

DOI: 10.3901/JME.2022.08.274

基于事件触发和扩展状态观测器的液压位置跟踪系统控制研究^{*}

沈 伟¹ 袁小康¹ 刘 明²

(1. 上海理工大学机械工程学院 上海 200093;
2. 哈尔滨工业大学航天学院 哈尔滨 150001)

摘要: 基于网络控制技术的液压控制系统具有远程控制、模块化、资源共享等优点。然而, 液压控制系统本身具有强非线性和参数不确定性等特点, 结合网络控制系统具有的通信带宽受限等问题, 导致控制效果不好而限制了应用。针对以上问题, 提出一种具有事件触发机制和扩展状态观测器(Extended state observer, ESO)的自适应鲁棒控制策略。通过引入事件触发机制过滤大量的冗余数据, 提高通信带宽的利用率。基于模型设计出一种扩展状态观测器, 同时对速度值和不匹配外干扰进行估计。通过自适应算法在线估计液压控制系统的不确定参数。通过 Lyapunov 稳定性理论分析闭环系统的全局稳定性。试验表明所设计的算法在减少了大量数据传输量的同时, 具有良好的位置跟踪控制性能。

关键词: 液压控制系统; 网络控制; 事件触发策略; 扩展状态观测器; 位置跟踪控制

中图分类号: TP273

Event-triggered Control for Hydraulic Position Tracking System with Extended State Observer

SHEN Wei¹ YUAN Xiaokang¹ LIU Ming²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;
2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The hydraulic control system based on network control technology has the advantages of remote control, modularization and resource sharing. However, the hydraulic control system itself has the characteristics of strong nonlinearity and parameter uncertainty, and the network control system has problems such as limited communication bandwidth, which lead to poor control performance and limit the application. An adaptive robust control strategy with an event-triggered mechanism and an extended state observer(ESO) is proposed to deal with the above problems. By introducing an event-triggered strategy to filter a large amount of redundant data, the utilization of communication bandwidth is improved. An extended state observer is designed based on the model to simultaneously estimate the velocity value and the disturbance outside the mismatch. The uncertain parameters of the hydraulic control system are estimated online through an adaptive algorithm. The global stability of the closed-loop system is analyzed by the Lyapunov stability theory. Experimental results indicate that the designed algorithm has good position tracking control performance while reducing a large amount of data transmission.

Key words: hydraulic servo system; network control technology; event-triggered strategy; extended state observer; position tracking control

0 前言

液压控制系统由于具有功率密度大、响应速度

快和控制精度高的优点在很多领域得到了应用^[1]。近年来, 随着对于控制性能和安全性能的要求日益增高, 液压控制系统也面临着模块化、遥操作、实时状态监测等发展需求, 例如恶劣条件下的工程机械运行、重型机器人系统的协调控制等情况^[2]。而网络控制技术因其有远程控制、资源共享以及安装

^{*} 国家重点研发计划(2020YFB2009900)和国家自然科学基金(51975376)资助项目。20211119 收到初稿, 20220228 收到修改稿

方便等多个优势已经引起了极大的关注, 这些特点与液压控制系统的发展需求具有很高的契合度。因此, 考虑到网络控制技术的众多优势, 并结合液压系统自身的优点, 液压控制与网络控制技术的结合具有非常广阔的研究与应用前景。

然而, 在网络控制框架下, 系统的稳定性会因为通信带宽的限制造成的数据包丢失、延迟等问题而受到破坏。因此, 如何提高通信带宽利用率成为研究网络控制通信系统的主要方向之一。XING 等^[3-4]提出了一种事件触发策略, 并将其和先进的控制算法结合起来运用。HEEMELS 等^[5]针对线性系统提出了一种周期性事件触发策略, 减少了通信数据量。LIU 等^[6-7]提出了模糊自适应事件触发和分布式混合事件触发方案来调节输出信号。GARCIA 等^[8]提出了一种适用于具有量化和时延系统的事件触发策略。SHEN 等^[9]将事件触发机制与液压系统结合, 去除了大量的冗余数据的同时保证了控制性能。事实上, 事件触发策略已经在实践中得到了广泛的应用。在车辆专用网络等系统中, 研究人员发现事件触发策略有效缓解了通信流量^[10]。

液压控制系统是典型的强非线性时变系统, 具有参数不确定性及未知的无法建模的外干扰等特点^[11], 这些问题都增大了开发高性能跟踪控制器的难度。为解决上述问题, 一些先进的控制策略被研究者们相继提出。MAEDA 等^[12-13]提出了一种基于迭代学习算法的控制策略, 有效提高了系统的控制性能。SUN 等^[14]提出了一种自适应非奇异终端滑模的算法, 使系统的鲁棒性得到提高。针对具有模型参数不确定和外干扰的系统, 一些学者分别提出了干扰观测器和高增益扰动观测器等在有限时间内来估计复合扰动^[15-16]。YAO 等^[17]将反步法和自适应控制结合, 避免了高收益反馈, 提高了系统的跟踪效果。然而, 上述控制策略都需要速度信息, 这个要求在电液伺服系统上由于速度传感器应用的限制而难以满足。间接获取速度信号的方法之一是通过计算位移的微分获取速度, 其缺点是在固定有限增益下的速度估计值不准确且有高增益峰值效应^[18]。另一种是基于模型的观测器, TALOLE 等^[19]提出了一种扩展状态观测器用于柔性关节机器人系统的轨迹跟踪。上述学者针对非线性系统进行控制策略的研究, 并提高了系统的控制性能。

本文将网络控制技术与液压控制系统相结合, 在重点关注液压控制系统自身存在的参数不确定性和不确定外干扰等问题的同时, 考虑如何有效提高网络系统通信带宽的利用率。从跨学科的角度出发,

提出了一种基于事件触发和扩展状态观测器的自适应鲁棒控制策略。在控制器设计过程中引入事件触发机制, 用以过滤大量数据从而提高通信带宽的利用率。将液压杆速度及系统未知的外部干扰用扩展状态观测器进行估计, 减少了传感器的作用。同时, 实际测量的位移信号被替代为对应的期望信号值, 并代入到观测器及自适应律中以降低噪声干扰和提升跟踪控制性能。此外, 在控制器中加入自适应算法以在线估计液压系统的不确定参数。

1 液压伺服阀控非对称缸模型

1.1 模型的建立

液压控制系统的工作原理如图 1 所示。图 1 中 p_1 、 q_1 、 A_1 和 p_2 、 q_2 、 A_2 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的压力、流量和有效作用面积, p_s 和 p_r 分别为系统供油压力和邮箱压力。为了实现对负载的跟踪控制, 安装了位置传感器以获得实时位置信息。此外, 安装了两个压力传感器来获得无杆腔和有杆腔的工作压力。根据系统模型及牛顿第二定律, 惯性负载的动力学方程为

$$A_1 p_1 - A_2 p_2 = m\ddot{y} + b\dot{y} + d(t) \quad (1)$$

式中, m 为液压缸活塞及外负载的质量和; y 为活塞位移; A_1 和 p_1 分别为液压缸无杆腔的有效面积和压力; A_2 和 p_2 分别为液压缸有杆腔的有效面积和压力; b 为黏性摩擦因数; $d(t)$ 表示力加载过程中的非线性摩擦及外部扰动等。

