

基于分数阶扩展滑模扰动观测器的 PMSM 无模型控制算法研究

程梦坤, 储剑波*

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106)

Research on Model-Free Control Algorithm for PMSM Based on Fractional-Order Extended Sliding Mode Disturbance Observer

CHENG Mengkun, CHU Jianbo*

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

Abstract: To address the issue of large speed fluctuations caused by sudden load changes in the speed control system of permanent magnet synchronous motor, this paper proposed a novel model-free control scheme for the speed loop based on fractional-order extended sliding mode disturbance observer (FOESMDO). The new algorithm improved the dynamic and static performances of the speed control system by establishing a new ultra-local model for the permanent magnet synchronous motor, which did not rely on motor parameters. With this model as the research object, a new model-free sliding mode control scheme was designed using fast terminal sliding mode control and an improved sliding mode switching function. To enhance the accuracy of disturbance estimation and reduce the chattering phenomenon in sliding mode control, the improved algorithm employed a FOESMDO for online estimation of unknown parts in the ultra-local structure. Finally, simulation comparison was made between the proposed fast terminal sliding mode control method with a new switching function based on FOESMDO and traditional methods, which verified the superior performance of the new model-free control algorithm (FOESMDO-ISFFTSMC) in improving the response speed and anti-interference property of the speed control system.

Key words: permanent magnet synchronous motor; fractional-order extended sliding mode disturbance observer; improved sliding mode switching function; model-free control algorithm

摘 要: 针对永磁同步电机调速控制系统突加负载时导致转速波动较大的问题,提出了一种基于分数阶扩展滑模扰动观测器(FOESMDO)的转速环新型无模型控制方案。新算法为了改善调速系统的动、静态性能,建立了不含电机参数的永磁同步电机新型超局部模型,以此为研究对象,借助快速终端滑模控制和改进型滑模切换函数设计新型无模型滑模控制器;同时为了提高扰动估计的准确性及减小滑模控制存在的抖振现象,改进算法采用分数阶扩展滑模扰动观测器进行超局部结构中未知部分的在线估计;最后,将所提出的基于 FOESMDO 的新型切换函数快速终端滑模控制方法同传统方法进行仿真对比,验证了新型无模型控制算法(FOESMDO-ISFFTSMC)在提高调速系统的响应速度和抗干扰能力方面的优异性能。

关键词: 永磁同步电机; 分数阶扩展滑模扰动观测器; 改进滑模切换函数; 无模型控制算法

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)因为其具有高功率密度、效率高、体积小、转动惯量小及结构简单等特点而在机器人技术、电动汽车以及航空航天中应用非常广泛,同时促进了电机调速系统控制的迅速发展。目前主流的控制方案为比例积分(Proportional Integral, PI)控制,但是 PI 控制存在积分饱和、处理非线性系统困难的缺点,以及参数摄动和外界干扰均会对其控制性能产生较大的影响,不适用于对调速系统性能要求高的场合。因此,为了满足对 PMSM 高控制性能的要求,许多先进的控制算法

基金项目: 航空科学基金项目(2023M024052001)

Aviation Science Foundation Project(2023M024052001)

得以提出并应用,诸如模型参考自适应控制^[1-2]、模型预测控制^[3-5]等。然而上述算法的高控制性能均需获得 PMSM 精确的数学模型,而 PMSM 作为一个复杂的强耦合、非线性的控制对象,获得其精确的数学模型是非常困难的,而且参数摄动会对模型的控制算法产生较大的不利影响。

为了减小对电机精确数学模型的严重依赖,无模型控制算法应运而生。作为一种不依赖于被控对象精确数学模型的控制算法,无模型控制算法自 20 世纪 70 年代被提出之后,便受到了相关领域学者们的关注,至今已经形成了较为完善的理论体系。法国学者 M. Fliess 提出了智能比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)的方法,采用 PID 设计控制律,借助超局部模型进行控制器的设计,提高了系统的动态特性,为无模型控制算法应用到电机控制提供了新的思路。还有学者提出了基于超局部结构的无模型电流预测控制^[6-7]和基于超局部结构的无模型转速控制算法。在 M. Fliess 的研究基础之上,Radu-Emil Precup 等人通过在智能 PID 中加入滑模控制环节,验证了理论和实验的可能性,证明了滑模控制方案可以进一步提高响应速度,增强鲁棒性和抗干扰能力,但是滑模控制中存在的抖振问题亟待解决。

文献[8]采用改进的滑模趋近律设计转速环控制器,借助扩展滑模扰动观测器进行扰动估计,提高扰动估计准确性的同时也减小了抖振,但由于滑模面采用比例滑模面,导致其响应速度受限。在文献[8]的基础上,文献[9]采用非奇异终端滑模控制进一步提高无模型滑模控制算法的响应速度,但应用该算法时,转速会存在稳态误差,且转速越高,稳态误差越大。文献[10]采用等效滑模控制,加快系统响应速度的同时,也减小了电机运行时转速的稳态误差,但稳定性证明困难,增加了算法的复杂性。文献[11]将终端滑模控制和自适应超螺旋滑模控制相结合,保证有限时间收敛的同时也抑制了滑模的抖振效应,但算法整体比较复杂,实现困难。文献[12]提出了一种改进的双幂次趋近律,根据控制状态相对于滑模面“距离”的不同,使得对应发挥主要作用的幂次项能自动调整,解决了快速趋近滑模面和抑制抖振之间的矛盾。

此外,对于无模型控制方案中未知项的估计,

文献[13]采用扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO),在提高系统鲁棒性的同时获得较快的动态响应,但是应用 ESO 存在参数整定难度高、稳定性证明困难等不足。文献[14]采用代数参数辨识的方案进行扰动估计以求取未知项扰动,但该方案对于采样数据的准确性要求较高,且所需的计算量也较大。文献[15]采用传统的滑模观测器结构,使用新型准滑动模态函数,减少了滑模抖振,且观测器结构简单、鲁棒性较好,但增加了计算量且影响了滑模观测器的响应速度。文献[16]采用双重扰动观测器的设计方案,用以提高系统鲁棒性,但是该观测器实现较为复杂且需要调节的参数较多。文献[17]引入分数阶滑模控制以减小滑模抖振、提高响应速度和抗干扰能力,但是该控制参数选择需要知道扰动的幅值,这是较难确定的。文献[18]采用扩展滑模扰动观测器的估计方式,借助双幂次趋近律来抑制抖振。该方式结构较为简洁、稳定性证明也较为容易,有效减小了抖振,且相比于文献[17]的方式,参数确定较简单。

