

文章编号: 1001-0920(2001)04-0447-05

# 自动化仓库输送调度问题的建模与控制研究

田国会

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南, 250061)

**摘 要:** 基于面向对象着色 Petri 网模型和时态逻辑方法, 对自动化仓库输送系统运行过程的调度问题进行研究。建立了系统的面向对象着色 Petri 网模型, 讨论了该过程的死锁分析问题, 给出了系统行为的时态逻辑规范和死锁避免的最大允许反馈控制策略。

**关键词:** 自动化仓库; 输送系统; 离散事件动态系统; 时态逻辑; Petri 网

**中图分类号:** O 158      **文献标识码:** A

## Research on Modeling and Control for Transporting Process Scheduling Problem of an Automated Warehouse

TIAN Guo-hui

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The scheduling problem of the running process of transporting system in an automated warehouse is studied using the object-oriented colored Petri nets model and the temporal logic method. The process is modeled with object-oriented colored Petri nets. The deadlock analysis problem is discussed, and its specification with temporal logic and the maximally permissive feedback control strategy for deadlock avoidance are presented.

**Key words:** automated warehouse; transporting system; discrete event dynamic systems; temporal logic; Petri nets

### 1 引 言

在自动化仓库中, 输送系统作为连结客户与货架的“纽带”, 是整个仓库的重要组成部分。对输送小车进行合理调度, 提高其输送能力, 对于减小“瓶颈效应”, 提高自动化仓库的整体运行效率具有重要的意义<sup>[1,2]</sup>。我们将在离散事件动态系统(DEDs)层次上对此问题进行研究。

Petri 网是目前研究 DEDs 的重要工具之一, 但它也有自身的缺陷, 如对多状态复杂系统, 状态空间过于庞大, 不易于分析处理; 对于 DEDs 的一些基

本特征, 如“公平性”、“活性”等, 在网上不易直接描述。Manna 和 Pnueli 提出了时态逻辑(MPTL), 它由 4 部分组成: 语言、语构、语义和证明系统。它的语言包括: 变量、函词、谓词、真值联结词以及时态算子, 如 (next), (henceforth),  $\diamond$  (eventually), **U** (until), **P** (precedes) 算子等<sup>[3]</sup>。时态逻辑具有很强的描述能力, 能够弥补 Petri 网的不足, 而 Petri 网直观的图形描述能力则是时态逻辑所不具备的。因此, 时态逻辑与 Petri 网相结合, 将是 DEDs 研究的一种有效方法<sup>[4,5]</sup>。面向对象着色 Petri 网(OOCPN)模型采用面向对象思想进行系统分析、设计与实现, 它保

收稿日期: 2000-07-24; 修回日期: 2001-04-06

基金项目: 中国博士后基金项目; 山东省自然科学基金重点项目(Z2000G01)

作者简介: 田国会(1969—), 男, 河北河间人, 副教授, 博士后研究人员, 从事离散事件动态系统、混杂动态系统等研究。

持了普通 Petri 网的异步与并发描述能力,使网模型的规模大大降低,并且具有更强的可重用性和可操作性<sup>[6]</sup>。

本文将 MPTL 与 OOC PN 相结合,在此框架下对自动化仓库输送系统运行过程的调度问题进行研究,讨论了输送过程的建模与死锁分析问题,并给出了基于状态反馈的最大允许反馈控制策略。

## 2 输送调度问题的提出

某自动化仓库由三部分组成:货架区、输送系统和分拣系统,如图 1 所示。货架区由多排立体货架组成,货架的货格内有货箱;在每一巷道内有一台堆垛机负责两边货架上的货物存取,在巷道口处各有一出库台和一入库台,堆垛机把取出的货箱放到出库台,同时可从入库台上取得货箱并把它放置在相应的货位;分拣系统负责把取出的货物按相应品种和数量分发给在各分拣口等待的相应客户,它包括两个分拣台,每一分拣台各有一个上包台和一个下包台;输送系统包括导轨和一辆输送车,输送车可从出库台上取得货箱并把它送至分拣上包台,也可从下包台上取得货箱并把它送回某入库台。

