

基于时变扰动观测器的永磁同步电机预设性能滑模控制

陈勇志^{1,2}, 张立嘉³, 刘旭东^{1,2*}

(1. 青岛大学 自动化学院, 山东 青岛 266071;
2. 山东省工业控制技术重点实验室, 山东 青岛 266071;
3. 青岛东软载波科技股份有限公司, 山东 青岛 266023)

Preset Performance Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Time-Varying Disturbance Observer

CHEN Yongzhi^{1,2}, ZHANG Lijia³, LIU Xudong^{1,2*}

(1. School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China;
2. Shandong Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdao 266071, China;
3. Qingdao Eastsoft Communication Technology Co., Ltd., Qingdao 266023, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to improve the speed control performance of permanent magnet synchronous motors and ensure that the speed error converges to the preset boundary within a specified time, while avoiding issues such as controller singularities caused by disturbances and estimation peaks in the observer during motor starting. In this paper, a preset performance sliding mode control method based on a time-varying disturbance observer (PPSMC + TDO) is proposed by combining preset performance control with sliding mode control. [Methods] First, a preset performance function capable of setting convergence time was proposed, and an error transformation was performed to convert the inequality-constrained error system into an equality-constrained system. Second, a time-varying disturbance observer was designed to estimate system disturbances. Then, a preset performance sliding mode controller was developed for the transformed error system. [Results] Under the constraint of the preset performance function, PPSMC + TDO ensured that the speed error converged to the minimum preset boundary ε_r within the preset 0.3 s. When external disturbances were applied, PPSMC + TDO demonstrated the smallest speed fluctuations. Although

the instantaneous speed error exceeded the preset boundary, the controller remained stable, without singularities or other unstable behaviors. Furthermore, at the initial moment, the disturbance estimation curves showed no estimation peaks.

[Conclusion] Experimental results show that under the influence of the preset performance function, the speed error converges to the preset boundary within the designated time, ensuring good dynamic performance of the speed controller. When disturbances occur, the method addresses the issue of controller singularities caused by system errors exceeding the preset performance function boundary and provides excellent anti-disturbance capability against both constant external load disturbances and periodic disturbances. Additionally, the proposed time-varying disturbance observer effectively eliminates estimation peaks at the initial moment.

Key words: permanent magnet synchronous motor; preset performance; sliding mode control; time-varying disturbance observer

摘要: [目的] 为了提高永磁同步电机的转速控制性能, 保证转速误差在规定时间内收敛到预设边界以内, 同时避免系统受到扰动导致控制器的奇异性与电机启动时观测器的估计峰值等问题, 本文将预设性能控制与滑模控制方法相结合, 提出了一种基于时变扰动观测器的预设性能滑模控制 (PPSMC+TDO) 方法。[方法] 首先, 提出了一种能够设定收敛时间的预设性能函数, 并进行了误差变换, 将不等式误差约束系统转换为等式约束系统。

基金项目: 国家自然科学基金 (62273189); 山东省自然科学基金 (ZR2022MF262, ZR2021MF005)

National Natural Science Foundation of China (62273189);
Natural Science Foundation of Shandong Province, China
(ZR2022MF262, ZR2021MF005)

其次,提出了时变扰动观测器来估计系统扰动。然后,针对转换后的误差系统,设计了预设性能滑模控制器。【结果】在预设性能函数的约束下,PPSMC+TDO 的转速误差能够在设定的 0.3 s 内收敛到最小预设边界 ε_T 以内。当施加外部扰动时,PPSMC+TDO 的转速波动最小,瞬时转速误差已经超出了预设边界,但是控制器没有出现奇异性等不稳定行为。此外,在初始时刻,扰动估计曲线中没有出现估计峰值。【结论】试验结果表明,在预设性能函数的作用下,转速误差在指定的时间收敛到预设边界以内,保证了转速控制器具有良好的动态性能。当受到扰动后,解决了系统误差超过预设性能函数的边界导致控制器出现奇异性问题,并且保证了对外部恒定负载扰动与周期性扰动都具有良好的抗扰效果。此外,所提时变扰动观测器有效消除了初始时刻的估计峰值。

关键词: 永磁同步电机; 预设性能; 滑模控制; 时变扰动观测器

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有高效率、高功率密度、低噪声振动和结构简单可靠等优点,被广泛应用于新能源汽车^[1]、风力发电^[2]和轨道交通^[3]等领域。随着对控制性能要求的提高,以及非线性理论和现代电力电子技术的发展,自适应控制^[4]、模糊控制^[5]、反步控制^[6]、模型预测控制^[7]、滑模控制^[8](Sliding Mode Control, SMC)和神经网络控制^[9]等先进控制方法被提出并得到具体应用。

其中,SMC 因其结构简单、响应速度快以及对外部干扰具有较强的鲁棒性,而被广泛应用于电机控制中。文献[10]将系统状态变量引入趋近律中,分别设计了滑模速度和电流控制器,系统的动态性能以及抗扰性能得到大幅提升。文献[11]针对积分滑模控制中存在的超调过大问题,定义自调节积分初值来消除积分累计,从而减小了超调,提高了系统的平稳性。文献[12]通过改进超螺旋趋近律设计了一种连续滑模控制器,减小了系统抖振,提高了稳态精度。近年来,SMC 与其他控制方法相结合也得到了广泛应用,文献[13]提出了一种模糊滑模速度控制器,采用模糊规则动态调整控制参数,进一步提高系统性能。文献[14]将 SMC 与反步法相结合,既保证了系统的全局收敛特性,又提高了系

统的鲁棒性。文献[15]设计了一种自适应积分滑模预测控制器,解决了 SMC 的抖振问题,提高了系统的动态性能。

然而,在实际中,有些应用场合需要将跟踪误差约束在一定的范围内,即对暂态、稳态性能有特定要求。预设性能控制(Preset Performance Control, PPC)指的是在控制系统中,通过选择合适的预设性能函数和误差变换函数,使得系统的跟踪误差收敛到一个预先设定的边界内,同时保证系统暂态和稳态要求。因此,SMC 结合 PPC 受到了广大研究者的青睐。文献[16]针对双惯性驱动系统,提出了一种具有预设性能的滑模控制方法,设计了一种不需要精确初始误差的规定性能函数,以保证跟踪误差保持在规定的边界内。文献[17]提出了具有预设性能半车主动悬架系统的自适应滑模控制方案,利用预设性能函数对悬架系统的位移和俯仰角进行约束,保证悬架系统的瞬态和稳态响应。虽然上述方法具有一定的控制效果,但由于外部干扰和不确定性对系统的影响,系统跟踪误差很可能超出性能函数设定的边界。比如,对于 PMSM 调速系统,在突加较大的外部负载扰动后,转速会发生大幅变化,导致控制器出现奇异性问题从而导致方法失效。

