

PMSM新型非奇异快速终端滑模控制

郭昕¹, 曾聪颖¹, 曲锴¹, 彭昱^{2*}

¹湖南第一师范学院智能制造学院电气工程系, 湖南 长沙

²长沙理工大学电气与信息工程学院智能电网系, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年8月29日; 录用日期: 2025年9月19日; 发布日期: 2025年9月30日

摘要

为提高永磁同步电机(PMSM)调速系统的收敛速度、跟踪精度和抗干扰能力, 本文提出了一种基于双曲正切函数的改进型非奇异快速终端滑模控制方法(INFTSMC)。首先, 分析了现存滑模面存在的问题, 提出了基于双曲正切函数的新型终端滑模面。其次, 通过数学推导、理论分析, 证明了所提方法在跟踪精度和收敛速度上优于传统控制方法。最后, 设计了基于INFTSMC的PMSM速度控制器, 并搭建了仿真模型, 仿真结果表明, 并与现存方法进行对比, 所提的方法能够有效提高PMSM调速系统的跟踪精度、跟踪速度和降低超调。

关键词

永磁同步电机, 终端滑模控制, 速度控制器, 跟踪精度

Novel Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control for PMSM

Xin Guo¹, Congying Zeng¹, Kai Qu¹, Yu Peng^{2*}

¹Department of Electrical Engineering, School of Intelligent Manufacturing, Hunan First Normal University, Changsha Hunan

²Department of Smart Grid, School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

Received: August 29, 2025; accepted: September 19, 2025; published: September 30, 2025

Abstract

In order to improve the convergence speed, tracking accuracy and anti-interference ability of the

*通讯作者。

permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed control system, an improved nonsingular fast terminal sliding mode control method based on hyperbolic tangent function (INFTSMC) is proposed in this paper. Firstly, the existing problems of the sliding mode surface are analyzed, and a new terminal sliding mode surface based on the hyperbolic tangent function is proposed. Secondly, through mathematical derivation and theoretical analysis, it is proven that the proposed method is superior to the traditional control method in tracking accuracy and convergence speed. Finally, a PMSM speed controller based on INFTSMC is designed and a simulation model is built. The simulation results show that, compared with the existing methods, the proposed method can effectively improve the tracking accuracy, tracking speed and reduce overshoot of the PMSM speed control system.

Keywords

Permanent Magnet Synchronous Motor, Terminal Sliding Mode Control, Speed Controller, Tracking Accuracy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)因其良好的转矩性能、宽速度范围和快速动态响应而广泛应用于工业机器人、轨道交通、风力发电等工业领域[1]-[3]。在现有的控制策略中,经典的线性比例积分(PI)控制策略因其易于实现而被广泛应用于永磁同步电机控制系统。然而,永磁同步电机是一个非线性系统,传统的PI控制方法难以快速抑制干扰和限制参数变化的影响,从而保持满意的调速性能[4]-[6]。因此,有必要开发一种先进的控制方法来提高永磁同步电机的控制性能。

为提高PMSM调速系统控制性能,国内外学者提出了很多非线性控制方法,如鲁棒控制[7]、自适应控制[8]、模糊控制[9]、预测控制[10]、滑模控制(Sliding Mode Control, SMC) [11]等。其中滑模控制具有响应速度快、对模型参数变化不敏感、鲁棒性强等优点,在电机调速系统中得到了广泛的应用[11] [12]。滑模控制在永磁同步电机系统中有两种应用形式:一种是将滑模控制用于位置、速度、电流控制,另一种是以观测器的形式出现。文献[13]提出了一种提出一种双滑模变结构直接转矩控制方案,仿真结果表明该控制方法能够减少PMSM转矩脉动,对参数变化和外部干扰具有较强的鲁棒性。文献[14]提出了一种基于高阶滑模观测器的无差拍预测电流控制方法,所提方法有效地提高了永磁同步电机系统的动态性和抗干扰性。文献[3]在线性滑模面的基础上设计了一种新型滑模趋近律,该方法能够有效地削弱抖振并提升系统的收敛速度。文献[15]设计了一种基于滑模控制的弱磁调速控制策略。在额定转速以内时,设计了基于新型指数趋近律的转速滑模控制器;在弱磁扩速工况下,设计了一种二阶超螺旋算法。仿真结果表明所提方法能提升PMSM的响应速度,减少超调,增强系统抗负载扰动能力。上述方法均采用的是线性滑模控制(Linear Sliding Mode Control, LSMC),这种方法参数少、易实现,但只能保证受控输出渐进收敛。

