

基于扰动估计补偿的 PMLSM 固定时间积分滑模控制*

艾雄雄, 张 博, 邓 斌, 王 杰
(西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710600)

摘 要: 为了提高永磁直线同步电机(PMLSM)控制系统的动态响应速度和鲁棒性,提出了一种基于扰动估计补偿的固定时间积分滑模控制(DFISM)方法。首先,在积分滑模面的基础上,引入了一种固定时间滑模控制算法,保证系统可以在固定时间内到达平衡点。其次,设计了一种随系统状态动态调整的控制率增益函数 $f(s)$,进一步加快了收敛速度。最后,设计自适应超螺旋扰动观测器估计内部和外部不匹配扰动,并采用前馈补偿的方式将观测值引入控制律,增强了系统的抗干扰能力。仿真结果表明,DFISM 方法不仅保证了系统全局鲁棒性,而且有效提高了系统的跟踪精度和响应速度。

关键词: 永磁直线同步电机; 固定时间控制; 积分滑模控制; 自适应扰动观测器

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)09-0028-07

doi: 10.12177/emca.2023.105

Fixed Time Integral Sliding Mode Control for PMLSM Based on Disturbance Estimation Compensation*

AI Xiongiong, ZHANG Bo, DENG Bin, WANG Jie

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China)

Abstract: In order to improve the dynamic response speed and robustness of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) control system, a fixed-time integral sliding mode control (DFISM) method based on disturbance estimation compensation was proposed. Firstly, based on the integral sliding mode surface, a sliding mode control algorithm with fixed-time was introduced to ensure that the system can reach the equilibrium point within a fixed-time. Secondly, a control rate gain function $f(s)$ was designed to adjust dynamically with the state of the system, which further accelerates the convergence rate. Finally, an adaptive superspiral disturbance observer was designed to estimate the internal and external mismatched disturbances, and the observed values were introduced into the control rate by feedforward compensation, which enhances the anti-interference ability of the system. The simulation results show that the DFISM method not only guarantees the global robustness of the system, but also improves the tracking accuracy and response speed of the system.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); fixed time control; integral sliding mode control; adaptive disturbance observer

0 引 言

与传统旋转电机相比,永磁直线同步电机

(PMLSM)工作在直接驱动模式下,可以将推力直接加到负载上,具有定位精度高、推力大、速度快、结构简单等优点,已成功应用于交通运输、航空航

收稿日期: 2023-03-13; 收到修改稿日期: 2023-05-31

* 基金项目: 西安市青年托举计划(095920201324)

作者简介: 艾雄雄(1996-),男,硕士研究生,研究方向为电机控制、智能控制。

张 博(1981-),男,博士,讲师,研究方向为直线电机控制。

天、精密激光切割等控制系统中^[1-2]。但由于 PMLSM 取消了齿轮和滚珠丝杠等机械传动装置,导致负载变化和外部扰动等不确定因素对系统的影响大幅提高。此外,直线电机系统特有的齿槽力、边端力等内部不匹配扰动也会对控制精度造成影响^[3]。因此,如何应对内外部不匹配因素对 PMLSM 的影响是目前需要解决的主要问题。

滑模控制是一种强鲁棒性的非线性控制策略,可以忽略各种不确定因素的影响,广泛应用于伺服控制系统领域。但是传统滑模控制采用线性滑模面,只能保证时间趋于无穷大时,系统才会收敛到平衡状态^[4]。为了提高系统收敛速度,文献[5]在传统幂次趋近律的基础上,引入了 Fal 函数并与新型全局快速终端滑模结合的模型,该模型提高了系统的趋近速度,但是无法避免奇异问题的产生。文献[6]采用反馈线性化技术设计了单回路终端滑模控制器。该方法可使电机转速和电流在有限时间内达到参考值,实现快速瞬态响应,但是有限时间内控制方法受系统初始状态影响。为了提高系统抗干扰能力,文献[7]设计了基于反步滑模面的不匹配扰动观测器,观测系统的内部与外部不匹配扰动,但对于周期小,频率大的快时变扰动仅能实现有偏差观测。文献[8]提出了一种超螺旋滑模扰动观测器,对系统扰动进行观测并进行前馈补偿,进一步提高了系统的鲁棒性。但是超螺旋算法参数需要根据扰动的上界进行选择,在实际应用中难以获取^[9]。