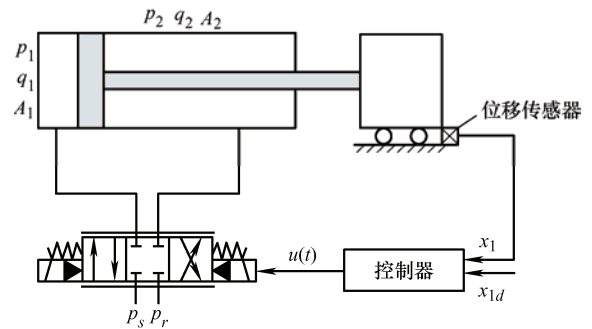


图 1 液压阀控非对称缸原理图

液压缸内流量压力动态方程为

$$\begin{cases} \frac{V_1}{\beta_e} \dot{p}_1 = -A_1 \dot{y} - C_k (p_1 - p_2) - C_{j1} p_1 + q_1 + f_1(t) \\ \frac{V_2}{\beta_e} \dot{p}_2 = A_2 \dot{y} + C_k (p_1 - p_2) - C_{j2} p_2 - q_2 - f_2(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, β_e 为液压油的体积弹性模量, $V_1 = V_{01} + A_1 y$ 和 $V_2 = V_{02} - A_2 y$ 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的有效容积, V_{01} 和 V_{02} 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的初

始容积, C_k 为液压缸内泄漏系数, C_{j1} 和 C_{j2} 分别为液压缸无杆腔和有杆腔外泄漏系数, 考虑到目前液压缸生产厂家密封技术的提高, 外泄漏系数通常可以忽略, $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的内泄漏引起的复杂的建模误差, q_1 和 q_2 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的流量, 可以表示为

$$\begin{cases} q_1 = s(u)k_c u \sqrt{(p_s - p_1)} + s(-u)k_c u \sqrt{(p_1 - p_r)} \\ q_2 = s(u)k_c u \sqrt{(p_2 - p_r)} + s(-u)k_c u \sqrt{(p_s - p_2)} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $s(\psi) = \begin{cases} 1 & \psi \geq 0 \\ 0 & \psi < 0 \end{cases}$, $k_c = C_g \omega x_v \sqrt{\frac{2}{\rho}}$ 为控制输入电压 u 的总流量增益, C_g 和 ω 分别为伺服阀流量系数和阀芯面积梯度, x_v 为阀芯位移, ρ 为液压油密度, p_s 为供油压力, $p_r \approx 0$ 为油箱压力。

1.2 状态空间方程的建立

定义状态变量为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T = [y, \dot{y}, A_1 p_1 - A_2 p_2]^T$, 则整个系统的状态空间方程如下

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m} x_3 - \frac{\theta_1}{m} x_2 + d(t) \\ \dot{x}_3 = -(h_1 \theta_3 + h_2 \theta_6) x_2 - (h_1 + h_2) \theta_4 (p_1 - p_2) + (h_1 g_1 + h_2 g_2) \theta_5 u + \tilde{q}(t) + \theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\theta_1 = b$, $\theta_2 = q_n(t)$, $q_n(t) = q(t) - \tilde{q}(t)$ 代表建模误差的估计值, $\tilde{q}(t)$ 代表建模误差的匹配干扰,

$q(t) = \frac{\beta_e}{m} \left[\frac{A_1 f_1(t)}{V_1} + \frac{A_2 f_2(t)}{V_2} \right]$ 是建模误差, $\theta_3 = \beta_e A_1$,

$\theta_4 = \beta_e C_k$, $\theta_5 = \beta_e k_c$, $\theta_6 = \beta_e A_2$, $h_1 = \frac{A_1}{V_{01} + A_1 x_1}$,

$h_2 = \frac{A_2}{V_{02} - A_2 x_1}$, $g_1 = s(u) \sqrt{(p_s - p_1)} + s(-u) \sqrt{p_1}$,

$g_2 = s(u) \sqrt{p_2} + s(-u) \sqrt{(p_s - p_2)}$ 。

考虑到液压控制系统的实际工况, 各个参数根据环境温度的变化而变化。因此, 在控制器设计中加入自适应算法, 自适应参数为 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$ 。目标是合成的控制律 u 可以使得实际位移信号 $y(t)$ 尽可能准确地跟踪上理想轨迹信号 $y_d(t) = x_{1d}$ 。为了更严谨地考虑, 在设计控制器前, 作出以下几个基于实际情况的假设。

假设 1: 期望轨迹 $y_d(t) = x_{1d}$ 及其三阶导数都是有界; 液压缸左右两腔的压力 p_1 和 p_2 是被 p_s 和 p_r 约束的, 即 $0 < p_r < p_1 < p_s$, $0 < p_r < p_2 < p_s$ 。

假设 2: 未知参数 θ 的范围为

$$\begin{cases} \theta \in \Omega_\theta \triangleq \{\theta : \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}\} \\ \theta_{\max} = [\theta_{1\max}, \theta_{2\max}, \theta_{3\max}, \theta_{4\max}, \theta_{5\max}, \theta_{6\max}]^T \\ \theta_{\min} = [\theta_{1\min}, \theta_{2\min}, \theta_{3\min}, \theta_{4\min}, \theta_{5\min}, \theta_{6\min}]^T \end{cases} \quad (5)$$

假设 3: 未知外干扰 $d(t)$ 及建模误差的匹配干扰 $\tilde{q}(t)$ 都是有界的, 即

$$|d(t)| \leq \tau_1 \quad |\tilde{q}(t)| \leq \tau_2 \quad |\dot{d}(t)| \leq \tau_3 \quad (6)$$

式中, τ_1 、 τ_2 、 τ_3 都是已知的正常数。

2 具有事件触发和状态观测器的自适应控制器的设计

2.1 事件触发通信策略

本文采用一种非固定周期采样策略, 事件触发时间 t_ξ 由事件触发器决定。 $u(t)$ 为控制器的输出电压, $u(t_\xi)$ 为事件触发器的释放电压。事件触发系统中 $l_0 = t_{(\xi+1)} - t_{(\xi)}$, l_0 为非定常数。

对于事件触发方案, 误差向量定义为

$$r_u(t) = u(t_\xi) - u(t), t \in [t_\xi, t_{\xi+1}) \quad (7)$$

事件触发条件

$$|r_u(t)| = |u(t_\xi) - u(t)| \geq \mu_1 |u(t)| + \mu_2 \quad (8)$$

式中, $0 \leq \mu_1 < 1$, $\mu_2 \geq 0$, 这会产生产生事件生成器

$$t_{\xi+1} = \min \{t \geq t_\xi : |r_u(t)| \geq \mu_1 |u(t)| + \mu_2\} \quad (9)$$

对于式(8)中描述的事件触发条件, μ_1 和 μ_2 是待设的事件触发参数。若 $\mu_1 = 0$ 且 $\mu_2 > 0$, 则事件触发则为绝对事件触发; 若 $\mu_1 > 0$ 且 $\mu_2 = 0$, 则事件触发为相对事件触发; 若两个参数都大于 0, 则为混合事件触发。本文采用混合事件触发策略。 μ_1 和 μ_2 越大, 则事件触发器消除的数据越多, 相对地, 控制效果越差。

芝诺行为^[20]对具有事件触发机制的系统具有非常大的影响。为了避免芝诺行为的出现, 令控制器的输出周期大于事件触发器相邻触发的最小时间间隔。事件触发器的连续判断条件于文献[9]中可见。

2.2 扩展状态观测器的设计

由于活塞速度 x_2 是不可测的, 因此需要一种准确的速度观测方法。此外, 无法准确建模的外部扰动 $d(t)$ 是电液伺服系统的主要扰动源, 因此状态观测器主要用来观测速度信号 x_2 及外部扰动 $d(t)$ 。

首先, 定义外部扰动 $x_4 = d(t)$, 令 $h(t) = \dot{x}_4$, 表示外部扰动变化率。根据系统模型(4), 观测器设计如式(10)所示

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + 3\omega_0(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \frac{1}{m} x_3 - \frac{\hat{\theta}_1}{m} \hat{x}_{1d} + \hat{x}_4 + 3\omega_0^2(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_4 = \omega_0^3(x_1 - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\dot{\hat{x}}_1$ 、 $\dot{\hat{x}}_2$ 和 $\dot{\hat{x}}_4$ 代表 x_1 、 x_2 和 x_4 的估计值的导数, $\omega_0 > 0$ 是扩展观测器的带宽, 是唯一需要选择设置的参数。

