文章编号：2096-1472(2022)-05-39-05　　DOI:10.19644/j.cnki.issn2096-1472.2022.005.010

基于指令滤波和期望补偿的液压位置跟踪系统控制研究

袁小康

(上海理工大学机械工程学院，上海 200093)
✉193711548@st.usst.edu.cn

摘　要：针对液压控制系统中存在的强非线性、参数不确定性和高频干扰等问题，提出一种基于指令滤波和期望补偿的鲁棒控制算法。该控制算法结合扩展状态观测器(ESO)，实现了对速度及外干扰的估计；所设计的自适应控制算法可以在线估计系统的不确定参数；利用期望补偿方法，将实际速度信号替换为相应的期望值，以减少对控制效果的影响。此外，利用指令滤波技术避免了反步控制法里的微分膨胀问题，基于Lyapunov函数证明了所设计控制器的稳定性，且所有信号均有界。仿真结果表明，系统期望跟踪指令幅值为40 mm时，在1 Hz和0.5 Hz工况下，平均跟踪误差分别约为0.088 mm和0.0481 mm，可见跟踪误差收敛到了极小值，系统跟踪精度得到了提高。

关键词：液压控制系统；指令滤波；期望补偿；扩展状态观测器；位置跟踪控制
中图分类号：TP273　　**文献标识码**：A

Research on Control of Hydraulic Position Tracking System based on Command Filtering and Expectation Compensation

YUAN Xiaokang

(*School of Mechanical Engineering*, *University of Shanghai for Science and Technology*, *Shanghai* 200093, *China*)
✉193711548@st.usst.edu.cn

Abstract: Aiming at the problems of strong nonlinearity, parameter uncertainty and high-frequency interference in hydraulic control systems, this paper proposes a robust control algorithm based on command filtering and expectation compensation. The control algorithm combines Extended State Observer (ESO) to realize the estimation of speed and external disturbance. The designed adaptive control algorithm can estimate the uncertain parameters of the system online. With the expectation compensation method, the actual speed signal is replaced by the corresponding expected value to reduce the impact on the control effect. In addition, command filtering technique is used to avoid the differential expansion problem in the backstepping control method. The stability of the designed controller is proved based on Lyapunov function and all signals are bounded. The simulation results show that when the expected tracking command amplitude of the system is 40 mm, the average tracking error is about 0.088 mm and 0.0481 mm under the conditions of 1 Hz and 0.5 Hz, respectively. It can be seen that the tracking error has converged to a minimum value, and the system tracking accuracy has been improved.

Keywords: hydraulic control system; command filtering; expectation compensation; extended state observer; position tracking control

1　引言(Introduction)

液压控制系统具有功率密度大、动态响应快和控制精度高等优点，在工业自动化领域具有广泛的应用[1-5]。然而，液压伺服系统本身具有强非线性、外干扰及无法建模的动态误差等缺点，极大地增加了控制器的设计难度。

近年来，为了提高非线性系统的控制效果，国内外学者将一些先进的控制算法运用到非线性系统中。文献[6]提出了一种自适应反步算法，有效地减小了伺服阀盲区的影响，

提高了跟踪性能。文献[7]利用扩展状态观测器对速度信号和不匹配扰动进行观测，实现了优异的跟踪性能。文献[8]将干扰观测器和滑模面相结合，有效地降低了噪音对跟踪性能的影响。YUCELEN等提出了一种基于低频学习算法的控制策略，可以过滤掉控制响应中的高频振荡，保持系统动态误差的渐近稳定性[9−10]。而实际应用中，由于液压伺服系统安装速度传感器难度较大，而通过全状态观测器得到的信号也难免受到噪音等外部干扰的影响，这也增加了提高控制精度的难度。

基于以上分析，本文提出了一种基于指令滤波和期望补偿的自适应鲁棒控制策略，通过在传统反步法基础上加入指令滤波器来避免微分爆炸的情况。在液压系统模型上设计扩展状态观测器对速度及外干扰进行估计，同时将速度信号用其期望值来代替以减小外部干扰的影响，并使用自适应算法对液压系统不确定参数进行估计。最后通过MATLAB/Simulink搭建数学模型，仿真对比结果证明了所设计控制器的有效性。

2　液压阀控非对称缸模型(Hydraulic valve controlled asymmetric cylinder model)

