

DOI: 10.7652/xjtuxb201608020

采用干扰估计的液压系统自适应鲁棒控制

徐张宝¹, 马大为¹, 姚建勇¹, 马威²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 210094, 南京; 2. 中航工业洪都集团 660 所, 330000, 南昌)

摘要: 针对液压伺服系统的建模不确定性和未建模不确定性问题, 提出基于精确干扰估计的自适应鲁棒控制算法。该算法通过反步方法融合了有限时间干扰观测器和自适应鲁棒控制器; 有限时间干扰观测器用于估计非匹配集中干扰, 能够保证有限时间精确估计干扰; 自适应鲁棒控制器用于处理系统参数不确定性并保证闭环系统稳定性。该算法理论上能够保证描述的瞬时控制精度和稳态跟踪误差, 并且在某一时间 T_1 后取得渐近跟踪性能。实验结果表明: 该算法能够准确估计非匹配干扰, 系统稳态跟踪误差最大约为 0.06 mm, 相对跟踪误差约为 0.15%, 系统跟踪精度得到了提高。

关键词: 参数不确定性; 不确定非线性; 精确干扰估计; 自适应鲁棒; 液压系统

中图分类号: O121.8; G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)08-00123-07

An Adaptive Robust Control Algorithm for Hydraulic Actuators with Disturbance Estimation

XU Zhangbao¹, MA Dawei¹, YAO Jianyong¹, MA Wei²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Hongdu Group 660 Institute of Aviation Industry Corporation of China, Nanchang 330000, China)

Abstract: An adaptive robust control algorithm with accurate disturbance estimation is proposed to deal with the modeling uncertainties and unmodeled uncertainties of the hydraulic systems. The algorithm uses the backstepping method to synthesize a finite time disturbance observer and an adaptive robust controller. The finite time disturbance observer is designed to estimate the mismatching concentrated uncertainties, and ensures accurate disturbance estimation in a finite time. The adaptive robust controller is designed to handle parametric uncertainties and stabilizes the closed loop system. In theory, the controller guarantees a prescribed transient tracking performance and final tracking accuracy, and achieves asymptotic tracking performance after a finite time T_1 . Experimental results show that the maximum static tracking error of the proposed algorithm is about 0.06 mm, and the relative tracking error is about 0.15%, and that the algorithm improves the system tracking accuracy.

Keywords: parametric uncertainty; uncertain nonlinearity; accurate disturbance estimation; adaptive robust control; hydraulic system

由于具有高响应、大功率、大系统刚度和强抗干扰能力等优点, 电液伺服系统在航天、航空、航海、兵

收稿日期: 2016-02-28。 作者简介: 徐张宝(1988—), 男, 博士生; 马大为(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305203); 中国博士后科学基金资助项目(2014M551593); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20141402)。

网络出版时间: 2016-06-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160627.1231.006.html>

器、矿山、冶金及民用等方面都得到了广泛应用^[1]。然而,由于电液伺服系统中存在着强非线性^[2]、模型不确定性等,尤其是参数不确定性和不确定非线性,增加了高精度控制系统的设计难度。

为了处理电液伺服系统中的不确定非线性问题,文献[3-5]设计了鲁棒控制器,但是其高跟踪精度可能是通过高增益反馈获得的。文献[6-7]考虑电液伺服系统中存在的参数不确定性,提出自适应控制策略,但是并不能解决系统中不确定非线性。文献[8-9]提出了一种自适应鲁棒控制(adaptive robust control, ARC)策略,以同时处理系统中存在的参数不确定性和不确定非线性,现已应用到多种控制对象^[10-15]。尽管自适应鲁棒控制能够取得优异的控制性能,但是高控制精度依然可能是通过高反馈增益获得的。为了处理系统中存在的不确定非线性问题,文献[5]使用了一种扩张状态观测器来估计系统的匹配不确定非线性,进行前馈补偿,然而并没有处理非匹配不确定非线性,仍不能避免高增益反馈。文献[16]设计了一种干扰观测器处理系统中存在的偏正弦干扰,但是控制器只能处理一类特定的偏正弦干扰,适用范围窄。

本文以重型火箭炮旋转液压伺服机构为背景,开展液压伺服系统高精度控制方法研究。为避免液压系统跟踪控制中可能出现的高增益反馈问题,融合有限时间干扰观测器^[17],提出了一种基于干扰估计的自适应鲁棒控制器。

1 系统建模与问题描述

如图1所示,液压伺服系统惯性负载的动力学模型可描述为

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

式中: y 为负载位移; m 表示惯性负载; $P_L = P_1 - P_2$ 为负载压力; P_1 和 P_2 分别为两腔的压力; A 为液压缸内腔的有效工作面积; b 代表黏性摩擦系数; f 代表其他未建模干扰,例如非线性摩擦、外部干扰以及未建模动态等。

