

# 物联网中的智慧溯源服务系统 Petri 网建模与分析

朱正月<sup>1,2</sup>, 陈增强<sup>2</sup>

(1.安徽电子信息职业技术学院 信息与智能工程系,安徽 蚌埠 233030; 2.南开大学 计算机与控制工程学院,天津 300350)

**摘要:**物联网(IOT)为人类社会的智慧化进程提供了革命性的信息技术,已广泛应用于社会各个领域。智慧农业是物联网的重要应用领域之一,农产品溯源是智慧农业的一个典型应用。在学习 Petri 网理论的基础上,围绕物联网在智慧农业领域的应用实际,结合农产品溯源系统需求,设计了一个基于物联网技术的农产品智慧溯源服务系统架构,分析了系统的整体业务流程,建立了系统的 Petri 网模型。采用关联矩阵和不变量对所建模型的可达性、有界性、安全性和活性等性质进行了分析,使用 PIPE 工具进行了仿真验证,证明了模型系统的合理性、可靠性和健壮性。

**关键词:**物联网;农产品;溯源;智慧系统;Petri 网;关联矩阵;不变量;仿真分析

**中图分类号:**TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2017)04-0538-10

中文引用格式:朱正月,陈增强.物联网中的智慧溯源服务系统 Petri 网建模与分析[J].智能系统学报,2017,12(4):538-547.

英文引用格式:ZHU Zhengyue, CHEN Zengqiang. Petri net modeling and analysis of an intelligent traceability service system based on the Internet of Things[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2017, 12(4): 538-547.

## Petri net modeling and analysis of an intelligent traceability service system based on the Internet of Things

ZHU Zhengyue<sup>1,2</sup>, CHEN Zengqiang<sup>2</sup>

(1. Department of Information and Intelligent Engineering, Anhui Vocational College of Electronics and Information Technology, Bengbu 233030, China; 2. College of Computer and Control Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** Applied in different fields, the Internet of Things (IOT) offers revolutionary information technology that can aid the development of human knowledge. Intelligent agriculture is one of the important applications of the IOT and the traceability of agricultural products is one of its typical applications. In this paper, based on the Petri nets theory and the requirements of agricultural product traceability, an intelligent traceability service system of agricultural products, based on IOT technology, is designed. The overall business process of the system is analyzed and a Petri model of the system constructed. An incidence matrix and invariants are adopted to analyze the properties of the Petri net model, which are reachable, bounded, safe, and live. The PIPE tool is applied for simulation and verification, which proves that the model system is rational, reliable, and robust.

**Keywords:** Internet of Things; agricultural product; traceability; intelligent system; Petri nets; incidence matrix; invariants; simulation analysis

物联网、云计算、大数据和移动互联网等新一代信息技术,为全球工业化、城市化、智能化进程提供了信息技术和智能技术支撑,物联网已被中国列入五大战略性新兴产业之一,在智能家居、智能农业、智能工业、智能交通、智能物流、智能环保、智能医疗、智能安防、智能电网等领域已有广泛应用<sup>[1]</sup>。其中,在智能农业领域的应用主要有农业环境监测、气象监测、温室控制、节水灌溉、产品安全溯源、

设备智能诊断管理等方面,产品安全溯源是其中的一个重要应用。

当前,国内不少专家学者正致力于物联网技术应用产品安全溯源系统的研究工作。钟海<sup>[2]</sup>、濮永仙<sup>[3]</sup>以果蔬类产品为研究对象,基于 RFID 及条码技术设计并实现了果蔬类产品的质量溯源系统;张龙青<sup>[4]</sup>、颜波等<sup>[5-6]</sup>以水产品养殖与供应链管理为研究对象,通过 RFID、EPC 等技术设计并实现了水产品质量安全溯源及供应链可追溯平台;姬五胜等<sup>[7]</sup>、刘尧等<sup>[8]</sup>以猪肉类产品为研究对象,以 RFID、EPC 和条码等技术设计并实现了猪肉类产品

质量安全溯源系统平台;杨运平等<sup>[9]</sup>、白红武等<sup>[10]</sup>、XU Hongsheng 等<sup>[11-12]</sup>以农产品为研究对象,以 RFID 及二维码等技术设计了一种基于物联网的农产品安全溯源系统。

通过对文献中多种农产品质量安全溯源系统的研究,结合社会生产实际,从农产品质量安全溯源系统实际需求出发,基于 RFID、一维码和二维码等物联网技术,设计一种农产品智慧溯源服务系统基本架构,从增强系统开发人员、使用人员和管理人员对服务系统的整体认知角度出发,建立农产品智慧溯源服务系统的 Petri 网模型,利用关联矩阵和不变量等方法对建立的 Petri 网模型进行可达性、有界性、安全性和活性等特性分析,确保模型的合理性和可靠性,以降低系统设计的错误率,提升系统开发的效率。

### 1 智慧溯源服务系统设计

在托普物联网平台中,农产品安全与溯源系统

是指围绕“从农田到餐桌”的安全管理理念,综合运用多种网络技术、条码识别等前沿技术,具有生产企业(生产基地)、农产品生产档案(产地环境、生产流程、质量检测)管理、检测数据(企业自检、检测中心抽检)管理、条形码标签设计和打印、基于网站和手机短信平台的质量安全溯源等功能,实现对农业生产、加工、流通、销售等环节信息的溯源管理,为生产者建立包含生产、物流和销售的可信流通体系,为监管者提供监督、管理、支持和决策的依据,为消费者提供多层次、直接的产品溯源信息<sup>[13]</sup>。

