

具有参数不确定和时变扰动的电液执行器 高精度运动控制

梁乾坤¹, 蔡衍², 宋锦春¹, 陈杰¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 针对具有参数不确定性、不匹配和匹配的时变扰动的电液执行器(electro-hydraulic actuator, EHA)系统,提出了一种渐近跟踪控制策略。首先,构造了一个扩展状态观测器(extended state observer, ESO)获得对不匹配时变扰动的精确估计及补偿;该ESO通过在经典ESO中引入鲁棒自适应项,得到了渐近估计结果,降低了鲁棒增益选择的保守性。然后,设计一个鲁棒自适应项来估计匹配扰动的上界,以消除匹配时变扰动的影响。此外,自适应律用于估计参数不确定性。通过李雅普诺夫稳定性理论证明了跟踪误差能渐近收敛至零。最后,通过仿真和实验验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 电液执行器;扩展状态观测器;时变扰动;参数不确定;渐近稳定

中图分类号: TH 137; TP 13 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)10-1435-08

High-Precision Motion Control for Electro-Hydraulic Actuators with Parametric Uncertainty and Time-Varying Disturbance

LIANG Qian-kun¹, CAI Yan², SONG Jin-chun¹, CHEN Jie¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China. Corresponding author: CAI Yan, E-mail: yancai.neu@hotmail.com)

Abstract: An asymptotic tracking control strategy is proposed for electro-hydraulic actuator (EHA) systems with parametric uncertainty, mismatched and matched time-varying disturbance. Firstly, an extended state observer (ESO) is constructed to estimate and compensate for the mismatched time-varying disturbance accurately. By introducing the robust adaptive term into the classical ESO, the asymptotic estimation result is obtained, and the conservatism of robust gain selection is reduced. Then, a robust adaptive term is designed to estimate the upper bound of the matched disturbance to eliminate the effect of the matched time-varying disturbance. In addition, adaptive laws are used to estimate the parametric uncertainty. Through the Lyapunov stability theory, it is proved that the tracking error can asymptotically converge to zero. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation and experiment.

Key words: electro-hydraulic actuator (EHA); extended state observer (ESO); time-varying disturbance; parametric uncertainty; asymptotic stability

由于具有高功率重量比的优势,电液执行器(electro-hydraulic actuator, EHA)在大功率和高机动性的工业设备中备受青睐^[1-3]。由于工作温度不

同及部件磨损,油液弹性模量和执行器内泄漏系数难以精确获得,造成系统主要的参数不确定^[4];此外,非线性摩擦、外部扰动及模型不确定构成

了系统时变扰动^[5]. 由于参数不确定和时变扰动的存在, 实现 EHA 高精度跟踪控制仍是一个挑战. 要实现 EHA 系统高精度运动控制, 就要妥善处理好这些不确定. 自适应控制是解决参数不确定性的有效方法, 若系统只存在恒定或慢时变扰动, 可实现渐近跟踪控制^[4]. 为了克服自适应控制对时变扰动鲁棒性差的缺点, Yao^[5]提出了自适应鲁棒控制方法. 为了实现渐近跟踪控制, 鲁棒积分控制方法用于抑制 EHA 系统中的不匹配扰动^[6], 但其需要已知扰动及其导数的边界信息且需利用加速度信号进行辅助设计. 以上控制方法取得了良好的控制性能, 但它们都存在一个共同的缺点, 即利用高增益抑制时变扰动将会导致控制器设计的保守性. 基于干扰估计和补偿的控制方法^[7-8]在降低控制器设计保守性和提高跟踪性能方面取得了显著成效. 其中, ESO 具有实时估计广义块扰动(包括未建模动力学、未知外部扰动和参数不确定性)的优势, 已成为扰动补偿技术的研究热点^[9-10]. 然而, 在存在时变不匹配扰动的条件下, 基于 ESO 的控制方法只能保证跟踪误差最终一致有界^[11-12].

受上述讨论的启发, 本文将鲁棒积分控制的主要思想应用到 ESO 的设计中, 以实现估计误差的渐近收敛. 然后, 针对存在参数不确定性、不匹配时变扰动和匹配时变扰动的 EHA 系统, 提出了一种基于自适应 ESO 的渐近跟踪控制方案, 该方案不仅降低了控制器设计的保守性, 还提高了执行器的跟踪性能, 并通过常用的控制方案进行对比验证.

1 EHA 系统模型

典型的 EHA 系统是由伺服电机、定量泵、双杆液压缸及相关补油回路组成, 其系统原理如图 1 所示. 根据牛顿第二定律, 液压缸活塞杆的速度动态方程可描述为

$$\dot{x}_p = (p_L A - d)/m. \quad (1)$$

式中: x_p 为执行器的位移, m; p_L 为液压缸左、右两腔的压力差, $p_L = p_a - p_b$, Pa, p_a 和 p_b 分别为液压缸左右两腔压力, Pa; A 为液压缸的有效面积, m^2 ; d 表示块扰动, 包括非线性摩擦和外部扰动, N; m 为负载等效质量, kg.

随着密封技术的进步, EHA 系统的外泄漏可以忽略不计. 因此, 液压缸左、右两腔的压力动态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{p}_a &= (D\omega_m - A\dot{x}_p - C_l p_L + q_1) \frac{E}{V_1}, \\ -\dot{p}_b &= (D\omega_m - A\dot{x}_p - C_l p_L + q_2) \frac{E}{V_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: D 为定量柱塞泵的排量, $m^3 \cdot r^{-1}$; ω_m 为伺服电机(泵)的转速, $r \cdot s^{-1}$; C_l 为液压缸的内泄漏系数, $m^3 \cdot (s \cdot Pa)^{-1}$; q_1 和 q_2 为压力动态通道上的建模误差, 包括未知的动态和补油流量, $m^3 \cdot s^{-1}$; E 为油液有效弹性模量, Pa; $V_1 = V_3 + Ax_p$ 和 $V_2 = V_4 - Ax_p$ 分别为泵到液压缸左、右两腔的容积, V_3 和 V_4 分别为泵到液压缸两腔的初始容积, m^3 .

