

基于命令发生跟踪器的 PMLSM 鲁棒简单自适应控制

雷滋稼, 金鸿雁*

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110870)

Robust Simple Adaptive Control of PMLSM Based on Command Generation Tracker

LEI Zijia, JIN Hongyan*

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

ABSTRACT: In order to solve the problems of low positioning accuracy and inaccurate position tracking in the feed system of CNC machine driven by the permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM), a robust simple adaptive control (RSAC) method based on the command generation tracker (CGT) is designed. Firstly, the PMLSM mathematical model is established, and the Stribeck effect under acceleration is introduced into the system modeling to improve the friction model. Secondly, the RSAC method that does not depend on the exact model is designed to overcome the uncertainty in the system, so as to improve the robustness. To overcome the difficulty in parameter selection in RSAC, a CGT with observable state variables is designed, which can adaptively adjust the parameters of RSAC and further improve the position tracking accuracy of the system. Finally, the friction disturbance is observed through the simulation and experiment, and the tracking performance and robustness of the system under a variety of position tracking signals are analyzed. The experimental results show that this method can effectively handle the system uncertainty, achieve the expected tracking error reduction, and meet the requirements of good tracking performance and strong robustness under precision machining conditions.

KEY WORDS: permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); command generation tracker; robust simple adaptive control; tracking accuracy; robustness

摘要: 针对永磁直线同步电机(permanent magnet linear

synchronous motor, PMLSM)驱动的数控机床进给系统在运行过程中受外部环境和负载扰动影响, 出现定位精度较低、位置跟踪不准确的问题, 设计一种基于命令发生跟踪器(command generation tracker, CGT)的鲁棒简单自适应控制(robust simple adaptive control, RSAC)方法。首先, 建立PMLSM 数学模型, 并在系统建模中引入加速度影响下的Stribeck 效应, 改进摩擦力模型; 其次, 设计不依赖精确模型的 RSAC 方法, 用于克服系统中的不确定性, 从而提高鲁棒性。针对 RSAC 中参数选取困难的问题, 设计可以观测状态量的 CGT, 能够自适应调节 RSAC 的参数, 进一步提高系统的位置跟踪精度。最后, 通过仿真和实验对摩擦力扰动进行观测, 并分析系统在多种位置跟踪信号下的跟随性和鲁棒性。结果证明, 该方法能够有效克服系统不确定性, 达到减小跟踪误差的预期效果, 满足精密加工工况下的跟随性好、鲁棒性强的要求。

关键词: 永磁直线同步电机; 命令发生跟踪器; 鲁棒简单自适应控制; 跟随性; 鲁棒性

0 引言

采用永磁直线同步电机(permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM)作为动力源的高端数控机床进给系统具有高响应速度、高精度定位和大推力密度的优点, 广泛应用于精密制造、半导体加工、高速印刷和扫描技术等领域^[1-3]。然而, PMLSM 中存在的参数变化、外部扰动和摩擦力等不确定性因素会降低跟踪精度, 从而给工业进给系统带来挑战^[4]。此外, PMLSM 的高速运行往往伴随着摩擦力扰动和系统状态时变等问题, 必须在设计时予以考虑^[5]。因此, 设计一种适应 PMLSM 动态特性、提高精度的控制方法至关重要。

为提高 PMLSM 直驱系统的伺服性能, 学者们

基金项目: 辽宁省科技计划联合计划面上项目(2024-MSLH-369); 辽宁省教育厅高校基本科研项目(202534180)。

General Program of the Joint Program Under Liaoning Provincial Science and Technology Plan (2024-MSLH-369); Basic Scientific Research Project of Colleges and Universities Under Liaoning Provincial Department of Education (202534180).

进行了深入研究,包括滑模控制^[6]、反步控制^[7]、神经网络^[8]和自适应控制^[9]等。其中,自适应控制可根据电机负载和运行环境的变化,调整自身结构和参数,具有鲁棒性强、适应性好的优点^[10-12]。文献[13]设计了自适应超螺旋时变滑模控制方法,显著削弱抖振并提高系统的响应速度;文献[14]设计了自适应鲁棒控制方法,解决直线电机伺服系统面临最短时间动态响应和高精度稳态跟踪的问题,抑制各类建模不确定性的影响,但反馈增益和自适应增益不能自适应调整;文献[15]将简单自适应控制应用于进给驱动系统,设计了摩擦补偿和增强输出信号,实现高精度运动控制;文献[16]针对 PMLSM 系统不确定性及饱和非线性等问题,设计了基于特征模型的自适应控制器,可使系统高效稳定运行,但其参数为固定值,在实验条件和环境变化时无法保证性能的优越性;文献[17]针对具有分布式执行机构和传感器的系统,设计了分散式自适应控制器,其优点是每个子系统控制器只需要局部测量,简单可行;文献[18]提出一种简单自适应轮廓控制方法,通过高阶导数信号替代传统并联前馈补偿器,但在高曲率复杂形状下,估计误差可能较大。

此外,由于采用 PMLSM 直接驱动,省略了滚珠丝杠和齿轮等中间传动环节,减小了积累误差。但直线电机滑台机构通常采用直线导轨进行导向和支撑,动力源和负载之间形成机械接触,从而增大了非线性摩擦力,影响运动精度^[19-21]。传统的摩擦力模型主要依赖库伦摩擦、粘性摩擦和 Stribeck 效应来估算摩擦力,并通过速度计算摩擦力,但在变速或预滑动的情况下,难以准确反映摩擦力的实际行为^[22]。文献[23]通过改进 LuGre 模型,更准确地描述和补偿了动态摩擦力,提高了电磁直线执行器的跟踪性能和抗干扰能力,但线圈电阻的变化对控制性能影响较大;文献[24]提出一种考虑定位力和摩擦力的预定位估计算法,以提高系统的位置估计精度,推导了预定位平衡位置估计的可实现约束条件,并提出一种基于二分法的预定位平衡位置迭代估计算法,提高了电机的初始位置估计精度,但算法的数学模型和迭代过程较为复杂,不易实现。

因此,本文提出一种基于命令发生跟踪器(command generation tracker, CGT)的鲁棒简单自适应控制(robust simple adaptive control, RSAC)方法。首先,建立含有负载扰动、摩擦力、齿槽推力等不确定性的 PMLSM 数学模型。考虑到摩擦力是跟踪

精度的重要影响因素,且现有模型并未考虑加速度及预滑动摩擦力的状态,设计基于改进 Stribeck 效应的摩擦模型;其次,设计 RSAC 方法,该方法不依赖于精确电机模型,且对不确定性因素具有强鲁棒性。然而,RSAC 中的状态参数与输入参数选取困难,且无法自调整。因此,引入 CGT 对模型进行观测,可通过理想模型与实际模型之间的差异计算出 RSAC 中的自适应参数值,进一步提高系统的伺服性能。最后,通过半实物仿真实验验证本方法对于提高系统位置跟踪精度和鲁棒性能的有效性。

