

基于改进型超螺旋滑模线性自抗扰的永磁同步电机速度控制研究

马雨新¹, 雷子奇¹, 顾萍萍¹, 张 为¹, 秦海鸿², 赵朝会¹

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306;

2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106)

Research on PMSM Speed Control Based on Improved Super-Twisting Sliding Mode Linear Active Disturbance Rejection

MA Yuxin¹, LEI Ziqi¹, GU Pingping¹, ZHANG Wei¹, QIN Haihong², ZHAO Chaohui^{1*}

(1. Electrical Engineering College, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To improve the dynamic response and disturbance rejection property of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed regulation system, an improved super-twisting sliding mode linear active disturbance rejection control (STSM-LADRC) strategy was proposed. This strategy optimized the linear extended state observer (LESO) and linear state error feedback (LSEF) control law in LADRC using the sliding mode variable structure principle. First, the STSM-LESO was designed, where the STSM control algorithm improves the LESO in LADRC, enhancing the observing property and thus the controller's disturbance rejection property. Second, the STSM control algorithm replaced the original LSEF control law, improving the controller's dynamic response property. The hyperbolic tangent function was used instead of the sign function in the STSM algorithm to further reduce inherent sliding mode chattering and enhance system stability. The proposed control strategy was then analyzed for stability using Lyapunov theory. Finally, simulations were conducted on the Matlab/Simulink platform for validation. The results showed that the proposed strategy provided better dynamic response and disturbance rejection property compared to traditional LADRC and other controllers.

Key words: permanent magnet synchronous motor; linear active disturbance rejection control; super-twisting sliding mode; linear extended state observer

摘 要: 为提升永磁同步电机调速系统中的动态响应性能和抗扰性能,提出了一种改进型超螺旋滑模线性自抗扰控制(STSM-LADRC)策略。该策略利用滑模变结构原理对 LADRC 中的线性扩张状态观测器(LESO)和线性状态误差反馈(LSEF)控制律进行优化。首先,设计了 STSM-LESO,采用 STSM 控制算法对 LADRC 中的 LESO 进行改进,以提高观测器观测性能从而增强控制器的抗干扰能力;其次,利用 STSM 控制算法代替原有的 LSEF 控制律,提高控制器的动态响应性能,同时使用 $\tanh$ 函数替换超螺旋滑模算法中的 sign 函数进一步削弱滑模固有抖振,提高系统的稳定性;然后,使用李雅普诺夫理论对所提控制策略进行稳定性分析;最后,基于 Matlab/Simulink 仿真平台进行验证。仿真结果表明,与传统的 LADRC 和其他控制器相比,所提控制策略具备更好的动态响应性能和抗扰性能。

关键词: 永磁同步电机; 线性自抗扰控制; 超螺旋滑模; 线性扩张状态观测器

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)由于具备高功率密度、高可靠性和高效率等诸多优点,被广泛应用于在各个工业领域^[1-2]。随着控制理论的快速发展,许多控制策略被应用到 PMSM 控制系统中,如自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)^[3-5]、滑模控制^[6-7]、模糊控制^[8-9]以及神经网络控制^[10]等。其中,ADRC 策略是 Han 首先提出的一种高

基金项目: 国家自然科学基金(51677089)

National Natural Science Foundation of China(51677089)

性能抗扰控制方法^[11]。该方法通过设计扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)来实时估计和补偿未知扰动,提升了控制策略的抗扰性能,但由于采用非线性函数,需要整定的参数过多,稳定性难以分析^[12]。为进一步促进自抗扰控制器的应用,文献[13]提出线性自抗扰控制(Linear ADRC, LADRC)将ADRC技术线性化,引入线性扩张状态观测器(Linear ESO, LESO)和线性状态误差反馈(Linear State Error Feedback, LSEF)控制律,减少了可调参数数量,给出参数整定方法。然而,传统LADRC不能完全解耦系统的动态响应性能和抗扰性能,因此,在实际应用中需要在两种性能之间进行权衡。许多学者主要从两个方面来解决LADRC的上述问题,一种是用先进的控制算法替换原有的LSEF控制律,另一种是对LESO结构进行改进。文献[14]引入全局快速终端滑模算法对LSEF控制器进行改进,将其应用于速度环,试验结果表明,该系统的动态响应性能有明显提高,但由于该控制器引入快速终端滑模,无法避免奇异现象的产生。文献[15]利用滑模控制对LSEF控制器进行改进,并将其应用于PMSM电流控制,提高了电流响应和控制精度。文献[16]提出一种改进速度环LADRC策略,利用级联LESO估计系统所受的总扰动,减小传统LESO对于斜坡型扰动的估计误差来提升系统的动态响应性能,但级联LESO存在许多冗余结构。

