

电液系统中新型反步自适应控制器设计*

袁朝辉, 袁 鸣

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要:针对非匹配不确定非线性系统的控制问题,介绍了反步控制的基本设计原理,然后提出了一种自适应反步控制算法,该控制方法不需要掌握被控系统不确定因素函数及其导数的上界,基于 Lyapunov 函数,给出了自适应控制规律,以及 CMAC 权值调整信息。采用 CMAC 神经网络在线学习系统的不确定性以及各阶虚拟控制量的导数信息,避免了系统阶次较高时引起的计算膨胀问题;在递推设计的最后一步加入非连续性鲁棒控制作用,克服了 CMAC 神经网络在线学习系统不确定性带来的误差;另外,该控制算法在实际控制输入前加入了低通滤波器,避免了因输入不连续而可能导致的抖振问题;最后,将所提出的控制算法应用于电液力伺服系统。稳定性分析表明,该控制方法具有渐近稳定性;仿真研究结果表明,该控制算法在理论上是有效的,同时对未知干扰和系统不确定性具有鲁棒特性。

关键词:电液力伺服系统;非线性系统;自适应反步控制;在线学习系统;低通滤波器

中图分类号:TP273.2;TH39;TH137.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)07-0769-05

New type backstepping adaptive controller for electro-hydraulic system

YUAN Zhao-hui, YUAN Ming

(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at controlling a class of non-matching uncertain nonlinear systems, a new type backstepping adaptive control algorithm which is based on the basic backstepping control method was proposed. The algorithm does not need to comprehend the controlled system uncertain function as well as its derivative bound. Adaptive control law and CMAC weight adjustment information was proposed based on Lyapunov function. The calculation expansion problem was avoided by using the CMAC to approximate the system uncertainties and the derivative of virtual control input online. In addition, the discontinuous robust control term was added in the last step of backstepping recursion to overcome the CMAC online approximation error of uncertainties. For solving the chattering problem caused by the discontinuous input of discontinuous robust control term, the low-pass filter was added before the practical control input. Finally, the proposed control algorithm was applied to the electric hydraulic servo system. The stability analysis shows that the control method can guarantee the output tracking error asymptotically convergent to zero. The simulation results indicate that the algorithm is effective and robust to system uncertainties and unknown disturbances.

Key words: electro-hydraulic servo system; nonlinear system; adaptive backstepping control; online learning system; low-pass filter

0 引 言

反步设计方法是交叉选择 Lyapunov 函数与反馈

控制的递归过程,它将整个系统的设计问题分解为一系列低阶(甚至是标量)子系统的设计问题。利用低阶子系统或标量子系统存在的额外自由度,反步设计

收稿日期:2013-03-08

作者简介:袁朝辉(1964-),男,安徽舒城人,博士,教授,博士生导师,主要从事电液伺服系统的理论分析、检测与控制技术方面的研究. E-mail: yuanzhh@nwpu.edu.cn

方法能在与其他方法相比更宽松的条件下求解稳定控制、跟踪控制和鲁棒控制问题^[1]。由于反步法递推系统的设计步骤,不仅可以处理非匹配不确定性,还可以处理带有未知参数的非线性系统,反步法在不确定非线性系统控制设计领域引起了广泛关注^[2-7]。基于反步法的各种控制算法为一大类非线性系统提供了系统的跟踪、镇定控制策略设计框架。尤其当干扰和不确定性不满足匹配条件时,自适应反步设计方法已经显示出它的优越性。但反步设计方法也存在着明显的缺陷:在递推设计过程中需要对虚拟控制进行求导,虽然这在理论上不存在任何问题,但却可能导致项数的膨胀最终使得每一步都很复杂,控制器的复杂程度随着系统阶数的增加而急剧增加^[8-10]。近年来,基于反步设计思想,部分学者提出了多滑模控制方法,该方法在解决反步法计算膨胀问题上具有一定的效果,但为了克服不确定性必须增大各滑模增益,且各滑模的趋近轨迹无法得到保证。

本研究控制方法采用 CMAC 神经网络在线估计系统的不确定性和虚拟控制导数项,有效解决在对虚拟控制进行求导时产生的计算膨胀问题;同时,在控制输入前加入低通滤波器,使控制量连续化,消除滑模控制可能产生的抖振问题,使控制效果达到预期效果。

