

# 永磁同步电机自适应非奇异快速终端滑模控制

主父冠峰, 王树波<sup>†</sup>

(青岛大学 自动化学院, 山东 青岛 266071; 青岛大学 山东省工业控制技术重点实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 本文针对含LuGre摩擦模型的永磁同步电机系统中参数未知问题, 提出了一种新颖的基于参数估计误差信息的自适应非奇异快速终端滑模控制方法, 以保证参数估计误差和跟踪误差同时收敛. 为了估计系统的未知参数, 通过引入辅助滤波器来提取参数估计误差信息, 然后将参数估计误差信息嵌入到自适应律设计中, 实现对系统未知参数的估计. 为了提高永磁同步电机的跟踪精度, 提出了一种改进的滑模面, 并将设计的自适应律嵌入到滑模面中, 设计了自适应非奇异快速终端滑模控制器, 通过李雅普诺夫稳定性理论保证估计误差和跟踪误差的同时收敛. 最后, 通过对比仿真和实验验证了本文所提控制算法的有效性.

**关键词:** LuGre模型; 永磁同步电机; 自适应参数估计; 滑模控制

**引用格式:** 主父冠峰, 王树波. 永磁同步电机自适应非奇异快速终端滑模控制. 控制理论与应用, 2025, 42(4): 855 – 863

DOI: 10.7641/CTA.2023.30200

## Adaptive non-singular fast terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motor

ZHUFU Guan-feng, WANG Shu-bo<sup>†</sup>

(School of Automation, Qingdao University, Qingdao Shandong 266071, China;

Shandong Provincial Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdao University, Qingdao Shandong 266071, China)

**Abstract:** This paper proposes a novel adaptive non-singular fast terminal sliding mode control method based on parameter estimation error information for the unknown parameters of permanent magnet synchronous motor system with LuGre friction model to guarantee the parameter estimation error convergence and tracking error convergence simultaneously. For this purpose, an auxiliary filter is introduced to extract the error information of parameter estimation. Then the error information of parameter estimation is used to drive adaptive law design to realize the estimation of unknown parameters of the system. In order to improve the tracking accuracy of permanent magnet synchronous motor, an improved non-singular fast terminal sliding mode surface is proposed. Then the new adaptation is incorporated into an improved non-singular fast terminal sliding mode surface to design controller. Then, using the Lyapunov stability analysis to ensure the convergence of estimation error and tracking error simultaneously. Finally, the effectiveness of the developed method is validated by using the comparative simulations and experiments.

**Key words:** LuGre model; permanent magnet synchronous motor; adaptive parameter estimation; sliding mode control

**Citation:** ZHUFU Guanfeng, WANG Shubo. Adaptive non-singular fast terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motor. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(4): 855 – 863

## 1 引言

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 以其结构简单、可靠性高等优点, 在工业过程中得到了广泛应用<sup>[1–3]</sup>. 然而, 这些系统中存在未知动态, 例如摩擦、系统不确定性和外部干扰等, 降低了永磁同步电机的控制性能. 其中, 摩擦是降低电

机性能的主要因素<sup>[4–5]</sup>, 它能够导致明显的稳态跟踪误差、极限环振荡, 从而导致控制系统的不稳定. 为了解决这些问题, 研究人员提出了多种先进的控制算法, 如自适应控制<sup>[6]</sup>、鲁棒控制<sup>[7]</sup>、模糊控制<sup>[8]</sup>、滑模控制 (sliding mode control, SMC)<sup>[9–10]</sup> 和神经网络控制<sup>[11]</sup>等. 在上述的控制策略中, 基于摩擦模型的自适

收稿日期: 2023–04–09; 录用日期: 2023–12–27.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: wangshubo1130@126.com. Tel.: +86 15263058086.

本文责任编辑: 徐胜元.

国家自然科学基金项目(62173194), 山东省优秀青年基金项目(ZR2021YQ41)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62173194) and the National Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2021YQ41).

应摩擦补偿技术能够保持稳定性的同时消除系统中的大部分摩擦,被广泛的用于PMSM的控制中。

然而,为了将自适应摩擦补偿技术运用到永磁同步电机控制中,需要一个完整的摩擦模型以及对应的参数识别方案。在摩擦模型中,LuGre模型能够模拟大多数摩擦行为,包括Stribeck效应、滞后和变化的分离力等<sup>[12]</sup>。但是,使用LuGre模型进行自适应控制设计的困难在于LuGre模型内摩擦状态不可测量,而且刷毛刚度、阻尼和粘性摩擦分量( $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ )是未知的。所以如何估计内摩擦状态和模型中的未知参数是使用LuGre模型需要解决的问题。LuGre模型的内摩擦状态,通常可以通过设计一个状态观测器来得到<sup>[15, 13]</sup>,而摩擦系数可以通过自适应参数估计设计得到。现在自适应律很多是基于梯度下降算法实现的,根据系统的观测误差或者跟踪误差来设计,从而造成了参数收敛速度慢,并且当系统受到干扰时,估计参数不能收敛到其真值。在文献[14-17]中,引入了一种新的通过滤波器来提取的估计误差设计自适应律的方法,避免了广泛的使用观测器的同时,保证了估计误差收敛。本文设计了一种新颖的参数自适应律来估计系统的未知参数,并将其用于控制器设计。

另一方面,从永磁同步电机跟踪控制设计的角度来看,滑模控制已被证明是抑制未知有界扰动的有效方法<sup>[18-19]</sup>。文献[20]提出了一种非奇异终端滑模控制(non-singular terminal SMC, NTSMC)方法,该方法具有非奇异性、强鲁棒性、瞬态误差小等优点。而非奇异快速终端滑模控制(non-singular fast terminal SMC, NFTSMC)方法<sup>[21]</sup>相比于传统的NTSMC方法,在保留NTSMC方法优点的同时改善了动态响应能力。同时为了平衡收敛速度和抖动,许多新的趋近律被运用到控制器设计中,一种无开关型趋近律<sup>[22]</sup>提高了受控系统的鲁棒性;而改进的指数趋近律<sup>[23]</sup>可以减少SMC的抖振,改善谐波失真的总体特性。所以可以通过使用新的滑模面设计,进一步修改了NFTSMC,保留NFTSMC的优势的同时提供更快收敛速度和更小的抖振。然而,当NFTSMC与具有经典自适应律的自适应控制相结合来实现永磁同步电机的跟踪控制时,无法保证估计参数的收敛。

