

# 采用普通 Petri 网的自动化 立体仓库系统的 PLC 程序设计

倪会娟, 罗继亮

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以一个实际立体仓库系统的出库流程为例,给出利用普通 Petri 网设计其可编程逻辑控制器(PLC)程序的方法. 首先,根据自动化立体仓库系统的出库流程,提出其对象 Petri 网的设计方法;然后,根据系统工艺流程对应的顺序控制规范,在对象 Petri 网的基础上增加执行机构的变迁,最终得到闭合 Petri 网(监控器);最后,给出将闭合 Petri 网转化成 PLC 梯形图的方法,实现自动化立体仓库系统的形式化建模和 PLC 程序设计. 研究表明:所提出的设计方法更容易自动实现系统的控制器设计及转化为梯形图语言.

**关键词:** 自动化立体仓库系统; 可编程逻辑控制器; Petri 网; 梯形图

**中图分类号:** TP 273.5; F 253.9

**文献标志码:** A

自动化立体仓库系统以输送机、堆垛机和自动导引小车(automated guided vehicle, AGV)等多种设备构成了物料传输线,将企业生产线、传输线和立体仓库紧密连接在一起. 然而,立体仓库系统的生产流程的描述、设计和调度问题非常复杂,系统设计和调试的成本昂贵,人工调度错误难以避免,因此亟待实现系统分析、仿真调度和监控的自动化. 利用 Petri 网设计立体仓库系统的可编程逻辑控制器(programmable logical controller, PLC)程序主要分为两个方面:一是利用 Petri 网对立体仓库系统的进行形式化建模和设计顺序控制器;二是将 Petri 网转化为 PLC 梯形图. 现有的研究成果<sup>[1-10]</sup>存在如下 3 个不足之处:1) 均以扩展 Petri 网对仓库系统进行建模,虽然扩展 Petri 网的网规模相比于普通 Petri 网要小,但是扩展 Petri 网是将变迁定义为一个特定的事件,不具有一般性,难以给出统一的建模方法,并且,扩展 Petri 网妨碍了成熟 Petri 网分析方法的应用;2) 对于仓库系统建模方法的研究,通常是将系统的资源(物理位置、运输设备等)描述成库所,这虽然可以清楚地描述各种物流活动,但是从监控的角度分析,系统是一组分散布置的控制元件,包括传感器、执行机构等,它们的状态切换才是有价值的信息;3) 对于 Petri 网到 PLC 梯形图程序转化方法的研究,通常是针对某一特定的例子给出 Petri 网模型,再将其转化为梯形图,尚未形成一个完整统一的算法,现有成果的实际应用有一定的局限性. 为此,本文以一个实际立体仓库系统的出库流程为例,给出利用普通 Petri 网设计其 PLC 程序的方法.

## 1 基本概念

### 1.1 Petri 网

普通 Petri 网是一个三元组  $N=(P, T, F)$ ,  $P$  是库所集;  $T$  是变迁集;  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  表示库所与变迁之间有向弧的集合;  $m: P \rightarrow Z$  表示标识,  $m(p)$  指库所  $p$  内的托肯数,  $m_0$  为初始标识;  $\cdot t$  和  $t \cdot$  分别表示变迁  $t$  的输入库所集和输出库所集; 如果  $\forall \in \cdot t: m(p) > 0$ , 那么在标识  $m$  下变迁  $t$  是使能的, 记做  $m[t >]$ ; 如果  $t$  激发, 则从它的每个输入库所剔除一个托肯, 并给它的每个输出库所添加一个托

收稿日期: 2013-06-25

通信作者: 罗继亮(1977-),男,副教授,主要从事离散事件动态系统的研究. E-mail: jlluo@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61203040); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划(11FJRC01); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划(JA10004); 福建省自然科学基金资助项目(2011J01352); 福建省教育厅科技计划项目(JA11002)

肯,得到后继标识  $m'$ ,记做  $m[t > m']$ .其他基本概念,请参阅文献[11].

