

智能自整定 PID 在药剂温度控制系统中的应用

李敏远, 都延丽, 姜海鹏

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对一些工业控制对象中出现的纯时滞、大惯性、时变不确定性等问题, 提出了基于模糊逻辑来智能调整 PID 控制器参数的方法, 并且将其应用到了药剂温度控制系统当中。另外, 还给出了此方法的硬件和软件实现。最后, 实际系统的运行结果表明此方法能够降低被控量超调、提高控制精度并且增强系统的鲁棒性, 证明其在一类过程对象的应用中优于传统的 PID 控制方法。

关键词: 智能自整定 PID; 模糊 PID; 温度控制

中图分类号: TP273+.4 **文献标识码:** A

Application of intelligent self-tuning PID in temperature control system of medicament

LI Min-yuan, DU Yan-li, JIANG Hai-peng

(College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Shanxi Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at such problems as time delays, large inertia, uncertainties in some industrial control plants, an intelligent tuning method of PID controller with fuzzy logic which was used in a temperature control system of medicament was presented. Moreover, a realization of this method in hardware and software was also provided. Finally, the practical results after system running show that the controller can reduce large overshoot, increase control accuracy and make system effective in robustness to model uncertainties, meanwhile prove the superiority of this intelligent tuning method of PID controller over the classic one in the application of a kind of process plants.

Key words: intelligent self-tuning PID; fuzzy PID; temperature control

1 引言(Introduction)

在工业生产过程中, 被控对象常常存在着纯滞后、大惯性、时变不确定性等特征, 难以建立精确的数学模型^[1-3]。常规的 PID 调节器是一种普遍采用的控制方法, 它算法简单、可靠性高, 但其参数不能随着被控对象参数的变动而灵活地整定, 从而造成系统对运行工况的适应性很差, 不易达到良好的控制效果。智能控制的方法不要求掌握被控对象精确的数学模型, 同时控制方法多样、灵活、适应性强, 本文将智能控制和 PID 控制相结合, 构成智能型自整定 PID 控制器^[4,5]来解决上述问题, 并在实际系统中得以成功应用。

文中针对西安杨森制药公司非固体车间霜、液剂温度控制系统来阐述智能型 PID 在其中的应用和实现。

2 系统数学模型描述(System mathematical model statement)

医药生产行业中的霜、液剂温度控制系统的工艺简图如图 1 所示。其中的冷、热水介质流到加热罐的隔层来对罐内的药剂进行加热、冷却和保温等自动化控制。此系统性能指标为: 上升时间 ≤ 30 mins, 超调量 $\sigma_{\max} \% \leq 2\%$ 及稳态误差 $\leq 0.5\% T_{\text{设定}}$ 。

本系统中介质输送距离远, 被控对象存在着较大延迟。此外, 介质流到钢罐的隔层, 经钢罐的单层平壁导热后, 使罐内壁加热, 药剂温度的变化则靠壁面和药剂流体的对流传热实现^[6]。由于钢的热导率较大, 对象具有小惯性环节特征; 而药剂的热导率很小, 且经常会根据生产的需要发生改变, 这又使对象具有大惯性及时变不确定的特征。于是, 被控对象的数学模型近似为式(1)

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (1)$$

式中 K 为对象静态增益, τ 为时滞环节延迟时间, T_1

是钢壁传热小惯性环节时间常数, T_2 是经常变动的药剂传热大惯性环节时间常数. 可见, 本系统的被控对象是一个具有纯滞后、大惯性和参数不确定特征的工业对象, 应用常规 PID 控制器无法达到所要求的性能指标.

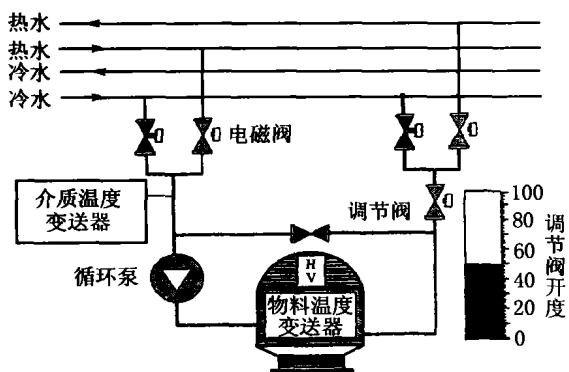


图1 系统工艺图

Fig. 1 The graph of system technics

3 控制器设计和实现 (Controller design and realization)

3.1 控制器设计 (Controller design)

模糊控制以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础, 它无需对象的精确数学模型. 如果把这种智能控制方法和 PID 控制结合起来, 则只需将操作人员 (专家) 长期实践积累的经验知识用控制规则模型化, 然后运用推理便可对 PID 的参数实现最佳调整. 结合本系统特点, 模糊 PID 控制原理如图 2 所示.