1 系统模型

1.1 PMLSM 数学模型

在同步旋转坐标下,忽略电机的涡流损耗、磁滞损耗以及磁路饱和等因素,采用 $i_d=0$ 控制,PMLSM 的电磁推力方程^[25]表示为

$$F_e = \frac{3\pi p_n \varphi_f}{2\tau} i_q = K_f i_q \quad (1)$$

式中: F_e 为电磁推力; K_f 为电磁推力系数; i_q 为 q 轴电流; p_n 为极对数; φ_f 为永磁体磁链; τ 为极距。

PMLSM 的运动学方程表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p + \mathbf{B}_p (u_p + F_d / K_f) \\ y_p = \mathbf{C}_p \mathbf{x}_p \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_p = [q \ \dot{q}]^T \\ F_d = F_f + F_L + F_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -B/M \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_p = [1 \ 0] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}_p$ 为系统状态变量; u_p 为输入信号; y_p 为位置输出; F_d 为集总扰动; F_f 为摩擦力扰动,通过后文设计的摩擦力模型得到; F_L 为负载扰动; F_0 为齿槽推力、端部效应等其它非线性扰动; q 为动子位置; $\dot{q}$ 为动子速度; $\mathbf{A}_p$ 为状态参数矩阵; $\mathbf{B}_p$ 为输入参数矩阵; $\mathbf{C}_p$ 为输出参数矩阵; B 为动子粘滞摩擦系数; M 为动子质量。

1.2 改进摩擦力模型

传统 LuGre 模型为:

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \dot{q} \quad (5)$$

$$\frac{dz}{dt} = \dot{q} - \frac{\sigma_0 |\dot{q}|}{g(\dot{q})} z \quad (6)$$

式中: σ_0 为鬃毛刚性系数; σ_1 为滑动阻尼系数; σ_2 为粘性摩擦因数; z 为鬃毛的平均形变; $g(\dot{q})$ 为 Stribeck 效应的非线性函数, 表示为

$$g(\dot{q}) = \begin{cases} F_e, & \dot{q} = 0, |F_e| < F_s \\ F_s \operatorname{sgn}(\dot{q}), & \dot{q} = 0, |F_e| \geq F_s \\ [F_c + (F_s - F_c)e^{-\dot{q}/\dot{q}_s}], & \dot{q} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: F_s 为最大静摩擦力; F_c 为库伦摩擦力; $\dot{q}_s$ 为 Stribeck 速度。

在 PMLSM 运行过程中的预滑动阶段, 加速度会造成最大静摩擦力变化, 且加剧摩擦滞后现象, 使 Stribeck 效应曲线后移, 从而影响系统的运动精度, 因此, 需要考虑预滑动阶段和加速度对摩擦力的影响, 设计改进的 Stribeck 效应函数为

$$g(\dot{q}) = \{F_{c0} + [(F_{smax} - F_{s0})\delta(\ddot{q}\dot{q}) + (F_{s0} - F_{c0})]e^{-(\dot{q}/\dot{q}_s)^2}\}h(\dot{q}) + F_{\sigma_2} \quad (8)$$

式中: $\delta(\ddot{q}\dot{q})$ 为变速度摩擦项的切换参数; $h(\dot{q})$ 为饱和函数, 保证摩擦力模型符合实际; F_{σ_2} 为粘性摩擦力, 其中:

$$\dot{q}_s = \dot{q}_{s0} + (\dot{q}_{smax} - \dot{q}_{s0})(1 - e^{-k_1|\dot{q}|}) \quad (9)$$

$$F_{\sigma_2} = b_1(1 - e^{-b_2|\dot{q}|})\operatorname{sgn}(\dot{q}) \quad (10)$$

$$h(\dot{q}) = (1 - e^{-k_2\dot{q}})/(1 + e^{-k_2\dot{q}}) \quad (11)$$

$$\delta(\ddot{q}\dot{q}) = \begin{cases} 1, & \operatorname{sgn}(\ddot{q}\dot{q}) > 0 \\ 0, & \operatorname{sgn}(\ddot{q}\dot{q}) \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

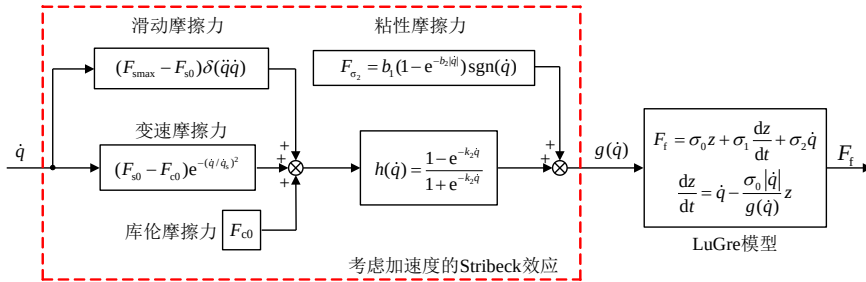


图 2 改进的 LuGre 摩擦力模型

Fig. 2 Improved LuGre friction model

2 PMLSM 位置跟踪控制器设计

为提高 PMLSM 伺服系统的跟踪精度和鲁棒性, 设计一种基于 CGT 的 RSAC 方法。利用 RSAC 解决不确定性对系统跟踪精度影响的问题, 利用 CGT 通过模型差异计算出 RSAC 的参数, 实现参数的自适应性调整, 该方法结构简单、易于实现, 且性能优越, 系统总体框图如图 3 所示。

2.1 RSAC 设计

由于 PMLSM 伺服系统为多变量、强耦合的非

线性系统, 难以建立精确的数学模型, 因此设计不依赖精确模型的 RSAC 方法, 直接观测系统状态, 并克服不确定性的影响。

对式(2)改写, 定义不含集总不确定性 F_d 的参考模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{B}_m u_m \\ y_m = \mathbf{C}_m \mathbf{x}_m \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{x}_m$ 为参考状态变量; u_m 为参考模型的输入信号, 即参考模型的 q 轴电流; y_m 为参考位置输出;

