



## 基于随机 Petri 网的流通加工系统建模研究

李小鹏, 李孝忠

(天津科技大学计算机科学与信息工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 流通加工系统是一个动态离散系统, 影响该系统的因素多具有并发性、异步性及随机性的特点, 所以定性和定量分析流通加工系统较为复杂. 以三华农副产品加工基地农副产品的一次流通加工为研究背景, 利用随机 Petri 网构建了反映该企业流通加工系统的实际组成及运行状态的随机 Petri 网模型, 并对该模型进行了定性分析和定量分析. 其中, 定性分析是根据连续时间的随机 Petri 网同构于连续时间马尔科夫链的特点对模型的活性、可达性、有界性等进行了分析; 定量分析是利用带有模糊参数的随机 Petri 网求解出库所繁忙的概率、系统变迁的利用率、系统平均延时时间及流入系统的标记流速. 根据所得数据分析可知: 应进一步优化加工环节, 流入系统的标记流速还应加快.

**关键词:** 流通加工系统; 随机 Petri 网; 模糊理论

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2013)02-0068-06

## Research on Modeling of Circulation Processing System Based on Stochastic Petri Net

LI Xiaopeng, LI Xiaozhong

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

**Abstract:** Circulation processing system is a dynamic discrete system; factors that affect the system usually have multi-concurrent, asynchronous and stochastic characteristics; so qualitative and quantitative analyses of the circulation processing system are often more complicated. Taking the distribution process of agricultural products of San Hua Agricultural Produce and By-products Processing Base as a sample, a Petri net model of circulation processing system which directly reflected the actual composition and operation state of the circulation processing system of the base was constructed by using stochastic Petri net, and both qualitative and quantitative analyses of the system were made. According to the characteristic that continuous-time stochastic Petri net is isomorphic to continuous-time Markov chain, qualitative analysis included the analysis of the activity, accessibility, the boundedness of the model, etc. Quantitative analysis that used stochastic Petri net with fuzzy parameters dealt with the busy probability of each place, the utilization rate of each system transition, the average delay time of the system, as well as the mark flow rate flowing into the system. According to the data analyses, the processing link should be further optimized, and the mark velocity flowing into the system needs to be accelerated.

**Key words:** circulation processing system; stochastic Petri net; fuzzy theory

流通加工系统是库存系统的一个关键环节, 所谓流通加工, 就是物品从生产到使用的过程中, 根据客户需要所施加的组装、包装、分割、计量、分拣、贴标签、分装等简单作业的总称, 是对生产加工的一种补充. 常见的流通加工有冷冻加工、分选加工、精制加工、分装加工、组装加工. 本文研究的是精制加工, 主

要包括产品的清洗、加工、包装等步骤.

Petri 网的图形表示和描述异步并发的能力为系统的建模提供了强有力的帮助. 随机 Petri 网 (stochastic Petri net, SPN)<sup>[1]</sup>是在 P/T 网的基础上, 对每个变迁相关联一个服从指数分布的实施速率, 它是用来描述动态行为同构于连续时间马尔科夫链

收稿日期: 2012-07-12; 修回日期: 2012-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61070021); 天津科技大学科学研究基金资助项目(20110119)

作者简介: 李小鹏(1984—), 女, 天津人, 硕士研究生; 通信作者: 李孝忠, 教授, lixz@tust.edu.cn.

(Markov chain, MC)的离散动态系统的,并被广泛应用于通信、同步等问题<sup>[2]</sup>,然而相关研究所处理的系统大多是精确系统,有一定的局限性。

流通加工系统是一个动态离散系统,为了得到更精确的数值解,使系统的性能分析结果更符合实际,本文将 SPN 与模糊理论结合,提出一种新的建模与分析方法,即基于模糊参数的 SPN(stochastic Petri net with fuzzy parameter, SPNFP),并以三华农副产品加工基地农副产品的一次流通加工为研究背景,建立流通加工系统的 SPN 模型,对该系统进行了有效性分析(定性分析)和性能分析(定量分析)。有效性分析是基于 T\_不变量和马尔科夫过程的分析;性能分析是基于模糊参数的 SPN 的分析,其基本思想是给 SPN 模型中的每个竞争变迁分配一个模糊算子,对变迁实施速率模糊化,借助于连续时间的 SPN 同构于连续时间马尔科夫链的特点得到系统的稳定状态概率方程组<sup>[3-4]</sup>,然后利用三角形隶属模糊数的运算规则得到稳定概率的信任区间,再用区域中心法得到精确解,最后对其进行性能分析。

