

基于新型趋近律的三相永磁同步电机滑模控制研究

张乃峰, 郭凯凯, 刘 晨, 李 聪

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘 要:目的 针对基于指数趋近律的滑模控制系统存在无法同时兼顾趋近速度和抖振的问题, 搭建了基于新型趋近律的改进快速非奇异终端滑模控制系统。方法 首先设计了一种新型趋近律, 该趋近律在趋近阶段能快速趋向滑模面, 在到达阶段能够快速收敛, 并基于这种新型趋近律设计了一种改进快速非奇异终端滑模控制器; 其次, 由于电机在实际运行过程中可能受到如负载扰动等不确定因素的影响, 为了提升系统的抗干扰性能, 设计了一种扰动观测器用来估计控制系统中的扰动, 并将估计到的扰动值反馈到速度环滑模控制器中进行扰动补偿。结果 在 MATLAB/Simulink 中搭建 PMSM 控制系统仿真模型, 进行仿真验证。结论 研究表明: 与传统的滑模控制相比, 所设计的控制方法能够有效地削弱抖振, 具有良好的动态响应。

关键词: 永磁同步电机; 新型趋近律; 快速非奇异终端滑模控制; 扰动观测器

中图分类号: TM341 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0006.004

Research on Sliding Mode Control of Three-phase PMSM Based on a Novel Reaching Law

ZHANG Naifeng, GUO Kaikai, LIU Chen, LI Cong

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China

Abstract: Objective To address the issue that the sliding mode control system based on the exponential reaching law cannot simultaneously balance the reaching speed and chattering, an improved fast non-singular terminal sliding mode control system based on a novel reaching law is established. **Methods** First, a novel reaching law is designed, which can rapidly approach the sliding mode surface during the approaching stage and quickly converge upon reaching the surface. Based on this novel reaching law, an improved fast non-singular terminal sliding mode controller is designed. Second, since the motor may be affected by uncertain factors such as load disturbances during actual operation, to enhance the anti-interference performance of the system, a disturbance observer is designed to estimate the disturbances in the control system, and the estimated disturbance values are fed back to the speed-loop sliding mode controller for disturbance compensation. **Results** A simulation model of the PMSM (permanent magnet synchronous motor) control system is built in MATLAB/Simulink for simulation verification. **Conclusion** The results indicate that, compared with traditional sliding mode control, the proposed control method can effectively reduce chattering and has a good dynamic response.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; novel reaching law; fast non-singular terminal sliding mode control; disturbance observer

收稿日期: 2024-01-01 修回日期: 2024-03-19 文章编号: 1672-058X(2025)06-0026-07

基金项目: 安徽省教育厅基金重大项目(2022AH040110)资助, 安徽省自然科学基金青年项目(1908085QE207)资助。

作者简介: 张乃峰(1998—), 男, 河北省石家庄人, 硕士研究生, 从事永磁同步电机滑模控制研究。

通信作者: 郭凯凯(1987—), 男, 山东东营人, 副教授, 从事永磁电机结构设计其控制系统研究。Email: guokai0072000@gmail.com.

引用格式: 张乃峰, 郭凯凯, 刘晨, 等. 基于新型趋近律的三相永磁同步电机滑模控制研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(6): 26-32.

ZHANG Naifeng, GUO Kaikai, LIU Chen, et al. Research on sliding mode control of three-phase PMSM based on a novel reaching law[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(6): 26-32.

1 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)是一个多变量,非线性,强耦合的系统,由于其具有效率高,启动时间短等优点,在工业生产和生活中被广泛使用^[1-3]。传统比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制作为一种线性控制方法,很难满足 PMSM 高精度控制需要^[4-7]。

