

文章编号: 1001-0920(2002)05-0617-04

一种改善稳态性能的模糊控制器

李娟

(莱阳农学院 工程系, 山东 莱阳 265200)

摘要: 针对常规模糊控制存在静差的缺陷, 提出一种变结构自适应模糊控制器, 该控制器能够根据控制过程的不同阶段进行变结构控制和自适应控制, 且不存在平滑过渡问题, 有效地改善了系统的动态性能并克服了静差, 为大时滞系统和许多未知模型系统的控制提供了一种新的思路。仿真和实际应用证明了该控制器的有效性。

关键词: 模糊控制; 稳态误差; 变结构自适应控制; 平滑过渡

中图分类号: TP 273.4

文献标识码: A

A fuzzy controller to improve the steady state performance

LI Juan

(Department of Engineering, Laiyang Agricultural College, Laiyang 265200, China)

Abstract: To overcome the shortcoming that fuzzy control has static error, a variable structure and adaptive fuzzy controller is proposed, which can proceed with the variable structure control and adaptive control without the smooth transition problem according to the different stages of control process. This controller also improves the performance of the dynamic state and overcomes the static error, which gives a new thought for the control of the large time-delay system. The emulation and application in intelligent temperature control system prove the effectiveness of the controller.

Key words: fuzzy control; static error; variable structure adaptive control; smooth transition

1 引言

模糊控制作为智能控制的一个重要分支, 在电力自动控制、化工、冶炼等工业控制中得到了极为广泛的应用, 但由于各种原因, 它还存在着稳态精度差和对大时滞系统的控制效果不好等缺陷。为解决稳态精度差问题, 许多学者进行了不懈的探索。文献 [1] 提出采用两级控制, 但该方法的二级控制在缩小论域后, u 的论域仍无法精确确定, 并使规则数目变得庞大, 多占一倍内存; [2] 提出采用缩小论域逼近法, 但由于系统模型未知, 缩小论域后的比例因子 k_u 只能凭经验取值, 因而仍造成较大的稳态误

差; [3] 提出多项式重置法, 但该方法需 2 个模糊推理机, 涉及到 4 个控制变量和 2 个控制规则表, 推理繁琐, 需占用大量存储空间; [4] 以三维的模糊调节器为基础, 同时引入了反馈模糊调节器作为并联校正, 变量多, 推理复杂, 规则表庞大, 很难实现; [5] 提出一种自适应模糊控制器, 该控制器能根据 e , de 及误差积分自动调节控制器的控制参数 k_u , 但 k_u 中所包含的参数 k_{u_p} , k_{u_d} 和 k_{u_i} 的值只能由稳态实验结果确定, 使得该方法在实时控制上受到限制。从原理上讲, 上述各种模糊控制器对稳态性能在一定程度上都有所改善, 但没有从根本上消除模糊控制所带来的静差, 并失去了模糊控制本身易理解、易修正、

收稿日期: 2001-06-15; 修回日期: 2001-09-20

作者简介: 李娟(1969—), 女, 山东海阳人, 讲师, 硕士, 从事计算机过程控制和模糊控制等智能控制的教学和研究工作。

操作简单和易实现的特点。如何面对工业过程的要求,设计出一种简单、实用且能克服静差的模糊控制器是设计者们急需解决的问题。本文对此进行了探索。

2 基本模糊控制器静差产生的原因

基本模糊控制算法中,查表法因程序简单、运算量少、速度快、中低档单片机也能胜任的优点,在实时控制中得到了广泛应用,但它的缺点是存在稳态误差,容易振荡。文献[6]给出了查表法控制面不连续的证明及查表法产生稳态误差和容易振荡的原因,在该理论指导下我们提出如下的模糊控制器。

3 变结构自适应模糊控制器

文献[6]证明了输入为 e 和 de , 输出为 u , 采用查表法的模糊控制器无法消除静差。文献[7]证明了采用线性控制规则和非线性解模糊算法, 输出为 du 的二维模糊控制器结构是全局性的多值继电器与局部的非线性 PI 控制器的和, 当输入 e 和 de 均很小时, 典型模糊控制器近似于线性 PI 控制器。换句话说, 在一定条件下输出为 du 的模糊控制器可消除静差。但实验证明, 若 du 的论域太大则出现很大的超调且达不到消除静差的目的; 若 du 论域太小, 虽消除了静差但响应速度过于迟缓。于是本文基于模糊控制器响应快的特点和增量式模糊控制器无静差的特点提出了变结构自适应增量式模糊控制器, 其基本原理如下:

1) 当误差 $|e| \geq a$ 或 $|de| \geq b$ 时, 采用输出为 u 的基本模糊控制器, 通过查询表直接进行控制, 充分发挥基本模糊控制器响应快的优点。

