

文章编号: 1001-0920(2009)02-0221-05

电液位置伺服系统的多滑模神经网络控制

陈刚, 柴毅, 丁宝苍, 魏善碧

(重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

摘要: 针对电液位置伺服系统存在的强非线性、控制增益未知和非匹配不确定性, 通过引入神经网络和带饱和层的多滑模面, 提出了一种多滑模神经网络控制方法. 该方法运用神经网络的万能逼近特性和滑模控制优良的抗干扰特点, 采用构造性方法设计控制器. 运用光滑投影算法和积分李雅普诺夫技术, 避免了参数漂移和控制器奇异问题. 理论证明了系统跟踪误差收敛于任意设定的滑模面饱和层内. 仿真实验表明了理论结果的有效性.

关键词: 电液位置伺服系统; 滑模控制; 神经网络; 非线性系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Multiple sliding mode neural network control of electro-hydraulic position servo system

CHEN Gang, CHAI Yi, DING Baocang, WEI Shanbi

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Correspondent: CHEN Gang, E-mail: chengang@cqu.edu.cn)

Abstract: A multiple sliding mode neural network control scheme, which combines the technology of neural network and sliding mode surface with boundary layer, is proposed for an electro-hydraulic position servo system with strong nonlinear terms, unknown control gain and mismatched uncertainties. By employing the universal approximation property of neural network and the advantage of sliding mode control, and using constructive method, the controller is designed. The parameter drift and controller singular problem are avoided perfectly by applying the smooth projection method and the integral type Lyapunov function. It is proved that the tracking error converges to the arbitrarily prescribed boundary layer. Simulation results demonstrate the effectiveness of the control strategy.

Key words: Electro-hydraulic position servo system; Sliding mode control; Neural network; Nonlinear system

1 引言

电液伺服系统具有响应速度快、信号处理灵活、刚度高、输出功率大、结构紧凑和重量轻等优点, 在船舶制造、材料处理、农业设备、军事装置和工业设备中得到了广泛应用^[1-3]. 液动力系统的高度非线性、伺服阀的阀芯换向、运动摩擦等因素使得伺服系统是一个典型的非线性系统, 同时系统负载、外界干扰、不同温度下液压油的弹性模量和粘性的变化等因素使得系统存在大量的不确定性^[4-6]. 因此, 对电液伺服系统采用常规 PID 控制算法往往达不到设计要求^[3,7]. 常用的控制算法是在工作点处对电液伺服系统的非线性模型进行线性化处理, 并应用线性控制理论对其进行控制器的设计. 由于液压系统

的工作点一般不固定, 这就导致模型误差大, 控制效果不理想. 滑模控制与状态反馈精确线性化方法相结合的控制策略得到了研究人员的广泛关注, 并在液压伺服控制系统中得到了应用. 为使系统在滑动模态上运动, 变结构滑模控制需要来回地作逻辑切换, 容易引起抖振现象^[8]. 变结构控制算法的另一不足之处是要求系统的不确定性满足匹配条件. 液压系统的不确定性是非匹配的, 且为高阶系统^[9].

虽然电液伺服系统得到了广泛应用, 但设计一种既能克服系统非线性特性和时变特性, 又具有良好跟踪性能的控制器的仍很困难. 本文将针对电液位置伺服系统, 提出一种多滑模神经网络控制策略. 当系统信息来源于传感器的数据信息和专家的语言

收稿日期: 2007-11-16; 修回日期: 2008-04-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60504013); 重庆大学青年骨干教师创新基金项目(CDCX019).

作者简介: 陈刚(1976—), 男, 重庆人, 讲师, 博士, 从事机电控制、非线性控制的研究; 柴毅(1962—), 男, 安徽芜湖人, 教授, 博士, 从事智能控制等研究.

信息时,作者将在另文给出多滑模模糊控制器的设计方法.

