

系统建模中基于对象的有向无环图节点粒度的转换

韩中, 陈富民, 高智勇, 高建民

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对化工系统模型难以确定的问题, 提出了基于对象的有向无环图节点粒度的转换方法. 通过引入嵌套节点实现了基于对象的初始化有向无环图模型, 在分析模型组成结构形式的基础上定义了转换过程必须遵守的操作规则, 并且详细描述了节点合并和展开的操作流程. 同时, 从一致性和计算复杂度方面对模型性能进行了评价. 最后, 使用化工燃油控制系统作为实例, 证明了节点转换法能够保证模型形式上的一致性和功能上的完整性, 以及操作简便高效的特点, 可以比较好地满足系统建模的需要.

关键词: 节点粒度; 有向无环图; 完整性; 一致性

中图分类号: TH17; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)09-1122-05

Node Granularity Transformations Based on Object Directed Acyclic Graph in System Modeling

HAN Zhong, CHEN Fumin, GAO Zhiyong, GAO Jianmin

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the difficulty in modeling a chemical system a new node granularity transformation method based on object directed acyclic graph was proposed. By exploring nested nodes, an initialized object directed acyclic graph model was obtained. Following the analysis to the model structure, the necessary operational rules during the transformation were defined, and the operational procedure of node merging and expansion was elaborated. Simultaneously, this model performance was evaluated from the perspective of consistence and computational complexity. A chemical-engineering fuel control system is taken as a sample and modeled by the proposed method. It is verified that the node granularity transformation enables to guarantee the formal consistence and functional intactness, the operational simplicity and efficiency meet the requirements in the system modeling.

Keywords: node granularity; directed acyclic graph; integrality; consistency

化工系统建模是系统故障分析中的重要一环, 并且在这方面已经有了大量类似的研究工作^[1-9]. 由于化工系统的复杂性特点, 所以系统建模中的模型节点粒度的确定变得尤为关键, 而系统模型的节点粒度确定就是对系统功能的切割过程. 通常切割是以完整的设备为粒度的, 一般来说, 确定的粒度大会产生较少的节点对象, 确定处理过程也不那么复杂, 且能比较快地完成. 由于生成的模型比较抽象, 因此

节点粒度较能体现模型系统的结构, 计算快速且占用资源少. 确定的粒度小会产生较多的节点对象, 模型更能体现系统设计的细节, 也方便整个系统的维护, 这对系统的再设计和改造都有好处. 但是, 这种模型不直观, 问题求解的计算时间较长, 同时会耗费大量地系统资源, 在化工系统建模研究工作中也发现了节点粒度对系统性能和代价有着十分重要的影响. 首先, 不同节点粒度的大小和多少会使确定对象

有着不同的计算量和通信量.其次,粒度对各节点对象的功能分布也有一定的影响.本文为了解决系统模型节点确定的问题,定义了一种基于对象的有向无环图模型(简称为模型)作为系统功能描述的转换基础,并以此来实施节点的转换操作.

1 系统建模过程

在化工系统的建模中,节点粒度的转换过程如图1所示.初始化模型一般是按照自然的方式、以完整的设备为粒度建立的模型,节点粒度的确定就是根据待处理节点对象的大小,来确定模型的子模型是合并还是扩展.节点关联确定是对节点对象的关联关系进行的转移,增加或删除等操作过程、生成新的模型结果将进入模型系统的性能评价模块,并进行系统性能及代价的分析和估算,评估结果作为一种启发式的反馈信息为新一轮的粒度确定迭代切割过程.

