

文章编号: 1671-6833(2005) 01-0092-04

纯滞后系统的模糊复合控制方法

朱晓东, 李晓媛, 万 红

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对具有纯时间滞后的系统, 分析了 PID 算法、Smith 预估算法以及模糊控制的不足, 由此提出了一种新的模糊复合型控制器, 该控制器是基于 Smith 预估的模糊-PID 控制器, 利用 Smith 预估算法克服纯滞后, 利用模糊控制来提高系统的鲁棒性, 而在稳态阶段则切换为 PID 控制来提高控制精度. 在模型匹配和失配情况下进行了仿真研究, 结果表明该复合型控制器既具有模糊控制较强的鲁棒性, 又具有 PID 控制精度高的特点, 尤其是在模型失配时表现出良好的稳定性和鲁棒性, 对于大时间滞后系统是一种实用而简便的控制方法.

关键词: 纯滞后; PID 算法; Smith 预估; 模糊控制

中图分类号: TP 273+.5

文献标识码: A

0 引言

在多数工业过程当中, 控制对象普遍存在着纯时间滞后现象, 如化工、热工过程等. 这种滞后时间的存在, 会使系统产生明显的超调量和较长的调节时间, 滞后严重时甚至会破坏系统的稳定性. 因此长期以来, 纯滞后系统就一直是工业过程中的难控制对象, 人们也对它进行了大量的研究. 对于纯滞后系统常用的控制方法主要是 PID 控制、Dahlin 控制算法和 Smith 预估算法^[1,2].

随着控制理论的发展, 智能控制尤其是模糊控制理论得到了广泛的发展和应用, 模糊控制理论是将人的经验知识转化为控制策略, 对于难以建立准确模型以及复杂系统的控制提供了一种有效的控制模式. 模糊控制系统具有不要求精确模型以及较强的鲁棒性的特点. 传统 PID 控制具有结构简单、控制精度高、可靠性高等优点, 在工业控制领域仍然在大量应用也说明了它的生命力. 由于模糊控制与传统 PID 控制有着各自的特点, 因此基于两者结合的模糊-PID 复合控制就成为改善系统性能的一种新的有效控制手段, 也是模糊控制领域一个热门的话题. 本研究将探讨把模糊控制与传统控制方法结合起来对纯滞后系统进行控制的方法.

1 PID 控制算法^[3]

PID 控制算法的原理可以表示为: $u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$, 控制器的传递函数为 $G_c(s) = K_p + K_i/s + K_d s$. PID 控制器的参数 K_p , K_i 和 K_d 可以根据过程的动态特性进行整定^[3]. PID 参数整定方法很多, 如工程整定法、理论值计算法、经验法等, 在工程中一般采用实验经验法, 如 Ziegler-Nichols 整定公式^[4]、Cohen-Coon 整定公式^[5]等等.

2 复合控制算法及仿真

2.1 模糊控制算法^[3]

常规模糊控制系统的结构如图 1 所示, 为了提高稳态误差, 往往在模糊控制器上并联一个积分器以消除稳态误差, 如图中虚线所示.

图中 K_e , K_{ec} 及 K_u 分别为误差量化因子、误差变化率量化因子及输出比例因子, 它们的大小以及不同量化因子之间大小的相对关系, 对模糊控制器的控制性能影响极大. 对于不同的系统, 要选择合适的量化因子及比例因子. 笔者以实验室中的电阻炉加热系统为对象, 建立模糊控制系统. 取模糊变量误差 E , 误差变化率 EC 的论域为 $[-6, 6]$, 模糊子集均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM\}$,

收稿日期: 2004-11-16; 修订日期: 2005-01-15

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(0111060300)

作者简介: 朱晓东(1970-), 男, 河南省安阳市人, 郑州大学讲师, 硕士, 主要从事计算机控制技术研究.

PB}, 输出量 U 的论域为 $[-6, 6]$, 模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$. NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大) 分别是对应于各语言值的隶属函数. 误差 E , 误差变化率 EC 的隶属函数相同均为三角形, 如图 2 所示; 输出量 U 的隶属函数为高斯图形, 如图 3 所示.

