

DOI: 10.7652/xjtuxb201701015

考虑状态约束的液压系统自适应控制

徐张宝, 朱忠领, 马大为, 姚建勇
(南京理工大学机械工程学院, 210094, 南京)

摘要: 针对液压伺服系统中的状态约束和不确定性问题,提出一种考虑状态约束的液压伺服系统自适应控制算法。该算法基于障碍李雅普诺夫函数设计了有限时间干扰观测器和自适应控制器,其中:有限时间干扰观测器用于干扰估计,且能保证估计精确;自适应控制器用于处理系统参数不确定性;障碍李雅普诺夫函数用于约束状态并保证闭环系统稳定。实验结果表明,该算法能够约束系统输出速度和加速度,系统期望跟踪指令幅值为 10 mm,稳态跟踪误差最大约为 0.06 mm,相对跟踪误差约为 0.6%,系统跟踪精度得到了提高。

关键词: 液压伺服系统;自适应控制;障碍李雅普诺夫函数;干扰观测器

中图分类号: O121.8;G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)01-0097-06

Adaptive Control of Hydraulic Systems with State Constraints

XU Zhangbao, ZHU Zhongling, MA Dawei, YAO Jianyong
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: An adaptive controller with state constraints is proposed for hydraulic systems, where a finite time disturbance observer and an adaptive controller are designed following barrier Lyapunov function. The finite time disturbance observer ensures disturbance estimation accuracy, and the adaptive controller handles parametric uncertainties. Barrier Lyapunov function is employed for state constraints to stabilize the closed loop system. Theoretically, the controller guarantees asymptotic tracking performance. Experimental results show that the algorithm can constrain the output velocity and acceleration, the maximum static tracking error is 0.06 mm when the amplitude of the desired tracking trajectory is 10 mm, and the maximum relative tracking error reaches 0.6%, thus the system tracking accuracy is obviously improved.

Keywords: hydraulic system; adaptive control; barrier Lyapunov function; disturbance observer

液压系统由于输出力大、体积小等优点,所以在工业中得到了广泛的应用。然而,严重的非线性行为^[1],如控制输入饱和、状态约束、阀门开度、非线性摩擦、模型的不确定性^[2-3](负载变化、液压参数变化(如液体体积弹性模量)以及元件磨损^[4]引起的参数不确定性和包含外部干扰、泄漏等的不确定非线性),制约了高性能闭环控制器的发展。

为了取得高精度跟踪性能,越来越多的研究人员设计了非线性控制器,以补偿液压伺服系统的非线性特性。文献[3]针对单出杆液压伺服系统中存在的参数不确定性和不确定非线性行为,设计了自适应鲁棒控制器。文献[2]设计了一种基于误差符号鲁棒积分的自适应控制器,以处理系统的建模不确定性,并减小了反馈增益。文献[5]设计了一种基

于扩张状态观测器的输出反馈控制器,解决了系统状态不可测和匹配干扰问题。文献[6]考虑了摩擦对系统的影响,设计了一种自适应控制器,解决了系统摩擦和参数不确定性问题。滑膜控制器^[7]等也被广泛用于液压伺服系统,提高了系统控制精度,与此同时许多研究者也对系统状态约束问题展开了研究。文献[8]使用了障碍李雅普诺夫函数处理系统的状态约束问题。文献[9]基于李雅普诺夫函数设计了一类非线性系统的输出状态约束控制器。

实际上,一些系统常常受到状态约束的影响,如化学反应中的温度约束,以及一些机械系统遭受物理故障时的速度或加速度约束。由于液压系统的高承载能力和高刚度性质,所以在环境和测量单元相互作用的测试中忽视了输出状态约束问题,使得测试过程中过大的速度或加速度损坏了测量设备^[10]。在测试和实验中,如果系统的初始条件不匹配,就有可能出现速度或加速度过大的情况,因此本文针对此问题开展基于速度和加速度约束的液压系统运动跟踪控制研究,设计了一种考虑状态约束的液压系统自适应控制器。实验结果证明了设计控制器的有效性。

