

基于延迟补偿的永磁直线同步电机伺服系统 双闭环鲁棒重复控制

徐东波, 武志涛*

(辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114001)

Dual-Closed-Loop Robust Repetitive Control for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Servo System Based on Delay Compensation

XU Dongbo, WU Zhitao*

(School of Electronic and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114001, China)

Abstract: [Objective] In order to improve the dynamic response and robustness of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) servo systems, a dual-closed-loop cascade composite control method was proposed, combining robust velocity control with delay compensation and plug-in repetitive proportional differential (PD) position control. [Methods] Initially, a robust velocity controller was designed based on the reference model robust compensation principle, which effectively addressed the modeling errors between the reference model and the actual system model, using an inverse system delay model to mitigate the effects of system transmission delays. In addition, to effectively suppress periodic external disturbances, a plug-in repetitive controller was integrated with the PD position controller, forming a plug-in repetitive PD position controller. [Results] Experimental results demonstrate that this dual closed-loop cascade control structure significantly reduces position errors, addresses the degradation of system performance and overshoot caused by transmission delays, and effectively mitigates the impact of external periodic disturbances. [Conclusion] The proposed composite control method enables the PMLSM position servo system to achieve high-precision tracking of periodic signals, thereby improving the system's dynamic response and robustness.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor; delay compensation; periodic input; repetitive control; external disturbance

摘要: 【目的】为提升永磁直线同步电机(PMLSM)伺服系统的动态响应和鲁棒性,提出了一种将带延迟补偿的鲁棒速度控制与插入式重复比例微分(PD)位置控制相结合的双闭环级联复合控制方法。【方法】首先,基于参考模型鲁棒补偿原理设计了鲁棒速度控制器,该控制器能够有效地调节参考模型与实际系统模型之间的建模误差,并利用逆系统延迟模型来抵消系统传输延迟效应。此外,为了有效抑制周期性外部扰动,引入了插入式重复控制器与PD位置控制器相结合,构建了插入式重复PD位置控制器。【结果】试验结果表明,通过这种双闭环级联控制结构,可以有效地减小位置误差,解决了传输延迟导致的系统性能变差和响应超调问题,并且有效抑制了外部周期性扰动的影响。【结论】所提复合控制方法使PMLSM位置伺服系统能够实现对周期性信号的高精度跟踪,并提高了系统的动态响应和鲁棒性。

关键词: 永磁直线同步电机; 延迟补偿; 周期性输入; 重复控制; 外部扰动

0 引言

随着工业自动化和精密制造需求的不断增长,永磁直线同步电机(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM)作为一种高效的直线伺服运动执行器,其应用范围日益扩大^[1-4]。PMLSM以其高速、高精度和强推力等优势,在工业机器人、半导体生产设备以及物流仓储等领域展现出巨大潜力。然而,考虑到系统内部参数摄动、外部扰动以及不确定性干扰等因素,PMLSM在实际应用中仍然面临着多种挑战。其中,周期性的运动任务对PMLSM的精确控制提出了更高

基金项目: 国家自然科学基金(51677122)

National Natural Science Foundation of China(51677122)

的要求。在生产线上的重复定位应用中,精准的位置控制非常关键。然而,外部干扰可能会对系统的定位精度造成严重影响。本文旨在探讨如何抑制内部和外部扰动对系统的影响,以提升 PMLSM 在周期性参考输入轨迹跟踪过程中的跟踪精度。

为了提升 PMLSM 的位置跟踪控制品质,文献[5]提出一种基于不匹配干扰观测器的滑模控制以提高直线电机位置跟踪控制的鲁棒性,但该滑模控制方法的切换项会引起控制输入的抖振问题。文献[6]提出了一种自适应反推滑模控制方法,通过引入自适应参数估计器来校正滑模面的偏移,从而有效提高位置跟踪的精度,然而,该方法没有考虑如何削弱周期性推力扰动对系统的影响,当存在周期性外部扰动时可能激励未建模动态产生高频振荡问题。文献[7]设计了比例积分微分(Proportional Integral Differential, PID)分数阶迭代学习控制器以减小 PMLSM 位置伺服系统执行重复性任务时受多种因素影响而产生的跟踪误差,但 PID 控制方法仅在被控对象结构简单的情况下才能进行有效的控制,在对复杂非线性系统和复杂信号追踪方面存在局限性,并且该控制器内部参数多,参数取值依赖大量的试验辨识分析。文献[8]为了削弱周期性扰动对系统造成的影响,将小波滤波器与迭代学习控制算法相结合并引入到系统控制中,以提高系统的跟踪性能,该方法对系统扰动进行总估计有效地补偿了 PMLSM 位置跟踪过程中的周期性扰动,增强了系统的鲁棒性,提高了系统的位置跟踪性能,但该控制方法设计结构较复杂,且需要进行大量的试验以获取最佳的参数值,因此不易实现。文献[9]采用周期自适应扰动观测器来估计和补偿系统中的周期性扰动,从而提高 PMLSM 位置伺服系统的跟踪精度。然而,这种观测器对于系统模型的准确性和稳定性要求较高。如果系统模型存在误差或不确定性,观测器可能会引发较大的估计误差,从而对控制系统的稳定性造成不利影响。文献[10]使用自适应滑模控制器和重复控制器相级联的方法来抑制周期性扰动对 PMLSM 速度跟踪系统的影响,但系统的建模误差、传输延迟等因素依然会降低伺服系统的控制精度。