对于系统存在的扰动,通常情况下是使用扰动观测器对扰动进行估计,并前馈补偿到控制器中,由此来增强系统的抗扰性能。除此之外,观测器的使用可以使控制器选择相对较小的增益,这对滑模控制器来说可以减小抖振。现有扩展状态观测器^[18-20]、非线性扰动观测器^[21-22]、滑模观测器^[23-25]以及神经网络扰动观测器^[26]等被提出并用于控制系统的扰动估计。对于 PMSM 转速控制系统来说,电机起动时的转速估计误差较大,虽然较大的增益会保证观测器的快速收敛,但是较大的观测器增益以及较大的估计误差则会在初始时刻产生估计峰值,这将会对系统起动时的瞬态性能造成不利影响。

针对传统预设性能控制器可能出现的奇异性以及固定增益观测器存在的估计峰值等问题,本文提出了一种基于时变扰动观测器(Time-Varying Disturbance Observer, TDO)的预设性能滑模速度控制策略,以进一步提高 PMSM 的速度控制性

能。与以往的工作相比,本文的贡献和创新之处如下:

(1) 提出了一种新的预设性能函数与误差转换方法,由此设计的预设性能滑模控制器可以避免系统的奇异性,防止方法失效,还可以预定义设置收敛时间。

(2) 提出了一种 TDO 用来估计系统的内外扰动,同时避免初始时刻的估计峰值给系统造成的不利影响。

(3) 在 PMSM RT-SIM 试验平台上进行了试验测试,验证了所提方法的有效性。

1 系统描述和问题预备

1.1 PMSM 数学模型

根据磁场定向控制理论,PMSM 在 $d-q$ 轴旋转变坐标系的数学模型可表示为

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R_s}{L_d}i_d + \frac{n_p\omega L_q}{L_d}i_q + \frac{1}{L_d}u_d + f_d \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R_s}{L_q}i_q - \frac{n_p\omega L_d}{L_q}i_d - \frac{n_p\Phi}{L_q}\omega + \frac{1}{L_q}u_q + f_q \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{T_e}{J} - \frac{B}{J}\omega + f_\omega \end{aligned} \quad (1)$$

式中: L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴定子电感; i_d 、 i_q 和 u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴定子电流和定子电压; ω 为机械角速度; T_e 为电磁转矩; J 为转动惯量; R_s 为定子电阻; B 为粘性摩擦系数; Φ 为永磁体磁通; n_p 为极对数; f_d 、 f_q 和 f_ω 为模型参数失配等引起的扰动,定义为

$$\begin{aligned} f_d &= -\frac{1}{L_d} \Delta R_s i_d - \Delta L_q n_p \omega i_q + \Delta L_d \frac{di_d}{dt} \\ f_q &= -\frac{1}{L_q} \Delta R_s i_q + \Delta L_d n_p \omega i_d + \Delta \Phi n_p \omega + \Delta L_q \frac{di_q}{dt} \\ f_\omega &= -\frac{1}{J} [\Delta J \omega + \Delta B \omega + \tau_L - n_p \Delta \Phi i_q - \\ & \quad n_p (\Delta L_d - \Delta L_q) i_d i_q] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\Delta L_q = L_{qt} - L_q$ 、 $\Delta L_d = L_{dt} - L_d$ 、 $\Delta R_s = R_{st} - R_s$ 、 $\Delta B = B_t - B$ 、 $\Delta J = J_t - J$ 和 $\Delta \Phi = \Phi_t - \Phi$ 均表示参数不匹配; L_{dt} 、 L_{qt} 、 R_{st} 、 B_t 、 Φ_t 和 J_t 为 PMSM 中的实际参数; τ_L 为外部负载扭矩。

电磁转矩可表示为

$$T_e = n_p [\Phi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

对于表贴式 PMSM,由于 $L_d = L_q$,式(1)中的机械运动方程可替换为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{n_p \Phi i_q}{J} - \frac{B}{J} \omega + f_\omega \quad (4)$$

为了便于转速控制器的设计,将式(4)改写为式(5):

$$\dot{\omega} = \frac{n_p \Phi}{J} i_q - \frac{B}{J} \omega + f_\omega = bi_q + d \quad (5)$$

式中: $b = n_p \Phi / J$ 、 $d = f_\omega - B\omega / J$ 为系统的集总扰动。

PMSM 的调速系统由外速度环和内电流环组成,本文控制目标是针对转速环设计预设性能滑模控制器,以确保转速误差有界并收敛到原点附近的邻域,利用 TDO 估计集总扰动并用作控制器的前馈补偿。所提出的控制策略结构框图如图 1 所示。

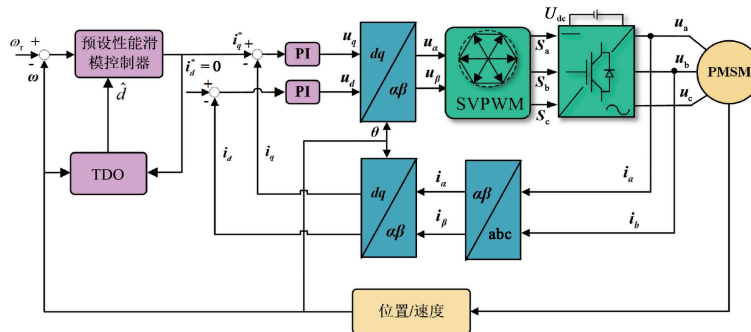


图 1 基于 TDO 的预设性能滑模控制结构框图

Fig. 1 Structure diagram of preset performance sliding mode control based on TDO

1.2 预设性能函数与误差转换

为了实现 PMSM 在预设性能下的转速跟踪

控制,解决传统预设性能函数^[27]不能在规定时间内收敛到预设边界的缺点,基于收敛时间 T ($T >$

0), 设计新的预设性能函数为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} (\varepsilon_0 - \varepsilon_T) \alpha^{-\frac{t}{T-\varepsilon_0}} + \varepsilon_T, & 0 \leq t < T \\ \varepsilon_T, & t \geq T \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\alpha > 1$ 为该函数的收敛速率; $\varepsilon_0, \varepsilon_T$ 分别为该函数的初始值、稳态值, 并且满足 $\varepsilon_0 > \varepsilon_T > 0$ 。

