

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221731

基于超螺旋滑模观测器的永磁同步直线电机无模型控制

沈艳霞, 罗昌茜

(江南大学物联网技术应用教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

摘要:针对永磁同步直线电机(permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM)在运行过程中因参数失配和外部扰动导致控制性能下降的问题, 提出一种基于超螺旋滑模观测器的永磁同步直线电机无模型控制策略。根据PMLSM在dq旋转坐标系下参数摄动时的数学模型建立电机对应的新型超局部模型, 以避免参数失配。基于该新型超局部模型, 结合滑模控制设计了无模型滑模速度控制器, 通过Lyapunov稳定性理论证明该控制器的稳定性。同时, 为削弱传统扩展滑模观测器对新型超局部模型中未知量观测的抖振, 提高控制精度, 设计超螺旋滑模观测器(super-twisting sliding mode observer, STSMO)对未知量进行在线辨识并实现前馈补偿。最后, 将传统滑模控制、基于传统扩展滑模观测器的无模型控制算法与所提方法进行仿真和硬件在环实验对比, 结果表明所提方法改善了PMLSM控制系统的动态响应性能, 具有较强的鲁棒性。

关键词: 永磁同步直线电机; 新型超局部模型; 超螺旋滑模观测器; 滑模控制

Model-free control of a permanent magnet linear synchronous motor based on a super-twisting sliding mode observer

SHEN Yanxia, LUO Changxi

(Engineering Research Center of Application Internet of Things Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: There is a problem of control performance deterioration of a permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) when the parameters mismatch and external disturbances exist during operation. Thus a model-free control strategy for a permanent magnet linear synchronous motor based on a super-twisting sliding mode observer is proposed. From a mathematical model of PMLSM with parameter perturbation in the dq rotation coordinate system, a novel ultra-local model corresponding to the motor is established to avoid parameter mismatch. Based on this model and combined with sliding mode control, a model-free sliding mode speed controller is designed, and the stability of the controller is analyzed using Lyapunov stability theory. To weaken the chattering of the traditional extended sliding mode observer to the unknown part in the novel ultra-local model and improve the control accuracy, a super-twisting sliding mode observer (STSMO) is designed. This realizes online identification and feedforward compensation of the unknown part. Finally, simulation and hardware-in-the-loop experiment results comparing traditional sliding mode control, model-free control algorithm based on traditional extended sliding mode observer and the proposed method have verified that the proposed method can improve the dynamic response performance of a PMLSM control system and has strong robustness.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB1711102).

Key words: permanent magnet linear synchronous motor; novel ultra-local model; super-twisting sliding mode observer; sliding mode control

0 引言

永磁同步直线电机(permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM)具有结构简单、推力密

度大、机械损耗小、精度高、效率高和动态响应快的特点。以PMLSM为代表的直驱系统具有传统直线伺服系统——“旋转电机+滚珠丝杠”无法比拟的优势, 在高档数控机床、光刻机、物流传输等高精度工业生产领域具有广阔的应用前景^[1-2]。但PMLSM是一个复杂的非线性、强耦合、多变量系

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2020YFB1711102)

统, 而且 PMLSM 简化的物理结构存在齿槽效应、边端效应和饱和效应, 在运行过程中会出现温升参数变化和外部不确定扰动等, 因此需要设计合理的控制策略来实现 PMLSM 的高性能控制^[3]。

传统 PI 控制算法简单, 能消除稳态误差, 但当电机内部参数失配或外部扰动过大时, 一组固定的 PI 参数不能很好地适应工况的变化, 很难在整个工作范围内取得令人满意的控制效果。近年来, 滑模控制^[4-5]、预测控制^[6-7]、智能控制^[8]等先进控制策略被提出并运用到电机控制系统中。其中滑模控制 (sliding mode control, SMC) 响应快、对参数变化和扰动不灵敏、物理实现简单, 已被证明是改善电机控制系统抗干扰和鲁棒性的有效方法^[9-10]。