传统和改进的 Stribeck 摩擦力效应曲线如图 1 所示。

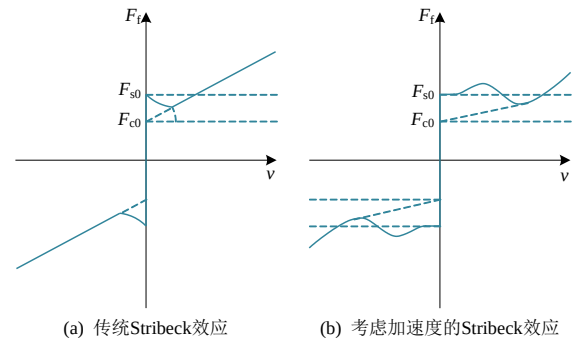


图 1 Stribeck 效应曲线

Fig. 1 Stribeck effect curves

因此, 将式(8)—(12)代入式(5)—(6)所示的传统 LuGre 模型中, 即可得到改进的 LuGre 模型如图 2 所示。

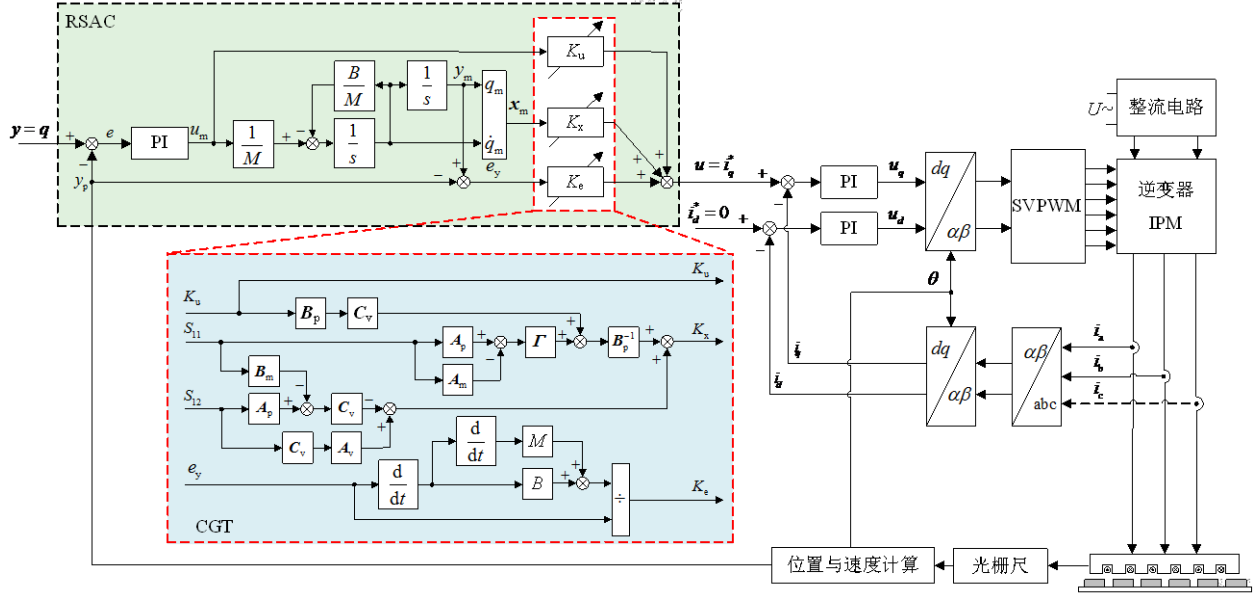


图3 基于CGT的永磁直线同步电机RSAC系统框图

Fig. 3 Block diagram of RSAC system of permanent magnet linear synchronous motor based on CGT

A_m 为参考状态矩阵； B_m 为参考输入矩阵； C_m 为参考输出矩阵。

当完全跟踪时(即实际位置与参考位置相等)，相应的状态和控制输入分别被定义为参考状态和参考控制输入，其传递函数为

$$G(s) = 1/(Ms^2 + Bs) \quad (14)$$

式(2)相对度为2，不满足几乎严格正实性，需要并联前馈增益 $D(s)$ 减小系统相对度，使传递函数在右半开复平面上都有解，即在右半开复平面上无极点，保证系统的稳定性^[26]。设计新的传递函数 $G_p(s)$ 为

$$G_p(s) = G(s) + D(s) = \frac{1}{Ms^2 + Bs} + \frac{\alpha}{Ds + 1} \quad (15)$$

并联前馈增益 $D(s)$ 的存在只为降低模型相对度，在实际情况中不会影响模型输入输出的物理意义，由于并联前馈增益后的实际模型和参考模型之间会产生差异，所以需要前馈增益数值上设计的极小，以减小2个系统间差异。

为保证系统完全跟踪，参考模型与实际模型采用相同数学模型，式(15)可记为理想模型如下：

$$\begin{cases} \dot{x}_p^* = A_p x_p^* + B_p u_p^* \\ y_p^* = y_m = C_p x_p^* \end{cases} \quad (16)$$

式中： $\dot{x}_p^*$ 为理想状态变量； u_p^* 为理想输入信号，即传递函数 $G_p(s)$ 的 q 轴电流； y_p^* 为理想位置输出。

定义状态误差为

$$e_x = x_m - x_p \quad (17)$$

定义输出跟踪误差为

$$e_y = y_m - y_p \quad (18)$$

设计RSAC控制律为

$$u = K_x x_m + K_u u_m + K_e e_y \quad (19)$$

式中： u 为保证系统能够完全跟踪情况下的 q 轴电流； K_x 、 K_u 和 K_e 为状态增益、输入增益和误差增益，由CGT计算得出。

2.2 CGT设计

虽然RSAC可克服PMLSM中的不确定性，提高系统的鲁棒性和跟踪精度，但其参数 K_x 、 K_u 和 K_e 通常需人为设置，无法依据系统状态的变化而自适应调整，从而难以实现最优的控制效果。因此，设计CGT对状态矩阵进行观测，通过实际输出与参考输出差异计算出自适应参数。

为获得完全跟踪时的系统实际输入信号，将参考输入 u_m 表示为CGT的输出信号如下：

$$\begin{cases} \dot{v}_m = A_v v_m \\ u_m = C_v v_m - F_f / K_f \end{cases} \quad (20)$$

式中： A_v 为命令状态矩阵； C_v 为命令输出矩阵； v_m 为命令状态变量。

由于式(13)为非齐次线性方程，结合式(20)，则式(13)的解为：

$$x_m = \Gamma v_m + e^{A_m t} \xi_0 \quad (21)$$

$$\xi_0 = x_m(0) - \Gamma v_m(0) \quad (22)$$

式中: Γ 为命令状态参数矩阵; ξ_0 为初始状态下的状态误差。

将式(20)——(21)与式(13)联立, 得:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_m &= \Gamma \dot{\mathbf{v}}_m = \mathbf{A}_m \Gamma \mathbf{v}_m + \mathbf{B}_m \mathbf{C}_v \mathbf{v}_m = \\ \Gamma \mathbf{A}_v \mathbf{v}_m &= (\mathbf{A}_m \Gamma + \mathbf{B}_m \mathbf{C}_v) \mathbf{v}_m\end{aligned}\quad (23)$$

得到常数矩阵 Γ 满足关系式:

$$\mathbf{A}_m \Gamma - \Gamma \mathbf{A}_v + \mathbf{B}_m \mathbf{C}_v = 0 \quad (24)$$