为了减小负载扰动对电机转速的影响并实现快速响应,本文提出了一种基于分数阶扩展滑模扰动观测器(Fractional-Order Extended Sliding Mode Disturbance Observer, FOESMDO)的 PMSM 无模型控制策略。选用积分型快速终端滑模面避免微分带来的噪声,并且借助新型滑模切换函数设计切换控制律,在提高控制精度的同时,提高系统的响应速度。对于超局部无模型中未知项的估计,采用改进型分数阶扩展滑模扰动观测器,在减小抖振的同时,进一步提高扰动估计的准确性和响应速度,提高系统的抗干扰能力。

1 永磁同步电机数学模型

由于 PMSM 是一个强耦合、多变量及非线性的复杂系统,所以需要进行如下假设:

- (1) 忽略转子永磁体微小的电导率对主磁场的影响;
- (2) 气隙磁场正弦分布;
- (3) 不考虑磁路饱和;
- (4) 不计定、转子铁心的磁滞与涡流损耗。

基于上述假设,PMSM 的数学模型可用三组方程表示:

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d p & -L_q p_n \omega_m \\ L_d p_n \omega_m & R_s + L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p_n \omega_m \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L - B\omega_m) \quad (2)$$

转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [(L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q] \quad (3)$$

式中: L_d 、 L_q 分别为 d 轴、 q 轴电感; u_d 、 u_q 分别为 d 轴、 q 轴电压; ψ_f 为永磁体磁链; R_s 为定子电阻; ω_m 为转子机械角速度; J 为转动惯量; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; B 为阻尼系数; p_n 为极对数。

考虑电机存在参数摄动以及外部扰动, 得到 PMSM 的数学模型为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s0} + L_{d0} p & -L_{q0} p_n \omega_m \\ L_{d0} p_n \omega_m & R_{s0} + L_{q0} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p_n \omega_m \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_{f0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L - B_0 \omega_m) + \Delta T \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [(L_{d0} - L_{q0}) i_d i_q + \psi_{e0} i_q] + \Delta T_e = i_q + \Delta T_e \quad (6)$$

式中: X_0 为理想情况下的参数值; Δu_d 、 Δu_q 、 ΔT 和 ΔT_e 为实际运行时因参数摄动或者未建模部分带来的扰动量; ψ_{f0} 为转子磁链标称值; $\psi_{e0} = (L_{d0} - L_{q0}) i_d + \psi_{f0}$, 为电机运行过程理论实际作用磁链, 即有效磁链。

结合式(5)、式(6)可得, 在外部参数变化以及未知扰动的情况下, PMSM 转速环状态方程为^[19]

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n \psi_{e0} i_q + \Delta T_e - T_L - B_0 \omega_m \right) + \Delta T \quad (7)$$

由式(7)可知, 电机在实际运行过程中, 获取精确数学模型的难度较高, 因此需要不依赖于精确数学模型的无模型控制算法。

2 无模型控制器设计

2.1 新型超局部模型

一阶单输入单输出系统的超局部模型可表

示为^[20]

$$\begin{cases} y^{(\nu)} = \phi + \alpha \cdot u \\ y = x \end{cases} \quad (8)$$

式中: $x \in \mathbb{R}$ 为系统的状态变量; y 为单输出变量 (ν 代指微分阶数, 一般取 1); u 为控制变量; α 为非物理常数使得 αu 、 $y^{(\nu)}$ 具有相同的量级; ϕ 是不断更新的, 包括被控对象中各种未知的扰动, 而无需具体细分是何种扰动。

转速环中, 传统超局部模型结构为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \alpha i_q + D \quad (9)$$

式中: α 为定子 q 轴电流增益, 根据式(5)、式(6)通常初步可取 $\alpha = 3p_n \psi_{f0} / 2J$; D 为未知扰动部分。

未知项部分可以进一步分解为线性扰动项和非线性扰动项^[21], 即:

$$D = F + \beta \omega_m \quad (10)$$

故可在转速环中构造新型超局部模型:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \alpha i_q + \beta \omega_m + F \quad (11)$$

式中: β 为转速增益, 根据式(5)可初步取 $\beta = B_m / J$; F 为非线性扰动项。

由式(9)可以得到转速环新型超局部模型控制律为

$$i_q = - \frac{F - \dot{\omega}_m^* - u_c + \beta \omega_m}{\alpha} \quad (12)$$

联立式(9)、式(10)可得:

$$u_c = - (\dot{\omega}_m^* - \dot{\omega}_m) \quad (13)$$

由上述分析可得无模型控制结构如图 1 所示。

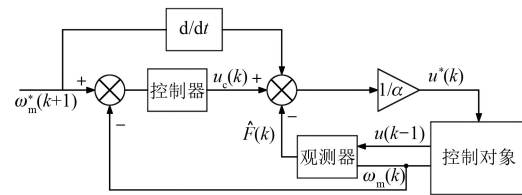


图 1 无模型控制框图

Fig. 1 Model-free control block diagram

2.2 基于快速终端滑模面的新型滑模控制器设计

采用等效滑模控制方式对无模型滑模控制器进行设计。为了减小滑模抖振、提高收敛速度, 采用快速终端滑模面进行等效控制项的设计, 并且采用新型滑模趋近律进行切换控制项的设计。

2.2.1 等效控制项设计

为了有效减少稳态误差、加快响应速度,选取快速终端滑模面,而为了减小微分带来的高频噪声,选用积分快速终端滑模面:

$$s = \int_0^t e dt + \lambda_1 e + \lambda_2 e^{p/q} \quad (14)$$

式中: s 为设计的滑模面; $e = \omega_m^* - \omega_m$; p, q 均为奇数,并且满足 $1 < p/q < 2$; $\lambda_1, \lambda_2 > 0$,为需要设计的常数增益。

对式(14)求导得到:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= e + \lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 \frac{p}{q} e^{p/q-1} \dot{e} = \\ &e + \left(\lambda_1 + \lambda_2 \frac{p}{q} e^{p/q-1} \right) \dot{e} = \\ &e + \left(\lambda_1 + \lambda_2 \frac{p}{q} e^{p/q-1} \right) (\dot{\omega}_m^* - \dot{\omega}_m) \end{aligned} \quad (15)$$

等效控制要求实现 $\dot{s} = 0$ 且结合式(11)、式(15)可得:

$$u_{eq} = \left(\frac{e}{\lambda_1 + \lambda_2 \frac{p}{q} e^{p/q-1}} - \beta \times \omega - F \right) / \alpha \quad (16)$$

