

# FUZZY 控制规则的自生成 及其自校正方法<sup>1)</sup>

胡少华 刘少民  
(北京科技大学自动化系)

## 摘 要

本文研究了: 1) 以被控对象规则模型为依据自动生成 Fuzzy 控制器规则的新方法; 2) 其相应的自校正 Fuzzy 控制方法。最后以一实验室电加热炉温控实例说明它们的可行性和有效性。

**关键词:** 模糊控制, 规则, 模型自生成。

## 一、引 言

Fuzzy (模糊)控制器采用“if……then……”形式的控制规则。以往,这些规则大都通过总结经验来获取。实践表明,这种经验控制器对某些复杂或难于精确定义的系统具有较好的适用性<sup>[1]</sup>,同时它也有着不足: 1) 经验的获取有时会遇到困难; 2) 难于保证较优的控制规则; 3) Fuzzy 控制闭环系统没有统一的数学方法来描述。

鉴此,本文采用一种新的 Fuzzy 控制规则模型的自生成方法,即由被控对象的 I/O 数据建立被控对象的规则模型<sup>[2]</sup>,再在此模型的基础上自动生成控制器的规则模型。

## 二、控制规则的自生成及自校正

下文涉及到可能性测度、论域标准 Fuzzy 划分、Fuzzy 近似表示这三个概念,详见文献[2]。

### 1. 被控对象模型描述

设 SISO 被控对象,其 I/O 论域分别为  $U/X$ , 定义如下标准 Fuzzy 划分:

$U: u_1 u_2 \cdots u_r$ , 其中  $u_i \in F(U)$ ,  $i \in I \triangleq \{1, 2, \cdots, r\}$ .

$X: x_1 x_2 \cdots x_{r_0}$ , 其中  $x_i \in F(X)$ ,  $i \in I_0 \triangleq \{1, 2, \cdots, r_0\}$ .

该对象的规则模型采用下式描述:

$$X(t+1) = X(t) \circ X(t-1) \circ U(t-k+1) \circ W, \quad (1)$$

本文于 1990 年 1 月 15 日收到。

1) 国家自然科学基金资助项目。

其中  $X(\cdot) \in F(\mathbf{X})$ ,  $U(\cdot) \in F(\mathbf{U})$ ;  $k, l$  为结构参数; “ $\circ$ ” 为合成算子;  $\mathbf{W}$  为  $r_0 \times r_0 \times r \times r_0$  维的权重矩阵, 其非零元素  $W(i_1 i_2 i_3 i)$  对应规则:

$$\text{if } X(t) \text{ is } x_{i_1} \text{ and } X(t-1) \text{ is } x_{i_2} \text{ and } U(t-k+l) \text{ is } u_{i_3} \text{ then } X(t+l) = W(i_1 i_2 i_3 j) \circledast x_j, \text{ 其中 } \circledast \text{ 取 } \cap \text{ 或 } \text{prod.}$$

### 2. FUZZY 控制规则模型自生成

假设控制目标为  $X_{opt.}, X_{opt.} \in F(\mathbf{X})$ . 考虑对象模型(1), 本文定义 Fuzzy 控制规则模型如下:

$$U(t-k+l) = X(t) \circ X(t-1) \circ \mathbf{V} \tag{2}$$

其中  $U(\cdot), X(\cdot)$  分别为控制器的输出、输入变量;  $\mathbf{V}$  为控制器的权重矩阵; 参数  $k, l$  及算子“ $\circ$ ”在式(1)中业已确定. 自生成 Fuzzy 控制系统的框图见图 1. 于是, 控制规则自生成的关键就是通过对对象规则模型(1)获取一合适的控制器权重矩阵  $\mathbf{V}$ , 使在  $t$  时刻被控对象输出的任意状态下, 控制器能产生一控制量使  $t+l$  时刻的被控对象的输出能趋于给定控制目标  $X_{opt.}$ . 为此, 定义一权重指标

$$v \triangleq \text{poss}[X(t+l) | X_{opt.}], \tag{3}$$

即

$$v = \text{poss}[X(t) \circ X(t-1) \circ U(t-k+l) \circ \mathbf{W} | X_{opt.}]. \tag{4}$$

将权重指标  $v$  在被控对象输入为  $X(t) = x_i, X(t-1) = x_j, U(t-k+l) = u_m$  时的取值作为矩阵  $\mathbf{V}$  的元素  $V(i j m)$ , 即

$$\begin{aligned} V(i j m) &= \text{poss}[x_i \circ x_j \circ U_m \circ \mathbf{W} | X_{opt.}] \\ &= \text{poss} \left[ \bigcup_{n=1}^{r_0} (W(i j m n) \circledast x_n) | X_{opt.} \right]. \end{aligned} \tag{5}$$

当被控对象输入取遍各论域中所有的标准 Fuzzy 集时, 可得  $r_0 \times r_0 \times r$  维的权重矩阵  $\mathbf{V}$ .