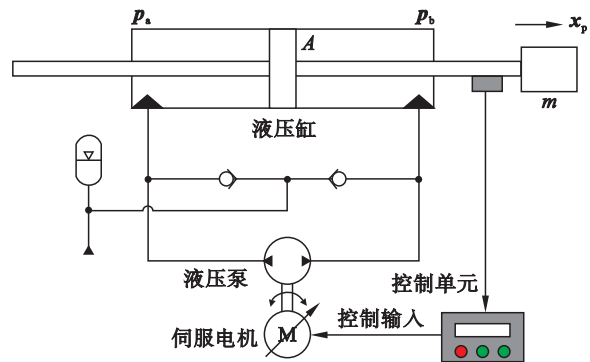


图 1 EHA 系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the EHA system

EHA 系统通过伺服驱动器调节伺服电机, 实现电流—速度—角度的闭环控制, 以及脉冲补偿和振动抑制. 由文献[13]可见, 伺服电机的闭环带宽远高于液压执行器. 因此, 对于伺服电机, 可以忽略其动态, 直接将控制电压与伺服电机转速视为比例环节.

$$\omega_m = k_m u. \quad (3)$$

式中: k_m 为电机增益, $r \cdot (s \cdot V)^{-1}$; u 为控制输入电压, V.

定义状态变量 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [x_p \ \dot{x}_p \ Ap_L/m]^T$, 并结合式(1)~式(3)可得到如下状态方程:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3 - d/m, \\ \dot{x}_3 &= \frac{A}{m} Dk_m E f_1 u - \frac{A}{m} E f_2 - E C_l f_3 + q, \\ y &= x_1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $x_1 = x_p$, 为执行器位移; $x_2 = \dot{x}_p$, 为执行器速度; $x_3 = Ap_L/m$, 为负载压力所引起的加速度; $f_1 = 1/V_1 + 1/V_2$; $f_2 = Af_1 x_2$; $f_3 = f_1 x_3$; $q = (AE/m)(q_1/V_1 + q_2/V_2)$; y 为 EHA 系统输出, 即执行器位移.

不同的工作环境, 油液的温度也不一样, 且随着工作时间的增加, 系统部件也会发生不同程度的磨损, 因此, EHA 的系统参数难以精确获取.

此处,将不确定参数集表示为 $\theta=[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$,其中 $\theta_1=ADk_m E/m$, $\theta_2=AE/m$, $\theta_3=EC_1$, 并令 $d_1=-d/m$ 和 $d_2=q$,式(4)可以写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3 + d_1, \\ \dot{x}_3 &= \theta_1 f_1 u - \theta_2 f_2 - \theta_3 f_3 + d_2, \\ y &= x_1. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

针对式(5)所描述的EHA系统,为方便后续控制器设计,此处给出如下假设:

假设 1 期望的运动轨迹 x_d 及其时间导数 $\dot{x}_d, \ddot{x}_d, \dddot{x}_d$ 都是有界的.

假设 2 式(5)所描述的EHA系统中的时变不匹配扰动 d_1 和时变匹配扰动 d_2 满足以下条件:

$$|\dot{d}_1| \leq \delta_1, |\ddot{d}_1| \leq \delta_2, |d_2| \leq \delta_3, \quad (6)$$

式中, δ_1, δ_2 和 δ_3 都是未知的正常数.

2 控制器设计及稳定性分析

2.1 ESO 设计

构建一种自适应ESO来精确估计时变不匹配扰动 d_1 . 在构建自适应ESO之前需要将 d_1 扩展为一个新的状态变量,即 $d_1 = x_e$. 因此,速度动态方程可写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_2 &= x_3 + x_e, \\ \dot{x}_e &= \dot{d}_1. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, x_e 为时变不匹配扰动 d_1 的新状态变量.

利用速度信号作为反馈信号构建自适应ESO,如式(8)所示.

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 &= x_3 + \hat{x}_e + 2l(x_2 - \hat{x}_2), \\ \dot{\hat{x}}_e &= l^2(x_2 - \hat{x}_2) + \hat{\beta} \text{sign}(lx_2 - l\hat{x}_2). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: \hat{x}_2 为 x_2 的估计; \hat{x}_e 为 x_e 的估计; l 为可调整的观测器增益; $\text{sign}(\cdot)$ 为标准的符号函数; $\hat{\beta}$ 为 β 的估计,其中 β 是未知的正常数.

由式(7)和式(8)可知,ESO估计误差动态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_2 &= \tilde{x}_e - 2l\tilde{x}_2, \\ \dot{\tilde{x}}_e &= -l^2\tilde{x}_2 - \hat{\beta} \text{sign}(l\tilde{x}_2) + \dot{d}_1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$ 和 $\tilde{x}_e = x_e - \hat{x}_e$ 分别为 x_2 和 x_e 的估

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha}_2 &= \dot{\alpha}_a + \dot{\alpha}_u, \\ \dot{\alpha}_a &= -(k_1 + k_2)(x_3 + \hat{x}_e - \alpha_1) + k_1 z_1 - z_2 - l\eta_1 - \hat{\beta} \text{sign}(\eta_1) - k_1^3 z_1 + k_1^2 z_2 + \ddot{x}_d, \\ \dot{\alpha}_u &= -(k_1 + k_2)\eta_2, \\ \dot{\alpha}_1 &= k_1^2 z_1 - k_1 z_2 + \ddot{x}_d. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中, $\dot{\alpha}_a$ 和 $\dot{\alpha}_u$ 分别是 $\dot{\alpha}_2$ 的可计算部分和不可计算部分.

