

含有非线性不确定参数的电液系统滑模自适应控制

管 成, 潘双夏

(浙江大学 机械设计研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对含有非线性不确定参数的电液控制系统, 提出了一种滑模自适应控制方法. 该控制方法主要是为了解决由于初始控制容积的不确定性而引起的, 非线性不确定参数自适应律设计的难题. 其主要特点为, 通过定义一个新型的特殊Lyapunov 函数, 进而构建系统的自适应控制器及参数自适应律, 并结合滑模控制方法及一种简单的鲁棒设计方法, 给出整个电液系统的滑模自适应控制器, 及所有不确定参数的自适应律. 试验结果表明, 采用该控制方法能够取得良好的性能, 尤其可以补偿非线性不确定参数对系统的影响.

关键词: 自适应控制; 滑模控制; 电液控制系统; 非线性不确定参数; Lyapunov 方法

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

Sliding mode adaptive control of electro-hydraulic system with nonlinear unknown parameters

GUAN Cheng, PAN Shuang-xia

(Mechanical Design Institute, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: An adaptive sliding control method is proposed for an electro-hydraulic system with nonlinear unknown parameters. The proposed control method is for designing a nonlinear adaptive controller with adaptation laws to compensate the nonlinear uncertain parameters due to the uncertainty of the original controlled volumes. Firstly, we developed a novel type Lyapunov function to construct an asymptotically stable adaptive controller and present the adaptation laws of nonlinear uncertain parameters. Then, by combining sliding mode control with a simple robust method, the sliding mode adaptive controller with parameters update laws of the electro-hydraulic system is designed, which can compensate the system for uncertain nonlinearities, linear uncertain parameters and especially nonlinear uncertain parameters resulted from the uncertainty of the original controlled volumes. Finally, the experimental results show that the nonlinear control algorithm, together with the adaptation scheme, gives a good performance for the specified tracking task in the presence of unknown nonlinear parameters.

Key words: adaptive control; sliding control; electro-hydraulic system; nonlinear unknown parameter; Lyapunov stability

1 引言(Introduction)

由于自适应控制能有效地克服由于系统不确定性对系统性能的影响, 尤其是不确定参数对系统的影响, 所以很多学者在电液控制系统中提出了很多非线性的自适应控制方法, 如精确反馈自适应控制^[1], 滑模自适应控制^[2], 基于Backstepping的非线性自适应控制^[3~6]等. 近年来, 在电液系统中, 一些学者又提出了几种新的自适应方法^[7~10], 这些控制方法在一定条件下取得了良好的控制效果.

然而在这些自适应控制方法中, 一般总是假设液压缸两腔总的初始控制容积是确定已知的, 这样就使一个重要的假设, 即, 系统的不确定参数均可表示

为线性的是成立的. 但是在实际液压系统中, 初始控制容积的精确容积却是很难得到的, 并且对于不同的工作空间及不同的工作过程其值还是变化的. 因此, 液压缸两腔总的初始控制容积均是不确定的. 这样就会导致系统中非线性不确定参数的存在.

为此, 本文以双作用液压缸电液系统为基础, 定义一特殊类型的Lyapunov函数, 进而导出具有非线性不确定参数系统的非线性自适应控制器及非线性不确定参数自适应律的设计方法. 并结合滑模控制理论, 给出整个电液控制系统的滑模自适应控制器及所有不确定参数自适应律的设计方法. 另外为了避免抖振现象, 设计了一种简单的鲁棒控制方法来

代替变结构控制,以补偿模型不确定项对系统的影响。

最后试验结果表明,该控制方法可取得良好的控制性能,具有较强的鲁棒特性,能够很好地克服非线性不确定参数对系统的影响。

2 系统动力学模型(System dynamic model)

本文所研究的电液系统如图1所示,该系统包括一个双出杆液压缸,一个伺服阀,及负载系统.下面首先建立系统的动力学模型。

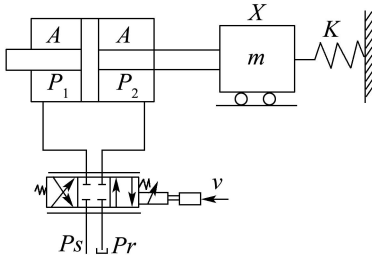


图1 电液系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of the hydraulic system

系统力平衡方程为

$$(P_1 - P_2)A = m\ddot{x} + Kx + F_l(t). \quad (1)$$

式中: x 为负载位移, m 为负载质量, P_1, P_2 分别为液压缸两腔的压力, A 为活塞作用面积, K 为弹簧刚度, $F_l(t)$ 为包括外负载力、摩擦力、粘性阻力以及一些难于建模的阻力等。

忽略外泄漏的影响,系统流量方程可表示为

$$\begin{cases} A\dot{x} + C_t(P_1 - P_2) + \frac{V_1 + Ax}{\beta_e} \dot{P}_1 = Q_1, \\ A\dot{x} + C_t(P_1 - P_2) = \frac{V_2 - Ax}{\beta_e} \dot{P}_2 + Q_2. \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_t 为液压缸内泄漏系数, B_e 为油液弹性刚度, V_1, V_2 分别为液压缸两腔总的初始控制容积, Q_1 为流入液压缸左腔的流量, Q_2 为流出液压缸右腔的流量. Q_1, Q_2 可表示为

$$\begin{cases} Q_1 = g_1 u [s(u) \sqrt{P_s - P_1} + s(-u) \sqrt{P_1 - P_r}], \\ Q_2 = g_2 u [s(u) \sqrt{P_2 - P_r} + s(-u) \sqrt{P_s - P_2}]. \end{cases} \quad (3)$$