滑模控制(Sliding Model Control, SMC)本质上作为一种非线性控制,因其对参数的不确定性和对外部扰动具有良好的鲁棒性等优点,从而被诸多学者所研究^[8-10]。然而,SMC 不连续的开关特性会造成抖振,进而会对硬件造成一定的损害,影响控制系统的精度。目前已有不少学者针对削弱滑模控制抖振的问题展开研究。文献[11]提出了一种基于新型指数趋近律的滑模控制和滑模扰动观测器相结合的方法,提高了 PMSM 的动态性能。文献[12]提出了一种自适应分数阶终端滑模控制,并通过对不确定扰动进行估计,进一步改善了系统的动态性能。文献[13]采用一种基于改进的降阶比例积分观测器的自适应滑模控制,能够有效改善控制系统的抖振并缩减到达滑模面所需时间。文献[14]提出了一种新型滑模趋近率,有效改善了系统的动态性能。文献[15]采用了模糊控制和滑模控制相结合的方法,不仅削弱了抖振,而且具有更好的动态性能。文献[16]提出了一种基于扰动观测器(Disturbance Observer, DOB)的复合滑模控制技术,能够避免因 SMC 的高增益从而产生的抖振。文献[17]采用了一种积分终端 SMC 策略,结合预测控制来预测最优信号,可以有效地削弱抖振。在实际操作中,针对模型的不确定性,参数摄动以及外界干扰等情况,文献[18]和[19]分别提出了一种超螺旋滑模 DOB 和复合 DOB,对控制系统中的扰动进行估计和补偿。

针对基于指数趋近律的滑模控制系统存在无法同时兼顾趋近速度和抖振的问题,本文提出了一种基于新型趋近律的改进快速非奇异终端 SMC 系统(Non-singular Fast Terminal SMC, NFTSMC)。首先,提出了一种新型趋近律,该趋近律有效解决了指数趋近律在趋近速度与抖振抑制间难以兼顾的矛盾,能够快速稳定的趋向原点。然后,设计了一种 DOB,通过将估计到的控制系统的扰动反馈到转速环 SMC 中进行扰动补偿,从而进一步提高控制系统的稳定性。最后,搭建了 PMSM 仿真控制模型进行了仿真分析。

2 PMSM 数学模型

在本文中,假设定子线圈均为 Y 形连接,三相线圈对称,且相差 120°。永磁体和电枢磁场在气隙中都是正弦分布,忽略了铁芯的饱和效应。PMSM 在 $d-q$ 轴坐标系中的数学方程如下:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - n_p \omega_m L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - n_p \omega_m (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (1)$$

其中, u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 分别是 PMSM 在 $d-q$ 坐标系下的电压和电流分量; R_s 是定子绕组的电阻值; ω_m 是机械角速度; φ_f 是永磁体的磁链; L_d 、 L_q 是 $d-q$ 轴上的电感; n_p 是 PMSM 的极对数。

PMSM 的转矩方程 T_e 为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \varphi_f i_q \quad (2)$$

电机的机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (3)$$

其中, J 是惯性矩; B 是阻尼系数; T_L 是负载扭矩。

3 新型趋近律的设计与分析

3.1 传统指数趋近律设计

指数趋近律的表达式为

$$\frac{ds}{dt} = -\varepsilon \operatorname{sgn}s - ks \quad (4)$$

其中, ε 是系统向滑模面趋近的速率, k 是指数趋近项系数,二者均大于零。由该函数可知,当使用指数趋近律时,会存在无法同时兼顾趋近速度和抖振的问题,即趋近速度越快,抖振越大。

3.2 新型趋近律设计

为了解决上述问题,本文提出了一种新型趋近律,该趋近律为

$$\frac{ds}{dt} = -\varepsilon(e^{a|x|} - 1)G(s) - kb^{1/s}|s| \quad (5)$$

其中, $a > 0$, $G(s) = |s|/\sqrt{1+(|s|)^2}$, $\lim_{|x| \rightarrow \infty} |x| = 0$, $b > 0$ 。 $G(s)$ 用来替代传统指数趋近律中的符号项 sgn 。由式(5)可知,当系统状态远离滑模面时,系统状态按照变速项速率和指数项速率两个速率到达滑模面。而当系统接近滑模面时,指数项逐渐为零,此时变速项起主要作用,而随着时间的增加, $|x|$ 逐渐为零,表明此时稳态抖振得到了显著的抑制。

3.3 传统指数趋近律与新型趋近律对比分析

设控制系统的受控对象为

$$\dot{\theta}(t) = -g(\theta, t) + mu(t) \quad (6)$$

其中, $m > 0$ 。

线性滑模面的表达式为

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \quad (7)$$

其中, $c > 0$ 。

跟踪误差的表达式为

$$\begin{cases} e(t) = \theta_d(t) - \theta(t) \\ \dot{e}(t) = \dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t) \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\theta_d(t)$ 是理想位置信号。

根据式(4)、式(6)一式(8)可得, 基于指数趋近律的控制率的表达式为

$$u(t) = \frac{1}{m} (\varepsilon \operatorname{sgns} + ks + c(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + \theta_d + g(\theta, t)) \quad (9)$$