根据式(19),实际控制输入电压 u 可设计为

计误差.

令 $\eta=[\eta_1 \ \eta_2]^T=[l\tilde{x}_2 \ \tilde{x}_e]^T$,则式(9)可写成向量微分方程的形式,

$$\dot{\eta} = LA_1\eta + B[\dot{d}_1 - \hat{\beta} \text{sign}(\eta_1)]. \quad (10)$$

式中: $A_1 = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$. 因为 A_1 是赫尔维茨矩阵,故存在正定矩阵 P 满足以下方程:

$$A_1^T P + PA_1 = -2I. \quad (11)$$

式中, I 为单位矩阵.

经计算,矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 3 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

$\hat{\beta}$ 的自适应律可设计为

$$\dot{\hat{\beta}} = \rho r \text{sign}(\eta_1). \quad (13)$$

式中: ρ 为正的自适应增益; r 为辅助误差函数,可设计为

$$r = 5\eta_1 + 3\dot{\eta}_1/l. \quad (14)$$

由于 r 中含有不可计算的 $\dot{\eta}_1$,故 r 不能直接使用.因而, $\hat{\beta}$ 可通过以下公式进行计算.

$$\hat{\beta}(t) = \hat{\beta}(0) + \rho \int_0^t 5|\eta_1| d\tau + \frac{3\rho}{l} (|\eta_1(t)| - |\eta_1(0)|). \quad (15)$$

式中: $\hat{\beta}(t)$ 为 t 时刻 $\hat{\beta}$ 的值; $\hat{\beta}(0)$ 为 0 时刻 $\hat{\beta}$ 的值; τ 为积分微元.

2.2 反步控制器设计

将ESO融入到反步控制的构架中去设计控制器.跟踪误差 $z_i (i=1, 2, 3)$ 可以定义为

$$z_1 = x_1 - x_d, z_2 = x_2 - \alpha_1, z_3 = x_3 - \alpha_2. \quad (16)$$

式中, α_1 和 α_2 分别是 x_2 和 x_3 的虚拟控制输入.

根据式(5)所描述的EHA系统,虚拟控制输入 α_1 和 α_2 可分别设计为

$$\alpha_1 = -k_1 z_1 + \dot{x}_d, \alpha_2 = -k_2 z_2 - z_1 - \hat{x}_e + \dot{\alpha}_1. \quad (17)$$

将式(16)和式(17)分别代入 z_1 和 z_2 的时间导数得

$$\dot{z}_1 = -k_1 z_1 + z_2, \dot{z}_2 = -k_2 z_2 - z_1 + z_3 + \eta_2. \quad (18)$$

对 z_3 进行求导得

$$\dot{z}_3 = \theta_1 f_1 u - \theta_2 f_2 - \theta_3 f_3 + d_2 - \dot{\alpha}_2, \quad (19)$$

式中, $\dot{\alpha}_2$ 可由式(20)进行计算:

$$u = \frac{1}{\hat{\theta}_1 f_1} [\hat{\theta}_2 f_2 + \hat{\theta}_3 f_3 - k_3 z_3 - z_2 + \dot{\alpha}_a - \hat{\delta}_3 \text{sign}(z_3)]. \quad (21)$$

式中, $\hat{\delta}_3$ 为 δ_3 的估计值, 其自适应律可设计为

$$\dot{\hat{\delta}}_3 = \gamma |z_3|. \quad (22)$$

式中, γ 是正的自适应增益.

将式(21)代入式(19)得

$$\dot{z}_3 = -k_3 z_3 - z_2 + (k_1 + k_2)\eta_2 - \hat{\delta}_3 \text{sign}(z_3) + d_2 + \tilde{\theta}_1 f_1 u - \tilde{\theta}_2 f_2 - \tilde{\theta}_3 f_3. \quad (23)$$

式中, $\hat{\theta}$ 的自适应律设计为

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma [f_1 u z_3 \quad -f_2 z_3 \quad -f_3 z_3]^T. \quad (24)$$

式中, $\Gamma = \text{diag}(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3)$ 为自适应增益矩阵.

根据上述步骤, EHA 的闭环系统控制原理图

如图 2 所示. 位移传感器采集到的执行器位置信号通过与给定的指令信号 (即期望运动轨迹) x_d 进行比较得到位置跟踪误差 z_1 , 设计出 x_2 的虚拟控制输入 a_1 并通过作差得出速度跟踪误差 z_2 , 同时以 x_2 作为反馈信号设计出 ESO(8) 来估计不匹配扰动 d_1 , 然后由 z_2 和 ESO 估计结果共同构建 x_3 的虚拟控制输入 a_2 并通过作差得出加速度跟踪误差 z_3 , 最后设计出参数自适应律 (式(22)和式(24)) 及真实控制输入电压 (式(21)), 真实控制输入电压作用于 EHA 系统中的伺服驱动器进而驱动伺服电机带动定量泵转动, 从而控制执行器运动.

