



基于分层 Petri 网的敏捷供应链建模与分析

李孝忠, 李蕊

(天津科技大学计算机与信息工程学院, 天津 300222)

摘要: 基于 Petri 网系统理论,采用分层分析的方法,将供应链抽象出顶层和底层模块,将顶层模块细化,形成底层模块,并生成与各层次相对应的状态图. 根据状态图抽象出其中的库所、变迁等变量,形成对应的 Petri 网. 利用 Petri 网理论对此供应链系统进行静态结构分析和动态行为分析,最终实现供应链上各节点企业的整体集成和协调控制. 子网中应用 CPRF 流程生成订单的思想,构造订单生成子网模块,产品生产子网模块及信息采集子网模块,整合出整个供应链的子网系统. 最后,对系统的鲁棒性和反应敏捷度作综合分析,构造了可达树,并对所建模型的正确性和可达性进行分析.

关键词: 分层 Petri 网; 敏捷供应链; CPRF 流程; 可达图

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2010)06-0058-04

Modeling and Analysis of Agile Supply Chain Based on Hierarchical Petri Net

LI Xiao-zhong, LI Rui

(College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Based on Petri net systems theory, the supply chain was abstracted to top and bottom modules using stratified analysis, the top-level module was refined into bottom-level module, then the state diagram was built corresponding to various levels. Based on the state diagram, place, transition and so on was abstracted to form the corresponding Petri net. The static structure and dynamic behavior of this supply chain system was analysed by Petri net to make all nodes in the supply chain integration and coordination eventually. Subnet included the module of order generation inspired by the thought of CPRF, the module of production and the module of information collection. Finally the comprehensive analysis of robustness and Agility of the system was made and the reachability tree to verify the accuracy and accessibility of the system was constructed.

Keywords: hierarchical Petri net; agile supply chain; CPRF process; reachability graph

随着全球经济一体化和信息技术的高速发展,市场竞争日益加剧,企业之间的竞争逐步演变成了供应链之间的竞争. 为适应这种竞争,本文提出了企业之间协同工作的模式,以对市场需求的变化的敏捷反应.

早期对供应链的研究主要集中在供应链的组成、最小库存、供应契约等方面,主要基于供应链中直接上下级结点的短期的业务活动,偏重于对供应链中直

接上下级的动态鲁棒性研究^[1],缺乏对整体供应链建立一种完整的网络系统去统筹供应链中各结点的反馈信息的研究,为此提出了将 Petri 网系统理论的研究嵌入到供应链和其各个子结点中,从整体上考虑供应链的动态运行机制.

Petri 网采用直观的可视化图形描述和严谨的数学公式表达,使得模型的过程表现力增强,便于系统实现^[1];本文基于 Petri 网系统理论,分别抽象出供应

收稿日期: 2010-07-01; 修回日期: 2010-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61070021)

作者简介: 李孝忠(1962—),男,山东人,教授,博士,lixz@tust.edu.cn.

链中表示状态的元素和表示变迁的元素, 建立供应链的数学模型, 去探讨供应链中各企业间的协同工作模式. 研究建立一种供应链的协调机制, 使信息能够畅通地在供应链中传递, 对不断变化的市场作出快速反应.

1 基本 Petri 网

1.1 网的定义^[2]

三元组 $N = (S, T; F)$ 称为有向网 (directed net, 简称网) 的条件是:

$$\begin{cases} S \cap T = \phi \\ S \cup T = \phi \\ F \subseteq S \times T \cup T \times S (\text{"x" 为笛卡儿积}) \\ \text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = S \cup T \end{cases}$$

其中

$$\text{dom}(F) = \{x \mid \exists y: (x, y) \in F\}$$

$$\text{cod}(F) = \{y \mid \exists x: (x, y) \in F\}$$

它们分别是 F 的定义域和值域.

