

# 自调整模糊控制器的控制参数和控制规则<sup>\*</sup>

邓辉文 王 艺 胡伟平

(西南师范大学计算机与信息科学学院 重庆400715)

## A Self-Tuning Scheme for Scaling Factors and Control Rules of Fuzzy Controllers

DENG Hui-Wen WANG Yi HU Wei-Ping

(College of Computer and Information Science, Southwest Normal University, Chongqing 400715)

**Abstract** We present a fuzzy logic controller that self-tune both scaling factors and control rules and give the simulation results for the second-order system.

**Keywords** Fuzzy controller, Scaling factors, Control rules, Simplex algorithm

### 1 引言

模糊控制是智能控制研究的方向之一。与传统控制截然不同的，模糊控制不需要被控对象的精确数学模型。自从 E. H. Mamdani<sup>[1]</sup>1974年在实验室将模糊控制应用于锅炉和

汽轮机的控制取得成功以来，模糊控制在家电、化工、机械、冶金等诸多领域都取得了较大成功。本文针对 FZ-1 模糊控制器中有待解决的问题进一步开展研究。

### 2 现有模糊控制器有待解决的问题

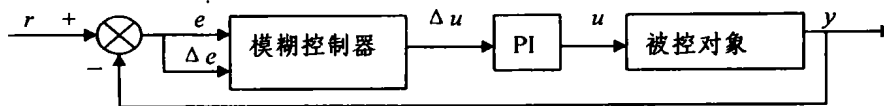


图1 模糊控制系统结构图

模糊控制系统的结构图如图1所示。图1中， $r$  是设定值。在取样时刻  $t$ ， $e(t) = r - y(t)$  是偏差， $\Delta e(t) = e(t) - e(t-1)$  是偏差的变化。采用 PI 型模糊控制器<sup>[2]</sup>，则控制器的输出为控制增量  $\Delta u(t)$ ，经 PI 部分后为控制量  $u(t)$ ，这时

$$u(t) = \Delta u(t) + u(t-1) \quad (1)$$

设  $e(t)$ 、 $\Delta e(t)$  及  $\Delta u(t)$  的基本论域分别为  $[-e_{max}, e_{max}]$ 、 $[-\Delta e_{max}, \Delta e_{max}]$  和  $[-\Delta u_{max}, \Delta u_{max}]$ ，定义在其上的语言变量分别为  $E$ 、 $\Delta E$  和  $\Delta U$ ，这些语言变量分别有  $2n+1$ 、 $2m+1$  和  $2l+1$  个量化等级，即其模糊论域分别为

$$\begin{aligned} E &= \{-n, -n+1, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, n-1, n\}, \\ \Delta E &= \{-m, -m+1, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, m-1, m\}, \\ \Delta U &= \{-l, -l+1, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, l-1, l\} \end{aligned} \quad (2)$$

定义控制器的参数如下<sup>[3]</sup>：

$$k_e = \frac{n}{e_{max}}, k_{\Delta e} = \frac{m}{\Delta e_{max}}, k_{\Delta u} = \frac{\Delta u_{max}}{l} \quad (3)$$

式(3)中定义参数称为量化、比例因子(Scaling Factors, SF's)，基于控制查询表的控制算法如下：

**Step 1** 计算  $e(t)$  和  $\Delta e(t)$ ；

**Step 2**  $E = Q(k_e \cdot e)$ ， $\Delta E = Q(k_{\Delta e} \cdot \Delta e)$ ，其中  $Q(x)$  表示  $x$  所在的模糊论域中的模糊等级；

**Step 3**  $\Delta U = f(E, \Delta E)$ ，其中  $f$  是由控制查询表定义的函数；

**Step 4**  $\Delta u = k_{\Delta u} \cdot \Delta U$ 。

对于函数  $f$ ，文[4, 5]分别论述了它实际上等价于通常的模糊语言控制规则。在文[4, 5]中，

$$f = \left\langle \frac{1}{2}E + \frac{1}{2}\Delta E \right\rangle \quad (4)$$

在我们的研究中，取  $n=m=5, l=10$ ，并且

$$f = E + \Delta E \quad (5)$$

其控制规则查询表见表1。

表1 控制规则表

$\Delta U$	$\Delta E$	$E$									
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-5	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
-4	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
-3	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
-2	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
-1	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
0	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
1	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
2	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
4	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