1 系统建模与问题描述

液压系统如图1所示,其惯性负载的运动学方程为

$$m\ddot{y} = P_L A - B\dot{y} - d(y, \dot{y}, t) \quad (1)$$

式中: m 和 y 分别为运动总部件的惯性负载和负载位移; $P_L = P_1 - P_2$ 为负载压力差, P_1 和 P_2 分别为液压缸左右两腔的压力; A 为液压缸内腔的环形工作面积; B 为黏性摩擦系数; $d(y, \dot{y}, t)$ 为系统其他未考虑的干扰。

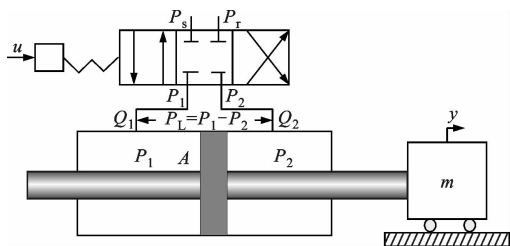


图1 液压伺服系统

考虑液压油的可压缩性,液压缸左右两腔的压力动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{P}_1 V_1 / \beta_e &= -A\dot{y} - C_t P_L - q_1(t) + Q_1 \\ \dot{P}_2 V_2 / \beta_e &= A\dot{y} + C_t P_L + q_2(t) - Q_2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $V_1 = V_{01} + A y$ 和 $V_2 = V_{02} - A y$ 分别为液压缸

左右两腔的容积, V_{01} 和 V_{02} 分别为左右两腔的初始容积; β_e 为液压缸有效容积液体弹性模数; C_t 为液压缸内泄露系数; Q_1 和 Q_2 分别为液压缸供油流量和回油流量, $Q_L = (Q_1 + Q_2)/2$ 为负载流量; $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$ 分别为左右两腔的建模误差。 Q_1 和 Q_2 分别为

$$\begin{aligned} Q_1 &= k_t u [s(u)(P_s - P_1)^{1/2} + s(-u)(P_1 - P_r)^{1/2}] \\ Q_2 &= k_t u [s(u)(P_2 - P_r)^{1/2} + s(-u)(P_s - P_2)^{1/2}] \end{aligned}$$

$$s(u) = \begin{cases} 1; & u \geq 0 \\ 0; & u < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_t 为总流量增益; P_s 为供油压力; P_r 为回油压力。

假设 $P_s = P_1 + P_2$, $P_r = 0$,定义状态变量 $x = [x_1, x_2, x_3]^T = [y, \dot{y}, \ddot{y}]^T$,那么整个系统可以写成如下状态空间形式

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = \theta_1 g u - \theta_2 x_2 - \theta_3 x_3 - f(x, t) \\ \Delta(x, t) = \frac{1}{k_t} q(t) + \frac{C_t}{A k_t} d(x, t) + \frac{V_t}{4 A \beta_e k_t} \dot{d}(x, t) \end{cases} \quad (4)$$

定义未知参数集 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$, $\theta_1 = 4 A \beta_e k_t / (m V_t)$, $\theta_2 = (4 A^2 \beta_e + 4 \beta_e C_t B) / (m V_t)$, $\theta_3 = (V_t B + 4 \beta_e C_t m) / (m V_t)$, $g = (P_s - \text{sign}(u) P_L)^{1/2}$, $f(x, t) = 4 A \beta_e k_t \Delta(x, t) / (m V_t)$ 为集中扰动, $V_t = V_1 + V_2$ 为液压缸有效液体总容积; $q(t) = [q_1(t) + q_2(t)]/2$ 。 $\text{sign}(u)$ 为

$$\text{sign}(u) = \begin{cases} 1; & u \geq 0 \\ -1; & u < 0 \end{cases} \quad (5)$$

对于确定的液压系统,其大致的系统参数信息是可知的,系统的干扰总是有界的。因而,以下假设是合理的。

假设1:系统参数 θ 满足

$$\theta \in \Omega_\theta \triangleq \{\theta: \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}\} \quad (6)$$

$\theta_{\min} = [\theta_{1\min}, \theta_{2\min}, \theta_{3\min}]^T$ 和 $\theta_{\max} = [\theta_{1\max}, \theta_{2\max}, \theta_{3\max}]^T$ 是已知的。

