

文章编号: 1001-0920(2006)11-1257-07

## 基于规则的模糊离散事件系统建模与控制研究

张颖<sup>1,2</sup>, 邵世煌<sup>1</sup>

(1. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 200051; 2 上海海事大学 信息工程学院, 上海 200135)

**摘要:** 用模糊离散事件系统(FDES)从离散事件的角度描述一类包含“具有确定性的不确定/模糊”问题以及与人的主观观察/判断密切相关的复杂系统,提出了基于规则的FDES描述方法及自寻优监督控制策略,为FDES的实际应用提供了一种方法,提高了FDES在具体应用中的可操作性,并介绍了其在纺织染整控制过程中的具体应用

**关键词:** 模糊离散事件系统; 模糊规则; 监督控制; 染整

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## Research of Modeling and Control of Rule-based Fuzzy Discrete Event System s

ZHANG Ying<sup>1,2</sup>, SHAO Shi-huang<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2 College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China Correspondent: ZHANG Ying, Email: lab518@163.com)

**Abstract:** Fuzzy discrete event systems (FDES) can effectively represent a kind of complex systems involving deterministic uncertainties and vagueness as well as human subjective observation and judgement from the viewpoint of discrete events. A modeling method of rule-based FDES and its optimal supervisory control policies are presented, which improves the applicability of FDES in engineering. Application examples in dyeing and finishing are provided to illustrate the proposed method.

**Key words:** Fuzzy discrete event systems; Fuzzy rule; Supervisory control; Dyeing and finishing

### 1 引言

现实世界中有许多不能用诸如微分方程等形式来精确描述的复杂系统,却可以通过一些反映系统稳定性的状态变化的事件序列来间接描述,这就产生了关于离散事件系统(DES)的研究<sup>[1,2]</sup>. DES的研究可以应用于诸多领域,如计算机网络系统、自动化制造系统、数据库实时控制系统、交通管理系统以及信息服务系统等.这类系统一般都不可能用传统控制理论中的精确状态方程来表述,DES通过对其中决定系统各种状态的事件及相关状态之间演化的描述来表征这些系统.这些状态一般是逻辑、符号化的表述,而非精确的数字化表述,在这些表述中经常存在所谓具有宏观概念上的确定性,同时又具有内在

不确定性和模糊性的一类判断问题,即“具有确定性的不确定/模糊”问题,比如在一些与人的主观观察/判断等密切相关的领域.模糊集合理论<sup>[3]</sup>是描述这类对象的一种有效工具,针对传统离散事件系统在解决这类问题上的制约,文献[4,5]将DES与模糊集合理论相结合,引入了模糊离散事件系统(FDES)的概念.FDES为有效地描述现实世界中固有的、类似人的主观观察/判断,被称为“具有确定性的不确定/模糊”问题提供了一种科学的理论方法和解决问题的手段.

本文针对FDES的建模和监督控制等问题,提出了基于模糊规则的FDES,并结合纺织染整工艺的实例介绍了一种自寻优FDES监督控制的实现

收稿日期: 2005-07-26; 修回日期: 2005-10-17.

作者简介: 张颖(1968—),男,合肥人,博士后,从事模糊系统与控制、智能信息处理等研究;邵世煌(1938—),男,江苏苏州人,教授,博士生导师,从事智能系统与优化计算、自组织模糊控制等研究.

## 2 从DES到FDES

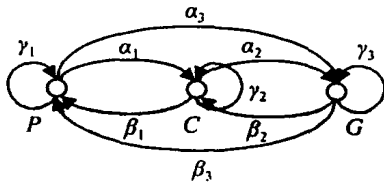


图1 描述染色制品色差变化的有限自动机图

图1是一种描述纺织染整色差变化的有限自动机图,其中:  $P$  (Poor),  $C$  (Common),  $G$  (Good) 为它的3个状态节点;  $\alpha_1 \sim \alpha_3, \beta_1 \sim \beta_3, \gamma_1 \sim \gamma_3$  是相关的事件.有限自动机  $G$  的数学表述为

$$G = (Q, \Sigma, \delta, q_0), \quad (1)$$

其中:  $Q$  表示离散状态集合,  $\Sigma$  表示事件集合,  $\delta$  表示一个由  $Q \times \Sigma \rightarrow Q$  的转换映射,即描述什么事件在什么状态下可以发生并导致新的状态出现,  $q_0$  表示初始状态.这里

$$\begin{aligned} Q &= \{P, C, G\}, \\ \Sigma &= \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \\ &\quad \beta_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\}, \\ q_0 &= P, \end{aligned}$$

$\delta$  关系如图1所示 (2)

传统意义上这种状态或事件彼此之间是有清晰界线的,称这种DES为Crisp DES,它所对应的有限自动机模型为Crisp DES有限自动机模型,一般意义上的DES均为Crisp DES

若将图1中的状态节点  $P, C$  和  $G$  分别用  $1, 2, 3$  来替代,那么初始状态  $q_0$  及事件  $\alpha_i$  可表示为

$$q_0 = [1 \ 0 \ 0], \alpha_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\alpha_i$  中的第1行第2列为1表示该事件将使系统从状态1变化为状态2,其余项为0表示该事件对其余状态之间的转化不起任何作用

