

青岛科技大学自动化与电子工程学院 赵彤 张震

摘要：针对工业玻璃钢化炉温度控制系统中存在的非线性、时变时滞、变量间关联严重、扰动复杂和被控对象难以建模等特性，传统控制方法难以满足控制要求。对这类复杂的控制系统，运用模糊控制算法可以克服传统控制的缺陷和不足，发挥其优越的性能。运用MATLAB对被控对象的仿真结果表明，模糊控制算法能很好的适应具有非线性，时变性特点的不确定性系统，对这类系统具有优越的控制性能。

文章编号：140103

模糊算法在玻璃钢化炉中的应用设计和仿真

The application of fuzzy algorithm in the glass tempering furnace design and simulation

1 引言

钢化玻璃（Tempered glass）作为安全玻璃，具有耐冲击、抗弯曲、热稳定性好且在破碎时变成小碎块，不易对人体造成伤害等优点，被广泛应用于高层建筑、玻璃护栏、动车车窗等对玻璃安全和质量要求较高的地方。

钢化炉是对玻璃进行钢化处理最重要的设备，其中钢化过程中的冷却阶段，是钢化过程中非常重要的环节，其冷却温度的控制直接影响到钢化玻璃的品质，控制不好甚至会出现玻璃的破碎。因此，冷却过程中冷却的温度是一个重要的控制参数。

2 研究背景

钢化炉冷却阶段炉温的调节采用的是风冷技术，即通过风机送冷却风的方式对钢化玻璃进行降温处理。由于冷却阶段有诸多不确定因素，如冷却风的温度会随外界发生变化、玻璃厚度也会随钢化的不同阶段发生变化等。目前，冷却阶段的温度控制主要采用人工操作和PID相结合的方式为主。人

工调节虽然能把温度控制在合理的区间内，但受人为因素影响较大，且很难达到高标准控制；PID控制虽具有简单易行的特点，但PID控制对控制对象模型的依赖程度较大，而且只有在系统的各项参数保持基本不变的条件下才能满足控制要求。而实际却是一个参数随动、参数耦合的不确定性系统，因此PID很难达到精准控制。模糊控制，则是智能控制领域中的一个分支，由其对被控制对象参数、结构变化不敏感、不需要建立被控对象的数学模型、鲁棒性好等特点，在控制领域占有相当重要的作用。其运用操作者经验、知识或操作数据对被控对象进行控制，具有动态响应快、超调小等优点，特别对动态时变系统、非线性系统、大时滞系统等复杂的系统具有很好的控制优势。

3 模糊控制系统

模糊控制（Fuzzy Control）是以模糊集合论，模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的智能控制方式，延续了传统控制思想，由被控对象、模糊控制器、执行器和反馈环节组成，如图1所示。