鉴于上述分析,本文设计了一种基于扰动估计补偿的固定时间积分滑模控制(DFISMC)方法。DFISMC 采用固定时间趋近律结合非奇异快速终端滑模面的方式,保证系统状态在避免非奇异问题的同时可在固定时间内收敛,收敛时间与趋近率参数相关。为进一步加快收敛速度,设计固定时间动态趋近率,加快收敛速度的同时减小系统抖振。考虑到系统的不确定性扰动对电机运动过程的影响,设计了自适应超螺旋扰动观测器,实现不确定性扰动有限时间观测,提高系统的动态性能。利用 Lyapunov 函数分析方法验证了该方案的有效性和稳定性。最后,通过试验验证了该控制方法比 PI 控制及积分滑模控制具有更好的调节性能和更强的抗干扰能力。

1 数学模型

1.1 PMLSM 数学模型

PMLSM 采用 $i_d = 0$ 的磁场定向控制,磁滞和涡流损耗不计,空间磁场呈对称正弦分布。在表贴式 PMLSM 中 $L_d = L_q$,则简化的 PMLSM 模型表示为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau} \nu L_d i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau} \nu (L_q i_d + \varphi_f) \\ F_e = \frac{3\pi n_p}{2\tau} \psi_f i_q = k_f i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 和 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_d 和 i_q 为 d 、 q 轴电流; R_s 为绕组电阻; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; F_e 为电磁推力; k_f 为推力系数; τ 为永磁体极距; n_p 为电机的极对数; ψ_f 为永磁体磁链。

PMLSM 运动方程为

$$\begin{cases} M\dot{v} = F_e - Bv - F \\ F = F_l + F_d + F_\Delta \end{cases} \quad (2)$$

式中: M 为动子质量; B 为黏性摩擦因数; v 为动子运动速度; F 为不确定因素,包括摩擦力 F_d 、负载扰动 F_l 和参数变化 F_Δ 。

定义状态变量 $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ x_2 \end{bmatrix}$,考虑不确定因

素对系统的影响,由式(2)可得系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = A_n x_2 + B_n u + F \\ y = x_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A_n = -\frac{B}{M}$; $B_n = \frac{k_f}{M}$; u 为控制器的控制律, $u = i_q^*$; y 为系统输出变量。

设定 v_d 为速度信号,并作出以下假设:

假设 1,系统未知复合扰动一阶微分连续且有界,即 $|F| \leq D$, $\|\dot{F}\| \leq D_1$, $D, D_1 > 0$ 。

1.2 定义与引理

定理 1:固定时间基本理论

考虑如下非线性系统:

$$\dot{x} = f(x), f(0) = 0, x \in R^n \quad (4)$$

其中, $f(x): R^n \rightarrow R^n$, 是一个连续函数。

当系统(4)处于全局有限时间稳定的状态,

并且存在一个稳定时间函数 $T(x)$, 使得 $T(x) \leq T_{\max}$ 成立, 其中 $T_{\max}$ 是固定常数。则系统(4)的平衡点 $x=0$ 时固定时间稳定^[10]。

引理 1^[10]: 对于系统(4), 如果存在一个连续的正定函数 $V(x): R^n \rightarrow R$ 使得 $\dot{V}(x) \leq -\alpha V^p(x) - \beta V^q(x)$, $x \in R^n$, 其中 $\alpha > 0, \beta > 0, 0 < p < 1, q > 1$, 则系统(4)是固定时间稳定的, 固定时间 $T \leq \frac{1}{\alpha(1-p)} +$

$$\frac{1}{\beta(q-1)}.$$

2 控制系统设计

基于扰动估计补偿的固定时间积分滑模控制方法系统框图如图 1 所示。设计积分定时滑模面用于 PMLSM 控制器, 观测器采用自适应超螺旋扰动观测器, 有效提高系统的控制精度和鲁棒性。

