

文章编号: 1005-8893(2000)02-0052-05

催化裂化系统模糊诊断模型及其算法^{*}

王凯全¹, 陈炳琳²

(1. 江苏石油化工学院 工商管理系, 江苏 常州 213016; 2. 茂名石化公司 安全监察处, 广东 茂名 525011)

摘要: 催化裂化系统的故障及其表现具有模糊集关系。现建立的模糊故障诊断模型, 对识别催化裂化系统中能量波动故障的专家知识进行了整理, 编制了相应的计算机程序。

关键词: 催化裂化; 模糊诊断; 计算机算法

中图分类号: X 913; TE 624.4

文献标识码: A

引言^[1-4]

系统故障诊断技术是系统模式识别的重要内容。系统故障诊断的一个重要目的是预防各类事故。催化裂化系统具有两类危险源, 第一类危险源是触发系统中能量或危险物质波动和激化的各种因素, 第二类危险源是使约束限制这些能量或危险物质的措施失效、破坏的各种因素。前者是事故的根据, 后者是事故的条件。为了实现“安、稳、长、满、优”生产, 必须运用故障诊断技术对系统危险源、特别是第一类危险源的发展变化情况进行判断。

催化裂化系统在封闭状态下运行, 人们对系统内在危险物质的情况及其约束装置的状态不能直接体察, 只能通过外在的故障表现来推断系统所处的危险程度, 故障及其表现间的关系具有模糊集性质, 如何对催化裂化系统进行模糊故障诊断是安全管理中需要认真研究的重要问题。本文以催化裂化流程中反应—再生系统的能量波动为例, 进行有关问题的探索。

1 系统模糊故障诊断模型及其算法

1.1 模糊故障诊断的基本理论^[5-7]

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示某个系统的故障集, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 为该系统出现故障后的症状集, 所谓故障诊断是指由所出现的症状来推断发生了哪些故障。首先, 规定基本命题:

若 $A_i: x_i$ 发生, $i=1, 2, \dots, n$;

$B_j: y_j$ 出现, $j=1, 2, \dots, m$;

则 $R_{ij}: x_i$ 与 y_j 有因果关系。即 x_i 发生有可能导致 y_j 出现。否则就说它们无因果关系。可表达为

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i \text{ 可能导致 } y_j \text{ 出现} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

根据基本命题再定义以下复合命题:

$$P_j: B_j \rightarrow \bigvee_{i=1}^n (A_i \wedge R_{ij}), \quad j=1, 2, \dots, m$$

$$P_{ij}: A_i \rightarrow B_j, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad j=1, 2, \dots, m$$

其中 P_j 的意义是: 如果第 j 个症状出现, 则至少发生一种故障 x_i , 并且这种故障与 y_j 有因果关系。实际上, 除非在 X 中遗漏了一种与 y_j 有因果关系的某种故障, 命题 P_j 的真实程度是高的, 因此一般可以取 $T(P_j) = p_j = \text{ct}$ (纯真)。

P_{ij} 的意义是: 如果故障 x_i 发生, 那么症状 y_j 出现, P_{ij} 的真实程度取决于 A_i 导致 B_j 的程度。设

* 收稿日期: 2000-05-15

作者简介: 王凯全(1951—), 男, 上海市人, 副教授, 博士, 主要从事安全技术及管理方面的研究。

$p_{ij} = T(P_{ij})$, $r_{ij} = T(R_{ij})$, 注意到 R_{ij} 的意义, 有下面的假设:

$$\left. \begin{aligned} r_{ij} = \text{ct} &\Leftrightarrow p_{ij} > \text{un} \\ r_{ij} = \text{cf} &\Leftrightarrow p_{ij} = \text{un} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

当 $r_{ij} = \text{ct}$ 时, p_{ij} 真于未知 un, 但具体赋值依赖于 A_i 导致 B_j 的程度。

当 $r_{ij} = \text{cf}$ (纯假) 时, y_j 的出现不依赖于 x_i , 故取 $p_{ij} = \text{un}$ (未知)。

根据 (1) 式, 我们可以假设:

$$\begin{aligned} (p_j)_\lambda &= [1, 1], (p_{ij})_\lambda = [(p_{ij})_\lambda^-, 1] \\ (b_j)_\lambda &= [(b_j)_\lambda^-, (b_j)_\lambda^+] \end{aligned}$$

