

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.12.014

# Smith 预估模糊自适应 PID 控制在时滞系统中的应用

李全俊, 黄权, 李锦

(中国兵器工业第五八研究所工业自动化工程技术部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为确保系统的实时性和稳定性, 设计一种新的 Smith 预估模糊自适应 PID 控制器。以气液增压缸的自动控制为具体研究对象, 将模糊自适应控制器与传统的 PID 控制器结合, 通过 Smith 预估器将控制过程中出现的纯滞后环节移至闭环系统之外, 并在 Matlab 中进行仿真验证。验证结果表明: 该设计能消除纯滞后现象, 提高响应实时性和稳定性。

**关键词:** Smith 预估; 模糊自适应控制; PID 控制

**中图分类号:** TP273+.2 **文献标志码:** A

## Application of Smith Predicted Adaptive Fuzzy-PID Controller in Time-Delay System

Li Quanjun, Huang Quan, Li Jin

(Dept. of Industrial Automation Engineering Technology, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** For the sake of ensuring the real-time and stability of system, design a new controller of Smith predicted adaptive fuzzy-PID. Application of the pneumatic-hydraulic intensifier autocontrol, combine fuzzy adaptive controller with the traditional PID controller, the controller through the Smith predictive controller move the course of time delay link in the control to the closed-loop, and simulate in MATLAB. The simulation result shows that the design can eliminate dead time, increase the real-time and stability of the response.

**Keywords:** Smith predictive; fuzzy adaptive controller; PID controller

### 0 引言

工业生产过程中, 很多控制系统都存在时滞现象, 时延的存在会给系统带来相位上的滞后, 而相位上的滞后则是造成系统不稳定的重要因素。如何克服时延所带来的问题, 确保系统的实时性和稳定性, 是一个重要的问题。

传统的 PID 控制方法至今仍广泛应用, 具有良好的鲁棒性, 但针对具有参数变化大、非线性、大时滞控制对象来说, 单一的 PID 控制并不能很好地解决问题。模糊控制对于难以建立模型的控制对象来说非常有用, 它对非线性以及参数不确定的控制对象来说有较好的品质, 但被控对象参数变化较大且时滞性较强时, 控制效果也不理想<sup>[1]</sup>。Smith 预估算法对于参数非时变的纯滞后系统来说输出响应较好, 但对于参数时变的控制对象来说, 应用常规的 Smith 算法来控制, 效果也很差, 因为应用 Smith 预估的前提条件是模型与系统一致, 至少相当接近, 否则达不到要求的效果。

为了消除单一控制器难以解决的问题, 采用模糊自适应 PID 控制器, 并由 Smith 预估算法来实现对滞后特性动态补偿的控制策略, 具有复合控制动态性能好、抗干扰能力强、鲁棒性好的优点。因此,

笔者将以气液增压缸的自动控制为具体的研究对象, 进行 Smith 预估模糊自适应 PID 控制。

### 1 Smith 预估模糊自适应 PID 控制基本原理

#### 1.1 Smith 预估控制

Smith 预估控制原理图如图 1, 其中  $W_{(s)}$  为控制器的传递函数;  $G_{P(s)}G_{Z(s)}$  为被控对象的传递函数;  $G_{P(s)}$  为被控对象中不包含纯滞后环节的传递函数;  $G_{Z(s)} = e^{-\tau s}$  为被控对象中纯滞后环节的传递函数。

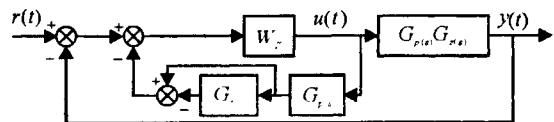


图 1 Smith 预估控制原理图

Smith 预估器的传递函数为:

$$G_{\tau(s)} = G_{P(s)} \cdot (1 - e^{-\tau s}) \quad (1)$$

Smith 预估器和  $W_{(s)}$  组成的回路为纯滞后补偿器, 它的传递函数为:

$$W_{(s)}^1 = \frac{W_{(s)}}{1 + W_{(s)}G_{P(s)}(1 - e^{-\tau s})} \quad (2)$$

经过补偿后的闭环传递函数为:

收稿日期: 2011-08-10; 修回日期: 2011-08-29

基金项目: 国防基础科研“高质量高效率绿色安全装药工程”(C1020110001)

作者简介: 李全俊(1987—), 男, 陕西人, 硕士在读, 从事控制理论与控制工程研究。

$$\Phi(s) = \frac{W(s)G_P(s)e^{-\tau s}}{1 + W(s)G_P(s)e^{-\tau s}} = \frac{W(s)G_P(s)}{1 + W(s)G_P(s)} \cdot e^{-\tau s} \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出, 闭环系统的特征方程中不含纯滞后部分  $e^{-\tau s}$ , 所以补偿消除了纯滞后部分对控制系统的影响, 根据拉氏变换的位移定理,  $e^{-\tau s}$  只是将控制作用在时间坐标上推移了一个时间  $\tau$ , 控制系统的过渡过程以及其它性能都与对象特征为  $G_P(s)$  时完全相同<sup>[2]</sup>。