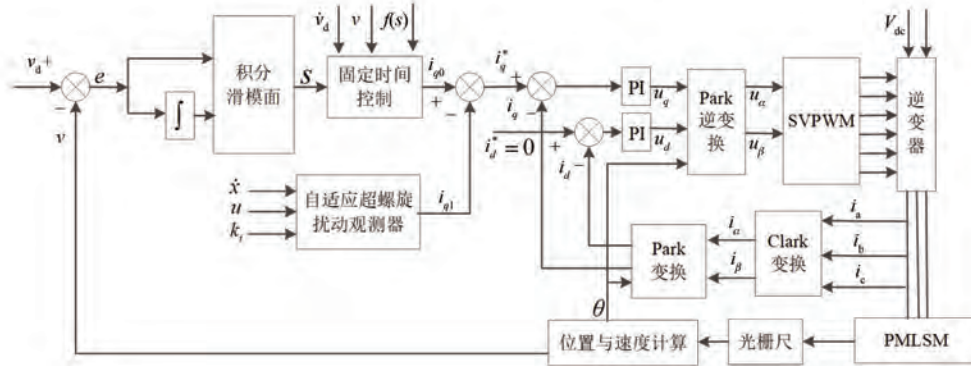


图 1 基于扰动估计补偿的 PMLSM 固定时间积分滑模控制系统框图

2.1 固定时间积分滑模面设计

设 v_d 为指定速度参考信号, 定义速度跟踪误差 e 为

$$e = v_d - x_2 \quad (5)$$

定义滑模面为

$$S = e + \int_0^t [k_1 |e|^{\alpha_1} \text{sign}(e) + k_2 |e|^{\alpha_2} \text{sign}(e)] d\mu \quad (6)$$

式中: $k_1 > 0, k_2 > 0; 0 < \alpha_1 < 1, \alpha_2 > 1$ 。

将式(3)、式(5)代入式(6)并对其求导得到如下表达式:

$$S = \dot{v}_d - A_n v - B_n u + F + k_1 |e|^{\alpha_1} \text{sign}(e) + k_2 |e|^{\alpha_2} \text{sign}(e) \quad (7)$$

为了保证 $S=0$, 设计如下连续时间滑模控制器:

$$u = \frac{1}{B_n} [\dot{v}_d - A_n v + k_1 |e|^{\alpha_1} \text{sign}(e) + k_2 |e|^{\alpha_2} \text{sign}(e) + l_1 \text{sign}(S) + l_2 |S|^{\beta_1} \text{sign}(S)] \quad (8)$$

式中: $l_1 > 0, l_2 > 0; \beta_1 > 1$ 。

将式(8)代入式(7)可得:

$$S = F - l_1 \text{sign}(S) - l_2 |S|^{\beta_1} \text{sign}(S) \quad (9)$$

为了证明系统的稳定性, 设计 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} S^T S, \text{ 则有如下表达式:}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S^T \dot{S} = S^T [F - l_1 \text{sign}(S) - l_2 |S|^{\beta_1} \text{sign}(S)] \leq D |S| - l_1 |S| - \\ & l_2 |S|^{\beta_1+1} = -2^{\frac{1}{2}} \lambda_1 V^{\frac{1}{2}} - 2^{\frac{\beta_1+1}{2}} l_2 V^{\frac{\beta_1+1}{2}} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\lambda_1 = D - l_1 > 0$ 。

当 $S=0$ 时, 根据定理 1, 系统在固定时间内达到滑模面, 其收敛时间上界为

$$T_1 \leq \frac{\sqrt{2}}{\lambda_1} + \frac{1}{2^{\frac{\beta_1-1}{2}} (\beta_1 - 1) l_2} \quad (11)$$

