

# 时滞系统的模糊自适应PID控制研究

褚丽丽, 李春茂, 郭汉桥, 刘军华

(西南交通大学 电气工程学院 四川 成都 610031)

**摘要:**将模糊控制和常规PID控制相结合,设计了一种模糊自适应PID控制器,该控制器根据偏差和偏差变化率的要求实时调整PID参数。通过仿真表明:该控制器既具有常规PID控制器高精度的优点,又具有模糊控制器快速、适应性强的特点,并可以迅速消除系统误差,保证了系统具有良好的动、静态特性。

**关键词:**模糊控制;PID控制;自适应控制;时滞系统

中图分类号:TP273.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2008)01-0034-03

## Fuzzy Adaptive PID Control of a Time-delay System

CHU Li-li, LI Chun-mao, GOU Han-qiao, LIU Jun-hua

(Department of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, ChengDu, 610031, China)

**Abstract:** This paper presents a fuzzy adaptive PID controller, where the parameters of PID are adjusted according to the error and its derivative. It possesses both the precise character of the PID controller and the flexible advantage of the fuzzy controller, and can guarantee good dynamic and static performance.

**Key words:** fuzzy control; PID control; adaptive control; time-delay system

### 1 引言

在工业生产过程中,PID控制(比例、积分、微分控制的总称)是迄今为止应用最广泛的一种控制算法。传统的PID控制算法简单、鲁棒性好和可靠性高,适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。但是,在现代工业生产过程中,经常会遇到时滞环节,而时滞的存在严重影响了系统的稳定性,导致系统的超调量变大,调节时间变长,甚至出现振荡、发散,从而使得系统的动态品质大大降低。如果仍然使用常规的PID控制器,则较难整定PID参数。针对这一问题,本文将模糊控制和PID控制两者结合起来,设计了一种模糊自适应PID控制器,既具有模糊控制灵活、适应性强的优点,又具有PID控制精度高的特点,并且能实现PID参数的在线自调整功能。

温度控制系统是典型的时滞系统,温控对象是一个比较复杂的被控对象,其数学模型一般可用一阶惯性加纯滞后环节来描述:

$$G(s) = \frac{ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (1)$$

其中: $k$ 是系统增益, $T$ 是时间常数, $\tau$ 是系统的纯滞后时间。

### 2 模糊自适应PID控制器的设计

#### 2.1 模糊控制

模糊控制是基于模糊集、模糊逻辑,同控制理论相结合,模拟人的思维方式,对难建模的对象实施的一种控制方法。模糊控制不需要精确的数学模型去描述系统的动态模型,而是根据实际系统输入、输出的结果数据,参考现场操作人员的运行经验就可对系统进行控制<sup>[3]</sup>。模糊控制实际上是一种非线性控制,从属于智能控制的范畴。模糊控制器主要由三部分组成:模糊化接口(Fuzzification)、模糊推理机(Inference engine)和解模糊接口(Defuzzification)。其中模糊推理机由知识库(数据库和规则库)与提供模糊推理算法的模糊推理决策逻辑组成。

#### 2.2 模糊自适应PID控制

模糊自适应PID控制,是在传统PID控制基础上,将控制规则的条件和作用模糊集表示,并将这些模糊控制规则以及有关信息(如评价指标、初始PID参数等)作为知识存入计算机知识库中,然后计算机根据控制系统的实际响应情况(即专家系统的输入),运用模糊推理,自动实现对PID参数的最佳调整<sup>[4][5]</sup>。

自适应模糊控制器以误差 $e$ 和误差变化率 $ec$ 作为输入,可以满足不同时刻的 $e$ 和 $ec$ 对PID参数自整定的要求。控制器结构如图1所示<sup>[1][7]</sup>。

PID参数模糊自整定的关键就是要找出PID三个参数 $K_p$ ,  $K_i$ 和 $K_d$ 与 $e$ 和 $ec$ 之间的模糊关系,在运行中通过不断检测 $e$ 和 $ec$ ,再根据模糊控制原理来实现对 $K_p$ ,  $K_i$ 和 $K_d$ 的在线修改,从而