定义方程:

$$s(*) = \begin{cases} 1, & \text{if } * > 0, \\ 0, & \text{if } * < 0, \end{cases}$$

$$g_1 = \tau C_d w_1 \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \quad g_2 = \tau C_d w_2 \sqrt{\frac{2}{\rho}}.$$

式中: P_s 为系统压力, P_r 为回油压力, x_v 为伺服阀阀芯位移, C_d 为流量系数, w 为伺服阀面积梯度, ρ 为油液密度, τ 为放大系数, u 为输入电压。

定义系统状态变量为 $x = [x_1, x_2, x_3]^T \triangleq$

$[\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3]^T$. 由式(1)~(3)可得系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = x_3, \\ \dot{x}_3 = \frac{A\beta_e}{m(V_1 + Ax_1)} [-Ax_2 - \frac{C_t}{A}(mx_3 + Kx_1 + l) + g_1 R_1 u] - \\ \frac{A\beta_e}{m(V_2 - Ax_1)} [Ax_2 + \frac{C_t}{A}(mx_3 + Kx_1 + F_l) - g_2 R_2 u] - \frac{K}{m} x_2 - \frac{\dot{F}_l}{m}. \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$R_1 = s(u) \sqrt{P_s - P_1} + s(-u) \sqrt{P_1 - P_r},$$

$$R_2 = s(u) \sqrt{P_2 - P_r} + s(-u) \sqrt{P_s - P_2}.$$

假设系统的期望输出轨迹为 $x_d(t)$, 本文的目标就是要设计一个控制器使系统的实际输出 x_1 尽可能地跟踪期望运动轨迹 $x_d(t)$, 根据系统的实际情况, 给出以下假设

假设1 期望位移 $x_d(t)$, 期望速度 $\dot{x}_d(t)$, 以及加速度 $\ddot{x}_d(t)$ 都是有界的。

3 控制器设计(Controller design)

首先定义参数 $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6]^T$ 为

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{A\beta_e}{m}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\beta_e C_t}{A}, \quad \varepsilon_3 = \frac{K\beta_e C_t}{Am}, \\ \varepsilon_4 &= \frac{g_1 \beta_e}{m}, \quad \varepsilon_5 = \frac{g_2 \beta_e}{m}, \quad \varepsilon_6 = \frac{K}{m}; \end{aligned}$$

参数 $\beta = [\beta_1, \beta_2]^T$ 为

$$\beta_1 = \frac{V_1}{A}, \quad \beta_2 = \frac{V_2}{A}$$

及

$$d_1(t) = \frac{\beta_e C_t}{Am} F_l(t), \quad d_2(t) = \frac{\dot{F}_l(t)}{m}.$$

因此系统状态方程(4)转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{\beta_1 + x_1} [-\varepsilon_1 x_2 - \varepsilon_2 x_3 - \varepsilon_3 x_1 - d_1(t) + \varepsilon_4 R_1 u] - \\ \frac{1}{\beta_2 - x_1} [\varepsilon_1 x_2 + \varepsilon_2 x_3 + \varepsilon_3 x_1 + d_1(t) - \varepsilon_5 R_2 u] - \varepsilon_6 x_2 - d_2(t). \end{cases} \quad (5)$$

再定义参数 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9]^T$ 为

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \varepsilon_3(\beta_1 + \beta_2), \quad \theta_2 = \varepsilon_1(\beta_1 + \beta_2) + \varepsilon_6 \beta_1 \beta_2, \\ \theta_3 &= \varepsilon_2(\beta_1 + \beta_2), \quad \theta_4 = \varepsilon_6(\beta_2 - \beta_1), \quad \theta_5 = \varepsilon_6, \\ \theta_6 &= \varepsilon_4 \beta_2, \quad \theta_7 = \varepsilon_5 \beta_1, \quad \theta_8 = \varepsilon_5, \quad \theta_9 = \varepsilon_4; \end{aligned}$$

参数 $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2]^T$ 为

$$\varphi_1 = \beta_1 \beta_2, \quad \varphi_2 = \beta_2 - \beta_1.$$

将参数 θ, φ 代入式(5)得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2} \{ -\theta_1 x_1 - \theta_2 x_2 - \\ \theta_3 x_3 - \theta_4 x_1 x_2 + \theta_5 x_1^2 x_2 - \\ (\beta_1 + \beta_2) d_1(t) - (\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - \\ x_1^2) d_2(t) + [\theta_6 R_1 + \theta_7 R_2 + \\ \theta_8 R_2 x_1 - \theta_9 R_1 x_1] u \}. \end{cases} \quad (6)$$

从状态方程(5)和(6)可以看出, 该电液系统为一非线性系统, 且由于系统温度, 工作环境等的不同, 其参数 C_t, β_e 及 C_d , 等均是不同的, 因此在式(5)和(6)中的线性参数 ε 及 θ 都是不确定的. 另外式(5)中的 $d_1(t), d_2(t)$ 及式(6)中的与 $d_1(t), d_2(t)$ 有关的项均为模型不确定项.

