

动态系统的模糊时序知识表达、 推理及其应用¹⁾

钱大群 吕勇哉

(上海交通大学自动控制系) (浙江大学)

摘 要

本文以工业动态系统的知识表达和问题求解为背景,提出了一个描述动态系统行为的模糊时序模型、相应的时序匹配与数值匹配和推理方法。并将它们应用于建立催化裂化装置的故障诊断专家系统。这一研究有利于沟通人工智能与控制理论的联系。

关键词: 时序知识,模式匹配,时序推理,模糊集,动态系统。

一、引 言

目前虽有一些智能控制系统已应用于工业过程,但它们大都只是采用了一些简单的人工智能技术。人们未能从这些应用中提出具有一定普遍意义的智能控制方法。如何进一步将控制理论与人工智能结合起来,至今仍然缺乏系统的阐述。作者认为,由于人工智能基本上用于静态过程,而控制系统大都是动态系统,因此,研究工业动态系统的知识表达及问题求解,对将人工智能引入控制领域,加深控制理论与人工智能的联系,具有一定的普遍意义。

如何表达工业动态系统的时序知识并进行时序推理,是人工智能在工业动态系统应用中所面临的一个重要问题。目前人工智能领域中主要研究确定性的时序知识的表达方式和离线状态下的时序推理^[1,2]。本文探讨了工业动态系统的模糊时序知识的表达方式和在线的推理策略。

二、模糊时序模型

定义 1. 时序描述符 $T(P)$ 是描述模糊命题 P 的时间特性的算子。其基本的、完整的形式为

本文于 1988 年 6 月 20 日收到。

1) 本文的研究获国家教委科学基金的资助。

时间点描述符: $AT\left(P, \int_T \frac{\mu(t)}{t}, \text{unit}\right)$,

或 时间段描述符: $AT\left(P, \int_T \frac{\mu_1(t)}{t}, \int_T \frac{\mu_2(t)}{t}, \text{unit}\right)$,

式中 P 为模糊命题; $\int_T \frac{\mu(t)}{t}$ 是一个描述时间点的模糊数, 当 P 所描述的事件在时间轴上的一点发生时, μ 是时间论域 T 上的事件的发生时间的隶属函数; $\int_T \frac{\mu_1(t)}{t}, \int_T \frac{\mu_2(t)}{t}$ 是描述时间段的模糊数, 当 P 所描述的事件在时间轴上的一段时间上持续出现时, μ_1, μ_2 分别是时间论域 T 上的事件的开始时间与结束时间的隶属函数; unit 为时间单位, 如: 秒、分、小时等。

同理可以定义其它时序描述符, 如 AFTER、BEFORE、DURING 等, 并建立有关时序描述符关系的公式¹⁾。

$\int_T \frac{\mu(t)}{t}, \int_T \frac{\mu_1(t)}{t}, \int_T \frac{\mu_2(t)}{t}$ 也可称为时序描述。如果时序描述 A 所描述的时间是相对另一个时序描述 B 所描述的时间 t_B 而言, 则称 t_B 是时序描述 A 的时序参考点。在时序模型中有三种时序描述:

1) 绝对时序描述。以绝对时刻描述时间。如语句“模糊命题 P 约 5 时成立”可表示为

$$AT\left(P, \left(\frac{0}{4.50}, \frac{0.5}{4.55}, \frac{1}{5}, \frac{0.5}{5.05}, \frac{0}{5.10}\right), \text{o'clock}\right).$$

2) 相对时序描述。以非绝对时序描述的时间为时序参考点, 相对时序描述的时间与这个时序参考点间隔一定的模糊间隔。如语句“模糊命题 P_1 在模糊命题 P_2 前 2 分钟左右成立”可表示为

$$AT\left(P_1, \left(\frac{1}{0}\right), \text{min}\right) \wedge AT\left(P_2, \left(\frac{0}{0}, \frac{0.5}{1}, \frac{1}{2}, \frac{0.5}{3}, \frac{0}{4}\right), \text{min}\right).$$

