

基于扰动观测器的双电机同步驱动伺服系统滑模控制

王 郡^{1,2}, 岳国豪^{1,2}, 李增豪^{1,2}, 王保防^{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)

Sliding Mode Control for Dual-Motor Synchronous Drive Servo System Based on Disturbance Observer

WANG Jun^{1,2}, YUE Guohao^{1,2}, LI Zenghao^{1,2}, WANG Baofang^{1,2*}

(1. School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071 China;

2. Shandong Key Laboratory of Industry Control Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: [Objective] For a dual-motor servo system with external disturbance torques, a terminal sliding mode control (TSMC) strategy based on a finite-time disturbance observer is proposed. The aim is to enhance the dynamic response quality, robustness, and cooperative motion accuracy between the dual motors under complex working conditions.

[Methods] Firstly, a finite-time disturbance observer was designed to quickly and accurately estimate external disturbances, ensuring that the observation error converged in finite time. Second, a nonsingular terminal sliding mode surface was constructed to avoid singularity issues and enhance the system's anti-interference capability. Then, synchronous feedback and an optimized reaching law were introduced to suppress chattering and ensure high-precision synchronization of the dual motors. Finally, based on the Matlab/Simulink simulations platform, the performance of the proposed TSMC strategy was compared and analyzed with that of the integral sliding mode control strategy. [Results] The results demonstrated that the proposed TSMC strategy

exhibited significant advantages in system load tracking performance, trajectory tracking error, and dual-motor synchronization error. [Conclusion] The proposed TSMC strategy theoretically guarantees finite-time stability of the system and demonstrates significant practical advantages, including strong anti-interference capability, fast dynamic response, and high-precision synchronization. This achievement provides an effective solution for controlling high-performance dual-motor servo systems in scenarios with complex disturbances and stringent accuracy requirements.

Key words: dual-motor servo system; terminal sliding mode control; disturbance observer; high-precision synchronization

摘要: [目的] 针对具有外部扰动力矩的双电机伺服系统, 提出一种基于有限时间扰动观测器的终端滑模控制 (TSMC) 策略, 旨在提升系统在复杂工况下的动态响应品质、鲁棒性及双电机间的协同运动精度。 [方法] 首先, 设计有限时间扰动观测器, 快速精确估计外部扰动, 确保观测误差有限时间收敛。其次, 构建非奇异终端滑模面, 避免奇异性问题, 增强系统抗干扰能力。然后, 引入同步反馈与优化趋近律, 抑制抖振, 确保双电机高精度同步。最后, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台, 对比分析了本文所提 TSMC 策略与积分滑模控制策略的性能。 [结果] 结果表明, 本文所提 TSMC 策略在系统负载跟踪性能、轨迹跟踪误差及双电机同步误差性能指标上均展现出显著优势。 [结论] 本文所提 TSMC 策略在理论上保证了系统的有限时间稳定性, 在实践中展现出抗干扰强、响应快及同步精的显著优势。该成果为高性能双电机伺服系统在复杂扰动和高精度场景下的控制, 提供了

基金项目: 国家自然科学基金 (62573250); 山东省自然科学基金 (ZR2024QF008); 山东省重大科技创新工程 (2022CXG020901); 山东省高校青年创新团队计划 (2024KJH124); 青岛市自然科学基金 (25-1-1-159-zyyd-jch)

National Natural Science Foundation of China (62573250); National Natural Science Foundation of Shandong Province, China (ZR2024QF008); Major Science and Technology Innovation Projects in Shandong Province (2022CXG020901); The Team Plan for Youth Innovation of Universities in Shandong Province (2024KJH124); National Natural Science Foundation of Qingdao (25-1-1-159-zyyd-jch)

有效的解决方案。

关键词: 双电机伺服系统; 终端滑模控制; 扰动观测器; 高精度同步

0 引言

伺服系统是智能制造的核心, 广泛应用于机器人、数控机床和航空航天等领域。单电机系统难以满足大惯量、大功率需求, 双电机系统^[1-4]因此备受关注。但外部扰动和电机参数差异会影响其性能, 高精度跟踪控制成为挑战。

针对伺服系统的高精度控制, 学者们提出了多种先进控制算法, 主要包括自适应鲁棒控制^[5]、终端滑模控制 (Terminal Sliding Mode Control, TSMC) 和命令滤波控制^[6]等。其中, TSMC 被广泛认为是一种有效的伺服系统控制器设计方法。文献[7]提出一种自适应抗干扰 TSMC 控制器, 有效抑制速度波动。文献[8]提出一种用于伺服系统的连续 TSMC 算法, 实现了有限时间稳定性并保证了系统鲁棒性和连续性。针对永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM), 文献[9]提出一种基于自适应增益的无模型滑模控制策略, 实现了转速环的精确控制与扰动补偿; 文献[10]结合自适应趋近律与干扰观测器提升精度; 文献[11]采用非奇异 TSMC 与扩张状态观测器, 增强鲁棒性。文献[12]结合全局快速 TSMC 与模型预测转矩控制, 提升了系统性能。文献[13]采用自适应非奇异 TSMC, 优化了异步电机速度控制。但现有研究多针对单电机系统, 双电机伺服系统 TSMC 的应用仍需深入探索。

针对伺服系统的外部扰动力矩, 扰动观测器设计是当前研究的重点之一^[14-16]。例如, 文献[17]提出一种基于时变二阶非线性扰动观测器的 q 轴电流约束有限时间控制方法, 提升了 PMSM 的过电流保护和抗扰能力; 文献[18]提出一种结合全阶观测器的滑模控制器, 有效抑制电流脉动并增强鲁棒性; 文献[19]提出一种改进线性自抗扰控制策略, 有效提升抗干扰性能; 文献[20]提出一种基于重复控制的扰动校正观测器, 有效提升了电流跟踪精度与抗扰性能; 文献[21]提出一种基于超螺旋滑模观测器的参数辨识方