预设性能控制意味着系统的跟踪误差始终在该函数约束下收敛到预设边界内, 即转速跟踪误差 $e_\omega(t)$ 满足:

$$-\varepsilon(t) < e_\omega(t) < \varepsilon(t) \quad (7)$$

式中: $e_\omega = \omega_r - \omega$, ω_r 为给定参考信号。

跟踪误差 e_ω 可在时间 T 内收敛到邻域 $\Omega = \{e_\omega \in \mathbf{R} \mid |e_\omega(t)| \leq \varepsilon_T\}$, 收敛时间 T 与最小预设边界 ε_T 可以根据期望预先设定。

预设性能函数至少需要满足两个条件: (i) 预设性能函数需满足在时间域内是恒正且严格单调递减的, 即 $\varepsilon(t) > 0, \dot{\varepsilon}(t) < 0$; (ii) 满足系统初始误差 $|e_\omega(0)| \leq \varepsilon(0)$ 。

1.3 误差转换

为了实现式(7)所示的不等式约束, 需要进行误差转换, 利用非线性映射将具有误差约束的式(7)转换为等式约束系统。为此, 定义辅助函数来表示转速跟踪误差与性能函数边界之间的距离, 如式(8)所示:

$$\kappa = \varepsilon^2(t) - e_\omega^2(t) \quad (8)$$

基于函数(8), 构造函数 $\delta(\kappa)$, 将 κ 的值映射到 $(0, 1]$ 区间, 如式(9)所示:

$$\delta(\kappa) = \begin{cases} 1, & \eta < \kappa \\ 1 - \frac{\kappa}{\eta}, & 0 < \kappa \leq \eta \\ 0, & \kappa \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: η 为设定的最大安全距离, $\eta \in (0, \varepsilon_T^2]$; $n \in \mathbf{N}^*$, $\mathbf{N}^*$ 是正整数。

为了降低预设性能滑模控制器设计的复杂性, 对转速跟踪误差进行变换:

$$\vartheta = \frac{e_\omega}{\delta(\kappa)} \quad (10)$$

对于转换后的误差 ϑ , 只需确保 ϑ 的有界性, 则误差 $|e_\omega(t)| < |\varepsilon(t)|$ 的约束条件始终被满足, 并且具有以下性质:

- (1) 当且仅当 $e_\omega = 0$ 时, $\vartheta = 0$;
- (2) 当 $\kappa > \eta, \xi(\kappa) = 1$, 此时 $\vartheta = e_\omega$;

(3) 当 $|e_\omega(t)| \rightarrow |\varepsilon(t)|, \vartheta \rightarrow \infty$, 此时系统为确保 ϑ 的有界性, 会迫使 $e_\omega(t)$ 始终在预设函数 $\varepsilon(t)$ 的边界范围以内。

为便于后续控制器的设计, 对变换后的误差式(10)求导可得:

$$\dot{\vartheta} = \lambda \dot{e}_\omega + \dot{h} \quad (11)$$

式中:

$$\begin{aligned} h &= \begin{cases} 0, & \eta < \kappa \\ \frac{4n\varepsilon\dot{\varepsilon}e_\omega}{\eta\delta^2} - 1, & 0 < \kappa \leq \eta; \\ 0, & \kappa \leq 0 \end{cases} \\ \lambda &= \begin{cases} 1, & \eta < \kappa \\ \frac{1}{\delta} - \frac{4ne_\omega^2}{\eta\delta^2} - 1, & 0 < \kappa \leq \eta, \\ 1, & \kappa \leq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

并且满足 $\lambda > 0$ 。

2 TDO 的设计

为了提高 PMSM 的控制性能, 减少外部负载扰动和参数不确定性等对系统稳定性造成的不利影响, 同时消除初始时刻由于转速估计误差较大所带来的估计峰值, 本文设计 TDO 来估计集总扰动 $d(t)$ 。

假设 1: 集总扰动 $d(t)$ 及其一阶导数 $\dot{d}(t)$ 均是有界的, 即 $|d(t)| < D, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{d}(t) = 0, D$ 是一个正的未知常量。

首先, 定义转速估计误差为 $\hat{e}_\omega = \omega - \hat{\omega}$ 。其中, $\hat{\omega}$ 表示机械角速度 ω 的估计值, 则时变扰动观测器定义为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}} = b\hat{e}_\omega + \hat{d} + L_1 \text{sig}^{r_1}(\hat{e}_\omega) \\ \dot{\hat{d}} = L_2(t) \text{sig}^{r_2}(\hat{e}_\omega) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\hat{d}$ 为集总扰动 d 的估计值; $\text{sig}^{r_i}(\hat{e}_\omega) = |\hat{e}_\omega|^{r_i} \text{sign}(\hat{e}_\omega)$, $r_i \in (0, 1)$, $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数; $L_i(t) = (l_{i0} - l_i) e^{-\mu_i t} + l_i$, $l_i > 0$ 为观测器的增益, $\mu_i > 1$ 为时变函数的变化速率, $i = 1, 2$ 。

定义扰动估计误差 $e_d = d - \hat{d}$, 结合式(5), 并对估计误差 $\hat{e}_\omega, e_d$ 求导可得:

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_\omega = e_d - L_1 \text{sig}^{r_1}(\hat{e}_\omega) \\ \dot{e}_d = -L_2 \text{sig}^{r_2}(\hat{e}_\omega) \end{cases} \quad (13)$$

根据文献[28],转速估计误差 $\hat{e}_\omega$ 以及扰动估计误差 e_d 将会在有限时间内收敛到零的微小邻域。

3 预设性能滑模控制器的设计

3.1 转速环控制器的设计

本节将设计一种预设性能滑模转速控制器,实现在误差规定范围内跟随给定期望信号。首先,定义非奇异积分终端滑模面如式(14)所示:

$$s = \vartheta + \beta \int_0^t |\vartheta|^{\lambda} \text{sign}(\vartheta) d\tau \quad (14)$$

式中: $\beta > 0, 0 < \lambda < 1$ 为滑模面的可调参数。

对式(14)求导,并把式(11)代入可得:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{\vartheta} + \beta |\vartheta|^{\lambda} \text{sign}(\vartheta) = \\ &= \lambda \dot{e}_\omega + \dot{h} + \beta |\vartheta|^{\lambda} \text{sign}(\vartheta) \end{aligned} \quad (15)$$

