

基于单个神经元的自适应模糊控制器及其应用*

程涛 左静 刘艳明 杨叔子
(华中理工大学机械学院·武汉, 430074)

摘要: 本文利用单个神经元在线调整常规模糊控制器的模糊控制查询表, 以改善其性能. 仿真和铣削加工过程控制试验结果表明, 本文提出的神经元模糊控制器性能优于常规模糊控制器.

关键词: 常规模糊控制器; 神经元; 自适应控制

An Adaptive Fuzzy Controller Based on a Neuron and Its Application

Cheng Tao, Zuo Jing, Liu Yanming and Yang Shuzi

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, P. R. China)

Abstract: A fuzzy controller based on conventional fuzzy controller is proposed for modifying the fuzzy control query table on-line by a neuron. It is shown, by the computer simulation results and the practical application in milling process, that the performance of the adaptive fuzzy controller based on a neuron is better than that of the conventional fuzzy controller.

Key words: conventional fuzzy controller; neuron; adaptive control

1 引言(Introduction)

常规模糊控制器的模糊控制规则是通过总结手工操作者或该领域专家的控制策略、经验及知识而制定的, 在整个控制过程中固定不变, 这使得控制规则不可能确切反映被控对象的实际情况, 自学习和自适应能力较低. 因此常规模糊控制器对于那些严重非线性、大惯性、大时滞时变的复杂被控对象不能取得优良的控制效果, 如调节时间长甚至产生振荡, 稳态误差较大等^[1,2]. 由于模糊量化使常规模糊控制器丢失了许多有用信息, 本质上它体现了PD控制规

律, 不可避免地会产生较大的稳态误差^[1,2]. 人工神经元具有较强的自学习和自适应能力^[3], 利用单个神经元在线调整其模糊控制查询表, 即间接调整了控制规则, 并对丢失的信息进行了补偿, 因此可增强控制系统的鲁棒性、自适应能力和提高控制精度, 使系统性能不断完善.

2 神经元模糊控制器结构(The structure of the adaptive fuzzy controller based-on a neuron)

图1是神经元模糊控制器的结构框图. $E(t)$, $EC(t)$ 和 $\Delta U_b(t)$ 分别是误差 $e(t)$ 、误差变化率 $ec(t)$

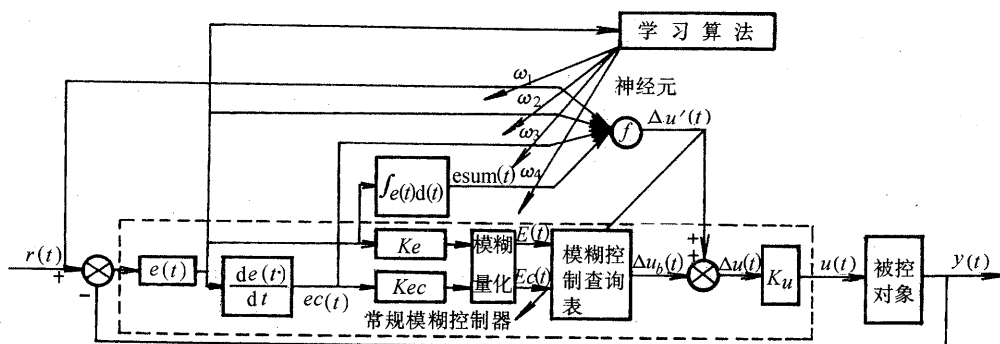


图1 基于单个神经元的自适应模糊控制器结构框图

Fig. 1 Block diagram of the adaptive fuzzy controller based-on a neuron

和模糊控制查询表输出 $\Delta u_b(t)$ 的语言变量. 总结专家或手动操作经验制定出如表1所示的控制规则, 据此用合成模糊推理法进行推理和最大隶属度法进

行模糊判决^[2], 并经反复调试、修改得到常规模糊器的控制查询表, 见表2.

* 国家自然科学基金(59335091)重点项目和武汉市青年科技晨光计划项目(武科计号[1996]138号).

本文于1997年5月27日收到, 1998年5月4日收到修改稿.

表 1 模糊控制规则表

Table 1 The fuzzy control rules table

ΔU_b	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NM	PL	PM	PL	*	*
NM	NL	NM	PM	PS	PM	ZE	ZE
NS	NL	NM	PS	PS	PS	PS	PM
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	NS	NS	NS	PM	PL
PM	ZE	ZE	NS	NM	NM	PM	PL
PL	*	*	NL	NL	NL	PM	PL

注: * 表示调节死区, 第一行和第一列分别表示 E 和 EC 的模糊子集(表 2 同).

