

# 基于广义随机Petri网的第四方 物流业务流程建模与分析

于 虎, 闫秀霞, 华晓晖

(山东理工大学 管理学院, 山东 淄博 255049)

摘 要: 供应链业务流程再造是提高供应链整体竞争力的重要措施, 而对业务流程的性能进行建模分析是业务流程再造的基础和前提, 也是近年来流程再造的研究热点。Petri网以其兼备图形化的描述方法和严格的数学定义的特点而成为目前流行的业务流程再造建模工具。首先给出广义随机Petri网的定义及性能评价的方法, 然后通过一个实例分析证明该方法的有效性和实用性。

关键词: 业务流程再造(BRP); 第四方物流; 广义随机Petri网(GSPN)

中图分类号: F252

文献标识码: A

文章编号: 1001-7348(2009)15-0020-04

## 0 引言

业务流程重组(简称 BPR)最早是由美国 MIT 大学的哈默教授于 1990 年在 HBR 杂志上正式提出来的。自 BPR 提出后, 在欧美企业中迅速推广, 带来了显著的经济效益, 涌现出大批成功的范例。随后, 亚太国家也开始 BPR 的尝试, 但是, BPR 的失败率也很高, 约 70% 的 BPR 项目失败<sup>[1]</sup>。因此, 对业务流程的分析和评价就成为学术界研究的重要课题之一。国内外学者纷纷对此展开了研究, 然而目前还没有一个量化的衡量标准<sup>[2]</sup>, 多采用定性分析的方法, 或将工作流管理(简称 WFM)技术与 BPR 技术结合, 从定性的方面分析业务流程效率。例如, 文献[3]应用定性和定量相结合的二级模糊综合评价方法评价业务流程重组, 文献[4]运用排队论评价业务流程效率, 文献 [5] 采用专家打分的 MUSA 多标准满意度分析模型对 BPR 应用效果进行综合评价, 定性方法的缺点是存在较强的主观性。有的学者则建立一个业务流程评价指标体系, 然后通过专家打分结合一定的数学方法对流程性能进行评价, 目前最为著名的是 Michael Hammer 和 James Champy 提出的用成本、质量、服务、速度 4 项指标来衡量 BPR 效果。然而, 这 4 个指标的具体内容本身就有重叠, 并且没有考虑企业外部环境激烈竞争所导致的企业在这 4 个指标方面的自然下降及对行业生命周期的影响。

本文应用广义随机 Petri 网来对第四方物流业务流程进行建模分析。Petri 网是一种描述离散系统的建模工具, 尤

其适合于顺序、并发、冲突和同步过程的分析<sup>[6]</sup>。Petri 网具有强大的数学分析能力, 可以建立各种动态方程、代数方程和它的描述系统行为的数学模型。利用广义随机 Petri 网进行第四方物流业务流程建模分析, 可以反映现有业务流程的特性及业务流程重组的效果并及时发现潜在的问题。

## 1 Petri 网原理

### 1.1 广义随机 Petri 网

广义随机 Petri 网 (generalized stochastic Petri nets, 简称 GSPN) 是在随机时间 Petri 网的基础上的一种扩充, 将变迁分为两类: 一种为瞬时变迁, 与随机开关相关联且实施延时为零; 另一种变迁为时间变迁, 与指数随机分布的实施延时相关联。GSPN 的状态空间较相同问题的 SPN 有所减少, 为缓解状态爆炸提供一种途径, 因此得到广泛应用。广义随机 Petri 网的形式化定义为<sup>[7]</sup>:

$$GSPN=(S, T; F, W, M_0, \lambda)$$

其中,  $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  表示位置的集合;  $T=\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  表示变迁的集合, 且变迁集合  $T$  划分为两个子集:  $T=T_i \cup T_t, T_i \cap T_t = \Phi; T_i=\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  表示时间变迁集,  $T_t=\{t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_m\}$  表示瞬时变迁集;  $F \rightarrow (S \times T) \cup (T \times S)$  表示弧的集合。且  $F$  中允许有禁止弧, 禁止弧仅存在于从位置到变迁的弧, 禁止弧所连接的位置的原可实施条件变为不可实施条件, 原不可实施条件变为可实施条件, 且在相连的变迁实施时, 没有标记从相连的位置中移出;  $W: F \rightarrow N^+$  是弧权函数;

