

# 面向对象的流程工业系统有向无环图建模

韩 中<sup>1,2</sup>, 高建民<sup>1</sup>, 陈富民<sup>1</sup>, 高智勇<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室; 2. 西安交通大学 CIMS 研究所, 西安 710049)

**摘 要:** 提出流程工业系统中有向无环图的面向对象的建模方法。介绍使用面向对象的技术对流程工业系统模进行建模的关键要素的技巧, 定义描述流程工业系统中有向无环图模型的建模机制, 扩展流程工业系统模型所具有的特性。以流程工业系统出现异常时的诊断实例说明系统模型解决问题的有效性。

**关键词:** 面向对象; 有向无环图; 邻接矩阵; workflow

## Object-oriented Modeling for Directed Acyclic Graph of Process Industry System

HAN Zhong<sup>1,2</sup>, GAO Jian-min<sup>1</sup>, CHEN Fu-min<sup>1</sup>, GAO Zhi-yong<sup>1</sup>

(1. State Key Lab of Mech. Manu. System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. CIMS Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**【Abstract】** After a thorough analysis and study of process industry system, an object-oriented modeling method for the directed acyclic graph of process industry systems is proposed. Techniques for determining key factors of process industry system models by object-oriented techniques are elaborated. Mechanisms for the modeling of the directed acyclic graph of process industry systems are defined and described. Characteristics of this process industry system model are discussed and expanded. Cases for diagnosing abnormal situations of process industry systems are explored to illustrate the validity of this system model in solving problems.

**【Key words】** object-oriented; Directed Acyclic Graph(DAG); adjacency matrix; workflow

### 1 概述

流程工业系统建模是系统分析研究过程中不可缺少的一步, 常使用的工业系统模型有分层模型、故障树模型 Agent 模型、Petri 网模型、有向图模型等<sup>[1-6]</sup>。其中, 有向图模型的建模过程简洁, 并能表达丰富的信息量, 在使用过程中具有优势。此外, 建模方法也非常关键, 使用面向对象(object oriented)的方法建模能使复杂问题变得更加清晰和独立。

本文使用面向对象的方法和有向图工具相结合实现建模, 使模型表达流程工业系统更加完整和精确, 基于对流程工业系统的综合分析研究, 提出面向对象的流程工业系统有向无环图(Directed Acyclic Graph, DAG)模型。

### 2 系统建模过程与规则

#### 2.1 系统建模过程

使用面向对象的方法建立流程工业系统模型的处理过程见图 1。

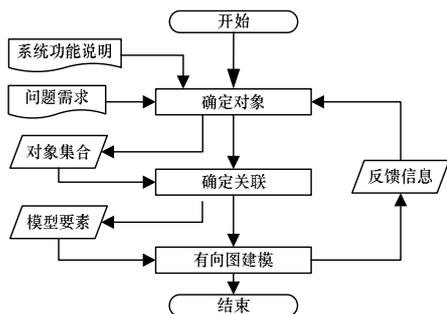


图 1 系统建模过程

(1)确定对象, 标识出问题域的相关的具体对象, 见图 2。所有对象的确定在应用中都必须有意义, 一般使用独立设备作为对象, 最后形成集合, 用  $V(V_1, V_2, \dots, V_n)$  来表示。



图 2 确定对象

(2)确定关联, 具体化 2 个或多个对象之间的相互依赖关系。关联使用的各种物质流必须是可度量的, 以形成确定的量化值。关联形成的集合用  $E(e_1, e_2, \dots, e_m)$  来表示, 见图 3。对象间的关联强度量化值的集合的表示为  $W(w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。

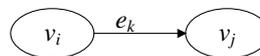


图 3 对象关联关系

(3)DAG 建模, 是使用上面确定的对象、确定的关联等要素建立流程工业系统的 DAG 模型的阶段。必须满足一定的规则要求, 并形成严格的数学表达形式, 这种数学形式是模型解决系统问题的基础或依据。

#### 2.2 系统建模规则

流程工业系统的特点为设备之间耦合性强, 各种物质流

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助项目(2006AA04Z441, 2007AA04Z432)

**作者简介:** 韩 中(1969 - ), 男, 博士研究生, 主研方向: 复杂系统; 高建民, 教授、博士生导师; 陈富民, 副教授; 高智勇, 讲师

**收稿日期:** 2008-08-10 **E-mail:** hzhong@stu.xjtu.edu.cn

按一定顺序或方向流动,在一定的温度、压力条件下发生的物质相变过程。建立 DAG 模型必须能精确的反映流程工业系统的真实情况,保持系统功能的完整性,保证系统模型建设的一致性。因此,在系统的建模过程中必须遵循一定规则以保证模型建设质量。规则定义使用到表示符号见表 1。

