

## 化工过程 EFSM 模型的应用

史晟辉, 徐 圆, 朱群雄

(北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

**摘要:** 扩展有限状态机(EFSM)是一种构造模型的形式化描述语言. 首先根据化工过程特征,改进 EFSM 模型和数据依赖关系,构建变量、状态及相互之间转换条件和动作的化工过程 EFSM 描述模型;然后提出化工过程变量之间的静、动态依赖关系和故障传播路径的分析方法;最后通过典型化工过程 CSTR 仿真应用验证了 EFSM 模型描述及分析方法的可行性和有效性,为工业过程的故障传播分析提供一种新的思路和方法.

**关键词:** 扩展有限状态机; 形式化; 数据依赖; 故障传播

**中图分类号:** TQ015.9; TP391.9; O6-39

**文献标志码:** A

## EFSM model research and application based on chemical process

SHI Sheng-hui, XU Yuan, ZHU Qun-xiong

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China.

Correspondent: ZHU Qun-xiong, E-mail: zhuqx@mail.buct.edu.cn)

**Abstract:** The extended finite state machine (EFSM) is a formal description language of model construction. According to the chemical process characteristics, EFSM models and data dependencies are improved, and the chemical process EFSM model is constructed including variables, states, transitions, conditions and actions between variables. The method of static and dynamic variables transitions and fault propagation path analysis is proposed. The simulation CSTR experimental results of the typical chemical process show the effectiveness and feasibility of the EFSM model description and analysis methods. New ideas and methods are provided for the fault propagation analysis in the industrial process.

**Key words:** extended finite state machine; formalization; data dependence; fault propagation analysis

### 0 引言

近年来,重大恶性事故导致大型化和复杂化工业企业的经济损失日益增大,故障诊断显得尤为重要.在常用的工业过程故障诊断方法体系<sup>[1]</sup>中,基于定性模型的方法更适用于大规模的复杂过程系统.大规模复杂系统的故障分析首先要解决系统模型的描述,并根据描述模型进行故障传播分析. Preisig<sup>[2]</sup>应用图论的方法描述基于物质流的大规模系统拓扑信息,没有考虑信息流; Iri 等<sup>[3]</sup>考虑了信息流,使用符号有向图(SDG)描述变量间的影响关系;学者们也相继开发出 MIDAS<sup>[4]</sup>、SDG-Diagnosis<sup>[5]</sup>、SDG 推理平台<sup>[6]</sup>等故障诊断系统,但都没有考虑转化条件,并且呈现的都是瞬时变量之间的影响关系. Petri 网使用条件转换描述离散事件动态系统,但没有考虑变量间的关系.当前,用不同方法的结合<sup>[7]</sup>对故障进行诊断

也是一种尝试.无论哪种方法,学者们都致力于研究出更恰当的描述模型和更有效的故障分析方法.

计算机领域中的扩展有限状态机(EFSM)模型结合了信息流,既可以描述出 SDG 中变量间的影响关系,又含有 Petri 网的条件转换,还可以将其形式化,规范工业过程 EFSM 模型,进行故障传播分析.

### 1 改进的化工过程 EFSM 模型

$M = (S, T, E, V)$  在计算机领域里是一种构造模型的形式化描述语言<sup>[8-9]</sup>. EFSM 模型通过迁移  $T$  中事件发生的条件和动作,生动地展示系统的变化过程及动态特性,适合描述工业过程.传统的 EFSM 通常描述变量之间的定量关系,实际工业中常用“多与少”、“增大与减小”或“高与低”等方式定性描述两个变量间的影响.改进的模型引入了定性关系,改变了传统的 EFSM 模型表述意义,迁移  $t_i$  的动作序列

收稿日期: 2013-07-16; 修回日期: 2013-10-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61104131); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(JD1310).

作者简介: 史晟辉(1974—),女,讲师,博士,从事编译技术、切片技术、故障诊断及安全分析的研究;朱群雄(1960—),男,教授,博士生导师,从事计算机控制及故障诊断等研究.

