

DOI: 10.7652/xjtuxb201811023

电液伺服系统多模型鲁棒自适应控制

成旭华, 姚建勇, 乐贵高
(南京理工大学机械工程学院, 290014, 南京)

摘要: 针对电液伺服系统中存在不确定非线性和强参数不确定性的问题, 提出一种多模型鲁棒自适应控制算法。根据系统参数不确定性范围建立了多个辨识模型, 在辨识模型中设计非线性鲁棒项, 以抑制干扰、未建模动态等不确定非线性影响, 提高系统的鲁棒性。基于辨识模型设计相应的控制器, 采用基于辨识误差的性能指标函数作为切换依据, 选取最佳控制器作为当前控制器, 解决了传统自适应控制对参数自适应初值敏感的问题。该方法能够克服不确定非线性和强参数不确定性的影响, 使系统得到渐进跟踪的性能, 提高系统的瞬态响应性能。实验结果表明, 该算法能抑制建模不确定性的影响, 系统期望跟踪指令幅值为 10 mm 时, 跟踪误差大约为 0.038 6 mm, 相对跟踪误差约为 0.386%, 系统跟踪精度得到了提高。

关键词: 电液伺服系统; 多模型自适应; 辨识模型; 鲁棒性

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)11-0156-07

Multiple Model Robust Adaptive Control of Electro-Hydraulic Servo Systems

CHENG Xuhua, YAO Jianyong, LE Guigao

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: An multiple-model robust adaptive control algorithm is proposed for motion control of electro-hydraulic servo systems subjected to both uncertain nonlinearities and strong parametric uncertainties. According to the range of parametric uncertainties, multiple identification models are designed and nonlinear robust items are added to the models to suppress the influence of uncertain nonlinearities and to improve the robustness of the system. The controllers are designed based on the identification models and then the performance index function designed based on the identification error is considered to select the optimal controller as the current controller. This method solves the problem that the traditional adaptive control is sensitive to the initial value. The proposed control algorithm can overcome the influence of uncertain nonlinearities and strong parametric uncertainties, guarantee an asymptotic output tracking performance, and improve the transient response performance of the system. Experimental results showed that the proposed algorithm can suppress the influence of modeling uncertainties. Its tracking error is 0.038 6 mm when the amplitude of the desired tracking trajectory is 10 mm and the relative tracking error reaches 0.386%, thus the system tracking accuracy is obviously improved.

Keywords: electro-hydraulic servo system; multiple-model adaptive; identification model; robustness

电液伺服系统具有动态响应快、体积小、出力/转矩大及控制精确度高等突出优点,在国防、航空航天、民用等领域得到了广泛应用。电液伺服系统是一个典型的非线性系统,包括各种非线性特性和建模不确定性,如摩擦非线性、电液伺服阀流量压力非线性等非线性特性,电液伺服阀流量增益、泄漏系数、负载质量、执行机构的黏性摩擦系数、液压油弹性模量等未知参数以及外部干扰、未建模动态、死区等建模不确定性^[1-2],这些非线性限制了电液伺服系统高性能控制器的发展。为了提高非线性系统的控制性能,越来越多的研究人员设计了各种非线性控制器^[3-6],滑模^[7]、自适应^[8]、自适应鲁棒^[9-10]等方法相继运用到液压非线性运动控制中。

液压系统中部分参数的不确定性比较大,如液压油弹性模量可从 100 MPa 到 1 400 MPa,泄漏系数可从 $1 \times 10^{-13} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$ 到 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^5/(\text{N} \cdot \text{s})$ 等。传统自适应控制对参数自适应初值比较敏感,系统存在强参数不确定性时,初值的选取将影响系统的瞬态响应性能,甚至闭环稳定性。针对此类问题,多模自适应控制被提出,且受到广泛关注。文献[11]针对线性系统建立含有多个固定模型和两个自适应模型,提出一种有停留时间的切换策略,并分析了系统的稳定性。李晓理等设计了一种基于有界扰动分区的多模型自适应控制,解决了含有有界扰动的离散时间系统输出跟踪问题,提高了系统控制性能^[12]。邵彭真等设计了一种多模型切换自适应控制器,解决了轧机电液伺服系统在空载和负载两种不同工况的切换控制。针对线性系统,Han 等提出一种二阶多模型自适应控制^[14],运用凸集的概念,减小了辨识模型的个数,且具有一定的鲁棒性能^[15]。随后,陈杰等提出非线性系统的二阶多模型自适应控制^[16-17],但没有考虑存在外部干扰等不确定性的情况。自适应控制在存在外部干扰、未建模动态等不确定性时,系统跟踪性能将会受到影响。