【相关链接】
<http://www.chuandong.com/tech/detail.aspx?id=24422>

模糊控制

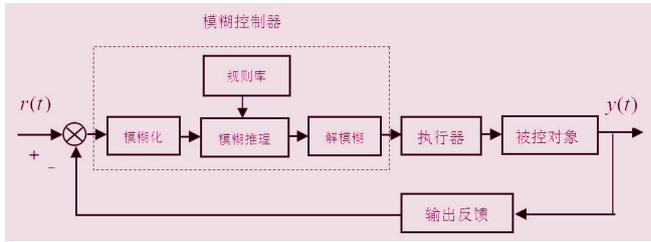


图1 模糊控制系统结构图

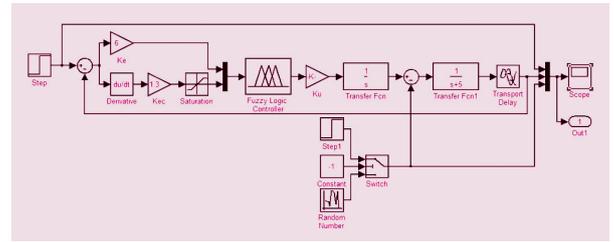


图8 扰动仿真结构图

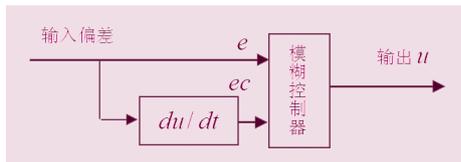


图2 二维模糊控制器结构

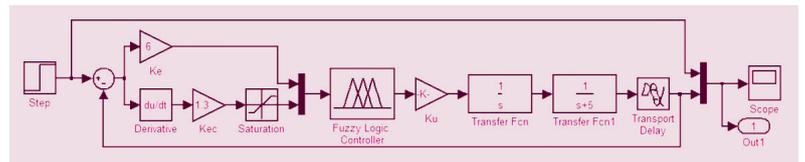


图6 仿真结构图

3.1 模糊控制器

模糊控制器是模糊控制系统的核心，它取代了传统控制系统控制器的位置，经过输入量的模糊化、模糊推理、输出解模糊得到模糊控制量u。根据输入变量个数，模糊控制器可分为一维模糊控制器、二维模糊控制器和 multidimensional 模糊控制器。工程中一般采用将偏差e和偏差变化率ec作为模糊控制器输入的二维模糊控制器结构，如图2所示。

3.2 模糊控制算法

模糊控制算法是建立在模糊数学上的一种控制算法，由普通集合的二值逻辑{0,1}—属于和不属于扩展到区间的连续取值，因此某个元素属于某个集合的概念就有了程度这个概念，用隶属度函数表示： $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ ，其中A为任一模糊集，它表示元素x属于模糊集合A的“程度”或“资格”。

模糊判断需要根据程度近似表示：

前提1：如果x是A，那么y是B

前提2：x是A'

结论：x是B'

其中A', B'是A和B的近似值。

$$B' = A' \circ (A \rightarrow B) = A' \circ R \quad (1)$$

式中：为模糊蕴含关系，为合成运算符子

$$R = (A \times B) \quad (2)$$

隶属度函数为：

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \quad (3)$$

对有m个元素的模糊集合A= {x₁, x₂, x₃, ..., x_m}，有n个元素的模糊集合B={y₁, y₂, y₃, ..., y_n}，就可以得到m × n的模糊关系矩阵

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \begin{bmatrix} \mu_{A \rightarrow B}(x_1, y_1) & \mu_{A \rightarrow B}(x_1, y_2) & \cdots & \mu_{A \rightarrow B}(x_1, y_n) \\ \mu_{A \rightarrow B}(x_2, y_1) & \mu_{A \rightarrow B}(x_2, y_2) & \cdots & \mu_{A \rightarrow B}(x_2, y_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{A \rightarrow B}(x_m, y_1) & \mu_{A \rightarrow B}(x_m, y_2) & \cdots & \mu_{A \rightarrow B}(x_m, y_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

模糊控制中用得最多的是Max - Min合成法：

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_{x \in X} \{ \mu_{A'}(x) \wedge [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \} \quad (5)$$

3.4 模糊规则建立

冷却过程中设定炉温为s(t)和实际检测到的炉温为y(t)，则偏差和偏差变化率：

$$e = s(t) - y(t) \quad (6)$$

$$ec = e(t_2) - e(t_1) \quad (7)$$

式中：t₁、t₂为相邻两个采样时间点

将e和ec模糊控制控制器输入，控制输出量为。其相应的模糊论域E、EC、U设为，覆盖模糊论域的模糊子集为{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}记为：{NB、NM、NS、ZE、PS、PM、PB}

