM 转速控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2025(5): 156-160+167.
Ren J X, Yao G H, Wang J R. PMSM speed control based on improved ESO and fractional order synergy [J]. Combination Machine Tool and Automated Processing Technology, 2025(5): 156-160+167.

收稿日期:2025-11-21

收到修改稿日期:2026-01-13

作者简介:

施昕昕(1985—),女,博士,教授,研究方向为机器人系统设计与控制、电机控制、运动控制及机电一体化系统研究, sxx@njit.edu.cn;

* 通信作者:姜卓玮(2000—),男,硕士研究生,研究方向为电机控制、机器人运动控制, 2289270345@qq.com。