

(2) 10-15

# 自适应修正模糊控制算法研究

Study on Fuzzy Control Algorithm with Adaptive Correction

杨永臻  
Yang Yongzhen

劳丽  
Lao Li

TP273.2

(重庆大学电子信息工程学院, 重庆, 630044; 第一作者 67 岁, 男, 教授)

4 摘要 提出了一类具有自适应修正功能的模糊控制算法。该算法可以用来处理具有不确定性、非线性、大时延和时变特性的复杂系统的控制问题。数字仿真结果证实了控制算法的有效性。

关键词 模糊控制; 自适应修正; 复杂系统  
中国图书资料分类法分类号 TP273.2

算法

ABSTRACT A class of Fuzzy Control algorithms with adaptive correction function is proposed. The new algorithm can be used to deal with control problem for complex system which have uncertainty, nonlinear, large time-delaying and time-varying characteristics. Simulation results demonstrate the effectiveness of the control algorithm.

KEYWORDS fuzzy control; adaptive correction; complex system

## 0 引言

迄今,以模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的模糊控制方法,越来越受到控制工程界的重视。主因是这类模糊控制系统的控制性能——鲁棒性强、算法简明、控制策略修改灵活、重组性能好。实践表明,它适用于一类具有非线性、变参数的控制系统,并已在多种工业设备和生产过程控制领域中得到应用<sup>[1]</sup>。但是,一般的模糊控制机理是建立在“事后控制”基础上的。由于它不具备对系统运动趋势的预测功能,致使其跟踪速度及控制性能受时滞的影响较大,制约了在更广泛的范围内推广应用。

本文提出一类基于广义预测控制的自适应修正模糊控制算法,目标是在保证模糊控制本身固有优点的同时,通过长序列最优预测,对模糊控制算法进行在线实时自适应修正,以期进一步扩展其应用范围,提高复杂控制系统的控制品质和响应速度。当注入一定的简化措施,并用递推算法求解预测控制的参量时,可以显著减少计算量,从而达到有效运用之目的。

## 1 预测控制

自从英国学者 Clarke 等人于 1987 年提出广义预测控制算法<sup>[2]</sup>以来,预测控制在控制工

程领域已经占有重要位置。主要特点是可成功地应用于一类时变时延、开环不稳定的非最小相位系统,且对描述对象的模型精度要求低,呈现出综合控制质量高、鲁棒性较强。

以长度后退原理为基础的广义预测控制,力求较准确地预测出将来时刻所需的控制量。参数型广义预测控制算法采用具有积分作用的自回归移动平均模型(CARIMA 模型)作为对象模型,使其更接近被控过程特性。并以预测输出  $y(k+j)$  与设定值  $y_r(k+j)$  的误差和控制增量  $\Delta u(k+j)$  的二次型函数作为目标函数。在目标函数  $J$  中考虑了将来某个时间范围内预测输出的轨迹与设定值的靠近程度,也考虑了某一时间范围内控制量变化的因素。因此,广义预测控制问题是一类目标函数  $J$  最小化的优化问题,其优化过程是反复地在线进行,采用动态滚动式的有限时域优化策略,从而可在充分长的时间区域内,及时反映和处理可能出现的不确定性。

## 2 自适应修正模糊控制算法

前已提及,模糊控制和广义预测控制都有各自的优点。本文从实现优势互补,提高控制系统的性能——鲁棒性出发,提出的自适应修正模糊控制系统框图如图 1 所示。

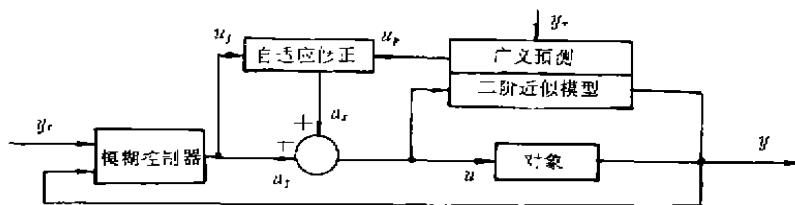


图 1 自适应修正模糊控制系统框图

本系统以模糊控制器为主控器,以广义预测控制值  $u_p$  作为自适应修正的依据,亦即用“预测控制”去修正单一模糊控制“事后控制”的不足。通过  $u_p$  的变化预测出对象特性的改变,实时修正模糊控制量  $u_f$ ,以便克服时滞等不确定性因素的影响。