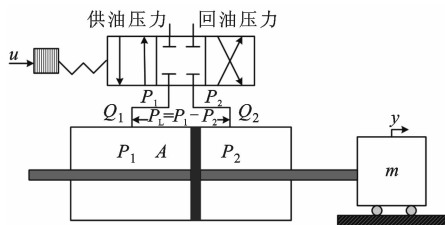


图1 液压伺服系统示意图

液压缸内压力动态方程为

$$\dot{P}_L V_t / 4\beta_e = -A\dot{y} - C_t P_L - q_n(t) + Q_L \quad (2)$$

式中: V_t 为液压缸有效容积; β_e 为系统有效容积模数; C_t 为液压缸内泄漏系数; $Q_L = (Q_1 + Q_2)/2$ 为负载流量; Q_1 为液压缸供油流量; Q_2 为液压缸回油流量; $q_n(t)$ 代表常值建模误差。 Q_L 为伺服阀阀芯位移 x_v 的函数^[1]

$$Q_L = k_q x_v (P_s - \text{sgn}(x_v) P_L)^{1/2} \quad (3)$$

式中: $k_q = C_d w (2/\rho)^{1/2}$ 为流量增益; P_s 为供油压力, $\text{sgn}(x_v)$ 为

$$\text{sgn}(x_v) = \begin{cases} 1, & \text{若 } x_v \geq 0 \\ -1, & \text{若 } x_v < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_d 为伺服阀的流量系数; w 为伺服阀的面积梯度; ρ 为液压油的密度。

忽略伺服阀的高频动态,假设伺服阀阀芯位移正比于控制输入 u ,即 $x_v = k_i u$, $k_i > 0$ 为伺服阀电气增益系数, u 是控制输入电压。因此,式(3)可以转化为

$$Q_L = k_t u (P_s - \text{sgn}(u) P_L)^{1/2} \quad (5)$$

式中: $k_t = k_q k_i$ 为总流量增益。

定义状态变量 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T = [y, \dot{y}, A P_L / m]^T$,那么整个系统可以写成如下状态空间形式

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 - \theta_1 x_2 - d(x, t) \\ \dot{x}_3 &= \theta_2 g u - \theta_3 x_2 - \theta_4 x_3 - \theta_5 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

定义未知参数集为 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T$,其中 $\theta_1 = b/m$, $\theta_2 = 4\beta_e k_t / m V_t$, $\theta_3 = 4\beta_e A^2 / m V_t$, $\theta_4 = 4\beta_e C_t / V_t$, $\theta_5 = 4\beta_e q_n(t) / V_t$, $g = (P_s - \text{sgn}(u) P_L)^{1/2}$, $d(x, t) = f/m$ 。

假设1 参数不确定性 $\boldsymbol{\theta}$ 满足

$$\boldsymbol{\theta} \in \boldsymbol{\Omega}_{\boldsymbol{\theta}} \triangleq \{\boldsymbol{\theta}: \boldsymbol{\theta}_{\min} \leq \boldsymbol{\theta} \leq \boldsymbol{\theta}_{\max}\} \quad (7)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}_{\min} = [\theta_{1\min}, \theta_{2\min}, \theta_{3\min}, \theta_{4\min}, \theta_{5\min}]^T$ 和 $\boldsymbol{\theta}_{\max} = [\theta_{1\max}, \theta_{2\max}, \theta_{3\max}, \theta_{4\max}, \theta_{5\max}]^T$ 已知。此外,假设 $\theta_{1\min} > 0, \theta_{2\min} > 0, \theta_{3\min} > 0, \theta_{4\min} > 0$ 。

假设2 $d(x, t)$ 是有界的且其一阶导数有界,即

$$|d(x, t)| \leq \delta_1, |\dot{d}(x, t)| \leq \delta_2 \quad (8)$$

式中: δ_1 和 δ_2 是已知的。

2 控制器设计

2.1 参数自适应律

令 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 表示 $\boldsymbol{\theta}$ 的估计, $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ 表示 $\boldsymbol{\theta}$ 的估计误差,即 $\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \hat{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{\theta}$ 。定义一个非连续投影函数^[5]

$$P_{\hat{\theta}_i}(\cdot_i) = \begin{cases} 0, & \hat{\theta}_i = \theta_{i\max}, \cdot_i > 0 \\ 0, & \hat{\theta}_i = \theta_{i\min}, \cdot_i < 0 \\ \cdot_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i=1,2,3,4,5$; $\cdot_i$ 代表矩阵 $\cdot$ 的第 i 项。

设计自适应律为

$$\dot{\hat{\theta}} = P_{\hat{\theta}}(\Gamma\tau); \hat{\theta}(0) \in \Omega_{\hat{\theta}} \quad (10)$$

式中: τ 是自适应函数; $\Gamma > 0$ 是自适应增益。由此自适应律, 可得以下性质^[16]:

(1) 参数估计值总在已知有界的 $\Omega_{\hat{\theta}}$ 集内, 即对于任意 t , 总有 $\hat{\theta}(0) \subseteq \Omega_{\hat{\theta}}$, 因而由假设 1 可得

$$\theta_{i\min} \leq \hat{\theta}_i(t) \leq \theta_{i\max}, i=1,2,3,4,5 \quad \forall t \quad (11)$$

$$(2) \quad \tilde{\theta}^T [\Gamma^{-1} P_{\hat{\theta}}(\Gamma\tau) - \tau] \leq 0 \quad \forall \tau \quad (12)$$