为提高 PMLSM 伺服系统的动态响应性能和

鲁棒性能,并实现对周期性输入信号的高精度跟踪,本文提出了一种带延迟补偿的鲁棒速度控制和插入式重复位置控制相结合的双闭环级联复合控制方法。首先,针对系统响应滞后降低速度控制性能的问题,基于鲁棒补偿控制原理,设计了一种带有延迟补偿项的鲁棒速度控制器。该控制器旨在消除参考模型与实际系统之间的建模误差,并且采用逆系统延迟模型来抵消传输延迟效应。其次,为了进一步抑制周期性外部扰动的影响,本文采用插入式重复控制器和比例微分(Proportional Differential, PD)位置控制器相结合,构建了插入式重复 PD 位置控制器。插入式重复控制器可以对周期性输入信号进行高精度跟踪,而 PD 位置控制器则用于实现对位置误差的闭环控制。试验表明,通过这种双闭环级联控制结构,可以有效减小位置误差,实现对周期性轨迹的精确跟踪。

1 PMLSM 鲁棒速度控制

1.1 PMLSM 数学模型

同步旋转坐标系下, PMLSM 的三相对称绕组 d 轴和 q 轴电压方程为^[11]

$$\begin{cases} u_d = L_d \frac{d}{dt} i_d + R_s i_d - \frac{\pi}{\tau} v L_q i_q \\ u_q = L_q \frac{d}{dt} i_q + R_s i_q + \frac{\pi}{\tau} v (L_d i_d + \psi) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ 为永磁体磁链; τ 为极距; v 为动子速度; R_s 为定子电阻; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感,表贴式 PMLSM 的交、直轴电感相等,即 $L_q = L_d$ 。

基于零直轴电流控制, PMLSM 的输出推力 F_e 可表示为^[12]

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

式中: $K_f = 3\pi\psi/(2\tau)$ 为推力系数。

PMLSM 运动方程为^[13-14]

$$F_e - F_d = M \frac{dv}{dt} + Bv \quad (3)$$

式中: M 为电机动子质量; F_d 为动子外力扰动; B 为导轨摩擦因数。

1.2 参考模型鲁棒补偿原理

鲁棒补偿原理基于一阶系统 $P(s)$, 其数学表

达式为

$$P(s) = \frac{c}{s + b} \quad (4)$$

式中: $b \neq c$, 且有 $b, c \in R^+$ 。

一阶系统 $P(s)$ 的闭环控制框图如图 1 所示。图 1 中: h 为积分增益; $U(s)$ 为控制量; $u(s)$ 为补偿量; $Y(s)$ 为系统输出信号; $R(s)$ 为系统输入信号; $\hat{P}(s)$ 为一阶参考模型, 其表达式为^[15]

$$\hat{P}(s) = \frac{a}{s + a} \quad (5)$$

式中: $a \in R^+$ 。

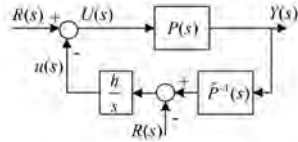


图 1 一阶系统 $P(s)$ 的控制框图

Fig. 1 Block diagram of control scheme for first-order system $P(s)$

$\hat{P}^{-1}(s)$ 是 $\hat{P}(s)$ 的逆模型。图 1 系统闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{acs + ach}{as(s + b) + hc(s + a)} \quad (6)$$

式(6)可改写为

$$G(s) = \frac{a}{s + a} \left(\frac{cs + hc}{as + hc} \right) \quad (7)$$

当 h 足够大时, 式(7)变为

$$G(s) \approx \frac{a}{s + a} \quad (8)$$

由式(8)可知, 当 h 足够大时, 系统闭环传递函数 $G(s)$ 与参考模型 $\hat{P}(s)$ 近似相同。

定义参考模型 $\hat{P}(s)$ 与实际模型 $P(s)$ 之差为建模误差 $\rho(s)$ 。将参考模型 $\hat{P}(s)$ 作为被控对象, 当存在外部扰动 F_d 时, 系统 $P(s)$ 的控制框图如图 2 所示。

补偿量 $u(s)$ 的表达式为

$$\begin{aligned} u(s) &= \frac{h}{s} [U(s) + \rho(s) - R(s)] = \\ &= \frac{h}{s} [F_d + \rho(s) - u(s)] = \\ &= \frac{h}{s + h} [F_d + \rho(s)] \end{aligned} \quad (9)$$

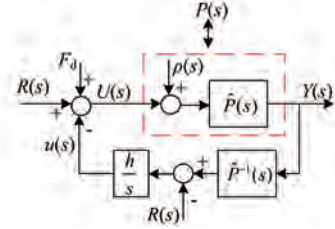


图 2 包含扰动的控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of control scheme with disturbance

由式(9)可知, 在参数 h 足够大时, 补偿量 $u(s)$ 等于外部扰动 F_d 与建模误差 $\rho(s)$ 之和, 从而有效应对系统不确定性。

1.3 引入延迟补偿的鲁棒速度控制

针对传输延迟导致系统响应滞后的问题, 本文依据鲁棒补偿理论设计了一种带延迟补偿项的鲁棒速度控制器, 旨在显著提升系统的动态响应性能。带延迟补偿项的鲁棒速度控制框图如图 3 所示。

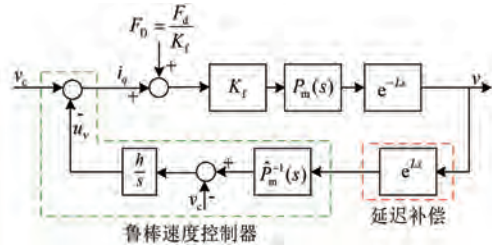


图 3 带延迟补偿项的鲁棒速度控制框图

Fig. 3 Block diagram of robust velocity control with delay compensation

图 3 中: $\hat{P}_m^{-1}(s)$ 为速度参考模型的逆模型; e^{-Ls} 为速度环产生的传输延迟; L 为延迟时间, $L \approx 0.001$ s。传输延迟会对直线伺服系统的动态性能产生负面影响, 导致系统响应产生超调现象, 还可能造成速度偏差较大, 进而影响控制系统的稳定性^[16]。为了解决以上问题, 本文在鲁棒速度控制器之前引入了传输延迟的逆模型 e^{Ls} 。由 $e^{-Ls} \cdot e^{Ls} \approx 1$ 可知, 逆模型 e^{Ls} 将会抵消系统内的传输延迟。根据泰勒展开式:

$$e^{Ls} = 1 + \frac{Ls}{1!} + \frac{L^2 s^2}{2!} + \frac{L^3 s^3}{3!} + \dots \approx 1 + Ls \quad (10)$$