Action 中算术表达式不再表示数值加减, 而是表示正负影响关系. 工业过程中开关和阀门比较多, 开动作频繁, 直接影响后继变量的数据依赖关系. 针对工业系统与传统的 EFSM 模型的差异, 根据工业过程开关操作对其他变量产生的影响不能忽视的情况, 对迁移内数据依赖 (IaTDD)<sup>[10]</sup> 进行改进, 增加条件变量集合的阀、泵和开关等开关变量, 以满足带开合操作的工业过程的 EFSM 描述, 确定一个迁移内单条语句和多条语句的数据依赖关系.

## 2 EFSM 模型形式化

EFSM 模型是实际系统的抽象描述, 理解和构建难度大. EFSM 模型形式化是提取共性问题进行抽象封装, 对于用户而言, 只需要制定模型书写规则和流程信息转换, 不需要了解内部结构, 模型如图 1 所示. 形式化的规则主要通过正则表达式和上下文无关文法<sup>[11]</sup>描述.

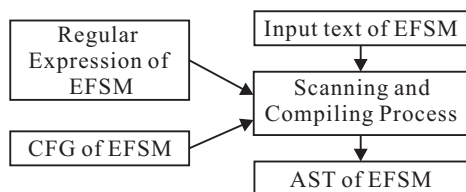


图 1 用户角度的形式化 EFSM 模型

## 3 数据依赖路径与故障传播分析

模型构造完成后, 如何对模型进行故障传播分析是问题的关键. 此部分主要通过数据依赖技术得以实现, 给定分析的故障点作为切片准则, 构造 EFSM 模型的 1 个迁移内数据依赖关系 IaTDD、2 个迁移间数据依赖关系 IeTDD 和 3 个以上迁移间数据依赖关系 (即传递的迁移间数据依赖关系 Transitive IeTDD), 通过深度优先搜寻逆向遍历得到数据依赖路径, 进而进行故障传播分析. 数据依赖关系和故障传播分析的构造过程如图 2 所示.

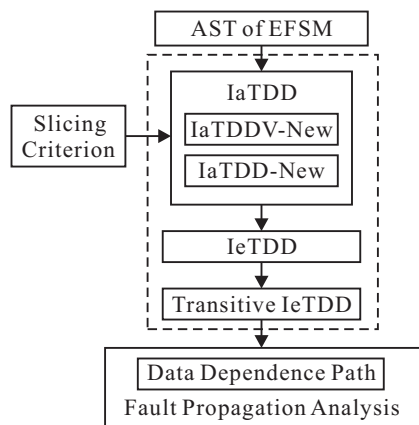


图 2 数据依赖关系的构造过程

设计的 EFSM 模型能够根据每一个变量发生的不同阶段描述其动态过程, 以此为基础提出基于

EFSM 的故障传播分析方法, 能够分析处在不同阶段的同一个变量的不同数据依赖情况. 系统将数据依赖关系的构造过程也进行封装, 如图 2 虚线部分所示, 用户只需要输入故障点, 就可以得到数据依赖关系路径. 中间过程对于用户而言, 是不需要了解的,

## 4 实例分析

以化工过程的一个子过程——带搅拌的釜式反应器系统 (CSTR) 为工业应用案例, 构建 EFSM 模型, 通过数据依赖关系, 实现在化工过程的不同发生阶段中变量间的故障传播分析.

CSTR 系统如图 3 所示, 以一个批次反应为例进行分析: 首先, 给  $L_2$  加二硫化碳,  $L_3$  加邻硝基苯, 通过  $V_6$  加多硫化钠, 在反应器  $L_4$  中反应; 然后, 通过蒸汽  $S_6$  加热升温,  $V_7$ 、 $V_8$  冷却控制、保温; 最后, 从  $V_9$  出料, 清洗反应釜, 至此完成一个批次间歇反应.