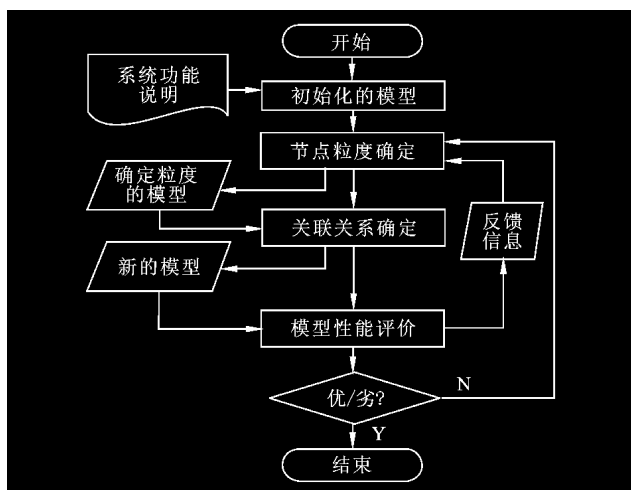


图1 系统的建模过程

2 基于对象的有向无环图建模

使用图论的有向无环图来表示化工系统的结构模型,对象的有向无环图模型为

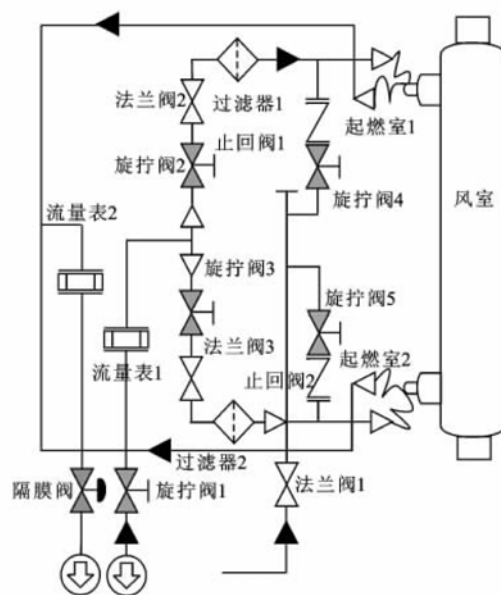
$$G = (V, E, W), \quad v \in V \quad (1)$$

$$v = (g, V_i, P, F) \quad (2)$$

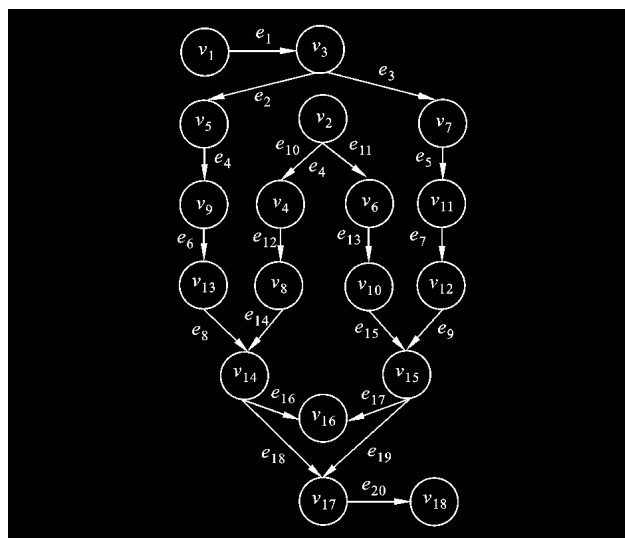
式中: V 表示模型 G 中的节点集合; E 表示节点间的连接; W 表示连接强度; v 表示具体的节点; g 表示该粒度的节点对象; V_i 表示该节点的前趋节点; P 是节点可接收的参数; F 表示节点实现的功能.

在模型 G 中的 E 可以是化工生产中的物质流、能量流和信息流等, G 的 W 用数值表示,能够客观、精确地反映节点的真实情况,而由式(2)可实现有向无环图中节点与模型的相互嵌套和递归机制.

如图2所示,图2a由供油、供气、燃烧换热、废油处理等系统组成,图2b对应的是燃油系统初始化的 G 图.



(a)化工燃油系统设备连接图



(b)初始化的有向无环图

v_1 :旋拧阀1节点; v_2 :法兰阀1节点; v_3 :流量表1节点; v_4 :旋拧阀4节点; v_5 :旋拧阀2节点; v_6 :旋拧阀5节点; v_7 :旋拧阀3节点; v_8 :止回阀1节点; v_9 :法兰阀2节点; v_{10} :止回阀2节点; v_{11} :法兰阀3节点; v_{12} :过滤器2节点; v_{13} :过滤器1节点; v_{14} :起燃室1节点; v_{15} :起燃室2节点; v_{16} :风室节点; v_{17} :流量表2节点; v_{18} :隔膜阀节点; $e_1 \sim e_{20}$:设备间的物流