本文所研究的液压控制系统的工作原理如图1所示。

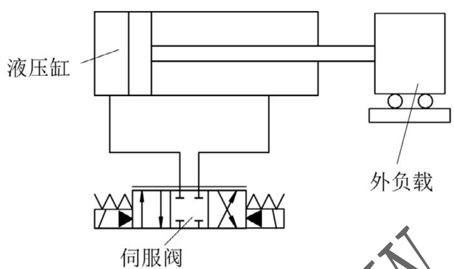


图1 液压阀控非对称缸系统图

Fig.1 System diagram of hydraulic valve controlled asymmetric cylinder

定义状态变量为 $x=\begin{bmatrix}x_1 & x_2 & x_3\end{bmatrix}^T=\begin{bmatrix}y & \dot{y} & A_1p_1-A_2p_2\end{bmatrix}^T$，则整个系统的状态空间方程如下：

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2\\ \dot{x}_2=\dfrac{1}{m}x_3-\dfrac{\theta_1}{m}x_2+\mathrm{d}(t)\\ \dot{x}_3=-(h_1\theta_3+h_2\theta_6)x_2-(h_1+h_2)\theta_4(p_1-p_2)+\\ \quad (h_1g_1+h_2g_2)\theta_5u+\tilde{q}(t)+\theta_2\end{cases}\tag{1}$$

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，$q(t)=\dfrac{\beta_e}{m}\left[\dfrac{A_1f_1(t)}{V_1}+\dfrac{A_2f_2(t)}{V_2}\right]$ 是建模误差，$\theta_3=\beta_eA_1$，$\theta_4=\beta_eC_k$，$\theta_5=\beta_ek_c$，$\theta_6=\beta_eA_2$，$h_1=\dfrac{A_1}{V_{01}+A_1x_1}$，$h_2=\dfrac{A_2}{V_{02}-A_2x_1}$，$g_1=s(u)\sqrt{(p_s-p_1)}+s(-u)\sqrt{p_1}$，$g_2=s(u)\sqrt{p_2}+s(-u)\sqrt{(p_s-p_2)}$，$m$ 为液压缸活塞及外负载的质量和，$\mathrm{d}(t)$ 为力加载过程中的非线性摩擦及外部扰动等。A_1、p_1 和 A_2、p_2 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的有效面积和压力，b 为粘性摩擦系数；β_e 为液压油的体积弹性模量，$V_1=V_{01}+A_1y$ 和 $V_2=V_{02}-A_2y$ 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，q_1 和 q_2 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的流量，$s(\psi)=\begin{cases}1,\psi\geqslant 0\\0,\psi<0\end{cases}$；$k_c=C_g\omega x_v\sqrt{2/\rho}$ 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。

定义自适应参数矩阵为 $\theta=\begin{bmatrix}\theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 & \theta_5 & \theta_6\end{bmatrix}^T$。为了更严谨地考虑，在设计控制器前，做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：外干扰 $\mathrm{d}(t)$ 及建模误差的匹配干扰 $\tilde{q}(t)$ 有界[11]，且 $\tilde{\theta}_1$ 是有界的，即

$$\dot{\tilde{\theta}}_1\leqslant\sigma_1,\quad |\mathrm{d}(t)|\leqslant\sigma_2,\quad |\tilde{q}(t)|\leqslant\sigma_3,\quad |\dot{\mathrm{d}}(t)|\leqslant\sigma_4\tag{2}$$

式中，σ_1、σ_2、σ_3、σ_4 都是正常数。

3　具有状态观测器和指令滤波器的自适应控制器的设计(Design of adaptive controller with state observer and command filter)

3.1　扩展状态观测器的设计

首先，定义外部扰动 $x_4=\mathrm{d}(t)$，令 $h(t)=\dot{x}_4$，根据式(1)，观测器设计如下：

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

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。观测器的估计误差如下：

$$\begin{cases}\dot{\tilde{x}}_1=\tilde{x}_2-3\omega_0\tilde{x}_1\\ \dot{\tilde{x}}_2=\tilde{x}_4+\dfrac{\tilde{\theta}_1}{m}\dot{x}_{1d}+\dfrac{\theta_1}{m}(\dot{x}_{1d}-x_2)-3\omega_0^2\tilde{x}_1\\ \dot{\tilde{x}}_4=h(t)-\omega_0^3\tilde{x}_1\end{cases}\tag{4}$$