受上述讨论的启发,本文针对LuGre摩擦模型的永磁同步电机系统中参数未知的问题,提出了一种新的自适应参数估计方法,并将其与改进的非奇异快速终端滑模控制相结合,以保证估计误差和跟踪误差的同时收敛,提高了受控系统的鲁棒性。首先引入了一个辅助滤波器来提取估计误差,然后运用估计误差构造的自适应律。将设计的自适应律与改进非奇异快速终端滑模面结合设计控制器,更新参数自适应律,保证估计误差和跟踪误差的同时收敛。相对于传统的控制方法,本文提出的方法避免了传统TSMC方法中潜在的奇点问题,通过稳定性分析保证参数估计误差和

跟踪误差的同时收敛。最后,通过对比仿真和实验验证了所开发方法的有效性。

本文的结构安排如下:LuGre摩擦模型的永磁同步电机模型如第2节所示,在第3节中给出自适应参数估计方法,第4节介绍了改进NFTSMC控制设计,第5节提供了仿真验证,第6节提供了实验验证,总结在第7节给出。

## 2 LuGre摩擦模型的永磁同步电机模型

将电机的转子坐标轴作为参考坐标,那么表贴式永磁同步电机的数学模型可以描述为

$$\begin{cases} \dot{i}_d = -\frac{Ri_d}{L_d} + n_p\omega i_q + \frac{u_d}{L_d}, \\ \dot{i}_q = -\frac{Ri_q}{L_q} - n_p\omega i_d - \frac{n_p\omega\psi_f}{L_q} + \frac{u_q}{L_q}, \\ J\dot{\omega} = \frac{3}{2}n_p\psi_f i_q - T_L - f, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_d, i_q$ 分别为d轴和q轴的电流; $u_d, u_q$ 分别为d轴和q轴的电压; $R$ 为定子电阻; $L_d, L_q$ 分别为d轴和q轴的电感且满足 $L_d = L_q = L$ ;  $\psi_f$ 为永磁体产生的磁链; $n_p$ 为永磁同步电机的极对数; $\omega$ 为电机机械转子角速度; $T_L$ 为负载转矩; $J$ 为转动惯量; $f$ 为摩擦力。

为了更加真实的描述摩擦的性质和进行摩擦非线性分析,非线性摩擦可用Lugre模型表示为

$$\begin{cases} \dot{z} = \omega - \sigma_0 \frac{|z|}{g(\omega)} z, \\ g(\omega) = F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2}, \end{cases} \quad (2)$$

其中: $z$ 表示平均相对刷毛偏转为不可测量的内摩擦状态; $g(\omega)$ 为Stribeck摩擦效应; $F_c$ 和 $F_s$ 分别代表库仑摩擦力和最大静摩擦力; $\omega_s$ 是Stribeck速度; $f$ 为摩擦力矩; $\sigma_0$ 和 $\sigma_1$ 是刷毛刚度和平均刷毛微阻尼系数; $\sigma_2$ 为粘性摩擦系数。

本文采用文献[5]中的滑模观测器来估计未知摩擦状态 $z$ 。

为了构造滑模观测器,定义跟踪误差

$$\begin{cases} e_1 = x_d - x_2, \\ e_2 = \dot{x}_d - \dot{x}_2, \end{cases} \quad (3)$$

其中: $x_d$ 为期望轨迹, $x_2 = \omega$ 为电机机械转子角速度。

构造滑模面

$$s_z = e_1 + c \int e_1 d\tau, \quad (4)$$

其中 $c$ 是正常数,即 $c > 0$ 。

$$\dot{\hat{z}} = \omega - \frac{|z|}{g(\omega)} \hat{z} - \mu_0 \text{sgn} s_z. \quad (5)$$

由式(2)(5)可得滑模观测器误差 $\tilde{z}$ 的方程为

$$\dot{\tilde{z}} = \dot{\hat{z}} - \dot{z} = -\frac{|z|}{g(\omega)} \tilde{z} - \mu_0 \text{sgn} s_z. \quad (6)$$

**定理 1** 对于受到摩擦(2)影响的永磁同步电机系统(1), 可以使用滑模观测器(5)估计内摩擦状态 $z$ , 并且其估计值 $\hat{z}$ 是有界的.

**证** 选取Lyapunov函数 $V = \frac{1}{2}\tilde{z}^2$ , 求导得

$$\dot{V} = \tilde{z}\dot{\tilde{z}} = \tilde{z}(\dot{\hat{z}} - \dot{z}) = -\frac{|\omega|}{g(\omega)}\tilde{z}^2 - \mu_0 \operatorname{sgn} s_z \tilde{z}. \quad (7)$$

选取合适的常数 $\mu_0$ , 使 $\mu_0 < \left| \frac{|\omega|}{g(\omega)} \tilde{z} \right|$ , 则 $\dot{V} < 0$ , 估计误差 $\tilde{z} = \hat{z} - z$ 趋近于零.

考虑式(2)中, 内摩擦状态 $z$ 由有界速度 $\omega$ 和有界非零函数 $g(\omega)$ 组成, 则 $z$ 有界. 由式(6)-(7)可知 $\tilde{z} = \hat{z} - z$ 是有界的. 由于内摩擦状态 $z$ 和观测误差 $\tilde{z}$ 是有界的, 可知 $\hat{z}$ 是有界的. 同理, 由式(5)中所有分量都有界可知 $\dot{\hat{z}}$ 也是有界. 证毕.