假设2:系统集中扰动 $f(x, t)$ 和其一阶导数都有界,即

$$|f(x, t)| \leq \sigma_1; \quad |\dot{f}(x, t)| \leq \sigma_2 \quad (7)$$

σ_1 和 σ_2 是已知常数。

假设3:指令信号 x_{1d} 足够光滑且有界。

2 控制器设计

2.1 自适应律设计

令 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 为 θ 的估计误差, $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计值。

定义一个非连续的投影函数^[11]

$$P_{\hat{\theta}}(\kappa) = \begin{cases} \kappa; & \hat{\theta} \subset \bar{\Omega}_{\theta} \text{ or } n_{\hat{\theta}}^T \kappa \leq 0 \\ \left(I - \Gamma(t) \frac{n_{\hat{\theta}} n_{\hat{\theta}}^T}{n_{\hat{\theta}}^T \Gamma n_{\hat{\theta}}} \right) \kappa; & \hat{\theta} \subset \partial \Omega_{\theta} \text{ \& } n_{\hat{\theta}}^T \kappa > 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\kappa \in \mathbf{R}^p$; $\Gamma(t) \in \mathbf{R}^{p \times p}$; $\bar{\Omega}_{\theta}$ 为 Ω_{θ} 的内部; $\partial \Omega_{\theta}$ 为 Ω_{θ} 的边界; $n_{\hat{\theta}}$ 为 $\hat{\theta}_i \in \Omega_{\theta}$ 时的外单位法向量。

为了约束参数估计过程中的自适应速率,定义饱和函数

$$\text{sat}_{\dot{\theta}_M}(\zeta) = \mu_0 \zeta; \quad \mu_0 = \begin{cases} 1; & \|\zeta\| \leq \dot{\theta}_M \\ \dot{\theta}_M / \|\zeta\|; & \|\zeta\| > \dot{\theta}_M \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\dot{\theta}_M$ 为预设的参数自适应限制速率。

引理 1^[12] 设计投影型自适应律

$$\dot{\hat{\theta}} = \text{sat}_{\dot{\theta}_M}(P_{\hat{\theta}}(\Gamma(t)\tau)); \quad \hat{\theta}(0) \subseteq \Omega_{\theta} \quad (10)$$

式中: τ 为自适应函数; $\Gamma(t) > 0$ 为连续可微的对称矩阵。由自适应律可知^[13]: $\theta_{i\min} \leq \hat{\theta}_i \leq \theta_{i\max}$, $i=1, 2, 3$ 始终成立; $\hat{\theta}^T[\Gamma^{-1}P_{\hat{\theta}}(\Gamma(t)\tau) - \tau] \leq 0$ 。

2.2 干扰观测器设计

式(4)可以写成如下形式

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= \hat{\theta}_1 gu - \hat{\theta}_2 x_2 - \hat{\theta}_3 x_3 - D(x, t) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $D(x, t) = (\theta_1 - \hat{\theta}_1)gu - (\theta_2 - \hat{\theta}_2)x_2 - (\theta_3 - \hat{\theta}_3)x_3 - f(x, t)$ 。由假设 2 可知, $D(x, t)$ 和其一阶导数都有界。

由式(11)可以设计干扰观测器^[14]

$$\begin{aligned} \dot{\chi}_0 &= \phi_0 + \hat{\theta}_1 gu - \hat{\theta}_2 x_2 - \hat{\theta}_3 x_3; \quad \dot{\chi}_1 = \phi_1 = \dot{D}; \\ \dot{\chi}_2 &= \phi_2 = \dot{\hat{D}} \\ \phi_0 &= -\eta_0 |\chi_0 - x_3|^{2/3} \text{sign}(\chi_0 - x_3) + \chi_1 \\ \phi_1 &= -\eta_1 |\chi_1 - \phi_0|^{1/2} \text{sign}(\chi_1 - \phi_0) + \chi_2 \\ \phi_2 &= -\eta_2 \text{sign}(\chi_2 - \phi_1) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\eta_i > 0$, $i=0, 1, 2$ 为观测器参数; $\hat{D}$ 为 D 的估计值, $\hat{\hat{D}}$ 为 $\hat{D}$ 的估计值。