表 1 表示符号

符号	说明
$v$ 或 $v_i$	表示单个的节点
$V, V_i$	表示 DAG 中所有节点的集合
$v_{i,j}$	表示 DAG 中从节点 $V_i$ 到节点 $V_j$ 的所有节点的集合,即路径集
$SV(v_i)$	表示 DAG 中所有首节点 $v_i$ 的集合
$EV(v_i)$	表示 DAG 中所有尾节点 $v_i$ 的集合
$Ho(v_i)$	表示 $v_i$ 的同质节点的集合

在使用  $Ho(v_i)$  表示  $v_i$  的同质节点时,如果  $Ho(v_i) = Ho(v_j)$ , 则认为  $v_i$  和  $v_j$  两者为同质节点。

结合流程工业特点,在进行 DAG 建模时,必须遵循以下规则:

(1)建成的 DAG 的节点集合  $V$  中的所有节点必须是相关的,即

$$\forall v_i \in SV, \forall v_j \in EV$$

$$\wedge \forall V_i = V_{i,j} \neq \Phi$$

$$\wedge \forall v_i \in V_i \subseteq V$$

(2)系统 DAG 模型必须保证流程工业系统的流的顺序:

$$\forall v_i \in SV, \forall v_j \in EV$$

$$\forall V_i = V_{i,j} \neq \Phi$$

$$\wedge \forall V_p = V_{j,i} = \Phi$$

(3)DAG 模型必须保证系统功能的完整性:

$$\forall v_i \in SV, \forall v_j \in EV$$

$$\wedge \forall v_i \in V_{i,j}$$

$$\wedge \forall v_i \in V$$

(4)DAG 模型必须保持系统功能的一致性:

$$\forall v_i, v_j \in V$$

$$\forall \exists v_i = v_j$$

$$\wedge Ho(v_i) = Ho(v_j)$$

### 3 面向对象的流程工业系统分析

面向对象的思想能简化流程工业系统的模型过程中的复杂问题,对整个流程工业系统建模机制分析如下:

(1)对象就是同一类型事物的抽象表示。流程工业系统里的任何组成元素皆可视为对象,这里把待解决的问题中的元素(设备、仪器、部件等)表示成模型里的对象。例如将流程工业系统抽象为一个大的对象  $V$ 。  $V$  可以划分为包含相互独立、相互联系的 3 个部分,记为  $v_1, v_2, v_3$ , 与部分之间存在关系  $V=v_1 \cup v_2 \cup v_3$ , 其中,  $v_1$  表示制造设备部分;  $v_2$  表示信息决策部分;  $v_3$  表示管理决策部分。

(2)对象之间存在联系,即对象的类型,属性,输入和输出,通过这些相互之间作用产生联系。流程工业系统中各组成要素之间通过工作流,物流,信息流,控制流,能量流相互作用,通过量化这种作用为对象传递的参数信息,表达对象间的联系程度。工作流主要解决对象之间,按某种预定义的规则传递文档、信息或任务的过程形成业务流动。物流是工件按一定的时间、空间与加工设备及运输设备的结合,完成加工过程,实现物品的流动。信息流为被加工产品的工序的几何尺寸数据和产品流动中与制具的配合信息。