收稿日期: 2008-04-22

作者简介: 于虎(1981-), 男, 山东烟台人, 山东理工大学管理学院硕士研究生, 研究方向为物流与供应链管理; 闫秀霞(1967-), 女, 陕西白水人, 山东理工大学管理学院教授, 研究方向为物流与供应链管理、系统分析与建模; 华晓晖(1982-), 男, 山东聊城人, 山东理工大学管理学院硕士研究生, 研究方向为物流与供应链管理。

$M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$  表示初始标识;  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$  是变迁的平均实施速率, 当与时间变迁相连时, 该值为服从指数分布的一组参数; 当与瞬时变迁集相连时, 该值为一个无穷大的值。

如果在一个标识  $M$  下存在多个可实施瞬时变迁, 则需定义一个随机开关, 以确定它们之间的实施概率选择。全部可实施瞬时变迁构成的子集连同相关的概率分布一起称为一个随机开关。相应的概率分布称为一个开关分布。

### 1.2 GSPN 的实施规则

在 GSPN 中, 如果在一个标识  $M$  下, 有若干个变迁构成一个可实施变迁集合  $H$ , 则有下列两种情形:

(1) 如果  $H$  全部由时间变迁组成, 则  $H$  中任一时间变迁  $t_i \in H_i$  实施的概率与各变迁的实施速率有关, 为:  $\lambda_i / \sum_{t_k \in H} \lambda_k$ , 与 SPN 的情形相同。

(2) 如果  $H$  中包含若干个瞬时变迁和若干个时间变迁或不包含时间变迁, 则只有瞬时变迁可以实施, 时间变迁便不能实施。选择哪一个瞬时变迁实施, 要根据一个概率分布函数(即一个开关分布)来确定。 $H$  的全部瞬时变迁构成的子集连同相关的概率分布一起成为一个随机开关, 开关分布即为随机开关的概率分布。

## 2 广义随机 Petri 网进行第四方物流业务流程性能分析的过程

为了分析广义随机 Petri 网在第四方物流业务流程重组中的应用, 本文特作以下假设<sup>[7]</sup>: ①可达集是有限的; ②变迁实施速率与时间无关(可能与标识有关); ③任何可达标识返回初始标识的概率不为零, 即在可达集中的标识之间都是相互可达的。

本文利用广义随机 Petri 网分析第四方物流业务流程重组问题时, 基于以下过程<sup>[8]</sup>:

(1) 建立 GSPN 模型。第四方业务流程是基于事例的, 每个流程就是执行一个特定的事例<sup>[2]</sup>。一个业务流程由一组活动, 以及活动之间的相互关系所组成, 还包括过程、活动的启动和终止条件, 以及对每一个活动的描述。本文用变迁表示活动, 用库所表示使活动发生的条件, 用托肯表示事例, 从而建立基于广义随机 Petri 网的业务流程模型。

(2) 构造同构嵌入式马尔可夫链(EMC)。先不考虑时间因素, 不区分时间变迁和瞬时变迁, 仅考虑 GSPN 可能到达的状态以及状态之间的转移, 计算可达图并确定模型是活性和有界的, 将模型中的每一条弧给予所对应变迁的激发率, 从而得到马尔可夫链。将所有标志记为  $M_0, M_1, \dots, M_{n-1}, n$  为状态总数。

(3) 求压缩的嵌入式马尔可夫链(REMC)的转移概率矩阵

上述 GSPN 模型的状态集包含了实存状态  $T$  和消失状态  $V, S = T \cup V, T \cap V = \Phi$ , 其状态总数量为  $K_s = K_t + K_v$ 。将