2) 当误差 $|e| < a$ 且 $|de| < b$ 时, 进行变结构控制, 转入输出为 du 的自适应增量型模糊控制。

具体步骤如下:

Step1: 确定模糊控制查询表中 $|e| \geq a$ 且 $|de| \geq b$ 所对应的中心论域: $|E| \geq A, |DE| \geq B$ 。其中 E, DE 分别是误差 e 和误差变化率 de 的量化值, A 和 B 的值一般取相应论域量化最大值的 $1/5 \sim 1/7$ 。

Step2: 当误差 $|E| < A$ 或 $|DE| < B$ 时, 采用基本的模糊控制, 模糊控制器输出 u 直接控制被控对象。

Step3: 当 $|E| < A$ 且 $|DE| < B$ 时(设为第 i 时刻), 进行变结构控制。将 E, DE 的值放大到原论域的大小(设放大 k 倍), 再将中心论域用原模糊查询

表表示, 但此时 u 的论域 $[-u_1, u_1]$ 变为 du 的论域 $[-du_1, du_1] = [-u_1/k, u_1/k], k$ 为大于 1 的正数。通过查表法得到的控制器的增量输出为 $du(i)$, 整个控制器输出的控制量为 $u(i) = u(i-1) + du(i)$ 。

Step4: 当放大论域后的 $|E| < A$ 且 $|DE| < B$ 时(设为第 j 时刻), 若稳态误差还没有达到要求, 则将放大后的 E, DE 再次放大到原论域的大小。通过查表法得到的控制器的增量输出仍为 $du(j)$, 此时 du 的论域则变为 $[-du_2, du_2] = [-u_1/k^2, u_1/k^2]$, 整个控制器输出的控制量仍为 $u(j) = u(j-1) + du(j)$ 。

Step5: 按上面的原理继续进行下去, 当缩小 du 论域的过程进行了 p 次后, 系统达到要求的稳态误差, 则此时 du 的论域为 $[-du_p, du_p] = [-u_1/k^p, u_1/k^p]$ 。

由以上步骤可看出, 当误差及其变化达到一定值后, 控制器输出转化为增量式输出 du 。由于控制器通过查表法得到的输出是增量 $du(i)$ 而不是直接控制量 $u(i)$, 因而 u 的论域大小对精度没有影响, 这就克服了基本模糊控制器中 u 的论域大小直接影响控制精度及因模型未知 u 的论域大小无法确定的缺陷。

由以上分析可看出, 该控制器能够根据误差及其变化自动改变结构以实现模糊控制的快速性, 并且根据控制过程自适应地调节增量输出 du 论域的大小, 越接近稳态, du 的论域越小, 从而控制器通过查表法得到的输出 $du(i)$ 越小, 使得控制量 $u(i) = u(i-1) + du(i)$ 在 $u(i-1)$ 基础上的变化就越小, $u(i)$ 则以越高的精度去逼近设定值所对应的 w , 因而从根本上解决了模糊控制存在静差的缺陷。同时, 由于变化后的控制量 $u(i)$ 是在变结构前的控制量 $u(1)$ 的基础上, 以积分形式逐渐变化的, 因而不存在变结构控制的平滑过渡问题。

3) 关于该模糊控制器可减小静差的证明。由文献[6]中的约定和证明可知, 在输出为 u 采用查表法的基本控制器中, 在稳态值附近, 即 $e^* \in (-0.5, 0.5)$ 且 $de^* \in (-0.5, 0.5)$ 时, 控制量恒为 0, 形成死区。在本文设计的控制器中, 当缩小论域的过程进行了 p 次后, 对应于 $e^* \in (-0.5, 0.5)$ 且 $de^* \in (-0.5, 0.5)$ 的实际量化值论域为: $e_p^* \in (-0.5/m^p, 0.5/m^p), de_p^* \in (-0.5/n^p, 0.5/n^p)$, 其中 m, n 分别为 e^* 和 de^* 在论域变化时的放大倍数, m, n 均大于 1, 一般取为 $5 \sim 7$ 。当 $p \rightarrow \infty$ 时, 则有 $0.5/m^p \rightarrow 0, 0.5/n^p \rightarrow 0$, 所以 $\lim_{p \rightarrow \infty} e_p^* \in (-0.0, 0.0)$

$= 0, \lim_{p \rightarrow 0} \Delta e_p^* (-0, 0) = 0$ 。即 $p \rightarrow 0$ 时, 控制死区缩小为一点, 也就是说当 $p \rightarrow 0$ 时, 控制死区消失, 模糊控制器的输入输出关系为一一映射关系: $(e^*, \Delta e^*) \rightarrow u$, 从而从原理上消除了稳态误差和振荡产生的原因, 因而本文提出的模糊控制器从原理上讲能将系统静态误差减小到任意满意的程度。