### 2.1 广义预测输出控制 $u_p$

广义预测控制算法在控制的每一步都要检测实际的输入、输出信息,并通过辨识得到的历史信息 and 选定的未来输入,对未来作出较准确的预测。因此,作为基础的预测模型,只是对对象特性的粗略描述。这样,从实现自适应修正对广义预测控制的实际需要出发,就可选用二阶模型结构去模拟被控对象,然后以辨识出的近似模型为基础,采用广义预测控制算法计算出预测控制量  $u_p$ ,作为自适应修正模糊控制量  $u_f$  的一个重要参量。

实际计算  $u_p$  的过程,考虑了时延上限,并将控制范围  $N_c$  取为 1,从而可以减小计算量,而不影响修正效果。

### 2.2 模糊控制器输出控制量 $u_f$

为了提高主控器的控制品质,本文采用一类多模态控制器<sup>[3]</sup>,系统框图如图 2 所示。

多模态控制器的工作过程如下:

1) 开关控制阶段 初始启动时,输出值可能远离设定点,这时采用开关控制方式,可以加快系统的响应速度,而对最终的控制精度影响不大。在该阶段对输出进行限幅是必要的。

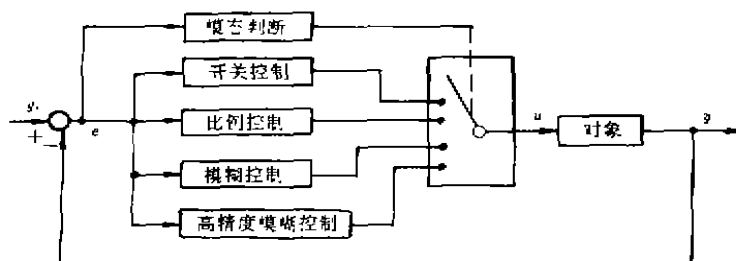


图 2 多模态控制器框图

2) 比例控制阶段 为了使控制过程平稳过渡,减少超调量,需要引入一段比例控制,为模糊控制阶段做好准备工作。

3) 模糊控制阶段 本阶段采用常规的模糊控制,即以偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$  为依据,通过在线查询控制规则表,对系统进行控制。该阶段由三部分组成,算法框图如图 3 所示。

4) 高精度模糊控制阶段<sup>[4]</sup> 当进入模糊控制的不灵敏区时,偏差  $E$  及偏差变化率  $EC$  可能均为零级,控制输出  $u$  也将为零级。这时,由于稳态误差的存在,在干扰作用下,将会出现自振现象。为此,可对量化丢失的信息再作一次判断,以求最大限度地降低余差。

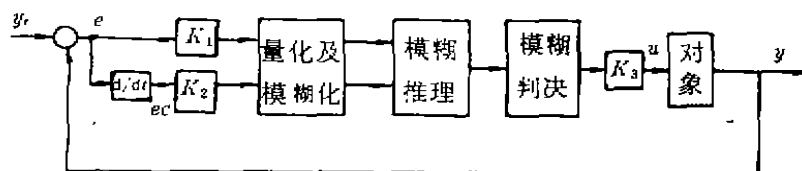


图 3 模糊控制算法框图

例如,设  $E$  及  $EC$  的实测值由各自的模糊子集赋值表量化出相应的等级  $E1$  及  $EC1$ ,即:

$$E1 = \text{INT}(K_1 \times e + 0.5); \quad EC1 = \text{INT}(K_2 \times ec + 0.5) \quad (1)$$