这一自生成方法实质上是将被控对象的输出相对于控制目标的可能性测度视为控制量相对于其论域上标准 Fuzzy 集的可能性测度. 于是,  $V(i j m)$  对应于这样一条控制规则:

$$\text{if } X(t) = x_i \text{ and } X(t-1) = x_j \text{ and } X(t+l) = X_{opt.} \text{ then } U(t-k+l) = V(i j m) \circledast u_m.$$

利用整个权重矩阵可获如下推理:

当  $X(t) = x_i, X(t-1) = x_j$  时, 控制量  $U(t-k+l) = \bigcup_{m=1}^r [V(i j m) \circledast u_m]$  能使  $X(t+l) = X_{opt.}$ .

对于 Fuzzy 控制器(2), 当其输入  $X(t) = A, X(t-1) = B, \forall A, B \in F(\mathbf{X})$  时, 其输出为

$$U(t-k+l) = \bigcup_{i_1 \in \lambda_1} \bigcup_{i_2 \in \lambda_2} \bigcup_{j \in I} [P_{1j_1} \circledast P_{2j_2} \circledast V(j_1 j_2 j) \circledast u_j], \tag{6}$$

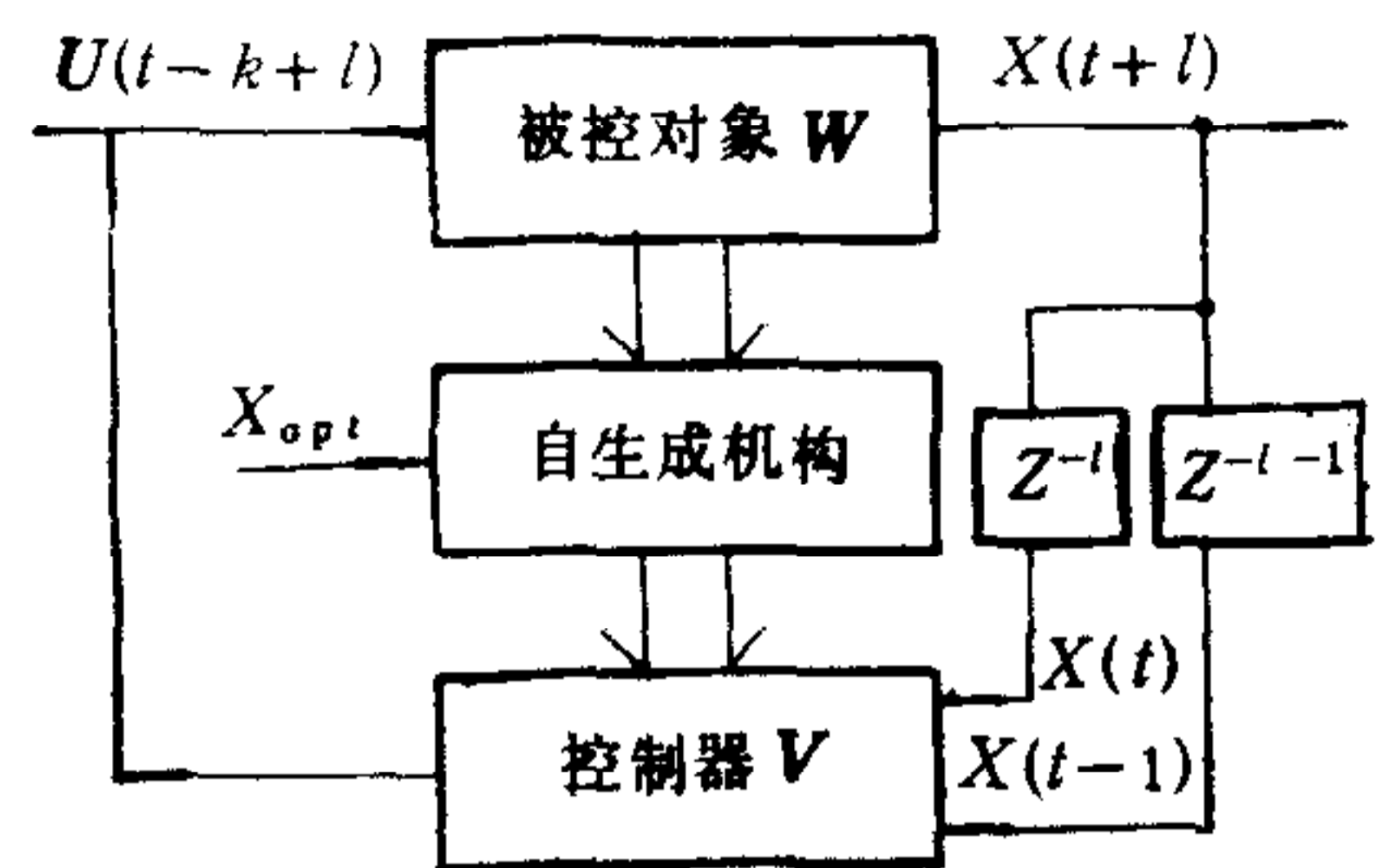


图 1 自生成 Fuzzy 控制系统



其中  $P_{1i} = \text{poss}[x_i|A]$ ,  $P_{2i} = \text{poss}[x_i|B]$ ,  $\forall i \in I_0$ ;  $\lambda_1 \triangleq \{j_1 | p_{1j_1} > q, j_1 \in I_0\}$ ,  $\lambda_2 \triangleq \{j_2 | p_{2j_2} > q, j_2 \in I_0\}$ ,  $q > 0$ . 实际过程中, 再对  $U(t-k+l)$  进行 Fuzzy 判决.

需要说明的是, 自生成控制器(2)是将  $U(t-k+l)$  视为  $U(t)$  而进行控制的, 是一种近似.

