

基于摩擦和扰动补偿的 永磁直线同步电机滑模控制^{*}

刘 鑫, 王丽梅

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 针对永磁直线同步电机(PMLSM)伺服系统的位置跟踪精度易受摩擦力、负载扰动等不确定性因素影响的问题,采用基于摩擦和扰动补偿的非奇异快速终端滑模控制(NFTSMC)方法来设计位置控制器。首先,建立含有 Stribeck 摩擦模型的 PMLSM 动态模型,使用自然选择粒子群算法对摩擦模型进行离线参数辨识;其次采用 NFTSMC 方法来确保系统状态快速收敛,避免奇异问题,利用辨识的摩擦模型进行补偿;最后采用滑模观测器对总不确定因素进行观测和补偿,削弱了抖振现象。仿真验证了所采用的控制策略提高了位置跟踪精度,同时具有快速收敛性和较强的抗扰性。

关键词: 永磁直线同步电机; 非奇异快速终端滑模控制; 自然选择粒子群算法; 滑模观测器; 摩擦力

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)04-0010-06

doi: 10.12177/emca.2021.208

Sliding Mode Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Based on Friction and Disturbance Compensation^{*}

LIU Xin, WANG Limei

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The position tracking accuracy of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) servo system is susceptible to uncertain factors such as friction and load disturbance. In view of the problem, a nonsingular fast terminal sliding mode control (NFTSMC) method based on friction and disturbance compensation is used to design the position controller. Firstly, the PMLSM dynamic model with Stribeck friction model is established, and the natural selection particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to identify the off-line parameters of the friction model. Secondly, the NFTSMC method is used to ensure the rapid convergence of the system state and avoid singular problems, and the identified friction model is used for compensation. Finally, the sliding mode observer is used to observe and compensate the total uncertainty, which weakens the chattering phenomenon. Simulation results verify that the control strategy improves the position tracking accuracy, and has fast convergence and strong disturbance immunity.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); nonsingular fast terminal sliding mode control (NFTSMC); natural selection particle swarm optimization algorithm; sliding mode observer; friction

收稿日期: 2021-11-10; 收到修改稿日期: 2022-02-24

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51875366)

作者简介: 刘 鑫(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁直驱伺服系统及其控制。

王丽梅(1969—), 女, 博士, 教授, 研究方向为交流伺服驱动技术。

0 引言

永磁直线同步电机(PMLSM)与旋转电机相比,可以实现更高的位置跟踪精度、更快的响应速度以及较低的机械噪声,而且不存在中间传动环节造成的机械损耗问题,因此,广泛应用于精密数控加工机床和磁悬浮列车等领域^[1-3]。但由于省去中间传动环节,非线性摩擦力、负载阻力等不确定性因素会导致位置跟踪精度下降^[4]。因此,设计有效的控制器抑制不确定性,对提高 PMLSM 的位置跟踪精度具有重要的意义。

滑模控制(SMC)广泛应用在非线性系统,具有算法实现简单、鲁棒性强等优点。但在普通滑模控制中,通常选择一个线性切换面,这会导致系统状态是指数收敛的,收敛速度取决于滑模控制参数,但是无法在有限时间内收敛^[5]。鲁棒性是利用足够大的干扰上界来实现的,但容易引起系统的抖振,破坏系统的控制精度。文献[6]将二阶超螺旋控制律引入快速终端滑模,避免了快速终端滑模的奇异问题,同时保证跟踪误差快速收敛。文献[7]提出自适应非奇异快速终端滑模控制(NFTSMC)方法,进一步提高了传统非奇异终端滑模的收敛速度,消除了非奇异快速终端滑模在出现扰动后位置跟踪曲线偏移期望位置曲线的问题。然而以上控制方法将所有的不确定因素进行集总处理,忽略了摩擦力对伺服控制系统的不良影响。

摩擦存在于所有的 PMLSM 伺服系统中,是影响伺服系统位置跟踪精度的一种主要干扰,容易导致系统出现稳态误差、极限环振荡,因此摩擦补偿得到了学者的广泛研究。摩擦补偿可分为基于摩擦模型补偿和非模型补偿两大类。文献[8]利用 PDL 算法学习系统中的摩擦力和端部效应并进行补偿,保证了系统对摩擦力和端部效应的抑制作用,利用自适应控制估计学习误差和非周期扰动,提高了系统的鲁棒性。文献[9-10]采用自适应模糊控制和神经网络逼近摩擦进行补偿,但是这些智能算法需要长时间的规则训练,神经网络响应速度慢,模糊控制的数据库和规则库选取困难,影响在实际中的可行性。文献[11]构造双重观测器观测 LuGre 摩擦模型的状态量,离线辨识摩擦模型参数并对系统自适应补偿,有效抑制了摩擦力产生的稳态误差和死区问题。但是该