由于滑模控制具有响应速度快、鲁棒性强的特点,为了进一步优化LADRC控制器的动态响应性能和抗扰性能,许多学者将滑模控制与LADRC相结合来提升系统的控制性能。其中,超螺旋滑模(Super-Twisting Sliding Mode, STSM)控制由于不需要引入新的控制变量、输出连续且可大幅度减小抖振,因此被普遍采用^[17]。文献[18]在支持向量机-直接转矩控制下,将STSM理论与LADRC相结合,并将其应用到速度控制器中,试验结果表明,该系统的响应速度有所提升,同时系统的转矩脉动也有所减小,进一步提高了该系统的鲁棒性。文献[19]使用STSM算法对LSEF控制律进行改进,设计了超螺旋滑模自抗扰速度控制器(STSM-LADRC),相对于比例积分控制器、LADRC控制器,该控制器的响应速度有所提高,

但由于滑模控制引入了固有振动,增加了LESO的观测负担。PMSM调速系统对扰动观测的要求较高,传统的LESO跟踪性能相对较差,上述研究均没有对LESO的跟踪性能进行改善,且LADRC的抗扰性不理想等问题仍未得到解决。

本文以PMSM控制系统为研究对象,将STSM算法引入到LADRC中,提出了一种改进型超螺旋滑模线性自抗扰控制(Improved STSM-LADRC, ISTSM-LADRC)策略。该控制策略采用STSM算法对LADRC中的LESO进行改进,设计STSM-LESO,使用STSM算法跟踪LESO中的误差信号,使其能够快速收敛到零,以改善LESO的跟踪性能,进一步提高系统的抗扰性能。其次,利用STSM算法对原有的LSEF控制律进行优化,以增强PMSM系统的动态响应性能。为减少滑模的固有抖振,使用tanh函数替换STSM中的sign函数,减少LESO的观测负担,提升系统的稳定性。仿真结果表明,所提控制策略明显减小了滑模的固有抖振,提高了系统的抗干扰能力和动态响应能力。

1 传统LADRC速度控制器的建立

本文以内置式PMSM为研究对象,对PMSM进行数学建模时,进行如下假设:忽略电机铁心饱和;不计电机涡流损耗与磁滞损耗;转子磁场在气隙空间内以正弦波分布;定子绕组三相对称分布。则PMSM数学方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} T_e = 1.5n_p i_q [i_d(L_d - L_q) + \psi_f] \\ T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \\ u_d = Ri_d - \omega_m L_q i_q + L \frac{di_d}{dt} \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_m L_d i_d + \omega_m \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为定子电流 d 、 q 轴分量; u_d 、 u_q 分别为定子电压 d 、 q 轴分量; R 为定子绕组电阻; L_d 、 L_q 分别为定子 d 、 q 轴自感; ψ_f 为转子永磁体产生的磁链; T_L 为负载转矩; T_e 为电磁转矩; J 为转子转动惯量; B 为阻尼系数; n_p 为极对数; ω_m 为转子机械角速度。

根据式(1),PMSM运动方程为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(-T_L - B\omega_m) + \frac{3n_p\psi_f}{2J}i_q \quad (2)$$

对于式(2), 令 $u = i_q$ 、 $b = 3n_p\psi_f/2J$ 、 $f = (-T_L - B\omega_m)/J$, f 为包含了负载转矩扰动和粘滞摩擦系数扰动的扰动项, 设 b_0 为 b 的估计值, 将估计误差部分 $(b-b_0)u$ 并入 f 中, 则式(2)可以改写为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = b_0 u + f \quad (3)$$

传统的 LADRC 速度控制器由线性跟踪微分器 (Linear Tracking Differentiator, LTD)、LESO 和 LSEF 控制器三部分组成。其中, LESO 是自抗扰控制技术的核心, 观测系统的总扰动并进行前馈补偿, 从而提高系统的抗扰能力。

LADRC 速度控制器的数学模型可由式(4)~式(6)来表示。

对于 LTD 有:

$$\begin{cases} e_1 = z_{11} - \omega_m^* \\ \dot{z}_{11} = -re_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_m^* 为 ω_m 的期望值; z_{11} 为 ω_m^* 的跟踪信号; e_1 为 LTD 的跟踪误差; r 为 LTD 的速度因子。

对于 LESO 有:

$$\begin{cases} e_o = z_{21} - \omega_m \\ \dot{z}_{21} = z_{22} + \beta_1 \cdot e_o + b_0 u \\ \dot{z}_{22} = \beta_2 \cdot e_o \end{cases} \quad (5)$$

式中: z_{21} 和 z_{22} 分别为 LESO 对 ω_m 和系统扰动项 f 的观测值; β_1 和 β_2 为 LESO 模块中的增益项; e_o 为状态变量 z_{21} 的观测误差。

对于 LSEF 控制器有:

$$\begin{cases} e_1 = z_{11} - z_{21} \\ u_0(t) = k \cdot e_1 \\ u(t) = [u_0(t) - z_{22}]/b_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: e_1 为 LSEF 的误差信号; $u_0(t)$ 为线性反馈输出; $u(t)$ 为最终输出控制信号; k 为 LSEF 模块中的增益项。

