

阀控非对称缸系统多级滑模鲁棒自适应控制^{*}

白寒 王庆九 徐振 管成

(浙江大学机械与能源工程学院, 杭州 310027)

【摘要】 考虑阀控非对称缸系统的特性,设计了一种基于逆向递推方法的多级滑模鲁棒自适应控制器。首先采用 Backstepping 逆向递推技术和状态反馈线性化的方法,给出系统的多级滑模控制器。然后依据 Lyapunov 稳定性理论,得到系统不确定参数的自适应律,并在自适应控制中引入鲁棒控制的设计方法,实现对活塞位移的精确位置跟踪控制。实验结果表明,多级滑模鲁棒自适应控制具有较强的鲁棒性和良好的跟踪性能。

关键词: 阀控非对称液压缸 多级滑模控制 自适应控制 鲁棒控制

中图分类号: TP271

文献标识码: A

Multiple Sliding Mode Robust Adaptive Control for Valve Controlled Asymmetric Cylinder System

Bai Han Wang Qingjiu Xu Zhen Guan Cheng

(College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

Considering the characteristics of valve controlled asymmetric cylinder system, a multiple sliding mode robust adaptive controller was designed. First, backstepping technique and state feedback linearization method were used to attain a multiple sliding mode controller. Next, based on Lyapunov stability theory, the uncertain parameters adaptation laws were presented and a robust adaptive controller combined with sliding mode method was designed to track piston displacement accurately. Experimental results show that the multiple sliding mode robust adaptive control approach has a strong robustness and enhances the tracking performance remarkably.

Key words Valve controlled asymmetric hydraulic cylinder, Multiple sliding mode control, Adaptive control, Robust control

引言

非对称缸系统具有占用工作空间小、结构紧凑、功率体积比大、应用广泛等优点。但是液压系统具有很强的非线性特性,而且由于非对称缸两腔活塞面积的非对称性,使系统正向和反向的运动特性呈现非线性,同时系统中多数参数具有不确定性和慢时变性^[1-2],这给传统控制方法的应用带来了很大的难度。传统的滑模变结构控制算法^[3]能适用于非线性系统,具有较强的抗干扰能力,而且系统到达滑模面之后,系统不受参数变化和外部干扰的影响。

但是滑模控制对于不确定的系统参数,需要参数的上界已知,并且很容易引起系统高频振动。近年来,自适应控制在电液伺服系统控制中得到了广泛的应用,许多学者提出了非线性的自适应控制方法,比如精确反馈自适应控制^[4]、滑模自适应控制^[5-7]。Bin Y以及 Alleyne A 等研究了基于 Backstepping 方法的电液系统非线性自适应控制方法^[8-9],但是这类方法相当复杂,难以在实际系统中使用。因此,本文基于逐步递推的方法,利用虚拟控制量,将高阶系统分解成几个一阶子系统,对其分别进行滑模控制,利用多滑模控制代替传统的 Backstepping 控制,以

收稿日期: 2008-09-03 修回日期: 2008-10-14

^{*} “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAF13B04)和台州市科技计划资助项目(07ZJU010)

作者简介: 白寒, 博士生, 主要从事电液系统研究, E-mail: bunnyjudybh@163.com

消除各虚拟控制量之间的耦合关系。同时,在滑模控制中采用自适应方法,利用自适应律对系统参数进行在线辨识,用自适应律来消除系统参数的不确定性对控制精度的影响,并结合鲁棒控制^[10]的设计方法,使控制器具有较强的抗干扰性能。

1 阀控非对称液压缸系统建模

单出杆非对称液压缸由伺服阀控制液压缸的位移,系统结构简图如图1所示。

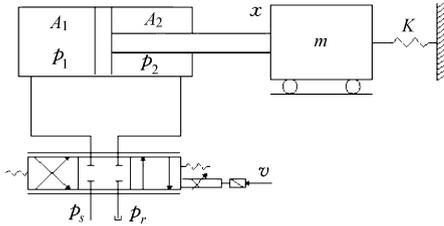


图1 典型阀控非对称液压缸系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the hydraulic system

图1中系统力平衡方程为

$$p_1 A_1 - p_2 A_2 = m \ddot{x} + Kx + F_l(t) \quad (1)$$

式中 x ——负载位移 m ——负载质量
 p_1, p_2 ——单杆液压缸两腔的压力
 A_1, A_2 ——无杆腔和有杆腔的活塞作用面积
 K ——弹簧刚度
 $F_l(t)$ ——外负载力、未建模的摩擦力、粘性阻力等一些难以建模的阻力