由于系统中被控对象呈现出大惯性的特征, 在控制初期被控量误差 e 的变化值 (Δe) 很小, 接近设定值时 Δe 又可能偏大, 模糊控制规则不易把握. T_m 作为控制药剂温度的媒介, 最终控制目的使 $T_{pv} = T_{sp} \approx T_m$ 以达到热平衡, 而被控对象近似二阶系统 ($T_2 \gg T_1$), 所以 T_m 带有 T_{pv} 的一阶和二阶微分的特性, $ec = T_{sp} - T_m$ 也就反映了 e 的变化和变化率, 同时 T_m 可以实时测量, 也便于利用专家经验来帮助制定模糊规则. 因此, 可以把 ec 作为模糊控制器的另一个输入量. 经过模糊推理对参数进行修正后, K_P , T_I , T_D 将不是 3 个固定值, 而是根据工况变化而自动调整的函数. 把它们表示为 $K_P = K_P[e(t)]$, $T_I = T_I[e(t)]$, $T_D = T_D[e(t)]$, 则 PID 控制器的输出如式 (2):

$$u = K_P[e(t)] \left\{ e(t) + \frac{1}{T_I[e(t)]} \int e(t) dt + T_D[e(t)] \frac{de(t)}{dt} \right\}. \quad (2)$$

经过分析, 设计模糊自整定 PID 控制器如下.

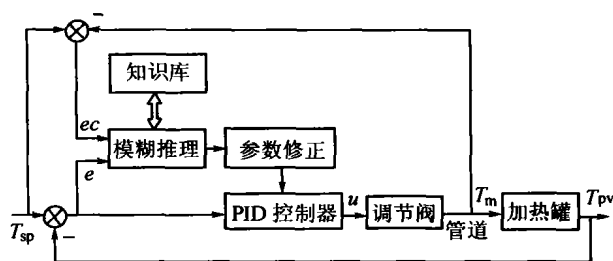


图2 模糊PID原理图

Fig. 2 Principle graph of fuzzy PID

其中, T_{sp} : 物料温度设定值; T_{pv} : 物料温度现在值; T_m : 介质温度现在值; u : PID 控制器输出.

3.1.1 模糊变量选取与子集划分 (Selection of fuzzy variables and fuzzy partition)

系统开始阶段应用开关控制使调节阀全开加热, 待药品完全融化并上升到一定温度后采用模糊 PID 来控制物料温度, 因此 PID 调节 T_{pv} 的范围在 $[T_{sp} - t_e, T_{sp} + t_e]$ 内, 介质温度 T_m 在 $[T_{sp} - t_{ec}, T_{sp} + t_{ec}]$ 内. 控制器采用目前广泛使用的二维模糊控制器. 模糊输入量选取 $E = T_{sp} - T_{pv}$, $EC = T_{sp} - T_m$, 模糊输出量选取 K_P , 则

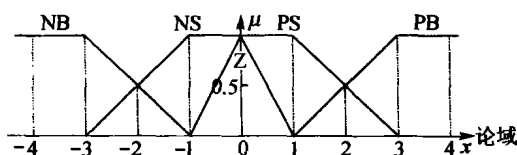
E 和 EC 的基本论域为 $[-t_e, t_e]$ 和 $[-t_{ec}, t_{ec}]$; E 和 EC 的模糊论域设为 $X_e = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$.

其中量化因子 $K_e = 4/t_e$, $K_{ec} = 4/t_{ec}$, 它们将 E 和 EC 从基本论域范围转换为模糊论域范围.

E 和 E_c 的模糊子集在其论域上有 5 个语言变量: NB, NS, Z, PS, PB, 其隶属函数取梯形函数, 如图 3 所示. 表 1 为模糊变量 E 和 EC 的隶属函数表.