然后,在  $E1$  和  $EC1$  的判断基础上,再进行一次量化,得出新的等级:

$$\begin{aligned} E2 &= \text{INT}((K'_1 \times e - E1) \times K'_1 + 0.5); \\ EC2 &= \text{INT}((K'_2 \times ec - EC1) \times K'_2 + 0.5) \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $K'_1$  和  $K'_2$  为新的比例因子。使用  $E2$  和  $EC2$  从控制查询表中得到需要的控制量  $u'$ ,而控制量  $u$  则为  $u = K_3 \times K'_3 \times u'$ ,其中  $K'_3$  和  $u'$  代表设计基本模糊控制器时所丢失信息相对应的修正作用。修正后可望达到减少稳态误差的目的。

表 1  $F_{ec}$  查询表

$F_{ef}$	$F_{ec}$						
	$PB$	$PM$	$PS$	$0$	$NS$	$NM$	$NB$
$PB$	$PB$	$PM$	$PS$	$OK$	$NS$	$NM$	$NB$
$PM$	$PM$	$PS$	$OK$	$OK$	$OK$	$NS$	$NM$
$PS$	$PS$	$OK$	$OK$	$OK$	$OK$	$OK$	$NS$
$NS$	$PS$	$OK$	$OK$	$OK$	$OK$	$OK$	$NS$
$NM$	$PM$	$PS$	$OK$	$OK$	$OK$	$NS$	$NM$
$NB$	$PB$	$PM$	$PS$	$OK$	$NS$	$NM$	$NS$

多模态控制器以误差作为模态转换的判断条件。例如,本控制器的模态转换产生式规则集为:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{规则 1: IF } |e| < r_1, & \text{ THEN 算法 1} \\ \text{规则 2: IF } |e| \leq r_1 \text{ and } |e| > r_2, & \text{ THEN 算法 2} \\ \text{规则 3: IF } |e| \leq r_2 \text{ and } |e| > r_3, & \text{ THEN 算法 3} \\ \text{规则 4: IF } |e| \leq r_3 \text{ and } |e| > r_4, & \text{ THEN 算法 4} \end{array} \right\} \quad (3)$$

规则集中的  $r_1 \sim r_4$  均为常数,由仿真确定。算法 1 ~ 算法 4 对应于上述四个阶段的控制算法。

### 2.3 自适应修正值 $u_a$

由图 1 可知,模糊控制的输出值为  $u_f$ , 广义预测控制的输出值为  $u_r$ , 自适应修正值为  $u_a$ , 实际加到被控对象上的控制量则为  $u = u_f + u_a$ 。本文提出的自适应修正值的确定原则为:

1) 当  $u_f \neq 0$  时

$$\text{令} \quad u_a = (u_r - u_f) / |u_f| \quad (4)$$

$u_a$  相应于一个差值比例度,作为修正量的判断基准。

修正等级分为大修正、小修正、不修正三级。例如:当  $u_f$  很小且  $u_a$  小时,表明  $u_r$  与  $u_f$  相差不大,可不修正;当  $u_f$  很小且  $u_a$  大时,小修正; $u_f$  大、 $u_a$  小时,小修正; $u_f$  大、 $u_a$  大时,大修正。这里修正量的大小,考虑了模糊控制量  $u_f$  本身的量值,因为修正是在保证模糊控制性能的前提下进行的。基于上述原则,就可以建立起以模糊集合形式出现的自适应修正表。

首先,将  $u_a$  模糊化后确定其模糊子集  $F_{u_a}$  为:

$$F_{u_a} = (PB, PM, PS, O, NS, NM, NB)$$

式中符号按序分别为:正大、正中、正小、零、负小、负中、负大。

然后,设定  $u_f$  的模糊子集  $F_{u_f}$  为:

$$F_{u_f} = (PB, PM, PS, NS, NM, NB)$$

上式中不考虑  $u_f$  为零的情况。符号意义同上。

最后,设修正量  $u_a = au_f$ , 其语言变量  $XZ$  的模糊子集  $F_{u_a}$  为:

$$F_{u_a} = (PB, PM, PS, OK, NS, NM, NB)$$

式中符号按序为:正大修正、正中修正、正小修正、不修正、负小修正、负中修正、负大修正。这样,就可根据实际对象设定出  $F_{u_a}$  的论域  $XZ$ , 例如设为:

$$XZ = (0.6, 0.4, 0.2, 0, -0.2, -0.4, -0.6)$$

上述论域表明:60%  $u_f$  的修正量为大修正;40%  $u_f$  的修正为中修正;20%  $u_f$  的修正量为小修正,并按  $u_r$  大于或小于  $u_f$  来考虑修正的正负方向。实际上,这就是在保证模糊控制稳定性的原则下,按一定比例对控制量  $u$  进行修正。