EMC 中的消失状态剔除, 只剩下实存状态, 就构成了压缩的嵌入式马尔可夫链(REMC)。在本文中, 将用时很少的环节视为消失状态, 用时较长的环节视为实存状态, 这种近似的处理方法能有效地减少复杂系统的状态空间<sup>[4]</sup>, 最终可以得到马尔可夫链转移概率矩阵为:

$$U = F + EG^\infty \tag{1}$$

其中,  $F$  表示  $U$  中实存状态向实存状态集的转移概率;  $E$  表示  $U$  中的实存状态向消失状态集的转移概率;  $G^\infty$  中的元素  $g_{ij} = P_r\{r \rightarrow j\}$  表示从给定的消失状态  $r$  出发, 沿着一条全部由消失状态构成中间状态的路径首次到达实存状态  $j$  的概率。

(4) 求与步数相关的实存状态稳定概率分布, 求解线性方程组:

$$Y = YU \tag{2}$$

其中,  $Y$  是一个行向量, 其元素  $Y_i$  为 REMC 的实存状态的稳定状态概率分布, 解释为与执行转移步数相关的量。

(5) 求 GSPN 稳定状态概率。选择压缩的嵌入式马尔可夫链(REMC)的一个状态  $i$  作参考状态, 则连续两次访问状态  $i$  之间访问  $j$  的次数为:

$$V_{ij} = Y_j / Y_i \tag{3}$$

重新引入时间参数计算 GSPN 的稳定状态概率, 首先计算 GSPN 在每个状态上的平均驻留时间为:

$$ST_i = \begin{cases} 0, & \forall i \in V \\ \left[ \sum_{f \in H_i} \lambda f_k \right]^{-1}, & \forall i \in T \end{cases} \tag{4}$$

其中,  $H_i$  为在实存状态  $i$  下可实施的变迁集。

在得到  $ST_i$  后, 利用下面的公式计算 GSPN 的稳定状态概率:

$$P_j = \begin{cases} 0, & j \in V \\ V_{ij} ST_j / \sum_{j \in T} V_{ij} ST_j, & j \in T \end{cases} \tag{5}$$

(6) 分析系统性能。求得稳定概率  $P_j$  后, 根据 GSPN 描述单元所要求的性能, 可以计算第四方物流的时间性能、运作效率等。

## 3 广义随机 Petri 网进行第四方物流业务流程性能分析实例

本文利用上面所建立的过程, 利用广义随机 Petri 网对某第四方物流公司的业务流程进行建模分析。图 1 为该公司的业务流程<sup>[7]</sup>, 该图是一个用 WfMC 过程描述语言定义的业务流程模型, 模型反映了第四方物流公司从确认本公司有能力承接客户订单上要求的物流服务(即可行)开始, 到最终完成该物流业务(结束)的几个主要的环节。

(1) 第四方物流业务流程的 GSPN 模型。首先用文献[8]的方法将该公司业务流程图转化为广义随机 Petri 网模型(见图 2), 各库所和变迁的含义见表 1。其中,  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}\} = \{1, 1, 1/5, 1/5, 1/2, 1, 1/2, 1/$