本文针对电液伺服系统的特点,建立了系统的数学模型以及多个辨识模型,在辨识模型中设计非线性鲁棒项,以减小外部干扰等不确定性的影响,并基于反步法和李雅普诺夫分析法设计了一种考虑强参数不确定性和不确定非线性的多模型鲁棒自适应控制器(MMRAC),使系统得到了渐进跟踪的性能,提高了系统的瞬态响应性能。实验结果证明了所设计控制器的有效性。

1 系统建模与问题描述

本文所研究的电液伺服系统如图 1 所示,图中右侧的负载被伺服液压缸驱动。控制器设计的目标是在电液伺服系统的输出下使得负载位移尽可能地跟踪任意指定的位移轨迹。电液伺服系统的动力学方程可以表示为

$$m\ddot{y} = AP_L - B\dot{y} - f(y, \dot{y}, t) \quad (1)$$

式中: m 和 y 分别为惯性负载参数和惯性负载的位移; A 为伺服液压缸内腔的有效工作面积; $P_L = P_1 - P_2$ 为负载压力差, P_1 和 P_2 分别表示伺服液压缸左右两腔的压力; B 为黏性摩擦系数; $f(y, \dot{y}, t)$ 为其他外部干扰及未建模摩擦等不确定性项。

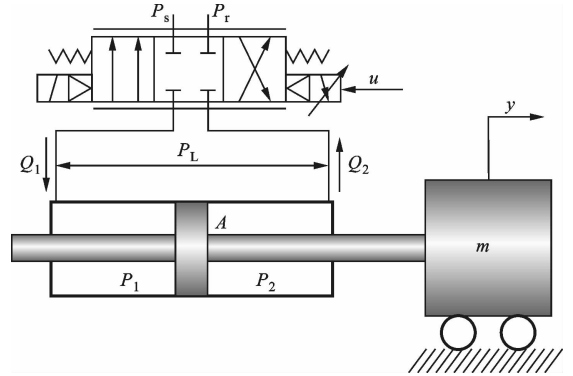


图 1 电液伺服系统示意图

忽略伺服液压缸的外泄漏,则伺服液压缸的压力动态方程为^[1]

$$\dot{P}_L = \frac{4\beta_c}{V_t} [-A\dot{y} - C_t P_L + Q_L - q(t)] \quad (2)$$

式中: V_t 为伺服液压缸的总容积; β_c 为有效油液弹性模量; C_t 为内泄漏系数; Q_L 为负载流量; $q(t)$ 为建模误差。

采用高响应的电液伺服阀,则阀芯位移 x_v 与控制输入 u 近似为比例环节,即 $x_v = k_i u$,因此得到电液伺服阀流量方程

$$Q_L = k_i u \sqrt{P_s - P_L \text{sgn}(u)} \quad (3)$$

式中: $k_i = k_i C_d \omega \sqrt{2/\rho}$ 为总流量增益,其中 C_d 为流量系数, ω 为阀的面积梯度, ρ 为油液的密度, k_i 为比例系数; P_s 为相对于回油压力 P_r 的供油压力, $\text{sgn}(u)$ 的定义为

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

正如文献[18]中所述,可以合理地假设未建模项 $f(t)$ 连续可微。定义状态变量以及未知参数向量为 $\mathbf{x}_p = [x_{p1}, x_{p2}, x_{p3}]^T = [y, \dot{y}, \ddot{y}]^T$, $\boldsymbol{\theta}_p = [\theta_{p1}, \theta_{p2},$

$\theta_{p3}, \theta_{p4}]^T$, 可得系统的状态方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{p1} &= x_{p2} \\ \dot{x}_{p2} &= x_{p3} \\ \dot{x}_{p3} &= \theta_{p1}x_{p2} + \theta_{p2}x_{p3} + \theta_{p3}gu + \theta_{p4} + \tilde{d}(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $\theta_{p1} = -(4A^2\beta_e + 4\beta_e C_t B)/mV_t$; $\theta_{p2} = -(4m\beta_e C_t + BV_t)/mV_t$; $\theta_{p3} = 4A\beta_e k_t/mV_t$; $\theta_{p4} = d_n$; $\tilde{d}(t) = d(t) - d_n$, $d(t) = -\frac{4A\beta_e}{mV_t}q(t) - \frac{4\beta_e C_t}{mV_t}f(t) - \frac{\dot{f}(t)}{m}$, d_n 是不确定性的未知常值分量; $g = \sqrt{P_s - P_L \operatorname{sgn}(u)}$.