表1 E 和 E_c 的隶属函数表Table 1 Membership function of E and EC

E	e								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
PB	0	0	0	0	0	0	0.5	1	1
PS	0	0	0	0	0	1	0.5	0	0
Z	0	0	0	0	1	0	0	0	0
NS	0	0	0.5	1	0	0	0	0	0
NB	1	1	0.5	0	0	0	0	0	0

图3 E 和 EC 模糊子集的隶属函数Fig. 3 Membership function of E and EC

3.1.2 制定模糊规则(Fuzzy rules)

为了达到预期的指标,需要根据系统的特征和实际运行情况(以升温为例)总结知识库即专家模糊规则:

规则1 运行前期($E = PB$),由于硬脂类药剂较难融化,可令 K_P 较大来提高温度响应的速度,但必须结合当时介质温度高低来做调整,例如介质温度靠近设定值($EC = PS$ 或 NS)时的 K_P 要较介质温度远离设定值($EC = PB$ 或 NB)时的小些,以防止大的超调。

规则2 运行中期($E = PS$), K_P 适中来兼顾稳定性和控制精度,介质温度对 K_P 的影响同规则1。

规则3 运行后期(E 接近为 Z), K_P 进一步减小来抑制超调。

规则的实现采用TS模糊模型,基于TS模型的规则具有以下形式^[5,7]:

$R: \text{if } x_1 \text{ is } A_1, x_2 \text{ is } A_2, \dots, x_n \text{ is } A_n,$

then $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n$. (3)

它的特点是规则的前件采用模糊量形式 A_i , 后件却采用精确量线性集结的形式,同一般模糊模型相比,更有利于信息的系统化表示和运算。对于单一的规则,TS模型表现为局部区域的一个线性映射,但随着多个规则间的互相重叠,TS模型实现了一种非线性映射。针对本系统,以 K_P 为例采用如下蕴含式

$$\begin{cases} \text{if } E \text{ is } A \text{ and } EC \text{ is } B, \\ \text{then } K_P = b_0 + b_1 |e| = g(e) (\text{取 } b_2 = 0). \end{cases} \quad (4)$$

其中, A, B 是 E 和 EC 的模糊子集。根据前述的专家规则和调试经验离线确定好 K_P 与 e 的各种关系,系统在线运行时根据 e 和 ec 的大小随时调整 K_P 数值,导出的模糊控制表如表2:

表2 K_P 模糊控制表

Table 2 Table of fuzzy control rules

K_P	E				
	PB	PS	Z	NS	NB
PB	$g_1(e)$	$g_1(e)$	$g_3(e)$	$g_1(-e)$	$g_1(-e)$
PS	$g_2(e)$	$g_2(e)$	0	$g_2(-e)$	$g_2(-e)$
EC	Z	$g_3(e)$	$g_4(e)$	0	$g_4(-e)$
	NS	$g_3(e)$	$g_3(e)$	0	$g_3(-e)$
	NB	$g_4(e)$	$g_4(e)$	$g_4(-e)$	$g_4(-e)$

其中, $g_1(e) = 0.5|e| + 4$, $g_2(e) = 0.75|e| + 2$, $g_3(e) = |e|$, $g_4(e) = 0.75|e|$ 。

以 $t_e = 8^\circ\text{C}$, $t_{ec} = 20^\circ\text{C}$ 为例(即量化因子 $K_e = 0.5$, $K_c = 0.2$),得到 K_P 变化曲线则如图4所示。

$e < 0$ 时, K_P 变化曲线与上图曲线关于 K_P 轴对称。

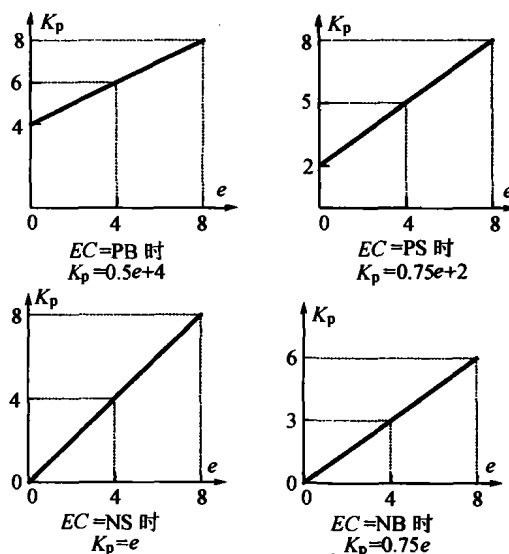


图4 K_P 变化曲线图

Fig. 4 Tuning graph of K_P

3.1.3 T_I 和 T_D 的整定(Tuning of T_I and T_D)

依据调试经验,运行前期不施加积分作用,适当加大微分作用,用以提高温度响应的速度;中期 T_I 适中、 T_D 数值减小来兼顾稳定性和控制精度;后期 T_I 适当减小、 T_D 更小以减少静差、抑制超调并减弱被控过程的制动作用。实际设计时为使程序简练, T_I 和 T_D 的调整选择了一维模糊控制器,具体过程从略。

3.2 控制器实现(Controller realization)