通常在描述一类所谓确定感觉下的某些不确定、模糊性状况和这些状况之间的变化时,人的主观观察/判断/解释都占有很重要的地位,这些通常都不是Crisp DES所能刻画的,如医生对病人的诊断治疗,纺织染整中的色差变化等,这样就出现了FDES

图1的系统引入模糊集合理论后就成为一个FDES系统,式(1)将被改写为

$$\tilde{G} = (\tilde{Q}, \tilde{\Sigma}, \tilde{\delta}, \tilde{q}_0), \quad (3)$$

其中:  $\tilde{G}, \tilde{Q}, \tilde{\Sigma}, \tilde{\delta}, \tilde{q}_0$  分别为式(1)中  $G, Q, \Sigma, \delta, q_0$  等变量的模糊化表示:  $\tilde{Q}$  是系统中诸多模糊状态  $\tilde{q}$  的总的模糊集合;  $\tilde{\Sigma}$  是系统中诸多模糊事件  $\tilde{\alpha}$  的总的

模糊集合;  $\tilde{\delta}: \tilde{Q} \times \tilde{\Sigma} \rightarrow \tilde{Q}$  表示一个模糊传递关系,即当前模糊状态集和某模糊事件集通过某些模糊集合算子的运算后可得到系统下一状态的模糊集合,这里  $\tilde{\delta}(\tilde{q}, \tilde{\alpha}) = \tilde{q} \circ \tilde{\alpha}$   $\circ$  是模糊集合理论中的最大-积算子;  $\tilde{q}_0$  是系统模糊初始状态.例如可将前述的  $q_0$  及  $\alpha_i$  表示成如下形式:

$$\begin{aligned} \tilde{q}_0 &= [0 \ 9 \ 0 \ 2 \ 0], \\ \tilde{\alpha}_i &= \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 8 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & & \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

即系统初始状态属于1状态的可能性为0.9,属于2状态的可能性为0.2,而不可能属于3状态;事件  $\tilde{\alpha}_1$  使当前状态保持为状态1而不变化的可能性为0.2,使状态从1变为2的可能性为0.8;依次类推.显然在某些实际情况下,这样的描述比前者更符合用语言表述一些经验性知识的习惯

FDES是模糊集合理论和传统离散事件系统理论的交叉与结合,充分发挥了各自在解决这类问题上的特点和优势,它将系统的状态向量和事件作用等用模糊化的变量来表征,通过一些反映系统定性的状态变化的事件序列来描述一类包含所谓“具有确定性的不确定/模糊”问题.与人的主观观察判断密切相关的复杂系统,如医疗、纺织、交通、农业等领域内的一些复杂系统过程.一般的离散事件系统可以看成是模糊离散事件系统中隶属度取成非0即1时的一种特例,后者是在前者理论基础上的扩展

## 3 基于模糊规则的FDES

### 3.1 模糊逻辑规则

模糊逻辑系统中的模糊规则库由若干“如果-则”规则构成,而模糊推理机在模糊逻辑原则的基础上,利用这些模糊规则来决定如何将输入论域  $U$  上的模糊集合与输出论域  $V$  上的模糊集合对应起来.这些模糊规则具有如下形式:

$$\begin{aligned} R^{(i)}: & \text{If } x_1 \text{ is } F_1^L, \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^L, \\ & \text{Then } y \text{ is } G^L. \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $F_i^L$  和  $G^L$  均为模糊集合;  $X = (x_1, \dots, x_n)^T$   $U, y \in V, X$  和  $y$  分别为输入和输出语言变量;  $L = 1, 2, \dots, M$  是规则数目.实际应用已经证明,这类模糊规则能够很方便地利用专家的知识.式(5)定义的每一条模糊规则都可以表示成一个积空间  $U \times V$  上的模糊蕴涵:  $F_1^L \times \dots \times F_n^L \rightarrow G^L$ .

在此只考虑多输入-单输出模糊逻辑系统,因为一个多输出系统总可以分解为多个单输出系统.可以证明,“不完整如果部分”规则、“或规则”、“只有模糊结论的规则”、“比较级规则”、“除非规则”以及所谓的“非模糊规则”等均可以作为式(5)的一个

特例来处理<sup>[6]</sup>, 即式(5) 模糊规则的表达具有足够的一般性来概括一般类型的语言信息表述

### 3.2 基于规则的 FDES 描述

下面以图 1 系统为例来具体介绍基于模糊规则的模糊离散事件系统的描述 设  $\tilde{q}$  及  $\tilde{\alpha}$  的表述仍如式(4) 所示, 显然  $\tilde{q}$  应隶属于  $P$  状态 假设在  $\tilde{\alpha}$  作用下, 其下一个状态  $\tilde{q} = [0.18 \quad 0.72 \quad 0.09]$ , 那么  $\tilde{\alpha}$  可以看成是由  $\tilde{q}$  映射到  $\tilde{q}$  的一个模糊关系, 显然  $\tilde{q}$  属于  $C$  状态的可能性最大, 即模糊状态  $\tilde{q}$  在模糊事件  $\tilde{\alpha}$  的作用下由状态  $P$  变化到状态  $C$ . 一般地, 若  $\tilde{\alpha}$  模糊矩阵中有元素  $\tilde{\alpha}_j$  明显大于其他位置的元素, 且目前系统隶属于  $i$  状态, 则系统在事件  $\tilde{\alpha}$  的作用下, 将很可能从  $i$  状态变化到  $j$  状态