结合电液伺服系统模型(4), 观测器的估计误差

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 - 3\omega_0 \tilde{x}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{x}_4 + \frac{\tilde{\theta}_1}{m} \dot{x}_{1d} + \frac{\theta_1}{m} (\dot{x}_{1d} - x_2) - 3\omega_0^2 \tilde{x}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_4 = h(t) - \omega_0^3 \tilde{x}_1 \end{cases} \quad (11)$$

定义估计误差向量 $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3]^T = [\tilde{x}_1, \frac{\tilde{x}_2}{\omega_0}, \frac{\tilde{x}_4}{\omega_0^2}]^T$,

则估计误差动态可以被重新书写为

$$\dot{\varepsilon} = \omega_0 \mathbf{A} \varepsilon + \mathbf{B} \frac{\frac{\tilde{\theta}_1}{m} \dot{x}_{1d} + \frac{\theta_1}{m} (\dot{x}_{1d} - x_2)}{\omega_0} + \mathbf{C} \frac{h(t)}{\omega_0^2} \quad (12)$$

$$\text{式中, } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -3 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

由于 \mathbf{A} 是 Hurwitz, 则必有一个正定矩阵满足 \mathbf{P} 满足

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{I} \quad (13)$$

式中, \mathbf{I} 是一个单位矩阵, 则矩阵 \mathbf{P} 的解为

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -1 \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -1 & -\frac{1}{2} & 4 \end{pmatrix} \quad (14)$$

式(12)~(14)中的各个参数和矩阵用于本文第3节系统闭环的稳定性证明。

注释 1: 本文中的观测器方法是受文献[18]的启发而设计的。虽然观测器误差系统(12)中的系统矩阵 \mathbf{A} 已经设计为 Hurwitz。但是注意到误差系统(12)中同时含有两个未知非线性项, 因此误差系统(12)的状态轨线不是严格收敛的。在这种情况下, 为同时保证观测器误差系统和液压闭环控制系统的稳定性, 我们将在第3节中同时考虑观测器误差系统和闭环控制系统的稳定性并开展控制器的分析设计工作, 以确保所设计的控制器能在弥补观测器观测误差的同时保证液压控制系统的稳定性。

注释 2: 注意到本文中的液压控制系统的活塞速度 $x_2(t)$ 是未知的, 而虚拟控制律(24)的第二个表达式中需要用到 $x_2(t)$ 的信息, 因此, 本文设计方法中如不事先采用观测器(10)对活塞速度 $x_2(t)$ 进行估计, 则所构造的反步控制器(28)中存在未知信息, 无法进行设计。另一方面, 如注释 1 中所提到, 虽然由于被控对象(4)中存在强非线性, 导致误差系统

(12)无法严格收敛, (也就是说无法得到 $x_2(t)$ 的精确估计, 并且存在估计误差), 但是在第 2.4 节的反步控制器设计中, 通过合理设计控制器实现了对 $x_2(t)$ 的估计误差完全补偿, 从而弥补了观测器(10)的观测精度不理想的缺陷, 并保证了整个闭环控制系统的稳定性。

2.3 映射投影及自适应参数

定义 $\hat{\theta}$ 为未知参数 θ 的估计值, 定义 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 为估计误差, 为了保证估计值始终在已知范围内, 投影映射可以定义为

$$\text{Proj}_{\hat{\theta}}(\zeta) = \begin{cases} 0 & \hat{\theta}_i = \theta_{i\max} & \zeta > 0 \\ 0 & \hat{\theta}_i = \theta_{i\min} & \zeta < 0 \\ \zeta & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, 6$, 记 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$, 参数自适应律如下

$$\dot{\hat{\theta}} = \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma \zeta) \quad \hat{\theta}(0) \in \Omega_{\hat{\theta}} \quad (16)$$

式中, Γ 是一个正定对角自适应律矩阵, 它决定了 $\hat{\theta}$ 的更新。根据式(15), 对于任意自适应函数 ζ , 可以保证式(16)中的自适应律满足

$$\hat{\theta} \in \Omega_{\hat{\theta}} \triangleq \{\hat{\theta} : \theta_{\min} \leq \hat{\theta} \leq \theta_{\max}\} \quad (17)$$

$$\tilde{\theta}^T [\Gamma^{-1} \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma \zeta) - \zeta] \leq 0 \quad \forall \zeta \quad (18)$$

2.4 控制器设计

为了提高基于事件触发的液压系统的跟踪控制性能, 结合从观测器获得的速度估计和干扰估计值, 将设计一种基于反步控制策略的期望补偿自适应控制器。

定义跟踪误差

$$z_1 = x_1 - x_{1d} \quad (19)$$

则跟踪误差对时间的导数

$$\dot{z}_1 = x_2 - \dot{x}_{1d} \quad (20)$$

定义状态误差

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 = k_1 z_1 + \dot{z}_1 \quad (21)$$

$$z_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (22)$$

式中, α_1 和 α_2 为状态变量 x_2 及 x_3 的虚拟控制律, k_1 为正反馈增益。

根据式(4)、式(19)~(22), z_2 对时间的导数如式(23)所示

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = \\ &= \frac{1}{m} x_3 - \frac{\theta_1}{m} x_2 + x_4 - \dot{\alpha}_1 = \\ &= \frac{1}{m} z_3 + \frac{1}{m} \alpha_2 - \frac{\theta_1}{m} (x_2 - \dot{x}_{1d}) - \frac{1}{m} \hat{\theta}_1 \dot{x}_{1d} + \\ &= \frac{1}{m} \tilde{\theta}_1 \dot{x}_{1d} + x_4 + k_1 (z_2 - k_1 z_1) - \ddot{x}_{1d} \end{aligned} \quad (23)$$

虚拟控制律

$$\begin{cases} \alpha_2 = \alpha_{2a} + \alpha_{2s}, \alpha_{2a} = \hat{\theta}_1 \dot{x}_{1d} + (-\hat{x}_4 + \ddot{x}_{1d})m \\ \alpha_{2s} = -k_2(\hat{x}_2 - \alpha_1) \end{cases} \quad (24)$$

式中, α_{2a} 是基于模型的前馈补偿项, 可以用参数自适应和观测器观测的速度量及外干扰来提高跟踪性能; α_{2s} 是线性鲁棒反馈项, 用来稳定液压系统; k_2 是正反馈增益。

将式(24)中的虚拟控制量代入式(23)中, 得

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= \frac{1}{m} z_3 + \frac{1}{m} (-k_2(x_2 - \tilde{x}_2 - \alpha_1)) + \omega_0^2 \varepsilon_3 + \\ &\frac{1}{m} \tilde{\theta}_1 \dot{x}_{1d} + k_1(z_2 - k_1 z_1) - \frac{\theta_1}{m} (x_2 - \dot{x}_{1d}) = \\ &\frac{1}{m} z_3 - \frac{1}{m} k_2 z_2 + k_2 \frac{1}{m} \omega_0 \varepsilon_2 + \frac{1}{m} \tilde{\theta}_1 \dot{x}_{1d} + \\ &\omega_0^2 \varepsilon_3 + \left(k_1 - \frac{\theta_1}{m} \right) (z_2 - k_1 z_1) \end{aligned} \quad (25)$$

结合式(4)和式(22), 可得

$$\begin{aligned} \dot{z}_3 &= \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2 = \\ &(h_1 g_1 + h_2 g_2) \theta_3 u - (h_1 \theta_3 + h_2 \theta_6) \dot{x}_{1d} - \\ &(h_1 \theta_3 + h_2 \theta_6) (x_2 - \dot{x}_{1d}) - \\ &(h_1 + h_2) \theta_4 (p_1 - p_2) + \tilde{q}(t) + \theta_2 - \dot{\alpha}_2 \end{aligned} \quad (26)$$