对于确定的液压系统,有以下合理的假设。

假设 1 系统的指令信号 $y_d(t) = x_{1d}(t) \in C^3$ 且有界;实际液压系统在一般工况下满足 $0 < P_r < P_1 < P_s$, $0 < P_r < P_2 < P_s$ 。

假设 2 系统参数不确定性 θ 的范围已知,即

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

式中: $\theta_{p\min} = [\theta_{p1\min}, \theta_{p2\min}, \theta_{p3\min}, \theta_{p4\min}]^T$, $\theta_{p\max} = [\theta_{p1\max}, \theta_{p2\max}, \theta_{p3\max}, \theta_{p4\max}]^T$ 是向量 θ_p 已知的上下界, $\theta_{p3\min} > 0$ 。

假设 3 时变不确定项 $\tilde{d}(t)$ 有界,即

$$|\tilde{d}(t)| \leq M \quad (7)$$

式中: M 为未知正数,即 $\tilde{d}(t)$ 有未知上界。

在控制器设计分析过程中,将用到以下引理。

引理 1 $\forall x \in R, a > 0$, 有

$$0 \leq x \tanh(x/a) \leq |x| \quad (8)$$

引理 2 $\forall x \geq 0, y > 0$ 或 $x > 0, y \geq 0$ 有

$$x/x + y \leq 1 \quad (9)$$

2 控制器的设计

2.1 辨识模型及参数自适应的设计

对系统进行在线辨识,根据系统状态方程(5)设计多个辨识模型如下

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{i1} &= -\lambda_1 e_{i1} + x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} &= -\lambda_2 e_{i2} + x_{i3} \\ \dot{x}_{i3} &= -\lambda_3 e_{i3} + \theta_{i1}x_{p2} + \theta_{i2}x_{p3} + \theta_{i3}gu + \theta_{i4} - \\ &\quad k_s e_{i3} M_i^2 / \left(k_s e_{i3} \tanh\left(\frac{e_{i3}}{\delta(t)}\right) M_i + \delta(t) \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$ 表示第 i 个辨识模型; $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, \lambda_3 > 0$ 为可调增益; x_{i1}, x_{i2}, x_{i3} 表示辨识状态; $e_{i1} = x_{i1} - x_{p1}, e_{i2} = x_{i2} - x_{p2}, e_{i3} = x_{i3} - x_{p3}$ 分别表示系统状态的辨识误差; $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}, \theta_{i4}$ 为系统参数的估计值; M_i 为 M 的估计值且大于 0。辨识模型中,

$-k_s e_{i3} M_i^2 / (k_s e_{i3} \tanh(e_{i3}/\delta(t)) M_i + \delta(t))$ 为非线性鲁棒项, k_s 为正的反馈增益,其目的是减小干扰、未建模动态等不确定性的影响,其中 $\delta(t) > 0$ 为可选函数,满足 $\int_0^t \delta(\tau) d\tau \leq L < \infty, \forall t \geq 0, L$ 为已知正数。

如上所示,各辨识模型的形式是一样的,只是参数估计的初值不同。

定义参数估计误差 $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \theta_p, \tilde{M}_i = M_i - M$, 其中 $\theta_i = [\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}, \theta_{i4}]^T$ 。为确保参数自适应控制律的稳定性,基于假设 3,定义如下的参数自适应不连续映射

$$\operatorname{Proj}_{\theta_{ij}}(\tau_{ij}) = \begin{cases} 0, & \theta_{ij} = \theta_{pj\max} \ \& \ \tau_{ij} > 0 \\ 0, & \theta_{ij} = \theta_{pj\min} \ \& \ \tau_{ij} < 0 \\ \tau_{ij}, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $j=1, 2, 3, 4$ 表示为第几个参数; τ_{ij} 为参数自适应函数,在后续控制器设计中决定其具体形式。

给定如下参数自适应率

$$\dot{\theta}_i = \operatorname{Proj}_{\theta_i}(\Gamma \tau_i); \theta_{p\min} \leq \theta_i(0) \leq \theta_{p\max} \quad (12)$$

式中 $\Gamma > 0$ 为正定对角矩阵。

对于任意的参数自适应函数 τ_i , 不连续映射式(12)满足以下性质

$$P1 \quad \theta_i \in \Omega_{\theta_i} \triangleq \{\theta_i : \theta_{p\min} \leq \theta_i \leq \theta_{p\max}\} \quad (13)$$

$$P2 \quad \tilde{\theta}_i^T [\Gamma^{-1} \operatorname{Proj}_{\theta_i}(\Gamma \tau_i) - \tau_i] \leq 0, \forall \tau_i \quad (14)$$

2.2 控制器的设计

基于各个辨识模型,用反步设计方法设计相应的控制器 u_i 。

定义 $e_{mi1} = x_{i1} - x_{1d}$, 则

$$\dot{e}_{mi1} = \dot{x}_{i1} - \dot{x}_{1d} = -\lambda_1 e_{i1} + x_{i2} - \dot{x}_{1d} \quad (15)$$

令 α_{i1} 为 x_{i2} 的虚拟控制输入,定义 α_{i1} 与 x_{i2} 的误差为 $e_{mi2} = x_{i2} - \alpha_{i1}$, 则

$$\dot{e}_{mi1} = \dot{x}_{i1} - \dot{x}_{1d} = -\lambda_1 e_{i1} + \alpha_{i1} - \dot{x}_{1d} + e_{mi2} \quad (16)$$