方法忽略了负载扰动、辨识误差等不确定因素,容易造成跟踪精度下降。

因此,本文采用一种基于摩擦模型和扰动补偿的 NFTSMC。NFTSMC 能够实现系统快速收敛到滑模面,使系统具有非奇异性。利用自然选择粒子群算法离线辨识 PMLSM 伺服系统中存在的摩擦力并加以补偿,降低摩擦对系统的不良影响,削弱抖振现象,最后利用滑模观测器对摩擦辨识误差和负载扰动等不确定性进行观测并加以补偿,降低切换增益,提高控制精度。通过仿真证明所采用的控制方法改善了控制精度和抗扰性。

1 PMLSM 数学模型

仅考虑基波分量,忽略磁通畸变, d - q 轴模型下的 PMLSM 的数学方程为

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \pi v \psi_q / \tau \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \pi v \psi_d / \tau \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 、 L_d 、 L_q 、 ψ_d 、 ψ_q 为 d 、 q 轴电压、电流、电感、磁链; $\psi_d = L_d i_d + \psi_f$; $\psi_q = L_q i_q$; R_s 为定子电阻; v 为动子线速度; ψ_f 为永磁体在定子绕组直轴上的磁链分量; τ 为极距。

电磁推力方程为

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

式中: p 为极对数,本文中 $p=1$ 。

基于 $i_d=0$ 磁场定向控制,假设磁场直轴励磁电感等于交轴励磁电感,即 $L_d=L_q$,电磁推力方程为

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} p \psi_f i_q = K_f i_q \quad (4)$$

式中: K_f 为电磁推力系数。

机械运动方程为

$$M \ddot{x} = F_e - F_f - F_d \quad (5)$$

式中: x 为动子位置; M 为动子总质量; F_f 为摩擦力; F_d 为负载扰动主要包括系统建模不确定性、系统参数变化及推力波动等非线性因素。

摩擦力用 Stribeck 模型表示:

$$F_f = [F_c + (F_s - F_c) e^{-(v/v_s)^2}] \operatorname{sgn}(v) + Bv \quad (6)$$

式中: F_c 为库伦摩擦力; F_s 为静摩擦力; v_s 为 Stribeck 速度; B 为黏滞摩擦系数。

2 基于自然选择粒子群算法的摩擦模型辨识

基于自然选择的粒子群算法是借鉴自然选择的机理,根据适应值大小将粒子降序排序,将排名靠后的一半粒子代替排名靠前的一半粒子,同时保留原来每个粒子的最优解,提高局部开发能力增强收敛速度和精度^[12]。通过本算法可以辨识出更精确的摩擦模型。

当系统工作于稳态时, $\ddot{x} = 0$, 忽略负载扰动, 由式(5)、式(6)可知

$$F_e = [F_c + (F_s - F_c) e^{-(v/v_s)^2}] \text{sgn}(v) + Bv \quad (7)$$

系统采用速度闭环控制,测量系统的电磁推力大小。为保证能准确辨识出 Stribeck 速度,在低速区取一组间隔较小的速度序列 $\{0:0.01:0.3\}$,在高速区选取一组间隔较大的速度序列 $\{0.4:0.1:1\}$,每一个速度多次测试得到的电磁推力取平均值作为该速度对应的摩擦力值,构成摩擦力矩序列 $\{F_f^k\}_{k=1}^{37}$ 。

由式(6)可知, Stribeck 模型有四个未知参数 $[F_c, F_s, v_s, B]$, 因此, 摩擦模型参数的辨识目标为

$$\hat{g} = [\hat{F}_c, \hat{F}_s, \hat{v}_s, \hat{B}] \quad (8)$$

辩证误差为

$$e_k = F_{\text{f}}^k - \hat{F}_{\text{f}}^k, k = 1, 2, \dots, 37 \quad (9)$$

式中: F_f^k 值由恒速跟踪实验所得。

取适应值函数为

$$f = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{37} e_k^2 \quad (10)$$

