

DOI: 10.3901/JME.2023.05.271

# 一种双轴直驱平台新型同步渐近跟踪控制设计<sup>\*</sup>

原 浩 赵希梅

(沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110870)

**摘要:** 针对双轴直驱平台伺服系统中存在同步进给的问题,提出一种交叉耦合迭代学习控制器与自适应加加速度控制器相结合的新型同步控制方法。首先,构建同步误差,利用交叉耦合控制器解决双轴的耦合问题;设计自适应 PD 型学习律减小同步误差,实现双轴协调同步。采用模型前馈控制补偿系统的参数不确定性,提高系统的响应速度。自适应加加速度控制器抑制系统中外部扰动、摩擦力等不确定性因素,实现系统的渐近跟踪控制。加加速度积分后形成反馈控制律,保证了控制信号的稳定性和连续性。设计自适应更新律,使鲁棒增益实现指数收敛并削弱测量噪声对系统的影响,增强系统的鲁棒性。系统实验结果表明,该方法能够明显地提高系统的同步性能,改善双轴直驱平台伺服系统的控制精度。

**关键词:** 双轴直驱平台; 渐近跟踪; 伺服系统; 自适应加加速度控制器; 同步控制

**中图分类号:** TP273; TM351

## Design of a Novel Synchronous Asymptotic Tracking Control for Dual Axis Direct Drive Platform

YUAN Hao ZHAO Ximei

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

**Abstract:** To solve the problem of synchronous feed in dual axis direct drive platform servo system, a novel synchronous control scheme combining cross-coupled iterative learning controller and adaptive jerk controller is proposed. Firstly, the synchronous error model is established. Cross-coupled controller is used to solve the coupled problem of the two axes. Adaptive PD-type learning law is designed to reduce synchronous error so that coordinated synchronization is implemented. The model feedforward control is used to compensate for parametric uncertainties to speed up the response. Adaptive jerk controller is adopted to suppress the uncertainties such as external disturbance and friction in the system, which can guarantee the asymptotic tracking control. The jerk is integrated to form the feedback control law, which ensures the stability and continuity of control signal. Adaptive update law of robust gain is designed to converge exponentially, which can weaken the effect of measurement noise and enhance the robustness of the system. The experimental results indicate that the control method can enhance the synchronous control performance of the system significantly. The control precision of the dual axis direct drive platform servo system is also improved.

**Key words:** dual axis direct drive platform; asymptotic tracking; servo system; adaptive jerk controller; synchronous control

## 0 前言

永磁直线同步电动机(Permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM)因其制造方便、动力效率高、可靠性好等特点,而广泛地应用于数控机床、光刻技术、快速刀具伺服等机械制造业<sup>[1-3]</sup>。双轴直驱平台由两台平行的 PMLSM 驱动,在运动过程

中,双轴需要保持一致性。然而,系统的滞后特性和双轴之间的动力学不匹配等问题会影响平台的协同运动<sup>[4-5]</sup>;此外,外部扰动、非线性摩擦、参数变化等不确定性以及测量噪声将影响系统的鲁棒性<sup>[6-7]</sup>。因此,应设计协调同步机制和鲁棒控制器,减小同步误差并提高鲁棒性,实现系统高精度、高速度的同步控制要求。

同步误差是评价双轴直驱平台同步控制精度的重要性能指标。文献[8]通过一种自适应鲁棒控制方法减小单轴的跟踪误差,进而降低系统的同步误差。

<sup>\*</sup> 辽宁省自然科学基金计划重点资助项目(20170540677)。20211215 收到初稿,20220610 收到修改稿

然而,各轴的动态性能并不完全匹配,仅减少单轴的跟踪误差不能保证同步误差的降低。文献[9]提出了基于 LuGre 摩擦模型的摩擦补偿方法。但是,摩擦模型中参数不确定性却未被考虑。文献[10]采用交叉耦合控制器(Cross-coupled controller, CCC)提高系统同步性能,并设计迭代学习控制器(Iterative learning controller, ILC)实现双轴的协同运动。然而,该方法仅考虑了双轴耦合效应的影响,而没有补偿系统的不确定性。滑模控制器(Sliding mode controller, SMC)对参数变化等不确定性不敏感,可以有效地提高系统的鲁棒性<sup>[11-12]</sup>。文献[13]设计了一种 CCC 与 SMC 相结合的控制方案,SMC 有效地抑制了系统的不确定性,满足了系统高精度的控制要求。然而 SMC 不连续控制特点产生的抖振问题并未完全解决,并可能激励未建模动态产生高频振荡。文献[14]提出一种误差信号的鲁棒积分控制方法,将生成的加加速度控制信号积分后形成系统的反馈控制律,产生连续的控制信号,实现了优异的控制性能。然而为保证系统的稳定性,选取过大的鲁棒增益可能引起高频振荡。文献[15]在文献[14]的基础上设计了自适应鲁棒增益,实现了系统的渐近跟踪,但是速度测量噪声会影响自适应增益的收敛性。

为此,提出一种交叉耦合迭代学习控制器(Cross-coupled iterative learning controller, CCILC)与自适应加加速度控制器(Adaptive jerk controller, AJC)相结合的方法。CCC 解决双轴之间的耦合问题,实现双轴的同步控制;采用自适应 PD 型学习律提高 ILC 性能,减小同步误差。AJC 能够抑制系统的不确定性,利用卷积分对自适应鲁棒增益进行更新,即使存在测量噪声该增益仍可实现渐近收敛,提高系统的鲁棒性。最后通过实验验证了所提出的控制方案能够有效减小同步误差,满足双轴直驱平台伺服系统的控制要求。