4 仿真结果

工业对象一般可用 $G(s) = \frac{k e^{-\tau s}}{T_s s + 1}$ 表示, 其额定滞为 $\theta = \tau T$ 。由实际工作经验知, 额定滞 θ 表征了控制一个过程的困难程度, θ 越大, 越难控制。文献[7] 给出了不同 θ 建议使用的方法: 1) $\theta < 0.15$, 可以考虑不采用补偿; 2) $0.15 < \theta < 0.6$, 建议使用 Ziegler-Nichols 调节的 PID 调节器; 3) $0.6 < \theta < 1.0$ 建议使用 Smith 预估器和极点配置, 并建议使用前馈; 4) $\theta > 1.0$, 使用更为有效的补偿方法。

在该实验中, 系统的输入信号为 $r = 100$, 取对象为 $G(s) = \frac{5e^{-50s}}{T_s s + 1}$, 当 T 分别取 10 和 20 时, 其额定滞分别为 $\theta = 50/10 = 5, \theta = 50/20 = 2.5$ 。该对象在基本模糊控制(F)、增量式模糊控制(IF)、PID 控制和本文提出的控制器(VAF) 作用下的实验曲线如图 1($\tau = 50, T = 10$) 和图 2($\tau = 50, T = 20$) 所示。

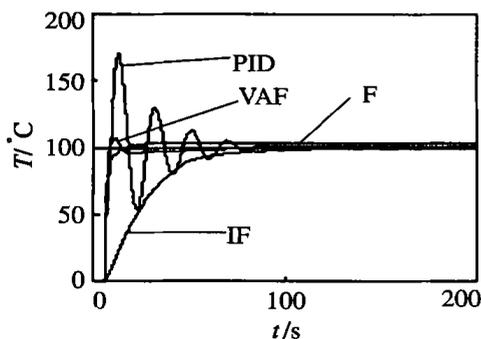


图 1 系统输出响应曲线

由上面的实验可看出, 在假定对象未知的情况下, 控制量 u 的论域取相同的区间, 基本模糊控制存在很大的静差, 增量式模糊控制响应太慢, PID 控制产生了很大的振荡, 而本文的变结构增量式模糊控制则呈现出较好的动态性能并消除了静差。

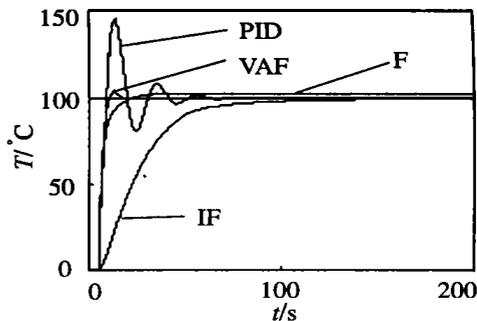


图 2 系统输出响应曲线

5 实验结果

用 8751 单片机实现本文提出的模糊控制器, 并将其应用于烤箱智能温控系统中, 烤箱的温度设定值为 100, 实验结果如图 3 所示。

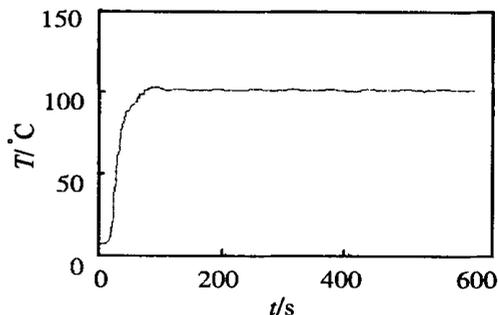


图 3 实验温度曲线

实验结果显示, 当温度设定值为 100 时, 控制误差为 ± 1 , 相对精度为 1%, 较好地实现了对温度的控制。该实验结果证明了本文提出的控制器的有效性和可行性。

6 结 论

本文借鉴积分能消除静差的原理, 采用变结构控制和自适应的增量式控制, 在保留常规模糊控制响应快的特点基础上, 有效地克服了静差, 为大时滞系统和许多未知模型的工业过程的控制提供了新的思路。

参考文献(References):

[1] 卢朝晖, 石光明. 时变对象模糊控制稳态性能的提高[J]. 信息与控制, 1995, 24(4): 59-62.
(Lu Zhao-hui, Shi Guang-ming. Improving of steady state performance of time-varying processes in fuzzy)

control[J]. *Information and Control*, 1995, 24(4): 59-62.)

- [2] 贾磊, 朱摩西. 用论域缩小逼近法消除模糊控制器的余差[J]. 信息与控制, 1995, 24(4): 251-256.

(Jia Lei, Zhu Mo-xi. Eliminating steady-state error of fuzzy controller with the successive approximation of universe of discourse [J]. *Information and Control*, 1995, 24(4): 251-256.)