### 1 基于模糊参数的随机 Petri 网

定义 1 基于模糊参数的 SPN 是一个八元组

$$SPNFP = (P, T; F, K, W, M_0, \mu, \tilde{\lambda})$$

式中:  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ , 是库所的非空有限集合;  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ , 是变迁的非空有限集合, 并满足  $P \cap T = \emptyset$  且  $P \cup T \neq \emptyset$ ;  $F \subseteq P \times T \cup T \times P$ , 是有向弧的有限集合;  $K$  是库所的容量函数, 令  $K \equiv \infty$ ;  $W$  是库所到变迁的有向弧的权函数, 令  $W \equiv 1$ ;  $M_0$  是库所的初始分布状况;  $\mu = (\mu_{ij})_{m \times n}$ ,  $\mu_{ij}$  是竞争变迁发生的模糊算子,  $\mu_{ij} \in [0, 1]$ , 令  $\sum_{j=1}^n \mu_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m$ ;  $\tilde{\lambda} = \{\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2, \dots, \tilde{\lambda}_n\}$ , 其中  $\tilde{\lambda}_i$  是一个三角模糊数, 是变迁  $T_i$  的变迁实施速率。

模糊引发率  $\tilde{\lambda}_i$  可由三角形隶属函数<sup>[5]</sup>中三元组  $(a_{i1}, a_{i2}, a_{i3})$  来定义, 其中参数  $a_{i2}$  给出了  $\mu_{\tilde{\lambda}_i}(x)$  的最大隶属度, 即  $\mu_{\tilde{\lambda}_i}(a_{i2}) = 1$ , 参数  $a_{i1}$  和  $a_{i3}$  给出模糊数据的最小和最大限。

### 2 基于 SPN 的流通加工系统的实例建模

#### 2.1 流通加工的流程

产品的流通加工过程是从农副产品进入系统开

始的, 主要包括卫生指标检测、清洗、加工、质量验收、包装 5 个步骤<sup>[6-7]</sup>, 具体流程见图 1。

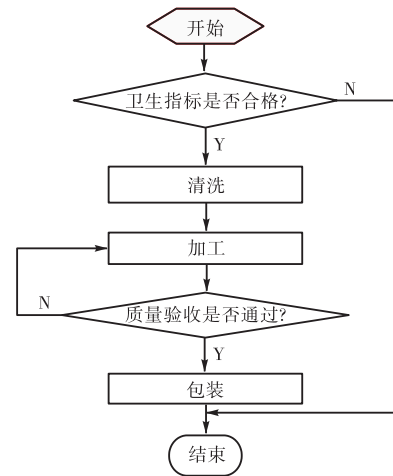


图 1 流通加工系统的流程图

Fig. 1 Flow chart of circulation processing system

#### 2.2 建模

对图1所示的流通加工系统进行建模, 其 SPN 模型如图 2 所示. 模型中库所和变迁的含义如下:  $P_1$  为农副产品到达仓库, 准备加工;  $P_2$  为产品的卫生检测完成;  $P_3$  为产品等待清洗;  $P_4$  为产品的清洗完成;  $P_5$  为产品等待加工;  $P_6$  为产品的加工完成;  $P_7$  为产品等待质量验收;  $P_8$  为产品的质量验收完成;  $P_9$  为产品等待包装;  $P_{10}$  为产品的包装完成;  $P_{11}$  为产品的流通加工完成, 等待后序工作;  $T_1$  为按标准对产品进行卫生质量检测;  $T_2$  为将不符合卫生指标的产品搬运至退货区;  $T_3$  为将符合卫生指标的产品搬运至清洗区;  $T_4$  为对产品进行清洗;  $T_5$  为将清洗后的产品搬运至加工区;  $T_6$  为对产品进行加工;  $T_7$  为将加工后的产品搬运至验收区;  $T_8$  为对产品进行质量验收;  $T_9$  为将质量验收不合格的产品再次搬运至加工区;  $T_{10}$  为将质量验收合格的产品搬运至包装区;  $T_{11}$  为对产品进行包装;  $T_{12}$  为将包装好的产品搬运至发货区, 等待发货;  $T_{13}$  为产品的流通加工全过程结束及信息反馈工作。