为了取得较好的控制效果，对模糊论域中的模糊等级采用不均匀划分<sup>[6]</sup>。

控制参数  $k_e$ 、 $k_{\Delta e}$  和  $k_{\Delta u}$  对系统性能的影响见文[3]，对于这三个参数的调整，不象 PID 参数有较系统的方法。在系统调整初期，由技术熟练的软件开发技术工程师可以完成，并在一定时期可以有满意的控制效果。但由于被控对象往往是慢时变的，一段时间后，随着工况的变化，为了获得满意的控制效果，需要重新整定  $k_e$ 、 $k_{\Delta e}$  和  $k_{\Delta u}$  这三个参数。对于成熟的控制软件产品，它能对这三个参数进行自整定，以节省一些不必要的经费开支。本文欲解决这个技术问题。

<sup>\*</sup> 教育部高等学校骨干教师基金和重庆市科委应用基础研究项目资助。

### 3 新的模糊控制方案

#### 3.1 控制参数(SF's)的寻优

针对现有模糊控制器的不足,我们利用单纯形寻优算法<sup>[7]</sup>,在线调整比例因子  $k_e$ 、 $k_{\Delta e}$  和  $k_{\Delta u}$ 。此时,模糊控制器的结构如图2。

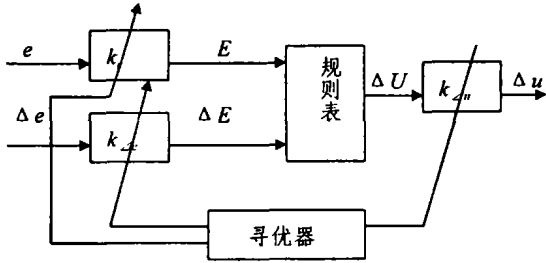


图2 控制参数自寻优的模糊控制器

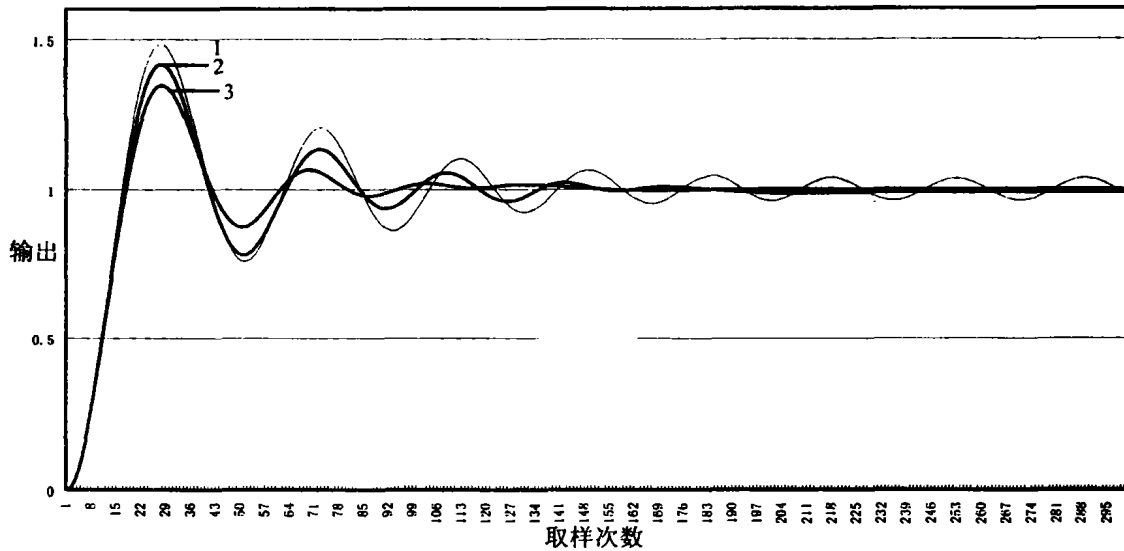


图3 二阶对象式(7)对控制参数的响应

图3中曲线1、2、3分别是用单纯形法对参数(SF's)寻优0次、5次、12次时对象的动态响应图。可以观察到,三个控制参数对系统性能的影响是很大的。我们的寻优过程是可观测的。最后我们找到的一组最佳比例因子如下: $k_e^* = 1.532, k_{\Delta e}^* = 77.883, k_{\Delta u}^* = 0.009$ 。

#### 3.2 控制参数和控制规则在线自调整

我们已解决现有模糊控制参数(SF's)的自调整问题。通过仿真实验也发现,通过一组最佳控制参数  $k_e$ 、 $k_{\Delta e}$ 、 $k_{\Delta u}$  去控制被控对象可以获得较满意的控制效果。在前面寻优控制参数  $k_e$ 、 $k_{\Delta e}$ 、 $k_{\Delta u}$  时,模糊控制规则是保持不变的。事实上,模糊控制规则是语言规则,文[8]论述了:可通过适当调整控制规则以改善系统的动态性能。