2.2 自适应超螺旋扰动观测器设计

据式(11)可知, 系统扰动对收敛时间有重要影响。因此, 本节设计了一种自适应超螺旋扰动观测器, 用来补偿系统扰动, 提高控制精度。对于式(3)这一类含有不确定扰动的系统, 设计辅助滑模面 S_1 为

$$S_1 = x_2 - \int A_n x_2 + B_n u + \hat{F} \quad (12)$$

将式(3)代入式(13)并对其求导得:

$$S_1 = F - \hat{F} \quad (13)$$

式中: F 为系统不确定因素, 包括摩擦力、负载扰动和参数变化; $\hat{F}$ 为不确定因素的观测值。

$\hat{F}$ 采用超螺旋算法,其表达式为

$$\dot{\hat{F}} = \zeta_1 |S|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_1) + \zeta_2 \int \text{sign}(S_1) d\tau \quad (14)$$

此时补偿的电流值为

$$i_{q1} = \hat{F}/B_n \quad (15)$$

式中: ζ_1 和 ζ_2 为自适应项。

自适应项表达式为

$$\begin{cases} \dot{\zeta}_1 = \begin{cases} a(|S_1| - \chi), & \zeta_1 > \zeta_m \\ b, & \zeta_1 \leq \zeta_m \end{cases} \\ \dot{\zeta}_2 = \tau \zeta_1 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $a, b, \chi, \tau, \zeta_m$ 为正参数。

如果存在正参数 ρ 和 λ , 使得 $\zeta_1 > \frac{(\rho + \lambda + \tau^2)^2 + \tau^2 - 2\tau^2 \rho}{2\lambda\tau}$ 成立, 则超螺旋扰动观测器可以在有限时间内收敛, 证明过程详见文献[11]。

2.3 基于扰动估计补偿的固定时间积分滑模控制设计

为了进一步加快收敛速度并削弱抖振, 基于式(14)的自适应超螺旋扰动观测器和式(6)的积分滑模面, 设计控制率如下所示^[12-14]:

$$\begin{aligned} u = i_{q0} + i_{q1} = & \frac{1}{B_n} \left[\dot{v}_d - A_n v + \hat{F} + k_1 |e|^{\alpha_1} \text{sign}(e) + \right. \\ & k_2 |e|^{\alpha_2} \text{sign}(e) + \frac{l_1}{f(s)} |S|^{\beta_2} \text{sign}(S) + \\ & \left. \frac{l_2}{f(s)} |S|^{\beta_3} \text{sign}(S) \right] \quad (17) \end{aligned}$$

式中: $f(s) = \left(\omega - \frac{\pi s^\eta}{\alpha(1+x^\eta)} \right) \gamma, \gamma > \frac{\pi}{2}, \omega = \frac{\pi}{2}, 0 < \eta < 1, 0 < \beta_2 < 1, \beta_3 > 1$ 。

由式(17)可知, $f(s)$ 恒为正数, 所以不会对系统稳定产生影响。当初始状态距离平衡点较远时, 变量 $\frac{\pi s^\eta}{\alpha(1+x^\eta)}$ 的值趋于 $\frac{\pi}{2}$, 选取合适的 η 可以保证 $f(s)$ 满足 $0 < f(s) < 1$ 。此时, 有 $\left| \frac{l_1}{f(s)} |S|^{\beta_2} \text{sign}(S) \right| > |l_1| |S|^{\beta_2} \text{sign}(S)|$, 因此该趋近律将会相应地提高系统状态的收敛速度。相反, 当 s 接近平衡点时, $\frac{\pi s^\eta}{\alpha(1+x^\eta)}$ 趋近于 0, $f(s) =$

$\frac{\pi}{2} \eta > 1$, 则 $\left| \frac{l_1}{f(s)} |S|^{\beta_2} \text{sign}(S) \right| < |l_1| |S|^{\beta_2} \text{sign}(S)|$, 有助于减少控制抖振。

将式(17)带入式(7)可得:

$$\begin{aligned} \dot{S} = F - \hat{F} - \frac{l_1}{f(s)} |S|^{\beta_2} \text{sign}(S) - \\ \frac{l_2}{f(s)} |S|^{\beta_3} \text{sign}(S) \end{aligned} \quad (18)$$