特别地, 可清楚看到, 在状态方程(5)与(6)中, 参数 β_1, β_2 或 φ_1, φ_2 明显为非线性的. 如前言中所述, 初始控制容积 V_1, V_2 为不确定的, 且 $\beta_1 = \frac{V_1}{A}, \beta_2 = \frac{V_2}{A}$, 所以 β_1, β_2 实际上是不确定的, 显然参数 $\varphi_1 = \beta_1 \beta_2, \varphi_2 = \beta_2 - \beta_1$ 也是不确定的.

尽管 β_1, β_2 是不确定的, 但在实际系统中, 它们却是有界的, 且大于零; 另外 $\theta, d_1(t)$ 及 $d_2(t)$ 也均是有界的. 因此给出以下假设:

假设 2 $L_1 \leq \beta_1 \leq B_1, L_2 \leq \beta_2 \leq B_2; |d_1(t)| \leq D_1, |d_2(t)| \leq D_2$.

其中 L_1, L_2, B_1, B_2 , 以及 D_1, D_2 均为正常数, 而且 L_1 大于最大的负位移绝对值, L_2 大于最大的正位移. 由假设2可得

$$|\varphi_1| \leq B_1 B_2, |\varphi_1| \leq \max(B_1, B_2), \quad (7)$$

$$(\beta_1 + x_1)(\beta_2 - x_1) = \varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2 > 0. \quad (8)$$

假设 3 1) $\theta_i \in \Omega_{\theta_i} \triangleq [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$; 2) $\theta_6 R_1 + \theta_7 R_2 + (\theta_8 R_2 - \theta_9 R_1) \neq 0, \forall \theta_i \in \Omega_{\theta_i}$.

其中 $i = 6, 7, 8, 9$.

3.1 一类含有非线性不确定参数的一阶系统自适应控制(Adaptive control of a class of nonlinear system with nonlinear unknown parameters)

先考虑如下的一类典型带有非线性不确定参数的一阶非线性系统

$$\dot{x} = \frac{\sigma_1^T f_{l1}(x) + \sigma_2^T f_{l2}(x)}{\sigma_3^T f_{n0}(x)}. \quad (9)$$

式中: x 为系统状态变量, u 为控制输入, $f_{l1}(x), f_{l2}(x)$ 及 $f_{n0}(x)$ 均为连续函数集, σ_1, σ_2 及 σ_3 均为不确定参数集, 其中参数 σ_3 为非线性的. 控制目标就是使系统实际输出 x 跟踪期望输出 x_d .

假设 4 $\sigma_i \in \Omega_{\sigma_i} \triangleq [\sigma_{i\min}, \sigma_{i\max}], i = 1, 2, 3$ 且 $\sigma_2^T f_{l2}(x) \neq 0, \forall \sigma_2 \in \Omega_{\sigma_2}; \sigma_3^T f_{n0}(x) \neq 0, \forall \sigma_3 \in \Omega_{\sigma_3}$.

定义 $\hat{\sigma}_i$ 为 σ_i 的估计值, $\tilde{\sigma}_i$ 表示估计误差 $\tilde{\sigma}_i = \sigma_i - \hat{\sigma}_i$. 定义跟踪误差 $e = x - x_d$.

选取特殊类型的Lyapunov函数为

$$V_0 = \frac{1}{2} \sigma_3^T f_{n0}(x) \eta(x) e^2. \quad (10)$$

这里函数 $\eta(x) \in R$, 且满足如下条件:

1) 连续可导; 2) 保证函数 $\sigma_3^T f_{n0}(x) \eta(x) > 0$.

因此对于跟踪误差 e , 函数 V_0 为正定的. 下面就基于这个Lyapunov函数 V_0 , 推导一控制器使 $\dot{V}_0 \leq 0$ 以得到渐近稳定的跟踪控制.

误差 e 沿系统(9)的时间导数为

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_d = \frac{\sigma_1^T f_{l1}(x) + \sigma_2^T f_{l2}(x)}{\sigma_3^T f_{n0}(x)} - \dot{x}_d. \quad (11)$$

考虑式(10)(11), V_0 的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 = & \frac{1}{2} \sigma_3^T e^2 \left\{ \frac{d[f_{n0}(x)]}{dt} \eta(x) + f_{n0}(x) \frac{d[\eta(x)]}{dt} \right\} + \\ & \eta(x) e [\sigma_1^T f_{l1}(x) + \sigma_2^T f_{l2}(x) u - \sigma_3^T f_{n0}(x) \dot{x}_d]. \end{aligned} \quad (12)$$