## 1 双轴直驱平台数学模型

双轴直驱平台利用 PMLSM 驱动,采用磁场定向控制,令  $d$  轴电流分量  $i_d=0$ ,定子矢量方向与永磁体磁场方向在空间上正交<sup>[16]</sup>。则 PMLSM 电磁推力方程为

$$F_{ei} = K_{fi} i_{qi} \quad (1)$$

式中,  $F_{ei}$  为电磁推力;  $K_{fi}$  为电磁推力常数;  $i_{qi}$  为  $q$  轴电流;  $i=y_1$  和  $y_2$ , 表示控制系统的  $y_1$  轴与  $y_2$  轴。

PMLSM 机械运动方程为

$$(M_i + \Delta M_i) \ddot{d}_i + (B_i + \Delta B_i) \dot{d}_i = F_{ei} - F_i \quad (2)$$

式中,  $\ddot{d}_i$  为动子加速度;  $\dot{d}_i$  为动子速度;  $d_i$  为动子位置;  $M_i$  为动子总质量;  $B_i$  为粘滞摩擦系数;  $\Delta M_i$ 、 $\Delta B_i$  分别为  $M_i$  与  $B_i$  参数变化的不确定量;  $F_i$  为包括外部扰动、摩擦力、未建模动态等扰动。为便于后续控制器的设计过程,下标  $i$  将被省略。

根据式(1)和式(2)得双轴直驱平台伺服系统的动态方程为

$$\theta' \ddot{d} = u - \theta'' \dot{d} - D \quad (3)$$

式中,  $\theta' = (M + \Delta M)/K_f$ ,  $\theta'' = (B + \Delta B)/K_f$ , 分别表示系统的不确定参数;  $D = F/K_f$  表示系统的不确定性;  $u$  为伺服系统的控制律。

## 2 同步渐近跟踪控制系统设计

基于 CCILC-AJC 的双轴直驱平台控制系统框图如图 1 所示。其中, CCILC 用于提高系统的位置同步性能,减小同步误差。采用模型前馈控制补偿系统的参数不确定性, AJC 确保双轴实现渐近跟踪,并且在含有不确定性的限制下具有较好的鲁棒性能和动态性能。

### 2.1 CCILC 设计

在运动过程中,双轴之间运动不协调、参数不匹配而产生的同步误差将对系统的控制精度产生不利影响。因此,应使得同步误差最小化,实现系统的同步控制。

定义位置跟踪误差为

$$e = d_m - d \quad (4)$$

式中,  $d_m$  为位置的参考输入。同步误差表示为

$$\sigma = C_1 e_{y1} - C_2 e_{y2} \quad (5)$$

式中,  $C_1$ 、 $C_2$  为交叉耦合增益。交叉耦合控制器的输出乘以  $C_1$ 、 $C_2$  分解并补偿至各轴。所以,当  $\sigma=0$  时可实现双轴的同步运行。

当系统执行重复任务时, ILC 可以提高系统的跟踪性能。该方法能够在每次迭代时学习误差信息,并使用该信息来改善系统的控制性能<sup>[17]</sup>。迭代学习控制律一般表示为

$$u_{j+1}(t) = L[u_j(t), \sigma_j(t)] \quad (6)$$

式中,  $j$  为迭代次数;  $L(\cdot)$  为学习律。传统 PD 型 ILC 为固定的学习增益,控制效果不佳。为改善控制性能,采用自适应 PD 型学习律,则迭代学习交叉耦合控制律为

$$u_{cj+1}(t) = u_{cj}(t) + \Psi(\sigma_j(t)) (K_p \sigma_j(t) + K_D \sigma_j'(t)) \quad (7)$$