2 电液位置伺服系统的数学模型

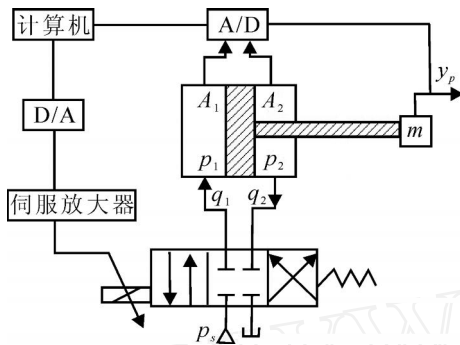


图 1 电液位置伺服系统

图 1 为电液位置伺服系统,通过伺服阀实现液压缸活塞位移的伺服控制.整个系统的动态模型描述如下:

1) 伺服系统的动力学方程为

$$m\ddot{y}_p = p_1 A_1 - p_2 A_2 - b\dot{y}_p - F_f(\dot{y}_p) + F(y_p, \dot{y}_p). \quad (1)$$

这里: m 为活塞和负载的总质量; y_p 表示活塞位移; A_1 为活塞头端面积, A_2 为活塞杆侧的面积; p_1 和 p_2 分别表示负载液压缸左右两腔的压力; b 表示活塞以及负载的粘性阻尼系数; F_f 为库仑摩擦力; F 表示外界干扰、未建模动态等未知非线性项.

2) 液压缸流量连续性方程. 对于液压缸的进油腔,在忽略内外泄漏时,根据流进油腔的净流量等于流体压缩流量与活塞运动所需流量之和,可得

$$q_1 = A_1 \dot{y}_p + \frac{v_{01}}{e} \dot{p}_1. \quad (2)$$

这里: q_1 为流入进油腔的流量, v_{01} 为液压缸进油腔的容积(包括阀、连接管道和液压缸左缸的体积), e 为流体等效体积弹性模量.

对于回油腔,由流量连续性方程可得

$$-q_2 = -A_2 \dot{y}_p + \frac{v_{02}}{e} \dot{p}_2. \quad (3)$$

这里: q_2 为流出回油腔的流量, v_{02} 为回油腔的体积.

设液压缸进油腔和回油腔的初始体积分别为 v_{01} 和 v_{02} , 那么有

$$v_1 = v_{01} + A_1 y_p, \quad v_2 = v_{02} - A_2 y_p. \quad (4)$$

3) 伺服阀流量特性方程. 当伺服阀阀芯位移 x_q 0 时,有

$$q_1 = k_{q1} x_q \sqrt{p_s - p_1}, \quad q_2 = k_{q2} x_q \sqrt{p_2}; \quad (5)$$

当伺服阀阀芯位移 $x_q < 0$ 时,有

$$q_1 = k_{q1} x_q \sqrt{p_1}, \quad q_2 = k_{q2} x_q \sqrt{p_s - p_2}. \quad (6)$$

其中: k_{qi} ($i = 1, 2$) 表示伺服阀的流量增益系数, $k_{qi} = c_d w \sqrt{2/\rho}$ ($i = 1, 2$); c_d 为滑阀节流窗口的节流系

数; w 为伺服阀口面积梯度; ρ 为油液密度.

令 $x_1 = y_p, x_2 = \dot{x}_1, x_3 = \frac{A_1}{m}(p_1 - p_2/2), A_1 = 2A_2$. 为减少计算误差,引入比例参数 S_c , 令 $u = x_q/S_c$. 由系统模型方程(1) ~ (6), 可得如下的系统状态方程:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3 - \frac{b}{m} x_2 - \frac{F_f(x_2)}{m} + \frac{F(x_1, x_2)}{m}, \\ \dot{x}_3 &= \frac{A_1}{m} \left(\frac{e}{v_{01} + A_1 x_1} k_{q1} \sqrt{|p_1|} + \frac{e}{2(v_{02} - A_2 x_1)} k_{q2} \sqrt{|p_2|} \right) S_c u - \frac{A_1}{m} \left(\frac{e A_1}{v_{01} + A_1 x_1} + \frac{e A_2}{2(v_{02} - A_2 x_1)} \right) x_2. \quad (7) \end{aligned}$$

这里

$$p_1 = \begin{cases} p_s - p_1, & \forall x_q \geq 0; \\ p_1, & \forall x_q < 0; \end{cases} \quad p_2 = \begin{cases} p_2, & \forall x_q \geq 0; \\ p_s - p_2, & \forall x_q < 0. \end{cases}$$

针对存在不确定参数和未建模动态的电液伺服系统,本文的控制目标是使液压缸活塞的输出 $y_p = x_1$ 跟踪给定的运动规律 y_d , 同时保证闭环系统所有信号是有界的.