设计虚拟控制输入

$$\alpha_{i1} = \lambda_1 e_{i1} + \dot{x}_{1d} - k_1 e_{mi1} \quad (17)$$

式中 $k_1 > 0$ 为可调增益。

将式(17)代入式(16)得

$$\dot{e}_{mi1} = -k_1 e_{mi1} + e_{mi2} \quad (18)$$

令 α_{i2} 为 x_{i3} 的虚拟控制输入,定义 α_{i2} 与 x_{i3} 的误差为 $e_{mi3} = x_{i3} - \alpha_{i2}$, 则

$$\dot{e}_{mi2} = -\lambda_2 e_{i2} + e_{mi3} + \alpha_{i2} - \dot{\alpha}_{i1} \quad (19)$$

设计虚拟控制输入

$$\alpha_{i2} = \lambda_2 e_{i2} + \dot{\alpha}_{i1} - k_2 e_{mi2} \quad (20)$$

式中 $k_2 > 0$ 为可调增益。

将式(20)代入式(19)得

$$\dot{e}_{mi2} = -k_2 e_{mi2} + e_{mi3} \quad (21)$$

对 e_{mi3} 求导,得到其动态方程如下

$$\begin{aligned} \dot{e}_{mi3} = & -\lambda_3 e_{i3} + \theta_{i1} x_{p2} + \theta_{i2} x_{p3} + \theta_{i3} g u + \theta_{i4} - \\ & k_s e_{i3} M_i^2 / \left(k_s e_{i3} \tanh\left(\frac{e_{i3}}{\delta(t)}\right) M_i + \delta(t) \right) - \dot{\alpha}_{i2} \end{aligned} \quad (22)$$

基于式(22)设计控制器

$$\begin{aligned} u_i = & u_{ia} + u_{is} \\ u_{ia} = & \frac{1}{\theta_{i3} g} \left[\lambda_3 e_{i3} - \theta_{i1} x_{p2} - \theta_{i2} x_{p3} - \theta_{i4} + \dot{\alpha}_{i2} + \right. \\ & \left. k_s e_{i3} M_i^2 / \left(k_s e_{i3} \tanh\left(\frac{e_{i3}}{\delta(t)}\right) M_i + \delta(t) \right) \right] \\ u_{is} = & -\frac{k_3 e_{mi3}}{\theta_{p3\min} g} \end{aligned} \quad (23)$$

式中 $k_3 > 0$ 为可调增益。

将控制器式(23)代入式(22)得

$$\dot{e}_{mi3} = -\frac{\theta_{i3}}{\theta_{p3\min}} k_3 e_{mi3} \quad (24)$$

2.3 切换策略的设计

对系统进行在线辨识并基于辨识模型设计控制器,其动机是通过辨识模型的稳定使得被控对象稳定。因此,如果使用多个辨识模型,具有最佳性能的模式也将产生最佳的控制性能。为了提高系统控制性能,需要在任何时刻有可靠的辨识性能指标。本文采用的切换方案是对基于系统辨识误差的指标函数进行监视,每次切换时选择对应于指标函数值最小的辨识模型的控制器作为系统的当前控制输入。

本文选择的性能指标函数为

$$J_i(t) = \alpha \|e_i(t)\|^2 + \beta \int_0^t \|e_i(\tau)\|^2 d\tau \quad (25)$$

式中: $\alpha > 0, \beta > 0$ 为对应项的权重,分别决定实时和历史辨识误差在性能指标中的权重。

切换函数

$$\begin{aligned} S(t) = & \text{sub}(J_i(t) = J_{\min}(t), i = 1, 2, \dots, N) \\ u = & u_{s(t)} \end{aligned} \quad (26)$$

式中: $\text{sub}(\cdot)$ 为取下标函数; $J_{\min}(t)$ 为 t 时刻各个辨识模型的性能指标函数中的最小值。将基于性能指标函数最小的辨识模型设计的控制器切换为当前控制器,即 $u = u_{s(t)}$,且切换间隙 $T_{\min} > \epsilon, \epsilon$ 为任意小的数,以防止无限切换。

2.4 控制性能及稳定性分析

定义系统真实位移和系统给定指令的误差 $z =$

$x_{p1} - x_{1d}$ 。

定理 对于电液伺服系统式(5),取参数自适应函数

$$\tau_i = \varphi e_{i3} \quad (27)$$

式中: $\varphi = [-x_{p2}, -x_{p3}, -gu, -1]^T$ 。

取 M 的自适应率

$$\dot{M}_i = \gamma |e_{i3}| \quad (28)$$

式中 $\gamma > 0$ 为参数自适应增益。

选取 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, k_1, k_2, k_3$ 使得如下定义的矩阵为正定矩阵

$$\Lambda = \begin{bmatrix} k_1 & -1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2 & k_2 & -1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/2 & k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & -1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/2 & \lambda_2 & -1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/2 & \lambda_3 \end{bmatrix}$$