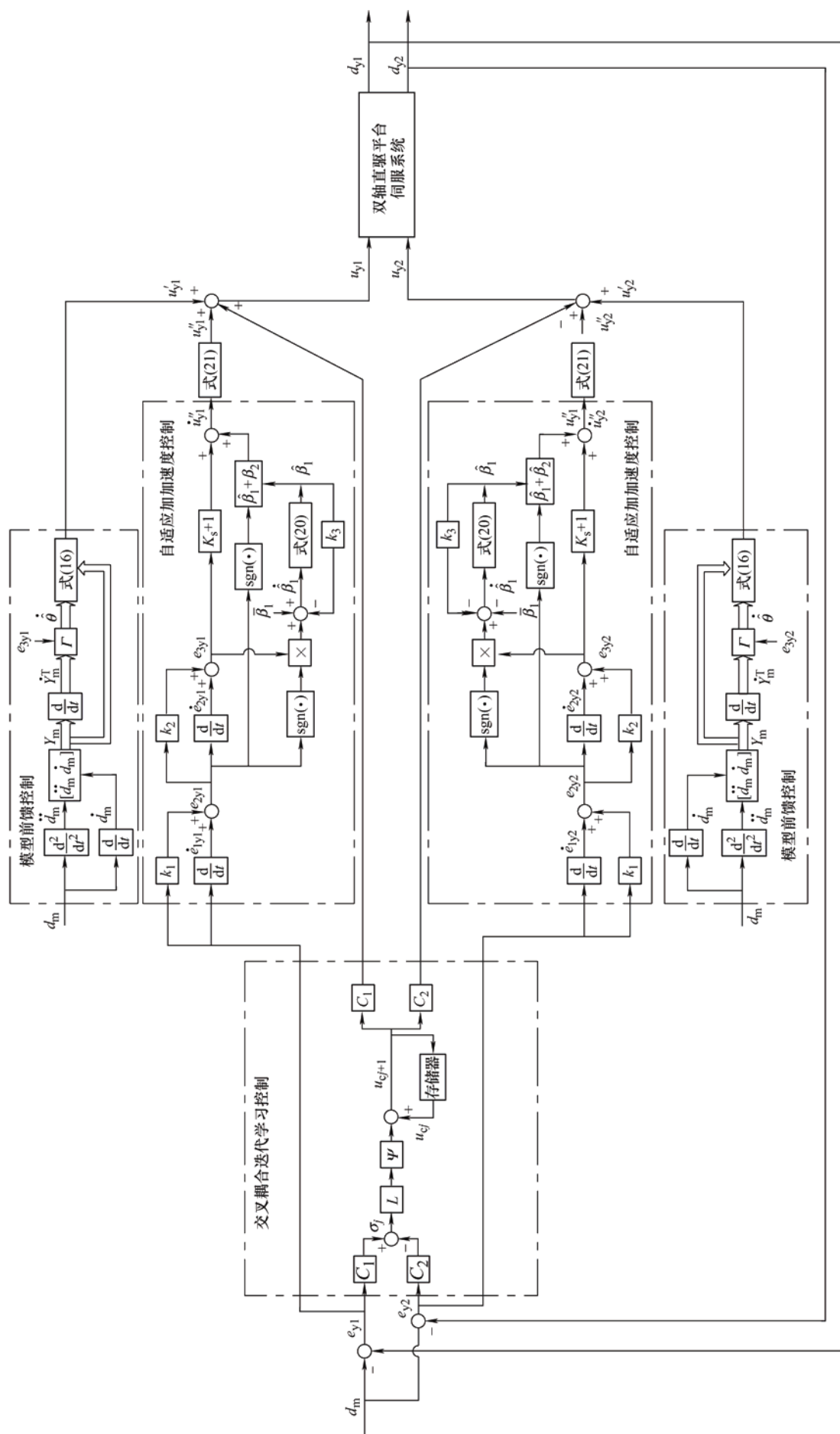


图 1 基于 CCILC-AJC 的双轴直驱平台控制系统框图

式中,  $K_p$ 、 $K_D$  为学习增益;  $\sigma_j^n$  为指数函数;  $\Psi(\sigma_j)$  是与误差边界  $\delta$  相关的非线性函数, 其曲线如图 2 所示, 其表达式为

$$\Psi(\sigma_j) = \begin{cases} 1 - \frac{\delta}{\sigma_j} & |\sigma_j| > \delta \\ 0 & |\sigma_j| \leq \delta \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)、(8)并结合图 2 可知: 当  $\sigma_j$  较大时,  $\sigma_j^n$  使误差快速收敛; 当  $\sigma_j > \delta$  时, ILC 为变增益控制器, 通过调整学习增益提高控制精度; 当  $\sigma_j \leq \delta$  时,  $u_{cj+1} = u_{cj}$ , 从而使 ILC 停止学习。因此,  $\Psi(\sigma_j)$  的分段连续特性有助于改进 ILC 的控制性能。

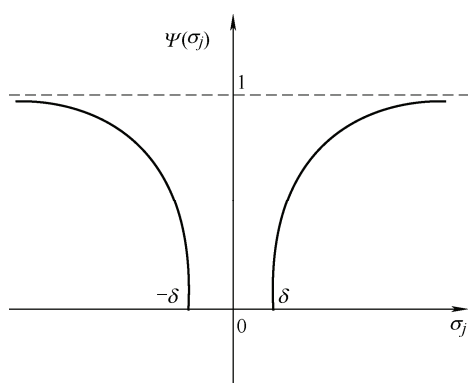


图 2  $\Psi(\sigma_j)$  曲线示意图

此外, 从式(5)可看出, 系统的同步误差与双轴的跟踪误差有关。因此, 应设计控制器用于减小单轴位置跟踪误差, 这样既保证了位置跟踪精度, 又实现了双轴直驱平台伺服系统的同步性。

## 2.2 模型前馈控制律设计

定义滤波误差向量为

$$z = [e_1 \quad e_2 \quad e_3]^T \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} e_1 &= d_m - d \\ e_2 &= \dot{e}_1 + k_1 e_1 \\ e_3 &= \dot{e}_2 + k_2 e_2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $k_1 > 0$ ,  $k_2 > 0$  为反馈增益。与传统鲁棒控制不同, 引入滤波误差  $e_3$  可获得额外的设计自由度。式(10)代入式(3)得

$$\theta'(t)e_3 = Y_m \theta + S + D - u \quad (11)$$

式中,  $Y_m = [\ddot{d}_m \quad \dot{d}_m]$  为回归向量;  $\theta = [\theta' \quad \theta'']^T$  为系统参数向量。S 为参考模型与实际模型之间的误差

$$S = \theta'(t)(k_1 \dot{e}_1 + k_2 e_2) + (\theta'(t) - \theta'(0))\ddot{d}_m \quad (12)$$

因此, 根据式(11)提出一种二自由度控制结构, 伺服系统单轴的控制律为

$$u = u' + u'' \quad (13)$$

式中,  $u'$  为基于模型的前馈控制律,  $u''$  为反馈控制律。  $u'$  用于补偿双轴参数变化的不确定性, 表示为

$$u' = Y_m \hat{\theta} \quad (14)$$

式中,  $\hat{\theta}$  为系统参数向量的估计值。采用基于梯度的自适应律对  $\hat{\theta}$  进行更新

$$\dot{\hat{\theta}} = -\dot{\tilde{\theta}} = \Gamma \dot{Y}_m^T e_3 \quad (15)$$

式中,  $\Gamma$  为正常数,  $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$  为系统参数估计误差向量。对式(15)积分得前馈控制律  $u'$  为

$$\begin{aligned} Y_m \hat{\theta} &= Y_m \hat{\theta}(0) + Y_m \Gamma \dot{Y}_m^T e_2(\tau) \Big|_0^t - \\ &Y_m \Gamma \int_0^t [\dot{Y}_m^T e_2(\tau) - k_2 \dot{Y}_m^T e_2(\tau)] d\tau \end{aligned} \quad (16)$$

## 2.3 基于 AJC 的反馈控制律设计

当系统存在外部扰动和模型不确定性时, 反馈控制律  $u''$  应确保闭环系统的鲁棒性, 并实现渐近跟踪控制。为保证  $u''$  的连续性, 则  $\dot{u}''$  应该是有界的。设计自适应加速度控制律  $\dot{u}''$  为

$$\dot{u}'' = (K_s + 1)e_3 + (\hat{\beta}_1 + \beta_2) \text{sgn}(e_2) \quad (17)$$