2.2 控制器设计

2.2.1 自适应鲁棒控制器设计 定义变量如下

$$z_2 = \dot{z}_1 + k_1 z_1 = x_2 - x_{2eq} \quad (13)$$

式中: $z_1 = x_1 - x_{1d}(t)$ 是输出跟踪误差; $k_1 > 0$ 为反馈增益。由于 $G(s) = z_1(s)/z_2(s) = 1/(s+k_1)$ 是一个稳定的传递函数, 当 z_2 趋于 0 时, z_1 必然也趋于 0。接下来的控制器设计, 将以使 z_2 趋于 0 为主要目标。对式(13)微分并把式(6)代入, 可得

$$\dot{z}_2 = x_3 - \theta_{1n} x_2 - \dot{x}_{2eq} - D(x, t) \quad (14)$$

式中: $D(x, t) = (\theta_2 - \theta_{2n}) x_2 - d(x, t)$ 表示集中干扰; x_3 为一个虚拟控制输入。下面将针对虚拟控制量 x_3 设计虚拟控制律 α_2 来保证输出跟踪精度。

令 $z_3 = x_3 - \alpha_2$ 表示输入误差, 由式(14)可得

$$\dot{z}_2 = z_3 + \alpha_2 - \theta_{1n} x_2 - \dot{x}_{2eq} - D(x, t) \quad (15)$$

由此, 可设计虚拟控制律为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= \alpha_{2a} + \alpha_{2s}, \alpha_{2s} = \alpha_{2s1} + \alpha_{2s2} \\ \alpha_{2a} &= \dot{x}_{2eq} + \theta_{1n} x_2 \\ \alpha_{2s1} &= -k_2 z_2, \alpha_{2s2} = -k_{s1}(x, t) z_2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: $k_2 > 0$ 为线性反馈增益; k_{s1} 为非线性反馈增益; α_{2a} 为模型补偿项; α_{2s1} 为线性反馈项; α_{2s2} 为非线性反馈项。

把式(16)带入式(15), 可得 z_2 的动态方程

$$\dot{z}_2 = z_3 - k_2 z_2 + \alpha_{2s2} - D(x, t) \quad (17)$$

存在足够大的 α_{2s2} 满足以下条件^[8-9]

$$z_2(\alpha_{2s2} - D(x, t)) \leq \sigma_1; z_2 \alpha_{2s2} \leq 0 \quad (18)$$

式中: $\sigma_1 > 0$ 是设计参数。

由式(6)可知, z_3 的微分式为

$$\begin{aligned} \dot{z}_3 &= \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2 = \\ &\theta_2 gu - \theta_3 x_2 - \theta_4 x_3 - \theta_5 - \dot{\alpha}_{2c} - \dot{\alpha}_{2u} \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $\dot{\alpha}_2 = \dot{\alpha}_{2c} + \dot{\alpha}_{2u}$, 其中 $\dot{\alpha}_{2c}$ 和 $\dot{\alpha}_{2u}$ 分别为 $\dot{\alpha}_2$ 的可计算

量和不可计算量。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha}_{2c} &= \frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + \left(\frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1} \right) \hat{x}_2 + \left(\frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2} \right) \hat{x}_2 \\ \dot{\alpha}_{2u} &= (\partial \alpha_2 / \partial x_2) \tilde{x}_2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: $\hat{x}_2$ 和 $\tilde{x}_2$ 分别代表 x_2 的估计和估计误差

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_2 &= x_3 - \theta_{1n} x_2 \\ \tilde{x}_2 &= \hat{x}_2 - x_2 = D(x, t) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

自适应鲁棒控制器为

$$\left. \begin{aligned} u &= (u_a + u_s) / g \hat{\theta}_2, u_s = u_{s1} + u_{s2} \\ u_a &= \hat{\theta}_3 x_2 + \hat{\theta}_4 x_3 + \hat{\theta}_5 + \dot{\alpha}_{2c}, u_{s1} = -k_3 z_3 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中: $k_3 > 0$ 为反馈增益。

把式(22)代入式(19), 可得 z_3 的动态方程

$$\dot{z}_3 = u_{s2} - k_3 z_3 + \tilde{\theta}^T \phi - \dot{\alpha}_{2u} \quad (23)$$

式中: $\tilde{\theta}^T = [\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \tilde{\theta}_3, \tilde{\theta}_4, \tilde{\theta}_5]$; $\phi^T = [0, -gu, x_2, x_3, 1]$ 。

存在足够大的 u_{s2} 满足以下条件^[8-9]

$$z_3(u_{s2} + \tilde{\theta}^T \phi - \dot{\alpha}_{2u}) \leq \sigma_2, z_3 u_{s2} \leq 0 \quad (24)$$

式中: $\sigma_2 > 0$ 是设计参数。

尽管自适应鲁棒控制器在正常工作状况下能够取得优秀的跟踪性能^[10-12], 但是在实际应用中, 高的控制精度可能是由大的反馈增益来保证的。因此, 为了减小反馈增益, 本文设计了一种有限时间干扰观测器来精确估计系统中存在的非线性不确定性。