其中 $b_j = T(B_j)$ 。利用演绎推理原则, 有

(1) 如果已知 $p_j = \text{ct}$ 和 b_j , 可按下式求得 $\bigvee_{i=1}^n (A_i \wedge R_{ij})$ 的真值:

$$\begin{aligned} T \bigvee_{i=1}^n (A_i \wedge R_{ij}) &= \bigvee_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij}) = \\ \bigcup_{\lambda \in [0, 1]} \lambda [&((b_j)_\lambda^- + (p_j)_\lambda^- - 1) \vee 0, 1] = \\ \bigcup_{\lambda \in [0, 1]} \lambda [&(b_j)_\lambda^- 1] \end{aligned}$$

其中, $a_i = T(A_i)$ 。于是对任何 λ , 存在广义模糊关系方程:

$$\bigvee_{i=1}^n ([(a_i)_\lambda^-, (a_i)_\lambda^+] \wedge r_{ij}) = [(b_j)_\lambda^-, 1] \quad (2)$$

该方程意味着可由 b_j 求 a_j , 即由症状 B_j 来推断 A_i 发生的真实程度。

(2) 如果已知 p_{ij} 和 b_j , 可按下式求出 A_i 的真值 $a_i = T(A_i)$:

$$a_i = \bigcup_{\lambda \in [0, 1]} \lambda [0, ((b_j)_\lambda^+ - (p_{ij})_\lambda^- + 1) \wedge 1] \quad (3)$$

该方程意味着, 由 P_{ij} 和 B_j 来推断 A_i 发生的真实程度。

(2) 式、(3) 式就是根据命题 P_j 和 P_{ij} , 通过逻辑演绎的推理得到的一类诊断模型。它们的实质是由症状 y_j 的出现来推断故障 x_i 发生的真实程度。

1.2 诊断模型的应用思路

首先, 将症状分为三类: 阳性症状 (与故障间有因果关系)、阴性症状 (与故障间无因果关系) 和中性症状 (与故障间因果未知)。建立如下指标集:

$$\begin{aligned} J_1 &\triangleq \{j | b_j > \text{un}\}; J_2 \triangleq \{j | b_j > \text{cf}\}; J_3 \triangleq \{j | \\ &b_j = \text{un}\} \end{aligned}$$

分别为阳性症状指标集、阴性症状指标集和中性症状指标集。

诊断时, 先根据阴性指标集 J_2 来排除某些故障 x_i 发生的可能。在 J_2 中 $b_j = \text{cf}$ (纯假), 应以 (3) 式求出 $a_i^{(j)}$ (j 对应故障集中的指标)。此时, $(b_j)_\lambda^+ = 0$, 因此 $(a_i)_\lambda^{(j)} = [0, 1 - (p_{ij})_\lambda^-]$, 于是

$$\begin{aligned} a_i &= \bigwedge_{j \in J_2} a_i^{(j)} \\ a_i^{(j)} &= [0, 1 - (p_{ij})_\lambda^-] = \\ [0, 1 - \bigvee_{j \in J_2} (p_{ij})_\lambda^-] \end{aligned} \quad (4)$$

再针对 J_1 来分析 x_i ($i \in I$) 出现的真实程度。注意到 $(\forall j \in J_1) (b_j > \text{un})$, 即 B_j 为偏真型, 应利用假言推理 (2) 式。只对 $i \in I$ 求解广义模糊关系方程:

$$\begin{aligned} \bigvee_{i \in I} ([(a_i)_\lambda^-, (a_i)_\lambda^+] \wedge r_{ij}) &= \\ [(b_j)_\lambda^-, 1] \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $(a_i)_\lambda^-, (a_i)_\lambda^+$ 为未知量。该方程等价于

$$\begin{cases} \bigvee_{i \in I} ((a_i)_\lambda^- \wedge r_{ij}) = (b_j)_\lambda^- \\ \bigvee_{i \in I} ((a_i)_\lambda^+ \wedge r_{ij}) = 1 \end{cases} \quad (6)$$

它有解的充分而必要的条件是

$$(\forall j \in J_1) (\exists i \in I) (r_{ij} = 1) \quad (7)$$

在实际应用中可不必求出方程的全部解, 应当优先考虑对实际问题最有意义的解。这时, 应考虑以下两种情形:

情形 1: 在早期诊断中, n 个故障同时发生的可能性远远小于单个故障发生的可能性, 这时我们可以优先考虑 (6) 式中只包含一个非零分量的极小解, 这种解称之为独点下界解, 它满足:

$$(a_k)_\lambda^- \neq 0, (\forall i \neq k) ((a_i)_\lambda^- = 0) \quad (8)$$

这种解存在的充分而必要的条件是

$$(\exists k \in I) (\forall j \in J_1) (r_{kj} = 1) \quad (9)$$

这时,

$$(a_i)_\lambda^- = \begin{cases} (a_k)_\lambda^- = \bigvee_{j \in J_1} (b_j)_\lambda^-, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad (10)$$

此外, 方程 (6) 的最大解为 $(a_i)_\lambda^+ = 1$ ($i \in I$), 于是

$$a_i = \bigcup_{\lambda \in [0, 1]} \lambda [(a_i)_\lambda^-, (a_i)_\lambda^+]$$

其中

$$[(a_i)_\lambda^-, (a_i)_\lambda^+] =$$

$$\begin{cases} [\bigvee_{j \in J_1} (b_j)_{\lambda}^-, 1], & i = k \\ [0, 1], & i \neq k \end{cases}$$

这样, 我们得到

$$a_i = \begin{cases} \bigvee_{j \in J_1} b_j, & i = k \\ un, & i \neq k \end{cases} \quad (11)$$

由 (11) 式得到的诊断结果为: 第 i 种故障发生的真实程度为语言值 $\bigvee_{j \in J_1} b_j$ 。

情形 2: 虽然方程 (6) 有解, 但没有独点下界解, 而且有若干极小解, 那么可认为症状是由 n 个故障同时发生而引起的, 做方程 (6) 所有极小解的“交”, 称之为伪最小解, 其分量为

$$(a_i)_{\lambda}^- = \bigvee_{j \in J_1} \{ (b_j)_{\lambda}^- \mid r_{ij} = 1 \text{ 且 } (\forall k \in I) \}$$

$$(k \neq i) (r_{ij} = 0) \}$$

因此我们有

$$a_i = \bigcup_{\lambda \in [0, 1]} \lambda [(a_i)_{\lambda}^-, 1]$$

即 $a_i = \bigvee_{j \in J} \tau_{ij}$, 其中

$$\tau_{ij} = \begin{cases} b_j, & r_{ij} = 1 \text{ 且 } (\forall k \in I) (k \neq i) (r_{ij} = 0) \\ un, & \text{其它} \end{cases}$$

(12)