式中,  $\hat{\beta}_1$  为自适应鲁棒增益,  $\beta_2$  为固定鲁棒增益, 并且  $\hat{\beta}_1 > -\beta_2$ ,  $\beta_2 > 0$ 。对  $\dot{u}''$  积分得

$$\begin{aligned} u''(t) &= (K_s + 1) \left[ e_2(t) - e_2(0) + \int_0^t k_2 e_2(\tau) d\tau \right] + \\ &\int_0^t (\hat{\beta}_1 + \beta_2) \text{sgn}(e_2(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (18)$$

$\hat{\beta}_1$  的更新律设计为

$$\dot{\hat{\beta}}_1 = -k_3 \hat{\beta}_1 + \bar{\beta}_1 + e_3 \text{sgn}(e_2) \quad (19)$$

式中,  $\bar{\beta}_1$ ,  $k_3$  为正常数。式(19)确保  $\hat{\beta}_1$  指数收敛至  $\beta_1 = \bar{\beta}_1/k_3$ , 从而提高  $\hat{\beta}_1$  的收敛速度。  $\hat{\beta}_1$  表示为

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_1 &= \beta_1 (1 - e_2^{-k_3 t}) + |e_2| - e_2^{-k_3 t} |e_2(0)| + \\ &e_2^{-k_3 t} \hat{\beta}_1(0) + (k_2 - k_3) e_2^{-k_3 t} * |e_2(t)| \end{aligned} \quad (20)$$

式中, “\*” 表示卷积运算。由式(19)、(20)可知, 即使  $e_2$  存在测量噪声的情况下, 当  $\hat{\beta}_1$  指数收敛至  $\beta_1$ , 仍可使  $e_2$  渐近收敛至零, 实现系统的渐近跟踪控制。

## 2.4 系统稳定性分析

对式(11)求导, 得

$$\theta(t)\dot{e}_3 = -\dot{\theta}'(t)e_3/2 + \dot{Y}_m \tilde{\theta} + \tilde{N} + N_d - \dot{u}'' - e_2 \quad (21)$$

式中

$$\tilde{N}(t) = Y_m \dot{\tilde{\theta}} + \dot{S} + e_2 - \dot{\theta}'(x)e_3/2 \quad (22)$$

$$N_d(t) = \dot{D} \quad (23)$$

假设不确定性  $D$  的一阶、二阶导数均有界, 得

$$\|N_d(t)\|_1 \leq \varsigma_1, \|\dot{N}_d(t)\|_1 \leq \varsigma_2 \quad (24)$$

式中,  $\varsigma_1 > 0$ ,  $\varsigma_2 > 0$ 。  $\tilde{N}$  满足下列条件

$$\|\tilde{N}\| \leq \rho(\|z\|)\|z\| \quad (25)$$

式中,  $\rho$  为非递减可逆的正函数。

引入辅助函数  $L_1$  和  $L_2$ , 分别表示为

$$L_1 = e_3(N_d(t) - \beta_1 \operatorname{sgn}(e_2)) \quad (26)$$

$$L_2 = -\beta_2 \dot{e}_2 \operatorname{sgn}(e_2) \quad (27)$$

并且满足

$$\beta_1 \geq \varsigma_1 + \frac{1}{k_2} \varsigma_2, \beta_2 \geq 0 \quad (28)$$

则

$$P_1 = \varsigma_{b1} - \int_0^t L_1(\tau) d\tau \geq 0 \quad (29)$$

$$P_2 = \varsigma_{b2} - \int_0^t L_2(\tau) d\tau \geq 0 \quad (30)$$

式中,  $\varsigma_{b1}$ 、 $\varsigma_{b2}$  为正常数。

为证明系统的闭环稳定性和渐近收敛性, 设置向量  $y(t)$  为

$$y(t) = [z^T(t) \quad \tilde{\theta}^T(t) \quad \tilde{\beta}_1(t) \quad \sqrt{P_1} \quad \sqrt{P_2}]^T \quad (31)$$

选择 Lyapunov 函数

$$V(y, t) = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2 \theta' + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} + \frac{1}{2} \tilde{\beta}_1^2 + P_1 + P_2 \quad (32)$$

式中,  $\tilde{\beta}_1 = \beta_1 - \hat{\beta}_1$ 。因为  $P_1 \geq 0$ ,  $P_2 \geq 0$ , 则  $V(y, t) \geq 0$ , 并且

$$\eta_1 \|y\|^2 \leq V(y, t) \leq \eta_2 \|y\|^2 \quad (33)$$

式中,  $\eta_1 = \frac{1}{2} \min\{1, \underline{m}, \Gamma^{-1}\}$ ,  $\eta_2 = \frac{1}{2} \max\{2, \bar{M}, \Gamma^{-1}\}$ ,  $\underline{m} = \inf(\theta')$ ,  $\bar{M} = \sup(\theta')$ 。

对  $V(y, t)$  求导, 得

$$\dot{V}(y, t) = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3 \theta' + \frac{1}{2} e_3^2 \dot{\theta}' + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} + \dot{P}_1 + \dot{P}_2 + \tilde{\beta}_1 \dot{\tilde{\beta}}_1 \quad (34)$$