2.2.2 切换控制项设计

对于切换控制律,本文提出新型滑模趋近律,其表达式为

$$u_{sw} = k_{sw1} \times [(1 + |e|) \times |s|]^a \times \text{sign}(s) + k_{sw2} \times s \quad (17)$$

式中: e 为控制状态; $0 < a < 1$ 为幂次; k_{sw1}, k_{sw2} 为控制增益。

上述滑模切换律在初始状态时,若控制状态距离滑模面较远,则滑模控制律由 $k_{sw1} \times [(1 + |e|) \times |s|]^a \times \text{sign}(s)$ 和 $k_{sw2} \times s$ 两部分组成。这两部分可以保证状态量远离滑模面时,有较高的趋近速度,此时 e 和 s 均有较大的数值,所以上述结构可以保证其在较短的时间内趋近滑模面。而 $0 < a < 1$ 是为了防止初始 $|e| \times |s|$ 变化过快,影响稳定性。而当控制状态趋近滑模面之后,此时 $s < 1$ 、 $e < 1$ 且同时起作用,但 $s < 1$ 起主要作用,保证了较快的响应速度、较小的抖振。

2.2.3 收敛性证明

结合等效控制项和切换控制项设计新型滑模控制器为

$$u_c = u_{eq} + u_{sw} = \left(\frac{e}{\lambda_1 + \lambda_2 \frac{p}{q} e^{p/q-1}} - \beta \times \omega - F \right) / \alpha +$$

$$k_{sw1} \times [(1 + |e|) \times |s|]^a \times \text{sign}(s) + k_{sw2} \times s \quad (18)$$

李雅普诺夫(Lyapunov)函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (19)$$

引入定理 I^[22]:

定理 I:考虑非李普希茨(non-Lipschitz)连续的非线性系统: $\dot{x} = f(x)$, $f(0) = 0$,假设在原点附近定义一个李雅普诺夫函数 $V(x)$,存在实数 $a > 0, b > 0, 0 < \gamma < 1$,并且该李雅普诺夫函数满足下列条件:

(1): V 正定;

(2): $\dot{V} + aV + bV^\gamma \leq 0$

则系统局部快速有限时间稳定,且收敛时间与初始状态相关,满足式(20):

$$T(s_0) \leq \frac{1}{a(1-\gamma)} \ln \left(\frac{aV^{1-\gamma}(s_0) + b}{b} \right) \quad (20)$$

式中: s_0 为滑模面的初始状态。

对式(19)求导得到:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s \times \left(e + \lambda_1 \times \dot{e} + \lambda_2 \times \frac{p}{q} \times e^{p/q-1} \times \dot{e} \right) \quad (21)$$

根据:

$$\begin{cases} \dot{e} = \dot{\omega}_m^* - \dot{\omega}_m = \dot{\omega}_m^* - (\alpha \times u + \beta \times \omega_m + F) \\ u_c = u_{eq} + u_{sw} \end{cases} \quad (22)$$

因为: $\dot{s} = 0 (u = u_{eq})$, 式(21)可表示为

$$\dot{V} = -s \times \left(\lambda_1 + \lambda_2 \times \frac{p}{q} \times e^{p/q-1} \right) \times (\alpha \times u_{sw}) \quad (23)$$

将式(17)代入式(23)后化简得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -s \times \left(\lambda_1 + \lambda_2 \times \frac{p}{q} \times e^{p/q-1} \right) \times (\alpha \times (k_{sw1} \times \\ &((1 + |e|) \times |s|)^a \times \text{sign}(s) + k_{sw2} \times s)) \end{aligned} \quad (24)$$

由于 $\lambda_1, \lambda_2 > 0$, 且 p, q 均为奇数, 满足 $1 < p/q < 2$, 使得 $\lambda_2 \times \frac{p}{q} \times e^{p/q-1} > 0$, 则 $\lambda_1 + \lambda_2 \times \frac{p}{q} \times e^{p/q-1} \geq \lambda_1$, $(1 + |e|) \geq 1$, 得到式(25):

$$\dot{V} \leq -s \times \lambda_1 \times \{ [\alpha \times (k_{sw1} \times |s|)^a] \times \text{sign}(s) + k_{sw2} \times s \} \quad (25)$$

令 $k_{v1} = \lambda_1 \times \alpha \times k_{sw1}$, $k_{v2} = \lambda_1 \times k_{sw2}$, 将 $V = \frac{1}{2}s^2 \geq$

$|s| = \sqrt{2} \times \sqrt{V}$ 代入式 (25) 得到:

$$\dot{V} + k_{v1} \times V^{\frac{1+a}{2}} + 2 \times k_{v2} \times V \leq 0 \quad (26)$$

根据定理 1, 得到:

$$t \leq \frac{1}{k_{v2}(1-a)} \ln \left(\frac{2k_{v2}V^{\frac{1-a}{2}}(s_0) + k_{v1}}{k_{v1}} \right) \quad (27)$$

根据式 (27) 可知, 控制器的参数 k_{v1} 、 k_{v2} 与收敛时间之间存在关系, 综合考虑滑模抖振和收敛时间进行参数确定。

3 分数阶扩展滑模扰动观测器设计

3.1 分数阶滑模控制

分数阶滑模控制^[23] 相对于整数阶滑模结构在提高滑模收敛速度、系统鲁棒性方面具有显著优势, 传统整数阶积分存在超调较大、调节时间长以及抖振严重等缺点, 采用分数阶滑模控制可有效减少整数阶积分存在的缺陷。图 2 为分数阶与整数阶滑模抖振分析示意图。

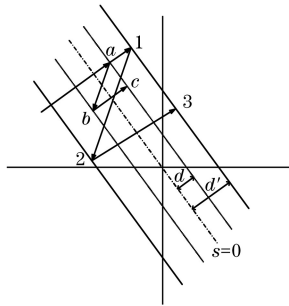


图 2 分数阶与整数阶滑模抖振分析

Fig. 2 Chattering analysis of fractional and integer order sliding modes

图 2 中: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ 、 $a \rightarrow b \rightarrow c$ 为一个抖振周期, d 、 d' 为振幅。在相同的抖振周期内, 整数阶滑模会沿着 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ 运动, 而分数阶滑模会沿着 $a \rightarrow b \rightarrow c$ 运动。