当扰动可以被精确估计时, 式(17)可表示为

$$\dot{S} = -\frac{l_1}{f(s)} |S|^{\beta_2} \text{sign}(S) - \frac{l_2}{f(s)} |S|^{\beta_3} \text{sign}(S) \quad (19)$$

为了证明系统的稳定性, 设计 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} S^T S, \text{求导得:}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & S^T \left(-\frac{l_1}{f(s)} |S|^{\beta_2} \text{sign}(S) - \frac{l_2}{f(s)} |S|^{\beta_3} \text{sign}(S) \right) \leq \\ & -\frac{l_1}{f(s)} |S|^{\beta_2+1} - \frac{l_2}{f(s)} |S|^{\beta_3+1} = \\ & -2^{\frac{\beta_2+1}{2}} \frac{l_1}{f(s)} V^{\frac{\beta_2+1}{2}} - 2^{\frac{\beta_3+1}{2}} \frac{l_2}{f(s)} V^{\frac{\beta_3+1}{2}} \end{aligned} \quad (20)$$

根据定理 1, 系统在固定时间内达到滑模面, 其收敛时间上界为

$$T_2 \leq \frac{1}{2^{\frac{\beta_2-1}{2}} (1-\beta_2) \frac{l_1}{f(s)}} + \frac{1}{2^{\frac{\beta_3-1}{2}} (\beta_3-1) \frac{l_2}{f(s)}} \quad (21)$$

当系统状态在滑模面上时, $S=0$, 对式(6)求导可得:

$$\dot{e} = -k_1 |e|^{\alpha_1} \text{sign}(e) - k_2 |e|^{\alpha_2} \text{sign}(e) \quad (22)$$

设计 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2} S^T S$, 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -k_1 |e|^{\alpha_1+1} - k_2 |e|^{\alpha_2+1} \leq \\ & -k_1 V^{\frac{\alpha_1+1}{2}} - k_2 V^{\frac{\alpha_2+1}{2}} \end{aligned} \quad (23)$$

根据引理 1, 误差状态 e 会在固定时间内收敛于零, T_3 可表示为

$$T_3 = \frac{2}{k_1(1-\alpha_1)} + \frac{2}{k_2(\alpha_2-1)} \quad (24)$$

综上所述, 本文提出的基于扰动估计补偿的

固定时间积分滑模控制器满足 Lyapunov 稳定性, 并且可在固定时间内收敛到零。

3 仿真分析

为了验证本文提出的 DFISMV 系统有效性, 搭建 PMLSM 仿真模型, 分析 DFISMV 方法在不同输入信号情况下的收敛速度、速度误差和突加扰动情况下的抗干扰能力, 证明本方法的有效性。通过与 PI 控制、积分滑模控制等算法进行对比验证本方法的改进效果。PMLSM 仿真模型各项参数如表 1 所示。

表 1 PMLSM 参数表	
参数名称	参数值
电磁推力系数 $k_t/(\text{N}\cdot\text{A}^{-1})$	60.2
电阻 R_s/Ω	0.95
d 轴电感 L_d/mH	6.827
q 轴电感 L_q/mH	6.827
永磁体磁链 ψ_f/wb	0.034
黏性摩擦因数 $B/(\text{N}\cdot\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	0.02
电机的质量 M/kg	6.5

(1) 电机空载起动, 采样周期为 1 s, 给定速度信号为 0.2 m/s, 在 0.3 s 时给定外部负载扰动, 其值为 50 N。速度响应曲线如图 2 所示, 从图中可知在到达阶段, DFISMV 方法在 0.018 s 时到达给定速度, 积分滑模方法在 0.03 s 时到达稳定状态, 相较于其他两种方法, PI 控制方法超调较大, 在 0.05 s 时才到达给定速度。在突加扰动时, PI 控制方法波动明显, 恢复稳态时间为 0.05 s, 积分滑模方法波动较小, 收敛速度与 PI 控制相当, 而 DFISMV 方法波动最小, 收敛速度也最快。