本文采用径向基神经网络来逼近系统状态方程中的未知光滑函数. 对一个非线性光滑函数 $f(x)$, 由神经网络的万能逼近定理可得

$$f(x) = W^T \phi(x) + o. \quad (8)$$

这里: $x \in R^n$ 为输入矢量, $W = (w_1, \dots, w_l)^T$ 为权重矢量, $l > 1$ 表示神经网络节点数, $\phi(x) = (\phi_1(x), \dots, \phi_l(x))^T$, o 为逼近误差. $\phi_i(x)$ 表示高斯函数

$$\phi_i(x) = \exp\left(-\frac{(x - \mu_i)^T (x - \mu_i)}{\sigma_i^2}\right), \quad i = 1, \dots, l. \quad (9)$$

其中: $\mu_i = (\mu_{i1}, \dots, \mu_{in})^T$ 为接收域的中心, σ_i 为高斯函数宽度.

为避免自适应控制算法中的参数漂移现象,下面引入光滑投影算法的定义.

定义 1 令 $\Omega \subset R$ 表示半径为 r 的闭球域, (t) 为未知的时变参数矢量, $\hat{\cdot}(t)$ 为其估计值, 投影算法 $\text{Proj}(y, \hat{\cdot})$ 定义为^[10]

$$\text{Proj}(y, \hat{\cdot}) = \begin{cases} y, & \hat{\cdot} \in \Omega; \\ y, & \hat{\cdot} \in \Omega, \text{ 且 } \frac{\partial}{\partial \hat{\cdot}} y \leq 0; \\ y - \frac{(\hat{\cdot})}{\sigma} \frac{\partial}{\partial \hat{\cdot}} y, & \text{其他.} \end{cases} \quad (10)$$

这里 $\lambda = (\lambda^T \lambda - r^2) / (r^2 + 2r)$, 为正实数. 如果 $\lambda > 0$, 投影算法具有以下几个性质:

- 1) $\lambda > 0, \forall t \geq 0$;
- 2) $\text{Proj}(y, \lambda) = y$;
- 3) $\lambda^T \text{Proj}(y, \lambda) = \lambda^T y, \lambda = \lambda - \lambda$.

3 控制器的设计

在整个控制器的设计中, 本文将定义 3 个滑模面 $s_i = x_i - x_{id}, i = 1, 2, 3$, 这里 x_{id} 表示状态变量 x_i 的期望值, 其中 $x_{1d} = y_d$.

Step1: 对第 1 个滑模面求导, 可得

$$\dot{s}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} = \dot{x}_2 - \dot{y}_d \quad (11)$$

为了镇定式(11), x_{2d} 设计为

$$x_{2d} = \dot{y}_d - c_1 \frac{s_1}{h_1} \quad (12)$$

其中: $c_1 > 0$ 为设计参数, $h_1 > 0$ 为第 1 个滑模面饱和层的厚度.

Step2: 对第 2 个滑模面求导, 可得

$$\dot{s}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} = \dot{x}_3 + f_1(x_1, x_2) - \dot{x}_{2d} \quad (13)$$

这里

$$f_1(x_1, x_2) = -\frac{h}{m} x_2 - \frac{F_f(x_2)}{m} + \frac{F(x_1, x_2)}{m}$$

由于函数 f_1 未知, 可采用前一节介绍的径向基神经网络来逼近它, 即

$$f_1(x_1, x_2) = w_1^T \phi_1(x_1, x_2) + \epsilon_1 \quad (14)$$

为镇定式(13), x_{3d} 设计为

$$x_{3d} = \dot{x}_{2d} - \hat{w}_1^T \phi_1(x_1, x_2) - c_2 \frac{s_2}{h_2} \quad (15)$$

