

文章编号: 1671-7848(2007)04-0422-05

模糊 Smith 智能温度控制器的设计与仿真

陈以, 杨启伟

(桂林电子科技大学 计算机与控制学院, 广西 桂林 541004)



摘 要: 结合模糊 PID 控制与模糊自适应 Smith 预估控制的优点, 提出了模糊 Smith 智能控制方法。用模糊控制方法设计了改进型 Smith 预估器的滤波时间常数, 并制定了其整定规则和参数的模糊自适应调整机构。仿真研究表明, 模糊 Smith 智能控制能改善参数时变的纯滞后系统的控制性能, 提高系统控制时的鲁棒性与自适应性。

关键词: 模糊 PID; Smith 预估控制; 模糊 Smith; 温度控制

中图分类号: TP 273 文献标识码: A

Design and Simulation of Fuzzy Smith Intelligent Temperature Controller

CHEN Yi, YANG Qi-wei

(College of Computer and Control, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Based on the advantages of fuzzy PID control and fuzzy adaptive Smith predictor control, a Fuzzy Smith intelligent method is proposed. The filter time constant of improved-type Smith predictor is designed by fuzzy control method. The self-tuning rules and parameter fuzzy adjust organization are established. Simulation research shows that Smith intelligent control can improve the control performance of the pure hysteresis system, and the robustness and adaptability are improved.

Key words: fuzzy PID; Smith predictor control; fuzzy Smith; temperature control

1 引言

模糊自整定 PID 控制既具有模糊控制动态性能好、抗干扰能力强、鲁棒性好的优点, 又具有 PID 控制的较好的稳态精度^[1]。但对于具有纯滞后环节的控制对象来讲, 控制器的参数调整往往不准确。Smith 算法在解决纯滞后对象的控制的问题时, 原理简单, 计算方便, 因而被广泛应用。但是传统的 Smith 预估补偿控制器对于缺乏精确模型或参数时变的具有纯滞后的过程控制系统来说, 很难获得令人满意的控制效果^[2]。由 C. C. Hang 等人提出的改进型 Smith 预估器控制方案具有对被控对象模型参数变化不敏感的特点, 它对系统性能的作了改善。

考虑将模糊 PID 与改进型 Smith 预估控制方案结合, 用模糊 PID 控制器代替普通 PID 控制器, 及由改进型 Smith 预估器来实现对滞后特性的动态补偿的控制策略。两者都能够在一定程度上克服被控对象模型参数的变化带来的不利影响, 提高系统的鲁棒性和稳态精度。

2 模糊 Smith 智能控制器的设计

1) 常规 Smith 预估控制 Smith 预估控制^[3]最

早是由 O. J. M. Smith 在 1958 年提出来的, 这是一个时滞预估补偿算法, 其原理框图如图 1 所示。

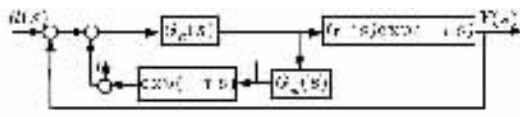


图 1 Smith 预估控制系统原理框图

Fig. 1 Block diagram of Smith predictive control system

它的基本原理是通过估计对象的动态特性, 用一个预估模型进行补偿, 从而得到一个没有时滞的被调节量反馈到控制器, 使得整个系统的控制犹如没有时滞环节。

即当预估模型传递函数 $G_m(s) = G(s)$ 时, 得出闭环系统的传递函数为

$$G_B(s) = \frac{G_c(s)G(s)\exp(-\tau s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (1)$$

从式(1)中可看出, 经 Smith 补偿后, 闭环系统的特征方程式中不再含有纯滞后项 $\exp(-\tau s)$, 说明纯滞后被消除了, 只是它的输出滞后了一个 τ 的时间。

Smith 预估法最大的缺点就是太过依赖精确的数学模型。当估计模型和实际对象有误差时, 控制品质会显著恶化, 甚至发散; 对于外部有扰动时,

也非常敏感,可使鲁棒性较差。所以,常规 Smith 预估控制系统在实际中难以得到广泛的应用。

2) Smith 预估器的改进型 为了克服 Smith 预估器对模型误差敏感的缺点, C.C.Hang 等人提出了改进型 Smith 预估器如图 2 所示。

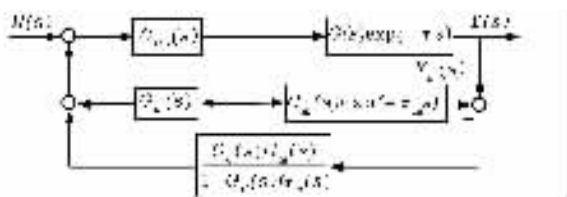


图 2 C.C.Hang 的改进型 Smith 预估器结构框图
Fig.2 Block diagram of Smith predictor improved by C.C.Hang