定义估计误差向量 $\varepsilon=[\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varepsilon_3]^T=[\tilde{x}_1,\dfrac{\tilde{x}_2}{\omega_0},\dfrac{\tilde{x}_4}{\omega_0^2}]^T$，则估计误差动态被重新书写为：

$$\dot{\varepsilon}=\omega_0A\varepsilon+B\frac{\frac{\tilde{\theta}_1}{m}\dot{x}_{1d}+\frac{\theta_1}{m}(\dot{x}_{1d}-x_2)}{\omega_0}+C\frac{h(t)}{\omega_0^2}\tag{5}$$

式中，A、B和C为对应矩阵。由于A是赫尔维兹矩阵，则必有一个正定矩阵P满足：

$$A^T P + PA = -I \tag{6}$$

式中，I是一个单位矩阵，则矩阵P的解为：

$$P = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1 & -1/2 & 4 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式(5)、式(6)及式(7)用于本文第4部分系统闭环的稳定性证明。

3.2 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，投影映射定义为：

$$\operatorname{Proj}_{\hat{\theta}_i}(\varsigma) = \begin{cases} 0, \text{if } \hat{\theta}_i = \theta_{i\max} \text{ and } \varsigma > 0 \\ 0, \text{if } \hat{\theta}_i = \theta_{i\min} \text{ and } \varsigma < 0 \\ \varsigma, \text{else} \end{cases} \tag{8}$$

式中，$i = 1, 2, \cdots, 6$，记$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$，参数自适应率如下：

$$\dot{\hat{\theta}} = \operatorname{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\varsigma), \quad \hat{\theta}(0) \in \Omega_{\hat{\theta}} \tag{9}$$

式中，$\Gamma > 0$且Γ是一个自适应对角矩阵，它决定了$\hat{\theta}$的更新。根据式(8)，对于任意自适应函数ς，可以保证式(9)中的自适应率满足如下条件：

$$\hat{\theta} \in \Omega_{\hat{\theta}} \triangleq \left\{ \hat{\theta} : \hat{\theta} \in (\theta_{\min}, \theta_{\max}) \right\} \tag{10}$$

$$\tilde{\theta}^T [N^{-1} \operatorname{Proj}_{\hat{\theta}}(N\varsigma, \hat{\theta}) - \varsigma] \leqslant 0, \forall \varsigma \tag{11}$$

3.3 指令滤波器反步控制器的设计

定义误差变量如下：

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - x_{1d} \\ e_2 = x_2 - \gamma_1 \\ e_3 = x_3 - \gamma_2 \end{cases} \tag{12}$$

式中，γ_1和γ_2为指令滤波器的输出虚拟控制量，e_1为跟踪误差，e_2和e_3为状态误差。

为了在反步计算中避免微分爆炸的问题，将标准虚拟控制量α_1和α_2通过指令滤波器输出γ_1、γ_2及其导数。指令滤波器的状态空间表达式如下：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{ni}^2 & -2\varsigma_i \omega_{ni} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ni}^2 \end{bmatrix} \alpha_i \\ \psi_1 = \gamma_i \\ \psi_2 = \dot{\gamma}_i \end{cases} \tag{13}$$

通过式(13)可知，$\dot{\gamma}_i$可以直接获得，避免了反步法中的膨胀问题。此外，当α_i有界时，γ_i和$\dot{\gamma}_i$连续且有界，且取足够大的ω_{ni}即可保证$|\gamma_i - \alpha_i|$收敛于无穷小。

定义补偿跟踪误差：

$$\begin{cases} z_1 = e_1 - \xi_1 \\ z_2 = e_2 - \xi_2 \\ z_3 = e_3 - \xi_3 \end{cases} \tag{14}$$

根据指令滤波器的设计步骤，定义$\dot{\xi}_1 = -k_1\xi_1 + \gamma_1 - \alpha_1$，$\dot{\xi}_2 = -k_2\xi_2 + \frac{1}{m}\gamma_1 - \alpha_2$；$k_1$、$k_2$为控制器反馈增益，$k_1 > 0$，$k_2 > 0$。记矩阵$z = [z_1, z_2, z_3]^T$，则构造标准虚拟控制量$\alpha_1 = -k_1 e_1 + \dot{x}_{1d} - \xi_2$，$\alpha_2 = -k_2(\hat{x}_2 - \gamma_1) + \dot{\gamma}_1 - \hat{x}_4 + \frac{\hat{\theta}_1}{m}\dot{x}_{1d} - z_1 - \frac{1}{m}\xi_3$。