### 3. 控制规则模型自校正

控制规则模型自校正实际是优化  $V$  矩阵, 步骤如下:

1) 运行矩阵为  $V^{(t-1)}$  的原控制器, 采样  $t$  时刻的 I/O 数据  $[x(t), u(t)]$ , 并计算  $[e(t), c(t)]$ .  $e(t)$  为对象输出与控制目标间的误差,  $c(t)$  为误差的变化;

2) 选定适当修正函数  $f_1$  和  $f_2$ . 将控制器原 I/O 关系:  $x(t), x(t-1) \rightarrow u(t-k+l)$  修改为  $x(t), x(t-1) \rightarrow u'(t-k+l) \triangleq u(t-k+l) \cdot f_1[e(t)] \cdot f_2[c(t)]$ ;

3) 定义  $\Delta(t) \triangleq |1 - f_1[e(t)]f_2[c(t)]|$ . 指定  $\varepsilon > 0$ , 当  $\Delta(t) \leq \varepsilon$  时, 不作修正,  $V^{(t-1)} \rightarrow V^{(t)}$ ; 当  $\Delta(t) > \varepsilon$  时, 用数据组  $x(t), x(t-1) \rightarrow u'(t-k+l)$  来修正  $V^{(t-1)}$ , 过程为

(a) 求

$$Z^{(t)}(j_1 j_2 j) = \begin{cases} P_{1j_1}^t * P_{2j_2}^t * P_j^t, & \text{当 } j_1 \in \lambda_1, j_2 \in \lambda_2, j \in \lambda, \\ 0, & \text{其余,} \end{cases} \quad (7)$$

$$\forall j_1, j_2 \in I_0, j \in I.$$

其中  $P_{1j_1}^t = \text{poss}[x_{j_1}|x(t)]$ ,  $P_{2j_2}^t = \text{poss}[x_{j_2}|x(t-1)]$ ,  $P_j^t = \text{poss}[u_j|u'(t-k+l)]$ ;  $\lambda \triangleq \{j | p_j^t > q, j \in I\}$ .

