

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201402012

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1673-4785.201402012.html>

# 动态不确定因果图在化工过程故障诊断中的应用

杨佳婧<sup>1</sup>, 张勤<sup>2</sup>, 朱群雄<sup>1</sup>

(1. 北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029; 2. 北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100083)

**摘要:** 化工过程具有高复杂性和高危险性等特点, 且生产过程都是长周期连续运转, 一旦出现故障就会造成巨大的损失, 因此对化工过程进行实时的过程监控和故障诊断, 对于确保化工生产过程的安全性具有十分重要的意义。动态不确定因果图(Dynamic Uncertain Causality Graph, DUCG)理论是一种动态不确定因果知识的表达和推理方法, 能够以图形方式简洁表达不确定因果关系, 并基于证据化简图知识库和进行事件展开运算, 最终得到定性推理结果(可能的假设事件集合)及其发生的概率。以 TE(Tennessee Eastman)化工过程为测试平台, 对基于 DUCG 理论开发的一种新的应用于化工过程的实时过程监控与故障诊断系统进行了知识库构建和实时在线故障诊断测试, 结果证明基于 DUCG 的化工过程故障诊断方法及开发的软件系统非常有效。

**关键词:** 动态不确定因果图; 故障诊断; 化工过程; TE 过程

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2014)02-0154-07

中文引用格式: 杨佳婧, 张勤, 朱群雄. 动态不确定因果图在化工过程故障诊断中的应用[J]. 智能系统学报, 2014, 9(2): 154-160.

英文引用格式: YANG Jiajing, ZHANG Qin, ZHU Qunxiong. Application of dynamic uncertain causality graph to fault diagnosis in chemical processes[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(2): 154-160.

## Application of Dynamic Uncertain Causality Graph to fault diagnosis in chemical processes

YANG Jiajing<sup>1</sup>, ZHANG Qin<sup>2</sup>, ZHU Qunxiong<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Chemical processes have the characteristics of high complexity and high risk, and the production process is in a continuous operation for a long period of time. Once a fault occurs, huge losses will be the result, so the real-time process monitoring and fault diagnosis of the chemical process are of great significance to ensuring the safety of the chemical production. The Dynamic Uncertain Causality Graph (DUCG) is a methodology used to deal with knowledge representation and reasoning of dynamical uncertain causalities. DUCG is able to compactly and graphically represent uncertain causalities, simplify the graphical knowledge base based on the online evidence and expand events as independent random event expressions, and finally reveals the qualitative reasoning results (the set of the possible hypotheses) and the probabilities of these hypotheses. In this paper, we use the TE (Tennessee Eastman) process as the test platform, and the knowledge database is built for the new real-time process monitoring and the fault diagnosis is applied to the chemical process based on the DUCG and the real-time online fault diagnosis is performed. The results show that the fault diagnosis method based on the DUCG for chemical processes and our software system are very effective.

**Keywords:** Dynamic Uncertain Causality Graph; fault diagnosis; chemical process; Tennessee Eastman

故障诊断主要研究如何对系统中出现的故障进

行检测、分离和辨识, 即判断故障是否发生, 定位故障发生的部位和种类以及确定故障的大小和发生的时间等。在存在多种可能故障的情况下, 计算各种故障的概率并根据其大小排序。故障诊断发展至今

收稿日期: 2014-02-18. 网络出版日期: 2014-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273330).

通信作者: 张勤. E-mail: zhangqin@buaa.edu.cn.

朱群雄. E-mail: zhuqx@mail.buct.edu.cn.

已经有很多方法,许多学者都对其进行过分类。其中德国的 P.M.Frank 教授和美国的 Venkatasubramanian 教授的分类方法是比较权威的。Frank 教授将故障诊断方法分成基于知识的方法、基于解析模型的方法、基于信号处理的方法三大类<sup>[1]</sup>。Venkatasubramanian 教授将故障诊断方法分为基于模型的定量方法、基于模型的定性方法和基于过程历史的方法三大类<sup>[2-4]</sup>。基于定量模型的方法要求建立系统的精确解析模型,非常复杂,因而难以实现;基于定性模型的方法利用过程作用的机理和系统元素的关系建立一种定性模型来描述系统,并进行故障诊断,故障推理时有一定的难度;基于数据的方法,要求对大量过程历史数据进行数学分析,挖掘出数据中包含的故障信息,必须利用已知的故障模式,对新出现的故障没有识别能力。每一种故障诊断方法都有各自的优缺点,单一的诊断方法不足以构建实时有效的诊断系统。实际的故障诊断系统通常都采用混合的故障诊断方法。其中,将客观定量数据和主观定性信息进行综合利用是重要的研究方向。基于动态不确定因果图(DUCG)的实时故障诊断方法就是一种定性分析和定量分析相结合的方法,既有由主观经验知识建立的定性模型,也包括客观定量数据的表达,弥补了纯定性方法或纯定量方法的不足。