由式(1)-(6), 系统动力学公式可以写成

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega, \\ J\dot{\omega} = \frac{3}{2}n_p\psi_f i_q - T_L - \sigma_0 \hat{z} - \sigma_1 \dot{\hat{z}} - \sigma_2 \omega. \end{cases} \quad (8)$$

选取状态变量 $[x_1 \ x_2] = [\theta \ \omega]$ 和 $u = i_q$ , 则模型重写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = bu - \alpha_1 x_2 - \alpha_2 \hat{z} - \alpha_3 \dot{\hat{z}} + d, \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $\alpha_1 = -\frac{\sigma_2}{J}$ ,  $\alpha_2 = -\frac{\sigma_0}{J}$ ,  $\alpha_3 = -\frac{\sigma_1}{J}$ ,  $d = -\frac{T_L}{J}$ ,  $b = \frac{3n_p\psi_f}{2J}$ ,  $x_1 = \theta$ 是电机机械转子角位置,  $x_2 = \omega$ 为电机机械转子角速度.

为了之后的分析, 总结出以下假设:

**假设 1** 系统(9)的状态 $[x_1 \ x_2] = [\theta \ \omega]$ , 输入 $u$ ,  $\hat{z}$ ,  $\dot{\hat{z}}$ ,  $d$ 都是可测量和有界的.

**假设 2** 未知参数 $\alpha_i$ 和它的时间导数 $\dot{\alpha}_i$ ,  $i=1, 2, 3$ 是有界的.

### 3 自适应参数估计

本节提出了一种新的参数自适应估计律来估计系统未知参数.

为了便于自适应律的设计, 对 $x_2$ ,  $u$ 和 $\hat{z}$ 进行滤波得到 $x_{2f}$ ,  $u_f$ 和 $\hat{z}_f$ , 即

$$\begin{cases} k\dot{x}_{2f} + x_{2f} = x_2, & x_{2f}(0) = 0, \\ k\dot{u}_f + u_f = u, & u_f(0) = 0, \\ k\dot{\hat{z}}_f + \hat{z}_f = \hat{z}, & \hat{z}_f(0) = 0, \end{cases} \quad (10)$$

其中 $k > 0$ 为滤波常数.

由式(9)-(10)以及运用交换引理在 $\frac{1}{ks+1} \times (-\alpha_1 x_2 - \alpha_2 \hat{z} - \alpha_3 \dot{\hat{z}})$ 上可得

$$\dot{x}_{2f} = bu_f + (-\alpha_1 x_{2f} - \alpha_2 \hat{z}_f - \alpha_3 \dot{\hat{z}}_f) +$$

$$\frac{k}{ks+1}(-\dot{\alpha}_1 x_{2f} - \dot{\alpha}_2 \hat{z}_f - \dot{\alpha}_3 \dot{\hat{z}}_f) + d, \quad (11)$$

取

$$\alpha_4 = \frac{k}{ks+1}(\dot{\alpha}_1 x_{2f} + \dot{\alpha}_2 \hat{z}_f + \dot{\alpha}_3 \dot{\hat{z}}_f). \quad (12)$$

为了便于自适应律的设计由式(9)-(12), 系统模型可以改写成

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_{2f} = bu_f + \Phi_f \alpha + d, \end{cases} \quad (13)$$

则 $\alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4]^T$ ,  $\Phi_f = [-x_{2f} \ -\hat{z}_f \ -\dot{\hat{z}}_f \ -1]$ . 由假设1和假设2可知 $\Phi_f$ ,  $\alpha$ ,  $\dot{\alpha}$ ,  $d$ 是有界的, 即可知 $\|\dot{\alpha}\| \leq \varpi$ ,  $\|\Phi_f\| \leq \eta$ ,  $\|d\| \leq \delta$ .

**注 1** 参数 $\alpha_4$ 是因为使用交换引理产生的. 因此, 滤波常数 $k$ 一般应设置的较小. 另一方面,  $k$ 定义了低通滤波器的带宽, 足够大才可以滤除高频分量, 同时最大限度地减少引入的延迟. 因此, 应设置合适的滤波器常数.

为了实现自适应参数估计, 设计中间变量

$$\begin{cases} \dot{P} = -lP + \Phi_f^T \Phi_f, & P(0) = 0, \\ \dot{Q} = -lQ + \Phi_f^T \left[ \frac{(x_2 - x_{2f})}{k} - bu_f \right], & Q(0) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

为了使用式(14)中 $P$ 设计自适应律, 需要分析该矩阵的正定性. 用 $\lambda_{\max}(\cdot)$ ,  $\lambda_{\min}(\cdot)$ 表示最大和最小矩阵特征值. 其中 $l > 0$ , 则上式的解为

$$\begin{cases} P = \int_0^t e^{-l(t-\tau)} \Phi_f^T(\tau) \Phi_f(\tau) d\tau, \\ Q = \int_0^t e^{-l(t-\tau)} \Phi_f^T \left[ \frac{x_2 - x_{2f}}{k} - bu_f \right] d\tau. \end{cases} \quad (15)$$

**引理 1** 如果回归矩阵 $\Phi$ 是持续激励(persistent excitation, PE)的(存在 $T > 0$ ,  $\varepsilon > 0$ ,  $\int_t^{t+T} \Phi_f^T(\tau) \Phi_f(\tau) d\tau > \varepsilon I$ ,  $\forall t \geq 0$ ), 则式(14)中定义的矩阵 $P$ 是正定的, 即存在正常数 $\vartheta$ ,  $\lambda_{\min}(P) > \vartheta > 0$ <sup>[15-16]</sup>.