其中: $c_2 > 0$ 为设计参数, $h_2 > 0$ 表示第 2 个滑模面饱和层的厚度. 对式(12)求导, 并根据(11), 可得

$$\dot{x}_{2d} = \ddot{y}_d + s_1 c_1^2 / h_1^2 - s_2 c_1 / h_1$$

\hat{w}_1 表示神经网络参数向量 w_1 的估计值, 其在线调节律取为

$$\dot{\hat{w}}_1 = r_1 \text{Proj}(s_2 \phi_1, \hat{w}_1) \quad (16)$$

这里 $r_1 > 0$ 为正实数.

Step3: 令

$$g(x_1) = \frac{A_1}{m} \left(\frac{e^{-\frac{c_1 |s_1|}{h_1}}}{v_{01} + A_1 x_1} k_{q1} \sqrt{|p_1|} + \frac{e^{-\frac{c_2 |s_2|}{h_2}}}{2(v_{02} - A_2 x_1)} k_{q2} \sqrt{|p_2|} \right) S_c$$

$$f_2(x_1, x_2) = -\frac{A_1}{m} \left(\frac{e^{-\frac{c_1 |s_1|}{h_1}}}{v_{01} + A_1 x_1} + \frac{e^{-\frac{c_2 |s_2|}{h_2}}}{2(v_{02} - A_2 x_1)} \right) x_2$$

存在函数 $\bar{g}(x_1)$ 使得 $\bar{g}(x_1) > g(x_1)$. 设 $(x_1) = \bar{g}(x_1) / g(x_1), V_{30} = \int_0^{s_3} (x_1) d$, 取代数变换

$$s_3, \text{有 } V_{30} = \int_0^{s_3} (x_1) d, \text{对 } V_{30} \text{ 求导可得}$$

$$\dot{V}_{30} = s_3 (x_1) \dot{s}_3 + \int_0^{s_3} (x_1) d =$$

$$s_3 \left(\bar{g}(x_1) u + (x_1) f_2(x_1, x_2) + \int_0^{s_3} (x_1) d - (x_1) \dot{x}_{3d} \right) \quad (17)$$

采用一个径向基神经网络来逼近如下的非线性函数:

$$(x_1) f_2(x_1, x_2) + s_3 \int_0^{s_3} (x_1) d - (x_1) \dot{x}_{3d} = w_2^T \phi_2(x_1, x_2, x_3) + \epsilon_2 \quad (18)$$

实际控制器设计为

$$u = \frac{1}{g(x_1)} \left(-\hat{w}_2^T \phi_2(x_1, x_2, x_3) - c_3 \frac{s_3}{h_3} \right) \quad (19)$$

其中: $c_3 > 0$ 为设计参数, $h_3 > 0$ 为第 3 个滑模面的饱和层厚度. \hat{w}_2 表示向量参数 w_2 的估计值, 在线自适应律取为

$$\dot{\hat{w}}_2 = r_2 \text{Proj}(s_3 \phi_2, \hat{w}_2) \quad (20)$$

这里 $r_2 > 0$ 为正实数.

4 稳定性分析

下面给出本文的主要结论.

定理 1 考虑由电液伺服系统(7), 控制器(19)及参数自适应律(16)和(20)所构成的闭环控制系统. 对于给定的紧集 $\Omega \subset R^3$, 当系统初始状态满足 $x(0) \in \Omega$ 时, 闭环系统所有信号是有界的. 同时, 系统跟踪误差收敛于任意给定的滑模面饱和层内.