定义$\dot{\xi}_3 = -k_3\xi_3$，k_3为控制器反馈$\mathrm{d}(t, y, \ddot{y})$增益，$k_3 > 0$，则

$$\begin{aligned} \dot{z}_3 &= \dot{e}_3 - \dot{\xi}_3 = \dot{x}_3 - \dot{\gamma}_2 - \dot{\xi}_3 \\ &= (h_1 g_1 + h_2 g_2)\theta_5 u - (h_1\theta_3 + h_2\theta_6)\dot{x}_{1d} - \\ &\quad (h_1\theta_3 + h_2\theta_6)(x_2 - \dot{x}_{1d}) - \\ &\quad (h_1 + h_2)\theta_4(p_1 - p_2) + \theta_2 - \dot{\gamma}_2 - \dot{\xi}_3 + \tilde{q}(t) \end{aligned} \tag{15}$$

此时设计控制器为：

$$u = \frac{1}{(h_1 g_1 + h_2 g_2)\hat{\theta}_5} I(\cdot)$$

$$\begin{aligned} I(\cdot) = {} & \hat{\theta}_2 + h_1\dot{x}_{1d}\hat{\theta}_3 + (h_1 + h_2)(p_1 - p_2)\hat{\theta}_4 + h_2\dot{x}_{1d}\hat{\theta}_6 + \\ & \dot{\gamma}_2 - \frac{1}{m}(\hat{x}_2 - \gamma_1 - \xi_2) - k_3 e_3 \end{aligned} \tag{16}$$

不确定参数自适应律如下：

$$\begin{aligned} & \dot{\hat{\theta}}_1 = -l_1 \frac{\dot{x}_{1d}}{m}(\hat{x}_2 - \gamma_1 - \xi_2), \quad \dot{\hat{\theta}}_2 = l_2 z_3, \quad \dot{\hat{\theta}}_3 = -l_3 z_3 h_1 \dot{x}_{1d} \\ & \dot{\hat{\theta}}_4 = -l_4 z_3 (h_1 + h_2)(p_1 - p_2), \quad \dot{\hat{\theta}}_5 = l_5 \frac{z_3}{\hat{\theta}_5} I(\cdot), \quad \dot{\hat{\theta}}_6 = -l_6 z_3 h_2 \dot{x}_{1d} \end{aligned} \tag{17}$$

式中，l_1、l_2、l_3、l_4、l_5和l_6为已知正常数，记$\Gamma = \operatorname{diag}\{1/l_1, 1/l_2, 1/l_3, 1/l_4, 1/l_5, 1/l_6\}$。记$\varpi_1(x_2) = -\frac{\theta_1}{m}x_2$，$\varpi_2(\dot{x}_{1d}) = \frac{\theta_1}{m}\dot{x}_{1d}$，$\varpi_3(x_2) = -\frac{1}{m\omega_0}x_2$，$\varpi_4(\dot{x}_{1d}) = \frac{\theta_1}{m\omega_0}\dot{x}_{1d}$，$\varpi_5(\dot{x}_{1d}) = (h_1\theta_3 + h_2\theta_6)\dot{x}_{1d}$，$\varpi_6(\dot{x}_2) = -(h_1\theta_3 + h_2\theta_6)x_2$。

4 稳定性分析(Stability analysis)

因为$\varpi_1(x_2)$、$\varpi_2(\dot{x}_{1d})$、$\varpi_3(x_2)$、$\varpi_4(\dot{x}_{1d})$、$\varpi_5(\dot{x}_{1d})$和$\varpi_6(\dot{x}_2)$都是光滑的函数，通过运用中值定理[7]可得到下面的不等式：

$$\begin{aligned} |\phi_1| &= |(h_1\theta_3 + h_2\theta_6)(x_2 - \dot{x}_{1d})| \leqslant a_1|z_1| + a_2|z_2| \\ |\phi_2| &= \left|\frac{\theta_1}{m}(\dot{x}_{1d} - x_2)\right| \leqslant a_3|z_1| + a_4|z_2| \\ |\phi_3| &= \frac{\theta_1}{m\omega_0}(\dot{x}_{1d} - x_2) \leqslant a_5|z_1| + a_6|z_2| \end{aligned} \tag{18}$$