其次,选择终端滑模趋近律为

$$\dot{s} = -k_1 |s|^r \text{sign}(s) - k_2 s \quad (16)$$

式中: $k_1 > 0, k_2 > 0, 0 < r < 1$ 为滑模趋近律的控制参数。

根据式(15)和式(16),可以推导预设性能滑模转速控制器的表达式为

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{1}{b\lambda} [\lambda \dot{\omega}_r + \dot{h} + \beta |\vartheta|^{\lambda} \text{sign}(\vartheta) + \\ &+ k_1 |s|^r \text{sign}(s) + k_2 s - \lambda \hat{d}] \end{aligned} \quad (17)$$

3.2 系统稳定性分析

引理1^[29]:考虑系统 $\dot{x} = f(x)$,若存在正定函数 $V(x)$ 以及常数 $\lambda_1, \lambda_2 > 0, 0 < q < 1$ 使得 $\dot{V}(x) \leq -\lambda_1 V^q(x) - \lambda_2 V(x)$ 成立,则该系统满足有限时间收敛,收敛时间满足:

$$t \leq \frac{1}{\lambda_2(1-q)} \ln \frac{\lambda_2 V^{1-q}(x_0) + \lambda_1}{\lambda_1} \quad (18)$$

结合式(5),将式(17)代入式(15)可得:

$$\dot{s} = -k_1 |s|^r \text{sign}(s) - k_2 s - \lambda \hat{d} - \hat{d} \quad (19)$$

选取 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (20)$$

对式(20)求导,并将式(19)代入可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \dot{s} = \\ s [-k_1 |s|^r \text{sign}(s) - k_2 s - \lambda(\hat{d} - \dot{\hat{d}})] &\leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-k_1 |s|^{r+1} - k_2 s^2 + \lambda |s| \cdot |e_d| \leq \\ &-k_1 |s|^{r+1} - k_2 s^2 + \bar{D} |s| \leq \\ &-k_1 |s|^{r+1} + \bar{D} |s|^{r+1} - k_2 s^2 = \\ &= -\sqrt{2}^{r+1} k_1 - \bar{D} \sqrt{2}^{r+1} - 2k_2 V \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $\lambda |e_d| \leq \bar{D}, \bar{D}$ 是一个正常数。

根据引理1,若 Lyapunov 函数的导数式(21)成立,且 $k_1 > \bar{D}$ 被满足,则式(19)满足有限时间收敛。

4 试验验证

在本节中,基于 PMSM 试验平台完成了相关试验验证。试验平台由 130 MB 150 A 表贴式 PMSM、负载电机、绝缘栅双极晶体管功率转换器和扭矩传感器等组成,控制算法在 LINKS-RT 中实现,采样频率为 10 kHz。相电流由霍尔传感器根据霍尔效应测量并转换为电信号,采用编码器测量转子位置。试验平台如图2所示,PMSM 的标称参数如表1所示。

表1 PMSM 的标称参数

Tab. 1 Nominal parameters of PMSM

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
d,q 轴定子电感/mH	6.65
定子电阻/Ω	1.84
永磁体磁链/Wb	0.32

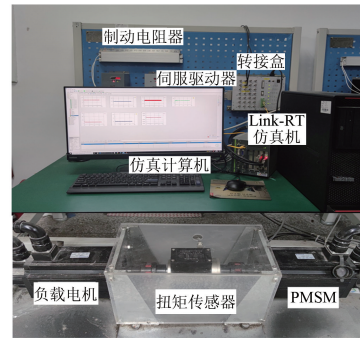


图2 PMSM 试验平台

Fig. 2 PMSM experimental platform

为验证所提控制方法的有效性与优越性,本文将传统比例积分(Proportional Integral, PI)控制、基于 TDO 的 SMC (SMC+TDO) 与本文提出的基于 TDO 的预设性能滑模控制 (Preset Performance Sliding Mode Control TDO, PPSMC+TDO) 进行对比验证。

PI 控制器的形式如式(22)所示:

$$i_{q1}^* = k_{sp}e_{\omega} + k_{si}\int e_{\omega}dt \tag{22}$$

式中: k_{sp} 、 k_{si} 分别为 PI 控制器的比例项增益、积分项增益。

在 SMC+TDO 中,选择没有进行误差转换的式(23)作为滑模面、式(16)作为趋近律,可以推导出控制器的表达式如式(24)所示:

$$s = e_{\omega} + \beta \int_0^t |e_{\omega}|^{\lambda} sign(e_{\omega}) d\tau \tag{23}$$

$$i_{q2}^* = \frac{1}{b}[\dot{\omega}_r + \beta |e_{\omega}|^{\lambda} sign(e_{\omega}) + k_1 |s|^r sign(s) + k_2 s - \hat{d}] \tag{24}$$

在三种控制策略中,为了保证试验的公平性, d 、 q 轴电流环均采用 PI 控制器,且参数均选择为 $k_p=9$ 、 $k_i=100$,其他控制参数如表 2 所示。

为了选取最优的控制参数,针对所提控制策略 PPSMC+TDO,分析了控制参数对系统性能的影响,提供了参数选取指南:

(1) 对于非奇异积分终端滑模面,参数 β 大于 0,可提高控制精度、消除稳态误差以及增强系统鲁棒性。然而,过大的 β 值会导致严重超调。此外,为确保该滑模面实现有限时间收敛, λ 取值

范围为(0,1)。参数 β 与 λ 从 0 开始逐渐增加,以确保输出转速跟踪给定转速。

(2) 对于终端滑模趋近律, k_1 、 k_2 均取正值,并且必须满足 $k_1>\bar{D}$ 来保证系统稳定性。趋近律的收敛速度主要由 k_1 、 k_2 决定,其值越大,收敛速度越快。然而,不合理的增大其值会带来抖振与超调。同样,为实现趋近律的有限时间收敛, r 的取值范围仍为(0,1)。参数 k_1 、 k_2 与 r ,从 0 开始逐渐增加,以确保良好的转速跟踪效果。