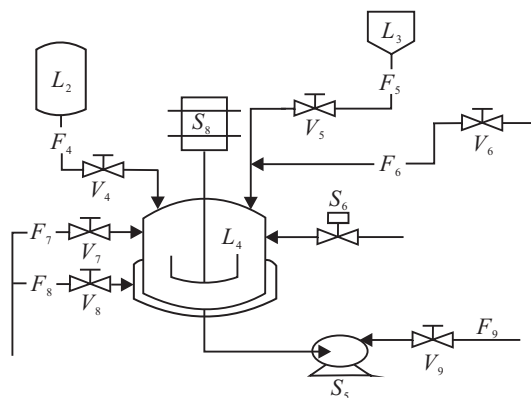


图 3 带搅拌釜式反应器系统

### 4.1 CSTR 系统的 EFSM 模型构建

通过对化工过程工艺流程的分析, 根据一个批次反应的具体操作规程, 将初始状态、加/停二硫化碳、加/停邻硝基苯、加/停多硫化钠、加热、升温、冷却控制、保温、放空、出料等操作点状态作为 EFSM 模型的状态, 将两个操作点之间的转化作为 EFSM 的迁移, 建立 EFSM 模型. CSTR 系统的 EFSM 模型的数学描述如下:

$$\begin{aligned}
 \text{EFSM CSTR} &= (S, T, S_{\text{begin}}, S_{\text{end}}); \\
 S &= \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}\}; \\
 T &= \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, \\
 &\quad T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, T_{17}\}; \\
 T_i &= (S_{\text{src}}, S_{\text{tgt}}, \text{event}, \text{condition}, \text{action}); \\
 S_{\text{begin}} &= S_1; \\
 S_{\text{end}} &= S_{10}.
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 T_1 &= (S_{\text{src}} = \{S_1\}; S_{\text{tgt}} = \{S_2\}; \\
 &\quad \text{event} = \{\text{initial} - L_2 - L_4()\});
 \end{aligned}$$

condition = {};  
 action = { $L_2 = 0.64$  m;  
 $L_3 = 1$  m;  $L_4 = 0$  m;  
 $V_4 \sim V_9, S_5, S_6, S_8 = \text{"off"}$ ;  
 $F_4 \sim F_9, FS_6, P, \text{Time}_{T_1=120^\circ\text{C}},$   
 $\text{Time}_{V_5=\text{"on"}} = 0, T_1 = 0^\circ\text{C}$ }.  
 $T_2 = (S_{\text{src}} = \{S_2\}; S_{\text{tgt}} = \{S_2\};$   
 event = {Add -  $L_2 - L_4$ ()};  
 condition = { $L_2 > 0$ };  
 action = { $V_4 = \text{"on"}$ ;  $L_2 -$ ;  
 $F_4 = F_4 - L_2$ ;  $L_4 = L_4 + F_4$ };).  
 $T_3 = (S_{\text{src}} = \{S_2\}; S_{\text{tgt}} = \{S_3\};$   
 event = {Stop -  $L_2 - L_4$ ()};  
 condition = { $L_2 == 0$ };  
 action = { $V_4 = \text{"off"}$ ;  $V_5 = \text{"on"}$ ;  $L_3 -$ ;  
 $F_5 = F_5 - L_3$ ;  $L_4 = L_4 + F_5$ };).  
 :  
 $T_1$  表示系统初始化过程;  
 $T_2$  表示添加二硫化碳过程;  
 $T_3$  表示当  $L_2 = 0$  时, 停止加二硫化碳;  
 $T_4$  表示添加邻硝基苯过程;

$T_5$  表示当  $L_3 = 0$  时停止加邻硝基苯;  
 $T_6$  表示添加多硫化钠过程;  
 $T_7$  表示当  $L_4 = 1.37$  m 时停止加多硫化钠;  
 $T_8$  表示搅拌与蒸汽加热;  
 $T_9$  表示停止蒸汽;  
 $T_{10}$  表示升温 and 开冷却水;  
 $T_{11}$  表示冷却控制;  
 $T_{12}$  表示保温和停止冷却水;  
 $T_{13}$  表示停止保温;  
 $T_{14}$  表示放空;  
 $T_{15}$  表示停止放空;  
 $T_{16}$  表示出料;  
 $T_{17}$  表示停止出料.