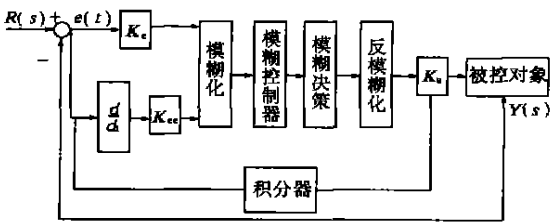


图 1 模糊控制系统的结构图

Fig. 1 Block diagram of fuzzy control system

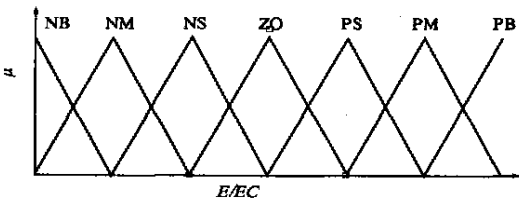


图 2 误差及误差变化率的隶属函数

Fig. 2 Membership function of error and change of error

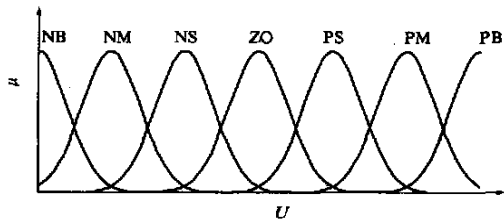


图 3 输出量的隶属函数

Fig. 3 Membership function of output

根据专家经验, 可建立 49 条模糊控制规则. 控制规则如表 1 所示.

表 1 模糊控制规则表

Tab. 1 Table of fuzzy control rules

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO
NM	NB	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO
NS	NM	NM	NM	NM	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	PM	PM	PM	PM
PM	ZO	ZO	PM	PB	PB	PB	PB
PB	ZO	ZO	PM	PB	PB	PB	PB

控制对象为实验室中的电阻炉加热温度系统, 通过阶跃响应辨识方法可以得到对象的传递函数模型为: $G(s) = G_p(s) e^{-\tau} = \frac{K}{1+Ts} e^{-\tau}$, 其中: 增益 $K=30$, 时间常数 $T=630s$, 滞后时间 $\tau=60s$. PD 控制器参数按 Ziegler-Nichols 公式整定并优化为 $K_p=0.26$, $K_i=0.0004$ 和 $K_d=2$. 模糊控制器的各个因子经调试确定为 $K_e=6$, $K_{cc}=60$, $K_u=0.01$, 积分系数为 0.012.

利用 MATLAB^[9] 对系统进行仿真, 图 4 为模型匹配时 PD 与模糊控制算法的仿真曲线, 其中曲线 1 为 PD 控制曲线, 曲线 2 为模糊控制曲线, 性能比较见表 2.

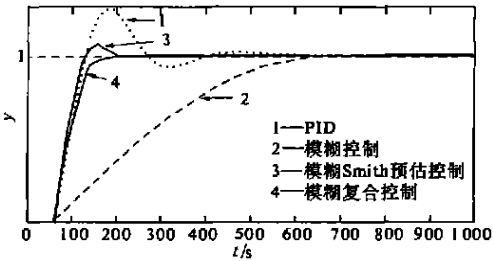


图 4 模型匹配时控制系统的仿真曲线

Fig. 4 curves of control system with model matching

表 2 模型匹配时的控制性能指标

Tab. 2 Table of control performance target

控制方式	稳态值	超调量	调整时间
	γ	$\sigma/\%$	t_s/s
PD 控制(曲线 1)	1	16.5	300
模糊控制(曲线 2)	1	0	600
模糊 Smith(曲线 3)	1	0	175
复合控制(曲线 4)	1	0	300

从图表中可以看到, 虽然模糊控制能够消除系统的超调量, 但是其调节时间明显过长 (600s), 其原因一方面是因为模糊控制器为了保证系统的稳定性, 输出比例因子 K_u 不能太大, 另一方面也在于系统的大滞后时间的影响. 传统上能够克服大滞后的 Smith 预估算法可以有效地解决纯滞后问题, 减小超调, 缩短调节时间, 而模糊控制器具有动态性能好, 鲁棒性强的特点, 因此将模糊控制和 Smith 预估算法结合起来, 无疑是一种新颖的方法.

2.2 模糊 Smith 预估算法^[9]

Smith 预估控制从理论上提供了将含有纯滞后的对象简化为不含纯滞后对象进行控制的方法. 其结构图如图 5 所示.