鉴于此药剂温度控制系统逻辑控制较多,故控制器选用了Siemens的S7-200 PLC。S7-200系列对于推理规则易于实现,并且具有PID运算指令,完全可以实现控制的要求。PLC配有CPU226、模入模块EM231、模出模块EM232。由EM231采集药剂和介质等温度信号,CPU程序进行处理并执行逻辑控制来决定各电磁阀和循环泵的开关,同时进行PID运算,经D/A转换后通过EM232模块输出4~20 mA电流信号控制调节阀开度在0%~100%变化。针对PLC程序设计的特殊性,可以写出模糊PID用PLC程序实现的流程图如图5所示。

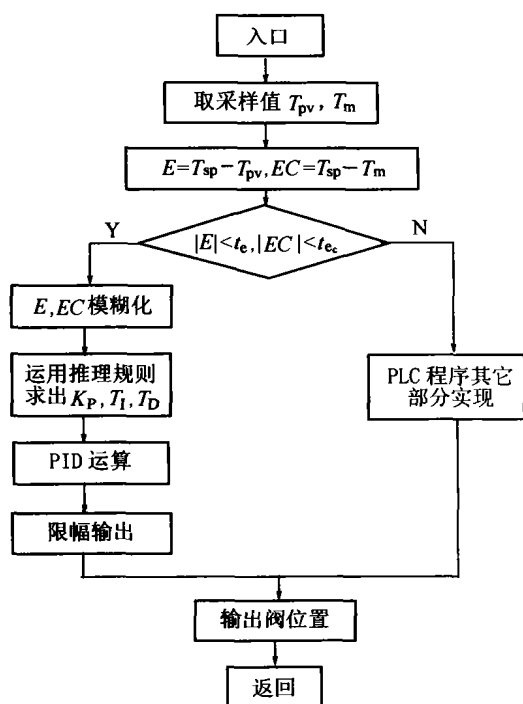
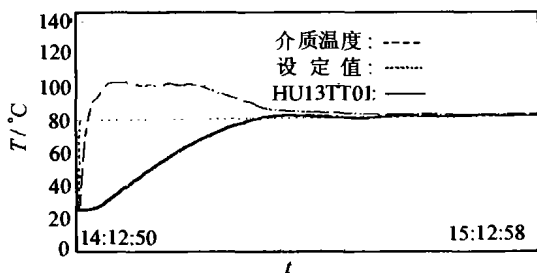


图5 模糊PID程序流程图

Fig. 5 Programming procedure of fuzzy PID

4 运行结果分析 (Analysis of running results)

由于系统采用了先进也较为成熟的可编程控制器+触摸屏的控制方式,所以可以应用触摸屏显示出温度曲线、历史趋势等信息.图6为被控药剂温度和介质温度变化的历史曲线(以升温为例,药剂为霜剂),它显示出了系统良好的控制效果.被控药剂温度超调量 $\sigma_{\max} \% = 1.5/80 < 2\%$, 稳态误差 $= 0.3^{\circ}\text{C} < 0.5\% \times 80^{\circ}\text{C}$, 本次运行升温时间 24 mins, 完全满足规定的性能指标.当温控药剂改变为热导率较大的液剂物料时,系统仍然可以实现温度的良好控制.由此可见,本控制系统也具有较的鲁棒性.



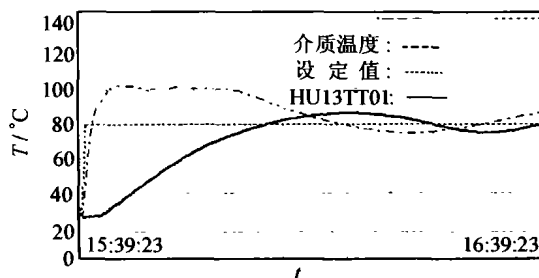
罐温现在值	HV13TT01	罐温设定值	介质温度
15:12:53	12/19/01 80.3	80.0	80.7
15:12:58	12/19/01 80.1	80.0	80.6

图6 智能PID调整温度历史资料图

Fig. 6 History temperature data graph of intelligent PID tuning

此外,图7还给出了调试初期使用普通PID参

数整定方法得到的PID参数 ($K_P = 4.5, T_I = 15, T_D = 0.15$) 调整系统后的历史曲线图. $K_P = 4.5$ 在运行初期对系统的快速升温效果不显著,但在接近设定温度时 K_P 又显得偏大,容易产生过调的现象.图中能够清楚看到药剂温度超调较大,有振荡,调整时间较长,难以满足系统的控制要求.改换药剂后, K_P 未能根据被控对象参数的变动而作出调整,控制效果更不理想.两图对比可知本系统设计的模糊自整定PID方法比常规PID具有更好的控制效果和优越性.