引理 2^[14] 当时间 t 大于某一时间常数 T_1 时, 干扰估计误差为 0。

可以选择足够大的观测器参数来保证 T_1 足够小。本文取 T_1 为 0。

2.3 加速度控制器设计

第 1 步 定义位置跟踪误差 $z_1 = x_1 - x_{1d}$, $z_2 = x_2 - \alpha_1$, α_1 为式(1)的虚拟控制律。

定义函数

$$V_1 = k_1 z_1 \arctan(z_1) \quad (13)$$

式中: k_1 为正值常数。

给定稳定函数

$$\alpha_1 = x_{2d} - v_1 \arctan(z_1) \quad (14)$$

式中: $v_1 > 0$ 为控制器增益。因此, 稳定函数 α_1 是有界的, 即

$$|\alpha_1| < \frac{\pi v_1}{2} + |x_{2d}| \quad (15)$$

此时, 函数 V_1 的时间微分为

$$\dot{V}_1 = -W_1 + k_1 z_2 \left[\arctan(z_1) + \frac{z_1}{1+z_1^2} \right] \quad (16)$$

$$W_1 = k_1 v_1 \arctan(z_1) \left[\arctan(z_1) + \frac{z_1}{1+z_1^2} \right] \quad (17)$$

由式(17)可知, W_1 恒为正; 由式(16)可知, 若 $z_2 = 0$, 则 $\dot{V}_1 \leq 0$ 。

由式(16)还可知, 定义的 Lyapunov 函数(式(13))保证了向式(2)传递的误差项是有界的, 即

$$\begin{aligned} k_1 \left| \arctan(z_1) + \frac{z_1}{1+z_1^2} \right| &\leq \\ k_1 \left| \arctan(z_1) \right| + k_1 \left| \frac{z_1}{1+z_1^2} \right| &\leq k_1 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

第 2 步 对于式(4)的 $\dot{x}_2$, 由于要确保速度输出满足约束, 又由 $z_2 = x_2 - \alpha_1$ 可知已经约束了稳定函数 α_1 , 因此只要再确保 z_2 在一个给定的范围 $(-L_2, L_2)$ 内即可约束状态 x_2 。为此, 定义障碍李雅普诺夫函数(BLF)

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} k_2 \ln \frac{L_2^2}{L_2^2 - z_2^2} \quad (19)$$

式中: k_2 为正值常数。为了对 BLF 有更加直观的认识, 其函数图形如图 2 所示。

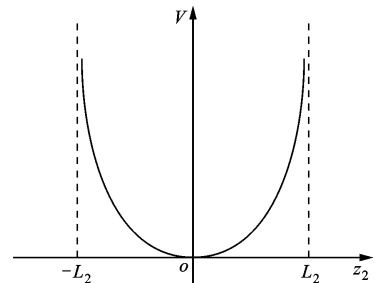


图 2 障碍李雅普诺夫函数示意图

由式(19)可知, V_2 在开区间 $(-L_2, L_2)$ 内关于 z_2 是有效的 Lyapunov 函数。

函数 V_2 的时间微分为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \frac{k_2 z_2 \dot{z}_2}{L_2^2 - z_2^2} = -W_1 + \\ &k_1 z_2 \left[\arctan(z_1) + \frac{z_1}{1+z_1^2} \right] + \frac{k_2 z_2 (x_3 - \dot{\alpha}_1)}{L_2^2 - z_2^2} \end{aligned} \quad (20)$$

定义 $z_3 = x_3 - \alpha_2$, α_2 为第2步的虚拟控制律,设计如下

$$\alpha_2 = \dot{\alpha}_1 - v_2 z_2 - \frac{k_1}{k_2} (L_2^2 - z_2^2) \left[\arctan(z_1) + \frac{z_1}{1+z_1^2} \right] \quad (21)$$

式中: $v_2 > 0$ 为控制器增益;

$$\dot{\alpha}_1 = x_{3d} - v_1 z_1 / (1 + z_1^2) \quad (22)$$

由此,式(20)可化为

$$\dot{V}_2 = -W_2 + k_2 z_2 z_3 / (L_2^2 - z_2^2) \quad (23)$$

$$W_2 = W_1 + k_2 v_2 z_2^2 / (L_2^2 - z_2^2) \quad (24)$$

由式(24)可知,若 $z_3 = 0$,则可确保 z_2 恒在 $(-L_2, L_2)$ 范围内,即确保了 x_2 有界,进而式(22)有界,因此第2步虚拟控制律(式(21))有界,即 α_2 有界。

