

基于时滞系统的参数自整定模糊 PID 控制器的设计与仿真研究

段五星¹ 张新政^{1,2*}

(广东工业大学自动化学院¹,广州 510006;广州科技贸易职业学校²,广州 571442)

摘要 时滞系统在受到干扰时,常规控制器很难及时对干扰产生抑制作用,不能保证系统的稳定性。结合模糊控制和常规 PID 控制各自的优点,设计了一种参数自整定模糊 PID 控制器,并根据其输出形式的不同,分别采用了位置式和增量式两种方法对时滞系统进行了有效的控制。同时利用 Matlab 软件的 Simulink 和 Fuzzy 工具箱进行了计算机仿真,总结出了调整模糊 PID 控制器各参数的一般规律,仿真结果表明采用增量式输出方法时控制效果更好,并具有零超调、无静差、过渡时间短、稳定性好等特点。

关键词 时滞系统 参数自整定 模糊 PID 控制器 位置式 增量式 计算机仿真
中图法分类号 TP273.4 **文献标志码** A

传统 PID 具有控制原理简单,使用方便,工作可靠等特点,但是针对现代工业工程控制中的具有大时滞、非线性、时变、强耦合等特性的被控对象,传统 PID 由于存在控制参数选择困难、超调量过大等问题,其应用受到了局限。而单纯的模糊控制虽然具有简化算法、解决非线性问题方面的优势,但在控制系统精度、静差和稳定性方面效果不是很理想。而模糊 PID 控制既结合了传统 PID 控制和模糊控制二者的优点,又弥补了各自的不足,控制时按照人的思维方式,根据系统的输出,在线实时调整 PID 的三个参数,不但加强了系统的适应性和稳定性,而且提高了系统的控制精度,改善了系统的动态特性和静态性能,从而取得了满意控制效果。另一方面,大部分文献只对传统 PID 控制和模糊 PID 控制进行了比较^[1],而本文主要针对模糊 PID 控制器的位置式和增量式控制方法以及其参数调整的

方法进行了研究。

1 模糊 PID 控制的基本原理^[2]

模糊 PID 控制即利用模糊逻辑算法并根据一定的模糊规则对 PID 控制的比例(P)、积分(I)、微分(D)系数进行在线优化,以达到较为理想的控制效果。模糊 PID 控制在控制系统中的实现有多种结构形式,本文采用经典的参数自整定模糊 PID 控制形式,如图 1 所示。模糊 PID 控制共包括参数模糊化、模糊规则推理、参数解模糊、PID 控制器等几个重要组成部分。其中模糊推理机根据系统的输入和反馈信号,计算实际值和理论值的偏差 $e(k)$ 以及当前的偏差变化 $ec(k)$,然后根据模糊规则进行模糊推理,再对模糊参数进行解模糊,输出 PID 调节器的比例、积分、微分系数,最后通过传统 PID 控制器控制被控对象。由此可见,整个模糊 PID 控制系统的关键就是设计合适的模糊控制器,实时地对 PID 调节器的比例、积分和微分系数进行在线自整定,从而使传统 PID 调节器能有效地控制被控对象。

2011 年 3 月 25 日收到,4 月 8 日修改

国家自然科学基金
(61074185)资助

第一作者简介:段五星(1988—),硕士研究生,研究方向:大系统的优化、控制及管理。E-mail:edduanwx@126.com。

*通信作者简介:张新政,教授,博士生导师,研究方向:复杂大系统的建模与控制、变结构控制。E-mail:lucy@gdut.edu.cn。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则表