假设不考虑外泄漏的影响,系统的流量方程为

$$\begin{cases} \frac{V_1 + A_1 x}{\beta_e} \dot{p}_1 + A_1 \dot{x} + C_t(p_1 - p_2) = Q_1 \\ A_2 \dot{x} + C_t(p_1 - p_2) = \frac{V_2 - A_2 x}{\beta_e} \dot{p}_2 + Q_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 β_e ——油液弹性刚度
 C_t ——液压缸内泄漏系数
 Q_1 ——流入液压缸无杆腔的流量
 Q_2 ——流入液压缸有杆腔的流量
 V_1, V_2 ——液压缸两腔的初始容积

流量 Q_1 和 Q_2 可表示为

$$\begin{cases} Q_1 = k_{q1} x_v (s(x_v) \sqrt{p_s - p_1} + s(-x_v) \sqrt{p_1 - p_r}) \\ Q_2 = k_{q2} x_v (s(x_v) \sqrt{p_2 - p_r} + s(-x_v) \sqrt{p_s - p_2}) \end{cases} \quad (3)$$

定义函数

$$s(*) = \begin{cases} 1 & (* \geq 0) \\ 0 & (* < 0) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $k_{q1} = C_d \omega_1 \sqrt{2/\rho}$ $k_{q2} = C_d \omega_2 \sqrt{2/\rho}$
 式中 p_s ——泵出口压力 p_r ——回油箱压力
 x_v ——伺服阀阀芯位移 C_d ——流量系数

ω_1, ω_2 ——伺服阀面积梯度

ρ ——液压油密度

忽略伺服阀的阀芯动态特性,将伺服阀阀芯位移与输入信号的关系简化为线性关系,可得: $x_v = \gamma u$,其中 γ 为增益系数,且 $\gamma > 0$, u 为输入电压信号。由此式(3)可转化为

$$\begin{cases} Q_1 = k_{q1} \gamma u (s(u) \sqrt{p_s - p_1} + s(-u) \sqrt{p_1 - p_r}) \\ Q_2 = k_{q2} \gamma u (s(u) \sqrt{p_2 - p_r} + s(-u) \sqrt{p_s - p_2}) \end{cases} \quad (5)$$

定义系统状态变量为

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [x_1, x_2, p_1, p_2]^T$$

则由式(1)、(2)变换可得系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{A_1}{m} x_3 - \frac{A_2}{m} x_4 - \frac{k}{m} x_1 - \frac{1}{m} F_l(t) \\ \dot{x}_3 = \beta_e h_1(x) [k_{q1} \gamma u R_1 - A_1 x_2 - C_t(x_3 - x_4)] \\ \dot{x}_4 = \beta_e h_2(x) [A_2 x_2 + C_t(x_3 - x_4) - k_{q1} \gamma u R_2] \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$h_1(x) = 1/(V_1 + A_1 x_1) \quad h_2(x) = 1/(V_2 - A_2 x_1)$$

$$R_1 = s(u) \sqrt{p_s - p_1} + s(-u) \sqrt{p_1 - p_r}$$

$$R_2 = k_{qc} [s(u) \sqrt{p_2 - p_r} + s(-u) \sqrt{p_s - p_2}]$$

$$k_{qc} = k_{q2}/k_{q1}$$

为了简化系统,定义不确定参数集 $\theta = [\theta_1, \theta_2, d(t), \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T$,其中: $\theta_1 = A_1/m$; $\theta_2 = K/m$; $d(t) = F_l(t)/m$; $\theta_3 = \beta_e k_{q1} r$; $\theta_4 = \beta_e A_1$; $\theta_5 = C_d \beta_e$ 。系统状态方程(6)由此转换为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \theta_1(x_3 - A_c x_4) - \theta_2 x_1 - d(t) \\ \dot{x}_3 = h_1[\theta_3 u R_1 - \theta_4 x_2 - \theta_5(x_3 - x_4)] \\ \dot{x}_4 = h_2[\theta_4 A_c x_2 + \theta_5(x_3 - x_4) - \theta_3 u R_2] \end{cases} \quad (7)$$