根据式(5)一式(8)可得, 基于新型趋近律的控制率的表达式为

$$u(t) = \frac{1}{m} \left(\varepsilon (e^{\alpha |x|} - 1) G(s) + kb |s| + \theta_d + g(\theta, t) + c(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \right) \quad (10)$$

规定给定指令信号 $\theta_d(t) = \sin(t)$, 并且 $\varepsilon = 10, k = 35, a = 0.8, b = 0.3, l = 0.2$, 系统的初始位置为 $(-1.5, -1.5)$ 。图 1 显示了指数趋近律和本文提出的新型趋近律之间的性能比较情况。可以看出, 本文所提出的趋近律在跟踪给定信号、减小位置跟踪误差、提高位置跟踪误差微分收敛速度、抑制抖振等方面明显优于指数趋近律。

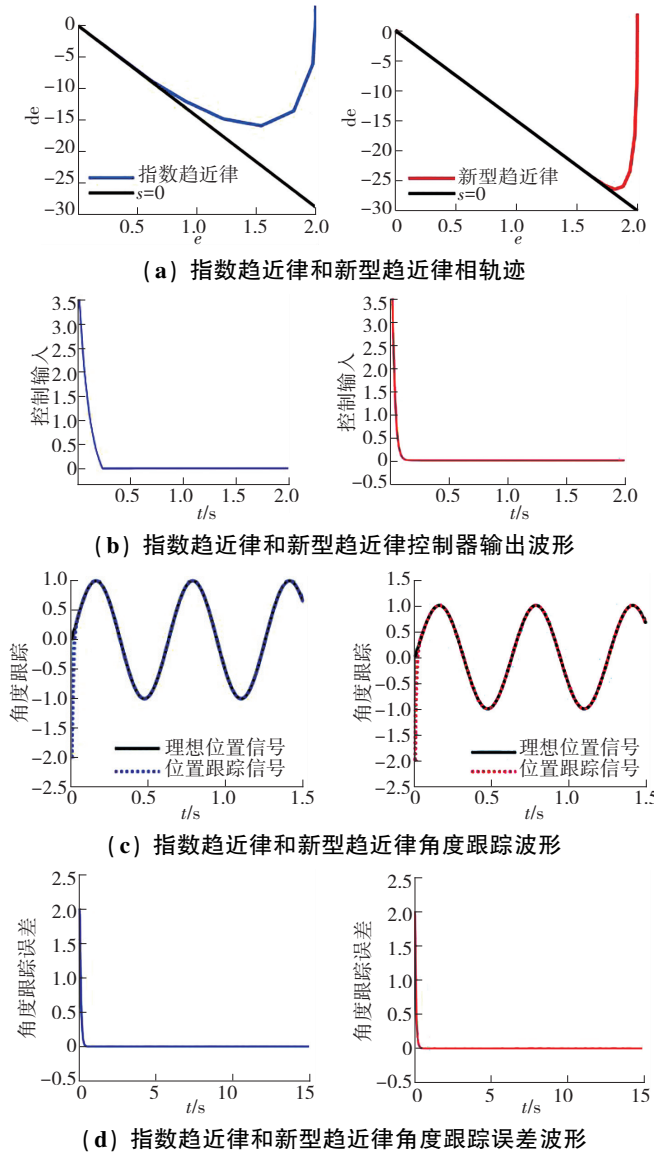


图 1 指数趋近律和新型趋近律的性能比较

Fig. 1 Performance comparison of exponential reaching law and new reaching law

4 基于新型趋近律的 NFTSMC 的设计

4.1 转速环 NFTSMC 的设计

将给定转子速度与实际转子速度的偏差信号作为速度环 NFTSMC 的输入, 则速度环 NFTSMC 状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 \end{cases} \quad (11)$$

其中, ω_{ref} 和 ω_m 分别是 PMSM 的给定转速值和反馈机械角速度值。

NFTSMC 的滑模面设计为

$$s = x_1 + \frac{1}{\alpha} x_1^{n/m} + \beta x_2^{j/g} \quad (12)$$

其中, $\alpha > 0, \beta > 0, n$ 和 m 均为奇数且满足 $1 < j/g < 2, n/m > j/g$ 。

根据式(11), 对 NFTSMC 滑模面求导可得:

$$\dot{s} = \dot{x}_1 + \frac{n}{\alpha m} x_1^{n/m-1} \dot{x}_1 + \frac{j\beta}{g} x_2^{j/g-1} \dot{x}_2 \quad (13)$$