(3) 对于时变扰动观测器,增益 $L_i(t)$ 是关于时间 t 的时变函数。当 $t\rightarrow\infty$, $L_i(t)$ 的变化趋势为 $l_{i0}\rightarrow l_i$ 。若要去掉初始时刻的估计峰值,必须在初始时刻的时间域内保持小增益 l_{i0} ;当系统状态达到稳态后,若要对系统扰动实现快速且精准的估计,需要保持较大的增益 l_i 。因此, $0<l_{i0}<l_i$ 必须被满足。然而,过大的 l_i 会放大高频噪声并降低估计精度。 μ_i 影响时变函数 $L_i(t)$ 的变化速率,其值越大, $l_{i0}\rightarrow l_i$ 的变化速率越快,反之越慢。为实现观测误差的有限时间收敛, r_i 的取值范围为(0,1)。对于上述参数,从 0 开始逐渐增加其值,以确保良好的抗扰性能。

表 2 控制器和观测器参数

Tab. 2 Parameters of controller and observer

控制策略	控制器参数	观测器参数
PI	$k_{sp}=0.04, k_{si}=0.5$	—
SMC+TDO	$\beta=149, \lambda=0.85, k_1=93, r=0.9, k_2=35$	$l_{i0}=20, l_i=400, \mu_1=50, l_{20}=40, l_2=1\ 600, \mu_2=80$
PPSMC+TDO	$\varepsilon_0=150, \varepsilon_T=0.8, T=0.3, \alpha=9, \eta=0.6, n=1, \beta=149, \lambda=0.85, k_1=93, r=0.9, k_2=35$	$l_{i0}=20, l_i=400, \mu_1=50, l_{20}=40, l_2=1\ 600, \mu_2=80$

4.1 起动过程性能分析

首先,测试了三种控制策略在不同转速下的起动性能,负载转矩为 0.5 N·m,给定转速分别为 200 r/min、600 r/min 和 1 000 r/min,设定预设性能函数边界在 0.3 s 内从初始值 $\varepsilon_0=150$ 收敛到稳态值 $\varepsilon_T=0.8$ 。图 3 显示了三种控制策略在不同给定速度下的转速跟踪曲线。当给定转速为 600 r/min 时,PI、SMC+TDO、PPSMC+TDO 的速度超调分别为 52 r/min、43 r/min 和 42 r/min,响应时间分别为 0.5 s、0.4 s 和 0.3 s,其他性能指标的详细对比如表 3 所示。图 4 为转速曲线所对应的跟踪误差收敛曲线,可以看出,由于 PI、SMC+TDO 在设计时没有考虑预设边界,出现了违反边界的

行为,而本文所提出的 PPSMC+TDO 能有效地迫使转速跟踪误差在 0.3 s 收敛到最小稳态边界 ε_T 以内。图 5 为所提方法在不同转速起动时的电流曲线,结果表明,该方法有效地将转速误差限制在预定范围内。

4.2 负载扭矩变化下的性能分析

其次,为验证所提方法在突加外部负载扰动后的抗扰性能,以及能否避免因误差超过边界所造成控制器的奇异性问题,电机稳定运行后,在 $t=5$ s 突加 3.5 N·m 的恒定外部扰动,然后在 $t=10$ s 移除施加的外部扰动。三种控制策略在不同转速下的速度响应曲线如图 6 所示,转速波动明显已经超过了预设边界,但控制器并没有出现奇

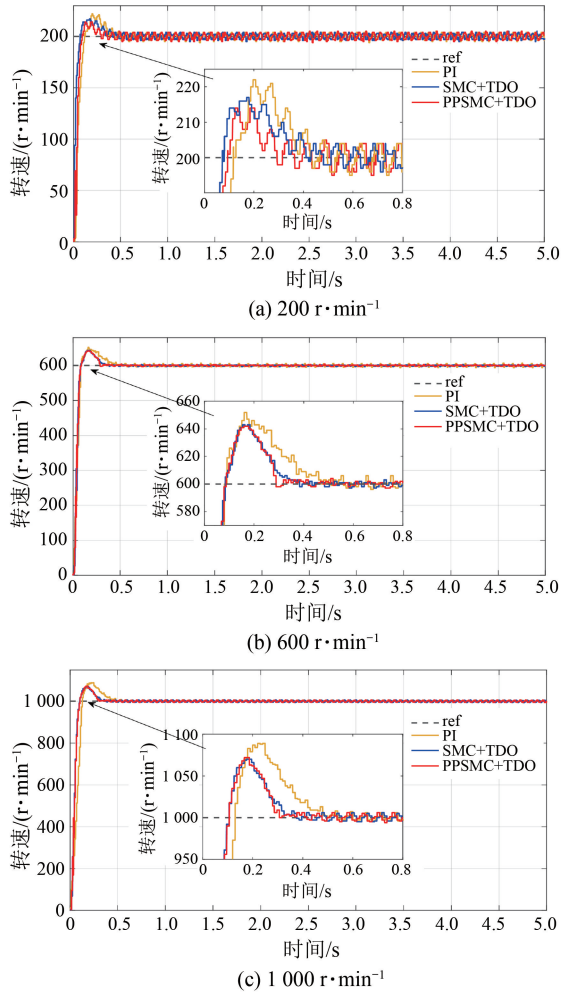


图3 起动时的转速跟踪曲线

Fig. 3 Speed tracking curves during starting

异性现象,而是重新恢复到给定转速。并且相较于 SMC+TDO 方法,所提方法抗扰性能也有些许提升,抗扰性能指标的详细对比如表 3 所示。

图 7 为所提方法在不同转速稳定运行后突加恒定外部扰动的电流曲线,图 8 为普通固定增益的扰动观测器和 TDO 分别对扰动 d 的估计曲线。从对比图可以看出,TDO 避免了初始时刻的估计峰值,从而不会对系统造成危害。

然后,为了验证所提方法抵抗周期性负载扰动的性能。电机起动并稳定运行后,在 $t = 5$ s 突加 $1.5\sin(2\pi t)$ N·m 的周期性外部扰动,在 $t = 10$ s 后去除该扰动。三种控制策略在不同转速下的速度响应曲线对比如图 9 所示,图 10 为所提方法在稳定运行后突加周期性外部扰动的电流曲线。试验结果表明,所提方法解决了预设性能控制器的奇异性问题,对恒定外部负载扰动具有较好的抗扰效果,