其中 $A_c = A_2/A_1$

从状态方程(6)和(7)可以看出,该电液系统为一非线性系统,且由于系统温度、工作环境的不同,其参数 C_t, β_e 及 C_d 也是不同的,因此这些参数均为不确定的。伺服阀的精确面积梯度 ω 也是很难得到的;在不同的环境下油液密度也有可能是不同的,使得 k_{q1}, k_{q2} 也是不确定的;负载质量 m 也是可变的,因此式(7)中参数 θ 均是不确定的。此外,式(7)中与 $d(t)$ 有关的项均为模型不确定项。但在实际系统中这些参数都是有界的。

2 多级滑模鲁棒自适应控制器设计

系统的输出为 $y = x_1$,假设系统的期望输出为

y_d , 即 $x_{1d}(t)$ 。那么控制器的设计目标就是使系统实际输出 x_1 尽可能地跟踪期望位置 y_d , 即使其满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} (y - y_d) = 0$ 。

定义 3 个单独滑模面: $s_i = x_i - x_{id}$ ($i = 1, 2, 3$), x_{1d} 即系统的期望输出, x_{id} 为各状态变量的期望值, 也是前一个子系统的虚拟控制量。为将系统(7)分解为 3 个一阶子系统, 定义 $P_L = x_3 - A_c x_4$, 将 P_L 作为系统(7)中前 2 个一阶子系统的控制输入, 由此第 3 个滑模面变为 $s_3 = P_L - \chi$, 其中 χ 为虚拟控制量 P_L 的期望值。这样前一子系统滑模的输出作为后一子系统滑模的输入, 使后面子系统的输出跟踪前一子系统所期望的输出值, 如此逐步向后递推, 得到系统(7)的控制器, 并且可以使系统输出跟踪期望的输出值。

虽然系统模型结构已知, 但是系统参数具有不确定性以及慢时变的特性, 会导致滑模控制精度的下降。因此, 在滑模控制中采用 Lyapunov 方法, 进行不确定参数自适应律的设计, 并结合鲁棒控制的方法, 提高对模型不确定项和未建模外力的抗干扰能力。

下面运用逆向递推的方法设计滑模鲁棒自适应控制器, 在以下各式中, $\tilde{d} = d - \hat{d}$, $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i$, \hat{d} 、 $\hat{\theta}_i$ 分别为 d 、 θ_i 的估计值, $i = 1, 2, \dots, 5$; ρ_j 、 α_j 、 β_j 为自适应增益, 且为正常数, $k_j > 0$, $j = 1, 2, 3$ 。

(1) 对滑模面 $s_1 = x_1 - y_d$ 求导并考虑方程(7)可得

$$\dot{s}_1 = \dot{x}_1 - \dot{y}_d = x_2 - \dot{y}_d \quad (8)$$

取虚拟控制量为

$$x_{2d} = \dot{y}_d - k_1 s_1 \quad (9)$$

其中 k_1 为正常数。

考虑式(8)及式 $s_2 = x_2 - x_{2d}$, 可得

$$\dot{s}_1 = s_2 - k_1 s_1 \quad (10)$$

定义 Lyapunov 函数: $V_1 = \frac{1}{2} s_1^2$ 。

对 V_1 求导, 同时考虑式(10), 可得

$$\dot{V}_1 = s_1 \dot{s}_1 = -k_1 s_1^2 + s_1 s_2$$

(2) 定义 $P_L = x_3 - A_c x_4$, 将其作为第 2 个一阶子系统的控制量。

对滑模面 $s_2 = x_2 - x_{2d}$ 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{s}_2 = & \theta_1 P_L - \theta_2 x_1 - \dot{d}(t) - \dot{x}_{2d} = \\ & -\hat{\theta}_2 x_1 - \hat{d}(t) + \hat{\theta}_1 P_L - \dot{x}_{2d} - \tilde{\theta}_2 x_1 - \tilde{d}(t) + \tilde{\theta}_1 P_L \end{aligned} \quad (11)$$

由式(9)求导, 并代入式(10)可得

$$\dot{x}_{2d} = \ddot{y}_d - k_1 \dot{s}_1 = \ddot{y}_d - k_1 s_2 + k_1^2 s_1 \quad (12)$$

取该步的虚拟控制量为

$$\chi = \frac{\hat{\theta}_2 x_1 + \hat{d}(t) + \dot{x}_{2d} - k_2 s_2}{\hat{\theta}_1} \quad (13)$$

由式(11)~(13)及式 $s_3 = P_L - \chi$ 可得

$$\dot{s}_2 = -k_2 s_2 + \theta_1 s_3 - \tilde{\theta}_2 x_1 - \tilde{d}(t) + \tilde{\theta}_1 \chi \quad (14)$$