可明显看出, 上式中不含有非线性参数, 即: 所有参数均为线性的. 因此通过定义式(10)所示的特殊Lyapunov函数, 将非线性不确定参数的问题转化为了线性不确定参数的问题. 所以即可采用传统的方法进行控制器及自适应律的设计, 控制器设计为

$$u = \frac{1}{\hat{\sigma}_2^T f_{l2}(x)} \{ \hat{\sigma}_3^T f_{n0}(x) \dot{x}_d - \hat{\sigma}_1^T f_{l1}(x) - \frac{ke}{\eta(x)} - \frac{1}{2\eta(x)} \hat{\sigma}_3^T e f(x) \}. \quad (13)$$

式中

$$\overline{f(x)} = \frac{d[f_{n0}(x)]}{dt} \eta(x) + f_{n0}(x) \frac{d[\eta(x)]}{dt}.$$

将控制器(13)代入式(12)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 = & -ke^2 + \frac{1}{2} \tilde{\sigma}_3^T e^2 \overline{f(x)} + \eta(x) e [\tilde{\sigma}_1^T f_{l1}(x) + \\ & \tilde{\sigma}_{21}^T f_{l2}(x) u - \tilde{\sigma}_3^T f_{n0}(x) \dot{x}_d]. \end{aligned} \quad (14)$$

为了得到参数的自适应律, 定义如下的Lyapunov函数

$$V_d = V_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \tilde{\sigma}_i^T T_i^{-1} \tilde{\sigma}_i. \quad (15)$$

考虑式(14)(15), V_d 的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_d = & -ke^2 + \tilde{\sigma}_1^T \left[\eta(x) e f_{l1}(x) - T_1^{-1} \dot{\tilde{\sigma}}_1 \right] + \\ & \tilde{\sigma}_2^T \left[\eta(x) e f_{l2}(x) u - T_2^{-1} \dot{\tilde{\sigma}}_2 \right] + \\ & \frac{1}{2} \tilde{\sigma}_3^T e \left[\overline{f(x)} - 2\eta(x) f_{n0}(x) \dot{x}_d \right] - \tilde{\sigma}_3^T T_3^{-1} \dot{\tilde{\sigma}}_3. \end{aligned} \quad (16)$$

为了使 $\dot{V}_d \leq 0$, 并保证 $\hat{\sigma}_2^T f_{l2}(x) \neq 0$, 选取参数自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\sigma}}_1 = T_1 \eta(x) e f_{l1}(x), \\ \dot{\hat{\sigma}}_2 = \text{Proj}_{\sigma_2} [T_2 \eta(x) e f_{l2}(x) u], \\ \dot{\hat{\sigma}}_3 = \frac{1}{2} T_3 e [\overline{ef(x)} - 2\eta(x) f_{n0}(x) \dot{x}_d]. \end{cases} \quad (17)$$

其中函数 $\text{Proj}_{\sigma_2}(\cdot)$ 应使以下条件得到满足:

$$\begin{cases} \hat{\sigma}_2^T f_{l2}(x) \neq 0, \\ \tilde{\sigma}_2^T [\eta(x) e f_{l2}(x) u - T_2^{-1} \dot{\hat{\sigma}}_2] \leq 0. \end{cases} \quad (18)$$

这里简单选取函数 $\text{Proj}_{\sigma_2}(\cdot)$ 为

$$\text{Proj}_{\sigma_2}(\cdot) = \begin{cases} 0, & \text{if } \hat{\sigma}_2 = \sigma_{2\max} \text{ and } \cdot > 0, \\ 0, & \text{if } \hat{\sigma}_2 = \sigma_{2\min} \text{ and } \cdot < 0, \\ \cdot, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (19)$$

将式(17)所示自适应律代入式(16)可得 $\dot{V}_d = -ke^2 \leq 0$, 因此可容易证明系统是渐近稳定的, 并得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$.

根据以上分析得到如下定理.

定理 1 对于含有非线性不确定参数的非线性系统(9), 若满足假设4,5, 则在控制器(13)及自适应律(17)作用下, 整个闭环控制系统是全局稳定的, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_d(t)$.

3.2 电液系统控制器设计(Electro-Hydraulic System Controller Design)

下面, 将采用以上方法, 对含有非线性不确定参数 φ_1, φ_2 的非线性系统(6)进行控制器及参数自适应律的设计, 以使跟踪误差收敛为零, 或使其绝对值尽可能的小.

令跟踪误差为 $e_p(t) = x_1(t) - x_d(t)$.

为减小系统稳态误差, 定义含有积分项的滑模面

$$\begin{aligned} z(t) &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^3 \int_0^t e_p(\tau) d\tau = \\ &\ddot{e}_p(t) + 3\lambda \dot{e}_p(t) + 3\lambda^2 e_p(t) + \lambda^3 \int_0^t e_p(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (20)$$

式中 λ 为正常数.

首先, 给出如下引理:

引理 1 对于滑模面(20), 若 $|z(t)| \leq M$, 则跟踪误差满足: 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $|e_p(t)| \leq \frac{2M}{\lambda^2}$. M 为正常数.