当延迟时间 L 很小时, 传输延迟的逆模型 e^{Ls} 可以由 $1 + Ls$ 等效实现。此外, 再根据等式 $P(s)U = \hat{P}(s)(U + \rho)$ 以及由图 1 到图 2 的等效

转化关系, 可以将图 3 等效转化为图 4。

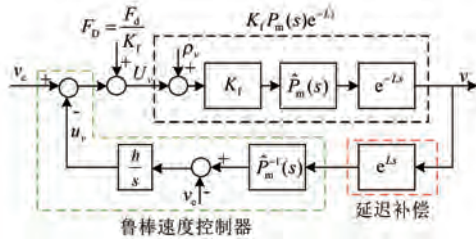


图 4 鲁棒速度控制框图

Fig. 4 Block diagram of robust velocity control

图 4 中: ρ_v 为速度模型的建模误差, 该误差可以被鲁棒速度控制器中的补偿机制所补偿。因此, 采用带延迟补偿的鲁棒速度控制器, 可以有效抑制外部干扰、克服建模误差, 并弥补传输延迟等多种因素的不利影响。这一改进使得速度闭环传递函数最终可以被简化为一阶理想系统 $\hat{P}_m(s)$, 其控制框图如图 5 所示。

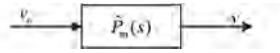


图 5 简化的速度控制框图

Fig. 5 Simplified block diagram of velocity control

2 PMLSM 插入式重复位置控制

为了减弱周期性外部干扰对位置跟踪精度的影响, 基于内模原理^[17-18], 本文采用了插入式重复控制器与 PD 位置控制器相结合的方式, 设计了一种插入式重复 PD 位置控制器, 具体的控制系统结构如图 6 所示。

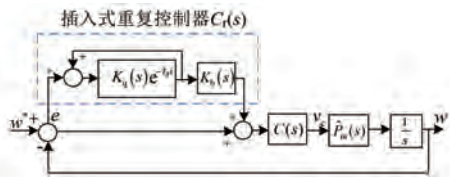


图 6 位置控制框图

Fig. 6 Block diagram of position control

图 6 中: w^* 为位置输入信号; w 为位置输出信号。插入式重复控制器 $C_r(s)$ 由二阶低通滤波器 $K_q(s)$ 、延迟环节 $e^{-T_d s}$ 串联形成局部单位正反馈, 再与相位超前补偿器 $K_b(s)$ 串联构成。低通滤波器 $K_q(s)$ 的函数式为^[19]

$$K_q(s) = \frac{e^{\tau_q s}}{\frac{s^2}{\omega_q^2} + \frac{2\zeta_q}{\omega_q}s + 1} \quad (11)$$

式中: $\zeta_q = \sqrt{2}/2$ 为阻尼系数; ω_q 为截止频率; τ_q 为低通滤波器超前系数。

$K_b(s)$ 的表达式为

$$K_b(s) = e^{\tau_b s} \quad (12)$$

式中: τ_b 为相位超前补偿器非负系数。

$C(s)$ 为位置控制器, 采用经典 PD 控制^[20], 其表达式为

$$C(s) = k_p + k_d s \quad (13)$$

式中: k_p, k_d 为 PD 控制器参数。

由图 6 可得控制器 $C_r(s)$ 的传递函数为

$$C_r(s) = \frac{1 - K_q(s)e^{-T_d s} + K_b(s)K_q(s)e^{-T_d s}}{1 - K_q(s)e^{-T_d s}} \quad (14)$$

式中: T_d 为延迟环节时间系数。

经整理得:

$$C_r(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_q \omega_q s + \omega_q^2 (1 - e^{-\tau_1 s} + e^{-\tau_2 s})}{s^2 + 2\zeta_q \omega_q s + \omega_q^2 (1 - e^{-\tau_1 s})} \quad (15)$$

式中: τ_1, τ_2 为重复控制器时间系数, $\tau_1 = T_d - \tau_q$, $\tau_2 = T_d - \tau_q - \tau_b$; $e^{-\tau_1 s}$ 和 $e^{-\tau_2 s}$ 为延时函数, 其利用 3 阶 Pade 逼近式实现, 具体为

$$e^{-\tau_1 s} = \frac{1 + \sum_{k=1}^n (-1)^k p_k (\tau_1 s)^k}{1 + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_1 s)^k} \quad (16)$$

$$e^{-\tau_2 s} = \frac{1 + \sum_{k=1}^n (-1)^k p_k (\tau_2 s)^k}{1 + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_2 s)^k} \quad (17)$$