上述事实如果是实际中一条经验的总结, 则可用如下的模糊规则来表征(将状态  $P, C, G$  分别用数字 1, 2, 3 来替代):

If  $\tilde{q}$  隶属于状态 1, 且事件  $\tilde{\alpha}$  发生,  
 并已知  $\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2$  为不太可能,  
 $\tilde{\alpha}_3$  为不可能,  $\tilde{\alpha}_4$  为很有可能, ...,  
 Then  $\tilde{q}$  的下一步状态  $\tilde{q}$  最可能隶属于状态 2

(6)

其中  $\tilde{\alpha}_{ij}$  表示事件  $\tilde{\alpha}$  发生作用后, 使系统从状态  $i$  变化到状态  $j$  的可能性大小, 它具体对应于模糊矩阵  $\tilde{\alpha}$  中的  $i$  行  $j$  列元素, 这里  $i, j \in \{1, 2, 3\}$ ,  $\tilde{\alpha}_{ij} \in \tilde{U} = \{\text{不可能}(S2), \text{不太可能}(S1), \text{有可能}(CE), \text{很有可能}(B1), \text{极有可能}(B2)\}$ , 其隶属函数表述形式如图 2 所示

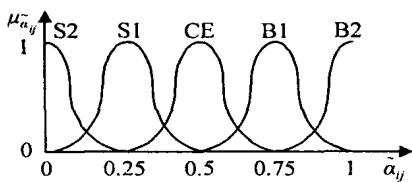


图 2 系统由状态  $i$  转化到状态  $j$  可能性大小的模糊区间划分及其模糊子集的隶属函数

这样便可将这类系统中某个状态对应于某种事件作用下的状态演化用标准的模糊 If-Then 规则来描述了. 更一般地可以将式(6) 写成如下形式:

If  $\tilde{q}_k \in \tilde{Q}$  and 事件  $\tilde{\alpha}$  发生,  $\mu_{\tilde{\alpha}_{ij}}(u)$  确定,  
 Then  $\tilde{q}_k$  变化到  $\tilde{q}_m$  或仍保持为  $\tilde{q}_k$   
 (这里  $\mu_{\tilde{\alpha}_{jm}}(u) = \max(\mu_{\tilde{\alpha}_{ij}}(u))$ ). (7)

其中:  $\tilde{q}_k, \tilde{q}_m$  是定义在  $\tilde{Q} = \{P, C, G\}$  上的模糊集合;  $\tilde{\alpha}_{jm}, \tilde{\alpha}_{ij}$  是定义在  $\tilde{U}$  上的模糊集合, 表示事件  $\tilde{\alpha}$  发生作用后, 系统由状态  $i$  (或  $k$ ) 变化到状态  $j$  (或  $m$ ) 的可能性大小的估计, 这里  $i, j, k, m \in \{1, 2, 3\}$ , 1, 2, 3 分别代表  $P, C, G$  三种色差状态(色差很大( $P$ ), 色差一般( $C$ ), 没有色差( $G$ )), 其隶属函数表述形式如

图 3 所示 因此式(7) 表示: 若系统在  $\tilde{q}_k$  状态下, 事件  $\tilde{\alpha}$  发生( $\tilde{\alpha}$  中的  $\mu_{\tilde{\alpha}_{ij}}(u)$  均已确定), 那么  $\tilde{q}_k$  有两种可能: 由  $\tilde{q}_k$  变化为  $\tilde{q}_m$  ( $\mu_{\tilde{\alpha}_{jm}}(u)$  明显大于其他任意的  $\mu_{\tilde{\alpha}_{ij}}(u)$ ) 或仍保持  $\tilde{q}_k$  状态不变(事件  $\tilde{\alpha}$  对  $\tilde{q}_k$  的状态不产生任何影响或影响甚微可以忽略).

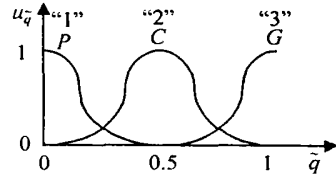


图 3 色差状态的模糊区间划分及其模糊子集的隶属函数

显然, 足够多的形如式(7) 的描述便可在一定程度上刻画出如图 1 的模糊离散事件系统, 用模糊规则描述可以充分利用长期以来专家和实际操作人员用语言所表述的各种经验性推断和总结