CSTR 系统的 EFSM 模型体现正负影响关系, 如出料过程, 反应器液位  $L_4$  的变化与反应器自身液位  $L_4$  和反应物出口流量  $F_9$  有关; 反应器液位  $L_4$  正拉偏, 反应器液位  $L_4$  正偏离; 反应物出口流量  $F_9$  负拉偏, 反应器液位  $L_4$  正偏差, 表示无量纲变量的正负影响关系.

#### 4.2 基于 EFSM 的 CSTR 系统的迁移内数据依赖的创建

根据改进的迁移内定义变量的数据依赖 (IaTDDV-New) 和改进的迁移内数据依赖 (IaTDD-New), 得到迁移内的数据依赖关系, 如表 1 所示.

表 1 CSTR 系统的迁移内的数据依赖关系

Transition	IaTDD-New
$T_1$	$(L_2, \{ \}), (L_3, \{ \}), (L_4, \{ \}), (V_4, \{ \}), (V_5, \{ \}), (V_6, \{ \}), (V_7, \{ \}), (V_8, \{ \}), (V_9, \{ \}), (FS_6, \{ \}), (P, \{ \}), (\text{Time}_{T_1=120^\circ}, \{ \}), (\text{Time}_{V_5=\text{"on"}}, \{ \}), (T_1, \{ \})$
$T_2$	$(V_4, \{ L_2 \}), (L_2, \{ L_2 \}), (F_4, \{ F_4, L_2 \}), (L_4, \{ L_4, F_4, L_2, V_4 \})$
$T_3$	$(V_4, \{ L_2 \}), (V_5, \{ L_2 \}), (L_3, \{ L_3, L_2 \}), (F_5, \{ F_5, L_3, L_2 \}), (L_4, \{ L_4, F_5, L_2, V_5 \})$
$T_4$	$(L_3, \{ L_3 \}), (F_5, \{ F_5, L_3 \}), (L_4, \{ L_4, F_5, L_3 \})$
$T_5$	$(V_5, \{ L_3 \}), (V_6, \{ L_3 \}), (L_4, \{ L_4, F_6, L_3, V_6 \})$
$T_6$	$(V_6, \{ L_4 \}), (F_6, \{ F_6, V_6, L_4 \}), (L_4, \{ L_4, F_6 \})$
$T_7$	$(V_6, \{ L_4 \}), (S_8, \{ L_4 \}), (S_6, \{ L_4 \}), (FS_6, \{ FS_6, S_6, L_4 \}), (T_1, \{ T_1, F_6, L_4, S_8, S_6 \})$
$T_8$	$(T_1, \{ T_1, FS_6 \})$
$T_9$	$(S_6, \{ T_1 \}), (T_1, \{ T_1 \})$
$T_{10}$	$(V_8, \{ T_1 \}), (V_7, \{ T_1 \}), (F_8, \{ F_8, V_8, V_7, T_1 \}), (F_7, \{ F_7, V_8, V_7, T_1 \}), (T_1, \{ T_1, F_8, F_7, V_8, V_7 \})$
$T_{11}$	$(V_8, \{ V_8, T_1 \}), (V_7, \{ V_7, T_1 \}), (F_8, \{ F_8, V_8, T_1 \}), (F_7, \{ F_7, V_7, T_1 \}), (T_1, \{ T_1, F_8, F_7 \}), (P, \{ P, T_1 \})$
$T_{12}$	$(V_8, \{ V_8, T_1, \text{Time}_{T_1=120^\circ} \}), (V_7, \{ V_7, T_1, \text{Time}_{T_1=120^\circ} \}), (\text{Time}_{T_1=120^\circ}, \{ \text{Time}_{T_1=120^\circ}, T_1 \})$
$T_{13}$	$(V_8, \{ \text{Time}_{T_1=120^\circ} \}), (V_7, \{ \text{Time}_{T_1=120^\circ} \}), (V_5, \{ \text{Time}_{T_1=120^\circ} \})$
$T_{14}$	$(\text{Time}_{V_5=\text{"on"}}, \{ \text{Time}_{V_5=\text{"on"}} \})$
$T_{15}$	$(V_5, \{ \text{Time}_{V_5=\text{"on"}} \}), (V_9, \{ \text{Time}_{V_5=\text{"on"}} \}), (F_9, \{ F_9, V_9, \text{Time}_{V_5=\text{"on"}} \}), (L_4, \{ L_4, F_9, \text{Time}_{V_5=\text{"on"}} \})$
$T_{16}$	$(L_4, \{ L_4, F_9 \})$
$T_{17}$	$(V_9, \{ L_4 \})$