由式(5)和式(13)可得, 转速环输出电流给定值 i_q^* 的表达式为

$$i_q^* = M \int_0^t \frac{g}{j\beta} [N + \varepsilon (e^{\alpha |x|} - 1) G(s) + kb |s|] x_2^{1-j/g} dt \quad (14)$$

其中, $M = \frac{2J}{3n_p \varphi_f}, N = \left(1 + \frac{nx_1^{n-m/m}}{\alpha m} \right) x_2$ 。

4.2 稳定性分析

为了验证本文所提出的基于新型趋近律的控制系统的稳定性, 定义李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (15)$$

由式(5)和式(15)可得, 李雅普诺夫函数的表达式为

$$\dot{V} = s \dot{s} = s (-\varepsilon (e^{\alpha |x|} - 1) G(s) - kb |s|) \quad (16)$$

由式(16)可知, $\dot{V} \leq 0$, 根据李雅普诺夫定律, 当 $\dot{V}$ 小于等于零时, 系统是稳定的。

4.3 扰动观测器的设计

由于电机在实际运行过程中可能受到如负载扰动等不确定因素的影响。SMC 是一种不连续的开关控制, 需要较大的开关增益来消除不确定因素的影响。然而, 较大的开关增益会导致抖振增加。因此, 提高系统的抗干扰能力, 设计 DOB 来补偿控制系统中的不确定因素。

根据式(2)和式(3)可得, 机械角速度导数的表达式为

$$\dot{\omega}_m = -\frac{K}{J}\omega_m + \frac{T_e}{J} - \frac{T_L}{J}$$

(17)

考虑控制系统中存在扰动,则机械角速度导数的表达式为

$$\dot{\omega}_m = -\frac{K}{J}\omega_m + \frac{T_e}{J} - \frac{d}{J}$$

(18)

其中, $d = \Delta T_e - K\Delta\omega_m - T_L - \Delta T_L$ 是控制系统的集总扰动。

默认负载转矩变化率为 0,由式(2)、式(3)可得, PMSM 的运动方程为

$$\begin{cases} \dot{\omega}_m = -\frac{K}{J}\omega_m + \frac{T_e}{J} - \frac{d}{J} \\ \dot{T}_L = 0 \end{cases}$$

(19)

对式(19)进行标准化,可得:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

(20)

其中, $x = [\omega_m \ T_L]^T$, $A = \begin{bmatrix} -\frac{K}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = [\frac{1}{J} \ 0]^T$, $C =$

$[1 \ 0]$, $y = \omega_m$, $u = T_e$ 。

构建 DOB 状态方程的表达式为

$$\begin{cases} \dot{\hat{A}} = A\hat{A} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{A} \end{cases}$$

(21)

其中, $L = [L_1 \ L_2]$ 是反馈增益矩阵,整理后的状态方程表达式为

$$\dot{\hat{A}} = (A - LC)\hat{A} + Bu + Ly$$

(22)

观测器的误差方程可以从系统的误差方程中得到,误差方程的表达式为

$$\dot{e} = x - \hat{x} = (A - LC)e$$

(23)

由式(23)可得,观测器状态方程的特征值与估计的速度有关,因此可以使用极点配置方法来设计状态增益 L 。

将扰动观测器代入到 NFTSMC 输出表达式(14),可得:

$$i_q^* = M \int_0^t \frac{g}{j\beta} [N + \varepsilon(e^{\alpha|x|} - 1)G(s) + kb|s|s] x_2^{1-\frac{j}{g}} dt + \frac{d}{J}$$

(24)

其中, $\tilde{d}$ 为 DOB 估计到的扰动值。

5 仿真实验与结果分析

为了验证新型趋近律的性能,利用 MATLAB/Simulink 建立了仿真模型。文中采用 $i_d = 0$ 的控制策略。由于 SMC 对非线性系统具有良好的控制效果,速度环采用了改进的 NFTSMC 算法。同时,利用 DOB 估

计控制系统的集总扰动并反馈给速度环 NFTSMC 进行扰动补偿,进一步增强系统的稳定性。PMSM 控制系统结构图如图 2 所示。PMSM 的主要参数如表 1 所示。