法, 优化增强了系统抗扰能力; 文献[22]提出了基于扩展双态观测器的速度控制器, 提高了 PMSM 在不确定性下的速度跟踪性能。上述研究实现了闭环系统的渐进稳定, 然而, 基于有限时间的扰动观测与双电机伺服系统控制设计有待进一步研究。

综上, 针对具有外部扰动力矩的双电机伺服系统, 本文设计了基于有限时间扰动观测器的 TSMC 策略, 具体如下。

(1) 针对具有高阶多变量特征的双电机伺服系统, 设计非奇异 TSMC 策略, 通过独立滑模面的设计直观观测状态收敛性, 实现高精度跟踪与有限时间稳定, 同时平滑控制信号以减少执行器磨损。

(2) 与文献[23]相比, 在滑模控制设计过程中, 考虑双电机的同步误差, 设计包含同步反馈信号的交叉耦合同步控制器, 提高双电机同步驱动伺服系统的性能, 避免电机之间速度不一致造成的额外能量损耗及安全隐患。

(3) 在两个电机侧分别设计了有限时间扰动观测器, 通过独立观测避免交叉耦合, 实现扰动快速精确估计并确保扰动估计误差在有限时间内收敛至 0 邻域, 提高系统的响应速度, 增强系统的抗干扰性能。

1 问题描述

在双电机伺服系统中, 电机通过两个减速器驱动齿轮, 预计将以相同的速度共同驱动负载。典型的双电机伺服系统的结构如图 1 所示。

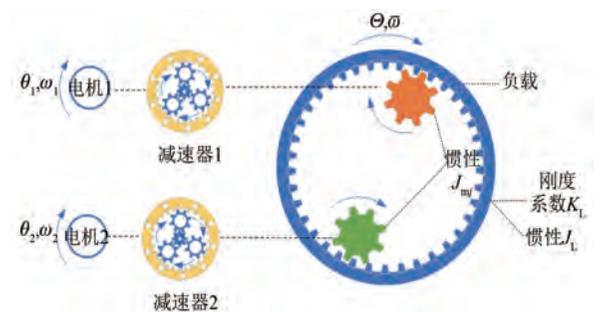


图 1 双电机同步驱动伺服系统结构

Fig. 1 Structure of dual-motor synchronous drive servo system

在双电机伺服系统中, 忽略间隙, 则系统的动力学方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{\theta}_L(t) = \omega_L(t) \\ \dot{\theta}_j(t) = \omega_j(t) \\ \dot{\omega}_L(t) = \sum_{j=1}^2 K_L[\theta_j(t) - \theta_L(t)]/J_L - b_L\omega_L/J_L \\ \dot{\omega}_j(t) = \{K_{Tj}i_j(t) - K_L[\theta_j(t) - \theta_L(t)]\}/J_{mj} - b_j\omega_j/J_{mj} + d_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ_j 、 ω_j 分别为每个电机按减速比折算到负载侧的角位置、角速度, $j(j=1,2)$ 为不同组的电机参数; K_{Tj} 、 b_j 、 J_{mj} 分别为等效电磁转矩常数、粘滞摩擦系数、惯性; θ_L 、 ω_L 、 b_L 和 J_L 分别为负载的角位置、角速度、粘滞摩擦系数和惯量; d_j 为电机侧的未知扰动力矩。

在负载侧选择状态变量 $x_1 = \theta_L(t)$ 和 $x_2 = \omega_L(t)$, 然后在电机侧选择 $x_{3j} = \theta_j(t)$ 和 $x_{4j} = \omega_j(t)$, 各电机的控制输入 $u_j = i_j(t)$ 。定义 $a_1 = K_L/J_L$, $a_2 = b_L/J_L$, $\lambda_{1j} = K_{Tj}/J_{mj}$, $\lambda_{2j} = K_L/J_{mj}$ 和 $\lambda_{3j} = b_j/J_{mj}$, 则系统方程可改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1(x_3 - 2x_1) - a_2x_2 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_{4j} = \lambda_{1j}u_j - \lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) - \lambda_{3j}x_{4j} + d_j \end{cases} \quad (2)$$

为了提高系统的效率和稳定性, 确保高精度和高可靠性运行双电机伺服系统, 引入了同步误差信号 e_s , 其中 $e_s = x_{42} - x_{41}$ 。

系统满足以下合理假设。

假设 1: 期望信号 x_d 及其导数 \dot{x}_d 、 \ddot{x}_d 、 $x_d^{(3)}$ 是连续、平滑和有界的, 并且 $x_d^{(4)}$ 也是有界的。

假设 2: 扰动力矩 d_j 有界但未知, 表示为 $|d_j| < \mu$, μ 是一个正常数, 为扰动的上限。

后续使用的相关引理如下。

引理 1^[24]: 假设存在满足不等式(3)的连续正定函数 $V(t)$:

$$\dot{V}(t) + \alpha V(t) + \lambda V^\gamma(t) \leq 0, \forall t > t_0 \quad (3)$$

则 $V(t)$ 在有限时间 t_s 内收敛到平衡点, t_s 满足不等式(4):

$$t_s \leq t_0 + \frac{1}{\alpha(1+\gamma)} \ln \frac{\alpha V^{1-\gamma}(t_0) + \lambda}{\lambda} \quad (4)$$

式中: $\alpha > 0$, $\lambda > 0$ 并且 $0 < \gamma < 1$ 。

引理 2^[25-26]: 考虑到系统 $\dot{x} = f(x)$, 若存在正

定函数 $V(x)$ 以及 $\alpha, \beta > 0, 0 < p < 1, 0 < c^* < \infty$, 使 $\dot{V}(x) \leq -\alpha V(x) - \beta V^p(x) + c^*$ 成立, 则系统的状态轨迹实际有限时间稳定, 收敛时间满足 $t \leq$

$$\frac{1}{\alpha(1-p)} \ln \frac{\alpha V^{1-p}(x_0) + \lambda \beta}{\lambda \beta}, 0 < \lambda < 1. \text{ 当 } c^* = 0 \text{ 时, 系统的状态轨迹有限时间稳定, 收敛时间满足 } t \leq \frac{1}{\alpha(1-p)} \ln \frac{\alpha V^{1-p}(x_0) + \beta}{\beta}.$$