则控制器式(23)及切换函数式(26)保证闭环系统中所有信号均有界,可获得渐近稳定跟踪,即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $z \rightarrow 0$,并且提高了系统的瞬态响应性能。

证明 假设某一时刻控制器为 u_i ,取李雅普诺夫函数为

$$\begin{aligned} V_i = & \frac{1}{2} e_{mi1}^2 + \frac{1}{2} e_{mi2}^2 + \frac{1}{2} e_{mi3}^2 + \frac{1}{2} e_{i1}^2 + \\ & \frac{1}{2} e_{i2}^2 + \frac{1}{2} e_{i3}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_i^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}_i + \frac{1}{2} \gamma^{-1} \tilde{M}_i^2 \end{aligned} \quad (29)$$

对其求得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = & -k_1 e_{mi1}^2 + e_{mi1} e_{mi2} - k_2 e_{mi2}^2 + e_{mi2} e_{mi3} - \\ & \frac{\theta_{i3}}{\theta_{p3\min}} k_3 e_{mi3}^2 - \lambda_1 e_{i1}^2 + e_{i1} e_{i2} - \lambda_2 e_{i2}^2 + e_{i2} e_{i3} - \\ & \lambda_3 e_{i3}^2 - \tilde{\theta}_i^T \varphi e_{i3} + \tilde{\theta}_i^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_i + \gamma^{-1} \tilde{M}_i \dot{M}_i - \\ & k_s e_{i3}^2 M_i^2 / \left(k_s e_{i3} \tanh\left(\frac{e_{i3}}{\delta(t)}\right) M_i + \delta(t) \right) - \\ & \tilde{d}(t) e_{i3} \end{aligned} \quad (30)$$

将参数自适应率式(11)(28)代入式(30)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i \leq & -\mathbf{E}_i^T \Lambda \mathbf{E}_i + M_i |e_{i3}| - \\ & k_s e_{i3}^2 M_i^2 / \left(k_s e_{i3} \tanh\left(\frac{e_{i3}}{\delta(t)}\right) M_i + \delta(t) \right) \end{aligned} \quad (31)$$

式中 $\mathbf{E}_i = [e_{mi1}, e_{mi2}, e_{mi3} e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}]^T$ 。

定义 $W_i = \mathbf{E}_i^T \Lambda \mathbf{E}_i$,根据引理1和引理2

$$\begin{aligned} \dot{V}_i \leq & -\mathbf{E}_i^T \Lambda \mathbf{E}_i + |e_{i3}| \left(M_i \delta(t) / (k_s |e_{i3}| M_i + \right. \\ & \left. \delta(t)) \right) \leq -W_i + \frac{\delta(t)}{k_s} \end{aligned} \quad (32)$$

对式(32)两边进行积分,得

$$V_i(t) + \int_0^t W_i \leq V_i(0) + \frac{\int_0^t \delta(\tau) d\tau}{k_s} \leq V_i(0) + L/k_s \quad (33)$$

因为 Λ 为正定矩阵,所以 $W_i > 0$,由式(33)可以得 $V_i(t)$ 有界,故 $e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}, e_{mi1}, e_{mi2}, e_{mi3}$ 及 $\tilde{\theta}_i, \tilde{M}_i$ 有界, $W_i \in L_2$,即 W_i 积分有界。由假设2、3,可得

θ_i, M_i 有界。根据假设 1, 系统的指令信号 $y_d(t) = x_{1d}(t) \in C^3$ 且有界, 则 x_{i1} 有界, 所以 $x_{p1}, \alpha_{i1}, x_{i2}, x_{p2}\dot{\alpha}_{i1}$ 有界, 可得 $\alpha_{i2}, x_{i3}, x_{p3}$ 有界, 因此 $\dot{W}_i$ 有界, 即 $\dot{W}_i \in L_\infty$ 。根据 Barbalat 引理可得 $t \rightarrow \infty$ 时, $W_i \rightarrow 0$, 因此 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $e_{m1} \rightarrow 0, e_{m2} \rightarrow 0, e_{m3} \rightarrow 0, e_{i1} \rightarrow 0, e_{i2} \rightarrow 0, e_{i3} \rightarrow 0$, 则系统跟踪误差

$$\begin{aligned} z &= x_{p1} - x_{1d} = (x_{i1} - x_{1d}) - \\ &\quad (x_{i1} - x_{p1}) = e_{m1} - e_{i1} \end{aligned} \tag{34}$$

由上述证明过程可知, 每一个控制器都可以使系统稳定。因此, 控制器式(23)和切换函数式(26)可以使得系统任意时刻都是稳定的, 即 $t \rightarrow \infty$ 时, $z \rightarrow 0$, 且把离真实系统最近的辨识模型所设计的控制器切换为系统当前控制器, 提高了系统的瞬态响应性能。