完全跟踪时, 完全跟踪误差 $e_y^* = 0$, 参考模型输入可由理想模型输入代替, 假设理想位置是模型状态和模型输入的线性函数, 表示为

$$\begin{bmatrix} x_p^* \\ u_p^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ K_x & K_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ u_m \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中 $\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ K_x & K_u \end{bmatrix}$ 为模型转换参数矩阵。

联立式(16)、(20)和(25), 整理得:

$$[(\mathbf{C}_p \mathbf{S}_{11} - \mathbf{C}_m) \Gamma + \mathbf{C}_p \mathbf{S}_{12} \mathbf{C}_v] \mathbf{v}_m = 0 \quad (26)$$

由此, 可确定 Γ 的选取值, 保证系统在理论上达到完全跟踪, 以便求解自适应增益 K_x 、 K_u 和 K_e 。

将式(25)和(16)联立, 整理得:

$$\dot{\mathbf{x}}_p^* = [(\mathbf{A}_p \mathbf{S}_{11} + \mathbf{B}_p \mathbf{K}_x) \Gamma + \mathbf{A}_p \mathbf{S}_{12} \mathbf{C}_v + \mathbf{B}_p \mathbf{K}_u \mathbf{C}_v] \mathbf{v}_m \quad (27)$$

对式(25)进行求导, 并和式(20)联立, 整理得:

$$\dot{\mathbf{x}}_p^* = (\mathbf{S}_{11} \mathbf{A}_m \Gamma + \mathbf{S}_{11} \mathbf{B}_m \mathbf{C}_v + \mathbf{S}_{12} \mathbf{C}_v \mathbf{A}_v) \mathbf{v}_m \quad (28)$$

可得 K_x 和 K_u 关系为

$$\begin{cases} (\mathbf{A}_p \mathbf{S}_{11} + \mathbf{B}_p \mathbf{K}_x - \mathbf{S}_{11} \mathbf{A}_m) \Gamma + \mathbf{A}_p \mathbf{S}_{12} \mathbf{C}_v + \\ \mathbf{B}_p \mathbf{K}_u \mathbf{C}_v - \mathbf{S}_{11} \mathbf{B}_m \mathbf{C}_v - \mathbf{S}_{12} \mathbf{C}_v \mathbf{A}_v = 0 \\ \dot{\mathbf{e}}_x = (\mathbf{A}_p - \mathbf{B}_p \mathbf{K}_e \mathbf{C}_p) \mathbf{e}_x \end{cases} \quad (29)$$

式(29)用于求解 RSAC 中的输入增益 K_u 和状态增益 K_x 。

将式(16)改写, 得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_p^* \\ \mathbf{y}_p^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{B}_p \\ \mathbf{C}_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p^* \\ \mathbf{u}_p^* \end{bmatrix} \quad (30)$$

将式(25)代入式(30), 得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_p^* \\ \mathbf{y}_p^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{B}_p \\ \mathbf{C}_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ K_x & K_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{u}_m \end{bmatrix} \quad (31)$$

对式(25)中的 x_p^* 进行求导, 得:

$$\dot{\mathbf{x}}_p^* = \mathbf{S}_{11} \dot{\mathbf{x}}_m + \mathbf{S}_{12} \dot{\mathbf{u}}_m \quad (32)$$

因为 u_m 为参考输入信号, 则:

$$\dot{\mathbf{x}}_p^* = \mathbf{S}_{11} \dot{\mathbf{x}}_m \quad (33)$$

将式(13)代入式(33), 得:

$$\dot{\mathbf{x}}_p^* = \mathbf{S}_{11} \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{S}_{11} \mathbf{B}_m \mathbf{u}_m \quad (34)$$

将式(34)与式(16)联立, 得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_p^* \\ \mathbf{y}_p^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} \mathbf{A}_m & \mathbf{S}_{11} \mathbf{B}_m \\ \mathbf{C}_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{u}_m \end{bmatrix} \quad (35)$$

令式(31)和(35)右式相等, 得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{B}_p \\ \mathbf{C}_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ K_x & K_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{u}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} \mathbf{A}_m & \mathbf{S}_{11} \mathbf{B}_m \\ \mathbf{C}_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{u}_m \end{bmatrix} \quad (36)$$

因为 $\begin{bmatrix} \mathbf{x}_m \\ \mathbf{u}_m \end{bmatrix}$ 任意, 所以假设:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{B}_p \\ \mathbf{C}_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ K_x & K_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11} \mathbf{A}_m & \mathbf{S}_{11} \mathbf{B}_m \\ \mathbf{C}_m & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

则式(37)用于求解转换参数矩阵中的元素。

定义转换矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & \mathbf{B}_p \\ \mathbf{C}_p & 0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (38)$$

式中逆的存在要求控制量等于被控量, 如果控制量大于被控量, 可能需要一个伪逆, 而控制量小于被控量的情况通常没有解。

所以, 要求解的分块矩阵方程为

$$\begin{cases} S_{11} = \Omega_{11} \mathbf{S}_{11} \mathbf{A}_m + \Omega_{12} \mathbf{C}_m \\ S_{12} = \Omega_{11} \mathbf{S}_{11} \mathbf{B}_m \\ K_x = \Omega_{21} \mathbf{S}_{11} \mathbf{A}_m + \Omega_{22} \mathbf{C}_m \\ K_u = \Omega_{21} \mathbf{S}_{11} \mathbf{B}_m \end{cases} \quad (39)$$

若式(39)中 Ω_{11} 的所有特征值和 $\mathbf{A}_m$ 的所有特征值不相等, 则该方程的解存在。

当 y_p 在 $t=0$ 不等于 y_m 时, 若状态误差 $\mathbf{e}_x$ 包含在控制律中, 系统可以实现渐进跟踪。

将状态误差方程写为

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}}_x &= \dot{\mathbf{x}}_p^* - \dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p^* + \mathbf{B}_p \mathbf{u}_p^* - \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p - \mathbf{B}_p \mathbf{u}_p = \\ &\mathbf{A}_p \mathbf{e}_x + \mathbf{B}_p (\mathbf{u}_p^* - \mathbf{u}_p)\end{aligned} \quad (40)$$

系统输入为

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{u}_p^* + \mathbf{K}_e (\mathbf{y}_m - \mathbf{y}_p) = \mathbf{u}_p^* + \mathbf{K}_e \mathbf{C}_p \mathbf{e}_x \quad (41)$$

则状态误差方程为

$$\dot{\mathbf{e}}_x = (\mathbf{A}_p - \mathbf{B}_p \mathbf{K}_e \mathbf{C}_p) \mathbf{e}_x \quad (42)$$

由式(42)可得, $\mathbf{K}_e$ 随误差变化自适应更新, 抑制系统不确定性, 保证状态误差 $\mathbf{e}_x$ 趋近 0。

3 系统实验仿真

为验证方法的有效性，将文献[15]中的简单自适应控制、文献[13]中的自适应超螺旋时变滑模控制和文献[14]中的自适应鲁棒控制与本文提出方法进行对比实验。控制器参数选取如下：

