

一种控制规则自调整的模糊控制器

程金, 张承慧, 夏东伟

(山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061)

[摘要] 根据模糊控制理论和实际工程经验, 设计了一个控制规则能够自调整的模糊控制器, 详细介绍了该模糊控制器的控制原理和运行机制, 并作出了仿真。该模糊控制器控制精度高, 动态和稳态性能均优于传统的PID和基本模糊控制器, 且具有较好的鲁棒性和抗扰动能力。仿真和工程实践证明, 该模糊控制器具有简便、稳定的优点, 且易于工程实现, 具有较高的工程应用价值。

[关键词] 模糊控制; 控制规则自调整; 自适应

[中图分类号] TP273 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)09-0078-04

1 引言

基本模糊控制器实际上是一种非线性控制器。与常规PID控制器相比, 在动态响应与抑制系统内部参数变化对系统输出的影响方面均优于常规PID控制器^[1]。但对非线性、时变的复杂系统采用模糊控制时, 为了获得良好的控制效果, 要求模糊控制器具有较完善的控制规则^[2]。然而, 由于被控过程的非线性、高阶次、时变性以及随机干扰等因素的影响, 造成模糊控制规则或者粗糙或者不够完善, 影响控制效果。同时基本模糊控制所依赖的控制规则缺乏在线自学习或自调整能力, 并且存在量化偏差与调节死区, 其稳态性能有时反不如PID和PI控制器; 系统存在稳态偏差、稳态震颤等现象^[2]。另外, 基本模糊控制器在工程应用中, 并不易于硬件实现。

为了弥补其不足, 笔者提出了一种控制规则自调整模糊控制技术, 使模糊控制器的控制规则在控制过程中能够自动调整和完善, 从而使系统的控制性能得到改善, 达到预期的效果; 并且结构简单, 便于工程应用。

2 控制规则自调整的模糊控制器

2.1 基本模糊控制器原理及其缺陷

在实际运用中, 常常以输入量与输出量之间的偏差 e 和偏差变化率 c 作为采样信息。这里, 定义 $e = y - r$, $c = \dot{e}$, 其中 y 为系统的输出, r 为系统参考输入。定义 u 为控制器的输出。设计规则涉及的论域有3个, 分别是偏差 E , 偏差变化率 C 及控制量 U , 三者所对应的模糊集合分别为 \tilde{A} , \tilde{B} , \tilde{C} 。设每个论域用7个语言变量描述, 它们的取值为

{PB, PM, PS, 0, NS, NM, NB}

$\stackrel{\text{def}}{=} \{3, 2, 1, 0, -1, -2, -3\}$ 。

实际上偏差 e 与偏差变化率 c 都是连续变化的量, 这里只取-3到+3之间的整数。把连续量离散为有限个数值是为了推理合成的方便。但这种离散化也造成量化偏差的存在, 从而引起系统出现稳态偏差, 造成不良影响。

根据人们对过程控制的实际经验的总结^[3], 推理语言规则可用表1来表示。

根据上述每一条控制规则, 采用Mamdani^[4]定义, 可得到相应的三元模糊推理关系

[收稿日期] 2002-11-04; 修回日期 2003-02-13

[基金项目] 山东省自然科学基金资助项目(Y2001G01); 山东省优秀中青年科学家基金资助项目(02BS020)

[作者简介] 程金(1978-), 男, 山东胶南县人, 山东大学硕士研究生

$$\tilde{R}_i = \tilde{A}_i \times \tilde{B}_i \times \tilde{C}_i \quad (1)$$

表 1 推理语言规则

Table 1 The linguistic rules of inference

$\tilde{C} \backslash \tilde{A}$	NB	NM	NS	NO	0	PS	PM	PB
\tilde{B}								
PB	PB	PM	NB	NB	NM	NB	*	*
PM	PB	PM	NM	NM	NM	NS	*	*
PS	PB	PM	NS	NS	NS	NS	NM	NB
0	PB	PM	PS	0	0	NS	NM	NB
NS	PB	PM	PS	PS	PS	PS	NM	NB
NM	*	*	PS	PS	PM	PM	NM	NB
NB	*	*	PB	PB	PB	PB	NM	NB