1.2 网系统的定义

六元组 $\Sigma = (S, T, F, K, W, M_0)$ 构成网系统的条件是:

(1) $N = (S, T, F)$ 构成有向网, 称为 Σ 的基网;

(2) K, W, M_0 依次为三元组 N 上的容量函数、权函数和标识. M_0 称为六元组 Σ 的初始标识 (initial marking).

1.3 变迁发生的条件

(1) $\cdot t \cdot = \cdot t \cup t \cdot$ 称为 T 的外延 (extention).

(2) t 在 M 有发生权 (firable) 的条件是:

$$\forall s \in \cdot t: M(s) \geq W(s, t) \wedge \forall s \in t \cdot: M(s) + W(s, t) \leq K(s)$$

t 在 M 有发生权记作 $M[t >$, 也称为 M 授权 (enables) t 发生或 t 在 M 授权 (enabled) 下发生.

1.4 变迁发生的后果

若 $M[t >$, 则 t 在 M 可以发生, 将标识 M 改变为 M 的后继 (successor) M' , M' 的定义是^[4]:

对 $\forall s \in S$

$$M'(s) = \begin{cases} M(s) - W(s, t) & s \in \cdot t - t \cdot \\ M(s) + W(s, t) & s \in t \cdot - \cdot t \\ M(s) - W(s, t) + W(s, t) & s \in \cdot t \cap t \cdot \\ M(s) & s \notin \cdot t \cdot \end{cases}$$

M' 为 M 之后继的事实记作 $M[t > M'$.

2 模型的构建

2.1 供应链主链

2.1.1 主状态图

供应链的主状态图见图 1.

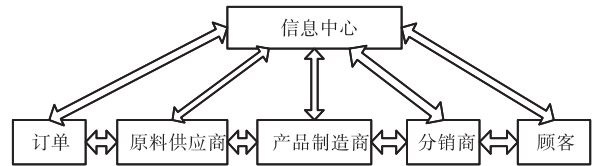


图 1 供应链主状态图

Fig.1 Main state diagram of supply chain

2.1.2 主 Petri 网

根据主状态图建立相应的主 Petri 网见图 2. 图中各库所、变迁的符号含义如下: p_1 , 订单; p_2 , 原料供应商; p_3 , 生产商; p_4 , 分销商; p_5 , 顾客; p_6 , 信息中心; $p_7 \sim p_{10}$, 向供应链上各结点提交信息时的审核机制; $p_{11} \sim p_{17}$, 表示供应链向上反馈时的监督检查机制; t_1 , 订单执行; t_2 , 原料采购、加工; t_3 , 产品制造; t_4 , 产品分销; $t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{15}, t_{16}, t_{17}$, 供应链上的逐级反馈和隔级反馈; $t_9 \sim t_{14}$, 向信息中心提交的信息和信息中心发出参考信息.

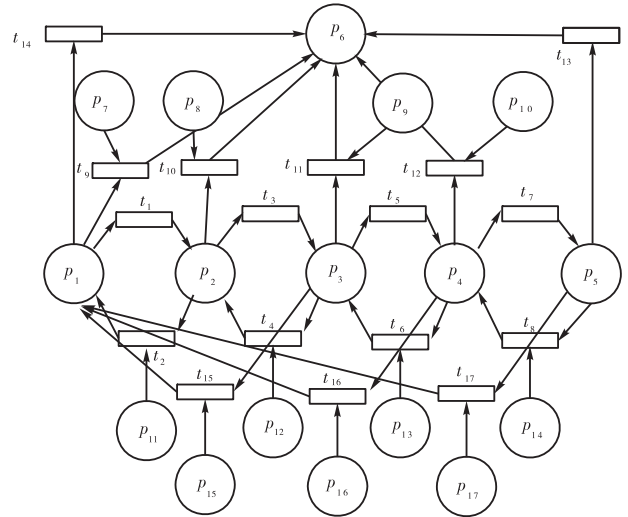


图 2 供应链主 Petri 网

Fig.2 Main Petri net of supply chain

主 Petri 网的运行过程^[5]:

(1) 根据顾客下的订单数 p_1 进行市场调查, 并进行可行性分析, 制定在供应链上的生产计划, 完成变迁 t_1 , 并进行生成订单时的信息采集, 经过 p_7 的审核, 完成变迁 t_9 , 到达信息中心 p_6 , 若出现例外事件, 由 p_{11} 进行检查、鉴定后, 通过 t_2 返回 p_1 ;

(2) 原料供应商 p_2 经过检查库存、采购原料后, 进行原材料加工, 完成变迁 t_3 , 并将相应信息传到 t_6 , 有例外事件经过 p_{12} 和 p_{15} 的鉴定后传回 p_2 或 p_1 ;

(3) 生产商 p_3 对原料加工生产, 并将信息传到 p_6 , 进而反馈给 p_1, p_2 和 p_3 ;

(4) 分销商 p_4 对产品进行销售, 并将信息传到 p_6 , 进而反馈给 p_1, p_2, p_3 和 p_4 ;

(5) 顾客拿到商品后, 信息中心调查消费者对响应时间、产品质量、产品价格等的满意程度, 结合之前各个环节的反馈信息进行综合评估, 制定改进方案, 用于指导以后的供应链运行.

2.2 供应链子链

2.2.1 生成订单环节子状态图

生成订单环节子状态图见图 3.

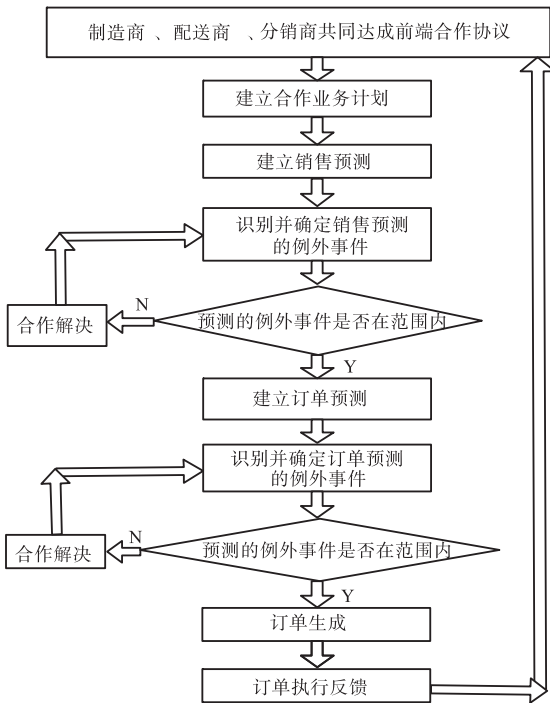


图 3 订单生成环节子状态图

Fig.3 Sub-state diagram of order generation

2.2.2 生成订单环节子 Petri 网

根据生成订单环节子状态图建立子 Petri 网见图 4. 图中各库所、变迁的符号含义如下: p_1 , 联合体达成的协议; p_2 , 销售预测计划; p_3 , 受例外事件影响的预测计划; p_4 , 健壮的销售预测计划生成的订单计划; p_5 , 受例外事件影响的订单计划; p_6 , 健壮的订单计划生成最终订单; $p_7 \sim p_9$, 人为干涉因素; t_1 , 联合体调查、评估; t_2 , 影响销售预测的例外事件发生; t_3 , 合作解决预测计划中的问题; t_4 , 影响订单预测的例外事件发生; t_5 , 合作解决订单计划中的问题; t_6 , 订单反馈; t_7 , 订单验收.

