

# 基于 Petri 网的自动售货机销售系统建模及验证

## Modeling and Verification of Vending Machine Sales System Based on Petri Net

朱 伟 尧飘海 鲍 陈 张云华 (浙江理工大学 信息电子学院 浙江 杭州 310018)

**摘 要:** 提出了一种层次 Petri 网建立多媒体自动售货机销售系统模型。首先给出了层次 Petri 网在该系统中的形式化定义及描述,运用分层设计、逐步细化的思想降低系统复杂度,使该系统设计直观、清晰。然后,利用 SNOOPY 仿真工具和 Petri 网可达图分别从定性和定量两个方面加以分析,验证了该模型的合理性和有效性。研究表明,层次 Petri 网是多媒体自动售货机销售系统建模的一种有效途径。

**关键词:** 自动售货机销售系统 层次 Petri 网 SNOOPY 仿真 可达图

### 1 引言

19 世纪 70 年代,自动售货机 (Vending Machine) 在美国、日本迅猛发展,如今已成为世界上最大的现金交易市场<sup>[1]</sup>。随着社会的发展,自动售货机会越来越普及,人们会越来越意识到它的快捷方便,成为人们生活中不可缺少的一部分。自动售货机越来越多元化,实物摆放购物转变为多媒体购物,由单一的购物方式转变为多元的购物方式等等。

把多媒体应用到自动售货机上是自动售货机多元化之一,它的出现使生活更丰富多彩,更人性化。过去对系统进行建模采用状态图,但该方法缺少精确的动态语义,本文采用 Petri 网进行图形化、数学化建模,这样能够很好地描述系统的整个过程,并且反映了系统的动态特性。Petri 网通过分析系统的动态变化过程,可以遍历系统所有可能的状态,识别出变迁的冲突、碰撞、死锁和陷阱等,便于对系统进行定性、定量的描述。

本论文提出利用层次 Petri 网理论与多媒体自动售货机销售运行流程相结合来建立系统模型,从分层的角度构建系统。然后,利用 SNOOPY 仿真工具进行仿真,且从定性的方面分析该模型;同时,也利用可达图从定量的方面分析,从两个方面的分析可以准确的验证该模型的可行性、合理性等性质,使系统的建立具有可靠的理论依据。

### 2 Petri 网理论

Petri 网最早是 1962 年由德国科学家 C. A. Petri 在

其博士论文《用自动机通信》中提出,阐述了一台计算机中的两个异步分支的通信理论的基础,并且建立网状模型。

#### 2.1 基本 Petri 网<sup>[2,3]</sup>

定义 1: 一个 Petri 网是一个四元组  $N = (P, T, F, M_0)$ , 其中  $P$  为有限库所集合,  $T$  为有限变迁集合,  $F$  称为有弧集合, 称初始标识。  $M_0$  并且满足下列条件:

$$(1) P \cup T \neq \emptyset, P \cap T = \emptyset$$

$$(2) \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$$

$$(3) \text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = P \cup T$$

为了方便起见,经常需要定义库所或变迁的前集和后集。设  $X = P \cup T, x \in X$  称  $x^* = \{y \mid (y, x) \in F\}$  为  $x$  的前集,  $x^\bullet = \{y \mid (x, y) \in F\}$  为  $x$  的后集。

定义 2: 一个 Petri 网有下面的变迁发生规则: (1) 对于变迁  $t \in T$ , 如果  $\forall p \in :p \in t \rightarrow M(p) \geq 1$ , 则说变迁  $t$  在标识  $M$  有发生权, 记为  $M[t >$ 。(2) 若  $M[t >$ , 则在标识  $M$  下, 变迁  $t$  可以发生, 从标识  $M$  发生变迁  $t$  得到一个新的标识  $M'$  (记为  $M[t > M'$ ), 对  $\forall p \in P$ , 有

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

初始标识  $M_0$  描述了系统的初始状态。在初始标识  $M_0$  下, 可能存在若干个变迁有发生权, 其中 (随意) 一个变迁发生, 就得到一个新的标识  $M_1$  (不同的变迁发生, 所得到的新标识一般也不相同)。在  $M_1$  下又可能存在若干个变迁有发生权, 其中 (随意) 一个发生,