SMC 是一种非线性控制方法, 通过切换函数来实现, 根据系统状态变量偏离滑动模态的程度来切换控制器的结构, 从而使系统按照滑模规定的规律运行^[11]。传统滑模控制器依赖被控对象的精确数学模型, 当参数变化或扰动过大时, 需增大切换增益来保证鲁棒性, 但会出现抖振大的现象。目前, 国内外相关学者对此进行了改进, 文献[12]针对永磁同步电机速度控制系统, 提出了一种采用改进自适应趋近律的非奇异快速终端滑模控制器和干扰观测器补偿技术结合的控制方法, 取得了较好的抖振抑制效果。文献[13]提出了一种永磁同步直线电机自适应模糊分数阶滑模控制策略, 设计分数阶滑模控制器提高位置跟踪速度和控制精度, 采用神经网络观测器和自适应模糊趋近调节器补偿未知扰动对系统的影响及抑制抖振。文献[14]将一种新型的扰动观测器与超螺旋滑模技术相结合, 提高了永磁同步电机调速系统的鲁棒性。

法国学者 Michel Fliess 在 2008 年提出了超局部模型控制理论, 又称无模型控制 (model-free control, MFC), 利用输入和输出对系统进行重构得到不断更新的超局部模型, 重构的超局部模型将原有系统模型中已知结构、不确定性与外部干扰简化为一个未知量, 并采用辨识方法在线估计, 然后基于超局部模型进行相应控制器设计^[15-16]。MFC 不需要系统具体模型, 设计者根据所需控制性能设计相应的无模型控制器就可实现对非线性系统的高性能实时控制, 现已在四旋翼无人机^[17]、永磁同步电机^[18-19]控制中得以运用。文献[20-21]将 MFC 与 SMC 相结合形成新的控制方法, 既避免了参数变化大时传统滑模控制器需额外增加切换增益的问题, 又保留了滑模控制鲁棒性好和响应迅速的优点。

超局部模型中的集总未知量需要在线估计, 其估计精度和可靠性对系统整体的控制效果也至关重要,

目前文献中主要采用数值代数估计方法和观测器方法^[20]。基于观测器的辨识算法在保证实时性的同时, 鲁棒性更强, 其中滑模观测器易于实现且具有较好的鲁棒性, 而超螺旋算法 (super-twisting algorithm, STA) 是现有二阶滑模控制算法中唯一不需要滑模导数及其符号信息的算法, 超螺旋滑模观测器 (super-twisting sliding mode observer, STSMO) 继承了传统一阶滑模观测器鲁棒性强的特性, 且具有更小的抖振^[22-24]。

基于此, 本文将滑模控制和新型超局部模型理论结合, 提出一种基于超螺旋滑模观测器的永磁同步直线电机无模型控制方法。建立电机的新型超局部模型, 为了提高系统趋近速度和减小抖振, 选取一种自适应趋近律, 再基于电机的新型超局部模型设计积分滑模反馈控制器, 采用 STSMO 对新型超局部模型中未知量进行实时观测补偿, 进而获得快速的动态响应和较强的鲁棒性。

1 PMLSM 新型超局部模型

1.1 PMLSM 数学模型

忽略铁芯长度和磁饱和引起的边端效应、环境温度 and 电流频率变化对气隙磁场的影响、磁滞损耗、涡流损耗、空间谐波等, 气隙磁场以正弦规律分布, PMLSM 在旋转坐标下的数学模型为^[1]

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = u_d - Ri_d + \frac{\pi v}{\tau} L_q i_q \\ L_q \frac{di_q}{dt} = u_q - Ri_q - \frac{\pi v}{\tau} L_d i_d - \frac{\pi v}{\tau} \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 表示动子运动速度; τ 表示极距; R 表示定子电阻; i_d 、 i_q 分别表示 d 、 q 轴电流; u_d 、 u_q 分别表示 d 、 q 轴电压; L_d 、 L_q 分别表示 d 、 q 轴电感; ψ_f 表示永磁体磁链。本文采用表贴式永磁同步直线电机, $L_d = L_q = L$ 。

电磁推力 F_e 方程为

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

式中, p_n 为电机极对数。

电机机械运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} = F_e - F_l - Bv \quad (3)$$

式中: m 为动子质量; F_l 为负载推力; B 为粘滞摩擦因数。

考虑到实际运行中电机内部参数变化的影响, 式(1)可写为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_d - Ri_d + \frac{\pi v}{\tau} Li_q + \Delta u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = u_q - Ri_q - \frac{\pi v}{\tau} Li_d - \frac{\pi v}{\tau} \psi_f + \Delta u_q \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta u_d = -\Delta Ri_d - \Delta L \frac{di_d}{dt} + \frac{\pi v}{\tau} \Delta Li_q \\ \Delta u_q = -\Delta Ri_q - \Delta L \frac{di_q}{dt} - \frac{\pi v}{\tau} \Delta Li_d - \frac{\pi v}{\tau} \Delta \psi_f \end{cases} \quad (5)$$