式中: $n = 3$; $k = 1, 2, 3$; $p_1 = 0.5$; $p_2 = 0.1$; $p_3 = 0.0084$ 。

设 $C_r(s) = \frac{N_r(s)}{D_r(s)}$, 将式 (16) 和式 (17) 代入式

(15) 得:

$$N_r(s) = (s^2 + 2\zeta_q \omega_q s + \omega_q^2) \left[1 + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_1^k + \tau_2^k) s^k + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_1 s)^k \sum_{k=1}^n p_k (\tau_2 s)^k \right] - \omega_q^2 \left[2 + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_1^k + \tau_2^k) s^k + \sum_{k=1}^n (-1)^k p_k (\tau_1^k + \tau_2^k) s^k + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_2 s)^k \sum_{k=1}^n (-1)^k p_k (\tau_1 s)^k + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_1 s)^k \sum_{k=1}^n (-1)^k p_k (\tau_2 s)^k \right] \quad (18)$$

$$D_r(s) = (s^2 + 2\zeta_q \omega_q s + \omega_q^2) \left[1 + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_1^k + \tau_2^k) s^k + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_1 s)^k \sum_{k=1}^n p_k (\tau_2 s)^k \right] - \omega_q^2 \left[1 + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_2 s)^k + \sum_{k=1}^n (-1)^k p_k (\tau_1 s)^k + \sum_{k=1}^n p_k (\tau_2 s)^k \sum_{k=1}^n (-1)^k p_k (\tau_1 s)^k \right] \quad (19)$$

根据文献[21]中重复控制器的参数确定方法,

$$K_b(s) = e^{0.01s} \quad (21)$$

得到本文控制器的参数为: $\tau_q = 0.02$; $\zeta_q = \sqrt{2}/2$; $\omega_q = 150 \text{ rad/s}$; $\tau_b = 0.01$ 。将以上参数分别代入式(11)、式(12)和式(15),则低通滤波器函数为

$$K_q(s) = \frac{e^{0.02s}}{\frac{s^2}{\omega_q^2} + \frac{2\zeta_q s}{\omega_q} + 1} \quad (20)$$

插入式重复控制器的传递函数为

$$C_r(s) = \frac{s^2 + 212.1s + 22\,500(1 - e^{-\tau_1 s} + e^{-\tau_2 s})}{s^2 + 212.1s + 22\,500(1 - e^{-\tau_1 s})} \quad (22)$$

将 $\tau_1 = T_d - 0.02$ 、 $\tau_2 = T_d - 0.03$ 代入式(18)、式(19)得:

$$N_r(s) = (s^2 + 212.1s + 22\,500) \left[1 + \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_1^k + \tau_2^k) s^k + \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_1 s)^k \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_2 s)^k \right] - 22\,500 \left[2 + \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_1^k + \tau_2^k) s^k + \sum_{k=1}^3 (-1)^k p_k (\tau_1^k + \tau_2^k) s^k + \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_2 s)^k \sum_{k=1}^3 (-1)^k p_k (\tau_1 s)^k + \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_1 s)^k \sum_{k=1}^3 (-1)^k p_k (\tau_2 s)^k \right] \quad (23)$$

$$D_r(s) = (s^2 + 212.1s + 22\,500) \left[1 + \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_1^k + \tau_2^k) s^k + \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_1 s)^k \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_2 s)^k \right] - 22\,500 \left[1 + \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_2 s)^k + \sum_{k=1}^3 (-1)^k p_k (\tau_1 s)^k + \sum_{k=1}^3 p_k (\tau_2 s)^k \sum_{k=1}^3 (-1)^k p_k (\tau_1 s)^k \right] \quad (24)$$

3 试验验证

本文采用支持 Matlab/Simulink 图形编程的科尔摩根零力矩点 (Zero Moment Point, ZMP) 运动控制平台进行试验与分析。该平台由 Kollmorgen ICD05-030 型 PMLSM、工控机 (内含 ZMP 控制卡)、机柜 (内含 Yaskawa GA800 伺服驱动器)、Heidenhain RCN 光栅尺、Omron D4NL 限位开关组成,如图 7 所示。ICD05-030 型 PMLSM 参数如表 1 所示。

表 1 ICD05-030 型 PMLSM 参数

Tab. 1 Parameters of ICD05-030 PMLSM

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电感/mH	9.1	粘滞系数/(N·s·m ⁻¹)	1.2
相电阻/Ω	3.2	推力系数/(N·A ⁻¹)	26.7
动子质量/kg	2.5	极距/mm	13

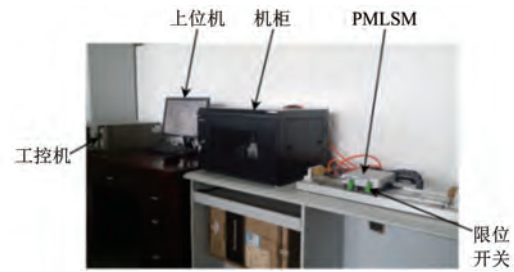


图 7 试验平台

Fig. 7 Experimental platform

3.1 速度特性试验

为了充分验证本文所提鲁棒速度控制器的卓越性能,进行了速度阶跃响应试验。速度鲁棒补偿控制器设定积分增益为 $h = 3\,000$;考虑到传输延迟,设置延迟时间 $L = 0.001 \text{ s}$ 。PD 控制器的参数设置为 $k_p = 2\,700$ 、 $k_d = 4.43$ 。将无延迟补偿和带延迟补偿两种情况下的鲁棒速度控制