## 1.2 自动化立体仓库系统

一个典型的自动化立体仓库系统包括入库和出库两个工作流程,由立体仓库、传送装置和控制系统 3 个部分组成.其中,出库流程一般指把生产线(或配送线)上需要的货物从立体仓库中取出,通过自动导引小车(AGV)送到生产线(或配送线)附近的缓冲站上.图 1 为某实验室立体仓库系统的出库流程.

该实验室使用的 PLC 型号是西门子 S7-200,它由微处理器(CPU)、存储器(EPROM,ROM)、输入输出(I/O)模块、外设 I/O 接口、电源等组成,各部分通过总线(电源总线、控制总线、地址总线、数据总线)连接而成.图 1 中:传输线包括 3 个辊筒式传输线和一个链条式传输线;传感器包括出库台传感器  $s_1$ 、出库传输传感器  $s_2$ 、分拣前端传感器  $s_3$ ,以及 AGV 分拣开始传感器  $s_4$  和 AGV 分拣结束传感器  $s_5$ ;执行机构包括出库台电机  $e_1$ 、出库传输电机  $e_2$ 、分拣电机  $e_3$ 、出库 AGV 传送电机  $e_4$  和出库 AGV 电磁阀  $e_5$ .AGV 分拣结束传感器是反射式传感器,位于轨道的下方,以“°”表示,用以感应轨道上货物是否离开,其他传感器均为对射式传感器,位于轨道上,以一对“□”表示;出库 AGV 传送电机控制的是链条式传输线,以虚线表示,其他电机控制的是辊筒式传输线,以实线表示.

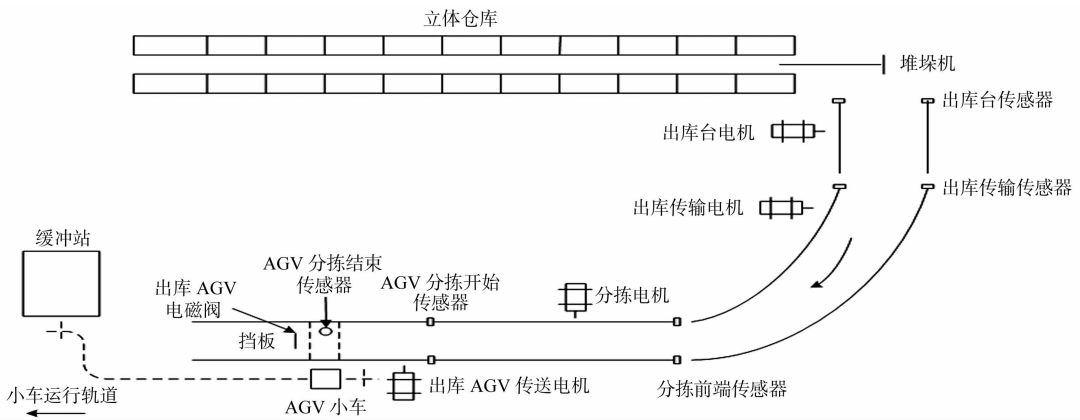


图 1 某自动化立体仓库系统的出库流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an automated storage and retrieval system's outbound process

## 2 自动化立体仓库系统的对象 Petri 网模型

根据图 1 所示的自动化立体仓库系统的出库流程,从系统运行的逻辑层面,每个控制元件均可以抽象为“运行”和“休息”状态,而且始终在两者之间切换,并且该切换有“打开”和“关闭”两类事件驱动.此两类事件可以是自发的,如传感器,也可以是由可编程逻辑控制器等计算机执行的,如出库台电机等.