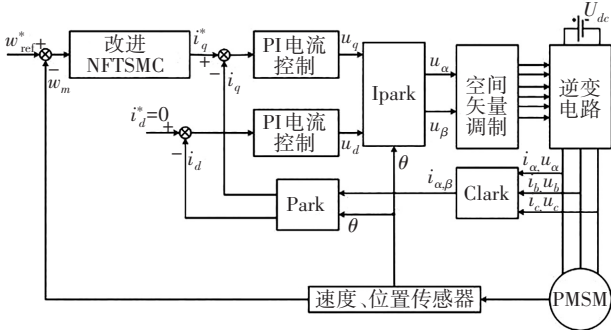


图 2 PMSM 控制系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of PMSM control system

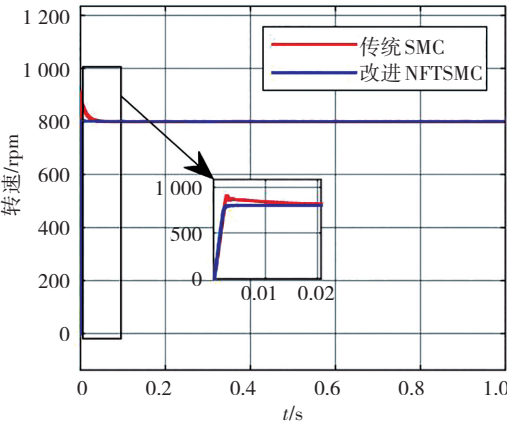
表 1 永磁同步电机主要参数

Table 1 Main parameters of PMSM

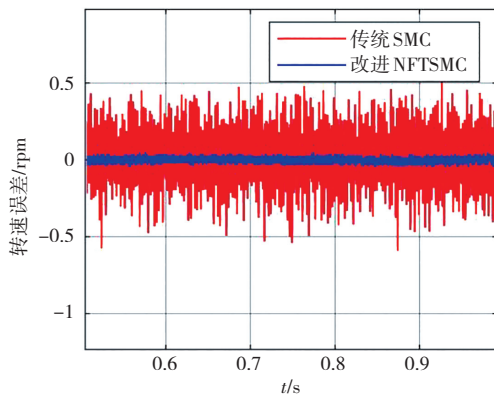
参数名称	参数值
定子电感/mH	6.4
定子电阻/ Ω	2.88
额定功率/W	750
额定转速/rpm	3 000
额定转矩/N·m	2.4
转动惯量/kg·m ²	0.000 182
极对数	5
摩擦系数/N·m·s	0.000 1

5.1 中高速条件下实验结果分析

图 3(a)是 PMSM 在 800 rpm 空载条件下的速度波形图。由图可知,传统 SMC 速度波形从启动到稳定所需的时间约为 0.05 s,改进的 NFTSMC 速度波形从启动到稳定时间约为 0.004 s。图 3(b)是 PMSM 在 800 rpm 空载条件下稳定后的速度误差波形图,由图可知,传统 SMC 抖振幅值约为 ± 0.4 rpm,改进 NFTSMC 的速度抖振幅值约为 ± 0.03 rpm。与传统 SMC 相比,改进 NFTSMC 响应时间更短,并且抖振更小。