本文的控制目标是设计一种基于有限时间扰动观测器的终端滑模跟踪控制器, 使系统输出能够遵循给定的期望信号 x_d 。设计适当的控制输入信号 u_1 和 u_2 , 以减少不确定性和干扰的影响, 同时确保跟踪和同步误差在短时间内收敛。

2 有限时间扰动观测器

为了设计具有有限时间收敛特性的扰动观测器, 引入了辅助变量:

$$v_j = z_j - x_{4j} \quad (5)$$

式中: z_j 被构造为电机角加速度状态的观测器状态, 其计算式为

$$\begin{aligned} \dot{z}_j = & -\delta v_j - \mu \text{sign}(v_j) - \varepsilon v_j^{m_0} - \\ & |-\lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) - \lambda_{3j}x_{4j} \text{sign}(v_j) + \lambda_{1j}u_j| \end{aligned} \quad (6)$$

式中: sign 为符号函数; δ 、 μ 、 m_0 和 ε 为正常数, 且 $1 < m_0 < 2$ 。

结合式(2)和式(6), 扰动估计 \hat{d}_j 的计算式、 v_j 的时间导数分别为

$$\begin{aligned} \hat{d}_j = & -\delta v_j - \mu \text{sign}(v_j) - \varepsilon v_j^{m_0} - \\ & |-\lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) - \lambda_{3j}x_{4j} \text{sign}(v_j) + \\ & \lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) + \lambda_{3j}x_{4j}| \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_j = & \dot{z}_j - \dot{x}_{4j} = -\delta v_j - \mu \text{sign}(v_j) - \varepsilon v_j^{m_0} - \\ & |-\lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) - \lambda_{3j}x_{4j} \text{sign}(v_j) + \\ & \lambda_{1j}u_j - \lambda_{1j}u_j + \lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) + \lambda_{3j}x_{4j} - \dot{d}_j = \\ & -\delta v_j - \mu \text{sign}(v_j) - \varepsilon v_j^{m_0} - \\ & |-\lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) - \lambda_{3j}x_{4j} \text{sign}(v_j) + \\ & \lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) + \lambda_{3j}x_{4j} - \dot{d}_j| \end{aligned} \quad (8)$$

定理 1: 在满足假设 2 的条件下, 基于式(5)~(7)为双电机伺服系统(1)设计了一个有限时间扰动观测器, 以确保扰动估计误差的收敛性, 即扰动估计误差在短时间内收敛到接近 0 的任意小邻域。

证明: 考虑李雅普诺夫函数:

$$V_j = \frac{1}{2}v_j^2 \quad (9)$$

结合式(8)中得到的 \dot{v}_j 的表达式, \dot{V}_j 的计算

式为

$$\dot{V}_j = v_j \dot{v}_j =$$

$$v_j[-\delta v_j - \mu \text{sign}(v_j) - \varepsilon v_j^{m_0} - |-\lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) - \lambda_{3j}x_{4j} \text{sign}(v_j) + \lambda_{1j}u_j - \lambda_{1j}u_j + \lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) + \lambda_{3j}x_{4j} - d_j] \leq v_j[-\delta v_j - \mu \text{sign}(v_j) - \varepsilon v_j^{m_0} - d_j] \leq -\delta v_j^2 - \mu v_j \text{sign}(v_j) - \varepsilon v_j^{m_0+1} + |v_j| |d_j| \leq -\delta v_j^2 - \varepsilon v_j^{m_0+1} \leq -2\delta V_j - 2^{\frac{m_0+1}{2}} \varepsilon V_j^{\frac{m_0+1}{2}} \quad (10)$$

式中: u_j 为控制输入, 在下文中给出定义。

结合式(2)、(5)和(7), 可得:

$$\begin{aligned} \tilde{d}_j = \hat{d}_j - d_j = & -\delta v_j - \mu \text{sign}(v_j) - \varepsilon v_j^{m_0} - |-\lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) - \lambda_{3j}x_{4j} \text{sign}(v_j) + \lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) + \lambda_{3j}x_{4j} - d_j = \\ & -\delta v_j - \mu \text{sign}(v_j) - \varepsilon v_j^{m_0} - |-\lambda_{2j}(x_{3j} - x_1) - \lambda_{3j}x_{4j} \text{sign}(v_j) + \lambda_{1j}u_j - \dot{x}_{4j} = z_j - \dot{x}_{4j} = \dot{v}_j \end{aligned} \quad (11)$$

式中: \tilde{d}_j 为扰动观测器观测的扰动估计误差, 其有界可导, 表示为 $|\tilde{d}_j| < \sigma$, σ 为一个正常数, 是扰动估计误差的上限。

根据引理 1 和式(10), 可以得出本文所提扰动观测器在有限时间内是收敛的, 收敛时间为

$$T \leq \frac{1}{\alpha(1-\gamma)} \ln \left\{ \frac{\alpha V^{1-\lambda} [v_j(0)] + \lambda}{\lambda} \right\} \quad (12)$$

式中: $v_j(0)$ 为观测误差初值; $\alpha = 2\delta$, δ 主导观测器的指数收敛速率, 增大 δ 可缩短收敛时间上界, 并增强初始偏差的抑制能力; $\lambda = 2^{\frac{m_0+1}{2}} \varepsilon$, ε 决定观测器的终端吸引性能, 增大 ε 能加速观测误差在平

衡点邻域内的收敛; $\gamma = \frac{m_0+1}{2}$ 。

3 TSMC 设计

本文提出一种双电机伺服系统使用 TSMC 方法的跟踪控制方案。控制系统根据给定的参考信号与实际输出之间的误差, 构建终端滑模面 s_1 , 并以此为基础, 逐层构造出三个更高阶的滑模面 s_2, s_3 和 s_4 。其中, s_4 集成了滑模面 s_1, s_2, s_3 的信息, 并加入 v_1 和 v_2 的补偿项, 从而将系统的动态特性和同步误差信号纳入控制律中, 最终生成集成了抗扰动能力的综合控制信号。其控制框图如图 2 所示。