综上所述, 传统一阶 LADRC 控制器的结构框图如图 1 所示。

2 ISTSM-LADRC 控制器研究

为增强 LADRC 的动态响应速度, 进一步提高控制器的控制性能和抗扰性能, 本文在传统 LADRC 中应用 STSM 算法, 对 LESO 和 LSEF 进行

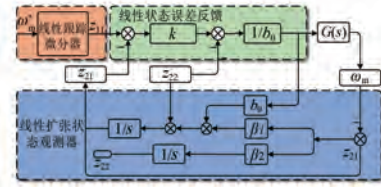


图 1 一阶 LADRC 控制器的结构框图

Fig. 1 Block diagram of the first-order LADRC controller structure

优化。将滑模变结构与 LESO 相结合, 设计 STSM-LESO 对系统扰动进行观测, 并使用 STSM 算法代替原有的 LSEF 控制律, 从而进一步提高系统的动态响应性能。

LADRC 中的 LTD 用来提取微分信号和安排过渡过程, 但是一阶 LADRC 中的 LTD 对 LESO 进行输出时并没有微分输出, 只起到了滤波作用。因此, 为了提高实时性、降低调参难度, 省去 LTD 环节。

2.1 STSM 算法

STSM 算法是二阶滑模控制中的一种特殊的算法。该算法采用了超螺旋控制的思想, 只需要知道滑模变量 s 的信息, 而不需要知道 s 的一阶导数值。在超螺旋控制中, 根据误差值采用不同的控制方式。当误差较小时, 控制器采用传统的滑动模式控制; 当误差较大时, 控制器通过调节超螺旋运动模式来提高控制精度。与传统的滑模控制相比, STSM 算法使用积分来获得实际控制量, 不含高频切换量, 有效抑制了系统抖振, 而且具有更快的响应速度和更强的鲁棒性。

对于单输入的非线性系统, 存在如式(7)所示的关系:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha(t, x) + \beta(t, x)u \\ y = s(t, x) \end{cases} \quad (7)$$

式中: x 为状态变量; u 为输入量; y 为输出量; $\alpha(t, x)$ 、 $\beta(t, x)$ 为未知的连续滑模变结构函数; $s(t, x)$ 为未知的滑模面函数。

设滑模变量 $s = y - y^*$, y^* 为参考信号, 则 STSM 控制算法的表达式为

$$\begin{cases} u = -k_1 |s|^r \text{sign}(s) + v \\ \dot{v} = -k_2 \text{sign}(s) \end{cases} \quad (8)$$

式中: u 、 v 为状态变量; k_1 、 k_2 和 r 为待设计参数。

由式(8)可知, STSM 控制算法主要由两个部

分组成。第一部分是滑模变量的非线性不连续函数,非线性变量可以通过改变指数 r 来改变;第二部分是积分值,积分值使得二阶滑模控制与一阶滑模控制相比,不受参数变化的影响,使系统固有抖振降低且具有较强的鲁棒性。其中, r 一般取 0.5。

2.2 STSM-LESO

LESO 是 LADRC 的核心,其主要作用是观测系统的总扰动并进行前馈补偿,以提高 LADRC 控制器的抗扰性能。本节提出了一种 STSM-LESO,对 LESO 中的转速跟踪误差信号使用 STSM 算法,使其能够快速收敛到零。因此,通过结合 STSM 变结构原理可以提升 LESO 的观测性能,从而进一步提高 PMSM 系统的控制性能与抗扰性能。

首先,定义误差的滑模面函数为

$$\begin{cases} h_1 = z_{21} - \omega_m \\ h_2 = \dot{h}_1 = \dot{z}_{21} - \dot{\omega}_m \end{cases} \quad (9)$$

式中: h_1 为状态变量 z_{21} 的观测误差,即观测器的转速跟踪误差; h_2 为 h_1 的一阶导数。

结合式(8)和式(9),利用 STSM 算法得到:

$$\begin{cases} u = v^* - k_1 |h_1|^r \text{sign}(h_1) = \dot{h}_1 \\ \dot{v}^* = -k_2 \text{sign}(h_1) = \dot{h}_2 \end{cases} \quad (10)$$

结合式(5),则 STSM-LESO 设计为

$$\begin{cases} h_1 = z_{21} - \omega_m \\ \dot{z}_{21} = z_{22} + \beta_1 \cdot [-k_1 |h_1|^r \text{sign}(h_1) + v^*] + b_0 u \\ \dot{z}_{22} = \beta_2 \cdot [-k_1 |h_1|^r \text{sign}(h_1) + v^*] \\ \dot{v}^* = -k_2 \text{sign}(h_1) \end{cases} \quad (11)$$

式中: β_1 和 β_2 为增益项,采用带宽法进行参数整定^[20], $\beta_1 = 2\omega_0$, $\beta_2 = \omega_0^2$ 。

传统的 STSM 算法采用的是符号函数 sign ,由于 sign 函数的不连续性,在系统切换时会引起控制输入的突变,导致系统发生抖振现象。为减小系统抖振,将符号函数 sign 替换为连续且光滑的双曲正切函数 $\tanh$,其表达式为

$$\tanh x = \frac{e^{\frac{x}{c}} - e^{-\frac{x}{c}}}{e^{\frac{x}{c}} + e^{-\frac{x}{c}}} \quad (12)$$