1 反步法原理

考虑如下类型的单输入、单输出非匹配不确定非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} + f_i(x_1, \dots, x_i) \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} —系统状态变量, $\mathbf{x} = [x_1 \ \dots \ x_n]^T \in \mathbf{R}^n$; u —系统控制量, $u \in \mathbf{R}$; y —系统输出; $f_i(x_1, \dots, x_i)$ —具有下三角结构的非线性充分光滑函数。

反步法的设计思想是把每一个子系统 $\dot{x}_i = x_{i+1} + f_i(x_1, \dots, x_i)$ 中的 x_{i+1} 作为虚拟控制输入,通过设计适当的虚拟反馈 $x_{i+1} = \alpha_i(x_1, \dots, x_i)$,使得前面的子系统得到镇定,且状态达到渐近稳定,但系统的虚拟反馈 $\alpha_i(x_1, \dots, x_i)$ 一般并不可得。因此,可引入误差变量 $z_{i+1} = x_{i+1} - \alpha_i(x_1, \dots, x_i)$,通过控制输入的作用,使得 x_{i+1} 渐近收敛于 $\alpha_i(x_1, \dots, x_i)$,从而实现整个系统的渐近稳定。

首先,定义虚拟反馈误差变量为:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - y_d \\ z_2 = x_2 - \alpha_1(x_1) \\ \vdots \\ z_n = x_n - \alpha_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: y_d —期望系统输出; z — n 维虚拟误差状态变量, $z = [z_1 \ \dots \ z_n]^T \in \mathbf{R}^n$; $\alpha_i(x_1, \dots, x_n)$ —待定虚拟反馈。

反步法对每一步构造一个 Lyapunov 函数,使每一步的虚拟误差状态分量 z_i 渐近收敛于零,最终系统输出 $y = x_1$,渐近收敛于期望系统输出 y_d 。

反步法实际上是一种由前向后递推的设计方法,通过逐步迭代设计 Lyapunov 函数,最终实现系统的镇定或跟踪。反步法比较适合在线控制,能够达到减少在线计算时间的目的。反步法中引入的虚拟控制本质上是一种静态补偿思想,前一个子系统必须通过其后子系统的虚拟控制才能达到镇定目的,因此该方法要求系统结构必须是与式(1)类似的严参数反馈系统,或可经过变换化为这种类型的非线性系统。

2 电液力伺服系统的自适应反步控制

2.1 电液力伺服系统非线性数学模型

本节针对电液力伺服系统非线性数学模型,将反步设计算法与 CMAC 神经网络相结合,设计了鲁棒自适应输出跟踪控制器,有效地解决了运动扰动和系统参数不确定性问题,提高了载荷谱跟踪精度。

假设期望输出力轨迹为 F_d ,则由于 $F = K_t(x_i - x_y)$,可知期望液压缸位移输出为 $x_{id} = F_d/K_t + x_y$,可通过设计控制律使得液压缸输出位移渐近跟踪期望输出位移,从而达到渐近跟踪期望输出力的目的。

选取状态变量为: $\mathbf{x} = [x_t \ \dot{x}_t \ p_f]^T$,则电液力伺服系统非线性数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{-K_t x_1 - B_t x_2 + A_t x_3 + K_t x_y}{m_t} + \Delta_1 \\ \dot{x}_3 = k_c(-A_t x_2 - C_{st} x_3 + cu \sqrt{p_s - \text{sgn}(u)x_3}) + \Delta_2 \\ F = K_t(x_1 - x_y) \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$k_c = \frac{4E_y}{V_t}, c = C_v w k_v \sqrt{\frac{1}{\rho}}$$

式中: C_v —滑阀节流窗口的节流系数; w —伺服阀的面

积梯度; m ; ρ —油液密度; $\text{sgn}(\cdot)$ —符号函数; p_f —负载压降; x_l —加载液压缸位移; x_y —位置系统干扰位移; m_l —负载等效质量; K_l —负载弹性刚度; B_l —粘性阻尼系数; A_l —加载液压缸截面积; E_y —油液弹性模量; V_l —加载液压缸等效容积; C_{sl} —总泄漏系数; F —加载力。

2.2 自适应反步控制器设计

首先,设计 CMAC 神经网络逼近不确定性:

$$\begin{cases} \tilde{\Delta}_i = \Delta_i - \dot{x}_{(i+1)d} = \mathbf{w}_i^T v_i + \varepsilon_i = (\hat{w}_i^T + \tilde{w}_i^T) v_i + \varepsilon_i \\ \hat{\Delta}_i = \hat{w}_i^T v_i \\ \tilde{w}_i = w_i - \hat{w}_i \end{cases}, i = 1, 2 \quad (4)$$

