

PID 控制系统和模糊自适应 PID 控制系统的研究及比较

张金焕

(武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要:首先介绍了 PID 控制系统的工作原理,因 PID 控制器结构简单、实现简单,控制效果良好,所以已得到广泛应用。但当控制对象变化时,控制器的参数难以自动调整。为了使控制器具有较好的自适应性,可以采用模糊控制理论的方法来实现控制器参数的自动调整。模糊 PID 控制系统就是模糊理论与传统的 PID 控制器的结合。最后以一控制对象为例,对该两种方式的控制进行了仿真和比较,并得出了相应的结论。

关键词: PID 控制; 模糊 PID 控制; 模糊控制; 模糊推理

中图法分类号: TP373⁺.4 **文献标识码:** A

1 引 言

在工业控制中, PID (Proportion- Integral Differential)控制是工业控制中最常用的方法。但是,它具有一定的局限性:当控制对象不同时,控制器的参数难以自动调整以适应外界环境的变化。为了使控制器具有较好的自适应性,实现控制器参数的自动调整,可以采用模糊控制理论的方法^[1]。

模糊控制已成为智能自动化控制研究中最活跃而富有成果的领域。其中,模糊 PID 控制技术扮演了十分重要的角色,并且仍将成为未来研究与应用的重点技术之一。到目前为止,现代控制理论在许多控制应用中获得了大量成功的范例。然而在工业过程控制中, PID 类型的控制技术仍然占有主导地位。虽然未来的控制技术应用领域会越来越宽广、被控对象可以是越来越复杂,相应的控制技术也会变得越来越精巧,但是以 PID 为原理的各种控制器将是过程控制中不可或缺的基本控制单元。

利用模糊控制理论的特性,结合传统的 PID 控制理论,构造模糊 PID 控制器,可实现控制器参数的自动调整。在对经典的 PID 控制和模糊 PID 控制介绍的基础上,利用 MATLAB 中的 SMU-LINK 工具^[2]对二者进行了仿真研究,并给出了仿真的结果。

2 PID 控制系统概述

PID 控制器系统原理框图如图 1 所示。将偏差的比例 (K_p)、积分 (K_i)和微分 (K_d)通过线性组合构成控制量,对被控对象进行控制, K_p 、 K_i 和 K_d 3 个参数的选取直接影响了控制效果。

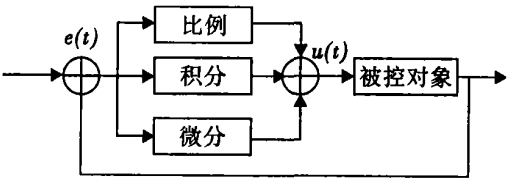


图 1 PID 控制器系统原理框图

在经典 PID 控制中,给定值与测量值进行比较,得出偏差 $e(t)$,并依据偏差情况,给出控制作用 $u(t)$ 。对连续时间类型, PID 控制方程的标准形式为,

$$u(t) = K_p [e(t) + \int_0^t e(t) \frac{dt}{T_i} + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (1)$$

式中, $u(t)$ 为 PID 控制器的输出,与执行器的位置相对应; t 为采样时间; K_p 为控制器的比例增益; $e(t)$ 为 PID 控制器的偏差输入,即给定值与测量值之差; T_i 为控制器的积分时间常数; T_d 为控制器的微分时间常数。

离散 PID 控制的形式为

$$u(k) = K_p \{ e(k) + \sum e(k) \frac{T}{T_i} + [e(k) - e(k-1)] \frac{T_D}{T} \} \tag{2}$$

式中， $u(k)$ 为第 k 次采样时控制器的输出； k 为采样序号， $k=0, 1, 2, \cdots$ ； $e(k)$ 为第 k 次采样时的偏差值； T 为采样周期； $e(k-1)$ 为第 $(k-1)$ 次采样时的偏差值。

离散 PID 控制算法有如下 3 类：位置算法、增量算法和速度算法。增量算法为相邻量词采样时刻所计算的位置之差，即

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \tag{3}$$

而 $K_i = K_p \cdot T / T_i$ ， $K_D = K_p \cdot T_D / T$ 。

从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等方面来考虑， K_p 、 K_i 、 K_D 对系统的作用如下。

(1) 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。 K_p 越大，系统的响应速度越快，系统的调节精度越高，但易产生超调，甚至导致系统不稳定； K_p 过小，则会降低调节精度，使响应速度缓慢，从而延长调节时间，使系统静态、动态特性变坏。