(b) 求

$$\tilde{V}^{(t)}(j_1 j_2 j) = \begin{cases} \alpha_j Z^{(t)}(j_1 j_2 j) + (1 - \alpha_j) V^{(t-1)}(j_1 j_2 j), & \text{当 } j_1 \in \lambda_1, j_2 \in \lambda_2, j \in \lambda, \\ V^{(t-1)}(j_1 j_2 j), & \text{其余.} \end{cases} \quad (8)$$

其中  $\alpha_j \triangleq \Delta \cdot h$ ,  $h > 0$  且保证  $\alpha_j \in [0, 1]$ .

(c) 由下式求新矩阵  $V^{(t)}$ :

$$V^{(t)}(j_1 j_2 j) = [\tilde{V}^{(t)}(j_1 j_2 j)] \vee [V^{(t-1)}(j_1 j_2 j)], \quad (9)$$

$$\forall j_1, j_2 \in I_0, j \in I.$$

这样, 控制器控制过程中每采样一次就可对控制器规则模型进行一次修正.

## 三、实例及结果分析

图 2 是一个电加热炉温度计算机 Fuzzy 控制系统.  $u(t)$  为直流控制电压,  $x(t)$  为电炉输出温度.  $u(t) \in [0, +6]V$ ,  $x(t) \in [45, 387]^\circ C$ . 选择  $T_s = 10s$ .  $r_0 = r = 7$ , 得对象模型为 ( $k=2, l=1$ , “ $\circ$ ” = “ $\nu - \cdot$ ”)

$$X(t+1) = X(t) \circ X(t-1) \circ U(t-1) \circ W \quad (10)$$

$W$  为  $7 \times 7 \times 7 \times 7$  维矩阵.

要求控制目标为  $x_{opt} = 200I(t)^\circ C$ , 自生成控制器模型为

$$U(t-1) = X(t) \circ X(t-1) \circ V, \quad (11)$$

$V$  为  $7 \times 7 \times 7$  维的权重矩阵, 其余部分元素见表 1.  $V$  中任一非零元素如  $V(3\ 2\ 4) = 0.0402$  对应规则: if  $X(t) = x_3$  and  $X(t-1) = x_2$  then  $U(t-1) = 0.0402 \circledast u_4$ , 控制