1) 简单自适应控制(下文简称为 C1): $A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.3 \end{bmatrix}$; $B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/0.2 \end{bmatrix}$; $K_x=0.2$; $K_u=1$; $K_e=35.8$; $\alpha=2\times10^{-6}$; $D=0.4$ 。

2) 基于命令发生跟踪器的鲁棒简单自适应控制(下文简称为 C2): $A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.3 \end{bmatrix}$; $B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/0.2 \end{bmatrix}$; $\Gamma = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$; $\alpha = 2\times10^{-6}$; $D = 0.4$; K_x 、 K_u 和 K_e 由命令发生跟踪器计算得出。

3) 自适应超螺旋时变滑模控制(下文简称为 C3): $K_3=350$; $K_4=1$; $K_5=1$; $\zeta_x=\zeta_y=5$; $\gamma_x=\gamma_y=2$; $\mu_x=\mu_y=2\times10^{-3}$; $C_3=1$; $\varepsilon_x=\varepsilon_y=1$; $K_{\min}=10$ 。

4) 自适应鲁棒控制(下文简称为 C4): $p=12$; $\theta_{\max}=[0.3,0.1,0.5,1.5]^T$; $\theta_{\min}=[0.3,0.1,0.5,-1.5]^T$; $k_1=240$; $k_5=120$; $\Gamma=\text{diag}\{0,10\,000,1\,000,5\,000\}$ 。

将 4 种方法应用于 PMLSM 位置伺服系统中，利用 Link-RT 实时仿真平台搭建系统的硬件装置，实验平台如图 4 所示，实验中采用 Kollmorgen 公司生产的 PMLSM，其参数如表 1 所示。

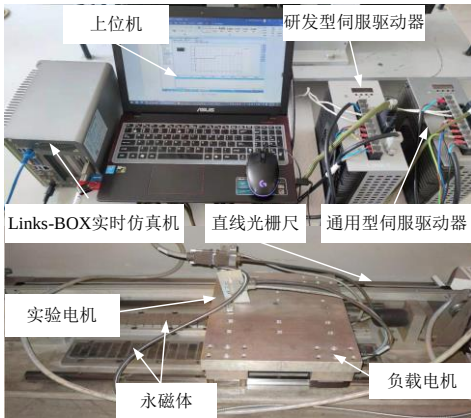


图 4 实验平台
Fig. 4 Experimental platform

表 1 PMLSM 主要参数

Table 1 Main parameters of PMLSM			
参数	数值	参数	数值
极对数 p_n	3	电阻/ Ω	2.8
永磁体磁链/Wb	0.11	电感/mH	22.1
动子质量/kg	6.6	粘滞摩擦系数/(N·s/m)	0.2
极距/mm	32	推力系数/(N/A)	50.7

3.1 摩擦力估计实验

本文建立的改进 LuGre 摩擦力模型考虑到加速度的影响，造成在预滑动阶段 Stribeck 曲线后移现象，导致精密加工时对摩擦力估计更符合实际工况，采用 CGT 对参考模型和理想模型的关系状态方程进行观测。由于温湿度对 PMLSM 机械接触间的摩擦力影响较小，在实验前后环境参数为：温度 22.8~24.1℃、相对湿度 42%~48%。摩擦力模型参数选取如下： $F_{c0}=11.245\text{ N}$ 、 $F_{s0}=5.239\text{ N}$ 、 $F_{s\max}=12.5163\text{ N}$ 、 $k_1=0.186$ 、 $k_2=252.1$ 、 $b_1=11.407$ 、 $b_2=1.535$ 。

预滑动下的 Stribeck 曲线如图 5 所示，在 I 阶段电机动子克服静摩擦力保持恒定；在 II 阶段由于加速度增大造成临界摩擦力逐渐变大，加剧摩擦滞后现象使 Stribeck 曲线后移；III 阶段表示摩擦力到达 Stribeck 特征摩擦力时出现在低速条件下随速度增大而减小的现象；IV 阶段表示当电机在预滑动时的摩擦力逐渐随速度增加而增加。可知，由于加速度影响会出现 Stribeck 效应后移现象，传统的线性摩擦力模型不能准确描述 PMLSM 在运动过程中的实际特性。因此，必须考虑加速度对摩擦力的影响。

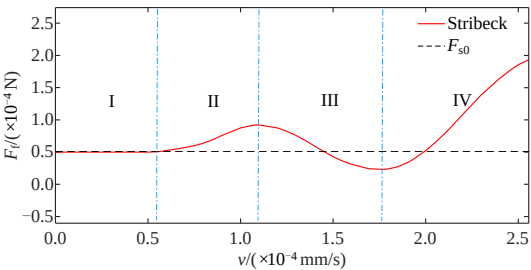


图 5 预滑动下的 Stribeck 曲线
Fig. 5 Stribeck curves under pre-sliding

当 PMLSM 以周期为 0.1s、幅值 5mm/s 的位置信号运动时，电机所受的摩擦力如图 6 所示，F1 (传统摩擦模型)表示当 PMLSM 从加速运动变为减速运动时，由于接触面鬃毛形变方向突变，导致所受摩擦力骤降。F2(改进摩擦模型)由于考虑加速度对摩擦力的影响，相比 F1 在加速度变化时更平滑，且由于 Stribeck 效应影响使摩擦力产生滞后，更符合实际情况。因此，本文对摩擦力的建模是必要的。

图 7 为相同正弦位置信号下的跟踪误差对比图，F2 相比 F1 表现出显著优越性。F2 的跟踪误差幅值明显更小，尤其在速度方向切换点，如 0.075s 处，传统模型因未考虑动态摩擦效应(如预滑动和加速度依赖的粘滞摩擦)导致误差突增，F2 通过加速度补偿将误差抑制在更低水平。此外，F2 的误差曲