器进行对比,两种情况下的速度阶跃响应曲线如图 8 所示。

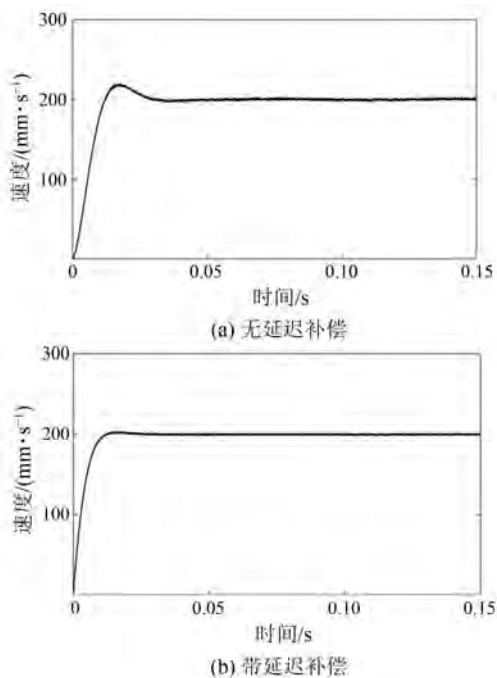


图 8 速度阶跃响应曲线

Fig. 8 Step velocity response curve

由图 8(a)可知,传输延迟对速度控制器的动态特性产生了明显的影响,导致速度响应在阶跃输入时出现了明显超调现象,并且需要大约 0.05 s 才能达到稳态。由图 8(b)可知,在采用带延迟补偿的鲁棒速度控制器后,阶跃响应的超调大幅减少,仅需约 0.03 s 即可达到稳态。因此,在带延迟补偿的情况下,鲁棒速度控制器的性能得到了显著改善,延迟补偿能够更好地抑制速度阶跃引起的过冲和振荡现象,使得系统的响应更加平稳。试验结果表明,本文提出的带延迟补偿的鲁棒速度控制器能够有效降低速度控制系统的过度调节,减轻了传输延迟所带来的负面效应,优化速度控制系统的动态特性。

图 9 和图 10 为带延迟补偿时不同速度的 S 型响应曲线。图 9 为电机从 0 mm/s 加速至 300 mm/s 最后减速至静止状态的速度响应曲线,动子质量为 $M = 2.5$ kg,在 $t = 0.06$ s 时突加 $F_d = 25$ N 的阶跃扰动;图 10 为电机从 0 mm/s 加速至 500 mm/s 最后减速至静止状态的速度响应曲线,动子质量为 $M = 3$ kg,在 $t = 0.06$ s 时突加 $F_d = 30$ N 的阶跃扰动。由图 9 可知,速度为

300 mm/s 时,在 $t = 0.06$ s 突加负载后,速度误差最大值为 18 mm/s,约 0.02 s 后速度响应恢复至稳态。由图 10 可知,速度为 500 mm/s 时,在 $t = 0.06$ s 突加负载后,速度误差最大值为 25 mm/s,约 0.03 s 后恢复至稳态。可知,本文提出的引入延迟补偿的鲁棒速度控制器,具有良好的抗负载干扰能力,能够实现精确的速度控制。

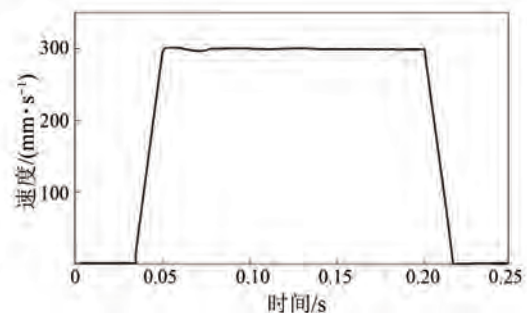


图 9 速度为 300 mm/s 时的 S 型速度响应曲线

Fig. 9 S-type velocity response curve at 300 mm/s

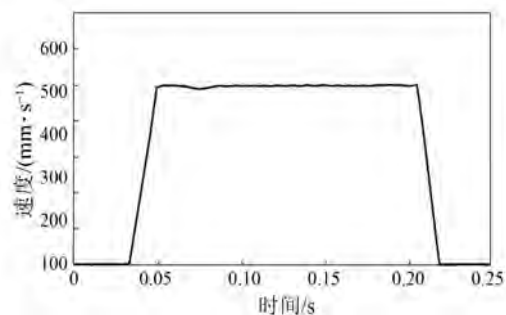


图 10 速度为 500 mm/s 时的 S 型速度响应曲线

Fig. 10 S-type velocity response curve at 500 mm/s

3.2 位置跟踪鲁棒性试验

为了验证本文方法对外部扰动的抑制能力,本文分别采用 PD 控制和插入式重复 PD 位置控制两种位置环控制方法进行对比试验。在试验中,阶跃位置指令 $w^* = 50$ mm,外部扰动为周期性扰动信号 $F_d = 10\sin(100t)$ N。两种位置环控制方法的阶跃位置响应分别如图 11、图 12 所示。

对比图 11、图 12 可知,采用插入式重复 PD 位置控制的系统具有更小的超调量,并且阶跃位置响应曲线更加平稳,较好地跟踪了给定的位置指令。同时,在给定指令与实际位置之间的误差方面,插入式重复 PD 位置控制方法可以得到更小的位置跟踪误差值,表明其对外部扰动的抑制能力更强。因此,本文所提出的插入式重复 PD