图2 系统结构与初始化的模型对照图

3 节点粒度转换

3.1 节点粒度的确定

定义1 被合并节点集合中的所有节点必须是弱连通的,即

$$\forall v_i, v_j \in V \quad (3)$$

$$V_t = V_{i,j} \cap V_{j,i} \neq \emptyset \quad (4)$$

$$\wedge \forall v_i \in V_t, V_t \subseteq V \quad (5)$$

式中: $V_{i,j}$ 表示从 v_i 到 v_j 的所有节点集合。

定义2 合并后的节点对象存在着如下关系的关联数量

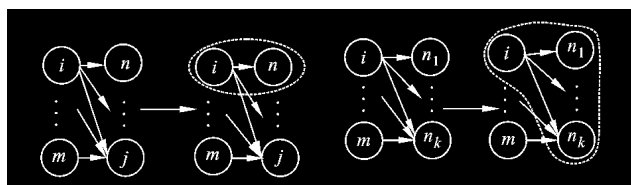
$$\forall P(v_i) = v \quad (6)$$

$$|F(v)| \leq \sum_{i=1}^n |F(v_i)| - n + 1 \quad (7)$$

$$\wedge |B(v)| \leq \sum_{i=1}^n |B(v_i)| - n + 1 \quad (8)$$

式中: $P(v_i)$ 表示 v_i 的父节点; $F(v)$ 表示 v 的所有前向节点集合; n 为 V 中的节点数目; $B(v)$ 表示 v 所有后继节点的集合。

定义3 节点的转换不能破坏模型的完整性,如图3所示。



(a)普通节点的合并 (b)带同质节点的合并

$m \sim n_k$: 同质节点; i, j, m : 不同类型节点

图3 节点转换中模型的完整性示意

设 v 为合并后生成的新的节点对象,若 v_i 为待合并节点 $\wedge v_i \in C(v)$, 令 $v_j \in H(v_i)$, 则

$$v_j \in C(v) \wedge V_{i,j} \subseteq V \quad (9)$$

式中: $H(v)$ 表示 v 的同质节点集合; $C(v)$ 表示嵌套 v 的所有子节点集合。

定义4 如果节点 v_p 和 v_t 属于带嵌套的节点对象,这2种节点所包含的内部模型必须无公共节点,即

$$\forall v_p, v_t, V_{v_p, v_t} \neq \emptyset$$

则

$$C(v_p) \cap C(v_t) = \emptyset \quad (10)$$

节点的合并过程如图4所示,节点的展开操作非常简单,按照原有的 G 恢复即可。

3.2 关联关系的确定

图5列出了节点 i, j 合并的几种情形,其中图5a~图5f的形式属于简单合并模型,可将2个节点直接合并。对于图5g和图5h的形式,需要作合并节点集合的关联节点的重复性处理。

当2个节点的合并完成后(更多节点的关联合并处理是从2个节点合并为1开始),再进一步与第3个节点合并,这样反复迭代,直至 V 中所有节点都

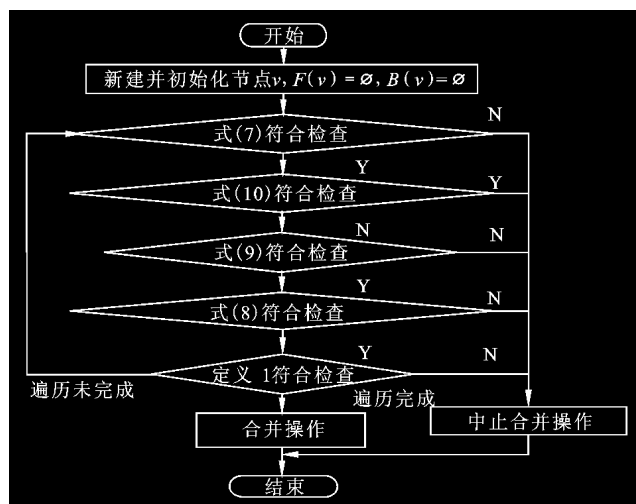
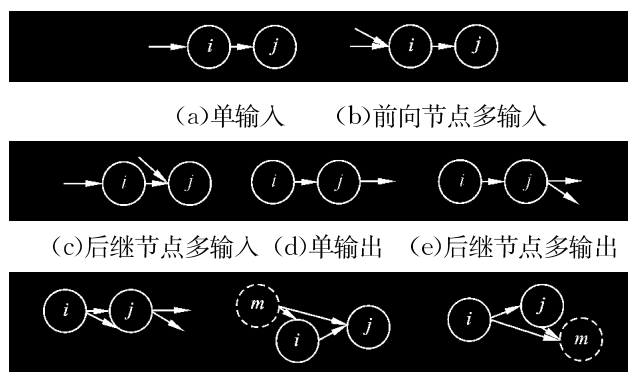