确定了  $XZ$  的论域后,可按模糊统计法建立  $XZ$  的隶属度。最简单的情况是按正态分布曲线并结合具体对象对隶属度进行赋值,例如令:

$$PB = 0.3/0.2 + 0.7/0.4 + 1.0/0.6$$

$$PM = 0.6/0.2 + 1.0/0.4 + 0.5/0.6$$

$$PS = 0.3/0.0 + 1.0/0.2 + 0.5/0.4 + 0.1/0.6$$

$$OK = 0.3/(-0.2) + 1.0/0.0 + 0.3/0.2$$

$$NS = 0.1/(-0.6) + 0.5/(-0.4) + 1.0/(-0.2) + 0.3/0.0$$

$$NM = 0.5/(-0.6) + 1.0/(-0.4) + 0.6/(-0.2)$$

$$NB = 1.0/(-0.6) + 0.7/(-0.4) + 0.3/(-0.2)$$

表 1 即为按如上所述获得的  $F_{\alpha}$  查询表, 作为自适应修正规则。

2) 当  $u_f = 0$  时, 也应进行修正处理, 这时可令  $u_s = u_r - u_f$ , 然后, 以  $u_r = Ku_s$  作为修正量度, 其中  $K$  值可按具体系统设定。

### 3 数字仿真研究

为了证实所提算法的有效性, 作者针对各种不同类别的对象模型进行了大量的数字仿真研究, 本文在此给出一组有代表性的仿真曲线, 藉以说明研究工作的成效。

设被控对象采用差分模型表示为:

$$A(q^{-1})Y(k) = q^{-m}B(q^{-1})u(k-1) + \xi(k) + d \quad (6)$$

其中  $A(q^{-1}) = 1 - 0.6345q^{-1} - 0.244q^{-2} + 0.672q^{-3}$

$$B(q^{-1}) = 0 - 0.3065 + 0.9533q^{-1}$$

$\xi(k)$  是均值为 0、方差为 0.05 的白噪声向量;  $d$  为直流分量;  $m$  为时滞。

显然, 这是一个较为难控的具有时滞和干扰的三阶非最小相位系统。

仿真研究过程中, 设定值  $Y_r(k)$  取为幅值为 1 和 3、周期为  $320T$  的方波信号。为了考核算法的控制性能——鲁棒性, 使对象参数时变, 并引入一定的非线性和随机性。仿真结果示于图 4~7 中。

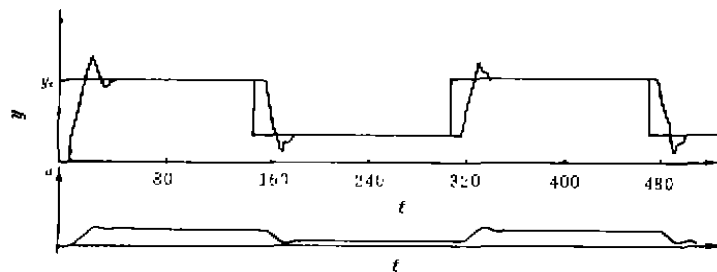


图 4 未加自适应修正的模糊控制仿真曲线

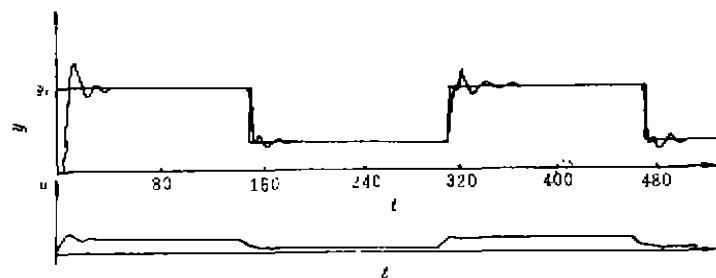


图 5 变时滞仿真曲线

图 4 是在无参数时变和干扰的情况下, 未加自适应修正的模糊控制仿真曲线, 显然, 控制效果不尽如人意;

