

文章编号: 1000-8152(2002)06-0905-04

一种自适应 CMAC 神经元网络控制器及其在水轮机调速器中的应用

金波¹, 俞亚新²

(1. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江杭州 310027; 2. 浙江工程学院 机械系, 杭州 310033)

摘要: 提出了一种自适应 CMAC 神经元网络控制器的结构. 该控制器的核心是一个两维的存贮区间, 它采用一个参考模型和直接自适应律来获得在线训练信号, 而相应存贮单元的更新采用一阶学习律. 最后以水轮机调速器仿真实验系统来检验它的控制性能, 并与普通的 PID 控制器比较, 结果证明, 该控制器有较强的学习能力及较强的鲁棒性.

关键词: 水轮机调速器; 人工神经网络; CMAC 模型; 自适应控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Adaptive CMAC controller for hydraulic turbine speed governor

JIN Bo¹, YU Ya-xin²

(1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Institute of Science and Technology, Hangzhou 310033, China)

Abstract: An adaptive CMAC controller for hydraulic turbine governor is discussed. The adaptive CMAC controller has a two dimensional memory area, the horizontal memory location is selected by the speed of the hydraulic turbine and the vertical memory location is selected by the speed error between the turbine speed and the input signal. All of these two dimensions are linearly coded. The first order learning law and the conception of generalization is used to update the memories of the CMAC. A reference model and the direct adaptive law are employed to obtain the on-line training signal for CMAC. In order to check the control quality of the adaptive CMAC controller, a hydraulic turbine speed governor simulation experiment system is used and an ordinary PID controller is used to compare with it. The experimental results show that the adaptive CMAC controller works well and has ability to resistant the disturbance of the system parameter change.

Key words: hydraulic turbine speed governor; artificial neural network; CMAC model; adaptive control

1 引言(Introduction)

近年来,人工神经网络有了长足的发展,向人们展示了一条控制复杂的时变和非线性系统的新路.人工神经网络具有一些人脑的性质,即它在一定程度上具有“学习”能力,可以从以往的工作中获得经验并将它们运用到以后的工作中.人工神经网络有许多种结构,本文采用 CMAC 模型(小脑模型)来构成一种自适应的神经网络控制器.

2 自适应 CMAC 神经元网络控制器(Adaptive CMAC Controller)

自适应 CMAC 神经元网络控制器的核心部分是一组记忆单元.本文所采用的存贮区可视为一个二维矩阵.它的两维分别为系统的两个状态变量,其坐标可依一定规律根据状态变量的值来确定.在每一个控制周期,由状态变量所决定的 CMAC 相应单

元将被更新,由于 CMAC 的信息是分布式存贮的,所以每次更新的其实是一个矩形区域.信息的分布式存贮,不但加快了 CMAC 的学习过程,而且符合我们对一个良好的控制系统,相近的系统状态有相近控制输出的常识.

假设由当前状态变量所决定的存贮单元坐标分别为 n_1 和 n_2 ,则由它们所决定的所需更新的存贮单元为 $[n_1 - c_1, n_2 - c_2] \sim [n_1 + c_1, n_2 + c_2]$ 的一块 $(2c_1 + 1) \times (2c_2 + 1)$ 的矩形区域,其中 c_1 和 c_2 为两个常数.对此区域中存贮单元 m_{ij} 可根据一阶学习律进行更新^[1],其更新式为

$$m_{ij}(k+1) = m_{ij}(k) + B[d(k) - m_{ij}(k)]. \quad (1)$$

其中 B 为学习率,介于 0,1 之间; $d(k)$ 为训练信号;

$$i = n_1 - c_1, n_1 - c_1 + 1, \dots, n_1, \dots, n_1 + c_1,$$

$$j = n_2 - c_2, n_2 - c_2 + 1, \dots, n_2, \dots, n_2 + c_2.$$

当前 CMAC 控制器的输出值 $u(k)$ 相应地可以由所有被更新单元的平均值来决定:

$$u(k) = \frac{\sum_{i=n_1-c_1}^{n_1+c_1} \sum_{j=n_2-c_2}^{n_2+c_2} m_{ij}(k)}{(2c_1+1)(2c_2+1)}. \quad (2)$$

在线训练信号的获取,一个简单的方法是采用一个参考模型并运用直接自适应律来获得,它可由下式表示:

$$d(k) = u(k) + K_1 e_m(k) + K_2 [e_m(k) - e_m(k-1)] / T_s, \quad (3)$$

其中, K_1 是比例增益, K_2 为微分增益, T_s 为采样时间, e_m 为参考模型与系统输出之间的误差.

本文采用的参考模型是二阶模型:

$$G(s) = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega^2} + \frac{2\zeta}{\omega}s + 1}. \quad (4)$$

其中 $\omega = 0.6, \zeta = 0.9$.