式中: c 取合适的正值。

图 2 为 sign 函数与 $\tanh$ 函数图像。由图 2 可知,当 c 越小,系统控制效果越好,但会引起抖振增强,从而可以证明采用 sign 函数时抖振较为明显;当 c 越大,抖振抑制效果明显变好^[21]。所以取合适的 c 值,将 sign 函数替换为 $\tanh$ 函数,可以使滑模控制器的切换更加平滑,从而减少系统抖振。

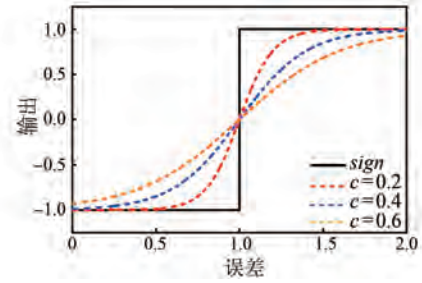


图 2 sign 函数与 $\tanh$ 函数图像对比

Fig. 2 Comparison of sign function and $\tanh$ function graphs

改进后的 STSM-LESO 结构框图如图 3 所示,其原理如式(13)所示:

$$\begin{cases} h_1 = z_{21} - \omega_m \\ \dot{z}_{21} = z_{22} + \beta_1 \cdot (-k_1 |h_1|^r \tanh h_1 + v^*) + b_0 u \\ \dot{z}_{22} = \beta_2 \cdot (-k_1 |h_1|^r \tanh h_1 + v^*) \\ \dot{v}^* = -k_2 \tanh h_1 \end{cases} \quad (13)$$

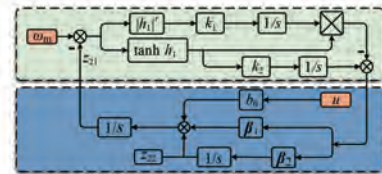


图 3 ISTSM-LESO 结构框图

Fig. 3 Block diagram of the structure of ISTSM-LESO

2.3 STSM LSEF 控制律

在 STSM-LESO 对扰动进行观测估计并对进行前馈补偿后,此时的控制系统可以等效为一个积分器。LSEF 控制就类似于比例积分控制器的比例控制,在系统的动态响应较快的情况下,若 LSEF 设计偏差过大,可能导致系统产生过冲和振荡,从而导致稳定性和鲁棒性降低。为解决这一问题,利用 STSM 响应快速、对参数变化及扰动不灵敏的特点,将 STSM 算法引入到 LSEF 控制律

中,以改善系统稳定性与鲁棒性^[19]。

首先,定义滑模面函数为

$$\begin{cases} e_1 = z_{21} - z_{11} \\ e_2 = \dot{e}_1 = \dot{z}_{21} - \dot{z}_{11} \end{cases} \quad (14)$$

式中: e_1 为 LESF 的误差信号; e_2 为 e_1 的一阶导数。

结合式(8)、式(12)和式(14),得到:

$$\begin{cases} u = v - k_p |e_1|^r \tanh e_1 = \dot{e}_1 \\ \dot{v} = -k_i \tanh e_1 = \dot{e}_2 \end{cases} \quad (15)$$

结合式(14)、式(15)得到 STSM LSEF 控制律的表达式如式(16)所示,其结构框图如图4所示。

$$\begin{cases} e_1 = z_{21} - z_{11} \\ u_0 = v - k_p |e_1|^r \tanh e_1 \\ \dot{v} = -k_i \tanh e_1 \\ u = (u_0 - z_{22})/b_0 \end{cases} \quad (16)$$

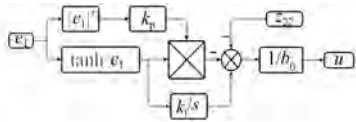


图4 STSM LSEF 控制律结构框图

Fig. 4 Block diagram of STSM LSEF control law structure

综上所述,ISTSM-LADRC 速度控制器结构框图如图5所示。

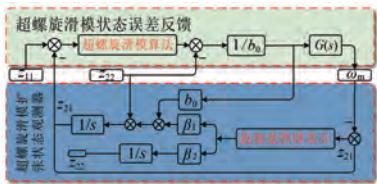


图5 ISTSM-LADRC 速度控制器结构框图

Fig. 5 Block diagram of ISTSM-LADRC speed controller structure

2.4 稳定性分析

为分析所设计的 STSM-LESO 的稳定性,建立如(17)所示的正定函数作为李雅普诺夫函数:

$$V_1 = Z^T P_M Z \quad (17)$$

式中: $Z^T = [Z_1 \ Z_2]^T = [|e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sat}(e_1) \ v]^T$; P_M 为正

定矩阵, $P_M = \begin{bmatrix} 2k_2 + k_1 & k_1 \\ k_1 & k_1 \end{bmatrix}$ 。

对 Z 求导可得:

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} |e_1|^{-\frac{1}{2}} [v - k_1 |e_1|^r \cdot \text{sat}(e_1)] \\ -k_2 \text{sat}(e_1) \end{bmatrix} = AZ \quad (18)$$

$$\text{式中: } A = \frac{1}{2|Z_1|} \begin{bmatrix} -k_1 & 1 \\ -2k_2 & 0 \end{bmatrix}。$$