* 表示在控制过程中不可能出现那种情况

对输入 A_i^* 和 B_i^* ，由 Mamdani 模糊推理算法^[4]，可推导出相应的控制输出 C_i^* 。

$$\begin{aligned} C_i^* &= (A_i^* \times B_i^*) \cdot \tilde{R}_i = \\ &= (A_i^* \wedge B_i^*) \cdot (\tilde{A}_i \wedge \tilde{B}_i \wedge \tilde{C}_i) = \\ &= A_i^* \cdot (\tilde{A}_i \wedge \tilde{C}_i) \cap B_i^* \cdot (\tilde{B}_i \wedge \tilde{C}_i) = \\ &= ((A_i^* \cdot \tilde{A}_i) \wedge \tilde{C}_i) \cap ((B_i^* \cdot \tilde{B}_i) \wedge \tilde{C}_i) = \\ &= (A_i^* \cdot \tilde{A}_i) \wedge (B_i^* \cdot \tilde{B}_i) \wedge \tilde{C}_i \end{aligned} \quad (2)$$

其中 ‘ \cdot ’ 为 max-min 算子，‘ \wedge ’ 为取小运算。

总的控制输出采用并取的办法来获得，即

$$C^* = C_1^* \cup C_2^* \cup \dots \cup C_j^* \quad (3)$$

按上述推导公式及步骤计算，可得控制表见表 2。

表 2 控制规则表

Table 2 Rule table

$u \backslash c$	-3	-2	-1	0	1	2	3
e							
-3	-3	-3	-3	-2	-2	-1	0
-2	-3	-2	-2	-2	-1	0	1
-1	-2	-2	-1	-1	0	1	1
0	-2	-1	-1	0	1	1	2
1	-1	-1	0	1	1	2	2
2	-1	0	1	2	2	2	3
3	0	1	2	2	3	3	3

设控制对象的传递函数为 $1/(s^2 + s)$ ， r 为 $r(t) = 1(t)$ ，采用上述模糊控制方法，用 Simulink 工具箱仿真得到的阶跃响应曲线如图 1 所示。可以看出，基本模糊控制器是一种粗糙的控制器，其动态性能虽然好于传统 PID 控制，但存在稳态误差，并不能满足实际工程对系统高控制精度及稳态性能的要求，不能应用在控制精度要求高的场合。

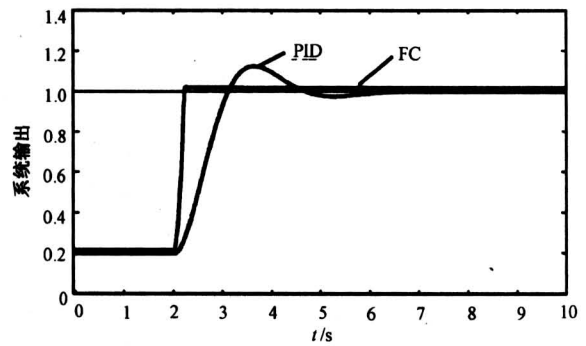


图 1 基本模糊控制器与 PID 控制器的阶跃响应曲线

Fig.1 Comparison of the step response of the basic FC and PID

2.2 控制规则自调整的模糊控制器

为了提高基本模糊控制器的控制精度和消除稳态误差，笔者在基本模糊控制器的基础上，提出了一种控制规则自调整的模糊控制器。控制规则自调整是提高和改善模糊控制器的关键，上述基本模糊控制器的控制规则是固定不可调整的。笔者应用修正因子法建立模糊控制器模型，对不同的控制对象，通过调整修正因子，改变对偏差 e 和偏差变化率 c 的加权程度，从而调整了控制规则，实现控制规则的在线自调整，达到了改善系统稳态性能的目的。