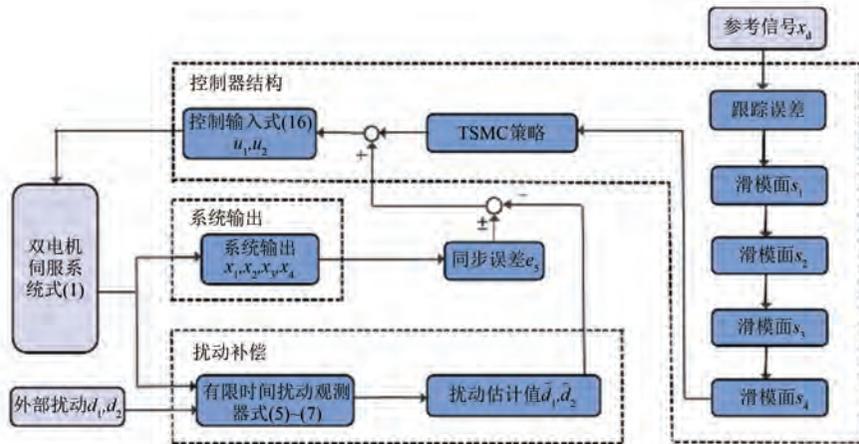


图 2 双电机伺服系统终端滑模跟踪控制框图

Fig. 2 Block diagram of terminal sliding mode tracking control for dual-motor servo system

为了研究终端滑模跟踪控制, 定义:

$$s_1 = x_1 - x_d \quad (13)$$

s_1 的导数为

$$\dot{s}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d \quad (14)$$

根据式(13)可以推断出双电机伺服系统式

(1) 的滑模面为

$$\begin{cases} s_2 = \dot{s}_1 + l_1 s_1 + \text{sig}^{m_1} s_1 \\ s_3 = \dot{s}_2 + l_2 s_2 + \text{sig}^{m_2} s_2 \\ s_4 = \dot{s}_3 + l_3 s_3 + \text{sig}^{m_3} s_3 + a_1(v_1 + v_2) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $l_i>0(i=1,2,3)$ 为调节系统状态的指数收敛速率; $1<m_i<2(i=1,2,3)$,其分数幂特性在状态接近平衡点时起主导作用; a_1, l_i 均为正参数; v_1, v_2

为扰动力矩观测。

基于有限时间扰动观测器的 TSMC 输入设计为

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{\lambda_{11}}(\lambda_{21}x_{31} - \lambda_{21}x_1 + \lambda_{31}x_{41} - \hat{d}_1) + \frac{1}{2a_1\lambda_{11}}[a_1a_2x_4 + (2a_1^2 - a_1a_2^2)x_3 - (4a_1a_2 - a_2^3)x_2 - \\ (4a_1^2 - 2a_1a_2^2)x_1 + x_d^{(4)} - \frac{d^3}{d^3t}(l_1s_1 + \text{sig}^{m_1}s_1) - \frac{d^2}{d^2t}(l_2s_2 + \text{sig}^{m_2}s_2) - \frac{d}{dt}(l_3s_3 + \text{sig}^{m_3}s_3) - k_1s_4 - \\ k_2\text{sign}(s_4) + k_s e_s + \gamma\text{sign}(e_s)] \\ u_2 = \frac{1}{\lambda_{12}}(\lambda_{22}x_{32} - \lambda_{22}x_1 + \lambda_{32}x_{42} - \hat{d}_2) + \frac{1}{2a_1\lambda_{12}}[a_1a_2x_4 + (2a_1^2 - a_1a_2^2)x_3 - (4a_1a_2 - a_2^3)x_2 - \\ (4a_1^2 - 2a_1a_2^2)x_1 + x_d^{(4)} - \frac{d^3}{d^3t}(l_1s_1 + \text{sig}^{m_1}s_1) - \frac{d^2}{d^2t}(l_2s_2 + \text{sig}^{m_2}s_2) - \frac{d}{dt}(l_3s_3 + \text{sig}^{m_3}s_3) - k_1s_4 - k_2 \\ \text{sign}(s_4) - k_s e_s - \gamma\text{sign}(e_s)] \end{cases} \quad (16)$$

式中: k_s 为正参数。

本文通过选择使用非线性趋近律 $\dot{s} = -k_1s_4 - k_2\text{sign}(s_4)$,利用非线性部分使其能够更快地接近滑动面。选择适当的 k_1 和 k_2 可以提高系统的稳定性,减少抖振并提高对外部扰动力矩的鲁棒性。式(16)中的同步反馈信号为 $(-1)^{j+1}k_s e_s + (-1)^{j+1}\gamma\text{sign}(e_s)$,旨在减少同步误差。通过引入符号切换项 $(-1)^{j+1}$,可以有效地调整动态特性,确保同步精度。

4 稳定性分析

定理 2:在 TSMC 输入和扰动观测器作用下,双电机伺服系统的跟踪误差将收敛至原点邻域,且所有闭环信号有界。

证明:在双电机伺服系统中,两个电机异步速度可能会导致跟踪精度降低、能耗增加及机械损坏。因此,总李雅普诺夫函数 V 还应包括速度同步误差,其设计为

$$V = \frac{1}{2}s_4^2 + \frac{1}{2}e_s^2 \quad (17)$$

对式(17)求导,可得:

$$\dot{V} = s_4\dot{s}_4 + e_s\dot{e}_s \quad (18)$$

对 s_4 求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{s}_4 = & a_1(\dot{x}_{41} + \dot{x}_{42}) - 2a_1(a_1x_3 - 2a_1x_1 - \\ & a_2x_2) - a_2[a_1x_4 - 2a_1x_2 - a_2(a_1x_3 - \\ & 2a_1x_1 - a_2x_2)] - x_d^{(4)} + \frac{d^3}{d^3t}(l_1s_1 + \end{aligned}$$