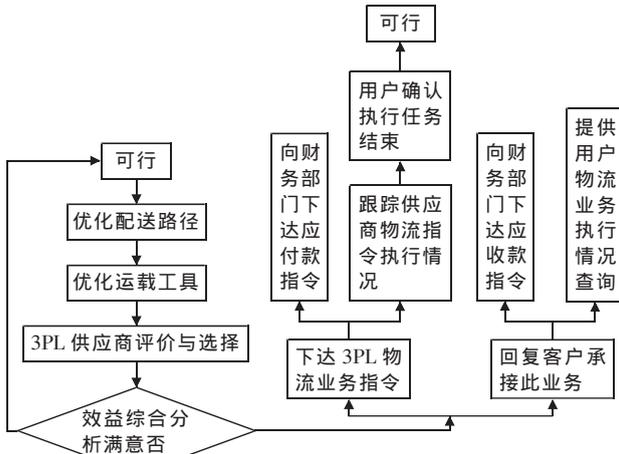


图1 某第四方物流公司的业务流程

3, 1/2, 1/2, 1/5}为模型中的相应的时间变迁的变迁速率。

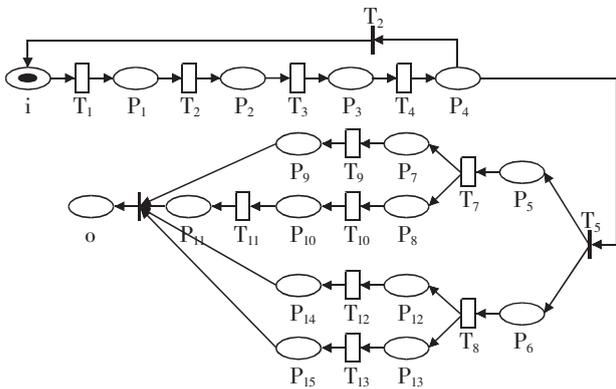


图2 第四方物流公司业务流程 GSPN 模型

为了简化计算,防止引起状态空间爆炸,本文利用文献[9]的方法,首先对 GSPN 模型进行性能等价化简(见图3),然后对化简后的 Petri 网模型进行性能分析,有研究已

表1 图1 GSPN 模型中库所和变迁的含义

| 库所              | 含义                      | 变迁              | 含义                   |
|-----------------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| i               | 可行                      | T <sub>1</sub>  | 优化配送路径               |
| P <sub>1</sub>  | 配送路径得到优化                | T <sub>2</sub>  | 优化运载工具               |
| P <sub>2</sub>  | 运载工具得到优化                | T <sub>3</sub>  | 3PL 供应商评价与选择         |
| P <sub>3</sub>  | 选择好合适的 3PL 供应商          | T <sub>4</sub>  | 进行效益综合分析             |
| P <sub>4</sub>  | 得到效益综合分析结果面<br>向供应商采取行动 | T <sub>5</sub>  | 得到满意的结果              |
| P <sub>5</sub>  | 面向供应商采取行动               | T <sub>6</sub>  | 得到不满意的结果             |
| P <sub>6</sub>  | 面向客户采取行动                | T <sub>7</sub>  | 下达物流业务指令             |
| P <sub>7</sub>  | 拿到应付款数据                 | T <sub>8</sub>  | 回复客户承接此业务            |
| P <sub>8</sub>  | 供应商开始执行物流指令             | T <sub>9</sub>  | 向财务部门下达应付款指令         |
| P <sub>9</sub>  | 财务部门得到应付款指令             | T <sub>10</sub> | 跟踪供应商物流指令执行情况        |
| P <sub>10</sub> | 3PL 物流指令执行完毕            | T <sub>11</sub> | 用户确认执行任务结束           |
| P <sub>11</sub> | 任务结束得到用户验收确认            | T <sub>12</sub> | 向财务部下应收款指令           |
| P <sub>12</sub> | 拿到应收款数据                 | T <sub>13</sub> | 提供用户物流业务执行情况<br>查询服务 |
| P <sub>13</sub> | 用户得到回复                  | T <sub>14</sub> | 结束流程                 |
| P <sub>14</sub> | 财务部门得到应收款指令             |                 |                      |
| P <sub>15</sub> | 用户对物流执行情况满意             |                 |                      |
| o               | 结束                      |                 |                      |