### 4 基于模糊规则的 FDES 监督控制

#### 4.1 基于模糊“最大-积”算子的 FDES 模糊状态推理

针对图 1 所示 3 种状态划分的系统, 可将  $\tilde{\alpha}$  用一个  $[\alpha_{ij}]_{3 \times 3}$  的矩阵来表示  $\alpha_{ij}$  表示在事件  $\tilde{\alpha}$  发生时, 使系统从  $i$  状态转换到  $j$  状态的可能性大小( $i, j \in \{P, C, G\}$ ). 显然  $\tilde{\alpha}$  是一个模糊关系矩阵, 其元素是由相对于“ $i \rightarrow j$  转化可能性大小”论域  $U$  中的一些模糊子集的隶属度构成的 式(7) 规则前件中所谓事件  $\tilde{\alpha}$  的确定其实就是指获得了关于系统  $\tilde{G}$  中所有状态受事件  $\tilde{\alpha}$  影响的情况描述,  $\alpha_{ij}$  可以通过式(7) 模糊规则中的模糊语言描述对照图 2 的模糊子集划分及其隶属函数形式而对应到横坐标获得 论域  $U$  中的模糊子集划分越密集, 这种可能性的语言描述就越细致

通过式(7) 的模糊语言规则得到  $\tilde{\alpha}$  矩阵后, 如果系统处于  $\tilde{q}$  状态, 则可通过如下的模糊推理算式得到系统的下一个状态  $\tilde{q}$ :

$$\tilde{q} = \tilde{q} \circ \tilde{\alpha} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3] \circ \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} = [\max\{q_1\alpha_{11}, q_2\alpha_{21}, q_3\alpha_{31}\}, \max\{q_1\alpha_{12}, q_2\alpha_{22}, q_3\alpha_{32}\}, \max\{q_1\alpha_{13}, q_2\alpha_{23}, q_3\alpha_{33}\}] \quad (8)$$

其中  $\circ$  表示“max-prod”模糊算子, 在很多场合下都具有现实意义 当然这一预测状态  $\tilde{q}$  与实际情况下产生的、通过各种检测手段得到的系统下一步实际状态相比会有一定的误差, 而误差大小取决于  $\tilde{\alpha}$  矩阵和系统状态描述  $\tilde{q}$  的精确性

4.2 FDES 自适应监督控制

FDES 控制系统的实施有两种形式: 第 1 种是基于模糊控制表的控制; 第 2 种是基于式(8)的实时模糊推理控制, 而自适应 FDES 控制体现在模糊规则库的实时自动更新修正

实际中的控制问题是根据当前的系统状态寻找合适的事件控制, 使系统向着人们期望的方向发展, 并且这种事件控制通常都有一定的约束条件, 即对完成这种转化的代价有一定的限制, 超过这种限制的事件, 即使可以达成目的, 但由于某种原因也不允许使用 因此通常是在满足一定代价要求的前提下, 尽可能寻找使系统状态向更好的方向变化的控制事件; 或是在满足使系统状态在一定程度上好转的前提下, 尽可能寻找代价最小的控制事件<sup>[7-9]</sup> 因此在实际中应根据具体条件来选择相应的监督控制模式 这里假设系统的状态反馈完全可观测且事件的作用效果完全可预测: 这里包括事件作用产生的积极效果和针对其他方面的消极影响两个方面, 事件实施的代价中就包括这种消极影响的部分

图 4 给出了自适应模糊离散事件系统的控制结构 模糊事件规则库由形如式(7)的大量模糊规则构成, 控制约束条件可以是前面两种监督控制条件形式中的一种 基于规则的模糊推理机对应于模糊控制表和式(8)的模糊推理两种形式, 当然基于规则描述的模糊离散事件系统事实上存在于以式(7)形式描述的模糊规则库中, 也就是说这种 FDES 系统是通过无数形如式(7)的模糊规则来加以描述的 自适应控制过程是一个在模糊规则库中不断寻找合适的  $\tilde{\alpha}$  同时在必要的情况下更新校正模糊事件规则库的过程, 这其中包含了基于规则的模糊推理控制和进行基于规则描述的模糊离散事件系统建模两部分内容

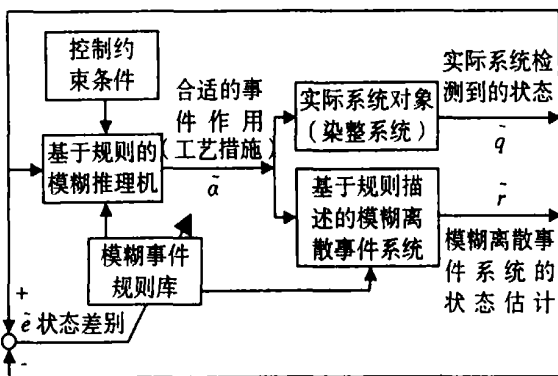


图 4 自适应最优模糊离散事件控制系统

表 1 是针对图 1 系统而构造的一个 FDES 系统控制表的一部分 这里引入了可采纳度的概念, 不仅

表 1 针对 FDES 的模糊控制规则表

模糊规则	If		Then	
	$\tilde{q}$	$\tilde{\alpha}_k$	$\tilde{q}$	可采纳度 $d$
0	“1”	$(\tilde{\alpha}_i)_{12}$ 为 B1	“2”	0.5184
1	“2”	$(\tilde{\alpha}_i)_{21}$ 为 S1	“1”	0.2
2	“3”	$(\tilde{\alpha}_i)_{32}$ 为 S2	“2”	0.1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

