推理合成法在炉温模糊控制系统中的应用

王文舜 万 睿
(北京航空航天大学 自动控制系)

摘 要 根据电阻炉温控制的特点,即只有升温单向控制、滞后较大且具有参数时变性,利用模糊推理合成法建立模糊模型并进行模糊控制器设计,为提高模糊控制的精度,引入模糊变量 K,构成参数自调整模糊控制系统.该系统可根据误差和误差变化在线自动调整控制器参数,使系统的稳态精度得到改善.

关键词 模糊控制; 控制系统; 电阻炉; 推理合成
分类号 TP 29

电阻炉温度控制具有以下特点: 温度控制的单向性即只有升温控制, 降温靠自然冷却; 一般这种对象可用 $G(S)=\frac{K}{TS+1}e^{-\tau S}$ 形式的传递函数来描述; 此外, 对象特性参数具有时变性.

对于这种被控对象, 若采用经典方法进行控制难于达到精度要求, 且参数的时变性要求系统有一定的适应能力.

根据上述特点, 我们采用模糊推理合成方法建立模糊模型进行模糊控制器的设计, 并在此基础上进行了模糊控制器的在线自调整算法设计, 提高了系统精度.

1 应用模糊推理合成法建立模糊模型

首先总结操作经验, 从较好的手动操作中提取 30 组输入输出数据对. 因一般加热炉不希望有超调存在, 所以控制策略既要保证快速性又要保证抑制系统超调. 相应地, 在过程处于升温阶段, 根据手动操作经验, 当误差大于设定值的 20% 时, 采用 ON-OFF 控制; 而在误差小于或等于设定值的 20% 时, 也即由升温转向趋于保温阶段采用模糊控制. 本系统要求温度稳定于+ 70℃, 根据手动策略确定误差 e 的基本论域为[-16℃, 16℃]; 误差变化 ec 的基本论域为[- 0.85, 3] (0.1℃/s); 控制量 u 的论域为[0%, 50%] (相应 D/A 输出电压为[0 V, 2.6 V]).

选取输入模糊变量为误差 E, 误差变化 EC, 输出模糊变量为控制量 U. k_e、k_{ec}和 k_u 分别为量化因子和比例因子, 定义为

$$k_e=\frac{n}{e} \qquad k_e=\frac{n}{\dot{e}} \qquad k_u=\frac{u}{n}$$

式中 n 为分档数. 确定误差的语言变量值为 $[NL, NS, NO, PO, PS, PL]$, 对应的论域

$$X=\{-5,-4,-3,-2,-1,-0,+0,+1,+2,+3,+4,+5\}$$

误差变化的语言变量值为[NL、NS、OK、PS、PL], 相应论域

$$Y=\{-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4\}$$

对控制量有[NL、NS、OK、PS、PL], 其论域

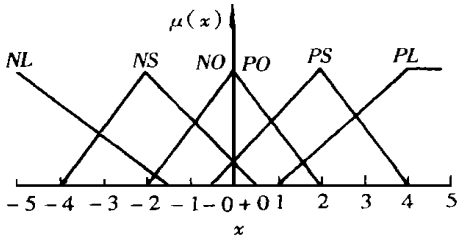
$$Z=\{-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5\}$$

对于各语言变量值, 需要确定其 Fuzzy 子集, 它由隶属函数描述. 图 1 为各语言变量隶属函数图, 本系统采用三角形隶属函数. 在确定各语言变量在其论域上的模糊集合后, 便可建立语言变量赋值表. 这里仅列出 E 的赋值表(表 1).

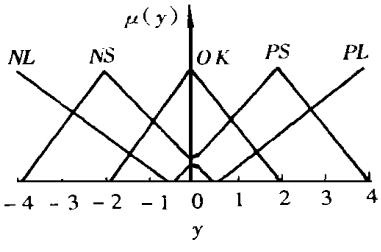
表 1 语言变量 E 的赋值表

量化等级	基本论域/℃	NL	NS	NO	PO	PS	PL
-5	$0\leqslant -16$	1.0					
-4	$-16< e\leqslant -12$	0.7	0.2				
-3	$-12< e\leqslant -8$	0.4	0.6				
-2	$-8< e\leqslant -4$	0.1	1.0				
-1	$-4< e\leqslant -1$		0.6	0.5			
-0	$-1< e\leqslant 0$		0.2	1.0			
+0	$0< e\leqslant 1$				1.0	0.2	
+1	$1< e\leqslant 4$				0.5	0.6	0.1
+2	$4< e\leqslant 8$					1.0	0.4
+3	$8< e\leqslant 12$					0.6	0.7
+4	$12< e\leqslant 16$					0.2	1.0
+5	$16< e$						0.8