第3步 对于式(3),约束系统的加速度输出 x_3 ,类似于第2步,已经约束了 α_2 ,只要再约束 z_3 即可。为此,需要设计实际的控制输入 u ,以保证 z_3 不侵犯预设的范围 $(-L_3, L_3)$ 。为此,定义 BLF 函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} k_3 \ln \frac{L_3^2}{L_3^2 - z_3^2} \quad (25)$$

式中: k_3 为正值常数。

因此, V_3 在开区间 $(-L_3, L_3)$ 内关于 z_3 是有效的 Lyapunov 函数。

函数 V_3 的时间微分为

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + k_3 \frac{z_3 \dot{z}_3}{L_3^2 - z_3^2} = -W_2 + \\ &\frac{k_2 z_2 z_3}{L_2^2 - z_2^2} + k_3 \frac{z_3 [\theta_1 g u - \theta_2 x_2 - \theta_3 x_3 - f(x, t) - \dot{\alpha}_2]}{L_3^2 - z_3^2} \end{aligned} \quad (26)$$

式中

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_2 &= \dot{x}_{3d} - \frac{v_1 z_1}{1+z_1^2} + \frac{2v_1 z_1 z_1^2}{(1+z_1^2)^2} - \\ &v_2 z_2 + \frac{2k_1}{k_2} z_2 z_2 \frac{z_1}{1+z_1^2} + \frac{2k_1}{k_2} z_2 z_2 \arctan(z_1) - \\ &\frac{k_1}{k_2} \frac{2z_1}{1+z_1^2} (L_2^2 - z_2^2) \left[1 - \frac{z_1^2}{1+z_1^2} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

基于干扰观测器(式(12)),可以获得 $\hat{D}(x, t)$, 因此设计如下控制器

$$u = \frac{1}{\hat{\theta}_1 g} \left[\hat{\theta}_2 x_2 + \hat{\theta}_3 x_3 + \hat{D}(x, t) + \right.$$

$$\left. \dot{\alpha}_2 - \frac{k_2}{k_3} \frac{L_3^2 - z_3^2}{L_2^2 - z_2^2} z_2 - v_3 z_3 \right] \quad (28)$$

式中: $v_3 > 0$ 为控制器增益。

将控制器式(28)代入式(26)有

$$\dot{V}_3 = -W_2 - \frac{k_3 v_3 z_3^2}{L_3^2 - z_3^2} = -W_3 \quad (29)$$

$$W_3 = W_2 + \frac{k_3 v_3 z_3^2}{L_3^2 - z_3^2} \quad (30)$$

由式(30)可知, W_3 关于 z , $z = [z_1, z_2, z_3]^T$ 是正定的,因此 $\dot{V}_3 \leq 0$,确保了 z_3 始终在范围 $(-L_3, L_3)$ 内,这样便成功地约束了系统加速度输出 z_3 。由此,通过调整控制器参数可约束系统的速度及加速度输出。

2.4 间接参数估计算法设计

假设干扰观测器能够准确估计干扰。由式(4)中 $\dot{x}$ 可得到下式

$$y_1 = \dot{x}_3 + \hat{D}(t) = \theta_1 g u - \theta_2 x_2 - \theta_3 x_3 \quad (31)$$

为了消除系统测量噪声,将滤波器 H_f 引入到式(31)中有

$$y_{1f} = H_f[\dot{x}_3 + \hat{D}(t)] = \theta_1 g u_f - \theta_2 x_{2f} - \theta_3 x_{3f} \quad (32)$$

式中: u, x_2, x_3 为滤波器 H_f 的输入; u_f, x_{2f}, x_{3f} 为对应的输出。定义误差 $\epsilon = \hat{y}_{1f} - y_{1f}$, $\hat{y}_{1f} = \phi_f^T \hat{\theta}$, 则

$$\epsilon = \phi_f^T \hat{\theta} \quad (33)$$

式中: $\phi_f = [u_f, -x_{2f}, -x_{3f}]^T$; $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ 。