**定义 1**<sup>[12]</sup> 对于一个控制元件  $x$ ,其 Petri 网模型为  $N_x^e = \{P_x^e, T_x^e, F_x^e\}$ . 库所集是  $P_x^e = \{w_x, i_x\}$ ,  $w_x$  对应  $x$  的“工作”状态,即如果  $w_x$  被标识,  $x$  处于工作状态,而  $i_x$  对应  $x$  的“休息”状态,即如果  $i_x$  被标识,  $x$  处于休息状态;变迁集合是  $T_x^e = \{o_x, c_x\}$ ,  $o_x$  表示“打开”事件,而  $c_x$  表示“关闭”事件;有向弧集合是  $F_x^e = \{(w_x, c_x), (c_x, i_x), (i_x, o_x), (o_x, w_x)\}$ ; 初始标识是  $m_0^x = (0, 1)^T$ , 即有  $m_0^x(w_x) = 0, m_0^x(i_x) = 1$ .

以出库台传感器  $s_1$  为例,其 Petri 网模型如图 2 所示.假设某立体仓库系统的出库流程中有  $I$  个传感器,并且每个传感器记为  $s_i, 1 \leq i \leq I$ ;  $J$  个执行结构(电机和电磁阀),并且每个执行结构记为  $e_j, 1 \leq j \leq J$ .

那么,该系统的对象 Petri 网  $N_p := ((P_p, T_p, E_p), m_0)$  可通过算法 1 得到.

**算法 1** 自动化立体仓库系统出库流程的对象 Petri 网设计方法.

输入:自动化立体仓库系统出库流程控制元件变量集合  $(s_i, 1 \leq i \leq I; e_j, 1 \leq j \leq J)$

输出:自动化立体仓库系统出库流程对象 Petri 网  $N_p := ((P_p, T_p, E_p), m_0)$

S.1  $P_p = \emptyset, T_p = \emptyset, E_p = \emptyset$

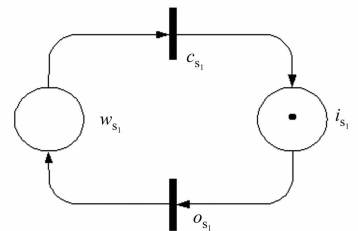


图 2  $s_1$  的 Petri 网模型

Fig. 2 Petri-net model of  $s_1$

S.2   for all  $s_i$  do  
S.3    if  $(i_{s_i} \notin P_p \wedge c_{s_i} \notin T_p)$  then  
S.4       $P_p = P_p \cup \{w_{s_i}, i_{s_i}\}; T_p = T_p \cup \{o_{s_i}, c_{s_i}\};$   
           $E_p = E_p \cup \{(i_{s_i}, o_{s_i}), (o_{s_i}, w_{s_i}), w_{s_i}, c_{s_i}), c_{s_i}, i_{s_i})\};$   
           $m_0(w_{s_i})=0, m_0(i_{s_i})=1;$   
S.5    end if  
S.6   end for  
S.7   for all  $e_j$  do  
S.8    if  $i_{e_j} \notin P_p$  then  
S.9       $P_p = P_p \cup \{w_{e_j}, i_{e_j}\}; m_0(w_{e_j})=0, m_0(i_{e_j})=1;$   
S.10    end if  
S.11   end for

算法 1 主要分两个部分:步骤 S.1 到 S.6 是对传感器进行 Petri 网建模;步骤 S.7 到 S.11 是对执行机构进行建模.以图 1 所示的仓库系统为例,其出库流程的对象 Petri 网模型如图 3 黑色实线所示.