模型中的变迁  $T_2$  和  $T_3$  及  $T_9$  和  $T_{10}$  均属于竞争关系<sup>[8]</sup>, 根据该企业以往的统计资料可知, 产品卫生指标检测合格的概率约为 99.5%, 产品加工质量合格的概率约为 99.9%. 因此, 对变迁  $T_3$  赋予模糊算子为  $\mu_{2,3} = 99.5\%$ , 对变迁  $T_2$  赋予模糊算子为  $\mu_{2,11} = 1 - 99.5\% = 0.5\%$ ; 对变迁  $T_{10}$  赋予模糊算子为  $\mu_{8,9} = 99.9\%$ , 对变迁  $T_9$  赋予模糊算子为  $\mu_{8,5} = 1 - 99.9\% = 0.1\%$ .

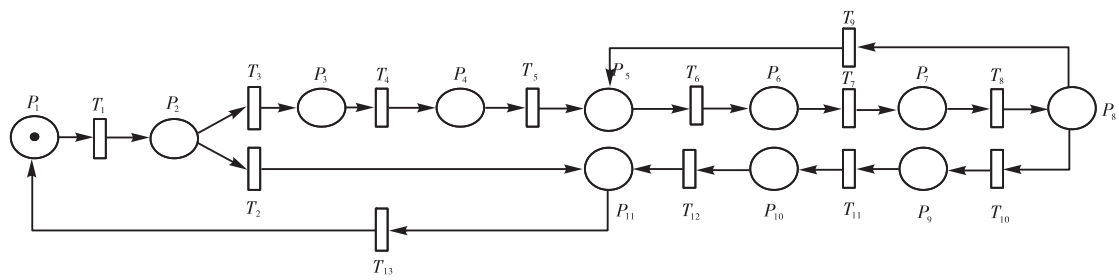


图2 流通加工系统的 SPN 模型  
Fig. 2 SPN model of circulation processing system

### 3 模型的有效性分析和性能分析

#### 3.1 模型有效性分析

##### 3.1.1 基于 T<sub>-</sub> 不变量的模型有效性分析

首先得到模型的关联矩阵

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

由  $C \times X = 0$  得到 T<sub>-</sub> 不变量:

$$X_1^T = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)$$

$$X_2^T = (1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1)$$

当分量为 1 时表示此变迁被触发, 分量为 0 时表示此变迁不被触发. T<sub>-</sub> 不变量中的  $X_2^T$  表示正常流通加工情况下的流程关系,  $X_1^T$  表示不需要流通加工情况下的流程关系.

由关联矩阵及 T<sub>-</sub> 不变量可得出如下结论:

- (1) 此过程中没有一个变迁(任务)没有输入条件

或没有输出条件, 它们都有各自的输入和输出库所, 表明任何流通加工任务的完成都需要一定的条件.

(2) 没有死任务, 即没有永远不能执行的任务, 竞争变迁  $T_2$  和  $T_3$  及  $T_9$  和  $T_{10}$  是根据实际情况来判断的, 其他结构均是顺序结构, 这说明流通加工系统的各个子任务都会发生, 这是流通加工工作可以顺利完成的前提.

##### 3.1.2 基于马尔科夫过程的模型有效性分析

根据连续时间的 SPN 同构于连续时间马尔科夫链的特点, 可得到与 SPN 模型同构的马尔科夫链, 如图 3 所示. 其中, 马尔科夫链中的状态可达标识见表 1, 数字“1”表示库所中的托肯数(即库所中的标记数)为 1, 数字“0”表示库所中的托肯数为 0.

表 1 Petri 网的状态可达标识  
Tab. 1 State reachable marking of Petri net

可达标识	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$
$M_0$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$M_1$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$M_2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$M_3$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$M_4$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$M_5$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
$M_6$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$M_7$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$M_8$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$M_9$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$M_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

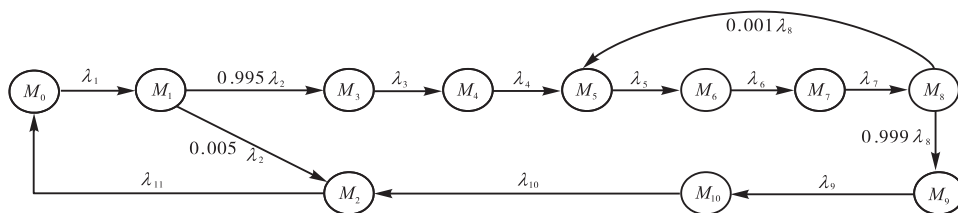


图3 模型的 MC  
Fig. 3 MC of the model

由模型的 MC 可知: (1) 整个流程没有发生堵塞, 托肯的流动是流畅的, 流通加工过程最重要的因素仍然是时间因素. (2) 整个流程中各个库所都至多有一个托肯, 说明流程不会产生瓶颈. (3) 不存在某种状态  $M_i$  没有任何变迁可达, 即没有一个状态永远

不会发生, 模型中不存在死锁. 因此, 所建模型是合理的.