注意到,文[8]未论及控制参数  $k_e$ 、 $k_{\Delta e}$ 、 $k_{\Delta u}$  的寻优问题。本文提出将控制参数  $k_e$ 、 $k_{\Delta e}$ 、 $k_{\Delta u}$  寻优与模糊控制规则的调整结合的一种控制方案。在找到一组最佳的控制参数  $k_e$ 、 $k_{\Delta e}$ 、 $k_{\Delta u}$  后,再利用与文[8]类似的调整方法对控制规则进行调整。

与文[8]类似,采用带多个修正因子的如下控制规则,其原理见文[8]。

$$\Delta U = \begin{cases} (\alpha_1 \cdot E + (2 - \alpha_1) \cdot \Delta E), & E = 0, \pm 1; \\ (\alpha_2 \cdot E + (2 - \alpha_2) \cdot \Delta E), & E = \pm 2; \\ (\alpha_3 \cdot E + (2 - \alpha_3) \cdot \Delta E), & E = \pm 3; \\ (\alpha_4 \cdot E + (2 - \alpha_4) \cdot \Delta E), & E = \pm 4; \\ (\alpha_5 \cdot E + (2 - \alpha_5) \cdot \Delta E), & E = \pm 5 \end{cases} \quad (8)$$

寻优时性能指标采用著名的 ITAE 积分,即使下列目标函数达最小:

$$Q(k_e, k_{\Delta e}, k_{\Delta u}) = \sum_t |e(t)| \quad (6)$$

根据对象的动态响应特性对这三个参数寻优,使系统性能达到令人满意的水平。这种方案完全摆脱了人工操作,一旦对象确定,给定了参数的初值,即可自动寻得较优的参数(SF's)。当对象的状态发生变化时,可立即启动寻优器来重新获得适当的控制参数。通过仿真实验,采用这种控制参数自整定方法的模糊控制器能够获得较好的控制效果。

例1 考虑传递函数  $G(s)$ :

$$G(s) = \frac{0.01}{s^2 + 0.1s + 0.01} \quad (7)$$

在仿真过程中,对  $k_e$ 、 $k_{\Delta e}$ 、 $k_{\Delta u}$  这三个参数,其初值就由(3)式给定,寻优步长为0.01,  $u$  的初值为1.5。寻优过程中对象的响应如图3所示。