又得到一个新的标识  $M_2, \dots$ 。这样下去,变迁的接连发生和标识的不断变化,就是网系统的运行。

### 2.2 多媒体自动售货机销售系统层次 Petri 网

定义 3: 一个多媒体自动售货机销售系统主 Petri 网定义成一个七元组  $N = (P, T, F, M_0, X, TM, XM)$ , 式中:  $P$  为库所集合, 对应自动售货机上显示画面状态集合;  $T$  为变迁集合, 对应动作集合;  $F$  为流关系;  $M_0$  为初始状态, 对应当前显示的画面;  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots\}$  为交互按钮集合;  $TM: T \rightarrow C$  集合  $C = \{0, 1\}$  为变迁触发标识, 它只能从 0 变为 1, 不能从 1 变为 0。  $XM: T \rightarrow X$  为变迁与其相关联的交互按钮的映射关系, 即  $\forall x \in X \exists t_i \in T \mid XM(t_i) = x$ 。

定义 4: 多媒体自动售货机销售系统子 Petri 网表示  $N = (Ps, Ts, Fs, Ms_0, Xs, TMs, XM_s)$ , 式中:  $Ps$  是子网内部库所的集合,  $Ps \subseteq P$ ;  $Ts$  子网内部变迁的集合,  $Ts \subseteq T$ ;  $Fs$  为子网内部流关系,  $Fs = ((Ps \times Ts) \cup (Ts \times Ps)) \cap F$ ;  $Ms_0$  为子网内部初始状态;  $X_s$  为子网内部交互按钮集;  $TMs$  为子网内部变迁触发标识;  $XM_s$  为子网内部变迁与其相关联的交互按钮的映射关系。

定义 5: Petri 网是正确的, 当且仅当 (1) 从初始状态  $M_0$  都可以到达任意状态  $M$ ; (2) 系统任意时刻, 只有唯一库所  $M$  含有托肯; (3) 系统无死变迁。

## 3 多媒体自动售货机销售系统的建模

### 3.1 多媒体自动售货机销售系统的建模步骤

建模步骤如下:

步骤 1: 将系统划分为若干子模块, 例如 (输入会员号模块、调查会员模块、选择商品模块等);

步骤 2: 按层次列出所有的模块, 并确定各子模块之间的上下层关系;

步骤 3: 确定模块间的库所、变迁等关系, 建立主 Petri 网模型;

步骤 4: 找出子模块对应的消息库所、变迁、流等关系, 细化子 Petri 网模型;

步骤 5: 构建完整系统的 Petri 网模型;

步骤 6: 分析动态模型的安全性、可达性、活性等。

### 3.2 多媒体自动售货机销售系统的建模

多媒体自动售货机销售系统操作流程类似于一种工作流过程, 每一步都有严格的条件和逻辑结构。进行商品调查主要针对会员调查, 调查不同身份的会员对各

个商品的喜爱程度, 预算新商品投放市场的销售情况。

多媒体自动售货机销售系统作为一个复杂系统存在着系统的多样性、间断性、系统修复等问题, 为了解决此问题的简化和分析, 对系统按相同功能进行逐层分解。本文主要对于多媒体自动售货机销售系统进行划分成输入会员号码、调查会员、选择商品等模块, 把它们作为顶层, 可以整体描述整个系统的过程。然后, 底层的化出系统的每一个细节, 如: 在输入会员号码模块中又分为输入号码、修改号码、检验会员号码等; 在调查商品模块中有职业调查、性别调查、血型调查、年龄调查等; 在商品选择模块中有商品 1 介绍、商品 2 介绍等。这样可以简化整个系统, 清晰、明确的解决系统的问题, 将复杂的问题简单明了化。