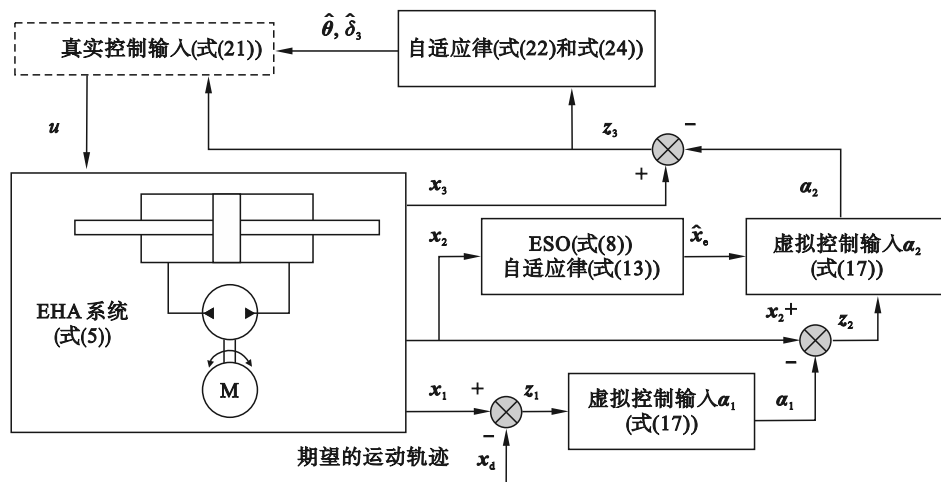


图 2 EHA 系统的控制原理图

Fig. 2 Control schematic diagram of the EHA system

2.3 闭环系统稳定性分析

为了证明估计误差渐近收敛, 下面的引理是必不可少的.

引理^[14] 函数 $J(t)$ 定义为

$$J(t) = \frac{3}{l} \beta |\eta_1(0)| - \frac{3}{l} \eta_1(0) \dot{d}_1(0) - \int_0^t L(\tau) d\tau. \quad (25)$$

式中, $L(t)$ 为辅助函数, 其表达式为

$$\begin{aligned} J(t) &= \frac{3}{l} \beta |\eta_1(0)| - \frac{3}{l} \eta_1(0) \dot{d}_1(0) - \int_0^t (5\eta_1 + 3\dot{\eta}_1/l)(\dot{d}_1 - \beta \text{sign}(\eta_1)) d\tau = \frac{3}{l} \beta |\eta_1(0)| - \frac{3}{l} \eta_1(0) \dot{d}_1(0) - \int_0^t 5\eta_1 \dot{d}_1 d\tau - \\ &\int_0^t 3\dot{\eta}_1 \dot{d}_1 / \omega_0 d\tau + \int_0^t 5\eta_1 \beta \text{sign}(\eta_1) d\tau + \int_0^t \frac{3\dot{\eta}_1}{l} \beta \text{sign}(\eta_1) d\tau = \frac{3}{l} \beta |\eta_1(0)| - \frac{3}{l} \eta_1(0) \dot{d}_1(0) - \int_0^t 5\eta_1 \dot{d}_1 d\tau - \frac{3}{l} \eta_1 \dot{d}_1 \Big|_0^t + \\ &\int_0^t 3\eta_1 \ddot{d}_1 / l d\tau + \int_0^t 5\beta |\eta_1| d\tau + \frac{3}{l} \beta |\eta_1| \Big|_0^t = \frac{3}{l} \beta |\eta_1(0)| - \frac{3}{l} \eta_1(0) \dot{d}_1(0) + 5 \int_0^t (\beta |\eta_1| - \dot{d}_1 \eta_1 + \frac{3}{5l} \eta_1 \ddot{d}_1) d\tau - \\ &\frac{3}{l} \eta_1 \dot{d}_1 + \frac{3}{l} \eta_1(0) \dot{d}_1(0) + \frac{3}{l} \beta |\eta_1| - \frac{3}{l} \beta |\eta_1(0)| \geq \int_0^t 5 |\eta_1| (\beta - \delta_1 - \frac{3}{5l} \delta_2) d\tau + \frac{3}{l} |\eta_1| (\beta - \delta_1). \end{aligned} \quad (28)$$

根据式(27)和(28)可推出引理 1 成立.

$$L(t) = r(\dot{d}_1 - \beta \text{sign}(\eta_1)). \quad (26)$$

如果存在足够大的增益 β 满足以下条件:

$$\beta \geq \delta_1 + \frac{3}{5l} \delta_2. \quad (27)$$

那么, 函数 $J(t)$ 总是正的. 引理 1 的证明如下.

将式(14)和式(26)代入式(25)中可得

定义 $Z = [z_1 \quad z_2 \quad z_3 \quad \eta_1 \quad \eta_2]^T$ 和一组标量为

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= k_1, K_2 = k_2 - \frac{1}{2}, K_3 = k_3 - \frac{k_1 + k_2}{2c}, K_4 = l, K_5 = l - \frac{c(k_1 + k_2)}{2} - \frac{1}{2}, \\ A &= \text{diag}(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5). \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

式中: c 为一个可调整的正常数; A 为对角矩阵; $K_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 为对角矩阵 A 的元素.

定理 对于式(5)所描述的 EHA 系统若满足假设 1 和假设 2, 通过设计 ESO(式(8)), 自适应律(式(13), 式(22), 式(24))及控制输入(式(17)和式(21))并通过选取观测器增益 l 和控制增益 k_1, k_2, k_3 使得 A 为正定矩阵, 那么可实现 EHA 系统的渐近跟踪控制, 即当时间趋于无穷时位置跟踪误差收敛至零.

证明 考虑 Lyapunov 候选函数为

$$V = \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} + \frac{1}{2\rho} \tilde{\beta}^2 + J(t) + \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\delta}_3^2 + \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}}. \quad (30)$$

式中: V 为选定的 Lyapunov 候选函数; $\tilde{\beta}$ 和 $\tilde{\delta}_3$ 分别为 β 和 δ_3 的估计误差, 即 $\tilde{\beta} = \beta - \hat{\beta}$ 和 $\tilde{\delta}_3 = \delta_3 - \hat{\delta}_3$.