式中，a_1、a_2、a_3、a_4、a_5和a_6是已知的正常数。显然$\dot{x}_{1d}$是有界的，设$\dot{x}_{1d} \leqslant \sigma_5$。

下面定义一些标量便于稳定性分析：

$$K_1 = k_1, \quad K_2 = k_2 - a_4, \quad K_3 = k_3 - \frac{1}{2},$$
$$\zeta_1 = a_3, \quad \zeta_2 = a_1, \quad \zeta_3 = a_2,$$
$$\zeta_4 = \frac{a_4}{2}, \quad \zeta_5 = k_2\omega_0 + a_6, \quad \zeta_6 = \omega_0^2 + \frac{a_6}{2},$$
$$\zeta_7 = \frac{a_5}{2}, \quad \zeta_8 = a_5, \quad \zeta_9 = \frac{1}{2},$$
$$\chi = \frac{1}{2}\omega_0 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2m}$$

选择足够大的控制增益k_1、k_2、k_3和观测带宽ω_0，使得如下矩阵M是正定的：

$$M=\begin{bmatrix} K_1 & -\zeta_1/2 & -\zeta_2/2 & -\zeta_7/2 & -\zeta_8/2 & -\zeta_9/2 \\ -\zeta_1/2 & K_2 & -\zeta_3/2 & -\zeta_4/2 & -\zeta_5/2 & -\zeta_6/2 \\ -\zeta_2/2 & -\zeta_3/2 & K_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\zeta_7/2 & -\zeta_4/2 & 0 & \chi & 0 & 0 \\ -\zeta_8/2 & -\zeta_5/2 & 0 & 0 & \chi & 0 \\ -\zeta_9/2 & -\zeta_6/2 & 0 & 0 & 0 & \chi \end{bmatrix} \tag{19}$$

选择Lyapunov函数为：

$$V_3=V_2+\frac{1}{2}z_3^2+\frac{1}{2}\varepsilon^T p\varepsilon+\frac{1}{2}\tilde{\theta}^T\Gamma\tilde{\theta}$$

则有：

$$\begin{aligned}\dot{V}_3=&-k_1z_1^2-k_2z_2^2-k_3z_3^2-\\&\frac{\theta_1}{m}(x_2-\dot{x}_{1d})z_2+\omega_0^2\varepsilon_3z_2+\frac{\tilde{\theta}_1}{m}\dot{x}_{1d}(\hat{x}_2-\gamma_1-\xi_2)+\\&\tilde{q}(t)z_3+k_2\omega_0\varepsilon_2z_2+\frac{1}{m}\omega_0z_3\varepsilon_2+\frac{\theta_1}{m\omega_0}(\dot{x}_{1d}-x_2)\varepsilon^TPB+\\&\frac{h(t)}{\omega_0^2}\varepsilon^TPC-Z_3\tilde{\theta}_2+(h_1+h_2)(p_1-p_2)z_3\tilde{\theta}_4+\\&h_2\dot{x}_{1d}z_3\tilde{\theta}_6-\frac{\tilde{\theta}_5}{\hat{\theta}_5}I(\cdot)z_3+\frac{\tilde{\theta}_1}{m}\dot{x}_{1d}\varepsilon^TPB+\tilde{\theta}^T\Gamma\dot{\hat{\theta}}-\\&\frac{1}{2}\omega_0\|\varepsilon\|^2+h_1\dot{x}_{1d}z_3\tilde{\theta}_3-(h_1\theta_3+h_2\theta_6)(x_2-\dot{x}_{1d})z_3+\frac{\tilde{\theta}_1}{m}\dot{x}_{1d}\varepsilon_2\omega_0\end{aligned} \tag{20}$$

结合式(2)、式(18)，应用杨氏不等式，并结合式(17)、式(19)和式(20)，可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_3\leqslant&-\eta^TM\eta-\frac{3}{2}z_3^2+\frac{\sigma_4^2}{2\omega_0^4}\|PC\|^2+\\&\frac{1}{2m}\sigma_1^2\sigma_5^2\|PB\|^2+\frac{1}{2}\sigma_3^2+\frac{\omega_0}{2m}(\sigma_1^2\sigma_5^2+\varepsilon_2^2)\\\leqslant&-\chi_{\min}(M)(\|z\|^2+\|\varepsilon\|^2)+U\\\leqslant&-\chi V_3+U\end{aligned} \tag{21}$$