3 模糊控制查询表的调整 (Modification of the fuzzy control query table)

以系统期望输出 $r(t)$ 为神经元

的一输入,起着前馈补偿作用;以误差积分 $\text{esum}(t)$ 为它的一输入,相当于加进了一积分环节;它的输入输出变量都是连续量,可对丢失的信息进行补偿;这些都有利于提高控制系统的稳态性能和消除稳态误差.

对每组输入变量 $e(t)$ 和 $ec(t)$ 进行模糊量化,得到其语言变量论域上的模糊子集 $E(t)$ 和 $EC(t)$,再根据它们的值查模糊控制查询表 2 得到控制量 $\Delta u_b(t)$,此控制量经神经元调整为:

$$\Delta u(t) = \Delta u'(t) + \Delta u_b(t). \quad (1)$$

其中 $\Delta u'(t)$ 是神经元的输出. 用 $\Delta u(t)$ 取代 $\Delta u_b(t)$,并存入常规模糊控制器的模糊控制查询表中 $\Delta u_b(t)$ 所在的位置,即调整了该控制查询表,也间接调整了模糊控制规则.将 $\Delta u(t)$ 乘以比例因子 K_u ,便得到施加给被控对象的控制量 $u(t)$:

$$u(t) = K_u \Delta u(t). \quad (2)$$

4 单个神经元的学习算法 (Learning algorithm based-on a neuron)

神经元的输入分别为:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= r(t), & x_2(t) &= e(t), \\ x_3(t) &= ec(t), & x_4(t) &= \text{esum}(t), \end{aligned}$$

表 2 模糊控制查询表

Table 2 The fuzzy control query table

Δu_b	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	0	0	0	0	1	2	4	4	4	6	7	6	7
-5	0	0	0	0	1	2	4	4	4	6	6	6	6
-4	0	0	0	0	1	2	4	4	4	6	7	6	7
-3	-2	-2	-2	0	-2	2	5	5	5	6	6	6	6
-2	-4	-4	-4	-3	0	0	1	4	4	6	6	6	7
-1	-4	-4	-4	-3	-3	0	1	4	4	6	7	6	7
0	-7	-6	-7	-6	-4	-1	0	1	1	6	7	6	7
1	-7	-6	-7	-6	-4	-4	-1	0	0	3	4	4	4
2	-7	-6	-7	-6	-4	-4	-1	0	0	2	4	4	4
3	-6	-6	-6	-6	-3	-3	-1	0	0	0	2	2	3
4	-7	-6	-7	-6	-4	-4	-4	-3	-1	-1	0	0	3
5	-6	-6	-6	-6	-4	-4	-4	-2	-1	-1	0	0	0
6	-7	-6	-7	-6	-4	-4	-4	-1	-1	-1	0	0	0

则神经元的总输入和输出分别为:

$$I = \sum_{i=1}^4 w'_i x_i(t). \quad (3)$$

$$O = \Delta u'(t) = f(I - \theta) = \frac{1 - e^{-k(I-\theta)}}{1 + e^{-k(I-\theta)}}. \quad (4)$$

其中

$$w'_i(t) = w_i(t) / \sum_{i=1}^4 |w_i(t)|,$$

K 为一大于零的常数.

神经元的学习功能是通过改变权系数 $w_i(t)$ 的值来实现的,令权系数按照误差能量函数的负梯度方向进行修改,则权系数 $w_i(t)$ 可按下式进行调整^[3]:

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \eta(-\partial E / \partial w_i). \quad (5)$$

式中, E 为能量函数,

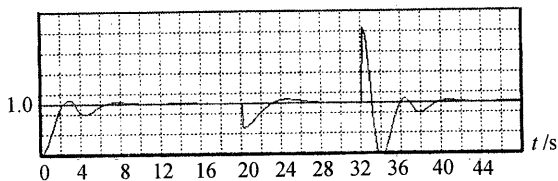
$$E = [r(t) - y(t)]^2 / 2 = e^2(t) / 2;$$

η 为学习步长,

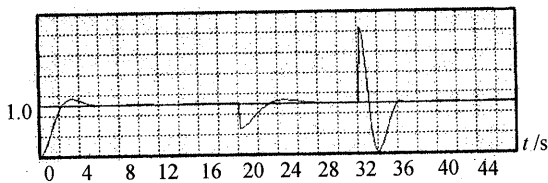
$$\eta = (\eta_{\max} - \eta_{\min}) |e(t)| / r(t) + \eta_{\min}.$$

5 仿真 (Simulation)

采用在工业过程控制中常用的二阶带有纯滞后的模型作为仿真模型,即



(a) 常规模糊控制器的仿真结果



(b) 神经元模糊控制器的仿真结果

图 2 被控对象参数发生变化时两模糊控制器的仿真结果

Fig. 2 The simulation results of the fuzzy controllers when the parameters of the controlled plant change

$$ke^{-\tau s} \omega_n^2 / (S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2).$$

取 $K = 1.0$, $\tau = 0.5s$; 约束值 $X_{re} = 1.0$; 采样周期 $T_s = 0.001s$, 控制周期 $T_c = 0.1s$.