将式(10)、(15)、(17)、(21)、(29)、(30)代入式(34), 得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e_1(e_2 - k_1 e_1) + e_2(e_3 - k_2 e_2) + \\ & e_3 \left( -\frac{1}{2} \dot{\theta}' e_3 + \dot{Y}_m \tilde{\theta} + \tilde{N} + N_d - \dot{u}'' - e_2 \right) + \\ & \frac{1}{2} e_3^2 \dot{\theta}' + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} (-\Gamma \dot{Y}_m^T e_3) - e_3(N_d - \\ & \beta_1 \operatorname{sgn}(e_2)) + \beta_2 \dot{e}_2 \operatorname{sgn}(e_2) + \tilde{\beta}_1 (\dot{\beta}_1 - \dot{\hat{\beta}}_1) \\ = & e_1 e_2 - k_1 e_1^2 + e_2 e_3 - k_2 e_2^2 - \frac{1}{2} \dot{\theta}' e_3^2 + e_3 \dot{Y}_m \tilde{\theta} + \\ & e_3 (\tilde{N} + N_d - \dot{u}'') - e_2 e_3 + \frac{1}{2} e_3^2 \dot{\theta}' - \tilde{\theta}^T \dot{Y}_m^T e_3 - \\ & e_3 (N_d - \beta_1 \operatorname{sgn}(e_2)) + \beta_2 \dot{e}_2 \operatorname{sgn}(e_2) - \tilde{\beta}_1 \dot{\hat{\beta}}_1 \\ = & e_1 e_2 - k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_3 \tilde{N} + e_3 N_d - K_s e_3^2 - e_3^2 - \\ & e_3 (\hat{\beta}_1 - \beta_1) \operatorname{sgn}(e_2) + \beta_2 (\dot{e}_2 - e_3) \operatorname{sgn}(e_2) - \\ & e_3 N_d - \tilde{\beta}_1 \dot{\hat{\beta}}_1 \\ = & e_1 e_2 - k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_3 \tilde{N} - K_s e_3^2 - e_3^2 - \\ & e_3 (-\tilde{\beta}_1) \operatorname{sgn}(e_2) - \beta_2 k_2 e_2 \operatorname{sgn}(e_2) \end{aligned} \quad (35)$$

由柯西—施瓦茨不等式, 得

$$e_1 e_2 \leq \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (36)$$

由式(25)可知

$$e_3 \tilde{N} \leq \rho(\|z\|)\|z\|e_3 \leq k_s |e_3|^2 + \frac{\rho^2(\|z\|)\|z\|^2}{4k_s} \quad (37)$$

将式(36)、(37)代入式(35), 得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\left(k_1 - \frac{1}{2}\right) e_1^2 - \left(k_2 - \frac{1}{2}\right) e_2^2 - (k_s + 1) e_3^2 + \\ & \frac{\rho^2(\|z\|)\|z\|^2}{4k_s} + k_s |e_3|^2 \\ \leq & -\|z\|^2 \left( \eta_3 - \frac{\rho^2(\|z\|)}{4k_s} \right) \end{aligned} \quad (38)$$

式中,  $\eta_3 = \min\left\{k_1 - \frac{1}{2}, k_2 - \frac{1}{2}, 1\right\}$ ,  $k_1 > \frac{1}{2}$ ,  $k_2 > \frac{1}{2}$ 。

因此, 当  $K_s$  满足

$$K_s > \frac{\rho^2(\|z\|)}{4\eta_3} \quad (39)$$

则  $\dot{V} \leq 0$ 。根据 Barbalat 引理, 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\|z\| \rightarrow 0$ ,  $\tilde{\beta}_1 \rightarrow 0$ 。从而保证了系统的稳定性和渐近收敛性。

### 3 系统实验分析

为验证上述 CCILC-AJC 的有效性, 搭建如图 3 所示的双轴直驱平台伺服系统的实验平台进行研

究。实验装置主要包括：双轴直驱平台、供电电源、控制板、驱动器等。控制板计算出电机信号，经 D/A 转换器变为模拟信号，并通过以太网接口传送给上位机进行数据采集。PMLSM 的参数为： $M=3.5\text{ kg}$ ， $K_f=59.8\text{ N/A}$ ， $B=244.319\text{ N}\cdot\text{s/m}$ 。



图3 实验平台

为了验证本文所提出的控制方案的有效性，对系统实验进行了对比分析。系统分别采用 CCC-SMC、CCILC-SMC 与 CCILC-AJC 进行实验。针对不同输入指令，反复调整控制器参数。设计 SMC 的控制律为： $u=B_n^{-1}[\ddot{d}_m-A_n\dot{d}-\lambda\dot{e}_1+\kappa\text{sgn}(s/\Phi)]$ ，式中， $A_n=-0.94$ ， $B_n=3.1$ ， $\lambda=50$ ， $\kappa=6$ ， $\Phi=0.002$ ， $s$  表示滑模面。CCILC 中， $C_1=C_2=1$ ， $j=6$ ， $K_P=20$ ， $K_D=7$ ， $\delta=2\times 10^{-7}$ ， $\gamma=3$ 。AJC 中参数选择为： $k_1=1.5$ ， $k_2=80$ ， $k_3=6.5$ ， $\hat{\beta}_1(0)=1$ ， $\bar{\beta}_1=20$ ， $\beta_1=3$ ， $\beta_2=2$ ， $\Gamma=15$ ， $K_s=80$ 。

对双轴直驱平台伺服系统输入图 4 所示的梯形信号，并向双轴同时施加图 5 所示的变负载扰动，实验结果如图 6 所示。从图 6a~c 中可以看出，三种方法产生的跟踪误差趋势类似，在梯形信号拐点处以及负载力发生变化时产生了较大的误差。CCC-SMC 的跟踪误差范围约为  $-39\sim 38.8\text{ }\mu\text{m}$ ，跟踪误差波动范围较大；CCILC-SMC 的跟踪误差范围约为  $-29\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ ，在梯形信号平缓处产生的误差波动幅度较小，当外部扰动发生变化时，误差范围约为  $-18\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ ；相比之下，CCILC-AJC 表现出了优越的控制性能，产生的跟踪误差曲线较为平稳，其范围约为  $-6\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ ，当外加扰动时，误差范围约为  $-3\sim 7\text{ }\mu\text{m}$ 。比较三种方法于第 5 s 负载发生变化时的曲线可知，AJC 的执行时间最短，约为 0.06 s，表明 AJC 能够有效地抑制扰动并产生稳定的控制效果，并且收敛速度较快。图 6d~f 分别为三种方法产生的同步误差。通过对比发现，CCC-SMC 的同步误差约为  $-8\sim 9.6\text{ }\mu\text{m}$ ，CCILC-SMC 的同步误差约为  $-4\sim 5.2\text{ }\mu\text{m}$ 。相较于前两者，CCILC-AJC 同步误差范围最小，约为  $-1.6\sim 2.2\text{ }\mu\text{m}$ ，表明自适应 PD 型学习