#### 1.1 系统平台架构设计

在综合分析已有溯源系统的基础上,以农产品安全管理与溯源为目的,从生产者、消费者和监管者 3 个群体的利益出发,设计一种基于物联网技术的 3 层架构、B/S 模式的农产品智慧溯源服务系统,以实现对农产品从生产、加工、流通到销售的全程跟踪与溯源,其系统架构如图 1 所示。

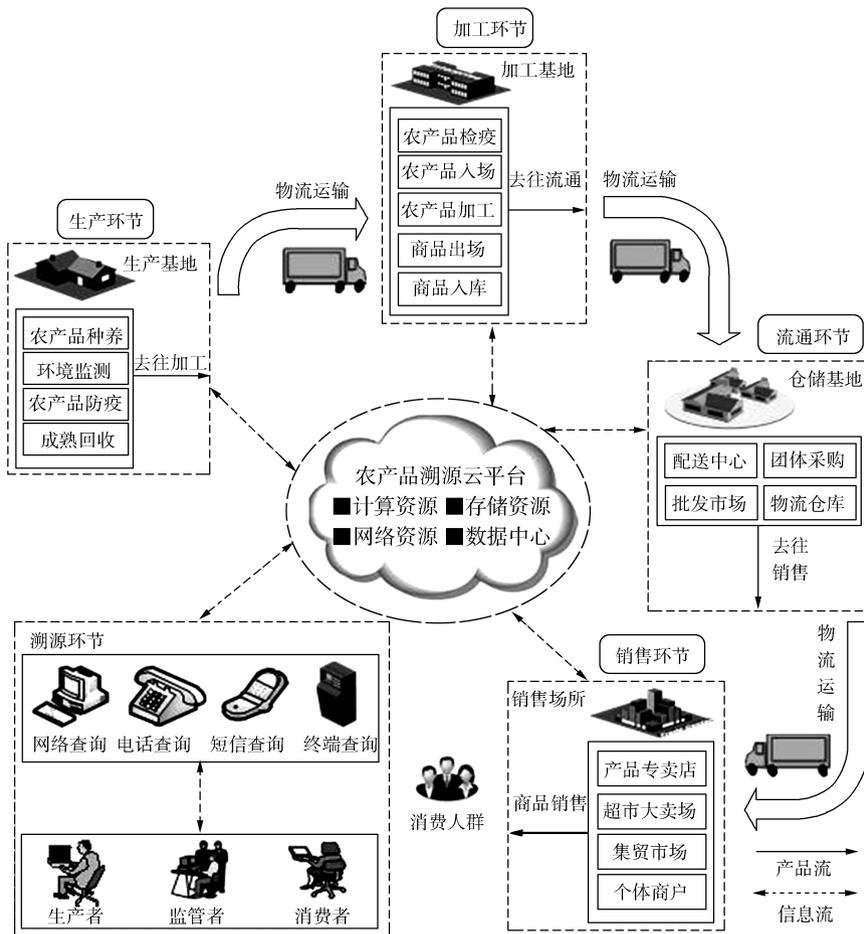


图 1 B/S 模式的农产品智慧溯源服务系统架构

Fig.1 Intelligent traceability service platform of agricultural product based on B/S model

### 1.2 系统业务流程设计

农产品从生产到最后消费涉及众多环节,每个环节都产生大量的信息数据,需要对各类必需的溯源信息数据进行分析、筛选后记录入系统数据库,以满足生产者、消费者和监管者 3 个不同群体人员的溯源查询需求。基于物联网技术设计的农产品智慧溯源服务系统被划分为生产、加工、流通、销售和溯源 5 个环节。在遵循“高内聚、低耦合”的软件架构设计原则

基础上,考虑到系统的用户角色和权限,也为系统后续实际开发提供良好的软件模型,将系统管理功能设计成 6 个子系统,分别是基础数据管理子系统、生产环节管理子系统、加工环节管理子系统、流通环节管理子系统、销售环节管理子系统和溯源环节管理子系统,各子系统通过溯源协同管理平台实现数据同步与数据交换。基于物联网的农产品智慧溯源服务系统的整体业务流程如图 2 所示。