式中, 令 $\phi_1(x_2) = (h_1 \theta_3 + h_2 \theta_6) x_2$, $\phi_2(\dot{x}_{1d}) = (h_1 \theta_3 + h_2 \theta_6) \dot{x}_{1d}$, $\phi_3(x_2) = \frac{\theta_1}{m} x_2$, $\phi_4(\dot{x}_{1d}) = \frac{\theta_1}{m} \dot{x}_{1d}$, 不确定参数的自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_1 = -r_1 \frac{1}{m} |\dot{x}_{1d}| (|z_2| + \frac{1}{\omega_0} \varepsilon^T \mathbf{PB}) \\ \dot{\hat{\theta}}_2 = r_2 |z_3| \\ \dot{\hat{\theta}}_3 = r_3 |z_3| |h_1 \dot{x}_{1d}| \\ \dot{\hat{\theta}}_4 = r_4 |z_3| (h_1 + h_2) |p_1 - p_2| \\ \dot{\hat{\theta}}_5 = -r_5 \frac{|z_3|}{\hat{\theta}_5} N(\cdot) \\ \dot{\hat{\theta}}_6 = r_6 |z_3| |h_2 \dot{x}_{1d}| \end{cases} \quad (27)$$

式中, $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 为已知正常数, 记 $\Gamma = \text{diag} \left\{ \frac{1}{r_1}, \frac{1}{r_2}, \frac{1}{r_3}, \frac{1}{r_4}, \frac{1}{r_5}, \frac{1}{r_6} \right\}$, 本文控制律设计如式(28)所示

$$\begin{cases} u(t) = -\frac{1}{(1-\mu_1)(h_1 g_1 + h_2 g_2) \hat{\theta}_5} [L(\cdot)] \frac{z_3}{|z_3|} \\ L(\cdot) = |h_1 g_1 + h_2 g_2| \theta_{3\max} \mu_2 + (h_1 + h_2) \hat{\theta}_4 |p_1 - p_2| + \\ \hat{\theta}_3 (h_1 |\dot{x}_{1d}|) + \hat{\theta}_2 h_2 |\dot{x}_{1d}| \hat{\theta}_6 + |\dot{\alpha}_2| + k_3 |z_3| \end{cases} \quad (28)$$

式中, k_3 是正反馈增益。

本文液压控制系统框图如图2所示。



图2 基于事件触发机制的液压控制系统框图

3 闭环控制系统稳定性分析

本节将对所设计的基于反步控制策略的期望补偿自适应控制器进行闭环系统稳定性分析。因为 $\phi_1(x_2)$ 、 $\phi_2(\dot{x}_{1d})$ 、 $\phi_3(x_2)$ 、 $\phi_4(\dot{x}_{1d})$ 都是光滑的函数, 通过运用中值定理^[18]可得

$$|o_1| = |(h_1 \theta_3 + h_2 \theta_6)(x_2 - \dot{x}_{1d})| \leq n_1 |z_1| + n_2 |z_2| \quad (29)$$

$$|o_2| = \left| \frac{\theta_1}{m} (\dot{x}_{1d} - x_2) \right| \leq n_3 |z_1| + n_4 |z_2| \quad (30)$$

式中, n_1, n_2, n_3, n_4 是已知的正常数。

下面定义一些标量便于稳定性分析

$$\begin{cases} K_1 = k_1 - \frac{1}{2} & K_2 = \frac{1}{m} k_2 - \left| k_1 - \frac{\theta_1}{m} \right| & K_3 = k_3 - 1 \\ \varphi_1 = k_1 \left| k_1 - \frac{\theta_1}{m} \right| + 1 & \varphi_2 = n_1 & \varphi_3 = \frac{1}{m} + n_2 \\ \varphi_4 = \frac{n_4}{2\omega_0} & \varphi_5 = \frac{1}{m} k_2 \omega_0 + \frac{n_4}{\omega_0} & \varphi_6 = \omega_0^2 - \frac{n_4}{2\omega_0} \\ \varphi_7 = -\frac{n_3}{2} & \varphi_8 = \frac{n_3}{2} & \varphi_9 = -\frac{n_3}{2} & \varpi = \frac{1}{2} \omega_0 - \frac{1}{2} \end{cases} \quad (31)$$

选择足够大的控制增益 k_1, k_2, k_3 和观测器系数 ω_0 , 使得如下矩阵 \mathbf{H} 是正定的

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} K_1 & -\frac{\varphi_1}{2} & -\frac{\varphi_2}{2} & -\frac{\varphi_7}{2} & -\frac{\varphi_8}{2} & -\frac{\varphi_9}{2} \\ -\frac{\varphi_1}{2} & K_2 & -\frac{\varphi_3}{2} & -\frac{\varphi_4}{2} & -\frac{\varphi_5}{2} & -\frac{\varphi_6}{2} \\ -\frac{\varphi_2}{2} & -\frac{\varphi_3}{2} & K_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\varphi_7}{2} & -\frac{\varphi_4}{2} & 0 & \varpi & 0 & 0 \\ -\frac{\varphi_8}{2} & -\frac{\varphi_5}{2} & 0 & 0 & \varpi & 0 \\ -\frac{\varphi_9}{2} & -\frac{\varphi_6}{2} & 0 & 0 & 0 & \varpi \end{bmatrix} \quad (32)$$

选择 Lyapunov 函数

$$V(t) = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2} \varepsilon^T P \varepsilon + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma \tilde{\theta} \quad (33)$$

则 $V(t)$ 对时间的导数

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2 + z_3 \dot{z}_3 + \frac{1}{2} (\dot{\varepsilon}^T P \varepsilon + \varepsilon^T P \dot{\varepsilon}) + \tilde{\theta}^T \Gamma \dot{\tilde{\theta}} = \\ & z_1 (-k_1 z_1 + z_2) + z_2 \left(\frac{1}{m} z_3 - \frac{1}{m} k_2 z_2 + k_2 \frac{1}{m} \omega_0 \varepsilon_2 + \right. \\ & \left. \left(k_1 - \frac{\theta_1}{m} \right) (z_2 - k_1 z_1) + \frac{1}{m} \tilde{\theta}_1 \dot{x}_{1d} + \omega_0^2 \varepsilon_3 \right) + \frac{1}{2} (-\omega_0 \|\varepsilon\|^2) + \\ & z_3 ((h_1 g_1 + h_2 g_2) \theta_5 u - (h_1 \theta_3 + h_2 \theta_6) \dot{x}_{1d} - \\ & (h_1 \theta_3 + h_2 \theta_6) (x_2 - \dot{x}_{1d}) - (h_1 + h_2) \theta_4 (p_1 - p_2) + \\ & \frac{\tilde{\theta}_1}{m} \dot{x}_{1d} + \frac{\theta_1}{m} (\dot{x}_{1d} - x_2)) \\ & \tilde{q}(t) + \theta_2 - \dot{\alpha}_2) + \frac{1}{\omega_0} \varepsilon^T P B + \\ & \frac{h(t)}{\omega_0^2} \varepsilon^T P C + z_3 (h_1 g_1 + h_2 g_2) \theta_5 u(t_k) + \tilde{\theta}^T \Gamma \dot{\tilde{\theta}} \quad (34) \end{aligned}$$