律可以提高迭代学习能力，并有效地减小同步误差，改进系统的运动同步性。由图 6g 所见，CCILC-SMC 需要迭代 6 次才能使同步误差收敛，而 CCILC-AJC 仅需迭代 3 次，其同步误差的均方根值约为  $0.53\text{ }\mu\text{m}$ 。图 6h 表明，当  $\beta_1=2$  时， $\hat{\beta}_1$  曲线在梯形信号拐点和施加扰动时，产生了较为明显的突变，系统稳定性将受到影响；当  $\beta_1=4$  时， $\hat{\beta}_1$  曲线的振荡较大；当  $\beta_1=3$  时， $\hat{\beta}_1$  曲线较为平稳且性能最佳，同时证明了自适应更新律的收敛性。因此，当系统输入梯形信号并外加扰动的情况下，CCILC-AJC 能保证系统具有较强的鲁棒性能和良好的同步跟踪性能。

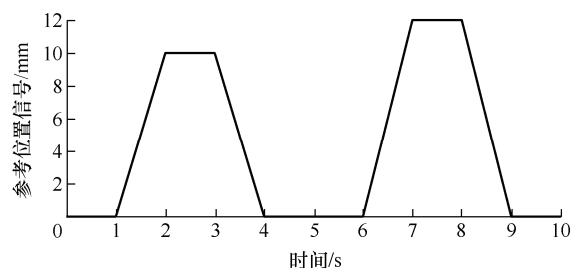


图4 梯形输入信号

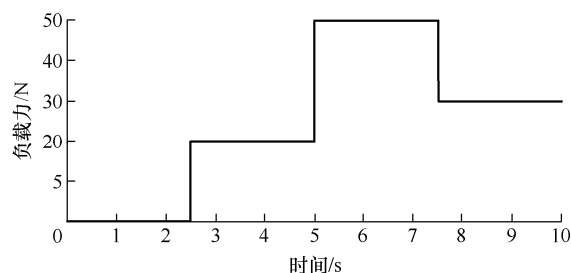
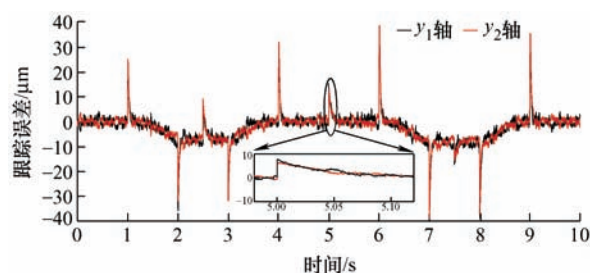
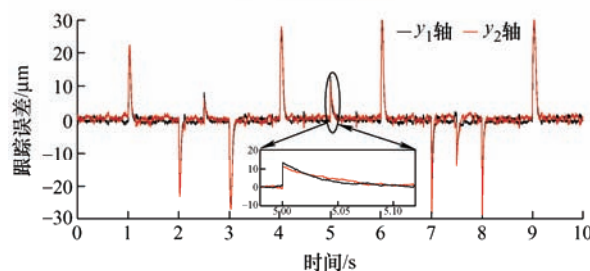


图5 负载力输入信号



(a) CCC-SMC跟踪误差



(b) CCILC-SMC跟踪误差



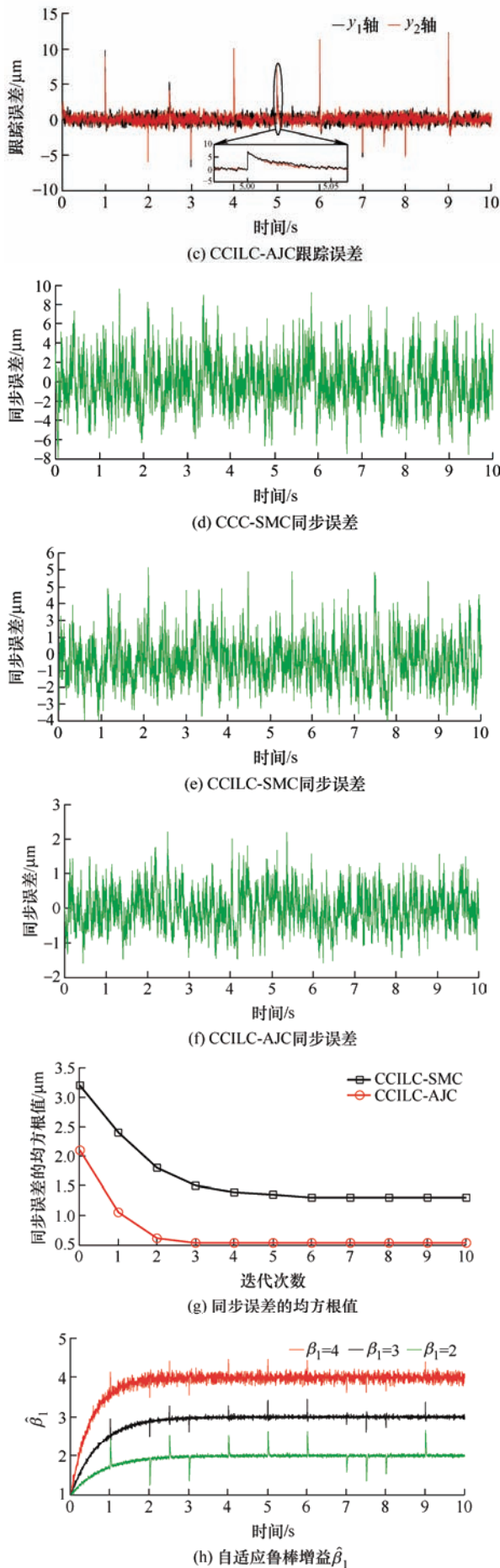
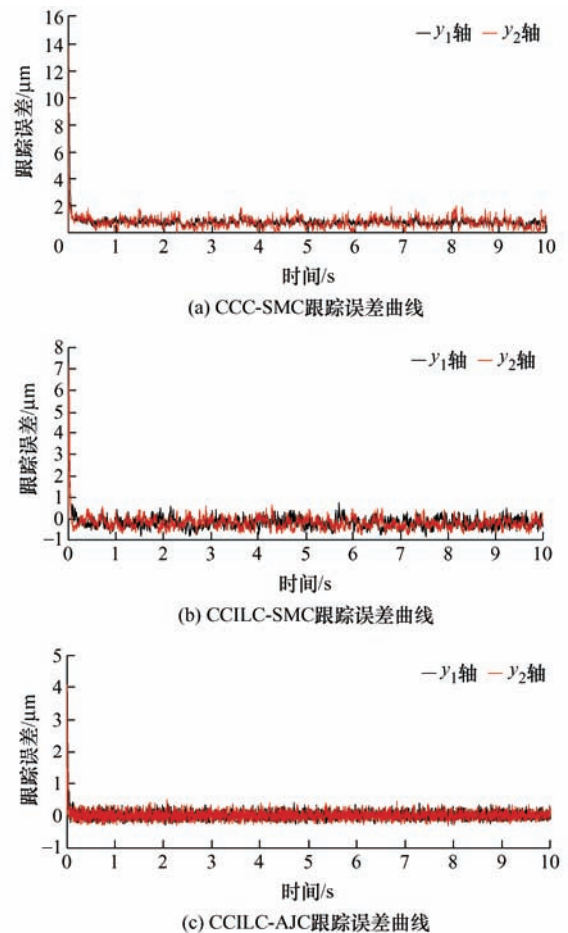