可以加快控制中对可选择事件的搜索速度, 而且能有效解决模糊规则积累过程中出现冗余规则和矛盾规则的问题, 即在遇到同样前提条件的模糊规则时, 应取可采纳度最大的那一条 这里  $\tilde{\alpha}_k$  表示第  $k$  个事件

$$d = \max(q_i) * \mu((\tilde{\alpha}_k)_{ij}) * \max(q_j) \quad (9)$$

若以式(4)为例, 则表 1 中规则 0 的可采纳度计算如下:

$$d(\text{规则 } 0) = \mu_P(\tilde{q}) \mu_{B1}((\tilde{\alpha}_i)_{12}) \mu_C(\tilde{q}) = 0.9 * 0.8 * 0.72 = 0.5184,$$

这里  $\mu_P(\tilde{q})$  取  $\tilde{q}_0$  中  $q_1$  的数值,  $\mu_{B1}((\tilde{\alpha}_i)_{12})$  取  $\tilde{\alpha}_i$  中  $\alpha_{12}$  的数值,  $\mu_C(\tilde{q})$  取  $\tilde{q}$  中  $q_2$  的数值, 即它们分别用各自隶属度分量中数值最大的来代表

针对每一条规则还可以引入信任度  $\mu$  的概念, 即专家对状态和事件描述的数据可靠性的相信程度(用 0~1 间的数值表示). 对于一些具体情况, 专家凭借多年经验会有一些先验判断, 比如他会认为某些规则可信程度极低, 某些规则不太适合等, 这样就可以给他认为合理的规则一个较高的信任度, 而不合理的规则给一个很低的信任度, 于是一些专家的重要经验也包括到规则中了. 如果不需要这部分主观信息, 只要把专家信任度取单位值就可以了. 因此式(9)可重新表示为

$$d = \max(q_i) * \mu((\tilde{\alpha}_k)_{ij}) * \max(q_j) * \mu \quad (10)$$

查询表 1 的最终目的是获得合适的控制事件  $\tilde{\alpha}$  而规则后件则是所希望的状态结果, 这与常见的模糊控制表的表述形式略有不同

如果用式(8)的模糊推理来代替上面的模糊控制表, 那么就形成了第 2 种形式的控制器, 与第 1 种相比增加了一定的计算量, 这包括实时状态判决(规则前件和后件的),  $\tilde{\alpha}$  的合成, 模糊推理运算等 这里一般以模糊规则表的形式来存储各种模糊事件, 使用时通过查表并根据其隶属度函数进行去模糊化的操作来合成出  $\tilde{\alpha}$  的数学表达式 表 2 是以图 1 为例事件  $\tilde{\alpha}$  的模糊规则表的一部分, 其中:  $\tilde{\alpha}_k$  代表第  $k$  个事件, 信任度  $\mu$  由专家提供, 遇到规则冗余和矛盾时, 优先选择信任度大的规则

表 2 关于  $\tilde{\alpha}$  的模糊规则表

模糊规则 $l$	If	Then	
	$\tilde{\alpha}_i$ 发生	$(\tilde{\alpha}_i)_{ij}$	信任度 $\mu$
0	$\tilde{\alpha}_i$	$(\tilde{\alpha}_i)_{11}$ 不太可能	0.6
1	$\tilde{\alpha}_i$	$(\tilde{\alpha}_i)_{12}$ 很有可能	0.7
⋮	⋮	⋮	⋮
8	$\tilde{\alpha}_i$	$(\tilde{\alpha}_i)_{33}$ 不可能	0.6
⋮	⋮	⋮	⋮

模糊控制表的形式比较简洁, 通过它可以直接获得控制结果, 但模糊控制表内综合了较多的信息, 没有长期、大量的实验和总结是不可能得到一张实用的控制表的, 并且其中包含的主观判断的因素过多, 若实际中需要更新调整, 则需花费一定的时间。另外在计算机处理过程中需要匹配的条件相对较多, 增加了处理的开销。模糊推理形式的控制器对存储形式的要求很低, 仅仅是  $\tilde{\alpha}$  中的各种隶属度值, 存储空间比较节省, 需要完成的是通过  $\tilde{\alpha}$  模糊规则表进行  $\tilde{\alpha}$  矩阵的合成、模糊推理运算和依据模糊隶属度函数进行的模糊判决。由于实时运算较多, 固定形式的信息相对较少, 因此系统更新起来相对方便。

### 5 应用举例

图 5 是一种简化的某纺织染整色差变化的有限自动机状态调整图, 表示了染整控制中可能经历的一些状态及相关的控制措施。这里将色差状态的模糊论域区间划分为 7 个部分。