考虑到事件触发条件(式(8)), 则 $\dot{V}(t)$ 可重新被写为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & -k_1 z_1^2 - \frac{1}{m} k_2 z_2^2 + \frac{1}{m} |z_2| |z_3| + \frac{1}{m} k_2 |z_2| \omega_0 |\varepsilon_2| + \\ & \left| k_1 - \frac{\theta_1}{m} \right| z_2^2 - k_1 |z_1 z_2| \left| k_1 - \frac{\theta_1}{m} \right| + \omega_0^2 |\varepsilon_3| |z_2| + |z_1| |z_2| - \\ & |(h_1 \theta_3 + h_2 \theta_6) (x_2 - \dot{x}_{1d})| |z_3| + |\tilde{q}(t)| |z_3| - \frac{1}{2} \omega_0 \|\varepsilon\|^2 + \\ & \left| \frac{\theta_1}{m} (\dot{x}_{1d} - x_2) \right| \frac{1}{\omega_0} \varepsilon^T P B + \frac{h(t)}{\omega_0^2} \varepsilon^T P C + \frac{1}{m} \tilde{\theta}_1 |\dot{x}_{1d}| |z_2| + \\ & h_1 \theta_3 |\dot{x}_{1d}| |z_3| + h_2 \theta_6 |\dot{x}_{1d}| |z_3| + \theta_2 |z_3| + |\dot{\alpha}_2| |z_3| + \\ & \frac{\tilde{\theta}_1}{m} |\dot{x}_{1d}| \frac{1}{\omega_0} \varepsilon^T P B + (h_1 + h_2) \theta_4 |p_1 - p_2| |z_3| + \\ & z_3 (h_1 g_1 + h_2 g_2) \theta_5 (\mu_1 |u(t)| + \mu_2) + \\ & z_3 (h_1 g_1 + h_2 g_2) \theta_5 u(t) + \tilde{\theta}^T \Gamma \dot{\tilde{\theta}} \quad (35) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & z_3 (h_1 g_1 + h_2 g_2) \theta_5 (\mu_1 |u(t)| + \mu_2) \leq \\ & \left| z_3 (h_1 g_1 + h_2 g_2) \frac{\mu_1 \theta_5}{(1 - \mu_1) (h_1 g_1 + h_2 g_2) \hat{\theta}_5} L(\cdot) \frac{z_3}{|z_3|} \right| + \\ & |z_3 (h_1 g_1 + h_2 g_2) \theta_{5 \max} \mu_2| \quad (36) \end{aligned}$$

考虑不等式(29), (30), 得

$$\begin{cases} |(h_1 \theta_3 + h_2 \theta_6) (x_2 - \dot{x}_{1d})| |z_3| \leq (n_1 |z_1| + n_2 |z_2|) |z_3| \\ \left| \frac{\theta_1}{m} (\dot{x}_{1d} - x_2) \right| \frac{1}{\omega_0} \varepsilon^T P B \leq -\frac{n_3}{2} |\varepsilon_1| |z_1| - \frac{n_4}{2} |\varepsilon_1| |z_2| + \\ n_3 |\varepsilon_2| |z_1| + n_4 |\varepsilon_2| |z_2| - \frac{n_3}{2} |\varepsilon_3| |z_1| - \frac{n_4}{2} |\varepsilon_3| |z_2| \end{cases} \quad (37)$$

考虑不等式(6)应用杨氏不等式得

$$\begin{aligned} \frac{h(t)}{\omega_0^2} \varepsilon^T P C & \leq \frac{|h(t)|_{\max}}{\omega_0^2} \|\varepsilon\| \|PC\| \leq \\ \frac{1}{2} \|\varepsilon\|^2 & + \frac{|h(t)|_{\max}^2}{2\omega_0^4} \|PC\|^2 \quad (38) \end{aligned}$$

$$|\tilde{q}(t)| |z_3| \leq \tau_2 |z_3| \leq \frac{1}{2} \tau_2^2 + \frac{1}{2} |z_3|^2$$

将自适应律(27)、式(36)~(38)、式(31)和式(32)中的定义代入式(35)得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & -\eta^T H \eta - \frac{3}{2} z_3^2 + \frac{1}{2} \tau_2^2 + \frac{|h(t)|_{\max}^2}{2\omega_0^4} \|PC\|^2 \leq \\ & -\chi_{\min}(H) (\|z\|^2 + \|\varepsilon\|^2) + U \leq -\chi V(t) + U \quad (39) \end{aligned}$$

式中, χ_{\min} 为矩阵 H 的特征值的最小值,

$$\chi = 2\chi_{\min}(H), \quad \eta = [z_1, |z_2|, |z_3|, |\varepsilon_1|, |\varepsilon_2|, |\varepsilon_3|]^T, \quad z = [z_1, z_2, z_3]^T.$$

通过运用非线性系统中用于判断系统稳定性与有界性的比较定理^[18], 可以从式(39)中获得

$$V(t) \leq V(0) \exp(-\chi t) + \frac{U}{\chi} (1 - \exp(-\chi t)) \quad (40)$$

由式(40)可分析出, 在所设计的反步控制器的作用下, 液压系统的闭环控制系统的状态轨线将收敛到包含平衡点或者原点的一个小邻域内, 并且具有指数收敛的瞬态性能。以上分析可以保证系统的稳定性。

4 试验验证

4.1 试验设备介绍

为了验证所设计控制器的控制效果, 建立了如图 2 所示的控制系统试验平台。它包含了一个试验载物台、一对行程为 250 mm 的导轨、一个液压非对称缸和一个液压伺服阀(伺服阀为 FF-106A, 其额定流量为 63 L/min)、两个压力传感器(其精度为 0.1 MPa)、一个惯性负载(20 kg)、一个泵站(最大压力为 4.5 MPa, 此次试验工作压力为 4 MPa)、一个位移传感器和一套控制系统。这个控制系统由工业计算机, 显示监测器及信号处理模块组成, 板卡为 PCI-1716, 采样时间为 1 ms。这个采样率用于控制器的闭环控制和数据采集。

该平台的系统参数如下: $V_{01} = 1.57 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $V_{02} = 8.011 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $A_1 = 1.256 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $A_2 = 0.64 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $p_s = 4 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。

4.2 试验结果比较

将 5 种算法的控制性能进行对比, 分别为: 具有事件触发机制的 PID 算法(ETPID), PID 算法(PID), 具有扩展状态观测器的自适应反步控制算法

(ESOC); 具有事件触发机制和扩展状态观测器的自适应鲁棒控制算法(ESOE), 具有扩展状态观测器的自适应鲁棒控制算法(ESOA)。

下列控制器参数的具体值确定时是通过具体试验测试得出最佳的控制效果时确定, 自适应参数的初值和边界值根据所需自适应参数的标称值加上试验测试时的效果确定。

(1) ETPID: 控制器参数为 $k_p=165$, $k_i=25$, $k_d=1$, $\mu_1=0.1$, $\mu_2=0.01$, 此算法是在 PID 控制器后面加了一个事件触发器。 μ_1 与 μ_2 为事件触发器参数。

(2) PID: 控制器参数 k_p 、 k_i 、 k_d 与 ETPID 三个参数数值相同。

(3) ESOC: 这是一个自适应反步控制策略。在设计过程中加入了扩展状态观测器以观测负载速度和外干扰。与本文控制策略的区别在于此控制策略未加入事件触发机制, 同时所设计的扩展状态观测器中的速度量没有用期望信号代替。基于式(4), 重新设计扩展状态观测器如式(41), 控制器如式(43)所示