其中,  $\alpha_1 \sim \alpha_5 \in [0, 2]$ 。

例2 同样采用例1中的二阶对象,仿真过程中选择初始修正因子为  $\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.6, \alpha_3 = 0.9, \alpha_4 = 1.2, \alpha_5 = 1.5$ ,初始规则见表1。仿真过程中,仍采用(6)式寻优指标函数,寻优步长为0.08,寻优25次后,得到优化规则的修正因子为:  $\alpha_1 = 0.562, \alpha_2 = 0.603, \alpha_3 = 0.948, \alpha_4 = 1.121, \alpha_5 = 1.543$ ,优化规则见表2(表中阴影部分表示经过修正的规则)。

表2 控制规则表

$\Delta U \backslash E$	$\Delta E$	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-10	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
-4	-9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2
-3	-8	7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3
-2	-7	6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4
-1	-6	5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5
0	-5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6
1	-4	3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7
2	-3	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
3	-2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

(下转第144页)

方:将采用另一种值,或者可能以 Confirm 同意对方要求改变的值。未经协商,任何属性都不能改变。一个简单的 CCID 协商的过程如图3: B 请求 A 应用 ID 为3或者4的拥塞控制算法(注意按照 ID 排列顺序,B 更希望 A 采用 CCID3),A 则认为 CCID1,CCID2和 CCID5的算法比较好,B 只好重新请求 A 使用 CCID5,A 最终确认了 CCID5。

B>A	Change(CC,3,4)
A>B	Prefer(CC,1,2,5)
B>A	Change(CC,5)
A>B	Confirm(CC,5)

图3 一个 CCID 协商的例子

#### 4. DCCP 的仿真和实现

DCCP 的基本设计已经结束,并已得到了 IETF 的认可。在刚刚结束的(2002年7月)日本横滨第54届 IETF 会议上 DCCP 工作组对协议的仿真和实现进行了深入的讨论,并总结了一些需要解决的问题。

目前有多个组织和个人在仿真研究或实现 DCCP 协议,其中 Patrick McManus 在 LINUX 内核中实现了基本的 DCP 协议<sup>[7]</sup>;加利福尼亚大学伯克利分校的研究组织 CITRIS 在 NS 软件中对 CCID3进行了仿真,验证了 CCID3良好的 TCP 友好性<sup>[8]</sup>。他们正在进行其他 CCID 是实现,以及向 Linux、BSD 等系统中移植 DCCP。他们的实现允许新的拥塞控制算法能被容易地嵌入,留下了扩展空间。

已有的实现并没有提供良好的应用接口,因而不利于应用程序从其他协议转到 DCCP 来。在 DCCP 设计中的一些重

要思想,比如支持确认向量等,是提高 DCCP 性能的一个关键,但是这些设计思想需要大量的仿真和实验来检验。另外,DCCP 协议的初衷是为用户提供一个轻型的传输控制协议,但是由于要实现众多的选项功能,现在的 DCCP 的包头是比较大的。如何改进设计,尽可能地减小包头的大小是一个开放的问题。

**结语** DCCP 的研究和实现还不充分,最终也许会有重要的变化。在最终的多媒体流传输控制方案确定之前,大部分应用还得使用 TCP 或者 UDP,或者其它基于它们之上的协议。但是研究结果表明 DCCP 是有效和 TCP 友好的,并且 DCCP 的研究表达了流媒体传输控制的清晰框架——不管最终的协议是如何的,一些基本的原则是:TCP 的拥塞控制机制决定了什么是公平的数据发送速率;UDP 的不可靠传输和简单性将是数据传输方式的目标。