根据上述所计算的控制表 2，模糊控制模型结构可采用下列解析表达式^[5]来描述：

$$U = \langle aE + (1 - a)C \rangle, \quad (4)$$

式中， a 为修正因子，又称加权因子。 a 的取值大小直接表示对偏差 e 和偏差变化率 c 的加权程度，这种加权也反应了操作者进行手动控制时的思维特点。

当 $a = 0.5$ 时，根据式 (4) 可计算得到控制规则表如表 3 所示。

表 3 $a = 0.5$ 时的控制规则表

Table 3 The rule table when $a = 0.5$

$u \backslash c$	-3	-2	-1	0	1	2	3
e							
-3	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0
-2	-3	-2	-2	-1	-1	0	1
-1	-2	-2	-1	-1	0	1	1
0	-2	-1	-1	0	1	1	2
1	-1	-1	0	1	1	2	2
2	-1	0	1	2	2	2	3
3	0	1	1	2	2	3	3

比较表 1 和表 2，可以看出两者的控制动作基本一致。显然，采用解析表达式描述的控制规则更加简单方便，更容易实现计算机实时控制和实际工程应用。

对二维模糊控制系统来说，当偏差较大时，控制系统的任务是消除偏差，这时对偏差的加权应该大些，即修正因子 a 大一些；相反，当偏差较小时，此时系统接近稳态，控制系统的主要任务是使系统尽快稳定，为此需减小系统超调，这就要求在控制规则中对偏差变化的控制作用大些，即对偏差变化加权大一些，即修正因子 a 小一些。因此，在不同的偏差范围时，采用不同的加权因子，以实现控制规则的自调整。

对修正因子 a 的调整，在基本模糊控制的基础上，根据实际经验对其按偏差大小自调整，同时可以使修正因子连续变化，从而使控制量连续变化。实验仿真证明采用这种自适应模糊控制器可以消除稳态误差。

模糊控制规则的调整按下述解析式确定：

$$U = \begin{cases} \langle a_0 E + (1 - a_0) C \rangle, & E = 0, \\ \langle a_1 E + (1 - a_1) C \rangle, & E = \pm 1, \\ \langle a_2 E + (1 - a_2) C \rangle, & E = \pm 2, \\ \langle a_3 E + (1 - a_3) C \rangle, & E = \pm 3, \end{cases} \quad (5)$$

式中 修正因子 $a_0, a_1, a_2, a_3 \in [0, 1]$ ， $\langle * \rangle$ 表示按四舍五入取整，通常 $a_0 < a_1 < a_2 < a_3$ 。

控制系统的结构如图 2 所示。

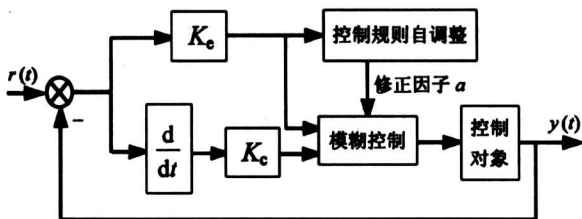


图 2 规则自调整模糊控制器的结构图

Fig.2 The architecture of the rule auto-tuning FC

凭经验确定修正因子 a 会带来一定的盲目性，很难获得一组最佳的参数。为此，笔者采用 ITAE (I 表示积分，T 表示时间，AE 表示绝对误差) 积分性能指标，进行模糊控制规则自寻优。ITAE 性能指标的表达式为

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt = \min, \quad (6)$$

式中 J 表示偏差函数加权时间之后的积分面积的大小。该性能指标能够较好的反映系统单位阶跃响应快、调节时间短、超调量小以及稳态偏差小等特性。寻优过程可根据目标函数值不断减小的原则，不断的校正修正因子的取值，最终可以获得一组优选的修正因子。

3 实验仿真

用 Simulink 对作者提出的控制规则自调整的模糊控制器做了仿真，数学模型如图 3 所示。在 Simulink 仿真中，采用 NCD 模块进行参数寻优。初选的各修正因子的初始值 $\{a_0, a_1, a_2, a_3\} = \{0, 0.2, 0.6, 1\}$ ，则性能指标 $J_0 = 0.08$ 。用 ITAE 积分性能指标寻优后，得到一组优选的修正因子 $\{a_0, a_1, a_2, a_3\} = \{0, 0.1, 0.45, 1\}$ ，这时性能指标 $J = 0.045$ 。