证 由式(20)得到 $z(t)$ 的时间导数为

$$\dot{z}(t) = \ddot{e}_p(t) + 3\lambda \dot{e}_p(t) + 3\lambda^2 e_p(t) + \lambda^3 e_p(t).$$

定义 $y(t) = e_p(t)e^{\lambda t}$, 则

$$\ddot{y} = \dot{z}e^{\lambda t}. \quad (21)$$

对式(21)积分可得

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) - \ddot{y}(0) &= \\ z(t)e^{\lambda t} - z(0) - \lambda \int_0^t z e^{\lambda \tau} d\tau &\leq \\ M e^{\lambda t} + \lambda M \int_0^t z e^{\lambda \tau} d\tau - z(0) &= \\ 2M e^{\lambda t} - z(0) - M. \end{aligned}$$

因此得到

$$\ddot{y}(t) \leq 2M e^{\lambda t} + c_1. \quad (22)$$

式中 $c_1 = \ddot{y}_0 - z(0) - M$, 同理可得

$$\ddot{y}(t) \geq -2M e^{\lambda t} + \bar{c}_1. \quad (23)$$

式中: $\bar{c}_1 = \ddot{y}_0 - z(0) + M$. 对式(22)积分可得 $\dot{y}(t) \leq 2\frac{M}{\lambda} e^{\lambda t} + c_1 t + c_2$, 式中 $c_2 = \dot{y}(0) - \frac{2M}{\lambda}$, 再对该不等式进行积分得到

$$y(t) \leq \frac{2M}{\lambda^2} e^{\lambda t} + \frac{1}{2} c_1 t^2 + c_2 t + c_3.$$

式中 $c_3 = y(0) - \frac{2M}{\lambda^2}$, 所以得到

$$\begin{aligned} e_p(t) = y(t)e^{-\lambda t} &\leq \\ \frac{2M}{\lambda^2} + \left(\frac{1}{2} c_1 t^2 + c_2 t + c_3 \right) e^{-\lambda t}. \end{aligned}$$

因此可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_p(t) \leq \frac{2M}{\lambda^2}$. 同理由式(23)可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_p(t) \geq -\frac{2M}{\lambda^2}$, 因此得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e_p(t)| \leq \frac{2M}{\lambda^2}$, 即, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $|e_p(t)| \leq \frac{2M}{\lambda^2}$.

证毕.

下面本文就设计一控制器使滑模面趋向于零, 或使其绝对值尽可能的小.

由式(8)可知 $\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2 > 0$, 所以这里简单选取函数 $\eta(x) = 1$, 采用3.1节的方法, 定义特殊Lyapunov函数为 $V_z = \frac{1}{2} (\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2) z^2$.

V_z 沿系统(6)的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_z &= \frac{1}{2} \varphi_2 x_2 z^2 + z[-\theta_1 x_1 - \theta_2 x_2 - \theta_3 x_3 - \\ &\theta_4 x_1 x_2 + \theta_5 x_1^2 x_2 - (\beta_1 + \beta_2) d_1(t) - \\ &(\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2) d_2(t)] + \\ &z[\theta_6 R_1 + \theta_7 R_2 + \theta_8 R_2 x_1 - \theta_9 R_1 x_1] u + \\ &z(\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2) \alpha. \end{aligned} \quad (24)$$

式中

$$\begin{aligned} \alpha &= 3\lambda x_3 + 3\lambda^2 x_2 + \lambda^3 x_1 - \ddot{x}_d - \\ &3\lambda \dot{x}_d - 3\lambda^2 \dot{x}_d - \lambda^3 \dot{x}_d. \end{aligned}$$

设计控制器为

$$u = \frac{u_1 + u_2 + u_3}{\hat{\theta}_6 R_1 + \hat{\theta}_7 R_2 + (\hat{\theta}_8 R_2 - \hat{\theta}_9 R_1) x_1}. \quad (25)$$

式中:

$$\begin{aligned} u_1 &= x_1 x_2 z + x_1^2 \alpha, \\ u_2 &= \hat{\theta}_1 x_1 + \hat{\theta}_2 x_2 + \hat{\theta}_3 x_3 + \hat{\theta}_4 x_1 x_2 - \\ &\quad \hat{\theta}_5 x_1^2 x_2 - \hat{\varphi}_1 \alpha - \frac{1}{2} \hat{\varphi}_2 (x_2 z + 2x_1 \alpha), \end{aligned}$$

$\hat{\theta}_i$ 表示 θ_i 的估计值, $i = 1, 2, \dots, 9$, $\hat{\varphi}_i$ 表示 φ_i 的估计值, $j = 1, 2$.

下面将设计一鲁棒控制器 u_3 来补偿与 $d_1(t)$, $d_2(t)$ 有关的模型不确定项. 对这类问题, 通常采用变结构的控制方法, 然而在变结构控制器中含有非连续函数, 从而导致系统的抖振现象, 使控制性能受到影响. 为此, 本文采用一个简单的鲁棒控制方法.

考虑式(7)(8)及假设2, 设计鲁棒控制器 u_3 为

$$u_3 = -hz - D_1(B_1 + B_2) \frac{z}{\delta} - D_2 \frac{z}{\delta} [B_1 B_2 + \max(B_1, B_2) \cdot \max(L_1, L_2)].$$

式中 h, δ 均为正常数.