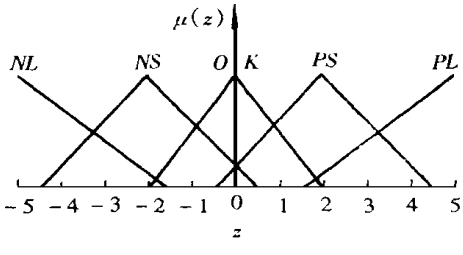
收稿日期: 1997-08-07 第一作者 女 58 岁 副教授 100083 北京



(a) 误差语言变量的隶属函数



(b) 误差变化语言变量的隶属函数



(c) 控制量语言变量的隶属函数

图 1 隶属函数图

应用推理合成法建立模糊模型的基本步骤:

1) 因系统输出是由 2 个模糊输入共同作用产生的, 所以应计算 2 个输入变量"交"运算的模糊关系 $\boldsymbol{R}_{E\times EC}$.

2) 根据 $\boldsymbol{R}_{E\times EC}$ 计算模糊输出 $U_i = [NL, NS, OK, PS, PL]$ 分别属于其各模糊子集 NL, NS, OK, PS, PL 的模糊关系, 即

$$\boldsymbol{R}_{O_j,i} = \mu_{O_j,i} \wedge \boldsymbol{R}_{E\times EC}$$

$$j = 1, \cdots, l \qquad i = 1, \cdots, m$$

式中 $\mu_{O_j,i}$ 为第 i 组模糊输入输出数据对求得的输出模糊子集 O_j 的隶属度, m 为输入输出数据对总数, l 为输出模糊子集数.

3) 将全部 m 组模糊输入输出数据对的推理结果加以合成, 即计算模糊关系

$$\boldsymbol{R}_{O_j} = \bigcup_{i=1}^{m} \boldsymbol{R}_{O_j,i}$$

$$j = 1, \cdots, l \qquad l = 5$$

4) 对上述结果进行水平截集处理, 当选定阈值 λ 之后(本系统选 $\lambda = 0.6$), 在 $\boldsymbol{R}_{O_j}$ 中记 $\geqslant\lambda$ 的元素为 1. $<\lambda$ 的元素为 0, 便得 λ 截关系矩阵 $\boldsymbol{R}_{O_j\lambda}(j = 1, \cdots, 5)$.

5) 用 Fuzzy 输出的相应 Fuzzy 子集 O_j 代替 $\boldsymbol{R}_{O_j\lambda}$ 中元素 1$(j = 1, \cdots, 5)$. 可得出 5 个$(l = 5)$ 相应输出模糊子集的控制规则表.

6) 将经过上述处理的 $\boldsymbol{R}_{O_j\lambda}(j = 1, \cdots, 5)$ 叠加构成一个 Fuzzy 关系总表, 也即模糊模型(见表 2).

以上计算均由计算机程序完成.

表 **2** 控制量的语言变量值(模糊模型)

误差的语言变量值	误差变化的语言变量值				
	NL	*NS*	*OK*	*PS*	*PL*
NL	*PL*	*PL*	*PL*	*PS*	*NL*
NS	*PL*	*PS*	*PS*	*NS*	*NL*
NO	*PL*	*PS*	*OK*	*NS*	*NL*
PO	*PS*	*PS*	*OK*	*NS*	*NL*
PS	*NS*	*NS*	*NS*	*NL*	*NL*
PL	*NL*	*NL*	*NL*	*NL*	*NL*

2 建立控制查询表

1) 根据模糊模型可得 30 条模糊条件语句组成的控制规则, 即

1 if $E_1 = NL$ and $EC_1 = NL$, then $U_1 = PL$

⋮

30 if $E_{30} = NL$ and $EC_{30} = PL$, then $U_{30} = NL$

该模糊模型中的每一条 Fuzzy 语句都决定一个 Fuxxy 关系, 即

$$\boldsymbol{R}_1 = [(NL)_E \times (NL)_{EC}]^{\mathrm{T}} \times (PL)_U$$

⋮

$$\boldsymbol{R}_{30} = [(PL)_E \times (PL)_{EC}]^{\mathrm{T}} \times (NL)_U$$

通过求"并"运算得总的模糊关系 $\boldsymbol{R}$, 即

$$\boldsymbol{R} = \bigcup_{i=1}^{30} \boldsymbol{R}_i$$

2) 通过计算建立查询表

当已知误差 e_i 为论域

$$X = [-5, -4, \cdots, -0, +0, \cdots, +4+5]$$

中的元素 x_i, 误差变化 ec_j 为论域

$$Y = [-4, \cdots, 0, +4]$$

中的元素 y_j, 则可根据系统模糊关系 $\boldsymbol{R}$, 应用推理合成法计算出相应控制量的模糊集合 U_{ij}, 再对其进行模糊判决, 可得论域