ec	e						
	负大(NB)	负中(NM)	负小(NS)	零(ZO)	正小(PS)	正中(PM)	正大(PB)
负大(NB)	正大(PB)	正中(PM)	正中(PM)	负大(NB)	负中(NM)	零(ZO)	零(ZO)
负中(NM)	正大(PB)	正中(PM)	正小(PS)	负中(NM)	负小(NS)	零(ZO)	正小(PS)
负小(NS)	正大(PB)	正小(PS)	零(ZO)	零(ZO)	零(ZO)	正小(PS)	正大(PB)
零(ZO)	正大(PB)	正小(PS)	零(ZO)	零(ZO)	零(ZO)	正中(PM)	正大(PB)
正小(PS)	正中(PM)	正小(PS)	零(ZO)	零(ZO)	零(ZO)	正中(PM)	正大(PB)
正中(PM)	正小(PS)	零(ZO)	负小(NS)	正小(PS)	正小(PS)	正中(PM)	正大(PB)
正大(PB)	零(ZO)	零(ZO)	负中(NM)	正小(PS)	正中(PM)	正大(PB)	正大(PB)

表 2 ΔK_i 模糊控制规则表

ec	e						
	负大	负中	负小	零	正小	正中	正大
负大	正大	正大	正大	负中	负中	零	零
负中	正大	正大	正中	负小	负小	零	正小
负小	正大	正大	正中	零	零	正小	正大
零	正中	正中	正小	零	正小	正中	正大
正小	正中	正小	零	零	正中	正中	正大
正中	正小	零	负小	负小	正中	正大	正大
正大	零	零	负中	负中	正大	正大	正大

字母符号见表 1

表 3 ΔK_d 模糊控制规则表

ec	e						
	负大	负中	负小	零	正小	正中	正大
负大	正大	正中	正大	正大	正大	零	负大
负中	负中	正小	正中	正中	正中	负小	负大
负小	正小	零	正小	正小	正小	负中	负大
零	负大	零	正小	正小	正小	零	正小
正小	负大	负大	正小	正小	正小	零	正小
正中	负大	负小	正中	正中	正中	正小	正中
正大	负大	零	正大	正大	正大	正中	正大

字母符号见表 1

2 模糊 PID 控制器的设计

2.1 模糊控制器的设计步骤

模糊控制器的设计步骤^[1]如下:

2.1.1 确定被控量及控制系统指标

由上分析可知,该模糊控制器的被控量是 PID

调节器的三个比例参数,被控对象为带延迟环节的一阶惯性环节系统, $G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}$ 。而控制系统指标看具体的情况而定,此处期望有零超调、无静差及尽可能短的上升时间和调节时间。

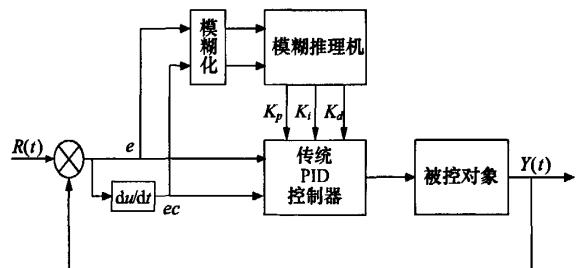


图 1 模糊 PID 控制系统结构框图

2.1.2 设计模糊语言变量

其中包括:

a) 确定输入、输出量的模糊语言变量名称。

选定实际值和理论值的偏差 $e(k)$ 以及当前的偏差变化 $ec(k)$ 为输入量,传统 PID 调节器的三个参数 K_p, K_i 和 K_d 或其增量 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 和 ΔK_d 为输出量,本文中,根据这两种参数形式,设计了两种不同的控制器。

b) 根据实际要求确定模糊语言变量的模糊论域与基本论域,将模糊论域离散化,并且确定其量化等级,量化因子及比例因子。由于选用单位阶跃为系统的输入信号,根据控制系统无静差的要求设模糊语言变量 E 的基本论域为 $[-1, 1]$,其模糊论域为 $[-6, 6]$ 。误差变化率的实际论域很难确定,可以根据系统响应速度的要求以及系统的稳定性