定义中间变量 $W$ 和 $V$ 为

$$\begin{cases} W = P\hat{\alpha} - Q = -P\tilde{\alpha} + \chi, \\ V = \Phi_f^T(r) \Phi_f(r) \hat{\alpha} - \Phi_f^T(r) \left[ \frac{x_{2f} - x_2}{k} - bu_f \right] - \Phi_f^T(r) \Phi_f(r) \tilde{\alpha} + \Phi_f^T(\tau) d, \end{cases} \quad (16)$$

其中:  $\hat{\alpha}$ 是未知参数向量 $\alpha$ 的估计值,  $\tilde{\alpha} = \alpha - \hat{\alpha}$ 是参数估计误差,  $\chi = \int_0^t e^{-l(t-\tau)} (\Phi_f^T(\tau) d) d\tau$ 是残差且满足 $\|\chi\| \leq \frac{\|\Phi_f\| \|d\|}{l} = \frac{\eta\delta}{l}$ .

由式(10)-(16), 自适应律设计为

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma \left( \frac{P^T W}{\|W\|} + \gamma V \right), \quad (17)$$

其中:  $\Gamma > 0$ 为对角矩阵,  $\gamma > 0$ 是常数.



将式(22)代入式(21)得

$$\dot{s} = -k_1 s - k_2 |s|^\beta \tanh s - \frac{q_2}{\lambda_2 p_2} e_2^{1-\frac{p_2}{q_2}} \tilde{\alpha}^T \Phi_f, \quad (23)$$

然后, 将自适应参数估计纳入控制器设计时, 可以得到更新的自适应律

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma \left( \frac{P^T W}{\|W\|} + \gamma V + r \Phi_f s \right). \quad (24)$$

**定理3** 将使用自适应律(24)设计的控制器(22)代入到有未知参数 $\alpha$ 的系统(13)时, 参数误差与跟踪误差会收敛到一个小的紧集. 此外更进一步, 当选取合适的参数时, 参数误差与跟踪误差可以收敛到零. 为了得到 $\hat{\alpha}$ , 定义 $\hat{\alpha}(0) = 0$ .

**证** 选取 Lyapunov 函数  $V_2 = \frac{1}{2} s^2 + \tilde{\alpha}^T \frac{\Gamma^{-1}}{r} \tilde{\alpha}$ , 求得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \frac{1}{2} s \dot{s} + \tilde{\alpha}^T \frac{\Gamma^{-1}}{r} \dot{\tilde{\alpha}} = \\ & s \left( e_2 + \lambda_1 \frac{p_1}{q_1} e_1^{\frac{p_1}{q_1}-1} e_2 + \lambda_2 \frac{p_2}{q_2} e_2^{\frac{p_2}{q_2}-1} \dot{e}_2 \right) + \\ & \tilde{\alpha}^T \Gamma^{-1} (\dot{\alpha} - \dot{\hat{\alpha}}) = \\ & s \lambda_2 \frac{p_2}{q_2} e_2^{\frac{p_2}{q_2}-1} (-k_1 s - k_2 |s|^\beta \tanh s) + \\ & \tilde{\alpha}^T \frac{\Gamma^{-1}}{r} \left( \dot{\alpha} + \Gamma \left( \frac{P^T W}{\|W\|} + \gamma V + r \Phi_f s \right) - \right. \\ & \left. \tilde{\alpha}^T \Phi_f s \leq \right. \\ & \lambda_2 \frac{p_2}{q_2} e_2^{\frac{p_2}{q_2}-1} (-k_1 s^2 - k_2 |s|^\beta s \tanh s) - \\ & \left. \frac{\rho V_1 - v}{r} \leq -\kappa - \frac{\rho V_1 - v}{r}, \quad (25) \right. \end{aligned}$$

其中  $\kappa = \lambda_2 \frac{p_2}{q_2} e_2^{\frac{p_2}{q_2}-1} (k_1 s^2 + k_2 |s|^{\beta+1} \tanh s) \geq 0$ . 由定理2, 可知  $\frac{V_1}{r}$  收敛到一个小的紧集, 则  $V_2$  会收敛到一个小的紧集. 此外更进一步, 当选取合适的参数, 使  $\kappa + \frac{\rho V_1}{r} \geq \frac{v}{r}$  时,  $\dot{V}_2 \leq 0$ , 此时参数误差与跟踪误差都收敛到零. 证毕.

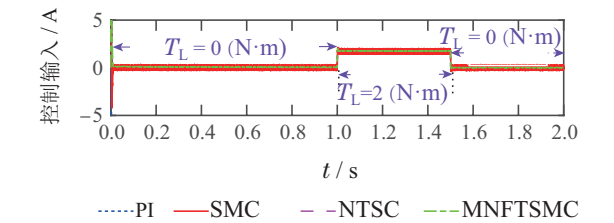
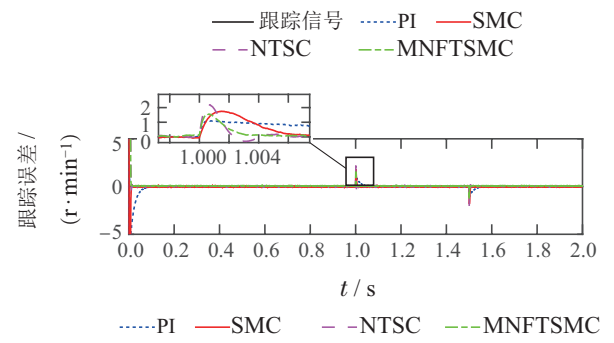
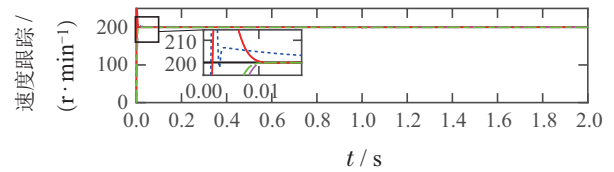
### 5 仿真验证

为了验证本文所提算法的有效性, 选择经典PI控制器、传统的积分滑模控制器、非奇异终端滑模控制器和基于参数估计的改进非奇异终端滑模控制器作比较.