(3)对象可以包含对象,也可以拆分为多个对象,从而可

实现流程工业系统、子系统、设备、部件、零件的抽象与细化。

### 4 DAG 的建模机制

上文介绍了流程工业系统  $V$  用面向对象的方法可分解为需要的多个对象的集合,这些对象可为机电设备、部件或是一个子系统等。将对象集合记为  $S$ , 则

$$V = \{v_i | v_i \in S, i = 1, 2, \dots, n, n \geq 2\} \quad (1)$$

其中,  $v_i$  表示  $V$  中的一个具体对象。

对象之间存在着关联关系,关联关系的集合记为  $E$ , 则

$$E = \{e_j | e_j \in S, j = 1, 2, \dots, m, m \geq 1\} \quad (2)$$

其中,  $e_j$  表示  $S$  中的一个连接关系。 $e_j$  连接的  $S$  中的 2 个对象之间存在着一定连接强度,记为  $W$ , 则

$$W = \{w_k | w_k \in S, k = 1, 2, \dots, k \geq 1\} \quad (3)$$

其中,  $w_k$  表示  $S$  中的某一连接强度。如果  $w_k$  为连接  $m, n$  2 个要素之间  $e_k$  关联的强度,则可记为

$$w(e_k) = v_m v_n \quad (4)$$

流程工业系统  $S$  可用数学模型来表示:  $S = \{V, E, W\}$  或简单记为

$$S = \{V, E\} \quad (5)$$

通过以上的数学模型描述即可将 DAG 引入到流程工业系统的模型中,形成流程工业系统的 DAG 模型。

使用上述方法构成一个完整的流程工业系统的 DAG 模型,现作如下定义。

**定义 1** 任意流程工业系统为 DAG 的  $G(V, E)$ , 记为  $G = (V, E)$ 。其中,  $V$  是有限非空集合;元素为系统中的要素对象(设备、部件、子系统、规则等);  $E$  是对象关联的集合,  $V$  和  $E$  中元素存在对应关系。

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$$

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$$

**定义 2** 若  $G$  中的边  $e$  与节点  $u, v$  的无序节点对  $(u, v)$  相对应,则称  $e$  为无向边,记为  $e = (u, v)$ 。此时称  $e$  与 2 个节点  $u$  与  $v$  相互关联,  $u$  和  $v$  称为该边的 2 个端点,也称  $u$  与  $v$  是邻接的,否则称为不邻接的。关联于同一节点的 2 条边称为邻接边。

**定义 3** 流程工业系统 DAG 的  $G$  中的边  $e$  与节点  $u, v$  的有序点对  $\langle u, v \rangle$  相对应,  $e$  为有向边,记为  $e = \langle u, v \rangle$ 。有向边又称为弧,此时称  $u$  为弧尾(或始端),称  $v$  为弧头(或终端)。

**定义 4** 流程工业系统模型图研究中的图都是 DAG(图中的边都是有向边)和简单图(无环且无重数大于 1 的边)。

**定义 5** 流程工业系统 DAG 中节点  $v$  所关联边的个数称为节点  $v$  的度数,记为  $deg(v)$ 。

**定理** 流程工业系统模型图  $G = (V, E)$  中节点度数的总和等于边数的 2 倍,即

$$\sum_{v \in V} deg(v) = 2|E| \quad (6)$$

**推论** 流程工业系统模型图  $G$  中度数为奇数的点必为偶数。如果  $V_1$  和  $V_2$  分别是  $G$  中奇数度数和偶数度数的节点集,则

$$\sum_{v \in V_1} deg(v) + \sum_{v \in V_2} deg(v) = \sum_{v \in V} deg(v) = 2|E| \quad (7)$$

由定义 4 可知流程工业系统模型可用 DAG 矩阵表示。

**定义 6** 设  $G = (V, E)$  是有  $n$  个节点的图,则  $n$  阶方阵  $A = (a_{ij})$  称为  $G$  的邻接矩阵。其中,

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \langle v_i, v_j \rangle \in E \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

## 5 流程工业系统 DAG 模型的应用

图 4 为某流程工业系统设备连接结构。其组成为：加工设备  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8$ ；连接设备  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9$  等。使用面向对象的方法建立一个合理的流程工业系统 DAG 模型，并利用此模型分析系统异常产生的原因。

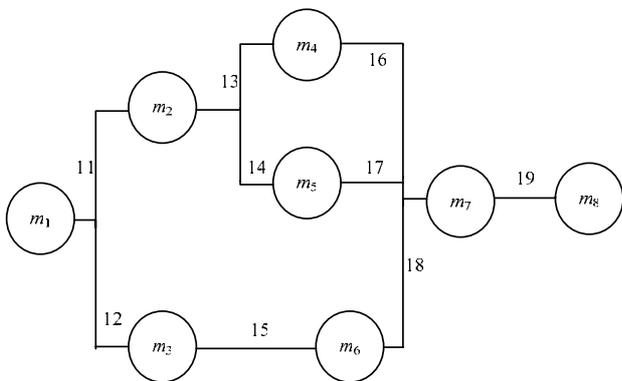


图 4 设备连接结构

(1) 使用面向对象的方法建模，定义该流程工业系统 DAG 模型为  $G$  进行研究。

(2) 确定  $G$  的  $V$  根据需要将设备  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8$  对应于流程工业系统 DAG 模型的节点  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8$  形成维护对象。忽略、隐藏或集成对维护模型对象影响不大和不重要的设备  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9$  等系统要素。

(3) 确定要素间的关联  $E$ 。用系统的维护要素间的关联，形成  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9$  等 9 个系统模型的关联要素。