本文将 DUCG 理论首次应用于化工过程的实时过程监控和故障诊断,并以国际上广泛采用的 TE 化工过程模拟器为平台,构建 DUCG 知识库,建立 TE 与 DUCG 之间的在线监测通信接口,进行实时故障诊断测试,取得了理想的结果。

## 1 动态不确定因果图理论

动态不确定因果图(Dynamic Uncertain Causality Graph, DUCG)理论<sup>[5-6]</sup>是张勤教授提出的一种用于处理不确定因果关系的理论模型。其基本思想是将不确定的因果关系用独立的随机事件并以图形的方式进行表达。由此引入了推理过程中的图形和逻辑化简,首先得到定性推理结果,然后再进行概率数值计算。DUCG 的目标是在已知证据和所有假设事件先验概率的情况下,通过推理计算求解当前可能的假设事件及其后验概率。

### 1.1 DUCG 简介

DUCG 是一个有向图,图中包含一系列节点和有向弧,其中本文仅涉及多赋值 DUCG(M-DUCG)模型,其定义如下:

$B$  节点代表基本(Basic)或根(root)原因变量或事件,分别画为矩形  $B_i$  或  $B_{ij}$ ,其中  $i$  标识变量,  $j$  标

识状态,之间可以用逗号隔开,例如  $B_{2,1}$  等。换句话说,  $B_i$  是一个事件变量,  $B_{ij}$  是  $B_i$  处于  $j$  状态这个事件。  $B$  是一个独立的原因,没有任何输入,至少有一个输出,每个  $B$  变量有一个先验状态概率分布:  $b_{ij} = \Pr\{B_{ij}\}$ 、 $\sum_j b_{ij} = 1$ 。在实际应用中,人们可以只给出所关注的  $b_{ij}$  的概率值。

$X$  节点代表结果变量或事件,分别画为圆形  $X_n$  或  $X_{nk}$ ,其中  $n$  标识变量、 $k$  标识状态,之间可以用逗号隔开,例如  $X_{2,3}$  等。  $X$  同时也可以是原因变量或事件,至少有一个输入,可以没有输出,不能是自己的输入和输出。  $x_{nk} = \Pr\{X_{nk}\}$ 、 $\sum_k x_{nk} = 1$ 。

$G$  节点代表逻辑门变量或事件,分别画为图形  $G_i$  或  $G_{ij}$ ,用以表达输入变量之间的可以用逻辑表达式表达的任意逻辑关系,例如  $G_{2,1} = X_{2,2}$ 、 $G_{2,2} = X_{2,1} + B_{2,2} X_{2,0}$ 、 $G_{2,0} =$ “其他剩余状态”等。不同状态的逻辑表达式必需互斥,以保证  $G$  变量各状态彼此互斥。  $G$  必需有 2 个以上(含)输入和至少一个输出。  $g_{ij} = \Pr\{G_{ij}\}$ 、 $\sum_j g_{ij} = 1$ 。  $G$  节点的输入由有向弧  $\rightarrow$  或  $\dashrightarrow$  连接。例如:

$$B_i \dashrightarrow G_j \dashrightarrow X_n \text{ 或 } B_i \dashrightarrow G_j \dashrightarrow X_n$$

有向弧  $\rightarrow$  代表权重作用事件或事件矩阵,箭头指向为从原因(父)节点到结果(子)节点,例如  $B_i \dashrightarrow X_n$ 。  $A$  代表  $\rightarrow$  中的作用变量或作用事件,其中  $A_{n,i}$  代表父变量  $V_i$  ( $V \in \{B, X, G\}$ ) 作用于子变量  $X_n$  的事件矩阵,  $A_{nk,ij}$  为  $A_{n,i}$  中的元素,代表父事件  $V_{ij}$  导致子事件  $X_{nk}$  的内在作用机理是否发生这一独立随机事件,其间的关系为

$$A_{n,i} \equiv \begin{bmatrix} A_{n0,i0} & A_{n0,i1} & \cdots & A_{n0,ij} \\ A_{n1,i0} & A_{n1,i1} & \cdots & A_{n1,ij} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{nK,i0} & A_{nK,i1} & \cdots & A_{nK,ij} \end{bmatrix}$$