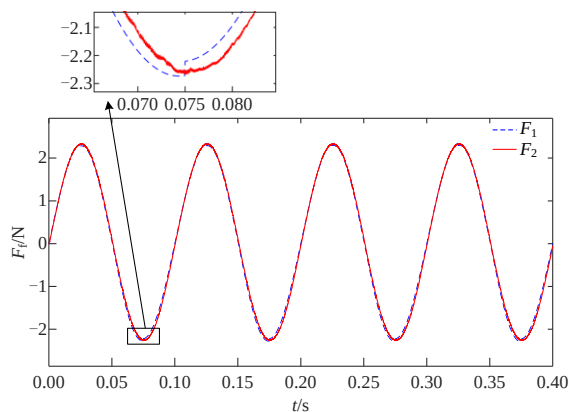


图 6 正弦位置信号下的摩擦力曲线

Fig. 6 Friction curves under sinusoidal position signal

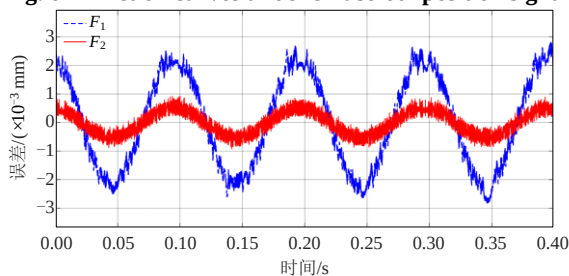


图 7 正弦位置信号下误差对比

Fig. 7 Errors comparison under sinusoidal position signal

线波动更平缓,说明其对动态扰动的鲁棒性更强,验证了加速度项在摩擦力建模中的关键作用。因此,本文所设计的改进 LuGre 模型切实可行,有助于提高系统跟踪精度。

3.2 梯形信号位置跟踪实验分析

为验证电机起停和匀速阶段的位置跟踪性能,给定位置参考信号为峰值 1、1.5、2 mm 梯形信号,验证本文所提方法对 PMLSM 位置跟踪的跟随性, PMLSM 空载起动运行,并且在 2、3.25 s 时对系统分别施加 40、75 N 负载扰动,验证该方法对 PMLSM 位置跟踪的鲁棒性。

采用所提方法得到的自适应控制参数如图 8 所示,在电机起动或停止时,受加速度影响,在预滑动过程中产生的系统不确定性较为复杂,命令发生跟踪器根据模型状态差异输出自适应参数。在电机运行过程中,由于摩擦力及其他扰动影响,系统误差时刻存在,命令发生跟踪器通过系统不确定性实时输出变化的自适应误差参数,抑制系统不确定性,减小系统的位置跟踪误差。

梯形位置跟踪曲线和位置跟踪误差曲线如图 9 和 10 所示。由图 9 中 0.5 s 的细节图可得,所提方法在梯形信号下的跟踪性能显著优于其他 3 种方法,尤其在拐点处现出更小的滞后和超调。通过图 10 所示的位置跟踪误差曲线可以看出,所提方

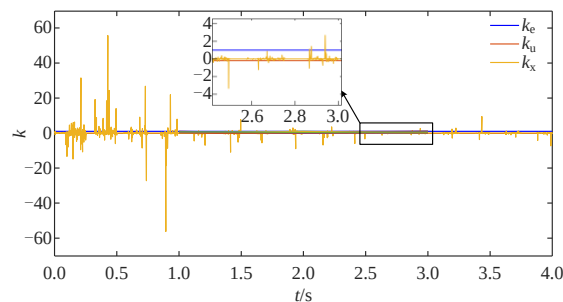


图 8 梯形信号下自适应控制参数

Fig. 8 Adaptive control parameters under trapezoidal signal

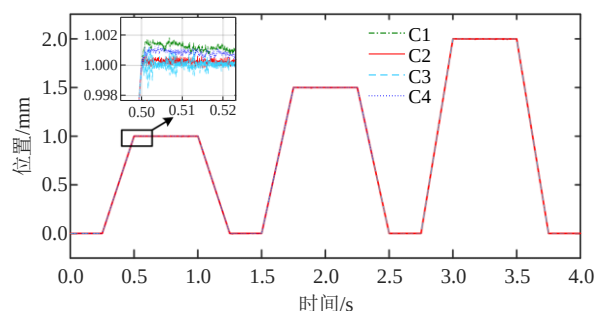


图 9 梯形信号下的位置跟踪曲线

Fig. 9 Position tracking curves under a trapezoidal signal

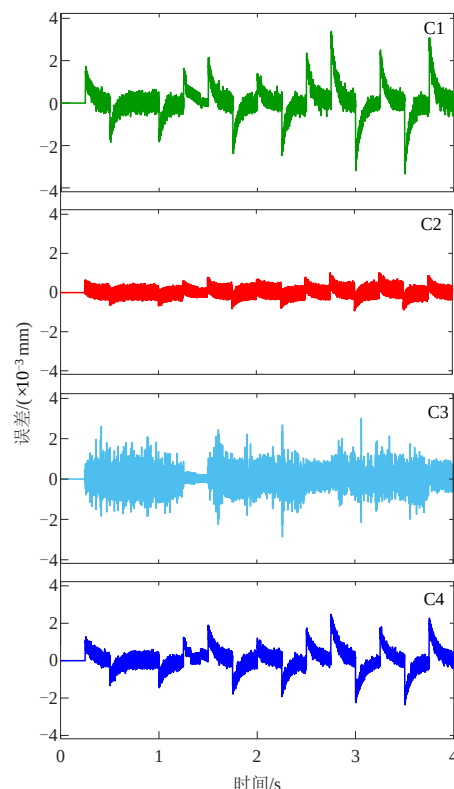


图 10 梯形信号下的位置跟踪误差曲线

Fig. 10 Position tracking errors curves under trapezoidal signal

法的优越性,系统稳定运行时,所提方法下的位置跟踪误差约为 $0.64\mu\text{m}$,较其他 3 种方法分别提高了 56%、66.7%和 47%。在 2 s 时对系统施加 40 N 负

载后，所提方法下的位置跟踪误差约为 $0.5\mu\text{m}$ ，系统的跟踪误差较其他 3 种方法分别减小了 56.5%、70.5%和 32.4%，满足 PMLSM 伺服系统的高精度要求。梯形信号下主要性能指标对如表 2 所示，所提方法较其他 3 种方法的位置跟踪超调量更小且调节时间更短。因此，所提方法可以很好地克服负载变化对系统的影响，使系统具有较强的鲁棒性。

表 2 梯形信号下的位置跟踪性能指标对比

Table 2 Comparison of position tracking performance indicators under trapezoidal signal

控制方法	(40N)	(40N)调节	(75N)	(75N)调节
	超调量/ μm	时间/ms	超调量/ μm	时间/ms
C1(文献[15])	1.36	9.89	2.48	12.96
C2(本文方法)	0.47	5.36	0.99	7.82
C3(文献[13])	0.88	6.14	1.50	9.38
C4(文献[14])	1.17	10.99	1.79	15.15

3.3 正弦信号位置跟踪实验分析

为验证变速运动下的位置跟踪性能，给定位置参考信号为幅值 1 mm 、周期 1 s 的正弦信号，验证所提方法对 PMLSM 位置跟踪的跟随性，PMLSM 空载起动运行，并且在 1.25 、 2.25 s 时对系统分别施加 40 、 75 N 负载扰动，验证该方法的鲁棒性。

采用所提方法的自适应控制参数如图 11 所示，体现了速度和加速度变化下的系统自适应误差参数随带有摩擦力扰动的集总扰动变化的情况，当集总扰动发生变化时，CGT 根据参考模型和实际模型的差异输出相对应的自适应误差参数，抑制系统不确定性，减小位置跟踪误差。