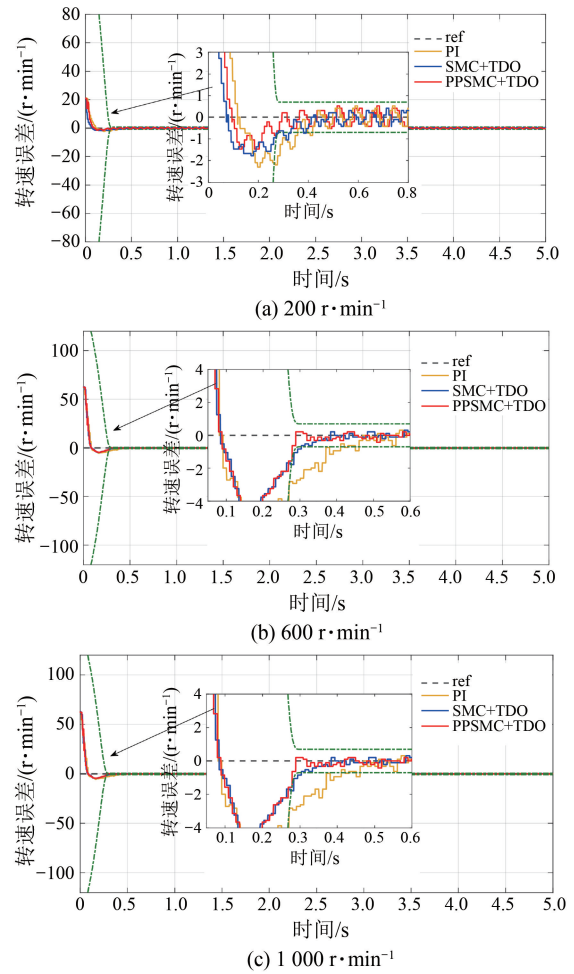


图4 起动时转速跟踪误差的收敛曲线

Fig. 4 Convergence curves of speed tracking errors during starting

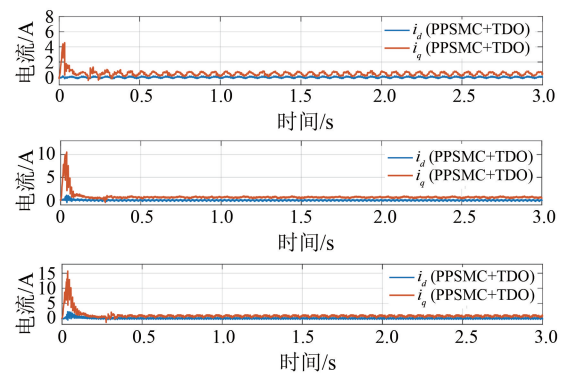


图5 PPSMC+TDO 分别在 200 r/min、600 r/min、1 000 r/min 起动时的电流曲线 (从上往下排列)

Fig. 5 Current curves of PPSMC+TDO at 200 r/min, 600 r/min, and 1 000 r/min during starting (arranged from top to bottom)

并且在周期性负载扰动的影响下转速波动最小。

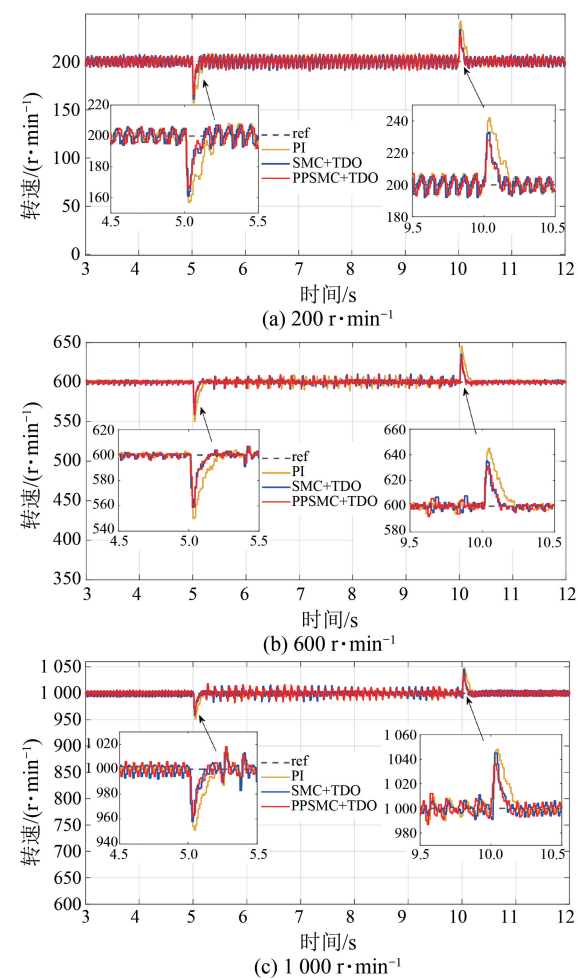


图 6 突加恒定负载扰动的转速跟踪曲线

Fig. 6 Speed tracking curves under sudden external constant load disturbance

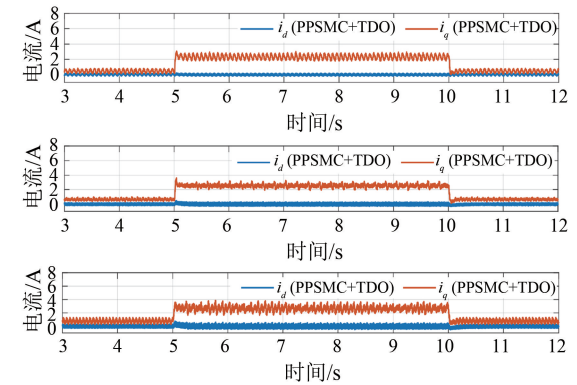


图 7 PPSMC+TDO 分别在 200 r/min、600 r/min、1 000 r/min 突加恒定负载扰动时的电流曲线 (从上往下排列)

Fig. 7 Current curves of PPSMC + TDO under sudden external constant load disturbance at 200 r/min, 600 r/min, and 1 000 r/min (arranged from top to bottom)

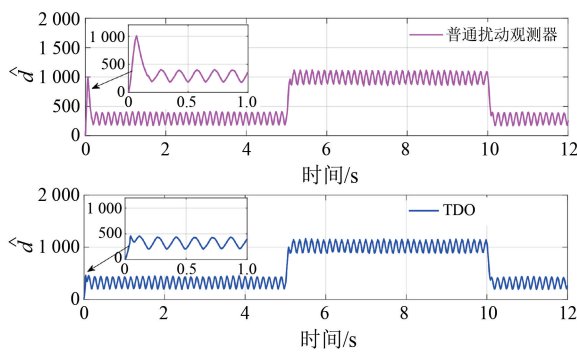


图 8 600 r/min 的扰动估计曲线

Fig. 8 Disturbance estimation curves at 600 r/min

表 3 不同转速下三种控制策略的性能指标对比

Tab. 3 Comparison of performance indicators of three control strategies at different speeds