定义 Lyapunov 函数

$$V_2 = \frac{1}{2} s_1^2 + \frac{1}{2} s_2^2 + \frac{1}{2} \rho_1 \tilde{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} \rho_2 \tilde{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} \rho_3 \tilde{d}^2(t)$$

对上式求导, 并考虑式(10)、(14)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & s_1 \dot{s}_1 + s_2 \dot{s}_2 - \rho_1 \tilde{\theta}_1 \dot{\tilde{\theta}}_1 - \rho_2 \tilde{\theta}_2 \dot{\tilde{\theta}}_2 - \rho_3 \tilde{d} \dot{\tilde{d}} = \\ & s_1 s_2 - k_1 s_1^2 - k_2 s_2^2 + \theta_1 s_2 s_3 - \tilde{\theta}_2 s_2 x_1 - \\ & \tilde{d} \dot{s}_2 \tilde{\theta}_1 \chi - \rho_1 \tilde{\theta}_1 \dot{\tilde{\theta}}_1 - \rho_2 \tilde{\theta}_2 \dot{\tilde{\theta}}_2 - \rho_3 \tilde{d}(t) \dot{\tilde{d}}(t) = \\ & -k_1 s_1^2 - k_2 s_2^2 + \theta_1 s_2 s_3 + s_1 s_2 + \tilde{\theta}_1 (s_2 \chi - \rho_1 \dot{\tilde{\theta}}_1) \cdot \\ & \tilde{\theta}_2 (-s_2 x_1 - \rho_2 \dot{\tilde{\theta}}_2) + \tilde{d}(t) (-s_2 - \rho_3 \dot{\tilde{d}}(t)) \end{aligned} \quad (15)$$

选取该步的虚拟自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_1 = \rho_1^{-1} s_2 \chi \\ \dot{\hat{\theta}}_2 = -\rho_2^{-1} s_2 x_1 \\ \dot{\hat{d}}(t) = -\rho_3^{-1} s_2 \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)可得

$$\dot{V}_2 = -k_1 s_1^2 - k_2 s_2^2 + s_1 s_2 + \theta_1 s_2 s_3$$

(3) 对式(13)求导可得

$$\dot{\chi} = (\hat{\theta}_2 \dot{x}_1 + \hat{\theta}_2 \dot{x}_2 + \dot{\hat{d}} + \ddot{x}_{2d} - k_2 \dot{s}_2) / \hat{\theta}_1 - \dot{\hat{\theta}}_1 \chi / \hat{\theta}_1 \quad (17)$$

其中 $\dot{x}_{2d} = \ddot{y}_d - k_1 \dot{s}_1 = \ddot{y}_d + k_1 \dot{y}_d - k_1 x_2$ (18)

$$\ddot{x}_{2d} = \ddot{y}_d + k_1 \ddot{y}_d - k_1 \dot{x}_2 =$$

$$\ddot{y}_d + k_1 \ddot{y}_d - k_1 \theta_1 P_L + k_1 \theta_2 x_1 + k_1 \dot{d}(t) \quad (19)$$

将式(18)、(19)代入式(17)可得

$$\begin{aligned} \dot{\chi} = & [(k_1 + k_2)(\hat{\theta}_2 x_1 + \hat{d} - \hat{\theta}_1 P_L) + \ddot{y}_d + k_1 k_2 y_d + \\ & \dot{\hat{d}}(k_1 + k_2) \ddot{y}_d - k_1 k_2 x_2 + \hat{\theta}_2 \dot{x}_1 + \hat{\theta}_2 x_2 - \dot{\hat{\theta}}_1 \chi] / \hat{\theta}_1 = \\ & \dot{\hat{\chi}} + (k_1 + k_2) (\tilde{\theta}_2 x_1 + \tilde{d} - \tilde{\theta}_1 P_L) / \hat{\theta}_1 \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\chi}} = & [(k_1 + k_2)(\hat{\theta}_2 \dot{x}_1 + \hat{d} - \hat{\theta}_1 P_L) + \ddot{y}_d + k_1 k_2 y_d + \\ & \dot{\hat{d}}(k_1 + k_2) \ddot{y}_d - k_1 k_2 x_2 + \hat{\theta}_2 \dot{x}_1 + \hat{\theta}_2 x_2 - \dot{\hat{\theta}}_1 \chi] / \hat{\theta}_1 \end{aligned}$$