针对该问题,文献[16]提出了一种终端滑模控制(Terminal Sliding Mode Control, TSMC)方法,该方法在保证收敛精度的同时能使状态变量在有限时间内收敛。然而,该方法存在奇异性问题。为解决上述问题,文献[17]提出了一种非奇异终端滑模控制(Nonsingular Terminal Sliding Mode Control, NTSMC),然而该方法收敛速度较慢。为了实现系统状态更快的收敛,研究人员提出了快速终端滑模控制(Fast Terminal

Sliding Mode Control, FTSMC)和非奇异快速终端滑模控制(Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control, NFTSMC), 并成功应用在电机控制中[18]-[20]。然而, 上述方法并未在理论上证明其具有较快的响应速度和稳态精度。

针对上述问题, 为了提高 PMSM 调速系统的响应速度和跟踪精度, 本文提出了一种基于双曲正切函数的改进型非奇异快速终端滑模控制(Improved Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control, INFTSMC)方法。所提控制方法结合了双曲正切函数和与幂函数, 理论上证明了该方法在收敛速度、跟踪精度上均优于传统线性滑模控制。仿真结果表明, 所提的控制方法有效改善了 PMSM 调速系统的动稳态性能。

2. 新型滑模面的提出

2.1. 现存问题

二阶非线性系统模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + b(x)u \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x = [x_1, x_2]^T$, 是系统状态变量; u 是系统输出信号, $f(x)$ 和 $b(x)$ 是系统连续函数。

传统的 LSMC 方法采用如下滑模面:

$$s_L = x_2 + cx_1 \quad (2)$$

式中 c 为任意正实数, 且 $c > 0$ 。

当 $s_L = 0$ 时, 对式(2)两侧求取积分, 可得收敛时间为

$$t_L = \frac{1}{c} \ln \frac{|x_0|}{|x(t_1)_0|} \quad (3)$$

方程(3)表明随着 $x(t_1)$ 的减小, 收敛时间 t_1 逐渐接近 0, 无法到达原点。结合式(1)、(2), 可得到基于 LSMC 的控制律为

$$u_L = -\frac{f(x) + cx_2 + k_1 \operatorname{sgn}(s_L)}{b(x)} \quad (4)$$

其中 k_1 为等速趋近律的系数。

根据 Lyapunov 函数 $V = 0.5s^2$, 并结合式(4)可得

$$\dot{V}_T \leq -k_1 |s_L| \quad (5)$$

方程(5)表明系统状态将在有限时间内收敛到零。

为解决上述问题, 传统 TSMC 方法采用如下滑模面:

$$s_T = x_2 + \alpha |x_1|^r \operatorname{sgn}(x_1) \quad (6)$$

式中 $r = q/p$, α , p 和 q 为任意正实数, 且 $0 < r < 1$, s 为滑模面。

当 $s_T = 0$ 时, 对式(6)两侧求取积分, 可得收敛时间

$$t_{TM} = \frac{1}{\alpha(1-r)} \left[|x_0|^{1-r} - |x(t_1)|^{1-r} \right] \quad (7)$$

通过式(7)分析可知, 增大 α 或减小 r 能够减少收敛时间。结合式(1)、(2), 可得到基于 TSMC 的控制律如下所示:

$$u_T = -\frac{f(x) + \alpha r |x_1|^{r-1} x_2 + k_1 \operatorname{sgn}(s_T)}{b(x)} \quad (8)$$