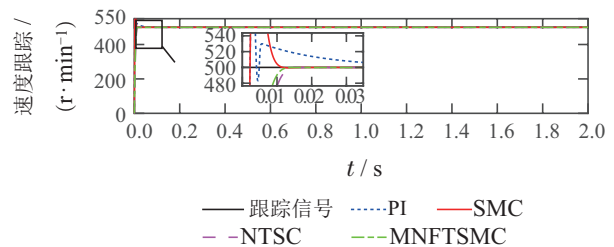
永磁同步电机仿真参数如下所示: 额定功率 1.5 kW; 转动惯量 ( $J$ ), 0.0027 kg·m<sup>2</sup>; 永磁磁通 ( $\psi_f$ ), 0.32 Wb; 定子电阻 ( $R$ ), 1.84 Ω; 转子电感 ( $L_q$ ), 6.65 mH; 定子电感 ( $L_d$ ), 6.65 mH; 磁极对数 ( $n_p$ ), 4. PI控制器, 比例增益  $k_p = 15$ , 积分增益  $k_i = 800$ ; 常规 SMC 采用线性趋近律  $\dot{s} = -k_0 s - \varepsilon_1 s$ , 其参数为  $\varepsilon_1 = 500$ ,  $k_0 = 1000$ ; 常规的 NTSMC 的参数为  $p =$

$7$ ,  $q = 5$ ,  $\lambda = 0.001$ ,  $\varepsilon_1 = 5000$ ,  $k_0 = 4\,200\,000$ ; 改进的 NFTSMC 的参数为  $p_1 = 71$ ,  $q_1 = 50$ ,  $p_2 = 35$ ,  $q_2 = 33$ ,  $\beta = 1.5$ ,  $\lambda_1 = 0.000\,1$ ,  $\lambda_2 = 0.000\,1$ ,  $k_1 = 40\,000$ ,  $k_2 = 2\,200\,000$ ,  $k = 0.01$ ,  $l = 500$ ,  $\Gamma = 0.05 \times \text{diag}\{50, 30, 0.2, 50\}$ .

图2给出了不同控制器在负载转矩  $T_L = 2\text{ N}\cdot\text{m}$  时, 分别以 200 r/min, 500 r/min 和 800 r/min 的速度启动时, 其速度跟踪性能、跟踪误差和控制输入的仿真结果. 通过改变负载验证控制器抗扰性能, 启动时电机转矩为 0 N·m, 运行到 1 s 时, 负载转矩突然增加到 2 N·m, 1.5 s 时, 增加的负载转矩被去除. 可以看出, 改进非奇异快速终端滑模控制器 (modified non-singular fast terminal sliding mode control, MNFTSMC) 和其他的控制器相比, 具有更好的动态响应和抗干扰性能, 电机受到扰动后速度的最大波动更小、恢复时间更短. 所以, 开发的 MNTSMC 方法具有更好的控制效果. 图3给出了  $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3, \hat{\alpha}_4$  的参数估计仿真结果. 从图3(a)中可以看出估计的参数收敛. 从图3(b)中可以看出, 当负载扭矩发生突然变化时, 估计的参数表现出振荡, 然后再收敛.



(a)  $\omega = 200\text{ r/min}$



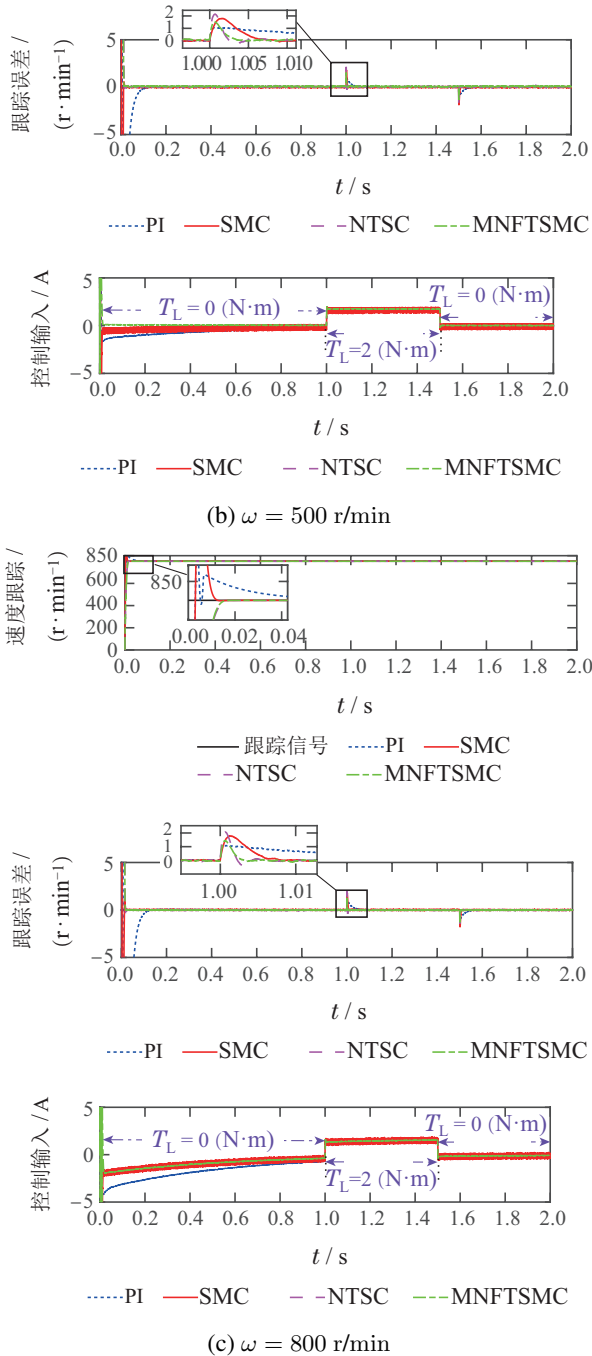
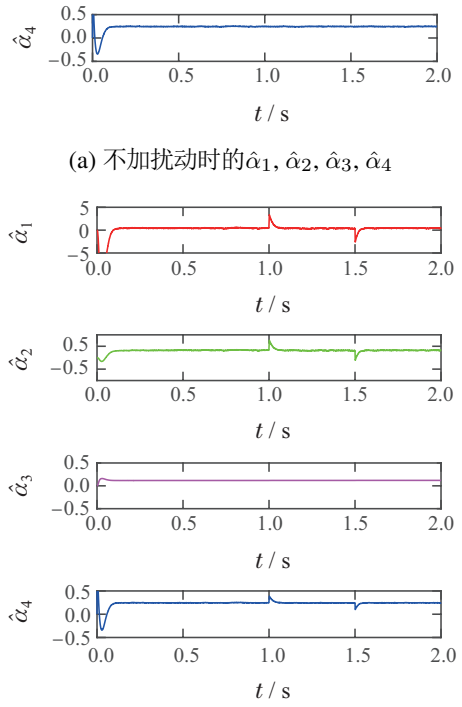
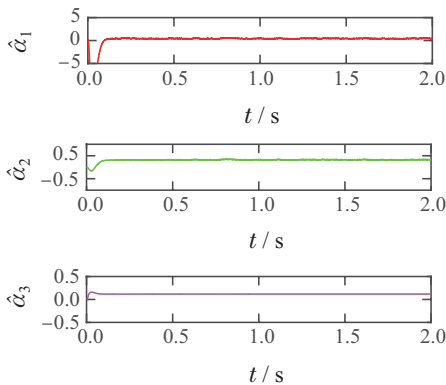