### 3.2 模型性能分析

根据已有 MC 可以得到马尔科夫过程的转移速率矩阵:

$$Q = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_2 & 0.005\lambda_2 & 0.995\lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{11} & 0 & -\lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_3 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_4 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_5 & \lambda_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_6 & \lambda_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_7 & \lambda_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001\lambda_8 & 0 & 0 & -\lambda_8 & 0.999\lambda_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_9 & \lambda_9 \\ 0 & 0 & \lambda_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_{10} \end{bmatrix}$$

由现场调研的统计数据有:  $\lambda_1 = \lambda_3 = \lambda_7 = \lambda_9 = 4$ ,  $\lambda_2 = \lambda_4 = \lambda_6 = \lambda_8 = \lambda_{10} = 10$ ,  $\lambda_5 = 1$ ,  $\lambda_{11} = 20$ , 单位是次/小时. 设稳定概率为  $x = (x_1, x_2, \dots, x_{11})$ , 根据求解稳定状态概率的公式<sup>[1]</sup>, 列出稳定概率方程如下:

$\alpha$  为 0~1, 步长为 0.1,  $\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{11})$ , 利用三角形隶属模糊数的运算规则<sup>[5]</sup>, 则可以计算出稳定概率的信任区间, 结果见表 2.

从而求得

$$\begin{cases} -\lambda_1 x_1 + \lambda_{11} x_3 = 0 \\ \lambda_1 x_1 - \lambda_2 x_2 = 0 \\ 0.005\lambda_2 x_2 - \lambda_{11} x_3 + \lambda_{10} x_{11} = 0 \\ 0.995\lambda_2 x_2 - \lambda_3 x_4 = 0 \\ \lambda_3 x_4 - \lambda_4 x_5 = 0 \\ \lambda_4 x_5 - \lambda_5 x_6 + 0.001\lambda_8 x_9 = 0 \\ \lambda_5 x_6 - \lambda_6 x_7 = 0 \\ \lambda_6 x_7 - \lambda_7 x_8 = 0 \\ \lambda_7 x_8 - \lambda_8 x_9 = 0 \\ 0.999\lambda_8 x_9 - \lambda_9 x_{10} = 0 \\ \sum_{i=1}^{11} x_i = 1 \end{cases}$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} 0.085\ 394 & 0.098\ 398 & 0.110\ 623 \\ 0.032\ 363 & 0.039\ 377 & 0.046\ 384 \\ 0.015\ 692 & 0.019\ 689 & 0.023\ 853 \\ 0.084\ 969 & 0.097\ 906 & 0.110\ 104 \\ 0.032\ 193 & 0.039\ 153 & 0.046\ 148 \\ 0.382\ 701 & 0.392\ 026 & 0.404\ 045 \\ 0.032\ 236 & 0.039\ 198 & 0.046\ 195 \\ 0.085\ 054 & 0.097\ 995 & 0.110\ 198 \\ 0.032\ 236 & 0.039\ 198 & 0.046\ 195 \\ 0.084\ 969 & 0.097\ 906 & 0.110\ 104 \\ 0.032\ 193 & 0.039\ 153 & 0.046\ 148 \end{bmatrix}$$

利用区域中心法<sup>[10]</sup>进行解模糊得:  $x_1 = 0.098\ 138$ ,  $x_2 = 0.039\ 375$ ,  $x_3 = 0.019\ 745$ ,  $x_4 = x_{10} = 0.097\ 660$ ,  $x_5 = x_{11} = 0.039\ 165$ ,  $x_6 = 0.392\ 924$ ,  $x_7 = x_9 = 0.039\ 210$ ,  $x_8 = 0.097749$ .