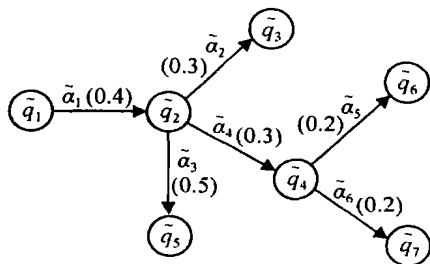


图 5 染整工艺中的 7 种状态和导致其状态转化的相关事件

假设色差的各个状态完全可观测, 各个控制事件的效果完全可预见, 色差程度随着  $\tilde{q}$  状态右下角标数字序号的增加而越来越轻。这里采用第 2 种形式的控制器模式来进行 FDES 自寻优控制。定义两种控制指标: 优良度  $E$  和次品率  $C$ , 依据各种状态对此指标贡献的权重大小, 定义其计算标准为

$$\begin{aligned}
 E(\tilde{q}) &= \tilde{q}_7 + 0.7\tilde{q}_6 + 0.4\tilde{q}_5 + 0.2\tilde{q}_4, \\
 C(\tilde{q}) &= \tilde{q}_1 + 0.6\tilde{q}_2 + 0.3\tilde{q}_3 + 0.2\tilde{q}_4 + 0.1\tilde{q}_5.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

另外定义了控制措施的代价指标参数  $\delta \in [0, 1]$ , 即不同的控制事件都有其相应的使用代价, 在衡

量是否进行某种事件控制时, 也要同时考虑监督控制条件中代价指标的相关约束条件, 一般是将计算得到的  $E$  除以  $\delta$  后, 再进行相互状态之间  $E$  指标的比较。  $C$  指标的定义主要是避免控制过程中系统进入非常差的状态节点,  $E$  通常是系统控制不断追求的指标, 它总是让系统不断向  $E$  指标最好的节点移动。 FDES 的控制主要通过两种方式来实现: 1) 强迫某些事件的发生, 使系统向期望的状态节点移动; 2) 使某些事件不发生, 从而使系统避开某些不希望到达的状态节点<sup>[10]</sup>。

假设系统初始状态  $\tilde{q} = [0.8 \ 0.4 \ 0.1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。 监督控制条件为: 在保证  $C < 0.7$  的前提下,  $E$  尽可能地大。 相应的代价指标参数标注于图 5 中各个事件的旁边, 分别为: 0.4, 0.3, 0.5, 0.3, 0.2, 0.2。 显然初始状态反馈  $\tilde{q}$  关于  $\tilde{q}_1$  的隶属度最大, 因此  $\tilde{q}_{state1} = \tilde{q}_1$ 。 下面通过一个仿真程序来模拟这一前向树控制搜索过程。 根据某染整作业的具体情况, 从表 2 中提取并合成出的模糊关系矩阵为

$$\tilde{\alpha} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.78 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\alpha} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.9 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\alpha} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.85 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\alpha} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.95 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\alpha}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 9 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\alpha}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

1) 通过搜索模糊规则库中的事件可知, 仅有  $\tilde{\alpha}_5$  与  $\tilde{q}_1$  发生关联, 因此

$$\tilde{r}_2 = \tilde{q}_1 \circ \tilde{\alpha}_5 = [0 \ 16 \ 0 \ 624 \ 0 \ 16 \ 0 \ 08 \ 0 \ 08 \ 0 \ 04 \ 0 \ 04],$$

显然  $\tilde{r}_2$  关于  $\tilde{q}_2$  的隶属度最大, 根据式 (11),  $E_2 = 0 \ 116, E_2 = E_2/0 \ 4 = 0 \ 29, C_2 = 0 \ 606 \ 4$ , 满足监督控制的约束条件, 因此  $\tilde{q}_{state2} = \tilde{q}_2$

2) 通过搜索模糊规则库中的事件可知, 与  $\tilde{q}_2$  相关联的前向分支有  $\tilde{\alpha}_6, \tilde{\alpha}_3, \tilde{\alpha}_4$  三种事件

针对事件  $\tilde{\alpha}_6$ :

$$(\tilde{r}_3)^1 = \tilde{q}_2 \circ \tilde{\alpha}_6 = [0 \ 062 \ 4 \ 0 \ 124 \ 8 \ 0 \ 561 \ 6 \ 0 \ 124 \ 8 \ 0 \ 124 \ 8 \ 0 \ 062 \ 4 \ 0 \ 062 \ 4],$$

显然  $(\tilde{r}_3)^1$  关于  $\tilde{q}_3$  的隶属度最大,  $E_3 = 0 \ 180 \ 96, E_3 = E_3/0 \ 3 = 0 \ 603 \ 2, C_3 = 0 \ 343 \ 2$

针对事件  $\tilde{\alpha}_3$ :

$$(\tilde{r}_3)^2 = \tilde{q}_2 \circ \tilde{\alpha}_3 = [0 \ 062 \ 4 \ 0 \ 124 \ 8 \ 0 \ 124 \ 8 \ 0 \ 592 \ 8 \ 0 \ 124 \ 8 \ 0 \ 062 \ 4 \ 0 \ 062 \ 4],$$

显然  $(\tilde{r}_3)^2$  关于  $\tilde{q}_4$  的隶属度最大,  $E_4 = 0 \ 274 \ 56, E_4 = E_4/0 \ 3 = 0 \ 915 \ 2, C_4 = 0 \ 305 \ 76$

针对事件  $\tilde{\alpha}_4$ :

$$(\tilde{r}_3)^3 = \tilde{q}_2 \circ \tilde{\alpha}_4 = [0 \ 062 \ 4 \ 0 \ 124 \ 8 \ 0 \ 062 \ 4 \ 0 \ 124 \ 8 \ 0 \ 530 \ 4 \ 0 \ 062 \ 4 \ 0 \ 062 \ 4],$$