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + 3\omega_0(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \frac{1}{m}x_3 - \frac{\hat{\theta}_1}{m}\hat{x}_2 + \hat{x}_4 + 3\omega_0^2(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_4 = \omega_0^3(x_1 - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (41)$$

$$\begin{cases} \alpha_2 = \alpha_{2a} + \alpha_{2s}, \alpha_{2a} = \hat{\theta}_1 \hat{x}_2 + (-\hat{x}_4 + \ddot{x}_{1d})m \\ \alpha_{2s} = -k_2(\hat{x}_2 - \alpha_1) \end{cases} \quad (42)$$

$$u(t) = -\frac{1}{(h_1 g_1 + h_2 g_2)\hat{\theta}_5} [E(\cdot)] \frac{z_3}{|z_3|} \quad (43)$$

$$E(\cdot) = k_3 |z_3| + |\dot{\alpha}_2| + \hat{\theta}_3 h_1 |\hat{x}_2| + \hat{\theta}_2 + h_2 |\hat{x}_2| \hat{\theta}_6 + (h_1 + h_2) \hat{\theta}_4 |p_1 - p_2| \quad (44)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_1 = -r_1 \frac{1}{m} |\hat{x}_2| (|z_2| + \frac{1}{\omega_0} \epsilon^T P B) \\ \dot{\hat{\theta}}_2 = r_2 |z_3| \\ \dot{\hat{\theta}}_3 = r_3 |z_3| h_1 |\hat{x}_2| \\ \dot{\hat{\theta}}_4 = r_4 |z_3| (h_1 + h_2) |p_1 - p_2| \\ \dot{\hat{\theta}}_5 = -r_5 \frac{|z_3|}{(h_1 g_1 + h_2 g_2)\hat{\theta}_5} E(\cdot) \\ \dot{\hat{\theta}}_6 = r_6 |z_3| h_2 |\hat{x}_2| \end{cases} \quad (45)$$

自适应估计值的初始值和上下界设为

$$\begin{cases} \hat{\theta}(0) = [4\,000, 100, 1 \times 10^5, 5 \times 10^{-5}, 960, 1 \times 10^5]^T \\ \hat{\theta}_{\max} = [4\,000, 1\,000, 3 \times 10^5, 7 \times 10^{-4}, 960, 2 \times 10^5]^T \\ \hat{\theta}_{\min} = [3\,200, 100, 1 \times 10^5, 5 \times 10^{-4}, 280, 1 \times 10^5]^T \end{cases} \quad (46)$$

此外, ESOC 中的控制器参数为 $k_1=2\,400$, $k_2=600$, $k_3=380$ 。

(4) ESOEA: 这是本文详细撰写的控制策略, 控制器参数选择如下: $k_1=2\,600$, $k_2=650$, $k_3=440$, $\omega_0=400$ 。自适应参数的初值、边界及收敛速率为: $\hat{\theta}(0)=[4\,000, 50, 1 \times 10^5, 1 \times 10^{-5}, 1\,000, 1.01 \times 10^5]^T$, $\hat{\theta}_{\max}=[4\,000, 1\,000, 3 \times 10^5, 7 \times 10^{-4}, 1\,000, 2 \times 10^5]^T$, $\hat{\theta}_{\min}=[3\,200, 50, 1 \times 10^5, 5 \times 10^{-4}, 180, 1 \times 10^5]^T$, 参数自适应速率为: $\Gamma = \text{diag}\{5 \times 10^5, 0.027\,5, 30, 1 \times 10^{-14}, 9 \times 10^{-6}, 15\}$, 事件触发器参数为 $\mu_1=0.1$, $\mu_2=0.01$ 。

(5) ESOA: 此算法是 ESOEA 算法去除事件触发机制, 控制器的其他参数与上面 ESOEA 相同。

为了定量评价 5 种控制算法的控制器性能, 按照文献[21]中定义的相应指标来进行对比, 分别为跟踪误差绝对值的最大值 M_z 、平均值 μ_z 以及标准差 σ_z , 此外还定义了事件触发率 t_z 以量化事件触发器的效果, 上述指标具体表达式为

$$M_z = \max\{|z_1(i)|\} \quad (47)$$

$$\mu_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_1(i)| \quad (48)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [|z_1(i)| - \mu_z]^2} \quad (49)$$

$$t_z = \frac{T_e}{T_s} \quad (50)$$

式中, $z_1(i)$ 为跟踪误差, T_e 为经过事件触发器筛选后的控制信号量, T_s 为未经过事件触发器的控制信号总量。

本次试验分为两种工况, 第一种工况选择了理想跟踪信号为 $x_{1d} = 40 \sin(\pi t)$ mm。试验结果见图 3~8, 最后两个周期的性能指标见表 1。