$$A_{nk,i} \equiv [A_{nk,i0} \quad A_{nk,i1} \quad \cdots \quad A_{nk,ij}]$$

$$A_{n,ij} \equiv [A_{n0,ij} \quad A_{n1,ij} \quad \cdots \quad A_{nK,ij}]^T$$

式中:  $J+1$  为  $V_i$  的状态数,  $K+1$  为  $X_n$  的状态数。  $a_{nk,ij} = \Pr\{A_{nk,ij}\}$ 、 $\sum_k a_{nk,ij} = 1$ 。实际应用中,人们可以只给出所关注的  $a_{nk,ij}$  的概率值。

$r_{n,i} > 0$  代表父变量  $V_i$  与子变量  $X_n$  之间的因果关系是否存在及其强度,称为关联度(relationship intensity)。  $r_{n,i} \neq 0$ , 否则该因果关系(有向弧)不存在。

$r_n \equiv \sum_i r_{n,i}$ , ( $r_{n,i}/r_n$ ) 始终绑定于  $A_{n,i}$  或  $A_{nk,i}$  或  $A_{n,ij}$  或  $A_{nk,ij}$ , 是  $A$  变量或事件的权重系数。  $F_{n,i} \equiv$

$(r_{n,i}/r_n)A_{n,i}, F_{nk,i} \equiv (r_{n,i}/r_n)A_{nk,i}, F_{n,i;j} \equiv (r_{n,i}/r_n)A_{n,i;j}, F_{nk,i;j} \equiv (r_{n,i}/r_n)A_{nk,i;j}$ , 是有向弧的文字表达。

代表条件权重作用事件或事件矩阵, 仅在满足给定条件  $Z_{n,i}$  的情况下才成立, 即当  $Z_{n,i}$  满足时, 虚线有向弧变成实线有向弧, 当  $Z_{n,i}$  不满足时, 虚线有向弧被删除。  $Z_{n,i}$  可以是任何可观测的事件。例如  $Z_{n,i} = X_{2,1}, Z_{n,i} = B_{3,0}X_{2,2}$  等等。

### 1.2 事件展开

文献[5-6]对事件展开给出了详细的定义和解释。设  $V_i (V \in \{B, X, G\})$  是  $X_n$  的父变量, 则式(1)成立:

$$X_{nk} = \sum_i (r_{n,i}/r_n) \sum_j A_{nk,i;j} V_{ij} \quad (1)$$

当式(1)中的  $V$  为  $X$  或  $G$  类型节点时, 按照上式或  $G$  的逻辑表达式继续展开, 直到表达式中的所有变量或事件均为  $\{B, A\}$  类型变量或事件和  $r$  参数。当有多个  $X$  或  $B$  类型事件相乘时, 需要对它们各自的表达式相乘后进行逻辑吸收或互斥运算, 使之成为  $\{B, A\}$  类型事件或变量和  $r$  参数的积之和的表达式, 然后将大写字母改成小写字母(小写字母代表与大写字母所代表的事件或事件矩阵对应的概率或概率矩阵), 即可计算这些表达式的概率值。逻辑吸收和互斥的运算规则详见参考文献[5-6]。

### 1.3 DUCG 推理计算过程

1) 根据接收到的证据信息  $E$  将 DUCG 图中的变量设为相应的状态, 以此来初步化简 DUCG。

2) 文献[5-6]中提出了 10 条化简规则, 根据规则 1~10 进一步化简已经初步化简的 DUCG, 规则 1~10 可按任何顺序反复应用, 直到 DUCG 图不能化简为止。

3) 在化简后的 DUCG 图中收集当前可能的故障假设事件(通常为  $B$  类型事件)。

4) 计算当前可能的故障假设事件的后验概率。设  $H_{kj}$  是希望求其条件概率的假设事件, 条件为所观察到的证据  $E = \bigcap_h E_h = \bigcap_h V_{hv}$ 。  $H_{kj}$  由  $\{X, B, A\}$  类型事件组成,  $k$  标识在  $H_{kj}$  中的变量组合(例如  $H_k = B_1 X_{2,j}$  标识这些变量的状态组合(例如  $H_{kj} = B_{1,1} X_{2,3}$ ), 则  $H_{kj}$  的后验状态概率计算公式如式(2)所示:

$$h_{kj}^s \equiv \Pr\{H_{kj} | E\} = \frac{\Pr\{H_{kj} | E\}}{\Pr\{E\}} = \frac{\Pr\{H_{kj} \bigcap_h V_{hy_h}\}}{\Pr\{\bigcap_h V_{hy_h}\}} \quad (2)$$