2.2.2 基于干扰精确补偿的自适应鲁棒控制器设计 把式(6)重新写成如下形式

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 - \theta_{1n} x_2 - D(x, t) \\ \dot{x}_3 &= \theta_2 gu - \theta_3 x_2 - \theta_4 x_3 - \theta_5 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式中: $D(x, t) = (\theta_2 - \theta_{2n}) x_2 - d(x, t)$ 表示集中干扰。

由 $D(x, t) = (\theta_2 - \theta_{2n}) x_2 - d(x, t)$ 和假设 2 可知, $D(x, t)$ 是有界的, 且其一阶导数也是有界的, 即 $D(x, t) \leq \theta_{2m} |x_2| + \delta_1$; $\dot{D}(x, t) \leq \theta_{2m} |\dot{x}_2| + \delta_2$

(26)

式中: $\theta_{2m} = \theta_{2\max} - \theta_{2\min}$ 。

为了估计式(26)中的干扰 $D(x, t)$, 本文参考文献[17]的思想设计了一种有限时间干扰观测器, 结构为

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_0 &= v_0 - \theta_{2n} x_2; \dot{e}_1 = v_1 = \dot{D}; \dot{e}_2 = v_2 = \dot{D} \\ v_0 &= -\lambda_0 |e_0 - x_2|^{2/3} \text{sgn}(e_0 - x_2) + e_1 \\ v_1 &= -\lambda_1 |e_1 - v_0|^{1/2} \text{sgn}(e_1 - v_0) + e_2 \\ v_2 &= -\lambda_2 \text{sgn}(e_2 - v_1) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式中: $\lambda_i > 0, (i=0, 1, 2)$ 是可调观测器系数; $\hat{D}, \hat{\dot{D}}$ 分别为 $D, \dot{D}$ 的估计值。

引理 1 存在一个有限的时间 T_1 , 当 $t > T_1$ 时, $\tilde{D} = 0, \tilde{\dot{D}} = 0, \tilde{D} = \hat{D} - D, \tilde{\dot{D}} = \hat{\dot{D}} - \dot{D}$ 。

定义饱和函数

$$s_{\text{at}}(\tilde{D}) = \begin{cases} \theta_{2m} |x_2| + \delta_1, & \text{若 } |\tilde{D}| > \theta_{2m} |x_2| + \delta_1 \\ \tilde{D}, & \text{若 } |\tilde{D}| \leq \theta_{2m} |x_2| + \delta_1 \end{cases}$$

$$s_{\text{at}}(\tilde{\dot{D}}) = \begin{cases} \theta_{2m} |\dot{x}_2| + \delta_2, & \text{或 } |\tilde{\dot{D}}| > \theta_{2m} |\dot{x}_2| + \delta_2 \\ \tilde{\dot{D}}, & \text{若 } |\tilde{\dot{D}}| \leq \theta_{2m} |\dot{x}_2| + \delta_2 \end{cases} \quad (28)$$

由式(26)和引理 1 可得

$$\left. \begin{aligned} \tilde{D} &\leq \theta_{2m} |x_2| + \delta_1, & \exists T_1, \forall t < T_1 \\ \tilde{D} &= 0, & \exists T_1, \forall t < T_1 \\ \tilde{\dot{D}} &\leq \theta_{2m} |\dot{x}_2| + \delta_2, & \exists T_1, \forall t < T_1 \\ \tilde{\dot{D}} &= 0, & \exists T_1, \forall t < T_1 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

由式(15), 基于干扰估计 $\hat{D}$, 虚拟控制律为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= \alpha_{2a} + \alpha_{2s}, \alpha_{2s} = \alpha_{2s1} + \alpha_{2s2} \\ \alpha_{2a} &= \dot{x}_{2eq} + \theta_{1n} x_2 + \hat{D}(x, t) \\ \alpha_{2s1} &= -k_2 z_2, \alpha_{2s2} = -k_{s1}(x, t) z_2 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

式中: $k_2 > 0$ 为线性反馈增益。

把式(30)代入式(15)可得

$$\dot{z}_2 = z_3 - k_2 z_2 + \alpha_{2s2} + \tilde{D} \quad (31)$$

α_{2s2} 满足如下条件

$$z_2 \{ \alpha_{2s2} + \tilde{D} \} \leq \sigma_3, z_2 \alpha_{2s2} \leq 0 \quad (32)$$

式中: $\sigma_3 > 0$ 是设计参数。

令 g_1 为任意一条光滑曲线

$$g_1 \geq \theta_{2m} |x_2| + \delta_1 \quad (33)$$

式中: $\theta_{2m} |x_2| + \delta_1$ 是 $\tilde{D}$ 的上界。满足 α_{2s2} 的表达式如下

$$\alpha_{2s2} = -k_{s1}(x, t) z_2 \triangleq -g_1^2 z_2 / (4\sigma_3) \quad (34)$$

由 $z_3 = x_3 - \alpha_2$, 以及式(25)和式(30), 可得

$$\begin{aligned} \dot{z}_3 &= \dot{x}_3 - \dot{\alpha}_{2c} - \dot{\alpha}_{2u} = \\ &\theta_2 g u - \theta_3 x_2 - \theta_4 x_3 - \theta_5 - \dot{\alpha}_{2c} - \dot{\alpha}_{2u} \end{aligned} \quad (35)$$