每个模块之间都有一定的联系, 只有前一模块顺利实现, 下一模块才能进行, 从而整个系统才能顺利完成, 它们之间可以用串联的关系描述出来。

#### 3.2.1 系统的主 Petri 网建模

打开电源后, 等待 3 秒钟, 出现待机模块, 触摸“进入”按钮, 转到输入会员号码模块, 如果会员号输入正确, 就进入调查模块, 如果会员号码输入错误, 返回到输入会员号码模块, 重新输入会员号码, 并且会员号码正确, 进入调查模块, 选择完调查内容之后, 进入商品选择模块, 当挑选好自己想要的商品之后, 就可以取出商品, 回到待机模块。在每一个模块都有可能出现故障, 当出现故障时就进入到出现故障模块, 等待管理人员进行维修, 当维修完之后重新返回到待机模块, 如图 1 所示:

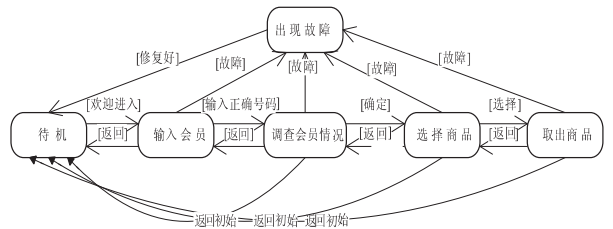


图 1 多媒体自动售货机销售主状态图

通过以上主模块的运行过程, 建立多媒体自动售货机销售总设计 Petri 网, 如图 2 所示。  $P_1$  为待机模块,  $P_2$  为输入会员号码模块,  $P_3$  为调查模块,  $P_4$  为商品选择模块,  $P_5$  为取出商品模块,  $P_6$  故障模块;  $t_1$  为系统开始,  $t_3$  为会员号码正确,  $t_5$  为调查完成,  $t_7$  为选择商品完成,  $t_2$ 、 $t_4$ 、 $t_6$ 、 $t_8$  为返回上一模块,  $t_{15}$ 、 $t_{16}$ 、 $t_{17}$  为返回待机模块,  $t_9$ 、

$t_{10}$ 、 $t_{11}$ 、 $t_{12}$ 、 $t_{13}$  为发生故障,  $t_{14}$  为故障修复完成。

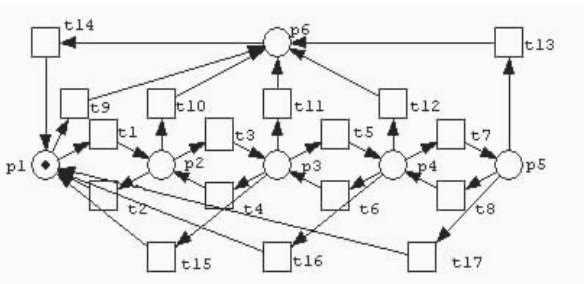


图 2 多媒体自动售货机销售系统主 Petri 网

### 3.2.2 系统的子 Petri 网建模

调查会员、选择商品等模块与输入会员号码模块建模方法类似,本文只针对输入会员号码模块具体分析。

在输入会员号码模块中,假设会员号为五位,会员触摸数字按钮可以输入数字,触摸回退按钮可以返回一个数字,输入五位数字后,触摸确认按钮,如果会员号正确就进入会员调查模块,如果不正确,返回到最初的输入会员号画面,重新输入。具体的运行过程如图 3 所示:

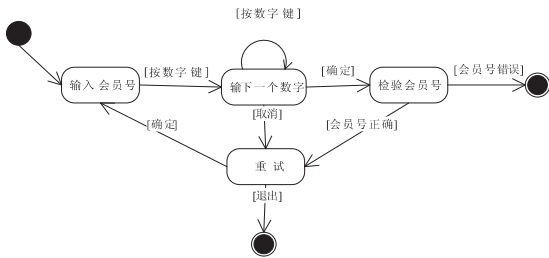


图 3 输入会员号状态图

通过上述输入会员号码子模块的运行过程,建立输入会员号码 Petri 网,如图 4 所示。ps1 为进入输入会员号的初始状态,ps2 为输入第一个号码,ps3 为输入第二个号码,ps4 为输入第三个号码,ps5 为输入第四个号码,ps6 为输入第五个号码,ps7 为会员号码检验,ps8 为重试状态;ts1、ts3、ts5、ts7、ts9 为输入一位数字,ts2、ts4、ts6、ts8、ts10 为清除一位数字,ts11、ts12、ts13、ts14、ts15 为确定号码检验,ts16 为号码错误,ts17 为确定重新输入号码。