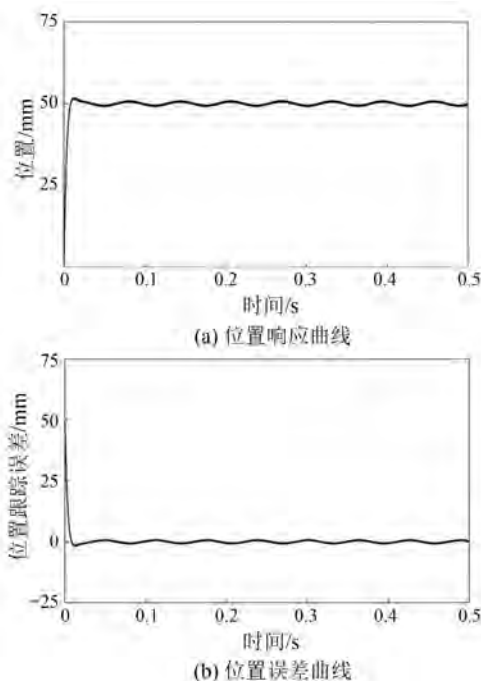


图 11 PD 控制方法的阶跃位置响应

Fig. 11 Step position response of the PD method

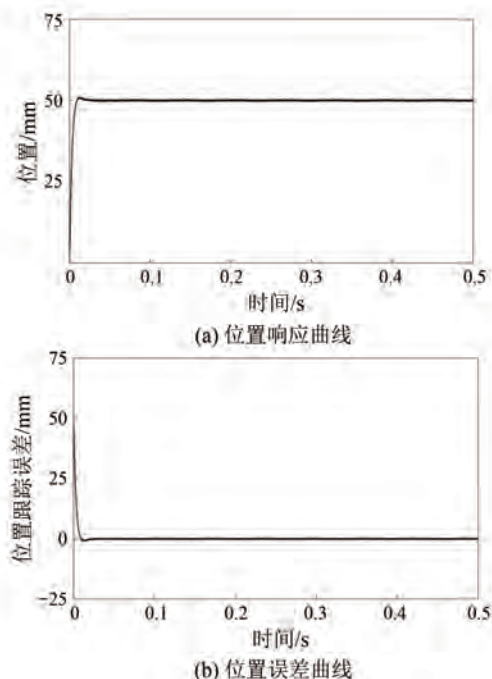


图 12 插入式重复 PD 位置控制方法的阶跃位置响应

Fig. 12 Step response of plug-in repetitive PD position control method

位置控制器能够有效抑制外部扰动对系统性能的影响,提高了直线伺服系统的位置跟踪精度和鲁棒性。

3.3 周期性位置跟踪性能试验

为了进一步验证本文方法的适用性,并评估其对周期性位置轨迹的跟踪能力,本文进行了方波位置轨迹和正弦位置轨迹的对比试验。图 13 和图 14 为方波轨迹的位置响应曲线;图 15 和图 16 为正弦轨迹的位置响应曲线。

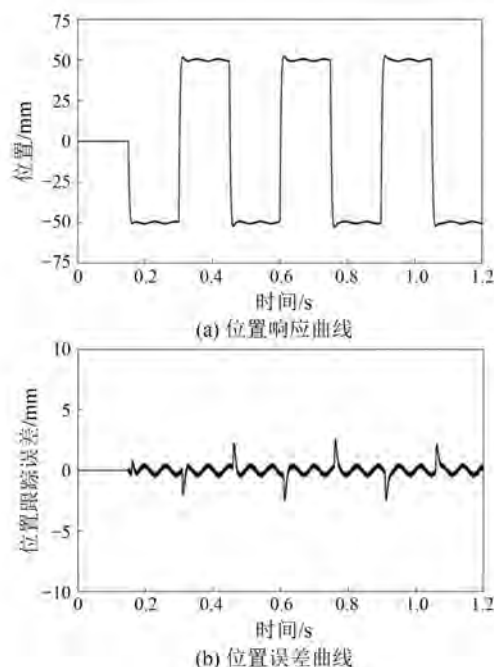


图 13 PD 控制方法的方波位置响应

Fig. 13 Square wave position response of the PD method

对比图 13 和图 14 可知,PD 控制方法的方波位置稳态跟踪误差波动较大,最大位置跟踪误差 $\leq \pm 3$ mm,而本文所提插入式重复 PD 位置控制方法的方波位置稳态跟踪误差比较平稳,最大位置跟踪误差 $\leq \pm 1.5$ mm。因此,插入式重复 PD 位置控制方法在跟踪方波位置方面具有较好的性能。

对比图 15 和图 16 可知,PD 控制方法的周期性正弦位置跟踪误差 $\leq \pm 0.5$ mm,而本文所提插入式重复 PD 位置控制方法的周期性正弦位置跟踪误差 $\leq \pm 0.06$ mm,因此,插入式重复 PD 位置控制方法在跟踪周期性正弦位置方面具有较好的性能。

4 结语

为提高 PMLSM 的动态响应性能和鲁棒性能,本文提出了一种带延迟补偿的鲁棒速度控制

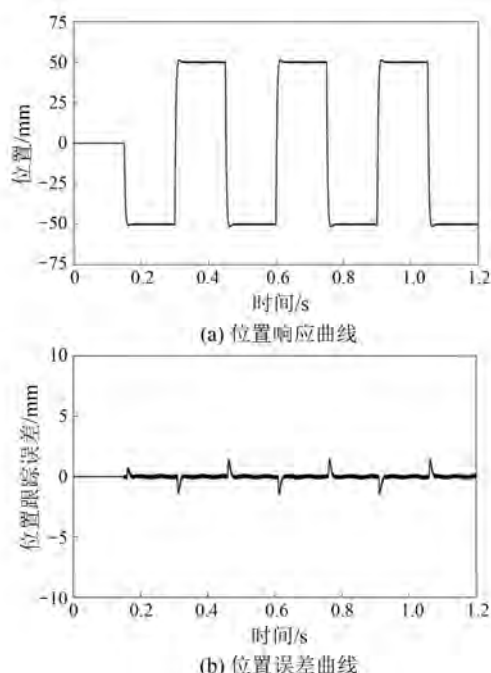


图 14 插入式重复 PD 位置控制方法的方波位置响应
Fig. 14 Square wave position response of plug-in repetitive PD position control method