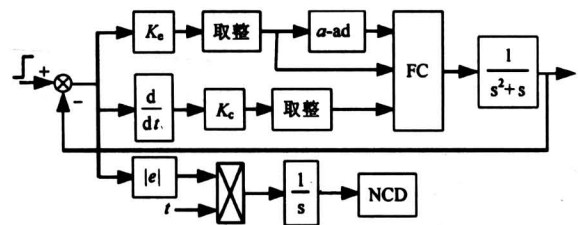


图 3 Simulink 仿真数学模型

Fig.3 The model in Simulink for simulation

优化后的控制规则阶跃响应曲线如图 4 所示，与基本模糊控制器相比，已经消除了稳态误差，并且在动态性能上也得到了改善，取得了令人满意的效果。

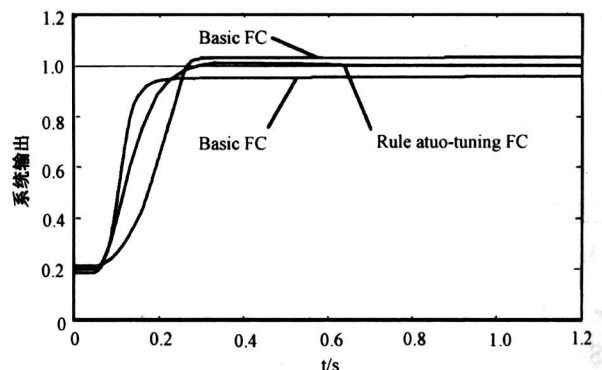


图 4 规则自调整模糊控制器的阶跃响应曲线

Fig.4 The step response of the rule auto-tuning FC

4 结论

通过在线调整模糊控制器的控制规则，消除了基本模糊控制器存在的稳态误差，改善了系统的动态性能和稳态性能。控制规则自调整模糊控制器的结构易于工程实现，具有简单、易行、稳定、可靠的优点。目前已经用于液压伺服控制系统，用以取代传统的PID控制器，并已取得了良好的控制效果。

参考文献

- [1] 李友善, 李军. 模糊控制理论及其在过程控制中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- [2] 王立新. 自适应模糊控制系统与控制-设计与稳定性分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995
- [3] 易继锴, 侯媛彬. 智能控制技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1999
- [4] Zadeh L A. Fuzzy sets informat control [J]. 1965, 8: 338~353
- [5] 刘国容. 模糊自适应PID控制器[J]. 控制与决策, 1995, 6(10): 558~562

Rules Auto-conditioning Fuzzy Controller

Cheng Jin, Zhang Chenghui, Xia Dongwei

(Control Science and Engineering School, Shandong University, Jinan 250061, China)

[Abstract] According to the fuzzy theory and practical experience, the authors propose a rules auto-conditioning fuzzy controller, whose dynamic performance and stability are all prior to the conventional PID controller and the basic fuzzy controller. It is also shown that the controller has good disturbance rejection properties and insensitivity to plant parameter variations. Both simulation and engineering prove that it is feasible actually and convenient to put into practical control project.

[Key words] fuzzy controller; rules auto-tuning; adaptive

蓄光型发光材料

长余辉发光材料是一类吸收了激发光能并储存起来,光激发停止后再把储存的能量以光的形式慢慢释放出来,并可持续几小时甚至十几小时的发光材料。这种吸收光—发光—储存—再发光,并可无限重复,故称之为蓄光型发光材料。

蓄光型发光材料的生产和应用始于20世纪初,但此类材料均为具有放射性的硫化物系列,有危害人体、污染环境的弊端。1992年以肖志国教授为首的大连路明集团发明并研制出添加稀土元素为激活剂的、无放射性的、蓄光性能优于硫化物的铝酸盐体系发光材料,余辉时间可达30多个小时,实现了夜间长时间发光的要求,使蓄光材料的发展迈入了一个新时代,并迅速为现代社会所接受和广泛应用。

如大连路明集团公司研发的发光专利产品之一的蓄光自发光型疏散指示标志系统,具有无需电源、安装简便、发光安全系数100%等特点,现已成为世界各国消防部门优先采用的消防新品,并在交通运动、军事、人防等领域获得广泛应用。美国纽约世贸中心大楼、德国法兰克福机场、巴黎地铁以及5000架波音、空客、麦道飞机,劳氏及挪威船级社认可的船只,均已采用该公司的发光标志指示产品。

(石吾子)