根据事件展开方法, 将式中的  $\bigcap_h V_{hy_h}$  和  $H_{kj} \bigcap_h V_{hy_h}$  分别展开为由  $\{B, A\}$  类型事件及其  $r$  类型参数组成的积之和的表达式, 然后用对应的概率参数(对应的小写字母)替代表式中的事件(大写字母), 从而

计算出所求状态概率  $h_{kj}^s$ 。

5) 按式(3)计算事件的排序概率:

$$h_{kj}^r \equiv \frac{h_{kj}^s}{\sum_{H_{kj} \in S_H} h_{kj}^s} = \frac{\Pr\{H_{kj}E\}}{\sum_{H_{kj} \in S_H} \Pr\{H_{kj}E\}} \quad (3)$$

显然,  $\sum_{H_{kj} \in S_H} h_{kj}^r = 1, S_H$  为所有可能故障假设(根原因事件)的集合。由此得到所有可能故障假设事件按照排序概率的排序。当只剩一个可能故障假设事件时, 故障原因被惟一确诊。

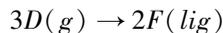
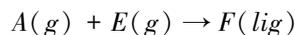
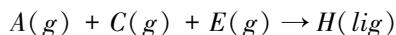
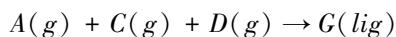
## 2 应用实例

本文首次将 DUCG 理论应用于化工过程, 选取典型的化工过程——TE 过程作为研究对象, 对其进行实时过程监控和故障诊断。首先, 需要对 TE 过程进行 DUCG 知识库模型, 然后通过接收实时过程信息进行实时过程监控, 最后当出现异常信息时, 自动启动实时推理计算, 确定故障发生的根原因, 并计算这些根原因的后验概率, 确定各故障原因的概率大小及排序。

### 2.1 TE 过程介绍

TE(Tennessee Eastman)过程是由 Downs 和 Vogel 于 1993 年提出来的一个用来开发、研究和评价过程控制技术和监控方法的典型的化工过程模型<sup>[7]</sup>。测试过程是基于一个真实工业过程的仿真。TE 过程的工艺流程图如图 1 所示。

TE 过程包括 5 个主要单元: 反应器、冷凝器、压缩机、分离器和汽提塔; 包含 8 种成分: A、B、C、D、E、F、G 和 H。气体成分 A、C、D 和 E 以及惰性组分 B 被喂入反应器, 液态产物 G 和 H 在反应器中形成, 物质 F 是反应的副产物。反应器中的各种反应为



反应器中的反应产物以蒸汽形式离开反应器, 并伴随着部分尚未反应的反应物, 通过冷凝器进行冷却, 然后送入到气液分离器。从分离器出来的蒸汽通过压缩机再循环送入反应器。为了防止过程中惰性组分 B 和反应副产品 F 的积聚, 必须排放一部分再进行循环。来自分离器的冷凝成分(流 10)被泵送到汽提塔。主要含 A、C 的流(流 4)用于汽提流 10 中的剩余反应物, 这些剩余反应物通过流 5 与再循环流结合。从汽提塔底部出来的产品 G 和 H 被送到下游过程。

TE 过程包括 41 个测量变量和 12 个操作变量。

2.2 TE 过程的 DUCG 知识库建模

TE 过程的 DUCG 知识库的建造步骤如下:

1) 研究确定对象系统即 TE 过程的  $\{X, B\}$  类型变量, 所定义的变量如表 1 所示。其中, 故障发生的

根原因被定义为  $B$  类型变量, 表 1 中的 20 个  $B$  变量依次对应 TE 过程中的 20 个故障; 过程中的测量变量和操作变量对应于  $X$  类型变量。