进行仿真分析, 假设系统的数学模型为

$$\dot{x} = \alpha \times u + \beta \times x + d(t) \quad (28)$$

式中: α 、 β 为常数值; u 为控制输入; x 为状态变量; $d(t) = 2\cos(62.8t)$ 为外加未知扰动。

选取积分型滑模面和分数阶积分型滑模面进行对比分析。整数阶积分滑模面:

$$\dot{s} = e + \int_0^t e dt \quad (29)$$

式中: $e = x^* - x$ 。

引入分数阶算子:

$$D^T = \begin{cases} \frac{d^T}{dt^T}, & \text{Re}(T) > 0 \\ 1, & \text{Re}(T) = 0 \\ \int_a^t (dt)^{-T}, & \text{Re}(T) < 0 \end{cases} \quad (30)$$

得到分数阶积分滑模面^[24]:

$$\dot{s} = e + D^T e \quad (31)$$

式中: 取 $-1 < T < 0$ (即取积分型分数阶滑模面)。

仿真得到的结果如图 3 所示。由图 3 可知, 分数阶滑模结构的收敛速度相比于整数阶滑模结构的收敛速度更快, 且对于没有额外扰动补偿的控制方案, 其稳态效果也更优。

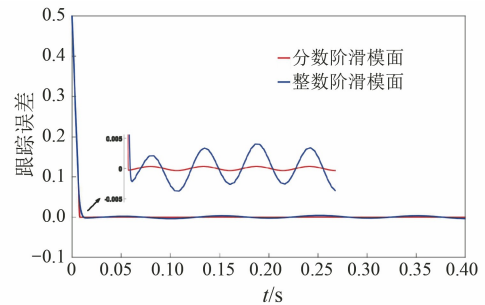


图 3 分数阶和整数阶滑模跟踪误差对比

Fig. 3 Comparison of tracking errors between fractional and integer order sliding modes

3.2 分数阶扩展滑模扰动观测器设计

引入扩展状态的 PMSM 转速环超局部模型, 其表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\omega_m}{dt} = \alpha i_q + \beta \omega_m + F \\ \frac{dF}{dt} = \eta(t) \end{cases} \quad (32)$$

式中: $\eta(t)$ 为系统未知部分的变化率。

对于上述系统, 设计转速环扩展滑模扰动观测器的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\omega}_m}{dt} = \alpha i_q + \beta \hat{\omega}_m + \hat{F} + u_{fosmo} \\ \frac{d\hat{F}}{dt} = \rho \times u_{fosmo} \end{cases} \quad (33)$$

式中: $\hat{\omega}_m$ 为机械角速度估计值; $\hat{F}$ 为系统未知部分的实时估计值, $d\hat{F}/dt$ 代表其变化率; u_{fosmo} 为待设计的滑模函数; $\rho > 0$ 为观测器增益。

式(33)与式(32)相减得到:

$$\begin{cases} \dot{e}_\omega = \beta e_\omega + e_F + u_{\text{fosmo}} \\ \dot{e}_F = \rho u_{\text{fosmo}} - \eta(t) \end{cases} \quad (34)$$

式中: $e_\omega = \hat{\omega}_m - \omega_m$ 为转速观测误差; $e_{\text{dis}} = \hat{F} - F$ 为系统未知部分的观测误差。

选用分数阶滑模面:

$$s = k_1 e_\omega + k_2 D^T e_\omega \quad (35)$$

对式(35)求导得:

$$\dot{s} = k_1 \dot{e}_\omega + k_2 D^{1+T} e_\omega \quad (36)$$

选用滑模趋近律:

$$\dot{s} = -\mu(1 + |s|) \text{sign}(s) \quad (37)$$

得到 u_{fosmo} 表达式为

$$u_{\text{fosmo}} = -\mu(1 + |s|) \text{sign}(s) - \frac{k_2}{k_1} D^{1+T} e_\omega - \beta e_\omega \quad (38)$$

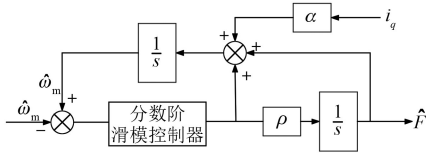


图4 分数阶滑模观测器控制框图

Fig. 4 Control block diagram of IFOESMDO

3.3 收敛性证明

选用形如式(19)所示的李雅普诺夫函数,并对该李雅普诺夫函数求导得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(k_1 \dot{e}_\omega + k_2 D^{1+T} e_\omega) = \\ &= s[k_1(\beta e_\omega + e_F + u_{\text{fosmo}}) + k_2 D^{1+T} e_\omega] = \\ &= k_1 s[e_F - \mu(1 + |s|) \text{sign}(s)] \leq k_1(e_F s - \\ &\mu |s|) \leq k_1(e_F - \mu) |s| \leq k_1(|e_F| - \mu) |s| \end{aligned} \quad (39)$$

选取 $\mu \geq |e_F|$ 即可保证 $\dot{V} \leq 0$, 实现分数阶扩展滑模扰动观测器的收敛。

4 仿真分析

4.1 参数鲁棒性仿真分析

基于第3节对分数阶扩展滑模扰动观测器PMSM无模型控制算法的分析,可以得到其整体的控制框图如图5所示。

为验证所提新算法的有效性和优越性,在Matlab/Simulink平台上搭建了仿真模型,并将新算法即基于FOESMDO的改进切换函数快速终端滑模控制(Improved Switching Function Fast

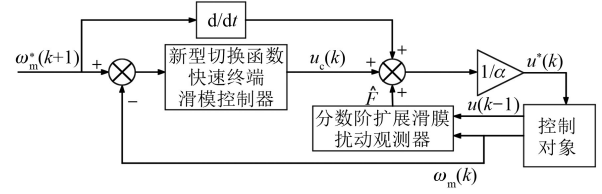


图5 基于分数阶扩展滑模扰动观测器的无模型算法控制框图

Fig. 5 Control block diagram of IFOESMDO-ISFFTSMC

Terminal Sliding Mode Control, ISFFTSMC) (FOESMDO-ISFFTSMC)与PI算法和基于整数阶扩展滑模扰动观测器(Integer Order Extended Sliding Mode Disturbance Observer, IOESMDO)的无模型超螺旋滑模算法(Model-free Super-twisting Sliding Mode Control, MFSTSMC)^[25](IOESMDO-MFSTSMC)进行对比分析。仿真使用电机模块参数如表1所示。