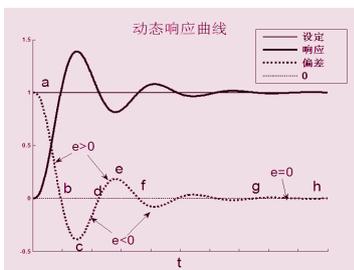


图3 动态响应曲线

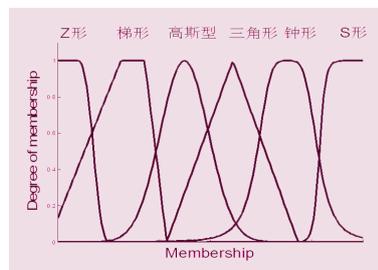


图4 隶属度函数

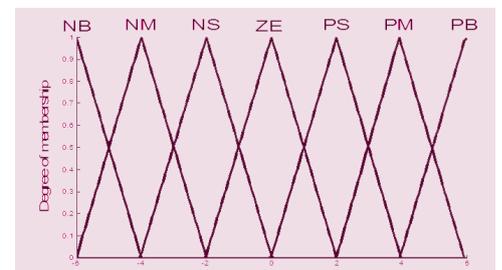


图5 E EC U模糊子集隶属度函数

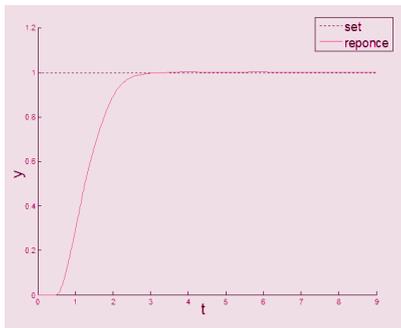


图7 仿真结果曲线

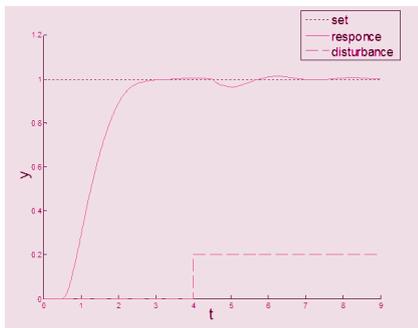


图9 20%干扰仿真曲线

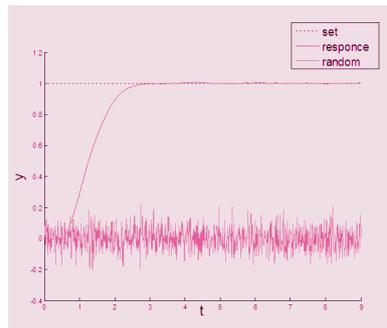


图10 随机干扰仿真曲线

PS、PM、PB}。模糊子集数目的选择不能太少但也不能过多，数目太少会减弱控制精度，数目过多会使运算过程变得复杂，一般选取3-10个为宜。

对如图3所示的动态响应曲线：

相应的操作经验可归纳如表1所示

基于以上操作经验和模糊子集的划分，控制规则采用If e is NB and ec is NB, then u is PB-Mamdani模糊形式，即b-c段，可得出49条控制规则，如表2所示。

3.4 隶属度函数、解模糊的设定

在工程应用中，最常用的几种隶属度函数为：三角形、梯形、钟形、高斯型、S形和Z形等，论域中间的模糊子集，多选用对称的隶属度函数，而左右边界的隶属度函数多选用边界变化缓慢

的隶属度函数，设计中输入和输出模糊子集的隶属度函数均采用三角形函数，如图4、图5所示。

4 模糊控制系统的MATLAB仿真

玻璃钢化炉是一个较为复杂的工业控制对象，冷却过程中通过冷却风的鼓入调节冷却过程的温度，具有时滞性、非线性、惯性、时变等因素的影响，因此很难建立其准确数学模型，一般采用简化的数学模型：

$$G_0(s) = \frac{1}{S(S+5)} e^{-\tau_0 s} \quad (8)$$

其中 τ_0 为滞后时间常数。比例因子 $K_e=6$ ， $K_{ec}=1.3$ ，量化因子 $K_u=-0.85$ ， $\tau_0=0.5$ 。

对系统的仿真主要是观测输入信号经过系统前后的变化，从而了解控制系统的控制性能，采取阶跃信号作为系输入，推理算法采用系统默认的Max-Min合成法，解模糊方法采用面积中心法，仿真采用固定步长 $t=0.01$ ，如图6、图7所示。

在 $t=4s$ 时加入20%的干扰和对系统加入随机干扰噪声仿真结果，如图8、图9和图10所示。

仿真结果表明，采用参数设置合理模糊控制算法，不仅动态响应曲线好，还具有超调量小、响应速度快、系统稳态精度高等优点，另外在遇到干扰扰动时，能克服噪声扰动影响，控制质量高，鲁棒性好。

5 结论

对具有非线性、时滞等特点的复杂系统，模糊控制具有超调小，响应快，稳态精度高的特点，对扰动的干扰具有很好的鲁棒性和适应能力，能保持较高的控制质量，具有明显的理论和实际应用价值。

控制与传动

阶段	响应曲线变化	经验规则
a-b	$>0, <0$ 实际温度低于被控温度且曲线趋于收敛	开度逐渐减小
b-c	$<0, <0$ 实际温度高于被控温度且曲线趋于发散	开度快速增大
c-d	$<0, >0$ 实际温度高于被控温度且曲线趋于收敛	开度适当增大
d-e	$>0, >0$ 实际温度低于被控温度且曲线趋于发散	开度快速减小
e-f	$>0, <0$ 实际温度低于被控温度且曲线趋于收敛	开度适当减小
g-h	$=0, =0$ 实际温度等于被控温度且曲线趋于稳定	开度不变

表1 变化趋势和操作

温度偏差	偏差变化率						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	NS
NS	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NB	NB
PB	ZE	NS	NM	NB	NB	NB	NB

表2 模糊控制规则表