式中: Δu_d 、 Δu_q 为电机参数发生变化时带来的定子电压干扰量; $\Delta \psi_f$ 为永磁体磁链的变化量; ΔR 、 ΔL 分别为定子电阻和电感的变化量。

参数摄动下电磁推力方程为

$$\begin{aligned} F_e &= p_n \frac{3\pi}{2\tau} [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] + \Delta F_e = \\ & p_n \frac{3\pi}{2\tau} \psi_f i_q + \Delta F_e \end{aligned} \quad (6)$$

式中, ΔF_e 为参数摄动时的电磁推力摄动量, 其计算如式(7)所示。

$$\Delta F_e = p_n \frac{3\pi}{2\tau} \Delta \psi_f i_q \quad (7)$$

在参数摄动和外部负载变化的影响下, 机械运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} = p_n \frac{3\pi}{2\tau} (\psi_f + \Delta \psi_f) i_q - F_l - Bv - \Delta F_l \quad (8)$$

式中, ΔF_l 为负载推力的变化量。

1.2 PMLSM 新型超局部模型

超局部模型控制(无模型控制)理论考虑未知动态系统的一般结构, 利用测量的输入输出数据在线估计未知动态系统并生成控制策略^[16]。Safaei 对超局部模型控制理论进行了拓展, 提出了新型超局部模型控制^[15]。

单输入单输出的非线性系统新型超局部模型表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha u + \beta x + f \\ y = x \end{cases} \quad (9)$$

式中: x 为系统状态变量; α 为非物理常数增益; β 为系统状态变量增益; f 为新型超局部模型参数, 包括所有结构参数, 如不确定性、扰动及其导数, 满足 Lipschitz 有界性和 Lebesgue 可测性原理; y 和 u 为系统的输出和控制输入。新型超局部模型控制(无模型控制)原理是采用辨识方法在线估计出 f , 再基于得到的新型超局部模型进行无模型控制器 u 的设计。

基于上述新型超局部模型理论, 根据式(8)与式(9)建立旋转坐标系下 PMLSM 转速环的新型超局部

模型, 如式(10)所示。

$$\frac{dv}{dt} = \alpha_v i_q + \beta_v v + F_v \quad (10)$$

式中: α_v 为待设计的 i_q 增益; β_v 为待设计的 v 增益; F_v 为系统未知部分, 包含 PMSLM 控制系统参数不确定、系统干扰等未知部分^[20]。一般情况下, 通过比较电机状态方程和新型超局部模型得到 $\alpha_v = 3p_n \pi \psi_f / (2\tau m)$ 、 $\beta_v = -B/m$ 。当然, α_v 和 β_v 取值可以是不精确的值, 因参数选取带来的误差部分已视为了 F_v 的一部分, F_v 不需要电机的准确参数就可以保持控制性能, 做到无模型控制^[18]。

2 无模型滑模控制器的设计

2.1 控制器设计

设 v^* 为参考动子转速, 定义转速误差 e 。

$$e = v^* - v \quad (11)$$

结合 PMLSM 的新型超局部模型式(10), 定义控制器状态变量, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} x_1 = \int e dt \\ x_2 = \dot{x}_1 = e = v^* - v \end{cases} \quad (12)$$

对式(12)中的 x_1 和 x_2 求导得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \beta_v x_2 - \alpha_v i_q + \dot{v}^* - \beta_v v^* - F_v \end{cases} \quad (13)$$

为了提高系统的动态响应和消除系统的稳态误差, 选择积分滑模面为

$$s = x_2 + cx_1 \quad (14)$$

式中, c 为待设计常数, $c > 0$ 。

对滑模面式(14)求导得

$$\dot{s} = \dot{x}_2 + cx_2 \quad (15)$$

将式(13)代入式(15)可得

$$\begin{aligned} \dot{s} = \dot{x}_2 + cx_2 = \\ \beta_v x_2 - \alpha_v i_q + \dot{v}^* - \beta_v v^* - F_v + cx_2 \end{aligned} \quad (16)$$

为了加快趋近速度和减小控制过程中出现的抖振问题, 采用趋近律如下^[25]:

$$\begin{cases} \dot{s} = -\varepsilon |s|^\delta \operatorname{sgn}(s) - ks, \delta = \alpha + (\lambda - \alpha)e^{-\beta|x|} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |x| = 0, \varepsilon > 0, k > 0, \alpha > 1, 0 < \lambda < 1, \beta > 0 \end{cases} \quad (17)$$