$$Z = [-5, \cdots, 0, \cdots, 5]$$

上的元素 z_k, 将 z_k 乘以比例因子 k_u 便得实际控制量. 对论域 X、Y 中全部元素的所有组合计算出相应的控制量 U_{ij}, 这些控制量可以构成矩阵 $[U_{ij}]_{12\times 9}$, 写成表格形式即为控制量查询表. 查询表通过离线计算得到, 其步骤为

(1) 将输入精确量模糊化, 即将输入精确量对应为相应论域的分档数, 将该量看作是模糊集合的一个特例, 即将该元素的隶属度定为 1, 其他为 0;

(2) 计算 E、EC 论域中所有分档组合对应的输出模糊集合, 即

$$U_{-5,-4} = [E_{-5} \times EC_{-4}]^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{R}$$

$$U_{-5,-3} = [E_{-5} \times EC_{-3}]^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{R}$$

$$\vdots$$

$$U_{5,4} = [E_5 \times EC_4]^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{R}$$

3) 采用加权平均法对输出模糊集合进行模糊判决, 即

$$z = \frac{\sum_{i=0}^{n} z_i \mu_U^2(z_i)}{\sum_{i=0}^{n} \mu_u^2(z_i)}$$

式中　$\mu_U(z_i)$ 是输出模糊子集中元素 z_i 的隶属度. 查询表计算程序框图见图 2, 查询表见表 3.

在实时控制中则通过查询该表得出控制量的量化等级, 再乘以比例因子 k_u 即得实际加于 D/A 的控制量. 图 3 为升温过程实时控制曲线, 控制结果表明, 模糊推理合成法建立模糊模型和进行模糊控制器设计可以取得满意的控制效果. 其不足之处是过程稳态时有微小幅度的振荡.

表 **3**　控制量的量化等级查询表

误差的量化等级	误差变化的量化等级								
	−4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4
−5	5	4	5	4	4	3	1	−2	−4
−4	4	4	4	4	3	2	0	−2	−4
−3	4	3	3	2	2	0	−1	−2	−4
−2	4	3	2	2	2	0	−2	−3	−4
−1	4	3	3	1	1	0	−3	−3	−4
−0	4	3	2	1	0	−1	−2	−3	−4
+0	2	2	1	0	0	−2	−4	−4	−4
+1	0	0	−1	−1	−1	−2	−4	−4	−4
+2	−2	−2	−2	−2	−2	−3	−4	−4	−4
+3	−3	−3	−3	−3	−3	−3	−4	−4	−4
+4	−4	−4	−4	−4	−4	−4	−5	−4	−5
+5	−4	−4	−4	−4	−4	−4	−4	−4	−4