式中，$\chi_{\min}$为矩阵M的特征值的最小值，$\chi=2\chi_{\min}(M)$，$\eta=\left[|z_1|,|z_2|,|z_3|,|\varepsilon_1|,|\varepsilon_2|,|\varepsilon_3|\right]^T$。通过运用比较定理[7]的引理，可得：

$$V(t)\leqslant V(0)\mathrm{e}^{-\chi t}+\frac{U}{\chi}(1-\mathrm{e}^{-\chi t}) \tag{22}$$

由式(22)可见$V(t)\in L_\infty$。可以分析出所提出的非线性自适应控制器能够确保所有闭环系统信号是有界的。此外，从式(22)可以看出，所提出的控制器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。

5 仿真分析(Simulation analysis)

仿真系统参数如下：

$V_{01}=1.57\times10^{-4}\ \mathrm{m}^3$，$V_{02}=8.011\times10^{-5}\ \mathrm{m}^3$，$A_1=1.256\times10^{-3}\ \mathrm{m}^2$，$A_2=0.64\times10^{-3}\ \mathrm{m}^2$，$p_s=4\times10^6\ \mathrm{Pa}$，$\beta_e=7\times10^8\ \mathrm{Pa}$，$C_v=9\times10^{-15}\ \mathrm{m}^3\cdot\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{Pa}^{-1}$，$k_c=1.019\times10^{-7}\ \mathrm{m}^{-3}\cdot\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{V}^{-1}\cdot\mathrm{Pa}^{-\frac{1}{2}}$，外干扰取$1.5(1-\mathrm{e}^{0.1t})\sin(0.2\pi t)$ N/kg。

对比三种算法的控制性能：

(1)PID。控制器参数为：$k_p=1000$，$k_i=400$，$k_d=0.5$。

(2)ESOBC。这是一个自适应反步控制策略。与本文控制策略的区别在于，此控制策略未加入指令滤波器，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，其余参数与本文参数选择一样。

(3)ESOBFC。这是本文详细撰写的控制策略，控制器参数选择如下：$k_1=2500$，$k_2=400$，$k_3=1000$，$\omega_0=200$，$\omega_{n1}=1600$，$\omega_{n2}=800$。自适应参数的初值、边界及收敛速率为：

$$\hat{\theta}(0)=[3000,120,1\times10^5,1\times10^{-5},700,1.2\times10^5]^T$$

$$\hat{\theta}_{\max}=[3500,600,3\times10^5,7\times10^{-4},700,2\times10^5]^T$$

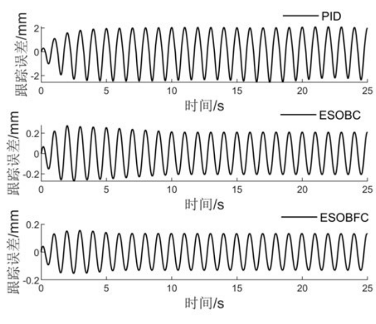
$$\hat{\theta}_{\min}=[3000,120,1\times10^5,5\times10^{-4},120,1.2\times10^5]^T$$

参数自适应速率为：

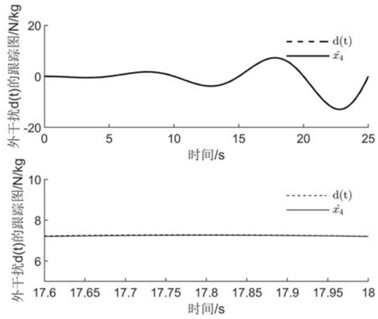
$$N=\mathrm{diag}\left\{5\times10^5,0.0275,30,1\times10^{-14},9\times10^{-6},15\right\}$$

为了定量评价三种控制算法的控制性能，按照文献[6]中定义的跟踪误差相应指标来进行对比，分别为跟踪误差绝对值的最大值、平均值和标准差。

本次实验分为两种工况，为了验证所提控制性能的有效性，第一种工况选择了理想跟踪信号为：$x_{1d}=40(1-\mathrm{e}^{-t})\sin(2\pi t)$ mm。实验结果如图2所示，性能指标如表1所示。