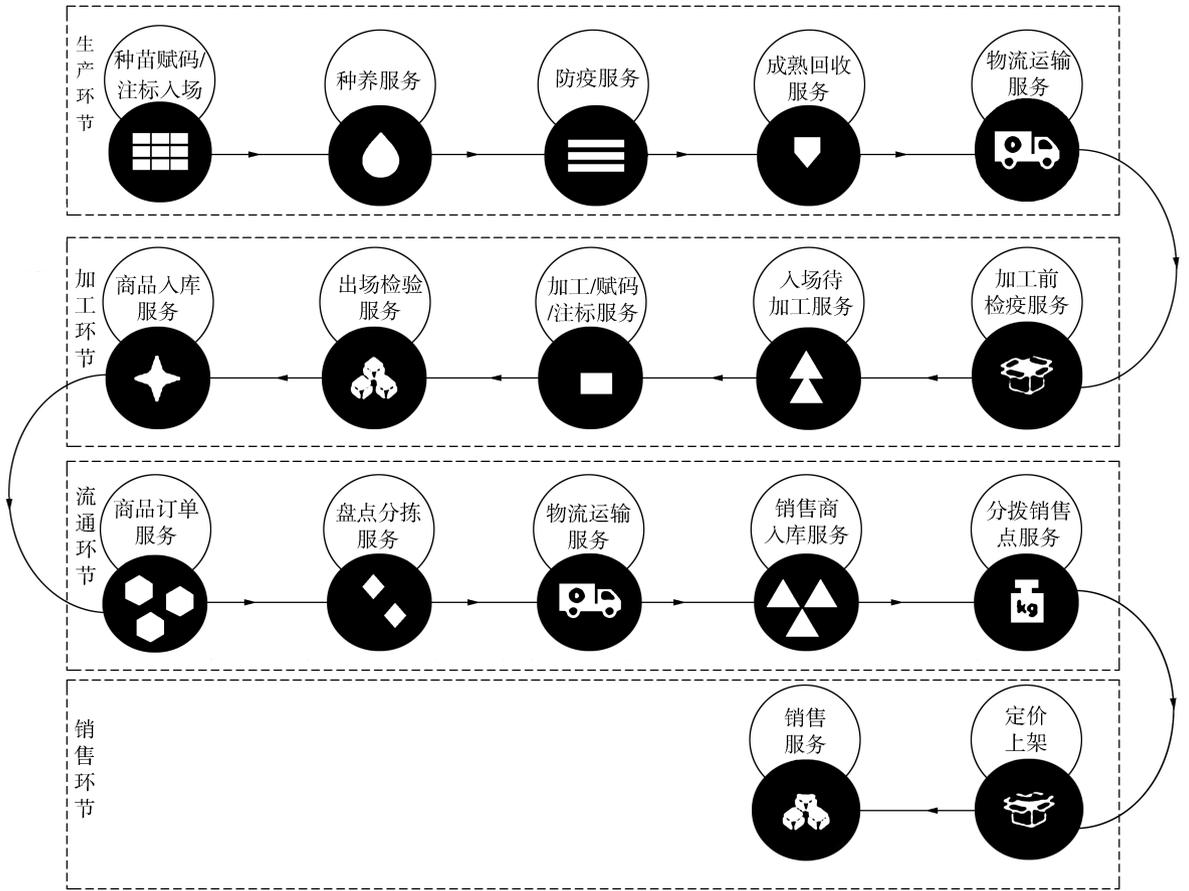


图 2 农产品智慧溯源服务系统整体业务流程

Fig.2 Overall business process of agricultural product intelligent traceability service system

## 2 智慧溯源服务系统 Petri 网建模

一个优秀系统的逻辑设计对于一个系统的运行有着举足轻重的作用,可以帮助开发人员发现致命错误并且可以提高系统开发的效率<sup>[14]</sup>,健壮的软件系统模型是实现一个具有高度灵活性、可靠性、可实用性、易于操作性的信息服务系统的关键和基础。目前常用的信息系统建模的方法主要有 DFD 图、UML、OMT 建模技术和 Petri 网等<sup>[15]</sup>。

Petri 网<sup>[16]</sup>是 20 世纪 60 年代由德国科学家 Carl Adam Petri 首先提出,在计算机科学技术、自动化科学技术、机械设计与制造及其他许多科学技术领域,都得到广泛应用。Petri 网既有严格的数学表

述方式,也有直观的图形表达方式,不仅可以刻画系统的结构,而且还可以描述系统的动态行为,它是完全从过程的角度出发为复杂系统的描述与分析而设计的一种有效模型工具,是离散事件动态系统(discrete event dynamic system, DEDES)的描述工具,是信息系统建模的重要工具之一,广泛应用在具有并发、并行、异步和随机性质的信息服务系统建模与分析中<sup>[17]</sup>。用 Petri 网可以描述一个系统中常见的顺序、迭代、并发和选择等流程,利用 Petri 网来描述系统模型,从控制和管理角度模拟系统,简化了细节,具有直观的图示、形式化的语义、丰富的表达能力等特点,拥有丰富的分析技术和手段,可对建立的模型进行可达性、有界性、活性及安全性

等性质分析,通过分析可以改进消除系统中存在的死锁(deadlock)和陷阱(trap)等问题。

在实际应用领域,利用 Petri 网进行系统建模并进行仿真和性能分析的案例很多,如陈慧灵等<sup>[18]</sup>讨论了基于 Petri 网的工作流建模方法和过程;刘炎培等<sup>[19]</sup>使用面向对象 Petri 网对设备采购管理系统进行了建模并做了性能分析;张鸿皓等<sup>[20]</sup>利用 Petri 网对水下机器人任务流程进行了建模,这些利用 Petri 网建模的研究为解决系统实际问题提供了重要帮助。目前有利用 Petri 网对水产品供应链追溯系统<sup>[21]</sup>、水产品溯源系统<sup>[22]</sup>、远洋渔船及其作业物联网智慧服务系统<sup>[23-24]</sup>及肉牛养殖溯源系统<sup>[25]</sup>等进行建模及性能分析的应用实例,但对基于物联网的农产品智慧溯源服务系统建立 Petri 网模型并进行分析、仿真验证,从而提高系统模型可靠性和系统健壮性的研究还不多。本节先给出 Petri 网的相关理论,然后围绕农产品智慧溯源服务系统的整体业务流程来建立 Petri 网模型。