表1 PMSM电机参数

Tab. 1 Parameters of the PMSM

参数名称	参数值
直流母线电压/V	270
定子电阻 R_s/Ω	0.24
直轴电感 L_d/mH	0.964 2
交轴电感 L_q/mH	1.5
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.045 944
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 48
粘滞系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.000 161 9
极对数 p_n	3

仿真采用的开关频率为10 kHz,空载启动至额定机械角速度为524 rad/s,对应额定转速为5 000 r/min,电机原参数 $L_q = L_{q0}$, $\psi_f = \psi_{f0}$ 。在 $t = 0.2$ s时突加额定负载 $T_L = 5 \text{ N}\cdot\text{m}$,其仿真对比如图6所示。图7、图8、图9分别进行了永磁体磁链变化、 q 轴电感参数变化的仿真验证。

PI控制与IOESMDO-MFSTSMC转速波形对比如图6(a)所示,IOESMDO-MFSTSMC算法在角速度上升阶段的响应速度更快且转速超调仅为525 rad/s,而传统PI控制在角速度上升阶段出现超过530 rad/s的较大超调;外加负载时,其角速度降落仅为2.2 rad/s,也明显小于PI控制5.1 rad/s的角速度降落;角速度在外界突加扰动时,恢复到稳态所需要的时间为0.002 5 s,也明显小于PI控制恢复稳态所需要的时间。从图6(b)

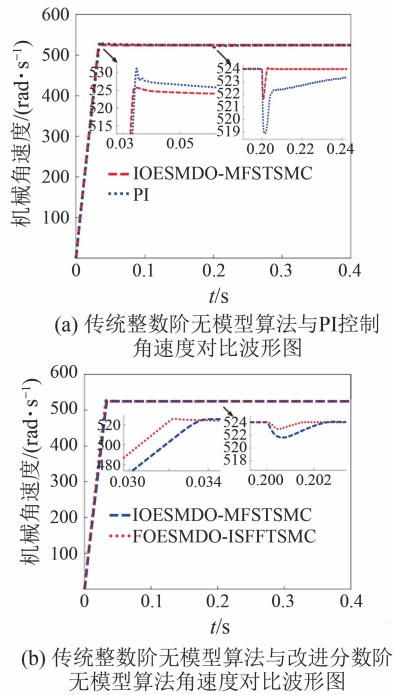


图 6 参数未扰动角速度空载仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of angular velocity without parameter perturbation under no-load condition

中可以看出, FOESMDO-ISFFTSM 的角速度在上升阶段的响应速度比 IOESMDO-MFSTSMC 更快, 且在外界突加负载时, 角速度进一步降为 1 rad/s, 恢复给定角速度的时间更短。

当永磁体实际磁链等于 0.7 倍的电机原磁链时, 从图 7(a) 可以看出, 在负载发生变化时, 相比于传统 PI 控制, 无模型算法的角速度降落仅为 4.3 rad/s, 而 PI 控制的角速度降落 21.5 rad/s。从图 7(b) 可以看出, 在磁链参数发生变化时, FOESMDO-ISFFTSMC 角速度的响应速度依然快于 IOESMDO-MFSTSMC; 且在外界突加负载时, FOESMDO-ISFFTSMC 角速度降落仅为 2.6 rad/s, 小于 IOESMDO-MFSTSMC 3.3 rad/s 的角速度降落; FOESMDO-ISFFTSMC 角速度降落恢复稳态角速度的时间仅为 0.001 5 s, 小于 IOESMDO-MFSTSMC 恢复稳态角速度的时间 0.009 s。

q 轴电感参数发生变化对三种控制策略的影响如图 8、图 9 所示。从图 8(a)、9(a) 可以看出, 电感变化时, 传统无模型算法相对于传统 PI 算法在外界突加负载时, 可以显著降低角速度的降落。而由图 8(b) 可以看出, 在电机 q 轴电感参数为 0.5 倍的电机原参数时, FOESMDO-ISFFTSMC 算

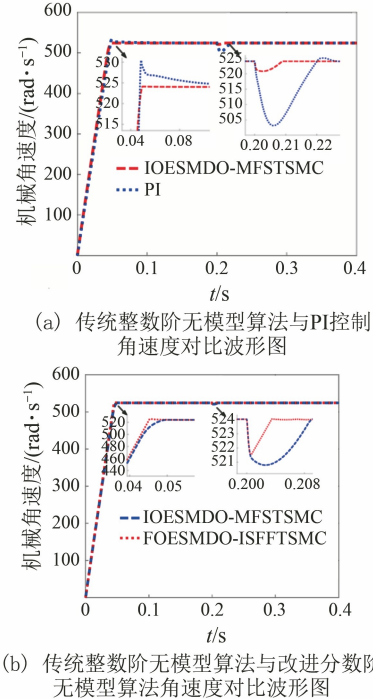


图 7 $\psi_r = 0.7\psi_0$ 角速度空载仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of angular velocity under no-load condition for $\psi_r = 0.7\psi_0$

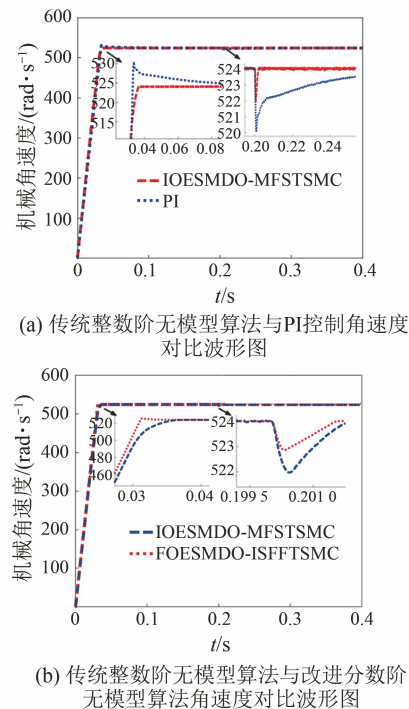
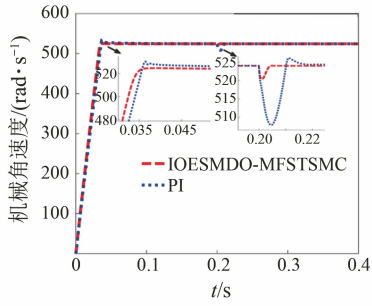