采用自然选择粒子群辨识 Stribeck 摩擦模型参数选取学习因子 $l_1=l_2=1.9$, 群体数量 $N=100$, 惯性权重 $\omega=0.7$, 最大迭代次数 $T=100$, 待求解个数 $H=4$, 参数搜索范围 $F_c \in [5, 15]$, $F_s \in [10, 20]$, $v_s \in [0, 0.5]$, $B \in [0, 10]$ 。辨识结果如表 1 所示。

3 PMLSM 控制系统设计

基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 永磁直线伺服系统位置跟踪控制原理框图如图 1 所示。利

表 1 辨识摩擦模型参数结果表

参数名称	给定值	辨识值
库伦摩擦力 F_c/N	8	8.005 50
静摩擦力 F_s/N	15	15.008 10
Stribeck 速度 $v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.1	0.099 36
黏滞摩擦系数 $B/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	3	2.992 70

用离线辨识的摩擦模型对摩擦力进行补偿; NFTSMC 提高系统的快速收敛性; 采用滑模观测器对摩擦辨识误差和负载扰动等不确定因素进行观测和补偿, 削弱系统抖振。

设计控制器首先定义位置跟踪误差为

$$e_1 = x_{\text{ref}} - x \quad (11)$$

$$e_2 = \dot{e}_1 = \dot{x}_{\text{ref}} - \dot{x} \quad (12)$$

式中: e_1 为误差; x_{ref} 为参考位置; x 为实际位置。

PMLSM 动力学方程可重新描述如下:

$$\ddot{x} = f(x, t) + bu + D \quad (13)$$

式中: $f(x, t) = -F_i/M$; $b = K_i/M$ 为已知量; $u = i_q$ 为控制输出; D 是负载扰动; 假设 $f(x, t)$ 、 D 有界且 $|f(x, t)| < \alpha$, $|D| < \beta$, α, β 均为正常数。

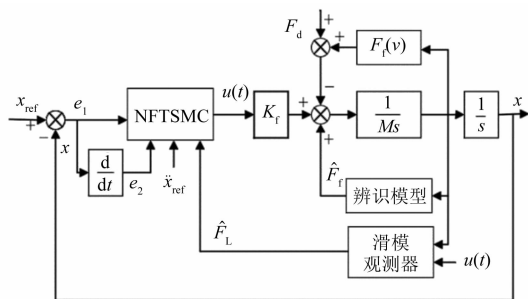


图 1 基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 永磁直线
伺服系统位置跟踪控制原理框图

3.1 NFTSMC 设计

为了提高系统收敛速度和非奇异特性,定义 NFTSMC 滑模面为

$$s(t) = e_1 + k_1 |e_1|^{\mu_1} \text{sgn}(e_1) + k_2 |e_2|^{\mu_2} \text{sgn}(e_2) \quad (14)$$

式中: k_1, k_2 为正实数; $1 < \mu_2 < 2; \mu_1 > \mu_2$ 。

对滑模面求导得:

$$\dot{s}(t) = e_2 + \mu_1 k_1 |e_1|^{\mu_1-1} e_2 + \mu_2 k_2 |e_2|^{\mu_2-1} e_2 \quad (15)$$

趋近律选取指数趋近律:

$$\dot{s}(t) = -ks - \mathcal{E} \text{sgn}(s) \quad (16)$$

式中: $k \in R^+$; $\varepsilon = \alpha + \beta + \eta$, η 为小的正常数。

滑模控制律为

$$u = b^{-1} \left[\ddot{x}_{\text{ref}} + \frac{1}{k_2 \mu_2} |e_2|^{2-\mu_2} (1 + \mu_1 k_1 |e_1|^{\mu_1-1}) \text{sgn}(e_2) + ks + \varepsilon \text{sgn}(s) \right] \quad (17)$$

因为 NFTSM 中 $1 < \mu_2 < 2$, $\mu_1 > \mu_2$, 所以不包含跟踪误差 e_1 和误差的导数 e_2 的负指数项, 系统能避免奇异问题。

3.2 滑模观测器设计

干扰观测器需要精确的系统模型, 在观测较大的扰动时, 不能通过算法对观测误差进行调节。因此, 本文采用滑模观测器观测摩擦模型辨识误差和负载扰动, 利用观测结果对系统进行反馈补偿, 降低切换增益进而削弱抖振。为了便于滑模观测器设计, 将摩擦辨识误差和负载扰动进行集总观测。集总扰动的变化率相对于转子线速度的变化率要慢得多, 扰动的变化率可近似为 0^[13]。

