

基于 CMAC 的 PID 控制在不确定性电液伺服系统中的应用*

姜 峰, 段锁林

(江苏工业学院 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘 要: 介绍了 CMAC 网络的控制原理, 给出了 CMAC 网络与 PID 复合控制的控制器设计步骤, 并将该方法应用到某电液位置伺服系统中。仿真结果表明, 该方法能获得良好的跟踪性能, 具有一定的鲁棒性, 对于抑制并消除系统的不确定性具有良好的控制效果。

关键词: 不确定性; CMAC 网络; 电液位置伺服系统; 鲁棒性

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

CMAC-based PID control and application to electrohydraulic servo systems with uncertainties

JIANG Feng, DUAN Suo Lin

(School of Information Science and Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

Abstract: This paper introduces the control theory of CMAC neural network, gives out the steps of designing controller combined CMAC neural network and PID control and applies this method to the electrohydraulic position servo systems. Simulation results show that a good tracking performance can be obtained, a strong robustness can be ensured and a better control effect could be obtained on suppressing and eliminating the uncertainties of the system by using the presented control strategy.

Key words: uncertainty; CMAC neural network; electrohydraulic position servo systems; robustness

近年来, 在解决不确定性系统的控制问题方面, 国内外学者做了很多工作^[1,3,6], 其中, 利用神经网络与常规控制结合实现复合控制的方法得到了广泛应用。本文选取 CMAC 神经网络模型是由于它对于每个输入输出数据对, 只有少量的连接权需要进行调整, 从而使局部逼近网络具有学习速度快的优点。文中针对一类非线性不确定性电液伺服系统^[2], 以线性化为前提, 按照线性变参数的观点处理系统, 并选择适当的状态变量, 将其转化为 1 个线性不确定性系统, 该系统通常可以认为是由 1 个确定的标称系统和 1 个不确定性系统组合而成的系统。在这种情况下利用 CMAC 神经网络和传统的 PID 控制结合, 对某电液位置伺服系统进行轨迹跟踪控制仿真, 仿真结果表明了该控制方法的有效性。

1 问题描述

考虑以下一类含参数不确定性和外部扰动的线性

不确定系统^[3]:

$$\begin{cases} \dot{x} = (A + \Delta A)x + Bu - Df \\ y = C_0 x \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x = [x_1 x_2 \cdots x_n]^T$, A 是已知常值矩阵, ΔA 表示系统的不确定性, f 表示有界扰动, u 、 y 分别表示系统的控制输入和系统的输出。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & & & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 1 \\ -a_1 & -a_2 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & -a_n \end{bmatrix},$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -\Delta a_1 & -\Delta a_2 & \cdots & -\Delta a_n \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C_0^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix},$$

* 基金项目: 江苏省高校自然科学基金基础研究项目(07KJD510038)

$b(t)$ 是一个时变的有界线性函数,并且满足:

$$b_{\min} \leq b(t) \leq b_{\max}, (b(t) > 0) \quad (2)$$

同时假设:

$$(1) |\Delta a_i| < \Delta a_m, (i=1, 2, 3)$$

$$(2) b_{\min} \leq b(x) \leq b_{\max}, (b(t) > 0)$$

$$(3) |f| \leq f_0$$

(4)存在连续常值矩阵 \tilde{A} ,使得 $\Delta A = B\tilde{A}$ 成立,且 Δa_m 、 b_{\min} 、 b_{\max} 、 f_0 是已知常数。对于系统(1),设计的目标是综合适当的控制器,使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x_d - x_1) = 0$, x_d 是期望的输出信号, x_1 是实际的输出信号。

2 控制器设计

2.1 CMAC 网络结构及工作原理

CMAC 网络是一种前馈神经网络,由 2 个基本映射表示输入输出之间的非线性关系^[4],其结构框图如图 1 所示。

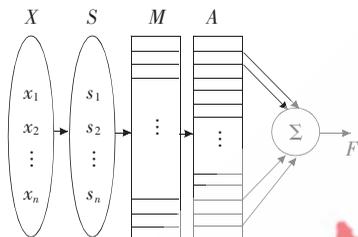


图 1 CMAC 结构模型

图中, X 表示输入数据, S 表示数据的状态空间, M 为联想记忆空间, A 表示实际地址空间, F 表示输出。CMAC 算法可以分为以下几个步骤:

(1)将输入数据进行量化,即 $X \rightarrow S$,在输入层对 X 进行划分,使得每一个输入都在要求划分的范围之内。

(2)实现状态量到记忆空间的映射,即 $S \rightarrow M$,在记忆空间得到各输入项的量化值,也即是 $M = \{m_{s_1,1}, m_{s_1,2}, \dots, m_{s_n,n}\}$,其中, $m_{s_i,k}$ 为 0 或 1,表示第 s_i 个输入量的第 k 个变量的量化值。

(3)权值映射,即 $M \rightarrow A$,将输入数据映射至实际的存储空间,并对应存放权值。

(4)计算输出,即 $A \rightarrow F$,将实际存储器中权值为 1 的项进行累加求和,得到对应的输出。即:

$$F_{s_i} = \sum_{j=1}^n s_j \omega_{ij}$$

(5)权值更新。根据期望值与实际的输出的偏差进行权值更新,进入学习过程,目的总是使输出与期望之差最小。

在 CMAC 网络的整个映射过程中,泛化系数 C 的选择对于网络的泛化能力起着重要作用,一般是根据经验由人为选定。在实际应用中, C 的选择范围很大,可以从较小值 1 到 100。

2.2 CMAC 网络与 PID 复合控制器设计

CMAC 网络和 PID 复合控制实现前馈反馈控制,CMAC 网络利用每一周期 PID 控制器的输出进行权值的训练,目的就是为了解决由训练获得复杂非线性被控对象的逆动态模型。由图 2 可以看出,CMAC 网络是在被控对象之前实现前馈控制,其作用主要是对出现的扰动量进行补偿控制;PID 算法实现反馈控制,保证系统的稳定性,且抑制扰动。

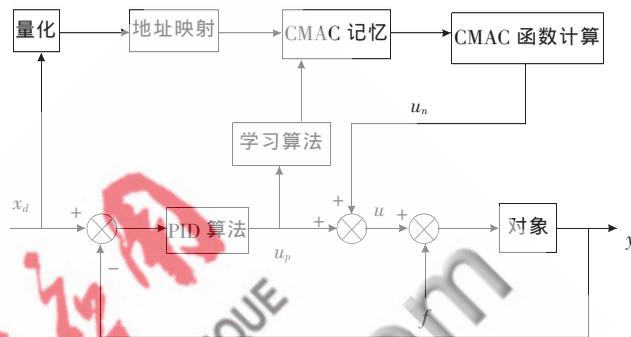


图 2 CMAC 与 PID 复合控制结构图

CMAC 采用有导师的学习算法。每一控制周期结束时,计算出相应的 CMAC 输出 $u_n(k)$,并与总控制输入 $u(k)$ 相比较,修正权值,进入学习过程。学习的目的是使总控制输入与 CMAC 的输出之差最小。经过神经网络的学习,使系统的总控制输出由 CMAC 产生。常规控制器采用传统的 PID 算法,目的在于利用 PID 的输出对神经网络的权值进行更新,进而使 CMAC 神经网络得到有效的学习。整个系统的控制算法为:

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^c \omega_i a_i \quad (3)$$

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k) \quad (4)$$

式中, a_i 为二进制选择向量, C 为 CMAC 的泛化参数, $u_n(k)$ 为 CMAC 产生的相应输出, $u_p(k)$ 为常规控制器 PID 产生的输出^[5]。下面主要介绍本文中控制器的详细设计过程。

网络的概念映射的方法为:将输入空间 S (指输入信号的取值区间)在区间 $[S_{\min}, S_{\max}]$ 上分成 $N+2C$ 个量化间隔,即:

$$\begin{cases} v_1 \cdots v_c = S_{\min} \\ v_j = v_{j-1} + \Delta v_j, (j=C+1 \cdots C+N) \\ v_{N+c+1} \cdots v_{N+2c} = S_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

CMAC 实际的映射方法为:

$$a_j = \begin{cases} 1 & \text{若 } S_j \in [v_j, v_{j+c}], (j=C+1 \cdots c+N) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