证明 考虑 Lyapunov 候选函数

$$V_3 = V_{30} + \frac{1}{2r_2} \overline{w_2^T w_2} \quad (21)$$

根据式(17) ~ (20), 对 V_3 求导, 经整理可得

$$\dot{V}_3 = -c_3 \frac{s_3^2}{h_3} + s_3 \dot{s}_2 + \overline{w_2^T} (s_3 \phi_2 - \frac{1}{r_2} \dot{\hat{w}}_2) \quad (22)$$

由投影算法的性质, 有

$$\dot{V}_3 \leq \left(-c_3 \frac{|s_3|}{h_3} + |\dot{s}_2| \right) |s_3|$$

设计参数 c_3 使得 $c_3 \sup(|\dot{s}_2|)$, 可得 \dot{V}_3

$c_3 / |s_3| \left(-\frac{|s_3|}{h_3} + 1 \right)$, 当 $|s_3| > h_3$ 时, $\dot{V}_3 < 0$, 故 $|s_3| \leq h_3$.

考虑 Lyapunov 候选函数

$$V_2 = \frac{1}{2} (s_2^2 + \frac{1}{r_1} \overline{w_1^T w_1}) \quad (23)$$

对 V_2 求导可得

$$\dot{V}_2 = s_2 \dot{s}_3 - c_2 \frac{s_2^2}{h_2} + s_2 \dot{s}_1 + \overline{w_1^T} (s_2 \phi_1 - \frac{1}{r_1} \dot{\hat{w}}_1) = s_2 \dot{s}_3 - c_2 \frac{s_2^2}{h_2} + s_2 \dot{s}_1 \quad (24)$$

当 $|s_3| \leq h_3$ 时, 首先考虑 $s_2 > h_2$ 的情况. 在式(24)

两边同除以 s_2 , 可得 $\frac{\dot{V}_2}{s_2} = \dot{s}_3 - c_2 \frac{s_2}{h_2} + \dot{s}_1$. 设计参数 c_2 使得 $c_2 \sup(|\dot{s}_1|)$, 可得 $\dot{V}_2 < 0$.

接着考虑 $s_2 < -h_2$ 的情况,在式(24)两边同除以 s_2 ,可得 $\frac{\dot{V}_2}{s_2} = s_3 + c_2 \frac{|s_2|}{h_2} + 1$,进一步可知 $\dot{V}_2 < 0$.

综上所述,可得结论 $|s_2| < h_2$. 下面证明跟踪误差的有界性.

考虑 Lyapunov 候选函数 $V_1 = \frac{1}{2} s_1^2$, 对 V_1 求导得

$$\dot{V}_1 = s_1 s_2 - c_1 \frac{s_1^2}{h_1} \quad (25)$$

当 $|s_2| < h_2$ 时,首先考虑 $s_1 > h_1$ 的情况. 在式(25)两边同除以 s_1 ,可得 $\frac{\dot{V}_1}{s_1} = s_2 - c_1 \frac{s_1}{h_1}$. 设计参数 c_1 使得 $c_1 > h_2$,可得 $\dot{V}_1 < 0$.

接着考虑 $s_1 < -h_1$ 的情况,在式(25)两边同除以 s_1 ,可得 $\frac{\dot{V}_1}{s_1} = s_2 + c_1 \frac{|s_1|}{h_1}$,进一步可知 $\dot{V}_1 < 0$.

综上所述,可得结论 $|s_1| < h_1$,即系统跟踪误差收敛于任意设定的饱和层 h_1 内.

由 $|s_1| < h_1$ 可知 x_1 是有界的,根据式(12)可知 x_{2d} 有界;由 $|s_2| < h_2$ 可知 x_2 有界,根据式(15)可知 x_{3d} 有界. 进而根据 $|s_3| < h_3$ 可知 x_3 有界. 因此闭环系统所有状态变量是有界的.