3 实验结果及分析

建立如图 2 所示的阀控电液位置伺服系统, 其系统参数与文献[3]相同。系统的供油压力 $P_s = 10$ MPa, $P_r = 0.08$ MPa, 采样时间为 0.5 ms。

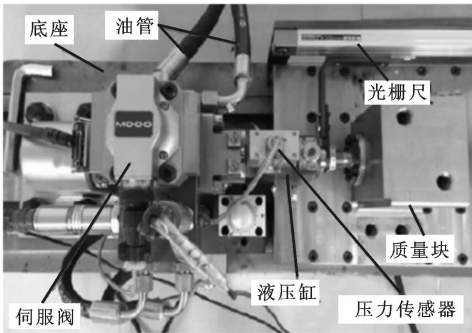


图 2 电液位置伺服系统实验平台

对比以下 5 种控制器以验证所提出控制器的有效性。

(1)MMRAC。本文所提出的多模型鲁棒自适应控制器, 控制器参数 $k_1 = 1\ 000, k_2 = 200, k_3 = 50, \lambda_1 = 1\ 000, \lambda_2 = 400, \lambda_3 = 100, \gamma = 0.05, \mathbf{\Gamma} = \text{diag}[20\ 000, 0.2, 1 \times 10^{-5}, 50]$ 。建立了 4 个辨识模型, $\theta_1(0) = [-1 \times 10^5, -100, 15, 0]^T, \theta_2(0) = [-5 \times 10^5, -500, 30, 0]^T, \theta_3(0) = [-1 \times 10^6, -1\ 000, 50, 0]^T, \theta_4(0) = [-2 \times 10^6, -2\ 000, 90, 0]^T, M_i(0) = 10, \delta(t) = 10\ 000/(t^2 + 1)$ 。取 $\alpha = 1, \beta = 1$, 初始控制器选为 u_2 。

(2)鲁棒自适应控制器(RAC)。传统的 RAC, 参数自适应初值 $\theta(0) = [-5 \times 10^5, -500, 30, 0]^T$, 其余参数同 MMRAC。

(3)多模型自适应控制器(MMAC)。与 MM-

RAC 的区别在于辨识模型中没有非线性鲁棒项, 控制器参数同 MMRAC。

(4)PI 控制器。控制器参数 $k_p = 8\ 000, k_i = 2\ 000$ 。

(5)VFPI 控制器。该控制器是速度前馈 PI 控制器, 速度增益 k_v 选为 $0.028\ 1\ \text{V} \cdot \text{s}/\text{mm}$, 这种控制结构在工业中被广泛使用, 其增益与 PI 控制器相同。

采用最大跟踪误差 M_e 、平均跟踪误差 μ 、跟踪误差的标准差 σ 等指标^[6]来评估以上 5 种控制器的性能。

为验证所提出算法的有效性, 选取两种不同工况进行实验验证。

工况 1: 取系统指令 $x_{1d} = 10 \arctan(\sin(\pi t)) \cdot [1 - e^{-t}]/0.785\ 4$ (mm), 该指令保证了假设 1 的条件。MMRAC 作用下系统位置跟踪、控制器输入、伺服液压缸两腔的压力值、切换函数分别如图 3~图 6 所示, 5 种控制器作用下系统位置跟踪误差如图 7 所示。5 种控制器作用下最后两周期的性能指标如表 1 所示。