#### 4.3 CSTR 系统的故障传播分析

SDG 描述的是变量之间的依赖关系, 是静态的描述, 如果描述动态信息, 只能随着时间或反应过程的推进, 得到  $N$  张 SDG 图, 而每一张 SDG 图描述的都是某一时刻的静态信息. 构建化工过程的 EFSM 模型, 将每一时刻的变量依赖关系通过一张图实现, 并

进一步通过迁移内、迁移间数据依赖及传递性<sup>[10,12]</sup>的方法实现故障传播的事前分析.

EFSM 描述变量的动态特性, 记录每一个定义变量所发生的阶段 (用迁移表示). 如表 2 所示, 反应器液位  $L_4$  发生在 8 个迁移中, 是动作最频繁的变量, 也是系统最关键的变量.

表 2 CSTR 系统的定义变量和发生的不同阶段

Defined variables	Transitions
$P$	$T_1, T_{11}$
$T_1$	$T_1, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}$
$FS_6$	$T_1, T_7$
$S_8$	$T_1, T_7$
$S_6$	$T_1, T_7, T_9$
$F_9$	$T_1, T_{15}$
$F_8$	$T_1, T_{10}, T_{11}$
$F_7$	$T_1, T_{10}, T_{11}$
$F_6$	$T_1, T_5, T_6$
$F_5$	$T_1, T_3, T_4$
$F_4$	$T_1, T_2$
$Time_{V_5} = \text{"on"}$	$T_1, T_{14}$
$Time_{T_1} = 120^\circ$	$T_1, T_{12}$
$V_9$	$T_1, T_{15}, T_{17}$
$V_8$	$T_1, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}$
$V_7$	$T_1, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}$
$V_6$	$T_1, T_5, T_6, T_7$
$V_5$	$T_1, T_3, T_5, T_{13}, T_{15}$
$V_4$	$T_1, T_2, T_3$
$L_4$	$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_{15}, T_{16}$
$L_3$	$T_1, T_3, T_4$
$L_2$	$T_1, T_2$

定义变量在每个阶段都有不同的依赖变量, 动作越频繁, 涉及的依赖变量越多. 描述涉及定义变量的发生阶段与依赖变量相互关系的趋势曲线如图 4 所示.

以反应器液位  $L_4$  变量为例, 对  $L_4$  值变化的影响发生在 8 个不同阶段  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_{15}, T_{16}$  中, 反应的时间变化, 变量的影响关系也发生改变. 单纯说受哪个变量影响不能很好地体现工业过程的变

化. EFSM 模型将  $L_4$  的所有阶段融合更好地描述成变量的动态变化过程, 如图 5 所示.