其中 k_1 为等速趋近律的系数。

根据 Lyapunov 函数 $V = 0.5s^2$ ，并结合式(8)可得

$$\dot{V}_T \leq -k_1 |s_T| \quad (9)$$

式(9)表明系统状态会在有限时间内收敛至零。然而，式(8)存在奇异项 $x_1^{r-1}x_2$ ，当状态变量趋于 0 时，该项会趋于无穷，这会增大系统状态变量的误差，一定程度上限制了 TSMC 在高精度伺服领域的发展。为解决奇异点问题，将 TSMC 中的 x_1 和 x_2 进行调换，得到一种非奇异终端滑模面：

$$s_N = x_1 + |x_2|^{1/r} \operatorname{sgn}(x_2)/\alpha \quad (10)$$

当 $s_N = 0$ 时，两侧积分后可求得收敛时间

$$t_N = \frac{\alpha^{1/r}}{1-1/r} \left[|x_0|^{1-1/r} - |x(t_1)|^{1-1/r} \right] \quad (11)$$

结合公式(1)和(10)，可得到基于 NTSMC 的控制律如下所示：

$$u_N = -\frac{f(x) + \alpha r |x_1|^{2-r} + k_1 \operatorname{sgn}(s_N)}{b(x)} \quad (12)$$

根据 Lyapunov 函数 $V = 0.5s^2$ ，并结合式(8)可得

$$\dot{V}_N \leq -\frac{k_1}{\alpha r} x_2^{1/r-1} |s_N| \quad (13)$$

式(12)中 $2-r > 0$ ，这表明奇异点已被消除。然而，当式(13)中 $x_2^{1/r-1}/ar < 1$ ，可以看出 NTSMC 的收敛时间比 TSMC 慢。这表明 NTSMC 消除奇异性是以牺牲收敛速率为代价的。

2.2. 提出及收敛性分析

针对上述滑模面的不足，本文提出了一种基于双曲正切函数和幂函数的非奇异快速终端滑模控制，其表达式如下所示

$$s_{TH} = x_2 + |x_1|^{1-\delta} \tanh(h|x_1|^\delta) \operatorname{sgn}(x_1) \quad (14)$$

其中 δ ， λ 和 h 为大于零的实数，且有 $0 < \delta < 1$ 。通过式(14)可以发现该方法与传统的终端滑模面相似，在原来的基础上引入了双曲正切函数和符号函数。该方法具有传统终端滑模的收敛速度且不存在奇异点。

定理 1: 一旦 $s_{TH} = 0$ ，系统(1)的状态误差函数将在一定时间内快速达到零点附近的邻域。可求得所提滑模面的收敛时间 t_l 如下所示

$$t_l = \int_{|x(t_1)|}^{|x_0|} \frac{1}{\lambda x_1^{1-\delta} \tanh(h|x_1|^\delta)} dx_1 = \frac{1}{\lambda h \delta} \ln \left(\frac{\sinh(h|x_0|^\delta)}{\sinh(h|x(t_1)|^\delta)} \right) \quad (15)$$

证明：当 $s_{TH} = 0$ ，式(15)可以改写为

$$x_2 + |x_1|^{1-\delta} \tanh(h|x_1|^\delta) \operatorname{sgn}(x_1) = 0 \quad (16)$$

选取李雅普诺夫函数 $V = 0.5x_1^2$ ，对 V 求导并将式(16)带入可得

$$\dot{V} = x_1 \dot{x}_1 = -\lambda |x_1|^{2-\delta} \tanh(h|x_1|^\delta) \leq 0 \quad (17)$$

由于不等式(17)成立, 标量函数 $V(x)$ 是径向无界的, 因此受控系统(1)是全局渐近稳定。当系统状态变量从 x_0 收敛到零附近的值 $x(t_1)$, 且有 $x(t_1) \neq 0$, 对式(12)两侧求取 $x_1 > 0$ 时积分, 可得

$$t_l = \int_{|x(t_1)|^\delta}^{|x_0|^\delta} \frac{1}{\lambda x_1^{1-\delta} \tanh(hx_1^\delta)} dx_1 = \frac{1}{\lambda h \delta} \ln \left(\frac{\sinh(hx_0^\delta)}{\sinh(hx(t_1)^\delta)} \right) \quad (18)$$