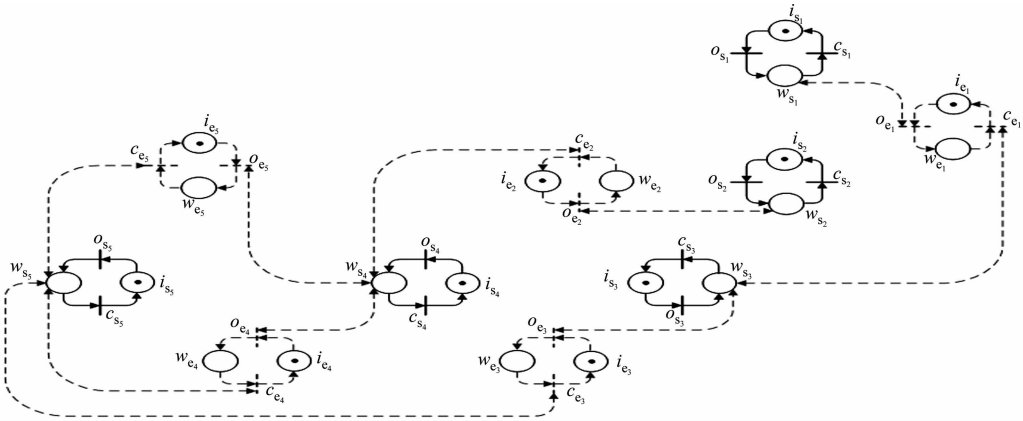


图 3 仓库系统出库流程的 Petri 网模型  
Fig. 3 Petri-net model of the warehouse system's outbound process

3 自动化立体仓库系统的闭合 Petri 网模型

立体仓库的对象 Petri 网模型只描述每个传感器的状态变化及执行机构的状态,缺少对执行机构的状态转变的描述.下面将给出立体仓库系统出库流程的顺序控制规范及闭合 Petri 网的设计方法.

给定一个立体仓库系统,当  $1 \leq i \leq I-2$ ,系统控制规范可以描述为

$$m(w_{e_j}) = [m(w_{s_i}) + m(w_{e_j})] \cdot m(i_{s_{i+2}}).$$
 (1)

式(1)中: $s_i$  是位于辊筒式传输线  $i$  最前端的传感器; $e_j$  是相应的控制电机.当传感器  $s_i$  检测到货物时,电机  $e_j$  运行,传输线  $i$  运行;当传感器  $s_{i+2}$  检测到货物时,电机  $e_j$  关闭,传输线  $i$  停止运行.

当  $I-2 < i < I$  时,系统控制规范可以描述成

$$m(w_{e_j}) = [m(w_{s_i}) + m(w_{e_j})] \cdot m(i_{s_{i+1}}).$$
 (2)

式(2)中: $s_i$  和  $s_{i+1}$  是位于链条式传输线  $i$  的 AGV 分拣开始和结束传感器; $e_j$  是相应的控制电机和电磁阀.当传感器  $s_i$  检测到货物,电机和电磁阀  $e_j$  运行,传输线  $i$  运行;当货物离开传输线到达 AGV 时,传感器  $s_{i+1}$  工作,相应电机和电磁阀  $e_j$  关闭,传输线  $i$  和挡板停止运行.

算法 2 自动化立体仓库系统出库流程的闭合 Petri 网设计方法.

输入:自动化立体仓库系统出库流程的对象 Petri 网  $N_p := ((P_p, T_p, E_p), m_0)$  和系统控制规范(式(1),(2))

输出:自动化立体仓库系统出库流程的闭合 Petri 网  $N_c := ((P_c, T_c, E_c), m_0)$

S.1  $P_c = P_p, T_c = T_p, E_c = E_p$

S. 2 for all  $e_j$  do  
 S. 3 if  $c_{e_j} \notin T_c$  then  
 S. 4  $T_c = T_c \cup \{o_{e_j}, c_{e_j}\};$   
 S. 5 if  $1 \leq i \leq I-2$  then  
 S. 6  $E_c = E_c \cup \left\{ (i_{e_j}, o_{e_j}), (o_{e_j}, w_{e_j}), (w_{e_j}, c_{e_j}), (c_{e_j}, i_{e_j}), \right. \\ \left. (w_{s_i}, o_{e_j}), (o_{e_j}, w_{s_i}), (w_{s_{i+2}}, c_{e_j}), (c_{e_j}, w_{s_{i+2}}) \right\};$   
 S. 7 else  
 S. 8  $E_c = E_c \cup \left\{ (i_{e_j}, o_{e_j}), (o_{e_j}, w_{e_j}), (w_{e_j}, c_{e_j}), (c_{e_j}, i_{e_j}), \right. \\ \left. (w_{s_i}, o_{e_j}), (o_{e_j}, w_{s_i}), (w_{s_{i+1}}, c_{e_j}), (c_{e_j}, w_{s_{i+1}}) \right\};$   
 S. 9 end if  
 S. 10 end if  
 S. 11 end for