由系统(7)可知

$$\begin{aligned} \dot{P}_L = & \dot{x}_3 - A_c \dot{x}_4 = (h_1 \theta_3 R_1 + A_c h_2 \theta_3 R_2) u - \\ & (A_c h_2 \theta_4 A_c + h_1 \theta_4) x_2 - (h_1 \theta_5 + A_c h_2 \theta_5) (x_3 - x_4) \end{aligned} \quad (21)$$

定义第 3 个滑模面为

$$s_3 = P_L - \chi \quad (22)$$

对式(22)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{s}_3 = \dot{P}_L - \dot{\chi} = & (h_1 R_1 + A_c h_2 R_2) \theta_3 u - (A_c h_2 A_c + h_1) \theta_4 x_2 - \\ & (h_1 + A_c h_2) \theta_5 (x_3 - x_4) - \dot{\chi} - \\ & (k_1 + k_2) (\tilde{\theta}_2 x_1 + \tilde{d} - \tilde{\theta}_1 P_L) / \hat{\theta}_1 \end{aligned} \quad (23)$$

取系统的实际控制量为

$$u = \frac{(A_c h_2 A_c + h_1) \hat{\theta}_4 x_2 + (h_1 + A_c h_2) \hat{\theta}_5 (x_3 - x_4) + \dot{\chi} - k_3 s_3}{(h_1 R_1 + A_c h_2 R_2) \theta_3} \quad (24)$$

将式(24)代入式(23)可得

$$\begin{aligned} \dot{s}_3 = & (h_1 R_1 + A_c h_2 R_2) \tilde{\theta}_3 u - (A_c h_2 A_c + h_1) \tilde{\theta}_4 x_2 - \\ & (h_1 + A_c h_2) \tilde{\theta}_5 (x_3 - x_4) - k_3 s_3 - \\ & (k_1 + k_2) (\tilde{\theta}_2 x_1 + \tilde{d} - \tilde{\theta}_1 P_L) / \hat{\theta}_1 \end{aligned} \quad (25)$$

定义 Lyapunov 函数

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} s_1^2 + \frac{1}{2} s_2^2 + \frac{1}{2} s_3^2 + \frac{1}{2} \alpha_1 \tilde{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} \alpha_2 \tilde{\theta}_2^2 + \\ & \frac{1}{2} \alpha_3 \tilde{d}^2 + \frac{1}{2} \beta_1 \tilde{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} \beta_2 \tilde{\theta}_4^2 + \frac{1}{2} \beta_3 \tilde{\theta}_5^2 \end{aligned}$$

考虑式(10)、(14)和(25),对上式求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s_1 \dot{s}_1 + s_2 \dot{s}_2 + s_3 \dot{s}_3 - \alpha_1 \tilde{\theta}_1 \dot{\tilde{\theta}}_1 - \alpha_2 \tilde{\theta}_2 \dot{\tilde{\theta}}_2 - \alpha_3 \tilde{d} \dot{\tilde{d}} - \\ & \beta_1 \tilde{\theta}_3 \dot{\tilde{\theta}}_3 - \beta_2 \tilde{\theta}_4 \dot{\tilde{\theta}}_4 - \beta_3 \tilde{\theta}_5 \dot{\tilde{\theta}}_5 = \\ & -k_1 s_1^2 - k_2 s_2^2 - k_3 s_3^2 + s_1 s_2 + \theta_1 s_2 s_3 - \\ & \tilde{\theta}_2 [s_2 x_1 + (k_1 + k_2) s_3 x_1 / \hat{\theta}_1 + \alpha_2 \tilde{\theta}_2] - \\ & \tilde{d} [s_2 + (k_1 + k_2) s_3 / \hat{\theta}_1 + \alpha_3 \tilde{d}] + \\ & \tilde{\theta}_1 [s_2 \chi + (k_1 + k_2) s_3 P_L / \hat{\theta}_1 - \alpha_1 \tilde{\theta}_1] + \\ & \tilde{\theta}_3 [(h_1 R_1 + A_c h_2 R_2) s_3 u - \beta_1 \tilde{\theta}_3] - \\ & \tilde{\theta}_4 [(A_c h_2 A_c + h_1) s_3 x_2 - \beta_2 \tilde{\theta}_4] - \\ & \tilde{\theta}_5 [(h_1 + A_c h_2) s_3 (x_3 - x_4) + \beta_3 \tilde{\theta}_5] \end{aligned} \quad (26)$$