### 2.1 Petri 网相关定义

**定义 1**<sup>[26]</sup> 一个 Petri 网系统被定义为一个六元组  $\Sigma = (S, T; F, K, W, M_0)$ 。其中,

1)  $N = (S, T; F)$  为有向网,称为  $\Sigma$  的基网,满足:

①  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$  是库所的有限非空集合,可表示条件、状态、资源、输入数据、输入信号等;

②  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  是变迁的有限非空集合,可表示事件、服务、作业或任务、计算步骤、信息处理等;

③  $S \cup T \neq \emptyset, S \cap T = \emptyset$ , 即集合  $S$  和  $T$  不相交;

④  $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$  为节点间的有向弧,称为流关系(“ $\times$ ”表示笛卡尔积);

⑤  $\text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = S \cup T$ , 其中,  $\text{dom}(F) = \{x \in S \cup T \mid \exists y \in S \cup T: (x, y) \in F\}$ ,  $\text{cod}(F) = \{x \in S \cup T \mid \exists y \in S \cup T: (y, x) \in F\}$ 。

2)  $K: S \rightarrow \{1, 2, \dots\} \cup \{\omega\}$  为  $N$  上的容量函数( $\omega$  表示无穷);

3)  $W: F \rightarrow \{1, 2, \dots\}$  为  $N$  上的有向弧权函数(权重),当弧上没有标明数值时,权重默认值为 1;

4)  $M_0: S \rightarrow \{1, 2, \dots\}$  为  $N$  上容量函数  $K$  允许的初始标识(即初始条件下网中各库所拥有的托肯(token)数构成的向量),满足  $\forall s \in S: M_0(s) \leq K(s)$ 。

考虑农产品智慧溯源服务系统的特性,本文中约定  $K = \omega$ ,将定义 1 中的六元组简化为  $\Sigma = (S, T; F, W, M_0)$  形式来讨论。

**定义 2**<sup>[26]</sup> 令  $N = (S, T; F)$  为一个有向网,  $X = S \cup T$  为其元素集,对  $\forall x \in X$ , 记:

$\cdot x = \{y \mid y \in X \wedge (y, x) \in F\}$ , 称  $\cdot x$  为  $x$  的前集或输入集;

$x \cdot = \{y \mid y \in X \wedge (x, y) \in F\}$ , 称  $x \cdot$  为  $x$  的后集或输出集;

$\cdot x \cdot = \cdot x \cup x \cdot$ , 称  $\cdot x \cdot$  为  $x$  的外延。

**定义 3**<sup>[26]</sup> 设  $\Sigma = (S, T; F, M_0)$  为一个标识网系统,  $M$  是  $\Sigma$  上的任一标识,  $M \in R(M_0)$ , 则在标识  $M$  下的变迁发生规则是:

1) 对  $t \in T$ , 若  $\forall s \in S: s \in \cdot t \rightarrow M(s) \geq 1$ , 则称  $t$  在标识  $M$  下有发生权(enabled), 记作  $M[t >]$ 。当  $\cdot t = \emptyset$  时,  $t$  在任意标识下都有发生权。

2) 若标识  $M$  授权  $t$  发生, 则变迁  $t$  在  $M$  下可以发生(fire), 从  $M$  发生变迁  $t$  得到新的标识  $M'$ ,  $M'$  与  $M$  的关系记作  $M[t > M']$ 。对  $\forall s \in S$ , 有

$$M'(s) = \begin{cases} M(s) - 1, & s \in \cdot t - t \cdot \\ M(s) + 1, & s \in t \cdot - \cdot t \\ M(s), & \text{其他} \end{cases}$$

图 3 是一个 Petri 网模型的图形表示,其中库所用“ $\circ$ ”表示,库所中的黑色实心圆点表示托肯(token),代表着系统中的资源,利用 token 可以控制 Petri 网变迁的触发;变迁用“ $\square$ ”表示,当获得所需要的 token 数变迁就被触发;有向弧用“ $\rightarrow$ ”表示,弧上标注的整数值代表其权重。

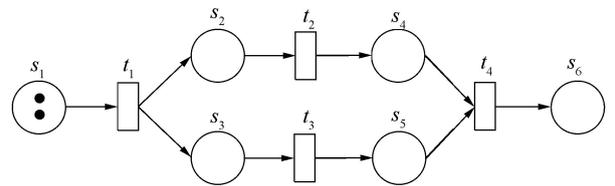


图 3 Petri 网模型的图形表示

Fig.3 Graphical illustration of Petri net model

### 2.2 智慧溯源服务系统 Petri 建模

基于 Petri 网建立农产品智慧溯源服务系统模型的主要步骤是:1)根据系统实际定义条件与事件,确定系统的条件集和事件集;2)确定系统中条件和事件间关系;3)将系统中的库所(对应条件)和变迁(对应事件)对应起来,建立 Petri 网模型图;4)根据系统情况,确定所建立 Petri 网模型图的初始状态,确定初始状态下的 token 数,得到初始标识  $M_0$ ;5)基于初始状态判断哪些事件可被激发,当模型激活后,模型状态图将发生变化,又引起哪些事件激发。

农产品智慧溯源服务系统设计有生产、加工、流通、销售和溯源等环节,其整体业务流程如图 2 所示。根据图示,系统的条件集  $S$ 、事件集  $T$  的各元素

定义及描述如表 1 所示。

表 1 农产品智慧溯源服务系统 Petri 网模型中的条件集、事件集定义及描述

Table 1 Definitions and descriptions of the condition set and event set of the agricultural product traceability intelligent service system based on the Petri net model