算法 2 分为 3 个部分: 步骤 S. 4 是在系统对象 Petri 网基础上增加执行机构的变迁集合; 步骤 S. 6 增加前  $I-2$  执行机构的有向弧集合; 步骤 S. 8 增加剩余执行机构的有向弧集合. 以图 1 所示的仓库系统为例, 其出库流程的闭合 Petri 网模型, 如图 3 所示.

## 4 将闭合 Petri 网转换为梯形图的方法

**定义 2** 给定一个自动化立体仓库系统出库流程闭合 Petri 网  $N_c := ((P_c, T_c, E_c), m_0)$ ,  $o_x$  和  $c_x$  是任意一个执行机构  $x$  对应的变迁. 在变迁  $o_x(c_x)$  输入库所的集合中剔除掉变迁  $c_x(o_x)$  的输出库所得到的集合, 称为变迁  $o_x(c_x)$  的自库所集, 记做  $P_{o_x} := \{ \forall p \in P_c \mid p \in \cdot o_x \wedge p \notin c_x \cdot \}$ ,  $(P_{c_x} := \{ \forall p \in P_c \mid p \in \cdot c_x \wedge p \notin o_x \cdot \})$ .

**定义 3** 给定一个自动化立体仓库系统出库流程闭合 Petri 网  $N_c := ((P_c, T_c, E_c), m_0)$ ,  $P_{c_x}$  是执行机构  $x$  的自库所集.  $P_{c_x}$  中所有元素表示的控制元件状态的相反状态对应库所组成的集合, 记做  $\bar{P}_{c_x}$ .

以图 3 中电机  $e_1$  为例, 其  $P_{o_{e_1}} = \{w_{s_1}\}$ ,  $P_{c_{e_1}} = \{w_{s_3}\}$ ,  $\bar{P}_{c_{e_1}} = \{i_{s_3}\}$ . 对于自动化立体仓库系统出库流程闭合 Petri 网  $N_c := ((P_c, T_c, E_c), m_0)$  中任意一个执行机构  $x$ , 将其 Petri 网转换为梯形图程序. 根据如下步骤, 可以得到图 1 所示的仓库系统出库流程的 PLC 梯形图程序, 如图 4 所示.

**步骤 1** 根据定义 2, 得到执行机构  $x$  的自库所集  $P_{o_x}$ ,  $P_{c_x}$ .

**步骤 2** 根据定义 3, 得到  $\bar{P}_{c_x}$ .

**步骤 3** 将库所集  $P_{o_x}$  中的元素与库所集  $\bar{P}_{c_x}$  中的元素串联. 其中库所  $i_y$  用常闭触点  $||$  表示, 并标记; 库所  $w_y$  用常开触点  $||$  表示, 并标记,  $y$  表示集合  $P_{o_x}$  和  $\bar{P}_{c_x}$  中任意一个元素的变量名.

**步骤 4** 将集合  $o_x$  中的元素与集合  $P_{o_x}$  中的元素并联. 其中库所  $i_z$  用常闭触点执行机构  $||$  表示, 并标记; 库所  $w_z$  用常开触点  $||$  表示, 并标记,  $z$  表示集合  $o_x$  中任意一个元素的变量名.