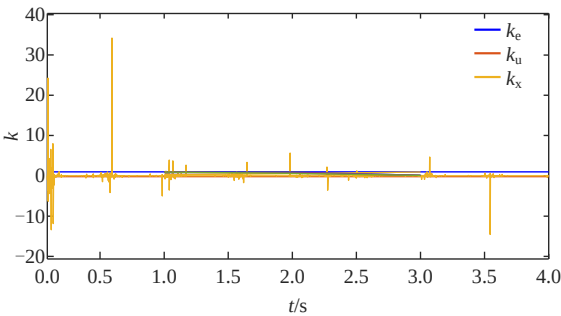


图 11 正弦信号下自适应控制参数

Fig. 11 Adaptive control parameters under sinusoidal signal

正弦位置跟踪曲线和位置跟踪误差曲线如图 12 和 13 所示。由图 13 可以看出，系统稳定运行时，所提方法下的位置跟踪误差约为 $0.6\mu\text{m}$ ，较其他 3 种方法的位置跟踪精度分别提高了 56%、66.7%、47%，表明所提方法的位置跟踪性能较好。在 1.25 s 时对系统施加 40 N 负载后，所提方法下的

位置跟踪误差约为 $0.5\mu\text{m}$ ，系统的位置跟踪误差较其他 3 种方法分别减小了 56.5%、70.5%、32.4%，且所提方法误差曲线波动更平缓，说明其对动态扰动的鲁棒性更强，能进一步提高位置跟踪精度。所提方法中的简单自适应控制参数根据集总扰动变化实时调节，从而减小 Stribeck 效应中加减速切换导致的非线性集总扰动问题，进而减小位置跟踪误差，使得该方法下的正弦位置信号跟踪的跟随性更优。从表 3 的正弦信号下的位置跟踪性能指标比

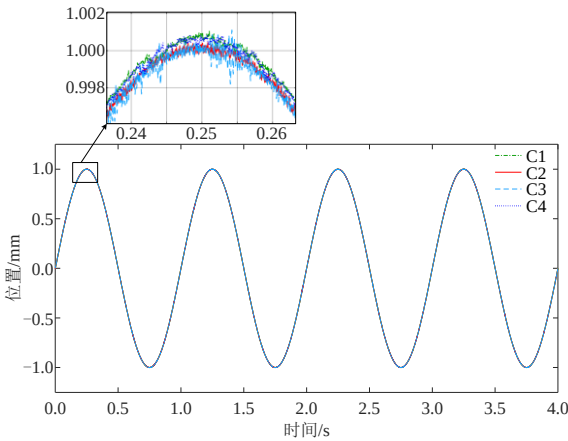


图 12 正弦信号下的位置跟踪曲线

Fig. 12 Position tracking curves under sinusoidal signal

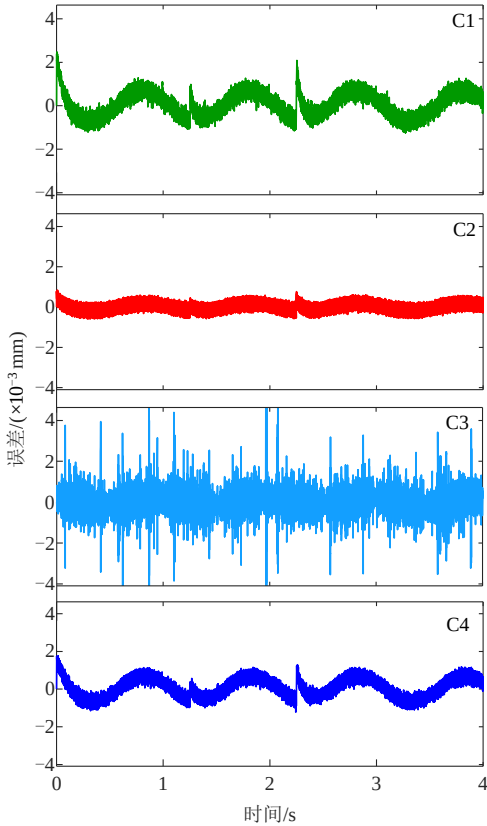


图 13 正弦信号下的位置跟踪误差曲线

Fig. 13 Position tracking errors curves under sinusoidal signal

较数据可以得出,所提方法的超调量较其它方法分别降低了 53.3%、35.6%和 46.2%,调节时间减少了 50.6%、14.5%和 39.6%。因此,所提方法在变速运动中可以很好地克服负载变化对系统的影响,使系统具有较强的鲁棒性。

表 3 正弦信号下的位置跟踪性能指标对比
Table 3 Comparison of position tracking performance indicators under sinusoidal signal

控制方法	(40N)	(40N)调节	(75N)	(75N)调节
	超调量/ μm	时间/ms	超调量/ μm	时间/ms
C1(文献[15])	1.05	11.05	2.16	13.48
C2(本文方法)	0.49	5.42	0.94	7.76
C3(文献[13])	0.76	6.34	1.47	9.15
C4(文献[14])	0.91	8.98	1.83	13.18

上文分析表明, PMLSM 在变速运行过程中,所提出的控制方法能够保证系统具有高精度的位置跟踪性能,可以有效克服不确定性,减小位置跟踪误差,提高精密加工精度。

4 结论

为克服工业进给驱动系统集总扰动不确定性及系统状态时变性影响,提高 PMLSM 伺服系统的位置跟踪精度和鲁棒性,本文提出抑制系统不确定性的 CGT-RSAC 方法,得出以下结论:

- 1) 采用 CGT-RSAC 方法能够更有效抑制系统不确定性因素,减小输出误差,提高位置跟踪精度;
- 2) CGT 能够将参考模型和实际模型的输出差异转换为 RSAC 的自适应控制参数,使系统能够适应参数变化和外部扰动,提高系统的位置跟踪精度和鲁棒性,满足精密加工要求。

参考文献

[1] 卢琴芬,沈毅明,叶云岳. 永磁直线电动机结构及研究发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2575-2587.
LU Qinfen, SHEN Yiming, YE Yunyue. Development of permanent magnet linear synchronous motors structure and research[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2575-2587(in Chinese).

[2] 张国强,赵新茹,张恒,等. 基于比例谐振内模扩张状态观测器的 PMLSM 推力波动抑制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2449-2458.
ZHANG Gouqiang, ZHAO Xinru, ZHANG Heng, et al. Proportional resonant internal model extended state observer based thrust ripple suppression strategy of PMLSM drives[J]. Transactions of China Electrotechnical

Society, 2024, 39(8): 2449-2458(in Chinese).