V 的时间导数为

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}) \boldsymbol{\eta} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\eta} [\dot{d}_1 - \hat{\beta} \text{sign}(\boldsymbol{\eta}_1)] - \frac{1}{\rho} \tilde{\beta} \dot{\hat{\beta}} - L(t) + z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2 + z_3 \dot{z}_3 - \frac{1}{\gamma} \tilde{\delta}_3 \dot{\hat{\delta}}_3 - \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}. \quad (31)$$

由于 $\boldsymbol{\eta}_2$ 是不可利用的, 所以需要 $\boldsymbol{\eta}_1$ 代替 $\boldsymbol{\eta}_2$, 由式(9), 可以得到

$$\boldsymbol{\eta}_2 = 2\boldsymbol{\eta}_1 + \dot{\boldsymbol{\eta}}_1/l. \quad (32)$$

将式(11) ~ 式(13), 式(18), 式(22) ~ 式(24), 式(26)和式(32)代入到式(31)可得

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_1 &= -k_1 z_1 + \dot{\boldsymbol{x}}_d, \quad \dot{\boldsymbol{\alpha}}_1 = k_1^2 z_1 - k_1 z_2 + \ddot{\boldsymbol{x}}_d, \quad \boldsymbol{\alpha}_2 = -k_2 z_2 - z_1 - \dot{\boldsymbol{x}}_c + \dot{\boldsymbol{\alpha}}_1, \\ u &= \frac{1}{\hat{\theta}_1 f_1} [\hat{\theta}_2 f_2 + \hat{\theta}_3 f_3 - k_3 z_3 - z_2 + \dot{\boldsymbol{\alpha}}_a - \hat{\delta}_3 \text{sign}(z_3)], \\ \dot{\boldsymbol{\alpha}}_a &= -(k_1 + k_2)(\boldsymbol{x}_3 + \dot{\boldsymbol{x}}_c - \dot{\boldsymbol{\alpha}}_1) + k_1 z_1 - z_2 - l \boldsymbol{\eta}_1 - k_1^3 z_1 + k_1^2 z_2 + \ddot{\boldsymbol{x}}_d. \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

式中, $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 和 $\hat{\delta}_3$ 的自适应律设计与式(24)和(22)一样.

此处使用 3 个指标来评价控制算法的跟踪性能, 即跟踪误差的最大绝对值 (M_e)、跟踪误差的平均绝对值 (μ_e) 和跟踪误差的标准差 (σ_e)^[16]. 需要注意的是, 后续仿真和实验中将采用最后两个周期的跟踪误差数据用于计算这些性能指标.

搭建的 EHA 实验平台如图 3 所示. 液压单元由一定排量柱塞泵 (Rexroth A10FZG006/10W)、伺服直流电机 (安川 SGM7G-30AFC61)、双杆液压缸、溢流阀、蓄能器、过滤器等组成. 位置信号由一旋转编码器 (Kübler 8.5000.8132.5000) 记录; 液压缸两腔压力由压力传感器 (HYDAC EDS 3448-5-0100-Y00) 进行测量; 速度信号可以通

$$\dot{V} = -l \boldsymbol{\eta}^T \boldsymbol{\eta} - k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + z_2 \boldsymbol{\eta}_2 - k_3 z_3^2 + (k_1 + k_2) \boldsymbol{\eta}_2 z_3 - \delta_3 |z_3| + d_2 z_3 \leq -\mathbf{Z}^T \mathbf{A} \mathbf{Z}. \quad (33)$$

由式(33)可知, $V(t) \in L_\infty$ 及 $\mathbf{Z} \in L_2$, 其中 L_∞, L_2 为范数. 又因为 β, δ_3 和 $\boldsymbol{\theta}$ 是有界的正常数, 故 $\hat{\beta}, \hat{\delta}_3$ 和 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 也是有界的. 根据假设 1 可进一步推断出 \mathbf{x} 是有界的, 即 $\mathbf{x} \in L_\infty$. 根据以上结论及假设 2, 可以从式(10), (18)和(23)中推断出 $\dot{\mathbf{Z}}$ 有界, 即 $\dot{\mathbf{Z}} \in L_\infty$. 因为 $\mathbf{Z} \in L_2$ 和 $\dot{\mathbf{Z}} \in L_\infty$, 利用 Barbalat 引理^[15], 可以得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{Z} = 0$, 完成了定理的理论证明.

3 实验验证

通过对比实验来证明所提控制器及 ESO 的有效性和优越性.

本文提出的基于自适应扩张状态观测器的反步控制器 (adaptive extended state observer based on backstepping control, AESOBC), 其中式(8)给出了自适应 ESO 的设计, 式(17)和式(21)给出了控制输入的设计.