选取系统的实际自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_1 = [s_2 \chi + (k_1 + k_2) s_3 P_L / \hat{\theta}_1] / \alpha_1 \\ \dot{\hat{\theta}}_2 = -[s_2 x_1 + (k_1 + k_2) s_3 x_1 / \hat{\theta}_1] / \alpha_2 \\ \dot{\hat{d}}(t) = -[s_2 + (k_1 + k_2) s_3 / \hat{\theta}_1] / \alpha_3 \\ \dot{\hat{\theta}}_3 = (h_1 R_1 + A_c h_2 R_2) s_3 u / \beta_1 \\ \dot{\hat{\theta}}_4 = -(A_c h_2 A_c + h_1) s_3 x_2 / \beta_2 \\ \dot{\hat{\theta}}_5 = -(h_1 + A_c h_2) s_3 (x_3 - x_4) / \beta_3 \end{cases} \quad (27)$$

将式(27)的自适应律代入式(26)中可得

$$\dot{V} = -k_1 s_1^2 - k_2 s_2^2 - k_3 s_3^2 + s_1 s_2 + \theta_1 s_2 s_3 = -\mathbf{S} \mathbf{Q} \mathbf{S}^T$$

$$\text{其中 } \mathbf{S} = [s_1, s_2, s_3]^T \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} k_1 & -\frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & k_2 & -\frac{\theta_1}{2} \\ 0 & -\frac{\theta_1}{2} & k_3 \end{bmatrix}$$

$$\text{则 } \det \mathbf{Q} = k_3 \left(k_1 k_2 - \frac{1}{4} \right) - k_1 \theta_1^2 / 4 \quad (28)$$

在系统(7)中, $\theta_1 = A_1 / m$, 由于无杆腔活塞作用面积 A_1 是一个常量, 负载质量 m 是有界的, 所以存在一个正常数 M , 使得 $\max(\theta_1) < M$ 。因此可以选取合适的 k_1, k_2, k_3 , 使

$$k_3 \left(k_1 k_2 - \frac{1}{4} \right) - k_1 M^2 / 4 > 0$$

$$\text{并且 } \begin{vmatrix} k_1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & k_2 \end{vmatrix} = k_1 k_2 - \frac{1}{4} > 0$$

由于 $k_1 > 0$, 所以矩阵 \mathbf{Q} 是正定的。由此可得 $\dot{V} = -\mathbf{S} \mathbf{Q} \mathbf{S}^T \leq 0$, 即 V 正定, \dot{V} 负定, 则系统(7)渐进稳定。因此 $\mathbf{S}, \boldsymbol{\theta}, d(t), V \in L_\infty$, 即它们均有界。定义

$$\mathbf{W}(t) = \mathbf{S} \mathbf{Q} \mathbf{S}^T = -\dot{V}(s_1(t), s_2(t), s_3(t))$$

对上式两边积分可得

$$\int_0^t \mathbf{W}(\tau) d\tau = V(s_1(0), s_2(0), s_3(0)) - V(s_1(t), s_2(t), s_3(t))$$

由于 $\dot{V} \leq 0$, V 是非增函数, 又因为 $V(s_1(0), s_2(0), s_3(0))$ 是有界的, 因此 $V(s_1(t), s_2(t), s_3(t)) < \infty$, 并且 $V(s_1(t), s_2(t), s_3(t)) \geq 0$, 所以可以得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \mathbf{W}(\tau) d\tau$ 。由式(10)、(14)、(25)可知 $\dot{\mathbf{S}}$ 有界, 所以 $\dot{\mathbf{W}}(t)$ 也是有界的。由 Barbalat 定理可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\mathbf{W}(t) \rightarrow 0$, 因此当 $t \rightarrow \infty$ 时, $S_i \rightarrow 0$, 所以 $y \rightarrow y_d$, 所以整个控制系统(7)是渐进稳定的。

3 实验结果

为测试多级滑模鲁棒自适应控制方法的性能, 在图2所示的实验装置上进行实验。其中, 伺服阀为博世力士乐公司的 HRV 电磁伺服阀, 控制输入为 $-10 \sim 10$ V, 供油泵为博世力士乐公司的齿轮泵, 排量为 $25 \text{ cm}^3/\text{rev}$, 铲斗关节油缸尺寸为 $40 \text{ mm} \times 22 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 泵出口安装有溢流阀, 将压力 p_s 设定为 6 MPa 。