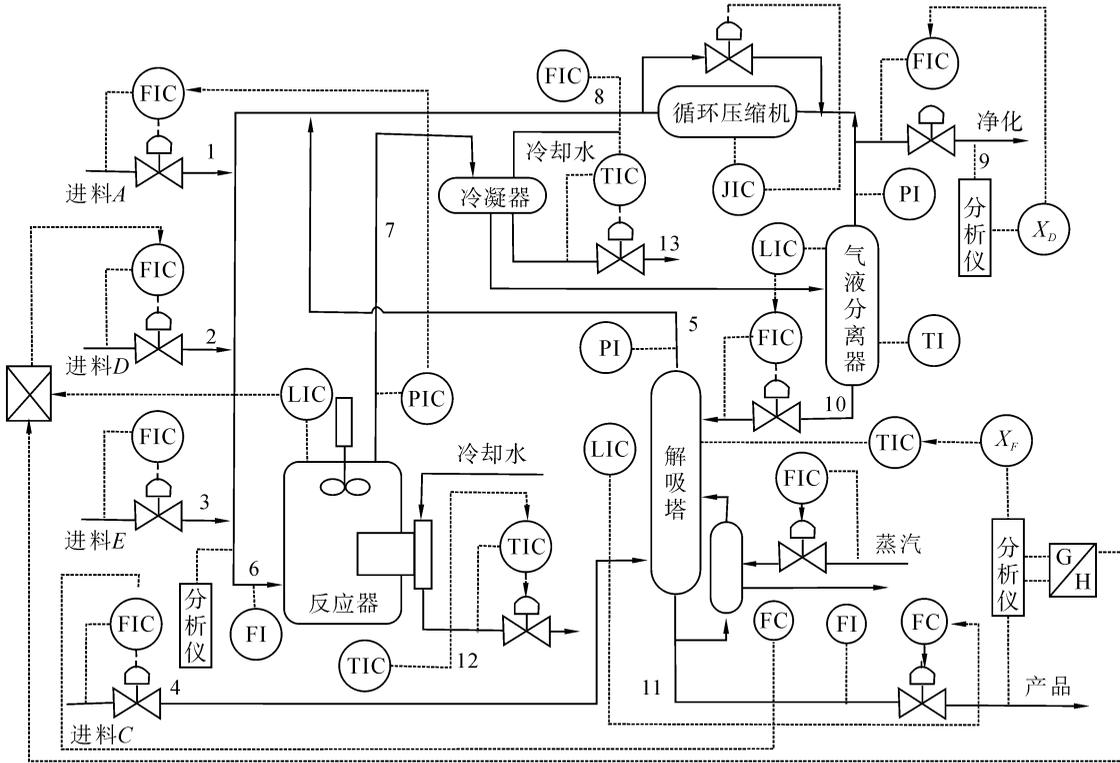


图 1 TE 过程工艺流程图

Fig.1 The Tennessee Eastman process

表 1 DUCG 变量列表

Table 1 The variables of the DUCG model of the TE

变量	描述	变量	描述
$X_1$	物料 A 的进料流量(流 1)	$X_{29}$	汽提塔压力
$X_2$	物料 D 的进料流量(流 2)	$X_{30}$	汽提塔出口流量
$X_3$	物料 E 的进料流量(流 3)	$X_{31}$	汽提塔温度
$X_4$	物料 A 和 C 的进料流量(流 4)	$X_{32}$	产品流量中组分 G 的含量
$X_5$	循环流量(流 8)	$X_{33}$	汽提塔产品流量阀门
$X_6$	反应器总进料流量(流 6)	$B_1$	故障 1: A/C 进料比变化, B 成分不变
$X_7$	反应器压力	$B_2$	故障 2: B 组分变化, A/C 进料比不变
$X_8$	反应器液位	$B_3$	故障 3: 物料 D 的进料温度变化
$X_9$	反应器温度	$B_4$	故障 4: 反应器冷却水入口温度变化
$X_{10}$	放空速率	$B_5$	故障 5: 冷凝器冷却水入口温度变化
$X_{11}$	反应器冷却水出口温度	$B_6$	故障 6: 物料 A 进料损失
$X_{12}$	反应器进料中 A 组分的含量	$B_7$	故障 7: 物料 C 压头损失
$X_{13}$	反应器进料中 B 组分的含量	$B_8$	故障 8: 物料 A、B、C 的组成发生变化
$X_{14}$	反应器进料中 C 组分的含量	$B_9$	故障 9: 物料 D 的进料温度随机变化
$X_{15}$	物料 D 控制阀	$B_{10}$	故障 10: 物料 D 的进料温度随机变化
$X_{16}$	物料 E 控制阀	$B_{11}$	故障 11: 反应器冷却水的入口温度随机变化