结合式(17)与式(16)可得到无模型滑模控制器表达式, 即

$$i_q^* = \frac{cx_2 + \beta_v x_2 - F_v + \dot{v}^* - \beta_v v^* + \varepsilon |s|^\delta \operatorname{sgn}(s) + ks}{\alpha_v} \quad (18)$$

其中, 未知量 F_v 采用 STSMO 观测得到, 记为 \hat{F}_v ,

为了体现所提方案控制性能的优越性, 将所提基于超螺旋滑模观测器的无模型滑模控制(MFSMC-STSMO)方案, 与带滑模扰动观测器补偿的传统积分滑模控制(SMC)方案、基于扩展滑模扰动观测器的无模型滑模控制(MFSMC-ESMDO)^[20]方案进行对比分析。

4.1 仿真分析

在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建模型进行仿真分析, 电机参数如表 1 所示, 控制器仿真参数如表 2 所示, 仿真中转速环的采样周期 T 设置为 $100 \mu\text{s}$, 电流环采样周期为 $10 \mu\text{s}$, 直流侧电压 $U_{\text{dc}} = 400 \text{ V}$ 。

表 1 永磁同步直线电机参数

Table 1 Parameters of the PMLSM

参数	数值	参数	数值
电机电阻 R/Ω	9.7	转子质量 m/kg	3.2
d 轴电感 L_d/H	0.0433	极矩 τ/mm	27
q 轴电感 L_q/H	0.0433	极对数 p_n	2
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.165	粘摩擦系数	0.5
		$B/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	0.5

表 2 控制器仿真参数

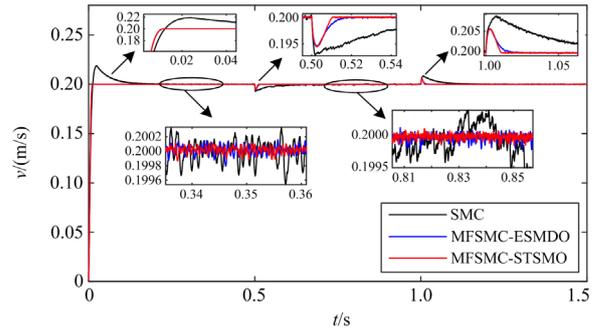
Table 2 Simulation parameters of the controller

控制方案	转速控制器	电流控制器
SMC	$c = 25; k = 250$	$k_p = 100; k_i = 600$
	$\varepsilon = 2; \varepsilon_{\text{SMO}} = -20$	
	$\alpha_v = 18; \beta_v = -0.15625$	
MFSMC-ESMDO ^[20]	$\alpha = 1.5; \lambda = 0.5$	$k_p = 100; k_i = 600$
	$\beta = 0.5; c = 0.01$	
	$\varepsilon = 35; k = 250$	
	$k_i = 150; \varepsilon_i = 20$	
	$l = 130$	
MFSMC-STSMO	$\alpha_v = 18; \beta_v = -0.15625$	$k_p = 100; k_i = 600$
	$\alpha = 1.5; \lambda = 0.5$	
	$\beta = 0.5; c = 0.01$	
	$\varepsilon = 35; k = 250$	
	$\lambda_i = -120; \sigma_i = -600$	

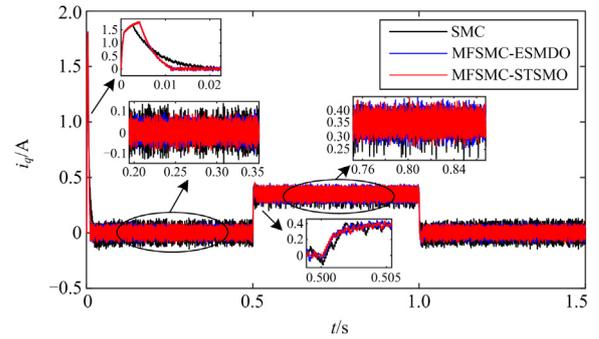
4.1.1 加减速仿真

电机空载状态下启动, 速度给定为 0.2 m/s , 在 0.5 s 时加入 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载, 在 1.0 s 时减去负载, 转速 v 、电流 i_q 和新型超局部模型中未知量 F_v 的观测值 \hat{F}_v 如图 4 所示。