3) 前后关系时序描述。它所描述的时间与时序参考点仅知前后时序关系。如语句“模糊命题 P_1 在模糊命题 P_2 之前发生”可表示为

$$AT\left(P_1, \left(\frac{1}{0}\right), \text{min}\right) \wedge AT\left(P_2, \left(\frac{1}{t > 0}\right), \text{min}\right).$$

定义 2. 模糊规则定义为如下形式:

$$\text{IF } T_1(P_1) \wedge T_2(P_2) \wedge \cdots \wedge T_m(P_m) \text{ THEN } T_{m+1}(P_{m+1}) \\ \text{WITH THE CONFIDENCE } W.$$

模糊规则所对应的事实为

$$(\bar{T}_1(\bar{P}_1) \wedge \bar{T}_2(\bar{P}_2) \wedge \cdots \wedge \bar{T}_m(\bar{P}_m)) \text{ WITH THE CONFIDENCE } \\ (\alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_m).$$

这里, P_i, \bar{P}_i 分别是形式为“ X_i 是 F_i ”、“ X_i 是 \bar{F}_i ”的模糊命题, μ_{P_i} 是 P_i 在论域 U_i 上的隶

1) 钱大群, 动态系统的知识表达, 问题求解及其应用, 博士学位论文, 浙江大学, 1987.

属函数, $\mu_{\bar{P}_i}$ 是 \bar{P}_i 在论域 U_i 上的隶属函数, T_i, \bar{T}_i 是时序描述符 ($i = 1, 2, \dots, m+1; j = 1, 2, \dots, m$), W 是规则的可信度, α_i 是 $\bar{T}_i(\bar{P}_i)$ 的可信度 ($i = 1, 2, \dots, m$).

三、模式匹配与推理

由于数据基中通过采样得到的数据序列构成了现场变量的动态症状和症状间的时序关系, 并且模糊规则前提中的模糊命题间也存在着模糊的时序关系, 因此在模式匹配时, 不仅数据基中的数据必须与模糊命题在数值上匹配, 而且还必须确定现场变量在数据基中的动态症状和这些症状间的时序关系, 并与由时序描述符描述的模糊的时序关系匹配. 这个在线的、模糊的时序匹配与数值匹配问题是一个新颖的问题.

模式匹配与推理可由四个步骤完成. 本文仅讨论时间段上的模糊命题的模式匹配.

步骤 1. 时间域的确

确定时序描述符 T_i 的时序描述 $\int_T \frac{\mu_j(t)}{t}$ 所对应的时间域 $[t_{i0j}, t_{ini}]$ 以及 $[t_{i0j}, t_{ini}]$ 上的数据基中的变量 X_i 的值 $x_i(t)$, $j = 1, 2$.

1) 绝对时序描述: 只要确定当前时刻 t_n , 由 t_n 与采样周期便可得到 $[t_{i0j}, t_{ini}]$ ($j = 1, 2$) 上的 $x_i(t)$.

2) 相对时序描述: 首先确定这个相对时序描述的时序参考点. 设在这个时序参考点上的模糊命题为 P_r , 并设与 P_r 对应的变量为 X_r , 如果这个时序参考点由前后关系时序描述确定, 则与时序参点对应的的时间 t_r 为

$$t_r = \begin{cases} \inf(\{t | \mu_{P_r}(x_r(t)) > \bar{\gamma}_r, t \in T\}), & \text{如果 } t_r \text{ 是 } P_r \\ & \text{的成立时刻,} \\ \sup(\{t | \mu_{P_r}(x_r(t)) > \bar{\gamma}_r, t \in T\}), & \text{如果 } t_r \text{ 是 } P_r \\ & \text{的消失时刻.} \end{cases} \quad (1)$$

$\bar{\gamma}_r$ 是 P_r 的时序匹配阈值, $\mu_{P_r}(x_r(t))$ 定义为

$$\mu_{P_r}(x_r(t)) = \begin{cases} \mu_{P_r}(\bar{u}_r), & \text{如果 } |\bar{u}_r - x_r(t)| < |u_r - x_r(t)|, \\ & \bar{u}_r \neq u_r, u_r, \bar{u}_r \in U_r, \\ 0, & \text{如果 } u_r \neq \bar{u}_r, u_r \in U_r, \end{cases}$$

则 $[t_{i0j}, t_{ini}]$ 由 t_r 加上对应的模糊间隔 $\int_T \frac{\mu_j(t)}{t}$ 便可得到 ($j = 1, 2$).