图 3 为 PI 控制方法速度跟踪误差曲线图, 速度误差约为 $-0.12\sim0.12\text{ mm/s}$ 。图 4 为积分滑模控制方法速度跟踪误差曲线图, 速度误差约为 $-0.04\sim0.05\text{ mm/s}$, 图 5 为 DFISMV 控制方法速度跟踪误差曲线图, 速度误差约为 $-0.02\sim0.02\text{ mm/s}$ 。由图 3~图 5 可知, 相较于 PI 控制方法, 其他两种方法误差曲线更平滑, 三种方法中 DFISMV 方法速度跟踪误差最小, 跟踪精度最高。由此可知 DFISMV 方法动态响应速度更快, 遇到扰动时超调量较小, 具有较强的鲁棒性和抗干扰能力强。

(2) 为验证本文提出的方法在变速条件下的

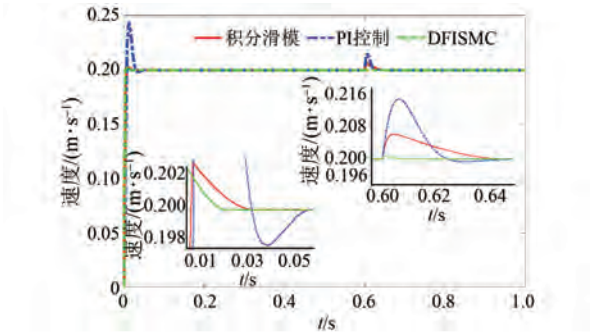


图 2 阶跃信号下的速度跟踪图

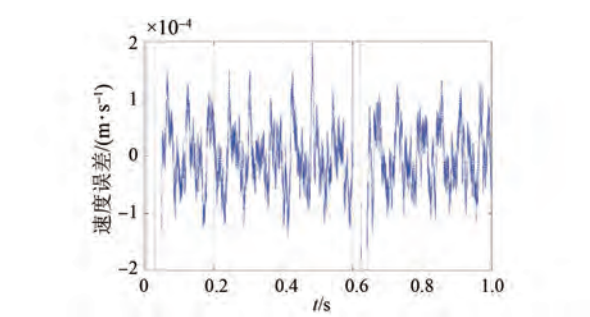


图 3 PI 控制算法速度误差图

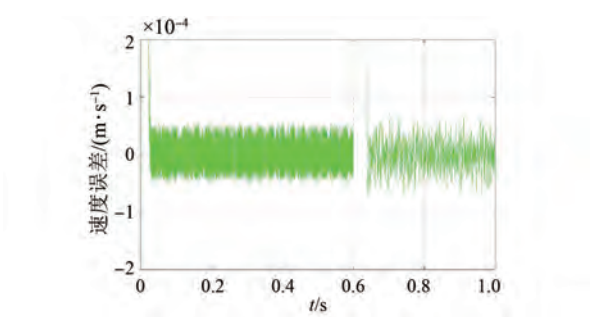


图 4 积分滑模控制算法速度误差图

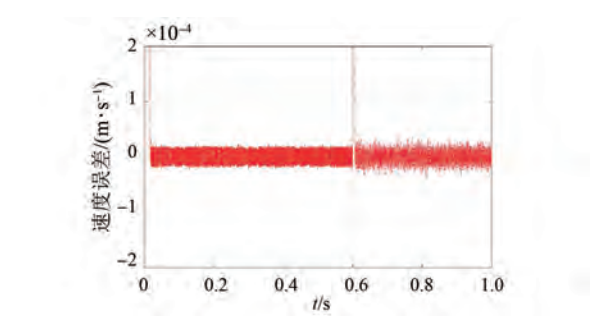


图 5 DFISMV 控制算法速度误差图

动态性能, 给定梯形轨迹速度信号, 初始速度为 0, 在 0.25~0.75 s 之间为 0.2 m/s 的匀速运动, 其余时间为变速运动。三种方法的速度跟踪对比图如图 6 所示, 通过细节放大图可知, 在加速度突变