综上所述,自适应 CMAC 神经网络控制器的结构图可由图 1 表示.

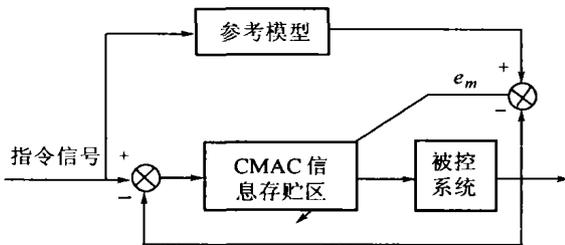


图 1 自适应 CMAC 神经网络控制器结构图
Fig. 1 Structure of adaptive CMAC controller

3 实验系统(Experiment system)

我们采用水轮机调速器仿真实验系统^[2]来检验自适应 CMAC 神经网络控制器的控制效果.该仿真实验系统如图 2 所示.它由自适应 CMAC 神经网络控制器、液压缸位置控制器、液压随动系统和水轮机发电系统仿真模型构成.其中除了液压随动系统是真实系统外,其余工作由一台 486DX2 计算机完成.

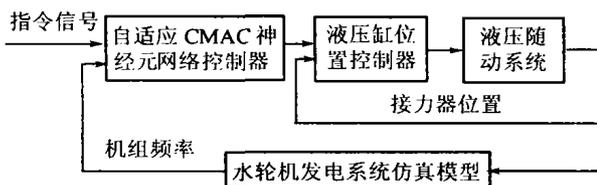


图 2 水轮机调速器仿真实验系统
Fig. 2 Hardware-in-loop simulation system for hydraulic turbine speed governor

液压随动系统是一开关阀和比例阀并联系统^[3].其中开关阀的流量大,比例阀的流量小.主要

控制思想是当接力器位置与指令信号误差较大时,开关阀与比例阀一起工作,快速接近指定位置,等到位置误差减少至某一值时,开关阀关闭,由小流量的比例阀将液压缸位置控制到位,并获得较高的位置精度.其中开关阀采用带死区的 bang-bang 控制,而比例阀采用比例控制.

液压缸位置控制器可表示为:

对开关阀

$$u_d(k) = \begin{cases} 1, & e_y(k) \geq z, \\ 0, & |e_y(k)| < z, \\ -1, & e_y(k) \leq -z. \end{cases}$$

其中, $e_y(k) = u(k) - y(k)$ 为 CMAC 控制器输出与液压缸位置之间的误差; z 为切换控制量.

对比例阀

$$u_p(k) = K * e_y(k) \pm D.$$

其中, K 为比例增益, D 为比例阀死区补偿量.

考虑到液压随动系统为非线性及计算机的计算能力,水轮机发电系统采用线性模型:

$$\begin{cases} \dot{h} = -T_w \dot{q}, \\ \dot{q} = \partial q / \partial y \cdot \dot{y} + \partial q / \partial h \cdot \dot{h} + \partial q / \partial x \cdot \dot{x}, \\ \dot{m} = \partial m / \partial y \cdot \dot{y} + \partial m / \partial h \cdot \dot{h} + \partial m / \partial x \cdot \dot{x}, \\ (T_a + T_b) \dot{x} = m - m_{g0} - e_g x. \end{cases} \quad (5)$$

其中, h 为水头偏差相对值, q 为流量偏差相对值, m 为水轮机水力矩偏差相对值, x 为水轮机转速偏差相对值, y 为接力器位置偏差相对值, T_w 为引水道时间常数, T_a, T_b 分别为机组和负载时间常数, m_{g0} 为负荷, e_g 为发电机负荷自调节系数.

自适应 CMAC 神经网络其中一维的坐标由水轮机当前转速决定,另一维由指令信号和当前转速之间的误差决定,并且这两维坐标都是线性编码的.而 CMAC 中存贮的信息为给液压缸位置控制的指令信号,即应使液压缸运动至哪一位置,相当于使水轮机的导叶处于某个开度.本系统其本质上是一个非线性、非最小相位系统,为了更好地表明 CMAC 控制器的控制效果,以一普通的 PID 控制器与之比较.PID 控制器的参数用正交实验的优化方法获得^[4],其优化目标是误差平方的积分和最小,用来优化的系统参数为:

$$\begin{aligned} \partial q / \partial y &= 1.0, \quad \partial q / \partial h = 0.5, \quad \partial q / \partial x = 0, \\ \partial m / \partial y &= 1.0, \quad \partial m / \partial h = 1.5, \quad \partial m / \partial x = -1.0, \\ T_a + T_b &= 3.0s, \quad T_w = 1.3s, \\ e_g &= 0.6, \quad m_{g0} = 0. \end{aligned}$$

优化结果为: $K_p = 1.7, K_i = 0.85, K_d = 0.4$.