图6 梯形信号的实验结果

为了进一步验证 CCILC-AJC 的性能,对系统输入幅值为 1 mm、频率为 1 Hz 的正弦信号,实验结果如图 7 所示。对比图 7a~c 三种方法的跟踪误差曲线可知,CCC-SMC 的跟踪效果不佳,误差无法收敛至零,其产生的最大跟踪误差约为 14.1  $\mu\text{m}$ ,跟踪误差的均方根值为 0.8  $\mu\text{m}$ ; CCILC-SMC 产生的最大跟踪误差约为 7.2  $\mu\text{m}$ ,跟踪误差的均方根值为 0.5  $\mu\text{m}$ ; CCILC-AJC 产生跟踪误差较为平稳,其最大跟踪误差约为 4.1  $\mu\text{m}$ ,跟踪误差的均方根值为 0.25  $\mu\text{m}$ ,表明 AJC 产生了较好的控制效果,跟踪误差较小。图 7d~f 分别为三种方法产生的同步误差,对比后发现 CCILC-AJC 产生的最大同步误差约为 1.4  $\mu\text{m}$ ,稳态时同步误差保持在  $-0.5 \sim 0.5 \mu\text{m}$ ,表明 ILC 可以有效减小同步误差,提高系统的同步性。由图 7g 可知,CCILC-AJC 迭代 3 次后,使得系统同步误差的均方根值收敛于 0.15  $\mu\text{m}$ ,其算法的执行时间较短。图 7h 中,当  $\beta_1=2$  时,  $\hat{\beta}_1$  曲线收敛速度较慢;当  $\beta_1=4$  时,  $\hat{\beta}_1$  曲线的稳定性较差;当  $\beta_1=3$  时,  $\hat{\beta}_1$  曲线较为光滑且最终收敛于 3 左右。因此,当系统输入正弦信号时,CCILC-AJC 能够产生较小的跟踪误差和同步误差,渐近跟踪性能较好。