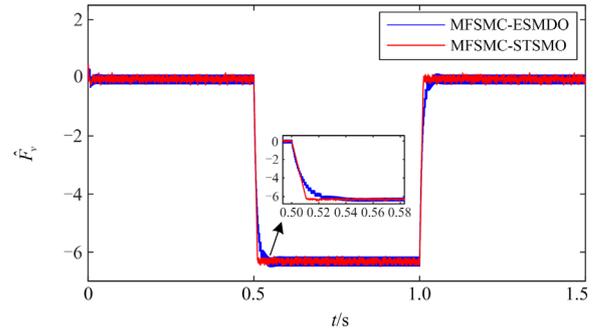
由图 4(a)、图 4(b)可以看出, 在电机启动阶段, 传统 SMC 方案速度超调大, 即便在很小的切换增益下, 电流波动抖振也比较大, 两种无模型滑模控制方案的速度均未产生超调, 且更快进入稳态状态, 电流抖振小, 而所提 MFSMC-STSMO 方案的速度稳态误差最小、精度更高, 电流波动幅值也小; 在受到负载扰动时, 所提 MFSMC-STSMO 方案速度



(a) 转子速度响应



(b) i_q 电流响应



(c) 新型超局部模型未知量 F_v 的观测值 \hat{F}_v

图 4 加减速仿真结果

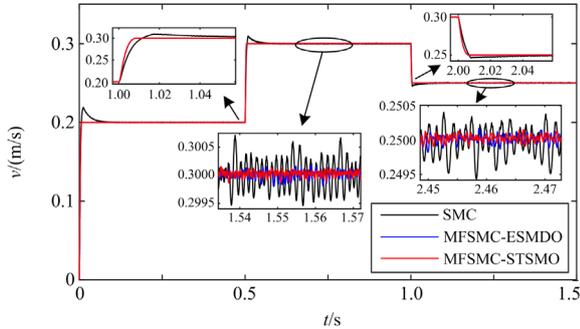
Fig. 4 Response curves of loading and unloading simulation

波动小, 且能快速恢复。图 4(c)为采用 ESMDO 和本文所提 STSMO 对新型超局部模型中未知量的观测结果对比, 两种方案仅观测器选择不同, 由图 4(c)可以看出, 当观测器收敛快速性近似时, STSMO 的观测响应更快且观测结果的抖振更小, 精度更高, 实现了新型超局部模型在线建立, 为所提出的无模型控制获得快速响应和良好的鲁棒性奠定了基础。由图 4 可知, 与传统 SMC 方案对比, 验证了所提方案有更快的响应速度和更强的鲁棒性, 与 MFSMC-ESMDO 方案对比, 所提 MFSMC-STSMO 方案具有更高的控制精度。

4.1.2 升降速仿真

电机空载启动, 在开始时给定转速设定为

0.2 m/s, 在 1 s 处设定为 0.3 m/s, 当电机运行至 2 s 处设定为 0.25 m/s, 转速 v 、电流 i_q 和新型超局部模型中未知量观测值 \hat{F}_v 如图 5 所示。



(a) 定子速度响应

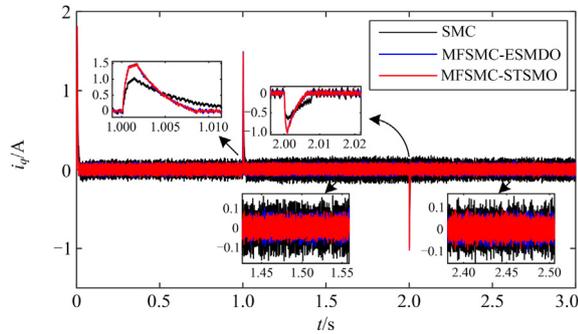
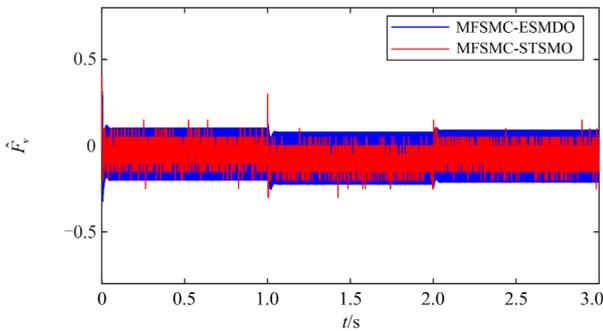
(b) i_q 电流响应(c) 新型超局部模型未知量 F_v 的观测值 \hat{F}_v