式中: \mathbf{w}_i —理想权值向量, \hat{w}_i —权向量的估计, \tilde{w}_i —误差权向量, ε_i —逼近误差。

定义虚拟反馈误差:

$$z_i = x_i - x_{id} \quad (5)$$

当 $i = 1$ 时, x_{1d} 为系统期望输出轨迹, $x_{1d} = x_d = F_d/K_l + x_y$; 当 $i \neq 1$ 时, x_{id} 为系统虚拟控制量, x_i 为系统实际状态变量, $i = 1, 2, 3$ 。

2.2.1 虚拟控制输入量

定义 Lyapunov 函数为: $V_1 = z_1^2/2$, 对其求导可得:

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_{1d}) = z_1 z_2 + z_1 x_{2d} - z_1 \dot{x}_{1d} \quad (6)$$

令: $x_{2d} = \dot{x}_{1d} - k_1 z_1$, $k_1 > 0$, 可得:

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 z_2 - k_1 z_1^2 \quad (7)$$

定义 Lyapunov 函数为:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2\beta_1} \tilde{\mathbf{w}}_1^T \tilde{\mathbf{w}}_1$$

对其求导可得:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \frac{1}{\beta_1} \tilde{\mathbf{w}}_1^T \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_1 + z_2 \left(\lambda_1 + \frac{A_l}{m_l} (z_3 + x_{3d}) + \tilde{\Delta}_1 \right) \quad (8)$$

其中:

$$\lambda_1 = \frac{-K_l x_1 - B_l x_2 + K_l x_y}{m_l},$$

$$\tilde{\Delta}_1 = \Delta_1 - \dot{x}_{2d} \circ$$

$$\text{令: } \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_1 = -\beta_1 v_1 z_2$$

并取:

$$x_{3d} = \frac{m_l}{A_l} (-\rho_1 - \hat{\mathbf{w}}_1^T v_1 - z_1 - k_2 z_2), k_2 > 0$$

有下式:

$$\dot{V}_2 = -z_1 z_2 - k_2 z_2^2 + \frac{A_l}{m_l} z_2 z_3 - \varepsilon_1 z_2 \quad (9)$$

设虚拟期望连续控制输入为 u_d , 定义实际控制输入与期望输入之间的误差为 $z_4 = u - u_d$ 。

定义 Lyapunov 函数为:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2\beta_2} \tilde{\mathbf{w}}_2^T \tilde{\mathbf{w}}_2$$

对其求导可得:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + \frac{1}{\beta_2} \tilde{\mathbf{w}}_2^T \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_2 + z_3 (\rho_2 + k_c c \sqrt{p_s - \text{sgn}(u) x_3} (z_{n+1} + u_d) + \tilde{\Delta}_2) \quad (10)$$

其中:

$$\lambda_2 = k_c (-A_l x_2 - C_{sl} x_3),$$

$$\tilde{\Delta}_2 = \Delta_2 - \dot{x}_{3d} \circ$$

$$\text{令: } \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_2 = -\beta_2 v_2 z_3$$

并取虚拟控制输入 u_d 为:

$$u_d = -(k_c c \sqrt{p_s - \text{sgn}(u) x_3})^{-1} (\rho_2 + \gamma) \quad (11)$$

$$\dot{V}_3 = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - k_3 z_3^2 - \varepsilon_1 z_1 - \varepsilon_2 z_2 + k_c c \sqrt{p_s - \text{sgn}(u) x_3} z_3 z_4 \quad (12)$$

2.2.2 低通滤波器设计

取 Lyapunov 函数 $V_4 = V_3 + \frac{1}{2} z_4^2 + \frac{1}{2\beta_3} \tilde{\mathbf{w}}_3^T \tilde{\mathbf{w}}_3$, 对其

求导并设计低通滤波器为:

$$\dot{u} = -\frac{u}{\tau} + \frac{v}{\tau} \quad (13)$$

式中: τ —低通滤波器时间常数, v —低通滤波器输入。

且:

$$\dot{V}_4 = \dot{V}_3 + \frac{1}{\beta_3} \tilde{\mathbf{w}}_3^T \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_3 + \left(-\frac{u}{\tau} + \frac{v}{\tau} + \tilde{\Delta}_3 \right) z_4 \quad (14)$$