由式(5)可得:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{式中: } \mathbf{x} = [v \quad F_L]^T; \mathbf{y} = v; u = i_q; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{K_f}{M} & 0 \end{bmatrix}^T; \mathbf{C} = [1 \quad 0]; F_L \text{ 为摩擦模型辨识误差和负载扰动的总值。}$$

构造滑模观测器为

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{v}} \\ \dot{\hat{F}}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{M} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{v} \\ \hat{F}_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{K_f}{M} \\ 0 \end{pmatrix} i_q + \begin{pmatrix} -1 \\ a_1 \end{pmatrix} u_1(t) \quad (19)$$

定义滑模面 $\sigma = \tilde{v} = \hat{v} - v$, $\tilde{F}_L = \hat{F}_L - F_L$ 。由式(18)和式(19)可得滑模观测器误差方程为

$$\begin{pmatrix} \dot{\tilde{v}} \\ \dot{\tilde{F}}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{M} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{v} \\ \tilde{F}_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 \\ a_1 \end{pmatrix} u_1(t) \quad (20)$$

本文选取指数趋近律, 表示为

$$\dot{\sigma} = -a_2 \sigma - a_3 \text{sgn}(\sigma) \quad (21)$$

式中: $a_2 > 0, a_3 > 0$ 。

$$\dot{\sigma} = \dot{\tilde{v}} = -u_1(t) = -a_2 \sigma - a_3 \text{sgn}(\sigma) \quad (22)$$

可得滑模观测器控制律为

$$u_1(t) = a_2 \sigma + a_3 \text{sgn}(\sigma) \quad (23)$$

构造李雅普诺夫函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (24)$$

对 V_1 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = \sigma \dot{\sigma} &= \sigma \left[-\frac{\tilde{F}_L}{M} - a_2 \sigma - a_3 \text{sgn}(\sigma) \right] \leq \\ &-a_2 \sigma^2 - a_3 |\sigma| - \frac{\tilde{F}_L}{M} \sigma \leq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

当 $a_3 > -\tilde{F}_L/M$ 时, 由李雅普诺夫函数可知, 观测器是稳定的。

当滑模观测器到达滑模面时, $\dot{\sigma} = \sigma = 0$ 。代入式(20)可得

$$\dot{\tilde{F}}_L = -a_1 \frac{\tilde{F}_L}{M} \quad (26)$$

若 $a_1 > 0$, 则 $\tilde{F}_L$ 呈指数型收敛于零。

为了有效削弱抖振, 将滑模观测器控制律改为

$$u_1(t) = a_2 \sigma + a_3 \text{sat}\left(\frac{\sigma}{\phi}\right) \quad (27)$$

式中: ϕ 为边界层厚度。

3.3 基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 设计

结合辨识的 Stribeck 摩擦模型和滑模观测器的观测结果, 对 PMLSM 伺服系统进行前馈补偿, 以降低摩擦力对系统的不良影响, 减小切换项的增益, 进而削弱抖振。NFTSMC 和滑模观测器都具有响应速度快、实现简单、实时性强的优点, 因此本文虽然采用多种算法相结合, 但整体上不会对系统的实时性造成太大的影响。新的控制律表示为

$$\begin{aligned} u &= b^{-1} \left[\ddot{x}_{\text{ref}} + ks + \varepsilon_2 \text{sgn}(s) + \frac{1}{M} \hat{F}_L + \right. \\ &\left. \frac{1}{k_2 \mu_2} |e_2|^{2-\mu_2} (1 + \mu_1 k_1 |e_1|^{\mu_1-1}) \text{sgn}(e_2) \right] \end{aligned} \quad (28)$$

式中: $\hat{F}_L$ 为滑模观测器的观测值, 假设 $|\tilde{F}_L|/M < \alpha_1$, 切换增益 $\varepsilon_2 = \alpha_1 + \eta$ 。

构造李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (29)$$

对 V 求导可得:

$$\dot{V} = s \dot{s} =$$

$$\begin{aligned}
& s(e_2 + \mu_1 k_1 |e_1|^{\mu_1-1} e_2 + \mu_2 k_2 |e_2|^{\mu_2-1} \dot{e}_2) = \\
& s[e_2 + \mu_1 k_1 |e_1|^{\mu_1-1} e_2 + \mu_2 k_2 |e_2|^{\mu_2-1} (\dot{x}_{\text{ref}} - \\
& \quad f(x, t) - bu - D)] = \\
& s\mu_2 k_2 |e_2|^{\mu_2-1} \left[-ks - \varepsilon_2 \text{sgn}(s) - \frac{\tilde{F}_L}{M} \right] = \\
& \mu_2 k_2 |e_2|^{\mu_2-1} \left[-ks^2 - (\alpha_1 + \eta) |s| - \frac{\tilde{F}_L}{M} s \right] \leq \\
& \mu_2 k_2 |e_2|^{\mu_2-1} (-ks^2 - \eta |s|) \leq 0 \quad (30)
\end{aligned}$$