采用3.1节的方法, 设计自适应律为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_a &= -\Gamma_1 z [x_1, x_2, x_3, x_1 x_2, -x_1^2 x_2]^T, \\ \dot{\hat{\theta}}_b &= \text{Proj}_{\theta_i} \{ \Gamma_2 z u [R_1, R_2, R_2 x_1, -R_1 x_1]^T \}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\dot{\hat{\varphi}} = \Gamma_3 z \left[\alpha, \frac{1}{2} (x_2 z + 2x_1 \alpha) \right]^T. \quad (27)$$

式中: $\theta_a = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5]^T$, $\theta_b = [\theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9]^T$, $\hat{\theta}_a, \hat{\theta}_b$ 分别表示参数 θ_a, θ_b 的估计值; Γ_1, Γ_2 , 及 Γ_3 为正定常对角矩阵.

定理2 对于满足假设1,2及3的非线性电液系统(6), 当采用控制器(25), 以及式(26)~(28)所示的自适应律时, 有

1) 跟踪误差 $e_p(t) = x(t) - x_d(t)$, 滑模面 $z(t)$ 以及估计参数 $\hat{\theta}_a = [\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3, \hat{\theta}_4, \hat{\theta}_5]^T$, $\hat{\theta}_b = [\hat{\theta}_6, \hat{\theta}_7, \hat{\theta}_8, \hat{\theta}_9]^T$ 均是有界的.

2) 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 跟踪误差 $e_p(t)$ 的绝对值收敛于 $\frac{2\delta}{\lambda^2}$ 内, 即, $\lim_{t \rightarrow \infty} |e_p(t)| \leq \frac{2\delta}{\lambda^2}$.

证 定义Lyapunov函数为

$$\begin{aligned} V &= V_z + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_a^T \Gamma_1^{-1} \theta_a + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_b^T \Gamma_2^{-1} \theta_b + \\ &\quad \frac{1}{2} \tilde{\varphi}^T \Gamma_3^{-1} \varphi. \end{aligned} \quad (28)$$

式中: $\tilde{\theta}_a = \theta_a - \hat{\theta}_a$, $\tilde{\theta}_b = \theta_b - \hat{\theta}_b$, $\tilde{\varphi} = \varphi - \hat{\varphi}$.

联立式(24)(25), 以及自适应律(26)~(28), 并由3.1节可得 V 的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_z - \tilde{\theta}_a^T \Gamma_1^{-1} \dot{\hat{\theta}}_a - \tilde{\theta}_b^T \Gamma_2^{-1} \dot{\hat{\theta}}_b - \tilde{\varphi}^T \Gamma_3^{-1} \dot{\hat{\varphi}} \leq \\ &\quad -D_1(B_1 + B_2) \frac{z^2}{\delta} - (\beta_1 + \beta_2) d_1(t) z - \\ &\quad h z^2 - \Delta \frac{z^2}{\delta} - (\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2) d_2(t) z. \end{aligned} \quad (29)$$

式中

$$\Delta = D_2 [B_1 B_2 + \max(B_1 + B_2) \max(L_1, L_2)].$$

由假设2及式(7)(8)可得 $\Delta \geq (\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2) |d_2(t)|$, 因此

$$\begin{aligned} -\Delta \frac{z^2}{\delta} - (\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2) d_2(t) z \leq \\ \frac{\delta [(\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2) d_2(t)]^2}{4\Delta} \leq \frac{\delta \Delta}{4}, \end{aligned} \quad (30)$$

以及

$$\begin{aligned} -D_1(B_1 + B_2) \frac{z^2}{\delta} - (\beta_1 + \beta_2) d_1(t) z \leq \\ \frac{\delta D_1(B_1 + B_2)}{4}. \end{aligned} \quad (31)$$

联立式(30)~(32)得

$$\dot{V} \leq -h z^2 + \frac{\delta [D_1(B_1 + B_2) + \Delta]}{4}. \quad (32)$$

因为 $\frac{\delta [D_1(B_1 + B_2) + \Delta]}{4}$ 为一已知正常数, 所以 V 、滑模面 $z(t)$ 以及 $\tilde{\theta}_a, \tilde{\theta}_b, \tilde{\varphi}$ 均是有界的, 又因参数 $\theta_a, \theta_b, \varphi$ 也都是有界的, 因此 $\hat{\theta}_a, \hat{\theta}_b$ 及 $\hat{\varphi}$ 均是有界的, 则定理2中的1)成立.

若 $|z| \geq \delta$, 则

$$\begin{aligned} -\Delta \frac{z^2}{\delta} - (\varphi_1 + \varphi_2 x_1 - x_1^2) d_2(t) z \leq 0, \\ -D_1(B_1 + B_2) \frac{z^2}{\delta} - (\beta_1 + \beta_2) d_1(t) z \leq 0, \end{aligned}$$

所以 $\dot{V} \leq -h z^2 \leq 0$, 因此在有限时间内, $|z|$ 收敛于 δ 内, 即, $|z(t)| \leq \delta$. 由引理1可得, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $|e_p(t)| \leq \frac{2\delta}{\lambda^2}$, 则定理2中的2)成立.

证毕

4 试验结果(Experimental results)

为了验证控制器的效果, 笔者进行了试验研究, 其中伺服阀选为Bosch公司的HRV型高频响伺服阀, 其输入电压为 $[-10 \ 10]$ V; 液压缸参数为 $40 \text{ mm}/22 \text{ mm}/300 \text{ mm}$; 系统压力设定为 60 bar .