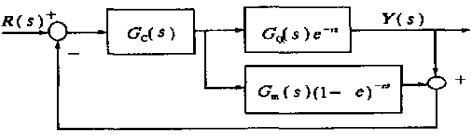


图 5 Smith 预估控制系统的结构图

Fig. 5 Block diagram of Smith predictor control system

图中 $G_o(s)$ 为对象中不含时间滞后的部分, $G_m(s)(1 - e^{-s})$ 为 Smith 预估器, 理想情况下 $G_o(s) = G_m(s)$, $G_c(s)$ 为控制器. Smith 预估控制的实质就是与实际对象并联一个模型 $G_m(s)(1 - e^{-s})$, 因此, 控制器 $G_c(s)$ 的等效控制对象变为 $G_o(s)$, 也就是说, 设计控制器 $G_c(s)$ 时不必考虑纯滞后环节的影响. 此时系统的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{G_c(s) G_o(s) e^{-s}}{1 + G_m(s) G_c(s)}.$$

可见, 滞后环节 e^{-s} 已不包含在系统的特征方程里, 因此系统性能完全不受纯滞后的影响. 模糊 Smith 控制系统的结构如图 6 所示, 其中的模糊控制器依然带有积分器, 参数经调试确定为 $K_e = 6$, $K_{ec} = 100$, $K_u = 0.12$, 积分系数为 0.001. 仿真结果为图 4 中的曲线 3, 此时系统静态误差为零, 无超调, 调节时间为 175 s, 比单纯的模糊控制系统有了极大地提高.

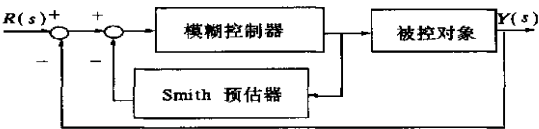


图 6 模糊 Smith 预估控制系统的结构图

Fig. 6 Block diagram of Fuzzy Smith predictor control system

但是 Smith 预估算法要求预估模型要和对象模型严格一致, 而在实际当中两者往往会不一致, 这样就给系统带来模型失配方面的干扰. 当预估模型的滞后时间 τ 由 60 s 变为 80 s 而其他参数不变时, 模糊 Smith 预估算法的仿真曲线如图 7 所示的曲线 2, 稳态时系统在稳态值附近产生振荡, 性能变坏, 曲线 1 为 PID 控制的响应曲线. 性能指标如表 3, 对比可见, 虽然由于模糊 Smith 控制算法的鲁棒性使得系统暂态响应要好于 PID 控制算法, 但稳态性能却变差了, 这是因为由于模型失配, 系统在稳定时会有一定的偏差, 而模糊控制器由于论域的划分存在重合, 其在稳态时的控制精度比较低, 由此造成了稳态性能的降低.

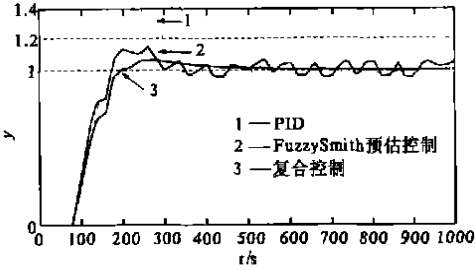


图 7 模型滞后时间失配时系统的仿真曲线

Fig. 7 Curves of control system with unmatched delay time

表 3 模型滞后时间不匹配时的控制性能指标

Tab. 3 Control performance target with unmatched delay time

控制方式	稳态值	超调量	调整时间
	γ	$\sigma/\%$	t_s/s
PID 控制(曲线 1)	1	40	670
模糊控制	1	2	600
模糊 Smith(曲线 2)	振荡	15	—
复合控制(曲线 3)	1	6	400

由分析可知, 模糊控制器具有较强的鲁棒性, 可以实现暂态过程的快速性和稳定性, 但是存在稳态误差; 而传统的 PID 控制器则在稳态时具有较高的控制精度. 当系统响应进入稳态时, 误差和误差变化率都比较小, 此时模糊控制器的调节精度往往不够, 而在这个时候传统 PID 控制器却能有比较高的控制精度, 因此在稳态阶段可以充分发挥 PID 控制器的这个优点. 这样, 就可以构成一种新的复合型控制器: 模糊 Smith PID 控制器.

2.3 复合控制器的设计

由模糊 Smith 及 PID 组成的复合控制器如图 8 所示, 利用 Smith 预估算法来克服纯滞后的影响, 利用模糊控制器的鲁棒性克服模型不准确带来的影响, 而利用 PID 控制算法来提高稳态时的控制精度.