由于式(14)是奇函数, 所以应在式(18)中给状态变量加上绝对值, 即为其收敛时间。从式(18)分析可知, 所提的 NFTSM 能在有限时间内收敛到平衡点邻域附近。

本文所提的 NFTSM 有如下特点: 1) 相比于传统的 TSM、NTSM, 所提滑模面会使系统状态变量具有更快的收敛速度; 2) 所提滑模面具有更高的收敛精度。

2.3. NFTSM 收敛性分析

式(18)中存在对数函数, 这会使得系统状态变量无限接近于平衡点。为了进一步分析基于所提方法的收敛性能, 假设系统状态 x_1 的波动值足够小(即 $-0.0001 \leq x_1 \leq 0.0001$), 则认为 x_1 已经收敛至平衡点邻域附近。

图 1 为式(15)在 $s_{AT} = 0$ 且 $x > 0$ 时的收敛情况。将系统状态变量 x 的收敛过程分为 $[x_0, 1]$ 和 $[1, \tau]$ 两部分。令由 $x_0 \rightarrow 1$ 的时间为 T_1 , 由 $1 \rightarrow \tau$ 的时间为 T_2 。当 x 到达 B 点时认为系统已经收敛到平衡点邻域。通过上述分析可知

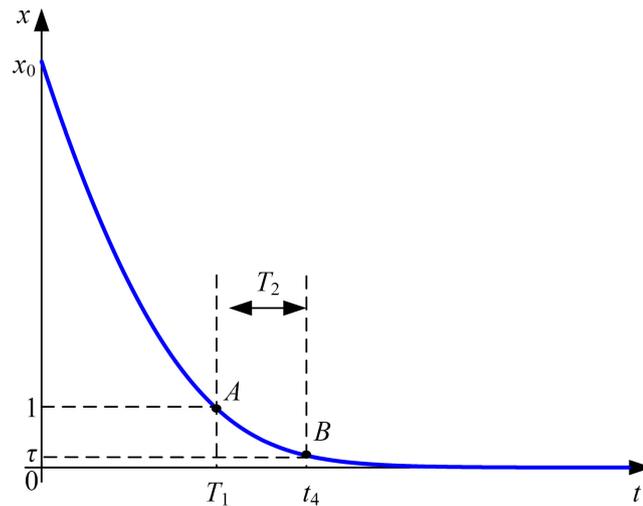


Figure 1. Convergence curve of Equation (18)

图 1. 式(18)的收敛曲线

$$T_1 = \frac{1}{\lambda h \delta} \ln \frac{\sinh(hx_0^\delta)}{\sinh(h)} \quad (19)$$

$$T_2 = \frac{1}{\lambda h \delta} \ln \frac{\sinh(h)}{\sinh(h\tau^\delta)} \quad (20)$$

结合式(19)和式(20)可得总的收敛时间

$$t_f = T_1 + T_2 = \frac{1}{\lambda h \delta} \ln \frac{\sinh(hx_0^\delta)}{\sinh(h\tau^\delta)} \quad (21)$$

同理可以求得 LSMC, TSMC 的收敛时间为

$$t_{LS} = \frac{1}{c} \ln \frac{x_0}{\tau} \quad (22)$$

$$t_{TMS} = \frac{1}{\alpha(1-r)} (x_0^{1-r} - \tau^{1-r}) \quad (23)$$

由于 TSM 和 NT 的参数一致, 下表仅比较 LSMC、TSMC 和 INFTSMC 假设控制参数 $c = \lambda = \alpha = 10$, $r = \delta = 0.4$, $h = 50$, 当 $x_0 = 50$ 时, 可求得 $s = 0$ 时, 各滑模面的收敛情况如表 1 所示。