图 5 升降速仿真结果

Fig. 5 Results of speed up and down simulation

由图 5(a)、图 5(b)可以看出, 当给定转速变化时, 传统 SMC 方案速度超调大, 即便在很小的切换增益下, 电流的抖振很大, 而两种无模型控制方案能快速无超调跟踪速度变化, 所提 MFSCM-STSMO 方案的速度波动最小, 在稳态时电流抖振最小。图 5(c)为观测器对未知量的观测结果对比, 由图可知, STSMO 观测的抖振更小。由图 5 可知, 当给定速度变化时, 所提 MFSCM-STSMO 方案具有较好的控制精度和跟踪性能。

4.2 实验验证

为了进一步验证所提方案的可行性, 搭建了以 dSPACE1104 控制器为核心的实验平台进行验证。基于 dSPACE1104 为核心的 PMLSM 驱动系统结构图如图 6 所示, 实验平台如图 7 所示。实验电机的参数与仿真参数一致, 但因实际环境及器件选型等因素影响, 控制器参数进行了适当调整, 如表 3 所示, 实验中转速环和电流环的采样周期分别选取为 400 μ s 和 200 μ s, IGBT 的死区时间设为 5 μ s。

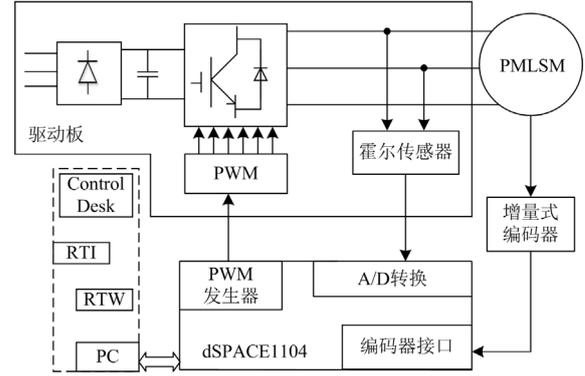


图 6 PMLSM 驱动系统框架

Fig. 6 Frame of PMLSM driving system

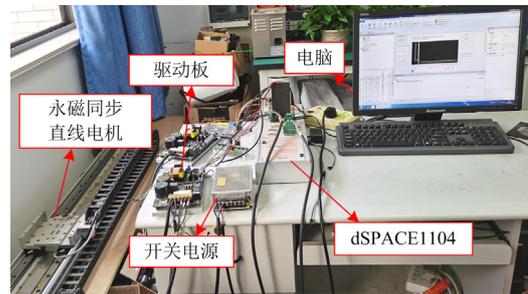


图 7 PMLSM 实验平台

Fig. 7 Experimental platform based on PMLSM control system

表 3 控制器实验参数

Table 3 Experimental parameters of the controller

控制方案	转速控制器	电流控制器
MFSCM-ESMDO ^[20]	$\alpha_v = 18; \beta_v = -0.156\ 25$	$k_p = 20; k_i = 600$
	$\alpha = 1.5; \lambda = 0.5$	
	$\beta = 0.5; c = 0.01$	
	$\varepsilon = 35; k = 250$	
	$k_1 = 70; \varepsilon_1 = 13$	
MFSCM-STSMO	$\alpha_v = 18; \beta_v = -0.156\ 25$	$k_p = 20; k_i = 600$
	$\alpha = 1.5; \lambda = 0.5$	
	$\beta = 0.5; c = 0.01$	
	$\varepsilon = 35; k = 250$	
	$\lambda_1 = -160; \sigma_1 = -600$	