- [3] 路兆梅, 于跃海. 多项式重置增量型模糊控制器[J]. 东南大学学报, 1999, 29(1): 49-53.

(Lu Zhao-mei, Yu Yue-hai. Polynomial reset incremental fuzzy controller[J]. *J of Southeast University*, 1999, 29(1): 49-53.)

- [4] 范晓英, 陆培新, 陈文楷. 一种新型的模糊控制器[J]. 控制理论与应用, 1995, 12(5): 597-601.

(Fan Xiao-ying, Lu Pei-xin, Chen Wen-kai. A new type of fuzzy controller[J]. *Control Theory and Application*, 1995, 12(5): 597-601.)

- [5] 李华. 一种自适应模糊控制器的设计方法[J]. 电气自动化, 1998, 20(1): 35-37.

(Li Hua. A design method of self-adaptive fuzzy controller[J]. *Electrical Drive Automation*, 1998, 20(1): 35-37.)

- [6] 李娟, 陈佳娟. 模糊控制静差产生原因的理论分析[J]. 甘肃科技, 2000, 16(3): 28.

(Li Juan, Chen Jia-juan. The theory analysis of causing the static error for fuzzy control[J]. *Gansu Science and Technology*, 2000, 16(3): 28.)

- [7] 张乃尧. 典型模糊控制器的结构分析[J]. 模糊系统与数学, 1997, 21(2): 10-21.

(Zhang Nai-yao. Structure analysis of typical fuzzy controllers[J]. *Fuzzy System and Mathematic*, 1997, 21(2): 10-21.)

- [8] Change C C. Improved DNC design for nonlinear process control[J]. *J of AIChE*, 1992, 38(4): 602-608.

(上接第 616 页)

参考文献(References):

- [1] 韩祯祥, 张琦, 文福拴. 粗糙集理论及其应用综述[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(2): 153-157.

(Han Zhenxiang, Zhang Qi, Wen Fushuan. A survey on rough set theory and its application[J]. *Control and Applications*, 1999, 16(2): 153-157.)

- [2] 曾黄麟. 粗糙集理论及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998. 71, 94-117.

- [3] Ning Shan, Wojciech Ziarko. Data-based acquisition and incremental modification of classification rules[J]. *Computational Intelligence*, 1995, 11(2): 357-370.

- [4] Ryszard Nowicki. Evaluation of vibroacoustic diagnostic symptoms by means of the rough sets theory[J]. *Computers in Industry*, 1992, 20(2): 141-152.

(Ryszard Nowicki. Evaluation of vibroacoustic diagnostic symptoms by means of the rough sets theory[J]. *Computers in Industry*, 1992, 20(2): 141-152.)

2003 年 IFAC 冶金自动化新技术国际会议征文通知

IFAC 冶金自动化新技术国际会议将于 2003 年 10 月 11 日~13 日在上海浦东召开。会议由 IFAC 采矿、矿物和金属加工自动化技术委员会以及 IFAC 低成本自动化技术委员会、IFAC 发展中国家技术委员会联合发起。受中国自动化学会委托, 经 IFAC 批准, 会议由大连理工大学和上海宝信软件股份有限公司联合承办。

征文范围: 与冶金工业生产过程有关的检测与自动化装置、建模与控制、故障诊断、计划与调度、管理与优化等, 以及与上述内容有关的方法与技术的实际应用。

征文要求: 论文作者应向程序委员会秘书处提交英文论文全文, 且 Email 投稿。论文应按 IFAC 论文版式(双列)排版, 不超过 6 页, 详见 IFAC 网站 www.ifac-control.org, 也可直接访问 www.elsevier.com/locate/ifac。论文经国际程序委员会审稿录用后, 要求至少有一位作者注册并参加会议。

论文出版: 按 IFAC 惯例, 会议向与会代表提供会议论文预印集(Preprints); 参加会议并在会上宣读的论文将

收入 IFAC 正式论文集(Proceedings); 论文集由 Elsevier Science Ltd, Oxford UK 出版。优秀论文可推荐到 *Control Engineering Practice* 等国际期刊。

论文提交日期: 2003 年 2 月 28 日

录用通知: 2003 年 5 月 31 日

终稿(按 IFAC 版式)提交日期: 2003 年 7 月 30 日

国际程序委员会秘书处地址: 116024 大连理工大学
信息与控制研究中心

联系人: 潘学军 副教授

电话: 0411-4707576 传真: 0411-4707579

Email: panxj@dlut.edu.cn

组织委员会秘书处地址: 201203 上海宝信软件有限公司

联系人: 丛力群 博士

电话: 021-50803342 传真: 021-50800701

Email: congliqun@baosight.com

英文征文通知见 <http://www.baosight.com/ifac03>。