5 仿真研究

应用本文提出的多滑模神经网络控制算法,在 Matlab 环境下编程对电液位置伺服系统进行仿真跟踪实验. 仿真中取期望跟踪轨迹为 $y_d = 0.04\sin(\frac{t}{2}) + 0.04$. 算法设计中构造了两个径向基神经网络,其高斯函数的宽度均取为 1. 第 1 个神经网络的输入矢量为 (x_1, x_2) ,包括 11 个节点,接收域的中心均匀分布在空间 $[-0.1, 0.1] \times [-0.1, 0.1]$ 上. 第 2 个神经网络的输入矢量为 (x_1, x_2, x_3) ,节点数取为 11,接收域的中心均匀分布在空间 $[-0.1, 0.1] \times [-0.1, 0.1] \times [-0.1, 0.1]$ 上. 在仿真研究中,电液伺服系统的参数分别取为: $m = 6000 \text{ Kg}$, $A_1 = 0.003 \text{ m}^2$, $b = 2500 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $F_f(x_2) = 700 \text{ sgn}(x_2)$, $e = 2.5 \text{ Mpa}$, $p_1 = 1 \text{ Mpa}$, $p_2 = 2 \text{ Mpa}$, $p_3 = 10 \text{ Mpa}$, $v_{01} = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $v_{02} = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $c_1 = c_2 = c_3 = 2$, $h_1 = h_2 = h_3 = 0.1$, $k_{q1} = 3.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \sqrt{\text{m/kg}}$, $k_{q2} = 2.65 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \sqrt{\text{m/kg}}$, $r = 0.5$, $F(x_1, x_2) = 2500\sin t$, $\hat{x}_1(0) = 0.04$, $\hat{x}_2(0) = 0$, $\hat{x}_3(0) = 1$, $\hat{w}_2(0) = 0$, $\hat{w}_1(0) = (0.01 \ 0.1 \ 0)^T$. 图 2 和图 3 表明,对于存在未知的强非线性函数的伺服系统模型,控制算法取得了良好的跟踪性能. 图 4 为压差控

制量,由于在控制器中引入了饱和层,使得控制算法避免了抖振现象的发生. 通过在参数自适应律中引入投影函数,可以防止参数漂移现象的发生,即图 5 表明自适应参数是有界的.

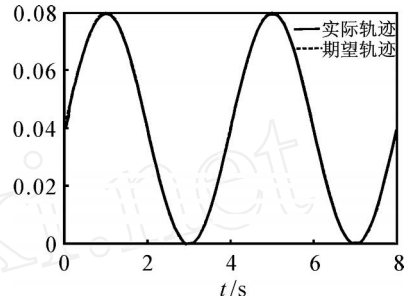


图 2 跟踪轨迹

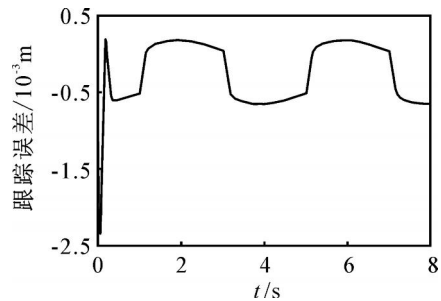


图 3 跟踪误差

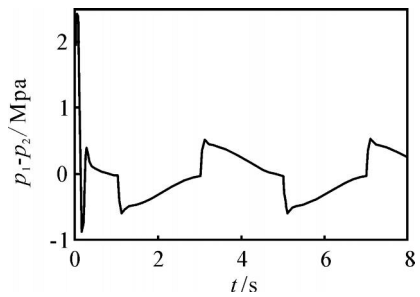


图 4 控制压差

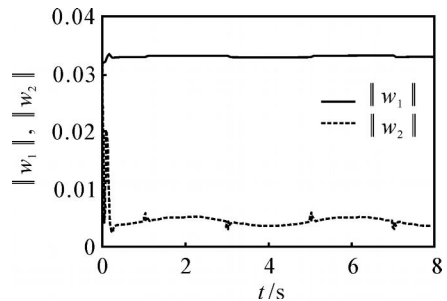


图 5 神经网络自适应参数

6 结 论

本文针对具有未知强非线性函数、未知控制增益的非匹配电液位置伺服系统,结合神经网络的万能逼近特性以及滑模控制的强抗干扰性能,提出了一种多滑模神经网络控制策略. 控制算法能够克服系统模型中的未建模动态、非匹配不确定性、控制器奇异、参数漂移等问题. 算法从理论上保证了跟踪误

差收敛于任意设定的滑模面饱和层内. 仿真结果进一步说明了理论分析的有效性.