显然  $(\tilde{r}_3)^3$  关于  $\tilde{q}_5$  的隶属度最大,  $E_5 = 0 \ 343 \ 2, E_5 = E_5/0 \ 5 = 0 \ 686 \ 4, C_5 = 0 \ 234 \ 0$

由上述计算可知, 这些事件的作用均满足控制过程中关于次品率  $C$  的约束条件, 而经过考虑代价指标参数的影响, 使  $E$  尽可能大的事件作用应该是  $\tilde{\alpha}_4$ , 因此  $\tilde{q}_{state3} = \tilde{q}_4$

3) 通过搜索模糊规则库中的事件可知, 与  $\tilde{q}_4$  相

关联的前向分支有  $\tilde{\alpha}_6, \tilde{\alpha}_7$  两种事件

针对事件  $\tilde{\alpha}_6$ :

$$(\tilde{r}_4)^1 = (\tilde{r}_3)^2 \circ \tilde{\alpha}_6 = [0 \ 006 \ 24 \ 0 \ 059 \ 28 \ 0 \ 059 \ 28 \ 0 \ 118 \ 56 \ 0 \ 059 \ 28 \ 0 \ 533 \ 52 \ 0 \ 118 \ 56],$$

显然  $(\tilde{r}_4)^1$  关于  $\tilde{q}_6$  的隶属度最大,  $E_6 = 0 \ 539 \ 448, E_6 = E_6/0 \ 2 = 2 \ 679 \ 24, C_6 = 0 \ 089 \ 232$

针对事件  $\tilde{\alpha}_7$ :

$$(\tilde{r}_4)^2 = (\tilde{r}_3)^2 \circ \tilde{\alpha}_7 = [0 \ 006 \ 24 \ 0 \ 059 \ 28 \ 0 \ 059 \ 28 \ 0 \ 118 \ 56 \ 0 \ 059 \ 28 \ 0 \ 118 \ 56 \ 0 \ 533 \ 52],$$

显然  $(\tilde{r}_4)^2$  关于  $\tilde{q}_7$  的隶属度最大,  $E_7 = 0 \ 663 \ 936, E_7 = E_7/0 \ 2 = 3 \ 319 \ 68, C_7 = 0 \ 089 \ 232$

通过上述计算可以看出, 这两种事件的作用均满足控制过程中关于次品率  $C$  的约束条件, 在考虑代价指标参数的影响下, 使  $E$  尽可能大的事件作用应该是  $\tilde{\alpha}_6$ , 因此  $\tilde{q}_{state4} = \tilde{q}_7$ . 所以最优控制轨迹应该为  $\tilde{q}_1 \xrightarrow{\tilde{\alpha}_1} \tilde{q}_2 \xrightarrow{\tilde{\alpha}_5} \tilde{q}_4 \xrightarrow{\tilde{\alpha}_6} \tilde{q}_7$ . 最优控制事件序列为  $\tilde{\alpha} = \{\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_5, \tilde{\alpha}_6\}$ .

因此得到如下结论: 基于规则的模糊离散事件系统可以建立起系统的模糊离散事件关系矩阵集  $\tilde{\alpha}_k (k = 1, 2, \dots)$ , 考虑量化归一后相应的实施代价因子  $\delta$  (如果都不考虑, 可取为 1), 并制定出符合实际需要的指标函数 (如“优良度”、“次品率”等):  $E(\tilde{q}), C(\tilde{q})$  及相应的阈值  $E_0$  (若大于此值可视为合格) 和  $C_0$  (若大于此值视为次品率超标), 那么 FDES 最优监督控制可归结为寻找使  $E(\tilde{q})$  尽可能大且  $C(\tilde{q}) < C_0$ ; 或使  $C(\tilde{q})$  尽可能小且  $E(\tilde{q}) > E_0$  的事件序列  $\tilde{\alpha} (l = 1, 2, \dots)$  的过程, 这两种控制目标都很有实际意义. 设由所有状态构成的整个前向树状态集合为  $T(\tilde{q})$ , 与前向状态树相关联的所有控制事件所组成的事件集合为  $T(\tilde{\alpha})$ , 最终寻找的控制事件序列为  $\tilde{\alpha} (l = 1, 2, \dots)$ ,  $\tilde{q}_{\tilde{\alpha}_l}$  表示在事件序列  $\tilde{\alpha}$  作用下系统最终所要到达的状态, 那么 FDES 最优监督控制可表示为

$$\tilde{\alpha} = \{\tilde{\alpha} \in T(\tilde{\alpha}), \tilde{q}_{\tilde{\alpha}_l} \in T(\tilde{q}): (\forall \tilde{q} \in T(\tilde{q})) E(\tilde{q}) \geq E(\tilde{q}_{\tilde{\alpha}_l}), C(\tilde{q}_{\tilde{\alpha}_l}) \leq C_0\},$$