$$\text{sig}^{m_1}s_1) + \frac{d^2}{d^2t}(l_2s_2 + \text{sig}^{m_2}s_2) +$$

$$\frac{d}{dt}(l_3s_3 + \text{sig}^{m_3}s_3) + a_1(\dot{v}_1 + \dot{v}_2) =$$

$$\begin{aligned} & a_1\lambda_{11}u_1 - a_1\lambda_{21}x_{31} + a_1\lambda_{21}x_1 - \\ & a_1\lambda_{31}x_{41} + a_1d_1 + a_1\lambda_{12}u_2 - a_1\lambda_{22}x_{32} + \\ & a_1\lambda_{22}x_1 - a_1\lambda_{32}x_{42} + a_1d_2 - a_1a_2x_4 - \\ & (2a_1^2 - a_1a_2^2)x_3 + (4a_1a_2 - a_2^3)x_2 + \\ & (4a_1^2 - 2a_1a_2^2)x_1 - x_d^{(4)} + \frac{d^3}{d^3t}(l_1s_1 + \end{aligned}$$

$$\text{sig}^{m_1}s_1) + \frac{d^2}{d^2t}(l_2s_2 + \text{sig}^{m_2}s_2) +$$

$$\frac{d}{dt}(l_3s_3 + \text{sig}^{m_3}s_3) + a_1(\dot{v}_1 + \dot{v}_2) \quad (19)$$

将式(16)代入式(19),可得:

$$\begin{aligned} \dot{s}_4 = & -a_1\hat{d}_1 + a_1d_1 - a_1\hat{d}_2 + a_1d_2 + \\ & a_1(\dot{v}_1 + \dot{v}_2) - k_1s_4 - k_2\text{sign}(s_4) = \\ & -a_1(\hat{d}_1 - d_1) - a_1(\hat{d}_2 - d_2) + \\ & a_1(\dot{v}_1 + \dot{v}_2) - k_1s_4 - k_2\text{sign}(s_4) = \\ & -a_1\tilde{d}_1 - a_1\tilde{d}_2 + a_1(\dot{v}_1 + \dot{v}_2) - \\ & k_1s_4 - k_2\text{sign}(s_4) \end{aligned} \quad (20)$$

结合式(11),可得:

$$\begin{aligned} \dot{s}_4 = & -a_1\dot{v}_1 - a_1\dot{v}_2 + a_1(\dot{v}_1 + \dot{v}_2) - \\ & k_1s_4 - k_2\text{sign}(s_4) = -k_1s_4 - k_2\text{sign}(s_4) \end{aligned} \quad (21)$$

在式(16)中,同步误差 e_s 的计算式为

$$\begin{aligned} \dot{e}_s = & \dot{x}_{42} - \dot{x}_{41} = \\ & \lambda_{12}u_2 - \lambda_{22}(x_{32} - x_1) - \lambda_{32}x_{42} + d_2 - \end{aligned}$$

$\lambda_{11}u_1 + \lambda_{21}(x_{31} - x_1) + \lambda_{31}x_{41} - d_1$ (22)
将式(16)代入到式(22)中可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{e}_s &= d_2 - \hat{d}_2 - (d_1 - \hat{d}_1) + \frac{1}{2a_1}[-k_s e_s - \\ &\gamma \text{sign}(e_s)] - \frac{1}{2a_1}[k_s e_s + \gamma \text{sign}(e_s)] = \\ &-\hat{d}_2 + \hat{d}_1 - \frac{1}{a_1}[k_s e_s + \gamma \text{sign}(e_s)] \leq \\ &2\sigma - \frac{1}{a_1}[k_s e_s + \gamma \text{sign}(e_s)] \end{aligned} \quad (23)$$

令 $2\sigma = W_0$, W_0 为正常数。根据式(23)可得:

$$\begin{aligned} e_s \dot{e}_s &\leq -\frac{1}{a_1}k_s e_s^2 - \frac{1}{a_1}\gamma |e_s| + W_0 e_s \leq \\ &-\frac{1}{a_1}k_s e_s^2 - \frac{1}{a_1}\gamma |e_s| + \frac{1}{2}W_0^2 + \frac{1}{2}e_s^2 \end{aligned} \quad (24)$$

故 \dot{V} 为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_4 \dot{s}_4 + e_s \dot{e}_s \leq -k_1 s_4^2 - k_2 |s_4| - \\ &\left(\frac{1}{a_1}k_s - \frac{1}{2}\right)e_s^2 - \frac{1}{a_1}\gamma |e_s| + \frac{1}{2}W_0^2 \end{aligned} \quad (25)$$

综上,可知:

$$\dot{V} \leq -aV - bV^{\frac{1}{2}} + c^* \quad (26)$$

式中: $a = \min\left\{2k_1, 2\left(\frac{1}{a_1}k_s - \frac{1}{2}\right)\right\}$, $k_1 > 0, k_s > \frac{a_1}{2}$; $b = \min\left\{\sqrt{2}k_2, \sqrt{2}\frac{1}{a_1}\gamma\right\}$, $k_2 > 0, \gamma > 0$; $c^* = \frac{1}{2}W_0^2$ 。

根据引理 2 和式(26),所有闭环信号在有限时间内收敛到平衡点。

5 仿真分析

对图 1 所示的双电机伺服系统进行了两组仿真试验,以证明所提 TSMC 策略的有效性。积分滑模控制(Integral Sliding Mode Control, ISMC)可减小系统的稳态误差,提高控制性能^[27],广泛应用于工业控制中。通过仿真和试验对比分析了本文所提 TSMC 策略与 ISMC 策略在系统负载跟踪性能、轨迹跟踪误差及双电机同步误差的性能。

在仿真试验中,有限时间扰动观测器和 TSMC 设计参数如下: $m_0 = 1.5, m_1 = 1.8, m_2 = 1.6, m_3 = 1.6, l_1 = 50, l_2 = 100, l_3 = 160$ 。系统中其他参数的设计为: $k_1 = 15, k_2 = 20, k_s = 5.6, \gamma = 80, \delta = 0.03, \mu = 0.001, \varepsilon = 0.000 2$ 。选择干扰信号 $d_1 =$