#### 参考文献

- 1 Floyd S, Handley M, Kohler E. Problem Statement for DCP. Internet-draft, February 2002, Work in progress
- 2 Kohler E, Handley M, Floyd S, Padhye J. Datagram Congestion Control Protocol (DCCP). Internet-draft, June 2002, Work in progress
- 3 Floyd S, Kohler E. Profile for DCCP Congestion Control ID 2: TCP-like Congestion Control. Internet-draft, May 2002, Work in progress
- 4 Padhye J, Floyd S, Kohler E. Profile for DCCP Congestion Control ID 3: TFRC Congestion Control. Internet-draft, June 2002, Work in progress
- 5 Schulzrinne H, et al. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. RFC 1889
- 6 Stewart R, et al. Stream Control Transmission Protocol. RFC 2960
- 7 <http://www.ducksong.com:81/dccp/>
- 8 Sohn T, Zolfaghari E. Experimentations in Datagram Control Protocol; [Tech. Report]. Tech. Report, University of California at Berkeley, May 2002

(上接第114页)

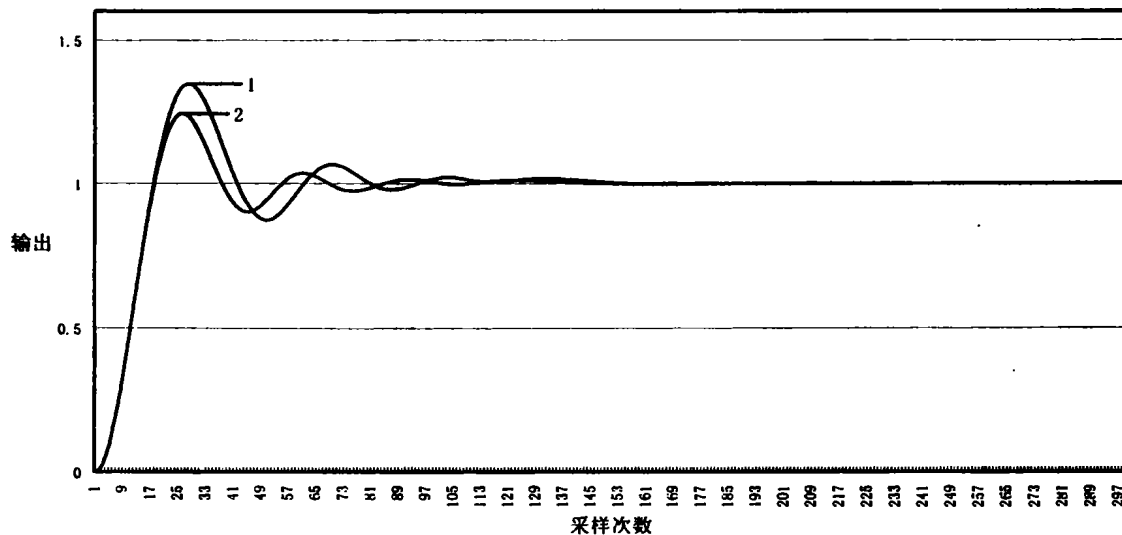


图4 二阶对象式(7)的系统响应;曲线1为只调整比例因子进行控制,曲线2为调整比例因子与修改规则相结合进行控制

图4显示了规则修改前和修改后对控制性能的影响。

#### 参考文献

- 1 Mandani E H. Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant. Proc IEEE, 1974, 121(12): 1585~1588
- 2 Mudi Rajani K, Pal Nikhil R. A Robust Self-Tuning Scheme for PI- and PD-Type Fuzzy Controllers. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1999, 7(1): 2~15
- 3 章卫国,等.模糊控制理论与应用.西北工业大学出版社,1999
- 4 龙升照,汪培庄. Fuzzy 控制规则的自调整问题.模糊数学,1982,

2(3): 105~111

- 5 He Shi-Zhong, Tan Shaohua, Hang Chang-Chieh, Wang Pei-Zhuang. Control of dynamical processes using an on-line rule-adaptive fuzzy control system. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 54: 11~22
- 6 Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization. The Computer Journal, 1965, 7: 308~313
- 7 李士勇. 模糊控制: 神经控制和智能控制论. 哈尔滨工业大学出版社, 1996
- 8 李东辉. Fuzzy 控制规则自调整和 Fuzzy 控制系统寻优及其仿真研究. 模糊数学, 1986, (3): 53~61