续表 1

变量	描述	变量	描述
$X_{17}$	物料 A 控制阀	$B_{12}$	故障 12: 冷凝器冷却水的入口温度随机变化
$X_{18}$	物料 C 控制阀	$B_{13}$	故障 13: 反应器反应动力学缓慢漂移
$X_{19}$	反应器冷却水控制阀	$B_{14}$	故障 14: 反应器冷却水控制阀粘滞
$X_{20}$	气液分离器温度	$B_{15}$	故障 15: 冷凝器冷却水控制阀粘滞
$X_{21}$	气液分离器液位	$B_{16}$	故障 16: 未知故障
$X_{22}$	气液分离器压力	$B_{17}$	故障 17: 未知故障
$X_{23}$	气液分离器出口流量	$B_{18}$	故障 18: 未知故障
$X_{24}$	冷凝器冷却水出口温度	$B_{19}$	故障 19: 未知故障
$X_{25}$	气液分离器底部出料阀	$B_{20}$	故障 20: 未知故障
$X_{26}$	冷凝器冷却水流量控制阀	$G_1$	$X_{1,3} + X_{2,3} + X_{3,3} + X_{4,3}$
$X_{27}$	放空阀	$G_2$	$X_{12,1} * X_{14,2}$
$X_{28}$	汽提塔液位		

2) 对  $\{X, B\}$  类型变量进行状态划分。

3) 对  $B$  类型变量确定其故障状态概率参数。

4) 对每一个  $X$  类型变量, 建造一个 DUCG 子模块, 具体步骤为:

① 选定模块子变量  $X_n$ ;

② 从已定义的  $\{X, B\}$  类型变量中确定  $X_n$  的父变量;

③ 用作用变量或条件作用变量将父变量与子变

量  $X_n$  相连, 其中可能用到逻辑门变量  $G$ , 其定义见表 1 中  $G$  变量列表;

④ 对每个作用变量和条件作用变量, 确定其关联度  $r_{n,i}$ ;

⑤ 由计算机将各子模块连结成完整的 DUCG 知识库。结果如图 2 所示。为简单起见, 图中  $X, B, G$  等字母被省略, 因为从其图形形状即可知其为何种类型变量。