电机空载启动, 给定转速设定为 0.2 m/s, 实验结果如图 8 所示。

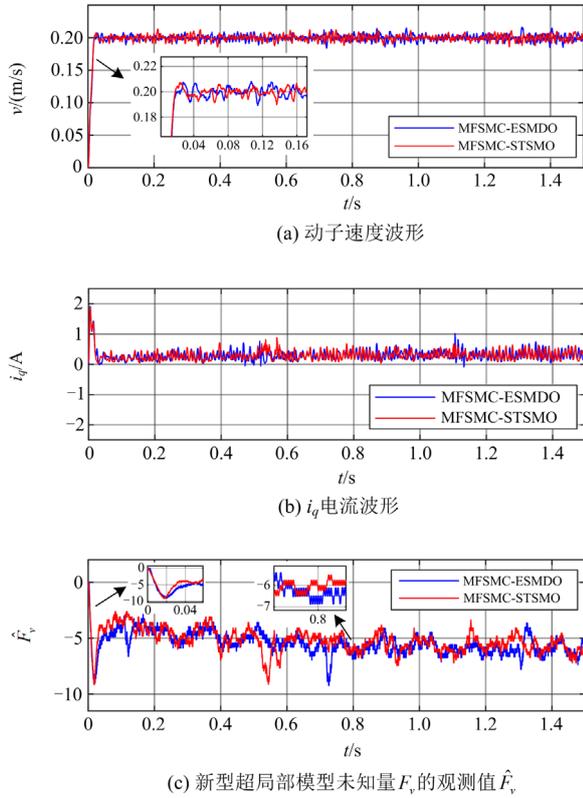


图 8 实验结果

Fig. 8 Experimental results

图 8(a)为动子速度响应曲线。由图 8(a)可以看出, MFSMC-ESMDO 方案和 MFSMC-STSMO 方案速度响应情况类似, 响应快速、有较小超调现象、能很快进入稳定状态。

图 8(b)为 i_q 响应曲线, 由于硬件采样周期限制和电机在实际运行中会出现随机不可避免的扰动、噪声, 电流出现了波动, 总体来看, 所提 MFSMC-STSMO 方案 i_q 波动幅度小一些, 平稳一些。

图 8(c)为 ESMDO 和所提的 STSMO 对新型超局部模型中未知量的观测曲线, 能随着电机的实时运动对随机噪声和扰动进行估计, 体现了新型超局部模型不断更新、在线建立的特点。从图 8(c)还可以看出, 当两种观测器收敛效果近似时, STSMO 可以在具有更小的抖振下实现类似的观测效果, 且更快进入稳定状态, 观测精度更高, 与理论仿真分析一致。

5 结论

为了减少参数失配和外部扰动对 PMLSM 调速系统的影响, 提高系统的动态性能和鲁棒性, 本文

提出了一种基于超螺旋滑模观测器的永磁同步直线电机无模型控制策略。考虑参数摄动和外部不确定扰动, 建立了 PMLSM 转速环的新型超局部模型, 新型超局部模型不涉及任何电机参数, 避免了参数失配; 为了提高响应速度和系统的鲁棒性, 结合 SMC 设计了基于新型超局部模型的无模型滑模控制器; 采用 STSMO 对新型超局部模型中的未知部分进行估计及前馈补偿, 使建立的新型超局部模型与电机实际模型实时保持一致, 提高了控制精度。通过仿真和半实物实验, 表明了所提出的控制策略启动平稳, 动态跟随性能好, 能够有效地减小负载扰动对系统的影响, 提高了系统的动态响应能力和鲁棒性。

参考文献

- [1] 杨瑞. 精密永磁直线同步电机系统扰动抑制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
YANG Rui. Research on disturbance rejection method of precision motor system with permanent magnet linear synchronous machine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [2] BODUROGLU A, DEMIR Y, CUMHUR B, et al. A novel track structure of double-sided linear PM synchronous motor for low cost and high force density applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(2): 1-5.
- [3] 李争, 安金峰, 肖宇, 等. 基于自适应观测器的永磁同步直线电机模型预测控制系统设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(6): 1190-1200.
LI Zheng, AN Jinfeng, XIAO Yu, et al. Design of model predictive control system for permanent magnet synchronous linear motor based on adaptive observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(6): 1190-1200.
- [4] 俞沛宙, 王澍, 杨继辉, 等. 基于灰狼优化的永磁同步电机自适应反推鲁棒控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 39-46.
YU Peizhou, WANG Shu, YANG Jihui, et al. Adaptive backstepping robust control strategy of PMSM based on grey wolf optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 39-46.
- [5] 赵希梅, 刘超, 朱国昕. 永磁直线同步电机自适应非线性滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(7): 39-47.
ZHAO Ximei, LIU Chao, ZHU Guoxin. Adaptive nonlinear sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(7): 39-47.
- [6] 杨玮林, 胡官洋, 许德智. 基于连续控制集的永磁同步直线电机模型预测控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(10): 1671-1682.
YANG Weilin, HU Guanyang, XU Dezhi. Model predictive control of permanent magnet linear synchronous motor based on continuous control set[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(10): 1671-1682.
- [7] 王金兵, 沈艳霞. 基于增量模型的永磁同步直线电机鲁棒预测电流控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020,