其中:

$$\tilde{\Delta}_3 = -\dot{u}_d$$

$$\text{令: } \dot{\tilde{\mathbf{w}}}_3 = -\beta_3 v_3 z_4$$

并取低通滤波器输入 v 为:

$$v = u - (\hat{\mathbf{w}}_3^T v_3 + k_c c \sqrt{p_s - \text{sgn}(u) x_3} z_3 + \sum_{i=1}^3 \delta_i \text{sgn}(z_{i+1})) \tau \quad (15)$$

$$\dot{V}_4 = -\sum_{i=1}^4 k_i z_i^2 - \sum_{i=1}^3 \xi_i \quad (16)$$

其中:

$$\xi_i = (\delta_i \text{sgn}(z_{i+1}) - \varepsilon_i) z_{i+1}$$

由分析可知, $V_4 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 z_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\beta_i} \tilde{\mathbf{w}}_i^T \tilde{\mathbf{w}}_i$ 即是该系统的 Lyapunov 函数, 且当 $\delta_i > |\varepsilon_i|$ 时, $V_4 < 0$, 实际输出可渐近跟踪期望输出。

3 仿真研究

为研究所提出的算法性能,笔者对其进行了仿真研究。系统仿真工具为 Matlab/Simulink 环境,仿真步长采用 0.001 s 固定步长,仿真算法采用四阶龙格-库塔函数。

电液力伺服系统为:

$$\dot{z}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + \tilde{\Delta}_n + g_n(x_1, \dots, x_n)(u_d + z_{n+1}) \quad (17)$$

其中:

$$\tilde{\Delta}_n = \Delta_n - \dot{\alpha}_{n-1}$$

系统主要参数如表 1 所示。控制器主要参数为: $k_1 = 1\ 000, k_2 = 16\ 000, k_3 = 1\ 500, \delta_1 = 0.001, \delta_2 = 0.1, \delta_3 = 1\ 000$, CMAC 权值调整参数 β 为 0.2, 泛化参数 C 为 100, 量化等级为 10 000, 低通滤波器参数 $\tau = 0.002$ 。仿真中,考虑电液伺服阀输入电流饱和,其上、下限为 $\pm 40\text{ mA}$ 。

表 1 电液力伺服系统主要参数

符号	意义	量纲	数值
K_F	力传感器及其调理电路转换系数	V/N	0.000 25
K_{LV}	电流放大器增益	A/V	0.01
m_l	负载等效质量	kg	9
B_l	粘性阻尼系数	N · s/m	300
K_l	弹性刚度	N/m	8×10^6
A_l	作动筒活塞面积	m ²	0.001 347
V_l	作动筒等效容积	m ³	$8.1 \times \exp - 4$
E_y	等效容积弹性模数	N/m ²	7×10^8
K_Q	伺服阀流量放大系数	m ² /s	0.98
K_C	流量-压力放大系数	m ⁵ /N · s	$4.7 \times \exp - 11$
k_{sv}	伺服阀增益	m/A	0.04
C_{sl}	作动筒总泄漏系数	m ⁵ /N · s	$2 \times \exp - 11$

加载指令为 0、舵机运动指令为 $60 \sin(10\pi t)\text{ mm}$ 时产生的多余力仿真结果,如图 1 所示。

由图 1 可见,多余力不足 50 N,本研究所提控制方法有效地抑制了舵机的运动干扰,且控制输入连续无抖振。为考察该控制方法对输入指令的跟踪性能,笔者对某型舵机进行了气动载荷加载仿真研究,某飞行试验状态下舵机载荷谱跟踪的仿真结果如图 2 所示。仿真中,舵机位移运动规律为 $60 \sin(10\pi t)\text{ mm}$,加载

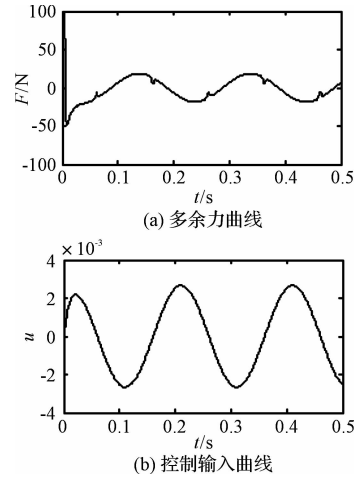


图 1 多余力仿真结果

力载荷谱为 $F = F_0 + F_A \sin(10\pi t)\text{ N}$ 的仿真结果。其中, F_0, F_A 为与飞行状态有关的量, $5\ 500 + 3\ 000 \sin(10\pi t)\text{ N}$ 。