由此可以得到稳定概率如下:

$$\begin{aligned} P[M_0] &= 0.098\ 138 \\ P[M_1] &= 0.039\ 375 \\ P[M_2] &= 0.019\ 745 \\ P[M_3] &= P[M_9] = 0.097\ 660 \\ P[M_4] &= P[M_{10}] = 0.039\ 165 \\ P[M_5] &= 0.392\ 924 \end{aligned}$$

利用三角形隶属函数表示模糊数, 根据实际可能完成情况, 对  $\lambda_1 = \lambda_3 = \lambda_7 = \lambda_9 = 4$  均采用 10% 的模糊化程度<sup>[9]</sup>作为其上下限, 对  $\lambda_2 = \lambda_4 = \lambda_6 = \lambda_8 = \lambda_{10} = 10$  均采用 5% 的模糊化程度作为其上下限, 对  $\lambda_5 = 1$  采用 20% 的模糊化程度作为其上下限, 对  $\lambda_{11} = 20$  采用 2% 的模糊化程度作为其上下限, 则可以得到:  $\tilde{\lambda}_1 = \tilde{\lambda}_3 = \tilde{\lambda}_7 = \tilde{\lambda}_9 = (3.6, 4, 4.4)$ ,  $\tilde{\lambda}_2 = \tilde{\lambda}_4 = \tilde{\lambda}_6 = \tilde{\lambda}_8 = \tilde{\lambda}_{10} = (9.5, 10, 10.5)$ ,  $\tilde{\lambda}_5 = (0.8, 1, 1.2)$ ,  $\tilde{\lambda}_{11} = (19.6, 20, 20.4)$ .

取稳定概率之和“1”的模糊数为 (0.9, 1, 1.1), 令

$$P[M_6] = P[M_8] = 0.039\ 210$$

$$P[M_7] = 0.097\ 749$$

根据求得的稳定概率可以计算出系统性能的指

标,包括库所繁忙的概率、系统变迁的利用率、系统平均延时时间、流入系统的标记流速.

表 2 稳定概率的信任区间

Tab. 2 Confidence interval of stable probability

$\alpha$	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$	$\tilde{x}_4$
0.0	(0.085 394,0.110 623)	(0.032 363,0.046 384)	(0.015 692,0.023 853)	(0.084 969,0.110 104)
0.1	(0.086 695,0.109 401)	(0.033 766,0.044 983)	(0.016 092,0.023 437)	(0.086 263,0.108 884)
0.2	(0.087 995,0.108 178)	(0.034 467,0.044 282)	(0.016 492,0.023 021)	(0.087 556,0.107 664)
0.3	(0.089 295,0.106 956)	(0.035 169,0.043 581)	(0.016 891,0.022 604)	(0.088 850,0.106 444)
0.4	(0.090 596,0.105 733)	(0.035 870,0.042 881)	(0.017 291,0.022 188)	(0.090 144,0.105 225)
0.5	(0.091 896,0.104 511)	(0.036 572,0.042 180)	(0.017 691,0.021 771)	(0.091 437,0.104 005)
0.6	(0.093 197,0.103 288)	(0.037 273,0.041 479)	(0.018 090,0.021 355)	(0.092 731,0.102 785)
0.7	(0.094 497,0.102 066)	(0.037 974,0.040 779)	(0.018 490,0.020 938)	(0.094 025,0.101 565)
0.8	(0.095 797,0.100 843)	(0.037 974,0.040 779)	(0.018 889,0.020 522)	(0.095 318,0.100 345)
0.9	(0.097 098,0.099 621)	(0.038 676,0.040 078)	(0.019 289,0.020 105)	(0.096 612,0.099 126)
1.0	(0.098 398,0.098 398)	(0.039 377,0.039 377)	(0.019 689,0.019 689)	(0.097 906,0.097 906)
$\alpha$	$\tilde{x}_5$	$\tilde{x}_6$	$\tilde{x}_7$	$\tilde{x}_8$
0.0	(0.032 193,0.046 148)	(0.032 193,0.046 148)	(0.032 236,0.046 195)	(0.085 054,0.110 198)
0.1	(0.032 889,0.045 449)	(0.032 889,0.045 449)	(0.032 932,0.045 496)	(0.086 348,0.108 978)
0.2	(0.033 585,0.044 749)	(0.033 585,0.044 749)	(0.033 628,0.044 796)	(0.087 642,0.107 758)
0.3	(0.034 281,0.044 050)	(0.034 281,0.044 050)	(0.034 324,0.044 096)	(0.088 936,0.106 537)
0.4	(0.034 977,0.043 350)	(0.034 977,0.043 350)	(0.035 021,0.043 397)	(0.090 231,0.105 317)
0.5	(0.035 673,0.042 651)	(0.035 673,0.042 651)	(0.035 717,0.042 697)	(0.091 525,0.104 097)
0.6	(0.036 369,0.041 951)	(0.036 369,0.041 951)	(0.036 413,0.041 997)	(0.092 819,0.102 877)
0.7	(0.037 065,0.041 252)	(0.037 065,0.041 252)	(0.037 109,0.041 297)	(0.094 113,0.101 656)
0.8	(0.037 761,0.040 552)	(0.037 761,0.040 552)	(0.037 806,0.040 598)	(0.095 407,0.100 436)
0.9	(0.038 457,0.039 853)	(0.038 457,0.039 853)	(0.038 502,0.039 898)	(0.096 701,0.099 216)
1.0	(0.039 153,0.039 153)	(0.039 153,0.039 153)	(0.039 198,0.039 198)	(0.097 995,0.097 995)
$\alpha$	$\tilde{x}_9$	$\tilde{x}_{10}$	$\tilde{x}_{11}$	
0.0	(0.032 236,0.046 195)	(0.084 969,0.110 104)	(0.032 193,0.046 148)	
0.1	(0.032 932,0.045 496)	(0.086 263,0.108 884)	(0.032 889,0.045 449)	
0.2	(0.033 628,0.044 796)	(0.087 556,0.107 664)	(0.033 585,0.044 749)	
0.3	(0.034 324,0.044 096)	(0.088 850,0.106 444)	(0.034 281,0.044 050)	
0.4	(0.035 021,0.043 397)	(0.090 144,0.105 225)	(0.034 977,0.043 350)	
0.5	(0.035 717,0.042 697)	(0.091 437,0.104 005)	(0.035 673,0.042 651)	
0.6	(0.036 413,0.041 997)	(0.092 731,0.102 785)	(0.036 369,0.041 951)	
0.7	(0.037 109,0.041 297)	(0.094 025,0.101 565)	(0.037 065,0.041 252)	
0.8	(0.037 806,0.040 598)	(0.095 318,0.100 345)	(0.037 761,0.040 552)	
0.9	(0.038 502,0.039 898)	(0.096 612,0.099 126)	(0.038 457,0.039 853)	
1.0	(0.039 198,0.039 198)	(0.097 906,0.097 906)	(0.039 153,0.039 153)	