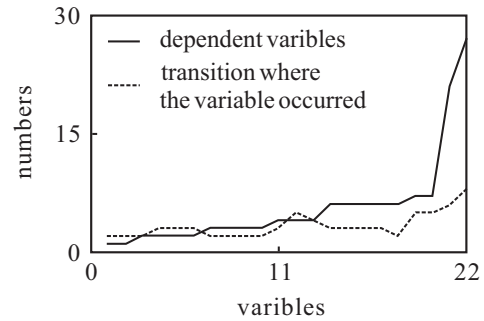


图 4 定义变量所在的迁移数与依赖变量数的关系

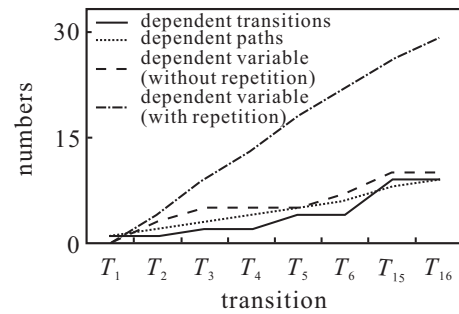


图 5 在不同时刻液位  $L_4$  依赖的迁移、路径及变量数量

由图 5 可知, 同一个变量在每个不同的发生阶段, 所依赖的迁移、变量和路径都不同. 随着时间的推移、反应的作用, 系统复杂度逐渐增加.

图 5 中液位  $L_4$  在迁移  $T_{16}$  阶段所依赖的迁移、变量和路径最多. 表 3 记录了所有发生在迁移  $T_{16}$  阶段的传播路径上影响反应器液位  $L_4$  的迁移、连接变量 (IeTDD-CV) 和依赖关系.

表 3  $T_{16}$  阶段影响反应器液位  $L_4$  的故障传播分析

No.	迁移	IeTDD-CV	依赖关系
1	$T_{16}$	$L_4$	$\{(L_4, \{L_4, F_9\})\}$
2	$T_{15}$	$L_4, F_9$	$\{(V_9, \{Time_{V_5} = \text{"on"}\}), (F_9, \{F_9, V_9, Time_{V_5} = \text{"on"}\}), (L_4, \{L_4, F_9, Time_{V_5} = \text{"on"}\})\}$
3	$T_{14}$	$Time_{V_5} = \text{"on"}$	$\{(Time_{V_5} = \text{"on"}, \{Time_{V_5} = \text{"on"}\})\}$
4	$T_6$	$L_4$	$\{(V_6, \{L_4\}), (F_6, \{F_6, V_6, L_4\}), (L_4, \{L_4, F_6\})\}$
5	$T_5$	$L_4, V_6$	$\{(V_6, \{L_3\}), (L_4, \{L_4, F_6, L_3, V_6\})\}$
6	$T_4$	$L_4, L_3$	$\{(L_3, \{L_3\}), (F_5, \{F_5, L_3\}), (L_4, \{L_4, F_5, L_3\})\}$
7	$T_3$	$L_4, F_5, L_3$	$\{(V_5, \{L_2\}), (L_3, \{L_3, L_2\}), (F_5, \{F_5, L_3, L_2\}), (L_4, \{L_4, F_5, L_2, V_5\})\}$
8	$T_2$	$L_4, L_2$	$\{(V_4, \{L_2\}), (L_2, \{L_2\}), (F_4, \{F_4, L_2\}), (L_4, \{L_4, F_4, L_2, V_4\})\}$
9	$T_1$	$L_4, F_4, L_2, V_4$	$\{(L_2, \{L_2\}), (L_4, \{L_4\}), (V_4, \{V_4\}), (F_4, \{F_4\})\}$

经过逆向深度优先搜索遍历得到影响迁移  $T_{16}$  中的液位  $L_4$  变化的 9 条可能存在的传播路径, 分别如下:

- $(T_{16}, T_{15}, T_{14}, T_6, T_5, T_4, T_3, T_2, T_1);$
- $(T_{16}, T_{15}, T_6, T_5, T_4, T_3, T_2, T_1);$
- $(T_{16}, T_{15}, T_6, T_5, T_4, T_3, T_1);$