图中 $G(s) \exp(-\tau s)$ 是被控对象的传递函数, K 为它的增益, $G_m(s) \exp(-\tau s)$ 为 Smith 预估器的传递函数, K_m 是它的增益, $G_c(s)$, $G_f(s)$ 分别为主、副调节器的传递函数。它与 Smith 补偿控制方案的区别在于主反馈通道的传递函数不是 1, 而是:

$$G_f(s) = \frac{G_c(s)G_m(s)}{1 + G_c(s)G_m(s)} \quad (2)$$

选择 $G_c(s)$ 为 PID 调节器, 如果 $G_m(s)$ 为一阶惯性环节, 使调节器的积分时间常数等于模型的时间常数, 则可以将主反馈通道传递函数 $G_f(s)$ 简化为

$$G_f(s) = 1/(t_f s + 1) \quad (3)$$

式中, $t_f = T_m / (K_c K_m)$ 为滤波时间常数; T_m 为预估器时间常数; K_c 为 $G_c(s)$ 的增益, 实际控制时, 只需要调整 t_f 即可。

不难得到闭环系统的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)\exp(-\tau s)}{1 + G_c(s)G_m(s) + G_c(s)G(s)\exp(-\tau s) - \frac{1}{G_m(s)\exp(-t_m s)} \frac{1}{t_f s + 1}} \quad (4)$$

显然, 这与原始的 Smith 预估控制方案相同, 改进方案对系统无影响。这种改进方案实际上是在主反馈通道中引入一个一阶惯性环节 $1/(t_f s + 1)$ 。该一阶惯性环节相当于一个低通滤波器, 使得被控对象的输出和预估器的输出 Y_m 之间的偏差必须经过一阶惯性环节的滤波处理后才反馈到控制器, 这就减缓了模型误差干扰系统的速度, 并削弱了模型不匹配对系统的影响, 有利于系统稳定。

此外, 当预估器存在误差时, 传递函数的分母的最后项多了一个 $1/(t_f s + 1)$ 因子, 调整 t_f 即可以改变闭环系统特征方程的根, 从而达到改变控制系统性能的目的。当 $t_f = 0$ 时, 则系统等效于常规的 Smith 预估控制系统。

3) 模糊 Smith 智能控制器设计 将模糊 PID 与

改进的模糊自适应 Smith 预估控制方案结合, 提出一种基于两种方法的模糊 Smith 智能控制系统。用模糊 PID 控制器代替普通 PID 控制器, 发挥模糊 PID 控制动态性能好、抗干扰能力强、鲁棒性好等特点, 进一步提高系统的稳态精度; 由改进型 Smith 预估器来实现对滞后特性的动态补偿的控制策略。两者都能够在一定程度上克服被控对象模型参数的变化带来的不利影响, 而且分别在控制器和预估器两个不同的地方起作用。其系统框图如图 3 所示。

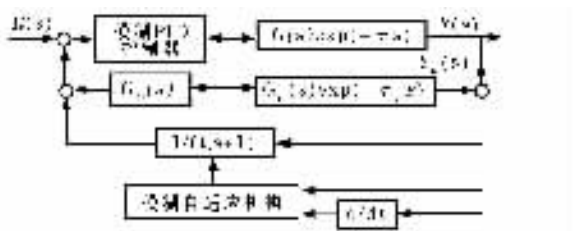


图 3 模糊 Smith 智能控制系统框图
Fig.3 Block diagram of fuzzy Smith intelligent control system

系统参数 t_f 在运行中是发生变化的, 原先设定的滤波时间常数 t_f 不一定能使系统的动态性能达到最佳, 只有根据变化情况相应整定 t_f , 才能使系统得到更好的控制效果。