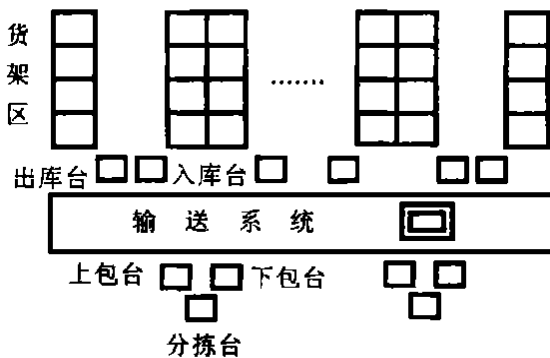


图 1 自动化仓库平面结构图

货物的出库方式有两种:拣选出库和单元出库。当有小批量需求时采用拣选方式,堆垛机携带一空货箱,人工把所需的多种货物拣选入箱,货物分发完毕后再返回空货箱,此时空箱不一定返回原巷道,但各巷道出返货箱数目应一致。在大批量分发时采用单元出库方式,各种货物需整箱取出(堆垛机自动存取),分发出一定数量后,剩余货物需要返回原货位,即要求“从哪来,回哪去”。

大批量分发时,多台堆垛机同时高速地工作,两分拣台也全部投入使用并具有很高的速度。在这种情况下,输送车的工作效率就成为制约整个仓库工作效率的重要因素。如何有效地调度输送车,并使系

统在运行过程中不出现死锁状态具有重要的意义,故在此只对单元出库方式下的情况进行研究。不失一般性,假设只启用 3 条巷道,并把研究过程限定为:货箱被堆垛机运到出库台,被分拣后回到入库台被堆垛机取走。

## 3 面向对象着色 Petri 网<sup>[5,6]</sup>

定义 1(对象子网) 一个对象子网是一个 5 元组

$$ON_i = (P_i, T_i, F_i, C_i, M_{oi})$$

其中,  $P_i = OP_i \cup PP_i \cup MP_i$  为有限位置集,  $OP_i, PP_i$  和  $MP_i$  分别为原始位置集、过程位置集和消息位置集,  $MP_i = OM P_i \cup MP_i$  分别代表发出和接收消息的位置集;  $T_i = PT_i \cup CT_i, PT_i \cup CT_i = \emptyset$  为有限变迁集,  $CT_i$  和  $PT_i$  分别为条件变迁集和过程变迁集;  $F_i: (P_i \times T_i) \cup (T_i \times P_i)$  为  $ON_i$  自身的状态流关系集;  $C_i$  为  $ON_i$  的颜色集,  $\forall c \in C_i, c = (i_a, S, inf)$ , 其中  $i_a$  为颜色  $c$  所代表个体的标号,  $S$  为该个体的指针,  $inf = (inf_1, inf_2, \dots, inf_k)$  为个体所携带的进程信息, 可用一复合字符串表示,  $inf_j (j = 1, 2, \dots, k)$  表示该个体有消息联系的对象进程信息,  $k$  是与  $ON_i$  有直接联系的对象数目;  $M_{oi}: P_i \rightarrow bag(C_i)$  为初始标识集。

设  $g(c, inf_i, S)$  是颜色为  $c$  的个体在第  $S$  工步时对对象  $ON_i$  的进程要求, 即当前工序第  $i$  个对象的哪个个体与颜色  $c$  匹配, 通常为进程和资源的匹配。定义  $C_e(p)$  为位置  $p$  中的使能颜色集,  $c |_{s=s+1}$  为计次指针已增 1 的颜色为  $c$  的托肯。

定义 2(使能) 对象子网  $ON_i$  的变迁  $t$  在标识  $M$  下关于颜色  $c$  是过程使能的, 如果对  $p \xrightarrow{t} PP_i, c \in M(p)$ ;  $t$  是资源使能的, 如果对  $p \xrightarrow{t} OP_i, g(c, inf_i, S) \in M(p)$ ;  $t$  是消息使能的, 如果对  $p \xrightarrow{t} MP_i, c \in M(p)$ 。