图4 节点合并流程图



(a)单输入 (b)前向节点多输入

(c)后继节点多输入 (d)单输出 (e)后继节点多输出

(f)前向节点多输出 (g)重复输入 (h)重复输出

图5 关联关系的模型形式

合并完成,此时关联处理任务才能结束。

关联合并流程的描述如图6所示。节点对象的关联展开操作,可根据原有模型 G 的合并节点作相应的恢复即可。

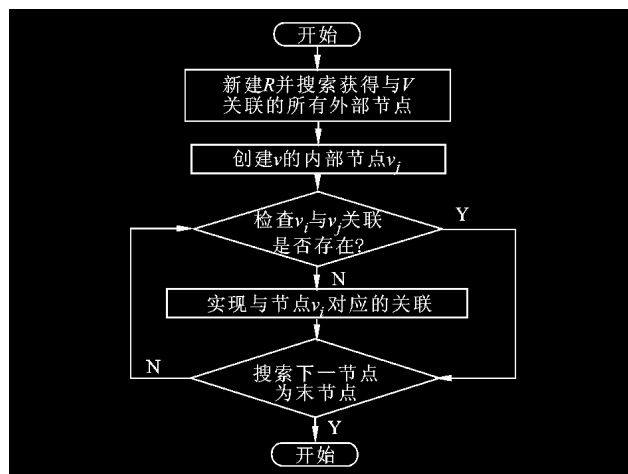


图6 关联关系的合并流程

3.3 模型性能评价

3.3.1 模型的一致性 节点粒度的转换要保证转换前后的模型在形式上和功能上相一致,这也是模

型性能的一个重要标志. 由于转换中信息的丢失和变动都会降低模型质量, 因此本文在节点粒度转换保持完整性方面首先定义了初始化模型, 使得节点对象的粒度变化不会丢失原始数据; 其次对节点的操作进行了定义, 以保证模型功能的一致性; 最后在转换操作中, 通过增加相应的定义符合检查, 使合并的正确操作次序得到了保证, 而节点的展开操作是直接从原有模型的恢复中得到的.

3.3.2 计算复杂度 计算复杂度主要是节点粒度确定过程中的节点遍历过程以及遍历的检查操作. 节点的遍历搜索在理论上可以看成是节点的排列组合过程, 这样处理的计算复杂度符合 $O(n!)$, 其中 n 是搜索的节点数. 节点的检查操作是在遍历之中进行的, 假设节点遍历计算的复杂度就是上述理论值 $O(n!)$, 检查项目数为某自然数 c , 则总的计算复杂度为 $O((c+1)n!)$, 但系统模型的计算复杂度仍是 $O(n!)$. 因此, 节点展开操作过程是合并操作的逆过程, 还原操作时间的复杂度仍然是 $O(n!)$.

从复杂度的计算中可以看出, 节点数量对模型性能的影响是相当大的, 计算时间是按照 $n!$ 的方式增长, 因此有关 n 的大小也是建模当中需要考虑的问题.

4 示 例

图7为初始模型节点粒度的转换示例, 合并操作的详细过程是在图2模型的基础上进行的, 输出结果如图7所示. 合并过程先按照第3节中的3.1节来实现节点粒度的确定, 然后按照第3节中的3.2节来实现关联关系的确定. 在节点粒度确定中创建了合并节点 v_{0-1} , 定义了符合检查时的合并节点集 $V = (v_{15}, v_{16}, v_{17})$, 其中 v_{15} 和 v_{16} 为同质节点 ($v_{15} = v_{16}$ 或 $v_{16} \in H(v_{15})$), v_{15} 与 v_{17} 合并, 则 v_{16} 与