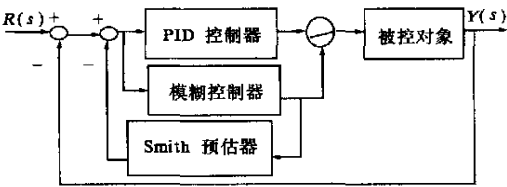


图 8 复合控制系统的结构图

Fig. 8 Block diagram of complex control system

对该系统进行仿真, 模糊控制器的参数确定为: $K_e = 6$, $K_{ec} = 130$, $K_u = 0.1$, 积分系数为 0.001; PID 控制器的参数为 $K_p = 0.26$, $K_i = 0.000\ 65$ 和

$K_d=2$;模糊控制器与PID 控制器的误差切换值为稳态值的 80%,即 0.8. 模型匹配时的仿真曲线如图 4 所示的曲线 4,当对象的滞后时间由 60s 变为 80s 时响应曲线如图 7 中的曲线 3;保持滞后时间为 60s ,而把模型的增益由 30 增加 20%,即增加为 36,此时系统的仿真曲线如图 9 所示,曲线 1 为PID 控制,曲线 2 为模糊Smith 控制,曲线 3 为复合控制,此时系统响应的指标如表 4 所示.

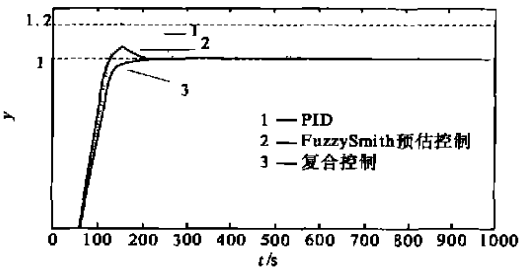


图 9 模型增益失配时控制系统的仿真曲线
Fig.9 Curves of control system with unlatched model gain

表 4 模型增益失配时的控制性能指标
Tab.4 Control performance target with unmatched model gain

控制方式	稳态值	超调量	调整时间
	y	$\sigma/\%$	t_s/s
PID 控制(曲线 1)	1	29	500
模糊控制	1	1.2	500
模糊Smith(曲线 2)	1	7.5	190
复合控制(曲线 3)	1	0	170

3 结论

通过以上的分析和仿真,可知不同的控制器都有其不同的特点,在实际当中,由于对象的变化,一种控制器往往不能应对所出现的各种情况.综合不同控制器特点的复合型控制器此时却能够得到比较好的控制效果,尤其是对于大时间滞后这一类复杂系统的控制.仿真表明,模糊Smith 及PID 的复合型控制器综合了Smith 预估对滞后的补偿,模糊控制的鲁棒性以及PID 控制的控制精度等特点,对纯滞后系统的控制效果要好于单纯使用一种控制器的控制效果,尤其是在模型失配时,复合型控制器表现出良好的稳定性和鲁棒性,对于大时间滞后系统是一种实用而简便的控制方法.

参考文献:

[1] 朱晓东,王 军.基于Smith 预估的纯滞后系统控制[J].郑州大学学报(工学版),2004,25(1):77~81.
[2] 王宏华,樊桂林.含有纯滞后系统的控制方法[J].江苏理工大学学报,1994,15(6):87~92.
[3] 师 黎,丁 海.PID 控制的参数模糊自整定方法[J].郑州大学学报(工学版),2001,22(3):25~27.
[4] 谢剑英.微型计算机控制技术[M].北京:国防工业出版社,2001.145~160.
[5] 刘曙光.模糊控制技术[M].北京:中国纺织出版社,2001.59~82.
[6] 楼顺天.基于Matlab 的系统分析与设计[M].北京:电子工业出版社,2000.

Fuzzy Complex Control for System with Pure Time Delay

ZHU Xiao -dong , LI Xiao -yuan , WAN Hong

(School of Electical Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002,China)

Abstract : The shortage of some control algorithms for the system with pure time delay is analyzed . They are PID control , Smith predictor algorithm and fuzzy control . A new algorithm of complex control is presented which is a fuzzy -PID controller based on Smith predictor . Smith predictor algorithm compensates for the time delay and fuzzy control is used to enhance the robustness of the system and PID algorithms are used to improve the precision of system when it is steady . The simulation of the new control algorithm is studied under the condition of model matching and unmatched model . The simulation shows that the new control algorithm has a better characteristic of stability and robustness . And it is an appropriate and simple control method for the system with pure time delay .

Key words : pure time delay ; PID algorithm ; Smith predictive algorithm ; fuzzy control algorithm