经上述推导,对式(17)求导可得:

$$\dot{V}_1 = \dot{Z}^T P_M Z + Z^T P_M \dot{Z} = Z^T A^T P_M Z + Z^T P_M A Z = Z^T Q Z \quad (19)$$

当 $k_1 > 0, k_2 > 0$ 时,保证 Q 负定。即:

$$\dot{V}_1 = Z^T Q Z < 0 \quad (20)$$

根据李雅普诺夫稳定性定理可知,当 $k_1 > 0, k_2 > 0$ 时, Q 负定, $\dot{V}_1 < 0$, 系统稳定。同理,分析所设计的 STSM LSEF 控制律的稳定性与上述相同,即 $k_p > 0, k_i > 0$ 时, Q 负定, $\dot{V}_1 < 0$, 系统稳定。

3 仿真分析

本文研究的 PMSM 的 ISTSM-LADRC 策略的系统框图如图6所示。根据表1所示的电机驱动参数基于 Matlab/Simulink 建立相应的系统仿真模型。本文选取三种控制策略进行分析,分别为 LADRC 策略、STSM-LADRC 策略以及本文所提的 ISTSM-LADRC 策略。对三种控制策略的速度响应性能和在变换负载情况下 PMSM 系统的运行情况进行对比分析。

表1 PMSM 参数表

Tab. 1 Table of PMSM parameters

参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.48
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 500
d 轴电感/mH	7.45
q 轴电感/mH	17.8
转子永磁体磁链/Wb	0.201
电机极对数	4
总线电压/V	546
转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.001 8

为测试三种控制策略在 PMSM 中的负载突加和突卸情况下的抗干扰能力,对 PMSM 进行负载试验。仿真时间设置为 0.5 s。给定运行速度为 1 500 rpm,在 0.2 s 时突加 10 N·m 负载转矩,

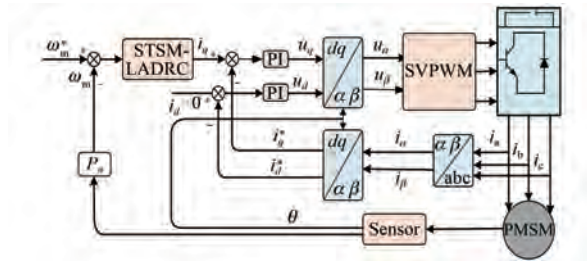


图 6 ISTSM-LADRC 系统框图

Fig. 6 Block diagram of ISTSM-LADRC system
在 0.4 s 时突卸 10 N·m 负载转矩。三种控制策略的速度波形对比如图 7 所示。