基于经典扩张状态观测器的反步控制器 (classic extended state observer based on backstepping control, CESOBC), 这是用于对比的控制器, 其中经典 ESO 和控制律分别设计为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_2 &= \mathbf{x}_3 + \hat{\mathbf{x}}_c + 2l(\mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2), \\ \hat{\mathbf{x}}_c &= l^2(\mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{x}}_2). \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

过对位置信号进行反向差分得到. 为了降低噪声的影响, 采用一个截止频率为 10 Hz 的二阶巴特沃斯滤波器对差分得到的速度信号进行滤波. Quanser Q8 作为信号采集卡将传感器检测到的信号进行采集并传输到装有 MATLAB/Simulink 的计算机上. 然后 MATLAB/Simulink 执行控制程序, 生成的控制输入电压驱动伺服电机转动进而控制执行器的运动. Simulink 中的采样步长设置需大于系统所有传感器的最大采样时间, 且过大的采样步长可能会造成控制精度下降, 但过小的采样步长会导致计算量太大从而影响控制的实时性, 综合以上考虑, 本实验中的采样步长设置为 0.001 s. EHA 系统的物理参数为: $D = 6 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{r}^{-1}$, $A = 6.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $V_3 = V_4 = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $k_m = 4.17 \text{ r} \cdot (\text{s} \cdot \text{V})^{-1}$,

$\beta_c = 7 \sim 1 \times 10^8 \text{ Pa}, C_l = 0 \sim 1 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{Pa}^{-1}, m = 11.5 \text{ kg}.$

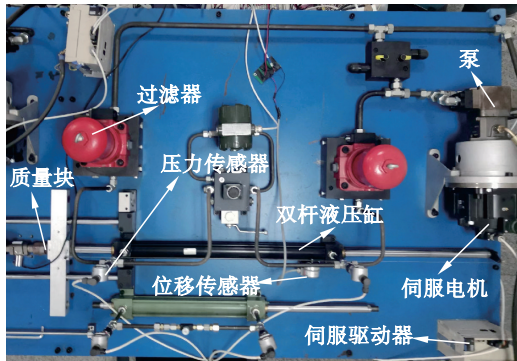


图3 EHA系统的实验平台
Fig. 3 EHA system experimental platform

控制参数的选取. AESOBC 控制器中控制增益和观测器增益的选取需保证式(29)中的矩阵 A 是正定的, 可能有多组观测器增益和控制增益满足条件, 可先选择一组较小的参数, 然后逐渐增大这些值, 以获得满意的跟踪性能, 同时保持 A 的正定性, 此处给出一组参数: $l = 220, k_1 = 200, k_2 = 140$ 和 $k_3 = 140$; 自适应增益选取也是先给出较小的增益, 然后逐渐增大, 直到参数估计曲线达到良好的收敛特性, 实验中自适应增益选为: $\rho = 15, \gamma = 0.2, \Gamma_1 = 8 \times 10^{-7}, \Gamma_2 = 1000$ 和 $\Gamma_3 = 1 \times 10^{-15}$; 自适应参数的初始估计值设置为 $\hat{\beta}(0) = 0, \hat{\delta}_3(0) = 0$ 和 $\hat{\theta}(0) = [1.2 \ 0 \ 0]^T$; ESO 中状态估计的初始值设置为: $\hat{x}_1(0) = 0.01, \hat{x}_2(0) = 0$ 和 $\hat{x}_3(0) = 0$. 为了保证比较的公平性, CESOBC 中所有控制参数的选取与 AESOBC 中的相同.

接下来将进行两种工况下的实验, 实验I和实验II.

实验I 在无外部干扰条件下, 执行器的非线性摩擦是不匹配扰动的主要组成部分.

表 1 和图 4~6 给出了实验曲线和跟踪性能指标. 图 4 为所设计 ESO 和经典 ESO 下状态 x_2 和 x_c 的估计结果. 从图 4a 可以看出, AESOBC 控制器的速度估计误差幅值逐渐减小, 而 CESOBC 控制器的速度估计误差幅值几乎保持不变, 这表明本文所提的自适应 ESO 的估计精度高于经典 ESO. 从图 5a 和图 5b 的跟踪结果和表 1 的性能指标可以看出: AESOBC 控制器相比 CESOBC 控制器能获得更好的跟踪性能, 性能指标值 M_c, μ_c 和 σ_c 分别降低 16.1%, 24.3%, 32.8%, 这是由于 AESOBC 控制器中的自适应 ESO 能对不匹配扰动进行更精确地估计和补偿. 图 5c 给出了 AESOBC 和 CESOBC 的控制输入. 由于 AESOBC 中存在 $\hat{\beta} \text{sign}(\eta_1)$ 项, 使得 AESOBC 的控制电压有一定的抖振, 但其不影响最终的跟踪性能. 图 6 给出了 AESOBC 中自适应参数的估计结果, 所有的参数估计值都展现出良好的收敛特性.

表 1 实验 I 中性能指标
Table 1 Performance indices in experiment I

控制器	性能指标/mm		
	M_c	μ_c	σ_c
AESOBC	0.535 7	0.102 7	0.081 73
CESOBC	0.638 8	0.135 6	0.121 6

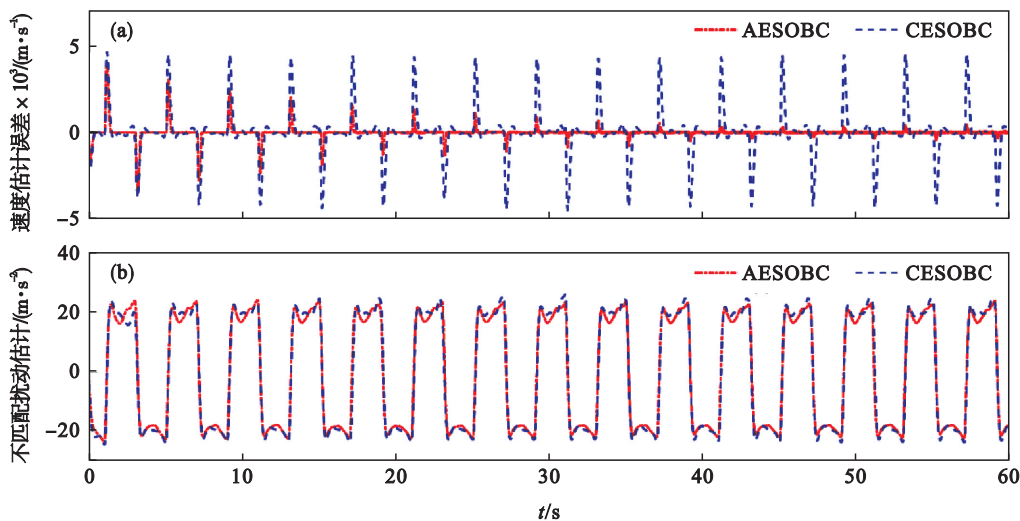


图 4 实验 I 中两种控制器的速度估计误差和不匹配扰动估计结果

Fig. 4 Velocity estimation error and mismatched disturbance estimation results of two controllers in experiment I