- 48(8): 69-77.
WANG Jinbing, SHEN Yanxia. Robust predictive current control for a permanent magnet synchronous linear motor based on an incremental model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 69-77.
- [8] 许德智, 黄泊珉, 杨玮林. 神经网络自适应的永磁直线同步电机超扭曲终端滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 64-71.
XU Dezhi, HUANG Bomin, YANG Weilin. Neural network adaptive super twist terminal sliding mode control for a permanent magnet linear synchronous motor[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 64-71.
- [9] SONG Jun, ZHENG Weixing, NIU Yugang. Self-triggered sliding mode control for networked PMSM speed regulation system: a PSO-optimized super-twisting algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 763-773.
- [10] 张荣芸, 周成龙, 时培成, 等. 基于自适应积分滑模与扰动观测的多 PMSM 同步控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 127-138.
ZHANG Rongyun, ZHOU Chenglong, SHI Peicheng, et al. Multi-PMSM synchronous control based on adaptive integral sliding mode and disturbance observation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 127-138.
- [11] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.
LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 407-418.
- [12] XU Bo, ZHANG Lei, JI Wei. 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.
- [13] CHEN S Y, CHIANG H H, LIU T S, et al. Precision motion control of permanent magnet linear synchronous motors using adaptive fuzzy fractional-order sliding-mode control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(2): 741-752.
- [14] HOU Qiankang, DING Shihong, YU Xinghuo. Composite super-twisting sliding mode control design for PMSM speed regulation problem based on a novel disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 2591-2599.
- [15] SAFAEI A, MAHYUDDIN M N. Adaptive model-free control based on an ultra-local model with model-free parameter estimations for a generic SISO system[J]. IEEE Access, 2018, 6: 4266-4275.
- [16] FLIESS M, JOIN C. Model-free control[J]. International Journal of Control, 2013, 86(12): 2228-2252.
- [17] CLOUTRE M, THITSA M, FLIESS M, et al. A robust but easily implementable remote control for quadrotors: experimental acrobatic flight tests[C] // 9th International Conference on Advanced Technologies, August 3-6, 2020: Istanbul, Turkey: 10-12.
- [18] ZHANG Yongchang, JIN Jialin, HUANG Lanlan. Model-free predictive current control of PMSM drives based on extended state observer using ultra local model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 993-1003.
- [19] GAO Siyu, WEI Yanjun, ZHANG Di, et al. Model-free hybrid parallel predictive speed control based on ultra local model of PMSM for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10): 9739-9748.
- [20] 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 Kaihui, DAI Wangke, ZHOU Ruirui, 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.
- [21] 侯利民, 何佩宇, 王巍, 等. 基于 ESO 的 PMSM 无模型自适应滑模控制研究[J]. 控制工程, 2022, 29(11): 2082-2089.
HOU Limin, HE Peiyu, WANG Wei, et al. Research on model-free adaptive sliding mode control for PMSM based on ESO[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(11): 2082-2089.
- [22] LIANG Donglai, LI Jian, QU Ronghai. Sensorless control of permanent magnet synchronous machine based on second-order sliding-mode observer with online resistance estimation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3672-3682.
- [23] 陶彩霞, 赵凯旋, 牛青. 考虑滑模抖振的永磁同步电机模糊超螺旋滑模观测器[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 11-18.
TAO Caixia, ZHAO Kaixuan, NIU Qing. Fuzzy super-spiral sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor considering sliding mode buffeting[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 11-18.
- [24] LIU Yongchao, LAGHROUCHE S, DEPERNET D, et al. Disturbance-observer-based complementary sliding-mode speed control for PMSM drives: a super-twisting sliding-mode observer-based approach[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5416-5428.
- [25] 王要强, 朱亚昌, 冯玉涛, 等. 永磁同步电机新型趋近律滑模控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 192-198.
WANG Yaoqiang, ZHU Yachang, FENG Yutao, et al. New reaching law sliding mode control strategy for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 192-198.
- [26] MORENO J A, OSORIO M. Strict Lyapunov functions for the super-twisting algorithm[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(4): 1035-1040.

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2023-01-31

作者简介:

沈艳霞(1973—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电机非线性控制、风力发电系统故障诊断与容错控制; E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn

罗昌茜(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步直线电机控制。E-mail: changxi_elec@163.com

(编辑 魏小丽)