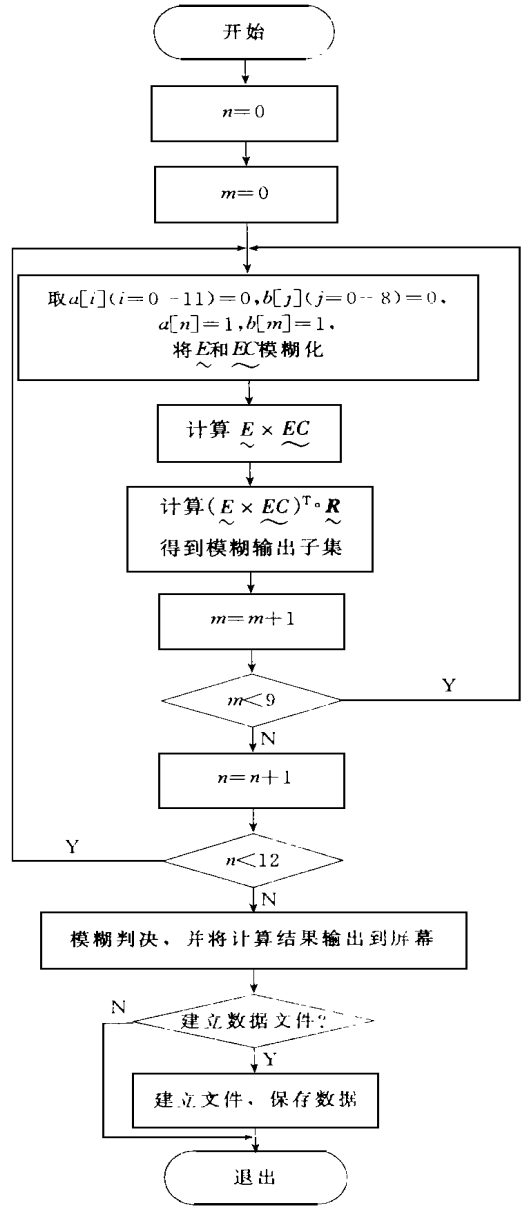


图 2　查询表计算程序框图

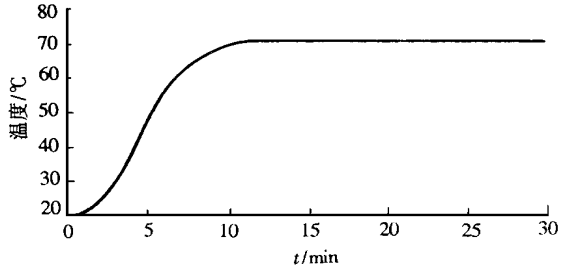


图 3　升温实时控制曲线

3　模糊控制器参数在线自调整

由前述可知模糊控制器的控制方式为对输入

变量通过分档量化, 输出也为一系列阶梯形信号, 因此控制精度较低. 若分档过细, 则模糊控制器设计计算工作量大; 若分档较粗, 虽可使计算量减少, 但又使控制精度降低. 为了解决这个问题, 可以在误差和误差变化较大时, 采用较小的量化因子 k_e 和 k_{ec} 及较大的比例因子 k_u, 也即进行"粗调"控制, 降低对 e 和 $\dot{e}$ 的分辨率, 而控制量较大; 当误差或误差变化较小时, 采用较大的 k_e 和 k_{ec} 以及较小的 k_u, 即接近稳态时采取"细调"控制, 提高对 e 或 $\dot{e}$ 的分辨率, 而控制量较小. 这也相当于在分档数不变情况下论域缩小细分, 从而达到提高精度的目的. 参数自调整模糊控制系统框图见图 4 所示.

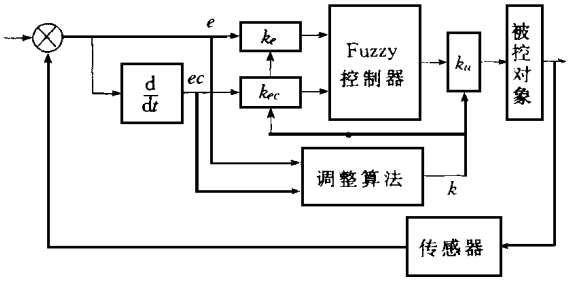


图 4 参数自调整模糊控制系统框图

参数自调整算法设计的思路和方法如下:

由于本系统 e 和 ec 的论域范围不宽, 所以论域不再放大, 仅取论域缩小策略, 增选一个模糊变量"调整量 K", 其基本论域 k 用以对 k_e、k_{ec} 进行相乘运算, 对 k_u 进行相除运算, 该语言变量值选定为"不变"和"缩小". 相应论域分为 3 档, 即 $[0, 1, 2]$, 当其为 0, 对应调整量为 1, 则 k_e、k_{ec} 不变; 当分档数分别为 1 或 2 时, 对应 k 为 1.5 或 2, 也即 k 为 k_e、k_{ec} 增大和 k_u 减小的倍数, K 的语言变量赋值表见表 4.

表 **4** 语言变量 ***K*** 的赋值表

分档数	调整量 k	不变	缩小
0	1.0	1.0	
1	1.5	0.5	0.3
2	2.0		1.0

根据当误差和误差变化较大时论域不变, 当误差和误差变化较小, 系统接近稳态时缩小论域并适当减小控制量的原则, 确定修改规则表见表 5.

然后应用本文前面所述推理合成方法计算出调整量 k 的查询表(见表 6).