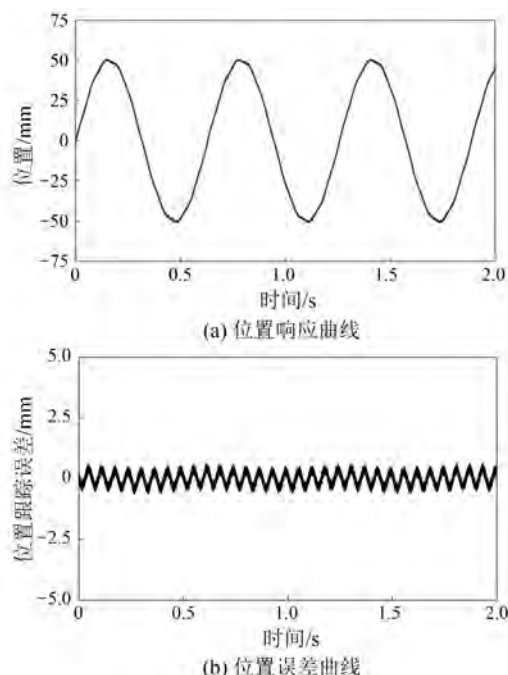


图 15 PD 控制方法的正弦位置响应

Fig. 15 Sine position response of the PD method
与插入式重复 PD 位置控制相结合的双闭环级联复合控制方法。通过设计鲁棒速度控制器,包括参考模型的逆模型、输入项、积分项和补偿项的设计,该方法能够有效补偿参考模型和实际系统模

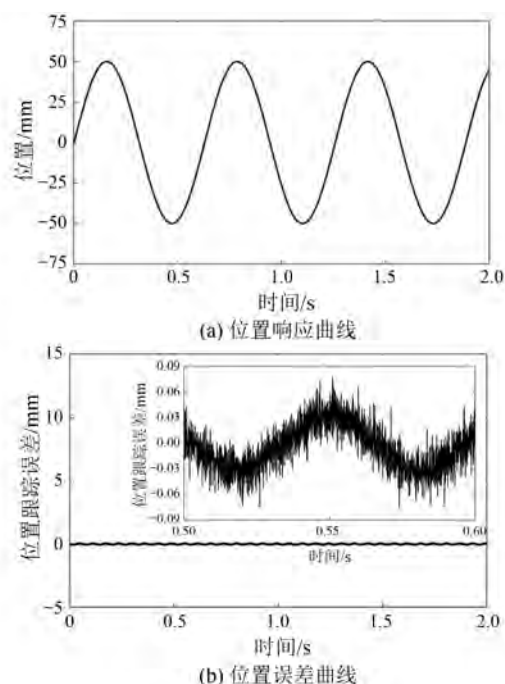


图 16 插入式重复 PD 位置控制方法的正弦位置响应
Fig. 16 Sine wave position response of plug-in repetitive PD position control method

型之间的建模误差,并且逆系统延迟模型可以补偿系统的传输延迟。为了抑制周期性外部扰动,本文将插入式重复控制器与 PD 位置控制器相结合,构建了插入式重复 PD 位置控制器。试验结果表明,所提双闭环级联复合控制方法解决了传输延迟导致的系统性能变差和响应超调问题,并且有效抑制了外部周期性扰动的影响。此外,该复合控制方法使 PMLSM 位置伺服系统能够实现对周期性信号的高精度跟踪,并提高了系统的动态响应和鲁棒性。

参考文献

- [1] 刘津成,夏加宽,马功臣. 永磁同步直线电机单齿切向电磁力分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 59-64.
LIU J C, XIA J K, MA G C. Analysis of single tooth tangential electromagnetic force in permanent magnet synchronous linear motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 59-64.
- [2] 王浩宇,李荣,张杰. 初级分段不连续型直线电机定位力分析与参数优化[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 61-71.
WANG H Y, LI R, ZHANG J. Detent force analysis

- and parameter optimization of primary segmented discontinuous linear motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(5): 61-71.
- [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): 29-33.
- ZHANG J, JI T S, WANG N F, et al. Plug-in integral sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(9): 29-33.
- [4] 文通, 张思磊, 王中仪. 定子分段式永磁直线同步电机速度波动抑制方法研究[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 933-945.
- WEN T, ZHANG S L, WANG Z Y. Speed ripple suppression method of PMLSM with segmented stators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 933-945.
- [5] 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): 33-40.
- SUN Y B, ZHONG Y, LIU C F. LMI-based sliding mode displacement tracking control for permanent magnet linear synchronous motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(1): 33-40.
- [6] 周华伟, 于晓东, 高猛虎, 等. 基于不匹配干扰观测器的圆筒型永磁直线电机新型滑模速度控制[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(7): 2163-2170.
- ZHOU H W, YU X D, GAO M H, et al. Novel sliding mode speed control for tubular permanent magnet linear motors based on mismatched disturbance observers [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(7): 2163-2170.
- [7] 武志涛, 杨兆宁. 永磁直线同步电机的双闭环鲁棒补偿控制[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(3): 101-108.
- WU Z T, YANG Z N. Double closed-loop robust compensation control for permanent magnet linear synchronous motors [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(3): 101-108.
- [8] 张宏伟, 余发山, 卜旭辉, 等. 基于鲁棒迭代学习的永磁直线电机控制[J]. *电机与控制学报*, 2012, 16(6): 81-86.
- ZHANG H W, YU F S, BU X H, et al. Robust iterative learning control for permanent magnet linear motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(6): 81-86.
- [9] 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 Z, AN J F, XIAO Y, 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.
- [10] 严乐阳, 叶佩青, 张辉, 等. 基于多周期迭代滑模控制的直线电机干扰抑制[J]. *电机与控制学报*, 2017, 21(1): 8-13.
- YAN L Y, YE P Q, ZHANG H, et al. Disturbance rejection for linear motor based on multi-periodic learning variable structure control [J]. *Electric Machines and Control*, 2017, 21(1): 8-13.
- [11] 武志涛, 李帅, 程万胜. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁直线同步电机定结构滑模位置跟踪控制[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(10): 2503-2512.
- WU Z T, LI S, CHENG W S. Fixed structure sliding mode position tracking control for permanent magnet linear synchronous motor based on extended sliding mode disturbance observer [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(10): 2503-2512.
- [12] 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): 132-141.
- ZHANG K, WANG L M. Adaptive sliding mode position control of permanent magnet linear motor based on periodic disturbance learning [J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(8): 132-141.
- [13] YAO W H, TANG P C, FU C C, et al. A robust uncertainty controller with system delay compensation for an ILPMSM system with unknown system parameters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(10): 4727-4735.
- [14] 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 G Q, ZHAO X R, ZHANG H, 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.