罐温现在值 HV13TT01	罐温设定值	介质温度
16:39:18 10/27/01 80.1	80.0	86.9
16:39:23 10/27/01 80.6	80.0	87.2

图7 PID调整温度历史资料图

Fig. 7 History temperature data graph of PID tuning

5 结束语 (Conclusion)

为了实现PID参数的自整定和良好的运行效果,文中将传统PID方法和模糊控制有效地结合起来构成了模糊自整定PID控制器.同时针对下位机PLC编程的习惯以及本系统水介质作为加热媒介的特点,模糊部分在变量选取和控制规则上又具有其特殊性.运行中的历史曲线显示出,此方法收到了良好的效果,实现了要求的控制指标,并具有一定的鲁棒性.实践证明,这种智能PID控制器和系统实际工况相结合设计达到了优良的控制品质,并可推广应用到具有类似特征的一类过程控制系统当中.

参考文献 (References):

- [1] SANTOS M, DEXTER A L. Temperature control in liquid helium cryostat using self-learning neurofuzzy controller [J]. *IEEE Proceedings - Control Theory & Applications*, 2001, 48(3): 233 - 238.
- [2] WANG Shuqing. *Advanced Control Technology and Application* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [3] WEI Jiangong, WANG Jiang, QI Jianling. Intelligent PID control algorithm and realization for temperature of class furnace [J]. *J of Tianjin University*, 2001, 34(1): 27 - 30.

(下转第810页)

缺少中间证明过程.其中需要用到如下不等式: $a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2 \geq n(\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n})^2$ 及一点(其中 $a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{N}$) 证明技巧.

最后,个人认为,文献[1]的结果并没有体现出自适应交叉、变异的作用机理,而且模式定理并不是一个恰当的分析交叉、变异作用机理的工具.首先,模式定理的证明过程的实质在于选择算子在起作用;交叉、变异的作用在于产生新的个体和新的模式,从证明过程来看,是在破坏已有模式,因而不能说明交叉、变异的机理.其次,要获得最优的可行解,必须保证较优解的样本数呈指数级增长^[2].修正后的模式定理^[3]只能说明具有平均适应值高于一定程度的模式的个体数将增加.从这一点上讲,采用模式定理分析 GA 的运行机理,尤其是交叉、变异算子的运行机理,不是一个有效的方法.

参考文献(References):

- [1] 陈长征,王楠.遗传算法中交叉和变异概率选择的自适应方法

及作用机理[J].控制理论与应用,2002,19(1):41-43.

(CHEN Changzheng, WAN Nan. Adaptive selection of crossover and mutation probability of genetic algorithm and its mechanism [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(1): 41-43.)

- [2] GOLDBERG D E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning* [M]. MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

- [3] 邢文训,谢金星.现代优化计算方法[M].北京:清华大学出版社,1999:149-152.

(XING Wenxun, XIE Jinxing. *Modern Algorithms on Optimization* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 149-152.)

作者简介:

高峰 (1978—),男,现为浙江大学控制系先进控制研究所硕士,目前主要从事遗传算法理论及应用研究, E-mail: fgao@ipc.zju.edu.cn;

荣冈 (1963—),男,教授,博士生导师,主要从事先进控制,过程优化,数据校正,数据挖掘,模糊控制与决策的理论和工程应用研究.

(上接第 808 页)

- [4] VISIOLI A. Tuning of PID controllers with fuzzy logic [J]. *IEE Proceedings—Control Theory & Applications*, 2001, 148 (1): 1-8.
- [5] LIU Guorong, YANG Xianhui. Fuzzy adaptative PID controller [J]. *Control and Decision*, 1995, 10(6): 558-562.
- [6] DAI Guosheng. *Study of Heat Transmission* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [7] ZHANG Enqin, SHI Songjiao, WENG Zhengxin. New type of parameters-varying PID control based on fuzzy rules [J]. *J of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(5): 630-634.

作者简介:

李敏远 (1957—),男,西安理工大学自动化与信息工程学院副教授.主要从事智能控制理论与应用以及电源技术的研究工作, E-mail: liminyuan@sohu.com;

都延丽 (1977—),女,西安理工大学自动化学院自动控制专业硕士研究生.主修方向为智能控制理论和应用;

姜海鹏 (1978—),男,西安理工大学自动化学院自动控制专业硕士研究生,主修方向为电源技术的应用研究.