选择 $i \in \{i \mid a_i > un\}$ 所对应的故障作为诊断结果。

1.3 故障诊断的步骤

总结上述过程, 诊断步骤概括如图 1。

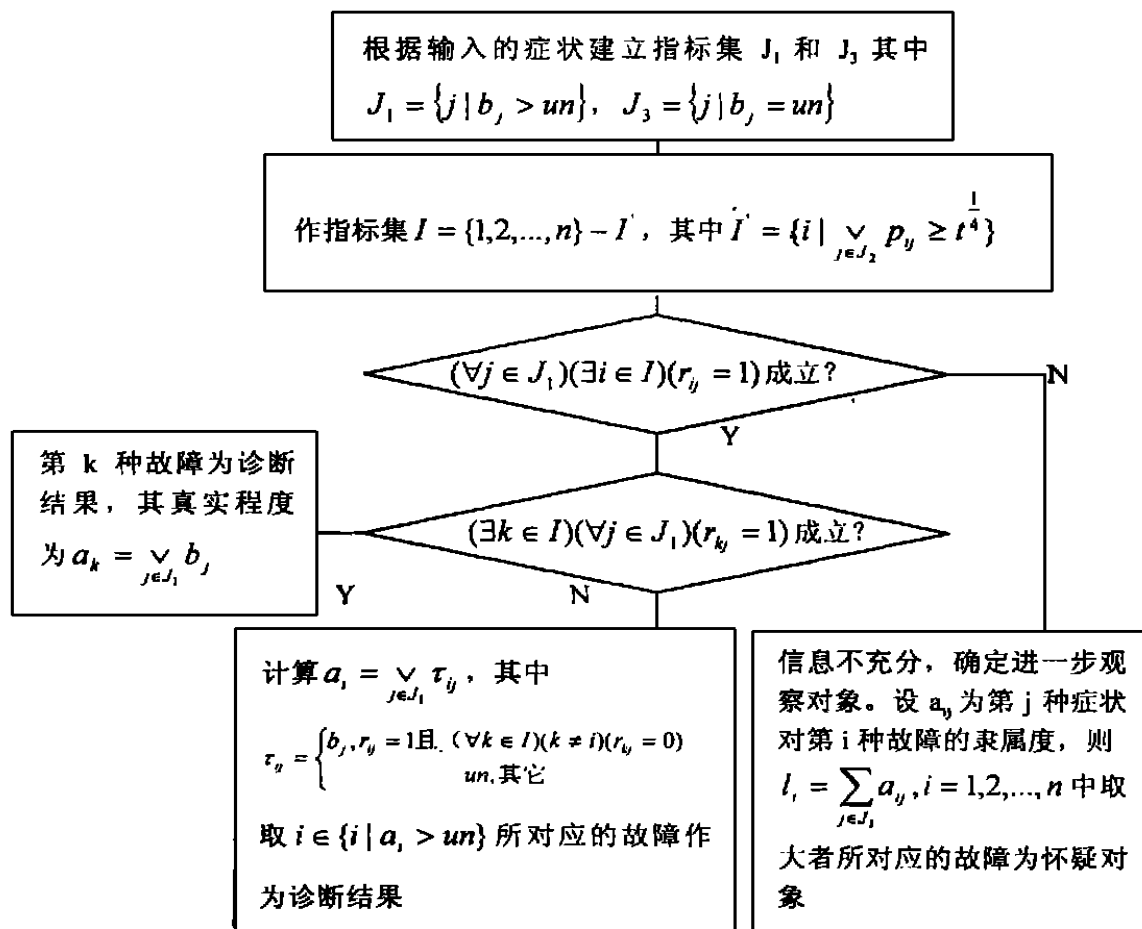


图 1 模糊故障诊断程序

2 催化裂化流程能量波动的故障诊断

2.1 专家知识的收集和整理

催化裂化流程运行中能量的波动主要表现为反

应温度大幅度波动、沉降器压力大幅度波动、两器差压大幅度波动总进料量大幅度波动等, 这些波动都可能引起火灾、爆炸和物料严重泄露等恶性事故, 因而属于重大事故隐患。当系统能量发生波动时, 应及时准确地找到原因并予以克服。表 1、表 2 为针对茂名石化公司炼油厂 II 套催化的 13 种波

动进行问卷调查所获得的专家知识。其中 x_i 为第 i 种事故原因, y_j 为第 j 种波动, 以 A 、 B 、 C 、 D 、 E 表达语言真值“最可能”、“很可能”、“有可能”、“或许可能”、“不排除可能”。相应的第 j 种波动对第 i 种事故原因的隶属度为 $1/1$ 、 $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/4$ 、 $1/5$ 。

表 1 催化裂化反应再生系统事故专家知识

事故原因 x_i	事故表现 y_j												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1 原料带水	A	B	D	C								E	
2 再生滑阀失去控制	B	C	B							B			
3 总进料量仪表失控	C		A										B
4 原料泵抽空	D		B								B	D	
5 进沉降器蒸汽带水		D								C			
6 烟机入口蝶阀失控			A			D							
7 再生调节系统失控			C					B					
8 外取热管破裂			D		A							B	
9 再生器碳堆积						A	A	C					
10 再生器二次燃烧			C			B		A	D				
11 待生催化剂带油						C			A				
12 待生管阻塞	B				B					A	A		
13 提升管阻塞		B		C								A	A
14 催化剂架桥		B	E										

表 2 催化裂化反应再生系统事故表现说明

序号	事故表现	序号	事故表现
1	反应温度大幅度波动	8	再生器局部升温
2	沉降器压力大幅度波动	9	再生温度、压力上升
3	两器差压大幅度波动	10	沉降器藏量上升
4	总进料量大幅度波动	11	待生立管压降为 0
5	再生温度突然下降	12	反应温度急剧
6	烟气氧含量下降, CO 上升	13	沉降器藏量下降
7	旋分器压降明显增加		