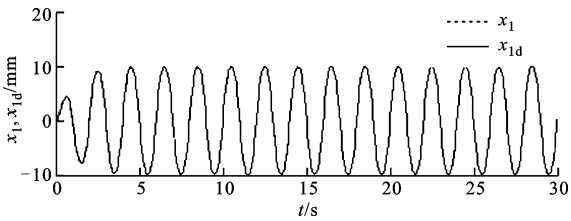


图 3 MMRAC 作用下系统的位置跟踪

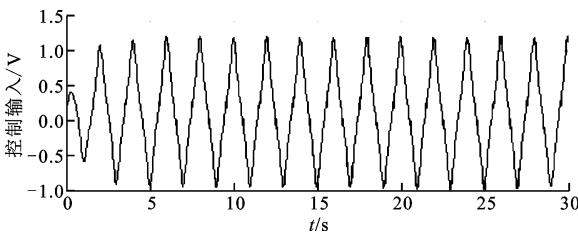


图 4 MMRAC 的控制输入

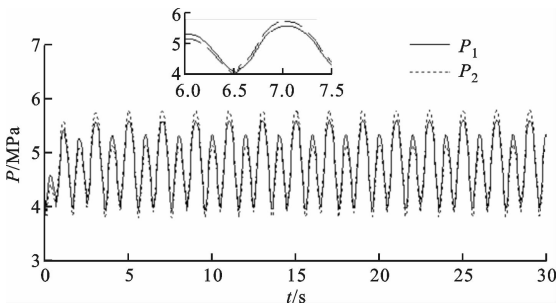


图 5 伺服液压缸两腔的压力值

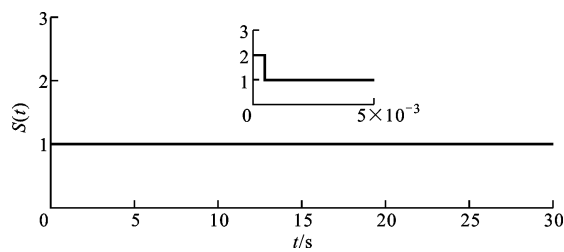


图 6 MMRAC 控制器切换图

由位置跟踪误差图 7 及表 1 中后两周期的性能指标可以看出,MMRAC 的各项性能指标均最优。由于 RAC 参数自适应初值选取得不合适,导致其跟踪性能较差,而 MMRAC 采用了多个辨识模型,其瞬态响应较 RAC 有了明显的提高。与 MMAC 相比,MMRAC 通过在辨识模型中加入非线性鲁棒项,抑制了外部干扰、未建模动态等不确定性的影响,提高了系统辨识的精度。由于 MMRAC 基于更为准确的辨识模型设计相应控制器,从而提高了系统的控制性能。从图 6 可以看出,MMRAC 的初始控制输入为 u_2 ,在经过一个采样周期后,系统的控制输入切换到 u_1 ,而后面 $S(t)$ 的值不再变化,说明已经切换到最佳的控制器。PI 控制器对模型不确定

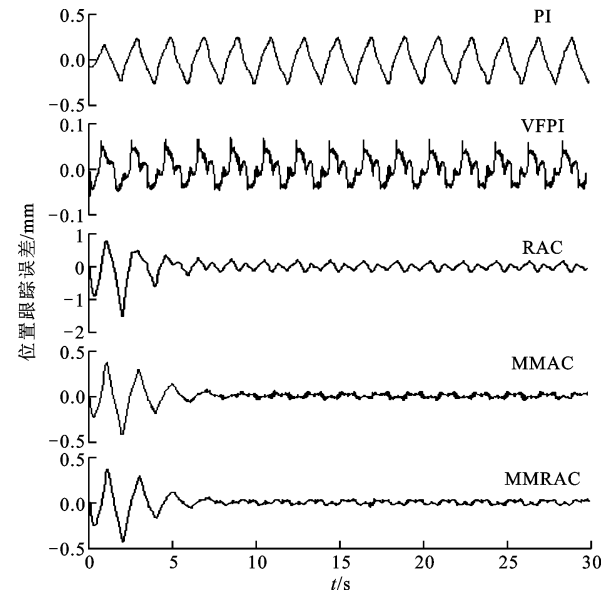


图 7 工况 1 下各控制器位置跟踪误差比较图

表 1 工况 1 下各控制器后两周期的性能指标				
控制器	M_e	μ	σ	
PI	0.265 1	0.136 6	0.079 1	
VFPI	0.062 5	0.021 2	0.013 3	
RAC	0.195 3	0.071 6	0.046 9	
MMAC	0.054 9	0.018 5	0.011 6	
MMRAC	0.038 6	0.017 9	0.007 6	

性有一些鲁棒性,其跟踪误差比其他 4 种控制器都要差。VFPI 控制器中加入了速度前馈,利用速度前馈消除主要的模型动态,同时通过大的反馈增益抑制其他未考虑的因素,但其性能指标仍不如 MMRAC。

工况 2:为了进一步验证算法的有效性,选取系统指令 $x_{1d} = 30\arctan(\sin(0.4\pi t)) [1 - e^{-t}]/0.785 4$ (mm)。5 种控制器的位置跟踪误差如图 8 所示,最后两周期的性能指标如表 2 所示。