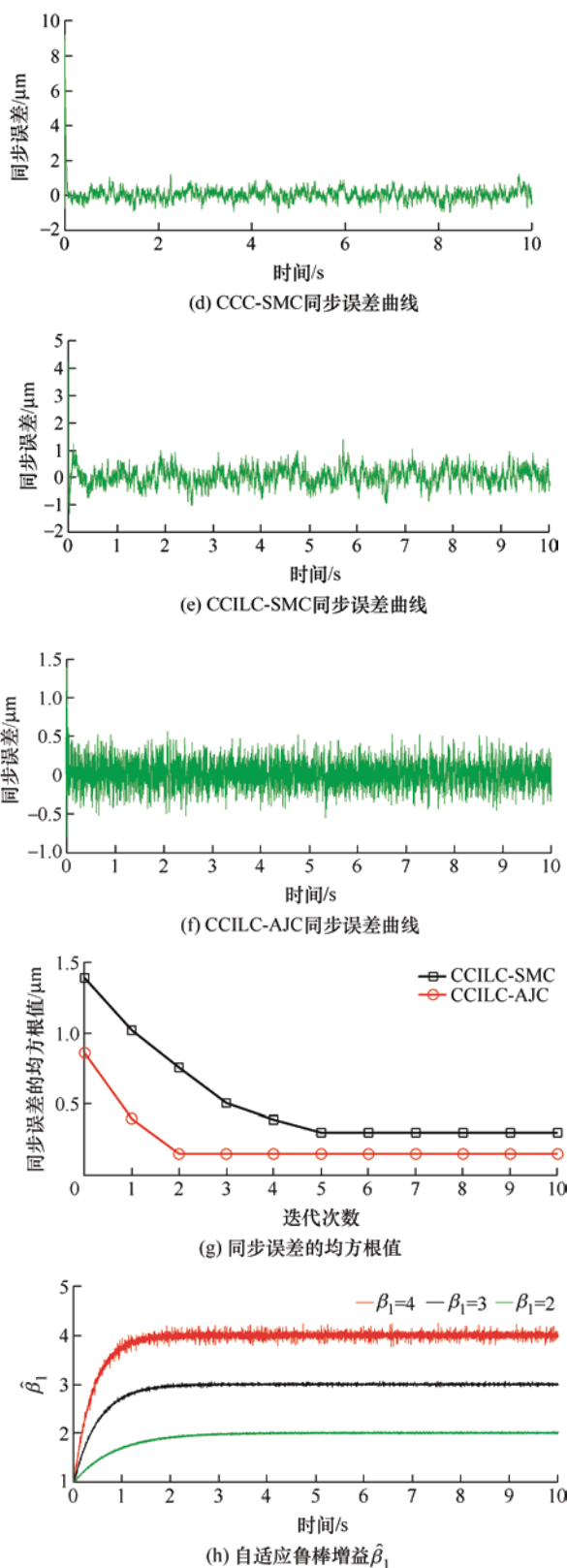


图 7 正弦信号的实验结果

## 4 结论

为实现双轴直驱平台伺服系统的高精度、高速度的同步控制要求,同时考虑外部扰动、摩擦力、

未建模动态等不确定性对系统的影响,提出了一种 CCILC-AJC 控制方案,并通过实验验证了该方案的可行性,主要结论如下。

(1) 利用 CCILC 实现双轴的解耦控制,自适应 PD 型学习律有效地提高迭代学习性能并减小同步误差;

(2) 采用 AJC 对不确定性进行抑制,形成更佳平稳、连续的控制效果,自适应更新律保证了鲁棒增益的指数收敛性,提高系统的控制精度和动态性能;

(3) 实验结果表明,所采用的控制方案有效地抑制了系统的不确定性,显著地减小了跟踪误差和同步误差,实现了双轴直驱平台同步渐近跟踪控制。

## 参 考 文 献

- [1] 周荣晶, 李云峰, 纪宇阳, 等. 基于混合驱动的大行程快速刀具伺服设计与控制[J]. 机械工程学报, 2019, 55(21): 199-207.  
ZHOU Rongjing, LI Yunfeng, JI Yuyang, et al. Design and control of a hybrid actuation based long range fast tool servo[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(21): 199-207.
- [2] 杨亮亮, 王杰, 王飞, 等. 基于最优控制迭代学习的直线伺服系统振动抑制研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(15): 217-225.  
YANG Liangliang, WANG Jie, WANG Fei, et al. Research on vibration suppression of linear servo system based on optimal control iterative learning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(21): 217-225.
- [3] 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): 1496-1540.  
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): 1496-1540.
- [4] WANG Ze, HU Chuxiong, ZHU Yu. Dynamical model based contouring error position-loop feedforward control for multi-axis motion systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4686-4695.
- [5] WANG Ze, HU Chuxiong, ZHU Yu, et al. Double Taylor expansion based real-time contouring error estimation for multi-axis motion systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(12): 9490-9499.
- [6] 温博轩, 王伟达, 项昌乐, 等. 机电复合传动系统基于



- $\mu$ -综合方法的鲁棒协调控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 88-97.
- WEN Boxuan, WANG Weida, XIANG Changle, et al. Coordination control based on  $\mu$ -synthesize for electro-mechanical transmission[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 88-97.
- [7] 武志涛, 朱连成. 基于滑模轮廓控制器的直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6188-6193.
- WU Zhitao, ZHU Liancheng. Trajectory tracking control for the motion table driven by linear motors based on sliding mode contour tracking controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6188-6193.
- [8] CHENG M H, LI Y J, BAKHOUM E G. Controller synthesis of tracking and synchronization for multiaxis motion System[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(1): 378-386.
- [9] FREIDOVICH L, ROBERTSSON A, SHIRIAEV A, et al. LuGre-model-based friction compensation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 20(1): 65-76.
- [10] BARTON K, ALLEYNE A. A cross-coupled iterative learning control design for precision motion control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(6): 1218-1231.
- [11] SHAO Ke, ZHENG Jinchuan, HUANG Kang, et al. Finite-time control of a linear motor positioner using adaptive recursive terminal sliding mode[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(8): 6659-6668.
- [12] 周华伟, 于晓东, 刘国海, 等. 基于内模的圆筒永磁直线电机滑模速度控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3382-3391.
- ZHOU Huawei, YU Xiaodong, LIU Guohai, et al. Sliding mode speed control for tubular permanent magnet linear motors based on the internal model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3382-3391.
- [13] ZHONG Guoliang, SHAO Zhizhong, DENG Hua, et al. Precise position synchronous control for multi-axis servo systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 3707-3717.
- [14] YAO Jianyong, DENG Wenxiang, JIAO Zongxia. RISE-based adaptive control of hydraulic systems with asymptotic tracking[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 3(14): 1524-1531.
- [15] DENG Wenxiang, YAO Jianyong. Adaptive integral robust control and application to electromechanical servo systems[J]. ISA Transactions, 2017, 67: 256-265.
- [16] 柯栋梁, 汪凤翔, 李家祥. 基于自适应高增益观测器的永磁同步电机预测电流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 728-738.
- KE Dongliang, WANG Fengxiang, LI Jiaxiang. Predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on an adaptive high-gain observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 728-738.
- [17] 杨亮亮, 武晓虎, 史伟民, 等. 基于正交投影迭代学习的高频响闭环运动控制系统模型参数辨识研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 188-195.
- YANG Liangliang, WU Xiaohu, SHI Weimin, et al. Research on model parameters identification of closed-loop high frequency motion control system based on iterative learning of orthogonal Projection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 188-195.

作者简介: 原浩, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向直线伺服、智能控制等。

E-mail: yuanhao\_sut@163.com

赵希梅(通信作者), 女, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电机控制、机器人控制、智能控制等。

E-mail: zhaoxm\_sut@163.com