4 实验结果(Experimental result)

4.1 自适应CMAC神经网络控制器的学习能力 (Self-learning ability of CMAC controller)

将系统参数取为优化PID参数时所取值,进行CMAC控制器学习能力的试验,结果如图3所示.系统工况为+4Hz频率上扰.曲线1,2,3分别为该工况第一次、第二次及第六次出现时的系统响应曲线.可以看出,当该工况第一次出现时,由于CMAC存贮区的内容需要建立,系统响应比较缓慢.而当它第二次出现时,经过了一次学习的CMAC控制器以比第一次快得多的速度完成响应,当学习次数增多时,系统响应仍可进一步改善,但最大的改善是在第一次学习后完成的.所以,自适应CMAC神经网络控制器有较强的学习能力,当某一工况第二次出现时,系统便可获得相当满意的控制效果.

4.2 鲁棒性(Robustness)

改变系统参数,以检验CMAC控制器对系统参数变化的鲁棒性.改变后的系统参数为:

$$T_a + T_b = 4.0s, T_w = 3.0s.$$

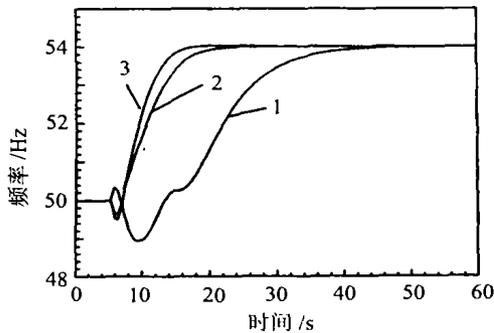


图3 CMAC控制器的学习性能
Fig. 3 Self-learning ability of CMAC

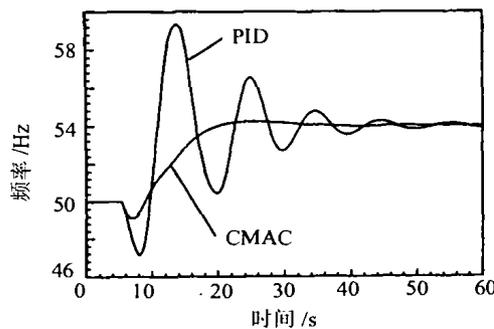


图5 参数改变后系统响应
Fig. 5 System response under new system parameters

图4是原始系统参数时PID控制器与经过5次学习的CMAC控制器的响应曲线,可见PID控制器的上升时间短,但振荡大,CMAC响应较平稳.图5是系统参数改变之后的PID控制器与CMAC控制器响应曲线,PID控制器出现了大幅振荡,而CMAC控制器仍能保持平稳的响应.所以CMAC控制器对系统参数的改变有较强的鲁棒性.

4.3 改进(Improvement)

由图3可以看出,当4Hz上扰第一次出现时,CMAC控制器的响应速度偏慢,其主要原因是缺乏先验知识,CMAC存贮区的值需要建立.如果能先对CMAC网络进行离线训练,则可获得满意的效果.一个简单的办法是用PID控制器的输出作为训练信号对CMAC网络进行训练,然后再用于控制.结果如图6所示.曲线1,2,3分别为+4Hz上扰第一次、第二次及第六次出现时的系统响应曲线.可以看出,经过离线训练的CMAC网络在该工况第一次出现时就能有良好的响应,并且随着学习次数的增加,响应会越来越好.

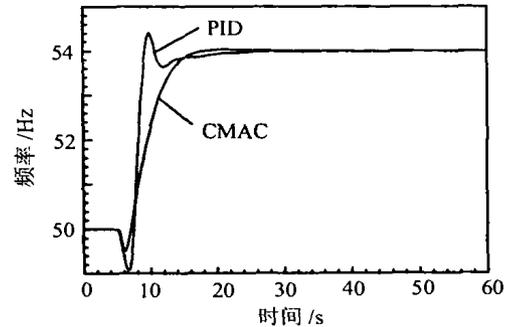


图4 原始系统参数下系统响应
Fig. 4 System response under original system parameters

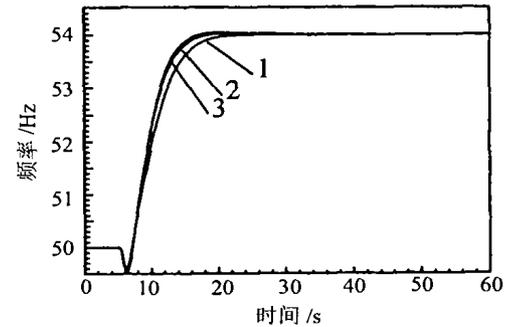


图6 离线学习后CMAC控制器响应
Fig. 6 System response after off-line learning of CMAC controller