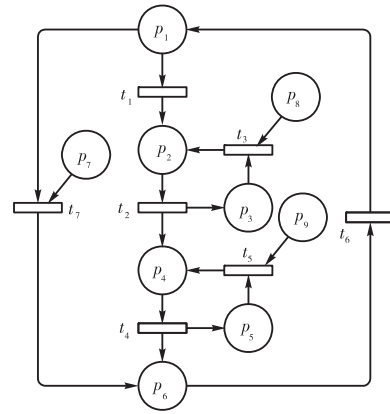


图 4 生成订单环节 Petri 网图

Fig.4 Sub-Petri net of order generation

订单生成运行过程:

(1) 由制造商、分销商等供应链上的结点企业达成前端合作协议 p_1 , 经过联合调查、评估分析, 建立销售计划 p_2 ;

(2) 对销售计划进行例外事件检验 t_2 , 有两种可能性发生, 一种为健壮的销售预测计划 p_4 , 另一种为受影响的销售预测计划 p_3 ; 其中受例外事件影响的计划将通过供应链上的企业结点合作解决 t_3 后, 重新进行例外事件检测;

(3) 健壮的销售计划同样经过例外事件检测后 (原理同 (2)) 生成订单 p_6 ;

(4) 订单生成后要要进行订单反馈 t_6 , 并进行订单验收.

2.2.3 产品生产环节子状态图

产品生产环节子状态图见图 5.

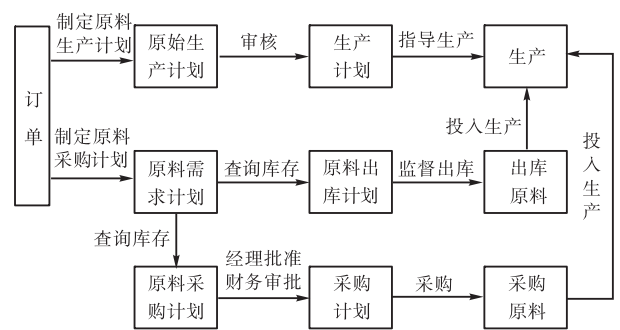


图 5 产品生产环节子状态图

Fig.5 Sub-state diagram of products

2.2.4 产品生产环节子 Petri 网

根据产品生产环节子状态图建立子 Petri 网见图 6. 图中各库所、变迁的符号含义如下: p_1 , 收到的订单; p_2 , 原始生产计划; p_3 , 相关审核机制; p_4 , 产品; p_5 , 原料出库计划; p_6 , 原料采购计划; p_7 , 监督机制; p_8 , 财物审批机制; p_9 , 采购的原料; t_1 , 分析调查; t_2 , 指

导生产; t_3 , 原料需求评估; t_4 , 出库原料用于生产; t_5 , 原料采购; t_6 , 采购原料用于生产.

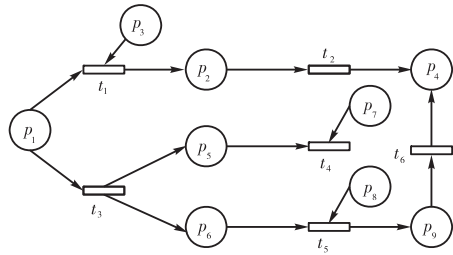


图6 产品生产环节子Petri网图
Fig.6 Sub-Petri net of products

产品生产运行过程:

- (1) 企业收到订单, 经过分析调查 t_1 , 在有关部门 p_3 的审核后制定出原始生产计划 p_2 , 用于指导 p_4 的生产;
- (2) 收到订单后, 进行原料需求评估 t_3 并查询库存, 制定原料出库计划 p_5 和原料采购计划 p_6 ;
- (3) 根据出库计划, 在出库员 p_7 的监督下出库原料 t_4 , 并用于 p_4 的生产;
- (4) 根据原料采购计划, 由经理核准, 财物审批 p_8 后, 由采购员进行采购 t_5 , 采购的原料 p_9 经过登记部分入库 t_6 后, 用于 p_4 的生产.