当 t_r 由相对时序描述确定时, 可重复上述方法求出 t_r 的时序参考点和 t_r .

3) 前后关系时序描述: 其时间域可参照(1)式确定.

步骤 2. 时序分析(见作者博士论文)

时序分析的任务包括两部分: (1) 针对上文求出的相对时序描述、前后关系时序描述的时间域, 判断它们间的时序关系是否与对应的模糊命题间的时序关系一致, 如果不一致, 则时序不匹配; (2) 根据上文求出的时间域和当前时刻, 判断模糊命题所描述的事件是否完全延迟或部分延迟. 对于完全延迟的事件, 其模式匹配的可信度可取值较低.

步骤 3. 数值匹配

对于同一陈述,可有不同的解释。例如,陈述“温度下午很高”可理解为:(a)下午温度平均值很高;(b)下午某一时刻温度很高;(c)在下午总存在某一时刻温度很高。因此,在模糊命题与数据基进行数值匹配之前,应对模糊命题所包含的语义进行分析,并针对其语义对数据进行相应的预处理。对应上面三种不同的语义解释,有三种相应的预处理方法。它们首先对时间域 $[t_{ioj}, t_{inj}]$ 进一步求解,得到 $[t_{isj}, t_{ifj}]$ 和 $t_{idj} (j=1,2)$ 。设当前时刻为 t_n , 则有

(1) 加权平均法:

$$[t_{isj}, t_{ifj}] = [t_{ioj}, \min(t_{inj}, t_n)], \quad t_{idj} = t_{inj}.$$

(2) 隶属函数最大值法:

$$[t_{isj}, t_{ifj}] = \{t | \mu_j(t) = \max_{t_{ioj} \leq t \leq \min(t_{inj}, t_n)} \mu_j(t)\}, \quad t_{idj} = \sup\{t | \mu_j(t) = \max_{t_{ioj} \leq t \leq t_{inj}} \mu_j(t)\}.$$

这里,不失一般性地设 $\sup\left(\int_T \frac{\mu_j(t)}{t}\right) = [t_{ioj}, t_{inj}]$, 下同。

(3) 变量最佳匹配法:

$$\begin{aligned} [t_{isj}, t_{ifj}] &= \{t | \mu_{F_j}(x_i(t)) \\ &= \max_{t_{ioj} \leq t \leq \min(t_{inj}, t_n)} \mu_{F_j}(x_i(t))\}, \end{aligned}$$

$$t_{idj} = \begin{cases} t_{ifj}, & \text{如果 } t_{ifj} < t_n \\ t_{inj}, & \text{如果 } t_{ifj} = t_n \end{cases}$$

X_i 的预处理值 \bar{x}_i 定义为

$$\bar{x}_i = \begin{cases} \sum_{t_{is1} \leq t \leq t_{if1}} \frac{\mu_1(t)}{\sum_{t_{is1} \leq t \leq t_{if1}} \mu_1(t)} \times x_i(t), & t_n \leq t_{id1}, \\ \frac{1}{2} \left(\sum_{t_{is1} \leq t \leq t_{if1}} \frac{\mu_1(t)}{\sum_{t_{is1} \leq t \leq t_{if1}} \mu_1(t)} \times x_i(t) \right. \\ \left. + \frac{1}{k_i - 1} \sum_{t_{if1} < t \leq t_n} x_i(t) \right), & t_{if1} < t < t_{is2}, \quad k_i T_s = t_n - t_{if1}, \quad k_i > 1, \\ \frac{1}{3} \left(\sum_{t_{is1} \leq t \leq t_{if1}} \frac{\mu_1(t)}{\sum_{t_{is1} \leq t \leq t_{if1}} \mu_1(t)} \times x_i(t) \right. \\ \left. + \frac{1}{k_i - 1} \sum_{t_{if1} < t < t_{is2}} x_i(t) + \sum_{t_{is2} \leq t \leq t_{if2}} \frac{\mu_2(t)}{\sum_{t_{is2} \leq t \leq t_{if2}} \mu_2(t)} \times x_i(t) \right), \\ & t_{is2} \leq t_n, \quad k_i T_s = t_{is2} - t_{if2}, \quad k_i > 1. \end{cases}$$

