

# 热电偶校验炉程序升温装置的智能 PID 控制研究

夏春梅, 黄凤良

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对具有较大的滞后性、非线性和时变性特点的热电偶校验炉对象, 常规方法难以达到良好的控制效果, 结合模糊专家系统控制器与 PID 控制器, 提出了一种智能 PID 控制器结构。它具有 PID 控制器的参数在线自整定和直接控制型模糊控制器的功能, 既保持了模糊控制灵活而适应性强的优点, 又具有常规 PID 控制器的动态跟踪品质好和稳态精度高的特点, 解决了热电偶校验炉的控制问题。仿真结果表明: 智能 PID 控制方案是可行性的、有效的, 与常规 PID 控制器相比, 系统的响应速度提高了、超调量减少了。

[关键词] 智能, PID 控制, 模糊控制, 自整定

[中图分类号] TP273<sup>+</sup>. 3 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292(2005) 04-0018-04

## Study on Intelligent PID Controller of Thermocouple Checkout Stove Temperature Programmed

XIA Chumei HUANG Fengliang

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 210042, China)

**Abstract** Aiming at the thermocouple checkout stove with more lag, non-linearity and variability, and difficult to be controlled very well by using conventional method, a kind of intelligent PID controller is put forward by combining fuzzy expert system controller and PID controller. It has the functions that parameter of PID controller is adjusted itself online and fuzzy controller output is directly controlled, and has both merits of agility and strong adaptability for fuzzy control and trait of high dynamic tracking quality and high steady precision for PID control, and thus the question of control thermocouple checkout stove is solved. The emulational experiment shows that intelligent PID control plan has feasibility and validity in simulation result. By comparing with conventional PID controller, it is indicated that the response is improved and excess amount adjusted is decreased.

**Key words** intelligence, PID control, fuzzy control, adjusted itself

## 0 引言

热电偶校验炉程序升温装置是一种具有较大的滞后性和非线性的时变系统, 对于采用常规 PID 控制往往难以取得较好的控制效果, 而炉温控制的效果直接影响到热电偶校验结果的正确与否。长期以来热电偶校验炉的温度控制问题都没有得到很好的解决, 问题的关键是要设计出一个性能良好的智能型控制器。

模糊控制、神经网络控制和专家控制是目前智能控制研究中最活跃的领域<sup>[1]</sup>。智能 PID 控制就是将智能控制 (intelligent control) 与传统 PID 控制相结合的一种控制方式, 其主要有模糊 PID 控制

器、专家 PID 控制器和基于神经网络的 PID 控制器等。

PID 控制是自动控制中产生最早的一种控制方法, 它在实际控制工程中的应用最广。据不完全统计, 在工业过程控制和航空航天控制等领域, PID 控制的应用占 80% 以上。然而, 传统 PID 控制算法有它的局限性和不足之处, 它只有在系统模型参数为非时变的情况下才能获得理想的效果, 当应用到时变系统时, 系统的性能会变差, 甚至不稳定。另外, 在对 PID 参数整定过程中, 往往得不到全局性的最优值, 因此这种控制作用无法从根本上解决动态品质和稳定精度的矛盾<sup>[4]</sup>。

模糊控制是公认的三大智能控制方法之一, 是

收稿日期: 2005-10-17

作者简介: 夏春梅 (1961-), 女, 高级实验师, 主要从事自动化测控技术及虚拟仪器技术的教学与研究。E-mail: xcm@mail.njnu.net

在 1965 年由 Zadeh L A 教授首次提出的模糊集合论的基础上发展起来的. 对于复杂的控制问题, 模糊控制能够很好地利用控制专家的经验信息, 模拟人类的思维和语言表达形式, 从而实现对工业对象的控制, 已在各种对象的控制中得到了成功的应用<sup>[5]</sup>. 模糊控制的方法无须建立被控对象的数学模型, 对被控对象的时滞性、非线性和时变性具有一定的适应能力, 鲁棒性好. 但模糊控制本身消除系统误差的性能较差, 难以达到较高的控制精度, 本文以实验室热电偶检定炉温度控制系统为背景, 把模糊控制、专家理论以及 PID 控制结合起来, 设计了一种智能 PD 控制器 (自调整模糊 PD 控制), 获得了较好的控制效果.