式中: $\dot{\alpha}_2 = \dot{\alpha}_{2c} + \dot{\alpha}_{2u}$, 其中 $\dot{\alpha}_{2c}$ 和 $\dot{\alpha}_{2u}$ 为 $\dot{\alpha}_2$ 的可计算和不可计算部分。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha}_{2c} &= \partial \alpha_2 / \partial t + (\partial \alpha_2 / \partial x_1) x_2 + \\ &(\partial \alpha_2 / \partial x_2) \dot{x}_2 + (\partial \alpha_2 / \partial \hat{D}) \hat{\dot{D}} \\ \dot{\alpha}_{2u} &= (\partial \alpha_2 / \partial x_2) \tilde{x}_2 \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

式中: $\hat{x}_2$ 和 $\tilde{x}_2$ 分别为 x_2 的估计值和估计误差, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_2 &= x_3 - \theta_{1n} x_2 - \hat{D}(x, t) \\ \tilde{x}_2 &= \hat{x}_2 - x_2 = -\tilde{D}(x, t) \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

基于干扰估计的自适应鲁棒控制器为

$$\left. \begin{aligned} u &= (u_a + u_s) / g \hat{\theta}_2, u_s = u_{s1} + u_{s2} \\ u_a &= \hat{\theta}_3 x_2 + \hat{\theta}_4 x_3 + \hat{\theta}_5 + \dot{\alpha}_{2c}, u_{s1} = -k_3 z_3 \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

式中: $k_3 > 0$ 为线性反馈增益。

把式(39)代入式(35), 可得 z_3 的动态方程

$$\dot{z}_3 = u_{s2} - k_3 z_3 + \tilde{\theta}^T \boldsymbol{\varphi} - \dot{\alpha}_{2u} \quad (39)$$

式中: $\tilde{\theta}^T = [\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \tilde{\theta}_3, \tilde{\theta}_4, \tilde{\theta}_5]$; $\boldsymbol{\varphi}^T = [0, -g u, x_2, x_3, 1]$ 。

u_{s2} 满足如下条件

$$z_3 \{ u_{s2} + \tilde{\theta}^T \boldsymbol{\varphi} - \dot{\alpha}_{2u} \} \leq \sigma_4, z_3 u_{s2} \leq 0 \quad (40)$$

式中: $\sigma_4 > 0$ 是设计参数。

令 g_2 为任意一个光滑曲线

$$\left. \begin{aligned} g_2 &\geq \|\boldsymbol{\varphi}\| \|\boldsymbol{\theta}_m\| + |\partial \alpha_2 / \partial x_2| |\tilde{D}(x, t)| = \\ &\|\boldsymbol{\varphi}\| \|\boldsymbol{\theta}_m\| + |\partial \alpha_2 / \partial x_2| (\theta_{2m} |x_2| + \delta_1) \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

那么满足 u_{s2} 的表达式为

$$u_{s2} = -k_{s2}(x, t) z_2 \triangleq -g_2^2 z_3 / (4\sigma_4) \quad (42)$$

2.3 主要结果

定理 1 选择合适的参数 k_2, k_3 , 使如下矩阵 $\mathbf{A}$ 为正定阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} k_2 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & k_3 \end{bmatrix} \quad (43)$$

由自适应函数 $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\varphi} z_3$, 设计控制器(38)具有如下结论: ①系统所有信号是有界的, 定义李雅普诺夫方程

$$V = z_2^2 / 2 + z_3^2 / 2 \quad (44)$$

满足如下的不等式

$$\dot{V} \leq \exp(-kt) V(0) + \sigma [1 - \exp(-kt)] / k \quad (45)$$

式中: $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2, k = 2\lambda_{\min}(\mathbf{A}), \lambda_{\min}(\mathbf{A})$ 表示矩阵 $\mathbf{A}$ 的最小特征值; ②一段时间 T_1 后, 干扰估计准确, 即 $\tilde{D} = 0$, 则设计控制器(29)除了能够得到结论①, 还能保证输出信号的渐进跟踪性能, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $z_1, z_2, z_3 \rightarrow 0$ 。

证明 对式(44)进行微分, 并代入式(31)、(32)、(39)和(40), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= z_2 \dot{z}_2 + z_3 \dot{z}_3 = \\ &z_2 (z_3 - k_2 z_2 + \alpha_{2s2} + \tilde{D}) + z_3 (u_{s2} - k_3 z_3 + \tilde{\theta}^T \boldsymbol{\varphi} - \\ &\dot{\alpha}_{2u}) \leq z_2 z_3 - k_2 z_2^2 - k_3 z_3^2 + \sigma_1 + \sigma_2 \leq -2\lambda_{\min}(\mathbf{A}) V + \sigma \end{aligned} \quad (46)$$

对式(46)积分可得式(45), 因此 z_1, z_2, z_3 是全局有界的, 假设期望轨迹是有界的, 那么由式(6)可知, 输出信号是有界的, 由式(38)可知 u 是有界的, 因此可