$0.002\sin\left(\frac{\pi}{3}t\right), d_2 = 0.005\sin\left(\frac{\pi}{10}t\right) - 0.12$ 。本文所提 TSMC 策略两台电机的参数如表 1 所示。

对照方法 ISMC 的电机参数选取同表 1。ISMC 系统中设计参数如下: $l_1 = 1.7, l_2 = 20, l_3 = 110, k_1 = 95, k_2 = 150, k_s = 120, \gamma = 250$,其他参数与 TSMC 参数保持一致。此外,ISMC 控制系统采用相同的有限时间扰动观测器,以验证控制方案的有效性。

表 1 电机参数

Tab. 1 Motor parameters

参数名称	数值
电机 1、2 转动惯量 $J_{m1}, J_{m2}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	4, 4
电机 1、2 电磁力矩常数 $K_{T1}, K_{T2}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1})$	3.7, 2.3
刚度系数 $K_L/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	250
负载转动惯量 $J_L/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	12
负载摩擦系数 b_L	6.5
电机 1、2 摩擦系数 b_1, b_2	0.000 25, 0.000 24

首先,选择正弦期望信号 $x_d = 3\sin\left(\frac{\pi}{2}t\right)$ 进行仿真试验,结果如图 3 所示。将图 3 结果整理成表格,如表 2 所示。

由图 3(a)、(b)可知,开始时电机的位置和速度都出现了较大的波动,但能在短时间内恢复到稳定状态。图 3(c)展示了在相同期望信号下, TSMC 和 ISMC 的跟踪性能曲线。本文所提 TSMC 策略采用了高阶终端滑模面设计,构建了从 s_1 至 s_4 的级联滑模面结构,能够集成误差的高阶动态信息,具备超前调节能力,有效减小超调、加速收敛并提高稳态精度。结果表明,本文所提 TSMC 策略在跟踪性能上显著优于对比方法。

TSMC 和 ISMC 的跟踪误差曲线如图 3(d)所示。从图中可以看出,跟踪误差都会随着时间的推移收敛到 0 附近。本文所提 TSMS 策略的跟踪误差在 1.2 s 时收敛到 0 附近,稳态误差为 1.8×10^{-3} rad,比较方法的跟踪误差在 2.36 s 时收敛到 0 附近,稳态误差为 5.6×10^{-3} rad。本文所提 TSMS 策略的收敛时间和稳态误差均显著优于对比方法。

图 3(e)展示了 TSMC 和 ISMC 的转速同步误差曲线。本文设计了交叉耦合同步控制器,

能够产生补偿力矩,主动且持续地抑制速度差异,实现性能同步提升。由图 3(e)可知,所提 TSMC 策略同步误差在 0.23 s 时收敛到 0 附近,稳态误差为 3.8×10^{-3} rad/s;而 ISMC 同步误差在 0.10 s 时收敛到 0 附近,稳态误差为 $1.05 \times$

10^{-2} rad/s。ISM 因积分项具有更快的收敛速度,但导致了显著的超调;而 TSMC 虽收敛速率稍缓,却有效缓解了超调现象。本文所提方法在同步误差抑制和抖振削弱上均优于对比方法,综合性能更优。

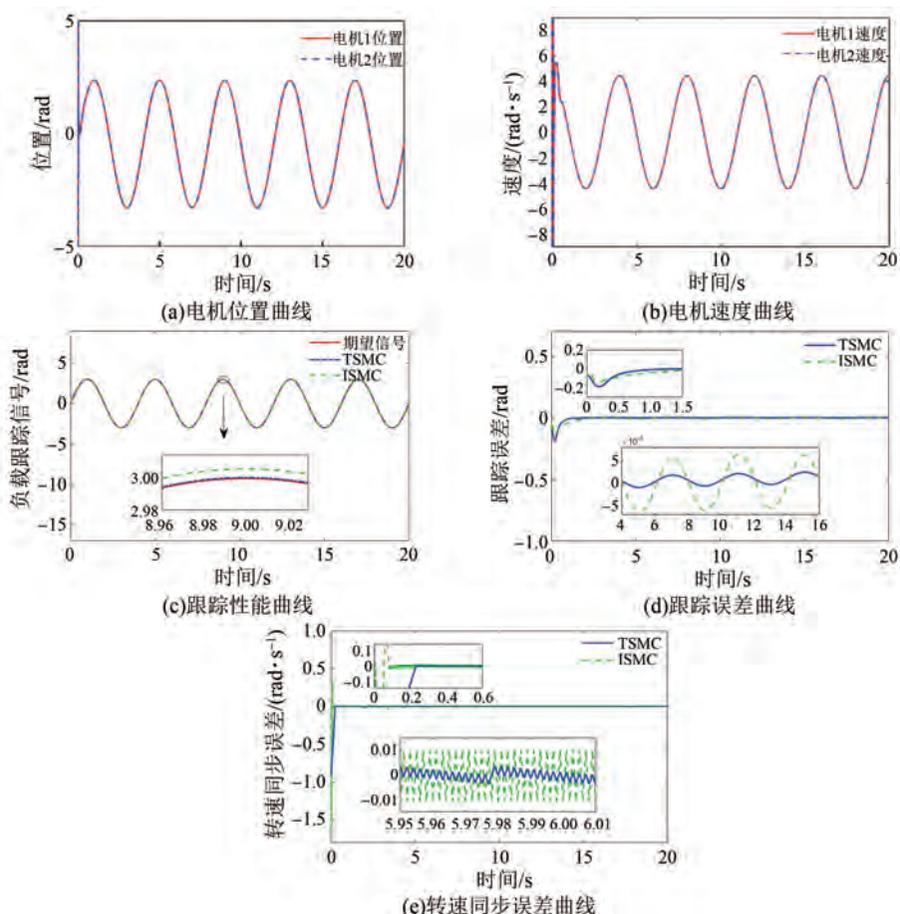


图 3 TSMC 和 ISMC 在正弦期望信号下的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of TSMC and ISMC under sinusoidal desired signal