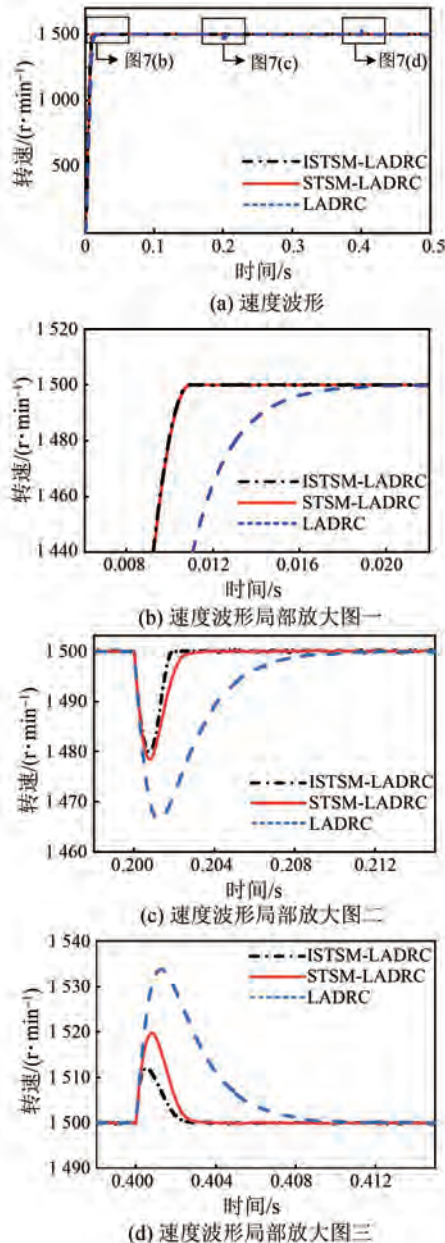


图 7 三种控制策略下的速度波形

Fig. 7 Speed waveforms under three control strategies

从图 7(b)可以看出,在电机启动阶段,三种控制策略基本没有超调现象,表明三种控制策略均具备较好的控制性能。其中,传统 LADRC 策略在启动阶段调节时间为 0.02 s,而 STSM-LADRC 策略和本文的 ISTSM-LADRC 策略的调节时间基本相同,均为 0.011 s。从图 7(c)可以看出,0.2 s 突加 10 N·m 负载后,LADRC 策略下系统转速下降至 1 466 rpm,恢复时间为 0.016 s;STSM-LADRC 策略下系统转速下降至 1 477 rpm,恢复时间为 0.004 s;ISTSM-LADRC 策略下系统转速下降至 1 480 rpm,恢复时间为 0.002 s。从图 7(d)可以看出,0.4 s 突卸 10 N·m 负载后,LADRC 策略下系统转速上升至 1 534 rpm,恢复时间为 0.015 s;STSM-LADRC 策略下系统转速上升至 1 520 rpm,恢复时间为 0.004 s;ISTSM-LADRC 策略下系统转速上升至 1 512 rpm,恢复时间为 0.002 s。综上可知,相较于 STSM-LADRC 策略和传统 LADRC 策略,本文所设计的 ISTSM-LADRC 策略的动态响应能力更强、控制性能更优。

为验证本文所设计的 STSM-LESO 策略对 PMSM 系统的观测性能,对三种控制策略下的速度跟踪误差和扰动观测进行对比分析。速度跟踪结果对比如表 2、表 3 和图 8 所示。扰动观测结果对比如图 9 所示,其中,图 9(b)为突加负载时三种控制策略对扰动观测对比波形;图 9(c)和图 9(d)分别为系统使用 sign 函数和 $\tanh$ 函数观测扰动时的抖振波形。

表 2 速度跟踪误差最大值

Tab. 2 Maximum speed tracking error $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

阶段名称	速度跟踪误差最大值		
	ISTSM-LADRC	STSM-LADRC	LADRC
启动	4.7	30.5	24.7
突加负载	0.7	10.9	10.0
突卸负载	0.7	10.1	10.0

表 3 速度跟踪误差收敛时间

Tab. 3 Convergence time of speed tracking error s

阶段名称	跟踪误差收敛时间		
	ISTSM-LADRC	STSM-LADRC	LADRC
启动	0.006	0.010	0.012
突加负载	0.001 5	0.004	0.004
突卸负载	0.003	0.005	0.004

从图 8 可以得出,在本文设计的 ISTSM-LADRC 策略下,系统在不同运动阶段的速度跟踪

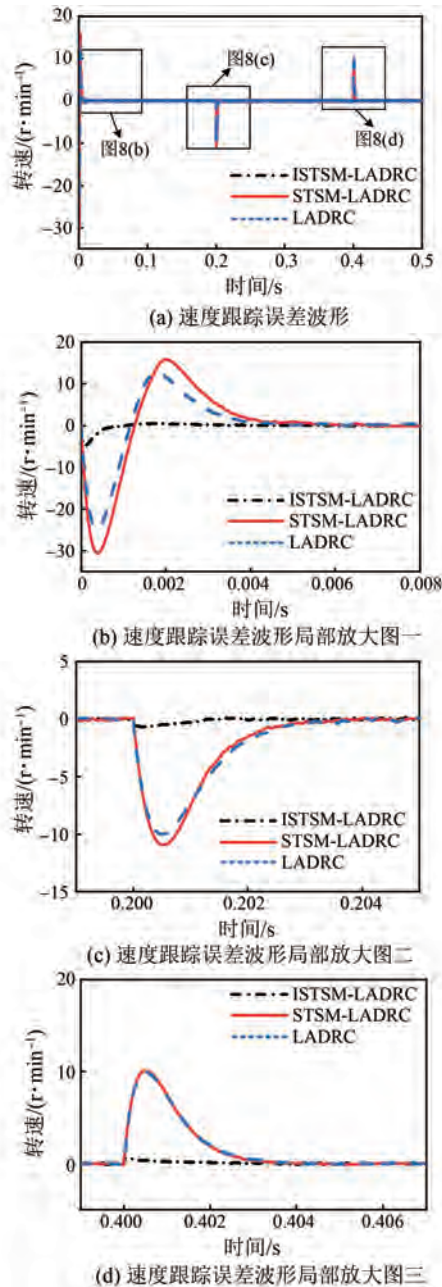


图 8 三种控制策略下的速度跟踪误差波形

Fig. 8 Speed tracking error waveforms under three control strategies

误差最大值始终最小,并且相对于其他两种控制策略具备更快的收敛速度。

从图 9(b)可以看出,相比传统的 LESO,本文所设计的 STSM-LESO 的扰动观测性能更优。从图 9(c)和图 9(d)可以看出,在系统稳定状态下,将 STSM 中的 $sign$ 函数替换为 $tanh$ 函数后,明显削弱了滑模的固有抖振,使用传统 $sign$ 函数观测信号抖振大小为 ± 0.06 ,而改为 $tanh$ 函数抖振大