满足不同 $e$ 和 $ec$ 对控制参数的要求,使得被控对象有良好的动态性能和静态性能。

系统的抗干扰性能。

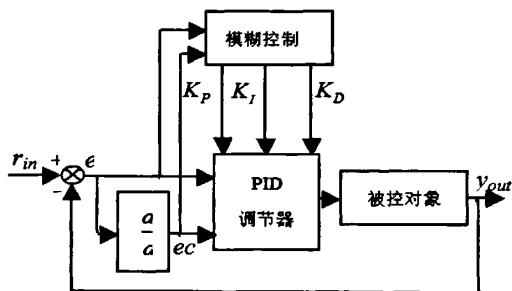


图1 模糊自适应PID控制器结构

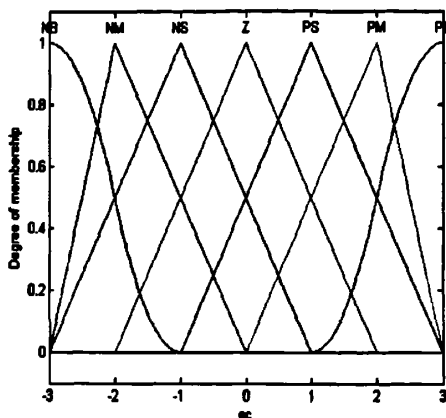


图3  $ec$ 的隶属度函数

### 2.3 语言变量隶属函数的确定

模糊控制器常常以控制查询表的形式出现,在采用关系合成推理法(CRI)中,通常将语言变量的论域从连续域转化成有限整数的论域。若某论域 $X = [-x, x]$ , 把此论域转化成整数 $N = [-n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n]$ 。为此,令 $k$ 为量化因子,则 $k = \frac{n}{x}$ 。若在 $x$ 论域中有 $a$ ,则可以找到论域 $N$ 中的元素 $y$ 与之对应: $y = ka$ 。在本设计中,系统误差 $e$ 和误差变化率 $ec$ 的论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ,其模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ,子集中元素分别代表负大,负中,负小,零,正小,正中,正大。其中它们的隶属度函数采用 $z$ 型分布、三角形分布和 $s$ 型分布,如图2、3所示:

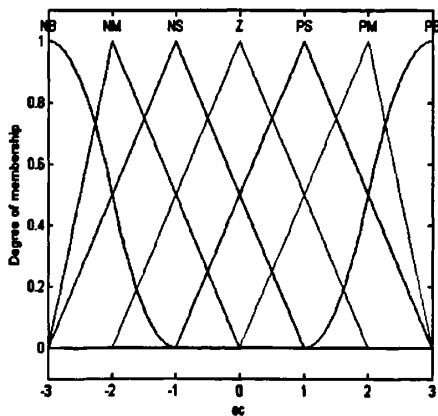


图2  $e$ 的隶属度函数

### 2.4 建立控制规则

从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等各方面来考虑<sup>[6]</sup>:比例系数 $K_p$ 的作用是加快系统的响应速度,提高系统的调节精度,但 $K_p$ 过大易产生超调,导致系统不稳定;积分作用系数 $K_i$ 的作用是消除系统的稳态误差,但 $K_i$ 过大在响应过程的初期会产生积分饱和的现象,引起较大的超调;微分作用系数 $K_d$ 的作用是改善系统的动态特性,在响应过程中抑制偏差向任何方向的变化,并对偏差变化进行预报。但 $K_d$ 过大会使响应过程提前制动,降低

模糊自适应PID是在PID算法的基础上,通过计算当前系统误差 $e$ 和误差变化率 $ec$ ,利用模糊规则进行模糊推理,查询模糊矩阵表进行参数调整。则模糊控制设计的核心是总结工程设计人员的技术支持知识和实际操作经验,建立合适的模糊规则表,得到针对 $K_p, K_i$ 和 $K_d$ 三个参数自整定的模糊控制规则表<sup>[1]</sup>,如表1所示:

表1  $K_p, K_i, K_d$ 模糊控制规则表

$e \backslash ec$	负	中	正	零	负	中	正
负	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS
中	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS
正	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS
零	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS
负	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS
中	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS
正	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS	PS/NB/PS

根据 $K_p, K_i$ 和 $K_d$ 这三个参数模糊控制规则表构造一个两个输入( $e, ec$ )三个输出( $K_p^*, K_i^*, K_d^*$ )的模糊控制器,如图4所示:

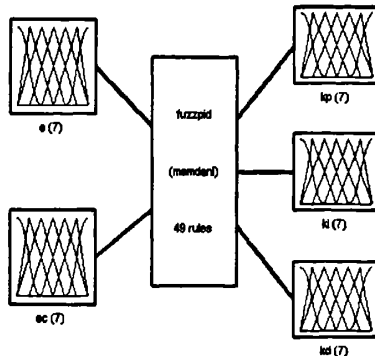


图4 模糊PID控制器的构成

通过分析可得到49条控制规则:

(1). If (e is NB) and (ec is NB) then (kp is PB)(ki is NB)  
(kd is PS) (1)

(2). If (e is NB) and (ec is NM) then (kp  
PB)(ki is NB)(kd is NS) (1)

.....