系统参数的初始值设为: $K = 7000 \text{ N/m}$, $m = 100 \text{ kg}$, $\beta_e = 700 \text{ MPa}$, $C_t = 10^{-15} \text{ m}^3 \text{ s}^1 / \text{Pa}$, $V_1 = 2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $V_2 = 2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $g_1 = g_2 = 3.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} / (\text{V} \sqrt{\text{Pa}})$. 控制器参数

选为: $D_1 = 0.05$, $D_2 = 0.01$, $\delta = 0.01$, $L_1 = 0.1$, $L_2 = 0.2$, $B_1 = B_2 = 0.7$, $\lambda = 6$, $h = 20$, $\Gamma_1 = \text{diag}\{40, 10^3, 0.01, 10^3, 10^3\}$, $\Gamma_2 = \text{diag}\{10^4, 10^3, 0.15, 0.15\}$, $\Gamma_3 = \text{diag}\{10, 10\}$.

实验中采用了两种控制方法, 并将结果进行对比. 一种就是本文提出的滑模自适应控制; 另一种方法与本文的方法一样, 但不进行自适应调节, 即, 令 $\Gamma_1 = \text{diag}\{0, 0, 0, 0, 0\}$, $\Gamma_2 = \text{diag}\{0, 0, 0\}$, $\Gamma_3 = \text{diag}\{0, 0\}$.

期望输出位移为0.5 Hz的正弦信号 $x_d = 0.1 \sin(\pi t)$ m. 当令非线性参数 β_1, β_2 不变化时, 输出误差如图2所示. 从图2(a)(b)中可以看出, 两种方法均取得了较好的效果, 但当不使用自适应律时, 误差大约大了0.03 mm, 这是由于在系统运行过程中其它参数发生变化, 或与控制器的初始设定值不同引起的, 这也正说明了自适应律的有效性.

为了测试非线性不确定参数 β_1, β_2 对系统性能的影响, 及本文的滑模自适应控制方法的有效性, 将伺服阀与液压缸之间的连接管路加长约一倍, 以增加初始控制容积 V_1, V_2 的值, 从而改变 β_1, β_2 的大小. 试验结果如图3、图4所示. 图3为输出误差, 从图中可以看出, 采用本文方法时, 输出误差大小变化不大. 当不采用自适应律时, 跟踪误差大大增加, 最大误差从大约0.08 mm增至2 mm以上. 这表明非线性参数 β_1, β_2 的变化对系统控制性能有较大的影响, 而采用本文的控制方法能够有效地克服这种影响. 如图4所示, 控制输入信号是有界的, 且在允许范围之内, 另外输入信号也是较光滑的, 无振动现象出现.

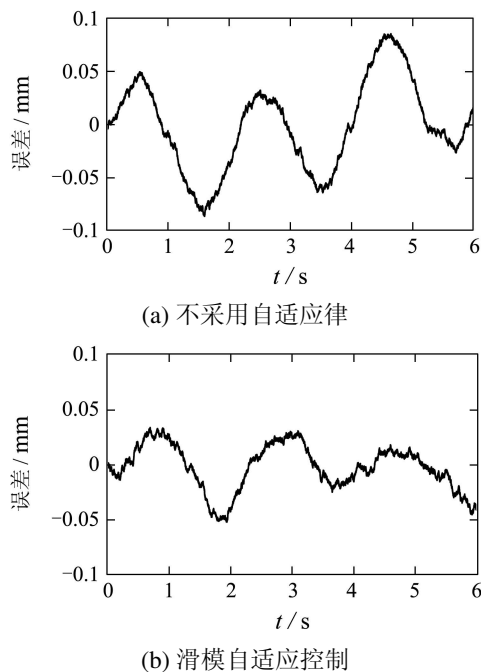
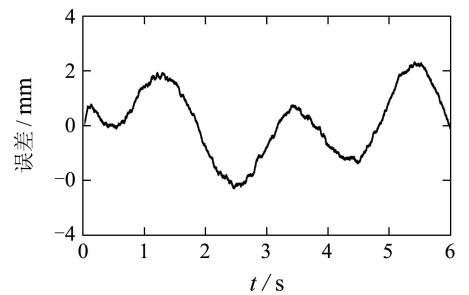
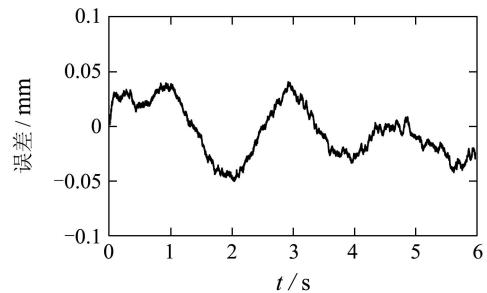