条件集 $S$		事件集 $T$	
条件	描述	条件	描述
$s_1$	农产品种苗	$t_1$	赋码/注标/登记服务
$s_2$	后入场种苗	$t_2$	种养服务
$s_3$	生长期农产品	$t_3$	防疫服务
$s_4$	防疫后生产	$t_4$	成熟回收服务
$s_5$	成熟后农产品	$t_5$	生产基地至加工基地
$s_6$	到达加工场地农产品	$t_6$	物流运输服务
$s_7$	检疫后合格农产品	$t_7$	加工前检疫服务
$s_8$	检疫后不合格农产品	$t_8$	入场待加工服务
$s_9$	入场待加工农产品	$t_9$	加工/赋码/注标服务
$s_{10}$	加工后待出场商品	$t_{10}$	出场质检服务
$s_{11}$	出场检验合格商品	$t_{11}$	商品入库服务
$s_{12}$	出场检验不合格商品	$t_{12}$	商品订单服务
$s_{13}$	加工企业仓库商品	$t_{13}$	加工基地至销售地
$s_{14}$	依订单出库待运输商品	$t_{14}$	物流运输服务
$s_{15}$	销售地商品	$t_{15}$	销售地盘点入库服务
$s_{16}$	销售地仓库商品		分拨销售服务
$s_{17}$	销售场所定价上架商品		销售服务
$s_{18}$	消费者购买的商品		

根据图 2 所示的农产品智慧溯源服务系统整体业务流程,系统的条件和事件对应关系如表 2 所示。

表 2 农产品智慧溯源服务系统 Petri 网模型的各个事件触发前条件和后条件

Table 2 Pre-conditions and post-conditions of the agricultural product traceability intelligent service system based on the Petri net model

事件	前条件	后条件
$t_1$	$s_1$	$s_2$
$t_2$	$s_2$	$s_3$
$t_3$	$s_3$	$s_4$
$t_4$	$s_4$	$s_5$
$t_5$	$s_5$	$s_6$
$t_6$	$s_6$	$s_7, s_8$
$t_7$	$s_7$	$s_9$
$t_8$	$s_9$	$s_{10}$
$t_9$	$s_{10}$	$s_{11}, s_{12}$
$t_{10}$	$s_{11}$	$s_{13}$
$t_{11}$	$s_{13}$	$s_{14}$
$t_{12}$	$s_{14}$	$s_{15}$
$t_{13}$	$s_{15}$	$s_{16}$
$t_{14}$	$s_{16}$	$s_{17}$
$t_{15}$	$s_{17}$	$s_{18}$

在分析农产品溯源的生产、加工、流通和销售等环节的状态和每一个初始可以触发的事件,确定 Petri 网模型的初始状态,确定初始状态下的状态标识 token 数与分布,建立基于物联网的农产品智慧溯源服务系统的 Petri 网系统  $\sum_1$  如图 4 所示。

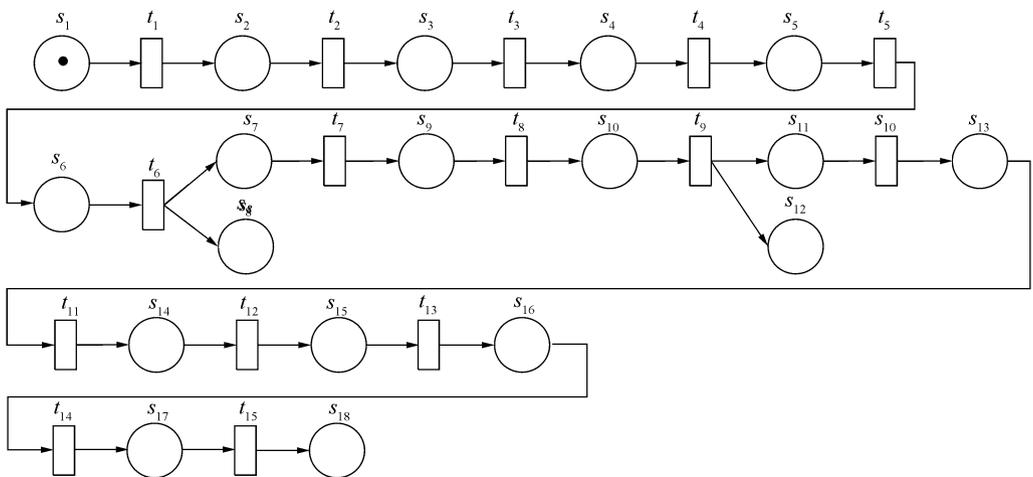


图 4 农产品智慧溯源服务系统的 Petri 网模型系统  $\sum_1$

Fig.4 Petri net model system  $\sum_1$  of the agricultural product traceability intelligent service system

### 3 Petri 网模型分析与验证

为验证所建立的农产品智慧溯源服务系统 Petri 网模型是否合理、可靠,需要对其进行性质分析,以改进系统模型。Petri 网的性质主要有动态性质和结构性质两类,包括可达性、有界性、活性、公平性、守恒性等,可以利用 Petri 网中的可达图、覆盖树、关联矩阵、不变量等分析方法和 HiPS、PIPE、CPN Tools 等<sup>[27]</sup> Petri 网模拟仿真工具实现对模型的分析 and 仿真验证。在 Petri 网的性质中,可达性是最基本的动态性质,其他的各种性质都要通过可达性来定义。在 Petri 网的可达性分析方法中,关联矩阵是一种分析 Petri 网可达性的有效方法。利用关联矩阵来计算 S-不变量和 T-不变量,依据不变量的相关特性,就可以判断所建立的 Petri 网模型是否满足可达、有界、守恒和活性等性质<sup>[21]</sup>。