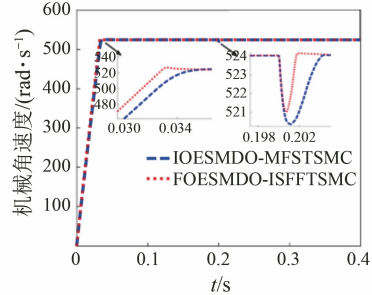
图 8 $L_q = 0.5L_{q0}$ 角速度空载仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of angular velocity under no-load condition for $L_q = 0.5L_{q0}$

法启动更快, 在外界突加额定负载时, 其角速度降



(a) 传统整数阶无模型算法与PI控制角速度对比波形图



(b) 传统整数阶无模型算法与改进分数阶无模型算法角速度对比波形图

图 9 $L_q = 1.3L_{q0}$ 角速度空载仿真图Fig. 9 Simulation diagram of angular velocity under no-load condition for $L_q = 1.3L_{q0}$

落仅为 1.2 rad/s , 小于 IOESMDO-MFSTSMC 2 rad/s 的角速度降落。由图 9(b) 可以看出, 在电机 q 轴电感参数为 1.3 倍的电机原参数时, FOESMDO-ISFFTSMC 算法保持启动更快的优点, 在外界突加额定负载时, 角速度降落仅为 2.9 rad/s , 小于 IOESMDO-MFSTSMC 3.6 rad/s 的角速度降落。

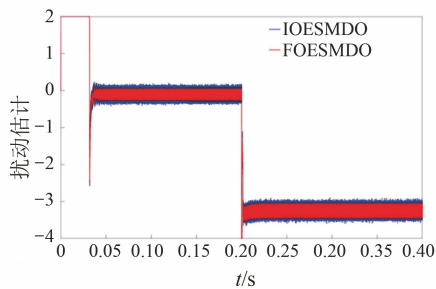


图 10 整数阶滑模扰动观测器与分数阶滑模扰动观测器扰动估计仿真图

Fig. 10 Simulation diagram of disturbance estimation for IOESMDO and FOESMDO

由图 10 可以看出, 基于 FOESMDO 的扰动估计方案相比于 IOESMDO 方案, 其估计的扰动波动更小, 并且由图 11 可以看出 FOESMDO 估计方

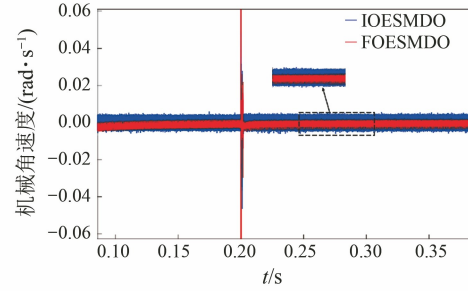


图 11 整数阶滑模扰动观测器与分数阶滑模扰动观测器角速度估计误差

Fig. 11 The estimation errors of angular velocity for IOESMDO and FOESMDO

案的角速度估计误差也要小于 IOESMDO。由此印证了 3.1 节中对于分数阶性能的描述, 体现了基于分数阶的扩展滑模扰动观测器在减小滑模抖振和提高系统稳态性能方面的重要作用。

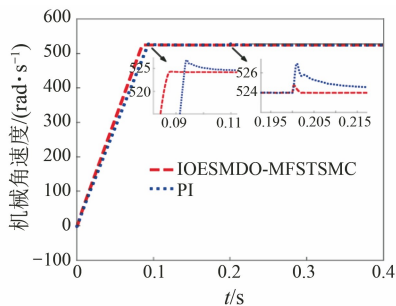
由图 6~图 11 的仿真分析可知, 在电机参数发生变化时, 无模型算法展现出相比于传统 PI 控制更加优异的鲁棒性以及抗干扰能力, 而新型无模型算法在保持传统无模型算法参数鲁棒性和优异抗干扰能力的基础上, 进一步提高了控制性能。

4.2 恒载启动仿真分析

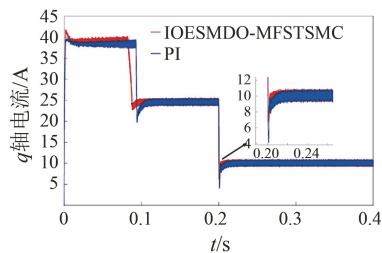
恒载启动部分仿真分析, 电机工作带载情况为: 带额定负载 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 进行恒载启动, 在 0.2 s 时, 突减负载至 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。PI 和 IOESMDO-MFSTSMC 的仿真对比如图 12 所示, IOESMDO-MFSTSMC 和 FOESMDO-ISFFTSMC 的仿真对比如图 13 所示。

由图 12(a) 可以看出, 相比于 PI 控制, IOESMDO-MFSTSMC 在外加恒定负载的情况下, 启动速度更快且无明显超调, 且在外界突降负载时, 角速度抬升仅为 0.8 rad/s , 远小于传统 PI 控制 2.8 rad/s 的角速度抬升。由图 12(b)、(c) 可以看出, IOESMDO-MFSTSMC 的 q 轴电流在外界突加负载的情况下, 波动更小。

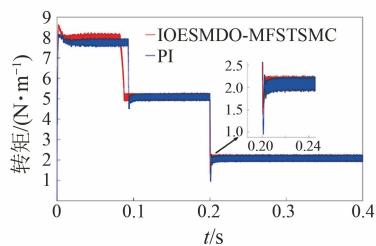
图 13(a) 仿真对比可以看出, 在以额定负载恒载启动的情况下, FOESMDO-ISFFTSMC 的启动速度相比于 IOESMDO-MFSTSMC 有所提升; 并且在突降负载时, 改进无模型算法的角速度抬升仅为 0.1 rad/s , 小于传统无模型算法 0.8 rad/s 的角速度抬升。从图 13(b)、(c) 的仿真结果中可以看出, 新算法的电流响应速度相比于 IOESMDO-MFSTSMC 有所提升, 转矩在外界负载发生变化



(a) 机械角速度仿真波形图



(b) q 轴电流仿真波形图



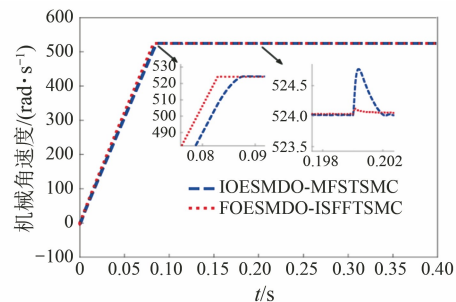
(c) 转矩仿真波形图

图 12 传统整数阶无模型控制算法和 PI 恒载仿真对比
Fig. 12 Comparison between IOESMDO-MFSTSMC and PI under constant load simulation