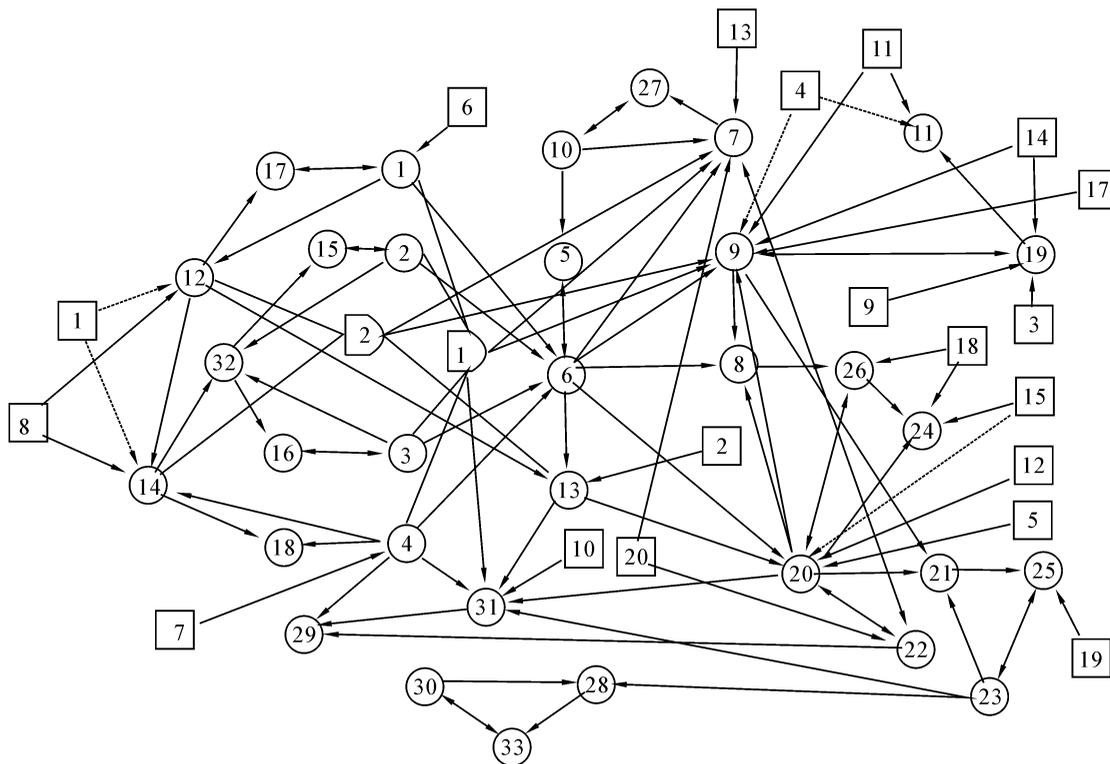


图 2 TE 过程的 DUCG 知识库模型

Fig.2 The DUCG model of the TE process

### 2.3 TE 过程的实时故障诊断测试

完成 TE 过程的 DUCG 知识库建模后,运行 TE 的 MATLAB 仿真可产生 TE 过程的实时数据,用通信模块将 DUCG 软件系统与之相连,可对 TE 过程进行实时监控和故障诊断。实验中,在第 6 小时引入故障。在实时监控中发现有变量处于异常,DUCG 软件系统自动启动实时推理诊断,并显示结果。下面选其中 2 个故障的实验结果进行分析。在诊断结果图中,黄色表示变量值偏高,浅蓝色表示变量值偏低,深蓝色表示变量值极低,粉色表示变量值出现振荡。

#### 2.3.1 故障 6

图 3 所示为引入故障 6 后,出现型的异常变量的 4 个时刻 ( $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ ) 的实时推理诊断结果图。其中图 3(a)是过程出现第 1 个异常信号时刻的诊断结果,可以看出 DUCG 系统迅速准确地诊断出了故障原因为  $B_6$ ,即故障 6,其中变量  $X_1$ (物料 A 的进料流量)的测量值处于极低的状态,这正是由于物料 A 进料损失导致  $X_1$  的值极低。类似地,图 3(b)、图 3(c)、图 3(d)为后继 3 个异常时刻的诊断结果图,说明随着时间的推移变化,由故障 6 引起的初始干扰对过程造成了进一步影响,不仅物料 A 的进料流量  $X_1$  因损失而极低,还进一步导致了其他很多变量都偏离了正常值范围,并被陆续检测到,如  $X_{17}$  偏高, $X_7$  偏低等。

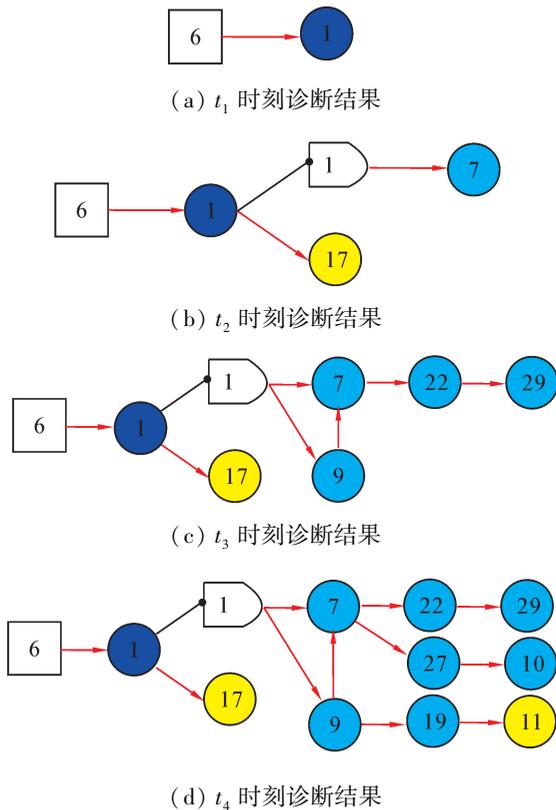


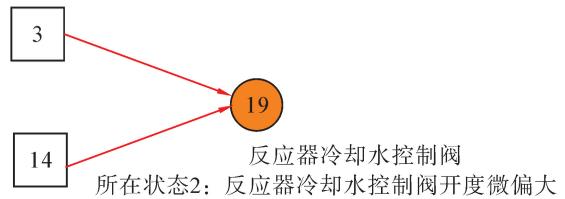
图 3 故障 6 的诊断结果

Fig.3 The diagnosis results of fault 6

#### 2.3.2 故障 3

故障 3 是物料 D 的进料温度变化(流 2)的一个

故障。图 4 所示为引入故障 3 后,实时推理诊断的结果图。由图 4(a)可以看出,变量  $X_{19}$ (反应器冷却水控制阀)出现异常,其开度微偏大,此时推理诊断出的故障原因有 2 个: $B_3$  和  $B_{14}$ ,即故障 3 和故障 14;再由图 4(b)所示的故障列表及计算出的排序概率可以看出, $B_3$  的排序概率为 95%,排在第一位, $B_{14}$  的排序条件概率仅为 5%,因此  $B_3$  是真正故障原因的概率很大。此故障中,只有  $t_1$  时刻出现异常,之后未再收到异常信号。