计算过程与控制量的查询表计算过程完全相同, 我们只需将原输出控制量的赋值表换成为调整量 K 的赋值表, 将原控制规则换成为修改规则即可.

表 **5** 修改规则表

误差的语言变量值	误差变化的语言变量值				
	NL	*NS*	*OK*	*PS*	*PL*
NL	不变	不变	不变	不变	不变
NS	不变	不变	不变	不变	不变
NO	不变	缩小	缩小	缩小	不变
PO	不变	缩小	缩小	缩小	不变
PS	不变	不变	不变	不变	不变
PL	不变	不变	不变	不变	不变

表 **6** 调整量查询表

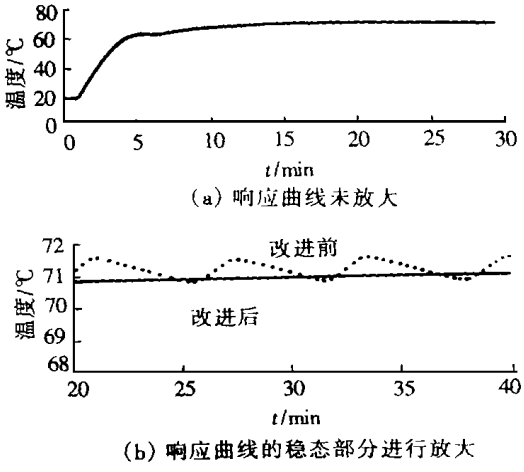
误差的量化等级	误差变化的量化等级								
	−4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4
−5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
−4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
−3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
−2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
−1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
−0	0	1	2	2	2	2	2	1	0
+0	0	1	2	2	2	2	2	1	0
+1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

程序中的实际计算过程: 先对采样值 e 和 ec 进行如前所述的量化, 然后查询调整量 k 的查询表, 得出所需 k 的分档数, 进而按表 4 可得调整量 k, 计算

$$k_e' = k_e \cdot k,\quad k_{ec}' = k_{ec} \cdot k$$

并使用修改后的 k_e' 与 k_{ec}' 重新对 e 和 ec 进行量化, 再根据此量化值查原查询表得到输出量 u, 利用修改后的 k_u' 对 u 进行调整后输出.

对改进前后的模糊控制系统进行仿真比较, 可以看出采用参数在线自调整模糊控制器的系统克服了原系统稳态下的微小幅度振荡, 提高了系统稳态精度(图 5 为仿真曲线). 图 5(a) 可看出两种情况响应曲线是重合的, 图 5(b) 将系统稳态部分曲线进行放大, 则可见改进前系统稳态下存在小幅度振荡(图 5(b) 中虚线), 而引入参数自调整后上述现象完全被克服(图 5(b) 中实线).



……改进前; ——改进后

图 5　改进前后模糊控制系统仿真曲线

4　结 束 语

本文将以模糊集合论为基础的模糊推理合成法应用于建立模糊模型和模糊控制器设计及其参数的自调整算法设计, 取得了很好的控制效果. 参数自调整算法虽增加了一个模糊变量, 而实时程序运行时只需增加一个调整量 k 的查询表, 计算机实现简单方便, 调整量 K 的赋值表可根据需要设置. 此法可使系统精度得到提高, 对其它温度模糊控制系统也具有较好的实用价值.

参 考 文 献

1　余永权, 曾　碧. 单片机模糊逻辑控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995

2　李友善. 模糊控制理论及其在过程控制中的应用. 北京: 国防工业出版社, 1993

3　王　磊. 模糊控制理论及应用. 北京: 国防工业出版社, 1997

4　肖　军, 王金章. 模糊控制在轧机厚度自动控制系统中的应用. 控制与决策, 1993, 8(3): 213~ 217

5　贾　磊. 用论域缩小逼近法消除模糊控制器的余差. 信息与控制, 1995, 24(4): 251~ 255

Application of Fuzzy Inference Compound Method to Resistance Furnace Temperature Control System

Wang Wenshun　Wan Rui

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Automatic Control)

Abstract　According to the characterestic of resistance furnace temperature control, temperature rising one-way control, large time delay and time-variation of parameter, using method of fuzzy compositional rule of inference establish fuzzy model and design fuzzy cntroler. In order to increase control system precision, it gives a fuzzy variable K, and sets parameter self-adjusting fuzzy control system. This system can on line self-adjusting controller parameters according to the error and variations of the error. It makes the system steady precision improved.

Key words　fuzzyy modals; control systems; resistance furnaces; rational synthesis