或

$$\tilde{\alpha} = \{\tilde{\alpha} \in T(\tilde{\alpha}), \tilde{q}_{\tilde{\alpha}_l} \in T(\tilde{q}): (\forall \tilde{q} \in T(\tilde{q})) C(\tilde{q}) \leq C(\tilde{q}_{\tilde{\alpha}_l}), E(\tilde{q}_{\tilde{\alpha}_l}) \geq E_0\}. \quad (12)$$

为了分析方便直观, 本例中假设状态完全可观测, 控制事件效果完全可预见. 由于采用了基于模糊规则的 FDES 处理方法, 模糊离散事件关系矩阵集  $T(\tilde{\alpha})$  的构建中融入了大量的来自实际生产操作中的经验规则, 这在一定程度上有效弥补了在某些情

况下由于观测手段不充分, 对控制事件本质研究不够透彻等造成的缺陷, 因此这一方法在实际应用中是完全可行的

## 6 结 语

FDES 是最近几年产生的关于离散事件系统的一个新的研究方向, 适合于描述一类与人的主观观察/判断密切相关的系统。本文介绍了 FDES 的特点以及在实际中如何应用它去解决一些实际问题; 并在一般 FDES 概念的基础上, 引入了基于模糊规则描述的 FDES 系统, 为这一理论方法的具体实施提供了一种有效的途径, 同时还对 FDES 监督控制应用进行了一般意义上的描述总结。当然 FDES 的状态不完全可观测性在理论上也具有一定的研究价值<sup>[11, 12]</sup>, 如何与实际应用很好地结合是目前待研究的课题

## 参考文献(References)

- [1] Cassandras C G, Lafortune S. *Introduction to Discrete Event Systems* [M]. Norwell: Kluwer, 1999
- [2] Ramadge P J, Wonham W M. The Control of Discrete Event Systems [H]. *Proc of the IEEE, Special Issue on Dynamics of Discrete Event Systems*, 1989, 77(1): 81-98
- [3] Zadeh L A. Fuzzy Sets [J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338-353
- [4] Lin F, Ying H. Modeling and Control of Fuzzy Discrete Event Systems [J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics — Part B*, 2002, 32(4): 408-415
- [5] Lin F, Ying H. Fuzzy Discrete Event Systems and Their Observability [A]. *Proc Joint Int Conf 9th Int Fuzzy Systems Association and World Congregation 20th North American Fuzzy Information Processing Society* [C]. Vancouver, 2001: 1271-1276
- [6] 王立新. *自适应模糊系统与控制: 设计与稳定性分析* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995  
(Wang L X. *Adaptive Fuzzy System and Control: Design and Stability Analysis* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995)
- [7] Ramadge P J, Wonham W M. Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes [J]. *SIAM J Control Optimization*, 1987, 25(1): 206-230
- [8] Chen Y L, Lin F. Safety Control of Discrete Event Systems Using Finite State Machines with Parameters [A]. *Proc of the 2001 American Control Conf* [C]. Arlington, 2001: 975-981
- [9] Li Y, Lin F, Lin Z H. A Generalized Framework for Supervisory Control of Discrete Event Systems [J]. *Int J of Intelligent Control and Systems*, 1998, 2(1): 139-159
- [10] Chung S L, Lafortune S, Lin F. Limited Look-ahead Policies in Supervisory Control of Discrete Event Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(12): 1921-1935
- [11] Lin F, Wonham W M. On Observability of Discrete Event Systems [J]. *Information Sciences*, 1988, 44(3): 173-198
- [12] Cieslak R, Desclaux C, Fawaz A, et al. Supervisory Control of Discrete Event Processes with Partial Observation [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1988, 33(3): 249-260
- [3] Li D F, Cheng C T. New Similarity Measures of Intuitionistic Fuzzy Sets and Application to Pattern Recognitions [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, 23(1-3): 221-225
- [4] Przemysław Grzegorzewski. Distances Between Intuitionistic Fuzzy Sets and/or Interval-valued Fuzzy Sets Based on the Hausdorff Metric [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2004, 148(2): 319-328
- [5] Li D F. Multiattribute Decision Making Models and Methods Using Intuitionistic Fuzzy Sets [J]. *J of Computer and System Sciences*, 2005, 70(1): 73-85
- [6] Atanassov K T, Gargov G. Interval Valued Intuitionistic Fuzzy Sets [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1989, 31(3): 34-349
- [7] Atanassov K T. Operators Over Interval Valued Intuitionistic Fuzzy Sets [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, 64(2): 159-174
- [8] Yang J B. Rule and Utility Based Evidential Reasoning Approach for Multiattribute Decision Analysis under Uncertainty [J]. *European J of Operational Research*, 2001, 131(1): 31-61
- [9] 尤天慧, 樊治平. 区间数多指标决策的一种 TOPSIS 方法 [J]. *东北大学学报*, 2002, 23(9): 840-843  
(You T H, Fan Z P. TOPSIS Method for Multiple Attribute Decision Making with Intervals [J]. *J of Northeastern University*, 2002, 23(9): 840-843)
- [10] Shi Y, Eberhart R C. Empirical Study of Particle Swarms Optimization [A]. *Proc of the Congress on Evolutionary Computation* [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1999: 1945-1949

(上接第 1256 页)