T_s 为 X_i 的数据采样周期。

定义时序匹配可信度 C_i 为

$$C_i = \begin{cases} \max_{t_{is1} \leq t \leq t_{ij1}} \mu_1(t), & t_n < t_{is2} \\ \max_{t_{is1} \leq t \leq t_{ij1}} (\mu_1(t)) \wedge \max_{t_{is2} \leq t \leq t_{ij2}} (\mu_2(t)), & t_{is2} \leq t_n \end{cases}$$

并定义数值匹配可信度 E_i 为

$$E_i = \underline{\mu}_{F_i}(\bar{x}_i).$$

步骤 4. 模糊推理

导出的结论的隶属函数 $\mu_{\bar{F}_{m+1}}$ 为

$$\mu_{\bar{F}_{m+1}} = \mu_{F_{m+1}},$$

其可信度 α_{m+1} 为

$$\alpha_{m+1} = \min^{(L)}(W, \min_{i=1, \dots, m}^{(L)}(E_i \times C_i \times \alpha_i)),$$

这里, $\min_{i=1, \dots, m}^{(L)}(a_i) = \prod_{i=1, \dots, m} (a_i) + \min_{i=1, \dots, m} (a_i) \left(\min_{i=1, \dots, m} (a_i) - \prod_{i=1, \dots, m} (a_i) \right)^{[3]}$. 结论的时间域可采用上述同样的方法求得.

四、动态过程的故障诊断

根据上述原理, 建立了一个用于催化裂化装置故障诊断的专家系统. 下面给出该原理的一个应用例子.

对陈述“以 0.96 的可信度认为: 当缓冲罐藏量上升时, 以此时为基准点, 约 1 分钟后反应压力下降, 再生温度上升, 约 2 分钟后再生压力下降, 反应温度下降, 则约在 1 分钟前再生单动滑阀因失灵而关闭; 且当再生单动滑阀恢复正常位置后, 约 1 分钟后上述变化趋势开始反向变化”. 诊断规则可表示为

$$\begin{aligned} & \text{IF } AT(P_1, U_1(0), U_2(t), \text{min}) \wedge AT(P_2, U_1(1), U_2(t), \text{min}) \wedge \\ & AT(P_3, U_1(1), U_2(t), \text{min}) \wedge AT(P_4, U_1(1), U_2(t), \text{min}) \wedge \\ & AT(P_5, U_1(1), U_2(t), \text{min}) \wedge AT(P_6, U_1(2), U_2(t), \text{min}) \wedge \\ & AT(P_7, U_1(2), U_2(t), \text{min}) \wedge AT(P_8, U_1(2), U_2(t), \text{min}) \wedge \\ & AT(P_9, U_1(2), U_2(t), \text{min}) \text{ TNEN } AT(P_{10}, U_1(-1), \\ & U_2(t-1, \text{min}) \text{ WITH THE CONFIDENCE } 0.96 \end{aligned}$$

这里, P_1 描述“缓冲罐藏量上升”; P_2, P_3 描述“反应压力下降”; P_4, P_5 描述“再生温度上升”; P_6, P_7 描述“再生压力下降”; P_8, P_9 描述“反应温度下降”; P_{10} 以阀位描述“再生单动滑阀因失灵而关闭”. 这些命题的具体含义见表 1, 表中 P_1 至 P_9 是以变量预处理后的值为论域.