## 1.2 模糊自适应 PID 控制

模糊自适应 PID 控制是在传统 PID 控制的基础上, 将控制规则的条件和操作用模糊集表示, 并将这些控制规则以及有关信息存入计算机知识库中, 使误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  能够满足不同时刻的  $e$  和  $e_c$  对 PID 参数自适应的要求, 然后计算机根据控制系统的实际响应情况, 运用模糊推理, 自动实现对 PID 参数的最佳调整。模糊自适应 PID 控制器原理图如图 2。

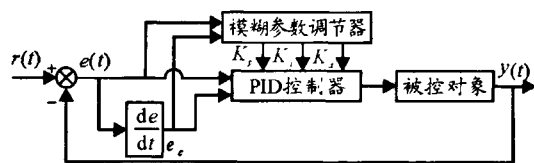


图 2 模糊自适应 PID 原理图

## 1.3 Smith 预估模糊自适应 PID 控制

模糊自适应 PID 控制器并联上 Smith 预估控制后, 将控制过程中出现的纯滞后环节消除。从理论上讲, 它不仅具有鲁棒性好、可控性强的优点, 而且具有良好的动态特性, 其原理图如图 3。

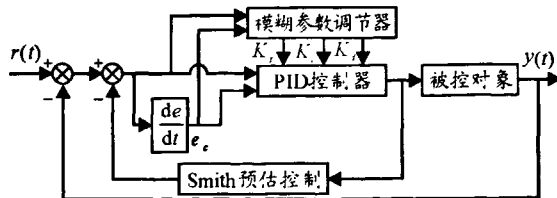


图 3 Smith 预估模糊自适应 PID 控制原理图

## 2 Smith 预估模糊自适应 PID 控制器的应用

在自动控制工业生产中, 气液联动控制由于其具有气压传动能源清洁、使用安全, 以及液压

传动功率密度大、静态特性好、频率响应高的优点, 在工业生产中得到广泛应用, 其原理如图 4。

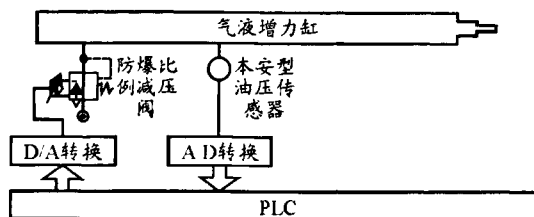


图 4 气液联动控制系统原理图

系统的基本工作原理是将传感器采集的信号与给定信号相比较, 得出偏差信号, 经过控制算法计算, 由计算机发出模拟控制信号来控制比例减压阀的开度, 使得系统向着减小偏差的方向运动, 从而实现精度较高的控制。但在系统工作过程中, 由于气液增压缸的固有特性, 使得系统运行存在一定的滞后, 为此需要寻找合适的控制策略来消除或减小系统的时滞。

根据文献[3]中关于气液联动控制系统传递函数的推导,

$$G(s) = \frac{K_v w_n^2 U(s)}{s(s^2 + 2\xi w_n + w_n^2)} \quad (4)$$

其中:  $K_v$  为速度增益;  $w_n$  为固有频率;  $\xi$  为等效阻尼系数;  $U_s$  为包含滞后环节的函数<sup>[3]</sup>。

为了便于仿真验证, 取适当的  $K_v$ 、 $w_n$ 、 $\xi$ 、 $u_s$ , 使得系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{18}{350s+1} e^{-125s} \quad (5)$$

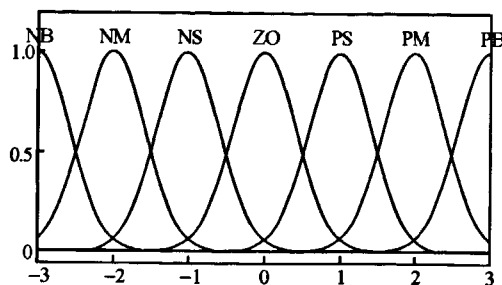
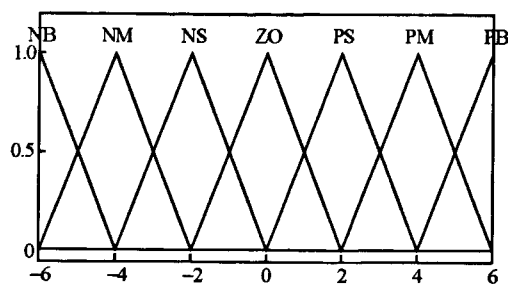
## 2.1 模糊策略