(a) 速度估计误差 \hat{x}_2 ; (b) 不匹配扰动估计 \hat{x}_c .

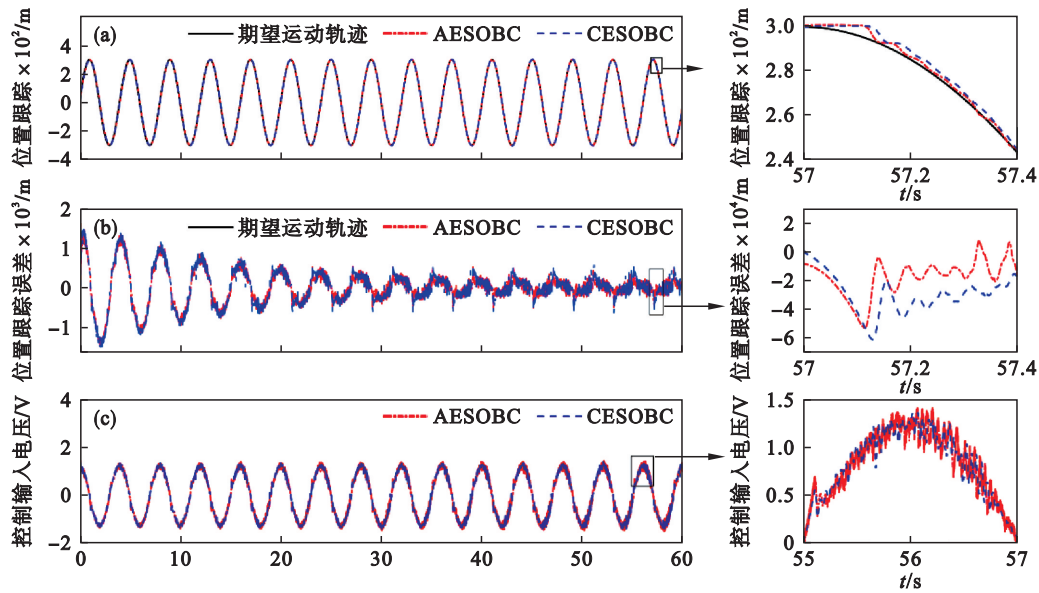


图 5 实验 I 的控制结果

Fig. 5 Control results in experiment I

(a)—位置跟踪; (b)—位置跟踪误差; (c)—控制输入电压.

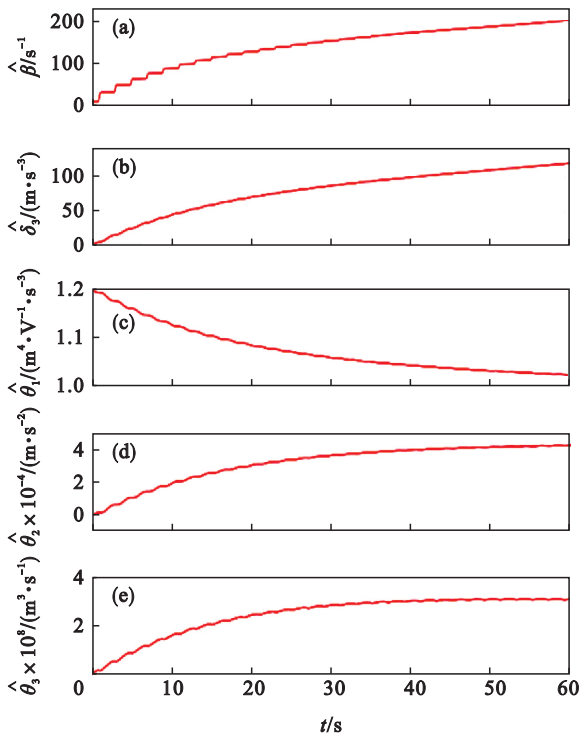


图 6 实验 I 中 AESOBC 控制器的参数估计

Fig. 6 Parameter estimation of the AESOBC controller in the experiment I

实验 II 为了测试所提控制器的鲁棒性,将刚度为 $82 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 弹簧作为外部干扰,如图 7 所示.在该实验条件下,执行器的非线性摩擦和外部弹簧力共同构成了不匹配扰动.

在此工况下,所有控制参数和估计初始值与实验 I 保持一致.表 2 和图 8 分别给出了实验 II 中性能指标和 AESOBC 和 CESOBC 控制器的跟踪

结果.可以发现,控制器 AESOBC 相比 CESOBC 可以获得更高的跟踪精度.在实验 II 中, AESOBC 控制器的性能指标值 M_e , μ_e 和 σ_e 相比控制器 CESOBC 分别降低 7.76%, 48.4% 和 36.4%. 虽然 AESOBC 和 CESOBC 的指标 M_e 相差不大,但 AESOBC 控制器的 μ_e 和 σ_e 指标远小于 CESOBC, 表明 AESOBC 控制器在减小标准差和均值误差方面更具优势.从实验 I 到实验 II 可以看出, AESOBC 与 CESOBC 控制器的性能指标 μ_e 和 σ_e 的比值减小,进一步验证了本文所提出的控制器在外部负载下降低标准差和平均误差的优越性.