5 结论(Conclusion)

实验表明,本文所采用的自适应CMAC神经网络控制器具有较强的自学习能力,当某一工况第二次出现时,系统便能有相当满意的响应,并且随着

该工况出现次数的增加,系统响应仍有改善.当系统工况第一次出现时,系统响应偏慢,这可以用离线学习的方法加以改进.一个简单的方法就是让CMAC控制器跟随一个普通的PID控制器进行学习,这样,

系统就能有满意的响应.并且,此 CMAC 控制器对于系统参数的变化有较强的鲁棒性,当系统参数有较大变化时,仍能保持平稳快速的响应.但是关于此 CMAC 控制器在水轮机调速器中的应用的研究仍很初步,进一步研究将增加 CMAC 控制器的维数,将负荷的变化也考虑在内,且采用水轮机发电系统的非线性模型.

参考文献(References)

- [1] Kraft L G III, David P C. A summary comparison of CMAC neural network and traditional adaptive control systems [A]. Neural Network for Control [M]. Cambridge, U S.: The MIT Press, 1990, 143 - 170

- [2] Jin Bo. Research on hydraulic turbine speed governor with parallel hydraulic system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998 (in Chinese)
- [3] Jin Bo, Zhu Shiqiang, Zhang Guangqiong, et al. Study on parallel connected hydraulic position control system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(9): 72 - 82 (in Chinese)
- [4] Jin Bo, Zhu Shiqiang, Zhang Guangqiong, et al. Use orthogonal experimental method to adjust PID parameters [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(6): 682 - 703 (in Chinese)

本文作者简介

金波 1971 年生.于 1998 年在浙江大学获博士学位.现任浙江大学流体传动及控制国家重点实验室副教授.主要从事电液控制系统和机电一体化系统的研究. Email: bjin@sfp.zju.edu.cn

俞亚新 1974 年生.于 2000 年在浙江大学获硕士学位.现于浙江工程学院机械系任教.

中国第五届智能机器人学术研讨会纪要

(2002 年 10 月 20 日)

由中国人工智能学会智能机器人专业委员会主办,福州大学计算机科学与技术系承办,福建省凯特有限公司协办的中国第五届智能机器人学术研讨会,于 2002 年 10 月 18 - 20 日在福州隆重召开.这是进入新世纪后我国智能机器人学领域的一次全国性会议.中国工程院院士蔡鹤皋教授、中国工程院院士何继善教授、湖南省政协副主席蔡自兴教授、福州大学校长吴敏生教授、副校长信息学院院长王钦敏教授、福建省凯特有限公司总经理许维健教授和来自全国各地从事智能机器人学和相关学科研究、开发与应用的专家代表近 100 人,出席了会议开幕式.吴敏生校长、王钦敏院长、蔡鹤皋院士、何继善院士在会上致词.大会主席蔡自兴教授致开幕词.中国人工智能学会等发来了贺信贺电,预祝会议圆满成功.

开幕式后,蔡自兴教授做了《我国智能机器人的若干研究课题》的主题报告;黄心汉教授等九位专家做了大会主题报告,然后,分组进行学术报告和科技交流.代表们在主会场和各分会场进行了广泛、深入和热烈的讨论,气氛活跃.

本次会议的所有报告和论文,由《计算机科学》杂志专辑出版.

会议期间进行了仿真机器人足球邀请赛.经过紧张角逐,哈尔滨工业大学队获得冠军,华南理工大学队获得亚军,武汉化工学院队和黑龙江工程学院队并列季军.通过比赛,促进了智能机器人的普及与发展.

会议期间,还进行了中国智能机器人专业委员会的换届工作.在充分酝酿和民主协商的基础上,以无记名投票方式选举了新一届专业委员会.本委员会现由 84 名委员组成.在三届一次委员会议上,推举蔡自兴为名誉主任,黄心汉为主任委员,朱森良、杨静宇、梁天陪、贺汉根、谭民为副主任委员,王敏为秘书长.会上还推举了本委员会的高级顾问 11 名和荣誉委员 16 名.

与会代表们对各级领导和专家的热情支持,对大会程序委员会、组织委员会和论文集编辑委员会的辛勤劳动表示衷心的感谢,对承办单位福州大学计算机系和协办单位福建省凯特有限公司的杰出贡献表示特别感谢.代表们对本次会议的各项工作表示满意,对会议的圆满成功表示由衷高兴和热烈祝贺.

下届学术研讨会将于 2004 年在武汉举行,由华中科技大学承办.让我们 2004 年在武汉再见,以新的研究成果迎接第六届学术研讨会的召开.

(黄心汉)