以证明结论①。

下面证明结论②,定义李雅普诺夫函数为

$$V_1 = V + \tilde{D}^2/2 + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}/2 \quad (47)$$

对式(47)进行微分可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = \dot{V} + \tilde{D}\dot{\tilde{D}} + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} = \\ z_2(z_3 - k_2 z_2 + \alpha_{2s2} + \tilde{D}) + z_3(u_{s2} - k_3 z_3 + \\ \tilde{\theta}^T \phi - \dot{\alpha}_{2u}) + \tilde{D}\tilde{D} + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \end{aligned} \quad (48)$$

基于引理1,代入式(31)、(32)、(39)和(40)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq z_2 z_3 - k_2 z_2^2 - k_3 z_3^2 + \tilde{\theta}^T (\Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} - \tau) \leq \\ - [z_2 \quad z_3] \mathbf{A} [z_2 \quad z_3]^T \leq \\ - \lambda_{\min}(\mathbf{A})(z_2^2 + z_3^2) = -W \end{aligned} \quad (49)$$

式中: W 恒为非负,且 $W \in L_2$ 。由式(31)和式(39)可知, $\dot{W}$ 有界,因此 W 是一致连续的,由Barbalat引理,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $W \rightarrow 0$,由此证明了结论②。

3 实验对比结果

3.1 实验建立

为了验证本文提出控制策略的有效性,建立如图2所示的实验平台。实验台包括底座(包括导轨等)、液压位置系统(包括有效面积 A 为904.778 mm²和行程为44 mm的双出杆液压缸;型号为Heidenhain LC483的光栅尺,精度为 $\pm 5 \mu\text{m}$;型号为MEAS US175-C00002-200BG的压力传感器,精度为0.1 MPa;型号为Moog G761-3003的伺服阀,其在7 MPa压差下的额定流量为19 L/min;质量 $m=30 \text{ kg}$ 的质量块), P_s 为10 MPa,测量与控制系统(包括测量软件和实时控制软件,A/D卡为16位的Advantech PCI-1716,D/A卡为16位的Advantech PCI-1723)。系统采样时间为0.5 ms。

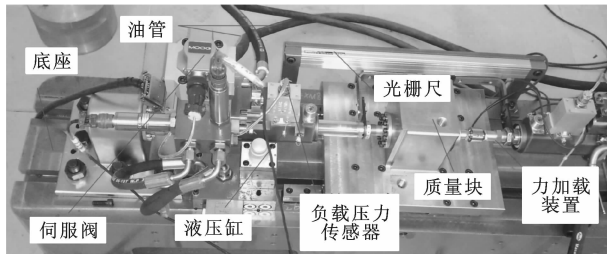


图2 电液伺服系统实验平台

3.2 实验结果对比

为了验证本文提出控制器的有效性,将对比以下7个控制器。

(1)本文提出的基于干扰估计的自适应鲁棒控制器(ARCDE)。系统参数为 $m=30 \text{ kg}$, $A=9.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $V_t=7.96 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $P_s=10 \text{ MPa}$,回油

压力 $P_r=0.08 \text{ MPa}$ 。选取参数不确定范围为 $\theta_{\min}=[0.1, 0.1, 10^5, 0.1, -10^5]^T$, $\theta_{\max}=[300, 100, 10^7, 1\,000, 10^5]^T$,给定参数估计初值为 $\theta_{1n}=133$, $\hat{\theta}_2(0)=21.7$, $\hat{\theta}_3(0)=1.09 \times 10^6$, $\hat{\theta}_4(0)=8$, $\hat{\theta}_5(0)=0$,自适应增益为 $\Gamma=\text{diag}\{10^{-6}, 800, 0.01, 8\}$,控制器设计参数 $k_1=1\,200$, $k_2=700$, $k_3=200$, $\lambda_0=60$, $\lambda_1=100$, $\lambda_2=600$ 。

(2)自适应鲁棒控制器(ARC)。参数不确定范围、参数估计初值、自适应增益以及控制器设计参数和基于干扰估计的自适应鲁棒控制器相同。

(3)基于干扰估计的反馈线性化控制器(FLCDE)。相对于基于干扰估计的自适应鲁棒控制器,FLCDE控制器不包括参数自适应,即式(38)中 $u_a=\theta_{3n}x_2+\theta_{4n}x_3+\theta_{5n}+\dot{\alpha}_{2c}$ 。控制器设计参数为 $k_1=1\,200$, $k_2=700$, $k_3=200$, $\lambda_0=60$, $\lambda_1=100$, $\lambda_2=600$, $[\theta_{1n}, \theta_{2n}, \theta_{3n}, \theta_{4n}]^T=[133, 21.7, 1.09 \times 10^6, 8]^T$ 。

(4)反馈线性化控制器(FLC)。相对于基于干扰估计的自适应鲁棒控制器,FLC控制器不包括参数自适应和干扰补偿项,即式(30)中 $\alpha_{2a}=\dot{x}_{2eq}+\theta_{1n}x_2$ 和式(38)中 $u_a=\theta_{3n}x_2+\theta_{4n}x_3+\theta_{5n}+\dot{\alpha}_{2c}$ 。控制器参数为 $k_1=1\,200$, $k_2=700$, $k_3=200$ 。