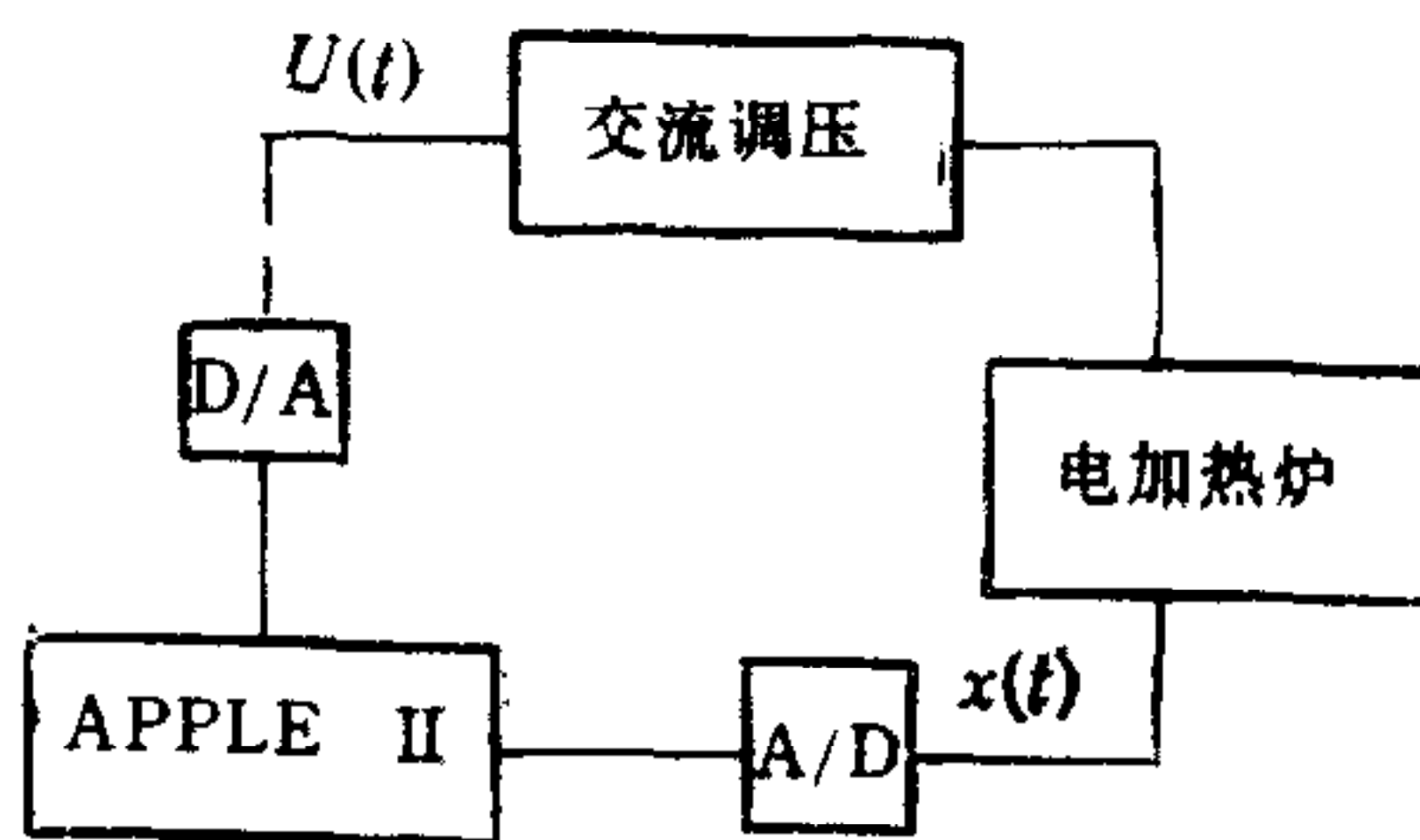


图 2 电炉温控系统简图

系统的温度响应曲线见图 3(a)。利用自校正方法两次修正  $V$  阵, 分别获得如图 3(b, c) 所示的温度响应曲线。各曲线的控制品质列于表 2。

表 1 权重矩阵  $V$  (部分)

$x_i$	$x_j$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$
3	1	0.0000	0.0000	0.0169	0.0394	0.0000	0.0000	0.0000
3	2	0.0261	0.0261	0.0391	0.0402	0.0335	0.0000	0.0000
3	3	0.1198	0.1916	0.0954	0.1447	0.1034	0.1013	0.0113
3	4	0.0656	0.0984	0.1125	0.0820	0.0633	0.0675	0.0075
3	5	0.0000	0.0000	0.0048	0.1500	0.0000	0.0000	0.0000
3	6	0.0000	0.0000	0.0000	0.2250	0.0000	0.0000	0.0000
3	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