表 2 正弦信号下仿真结果参数

Tab. 2 Simulation parameters under sinusoidal signal

性能指标	控制策略	收敛时间/s	稳态误差
跟踪误差	TSMC	1.20	1.8×10^{-3} /rad
	ISM	2.36	5.6×10^{-3} /rad
转速同步误差	TSMC	0.23	3.8×10^{-3} /(rad·s ⁻¹)
	ISM	0.10	1.05×10^{-2} /(rad·s ⁻¹)

选择斜坡期望信号 $x_d = t$, 仿真结果如图 4 所示。将图 4 结果整理成表格,如表 3 所示。

由图 4(a)、(b)可知,开始时电机位置与速度短暂波动,但迅速恢复平稳运行。由图 4(c)可知,在相同的斜坡期望信号下,本文所提

TSMC 策略较 ISMC 的跟踪性能更优。由图 4(d)可知,在 1.00 s 时,所提 TSMC 策略的跟踪误差收敛到 0 附近,稳态误差为 0.9×10^{-3} rad;在 2.30 s 时 ISMC 的跟踪误差收敛到 0 附近,稳态误差为 0.05 rad。由图 4(e)可知,在 0.27 s 时,所提 TSMC 策略的同步误差收敛到 0 附近,稳态误差为 2.8×10^{-3} rad/s;在 0.82 s 时,ISM 的同步误差收敛到 0 附近,稳态误差为 1.5×10^{-2} rad/s。综上,本文所提 TSMC 策略的跟踪性能更优。

仿真结果表明,本文所提基于有限时间扰动观测器的 TSMC 策略有效抑制了双电机伺服系统的外部扰动力矩。

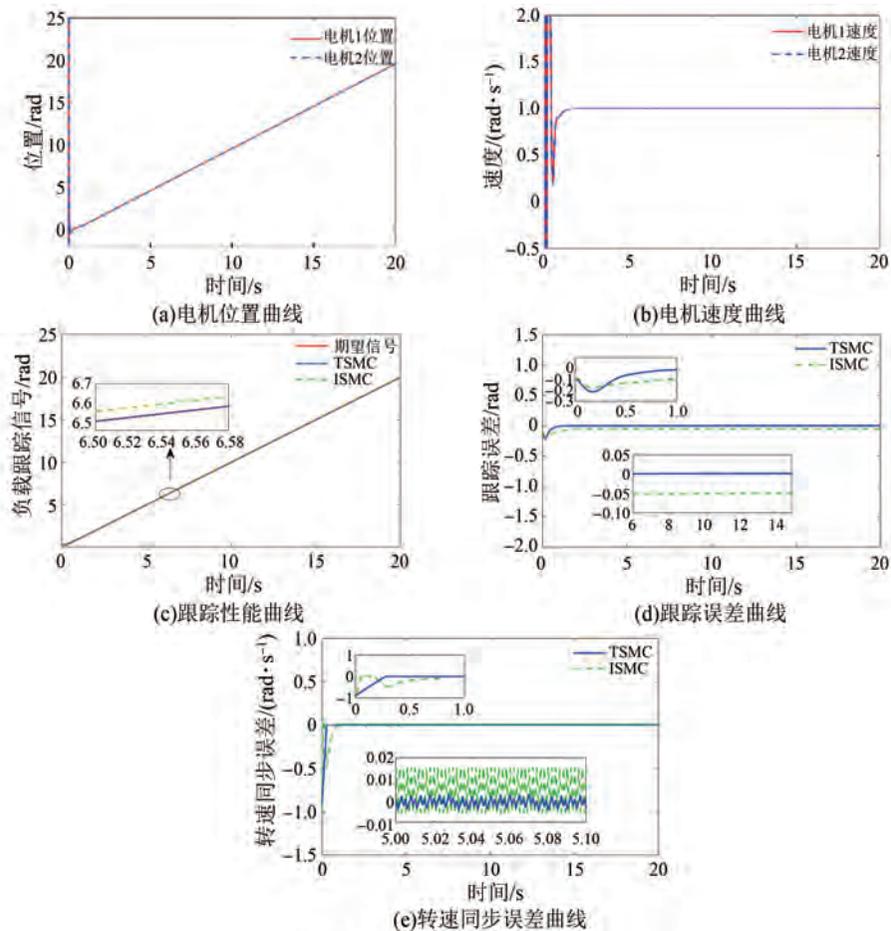


图 4 TSMC 和 ISMC 在斜坡期望信号下的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of TSMC and ISMC under ramp desired signal

表 3 斜坡信号下仿真结果参数

Tab. 3 Simulation parameters under ramp signal

性能指标	控制策略	收敛时间/s	稳态误差
跟踪误差	TSMC	1.00	$0.9 \times 10^{-3} / \text{rad}$
	ISMC	2.30	$0.05 / \text{rad}$
转速同步误差	TSMC	0.27	$2.8 \times 10^{-3} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
	ISMC	0.82	$1.5 \times 10^{-2} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$

6 结语

本文针对具有外部扰动的双电机伺服系统,提出了一种基于有限时间扰动观测器的 TSMC 策略。研究表明,所提 TSMC 控制器能够实现系统的高精度轨迹跟踪与有限时间稳定。通过引入同步误差反馈构成的交叉耦合同步机制,显著提升了双电机间的同步性能,避免了因速度不一致导致的额外能量损耗与运行风险。此外,基于电机侧独立设计的

有限时间扰动观测器实现了对扰动的快速精确估计,确保了估计误差在有限时间内收敛,从而增强了系统的动态响应速度与抗干扰能力。李雅普诺夫分析与仿真验证了所提方案的有效性。未来可研究参数自适应优化、实物验证及多电机协同扩展。

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

王郡进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写,王郡、岳国豪、李增豪及王保防参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, experiment, content

summary and paper writing were carried out by Wang Jun. The manuscript was revised by Wang Jun, Yue Guohao, Li Zenghao and Wang Baofang. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参 考 文 献