2.2 能量波动故障诊断的计算机实现

根据上述理论和专家知识, 编写了基于 Visaul—FoxPro 5. 0^[8] 平台的计算机程序。图 2 为系统控制结构图。

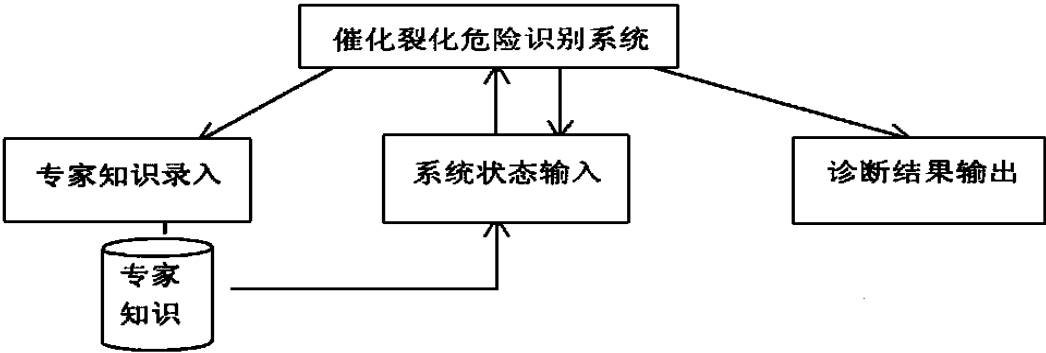


图 2 危险源识别系统控制结构图

例如, 观察发现系统反应温度大幅度波动, 两器差压大幅度波动、再生温度突然下降, 其计算机运行步骤是:

- (1) 进入系统, 见图 3;
- (2) 预先已输入了专家知识, 见图 4;
- (3) 输入系统状态, 见图 5;
- (4) 系统输出。识别结果是: 最可能原因为原料带水; 很可能原因为烟机入口蝶阀控制失灵; 有可能原因为再生滑阀控制失灵, 见图 6。



图 3 故障诊断系统封面

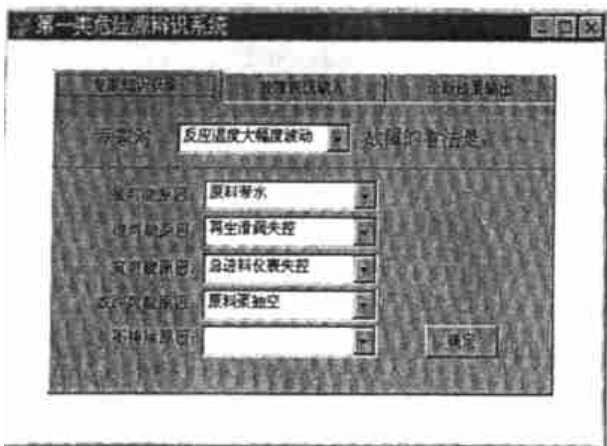


图 4 专家知识获取界面



图 6 故障诊断结果界面



图 5 故障表现输入界面

参考文献:

- [1] 汪培庄. 应用模糊数学 [M]. 北京: 北京经济学院出版社, 1989. 53—76.
- [2] 汪培庄. 模糊系统理论与模糊计算机 [M]. 北京: 科学出版社, 1996. 24—50.
- [3] 沈清. 模式识别导论 [M]. 北京: 国防科技大学出版社, 1991. 66—78.
- [4] 罗承忠. 模糊集合论 (上册) [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1989. 10—40.
- [5] Wang P Z. Win-win Strategy for Probability and Fuzzy Mathematics [J]. J of Fuzzy Mathematics, 1993, 1 (1): 39—42.
- [6] 张全寿, 周建峰. 专家系统建造原理及方法 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992. 66—80.
- [7] 汪培庄, 李洪兴. 知识表示的数学理论 [M]. 天津: 天津科技出版社, 1994. 12—25.
- [8] 明寰资讯. Visual FoxPro 学习手册 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1997. 10—77.

Fuzzy Diagnosis Model and Algorithm for FCCU

WANG Kai—quan¹, CHEN Bing—lin²

(1. Department of Business Administration, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China; 2. Department of Safety Supervision, Sinopec Maoming Petrochemical Coporation, Maom-ing 525011, China)

Abstract: The relationship of faults and their expressions in FCCU system is a fuzzy one. In this paper, the fuzzy diagnosis model was set up, the expert knowledge of identifying the fault in energy undulation of FCCU was collected and reviewed, and the computer program was designed.

Key words: fluid catalytic cracking unit; fuzzy diagnoses; computer algorithm