图2 V_1, V_2 不变化时的跟踪误差

Fig. 2 Tracking errors with no change of V_1, V_2



(a) 不采用自适应律



(b) 滑模自适应控制

图3 V_1, V_2 变化时的跟踪误差

Fig. 3 Tracking errors with V_1, V_2 changes

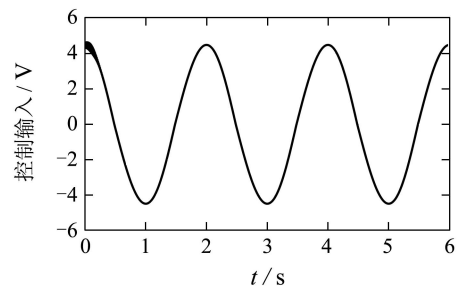


图4 V_1, V_2 变化时的控制输入

Fig. 4 Control input with V_1, V_2 changes

5 结论(Conclusion)

针对具有非线性不确定参数的电液控制系统, 提出了一种滑模自适应控制方法. 通过选择一个特殊的Lyapunov函数, 推导出了对含有非线性不确定参数系统的控制器及自适应律的设计方法, 并结合滑模控制方法, 给出了整个电液系统的滑模自适应控制器及所有不确定参数自适应律的设计方法. 试验结果显示了该方法的有效性较强的鲁棒特性.

参考文献(References):

- [1] GARAGIC D, SRINIVASAN K. Application of nonlinear adaptive control techniques to an electro hydraulic velocity servomechanism[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2004, 12(2): 303–314.
- [2] 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.)
- [3] ALLEYNE A, LIU R. A simplified approach to force control for electro- hydraulic systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(12): 1347–1356.

- [4] LIU R, ALLEYNE A. Nonlinear force/pressure tracking of an electro-hydraulic actuator[J]. *ASME Journal Dynam Syst Meas Contr*, 2000, 122(3): 232 – 237.
- [5] YAO B, BU F, CHIU G. Nonlinear adaptive robust control of electro-hydraulic servo systems with discontinuous projections[C]//*Proceedings of the IEEE Decision and Control*. Piscataway, USA: IEEE Press, 1998: 2265 – 2270.
- [6] YAO B, BU F, REEDY J, et al. Adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuators: Theory and experiments [J]. *IEEE/ASME Transactions Mechatronics*, 2000, 5(1): 79 – 91.
- [7] BU F, YAO B. Desired compensation adaptive robust control of single-rod electro-hydraulic actuator[C] //*Proceedings of the American Control Conference*. Piscataway, USA: IEEE Press, 2001: 3927 – 3931.
- [8] LIU S, YAO B. Indirect adaptive robust control of electro-hydraulic systems driven by single-rod hydraulic actuator [C] //*Proceedings of the IEEE/ASME international Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Piscataway, USA: IEEE Press, 2003: 296 – 301.
- [9] DURAIWAMY S, CHIU G, REEDY J. Nonlinear adaptive nonsmooth dynamic surface control of electro-hydraulic systems[C] //*Proceedings of the American Control Conference*. Piscataway, USA: IEEE Press, 2003: 3287 – 3292.
- [10] ZHU W, PIEDBOEUF J. Adaptive output force tracking control of hydraulic cylinders with applications to robot manipulators[J]. *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2005, 127(20): 206 – 217.

作者简介:

管 成 (1968—), 男, 博士, 主要从事电液系统控制、非线性控制理论的研究, E-mail: gchlsq@163.com;

潘双夏 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事机电控制的研究.

(上接第260页)

6 结论(Conclusions)

本文定义了描述多维时间序列分量间直接线性相依结构的线性条件互信息图, 提出了检验边存在性的信息论统计量和置换检验方法. 实例分析结果表明, 对于各种不同结构的线性模型, 检验方法可以准确揭示分量之间的相依联系, 建立描述多维序列相依结构的图模型. 并且模型的残差分布不必限制为正态分布. 由于定义的局限, 线性条件互信息图只反映了模型的线性联系. 但是, 基于信息论的线性检验对于用广义互信息建立研究多维时间序列分量间非线性相依结构的图模型提供了基本方法, 这也是今后研究的一个内容.

参考文献(References):

- [1] DAHLHAUS R. Graphical interaction models for multivariate time series[J]. *Metrika*, 2000, 51(2): 157 – 172.
- [2] PALUS M. Testing for nonlinearity using redundancies: quantitative and qualitative aspects[J]. *Physica D*, 1995, 80(1): 186 – 205.
- [3] PALUS M. Detecting nonlinearity in multivariate time series[J]. *Physics Letters A*, 1996, 213(3): 138 – 147.
- [4] GRANGER C, LIN J L. Using the mutual information coefficient to identify lags in nonlinear models[J]. *Journal of Time Series Analysis*, 1994, 15(4): 371 – 384.
- [5] DIKS C G H, MANZAN S. Test for serial independence and linearity based on correlation integrals[J]. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 2002, 6(2): 1 – 20.
- [6] TSAY R S. *Analysis of Financial Time Series*[M]. New York: Wiley & Sons, 2002.

作者简介:

高 伟 (1978—), 女, 西北工业大学理学院应用数学系博士研究生, 主要研究方向为非线性时间序列分析的理论与应用, E-mail: gaoww525@tom.com;

田 铮 (1958—), 女, 教授, 西北工业大学理学院应用数学系博士生导师, 计算机科学与工程系博士生导师, 主要从事非线性时间序列与信息处理、多尺度随机模型与图像处理等方面的研究, E-mail: zhtian@nwpu.edu.cn.