图 5 是仿真到第 240 步时, 时滞由 2 变为 8 的仿真曲线。可以看出, 对克服大时滞变化的能力强;

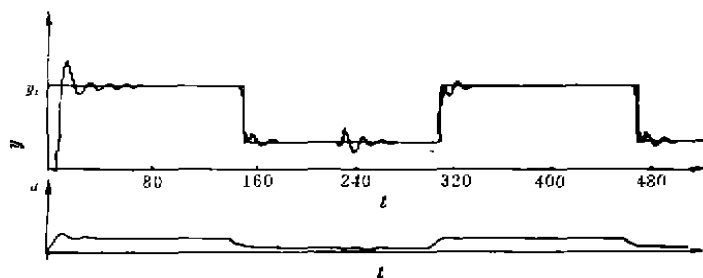


图6 突加脉冲干扰仿真曲线

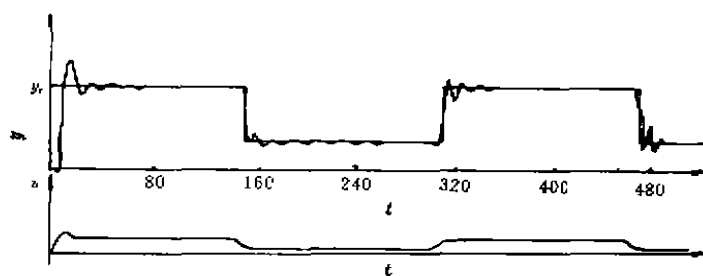


图7 变增益仿真曲线

图6是仿真到第240步时,加入幅值为0.5的脉冲干扰后的仿真曲线,结果表明对脉冲扰动有较强的鲁棒性;

图7是仿真到第240步时,对象增益由0.81变为1.03的仿真曲线,显见适应参数时变的能力是显著的。

典型仿真结果证实了本文提出的算法,能够有效地控制三阶非最小相位系统。由于自适应修正的作用,克服了建模误差对控制性能的影响,同时表明,可以在保持模糊控制固有优点的同时,卓有成效地提高了控制系统的跟踪性能和控制品质。

#### 4 结束语

模糊逻辑技术的优势体现在增强了自动化专家知识的可应用性,提高了非线性时变系统的鲁棒性,简化了控制系统应用开发的复杂性<sup>[5]</sup>。随着模糊控制软件固化工作的推广,模糊控制的研究和开发工作,正处于快速发展的时期。本文主要针对模糊控制“事后控制”的不足,从使其具备一定的预测能力出发,研究了基于简化广义预测的自适应修正模糊控制算法。数字仿真研究证实了所提出的方法,对于克服时滞影响,适应对象突变、参数时变的能力显著提高,从而有效地改善了一类难控系统的控制性能——鲁棒性,为模糊控制研究提供了一种新思路。

#### 参考文献

- 1 贺剑锋等. 模糊控制的新近进展. 控制理论与应用, 1994, 11(2): 129~136
- 2 Clarke D W, et. Generalized Predictive Control——Part 1 and Part I, Automatica, 1987, 23(2): 137~160
- 3 梁坚, 杨永臻等. 多模态自适应模糊控制器, 重庆大学学报, 1995, 18(6): 82~87
- 4 白丽, 杨永臻. 分层型多变量自适应模糊控制算法的研究, 重庆大学学报, 1995, 18(2): 27~32
- 5 Frank J Bartos. Fuzzy logic sharpens its image, Control Engineering, 1995, 42(8): 65~70