#### 3.1 Petri 网模型分析

图 2 描述的农产品智慧溯源服务系统业务流程,表达的是一种顺序无循环的系统流程结构,根据 Petri 网中 T-不变量的定义及特性,可以判断图 4 所示的农产品智慧溯源服务系统 Petri 网模型系统

$\Sigma_1$  中的 T-不变量个数为 0。下面利用关联矩阵和 S-不变量来讨论网系统  $\Sigma_1$  的相关性质。

**定义 4**<sup>[26]</sup> 设  $\Sigma = (S, T; F, W, M_0)$  是一个 Petri 网系统,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}, m = |S|, T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}, n = |T|$ , 则  $\Sigma$  的关联矩阵可以用一个  $m$  行  $n$  列矩阵  $A$  表示:

$$A = [a_{ij}]_{m \times n} \quad (1)$$

式中:

$$a_{ij} = W(t_j, s_i) - W(s_i, t_j) \quad (2)$$

$$i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}, j \in \{1, 2, 3, \dots, n\}.$$

为分析需要,这里引入  $A^+ = W(t_j, s_i), A^- = W(s_i, t_j), A^+$  称为  $\Sigma$  的输出矩阵,  $A^-$  称为  $\Sigma$  的输入矩阵,有:

$$A = A^+ - A^- \quad (3)$$

**定义 5**<sup>[26]</sup> 在网系统  $\Sigma$  中,  $|S|=m, A$  为  $\Sigma$  的关联矩阵,根据 Petri 网的理论,若存在非平凡的  $m$  维非负整数向量  $X$ ,使得  $A^T X = 0$ ,则称  $X$  为网系统  $\Sigma$  的一个 S-不变量。

根据定义,结合图 4 可容易得到  $\Sigma_1$  的输出矩阵  $A^+$  和输入矩阵  $A^-$ ,利用式(3)可解得网系统  $\Sigma_1$  的关联矩阵  $A$  如下:

	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	$t_{15}$
$s_1$	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_2$	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_3$	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_4$	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_5$	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_6$	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_7$	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_8$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s_9$	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
$s_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
$s_{11}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
$s_{12}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
$s_{13}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0
$s_{14}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0
$s_{15}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
$s_{16}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
$s_{17}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
$s_{18}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

图 5 网系统  $\Sigma_1$  的关联矩阵

Fig.5 The incidence matrix of the net system  $\Sigma_1$

在网系统  $\Sigma_1$  中,初始标识  $M_0 = [100000000000000000]^T$ ,通过分析判断,



表 6 变迁  $t_1$  发生 (fire) 后网系统  $\Sigma_1$  的标识  $M_1$

Table 6 The marking  $M_1$  of the net system  $\Sigma_1$  after the transition  $t_1$  fires

库 所	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_9$	$s_{10}$	$s_{11}$	$s_{12}$	$s_{13}$	$s_{14}$	$s_{15}$	$s_{16}$	$s_{17}$	$s_{18}$
初始标识	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
当前	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 7 变迁  $t_1$  发生 (fire) 后网系统  $\Sigma_1$  的变迁  $t_2$  具有发生权

Table 7 The transition  $t_2$  of the net system  $\Sigma_1$  can be fired after the transition  $t_1$  fires

变 迁	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	$t_{15}$
使能情况	no	yes	no	no	no	no	no	no							

利用 PIPE3.0 仿真工具的 Invariant Analysis 功能模块可以实现对网系统  $\Sigma_1$  的  $S$ -不变量和  $T$ -不变量分析,以此来验证模型系统的相关性质。表 8、表

9 分别给出了通过仿真工具获取的网  $\Sigma_1$  的  $S$ -不变量和  $T$ -不变量分析结果。

表 8 网系统  $\Sigma_1$  的  $S$ -不变量分析结果

Table 8 S-invariants analysis results of the net system  $\Sigma_1$

$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_9$	$s_{10}$	$s_{11}$	$s_{12}$	$s_{13}$	$s_{14}$	$s_{15}$	$s_{16}$	$s_{17}$	$s_{18}$
1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0

表 9 网系统  $\Sigma_1$  的  $T$ -不变量分析结果

Table 9 T-invariants analysis results of the net system  $\Sigma_1$

$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	$t_{15}$
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 8 的分析结果显示网系统  $\Sigma_1$  中有 3 个  $S$ -不变量,表 9 的分析结果显示网系统  $\Sigma_1$  中没有  $T$ -不变量。在利用 PIPE3.0 仿真工具的 Invariant Analysis 功能模块对网系统  $\Sigma_1$  的不变量进行分析的过程中,除了输出存在的不变量外,还给出不变量的相关分析结论。对网系统  $\Sigma_1$  中的  $S$ -不变量,仿真分析给出结论:该网有确定的  $S$ -不变量覆盖,因此它是有界的。对  $T$ -不变量,仿真分析给出结论:该网没有确定的  $T$ -不变量覆盖,因此无法知道它是否是有界和活的。这个分析结果与 3.1 节中通过关联矩阵分析计算得到的网系统  $\Sigma_1$  中不变量的结果完全一致,这也证明了前面分析计算结果的正确性。