图2 4个控制器在不同期望轨迹下的速度响应

Fig. 2 Speed responses of the four controllers under the different desired trajectories



(a) 不加扰动时的 $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3, \hat{\alpha}_4$

(b) 加扰动时的 $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3, \hat{\alpha}_4$

图3 参数估计值

Fig. 3 Parameter estimates

## 6 实验验证

### 6.1 实验平台简介

为了验证设计的控制器的控制性能,使用永磁同步电机实验装置作为试验台(见图4).实验平台由伺服驱动器、永磁同步电机、电机控制模块、负载控制模块、实时模拟器和扭矩传感器组成.控制算法在LINKS-RT中实现,采样频率为10 KHz,相电流由霍尔效应装置测量并转换为数字信号.在实验中,负载的转动惯量可以通过增加额外的负载组件来调节.

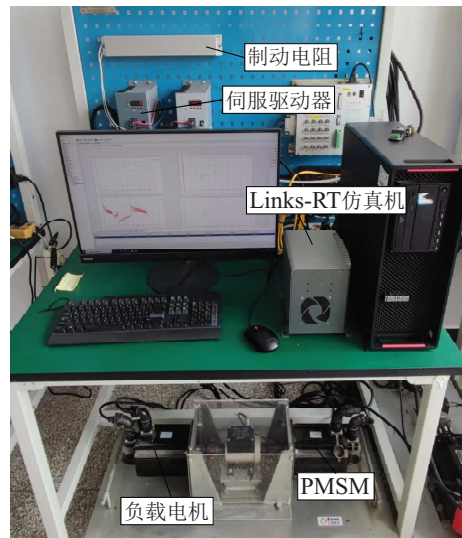


图4 永磁同步电机实验装置

Fig. 4 The experimental setup of permanent magnet synchronous motor

### 6.2 实验结果及分析

为了验证本文所提算法的有效性, 选择经典PI控制器、传统的积分滑模控制器、非奇异终端滑模控制器和基于参数估计的改进非奇异终端滑模控制器作比较. 永磁同步电机实验平台实际参数和仿真参数相同.

为了进行公平的比较, 电流回路中使用具有相同参数的PI调节器. PI控制器, 比例增益 $k_p = 0.04$ , 积分增益 $k_i = 0.5$ ; 常规SMC采用线性趋近律, 其中参数设置为 $\varepsilon_1 = 5, k_0 = 100$ ; 常规的NTSMC的参数选择为 $p = 7, q = 5, \lambda = 0.0004, \varepsilon_1 = 55, k_0 = 20$ ; 改进的NFTSMC的参数选择为 $p_1 = 71, q_1 = 51, p_2 = 35, q_2 = 33, \beta = 1.2, \lambda_1 = 0.001, \lambda_2 = 0.008, k_1 = 150, k_2 = 220, k = 0.01, l = 150, \Gamma = 0.005 \times \text{diag}\{83, 50, 10, 60\}$ .

图5给出了不同控制器在负载转矩 $T_L = 2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, 分别以 $200 \text{ r/min}, 500 \text{ r/min}$ 和 $800 \text{ r/min}$ 的速度启动时, 其速度跟踪性能、跟踪误差和控制输入的实验结果. 通过改变负载验证控制器抗扰性能, 启动时电机转矩为 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 运行到5s时, 负载转矩突然增加到 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 10s时, 增加的负载转矩被去除. 可以看出, MNFTSMC控制器和其他的控制器相比具有更好的动态响应和抗干扰性能, 电机受到扰动后速度的最大波动更小、恢复时间更短. 所以, 开发的MNTSMC方法具有更好的控制效果.

图6给出了 $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3, \hat{\alpha}_4$ 的参数估计的实验结果.