仿真结果如图 2 所示. 仿真中模型参数按以下规律变化:

在 $0s \leq t < 10s$ 时, $\xi = 0.552$, $\omega_n^2 = 2.0$;

在 $10s \leq t < 15s$ 时, $\xi = 0.39$, $\omega_n^2 = 2.0$;

在 $15s \leq t < 20s$ 时, $\xi = 0.707$, $\omega_n^2 = 2.0$;

在 $20s \leq t < 32s$ 时, $\xi = 0.552$, $\omega_n^2 = 1.0$;

在 $32s \leq t < 48s$ 时, $\xi = 0.552$, $\omega_n^2 = 2.5$.

可看出: 两个模糊控制器对阻尼系数 ξ 的变化不敏感, 对固有频率 ω_n 的变化却很敏感, 超调量较大, 但仍能稳定; 神经元模糊控制器在第一和最后一

个阶段调节次数较常规模糊控制器少, 调节时间较短, 动态稳定性能较后者的好, 稳态误差较小, 因此神经元模糊控制器的性能优于常规模糊控制器.

6 试验结果与分析 (Experimental results and discussion)

用模糊控制器控制铣削加工过程, 根据加工状况实时优化进给速度, 以保证在铣削过程中主轴每转中的最大铣削力 F_{max} 保持为约束值, 从而提高数控机床在切削过程中的适应能力和智能水平, 达到在粗加工阶段提高切削效率的目的.

6.1 数控铣削过程模糊控制系统 (The fuzzy control system in NC milling process)

图 3 是数控铣削过程模糊控制系统的结构框图.

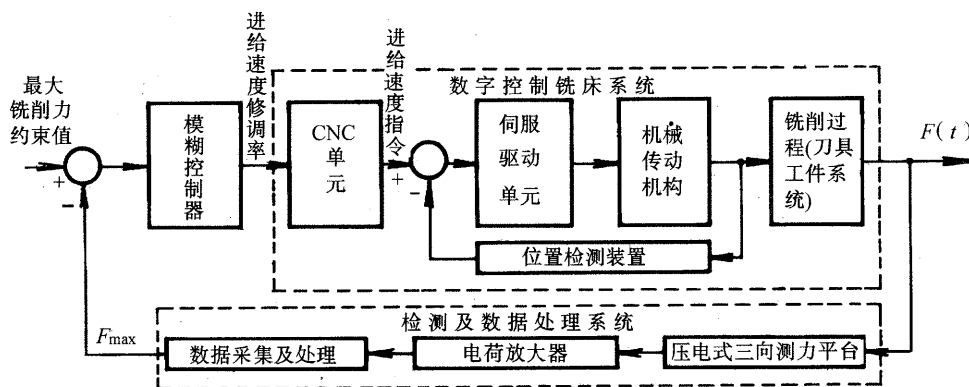


图 3 数控铣削过程模糊控制系统结构框图

Fig. 3 The architecture of the fuzzy control system in NC milling

主要由数控铣床系统、检测及数据处理系统和模糊控制器三部分组成. 数控铣床系统主要完成零件加工, 根据从模糊控制器接收的进给速度修调率, 实时调整进给速度; 检测及数据处理系统主要采集铣削力并进行数据处理; 模糊控制器则根据主轴每转中的最大铣削力与其约束值的误差和误差变化率, 计算出进给速度修调率并将其传送给 CNC 单元.

6.2 试验 (Experiment)

在模糊控制器的控制下将如图 4 所示的台阶铣成平面, 以验证铣削过程中切深变化对控制系统性能的影响.

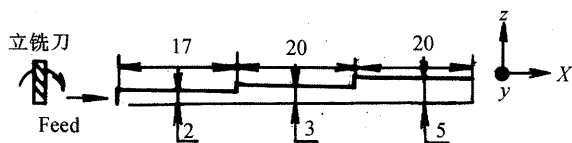


图 4 切深变化的加工示意图

Fig. 4 The machining sketch map under varying axial depths of cut

1) 试验条件.

在试验中, 数控加工程序中设定的初始进给速度为 $f = 90\text{mm}/\text{min}$, 主轴转速为 $N = 300\text{rpm}$; 进给速度修调率的允许范围为 $[0\%, 200\%]$; 切宽为 10mm ; 刀具是 $\varnothing 10$ 的 3 齿直柄立铣刀, 材料为 HSS; 工件材料为 HT20; 逆铣; 最大铣削力的约束值取为 360N ; 采样周期和控制周期分别为 $T_s = 0.001s$ 和 $T_c = 0.2s$.