为了防止 $\lambda_{\max}(\Gamma(t)) \rightarrow \infty$ 和估计器饱和,参考文献[15]将自适应律矩阵设计为

$$\dot{\Gamma} = \begin{cases} \mu \Gamma - \frac{\Gamma \phi_f \phi_f^T \Gamma}{1 + \nu \phi_f^T \Gamma \phi_f}; & \lambda_{\max}(\Gamma(t)) \leq \rho_M \text{ \& } \\ & \| P_{\hat{\theta}}(\Gamma(t)) \tau \| \leq \dot{\theta}_M \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \quad (34)$$

式中: $\nu \geq 0$ 为归一化因子; $\mu \geq 0$ 为遗忘因子; $\lambda_{\max}(\Gamma(t))$ 为矩阵 $\Gamma(t)$ 的最大特征值; ρ_M 为矩阵 $\Gamma(t)$ 范数的上界。 $\Gamma(t_r^+) = \rho \mathbf{I}$, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, t_r^+ 为预设协方差时间; 矩阵 $\Gamma(0) = \Gamma^T(0) > 0$ 。此时,自适应函数

$$\tau = \frac{1}{1 + \nu \phi_f^T \Gamma \phi_f} \phi_f \epsilon \quad (35)$$

当持续激励(PE)满足条件,即

$$\int_{T_1}^{T_1+T} \phi_f \phi_f^T \geq \gamma \mathbf{I}_p; \quad \gamma > 0, T > 0 \quad (36)$$

则系统参数收敛到真值,即 $t \rightarrow \infty$ 时,有 $\hat{\theta} \rightarrow \theta$ 。

引理3 由参数自适应律(式(10))、自适应函数(式(35))、式(34))以及误差模型(式(33))可得: $\hat{\theta} \in$

$L_{\infty}(0, \infty); \varepsilon, \hat{\theta} \in L_2(0, \infty) \cap L_{\infty}(0, \infty)$ 。

2.5 性能定理

定理 1 如果系统初值 $z(0)$ 满足如下条件

$$z(0) \in \Omega_{z_0} \triangleq \{ |z_2(0)| < L_2, |z_3(0)| < L_3 \} \quad (37)$$

则控制器式(28)具有如下结论。

(1)闭环控制器中所有信号都是有界的,且误差信号 z_2, z_3 满足如下不等式

$$\left. \begin{aligned} z_2 &\leq L_2(1 - \exp(-2V_3(0)/k_2))^{1/2} \\ z_3 &\leq L_3(1 - \exp(-2V_3(0)/k_3))^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

(2)控制器具有渐近稳定性,即当 $t \rightarrow \infty$ 时,有 $z_1 \rightarrow 0$ 。

证明 由式(29)可得, $V_3 \leq V_3(0)$, 且是不增的函数,因此可确保 $|z_2(t)| < L_2, |z_3(t)| < L_3$ 。由此,可推导出

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2}k_2 \ln \frac{L_2^2}{L_2^2 - z_2^2} &\leq V_2 \leq V_3 \leq V_3(0) \\ \frac{1}{2}k_3 \ln \frac{L_3^2}{L_3^2 - z_3^2} &\leq V_2 \leq V_3 \leq V_3(0) \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

因此,可得不等式(38)。因 V_3 有界,所以 z 有界,系统位置指令、速度指令、加速度指令及加加速度指令均有界,进而可得系统状态 x 有界;又由不连续映射的参数估计可知,参数估计有界,据此可轻易证明闭环系统中所有信号均有界。由此证明了结论(1)。

由式(29), $W_3 \in L_2$ 及 $V_3 \in L_{\infty}$, 此外闭环系统所有信号均有界,很容易证明 W_3 的时间微分也有界,即 W_3 一致连续,由巴巴拉特引理可知,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $W_3 \rightarrow 0$ 。由此证明了结论(2)。