①模糊 PID 自整定 将模糊控制和 PID 控制器两者结合起来, 使之既具有模糊控制灵活而适应性强的优点, 又具有 PID 控制精度高的特点。控制器由一个标准 PID 控制器和一个模糊自适应机构组成^[4,5]。模糊控制器以偏差 e 和偏差变化 Δe 作为输入, 修正参数 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 作为输出, 则 PID 控制器输出的参数 K_p, K_i, K_d 为

$$\begin{cases} K_p = K_p' + \Delta K_p \\ K_i = K_i' + \Delta K_i \\ K_d = K_d' + \Delta K_d \end{cases} \quad (5)$$

②滤波时间常数 t_f 的整定规则 本文采用模糊控制器对 t_f 进行整定, 模糊控制器的输入为对象输出和 Smith 预估器输出之间的预估偏差 e 及其变化率 Δe , 模糊自适应机构的输出值即为 t_f 调整值。为了确定模糊控制规则, 需要先对 t_f 进行整定, 具体整定规则^[6]如下:

a) 对象模型的增益 K 发生变化时: $\Delta K < 0$ 或 $\Delta K > 0$, 一阶惯性环节的引入都会对系统产生不利影响, 使系统控制性能下降。这时, 要求 $t_f = 0$, 即惯性环节不起作用, 相当于原 Smith 预估器。

b) 对象模型的时间常数 T 发生变化时: $\Delta T > 0$ 时, 引入惯性环节, 以削弱系统振荡, 误差越大, 要求滤波时间常数 t_f 也越大; $\Delta T < 0$ 时, 则

不宜引入惯性环节，应使 $t_f = 0$ 。

c) 对象模型的时滞常数 τ 发生变化时： $\Delta\tau < 0$ 或 $\Delta\tau > 0$ ，都要求引入一阶惯性环节，随着 $|\Delta\tau/\tau|$ 的增大，滤波时间常数 t_f 应该相应增大 ΔT 以消除时滞常数之间误差给系统带来的振荡，提高系统控制性能。

③ 模糊自适应机构的设计 根据以上分析，可以先根据 e 和 Δe 的值，确定是否需要引入一阶惯性环节，如果不需要，则令 $t_f = 0$ ；如果需要引入惯性环节来提高系统控制性能，则根据 e 和 Δe 的值对滤波时间常数 t_f 进行实时调整，本文的控制中采用如下调整公式：

$$t_f(k) = t_f(k-1) + \Delta t_f(k) \quad (6)$$

在调整过程中，应注意不能使 t_f 为负值，而且为增强系统的鲁棒性，可以给 t_f 设定一个最小值，根据经验，一般取最小值为 $(T/4 \sim T/3)$ 。

Δt_f 的值可以仿效文献 [7] 中采用的模糊控制器对 e 和 Δe 进行模糊推理得到， e 和 Δe 即为模糊控制器的输入，模糊化后为 $E, \Delta E$ 和 Δt_f 是模糊控制器的输出。它们的模糊论域定义为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，模糊子集定义为 $\{\text{负大, 负小, 零, 正小, 正大}\} = \{\text{NB, NS, ZO, PS, PB}\}$ ，定义 $E, \Delta E$ 和 Δt_f 的隶属函数如图 4 所示。

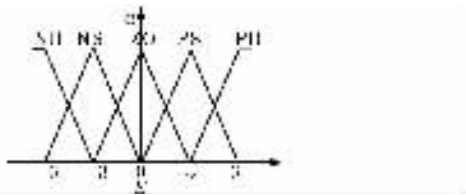


图 4 模糊子集隶属函数图

Fig.4 Diagram of fuzzy subset membership function

对于一个实际的系统，可以确定 $E, \Delta E$ 和 Δt_f 的基本论域，从而确定模糊控制器输入变量的量化因子和输出控制量的比例因子。

由此可以得出滤波时间常数 t_f 的模糊控制规则。如果 $\Delta\tau$ 较大，则 e 和 Δe 都较大，说明系统波动剧烈，此时应增大 t_f ，即 $\Delta t_f = \text{PB}$ ，所以其控制规则如下：

当 e 负大， Δe 负大时，情况类似，同样应增大 t_f ，即 $\Delta t_f = \text{PB}$ 。控制规则为：if $e = \text{NB}$ and $\Delta e = \text{NB}$ then $\Delta t_f = \text{PB}$ 。