同时,对网系统  $\Sigma_1$  中存在的 3 个  $S$ -不变量,仿真工具分析后还给出了对应的  $S$ -不变量方程:

$$1) M(s_1) + M(s_2) + M(s_3) + M(s_4) + M(s_5) + M(s_6) + M(s_8) = 1$$

$$2) M(s_1) + M(s_2) + M(s_3) + M(s_4) + M(s_5) + M(s_6) + M(s_7) + M(s_9) + M(s_{10}) + M(s_{11}) + M(s_{13}) + M(s_{14}) + M(s_{15}) + M(s_{16}) + M(s_{17}) + M(s_{18}) = 1$$

$$3) M(s_1) + M(s_2) + M(s_3) + M(s_4) + M(s_5) + M(s_6) + M(s_7) + M(s_9) + M(s_{10}) + M(s_{12}) = 1。$$

以上利用 Petri 网关联矩阵及求解  $S$ -不变量对网系统  $\Sigma_1$  进行了分析计算,并利用 PIPE3.0 仿真工具进行了仿真实验,从而确保了图 4 所示的 Petri 网模型是守恒的、可达的、有界的、安全的和活的,也充分表明了所设计的农产品智慧溯源服务系统架构及其整体业务流程是合理的、可靠的,在实际应用开发中是可行的。

## 4 结束语

物联网技术在农业领域的应用越来越广泛,是智能农业发展的重要实现技术。随着物联网技术

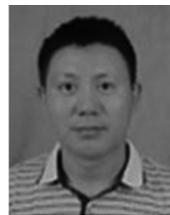
服务于农业生产的需求不断增加,各种智慧服务系统的设计、建模、开发及应用需求也在增强。Petri网作为一种分布式系统的建模和分析工具,其自身所具有的独特优势,可以很好地满足各类信息系统的建模需求。文中围绕农产品智慧溯源服务系统架构和整体业务流程的分析设计,建立了农产品智慧溯源服务系统的 Petri 网模型系统,利用关联矩阵、不变量等分析方法和 PIPE 仿真工具对所建立的模型进行了分析、仿真验证,结果表明利用 Petri 网建立的农产品智慧溯源服务系统模型是合理的、可靠的、健壮的,构建的模型系统不仅为实际应用中系统设计和开发提供了模型参考,也为系统开发人员在今后开展相关智慧服务系统的建模提供了一个经验案例。

## 参考文献:

- [1]工业和信息化部.关于印发《物联网“十二五”发展规划》的通知[EB/OL].(2011-11-28)[2016-10-28].<http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057497/n3057507/c3630599/content.html>. Ministry of industry and information technology. Notice on issuing the 12th five-year development plan of “Internet of Things”[EB/OL].(2011-11-28)[2016-10-28].<http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057497/n3057507/c3630599/content.html>.
- [2]钟海.基于物联网的生鲜果蔬产品溯源系统的设计与实现[D].株洲:湖南工业大学,2015.  
ZHONG Hai. Design and implementation of fresh fruits and vegetables traceability system based on internet of things [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology,2015.
- [3]濮永仙.基于物联网的新鲜果蔬产品质量安全溯源系统的构建[J].贵州农业科学,2016,44(6):139-143.  
PU Yongxian. Product quality and safety traceability system of fresh fruits and vegetables based on internet of things[J]. Guizhou agricultural sciences, 2016, 44(6): 139-143.
- [4]张龙青.基于物联网的洞庭湖淡水鱼质量安全溯源系统[D].长沙:中南林业科技大学,2015.  
ZHANG Longqing. Dongting lake freshwater fish quality and safety traceability system based on the internet of things [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [5]YAN Bo, HU Die, SHI Ping. A traceable platform of aquatic foods supply chain based on RFID and EPC internet of things [J]. International journal of Rf technologies research&applications, 2012, 4(1): 55-70.
- [6]颜波,石平,黄广文.基于 RFID 和 EPC 物联网的水产品供应链可追溯平台开发[J].农业工程学报,2013,29(15):172-183.
- YAN Bo, SHI Ping, HUANG Guangwen. Development of traceability system of aquatic foods supply chain based on RFID and EPC internet of things [J]. Transactions of the chinese society of agricultural engineering, 2013, 29(15): 172-183.
- [7]姬五胜,郭宏,张丰臣.基于 ZigBee 和 RFID 技术的生猪屠宰可溯源系统的设计与实现[J].天津职业技术师范大学学报,2014,24(2):1-6.
- JI Wusheng, GUO Hong, ZHANG Fengchen. Design and implement of pig slaughtering traceability system based on RFID and Zigbee technology [J]. Journal of tianjin university of technology and education, 2014, 24(2): 1-6.
- [8]刘尧,高峰,徐幸莲,等.基于 RFID 和 EPC 物联网的猪肉跟踪追溯系统开发[J].食品工业科技,2012,33(16):49-52.
- LIU Yao, GAO Feng, XU Xinglian, et al. Establishment of pork tracking and tracing system based on Internet of Things with RFID and EPC [J]. Science and technology of food industry, 2012, 33(16): 49-52.
- [9]杨运平,周志鹏,李沐华.基于物联网 RFID 的农产品溯源系统的设计与实现[J].计算机与现代化,2013(10):222-225.
- YANG Yunping, ZHOU Zhipeng, LI Muhua. Design and implementation of agriculture products tracing system based on internet of things & RFID [J]. Computer and modernization, 2013(10): 222-225.
- [10]白红武,孙爱东,陈军,等.基于物联网的农产品质量安全溯源系统[J].江苏农业学报,2013,29(2):415-420.
- BAI Hongwu, SUN Aidong, CHEN Jun, et al. Agricultural products traceability system for quality and safety based on Internet of Things [J]. Jiangsu journal of agricultural sciences, 2013, 29(2): 415-420.
- [11]XU Hongsheng, ZHANG Ruiling, LIN Chunjie, et al. Using RFID technology to development of agricultural products quality safety traceability system on internet of things [J]. Journal of chemical and pharmaceutical research, 2014, 6(10): 632-638.
- [12]XU Hongsheng, LI Yongliang. Design and development of agricultural products traceability system based on internet of things RFID technology [C]//The 6th International Conference on Sensor Network & Computer Engineering (ICSNCE2016). Xi'an, China, 2016: 388-393.
- [13]托普物联网平台.农产品质量安全及管理溯源系统[EB/OL].(2016-07-21)[2016-10-28].[http://www.tpwlw.com/baike/info\\_24.html](http://www.tpwlw.com/baike/info_24.html).