(5)速度前馈PID控制器(VFPID)^[18]。控制器参数为 $k_p=1\,500$, $k_i=500$, $k_d=0$,速度前馈增益为 $k_v=28 \text{ V} \cdot \text{s/m}$ 。

(6)PID控制器^[5]。参数为 $k_p=1\,500$, $k_i=500$, $k_d=0$ 。

(7)鲁棒反馈控制器(RFC)。相对于基于干扰估计的自适应鲁棒控制器,RFC控制器不包括模型补偿和干扰补偿项,即式(22)中的 $u_a=0$ 和式(17)中的 $\alpha_2=-k_2 z_2$ 。控制器反馈增益和ARCDE控制器相同。

系统指令为 $x_{1d}=40\arctan(\sin(0.4\pi t)) [1 - \exp(-t)]$,干扰 $f=4\,000\sin(0.2\pi t)$,实验结果如图3~5所示。7种控制器的跟踪误差如图3所示,可见本文所提出的ARCDE控制器取得了最优控制精度,稳态跟踪误差约为0.06 mm。通过对比RFC控制器和PID控制器的跟踪精度,可知ARCDE、ARC、FLCDE、FLC和RFC控制器的反馈增益小于PIDVF和PID控制器中的反馈增益,即本文设计的ARCDE控制器是基于模型补偿以及干扰补偿才取得的最优控制性能。ARCDE控制器作用下的参数估计如图4所示,可以看出系统参数能够收敛到定值。外干扰和干扰估计如图5所示,本文设计的干扰观测器能够准确地估计出系统非匹配干扰。

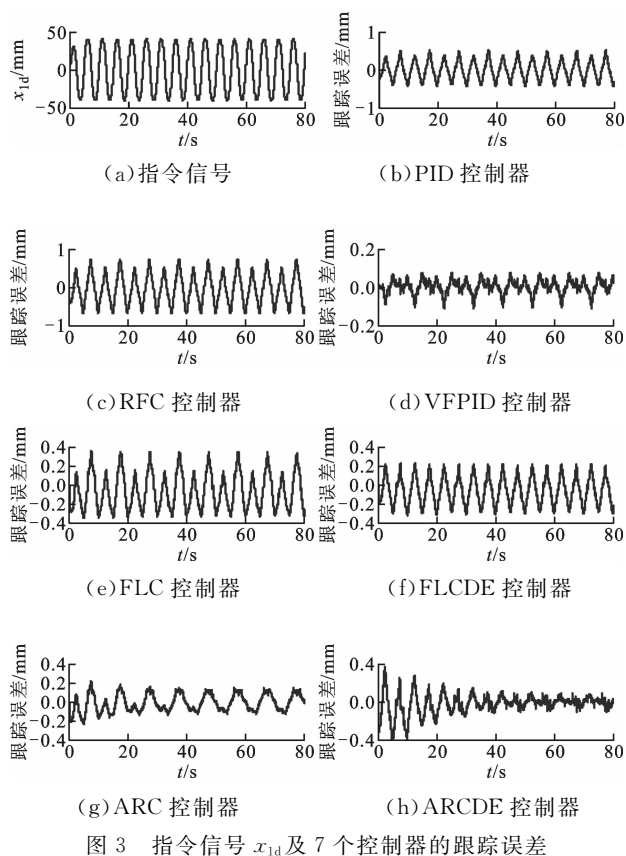
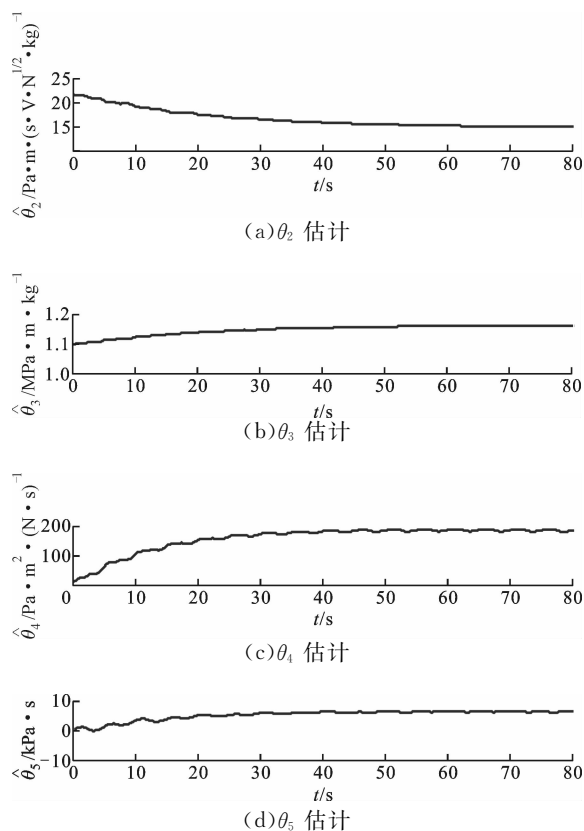
图3 指令信号 x_d 及 7 个控制器的跟踪误差