(a) 速度波形图

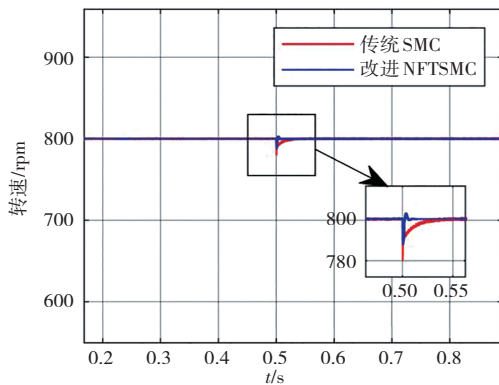


(b) 速度误差波形图

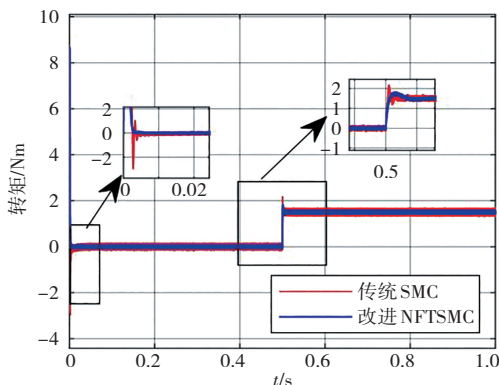
图 3 800 rpm 空载条件下速度和速度误差波形图

Fig. 3 Waveforms of speed and speed error under no-load condition at 800 rpm

图 4(a) 是 PMSM 在 800 rpm 带载条件下的速度波形图。由图可知, 在 0.5 s 时突加 1.7 N·m 的负载后, 传统 SMC 速度波形在突加负载后恢复稳定的时间约为 0.2 s, 速度沉降幅值约为 20 rpm。改进 NFTSMC 突加负载后速度恢复稳定的时间约为 0.13 s, 速度沉降幅值约为 14 rpm。可以看出, 本文所改进的 NFTSMC 策略具有更快的相应速度和更强的抗干扰能力。图 4(b) 是转矩波形图, 由图可知, 与传统 SMC 相比, 改进 NFTSMC 转矩波形响应时间更快, 波形更加平滑。



(a) 速度波形图

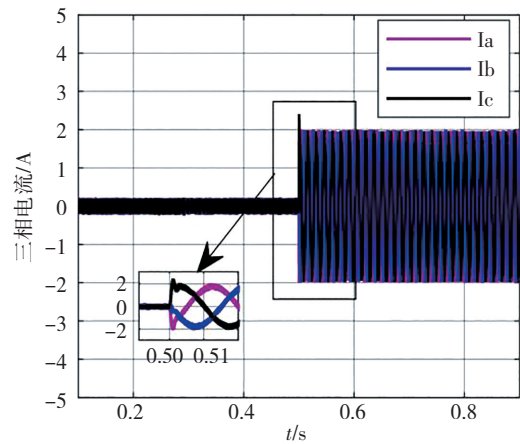


(b) 转矩波形图

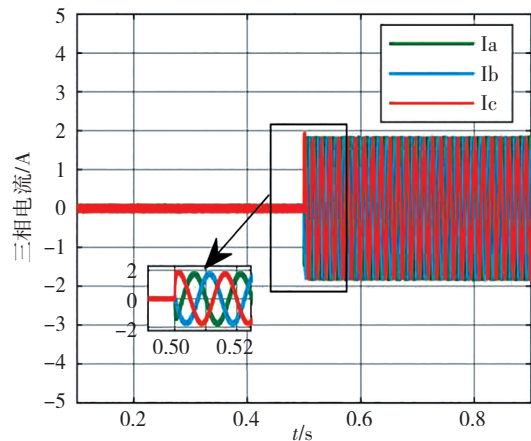
图 4 800 rpm 带载条件下速度和转矩波形

Fig. 4 Waveforms of speed and torque under load conditions at 800 rpm

图 5 是 PMSM 在 800 rpm 突加负载条件下的三相电流波形, 其中图 5(a) 是传统 SMC, 图 5(b) 是改进 NFTSMC。由图可知, 与传统 SMC 相比, 改进 NFTSMC 三相电流波形正弦度更高, 0.5 s 突加负载时的最大电流也得到了显著的抑制。



(a) 传统 SMC 三相电流波形



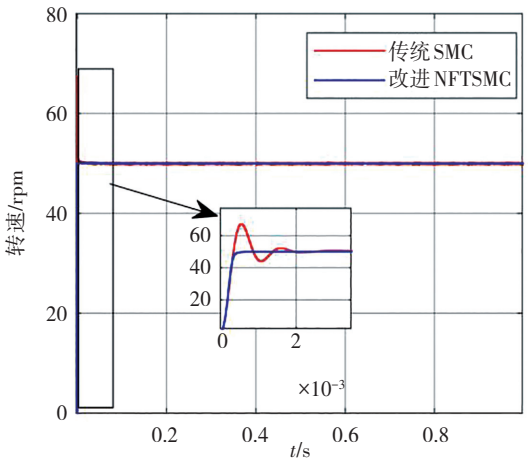
(b) 改进 NFTSMC 三相电流波形

图 5 带载条件下的三相电流波形

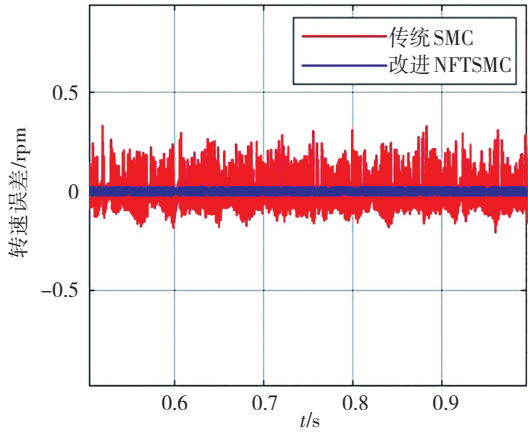
Fig. 5 Three-phase current waveforms under load conditions