(4) 确定流程工业系统 DAG 模型的连接强度  $W$ ，此处使用的是流程工业系统 DCS 采集到的各种设备运行的故障数据纪录，图 5 中标注的是要素已发生故障的概率统计值。

完整的流程工业系统 DAG 模型如图 5 所示。

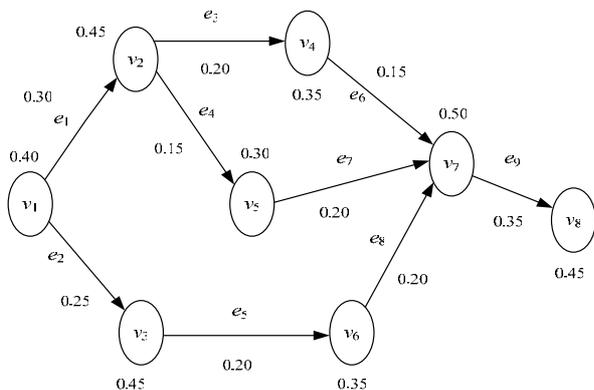


图 5 制造系统的 DAG 模型

流程工业系统 DAG 模型  $G$  的结点集  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}$ ，边集是  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9\}$ 。

流程工业系统 DAG 模型  $G = (V, E)$  是一个有 8 个节点的图，其 8 阶方阵  $A = (a_{88})$  称为  $G$  的邻接矩阵。

在节点  $v_8$  表现异常时，利用图 5 标明各元素对应的状态值，判断导致此异常的最大可能性的节点。

根据贝叶斯原理，计算异常时每条边的前向节点对后续节点故障影响的可能性的后验条件概率，分别为 (0.27, 0.22, 0.26, 0.23, 0.26, 0.11, 0.12, 0.14, 0.39)。

反向搜索后验条件概率最大可能性关联的节点， $v_8$  的前向节点只有  $v_7$ ，因为非相关节点的独立性， $v_7$  对应的前向节点可能性最大的为  $v_6$ ，依此搜索，最后确定的传播路径最大可能性为  $v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_4 \rightarrow v_6 \rightarrow v_7 \rightarrow v_8$ 。

验证最大概率故障传播路径的故障可信度，路径上的任一点都可成为系统异常风险传播源，任意点的状态信息可以通过系统检测数据得到，与可信度区间比较，然后映射为 5 种故障模式状态的一种。假设  $v_1$  的故障状态为“严重”，对应的可信度值为 0.7，根据可信度的传递为可信度值与发生可能性的积，为下一节点或边的可信度值，直至最后的节点，最大可能性路径传播到节点  $v_8$  的最大可信度值为 0.000 087。此值与  $v_8$  的设定阈值相比较，如果此值大于设备设定的故障的阈值，则认为  $v_1$  是引发故障的源节点。否则，删除此路径，重复上述搜索，直到  $v_8$  异常消除为止。

## 6 结束语

本文提出使用面向对象的流程工业系统 DAG 模型，通过分析和研究表明使用这种方法建模容易掌握，使用方便，解决问题有效。将面向对象思想引入到解决复杂流程工业系统 DAG 的建模问题中，对以往的流程工业系统的分析方法和建模方法进行扩展。在系统动态变化的环境应用中，模型能针对异常状态实现错误对象的准确定位。DAG 模型的搜索速度较快，容易找到所需路径，进而确定查找对象。使用 DAG 模型可以更广泛地为流程工业系统的安全分析、资源优化、设备状态监控与评估等提供解决方法，这将在以后的研究应用中得到验证。

## 参考文献

- [1] Li Ji, Wang Binghong, Jiang Pinqun, et al. Growing Complex Network Model with Acceleratingly Increasing Number of Nodes[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(8): 4051-4057.
- [2] 汪秉宏, 王文旭, 周涛. 交通流驱动的含权网络[J]. 物理, 2006, 35(4): 304-310.
- [3] Retchkiman Z. Stability and Stabilization Techniques for Discrete Event Systems Modeled by Coloured Petri Nets[C]//Proc. of IEEE International Conference on Control Applications. Anchorage, Alaska, USA: [s. n.], 2000: 924-928.
- [4] 王胜军, 郭德贵, 金成植, 等. 用有向图实现的 ATLAS 编译系统中的设备分配[J]. 计算机工程, 2006, 32(9): 22-24.
- [5] 韩光臣, 孙树栋, 司书宾, 等. 基于模糊概率 Petri 网系统的故障诊断仿真研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(4): 520-525.
- [6] 刘勇. 基于故障图模型的故障诊断方法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(9): 1741-1745.

编辑 金胡考