参考文献(References)

- [1] 王春行. 液压伺服控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
(Wang C X. Hydraulic servo control system [M]. Beijing: China Machine Press, 1987.)
- [2] 王雪松, 程玉虎, 易建强. 电-气位置伺服控制系统的研究进展[J]. 控制与决策, 2007, 22(6): 601-607.
(Wang X S, Cheng Y H, Yi J Q. Survey of the electro-pneumatic position servo control systems [J]. Control and Decision, 2007, 22(6): 601-607.)
- [3] Ioan U, Felicia U, Florica P. Backstepping design for controlling electrohydraulic servos[J]. J of the Franklin Institute, 2006, 343(1): 94-110.
- [4] 方一鸣, 聂颖, 王众. 电液伺服位置系统的变结构自适应鲁棒控制[J]. 计算机仿真, 2006, 23(11): 149-152.
(Fang Y M, Nie Y, Wang Z. Adaptive robust variable structure control of electro-hydraulic servo position system[J]. Computer Simulation, 2006, 23(11): 149-152.)
- [5] 陈浩锋, 戴一帆, 杨军宏. 非线性电液位置伺服系统的自学习滑模模糊控制[J]. 机床与液压, 2006, 34(9): 172-175.
(Chen H F, Dai Y F, Yang J H. Self-organizing sliding mode fuzzy control for electro-hydraulic position servo nonlinear systems [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006, 34(9): 172-175.)
- [6] 郭洪波, 李洪人. 基于 Backstepping 的阀控非对称缸电液伺服系统非线性控制[J]. 液压与气动, 2004, (10): 38-40.
(Guo H B, Li H R. Backstepping-based nonlinear control for asymmetric cylinder electro-hydraulic servo system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004, (10): 38-40.)
- [7] 黄进, 邵明贤, 段宝岩. 大射电望远镜舱索伺服系统的自适应滑模控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(6): 647-651.
(Huang J, Shao M X, Duan B Y. Adaptive sliding mode control for cabin-cable servo system of large spherical radio telescope [J]. Control and Decision, 2007, 22(6): 647-651.)
- [8] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学出版社, 1990.
(Gao W B. Theory foundation of variable structure control [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990.)
- [9] 管成, 朱善安. 基于 Backstepping 的电液伺服系统多级自适应滑模控制[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(6): 569-573.
(Guan C, Zhu S A. Backstepping-based multiple cascade adaptive sliding mode control of an electro-hydraulic servo system [J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2005, 26(6): 569-573.)
- [10] Pomet J B, Praly L. Adaptive nonlinear regulation: Estimation from Lyapunov equation [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 37(6): 729-740.
- [4] Kim J H. Discrete-time robust guaranteed cost filtering for convex bounded uncertain systems with time delay [J]. ICASE: The Institute of Control, Automation and Systems Engineers, 2002, 4(4): 324-329.
- [5] Kothare M, Balakrishnan V, Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities[J]. Automatica, 1996, 32(10): 1361-1379.
- [6] Francesco A Cuzzola, Jose C Geromel, Manfred Morari. An improved approach for constrained robust model predictive control[J]. Automatica, 2002, 38(7): 1183-1189.
- [7] Casavola A, Mosca E. Robust reference governors for constrained uncertain linear systems subject to input disturbances[C]. Proc of the 1996 IEEE Control and Decision Conference. Kobe, 1996: 3531-3536.
- [8] Casavola A, Giannelli M, Mosca E. Min-max predictive control strategies for input saturated polytopic uncertain systems [J]. Automatica, 2000, 36(1): 125-133.
- [9] Rawling J, Muske K. The stability of constrained receding horizon control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1993, 38(10): 1512-1516.
- [10] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V. Constrained model predictive control: Stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36(6): 789-814.
- [11] Tingshu Hu, Zongli Lin, Ben M Chen. An analysis and design method for linear systems subject to actuator saturation and disturbance [J]. Automatica, 2002, 38(2): 351-359.
- [12] Ding B C, Xi Y G, Li S Y. A synthesis approach of on-line constrained robust model predictive control [J]. Automatica, 2004, 40(1): 163-167.

(上接第 220 页)