Table 1. Comparison of convergence time and accuracy of three methods

表 1. 三种方法收敛时间及收敛精度对比

滑模面 $s = 0$	收敛精度			
	1×10^0	1×10^{-5}	1×10^{-15}	1×10^{-30}
LSMC	0.3912 s	1.5425 s	3.8451 s	7.2990 s
TSMC	1.5761 s	1.7426 s	1.7427 s	1.7427 s
INFTSMC	0.9454 s	1.1952 s	1.2415 s	1.3106 s

从上表 1 可以看出系统状态变量 x_0 从 50 收敛至 1 时, LSMC 方法最快, 而随着收敛精度的提升, 所提的 INFTSM 方法最快。这是因为当 $s = 0$ 时且 $x_0 > 1$ 时, LSMC 的斜率始终为常数, 而其他 TSMC 的斜率变化非常缓慢, 此时存在状态变量的初始值越大, 则 LSMC 的收敛时间越快; 当系统变量逐渐减少至小于 1 大于 0 时, 由于 LSMC 的斜率始终不变, TSMC 的斜率快速变化, 此时存在 LSMC 的收敛精度越高则其收敛时间逐渐越长, 而 TSMC 出现了相反的情况。小于 1 后, 所提 INFTSMC 方法斜率变化比 TSMC 更快, 因此, 收敛时间会更小。上述结果表明在一定收敛区间, 所提方法具有更快的收敛速度。

3. 基于 NNTSMC 的 PMSM 调速系统

3.1. PMSM 数学模型

建立同步旋转坐标系即 d - q 坐标系的 PMSM, 其数学模型如下:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (24)$$

$$T_e = 1.5 n_p i_q \psi_f \quad (25)$$

$$\dot{\omega} = \frac{n_p}{J} T_e - \frac{B}{J} \omega_e - \frac{n_p}{J} T_L \quad (26)$$

式中: u_d 和 i_d 分别代表 d 轴的电压和电流; u_q 和 i_q 分别代表 q 轴的电压和电流; R 为电机定子电阻, L_d 、 L_q 分别是 d 轴和 q 轴电感, 且 $L_d = L_q$; ψ_f 为电机永磁体磁链, ω_e 为电角速度, n_p 为电机极对数, J 为转动惯量; B 为阻尼系数; T_L 为负载转矩。

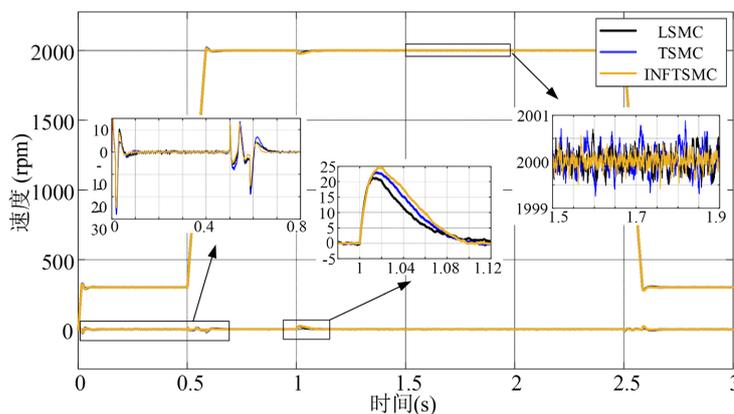
考虑参数变化的情况下, 永磁同步电动机的动态运动方程可以表示为:

续表

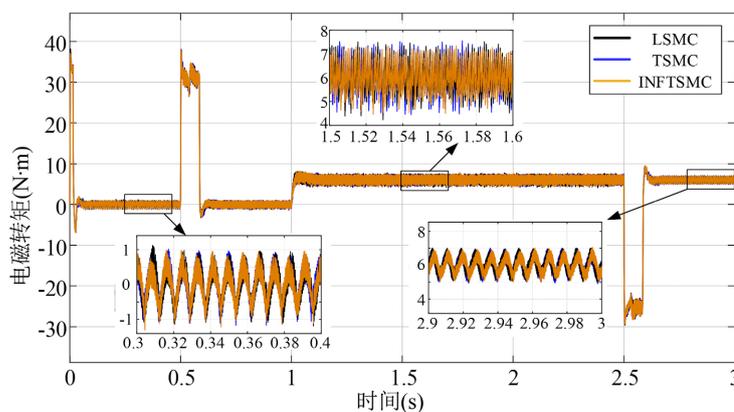
q 轴电感 L_q	6.4 mH	转子磁链 ψ	0.1213 Wb
极对数 p	4	转动惯量 J	0.01482 kg·m ²