$$\begin{aligned} U_1(i) &= \left(\frac{0}{i}, \frac{0.5}{i+0.30}, \frac{1}{i+1}, \frac{0.5}{i+1.30}, \frac{0}{i+2} \right), \\ U_2(t+i) &= \left(\frac{0}{0 < t+i}, \frac{0.5}{t+i+0.30}, \frac{1}{t+i+1}, \frac{0.5}{t+i+1.30}, \right. \\ & \left. \frac{0}{t+i+2} \right). \end{aligned}$$

表 1 模糊命题的隶属函数

隶属度		0	0.09	0.21	0.39	0.58	0.74	0.86	0.93	0.97	1.0
论 域	P_1 mmH ₂ O	775	790	805	820	835	850	865	880	895	910
	P_2 kg/cm ²	1.65	1.6	1.55	1.5	1.45	1.4	1.35	1.3	1.25	1.2
	P_3 kg/cm ² ·min	0	-0.15	-0.3	-0.45	-0.6	-0.75	-0.9	-1.05	-1.2	-1.35
	P_4 °C	680	680.8	681.6	682.4	683.2	684	684.8	685.6	686.4	687.2
	P_5 °C/min	0	0.35	0.7	1.05	1.4	1.75	2.10	2.45	2.8	3.15
	P_6 kg/cm ²	1.62	1.58	1.54	1.50	1.46	1.42	1.38	1.34	1.3	1.26
	P_7 kg/cm ² ·min	0	-0.012	-0.024	-0.036	-0.048	-0.06	-0.072	-0.084	-0.096	-0.108
	P_8 °C	485	482	479	476	473	470	467	464	461	458
	P_9 °C/min	0	-0.7	-1.4	-2.1	-2.8	-3.5	-4.2	-4.9	-5.6	-6.3
	P_{10} %	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