由李雅普诺夫稳定性理论可知, PMLSM 伺服系统渐进稳定, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow 0$ 。说明系统能保证位置跟踪误差收敛到滑模面。

4 仿真分析

在 MATLAB 的 Simulink 模块下进行仿真, 验证设计控制器的有效性。仿真中所用直线电动机参数为: $M=8.2 \text{ kg}$, $K_f=13.2 \text{ N/A}$, $\tau=32 \text{ mm}$, $\psi_f=0.09 \text{ Wb}$ 。NFTSMC 的参数: $k_1=4$, $k_2=1$, $\mu_1=4$, $\mu_2=1.9$, $k=100$, $\varepsilon=10$ 。基于摩擦补偿的 NFTSMC 的参数: $k_1=4$, $k_2=1$, $\mu_1=4$, $\mu_2=1.9$, $k=100$, $\varepsilon_1=6.6$ 。基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 的参数: $k_1=4$, $k_2=1$, $\mu_1=4$, $\mu_2=1.9$, $k=100$, $\varepsilon_2=4$, $a_1=1000$, $a_2=300$, $a_3=20$, $\varphi=0.01$ 。采样周期为 1 ms 。

仿真 1。跟踪幅值为 50 mm , 周期为 4 s 的正弦期望位置信号。三种控制方法的正弦信号跟踪曲线如图 2 所示。图 3~图 5 分别是 NFTSMC、基于摩擦补偿的 NFTSMC、基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 的位置跟踪误差曲线。当输入位置信号后, NFTSMC 进入稳态后的位置跟踪误差在 $5.5 \mu\text{m}$ 左右, 而基于摩擦补偿的 NFTSMC 的跟踪误差在 $1.5 \mu\text{m}$ 左右, 比 NFTSMC 的误差减小了 $4 \mu\text{m}$, 抑制了摩擦力的不良影响, 抖振得到削弱。基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 的跟踪误差在 $0.7 \mu\text{m}$ 左右, 与基于摩擦补偿的 NFTSMC 相比, 误差减小了 $0.8 \mu\text{m}$, 滑模观测器的结合进一步削弱了抖振, 使系统具有更高的控制精度。

仿真 2。在仿真 1 情况的基础上, 在 2 s 加入 20 N 的负载扰动, 三种控制方法的正弦信号位置跟踪误差曲线如图 6 所示。在突加扰动后, NFTSMC 的位置跟踪误差在 $-4.5 \sim 5.8 \mu\text{m}$, 偏离期望正弦信号的幅度最大; 基于摩擦补偿的