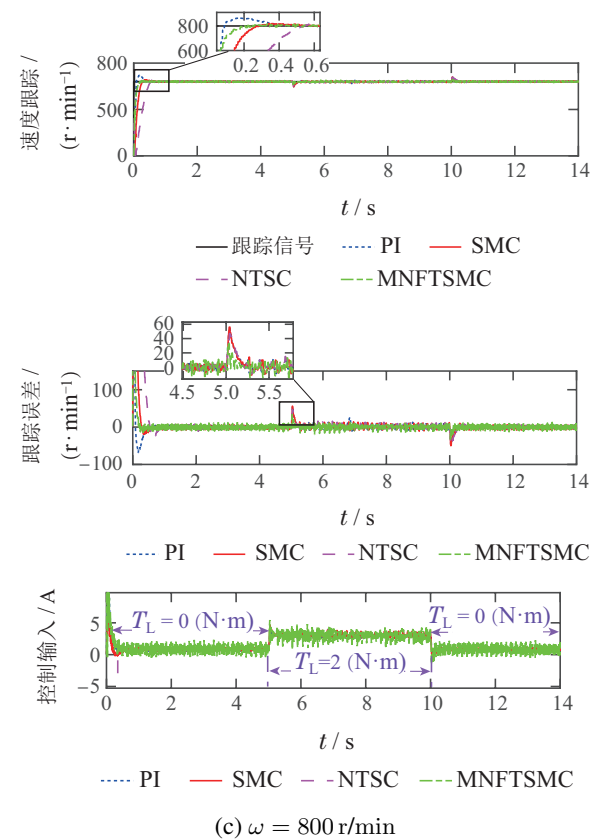
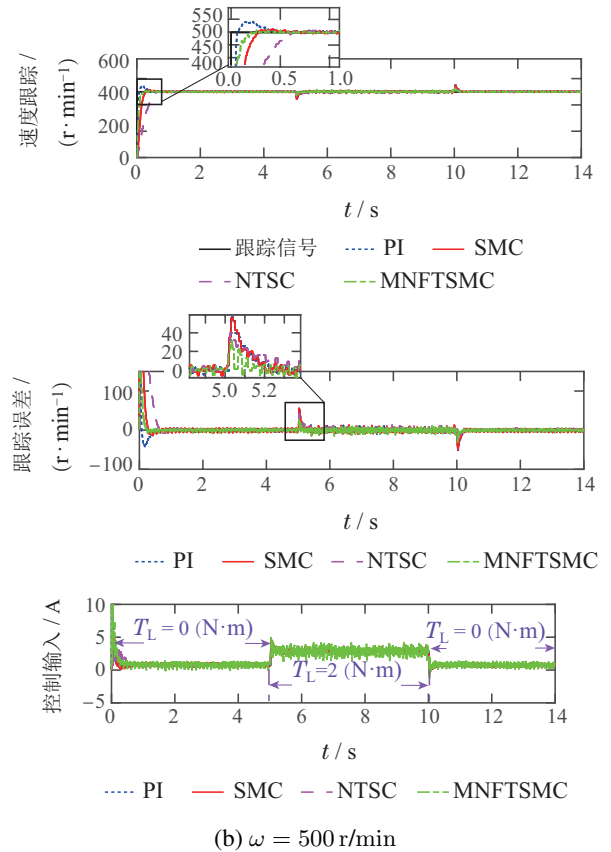
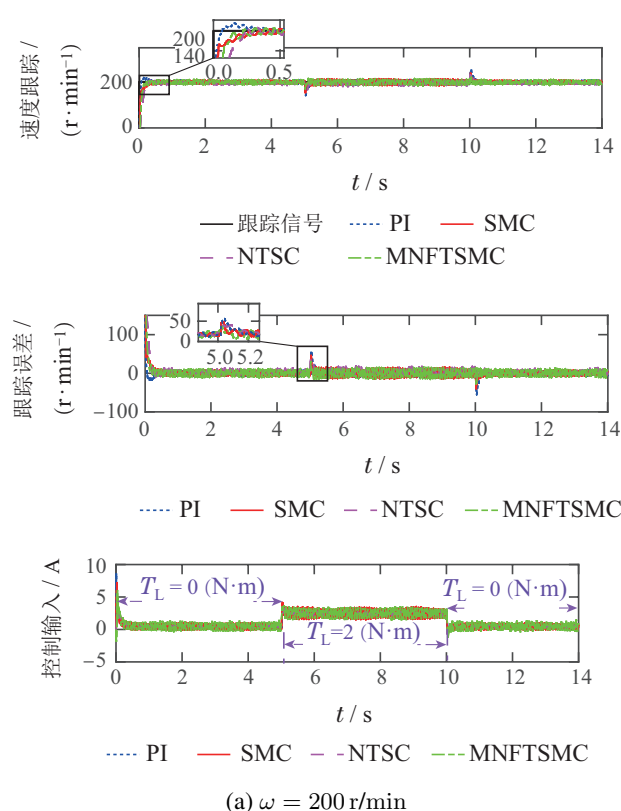


图5 4个控制器在不同期望轨迹下的速度响应

Fig. 5 Speed responses of the four controllers under the different desired trajectories

从图6(a)中可以看出, 估计的参数收敛到真实值.