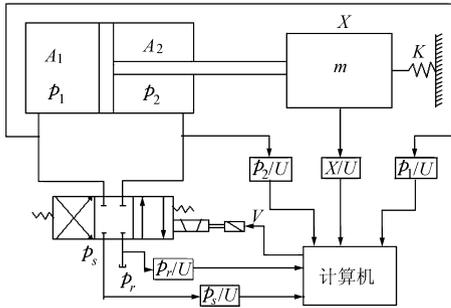


图 2 实验装置原理图

Fig.2 Experimental installation

设计的控制器中使用了 6 个系统状态量,其中非对称缸活塞杆位移 x_1 、液压缸无杆腔和有杆腔压力 p_1 、 p_2 由相应的位置传感器和压力变送器直接测量得到。非对称缸活塞杆速度 x_2 通过计算机对位移量 x_1 进行微分获得,这也实现了实时系统的数字控制。为提高控制系统的精度,供油压力 p_s 和回油压力 p_r 也都分别通过压力变送器直接测量得到。并且,所有模拟量 (x_2 、 p_1 、 p_2 、 p_s 和 p_r) 通过一个内置 16 位 A/D 和 D/A 板卡反馈给计算机。为尽量降低噪声的影响,所有测量信号都通过一个低通滤波器进行滤波处理。

控制器中主要参数的标称值设定如下:弹簧的有效弹性模量 $K = 7\ 000\ \text{N/m}$,此参数在控制过程中被作为一个常量对待;负载质量 $m = 100\ \text{kg}$;液压油的有效弹性模量 $\beta_e = 2\ 000\ \text{MPa}$;液压缸的内泄漏系数 $C_l = 2 \times 10^{-15}\ \text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa})$;比例阀口流量系数 $C_d = 0.7$;伺服阀开口梯度 $\omega = 2 \times 10^{-3}\ \text{m}$;液压油密度 $\rho = 900\ \text{kg/m}^3$ 。将活塞的初始位置设在液压缸的端部,即液压缸两腔的初始总控制容积为 $V_1 = 1.2 \times 10^{-4}\ \text{m}^3$ 和 $V_2 = 2.5 \times 10^{-4}\ \text{m}^3$ 。本文研究了实际系统运行过程中,当式(7)中的各个不确定参数和模型不确定项发生变化时,控制器的跟踪特性。

控制器参数选取为: $k_1 = k_2 = 20$, $k_3 = 100$, $\alpha_1 = 10^{-7}$, $\alpha_2 = 10^{-3}$, $\alpha_3 = 10^{-3}$, $\beta_1 = 10^{-2}$, $\beta_2 = 10^3$, $\beta_3 = 10^{-6}$ 。

为了说明参数的不确定性和负载模型不确定项对控制系统的影响,也同时验证本文设计的控制器的有效性,采用两种控制方法,并将其进行对比:本文提出的多级滑模鲁棒自适应控制;将第一种方法的参数自适应调节略去,即自适应律增益 $\alpha_i = \beta_i = 0$ ($i = 1, 2, 3$)。期望输出是频率为 $0.5\ \text{Hz}$ 的正弦信号 $x_d = 0.1 \sin(\pi t)$,两种控制方法的结果如图 3、图 4 所示。

控制输出误差如图 3、图 4 所示,从图 3 中可以看出,多级滑模鲁棒自适应控制方法的控制效果较好,输出误差小于 $0.2\ \text{mm}$;而不采用自适应参数调

节时,跟踪误差明显增加,输出误差最大值超过 $4\ \text{mm}$,这表明本文设计的控制方法有效地克服了参数不确定性和负载扰动对控制性能的影响,达到了较高的跟踪精度。非对称液压缸两腔压力 p_1 、 p_2 如图 5 所示,控制电压输入如图 6 所示,可以看出液压缸压力和控制输入都有界,且控制电压较平滑,无高频抖振现象。