1 智能 PD 控制器的设计

1.1 智能 PD 控制器结构

对于热电偶校验炉程序升温装置这样一个具有较大的滞后性、非线性的时变系统, 要想从根本上解决动态品质和稳定精度的矛盾, 单纯采用 PID 控制和模糊控制都不会取得较好的控制效果, 而采用模糊 PID 复合控制方式来控制不失为一种比较好的控制方法. 它既具有模糊控制灵活而适应性强的优点, 又具有 PD 控制精度高的特点. 结合模糊专家系统控制器与 PD 控制器构成的一种智能 PID 控制器如图 1 所示.

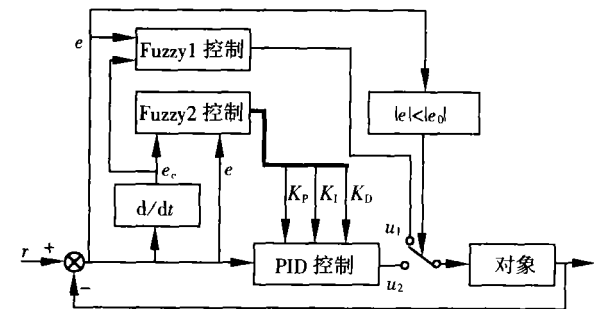


图 1 智能 PID 控制原理框图

在大偏差时 ( $|e| \geq |e_0|$ ), 选择简单的直接控制型模糊控制器 Fuzzy1 控制的输出作为控制量  $u_1$ , 小偏差时则选择模糊 PID 控制器输出作为控制量  $u_2$ , PID 控制器的参数  $K_P, K_I, K_D$  由 Fuzzy2 控制 (模糊增益自调整控制器) 进行在线修改, 实现 PID 控制器的参数在线自整定, 进一步改善 PID 控制器性能, 以适应控制系统的参数变化和工作条件的变化.

PID 控制是应用最广泛的一种控制规律, PID 控制表示比例 (proportional)-积分 (integral)-微分 (differential) 控制<sup>[2]</sup>. 在常规控制系统中, PID 控制

作用的一般形式如 (2) 式所示.

$$u(n) = K_P e(n) + K_I \sum e(i) + K_D e(n) \quad (2)$$

式中,  $n$  为采样序号;  $u(n)$  为第  $n$  次采样时刻的控制器输出;  $e(n)$  为第  $n$  次采样时刻输入的偏差;  $\sum e(i)$  为采样开始到第  $n$  次采样时刻之间偏差的累积和,  $i$  为采样次序;  $\Delta e(n)$  为第  $n$  次采样时刻输入的偏差与第  $n-1$  次采样时刻输入的偏差之差,  $n$  为采样序列;  $K_P$  为比例增益;  $K_I$  为积分系数,  $K_I = K_P \times T / T_s$ ;  $K_D$  为微分系数,  $K_D = K_P \times T_D / T$ ,  $T$  为采样周期 (s). 这种 PD 控制器存在参数修改不方便, 不能进行自整定等缺点, 当应用到时变系统时, 系统的性能会变差, 甚至不稳定. 因此本文采用 Fuzzy2 模糊控制器对 PID 参数进行在线自整定.

1.2 Fuzzy1 控制器的设计

以误差和误差变化率为模糊控制器的输入, 符合工业过程中人们的控制习惯, 因而容易建立比较通用的控制规则. Fuzzy1 控制的输入变量采用误差  $e$  和误差变化率  $e_c$ . 而输出为控制量  $u_1$ . 针对不同的被控对象或过程, 控制器的输入和输出变量的论域大小范围不是固定的. 根据本研究对象的特点, 输入变量误差  $e$  的论域取  $[-25^\circ\text{C}, +25^\circ\text{C}]$ , 误差变化率  $e_c$  的论域取  $[-9^\circ\text{C}, +9^\circ\text{C}]$ , 通过量化因子来实现标准化的过程. 各输入、输出模糊变量的语言值均采用“正大 (PB)”、“正小 (PS)”、“零 (Z)”、“负小 (NS)”、“负大 (NB)” 5 种, 相应的隶属度函数曲线如图 2 图 3 所示.

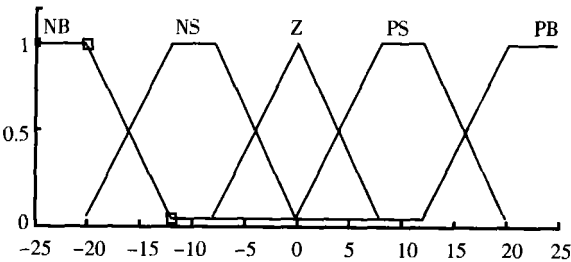


图 2 e 的隶属度函数

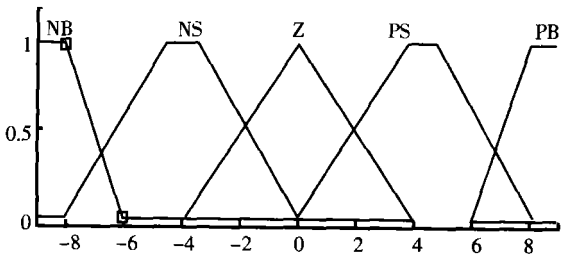


图 3 e\_c 的隶属度函数

根据专家理论和实验经验可建立如表 1 所示的控制规则.