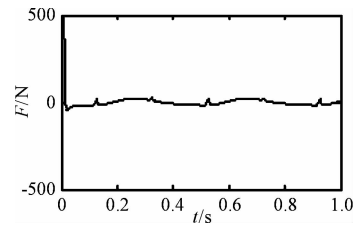


图 2 气动载荷谱跟踪误差仿真结果

载荷谱跟踪误差如图 2 所示。由图 2 中仿真结果可见,本研究所提控制策略具有较高的跟踪精度。为了进一步验证该控制策略的鲁棒性,令参数 C_{sl} 为额定值的 2 倍, B_l 为额定值的 0.5 倍, E_y 为原来的 70%, 其仿真结果如图 3 所示。

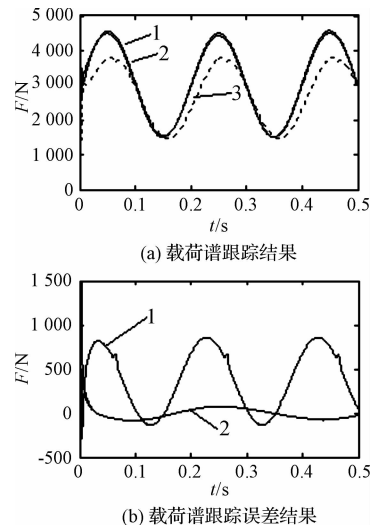


图 3 有、无 CMAC 时系统鲁棒性验证

图3(a)中,曲线1为力载荷谱,曲线2为采用本研究控制策略时系统实际响应,曲线3为无CMAC时系统实际响应;图3(b)中,曲线1为无CMAC时系统载荷谱跟踪误差,曲线2为采用本研究控制策略时系统载荷谱跟踪误差。由图3仿真结果可见,无CMAC时参数不确定性使得原控制器对系统的控制效果变差,而有CMAC时自适应鲁棒控制器有效抑制了参数不确定性对系统的影响,具有较高的载荷谱跟踪精度。因此,本研究所提出的自适应反步法采用CMAC神经网络在线学习系统不确定性,能够确保系统在参数摄动情况下仍具有较好的控制性能。

4 结束语

本研究所提出的新型自适应反步控制算法采用CMAC神经网络在线学习系统不确定性以及各阶虚拟控制量的导数信息,从而避免了反步法在系统阶次较高时引起的计算膨胀问题;该控制算法在递推设计的最后一步加入非连续鲁棒项,以克服CMAC神经网络在线学习系统不确定性的残余误差,同时,在控制输入前加入低通滤波器,使得符号函数产生的控制不连续项到达实际执行机构前连续化,能够避免不连续控制输入可能产生的抖振问题。另外,本研究将所提出的控制算法应用于电液力伺服系统,并进行了仿真验证,仿真结果表明本研究所提出的控制算法能够有效抑制系统不确定性,具有较好的指令跟踪性能。

参考文献(References):

- [1] 王占林. 液压伺服控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1987.
- [2] KHALIL H K. Nonlinear Systems [M]. Prentice Hall, 1996.
- [3] LIN F J, SHIEN P H, CHOU P H. Robust adaptive backstepping motion control of linear ultrasonic motors using fuzzy neural network [J]. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**,2008,16(3):676-692.
- [4] FRANCESC P, FAYCAL I, JOSE R. Numerical issues in backstepping control: sensitivity and parameter tuning [J]. **Journal of the Franklin Institute**,2008,345(8):891-905.
- [5] HSU C F, LIN C M. Fuzzy-identification based adaptive controller design via backstepping approach [J]. **Fuzzy Sets and Systems**,2005,151(1):43-57.
- [6] NURKAN Y, YUKSEL H. Backstepping control of a vehicle with active suspensions [J]. **Control Engineering Practice**, 2008,16(12):1457-1467.
- [7] OZBAY U, ZERGEROGLU E, SIVRIOGLU S. Adaptive backstepping control of variable speed wind turbines [J]. **International Journal of Control**,2008,18(6):910-919.
- [8] HUANG S J, HUANG K S, CHIOU K C. Development and application of a novel radial basis function sliding mode controller [J]. **Mechatronics**,2003,13(4):313-329.
- [9] 张海鹏. 鲁棒滑模反步控制法及其在减摇鳍中的应用 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学自动化学院,2004.
- [10] 吴玉香. 滑模控制理论及在移动机械臂中的应用 [D]. 广州:华南理工大学自动化科学与工程学院,2006.

[编辑:罗向阳]