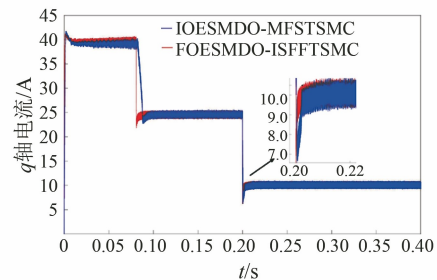
时,过渡时间更短,体现新算法对外界扰动的强鲁棒性以及较快的响应速度。

5 结语

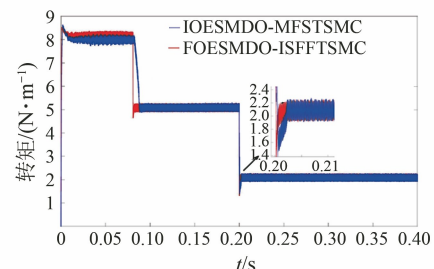
本文针对 PMSM 的调速控制突加负载时引起转速波动较大的问题,提出了一种基于分数阶扩展滑模扰动观测器的新型滑模切换函数快速终端滑模控制方案。改进控制算法不需要电机精确模型,采用新的滑模切换函数保证快速响应的同时减小了抖振,而分数阶扩展滑模扰动观测器在具有更快的响应速度的同时也增加了扰动估计的准确性,实现在负载突变时抑制转速波动的目的。借助仿真分析,验证了新算法相比于传统的 PI 控制和基于整数阶扩展滑模扰动观测器的超螺旋滑模控制方案在实现转速快速响应和负载突变时响应能力方面的优异性能。



(a) 机械角速度仿真波形图



(b) q 轴电流仿真波形图



(c) 转矩仿真波形图

图 13 传统整数阶无模型算法与改进分数阶无模型算法恒载仿真对比

Fig. 13 Comparison between IOESMDO-MFSTSMC and FOESMDO-ISFFTSMC under constant load simulation

参考文献

- [1] 张云, 阮承治. 一种用于 SPMSM 的改进型滑模模型参考自适应系统观测器[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 70-75.
ZHANG Y, RUAN C Z. An improved sliding mode model reference adaptive system observer for SPMSM [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10): 70-75.
- [2] 张懿, 徐斌, 魏海峰, 等. 新型模型参考自适应的 PMSM 无差拍电流预测控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 157-167.
ZHANG Y, XU B, WEI H F, et al. Novel model reference adaptive control for PMSM with beatless current prediction [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(9): 157-167.

- [3] 张云飞, 齐蓉. 永磁同步电机低开关损耗模型预测控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(7): 155-162.
ZHANG Y F, QI R. Low switching loss model predictive control for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(7): 155-162.
- [4] 刘述喜, 孙超俊, 杜文睿, 等. 改进的永磁同步电机双矢量模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 30-36.
LIU S X, SUN C J, DU W R, et al. Improved dual-vector model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(6): 30-36.
- [5] 杜承东, 聂子玲, 李忠瑞. 一种基于模型预测的永磁同步电机直接转矩控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 1-6.
DU C D, NIE Z L, LI Z R. A model predictive direct torque control strategy for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(5): 1-6.
- [6] XU L L, CHEN G M, LI Q Y. Ultra-local model-free predictive current control based on nonlinear disturbance compensation for permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Access, 2020, 8: 127690-127699.
- [7] NIU H C, MA Z X, HUANG J, et al. Ultra-local model-free predictive current control for PMLSM drive systems with moving horizon estimator [C] // 2022 IEEE Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, Haining, 2022.
- [8] 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): 2375-2386.
ZHAO K H, DAI W K, ZHOU R R, 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): 2375-2386.
- [9] ZHAO K H, YIN T H, ZHANG C F, et al. Robust model-free nonsingular terminal sliding mode control for PMSM demagnetization fault [J]. IEEE Access, 2019, 7: 15737-15748.
- [10] 赵凯辉, 易金武, 刘文昌, 等. 一种永磁同步电机无模型超螺旋快速终端滑模控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 88-98.
ZHAO K H, YI J W, LIU W C, et al. A model-free super-twisting fast terminal sliding mode control method for a permanent magnet synchronous motor [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 88-98.
- [11] KANG J S, HUANG X Y, CHANG X, et al. Ultra local model-free adaptive super twisting nonsingular terminal sliding mode control for magnetic levitation system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(5): 5187-5194.
- [12] 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.
GUO X, HUANG S D, PENG Y, et al. Sliding mode control of IPMSM speed regulation system based on an improved double power reaching law and global fast terminal sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 190-203.
- [13] 许令亮, 陈桂明, 李乔扬. 基于ESO的超局部无模型PMSM转速预测控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(11): 2204-2214.
XU L L, CHEN G M, LI Q Y. Ultra-local model-free speed predictive control based on ESO for PMSM [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(11): 2204-2214.
- [14] ZHOU Y N, LI H M, ZHANG H G, et al. Model free deadbeat predictive speed control of surface-mounted permanent magnet synchronous motor drive system [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2019, 14: 265-274.
- [15] 恩大凯, 王贞艳, 何延昭. 基于改进SMO的PMSM无传感器控制[J]. 微电机, 2024, 57(1): 42-47.
EN D K, WANG Z Y, HE Y Z. Sensorless control of PMSM based on improved SMO [J]. Micromotors, 2024, 57(1): 42-47.
- [16] 王栋栋, 刘旭东. 基于双重扰动观测器的PMSM改进无模型滑模控制[J/OL]. 控制工程, 2024-7-29. <https://link.cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20220527>.
WANG D D, LIU X D. Improved model free Sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on dual disturbance observer [J/OL]. Control Engineering of China, 2024-7-29. <https://link.cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20220527>.

- cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20220527.
- [17] 张会林, 林新才, 张建平. 基于分数阶扩展滑模扰动观测器的 PMSM 转速环无模型递归非奇异终端滑模控制[J]. 信息与控制, 2024, 53(2): 261-272.
ZHANG H L, LIN X C, ZHANG J P. Model-free recursive nonsingular terminal sliding mode control of PMSM speed loop based on fractional-order extended sliding mode disturbance observer [J]. Information and Control, 2024, 53(2): 261-272.
- [18] 赵凯辉, 刘文昌, 刘智诚, 等. 一种永磁同步电机无模型高阶滑模控制算法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1472-1485.
ZHAO K H, LIU W C, LIU Z C, et al. Model free high sliding mode control for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1472-1485.
- [19] 黄宜山, 唐润忠, 旷明秋, 等. 基于快速趋近律的永磁同步电机驱动系统改进无模型滑模控制[J]. 机车电传动, 2022, 3: 148-155.
HUANG Y S, TANG R Z, KUANG M Q, et al. Improved model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor drive system based on quick reaching law [J]. Electric Drive for Locomotives, 2022, 3: 148-155.
- [20] 罗昌茜. 基于新型超局部模型的永磁同步直线电机滑模控制系统研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
LUO C Q. Research on sliding mode control system of permanent magnet linear synchronous motor based on novel ultra-local model [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [21] ZHAO Z S, GU H R, ZHANG J, et al, Terminal sliding mode control based on super-twisting algorithm [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(1): 145-150.
- [22] KHOO S, XIE L, MAN Z. Integral terminal sliding mode cooperative control of multi-robot networks [C] // 2009 IEEE ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Singapore, 2009.
- [23] 吕凯琳. 基于无模型分数阶滑模控制的永磁直线同步电机无速度传感器控制[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
LV K L. Speed sensorless control of permanent magnet linear synchronous motor based on model free fractional sliding mode control [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [24] YU Y X, LIU X D. Model-free fractional-order sliding mode control of electric drive system based on nonlinear disturbance observer [J]. Fractal and Fractional, 2022, 6(10): 603.
- [25] 戴旺珂. 永磁同步电机无模型滑模鲁棒容错控制研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2023.
DAI W K. Research on model-free sliding-mode robust fault-tolerant control for PMSM [D]. Zhuzhou: Hu'nan University of Technology, 2023.

收稿日期:2024-04-24

收到修改稿日期:2024-06-27

作者简介:

程梦坤(1999-),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电动机控制,3200977475@qq.com;

* 通信作者:储剑波(1972-),男,博士,副教授,研究方向为电力电子与电力传动、永磁同步电机/异步电机控制,yubo_chu@nuaa.edu.cn。

Research on Model-Free Control Algorithm for PMSM Based on Fractional-Order Extended Sliding Mode Disturbance Observer

CHENG Mengkun, CHU Jianbo *

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

Key words: permanent magnet synchronous motor; fractional-order extended sliding mode disturbance observer; improved sliding mode switching function; model-free control algorithm

Permanent magnet synchronous motors are widely used in fields such as electric vehicles and aerospace due to their high power density, low density, compact size, simple structure, and high efficiency. However, as a complex, highly nonlinear, and strongly coupled control system, obtaining an accurate mathematical model for the permanent magnet synchronous motor is challenging. Moreover, during actual operation, the motor may be affected by parameter perturbations, as well as sudden external disturbances and other uncertain factors, all of which can impact its control performance and the stability of the control system. Therefore, this paper adopted a model-free control scheme to solve the above problems. By employing an ultra-local model to approximate the motor's behavior, a control method that did not rely on an accurate model of the motor was implemented. This ensured the system stability while enhancing the control system's response speed and disturbance rejection capability.

This paper proposed a speed loop control scheme based on a novel fast terminal sliding mode controller with a new switching function. The proposed controller consisted of two parts, a model-free sliding mode controller with a novel reaching law and a fractional-order extended sliding mode disturbance observer. To avoid high-frequency noise caused by differentiation, the model-free controller with the novel sliding mode reaching law adopted an integral fast terminal sliding mode surface and employed the equivalent sliding mode control

method. The controller design was divided into equivalent control terms and switching control terms. The switching control term adopted a new sliding mode reaching law, where the gain of the reaching law adjusted adaptively based on the magnitude of the state variable and the distance between the state variable and the sliding mode surface. This ensured a fast response while reducing sliding mode chattering when the control state approached the sliding mode surface. Subsequently, an extended sliding mode disturbance observer based on fractional order was proposed in this paper. Compared to traditional integer-order observers, the fractional-order disturbance observer could effectively reduce chattering caused by sliding modes while ensuring convergence speed. Moreover, the fractional-order observer offered unique advantages over integer-order observers in terms of improving robustness and disturbance rejection capabilities. The control block diagram of the novel switching function fast terminal sliding mode control based on the fractional-order extended sliding mode disturbance observer was shown in Fig.1.

In this paper, simulations were conducted under various load conditions to analyze the anti-disturbance performance of the proposed new algorithm compared to traditional model-free algorithms and proportional integral control. The results verified the superior anti-disturbance performance of the new algorithm. Subsequently, comparative simulations were carried out to compare the three control algorithms under parameter

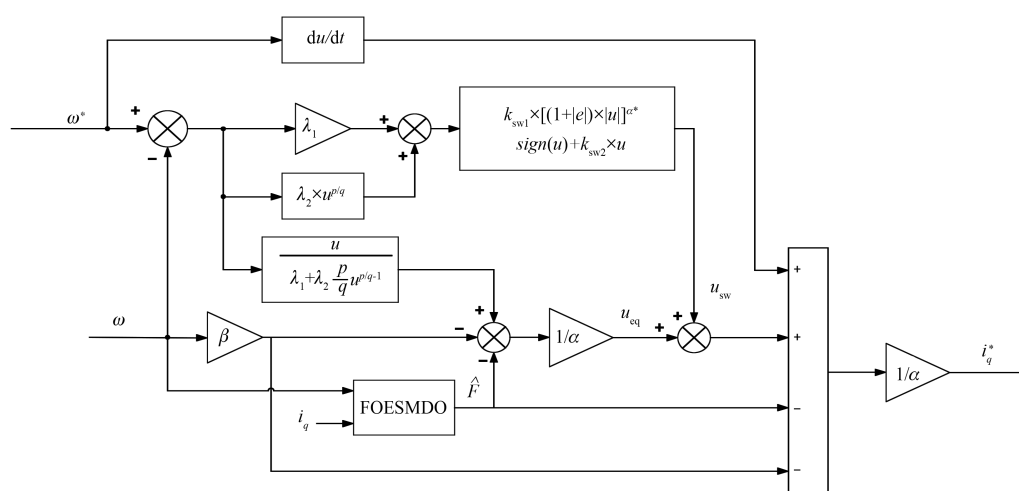


Fig. 1 Block diagram of FOESMDO-ISFFTSMC

perturbations, and the simulation results validated the strong robustness of the new algorithm against parameter variations.

Through simulation analysis under various working conditions, it has been verified that the new

algorithm exhibited excellent performance in terms of disturbance rejection capability and robustness to parameter perturbations without relying on an accurate mathematical model.