给定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	控制策略	起动过程		恒定负载变化(加载、减载)	
		响应时间/s	超调量/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	转速波动/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	调节时间/s
200	PI	0.5	22	43、42	0.21、0.19
	SMC+TDO	0.4	16	39、33	0.13、0.11
	PPSMC+TDO	0.3	14	34、28	0.12、0.11
600	PI	0.5	52	50、45	0.22、0.23
	SMC+TDO	0.4	43	41、35	0.14、0.12
	PPSMC+TDO	0.3	42	40、31	0.14、0.12
1 000	PI	0.5	89	49、48	0.22、0.23
	SMC+TDO	0.4	70	42、45	0.12、0.12
	PPSMC+TDO	0.3	72	38、36	0.12、0.13

5 结语

针对具有未知内外部扰动的 PMSM 调速系

统,本文提出了基于 PPSMC+TDO 来实现规定性能的转速跟踪。首先,设计了能够设置收敛时间的预设性能函数,然后对转换后的误差系统设计

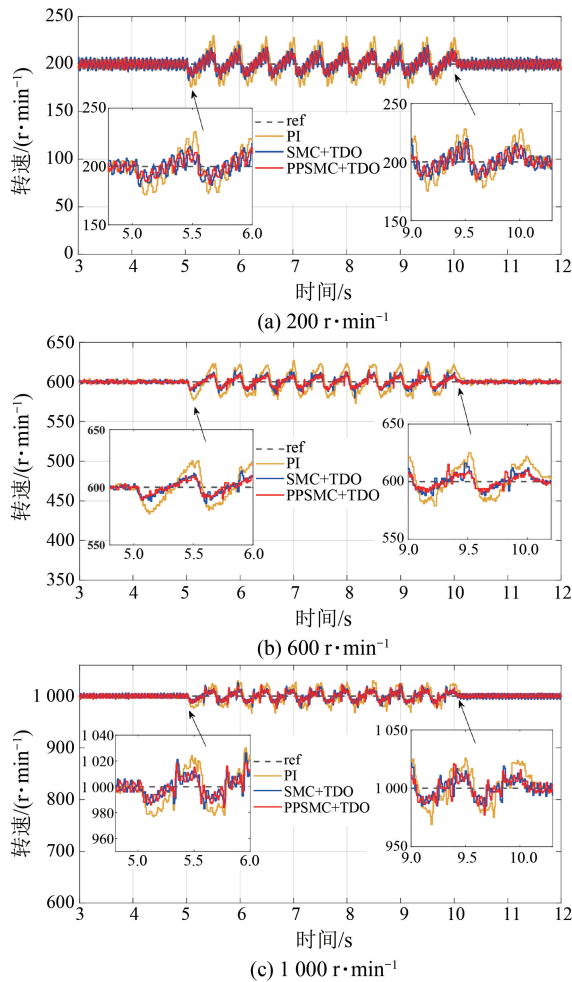


图9 突加周期性负载扰动的转速跟踪曲线

Fig. 9 Speed tracking curves under sudden periodic load disturbance

了预设性能滑模转速控制器,并通过 TDO 对系统扰动进行估计补偿。试验结果表明,所提方法 PPSMC+TDO 不但能够有效地迫使转速跟踪误差在 0.3 s 收敛到最小稳态边界 ε_r 以内,实现规定的性能指标,并且解决了误差超过预设边界导致控制器出现奇异性等问题,保证了对外部负载扰动也具有有良好的抗扰效果。此外,所提 TDO 有效避免了初始时刻估计峰值给系统带来的不利影响。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

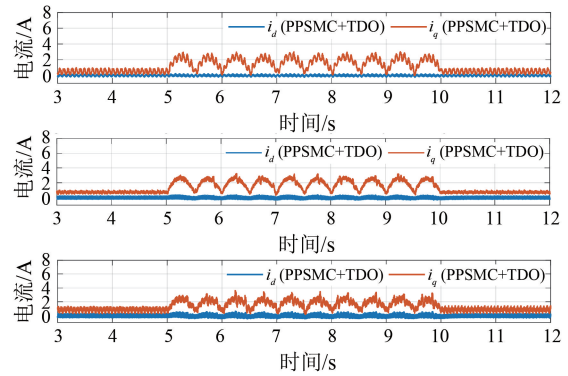


图10 PPSMC+TDO 分别在 200 r/min、600 r/min、1 000 r/min 突加周期性负载扰动时的电流曲线(从上往下排列)

Fig. 10 Current curves of PPSMC + TDO under sudden periodic load disturbance at 200 r/min, 600 r/min, and 1 000 r/min (arranged from top to bottom)

作者贡献

陈勇志设计了研究方法并撰写论文初稿,张立嘉进行了试验方案设计与实施、制作图表,刘旭东负责论文的修订与润色。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The research methods and initial draft of the paper were carried out by CHEN Yongzhi. The experiment scheme and the charts were designed and carried out by ZHANG Lijia. The manuscript was reviewed and revised by LIU Xudong. All authors have read the final version of the paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 白学森. 电动汽车驱动用分数槽永磁同步电机电磁噪声优化[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(6): 60-65.
- BAI X S. Electromagnetic noise optimization of fractional-slot permanent magnet synchronous motor for electric vehicle [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(6): 60-65.
- [2] 杨波, 贺建湘, 刘中华, 等. 大功率中速永磁风力发电机设计及性能研究[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(7): 35-38+47.
- YANG B, HE J X, LIU Z H, et al. Design and performance research of high-power medium-speed permanent magnet wind power generator [J].