取指令信号 x_d 作为 CMAC 的输入。CMAC 网络的调整指标为:

$$E(k) = \frac{1}{2} (u_n(k) - u(k))^2 \times \frac{1}{C} \quad (7)$$

$$\Delta\omega(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial \omega} = \eta \frac{u(k) - u_n(k)}{C} a_i \quad (8)$$

$$\omega(k) = \omega(k-1) + \Delta\omega(k) + \alpha(\omega(k) - \omega(k-1)) \quad (9)$$

式中, η 为网络学习率, $\eta \in (0, 1)$, α 为动量因子, $\alpha \in (0, 1)$ 。参考文献[6]在讲述 CMAC 网络时给出了 η 的取值证明过程, 能确保学习算法的收敛性。式(9)中引入了附加动量项, 目的是用来加速算法的收敛, 动量因子 α 的取值^[7]一般在 0.1~0.8。

综合式(6)和式(9)得到 CMAC 控制器输出, 如式(3)。常规控制器 PID 产生的输出为 $u_p(k) = k_p \times P + k_i \times I + k_d \times D$, 其中 $P = e(k)$, 表示每一周期输入与输出的误差, $I = I + e(k) \times t_s$, $D = \frac{e(k) - e(k-1)}{t_s}$, t_s 表示采样周期。这样就得到了式(4)

中总的控制输入 $u(k)$ 。

3 仿真研究

电液伺服系统是一种典型的非线性系统, 根据参考文献[8]对某传统液压系统的滑阀流量方程在其工作点附近进行线性化, 同时对该液压系统的力平衡方程以及流量连续方程适当转换, 并选择状态变量 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ (其中 x_1 为滑阀位移, x_2 为滑阀速度, x_3 为滑阀的加速度), 将液压系统微分方程转化为状态空间的描述形式。

考虑式(1)所描述的线性不确定性系统, 其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 \end{bmatrix}, \Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\Delta a_1 & -\Delta a_2 & -\Delta a_3 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b(t) \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C_0^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, a_1 = \frac{4\beta_e K_c K}{MV_t}, a_2 = \frac{K}{M} +$$

$\frac{4\beta_e}{MV_t}(A_p + K_c B_c), a_3 = \frac{B_c}{M} + \frac{4\beta_e}{V_t} K_c, K_c = K_{c0} + C_{t0}$ 。式中, K_{c0} 为实际滑阀的零位流量-压力系数, K 表示综合负载刚度, 其他标识符号的含义与传统的液压伺服系统相同。对系统的不确定性, 根据负载刚度及等效负载质量等的变化, 假设 $|\Delta a_1| < \Delta a_m = 1.344 \times 10^6$, 选择 $x_d = \sin 12\pi t$, 采样周期取 1 ms, 扰动 f 取频率为 1 Hz 的正弦信号, 且 $f_0 = 0.1$, 系统标称参数如表 1 所示。根据上面 a_1, a_2, a_3 的计算表达式以及表 1 的相关参数标称值可以得出三者的取值状况, a_1 的取值范围是 $(4.48 \sim 17.92) \times 10^5$, a_2 的取值范围为 $(9.083 \sim 9.093) \times 10^7$ (单位是 $1/s^3$), a_3 的取值为常值 13.8 (单位是 $1/s$)。在仿真试验时取三者范围中的某一标称值, 本仿真中 a_1 取 10×10^5 , a_2 取 9.09×10^7 , a_3 取 13.8。本系统的控制要求是: 设计合适的跟踪控制器, 满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x_d - x_1) = 0$ 。系统总的控制器为 u_n 与 u_p 表达式之和 (u_n 与 u_p 的设计如前所述)。仿真时, 选取 $k_p = 2000, k_i = 0.6, k_d = 0.2$; 网络在映射时选取 $N = 100$, 同时根据本文前面对泛化系数选取的说明要求, 仿真时选取 $C = 5$, 仿真结果如图 3、图 4、图 5 所示。