经证明化简前后模型的性能误差非常小<sup>[10]</sup>。

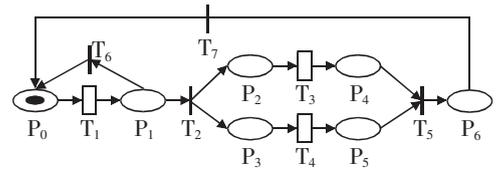


图3 性能等价化简后的简易 Petri 网模型

(2)构造同构的嵌入式马尔可夫链。由 GSPN 的所有可达状态和相应的变迁,构成了与可达图同构的马尔可夫链(见图4)及其状态集(见表2)。

$\lambda = \{\lambda_1, \lambda_3, \lambda_4\} = \{1/12, 7/53, 7/46\}$  为简易 Petri 网模型中对应的时间变迁的变迁速率。

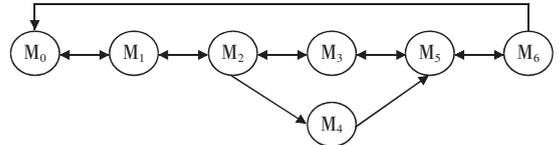


图4 与图3同构的马尔可夫链

表2 图3 马尔可夫链的状态集

| 状态             | P <sub>0</sub> | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> | P <sub>4</sub> | P <sub>5</sub> | P <sub>6</sub> | 状态 |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----|
| M <sub>0</sub> | 1              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 实存 |
| M <sub>1</sub> | 0              | 1              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 消失 |
| M <sub>2</sub> | 0              | 0              | 1              | 1              | 0              | 0              | 0              | 实存 |
| M <sub>3</sub> | 0              | 0              | 0              | 1              | 1              | 0              | 0              | 实存 |
| M <sub>4</sub> | 0              | 0              | 1              | 0              | 0              | 1              | 0              | 实存 |
| M <sub>5</sub> | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 1              | 0              | 消失 |
| M <sub>6</sub> | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 消失 |

(3)压缩的嵌入式马尔可夫链的转移概率矩阵。由表2可知:M<sub>0</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>为4个实存状态,M<sub>1</sub>、M<sub>5</sub>、M<sub>6</sub>为3个消失状态,根据式(1)可得:

$$U = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4646 & 0.5354 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4646 & 0.5354 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(4)与步数相关的实存状态稳定概率分布。由式(2)可得:

$$Y = (0.5000, 0.2500, 0.1162, 0.1338)$$

(5)GSPN 稳定状态概率。取状态 0 为参考状态,由式(3)可得:

$$V_0 = (1, 0.5, 0.2324, 0.2627)$$

由式(4)可得:

$$ST_i = (12, 0, 3.5180, 6.5714, 7.5714, 0, 0)$$

由式(5)可得:

$$P = (0.6946, 0, 0.1018, 0.1151, 0, 0)$$

(6)分析系统性能。评价第四方物流业务流程的指标有很多,时间性能指标是其中最重要的指标之一,本文选

用流程的平均执行时间进行计算,并以此评价该公司的流程绩效。

流程的平均执行时间可以通过公式  $N=\lambda T$  来计算,其中  $N$  为稳态时 Petri 网系统中某个子系统的平均托肯数, $\lambda$  为单位时间进入该子系统的托肯数, $T$  就是该子系统的平均执行时间。本文所定义的第四方物流业务流程子系统为:

$$PN'=(P',T',F',M^0,\lambda')$$

其中, $P'=P-\{P_0\}$ , $F'$  为  $F$  中去除同库所  $P_0$  相连的有向弧后得到的有向弧集, $T'$  和  $\lambda'$  与原网络相同。可以看出,单位时间进入该子系统的托肯数等于单位时间离开库所  $p_0$  的托肯数。同时该子系统包括所有变迁,因此,该子系统的平均执行时间与业务流程的平均执行时间相等。库所  $p_0$ ,