当 e 正小， Δe 为零时，说明 $\Delta K < 0$ ，此时不宜引入惯性环节，同样应减小 t_f ， $\Delta t_f = \text{NS}$ ，控制规则为：if e and $\Delta e = \text{ZO}$ then $\Delta t_f = \text{NS}$ 。

如此类推，可得到 25 条控制规则，见表 1。

表 1 滤波时间常数整定规则

Table 1 Adjusting rule of filtering time constant

Δt_f	$E\Delta E$				
	NB	PS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	PB
NS	PS	NS	NS	ZO	PB
E	ZO	PS	ZO	ZO	PS
	PS	PS	ZO	NS	PS
	PB	PB	ZO	NS	PB

3 算法仿真研究

温控对象参数的辨识采用飞升曲线法做实验，获得对象的飞升曲线，从曲线求出模型参数 K, T, τ ；一般地，温控对象近似模型的传递函数为

$$G(s) = \frac{K \exp(-\tau s)}{T_s + 1}$$

假设模型参数取 $K = 0.42, T = 80, \tau = 40$ 。

在对实际温度控制对象进行实验时，所得到的阶跃响应曲线，与理想的或典型的阶跃响应曲线不同。它没有界限清晰的 T 与 τ ，这一点是可以理解的，一般的温控对象并不是理想的一阶惯性加纯滞后环节。因此，一阶惯性加纯滞后环节只能近似描述被控对象。

1) Smith 预估控制与模糊自适应 Smith 控制的仿真 Smith 预估器的优越性在于能将滞后部分从对象传递函数的闭环部分中分离出来，与传统的 PID 控制器相比，Smith 预估器使系统的动作更灵敏，过渡过程缩短，超调量减小，能很好地改善系统的性能。采用 Smith 预估控制后的响应曲线，如图 5 所示。

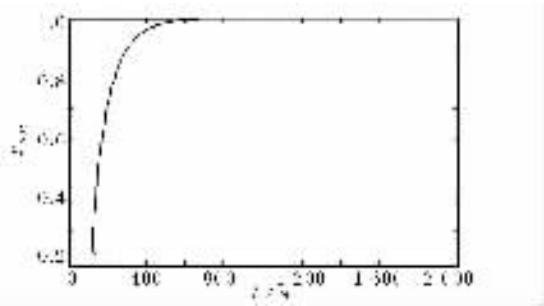


图 5 模型精确时的 Smith 预估控制曲线

Fig.5 Curve of Smith predictive control with precise model

PID 参数同样取 $K_p = 2.5, K_i = 0.02, K_d = 5$ 时 $\delta = 0, T_s = 650 \text{ s}$ 。但是如果控制对象参数变化使得模型不精确或者是出现负荷扰动时，控制效果并不理想，如图 6 所示。

模型参数变为 $K = 0.5, T = 50, \tau = 40$ 的情况下当稳态误差趋近于零之前，响应曲线出现超调 $\delta = 10\%$ ，调节时间变长 $T_s = 1300 \text{ s}$ 。如果参数变化更大，响应将出现振荡，及时调节控制器参数也很难解决此问题。

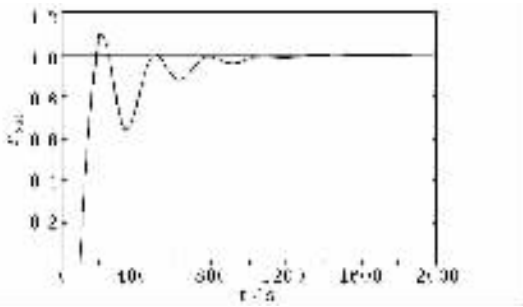


图 6 模型不精确时的 Smith 预估控制曲线

Fig.6 Curve of Smith predictive control with non-precise model

当模型一致时，加入了滤波常数模糊自适应机构的模糊自适应 Smith 预估控制的响应曲线与图 5 一致，这种情况下 t_f 接近于 0，实际情况相当于没有加入滤波环节，仍然是 Smith 预估控制。

对象模型参数不精确时，同等变化为 $K = 0.5$ ， $T = 50$ ， $\tau = 40$ 的情况下加入了模糊控制调整滤波常数 t_f 的模糊自适应 Smith 预估控制的响应曲线，如图 7 所示。