为了证明所提控制方法的有效性,下文对 LSMC、TSMC、HTSMC 和 NNFTSMC 进行了仿真对比。四种控制方法的参数分别如下: 1) LSMC: $c=40$, $k_1=50$, $k_2=100$; 2) TSMC: $\alpha=40$, $k_1=50$, $k_2=100$, $r=0.6$; 3) INFTSMC: $\lambda=40$, $k_1=50$, $k_2=100$, $\delta=0.6$, $h=100$ 。上述参数中,是在多次仿真调试中选取的最优参数。其中, c , α 和 λ 参数与系统状态靠近平衡点时的收敛速度有关; k_2 与远离平衡点时的收敛速度有关; k_1 与系统抗干扰性能有关,较大会引发高频抖振; r 的增大会加速 TSMC 的收敛速度,但会降低抗干扰性能; δ 和 h 的增大会延长 INFTSMC 的收敛速度。

图 3 为跟踪斜坡速度下三种控制方式的性能对比图,负载在 1 s 时加载至 6 N·m,转速在 0.5 s 由 300 r/min 缓慢升至 2000 r/min, 3 给出了四种控制方式性能对比的具体数值。从图 3(a)可知在 300 r/min 和 2000 r/min 下,所提的 INFTSMC 方法的响应速度和跟踪精度均优于 TSMC 和 LSMC。结合表 3 可以算出所提的控制方法在 200 r/min 时的响应时间分别是 TSMC, LSMC 的 91.76% 和 60.02%; 在 2000 r/min 时的响应时间分别是 TSMC, LSMC 的 85.46% 和 70%; 稳态误差分别是 HTSMC, TSMC, LSMC 的 84.92% 和 95.53%。从由图 3(b)和表 3 中可以看出所提方法均具有较小的转矩脉动。



(a) 速度波形对比



(b) 电磁转矩波形对比

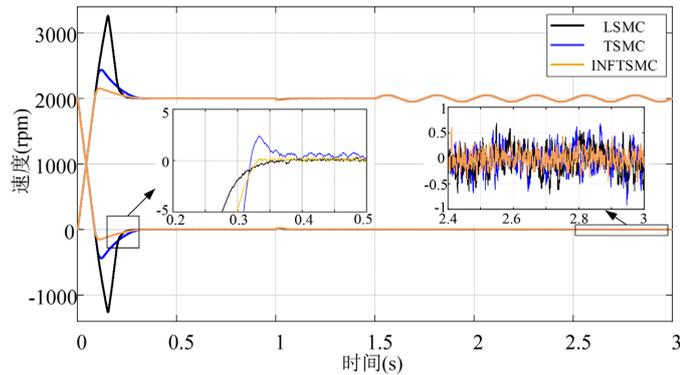
Figure 3. Performance comparison of four control methods for slope tracking
图 3. 斜坡跟踪时的四种控制方法性能对比

Table 3. Performance comparison of four control methods for slope tracking
表 3. 斜坡跟踪时四种控制方式性能比较

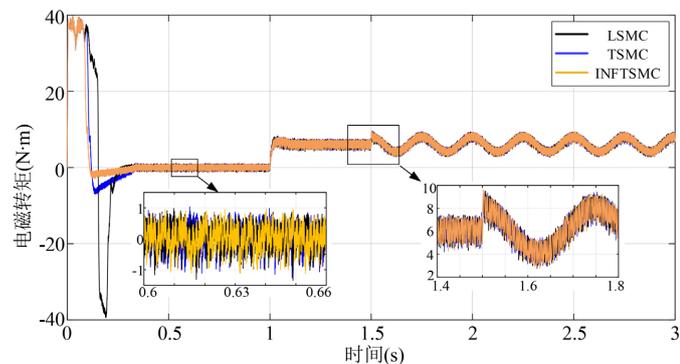
性能指标	LSMC	TSMC	INFTSMC
300 rpm 响应时间(ms)	113	85	78
2000 rpm 响应时间(ms)	210	172	147
速度稳态误差(rpm)	1.12	1.26	1.07
电磁转矩标准差	7.571	7.579	7.576