每个模块可以看作是一个面向对象的开放式模块,它们之间都有联系,对于一个模块来说,它有外部输出接口和外部输入接口(也就是说它有外部输出的变迁或库所和外部输入的变迁或库所)。比如输入会员号码模块,ps1 前方是来自待机模块的外部变迁  $t_1$  或者是经过调查会员模块返回的外部变迁  $t_4$ ;ps7 之后如

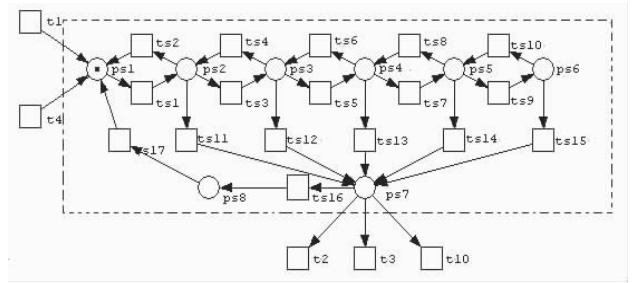


图 4 输入会员号码 Petri 网

果验证会员号码正确,经过外部变迁  $t_3$ ,进入到下一会员调查模块,如果要求退出此模块,经过外部变迁  $t_2$ ,可返回上一个待机模块,如果此模块发生故障,经过外部变迁  $t_{10}$ ,就要进入故障模块。

## 4 多媒体自动售货机销售系统的验证

### 4.1 SNOOPY 软件仿真

本文采用 SNOOPY 软件进行仿真,建立主 Petri 网后运行此软件,托肯从一个库所经过变迁到达另一个库所,其运行过程如图 5 所示:

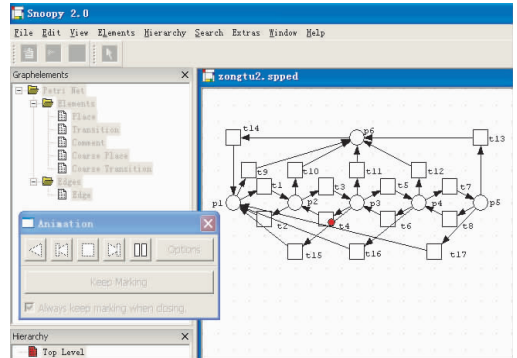


图 5 系统主 Petri 网 SNOOPY 软件仿真

经过 SNOOPY 软件的仿真,动态的直观地得到结果,下面从定性的角度分析此模型的合理性。(1) 经过仿真可以得出,托肯的运转是流畅的,可到达任意库所,并且没有任何的阻塞,按照一定的步骤运行,完成预期设计的要求。(2) 仿真的过程中始终仅有一个库所含有托肯,其他库所都是空的,此系统符合有界性。(3) 从初始状态总能通过激发某变迁序列来激发任意变迁,因此系统是活的,不存在死锁。

利用 SNOOPY 对子 Petri 网进行仿真,可得到同样的结论。在整个系统中,由于托肯在各个子 Petri 网设计是正确的,而且只有一个托肯在整个系统中运行,因

此,主 Petri 网和子 Petri 网形成的整体系统是也是具有可达性、活性、有界性等,整个系统模型设计是可行的、合理的。

#### 4.2 可达图分析

对 Petri 网可达图进行定量地分析也可以得到相同的结论,并且可达图可由算法直接得到。

计算可达图算法:<sup>[4]</sup>

输入:网系统  $S = \langle N, m_0 \rangle$

输出:对于有界网系统,有向图

$E: EU \{ \langle m, t, m' \rangle \}$

4.2.1 初始化有向图  $RG(S) = (\{m_0\}, \emptyset)$ ; ( $m_0$  没有作标记)