5.2 低速条件下实验结果分析

图 6(a) 是 PMSM 在 50 rpm 空载条件下的速度波形图; 图 6(b) 是 PMSM 在 50 rpm 空载条件下稳定后的速度误差波形图; 由图可知, 传统 SMC 启动到稳定所需的时间约为 7 ms, 稳定后抖振的幅值约为 ± 0.13 rpm。改进 NFTSMC 启动到稳定所需时间约为 0.8 ms, 并且稳定后抖振幅值约为 ± 0.015 rpm。与传统 SMC 相比, 在低速条件下改进 NFTSMC 具有更快的响应速度和更小的抖振。



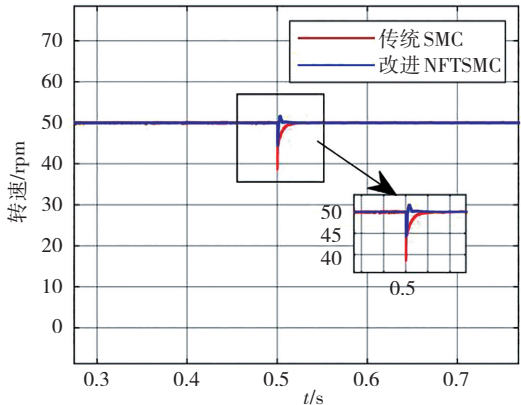
(a) 速度波形图



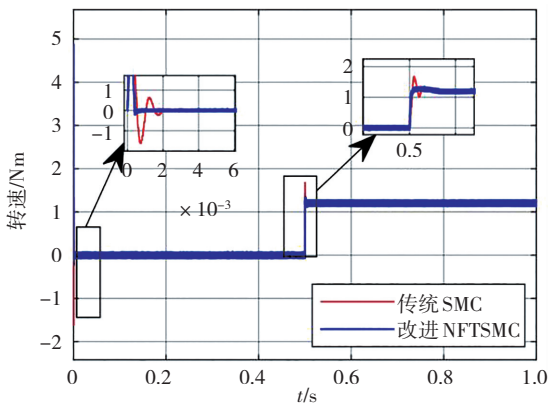
(b) 速度误差波形图

图 6 50 rpm 空载条件下速度和速度误差波形图
Fig. 6 Waveforms of speed and speed error under no-load at 50 rpm

图 7(a) 是 PMSM 在 50 rpm 带载条件下的速度波形图;图 7(b) 是 0.5 s 时突加 1.2 N·m 负载的转矩波形图。由图可知,在 0.5 s 时刻突加 1.2 N·m 的负载后,传统 SMC 恢复稳定所需的时间约为 0.05 s,改进 NFTSMC 速度恢复稳定所需的时间约为 0.01 s。可见,与传统 SMC 相比,改进的 NFTSMC 波形更加平稳,响应速度更快,抗干扰能力更好。



(a) 速度波形图



(b) 转矩波形图

图 7 50 rpm 带载条件下速度和转矩波形图

Fig. 7 Waveforms of speed and torque under load conditions at 50 rpm

6 结 论

为了解决基于指数趋近律的滑模控制系统无法同时满足趋近速度和抖振的问题,本文提出了一种基于新型趋近律的 NFTSMC 系统,该趋近律与传统指数趋近律相比,能够同时兼顾趋近速度和抖振的问题,不仅能快速的收敛至滑模面,还能减小稳态抖振。同时,针对控制系统的集总扰动引入 DOB,并将估计到的扰动值反馈给转速环 NFTSMC 中进行扰动补偿。最后,利用 Simulink 与传统 SMC 分别在高速和低速条件下进行比较分析。仿真结果表明:改进 NFTSMC 系统不仅能够加快系统的响应速度,而且超调和抖振均得到有效抑制,系统的动态性能得到有效地改善。

参考文献(References):

[1] NASR A, GU C, BUTICCHI G, et al. A low-complexity modulated model predictive torque and flux control strategy for PMSM drives without weighting factor[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11 (2): 1305-1316.

[2] 张惠智, 王英. 基于改进快速幂次趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 22-26. ZHANG Hui-zhi, WANG Ying. Sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on improved fast power reaching law[J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(3): 22-26.