3.2.1 库所繁忙的概率

库所繁忙的概率就是各流通实体所处于忙碌状态的概率,经计算得

$$P[M(P_1) = 1] = P[M_0] = 0.098\ 138$$

$$P[M(P_2) = 1] = P[M_1] = 0.039\ 375$$

$$P[M(P_3) = 1] = P[M_3] = 0.097\ 660$$

$$P[M(P_4) = 1] = P[M_4] = 0.039\ 165$$

$$P[M(P_5) = 1] = P[M_5] = 0.392\ 924$$

$$P[M(P_6) = 1] = P[M_6] = 0.039\ 210$$

$$P[M(P_7) = 1] = P[M_7] = 0.097\ 749$$

$$P[M(P_8) = 1] = P[M_8] = 0.039\ 210$$

$$P[M(P_9) = 1] = P[M_9] = 0.097\ 660$$

$$P[M(P_{10}) = 1] = P[M_{10}] = 0.039\ 165$$

$$P[M(P_{11}) = 1] = P[M_2] = 0.019\ 745$$

由此可知,状态  $P_5$  的库所繁忙概率比较大,即产品的等待加工环节最容易产生信息的堆积,因此,可将加工环节作为优化的重点.

### 3.2.2 系统变迁的利用率

系统变迁的利用率,是使变迁可实施的所有标识的稳定概率之和.经计算得

$$U(T_1) = P[M_0] = 0.098\ 138$$

$$U(T_2) = U(T_3) = P[M_1] = 0.039\ 375$$

$$U(T_4) = P[M_3] = 0.097\ 660$$

$$U(T_5) = P[M_4] = 0.039\ 165$$

$$U(T_6) = P[M_5] = 0.392\ 924$$

$$U(T_7) = P[M_6] = 0.039\ 210$$

$$U(T_8) = P[M_7] = 0.097\ 749$$

$$U(T_9) = U(T_{10}) = P[M_8] = 0.039\ 210$$

$$U(T_{11}) = P[M_9] = 0.097\ 660$$

$$U(T_{12}) = P[M_{10}] = 0.039\ 165$$

$$U(T_{13}) = P[M_2] = 0.019\ 745$$

从计算结果可知,变迁  $T_6$  的利用率相对较高,即产品的加工过程相对耗时.因此,对加工环节的优化可以有效的提高整个流通加工系统的效率.