- Electric Machines & Control Application, 2020, 47(7): 35-38+47.
- [3] ZHANG Z S, WANG C C, ZHOU M L, et al. Parameters compensation of permanent magnet synchronous motor in flux-weakening region for rail transit [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12509-12521.
- [4] 沈宏丽, 郭健, 樊卫华, 等. 基于特征模型的电梯用永磁同步电机抗扰动自适应控制[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(2): 1-6.
- SHEN H L, GUO J, FAN W H, et al. Anti-disturbance adaptive control of elevator PMSM based on characteristic model [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(2): 1-6.
- [5] 张萌, 蓝益鹏. 直线同步电动机磁悬浮系统区间二型模糊控制的研究 [J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 1-7.
- ZHANG M, LAN Y P. Research on interval type-2 fuzzy control for magnetic levitation system of linear synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(5): 1-7.
- [6] 刘志坚, 蓝益鹏, 徐泽来. 磁悬浮平台直线同步电动机悬浮系统的分数阶反步控制 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 52-58.
- LIU Z J, LAN Y P, XU Z L. Fractional order backstepping control of linear synchronous motor suspension system of magnetic levitation platform [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 52-58.
- [7] 杨狂彪, 石坚. 改进型永磁同步电机有限控制集模型预测速度控制 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 92-100.
- YANG K B, SHI J. Improved finite control set model predictive speed control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 92-100.
- [8] 马毓敏, 赵南南, 刘金颂, 等. 永磁直驱风力发电机非奇异终端滑模控制 [J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 86-94.
- MA Y M, ZHAO N N, LIU J S, et al. Permanent magnet direct drive wind generator control based on non-singular terminal sliding mode [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 86-94.
- [9] 刘泓杉, 刘慧博. 基于径向基函数神经网络的永磁同步电机转速自适应控制策略 [J]. 电子器件, 2023, 46(6): 1552-1560.
- LIU H S, LIU H B. Speed adaptive control strategy of permanent magnet synchronous motor based on RBF neural network [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(6): 1552-1560.
- [10] 康尔良, 朱金荣, 韩康玮. 永磁同步电机新型趋近律滑模控制器设计 [J]. 电机与控制学报, 2024, 28(7): 112-119+130.
- KANG E L, ZHU J R, HAN K W. Design of new reaching law of sliding mode controller for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(7): 112-119+130.
- [11] 程勇, 李思卿, 李森豪. 永磁同步电机改进积分型时变滑模控制 [J]. 电机与控制学报, 2024, 28(7): 160-167.
- CHENG Y, LI S Q, LI S H. Time-varying sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on improved integral sliding mode [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(7): 160-167.
- [12] 赵凯辉, 譙梦洁, 吕玉映, 等. PMSM 无模型超螺旋快速积分终端滑模控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(5): 64-74.
- ZHAO K H, QIAO M J, LV Y Y, et al. Model-free super-twisting fast integral terminal sliding mode control for PMSM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5): 64-74.
- [13] WANG B L, LI Z X, LI Y C, et al. Fuzzy sliding mode control of PMSM based on PSO [J]. IEICE Electronics Express, 2023, 20(20): 20230346.
- [14] ZHANG P, CHEN Y, WAN Z, et al. Adaptive finite-time backstepping sliding mode control for PMSM system with backlash [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(6): 7549-7559.
- [15] LI Z, WANG F, KE D, et al. Robust continuous model predictive speed and current control for PMSM with adaptive integral sliding-mode approach [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14398-14408.
- [16] WANG S, NA J, CHEN Q. Adaptive predefined performance sliding mode control of motor driving systems with disturbances [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 1931-1939.
- [17] LIU Y J, CHEN H. Adaptive sliding mode control for

- uncertain active suspension systems with prescribed performance [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(10): 6414-6422.
- [18] QU L Z, QIAO W, QU L Y. An extended-state-observer-based sliding-mode speed control for permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 9(2): 1605-1613.
- [19] 李永福, 文跃洲, 黄龙旺. 基于改进扩展状态观测器的四旋翼无人机轨迹鲁棒跟踪控制[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 129-139.
- LI Y F, WEN Y Z, HUANG L W. Robust trajectory tracking control of quadrotor UAV based on the improved extended state observer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 129-139.
- [20] 陆园, 朱其新, 朱永红. 基于扩展观测器的永磁同步电机快速积分终端滑模控制[J]. 机床与液压, 2023, 51(24): 116-121.
- LU Y, ZHU Q X, ZHU Y H. Fast integral terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on extended observer [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(24): 116-121.
- [21] SHI T N, YAN Y, ZHOU Z Q, et al. Linear quadratic regulator control for PMSM drive systems using nonlinear disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 5093-5101.
- [22] 侯波, 刘唐旺. 基于非线性扰动观测器的三相PWM整流器滑模控制[J]. 电子测量技术, 2024, 47(15): 89-100.
- HOU B, LIU T W. Nonlinear disturbance observer-based sliding-mode control for three-phase PWM rectifiers [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(15): 89-100.
- [23] CHEN L, ZHANG H M, WANG H, et al. Continuous adaptive fast terminal sliding mode-based speed regulation control of PMSM drive via improved super-twisting observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(5): 5105-5115.
- [24] 余莉, 张政, 沈喆磊. 基于新型滑模观测器的PMSM无传感器控制[J]. 信息技术, 2024, (11): 51-56+62.
- YU L, ZHANG Z, SHEN Z L. Sensorless control of PMSM based on a novel sliding mode observer [J]. Information Technology, 2024, (11): 51-56+62.
- [25] 宋建国, 李子豪, 刘小周. 永磁同步电机改进型全阶滑模观测器无传感控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 14-21.
- SONG J G, LI Z H, LIU X Z. Improved full order sliding mode observer without sensing control of permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 14-21.
- [26] WANG D, ZONG Q, TIAN B, et al. Neural network disturbance observer-based distributed finite-time formation tracking control for multiple unmanned helicopters [J]. ISA Transactions, 2018, 73: 208-226.
- [27] WANG X M, WANG X Y, WANG Z, et al. Composite finite-time control for PMSM with prescribed performance using disturbance compensation technique [J]. Control Engineering Practice, 2023, 141: 105677.
- [28] BAI C, YIN Z G, LUO J W, et al. Robust composite finite-time convergent speed control of induction machine based on multiple sources disturbance estimation technology generalized proportional integral observer [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 6160-6170.
- [29] 黄宴委, 林涛, 黄文超, 等. 一种快速有限时间收敛的轨迹跟踪引导律[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(6): 965-976.
- HUANG Y W, LIN T, HUANG W C, et al. Guidance law with fast finite time convergence for trajectory tracking [J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(6): 965-976.

收稿日期:2024-09-19

收到修改稿日期:2024-11-26

作者简介:

陈勇志(1999-),男,硕士研究生,研究方向为电机驱动与运动控制,chenyongzhi361@163.com;

* 通信作者:刘旭东(1987-),男,博士,副教授,研究方向为电驱动系统控制、非线性控制,xudong19871982@163.com。