情况具体调试,此处暂选取 $[-1, 1]$,也将其模糊论域定为 $[-6, 6]$ 。初步选定模糊控制器的三个输出量为 K_p 、 K_i 和 K_d 或 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的基本论域都为 $[-0.6, 0.6]$,模糊论域都为 $[-6, 6]$ 。由公式:

$$K_e = n_e/e, K_{ec} = n_{ec}/ec, K_u = u/n_u.$$

可得对应的量化因子 $K_e = K_{ec} = 6, K_u = 0.1$ 。由于模糊控制器的精度限制和系统的非线性性质,在仿真和具体实现时需要进行具体调试。

综合考虑系统精度和算法快速性,用7个模糊子集覆盖个以上每个模糊论域。 F (fuzzy)子集分别为负大(NB)(负大)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。

2.1.3 确定模糊控制规则

总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验,并综合考虑到在不同时刻3个参数的作用及相互之间的互联关系,得到模糊控制规则如表1—表3所示。

2.2 参数自整定模糊 PID 控制系统的搭建

在 Matlab 的 Simulink 工具箱中设计参数自整定模糊 PID 控制系统如图 2 所示,其中包括模糊控制器子系统和 PID 控制子系统,根据模糊控制器子系统输出量不同形式,可以得出不同的 PID 控制子系统。

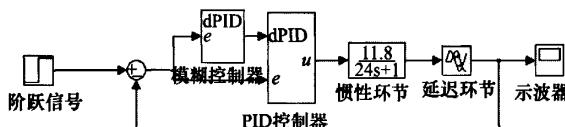


图 2 参数自整定模糊 PID 控制系统

2.3 模糊 PID 控制器的两种设计方法

根据模糊控制器输出量形式的不同,可以设计不同的算法。本文主要设计位置式和增量式两种方法进行对比。

2.3.1 位置式 PID 控制器

选择模糊控制器的输出量为 $K_p = a_{kp}K'_p + K_{p0}$,
 $K_i = a_{ki}K'_i + K_{i0}, K_d = a_{kd}K'_d + K_{d0}$,其中 a_{kp} 、 a_{ki} 和 a_{kd} 分别为比例修正系数、积分修正系数和微分修正系数, K'_p 、 K'_i 和 K'_d 分别为模糊推理机的输出量, K_{p0} 、 K_{i0} 和 K_{d0} 分别为比例、积分和为微分控制参数初值,

K_p 、 K_i 和 K_d 分别为输入到传统 PID 调节器的比例、积分和微分参数。在 Simulink 中的设计如图 3 所示。

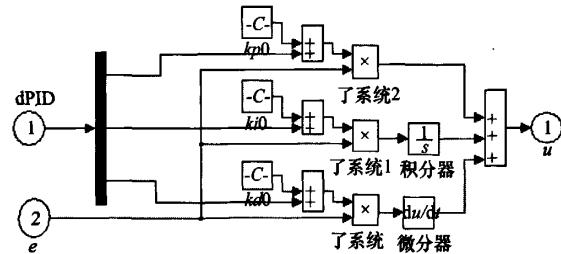


图 3 位置式 PID 控制子系统

2.3.2 增量式 PID 控制器

选择模糊控制器的输出量为 $K_p^{(j+1)} = K_p^{(j)} + K_{p0}$,
 $K_i^{(j+1)} = K_i^{(j)} + K_{i0}$ 和 $K_d^{(j+1)} = K_d^{(j)} + K_{d0}$,其中参数的上标 $(j+1)$ 和 (j) 分别表示 $(j+1)$ 时刻和 (j) 时刻的采样值,而且,在任意采样时刻 (j) 有 $K_p = a_{kp}\Delta K_p$,
 $K_i = a_{ki}\Delta K_i$ 和 $K_d = a_{kd}\Delta K_d$,且 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 模糊推理机的输出增量。在 Simulink 中的设计如图 4 所示。该方法虽然在位置式输出的基础上又多加了三个用来存储上一刻采样值的具有记忆功能的执行装置,但是,却增加了系统的安全性。若由于某种原因使模糊控制器输出为零时,则执行机构仍可以保持原有的动作位置,对控制系统不会造成太大的影响。同时,模糊推理机输出为参数的增量,细化了控制量,也提高了系统的控制精度,增加了系统的适应性。