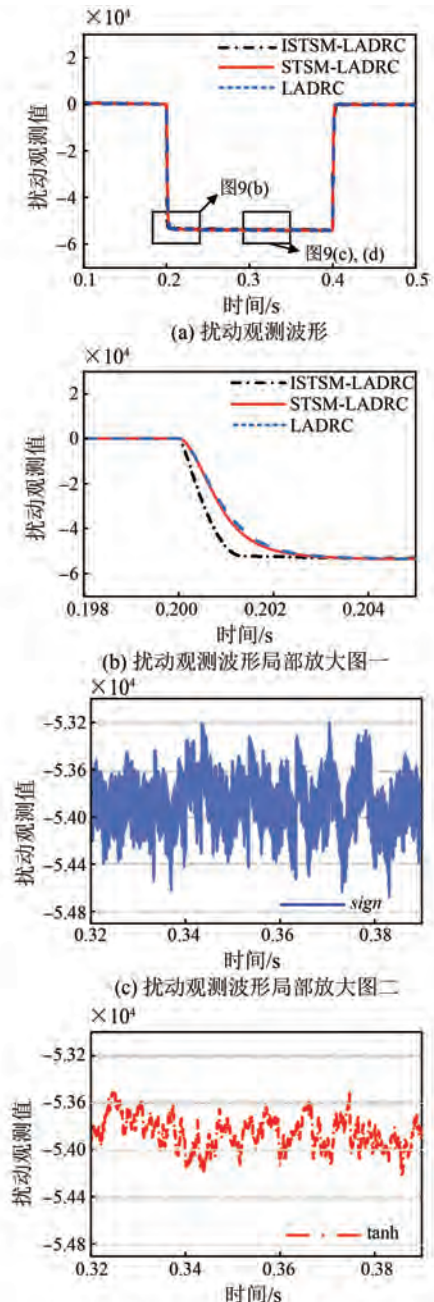


图 9 三种控制策略下扰动观测波形

Fig. 9 Disturbance observation waveforms under three control strategies

小为 ± 0.03 ,观测信号抖振减小了 50%。仿真结果表明本文所设计的 STSM-LESO 对系统中的总扰动具备更好的观测性能,可以进一步提高 PMSM 系统的抗干扰能力。

4 结语

为提升 PMSM 的动态响应性能和抗扰性能,

优化系统的控制性能,本文提出了一种 ISTSM-LADRC 策略。该策略利用 STSM 变结构原理对 LADRC 控制器中的 LESO 和 LSEF 进行优化后,提高 PMSM 系统的控制性能。并且使用 $\tanh$ 函数替换 sign 函数,明显削弱了滑模的固有抖振,增强系统稳定性。通过仿真,在变负载运动情况下对 LADRC、STSM-LADRC 和 ISTSM-LADRC 策略进行对比分析。得出如下结论:

(1) 本文所提的 ISTSM-LADRC 策略,具有较好的动态响应性能和较强的抗干扰能力,STSM-LESO 对系统中扰动具备较强的跟踪能力;

(2) 相较于传统的 LADRC 与 STSM-LADRC 策略,ISTSM-LADRC 策略在变负载运动情况下转速跌落分别减少 41%、13%,响应时间分别减少 87.5%、50%。在系统稳定情况下,相比使用传统 sign 函数,使用 $\tanh$ 函数后观测器观测信号抖振减小了 50%。

参考文献

- [1] 康尔良,吴炳道,禹聪. 基于 LADRC 控制的永磁同步电机无位置传感器研究[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(2): 69-78.
- KANG E L, WU B D, YU C, et al. Research on sensorless of permanent magnet synchronous motor based on LADRC control [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(2): 69-78.
- [2] 齐歌,黄文豪,马丁. 永磁同步电动机基于滑模与自抗扰控制研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023, 7: 87-90.
- QI G, HUANG W H, MA D, et al. Research on the control strategy of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode and active disturbance rejection double-loop control [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023, 7: 87-90.
- [3] 迟世伟,刘慧博. 基于前馈补偿的永磁同步电机自抗扰控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(1): 9-13.
- CHI S W, LIU H B. ADRC control of permanent magnet synchronous motor based on the feedforward compensation [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(1): 9-13.
- [4] 田明赫. 基于自抗扰控制的永磁同步电机扰动抑制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- TIAN M H. Research on disturbance rejection strategy of PMSM based on active disturbance rejection control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [5] 张琳元,张清艺,张志锋. 基于非线性观测器的永磁同步电机位置估计算法研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 79-85.
- ZHANG L Y, ZHANG Q Y, ZHANG Z F. Research on position estimation algorithm of permanent magnet synchronous motor based on nonlinear observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 79-85.
- [6] MOWAVIQ M I, OKTAVIANA P T W, JUNAIDI A, et al. Integral sliding mode embedded controller of PMSM position control [C]//2020 10th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar, Malang, 2020.
- [7] 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.
- [8] FENG X P, XIE S R, ZHANG Z Y, et al. Research on speed loop control of IPMSM based on fuzzy linear active disturbance rejection control [J]. Energy Reports, 2022, 8(10): 804-812.
- [9] 李耀华,邓益志,张鑫泉,等. 模糊占空比调制永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(6): 21-29.
- LI Y H, DENG Y Z, ZHANG X Q, et al. Model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor using fuzzy duty cycle modulation [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(6): 21-29.
- [10] MAO W W, JIN X Y, SUN H J, et al. Study on speed control of PMSM based on wavelet neural network [C]//2022 19th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, Chengdu, 2022.
- [11] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.