### 3.2.3 系统平均延时时间

令  $\bar{N}$  为位置中的平均标记数,  $\bar{T}$  为系统平均延时时间,经计算得

$$\begin{aligned} \bar{N} = & \bar{u}_1 + \bar{u}_2 + \bar{u}_3 + \bar{u}_4 + \bar{u}_5 + \bar{u}_6 + \bar{u}_7 + \bar{u}_8 + \bar{u}_9 + \bar{u}_{10} + \bar{u}_{11} = \\ & P[M(P_1)=1] + P[M(P_2)=1] + P[M(P_3)=1] + \\ & P[M(P_4)=1] + P[M(P_5)=1] + P[M(P_6)=1] + \\ & P[M(P_7)=1] + P[M(P_8)=1] + P[M(P_9)=1] + \\ & P[M(P_{10})=1] + P[M(P_{11})=1] = 0.901\ 863 \end{aligned}$$

根据 SPN 的简化规则<sup>[11]</sup>,可得整个流通加工系统的平均实施速率为  $\lambda = 0.393\ 593$ .

$$\bar{T} = \bar{N} / \lambda = 0.901\ 863 / 0.393\ 593 = 2.291\ 359$$

即系统平均工作时间为 2.291 359 h. 这里的系统平均工作时间考虑了需要流通加工和不需要流通加工两种情况,而这两种情况是不可能同时发生的,但从系统分析角度计算  $\bar{N}$  时需要将两种情况同时考虑,所以实际流通加工时间应该小于系统平均工作时间,但仍可作为性能评价的依据.

### 3.2.4 流入系统的标记流速

$$R(T_1, P_2) = W(T_1, P_2) \times U(T_1) \times \lambda_1 =$$

$$1 \times 0.098\ 138 \times 4 = 0.392\ 552$$

每小时流入流通加工系统的平均标记数为 0.392 552,即有一个标记数流入流通加工系统需要

2.547 433 h. 对比系统平均工作时间 2.291 359 h 可知,流入系统的标记流速还应适当加快,这样可以提高流通加工系统的效率.

## 4 结 语

本文以三华农副产品加工基地农副产品的一次流通加工为研究背景,利用 SPN 及模糊相关理论对流通加工系统进行了定性分析和定量分析,验证了模型的有效性,并指出了流通加工过程中需要重点强化及完善的环节.

实际的流通加工过程中有多种农副产品,本文没有考虑不同农副产品的分拣过程,直接默认已经分拣好,考虑的是单一农副产品流通加工过程,以后需进一步研究不同农副产品的分拣过程,使加工基地的所有农副产品的流通加工都能顺利有序地进行.

### 参考文献:

- [1] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] 顾明甲,张伟,周青. 一种基于 Petri 网的安全协议验证方法[J]. 微计算机信息,2010,26(5-3):78-80.
- [3] Balbo G. Introduction to Stochastic Petri Nets[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 84-155.
- [4] Chen S M. Weighted fuzzy reasoning using weighted fuzzy Petri nets[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2002, 14(2): 386-397.
- [5] 杨纶标,高英仪,凌卫星. 模糊数学原理及应用[M]. 5 版. 广州:华南理工大学出版社,2011.
- [6] 张春娜. 基于 Petri 网的物流仓储系统建模与仿真[D]. 南京:南京林业大学,2007:31-37.
- [7] 吴冰. 基于 Petri 网的物流中心库存建模和预测仿真的研究和实现[D]. 上海:上海交通大学,2008:15-21.
- [8] Colombo A G, Saiz de Bustamante A. Systems Reliability Assessment[C]. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishs, 1990: 125-130.
- [9] 艾厚文. 基于随机 Petri 网的铁路应急预案流程化研究[D]. 北京:北京交通大学,2008:50.
- [10] 原菊梅,侯朝楨,王小艺,等. 基于随机 Petri 网的可修系统可用性模糊评价[J]. 计算机工程,2007,33(8): 17-19.
- [11] 王伟,刘文菊,苏迪. 基于 Petri 网的物流仓储系统的建模研究[J]. 2010,21(11):95-98.

责任编辑:常涛