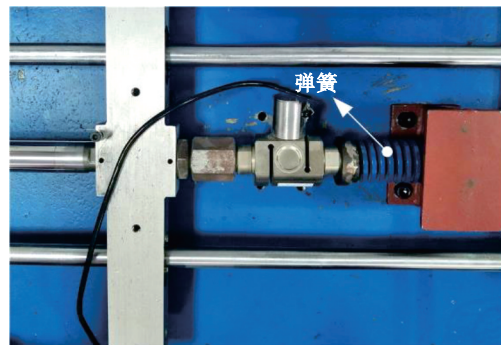


图 7 带有外部负载的 EHA 系统

Fig. 7 EHA system with external load

表 2 实验 II 中性能指标

Table 2 Performance indices in experiment II

控制器	性能指标/mm		
	M_e	μ_e	σ_e
AESOBC	0.603 9	0.108 4	0.086 62
CESOBC	0.654 7	0.210 1	0.136 3

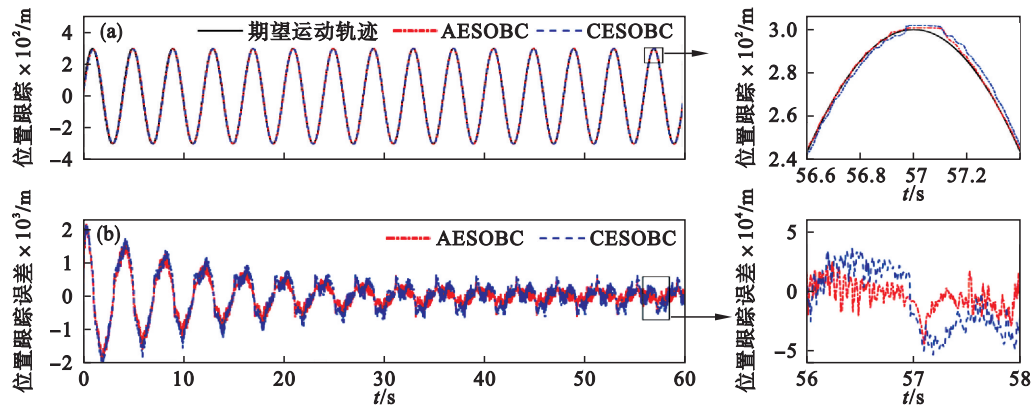


图8 实验II中的跟踪结果

Fig. 8 Tracking results in experiment II

(a)—位置跟踪; (b)—位置跟踪误差.

4 结 论

本文研究了具有参数不确定性和时变扰动的EHA系统的渐近跟踪控制问题.为了降低设计保守性,提高跟踪精度,构造了一种自适应ESO来估计EHA系统中的不匹配扰动.然后分别设计了自适应律和鲁棒自适应项来处理不确定性参数和匹配扰动.本文提出的基于自适应ESO的反步控制策略可以保证跟踪误差及估计误差渐近收敛至零.最后,通过搭建的实验平台验证了所设计控制器的有效性和优越性.

参考文献:

- [1] Jiao Z X, Chen X H, Liu X C, et al. An experimental study on outer frame position control of hydraulic flight motion simulator with model compensation [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5): 3419–3428.
- [2] Rath J J, Defoort M, Sentouh C, et al. Output-constrained robust sliding mode based nonlinear active suspension control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(12): 10652–10662.
- [3] Shen G, Zhu Z C, Li X, et al. Real-time electro-hydraulic hybrid system for structural testing subjected to vibration and force loading [J]. *Mechatronics*, 2016, 33: 49–70.
- [4] Wang B Y, Dong Y L, Zhao K D. Compound control for hydraulic flight motion simulator [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, 23(2): 240–245.
- [5] Yao B. High performance adaptive robust control of nonlinear systems: a general framework and new schemes [C]//Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, 1997: 2489–2494.
- [6] Yao J Y, Jiao Z X, Ma D W, et al. High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(2): 633–641.
- [7] Zhang J H, Liu X W, Xia Y Q, et al. Disturbance observer-based integral sliding-mode control for systems with mismatched disturbances [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(11): 7040–7048.
- [8] Xi R P, Zhang H G, Sun S X, et al. Reduced-order high-gain observer (ROHGO)-based neural tracking control for random nonlinear systems with output delay [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(12): 7507–7515.
- [9] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900–906.
- [10] Won D, Kim W, Tomizuka M. Nonlinear control with high-gain extended state observer for position tracking of electro-hydraulic systems [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(6): 2610–2621.
- [11] Guo Q, Zhang Y, Celler B G, et al. Backstepping control of electro-hydraulic system based on extended-state-observer with plant dynamics largely unknown [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(11): 6909–6920.
- [12] Shen W, Shen C. An extended state observer-based control design for electro-hydraulic position servomechanism [J]. *Control Engineering Practice*, 2021, 109: 104730.
- [13] Ahn K K, Nam D N C, Jin M L. Adaptive backstepping control of an electrohydraulic actuator [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(3): 987–995.
- [14] Xian B, Dawson D M, de Queiroz M S, et al. A continuous asymptotic tracking control strategy for uncertain nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(7): 1206–1211.
- [15] Tao G. A simple alternative to the Barbalat lemma [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(5): 698.
- [16] Deng W X, Yao J Y. Asymptotic tracking control of mechanical servosystems with mismatched uncertainties [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(4): 2204–2214.