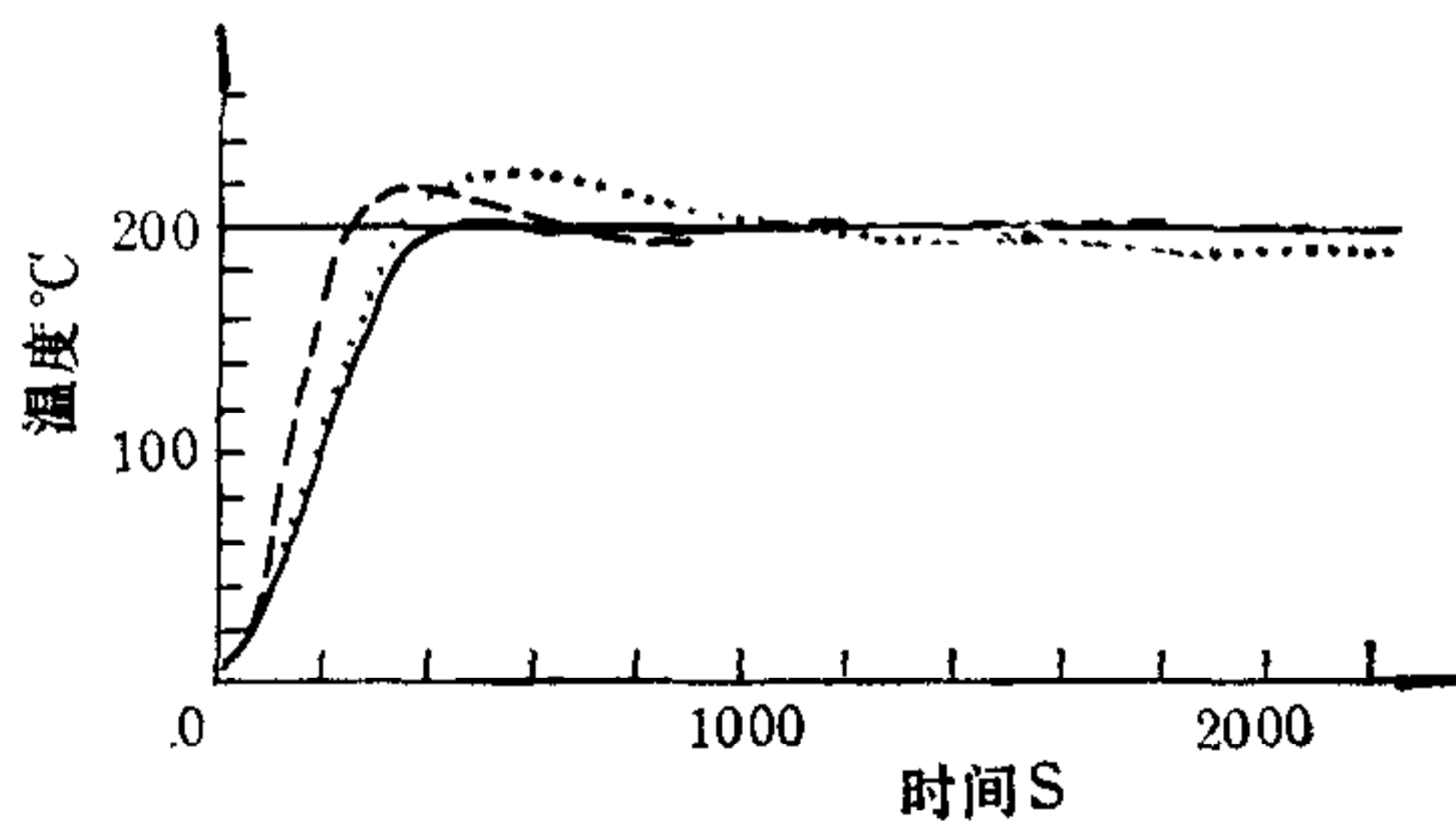


图 3 温度响应曲线

(a) 修正前  $V$  阵(.....) (b) 一次修正后  $V$  阵(-----) (c) 二次修正后  $V$  阵(——)

表 2 控制品质比较

$V$ 阵 \ 品质	$\delta\%$	$t_r(s)$	$t_s(5\%)s$	$e(\infty)(\%)$
修正前	13.5	330	860	$\pm 1.0$
一次修正	10.0	260	550	$\pm 0.5$
二次修正	4.0	290	370	$\pm 0.5$

控制结果表明,自生成的控制器与对象所构成的闭环系统是稳定的,且能将对象输出控制在给定目标上。而自校正控制能进一步提高其暂态指标,同时也能在一定程度上提高其稳态精度。

综上所述,本文提出的 Fuzzy 控制规则自生成方法,将控制规则与控制目标相联系,从而保证了较好的控制品质,并使整个闭环系统能用统一的数学模型表示,为整个 Fuzzy 系统的分析和 Fuzzy 控制中的稳定性及最优控制等问题的最终解决提供了可能。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Sugeno, M. (ed.), *Industrial Applications of Fuzzy Control*, Elsevier Science Publishers, North-Holland, 1985.
- [ 2 ] Wang Chunyan, Liu Shaomin, Hu Shaohua, On the Method of Generating Rule Model and Applications. AMSE International Conference on Signals and Systems, 1989, DaLian, China.
- [ 3 ] Pedrycz, W., An Identification Algorithm in Fuzzy Relational Systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 13(1984), 153—167.

## ON THE METHOD OF SELF-GENERATING AND SELF-TUNING CONTROL RULE MODEL

HU SHAOHUA    LIU SHAOMIN

(Beijing University of Science & Technology)

### ABSTRACT

The paper studies i) Generation of the fuzzy controller's rule from the model of the object; ii) Adjustment of the fuzzy controller. The resultant algorithms are applied to an electrical furnace temperature control system to demonstrate their feasibilities and effectiveness.

**Key words:** Fuzzy control; generating rule model.