变迁  $t$  引发后, 产生新的标识  $M'$ , 即

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) - C_e(p), & p \xrightarrow{t} \\ M(p) - C_e(t, PP_i) |_{s=s+1}, & p \xrightarrow{t} PP_i \\ M(p) + C_e(t, MP_i), & p \xrightarrow{t} MP_i \\ M(p) + C_e(t, OP_i), & p \xrightarrow{t} OP_i \end{cases}$$

设一系统由  $N$  类对象构成, 各对象相应的对象子网分别是  $ON_1, ON_2, \dots, ON_N$ , 则该系统的 OOC PN 模型为

$$N = ON_i = (P, T, F, C, M_0)$$

其中,  $P = P_i, T = T_i, F = F_i, C = C_i, M_0 = (M_{01}, M_{02}, \dots, M_{0v})$ 。

## 4 过程建模 分析与控制

### 4.1 系统的OOCPN 模型

系统按功能被分解成 5 类对象:

1) 货箱类对象: 这是系统中的主动对象, 它有如下状态: 在出库台等待状态; 由出库台到分拣上包台的输送状态; 在上包台的等待分拣状态; 被分拣操作状态; 在下包台等待输送状态; 由下包台到入库台的输送状态; 在入库台等待入库状态。

2) 出库台类对象: 包括 3 个巷道的出库台, 只有忙、闲两种状态。

3) 传输类对象: 即输送小车, 它有忙、闲两种状态, 当有货箱请求输送时, 它由闲状态进入忙状态, 输送完毕又从忙状态进入闲状态。

4) 分拣类对象: 包括两分拣类系统的上包台、分拣台和下包台。两实体的共同行为是: 货箱请求其上包台并占用它, 然后到分拣台被分拣, 分拣完毕后货箱进入下包台, 等待小车送回。

5) 入库台类对象: 包括 3 个巷道的入库台, 它

有忙、闲两种状态。

按上述分类方法, 并根据功能间的相互关系, 可得到系统的OOCPN 模型如图 2 所示。

图 2 中子网  $ON_0$  为货箱类对象子网。其各位置及变迁的含义如下:

- $p_0^1$ : 货箱在出库台等待
- $p_0^2$ : 货箱被输送(出库台至上包台)
- $p_0^3$ : 货箱在上包台等待
- $p_0^4$ : 货箱被分拣
- $p_0^5$ : 货箱在下包台等待
- $p_0^6$ : 货箱被输送(下包台至入库台)
- $p_0^7$ : 货箱在入库台等待
- $t_0^1$ : 货箱被堆垛机送出
- $t_0^2$ : 货箱从出库台到上包台输送过程开始事件
- $t_0^3$ : 货箱从出库台到上包台输送过程结束事件
- $t_0^4$ : 货箱从上包台到分拣台事件
- $t_0^5$ : 分拣完毕, 货箱从分拣台到下包台事件
- $t_0^6$ : 货箱从下包台到入库台输送过程开始事件
- $t_0^7$ : 货箱从下包台到入库台输送过程结束事件
- $t_0^8$ : 货箱从入库台到被堆垛机取走事件

它的颜色集确定为  $C_0 = (C_0^1, C_0^2, C_0^3)$ , 其中

$$C_0^1 = (B_1, 1, CH_1 \cdot A \cdot S_1 \mid = S_2 \cdot A \cdot CH_1)$$

$$C_0^2 = (B_2, 1, CH_2 \cdot A \cdot S_1 \mid = S_2 \cdot A \cdot CH_2)$$

$$C_0^3 = (B_3, 1, CH_3 \cdot A \cdot S_1 \mid = S_2 \cdot A \cdot CH_3)$$

此子网的初始标识为空, 即假设开始时刻没有货箱从货架内取出。

子网  $ON_1$  为出库台类对象子网, 其各位置及变迁含义如下:

- $p_1^1$ : 出库台空闲
- $p_1^2$ : 出库台被占用
- $t_1^1$ : 货箱占用出库台事件
- $t_1^2$ : 货箱从出库台上被运走事件

它的颜色集确定为  $C_1 = (C_1^1, C_1^2, C_1^3)$ , 其中

$$C_1^1 = (CH_1, 1, B_1^1)$$

$$C_1^2 = (CH_2, 1, B_2^1)$$

$$C_1^3 = (CH_3, 1, B_3^1)$$

此子网的初始标识为

$$M_0(p_1^1) = (C_1^1, C_1^2, C_1^3)$$

子网  $ON_2$  为分拣类对象子网, 其位置与变迁的含义如下:

- $p_2^1$ : 上包台空闲
- $p_2^2$ : 上包台被占用

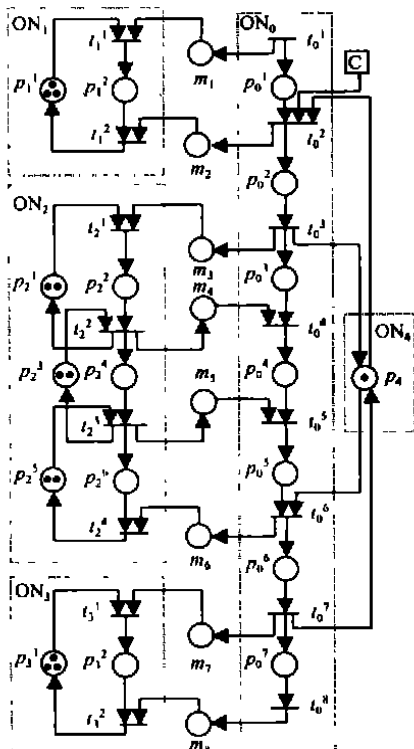


图 2 系统的OOCPN 模型

- $p_3^1$ : 分拣台空闲
- $p_3^2$ : 分拣台被占用
- $p_3^3$ : 下包台空闲
- $p_3^4$ : 下包台被占用
- $t_3^1$ : 上包台被占用事件
- $t_3^2$ : 上包台被释放, 分拣台被占用事件
- $t_3^3$ : 分拣台被释放, 下包台被占用事件
- $t_3^4$ : 下包台被释放事件

它的颜色集确定为

$$C_2 = (C_2^1, C_2^2)$$

$$C_2^1 = (S_1, 1, (B_1 | = B_2 | = B_3)^*)$$

$$C_2^2 = (S_2, 1, (B_1 | = B_2 | = B_3)^*)$$

此子网的初始标识为

$$M_0(p_2^1) = (C_2^1, C_2^2)$$

$$M_0(p_2^2) = (C_2^1, C_2^2)$$

$$M_0(p_2^3) = (C_2^1, C_2^2)$$

ON<sub>3</sub> 为入库台类子网, 其位置和变迁的含义如下:

- $p_3^1$ : 入库台空闲
- $p_3^2$ : 入库台被占用
- $t_3^1$ : 入库台被占用
- $t_3^2$ : 入库台被释放

颜色集确定为  $C_3 = (C_3^1, C_3^2, C_3^3)$ , 其中

$$C_3^1 = (CH_1, 1, B_1^*)$$

$$C_3^2 = (CH_2, 1, B_2^*)$$

$$C_3^3 = (CH_3, 1, B_3^*)$$

初始标识为

$$M_0(p_3^1) = (C_3^1, C_3^2, C_3^3)$$

用位置  $p_4$  代表输送小车, 用托肯的有无分别表示小车空闲和被利用状态. 因小车只有一个, 故颜色种类为 1,  $C_4 = (C_4^1), C_4^1 = (A, \emptyset, \emptyset)$ . 初始情况下  $M(p_4) = (C_4^1)$ .

另外,  $m_1, m_2, \dots, m_8$  为消息位置, 用来传递相应子网间的消息联系.