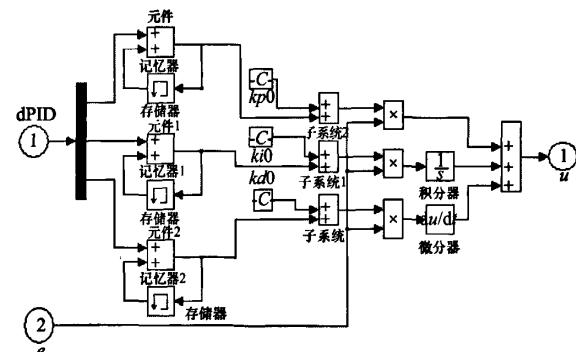


图 4 增量式 PID 控制子系统

3 系统仿真及分析

3.1 仿真调试

仿真实验表明,系统的量化因子、比例修正系数和参数的初值对模糊 PID 控制系统的性能影响较大^[1]。同时,又由于控制系统的模型的近似性和模糊控制器的非线性,目前没有完全成熟的理论和普遍适用的方法来确定这些参数值^[4]。但是通过实验和经验,能总结出如下一些调整各个系数的规律。

(1) 增大误差 e 的量化因子相当于不改变误差 e 的大小的基础上增大了误差 e 的模糊论域对应数值,从而能加快系统的上升速率,增大超调量,当其过分大时,甚至导致系统发散或震荡。但太小时,又会增加系统的调节时间,降低系统的稳态精度。

(2) 增大误差的变化 ec 的量化因子能提高系统对应状态变化的能力,但过分小时,会加快系统的上升速率,影响系统的稳定性。

(3) 比例修正系数和初值主要影响三个参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的大小。因此,确定大小时主要根据三个参数间的相互作用和它们对 PID 控制器的影响来进行修正。具体如下:增大 K_p 可以加快系统的响应速度,降低系统的稳态误差,但是过大则导致系统震荡或发散; K_i 主要影响系统的稳态误差,增大 K_i 可以减小系统的调节时间,而过大则可能导致系统不稳定,反之亦然; K_d 主要影响系统的动态性能,增大 K_d 可以抑制偏差的变化,但是过大则会延长调节时间,降低系统的抗干扰能力。

具体进行调试时,根据输出的变化情况,并结合如上的控制规律对参数进行调整。

3.2 仿真结果

仿真时,以烘干炉为滞后系统的实际控制对象,其传递函数为 $G(s) = \frac{11.8 e^{-9s}}{24 s + 1}$ 。通过 Matlab 软件中的 Fuzzy 逻辑工具箱根据设计过程的分析编辑隶属函数、控制规则,结合 Simulink 进行仿真^[5]。给定输入为单位阶跃信号,并在 150 s 时刻给系统加较强的锯齿波扰动,得仿真结果如下,其中图 5 和图 6 分别为位置式和增量式方法下系统的输出。

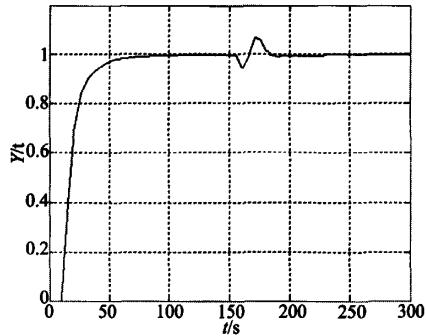


图 5 扰动作用下位置式模糊 PID 控制系统输出

其中 $a_{kp} = 5$, $a_{ki} = 0.0001$, $a_{kd} = 0.002$, $K_{p0} = 0.16$, $K_{i0} = 0.0048$, $K_{d0} = 0.49$ 。