### 2.1.1 模糊化

#### 1) 输入/输出变量模糊规划

将系统误差  $E$  和误差变化率  $E_c$  作为输入语言变量, 变化范围定义为模糊集合上的论域。  $E, E_c = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ , 其语言值为  $E, E_c = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ , 子集中元素分别代表: 负大、负中、负小、零、正小、正中、正大, 其隶属度函数如图 5。

输出变量  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ , 它们的模糊划分与输入变量相同, 值域分别为  $[-0.5, 0.5], [-0.1, 0.1], [-3, 3]$ ; 量化范围为:  $[-6, 6]$ ; 其隶属度函数如图 6。

图 5  $E$ 、 $E_c$  隶属度函数图 6  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  隶属度函数

## 2) 模糊控制规则

共有 49 条模糊控制规则<sup>[4-5]</sup>, 如表 1。

表 1  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  模糊规则控制表

$\Delta K_p / \Delta K_i / \Delta K_d$	$E$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$E_c$	NB	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PM/NB/ZO	PM/NM/ZO	PS/NM/ZO	PS/ZO/PB
	NM	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PM/PM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/ZO	ZO/ZO/NS
	NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	NS/PS/PS
	ZO	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/ZO	NM/PS/PS
	PS	PS/NS/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO	NM/PM/PS
	PM	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO	NM/PB/PS
	PB	ZO/ZO/PS	NS/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO	NB/PB/PB

## 2.1.2 模糊推理与去模糊化

在控制器设计中, 根据误差  $E$  和误差变化率  $E_c$ , 取得相应的语言值, 根据表 1 的整定规则, 经过模糊决策, 得到 3 个修正参数  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的模糊量, 然后  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  要进行去模糊化得到精确量, 一般去模糊化时采用重心整定法<sup>[6]</sup>, 如式 (6):

$$U = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{i(E, E_c)} X_i}{\sum_{i=1}^N \mu_{i(E, E_c)}} \quad (6)$$

其中:  $U$  为模糊判决的输出量;  $\mu_{i(E, E_c)}$  为隶属度函数;  $X_i$  为论域中的元素;  $N$  为单点集数。

由式 (7) 可得到各修正参数:

$$\begin{cases} \Delta K_p = U \cdot K_{U(\Delta K_p)} \\ \Delta K_i = U \cdot K_{U(\Delta K_i)} \\ \Delta K_d = U \cdot K_{U(\Delta K_d)} \end{cases} \quad (7)$$

其中  $K_u$  为输出量的比例因子, 值分别为:

$$\begin{cases} K_{U(\Delta K_p)} = \frac{-0.5 - 0.5}{-6 - 6} = \frac{1}{24} \\ K_{U(\Delta K_i)} = \frac{-0.1 - 0.1}{-6 - 6} = \frac{1}{60} \\ K_{U(\Delta K_d)} = \frac{-3 - 3}{-6 - 6} = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (8)$$

综上所述, 模糊自适应 PID 控制器的 3 个参数为:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (9)$$

在线运行过程中, 控制系统通过对模糊逻辑规则的处理、查表和运算, 完成对 PID 参数的在线校正<sup>[5]</sup>。

## 2.2 Smith 预估控制器的设计

根据图 1 所示, 由式 (1)、式 (5) 可得到 Smith 预估器的传递函数为:

$$G_{r(s)} = \frac{18}{350s + 1} \cdot (1 - e^{-125s}) \quad (10)$$

## 3 仿真分析与验证

## 3.1 仿真模型的建立

在 Matlab 的 Simulink 仿真平台下, 建立仿真模型如图 7。

在进行仿真验证时, 先需要对 PID 控制器的初始参数进行校正, 经校正后, 取  $K_{p0}=0.195$ ,  $K_{i0}=0.0002$ ,  $K_{d0}=0.02$ 。