在跟随斜坡信号时,不论是 200 rpm 还是 2000 rpm 都存在较小超调现象,从图中可以看出所提 INFTSMC 方法具有较小的超调,且跟踪速度快于 LSMC 和 TSMC 方法。这是由于 r 和 h 的值较大,在系统状态远离平衡点时,降低了 INFTSMC 方法的收敛速度,而在接近平衡点时,加快了 INFTSMC 的收敛速度。

图 4 比较了阶跃和正弦速度下三种控制方式,在 1.5 s 时由 2000 r/min 切换至 $2000 + 50\sin(8\pi)$ r/min,表 4 给出了三种控制方式性能对比的具体数值。从图中 4(a)可知所提的 INFTSMC 方法具有较好的抗干扰性能,在加载后能快速跟踪指定速度。虽然所提方法的具有一定的超调,但跟踪阶跃速度时的响应时间是最短的。此外,所提方法在变速下均具有较好的跟踪精度,LSMC 次之,TSMC 最差。结合表 4 可以算出所提的控制方法在跟踪阶跃速度 2000 r/min 时的响应速度分别是 TSMC, LSMC 的 90.95% 和 86.68%。所提方法在变速下的速度稳态误差分别是 TSMC, LSMC 的 60% 和 66.67%。图 4(b)和表 4 表明所提方法的电磁转矩脉动较小。



(a) 速度波形对比



(b) 电磁转矩波形对比

Figure 4. Performance comparison of four control methods under step speed and sine speed
图 4. 阶跃速度和正弦速度下四种控制方法性能对比

Table 4. Performance comparison of four control methods under step speed and sine speed
表 4. 阶跃速度和正弦速度下的四种控制方式性能比较

性能指标	LSMC	TSMC	INFTSMC
速度响应时间(ms)	383	365	332
变速稳态误差(r/min)	0.18	0.20	0.12
速度超调(r/min)	1621	438	154
电磁转矩标准差	8.78	6.72	6.23

5. 结论

针对永磁同步电机驱动系统,提出了一种基于双曲正切函数的快速高精度非奇异快速终端滑模控制方法。在经典终端滑模面中引入双曲正切函数和指数函数,有效提高了速度跟踪精度,缩短了收敛时间。通过理论推导、数学证明和仿真建模,表明所提出的 INFTSM 方法具有以下特点:1) 与传统的 LSMC、TSM 和 NTSM 相比,所提出的 INFTSMC 方法在一定范围内具有最快的收敛速度;2) 提出的滑动面具有较高的收敛精度。仿真结果表明,所提出的 INFTSMC 控制方法在跟踪参考转速 2000 rpm 时超调量最小,跟踪速度最快,在跟踪时变转速时速度误差最小。

基金项目

湖南省教育厅资助科研项目(23C0424);湖南省教育厅资助科研项目(23C0429);湖南省自然科学基金青年基金项目(2023JJ40053);湖南省教育厅优秀青年基金项目(23B0321)。