从图6(b)中可以看出,当负载扭矩发生突然变化时,估计的参数表现出振荡,然后再次收敛。

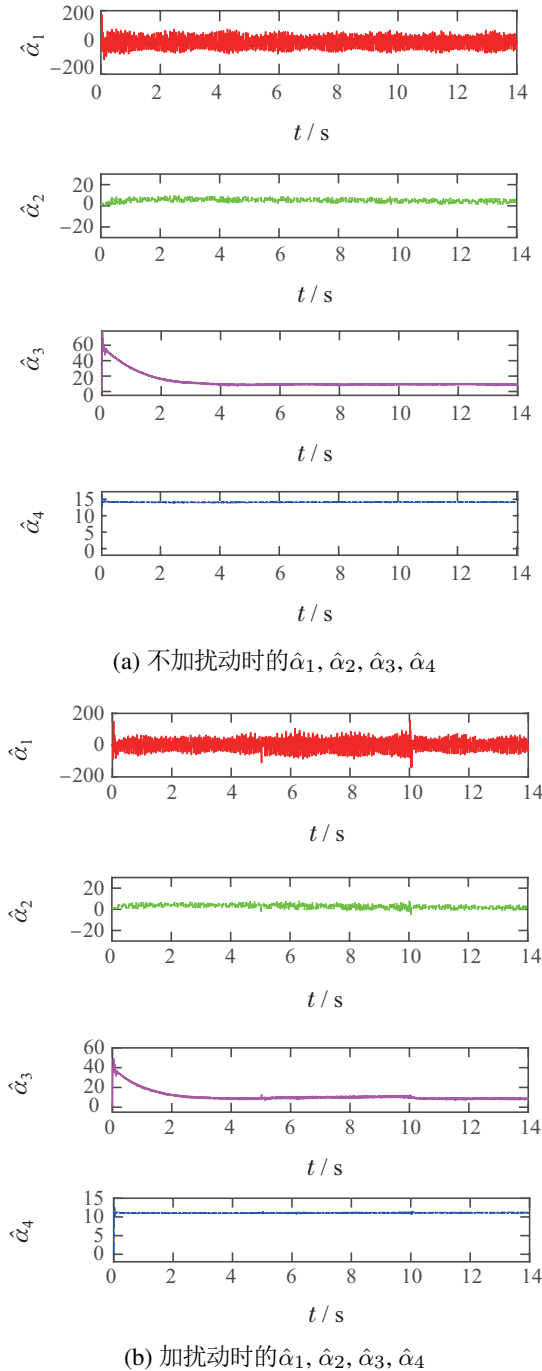


图6 参数估计值

Fig. 6 Parameter estimates

## 7 结论

本文针对LuGre摩擦模型的永磁同步电机系统中参数未知的问题,提出了一种新的自适应参数估计方法,并将其与改进的非奇异快速终端滑模控制相结合,以保证估计误差和跟踪误差的同时收敛.首先,运用了辅助滤波器变量来提取参数估计误差的信息;然后,构造提取估计误差推导的自适应律,并将其代入

LuGre摩擦模型的永磁同步电机系统中;之后,将设计的自适应律结合到永磁同步电机系统的改进非奇异快速终端滑模控制中,设计控制器并且更新参数自适应律,通过稳定性分析保证估计误差和跟踪误差的同时收敛.仿真和实验结果表明,所提出的方法可以获得优于传统的方法的参数估计效果和跟踪性能。

## 参考文献:

- [1] LIU H, LI S. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(2): 1171 – 1183.
- [2] NGUYEN A T, RAFAQ M S, CHOI H H, et al. A model reference adaptive control based speed controller for a surface-mounted permanent magnet synchronous motor drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(12): 9399 – 9409.
- [3] YAN Y, YANG J, SUN Z, et al. Robust speed regulation for pmsm servo system with multiple sources of disturbances via an augmented disturbance observer. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(2): 769 – 780.
- [4] KHAYATI K, BIGRAS P, DESSAINT L A. A multistage position/force control for constrained robotic systems with friction: Joint-space decomposition, linearization, and multiobjective observer/controller synthesis using lmi formalism. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(5): 1698 – 1712.
- [5] XIE W F. Sliding-mode-observer-based adaptive control for servo actuator with friction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(3): 1517 – 1527.
- [6] YANG X, YU J, WANG Q, et al. Adaptive fuzzy finite-time command filtered tracking control for permanent magnet synchronous motors. *Neurocomputing*, 2019, 337: 110 – 119.
- [7] ZHANG X, ZHANG L, ZHANG Y. Model predictive current control for pmsm drives with parameter robustness improvement. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(2): 1645 – 1657.
- [8] CHOI H H, JUNG J W. Discrete-time fuzzy speed regulator design for pm synchronous motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(2): 600 – 607.
- [9] DING S, MEI K, LI S. A new second-order sliding mode and its application to nonlinear constrained systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(6): 2545 – 2552.
- [10] LI S, ZHOU M, YU X. Design and implementation of terminal sliding mode control method for pmsm speed regulation system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(4): 1879 – 1891.
- [11] LIU L, LIU Y J, TONG S. Neural networks-based adaptive finite-time fault-tolerant control for a class of strict-feedback switched nonlinear systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 47(7): 2536 – 2545.
- [12] YAO J, DENG W, JIAO Z. Adaptive control of hydraulic actuators with lugre model-based friction compensation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(10): 6469 – 6477.
- [13] FENG H, YIN C, CAO D. Trajectory tracking of an electrohydraulic servo system with an new friction model-based compensation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(1): 473 – 482.
- [14] ADETOLA V, GUAY M. Finite-time parameter estimation in adaptive control of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(3): 807 – 811.
- [15] NA J, MAHYUDDIN M N, HERRMANN G, et al. Robust adaptive finite-time parameter estimation and control for robotic systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014, 25(16): 3045 – 3071.



- [16] NA J, YANG J, WU X, et al. Robust adaptive parameter estimation of sinusoidal signals. *Automatica*, 2015, 53: 376 – 384.
- [17] NA J, XING Y, COSTA-CASTELLÓ R. Adaptive estimation of time-varying parameters with application to roto-magnet plant. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(2): 731 – 741.
- [18] RATH J J, DEFOORT M, KARIMI H R, et al. Output feedback active suspension control with higher order terminal sliding mode. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(2): 1392 – 1403.
- [19] DING S, ZHENG W X, SUN J, et al. Second-order sliding-mode controller design and its implementation for buck converters. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(5): 1990 – 2000.
- [20] ZHAI J, XU G. A novel non-singular terminal sliding mode trajectory tracking control for robotic manipulators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(1): 391 – 395.
- [21] XU B, ZHANG L, JI W. Improved non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer for pmsm drives. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(4): 2753 – 2762.
- [22] BARTOSZEWICZ A, LESNIEWSKI P. New switching and non-switching type reaching laws for smc of discrete time systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(2): 670 – 677.
- [23] MOZAYAN S M, SAAD M, VAHEDI H, et al. Sliding mode control of pmsg wind turbine based on enhanced exponential reaching law. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10): 6148 – 6159.

#### 作者简介:

**主父冠峰** 硕士研究生, 目前研究方向为伺服系统驱动控制的研究, E-mail: 17806242185@163.com;

**王树波** 教授, 博士生导师, 从事伺服系统智能控制等研究, E-mail: wangshubo1130@126.com.