- [15] ZHANG X G, HOU B S, MEI Y. Deadbeat predictive current control of permanent-magnet synchronous motors with stator current and disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3818-3834.
- [16] 梅三冠, 卢闻州, 樊启高, 等. 基于滑模观测器误差补偿的永磁同步电机无位置传感器控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(2): 398-408.
- MEI S G, LU W Z, FAN Q G, et al. Sensorless control strategy of permanent magnet synchronous motor based on error compensation estimated by sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2): 398-408.
- [17] 刘瑞娟, 聂卓赟, 马亦婧, 等. 基于自抗扰重复控制的压电驱动器高精度跟踪控制[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 197-203.
- LIU R J, NIE Z Y, MA Y J, et al. High precision tracking control for the piezoelectric actuator based on active disturbance rejection repetitive control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 197-203.
- [18] 陈强, 余歆祺. 一类非参数不确定系统的自适应重复学习控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(6): 1349-1357.
- CHEN Q, YU X Q. Adaptive repetitive learning control for a class of nonparametric uncertain systems [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(6): 1349-1357.
- [19] 李鹤, 孙明轩, 张静. 一类不确定非线性系统的重复学习控制[J]. 自动化学报, 2018, 44(10): 1854-1863.
- LI H, SUN M X, ZHANG J. Repetitive learning control for a class of uncertain nonlinear systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(10): 1854-1863.
- [20] 孟高军, 余海涛, 胡敏强, 等. 一种基于非线性反馈重复控制策略的磁通切换直线电机推力波动抑制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 169-177.
- MENG G J, YU H T, HU M Q, et al. Thrust ripple suppression for linear flux-switching permanent magnet machine based on a repetitive control strategy of nonlinear feedback [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 169-177.
- [21] 孙宜标, 闫峰, 刘春芳. 抑制直线伺服系统周期性扰动的改进型重复控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009, 4: 42-45.
- SUN Y B, YAN F, LIU C F. Modified repetitive control for rejection the periodic disturbances of linear servo systems [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2009, 4: 42-45.

收稿日期:2024-07-20

收到修改稿日期:2024-08-11

作者简介:

徐东波(2000-),男,硕士研究生,研究方向为直线电机控制,lkxdb@163.com;

*通信作者:武志涛(1981-),男,博士,副教授,研究方向为直线电机控制,aswzt@163.com。

Dual-Closed-Loop Robust Repetitive Control for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Servo System Based on Delay Compensation

XU Dongbo, WU Zhitao *

(School of Electronic and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114001, China)

Key words: permanent magnet linear synchronous motor; delay compensation; periodic input; repetitive control; external disturbance

With the growing demand for industrial automation and precision manufacturing, permanent magnet linear synchronous motors (PMLSMs), as efficient linear servo motion actuators, are being increasingly applied in a wide range of fields. PMLSMs, with their advantages of high speed, high precision, and strong thrust, show great potential in areas such as industrial robotics, semiconductor manufacturing equipment, and logistics warehousing. However, PMLSMs still face numerous challenges in practical applications due to factors such as internal parameter perturbations, external disturbances, and uncertain interferences. Among these, periodic motion tasks place higher demands on the precise control of PMLSMs. In repetitive positioning applications on production lines, precise position control is crucial. However, external disturbances can severely affect the system's positioning accuracy. This paper aims to explore how to suppress the impact of internal and external disturbances to enhance the tracking accuracy of PMLSM in the process of tracking periodic reference input trajectories.

To improve the dynamic response and robustness of the PMLSM servo system, a dual-loop cascade composite control method was proposed, combining robust velocity control with delay compensation and plug-in repetitive proportional differential (PD) position control. First, a robust velocity controller was designed based on the robust compensation principle of the reference model, as

shown in Fig.1. This controller effectively adjusted for modeling errors between the reference model and the actual system model, using an inverse system delay model to offset the transmission delay effect. Then, to effectively suppress periodic external disturbances, a plug-in repetitive controller was introduced in combination with the PD position controller, forming a plug-in repetitive PD position controller, as shown in Fig.2.

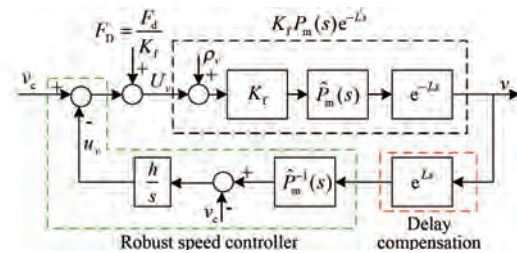


Fig. 1 Block diagram of robust speed control

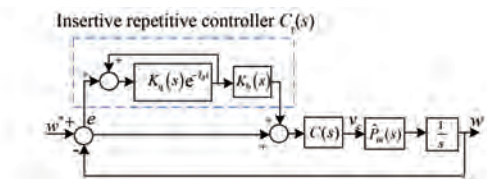


Fig. 2 Block diagram of position control

Experimental results show that this composite control method resolves the degradation of system performance and overshoot caused by transmission delays, and effectively suppresses the influence of external periodic disturbances. Additionally, the composite control method enables the PMLSM position servo system to achieve high-precision tracking of periodic signals, while improving the system's dynamic response and robustness.