- [12] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.
- GAO Z Q. On the foundation of active disturbance rejection control [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1498-1510.
- [13] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference, Denver, 2003.
- [14] WANG L, ZHAO J W, ZHANG X H, et al. Research on speed disturbance suppression of permanent magnet linear synchronous motor based on global fast terminal sliding mode active disturbance rejection control [C]//2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, Wuhan, 2021.
- [15] QU L Z, QIAO W, QU L Y. Active disturbance rejection based sliding mode current control for permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 751-760.
- [16] 朱良红, 张国强, 李宇欣, 等. 基于级联扩张观测器的永磁电机无传感器自抗扰控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4614-4624.
- ZHU L H, ZHANG G Q, LI Y X, et al. Active disturbance rejection control for position sensorless permanent magnet synchronous motor drives based on cascade extended state observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4614-4624.
- [17] 胡启国, 王泽霖, 胡豁然. 基于 MATLAB/Simulink 仿真的永磁同步电机新型超螺旋二阶滑模转速控制[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12108-12114.
- HU Q G, WANG Z L, HU H R. New super twisting second order sliding mode speed control for permanent magnet synchronous motor based on MATLAB/Simulink simulation [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(28): 12108-12114.
- [18] HU Z H, GAO H, DU H M, et al. Research on SVM-DTC control strategy of PMSM based on super-twisting sliding mode active disturbance rejection control [C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference, Nanjing, 2022.
- [19] 杜海明, 高函, 胡智宏, 等. 永磁同步电机超螺旋滑模自抗扰调速系统设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(10): 216-222.
- DU H M, GAO H, HU Z H, et al. Design of the active disturbance rejection speed regulation system of super-twisting sliding mode for permanent magnet synchronous motors [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(10): 216-222.
- [20] CUI Y Y, YIN Z G, BAI C, et al. Robust control of IPMSM based on doubly-fed differential compensation linear active disturbance rejection controller [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(1): 936-949.
- [21] 郑超. 永磁同步电机自适应模糊滑模控制方法研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
- ZHENG C. Adaptive fuzzy sliding mode control of permanent magnet synchronous motor [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021.

收稿日期:2024-04-17

收到修改稿日期:2024-05-29

作者简介:

马雨新(2000-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动,myx2282023@163.com;

*通信作者:赵朝会(1963-),男,博士,教授,研究方向为电机设计、电力电子技术,zhaoch@sdju.edu.cn。

Research on PMSM Speed Control Based on Improved Super-Twisting Sliding Mode Linear Active Disturbance Rejection

MA Yuxin¹, LEI Ziqi¹, GU Pingping¹, ZHANG Wei¹, QIN Haihong², ZHAO Chaohui^{1*}

(1. Electrical Engineering College, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Key words: permanent magnet synchronous motor; linear active disturbance rejection control; super-twisting sliding mode; linear extended state observer

Permanent magnet synchronous motor (PMSM) has advantages such as high power density, high reliability, and high efficiency, making it widely used in various industrial fields. With the rapid development of control theory, linear active disturbance rejection control (LADRC) has been increasingly applied to the speed control loop of PMSM to achieve better dynamic response and disturbance rejection property.

To improve the dynamic response and disturbance rejection property of PMSM speed regulation system, this paper proposed an improved super-twisting sliding mode (ISTSM) linear active disturbance rejection control strategy. The sliding mode variable structure principle was used to optimize the linear extended state observer (LESO) and linear state error feedback (LSEF) control law in LADRC. The block diagram of the ISTSM-LADRC structure was shown in Fig. 1.

First, the STSM-LESO was designed, where the STSM control algorithm improved the LESO in

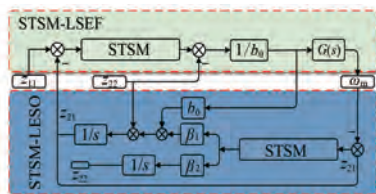


Fig. 1 Structural block diagram of the ISTSM-LADRC

LADRC, enhancing the observing performance and thus improving the controller's disturbance rejection property. Second, the STSM control algorithm replaced the original LSEF control law, improving the system's dynamic response. The tanh function was used instead of the *sign* function in STSM to further reduce the inherent sliding mode chattering and enhance system stability. Finally, the proposed control strategy was validated on the Matlab/Simulink simulation platform.

Comparative analyses of LADRC, STSM-LADRC, and the proposed ISTSM-LADRC strategy were conducted under variable load conditions. The conclusions were as follows:

1. The proposed ISTSM-LADRC strategy exhibited better dynamic response property and stronger disturbance rejection property, with the STSM-LESO showing a strong ability to track disturbances in the system.

2. Compared to traditional LADRC and STSM-LADRC, the ISTSM-LADRC strategy reduced the speed drop by 41% and 13%, respectively, and the response time by 87.5% and 50%, respectively, under variable load conditions. Under stable system conditions, replacing the traditional *sign* function with the tanh function reduced the observer signal chattering by 50%.