时 PI 控制算法会有小幅超调,其余阶段三种方法都能很好地跟踪到给定速度。

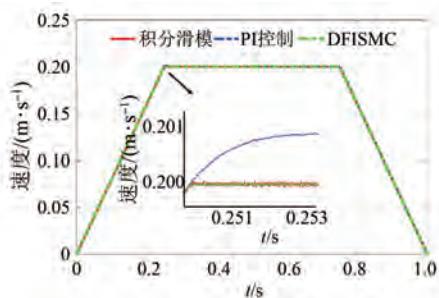


图6 梯形信号下的速度跟踪图

图7为PI控制方法速度跟踪误差曲线图,速度误差约为 $-0.1 \sim 0.09$ mm/s,图8为积分滑模控制方法速度跟踪误差曲线,速度误差约为 $-0.05 \sim 0.05$ mm/s。图9为DFISM方法速度跟踪误差曲线,速度误差约为 $-0.01 \sim 0.01$ mm/s。由图7~图9可知,在0.25 s和0.75 s处加速度突变时,PI控制方法的误差精度会有明显变化,积分滑模方法的误差精度也有小幅波动,DFISM方法受影响最小,误差曲线最平滑,误差精度最低。

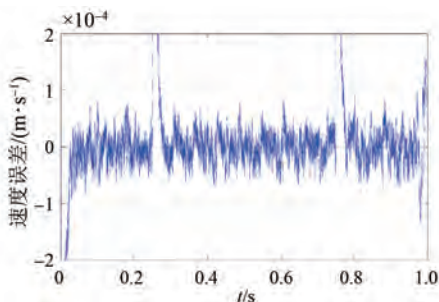


图7 PI控制算法速度误差图

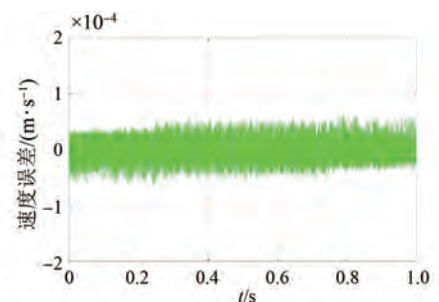


图8 积分滑模控制算法速度误差图

(3) 为验证本文提出的自适应超螺旋扰动观测器的观测性能,在负载侧施加定位力,构造定位力时,将定位力看作是动子位置的函数,以一个极

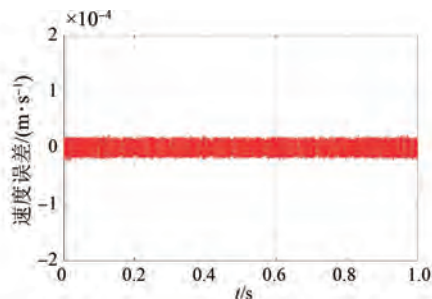


图9 DFISM算法速度误差图

距、半个极距、四分之一极距和八分之一极距为周期分别构造推力波动的基波、二次谐波、四次谐波和八次谐波。定位力构造计算式如下^[8]:

$$F_f = 2.29 \cdot \sin\theta + 6.27 \cdot \sin(2\theta) + 1.01 \cdot \sin(4\theta) + 0.6 \cdot \sin(8\theta) \quad (25)$$

其中, $\theta = 2\pi x / \tau$ 。

图10为定位力观测结果图,图11为观测误差图。由从图10~图11可知,自适应超螺旋扰动观测器可以较为准确地观测到定位力,观测误差约为 $-0.5 \sim 0.5$ N。由此可知,当实际运行中定位力存在时,本文提出的自适应超螺旋扰动观测器可以有效地观测到扰动值,提高系统抗干扰能力。