- [1] 阮磊, 胡亚山, 王吉平. 双三相永磁同步电机缺相故障特性分析[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(9): 957-970.
- Ruan L, Hu Y S, Wang J P. Fault characteristics analysis of dual three-phase permanent magnet synchronous motor with open phase [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(9): 957-970.
- [2] Xu K H, Liang W H, Zhao W Z, et al. Vehicle stability and synchronization control of dual-motor steer-by-wire system considering multiple uncertainties [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 3092-3104.
- [3] Sun L, Li X X, Chen L M, et al. Dual-motor coordination for high-quality servo with transmission backlash [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 1182-1196.
- [4] 辛洪敏, 蔡明洁, 王保防. 考虑未知惯量与不平衡力矩的四电机同步驱动伺服系统容错控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(6): 98-106.
- Xin H M, Cai M J, Wang B F. Four-motor synchronously driving servo system fault-tolerant control with unknown inertia and unbalanced torque [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(6): 98-106.
- [5] Wang Y T, Liu Y B, Sun W C. High-performance robust synchronous control of dual-drive gantry system via composite adaptive B-spline wavelet neural network [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 14679-14688.
- [6] Yu J P, Wang Q G, Wang G N, et al. Command filtered adaptive fuzzy control for induction motors with iron losses and stochastic disturbances via reduced-order observer [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023, 70(4): 1525-1529.
- [7] Tang Z H, Wang L P, Wang D, et al. Robust speed control of motor-driven servo systems via an adaptive disturbance rejection terminal sliding mode controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(12): 14425-14436.
- [8] Hou H Z, Yu X H, Xu L, et al. Finite-time continuous terminal sliding mode control of servo motor systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5647-5656.
- [9] 雷子奇, 赵朝会, 顾萍萍, 等. 基于自适应增益的永磁同步电机转速环无模型滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(12): 81-92.
- Lei Z Q, Zhao C H, Gu P P, et al. Model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor speed loop based on adaptive gain [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(12): 81-92.
- [10] Junejo A K, Xu W, Mu C X, 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.
- [11] 张智鑫, 刘旭东. 基于 ESO 的永磁同步电机伺服系统快速终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(7): 1233-1242.
- Zhang Z X, Liu X D. Fast terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motor servo system with ESO [J]. Control Theory and Application, 2023, 40(7): 1233-1242.
- [12] Teng Q F, Jin Y X, Li S Y, et al. GFTSM-based model predictive torque control for PMSM drive system with single phase current sensor [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1644-1655.
- [13] 姬娟娟, 崔彦良, 王开云. 异步电机自适应的快速滑模控制方法[J]. 控制与决策, 2025, 40(6): 1866-1872.
- Ji J J, Cui Y L, Wang K Y. Adaptive fast sliding mode control method for induction motors [J]. Control and Decision, 2025, 40(6): 1866-1872.
- [14] Rabiieh H, Ataiem M, Ekramianm M. Continuous nonsingular terminal sliding mode control based on adaptive sliding mode disturbance observer for uncertain nonlinear systems [J]. Automatica, 2019, 109: 108515.
- [15] 金宁治, 邢杰, 王令, 等. 基于非线性干扰观测器永磁同步电机逆变器扰动误差补偿的研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(6): 608-622.
- Jing N Z, Xing J, Wang L, et al. Research of

- inverter disturbance error compensation based on nonlinear disturbance observer for permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(6): 608-622.
- [16] 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, Liu 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.
- [17] Wang Y, Yu H T, Liu Y L. Speed-current single-loop control with over current protection for PMSM based on time-varying nonlinear disturbance observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(1): 179-189.
- [18] 刘小俊. 带全阶观测器的永磁同步电机电流滑模控制器研究[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(6): 690-699.
Liu X J. Research on current sliding mode controller with full-order observer for PMSM [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(6): 690-699.
- [19] Cui Y Y, Yin Z G, Luo P E, et al. Linear active disturbance rejection control of IPMSM based on quasi-proportional resonance and disturbance differential compensation linear extended state observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(10): 11910-11924.
- [20] Cao H Y, Deng Y T, Liu J, et al. Improved deadbeat predictive current control of PMSM drives with repetitive control-based disturbance correction observer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, 40(1): 801-812.
- [21] 高梓伦, 孙全增, 孔钰, 等. 基于超螺旋滑模观测器的双三相永磁同步电机鲁棒性模型预测控制算法[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(5): 562-571.
Gao Z L, Sun Q Z, Kong Y, et al. Robust model predictive control algorithms for dual three-phase permanent magnet synchronous motors based on super-twisting sliding mode observers [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(5): 562-571.
- [22] Xiong J X, Fu X H. Extended two-state observer-based speed control for PMSM with uncertainties of control input gain and lumped disturbance [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(6): 6172-6182.
- [23] 王芳, 杜雨欣, 周超. 高阶非线性不确定系统的复合有限时间控制[J]. *控制理论与应用*, 2025, 42(1): 209-215.
Wang F, Du Y X, Zhou C. Composite finite-time control for a high order nonlinear uncertain system [J]. *Control Theory and Applications*, 2025, 42(1): 209-215.
- [24] Man Z H, Yu X H. Terminal sliding mode control of MIMO linear systems [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1997, 44(11): 1065-1070.
- [25] Yu S H, Yu X H, Shirinzadeh B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode [J]. *Automatica*, 2005, 41: 1957-1964.
- [26] Li Y X. Finite time command filtered adaptive fault tolerant control for a class of uncertain nonlinear systems [J]. *Automatica*, 2019, 106: 117-123.
- [27] Jin C H, Wang B F, Cai M J. Integral sliding mode control based on command filtering backstepping for dual-motor servo systems with torque disturbance [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2023, 21(6): 1816-1827.

收稿日期:2025-10-14

收到修改稿日期:2025-12-04

作者简介:

王 郡(2000—),女,硕士研究生,研究方向为多电机伺服系统控制,17713155861@163.com;

*通信作者:王保防(1989—),男,博士,副教授,研究方向为伺服系统和非线性系统控制研究,baofangtc@163.com。