(49). If (e is PB) and (ec is PB) then (kp is NB)(ki is PB)  
(kd is PB) (1)

## 2.5 模糊推理与反模糊化

对于模糊控制而言,模糊量的清晰化是一个非常重要的环节,将模糊推理得出的模糊集合用一个确定的值表示的过程就叫做解模糊。常用的解模糊方法有:重心法、最大隶属度法、系数加权平均法和隶属度限幅元素平均法。经过比较发现,在本文的应用中采用重心法最为合理,它是取模糊隶属度函数曲线与横坐标所谓面积的重心作为代表点,适用于精度要求较高的系统。所以根据系统的采样的 $E$ 和 $E_c$ ,用重心法整定参数得到控制器的参数<sup>[2]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} K_p^* &= f_1(E, E_c) = \frac{\sum_{i=1}^P \mu_i(E, E_c) K_{pi}}{\sum_{i=1}^P \mu_i(E, E_c)} \\ K_i^* &= f_2(E, E_c) = \frac{\sum_{i=1}^P \mu_i(E, E_c) K_{ii}}{\sum_{i=1}^P \mu_i(E, E_c)} \\ K_d^* &= f_3(E, E_c) = \frac{\sum_{i=1}^P \mu_i(E, E_c) K_{di}}{\sum_{i=1}^P \mu_i(E, E_c)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中,  $K_p, K_i, K_d$  是清晰化输出量,  $K_{pi}, K_{ii}, K_{di}$  为输出变量,  $\mu$  为模糊集隶属度函数,  $P$  为单点集数。

根据各模糊子集的隶属度函数赋值表和各参数模糊控制模型,应用模糊合成推理设计PID参数的模糊矩阵表,查出修正参数代入下式计算:

$$\left\{ \begin{aligned} K_p &= K_p' + K_p'' \\ K_i &= K_i' + K_i'' \\ K_d &= K_d' + K_d'' \end{aligned} \right. \quad (3)$$

## 3 仿真结果

设被控对象为  $G(s) = \frac{4.5e^{-1.5s}}{11s+1}$

采样时间为500ms,采用模糊自适应PID控制阶跃响应,在第300个采样时刻控制器输出加1.0的干扰,采用此方法得到仿真曲线如图5所示:

计算系统的性能指标:超调量为0.07%,峰值时间是39s,调节时间是50s。

在第300个采样时刻控制器输出加100%干扰后的超调量为14.82%,过渡过程时间为44s。

若采用常规PID控制阶跃响应,则超调量增加到15.03%,调

节时间也增加到73s。而在第300个采样时刻控制器输出加100%干扰后的超调量为19.64%,过渡过程时间为64s。显然,对于时滞系统来说,采用模糊自适应PID控制的效果远比常规控制方法好。

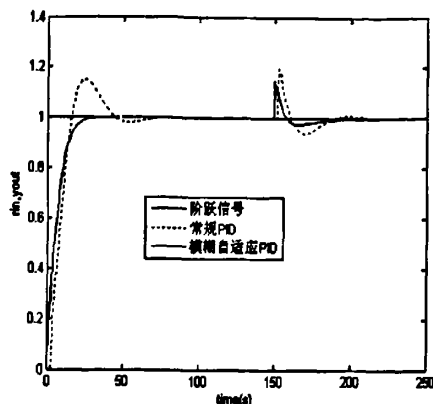


图5 模糊自适应PID和常规PID控制的阶跃响应

## 4 结束语

仿真结果可以看出,常规PID控制在满足控制要求的情况下易产生波动,当有干扰存在的情况下,响应速度缓慢,而且超调量大,易导致系统的不稳定。而模糊自适应PID控制,响应速度快且未产生波动,处于快速平稳调节的状态,当在控制过程中出现干扰时,能够对偏差变化进行提前预报,在线的自动调整 $K_p, K_i, K_d$ 参数,加快系统的响应速度,改善系统的动态特性,在短时间内使系统达到稳态,并且超调量小,表现出良好的控制性能。

## 参考文献:

- [1] 刘金琨. 先进PID控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 102-108
- [2] 易继锴, 侯媛彬. 智能控制技术[M]. 北京: 北京工业出版社, 1999: 192-214
- [3] 张化光, 何希勤, 等. 模糊自适应控制理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 297-303
- [4] WEN-SHYONG. Model reference fuzzy adaptive control for uncertain dynamical systems with time delays[J]. 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2004 6 (10): 5246 - 5251
- [5] WANG LI-XIN. Stable adaptive fuzzy controllers with application to inverted pendulum tracking [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 1996, 26(5): 677-691
- [6] 苏明等. 模糊PID控制及其MATLAB仿真[J]. 计算机应用, 2004, (4): 51-55
- [7] 孟宇, 彭晓华, 张浩. 模糊自适应整定PID控制及其仿真研究[J]. 机械工程与自动化, 2006, (12): 93-96

作者简介: 褚丽丽(1982-), 女, 山西临汾人, 在读硕士, 研究方向: 智能控制、计算机控制。