(2) 积分系数 K_i 的作用是消除系统的稳态误差。 K_i 越大，系统的稳态误差消除越快，但 K_i 过大，在响应过程的初期会产生积分饱和现象，从而引起响应过程的较大超调；若 K_i 过小，将使系统稳态误差难以消除，影响系统的调节精度。

(3) 微分作用系数 K_D 的作用是改善系统的动态特性。其作用主要是能反应偏差信号的变化趋势，并能在偏差信号值变的太大之前，在系统引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减少调节时间。

K_p 、 K_i 、 K_D 与系统时间域性能指标之间的关系如表 1 所示。

表 1 PID 调节参数与系统时间域性能指标间的关系				
参数名称	上升时间	超调量	过渡过程时间	静态误差
K_p	减小	增大	微小变化	减小
K_i	减小	增大	增大	消除
K_D	微小变化	减小	减小	微小变化

3 模糊自适应 PID 控制系统

模糊控制通过模糊逻辑和近似推理方法，让计算机把人的经验形式化、模型化，根据所取得的语言控制规则进行模糊推理，给出模糊输出判决，

并将其转化为精确量，作为馈送到被控对象（或过程）的控制作用。模糊控制表是模糊控制算法在计算机中的表达方式，它是根据输入输出的个数、隶属函数及控制规则等决定的。目的是把人工操作控制过程表达成计算机能够接受，并便于计算的形式。模糊控制规则一般具有如下形式：

if { $e = A_i$ and $ec = B_i$ } then $u = C_i$, $i = 1, 2, \cdots$ ，其中 e 、 ec 和 u 分别为误差、误差变化和 control 量的语言变量，而 A_i 、 B_i 、 C_i 为其相应论域上的语言值。

与传统的控制相比，模糊控制有以下特点：

(1) 适用于不易获得精确数学模型的被控对象，其结构参数不很清楚或难以求得，只要求掌握操作人员或领域专家的经验或知识。

(2) 模糊控制是一种语言变量控制器，其控制规则只用语言变量的形式定性的表达，构成了被控对象的模糊模型。在经典控制中，系统模型是用传递函数来描述；在现代控制领域中，则用状态方程来描述。

(3) 系统的鲁棒性强，尤其适用于非线性、时变、滞后系统的控制。

应用模糊推理的方法可实现对 PID 参数进行在线自整定，设计出参数模糊自整定 PID 控制器。仿真结果表明，该设计方法使控制系统的性能明显改善。

自适应模糊 PID 控制器是在 PID 算法的基础上，以误差 e 和误差变化 ec 作为输入，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，来满足不同时刻的 e 和 ec 对 PID 参数自整定的要求。利用模糊规则在线对 PID 参数进行修改，便构成了自适应模糊 PID 控制器，其结构框图如图 2 所示^[3]。

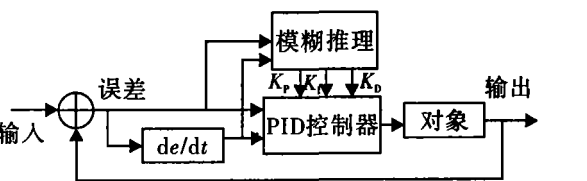


图 2 自适应模糊 PID 控制器结构

PID 参数模糊自整定是找出 PID 的 3 个参数 (K_p 、 K_i 、 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 根据模糊控制原理对 3 个参数进行在线修改，以满足不同 e 和 ec 是对控制参数的不同要求，从而使对象具有良好的动、静态性能；模糊控制的核心是总结工程设计人员的技术和实际操作经验，建立合适的模糊规则表，得到

针对 3 个参数 K_p 、 K_I 、 K_D 分别整定的模糊规则表。

4 常规 PID 和模糊自适应 PID 控制系统的仿真比较

利用 MATLAB 中的 SMULINK 工具箱和模糊逻辑工具箱可以对经典 PID 控制系统和模糊自适应 PID 控制系统进行仿真,在此假设控制对象为

$$G(s) = \frac{1}{(5s+1)(2s+1)(10s+1)} \tag{3}$$

4.1 常规 PID 控制系统仿真

在 MATLAB 中,构建 PID 控制系统仿真的模型如图 3 所示。利用稳定边界法、按以下步骤进行参数整定:

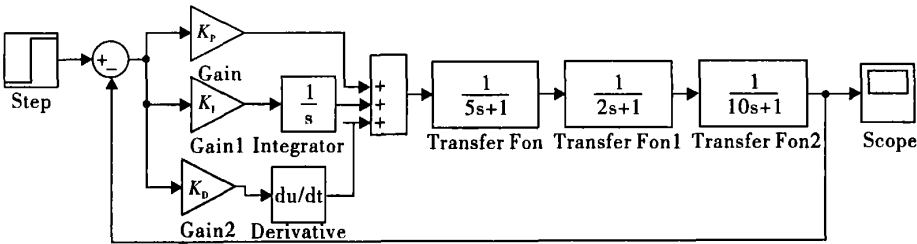


图 3 PID 控制系统仿真模型

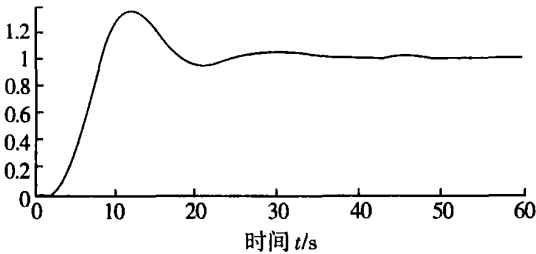


图 4 PID 控制系统的仿真结果

4.2 模糊自适应 PID 控制系统仿真

首先利用 FIS 图形窗口编辑器^[2]创建 1 个两输入 (e 、 ec)和三输出 (K_p 、 K_I 、 K_D)的 Mamdani 推理的模糊控制器,设输入、输出的论域值均为 $(-6, 6)$,取相应论域上的语言值为负大 (NB)、负中 (NM)、

(1) 将积分、微分系数 K_I 、 K_D 设为 0, K_p 置较小的值,使系统投入稳定运行,若系统无法稳定运行,则选择其他的校正方式;

(2) 逐渐增大 K_p ,直到系统出现等幅振荡,即临界振荡过程,记录此时临界振荡增益 K_{p*} 和临界振荡周期 T ;

(3) 按照经验公式: $K_p = 0.6 K_{p*}$, $K_I = 1.2 K_{p*} / T$, $K_D = 0.075 K_{p*} T$ 和校正装置类型整定相应的 PID 参数,然后进行仿真校验。

最后,得到的仿真结果如图 4 所示。由该图形可知,系统的超调量大约在 35% 左右,系统的上升时间、过渡时间及稳定性基本上还算可以。

负小 (NS)、零 (ZO)、正小 (PS)、正中 (PM) 和正大 (PB),而令所有输入、输出变量的隶属度函数均为 trinf 如图 5 所示;表 2 为 PID 控制的 3 个参数 (K_p 、 K_I 、 K_D) 的模糊控制规则。

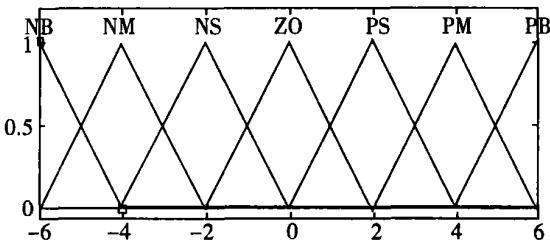


图 5 e 、 ec 、 K_p 、 K_I 、 K_D 的隶属度函数

表 2 K_p 、 K_I 、 K_D 的模糊规则

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZP	PM/NM/NS	PM/NS/MN	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZP
ZO	PM/NM/ZP	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