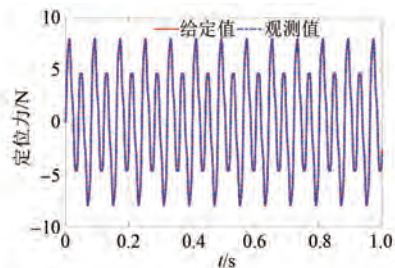


图10 定位力观测图

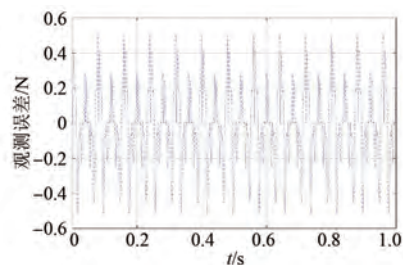


图11 定位力观测误差图

由上述仿真结果可知,本文提出的基于DFISM的算法在不同输入信号的情况下,都能准确地跟踪到给定速度,有效降低了系统速度跟踪误差,给定模拟定位力时也能准确地观测到扰

动值。与改进之前的方法对比可知,基于DFISMC的算法提高了系统位置跟踪性能,减少了未知因素的影响。

4 结 语

本文提出了一种基于扰动估计补偿的固定时间积分滑模控制方法来改善系统参数变化、负载扰动等问题,设计了一种固定时间积分终端滑模面,引入函数 $f(s)$ 促使趋近率系数可以进行动态调整,在避免非奇异问题的同时加快了收敛速度。针对内部和外部不匹配因素的影响引入自适应超螺旋扰动观测器并将观测结果进行前馈补偿,最后通过仿真与其他控制方法进行对比。结果表明,本文设计的DFISMC算法在不同输入情况下都能有效地跟踪到给定信号,超螺旋扰动观测器在添加定位力和负载时都能准确地观测到扰动值并给予反馈。与改进之前的方法进行对比可知,DFISMC算法降低了速度跟踪误差,提高了动态响应速度,保证了系统的全局鲁棒性,可以应用于PMLSM伺服系统。

【参考文献】

- [1] 张博,齐蓉,林辉. 激光切割永磁直线伺服系统的反演滑模控制[J]. 电工技术学报,2018,33(3): 642.
- [2] SHIN K H, LEE S H, CHO H W, et al. Analysis on the pitching moment in permanent magnet linear synchronous motor for linear motion stage systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1.
- [3] 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.
- [4] WANG L N, DU H B, ZHANG W J, et al. Implementation of integral fixed-time sliding mode controller for speed regulation of PMSM servo system [J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 102(1): 185.
- [5] 索宇超,张博,杨永宝,等. 基于新型趋近律的全局快速 Terminal 滑模 PMLSM 控制[J]. 电机与控制应用,2022,49(11): 16.
- [6] LIU X J, YU H S, YU J P, et al. Combined speed and current terminal sliding mode control with nonlinear disturbance observer for PMSM drive [J]. IEEE Access, 2018,6: 1.
- [7] 邵光杰. 永磁直线同步电机推力波动抑制与速度控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2020.
- [8] JIANG J, WANG M, TANG Y, et al. Super twisting-based position control of PMLSM with load force observer [C] // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE, 2019.
- [9] 刘洋,井元伟,刘晓平,等. 非线性系统有限时间控制研究综述[J]. 控制理论与应用,2020,37(1): 1.
- [10] POLYAKOV, A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(8): 2106.
- [11] 吕跃勇,秦堂皓,张薇,等. 基于超螺旋干扰观测器的组合体航天器姿态接管控制[J]. 无人系统技术,2020,3(5): 39.
- [12] 王宁,高颖,王仁慧. 状态测量不确定和动力学未知的无人艇固定时间容错控制[J]. 自动化学报, 2023,49(5): 1050.
- [13] 俞国燕,何飞扬,李卓城,等. 基于固定时间扩张观测器的ROV非奇异积分终端滑模轨迹跟踪控制[J/OL]. 船舶工程,2023-09-04. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1281.U.20221123.1240.002.html>.
- [14] 张博,韩雪峰,齐蓉,等. 复合滑模控制在精密PMLSM激光切割运动平台的应用[J]. 光学精密工程,2017,25(1): 84.