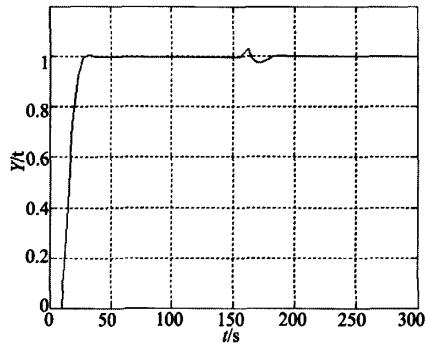


图 6 扰动作用下增量式模糊 PID 控制系统输出

其中 $a_{kp} = 0.005$, $a_{ki} = 0.0001$, $a_{kd} = 0.001$, $K_{p0} = 0.17$, $K_{i0} = 0.0063$, $K_{d0} = 0.18$ 。

运用 M 语言在 Matlab 下编写 M 函数^[6],计算出两种方法下系统的性能指标如表 4 所示。

表 4 位置式和增量式模糊 PID 控制系统性能指标

	超调量	上升时间/s	调节时间/s	静态误差
位置式	0	18.032 s	30.064 s	0
增量式	0	11.0609 s	25.5593 s	0

3.3 结果分析

由上面的结果可知,位置式和增量式模糊 PID 控制器都能实现零超调、无误差,但是增量式模糊 PID 控制系统的上升时间和调节时间最短,响应快,同时表现出更好的抗干扰能力。由此可以得出结论:和位置式控制相比,增量式控制方法细化了参

数变化的范围,提高了系统的控制精度,通过调节 PID 调节器的三个参数增量的细微变化,在保持零超调和无静差的前提下,可以进一步提高系统的响应速度。同时,控制器中具有记忆功能的存储装置也提高了系统的安全性和鲁棒性。

4 结束语

时滞系统在实际应用中非常普遍,蒸气和流体在管道中的流动,电信号在长线上的传递,都有时间延迟,设计控制器对其进行有效控制意义重大。本文主要结合模糊控制和传统 PID 控制器,扬长避短,设计了参数自整定模糊 PID 控制器,根据模糊推理机输出参数的不同形式,设计了位置式和增量式两种模糊 PID 控制器,并以烘干炉为实际控制对象,

进行了 Matlab 仿真,总结出了确定参数的一般规律和方法,并通过对比分析,得出了增量式模糊 PID 控制器控制效果更好的结论。

参 考 文 献

- 1 席爱民. 模糊控制技术. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008
- 2 张径周, 杨伟静, 李 想. 模糊自适应 PID 在高空模拟舱中压力控制的应用研究. 工业仪表与自动化装置, 2010; 25(1): 21—24
- 3 白端元. 伺服系统模糊 PID 控制方法研究. 吉林: 长春理工大学, 2009
- 4 欧旭升. 模糊神经网络机理及其在自适应控制中的应用研究. 广州: 广东工业大学, 1999
- 5 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真. 北京: 清华大学出版社, 2008
- 6 刘金现. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真. 北京: 电子工业出版社, 2004

Parameter Self-tuning Fuzzy PID Control for Time Lag System

DUAN Wu-xing¹, ZHANG Xing-zheng^{1,2*}

(Automation Institute, Guangdong University of technology¹, Guangzhou 510006, P. R. China;
Guangdong Vocational College of Technology & Business², Guangzhou 511442, P. R. China)

[Abstract] In time lag system with interference, it is difficult for conventional controller to guarantee its interference suppression and stability. Combine fuzzy control with conventional PID control, a parameter self-tuning fuzzy PID controller is designed based on the time lag system. And according to its different output form, two methods, position type and incremental type, are developed to control the time lag system effectively. Then used the Simulink and fuzzy tool boxes of Matlab to take the computer simulation and concluded the general rules of adjusting the parameters of fuzzy PID controller. The results show that the incremental type is better with zero overshoot, no static error, shorter transient time and superior stability.

[Key words] time lag system parameter self-tuning fuzzy PID controller position type incremental type computer simulation