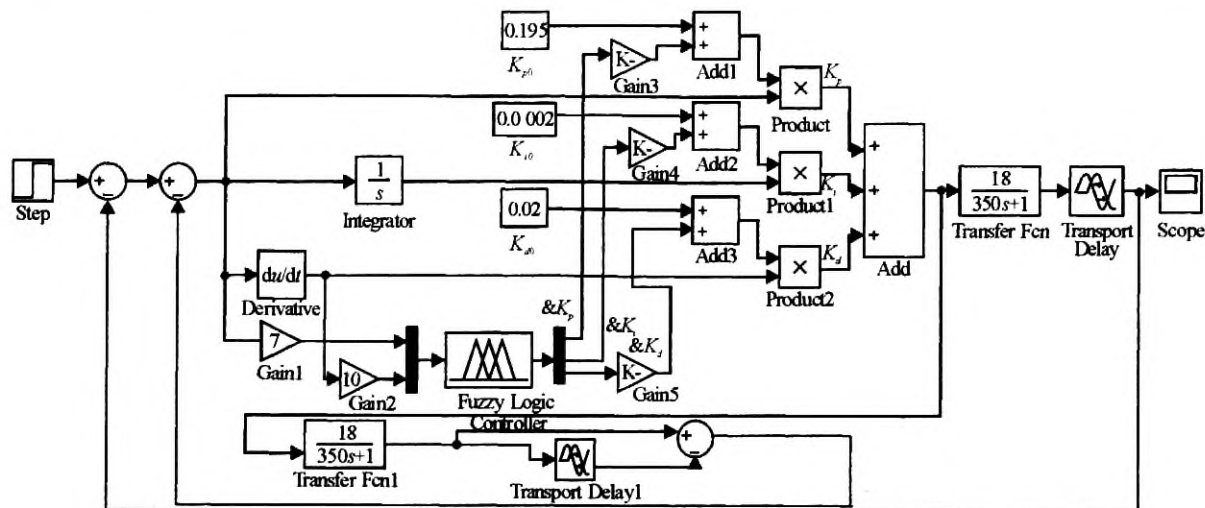


图 7 Smith 预估模糊自适应控制仿真模型

### 3.2 仿真结果分析

假设都使用阶跃输入,单独采用常规的 PID 控制器时,其仿真输出如图 8,阶跃响应的幅度单位为 1。

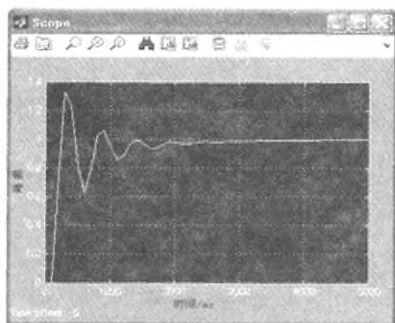


图 8 PID 控制器的阶跃响应

采用模糊自适应 PID 控制器时,其仿真输出如图 9,阶跃响应的幅度单位为 1。

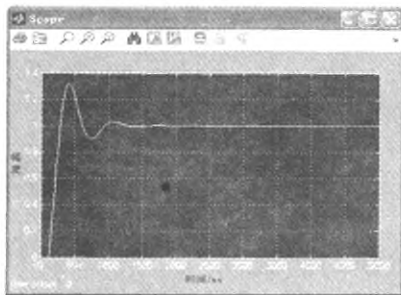


图 9 模糊自适应 PID 控制器的阶跃响应

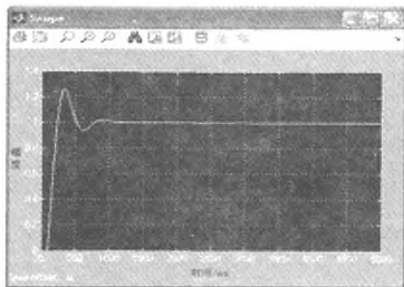


图 10 Smith 预估模糊自适应 PID 控制器的阶跃响应

采用 Smith 预估模糊自适应 PID 控制器时,其仿真输出如图 10,阶跃响应的幅度单位为 1。

针对相同的传递函数  $G(s) = \frac{18}{350s+1}e^{-125s}$ , 输入为阶跃输入时,不同控制器对系统性能的影响如表 2。

表 2 不同控制器对系统性能的影响

控制器类型	系统动态性能			
	峰值	稳态值	超调量/%	稳态时间/ms
常规PID	1.36	1	36	2 700
模糊PID	1.30	1	30	1 600
Smith模糊PID	1.28	1	28	1 200

### 4 结束语

仿真结果证明:在基于 Smith 算法的基础上,将模糊自适应控制器与传统的 PID 控制器结合,通过 Smith 预估器将控制过程中出现的纯滞后环节移至闭环系统之外,能够消除纯滞后现象,提高响应的实时性和稳定性。

### 参考文献:

- [1] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [2] 刘娜, 何永勃. 基于预估模糊自适应 PID 控制的智能电气阀门定位器的应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2010(4): 66-68.
- [3] 张强, 杨新军, 等. 新型气液增压缸比例/伺服系统的建模研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2005(4): 16-18.
- [4] 田庆涛, 吴斌. 火炮身管内膛擦拭及影响[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(5): 39.
- [5] Wang Guimei, Song Hui. Study of the Mine Drainage Fuzzy Control System Based on Matlab[J]. International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2009(2): 99-102.
- [6] 黄权, 度波. 数字技术在某枪弹生产线合膛工序中的应用[J]. 兵工自动化, 2010, 29(4): 52-53.