表 1 $u_1$ 控制规则					
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PB	PB	PS	Z
NS	PB	PS	PS	Z	NS
Z	PS	PS	Z	Z	NS
PS	PS	Z	Z	NS	NS
PB	Z	NS	NB	NB	NB

采用“ if A and B then C”的控制规则格式如下:

if  $e$  is NB and  $e_c$  is NB Then  $u_1$  is PB  
OR  
...  
OR  
If  $e$  is PB and  $e_c$  is PB Then  $u_1$  is NB

采用质心法 ( centroid ) 解模糊化方法, 得到直接控制量输出  $u_1$ .

1.3 Fuzzy2控制器的设计

本系统使用不依赖对象模型的模糊控制推理的参数自整定方法, 由图 1 可以看出, 由 Fuzzy2 控制和常规 PID 控制器构成模糊 PID 控制器, 实现 PID 控制器的参数在线自整定, 进一步改善 PID 控制器性能, 以适应控制系统的参数变化和工作条件的变化, 提高控制系统的性能. Fuzzy2 控制是以误差绝对值  $|e|$  和误差变化率绝对值  $|e_c|$  为输入变量, 以  $K_P, K_I, K_D$  作为输出变量的二输入三输出的模糊控制器. 在此输入、输出模糊变量的语言值均取“大 (B)、中 (M)、小 (S)、零 (Z)” 4 种, 相应的隶属度函数如图 4 和图 5 所示.

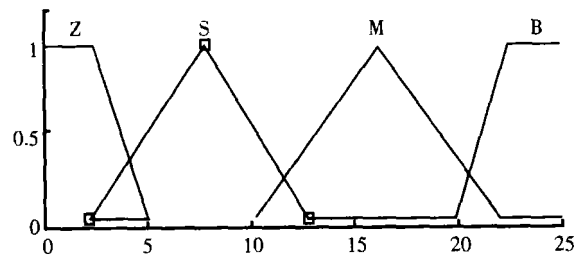


图 4  $|e|$  的隶属度函数

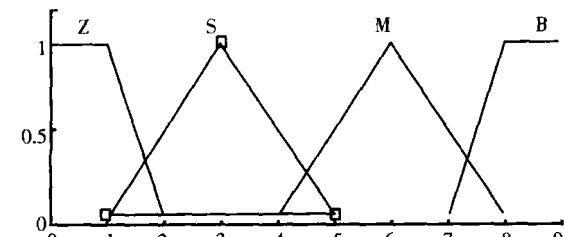


图 5  $|e_c|$  的隶属度函数

根据专家理论和实践经验,  $|e|$  的论域取  $[0^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}]$ ,  $|e_c|$  的论域取  $[0^{\circ}\text{C}, 9^{\circ}\text{C}]$ ;  $K_P, K_I$  和  $K_D$  的论

域均为  $[0, 1]$ . 由参数  $K_P, K_I$  和  $K_D$  对系统输出特性的影响和实际情况, 归纳出如下  $K_P, K_I$  和  $K_D$  的自整定规则:

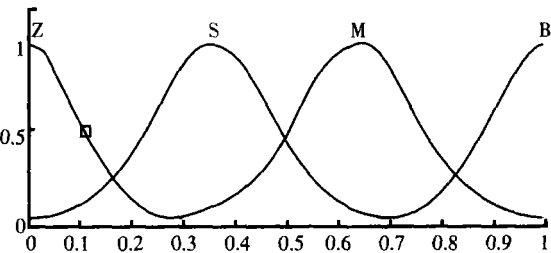


图 6  $K_P, K_I, K_D$  的隶属度函数

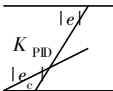
(1) 当  $|e|$  较大时, 为了加快系统的响应速度, 并避免因开始时  $|e|$  的偏差的瞬间变大, 而使控制作用超出许可范围, 同时为了防止积分饱和, 避免系统响应出现较大的超调量, 应取较大的  $K_P$ , 较小的  $K_D$ , 且使  $K_I = 0$

(2) 当  $|e|$  和  $|e_c|$  为中等大小时, 为使系统相应的超调量减少, 应取较小的  $K_P$  和  $K_I, K_D$  大小适中, 以保证系统的响应速度.