然后构建模糊自适应 PID 控制系统的仿真模型，如图 6 所示，并且给出了其相应部分的子系统

的框图如图 7 和图 8。最后的仿真结果如图 9 所示。

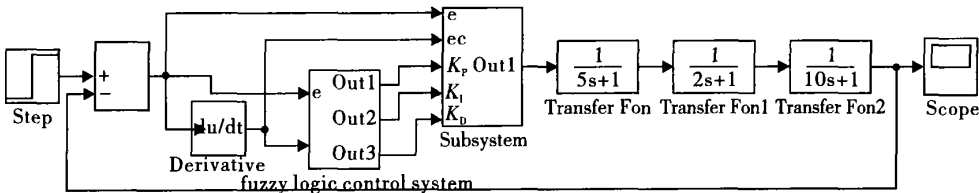


图 6 模糊自适应 PID 控制系统仿真模型

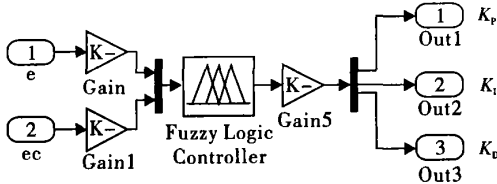


图 7 模糊控制子系统

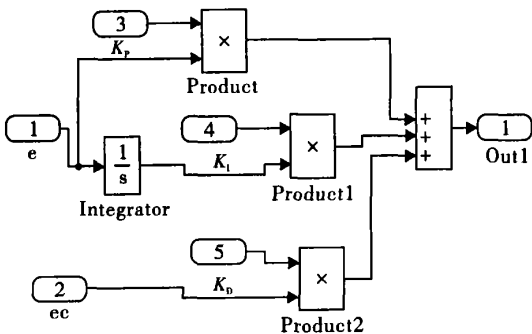


图 8 PID 控制子系统

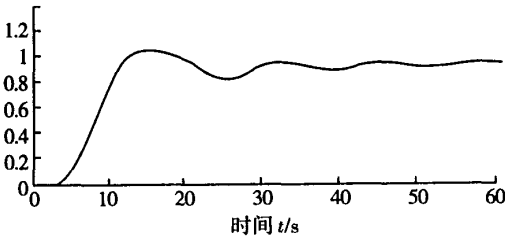


图 9 模糊 PID 控制系统的仿真结果

4.3 二者的比较

通过上面的仿真，比较图 4 PID 控制系统的仿真和图 9 模糊 PID 控制系统的仿真结果，可以看出，在对三阶线性系统的控制中，利用稳定边界法进行参数整定的经典 PID 控制的超调量比模糊 PID 控制的超调量要大，但模糊 PID 控制存在一定的稳态误差。模糊控制用模糊集合和模糊概念

描述过程系统的动态特性，根据模糊集和模糊逻辑来做出控制决策，它在解决复杂控制问题方面有很大的潜力，可以动态地适应外界环境的变化。

5 结 论

目前关于 PID 控制器参数整定的基本方法有离散模型的控制器参数整定、基于 Nyquist 曲线的控制器参数整定和基于传递函数模型的控制器参数整定^[4]。把常规 PID 控制和模糊控制理论相结合，可以发挥二者的特点和优势，以期实现更好的控制效果。

在 SMULINK 下设计不同结构的模糊 PID 控制器^[5]；在利用 FIS 编辑模糊控制器的过程中，可以设置不同的论域和语言值，不同形式的隶属度函数及选取根据实际经验和分析而得出的不同情况下的模糊规则表。如何选择变量的合适的隶属度函数、论域和语言值、模糊规则表及控制器的结构，来实现对系统在超调量、上升时间、过渡时间及稳定性等方面的最优控制，是要做的工作。

参考文献：

[1] 易继锴，侯媛彬. 智能控制技术（第五版）[M]. 北京：北京工业大学出版社，2004.
[2] 闻 新，周 露. MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析与应用 [M]. 北京：科学出版社，2001.
[3] 黄 峰，汪岳峰. 模糊参数自整定 PID 控制器的设计与仿真研究 [J]. 光学精密工程，2004，12(2)：235—239.
[4] 曹 刚. PID 控制器参数整定方法及其应用研究 [D]. 浙江：浙江大学信息工程学院，2004.
[5] Huang Y, Yasunobu S. A General Practical Design Method for Fuzzy PID Control from Conventional PID Control [J]. Fuzzy Systems 2005(2)：969—972.

Study and Comparison on PID Control and Fuzzy
Self-Adapting PID Control System

Zhang Jinhuan

Abstract The theory of Proportion Integral Differential (PID) control system is introduced. The structure and realization of PID controllers is simple and its control effect is good, so PID controller is widely used in the industrial control process. However, it is difficult for PID controllers to automatically condition their parameters when the control object changes. In order to make PID controllers have a better self-adaptability, fuzzy control theory is applied to realize auto conditioning of controllers parameters. Fuzzy PID control system is the combination of fuzzy theory and PID controllers. In the end, a control object is given as an example using PID control method and fuzzy PID control theory to do simulation separately.

Key words: PID control; Fuzzy PID control; Fuzzy control; Fuzzy Inference

Zhang Jinhuan: Postgraduate; School of Information Engineering, WUT, Wuhan 430070, China

[编辑:刘美玲]