- $(T_{16}, T_{15}, T_6, T_5, T_3, T_2, T_1);$
- $(T_{16}, T_{15}, T_6, T_5, T_3, T_1);$
- $(T_{16}, T_{15}, T_5, T_4, T_3, T_2, T_1);$
- $(T_{16}, T_{15}, T_5, T_4, T_3, T_1);$
- $(T_{16}, T_{15}, T_5, T_3, T_2, T_1);$
- $(T_{16}, T_{15}, T_5, T_3, T_1).$

针对同一变量发生在不同阶段具有不同的故障传播路径和同一阶段的变量受到不同阶段的同一变量影响两种情况的实现,更好地展示了 EFSM 模型及其依赖图能够很好地描述工业过程变量之间依赖关系的动态特性.

## 5 结 论

本文将计算机领域中的 EFSM 模型引入到工业过程中,改进了 EFSM 模型和数据依赖关系,描述了工业过程变量之间依赖关系的动态特性,分析了故障传播路径,并以带搅拌的釜式反应器系统为例,实现了 EFSM 模型的构建和形式化,分析了反应器液位  $L_4$  在 8 个不同发生阶段依赖的迁移、变量和路径的关系以及  $T_{16}$  阶段  $L_4$  的故障传播,验证了本文方法的可行性和有效性,为故障诊断及传播分析提供了新思路.

## 参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] Preisig H A. A graph-theory-based approach to the analysis of large-scale plants[J]. Computers and Chemical Engineering, 2009, 33(3): 598-604.
- [3] Iri M, Aoki K, O'shima E, et al. An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process[J]. Computers and Chemical Engineering, 1979, 3(1/2/3/4): 489-493.
- [4] Oyeleye O O, Finch F E. Qualitative modeling and fault diagnosis of dynamic processes by MIDAS[J]. Chemical Engineering Communication, 1990, 9(6): 205-228.
- [5] 张贝克,夏涛,吴重光.集成化 SDG 建模、推理与信息处理软件平台[J].系统仿真学报,2003,15(10): 1360-1363.
- (Zhang B K, Xia T, Wu C G. Integrated SDG modeling, inference and post-processing software platform[J]. J of System Simulation, 2003, 15(10): 1360-1363.)
- [6] 王杭州,陈丙珍,何小荣,等.基于开源组件的 SDG 推理平台[J].化工学报,2010,61(7): 1829-1836.
- (Wang H Z, Chen B Z, He X R, et al. Open source signed digraph inference framework [J]. CIESC J, 2010, 61(7): 1829-1836.)
- [7] 卢鹏,王锡淮,肖健梅.基于粗糙集和图论的电力系统故障诊断方法[J].控制与决策,2013,28(4): 511-524.
- (Lu P, Wang X H, Xiao J M. Method of fault diagnosis in power system based on rough set theory and graph theory[J]. Control and Decision, 2013, 28(4): 511-524.)
- [8] Korel B, Singh I, Tahat L, et al. Slicing of state-based models[C]. Proc of the Int Conf on Software Maintenance. Montreal: IEEE Computer Society, 2003: 4-43.
- [9] Androutsopoulos K, Gold N, Harman M, et al. A theoretical and empirical study of EFSM dependence[C]. 2009 IEEE Int Conf on Software Maintenance (ICSM09). Edmonton: IEEE, 2009: 287-296.
- [10] Shi S H, Zhu Q X, Geng Z Q, et al. Intra-transition data dependence[J]. J of Software, 2012, 12(7): 2663-2670.
- [11] Aho A V, Lam M S, Sethi R, et al. Compilers, principles, techniques, and tools[M]. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley, 2008: 109-356.
- [12] Shi S H, Zhu Q X, Xu W X. Transitivity of inter-transition data dependence[C]. The 3rd Int Conf on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2011). Dalian: IEEE, 2011: 67-71.

(责任编辑: 齐 霖)