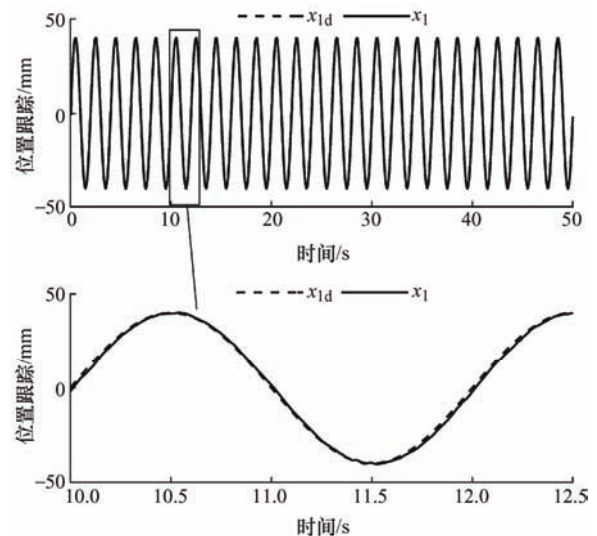


图3 0.5 Hz 工况下的位置跟踪图

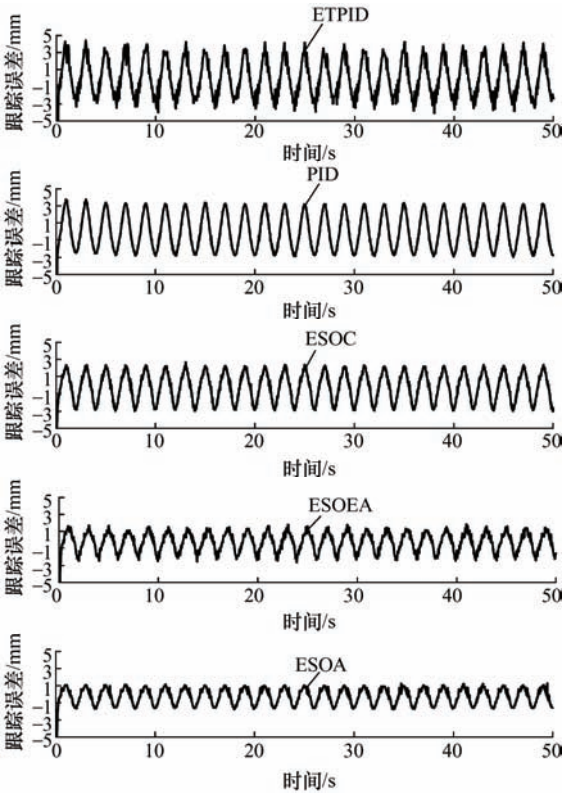


图 4 0.5 Hz 工况下五种控制算法的跟踪误差对比图

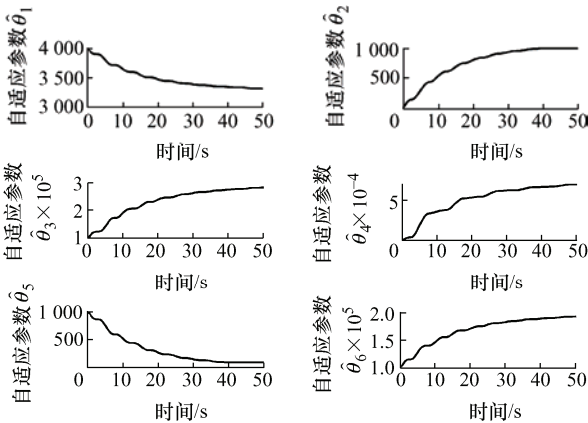


图 5 本文算法的自适应参数图

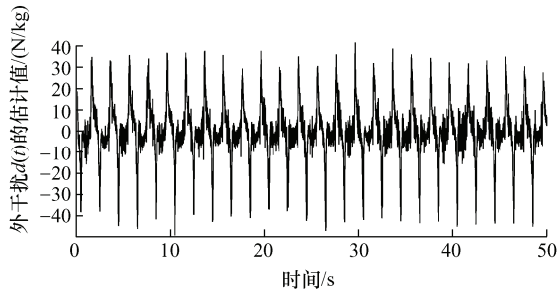


图 6 0.5 Hz 工况下外干扰 $d(t)$ 的估计图

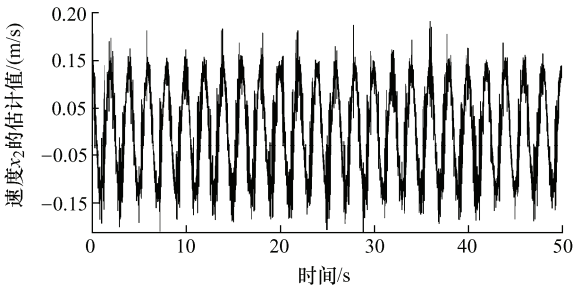


图 7 0.5 Hz 工况下液压杆速度的估计图

表 1 0.5 Hz 工况下最后两个周期的五种算法的指标对比

算法	指标			
	M_z/mm	μ_z/mm	σ_z/mm	$t_z(\%)$
ETPID	4.495 0	1.832 2	1.017 4	3.8
PID	3.954 0	1.820 6	0.916 3	—
ESOC	3.072 4	1.419 4	0.811 0	—
ESOEA	2.686 7	0.954 2	0.602 8	6.18
ESOA	1.852 5	0.771 1	0.465 7	—

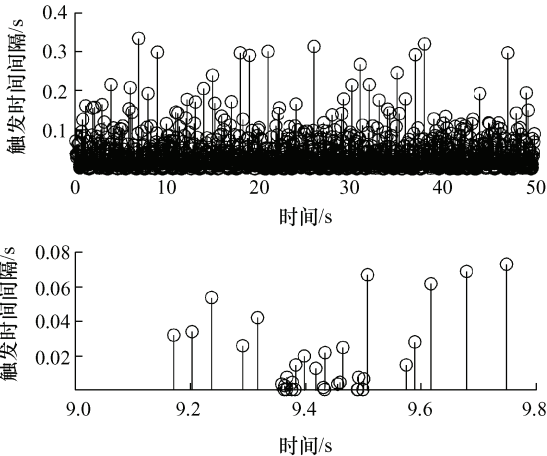


图 8 0.5 Hz 工况下事件触发器的触发瞬间和触发时间间隔

如图 3 所示，在 0.5 Hz 工况下，ESOEA 控制算法对应的位移信号可以很好地跟踪理想轨迹。图 4 表现了五种控制器的跟踪误差，可以得知 ESOEA 的跟踪误差相比 PID、ETPID 及 ESOC 算法表现出了更好的控制效果，同时，具有事件触发机制算法的误差相比没有事件触发机制算法的误差略大，这说明 ESOEA 在消除了大量的冗余信号的同时仍然保证了很好的跟踪效果。自适应参数的估计值如图 5 所示，可以得知，所有的自适应参数随着时间推移慢慢收敛，这体现了自适应算法的有效性。图 6 体现的是系统外部干扰的估计值，这体现了扩展状态观测器对外干扰观测的有效性，且外部扰动的估

计值随着时间推移保持在一定的水平, 并且有界, 这有助于提高控制器的控制性能。图 7 为液压杆速度的估计值, 其估计值大小和期望轨迹位移的导数值相差不大, 这体现了扩展状态观测器对速度观测的有效性。图 8 表示的是事件触发器的触发瞬间和触发时间间隔。根据表 1, ESOEA 的事件触发率大约为 6.18%, ETPID 的事件触发率为 3.8%, 可以得知 50% 以上的数据被事件触发器剔除。由此可以得出, ESOEA 在有效消除冗余数据的同时, 保持了闭环控制系统的稳定性及较好的控制效果。

为了进一步验证所提出控制策略的控制性能, 第二种工况选择一个慢动作轨迹, 即 $x_{1d} = 40 \sin(0.2\pi t)$ mm, 试验结果如图 9~13 所示。在 0.1 Hz 工况下, 最后两个周期的性能指标见表 2。图 9 为 ESOEA 的位置跟踪图, 可以看出 ESOEA 表现出了很好的跟踪效果。五种控制算法对应的跟踪误差如图 10 所示, 与 0.5 Hz 的工况类似, 相比 PID、ETPID、ESOC 算法, ESOEA 表现出较好的跟踪性能。图 11 体现的是慢动作轨迹下系统外部干扰的估计值, 图 12 为液压杆速度的估计值, 这也进一步体现了扩展状态观测器对外干扰和速度观测的有效性。图 13 表示事件触发器的触发瞬间和触发时间间隔。根据表 2, ESOEA 的事件触发率大约为 13.9%, ETPID 的事件触发率为 3.6%, 可以得知 50% 以上的数据被事件触发器剔除。由此可以得出, 在 0.1 Hz 慢动作工况下, ESOEA 不仅可以保持较好的跟踪性能, 同时依旧可以保证事件触发机制消除冗余数据的有效性。