(3) 当  $|e|$  较小时, 为使系统具有良好的稳态性能, 应增大  $K_P, K_I$  值, 同时避免系统在设定值附近出现振荡, 并考虑系统的抗干扰能力, 故  $K_D$  值的选取相当重要, 其原则为: 当  $|e_c|$  较小时,  $K_D$  应取大一些; 当  $|e_c|$  较大时,  $K_D$  应取小一些.

采用的控制规则为: “ if A and B then ( C1 ) ( C2 ) ( C3 ) ”, 因此可得出  $K_P, K_I$  和  $K_D$  的控制规则如表 2 所示, 表中模糊输出依次为  $K_P, K_I$  和  $K_D$  的语言值.

表 2  $K_P, K_I, K_D$  控制规则

	Z	S	M	B
Z	Z, B, Z	S, M, S	M, Z, M	B, Z, S
S	B, B, Z	B, M, S	M, Z, M	B, Z, S
M	B, B, Z	B, B, S	M, S, M	B, Z, S
B	M, B, Z	M, M, Z	S, S, M	S, Z, S

同样采用质心法解模糊化后即可实现 PID 参数的在线模糊自整定功能. 图 7 所示为 Matlab 模糊控制规律观察器, 由不同的输入组合分别得出相应的解模糊输出, 即可得到模糊控制表. 图中所示为  $|e| = 25, |e_c| = 5$  时, 解模糊输出:  $K_P = 0.907, K_I = 0.0862, K_D = 0.347$

2 仿真与结果

当被控对象的传递函数为 ( 1 ) 式时, 对炉温进行  $400^{\circ}\text{C}$  控制的阶跃响应仿真曲线如图 8 所示, 对  $100^{\circ}\text{C}, 200^{\circ}\text{C}$  的阶跃响应仿真曲线与其相类似.



图 7 模糊控制规律观察器

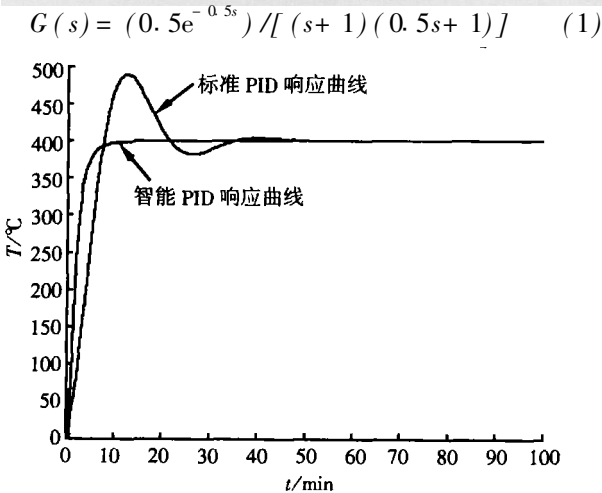


图 8 仿真曲线

结果表明, 智能 PD 控制比标准 PD 控制有更快的动态响应、更小的超调量. 比较采用不同控制方案炉温在 100℃、200℃和 400℃时仿真结果, 系统动态响应的超调量以及调节时间的不同, 如表 3 所示.

表 3 仿真结果

炉温 /℃	调节时间 $t_s$ /min		超调量 $\delta$ /%	
	智能 PID	标准 PID	智能 PID	标准 PID
100	9.4	20	0	24
200	9.8	22	0	23
400	10.5	25	0	23

3 结束语

本文提出的控制方案, 对于热电偶校验炉装置这样一个具有较大的滞后性、非线性时变系统, 解决了具有严重非线性和不确定性系统的控制问题, 既具有模糊控制响应速度快的特点, 又具有 PD 控制器的动态跟踪品质好和稳态精度高的特点. 结果表明, 在控制系统的参数变化和工作条件变化的场合, 该方案控制效果理想、可靠.

[参考文献]

[1] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PD 控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998

[2] 何克忠, 李伟. 计算机控制系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998

[3] 汤兵永, 路林吉, 王文杰. 模糊控制理论与应用技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002

[4] 李英顺, 伦淑娴. 模糊 PD 温度测控仪 [J]. 仪表技术与传感器, 2003(1): 20-22

[5] 刘益剑. 水轮机组调节的模糊控制算法研究 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2005 5(1): 35-38

[责任编辑: 严海琳]