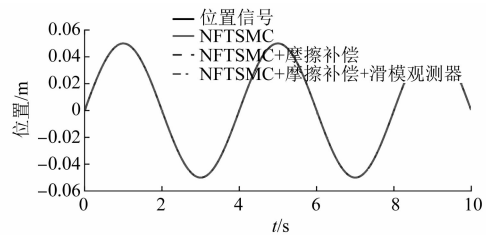


图 2 期望正弦位置输入与实际输出

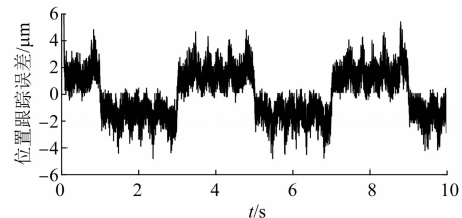


图 3 NFTSMC 位置跟踪误差曲线

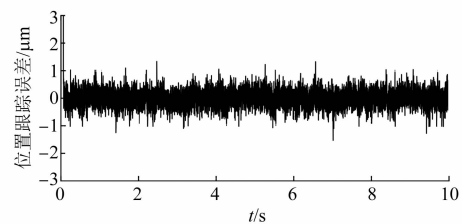


图 4 基于摩擦补偿的 NFTSMC 位置跟踪误差曲线

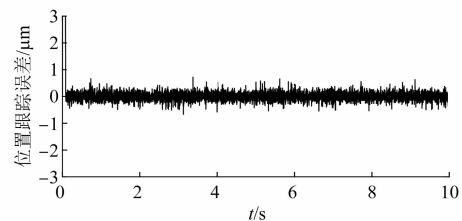


图 5 基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 位置跟踪误差曲线

NFTSMC 的跟踪误差在 $-1.2 \sim 3.3 \mu\text{m}$, 也偏离了期望正弦信号, 与 NFTSMC 相比误差减小了 $2.5 \mu\text{m}$; 基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 的跟踪误差在 $-0.7 \sim 0.7 \mu\text{m}$, 基本没有偏离期望正弦信号, 说明加入滑模观测器有效解决了突加负载扰动后, 误差会有正向偏移的问题, 基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 具有较强的抗扰动能力和较好的跟踪性能。

仿真 3。在仿真 1 情况的基础上, 带动额定负载 40 N 运行, 三种控制方法的正弦信号位置跟

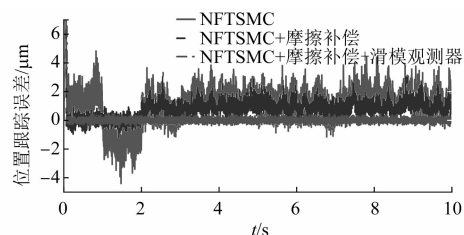


图6 20 N 负载扰动下位置跟踪误差

踪误差曲线如图7所示。NFTSMC 的位置跟踪误差在 $-0.3 \sim 5.2 \mu\text{m}$, 基于摩擦补偿的 NFTSMC 的跟踪误差在 $-0.1 \sim 3.7 \mu\text{m}$, 基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 的跟踪误差在 $0.6 \mu\text{m}$ 之间。仿真结果表明, 基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 能有效提高系统额定工况下的控制精度。

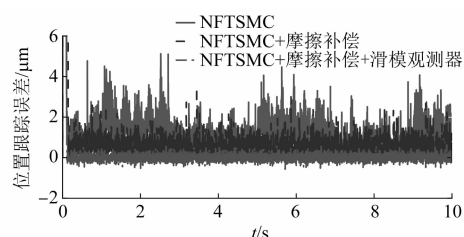


图7 40 N 额定负载下位置跟踪误差

5 结 语

为了提高 PMLSM 伺服系统的位置跟踪精度和抗扰动能力, 本文研究了基于摩擦和扰动补偿的 NFTSMC 方法。采用 NFTSMC 实现跟踪误差快速收敛到零, 避免奇异问题。摩擦补偿有效降低了摩擦力的不良影响。采用滑模观测器对摩擦模型辨识误差和负载扰动进行集总观测并补偿, 降低了切换增益, 从而削弱了抖振现象。仿真结果表明, 在系统存在摩擦力和负载扰动的状况下, 采用本文控制策略的永磁直线伺服系统具有较好的位置跟踪性能和抗扰性。

【参考文献】

[1] 刘扬, 杨玮林, 毕恺韬, 等. 基于干扰观测器的永磁同步直线电机自适应 PID 控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(4): 18.

[2] CHEN S, CHIANG H, LIU T, 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.

[3] 张戟, 纪铁生, 王乃福, 等. 永磁直线同步电机插入式积分滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9): 29.

[4] 向凡, 许鸣珠. 基于改进滑模速度控制器的永磁直线同步电机直接推力控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(6): 38.

[5] WU S, SU X, WANG K. Time-dependent global nonsingular fixed-time terminal sliding mode control-based speed tracking of permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Access, 2020, 8: 186408.

[6] 孙宜标, 陈展琴, 王丽梅. 永磁直线电机二阶非奇异快速终端滑模控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(3): 86.

[7] 付东学, 赵希梅. 永磁直线同步电机自适应非奇异快速终端滑模控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 717.

[8] 张康, 王丽梅. 基于周期性扰动学习的永磁直线电机自适应滑模位置控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(8): 132.

[9] 过希文, 王群京, 李国丽, 等. 基于摩擦补偿的永磁球形电机自适应模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 75.

[10] 王元生, 杨书根. X-Y 数控工作台的摩擦和扰动补偿方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(8): 38.

[11] 王瑞娟, 梅志千, 李向国, 等. 机电伺服系统非线性摩擦自适应补偿的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 123.

[12] 温正, 孙华克. MATLAB 智能算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 134-136.

[13] 孙宜标, 仲原, 刘春芳. 基于 LMI 的直线伺服滑模位移跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 33.