[3] 赵凯辉, 戴旺珂, 周瑞睿, 等. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁同步电机新型无模型滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2375-2385. ZHAO Kai-hui, DAI Wang-kei, ZHOU Rui-rui, et al. Novel model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on extended sliding mode disturbance observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2375-2385.

- [4] 康尔良, 陈健. 永磁同步电机改进滑模无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(10): 88–97.
KANG Er-liang, CHEN Jian. Improved sliding mode sensorless control of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(10): 88–97.
- [5] 陈健, 凌有铸. 矢量细分的双控制器永磁同步电机直接转矩控制系统研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2015, 32(10): 68–72.
CHEN Jian, LING You-zhu. Research on Dual-controller segment permanent magnet synchronous motor direct torque control system based on vectors subdivision[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2015, 32(10): 68–72.
- [6] 康尔良, 贺建智, 王一琛. 永磁同步电机非奇异终端滑模控制器的设计[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 58–64.
KANG Er-liang, HE Jian-zhi, WANG Yi-chen. Design of non-singular fast terminal sliding mode controller for permanent magnet synchronous motors[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(12): 58–64.
- [7] 颜伟平, 王兵, 刘凯, 等. 基于改进型负载转矩观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(2): 15–22.
YAN Wei-ping, WANG Bing, LIU Kai, et al. Sliding mode control of PMSM based on improved load torque observer[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2021, 35(2): 15–22.
- [8] 高俊岭, 张翔, 丁昇. 模糊超扭曲滑模观测器在 PMSM 中的研究与应用[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(3): 27–33.
GAO Jun-ling, ZHANG Xiang, DING Sheng. Study and application of fuzzy super-twisting sliding mode observer in PMSM[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University(Natural Science Edition), 2023, 40(3): 27–33.
- [9] 刘胜, 郭晓杰, 张兰勇. 六相永磁同步电机新型单向滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(10): 10–19.
LIU Sheng, GUO Xiao-jie, ZHANG Lan-yong. Unidirectional sliding mode control for six-phase PMSM system[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(10): 10–19.
- [10] 张晓光, 赵克, 孙力, 等. 永磁同步电机滑模变结构调速系统动态品质控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 47–52.
ZHANG Xiao-guang, ZHAO Ke, SUN Li, et al. Sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on a novel exponential reaching law[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 47–52.
- [11] XU B, ZHANG L, JI W. Improved non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2753–2762.
- [12] 赵鑫宇, 王丽梅. 永磁直线同步电机自适应分数阶终端滑模控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5434–5443.
ZHAO Xin-yu, WANG Li-mei. Adaptive fractional-order terminal sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5434–5443.
- [13] NGUYEN T H, NGUYEN T T, NGUYEN V Q, et al. An adaptive sliding-mode controller with a modified reduced-order proportional integral observer for speed regulation of a permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 7181–7191.
- [14] WANG Y, FENG Y, ZHANG X, et al. A new reaching law for antidisturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4117–4126.
- [15] 陈国真, 田亚南. 基于滑模控制的永磁同步电机模糊调速系统[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(3): 28–32.
CHEN Guo-zhen, TIAN Ya-nan. Fuzzy speed control system of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode control[J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(3): 28–32.
- [16] 程勇, 李思卿, 李森豪. 永磁同步电机干扰观测复合滑模控制技术[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 39–46, 64.
CHENG Yong, LI Si-qing, LI Sen-hao. Compound sliding mode control technology of permanent magnet synchronous motor based on disturbance observation[J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(3): 39–46, 64.
- [17] MA Y, LI D, LI Y, et al. A novel discrete compound integral terminal sliding mode control with disturbance compensation for PMSM speed system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(1): 549–560.
- [18] 韩琨, 张长征, 袁雷. 基于超螺旋滑模扰动观测器的永磁同步电机无传感器抗干扰控制策略研究[J]. 包装工程, 2023, 44(3): 139–147.
HAN Kun, ZHANG Chang-zheng, YUAN Lei. Sensorless anti-disturbance control strategy of permanent magnet synchronous motor based on super-twisting sliding mode disturbance observer[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(3): 139–147.
- [19] 刘小俊. 基于扰动观测器的永磁同步电机电流谐波抑制方法[J]. 电工技术, 2022(23): 24–27, 31.
LIU Xiao-jun. Current harmonic suppression method for permanent magnet synchronous motor based on disturbance observer[J]. Electric Engineering, 2022(23): 24–27, 31.

责任编辑:陈 芳