[3] 王立俊,赵吉文,盘真保,等. 基于有限时间状态观测器的永磁同步直线电机递归终端滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 755-765.
WANG Lijun, ZHAO Jiwen, PAN Zhenbao, et al. Recursive terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous linear motor based on finite-time state observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 755-765(in Chinese).

[4] 刘进海,史黎明,郭科宇,等. 抑制电流波动的直线电机分段供电切换方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1576-1586.
LIU Jinhai, SHI Liming, GUO Keyu, et al. A switch method to suppress the current fluctuation for segmented powered linear motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1576-1586(in Chinese).

[5] 鲍明堃,周扬忠,钟天云. 基于传动模型重构的永磁同步直线电机机械参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1597-1607.
BAO Mingkun, ZHOU Yangzhong, ZHONG Tianyun. Mechanical parameter identification of permanent magnet synchronous linear motor based on transmission model reconstruction [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1597-1607(in Chinese).

[6] 方馨,王丽梅,张康. 基于扰动观测器的永磁直线电机高阶非奇异快速终端滑模控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(2): 409-421.
FANG Xin, WANG Limei, ZHANG Kang. High order nonsingular fast terminal sliding mode control of permanent magnet linear motor based on disturbance observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2): 409-421(in Chinese).

[7] 滕子铖,陶友瑞,李珊瑚,等. 永磁同步直线电机位移误差的预设性能反步控制策略[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(9): 70-80.
TENG Zicheng, TAO Yourui, LI Shanhu, et al. Prescribed performance backstepping control strategy for displacement error of permanent magnet linear synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(9): 70-80(in Chinese).

[8] 鲍明堃,周扬忠. 基于复合神经网络重构对象的永磁同步直线电机变参数型位移速度并行控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2470-2484.
BAO Mingkun, ZHOU Yangzhong. Parallel displacement velocity control of permanent magnet synchronous linear motor with variable parameters based on composite neural network reconstruction object[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2470-2484(in Chinese).

[9] 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 Xinyu, WANG Limei. Adaptive fractional-order terminal sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5434-5443(in

- Chinese).
- [10] WANG Lijun, ZHAO Jiwen, YU Zixiang, et al. Robust and high-precision position control of PMLSM-driven feed servo system based on adaptive fast nonsingular terminal sliding mode[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(1): 4882-4894.
- [11] WANG Xintian, MEI Xuesong, YANG Jiankun, et al. Adaptive neural sliding mode control of an uncertain permanent magnet linear motor system with unknown input backlash in laser processing[J]. Information Sciences, 2024, 680: 121087.
- [12] 张毅伟, 黄旭珍, 徐济安. 基于混合自适应扩展卡尔曼滤波的永磁同步直线电机等效机械参数辨识策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 1162-1172.
- ZHANG Yiwei, HUANG Xuzhen, XU Ji'an. Equivalent mechanical parameter identification of permanent magnet synchronous linear motor based on hybrid adaptive extended Kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1162-1172(in Chinese).
- [13] 金鸿雁, 雷滋稼, 马阔. 直驱 XY 平台自适应超螺旋时变滑模精密轮廓跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(16): 6485-6493.
- JIN Hongyan, LEI Zijia, MA Kuo. Adaptive super twisting time varying sliding mode precise contour tracking control for direct drive XY platform [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(16): 6485-6493(in Chinese).
- [14] 袁明星, 刘馨, 张雪波. 驱动约束下直线电机自适应鲁棒优化控制[J]. 控制工程, 2022, 29(5): 813-818.
- YUAN Mingxing, LIU Xin, ZHANG Xuebo. Optimized adaptive robust control of a linear motors with actuating constraints[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(5): 813-818(in Chinese).
- [15] NYOBUYA H J, HALINGA M S, UCHIYAMA N. Enhanced motion accuracy in industrial feed drive systems using simple adaptive control with a jerk-based augmented signal[J]. IFAC-PapersOnLine, 2023, 56(2): 9203-9208.
- [16] 曹阳, 郭健. 基于特征模型的永磁同步直线电机自适应控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(3): 131-140.
- CAO Yang, GUO Jian. Adaptive control of permanent magnet synchronous linear motor based on characteristic model[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(3): 131-140(in Chinese).
- [17] HU Quan, SU Li, CAO Yinguo, et al. Decentralized simple adaptive control for large space structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 427: 95-119.
- [18] NYOBUYA H J, HALINGA M S, UCHIYAMA N. Simple adaptive contouring control for feed drive systems using jerk-based augmented output signal[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 130(9): 4985-5001.
- [19] GE Wenqing, XU Haoli, TAN Cao, et al. High precision control of direct-drive permanent magnet linear motor with adaptive friction compensation[J]. Journal of Vibration and Control, 2024, 30(17-18): 4069-4079.
- [20] 朱禹豪. 基于 LuGre 模型摩擦补偿的直线电机运动控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- ZHU Yuhao. Design of linear motor motion control system based on LuGre model friction compensation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023(in Chinese).
- [21] 赵天一, 贵献国, 乔岳, 等. 基于平滑 GMS 模型和改进扩张状态观测器的复合摩擦补偿[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 1999-2008.
- ZHAO Tianyi, GUI Xianguo, QIAO Yue, et al. Composite friction compensation based on smooth GMS model and improved extended state observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1999-2008(in Chinese).
- [22] MAIER M, PUSTERHOFFER M, SUMMER F, et al. Validation of statistic and deterministic asperity contact models using experimental Stribeck data[J]. Tribology International, 2022, 165: 107329.
- [23] 谭草, 黎德祥, 葛文庆, 等. 改进 LuGre 模型的电磁直线执行器自适应鲁棒控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(10): 130-138.
- TAN Cao, LI Dexiang, GE Wenqing, et al. Adaptive robust control for electromagnetic linear actuator with improved LuGre model[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(10): 130-138(in Chinese).
- [24] 黄旭珍, 张成明, 梁进, 等. 考虑定位力及摩擦力的永磁同步直线电机系统预定位估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1496-1504.
- HUANG Xuzhen, ZHANG Chengming, LIANG Jin, et al. Pre-position estimation algorithm of permanent magnet synchronous linear motor system considering positioning force and friction times[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1496-1504(in Chinese).
- [25] 张恒. 永磁直线电机无传感器控制系统推力波动抑制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- ZHANG Heng. Research on thrust ripple suppression strategy for sensorless PMLSM drives[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023(in Chinese).
- [26] HAKIMI-MOGHADDAM M, FERRANTE A. New results on the characterization of strictly positive real matrix transfer functions[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2021, 66(1): 335-339.



雷滋稼

在线出版日期: 2025-08-27.

收稿日期: 2025-02-28.

作者简介:

雷滋稼(2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电机控制, leizijia2023@163.com;

*通信作者: 金鸿雁(1993), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为直线伺服、智能控制等, jinhongyanch@163.com。

(编辑 陈娟, 李新洁)