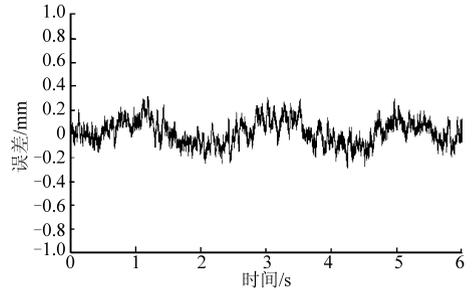


图 3 多级滑模鲁棒自适应控制跟踪误差曲线

Fig.3 Tracking error with parameter estimation

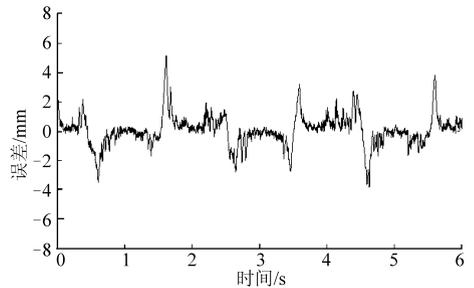


图 4 未进行参数自适应调节的跟踪误差曲线

Fig.4 Tracking error without parameter estimation

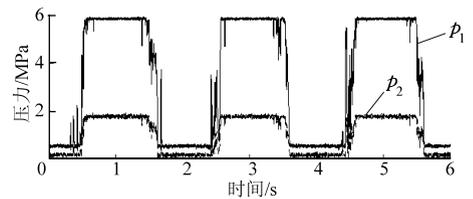


图 5 液压缸的两腔压力曲线

Fig.5 Pressures in two cylinder

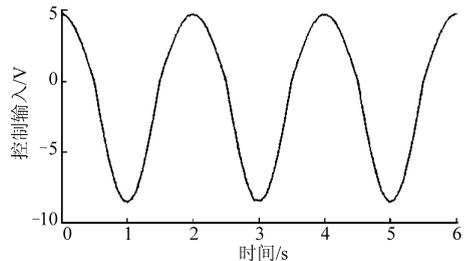


图 6 控制输入

Fig.6 Control input

4 结束语

对于阀控非对称缸这种高阶非线性系统,定义多个子滑模面,利用多滑模控制代替传统的 Backstepping 控制,把系统分成几个一阶子系统,以

消除各虚拟控制量之间的耦合关系,同时利用自适应的方法对系统不确定参数进行在线辨识,消除了参数漂移对控制精度的影响,并使用鲁棒控制使系统具有较强的抗负载能力。实验结果表明,多级滑模鲁棒自适应控制在电液伺服系统的位置跟踪控制

中能很好地克服系统的非线性特性、参数不确定性以及负载扰动的影响,达到较高的跟踪精度。比现有的其他控制算法更适用于高阶非线性系统,计算简单,能对参数进行在线实时调节,实用性强。

参 考 文 献

- 1 Raade J W, Kazerooni H. Analysis and design of a novel hydraulic power source for mobile robots[J]. IEEE Transactions on Automation science and Engineering, 2005, 2(3): 226~232.
- 2 Haggag S, Alstrom D, Cetinkunt S, et al. Modeling, control, and validation of an electro-hydraulic steer-by-wire system for articulated vehicle applications[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(6): 688~692.
- 3 Hong L, Kil T C, Tae S N, et al. Vehicle longitudinal brake control using variable parameter sliding control[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(4): 403~411.
- 4 Garagic D, Srinivasan K. Application of nonlinear adaptive control techniques to an electro-hydraulic velocity servomechanism [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(2): 303~314.
- 5 刘云峰, 缪栋. 电液伺服系统的自适应模糊滑模控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 140~144.
Liu Yunfeng, Liao Dong. Research on adaptive fuzzy sliding mode control for electro-hydraulic servo system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 140~144. (in Chinese)
- 6 管成, 朱善安. 一类非线性系统的微分与积分滑模自适应控制及其在电液伺服系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 103~108.
Guan Cheng, Zhu Shan'an. Derivative and integral sliding mode adaptive control for a class of nonlinear system and its application to an electro-hydraulic servo system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 103~108. (in Chinese)
- 7 管成, 朱善安. 电液伺服系统的多滑模鲁棒自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 931~938.
Guan Cheng, Zhu Shan'an. Multiple sliding mode robust adaptive control of an electro-hydraulic servo system[J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(6): 931~938. (in Chinese)
- 8 Liu R, Alleyne A. Nonlinear force/pressure tracking of an electro-hydraulic actuator[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2000, 122(3): 232~237.
- 9 Bin Y, Bu F P, 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.
- 10 Yun H, Bin Y. A globally stable high-performance adaptive robust control algorithm with input saturation for precision motion control of linear motor drive[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 12(2): 198~207.

(上接第 192 页)

- 9 张增年, 陈无畏, 郁明. 电动助力转向系统神经网络变结构控制器[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 1~4.
Zhang Zengnian, Chen Wuwei, Yu Ming. Electric power steering system neural network variable structure controller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 1~4. (in Chinese)
- 10 Kobayashi H, Katsura S, Ohnishi K. An analysis of parameter variations of disturbance observer for motion control[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3 413~3 421.
- 11 Umento T, Hori Y. Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1991, 38(5): 363~368.