(a)  $t_1$  时刻故障 3 诊断结果

故障列表		
刷新	清除闪烁	诊断结束
柱状图	停止报警	
标识	变量描述	概率
B3	物料D的进料温度变化(流2)	95.00%
B14	反应器冷却水控制阀粘滞	5.00%

(b)  $t_1$  时刻故障列表及概率

图 4  $t_1$  时刻故障 3 的诊断结果

Fig.4 The diagnosis results of fault 3 at time  $t_1$

故障 3 是 TE 过程中公认的用其他很多故障诊断方法都很难进行诊断或诊断正确率极低的一个故障。这里用本文提出的基于动态不确定因果图的实时故障诊断方法,诊断出故障 3 的概率为 95%,说明了该方法用于故障诊断的可行性及优越性。TE 过程的 20 个故障的测试结果如表 2 所示,其中故障 16 因过程运行数据未出现任何异常,故无故障诊断或故障预报。其余故障的诊断结果良好。

表 2 TE 过程 20 个故障的最终诊断结果

Table 2 The diagnosis results of the 20 faults of the TE

故障	排序概率/%	故障	排序概率/%
1	100	11	100
2	100	12	100
3	95	13	100
4	95	14	100
5	80	15	100
6	100	16	/
7	100	17	80
8	100	18	100
9	100	19	100
10	100	20	100

### 3 结束语

DUCG 模型有 3 个优点:1)能够直观简洁地表达模块内的各种复杂的不确定因果关系;2)由于引入独立的连接事件或作用事件,且仅表达所关注的因果关系(多数  $a$  矩阵为稀疏矩阵),当获得证据后,可通过删除无关的独立事件而大大简化 DUCG 图,推理也变得非常容易;3)在建造 DUCG 图的过程中,不同的模块可由不同的领域工程师分别独立建造,只要求相同变量的定义保持一致即可。这样,分别独立建造的不同的 DUCG 模块可以由计算机自动合成为一个完整的 DUCG,从而将大型复杂的 DUCG 建造和维护问题变得非常简单。

本文将动态不确定因果图理论及其软件系统首次应用于化工过程实时过程监控和故障诊断,以 TE 过程为具体研究对象进行实验验证,结果良好,尤其对于现有方法难以诊断的故障(故障 3、9、15)均有很好的诊断效果,证明了本文采用的基于动态不确定因果图的实时故障诊断方法的有效性,为大型复杂化工过程的实时故障诊断提供了一个新的有效的途径。

### 参考文献:

- [1] FRANK P M. Fault diagnosis in dynamics systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results[J]. Automatica, 1990, 26(3): 459-474.
- [2] VENKATASUBRAMANIAN V, RENGASWAMY R, YIN K, et al. A review of process fault detection and diagnosis part I: quantitative model-based methods[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3): 293-311.
- [3] VENKATASUBRAMANIAN V, RENGASWAMY R, KAVURI S N. A review of process fault detection and diagnosis part II: quantitative model and search strategies[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3): 313-326.
- [4] VENKATASUBRAMANIAN V, RENGASWAMY R, KAVURI S N, et al. A review of process fault detection and diagnosis part III: process history based methods[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(3): 327-346.
- [5] ZHANG Qin. Dynamic uncertain causality graph for knowledge representation and reasoning: discrete DAG cases[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2012, 27(1.): 1-23.
- [6] ZHANG Qin, DONG Chunling, CUI Yan, et al. Dynamic uncertain causality graph for knowledge representation and probabilistic reasoning: statistics base, matrix, and application[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2013(99):1-18.
- [7] DOWNS J J, VOGEL E F. A plant-wide industrial process control problem[J]. Computers and Chemical Engineering, 1993, 17(3): 245-255

#### 作者简介:



杨佳婧,女,1989年生,硕士研究生,主要研究方向为动态不确定因果图理论及应用和故障诊断。



张勤,男,1956年生,教授,博士生导师,博士。主要研究方向为动态不确定因果图理论及应用、系统可靠性评价与管理、知识产权理论及应用等。任国际原子能机构《与安全有关的专家系统》中方课题负责人,国家“九五”重大软课题负责人、国家自然科学基金、国家中长期科技发展规划纲要等多项课题负责人。发表学术论文 70 余篇。



朱群雄,男,1960年生,教授,博士生导师,博士。主要研究方向为智能建模与优化、数据挖掘与故障诊断等。主持完成 20 余项国家自然科学基金、国家“863”计划、省部级科研和企业工程项目,获省部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 1 项、发明专利和国家软件著作权 10 余项,发表学术论文 200 余篇。