参考文献

- [1] Sun, X.D, Shi, Z., Lei, G., Guo, Y. and Zhu, J. (2021) Multi-Objective Design Optimization of an IPMSM Based on Multilevel Strategy. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **68**, 139-148. <https://doi.org/10.1109/tie.2020.2965463>
- [2] Li, L., Xiao, J., Zhao, Y., Liu, K., Peng, X., Luan, H., et al. (2020) Robust Position Anti-Interference Control for PMSM Servo System with Uncertain Disturbance. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, **4**, 151-160. <https://doi.org/10.30941/cestems.2020.00020>
- [3] 郭昕, 黄守道, 彭昱, 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.
- [4] 杨帆, 赵希梅, 金鸿雁, 等. 基于广义比例积分观测器的永磁同步电机鲁棒谐振预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(10): 2995-3006.
- [5] Guo, X., Huang, S., Peng, Y., Lu, K., Huang, S., Luo, D., et al. (2023) An Improved Integral Sliding Mode Control for PMSM Drives Based on New Variable Rate Reaching Law with Adaptive Reduced-Order PI Observer. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, **9**, 4503-4516. <https://doi.org/10.1109/tte.2023.3242452>
- [6] Cheng, C., Liu, L. and Ding, S. (2024) Iterative Learning Observer-Based Composite SOSM Control for PMSM Speed Regulation Problem with Mismatched Disturbances. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **39**, 9470-9480. <https://doi.org/10.1109/tpe.2024.3398775>
- [7] Mwasilu, F. and Jung, J. (2016) Enhanced Fault-Tolerant Control of Interior PMSMs Based on an Adaptive EKF for EV Traction Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **31**, 5746-5758. <https://doi.org/10.1109/tpe.2015.2495240>
- [8] Jung, J., Leu, V.Q., Do, T.D., Kim, E. and Choi, H.H. (2015) Adaptive PID Speed Control Design for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **30**, 900-908. <https://doi.org/10.1109/tpe.2014.2311462>
- [9] 魏惠芳, 王丽梅. 永磁直线同步电机自适应模糊神经网络时变滑模控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 861-869.
- [10] Wang, Y., Liao, W., Huang, S., Zhang, J., Yang, M., Li, C., et al. (2023) A Robust DPCC for IPMSM Based on a Full Parameter Identification Method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **70**, 7695-7705.

-
- <https://doi.org/10.1109/tie.2022.3212371>
- [11] 陈闯, 王勃, 于泳, 等. 基于改进指数趋近律的感应电机滑模转速观测器研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 155-163.
- [12] 金鸿雁, 赵希梅, 王天鹤. 基于扰动观测器的永磁直线同步电动机自适应反推互补滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2356-2366.
- [13] 潘峰, 闫庚龙, 苑伟华, 等. 基于双滑模的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S2): 427-433.
- [14] Jiang, Y., Xu, W., Mu, C. and Liu, Y. (2018) Improved Deadbeat Predictive Current Control Combined Sliding Mode Strategy for PMSM Drive System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **67**, 251-263. <https://doi.org/10.1109/tvt.2017.2752778>
- [15] 王鹏康, 李鑫帅, 梁庭福, 等. 基于新型趋近律和超螺旋算法的 PMSM 滑模控制[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(2): 204-210.
- [16] Man, Z.H., Paplinski, A.P. and Wu, H.R. (1994) A Robust MIMO Terminal Sliding Mode Control Scheme for Rigid Robotic Manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **39**, 2464-2469. <https://doi.org/10.1109/9.362847>
- [17] Feng, Y., Yu, X. and Man, Z. (2002) Non-Singular Terminal Sliding Mode Control of Rigid Manipulators. *Automatica*, **38**, 2159-2167. [https://doi.org/10.1016/s0005-1098\(02\)00147-4](https://doi.org/10.1016/s0005-1098(02)00147-4)
- [18] Shao, K., Zheng, J., Huang, K., Wang, H., Man, Z. and Fu, M. (2020) Finite-Time Control of a Linear Motor Positioner Using Adaptive Recursive Terminal Sliding Mode. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67**, 6659-6668. <https://doi.org/10.1109/tie.2019.2937062>
- [19] Xu, W., Qu, S. and Zhang, C. (2023) Fast Terminal Sliding Mode Current Control with Adaptive Extended State Disturbance Observer for PMSM System. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, **11**, 418-431. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2022.3185777>
- [20] 李祥飞, 易志萱, 刘摺钺, 等. 深度弱磁反馈超螺旋非奇异快速终端滑模控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(11): 132-145.