- Tuopu IOT Platform. The security and management traceability system of agricultural product quality [EB/OL]. (2016-07-21) [2016-10-28]. [http://www.tpwlw.com/baike/info\\_24.html](http://www.tpwlw.com/baike/info_24.html).
- [14] 李乃文. 智能小区情境感知服务系统的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- LI Naiwen. Intelligent community context aware service system research [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [15] 徐学东, 李叶茂. 基本 Petri 网在信息系统中的建模方法[J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2006, 7(4): 77-80.
- XU Xuedong, LI Yemao. Modeling method in the information system of basic Petri net [J]. Journal of changchun institute of technology: natural science edition, 2006, 7(4): 77-80.
- [16] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- YUAN Chongyi. Theory and application of Petri net [M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2005.
- [17] 赵杰. Petri 网的面向对象动态建模及在电梯控制中的应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2004.
- ZHAO Jie. Object-oriented dynamic modeling of Petri net and its application in elevator control [D]. Changsha: Changsha university of science&technology, 2004.
- [18] 陈慧灵, 王宪增, 邹宽城. 基于 Petri 网的工作流过程建模[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(5): 92-94.
- CHEN Huiling, WANG Xianzeng, ZOU Kuancheng. Workflow process modeling based on Petri nets [J]. Computer engineering and science, 2008, 30(5): 92-94.
- [19] 刘炎培, 彭晓红, 舒远仲, 等. 基于面向对象 Petri 网的设备采购管理系统建模及性能分析[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(10): 157-160.
- LIU Yanpei, PENG Xiaohong, SHU Yuanzhong, et al. Equipment purchasing management system modeling and performance analysis based on object-oriented Petri nets [J]. Computer engineering and science, 2010, 32(10): 157-160.
- [20] 张鸿皓, 姜大鹏, 庞永杰, 等. 水下机器人任务流程建模与管理[J]. 智能系统学报, 2013, 8(5): 433-438.
- ZHANG Honghao, JIANG Dapeng, PANG Yongjie, et al. Workflow modeling and management on AUV [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2013, 8(5): 433-438.
- [21] 黄广文. 基于 RFID 和 EPC 物联网的水产品供应链追溯研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- HUANG Guangwen. Research on tracing of aquatic products supply chain based on RFID and EPC Internet of things [D]. Guangzhou: South China university of technology, 2011.
- [22] 袁红春, 丛斯琳. Petri 网的水产品溯源系统模型[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(9): 42-45.
- YUAN Hongchun, CONG Silin. Seafood traceability system model based on Petri net [J]. Transducer and microsystem technologies, 2016, 35(9): 42-45.
- [23] 虞丽娟, 凌培亮, 杨劲松, 等. 物联网智慧服务系统架构及在远洋渔船中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(1): 147-153.
- YU Lijuan, LING Peiliang, YANG Jinsong, et al. The architecture of smart service system based on IOT and its application on pelagic fishing vessel [J]. Journal of shanghai ocean university, 2013, 22(1): 147-153.
- [24] CHEN C M, YU L J, LING P L, et al. The architecture of IOT smart service system of ocean fishing vessel and its application based on Petri net [J]. Applied mechanics & materials, 2013, 385/386: 1771-1775.
- [25] 王森, 李志刚. 基于扩展 Petri 网的新疆肉牛养殖溯源模型设计[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(3): 413-416.
- WANG Sen, LI Zhigang. Design of Xinjiang beef cattle breeding traceability model based on the extended Petri net [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2016, 44(3): 413-416.
- [26] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- WU Zhehui. Introduction to Petri nets [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [27] Petri nets world. Petri nets tools database quick overview [EB/OL]. [2016-10-28]. <http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/index.php>.

#### 作者简介:



朱正月,男,1974年生,副教授,主要研究方向为 Petri 网理论与应用建模、计算机网络及物联网技术应用。



陈增强,男,1964年生,教授,博士生导师,主要研究方向为智能预测控制、混沌系统与复杂动态网络、智能物联网、多智能体系统控制,曾获天津市自然科学二等奖、教育部科技进步三等奖等,发表学术论文 100 余篇。