图4 ARCDE 控制器作用下的参数估计曲线

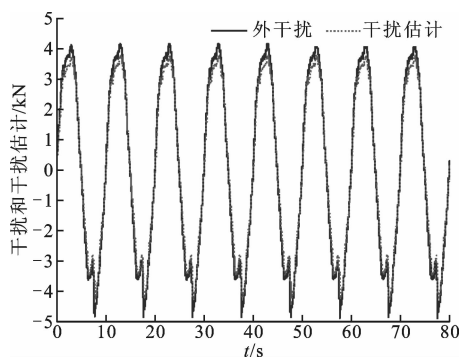


图5 外干扰和干扰估计曲线

4 结 语

本文设计了一种基于精确干扰估计的自适应鲁棒控制器,用于液压缸系统驱动的高精度伺服控制。本控制器同时考虑了系统参数不确定性和非匹配干扰。通过设计有限时间干扰观测器精确估计系统非匹配干扰,并进行前馈补偿,从而使本文所设计的控制策略不通过高增益反馈而达到处理非匹配干扰的目的。运用 Lyapunov 稳定性理论,证明了控制策略的稳定性。实验结果表明,本文设计的参数估计器和干扰观测器能够准确地分别估计出系统的真实参数和外干扰,说明了本文设计方案的有效性和精准跟踪精度。

参考文献:

- [1] 吴振顺. 液压控制系统 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 67-76.
- [2] MERRITT H E. Hydraulic control systems [M]. New York, USA: Wiley, 1967: 45-82.
- [3] 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.
- [4] LU Hungching, LIN Wenchen. Robust controller with disturbance rejection for hydraulic servo systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 157-162.
- [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] AHN K K, NAM D N C, JIN Maolin. Adaptive backstepping control of an electrohydraulic actuator [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(3): 987-995.

- [7] KADISSI C, KENNE J P, SAAD M. Indirect adaptive control of an electrohydraulic servo system based on nonlinear backstepping [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(6): 1171-1177.
- [8] YAO Bin, TOMIZUKA M. Smooth robust adaptive sliding mode control of robot manipulators with guaranteed transient performance [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1996, 118(4): 764-775.
- [9] YAO Bin, TOMIZUKA M. Adaptive robust control SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form [J]. Automatica, 1997, 33(5): 893-900.
- [10] YAO Bin, BU Fanping, 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.
- [11] GUAN Cheng, PAN Shuangxia. Nonlinear adaptive robust control of single-rod electro-hydraulic actuator with unknown nonlinear parameters [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(3): 434-445.
- [12] MOHANTY A, YAO Bin. Indirect adaptive robust control of hydraulic manipulators with accurate parameter estimates [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 567-575.
- [13] SUN Weichao, ZHAO Zhengli, GAO Huijun. Saturated adaptive robust control for active suspension systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3889-3896.
- [14] YAO Jianyong, JIAO Zongxia, YAO Bin, et al. Nonlinear adaptive robust force control of hydraulic load simulator [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(5): 766-775.
- [15] SUN Weichao, GAO Huijun, KAYNAK O. Adaptive backstepping control for active suspension systems with hard constraints [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(3): 1072-1079.
- [16] KIM W, SHIN D, WON D, et al. Disturbance observer based position tracking controller in the presence of biased sinusoidal disturbance for electrohydraulic actuators [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(6): 2290-2298.
- [17] SHTESSEL Y, SHKOLNIKOV I, LEVANT A. Smooth second-order sliding modes: missile guidance application [J]. Automatica, 2007, 43(8): 1470-1476.
- [18] YAO Jianyong, DENG Wenxiang, MA Dawei. Adaptive control of hydraulic actuators with LuGre model-based friction compensation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6469-6477.

(编辑 武红江)

(上接第 37 页)

- KANG Huimin, CHEN Xiao'an, CHEN Wenqu, et al. High speed motorized spindle bearing thermal analysis and experimental research [J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(6): 797-802.
- [7] HARRIS T A, KOTZALAS M N. 轴承技术的基本概念 [M]. 罗继伟, 马伟, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2010: 138-140.
- [8] BURTON R A, STAPH H E. Thermally activated seizure of angular contact bearing [J]. ASLE Trans, 1967, 10(4): 408-417.
- [9] BERND B, JAY F. A thermal model for high speed motorized spindles [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(9): 1345-1366.
- [10] 刘志峰, 马澄宇, 赵永胜, 等. 基于接触热阻的高速精密电主轴热特性分析 [J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(1): 17-23.
- LIU Zhifeng, MA Chengyu, ZHAO Yongsheng, et al. Analysis of high speed motorized spindle thermal characteristics based on thermal contact resistance [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(1): 17-23.
- [11] BOSSMANN B, TU J F. A power flow model for high speed motorized spindles: heat generation characterization [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(3): 494-505.
- [12] MA Chi, YANG Jun, ZHAO Liang, et al. Simulation and experimental study on the thermally induced deformations of high-speed spindle system [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 86: 251-268.
- [13] 王梦茜. 机床电主轴热特性分析技术研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2014.
- [14] WANG Mengxi, HONG Jun, WU Wenwu, et al. An improved model of motorized spindle for transient thermo-structural analysis [C]// IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 91-96.

(编辑 杜秀杰)