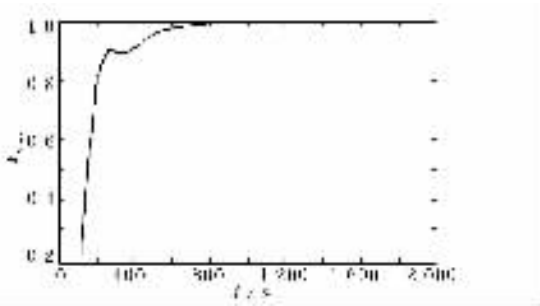


图 7 模型不精确时的模糊自适应 Smith 控制曲线

Fig.7 Curve of fuzzy adaptive Smith control with non-precise model

响应参数 $\delta = 0$ ， $T_s = 900$ s，对比图 6 可见，系统具有较为理想调节时间和稳态精度。

3) 模糊 Smith 智能控制的仿真 模糊 PID 控制与模糊参数整定的 Smith 的预估控制从不同角度，能较好解决大滞后与参数时变对系统控制性能的恶劣影响。将有模糊辨识器的 Smith 预估器以及模糊 PID 控制器结合起来，应用到纯滞后、大惯性的系统中，对解决输出响应的振荡问题，提高控制系统的稳态性和快速性，是一种很好的控制策略。

当 Smith 预估器与模型一致即模型参数依然为 $K = 0.42$ ， $T = 80$ ， $\tau = 40$ 时，采用模糊 Smith 智能控制算法的响应曲线如图 8 所示。

对比图 5，可见采用模糊 Smith 智能控制响应曲线 $\delta = 0$ ， $T_s = 450$ s，比 Smith 预估控制的响应略快，同样没有超调，这是模糊 PID 控制 PID 参数可自调整的结果。

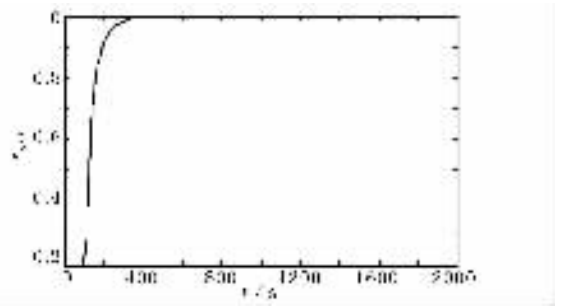


图 8 模型精确时的模糊 Smith 智能控制曲线

Fig.8 Curve of fuzzy Smith intelligent control with precise model

当温控对象模型参数同样变化为 $K = 0.5$ ， $T = 50$ ， $\tau = 40$ 时，采用模糊 Smith 智能控制算法的响应曲线如图 9 所示。

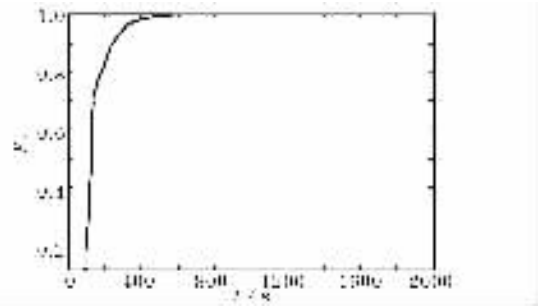


图 9 模型不精确时的模糊 Smith 智能控制曲线

Fig.9 Curve of Smith predict control with non-precise model

对比图 7，在同变参数模型下，可见用模糊 Smith 智能控制的比模糊参数自适应 Smith 预估控制的响应快，控制效果要好。

变化不同参数进行进一步仿真，同样可以表明本文提出的模糊 Smith 智能控制方法在控制电温度箱这样的具有参数时变的纯滞后系统时，能很大程度改善系统的控制品质，增强系统的鲁棒性和抗干扰性，是一种有效的控制方案。

4) 仿真结果分析 通过以上 Matlab 仿真比较，得出模型参数精确情况下几种控制的性能指标，见表 2。

表 2 模型参数精确时的三种控制性能指标

Table 2 Performance parameter of three control methods with precise model

控制方法	超调量/ %	调节时间/s	稳态误差
Smith 预估控制	0	650	0
模糊自适应 Smith 控制	0	650	0
模糊 Smith 智能控制	0	450	0

当模型参数不精确，由 $K = 0.42$ ， $T = 80$ ， $\tau = 40$ 变化为 $K = 0.5$ ， $T = 50$ ， $\tau = 40$ 的情况下，几种控制的性能指标见表 3。（下转第 429 页）