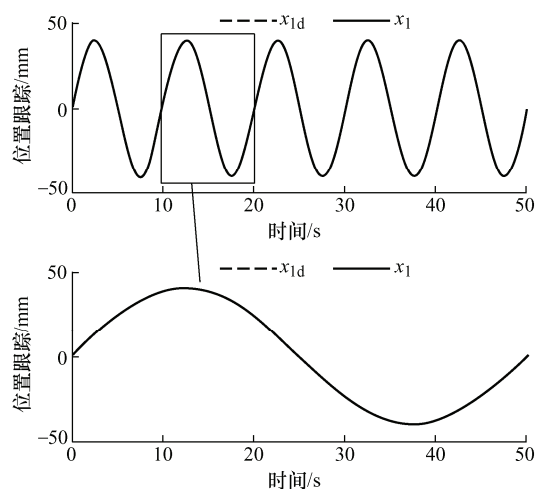


图 9 0.1 Hz 工况下的位置跟踪图

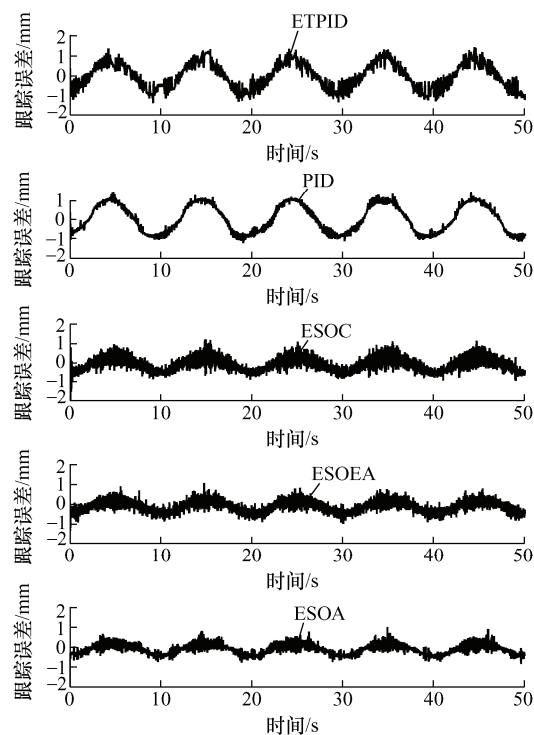


图 10 0.1 Hz 工况下五种控制算法的跟踪误差对比图

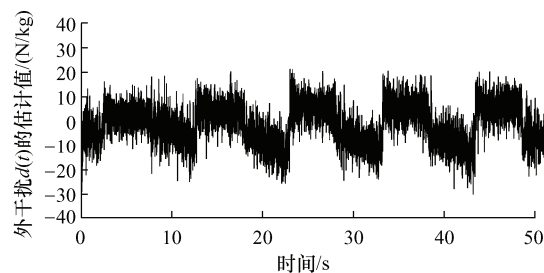


图 11 0.1 Hz 工况下外干扰 $d(t)$ 的估计图

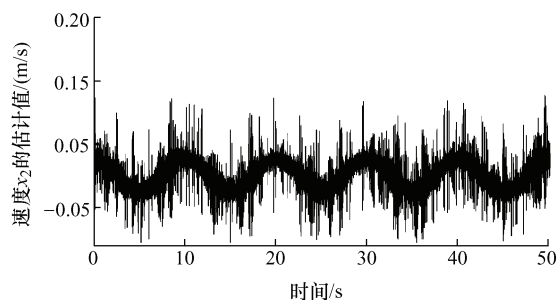


图 12 0.1 Hz 工况下液压杆速度的估计图

表 2 0.1 Hz 工况下最后两个周期的五种算法的指标对比

算法	指标			
	M_z /mm	μ_z /mm	σ_z /mm	t_z (%)
ETPID	1.447 6	0.560 4	0.307 2	3.6
PID	1.320 3	0.523 1	0.286 7	—
ESOC	1.204 3	0.294 3	0.198 8	—
ESOEA	1.262 5	0.227 4	0.170 7	13.9
ESOA	1.034 9	0.207 6	0.149 1	—

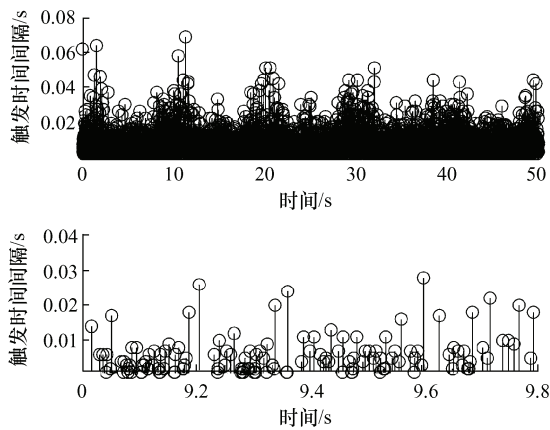


图 13 0.1 Hz 工况下事件触发器的触发瞬间和触发时间间隔

5 结论

本文研究了一类基于网络的液压控制系统的高精度位置跟踪控制问题, 提出了一种基于事件触发和扩展状态观测器的自适应鲁棒控制策略, 通过试验分析, 可得出如下结论。

(1) 控制器中加入的事件触发机制剔除了大量的冗余数据, 有效释放了通信带宽。

(2) 针对无速度测量和具有不确定外干扰的液压控制系统设计了一种扩展状态观测器, 有效估计了速度和外干扰, 结合期望补偿算法, 有效提高了控制器的跟踪控制性能。

(3) 针对具有不确定参数的液压控制系统设计了自适应算法, 实现了对系统不确定参数的估计。

(4) 采用 Lyapunov 稳定性分析法分析了控制系统的稳定性, 结果表明, 所提出控制策略在具有时变建模不确定性的情况下保证了系统的稳定性。

(5) 试验结果表明, 本文所提出的控制策略在保证了对液压控制系统高精度位置跟踪控制的同时, 使带宽的利用率显著提高。

参 考 文 献

- [1] 赵斌, 郭伟伟, 葛磊, 等. 新型流量自平衡泵控非对称液压缸运行特性试验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 257-264.
- ZHAO Bin, GUO Weiwei, GE Lei, et al. Experiment study on operation characteristics of new flow self-balancing pump controlled asymmetric hydraulic cylinder[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 257-264.
- [2] PARK J, LEE B, KANG S, et al. Online learning control

of hydraulic excavators based on echo-state networks[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 14(1): 249-259.

- [3] XING L, WEN C, LIU Z, et al. Event-triggered adaptive control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 62(4): 2071-2076.
- [4] 王本斐, 彭卫文, 张荣辉, 等. 电动汽车混合储能系统的事件触发无差拍控制[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 77-86.
- WANG Benfei, PENG Weiwen, ZHANG Ronghui, et al. Event-triggered deadbeat control for the hybrid energy storage system in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 77-86.
- [5] HEEMELS W P M H, DONKERS M C F, TEEL A R. Periodic event-triggered control for linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 58(4): 847-861.
- [6] LIU Z, WANG J, CHEN C L P, et al. Event trigger fuzzy adaptive compensation control of uncertain stochastic nonlinear systems with actuator failures[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(6): 3770-3781.
- [7] WANG D, WANG Z, WANG Z, et al. Design of hybrid event-triggered containment controllers for homogeneous and heterogeneous multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 51(10): 4885-4896.
- [8] GARCIA E, ANTSAKLIS P J. Model-based event-triggered control for systems with quantization and time-varying network delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 58(2): 422-434.
- [9] SHEN W, LIU S, LIU M. Adaptive sliding mode control of hydraulic systems with the event trigger and finite-time disturbance observer[J]. Information Sciences, 2021, 569: 55-69.
- [10] WEN S, GUO G, CHEN B, et al. Event-triggered cooperative control of vehicle platoons in vehicular ad hoc networks[J]. Information Sciences, 2018, 459: 341-353.
- [11] MINTSA H A, VENUGOPAL R, KENNE J P, et al. Feedback linearization-based position control of an electrohydraulic servo system with supply pressure uncertainty[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 20(4): 1092-1099.
- [12] MAEDA G J, MANCHESTER I R, RYE D C. Combined ILC and disturbance observer for the rejection of near-repetitive disturbances, with application to excavation[J]. IEEE Transactions on Control Systems

- Technology, 2015, 23(5): 1754-1769.
- [13] 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(15): 217-225.
- [14] SUN X, WANG Y, CAI Y, et al. An adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control for yaw stability control of bus based on STI tire model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 1-14.
- [15] KATO T, XU Y, TANAKA T, et al. Force control for ultraprecision hybrid electric-pneumatic vertical-positioning device[J]. International Journal of Hydromechatronics, 2021, 4(2): 185-201.
- [16] WON D, KIM W, SHIN D, et al. High-gain disturbance observer-based backstepping control with output tracking error constraint for electro-hydraulic systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 23(2): 787-795.
- [17] YAO J, DENG W. Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8023-8032.
- [18] DENG W, YAO J. Extended-state-observer-based adaptive control of electrohydraulic servomechanisms without velocity measurement[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 25(3): 1151-1161.
- [19] TALOLE S E, KOLHE J P, PHADKE S B. Extended-state-observer-based control of flexible-joint system with experimental validation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 57(4): 1411-1419.
- [20] ZOU W, SHI P, XIANG Z, et al. Consensus tracking control of switched stochastic nonlinear multiagent systems via event-triggered strategy[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 31(3): 1036-1045.
- [21] DENG W, YAO J, MA D. Robust adaptive precision motion control of hydraulic actuators with valve dead-zone compensation[J]. ISA Transactions, 2017, 70: 269-278.
-
- 作者简介: 沈伟(通信作者), 男, 1984 年出生, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电液伺服控制, 基于 CPR 的液压节能, 液压变压器元件开发, 液压泵控系统的节能与控制。
E-mail: shenwei@usst.edu.cn
- 袁小康, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为电液伺服控制。
E-mail: 193711548@st.usst.edu.cn
- 刘明, 男, 1981 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为网络化安全控制(事件触发、网络信息安全、信息物理系统 CPS)、故障诊断和容错控制, 大规模智能星群的设计与优化。
E-mail: mingliu23@hit.edu.cn