$p_1,p_2,p_3,p_4,p_5,p_6$  中有一个托肯的概率为:

$$P(p_0=1)=P(M_0)=0.6946;P(p_1=1)=P(M_1)=0;$$

$$P(p_2=1)=P(M_2)+P(M_4)=0.2169;$$

$$P(p_3=1)=P(M_2)+P(M_3)=0.1902;$$

$$P(p_4=1)=P(M_3)+P(M_5)=0.0884;$$

$$P(p_5=1)=P(M_4)+P(M_5)=0.1151;P(p_6=1)=P(M_6)=0$$

在该子系统  $PN'$  中,单位时间进入它的托肯数就是经过  $T_1$  输出的托肯数,又有  $T_1$  的传递速度为  $1/12$ ,所以单位时间进入该子系统  $PN'$  的中的托肯数为  $(1/12) \times P(p_0=1)=$

$0.0579$ , 在该子系统  $PN'$  中的托肯平均数  $N = \sum_{i=1}^6 P(p_i=1) = 0.6106$ 。

业务流程的平均执行时间  $Y=N/\lambda=0.6106/0.0579=10.5458$ (工作日)。

将仿真结果与该物流公司实际操作中的业务流程执行时间(一般为 10~13 个工作日)进行比较可以发现,该结果与实际情况基本吻合,但是也存在实际工作日大于仿真结果的情况,原因可能是由于各流程环节之间的配合不够默契,在以后的工作中需要各部门增加合作力度,提高整个业务流程的效率。

## 4 结语

本文根据第四方物流业务流程的离散性和动态性与 Petri 网理论的内在一致性,将业务流程图转化为广义随机 Petri 网模型,并根据广义随机 Petri 网与嵌入马尔可夫链的同构关系,对其时间性能进行了定量的分析与计算。本文的不足之处在以后的研究中在于仅仅对业务流程的时间性能进行了研究,今后,将更加全面地研究业务流程的其它各方面的性能,从而达到使业务流程得到全面优化的目的。

参考文献:

- [1] V.HLUPIC,J. CHOUDRIE,N. Patel Cognition [J].Technology & Work,2000(2):89-96.
- [2] 胡飞虎,张涛,孙林岩.信息技术在企业业务流程重组中的功能研究[J].科技与管理,2000(4):124.
- [3] 杨扬,杨畅.业务流程质量的评价方法[J].西北大学学报:自然科学版,2003,33(5):531-535.
- [4] 刘飏.运用排队论评价业务流程效率的方法及模型研究[J].商业研究,2004(17):90-94.
- [5] 李松.业务流程再造的效果评价与流程的持续改进[J].工业技术经济,2006,25(10):86-90.
- [6] CASSANDRAS C G.Discrete event systems:modeling and performance analysis[M].Boston,MA,USA:IRWIN Inc,1993.
- [7] 林闯.随机 Petri 网和系统性能评价[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [8] 谢楠,李爱平,徐立云.基于广义随机 Petri 网的可重组制造单元建模与分析方法[J].计算机集成制造系统,2006,12(6).
- [9] 陈久梅.第四方物流及其业务流程研究[J].科技进步与对策,2004(3):110.
- [10] 林闯,曲扬,郑波,等.一种随机 Petri 网性能等价化简与分析方法[J].电子学报,2002,30(11):1621-1622.

(责任编辑:赵贤瑶)

## Modeling and Analysis of Business Process of the Forth Party Logistics Based on Generalized Stochastic Petrinets

Yu Hu, Yan Xiuxia, Hua Xiaohui

(School of Management, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** Business Process Reengineering (BPR) of Supply Chain is a most important measure to improve the supply chain competitive ability, modeling and analysis of the business process performance is both the base of BRP and a hot spot of process reengineering in the last few years. Petri net becomes a popular business process model tool, because it has both description languages for model and strict mathematical definitions. This article describes the definition of generalized stochastic Petri nets and the method of performance analysis firstly, and then a practical calculation is carried out to illustrate the practicality and effectiveness of the methodology.

**Key Words:** Business Process Reengineering (BPR); Forth Party Logistics; Generalized Stochastic Petri Nets (GSPN)