3 实验结果对比

3.1 实验

建立如图 3 所示的电液伺服实验平台(系统参数同文献[16])来验证控制策略的有效性。系统采样时间为 0.5 ms。

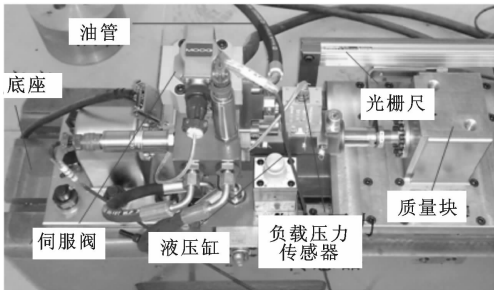


图 3 电液伺服系统实验平台

3.2 实验结果对比

为了验证本文控制器的有效性,对比以下 2 个控制器。

(1)本文的考虑状态约束的液压系统自适应控制器(ACSC)。系统参数为: $m = 30 \text{ kg}$, $A = 9.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $V_t = 7.96 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $P_s = 10 \text{ MPa}$, $P_r = 0.08 \text{ MPa}$ 。选取参数不确定范围 $\theta_{\min} = [1, 1 \times 10^5, 10]^T$, $\theta_{\max} = [200, 1 \times 10^7, 2000]^T$, 给定参数估计初值 $\hat{\theta}_1(0) = 16 \text{ m}^3 \cdot \text{MPa} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{N}^{-1/2}$, $\hat{\theta}_2(0) = 1 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{MPa} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\hat{\theta}_3(0) = 500 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 控制器设计参数 $v_1 = 800$, $v_2 = 500$, $v_3 = 300$, $k_1 = 5$, $k_2 = 1$, $k_3 = 0.1$, $L_2 = 0.12$, $L_3 = 2.5$, $\lambda_0 = 50$, $\lambda_1 = 600$, $\lambda_2 = 800$, $\alpha = 20$, $\nu = 1.5$ 。

(2)PI 控制器^[5]。参数为 $k_p = 1500$, $k_i = 500$ 。

系统指令 $x_{1d} = 10 \arctan(\sin(0.4\pi t)) [1 - \exp(-t)] + 5$ 。实验结果如图 4~图 9 所示。由图 4 可以看出,系统参数能够收敛到定值。由图 5 知,由于非匹配干扰补偿以及参数自适应的作用,本文设计的控制器取得最优跟踪性能,稳态跟踪误差约为 0.06 mm,而 PID 控制器稳态跟踪误差约为 0.28 mm。由图 7 和图 8 可知,状态约束控制器作用下的