2) 试验结果及分析.

常规模糊控制器和神经元模糊控制器的试验结果分别见图 5 的 (a) 和 (b) 所示. 比较试验结果可看出: 在加工第一和第三个台阶时, 常规模糊控制器的最大超调量和稳态误差都较神经元模糊控制器的要大; 在加工第三个台阶时, 前者的 F_{max} 响应曲线围绕约束值波动较大, 系统的动态定性较差, 而后者却较平稳, 即动态稳定性较好. 由此可见, 基于单个神经元的自适应模糊控制器的性能比常规模糊控制器的要好.

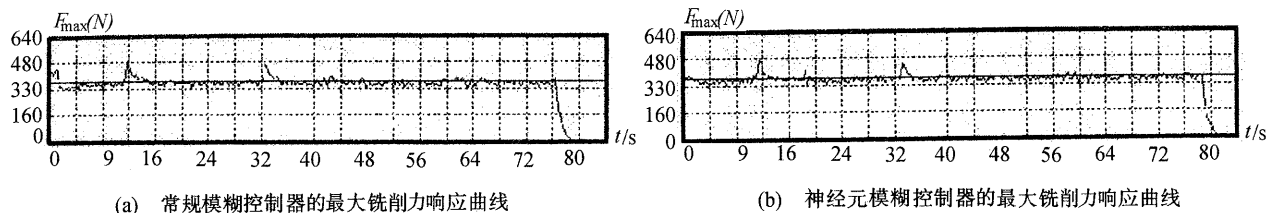


图 5 试验结果

Fig. 5 Experimental results

7 结论(Conclusion)

基于单个神经元的自适应模糊控制器具有算法简单、实时性好的特点,具有较强的自适应、自学习能力和较强的鲁棒性,对于象铣削加工过程这样复杂的被控对象也能取得优良的控制效果,具有良好的动态品质、稳态性能、响应快且平稳,因此,将会在机械切削加工过程控制及其它工业过程控制中有广阔的应用前景。

参考文献(References)

- 1 Lee C C. Fuzzy Logic in Control Systems; Fuzzy Logic Controller, Part 1, Part 2, IEEE Trans. Syst., Man, and Cybern., 1990, 20(2): 404 - 434
- 2 李士勇等. 模糊控制和智能控制理论与应用. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990

大学出版社, 1990

- 3 焦李成. 神经网络的应用与实现. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1993

本文作者简介

程涛 1971 年生, 华中理工大学博士研究生. 主要研究方向为先进制造, 智能控制, 分布式对象技术, 信号检测及处理等。

左静女. 1972 年生. 华中理工大学机械学院数控研究所硕士研究生. 主要研究方向为数控技术, 智能控制系统及虚拟制造等。

刘艳明 见本刊 1999 年第 4 期第 610 页。

杨叔子 1933 年生. 1956 年毕业于华中工学院(现华中理工大学), 现为华中理工大学机械学院教授, 博士生导师, 国家级有突出贡献专家, 中科院院士. 多年来, 立足于机械工程, 致力于新兴学科交叉领域的研究与教学工作, 特别是在先进制造技术, 振动工程, 设备诊断, 信号处理, 无损检测技术, 人工智能的应用等方面取得一系列成果。

(上接第 602 页)

参考文献(References)

- 1 Xie L, Xie S and de Souza C E. H_∞ control of a class of uncertain nonlinear systems; an observer-based controller design. Proc. of IFAC'96, 1996, 323 - 326
- 2 Wang Y Y, Xie L and de Souza C. Robust control of a class of uncertain nonlinear systems. Syst. Contr. Lett., 1992, 19: 139 - 144
- 3 Xie L, Fu M and de Souza C. H_∞ control and quadratic stabilization for systems with parameter uncertainty via output feedback. IEEE Trans. Automat. Contr., 1992, 37(8): 1253 - 1256
- 4 Shen T and Tamura K. Robust H_∞ control of uncertain nonlinear systems via state feedback. IEEE Trans. Automat. Contr., 1995, 40(4): 766 - 768
- 5 郭雷, 冯纯伯. 一类不确定系统的鲁棒 H_∞ 控制器设计. 中国科学 E 辑, 1998, 28(1): 53 - 58
- 6 Iwasaki T and Skelton R E. All controllers for the general H_∞ control problem; LMI existence conditions and state space formulas. Automatica, 1994, 30(8): 1307 - 1317
- 7 Gahinet P. Explicit controller formulas for LMI-based H_∞ synthesis. Automatica, 1996, 32(7): 1007 - 1014

本文作者简介

郭雷 1966 年生. 东南大学自动化所博士后. 研究方向为鲁棒控制与鲁棒滤波理论及其应用。

冯纯伯 见本刊 1999 年第 1 期第 126 页。