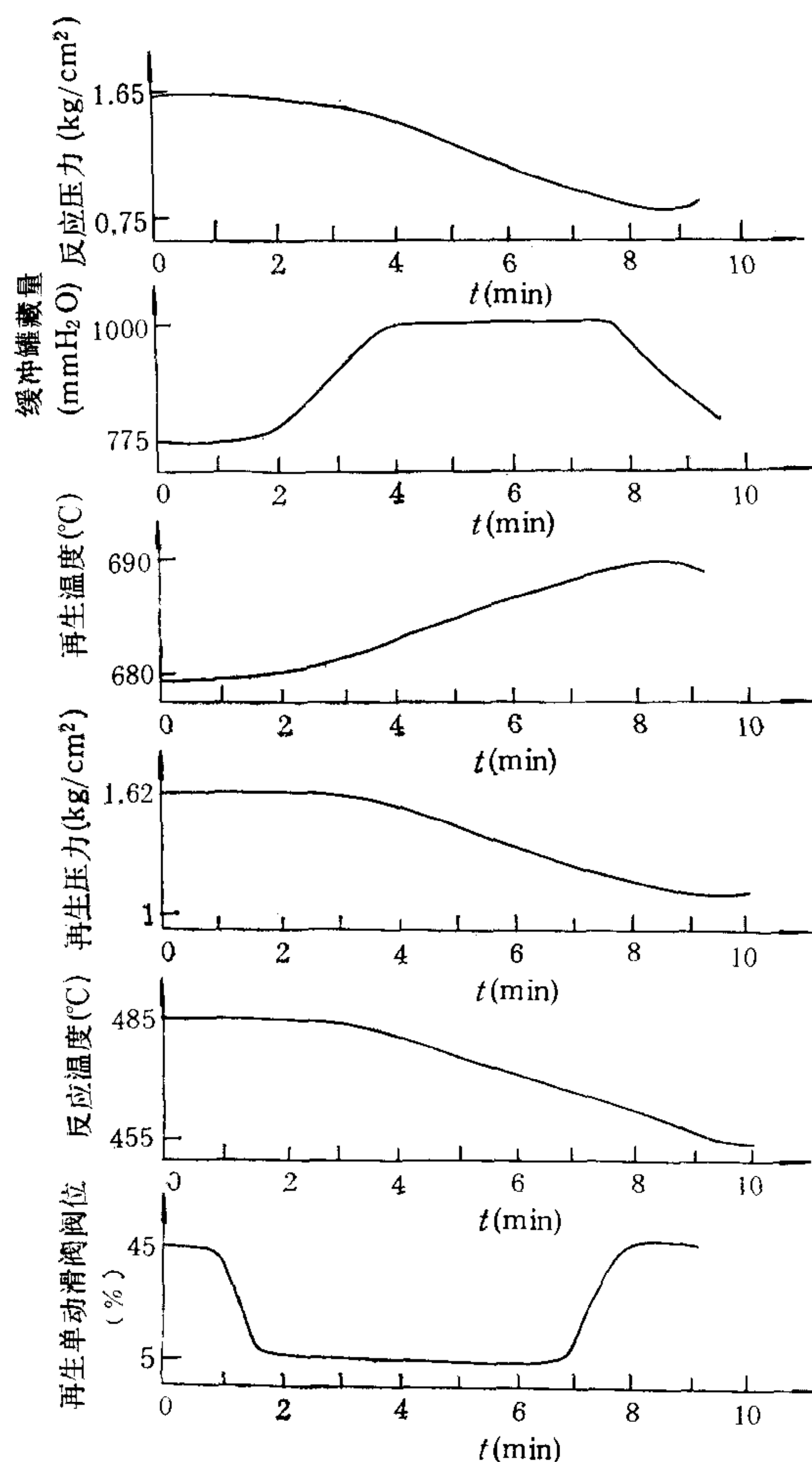


图 1 物理量的变化

这里以时刻 0 为时序参考点。

当再生单动滑阀因失灵而关闭时，这些物理量的变化如图 1 所示。当计算机在时间轴上零时开始采样， T_s 为 0.5 分，在 t_n 为 9.5 分时，采用加权平均法对采样值进行预处理，可以 0.82 的可信度导出结论：再生单动滑阀在时间域 [1.5, 2.5] (即 $[t_{10s1}, t_{10f1}]$) 间开始关闭，在时间域^[7,8] (即 $[t_{10s2}, t_{10f2}]$) 开始由关闭状态转向打开状态。这个结论与图 1 中的再生单动滑阀的实际变化曲线比较接近。

五、结 束 语

本文提出的模糊时序模型可以有效地描述动态系统的不精确的时序知识；并提出了一个模糊的、在线的时序匹配与数值匹配方法以及推理策略。根据这些原理建立的催化裂化装置故障诊断专家系统可以有效地在动态环境中在线地工作。

本文所研究的命题对模糊专家系统的建立和人工智能在工业动态环境中的应用都具有一定的意义。

参 考 文 献

- [1] Kahn, K. and Gorry, G. A., Mechanizing Temporal Knowledge, *Artificial Intelligence*, 9(1977), 87—108.
- [2] Allen, J. F., Maintaining Knowledge about Temporal Intervals, *Commun. of ACM*, 26(1983), 832—843.
- [3] Lesmo, L. and Torasso, P., Evidence Combination in Expert Systems, *International Journal of Man-Machine Studies*, 22(1985), 307—326.

FUZZY TEMPORAL KNOWLEDGE REPRESENTATION, REASONING AND THEIR APPLICATIONS TO DYNAMIC SYSTEMS

QIAN DAQUN

(Dept. of Automation, Shanghai Jiaotong University)

LU YONGZAI

(Institute of Industrial Control, Zhejiang University)

ABSTRACT

Based on knowledge representation and reasoning of industrial dynamic systems, this paper proposes a fuzzy temporal model describing the dynamic system behaviors, the relevant temporal match and/or numerical match, and the reasoning approaches. The proposed methods have been used to establish an expert system for the fault diagnosis of a fluidized catalytic cracking unit. Obviously, this study may be helpful to link the artificial intelligence with control.

Key words: Temporal knowledge; pattern match; temporal reasoning; fuzzy set; dynamic system.