同样,从实验结果可以看出,MMRAC 的各项性能指标均优于其他 4 种控制器,从而进一步验证了所提出算法的有效性。

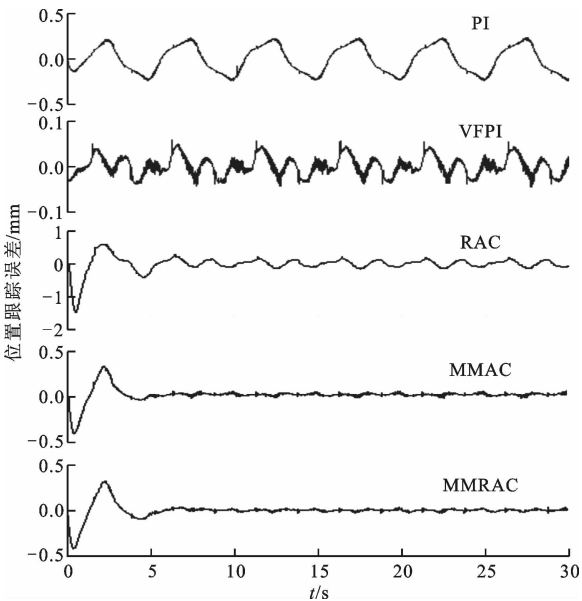


图 8 工况 2 下各控制器位置跟踪误差比较图

表 2 工况 2 下各控制器后两周期的性能指标				
控制器	M_e	μ	σ	
PI	0.230 3	0.134 1	0.062 1	
VFPI	0.055 1	0.016 0	0.012 2	
RAC	0.190 9	0.069 6	0.042 1	
MMAC	0.045 7	0.008 5	0.007 1	
MMRAC	0.032 9	0.007 8	0.005 7	

4 结 论

本文针对电液伺服系统存在的强参数不确定性和不确定非线性,设计了一种多模型鲁棒自适应控制器。通过设计多个含有非线性鲁棒项的辨识模型对系统进行在线辨识,并基于辨识模型设计相应的控制器。采用基于辨识误差的性能指标函数作为切换依据,选取最佳辨识模型及控制器,并把该控制器

作为当前控制器,解决了传统自适应控制对参数自适应初值敏感的问题,提高了系统的瞬态响应性能。通过辨识模型中的非线性鲁棒项,减小了干扰、未建模动态等不确定非线性影响。运用李雅普诺夫稳定性理论,证明了控制器的稳定性。实验结果表明,通过设计多个含有非线性鲁棒项的辨识模型,可以有效抑制建模不确定性的影响,提高系统跟踪精度,与MMAC相比,稳态精度提高了28%左右,验证了本文所提算法的有效性。

参考文献:

- [1] MERRITT H E. Hydraulic control systems [M]. New York, USA: Wiley, 1967: 100-175.
- [2] 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.
- [3] YAO J, DENG W, SUN W. Precision motion control for electro-hydraulic servo systems with noise alleviation: a desired compensation adaptive approach [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 859-868.
- [4] 徐张宝, 朱忠领, 马大为, 等. 考虑状态约束的液压系统自适应控制 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(1): 97-102.
XU Zhangbao, ZHU Zhongling, MA Dawei. Adaptive control of hydraulic systems with state constraints [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(1): 97-102.
- [5] YAO J, DENG W, JIAO Z. Adaptive control of hydraulic actuators with LuGre model based friction compensation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6469-6477.
- [6] 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.
- [7] GUAN C, PAN S. Adaptive sliding mode control of electro-hydraulic system with nonlinear unknown parameters [J]. Control Theory & Applications, 2008, 16(11): 1275-1284.
- [8] REN H P, GONG P F. Adaptive control of hydraulic position servo system using output feedback [J]. Journal of Systems & Control Engineering, 2017, 23(7): 527-540.
- [9] YAO B, BU F, REED Y J, et al. Adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuators: theory and experiments [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 5(1): 79-91.
- [10] 徐张宝, 马大为, 姚建勇, 等. 采用干扰估计的液压系统自适应鲁棒控制 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(8): 123-129.
XU Zhangbao, MA Dawei, YAO Jianyong, et al. An adaptive robust control algorithm for hydraulic actuators with disturbance estimation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(8): 123-129.
- [11] NARENDRA K S, BALAKRISHNAN J. Adaptive control using multiple models [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42(2): 171-187.
- [12] 李晓理, 张维存, 王伟. 基于有界扰动分区的多模型自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(2): 283-286.
LI Xiaoli, ZHANG Weicun, WANG Wei. Multiple model adaptive control based on the scope of bounded disturbance [J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(2): 283-286.
- [13] 邵彭真, 方一鸣, 王文宾, 等. 轧机液压伺服系统多模型切换自适应反步控制 [J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(11): 1346-1351.
SHAO Pengzhen, FANG Yiming, WANG Wenbin, et al. Adaptive backstepping control of multi-model switching for the hydraulic servo position system of a rolling mill [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(11): 1346-1351.
- [14] HAN Z, NARENDRA K S. New concepts in adaptive control using multiple models [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(1): 78-89.
- [15] NARENDRA K S, WANG Y, CHEN W. Stability, robustness, and performance issues in second level adaptation [C]// American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 2377-2382.
- [16] CHEN W, SUN J, CHEN C, et al. Adaptive control of a class of nonlinear systems using multiple models with smooth controller [J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2015, 25(6): 865-877.
- [17] CHEN J, CHEN W, SUN J. Smooth controller design for nonlinear systems using multiple fixed models [J]. IET Control Theory & Applications, 2017, 11(9): 1467-1473.
- [18] YAO J, JIAO Z, MA D, et al. High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(2): 633-641.

(编辑 荆树蓉)