4.2.2 While 在集合  $V$  中还存在没有标记的节点 do

(1) 从集合  $V$  中任意选择一个没有标记的节点  $m \in V$  并且标记它;

(2) for 每个在标识  $m$  下可以发生的变迁  $t$  do

① 计算  $m'$  使得  $m \xrightarrow{t} m'$ ;

② if 存在标识  $m'' \in V$  使得  $m'' \xrightarrow{t} m'$  并且  $m''$  大于

$m'$ ;

then 算法失败,终止,输出“系统是无界的”; (检测完网系统的无界条件)

③ if 不存在标识  $m'' \in V$  使得  $m'' = m'$ ; the  $V := V \cup \{m'\}$ ; (其中  $m'$  没有做标识)

④  $E := EU \{ \langle m, t, m' \rangle \}$ ;

4.2.3 算法成功输出可达图  $RG(S)$ 。

例如,输入为主 Petri 网,初始标识,经过可达图算法可得到以下可达图。如图 6 所示,由多媒体自动售货机销售总体设计可达图可以看出,共有 6 个库所,17 个变迁,图中的每个库所在任何状态下的标识数不大于库所的容量,保证了模块的正常运行,不会产生溢出现象,使系统满足有界性。标识可以遍历所有库所(也就是说每个库所都能到达),所以系统具有可达性,系统始终只有一个库所内含有标识,也就不可能产生冲撞和冲突。可达图中不存在任何叶子结点,同时所有的变迁都可不断地发生,因此系统是活的,更不存在死锁。由此可以得出多媒体自动售货机销售主系统是可行的、安全的。同样方法可以得出子系统也是可行的、安全的。因此,整个系统经过定量的验证,也是具有可行性、合理性的。

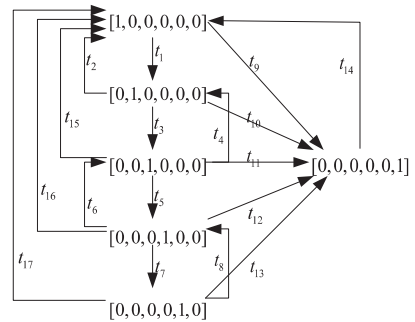


图 6 多媒体自动售货机销售主可达图

## 5 结论

本文重点介绍运用层次 Petri 网建模方法建立多媒体自动售货机销售模型,结合在多媒体自动售货机上进行商品调查的实际环境,对整个系统和输入会员、会员调查、商品选择等子模块过程进行分层设计和验证。同时利用可达图和软件仿真等方法对系统的有界性、可达性、活性等方面作出良好分析,使系统的设计和运行高效且可靠。

### 参考文献

- 1 卢振. 自动售货机的特色与运营. 信息与电脑, 2006, (2): 28 - 26.
- 2 袁崇义. Petri 网原理. 北京: 电子工业出版社, 2005: 10 - 60.
- 3 吴哲辉. Petri 网导论. 北京: 机械工业出版社, 2006, (4): 6 - 52.
- 4 Claude G, Valk R. Petri Net for Systems Engineering: A Guide to Modeling, Verification and Applications. Berlin New York: Springer, 2003: 473 - 566.
- 5 胡娟, 刘力惠, 范植华, 等. Petri 网可达性的综合判定法. 软件学报, 2004, 15(7): 949 - 955.
- 6 徐享衷, 王精业, 荆涛. 结合 Petri 网和 UML 的用户交互行为建模研究. 系统仿真学报, 2007, (8): 187 - 189.
- 7 郑红, 李师贤. 分层的面向对象 Petri 网模型分析. 计算机科学, 2002, (3): 24 - 26.
- 8 van der Aalst WMP. The Application of Petri Nets to Workflow Management. The Journal of Circuits and Computers, 1998, 8(1): 21 - 66.
- 9 Ramachandran P. An acyclic transformation technique for the reachability analysis of petri nets. Oklahoma State University Stillwater, OK, USA, 2002.