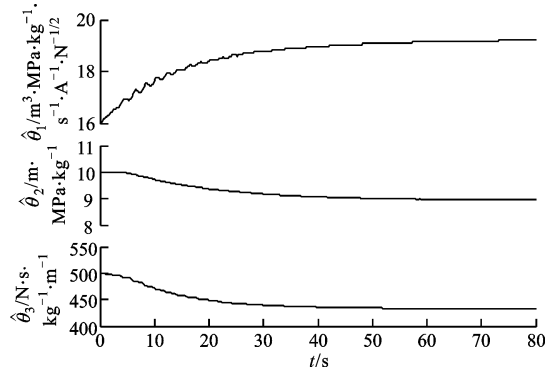


图 4 ACSC 控制器作用下参数估计曲线

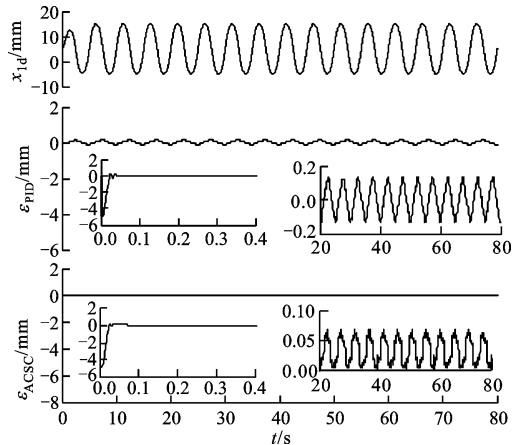


图 5 指令信号 x_{1d} 及两个控制器的跟踪误差

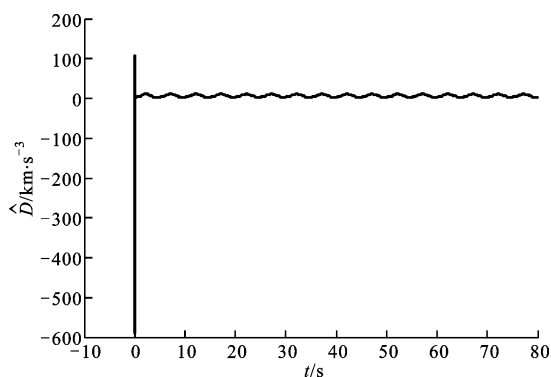
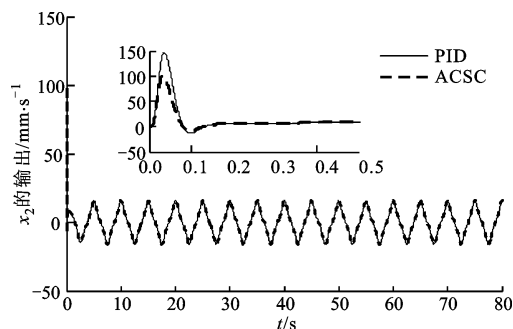
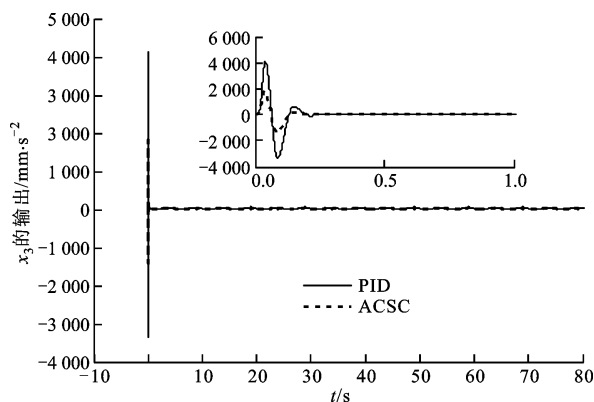
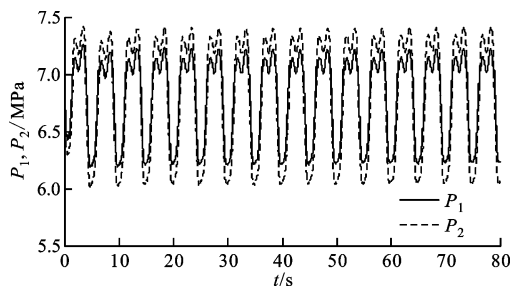
图6 D 估计曲线图7 2种控制器作用下的速度状态 x_2 输出曲线图8 2种控制器作用下的加速度状态 x_3 输出曲线

图9 ACSC 控制器作用下液压缸腔内压强

4 结束语

本文设计了一种考虑状态约束的液压伺服系统自适应控制算法,用于考虑状态约束的双出杆液压缸系统。本文控制器同时考虑了系统不确定性和状态约束问题,通过设计干扰观测器和自适应律解决了系统不确定性问题;通过设计障碍李雅普诺夫函数解决了系统状态约束问题,证明了控制策略的稳定性。实验结果说明了本文设计方案是有效的。

参考文献:

- [1] MERRITT H E. Hydraulic control systems [M]. New York, USA: Wiley, 1967: 100-175.
- [2] YAO Jianyong, JIAO Zongxia, MA Dawei, et al. High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(2): 633-641.
- [3] YAO Bin, BU Fangping, REEDY J, et al. Adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuators: theory and experiments [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2000, 5(1): 79-91.
- [4] WHATTON J. Fluid power systems [M]. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1989: 65-109.
- [5] YAO Jianyong, JIAO Zongxia, MA Dawei. Extended state observer-based output feedback nonlinear robust control of hydraulic systems with backstepping [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 6285-6293.
- [6] YAO Jianyong, DENG Wenxiang, JIAO Zongxia. Adaptive control of hydraulic actuators with LuGre model based friction compensation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6469-6477.
- [7] SCHKODA R F. Sliding mode control of a hydraulically actuated load application unit with application to wind turbine drivetrain testing [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(6): 2203-2215.
- [8] NGO K B, MAHONY R, JIANG Zhongping. Integrator backstepping using barrier functions for systems with multiple state constraints [C]//Proceedings 44th IEEE Conference on Decision & Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 8306-8312.
- [9] TEEK P, GE Shuzhi, TAY E H. Barrier Lyapunov functions for the control of output-constrained nonlinear systems [J]. Automatica, 2009, 45(4): 918-927.

(下转第108页)

系统输出的速度和加速度均小于PID控制器作用下的系统速度和加速度的输出,说明状态约束控制对速度和加速度的作用效果比PID的好,证明了设计控制策略的有效性。