2.2.5 销售环节子状态图与子Petri网

此环节与订单环节类似, 不再赘述.

3 模型分析

3.1 系统鲁棒性和反应敏捷度的优化

供应链会受多种不确定因素的影响, 这里仅就供求数量不确定和供求价格不确定的情况来作分析. 采用已知概率的离散情景描述上、下游市场供求量的不确定性, 采用区间不确定性描述原材料价格和最终产品价格的波动情况, 利用基于区间分析的鲁棒线性优化可得到如下结果:

供应链运作鲁棒优化模型的目标函数^[3]为

$$\min P_T \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^I (d_{ii}^- + d_{ii}^+) + P_p d_p^- + P_s d_s^- \quad (1)$$

式中: P_T, P_p, P_s 为足够大的常数, 代表期望利润的优先因子, 且有 $P_T \gg P_p = P_s$; d_{ii}^-, d_{ii}^+ 分别为下游供应商在 t 阶段对原料 i 的不足交付量和过剩交付量; d_p^- 为目标利润的未实现值, d_s^- 为目标利润的超过量.

约束条件: (1) 供应链中参与主体下游的交付量应等于上游的需求量; (2) 下游目标利润最大; (3) 上

游目标利润最大.

经过主 Petri 网优化后的供应链鲁棒性优化实例如下:

设定优先因子 $P_T = 10\ 000$ (单位), $P_p = P_s = 10$. 由主 Petri 网可知共有 5 个阶段, $T = 5$, 为简化分析各阶段的原料数 $I = 1$, Petri 网中加入 (p_7 到 p_{17}) 等信息审核, 使 t_3, t_4, t_5, t_7 发生的准确性提高, 所消耗 token 的数量理论上会减少, 设减少 50%. 将以上数据代入式 (1) 可得

$$\min 10\ 000 \times 5 \times 50\% (d_{ii}^- + d_{ii}^+) + 10 (d_p^- + d_s^-)$$

这里由于 d_p^- 和 d_s^- 的数值较小, 忽略不计. 可得到, 整个系统的鲁棒性目标函数值约降低了 50%.

由目标函数可知: 在满足约束条件的情况下, $d_{ii}^-, d_{ii}^+, d_p^-, d_s^-$ 影响着目标函数的最优值大小, 而所建模型引入了信息反馈机制, 即由 P_6 (信息中心) 对供应链各结点的每个动作环节 ($t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}$) 逐一采集信息, 并进行综合分析、预测, 经过变迁 t_{14} , 将市场需求信息传递到供应链的输入库所中, 使供应链中可以迅速、准确地反映对原料的交付量 d_{ii}^- 和 d_{ii}^+ 这一组参数, 使不足交付量和过剩交付量达到最小, 从而减少目标函数的相对大小, 以达到对供应链鲁棒性的优化.

模型中加入了对于信息反馈^[6] ($t_2, t_4, t_6, t_8, t_{15}, t_{16}, t_{17}$) 的验证机制 (库所 P_7 到 P_{17}), 使供应链中各结点收集到的虚假和冗余信息大大减少, 为信息中心做出正确判断提供可靠数据资料, 从而降低供应过程、制造过程、客户需求过程中的不确定性, 减少由于需求预测不准确带来的货品不足或积压, 通过使系统中的各节点都保持最合适存量, 提高系统反应敏捷度.

3.2 系统动态性质的验证

主 Petri 网的可达树^[7]如下: $(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \rightarrow (0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \rightarrow (0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \rightarrow (0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \rightarrow (0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \rightarrow (0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \rightarrow (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$

为了使所建模型更具有实际意义, 并且使网能够定向运行, 避免因争夺发生权所产生的冲突, 在模型中加入人为约束性节点 ($p_7 \sim p_{17}$, 这些结点需要人为控制, 没有加入到分析中, 这些节点的初始 token 数为 0, 需要人为控制时, 为其加入 token).

(下转第 78 页)