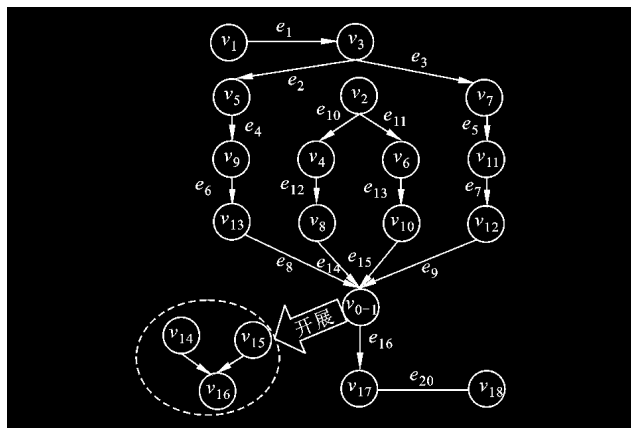


图7 粒度转换示例

v_{17} 也必须合并, 这样才符合文中的定义3. 最后形成新的节点 v_{0-1} . 当关联关系确定时, 图2模型的关联 e_8, e_9, e_{14}, e_{15} 形成与新节点对象 v_{0-1} 的前向关联, 并对应图7中的 e_8, e_9, e_{14}, e_{15} . 图2中的关联 v_{16}, v_{17} 自动收缩到节点 v_{0-1} 内部(不可见), 图2中的 e_{18}, e_{19} 合并后为图7中 v_{0-1} 后的 v_{16} . 这样, 节点数由3个变成了1个, 从而大大节省了节点运算和节点通讯带来的系统开销, 同时进行满足定义的符合检查, 保证了系统具有功能的完整性.

5 结束语

本文介绍了化工系统建模中基于对象的有向无环图的节点粒度转换. 转换的合并操作是将一组节点连同相关的边封装到节点对象中, 转换的展开操作是将节点对象恢复原有的模型过程. 本文详细介绍了节点粒度的确定和关联关系确定的操作过程, 粒度转换以初始模型的节点对象为基础, 在满足定义要求的条件下进行转换. 在转换过程中, 给出了多种定义, 以保证变换前后的模型在形式和功能上的一致性. 文中还对系统模型的性能进行了分析, 发现无论是合并操作还是展开操作, 模型的时间复杂度均为 $O(n!)$, 表明这是一种简单快速、功能和形式都保持一致的粒度转换, 非常适合于化工系统建模粒度的确定.

参考文献:

- [1] LEI Hao, HUANG Jian, FENG Dengguo. A fine-grained coalition access control policy for jointly-owned resources in collaborative environments [J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 1000-1011.
- [2] 陈洪娜, 黄洪钟, 赵宏. 协同开发过程任务粒度设计的度量模型 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 57-61.
CHEN Hongna, HUANG Hongzhong, ZHAO Hong. Metrics based task granularity design model in collaborative development process [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(1): 57-61.
- [3] 卜东波, 白硕, 李国杰. 聚类/分类中的粒度原理 [J]. 计算机学报, 2002, 25(8): 810-816.
BU Dongbo, BAI Shuo, LI Guojie. Principle of granularity in clustering and classification [J]. Journal of Computers, 2002, 25(8): 810-816.
- [4] 吴强, 王云峰, 边计年, 等. 软硬件划分中基于一种新的层次化控制数据流图的粒度变换 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(3): 337-393.
WU Qiang, WANG Yunfeng, BIAN Jinian, et al.

- Granularity transformations based on a new CDFG format for granularity selection in hardware-software partitioning [J]. *Journal of Computer-Aided & Computer Graphics*, 2005, 17(3): 337-393.
- [5] 王英林, 杨东, 张申生, 等. 基于粒度分层的布局设计模型 [J]. *上海交通大学学报*, 2000, 34(7): 873-876.
WANG Yinglin, YANG Dong, ZHANG Shensheng, et al. Layout design model based on granularity theory [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(7): 873-876.
- [6] 李必信, 王云峰, 张勇翔, 等. 基于简化系统依赖图的静态粗粒度切片方法 [J]. *软件学报*, 2001, 12(2): 204-211.
LI Bixin, WANG Yunfeng, ZHANG Yongxiang, et al. An approach of static coarse-grained slice based on simplified system dependence graph [J]. *Journal of Software*, 2001, 12(2): 204-211.
- [7] ANTONIO L, STEFANO C, ALESSANDRO B, et al. Computational granularity and parallel models to scale up reactive scattering calculations [J]. *Computer Physics Communications*, 2000, 128: 295-314.
- [8] JORG H, ROLF E. An approach to automated hardware/software partitioning using a flexible granularity that is driven by high-level estimation techniques [J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2001, 9(2): 273-289.
- [9] GAO Qiong, LI Ming, PAUL V. Applying MDL to learn best model granularity [J]. *Artificial Intelligence*, 2000, 121: 1-29.

(编辑 管咏梅)