针对电液伺服系统的综合负载刚度的变化对系统

表 1 系统参数标称值

参数	数值	量纲
M	50~150	kg
B_c	8.82×10^{-2}	N.s/m
K	$5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$	N/m
A_p	2.27×10^{-2}	m ²
V_t	4.54×10^{-3}	m ³
P_s	10.5	MPa
ρ	800	kg/m ³
β_e	700	MPa
C_t	2.24×10^{-11}	m ⁵ /(N.s)
C_q	0.62	
W	3.14×10^{-2}	m
K_w	5×10^{-2}	m/A
K_v	0.012~0.02	A/V



图 3 $K = 5 \times 10^6$ (N/m), $x_d = \sin 12\pi t$

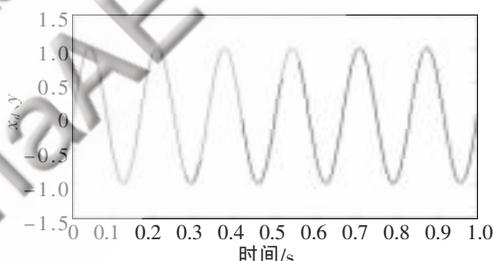


图 4 $K = 2 \times 10^7$ (N/m), $x_d = \sin 12\pi t$

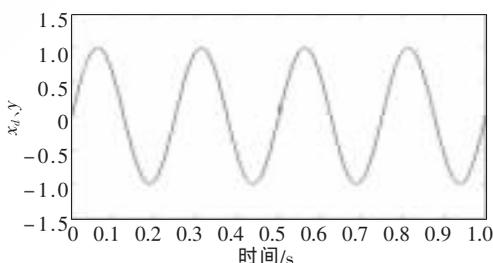


图 5 $K = 2 \times 10^7$ (N/m), $x_d = \sin 8\pi t$, 加干扰

引起的不确定性进行跟踪仿真控制。图 3 为负载刚度取下界值时(参考表 1)对 6 Hz 的正弦信号的跟踪结果, 有延迟现象。图 4 为负载刚度取上界值时对 6 Hz 正弦信号的跟踪结果, 可以看出跟踪效果良好。图 5 为负载刚度取上界值时进行对 4 Hz 的正弦信号跟踪, 并在 0.5 s 处对系统施加 1 个外干扰。可以看出, 该控制方法能在短时间内克服外界扰动, 继续跟踪给定信号, 跟踪效果良好, 具有一定的鲁棒性。综上所述, 利用所提出的控制

方法对某电液伺服系统进行仿真控制,在跟踪 6 Hz 以内的正弦信号时能获得良好的跟踪性能和鲁棒性。

对一类存在扰动的线性不确定系统,利用 CMAC 与 PID 复合控制方法设计控制器,选取参数变化的界值进行仿真实验。仿真结果表明,系统在跟踪某一固定频率的输入信号时,在给定界值变化范围内能获得良好的跟踪性能和鲁棒性,对于抑制并消除由于系统参数不确定性带来的跟踪性能差的问题是一个有效的控制方法,跟踪结果表明了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 冯纯伯,武玉强.动态不确定性系统的变结构控制器设计[J].自动化学报,1994,20(4).
- [2] 宋志安.基于 MATLAB 的液压伺服控制系统分析与设计[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [3] 段锁林.不确定性机电系统的滑模鲁棒跟踪控制及其应用研究[D].西安:西安交通大学,1999.
- [4] LANE S H, HANDELMAN D A, GELFAND T J. Theory

and development of high-order CMAC neural networks[J]. IEEE Control Sys., 1992,23(2):23-30.

- [5] 刘金锟.先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第 2 版)[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [6] 孙增圻.智能控制理论与技术[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [7] 姜长生.智能控制与应用[M].北京:科学出版社,2007.
- [8] YUN J S, CHO H S. Adaptive model following control of electrohydraulic velocity control systems subjected to unknown disturbances[J]. IEEE Proc., 1988,135(2):149-156.

(收稿日期:2009-10-12)

作者简介:

姜峰,男,1983 年生,硕士研究生,主要研究方向:智能控制。

段锁林,男,1956 年生,教授,主要研究方向:机电系统控制,机器人视觉伺服控制,变结构控制。

电子技术应用网
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNIQUE
www.chinaAET.com