**步骤 5** 将执行机构  $x$  用线圈  $()$  表示, 并标记.

**步骤 6** 用水平和竖直连接线将触点, 线圈与左、右母线相连接.

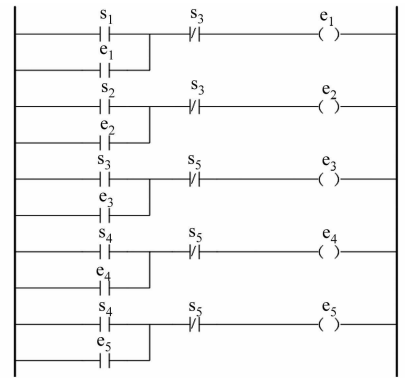


图 4 仓库系统出库流程的 PLC 程序  
 Fig. 4 PLC program of the warehouse system's outbound process

## 5 结束语

从监控角度给出仓库物流系统出库流程的可编程逻辑控制器程序设计方法, 即将控制元件描述为对象 Petri 网, 然后根据系统工艺流程对应的顺序控制规范, 设计仓库物流系统的闭合 Petri 网模型. 最

后,给出将闭合 Petri 网转化为梯形图的方法. 下一步工作是,研究利用可达图、关联矩阵等方法分析闭合 Petri 网的性质.

### 参考文献:

- [1] DOTOLI M, FANTI M P. Modeling of an AS/RS serviced by rail-guided vehicles with colored Petri nets: A control perspective[C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2002, 40(3): 330-339.
- [2] 许晓伟, 梁英宏, 吴耀华. 面向仓库物流的建模及控制系统设计方法[J]. 计算机集成制系统, 2009, 15(12): 2335-2340.
- [3] CAI Wen-xue, WU Zhong-ming. An approach to model the AS/RS via colored timed Petri net[C]//International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management. Harbin: IEEE Press, 2010: 590-594.
- [4] 陈健. 基于 Petri 网的自动化立体仓库调度系统的建模及优化研究[D]. 保定: 河北大学, 2012: 6-17.
- [5] FREY G. Automatic implementation of Petri net based control algorithms on PLC[C]//Proceedings of American Control Conference. Chicago: IEEE Press, 2000: 2819-2823.
- [6] LEE G B, HAN Z, LEE J S. Automatic generation of ladder diagram with control Petri net[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2004, 15(2): 245-252.
- [7] SUESUT T, INBAN P, NILAS P, et al. Interpretation Petri net model to IEC 1131-3: LD for programmable logic controller[C]//Proceedings of IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Seoul: IEEE Press, 2004: 1107-1111.
- [8] THAPA D, DANGOL C, WANG G. Transformation from Petri nets model to programmable logic controller using one-to-one mapping technique[C]//International Conference on Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation. Vienna: IEEE Press, 2005: 228-233.
- [9] PERME T. Translation of extended Petri net model into ladder diagram and simulation with PLC[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 55(10): 608-622.
- [10] KOROTKIN S, ZAIDNER G, COHEN B, et al. A Petri net formal design methodology for discrete-event control of industrial automated systems[C]//IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. Eliat: IEEE Press, 2010: 431-435.
- [11] 大卫 R, 奥兰 H. 佩特利网和逻辑控制器图形表示工具(GRAFCET)[M]. 黄建文, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1996: 1-42.
- [12] 罗继亮, 陈雪琨, 齐鹏飞, 等. 间歇式化工形式化建模与顺序控制器设计[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(12): 1896-1900.

## PLC Program Design for Automated Storage and Retrieval Systems Based on Ordinary Petri Nets

NI Hui-juan, LUO Ji-liang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Taking an actual automated storage and retrieval system's outbound process as an example, an approach is proposed to design its PLC program using ordinary Petri nets (PN). First, the method is proposed to model an automated storage and retrieval system as a plant PN based on its outbound process. Then, according to the control objective of the correct execution sequence, the closed-loop PN (supervisor) is obtained by adding the arcs of actuators into the plant PN. Lastly, the method is proposed to translate a closed-loop PN into a ladder diagram, and consequently, the formal modeling and PLC program design for an automated storage and retrieval system are implemented. The research results show that the proposed methods are easier to realize the design of controllers and transformation of ladder diagram.

**Keywords:** automated storage and retrieval systems; programmable logical controller; Petri nets; ladder diagram

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)