(a)1 Hz工况下跟踪误差图



(b)外干扰估计图

图2 1 Hz工况下系统输出响应图

Fig.2 System output response diagram under 1 Hz condition

如图2(a)所示为在1 Hz对应的工况下，ESOBFC控制算法对应的跟踪误差，可以看出基于指令滤波算法的跟踪误差相比其他两种误差明显更小，这表明了本文算法优异的跟踪性能。如图2(b)所示，状态观测器完成了对外干扰的估计。

表1 1 Hz工况下的指标对比

Tab.1 Index comparison under 1 Hz working condition

指标	M_z/mm	μ/mm	σ/mm
PID	2.58	1.33	0.707
ESOBC	0.275	0.144	0.0702
ESOBFC	0.157	0.088	0.0419

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稍低频率的轨迹，即$x_{1d} = 40(1-\mathrm{e}^{-t})\sin(\pi t)$ mm。实验结果如图3所示，性能指标如表2所示。在此工况下，相比于其他两种算法，本文算法的跟踪误差依旧最优。

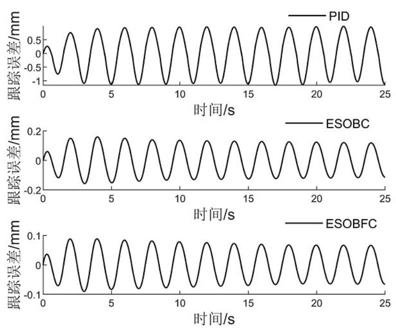


图3 0.5 Hz工况下跟踪误差对比图

Fig.3 Comparison chart of tracking error under 0.5 Hz working condition

表2 0.5 Hz工况下的指标对比

Tab.2 Index comparison under 0.5 Hz working condition

指标	M_z/mm	μ/mm	σ/mm
PID	1.17	0.631	0.327
ESOBC	0.16	0.0857	0.0417
ESOBFC	0.0900	0.0481	0.0234

6 结论(Conclusion)

本文研究了一类具有参数不确定性和强非线性特点的液压控制系统的位置控制问题。针对无速度测量的液压伺服系统，基于模型设计了扩展状态观测器，可以同时观测速度及不确定性外部干扰，结合基于实际位置的期望补偿的自适应算法，实现了对不确定性参数的自适应和补偿。基于Lyapunov理论证明了所提出控制策略在保持系统稳定性的同时，具有渐近跟踪性能。通过仿真分析，验证了与传统的PID控制策略及一般的自适应反步控制策略相比，本文提出的ESOBFC控制算法具有更好的位置跟踪控制效果。

参考文献(References)

[1] LU L, YAO B. Energy-saving adaptive robust control of a hydraulic manipulator using five cartridge valves with an accumulator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12):7046-7054.

[2] SUN W, GAO H, KAYNAK O. Vibration isolation for active suspensions with performance constraints and actuator saturation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 20(2):675-683.

[3] LI Y, HE L. Counterbalancing speed control for hydrostatic drive heavy vehicle under long down-slope[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(4):1533-1542.

[4] PARK J, CHO D, KIM S, et al. Utilizing online learning based on echo-state networks for the control of a hydraulic excavator[J]. Mechatronics, 2014, 24(8):986-1000.

[5] SERON J, MARTINEZ J L, MANDOW A, et al. Automation of the arm-aided climbing maneuver for tracked mobile manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(7):3638-3647.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 刘龙,姚建勇,胡健,等.基于干扰观测器的电液位置伺服系统跟踪控制[J].兵工学报,2015,36(11):2053-2061.

[9] YUCELEN T, CALISE A J. Kalman filter modification in adaptive control[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2012, 33(2):426-439.

[10] YUCELEN T, HADDAD W M. Low-frequency learning and fast adaptation in model reference adaptive control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 58(4):1080-1085.

[11] SHEN W, LIU X, SU X. High-precision position tracking control of electro-hydraulic servo systems based on an improved structure and desired compensation[J]. International Journal of Control, Automation and Systems,2021, 19(11):3622-3630.

作者简介：

袁小康(1996-)，男，硕士生.研究领域：电液伺服控制.