### 4.2 死锁分析及系统规范

**定义 3(死锁)** 给定一 OOC PN、标识  $M$  及进程颜色  $C$ , 称变迁  $t$  关于  $C$  是阻塞的, 如果  $t$  在  $M$  下关于  $C$  是过程使能的, 但不是消息(或资源)使能的; 称变迁  $t$  关于颜色  $C$  是死锁的, 如果  $\forall M \in R(M), t$  都不是消息(或资源)使能的; 并称  $C$  为死锁颜色或死锁进程.

死锁有以下 4 个必要条件<sup>[7, 8]</sup>:

- 1) 互斥: 一个资源不能同时为多个进程服务;

2) 占用且等待: 存在一个或多个进程占用资源且等待其它进程所占用的资源;

3) 无优先级: 被占用的资源能否被释放取决于占用它的进程是否完成;

4) 循环等待: 一些进程形成闭合链, 链中每个进程都依次等待链中下一个进程被占用的资源.

本系统满足前 3 个条件, 因此系统避免问题可归结为破坏第 4 个条件的成立. 而导致循环等待的关键原因在于处于占有资源且为等待状态的进程能否释放资源. 可以证明, 当  $M(p_3^1) = M(p_3^2) = M(p_3^3) = 2$  时, 系统处于局部临界死锁状态. 此时若  $t_3^1$  发生, 则出库台的一货箱占用输送小车并处于被输送状态. 这时上包台、分拣台和下包台等处于饱和状态, 而小车被占用使得下包台的货箱不能被运走并一直占有下包台, 这样连锁反应而不能使上包台得到释放, 也就不能使小车得到释放, 从而造成局部死锁的出现.

系统行为可规范为时态逻辑公式

$$f_s = \square [M(p_3^1) = M(p_3^2) = M(p_3^3) = 2]$$

### 4.3 死锁避免控制

反馈控制的思想是根据系统现行状态确定一个控制策略, 阻止某些当前可能发生的事件发生, 以避免由于这些事件发生而导致的死锁状态. 而系统中不出现死锁并不是控制的唯一目标, 例如可让货箱逐个进入“送出 分拣 送回”的操作过程, 一个货箱操作完毕后再让第二个货箱进入操作过程. 我们希望多个货箱的各种操作尽可能地并发进行, 以提高仓库的出库效率. 即尽可能少地控制事件发生, 从而保证系统以最大的并发程度运行.

控制策略是在变迁  $t_3^1$  上加外部输入控制位置  $c$ , 其条件可用时态公式表示为

$$f_c = [M(p_3^1) + M(p_3^2) + M(p_3^3) > 0]$$

它是变迁发生的一个必要条件. 在本系统中, 变迁  $t_3^1$  是可控的. 可以证明, 这为最大允许反馈控制策略. 在网上用一个方框表示外部输入控制位置, 如图 2 所示.

## 5 结 语

在 OOC PN / M PTL 框架下, 可以简单、方便、直接地进行更为复杂的系统行为和控制策略规范. 本文所建立的 OOC PN 模型具有很强的可重用性: 当有多条巷道投入运行时, 不需要改变网的结构, 只要相应增减子网 ON<sub>1</sub>, ON<sub>2</sub>, ON<sub>3</sub> 的颜色数目即可; 并



可不变地采用同一控制策略避免死锁状态出现。

### 参考文献:

- [1] 常发亮, 刘长有. 自动化立体仓库输送系统调度的优化仿真及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 1998, 10(4): 14-19
- [2] 孙相建, 田国会, 刘长有. 输送系统的 Petri 网建模分析与控制[A]. 1997 中国控制与决策学术年会论文集[C]. 沈阳: 东北大学出版社, 1997. 874-877.
- [3] Galton A. Temporal logics and their applications[M]. London: Academic Press, 1987.
- [4] Ostroff J S, Wonham W M. A framework for real time discrete event control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1990, 35(4): 386-397.
- [5] 田国会, 刘长有, 徐心和. 实时离散事件系统的 TOOCPN/RTTL 研究框架[A]. 1997 中国控制与决策学术年会论文集[C]. 沈阳: 东北大学出版社, 1997. 853-856
- [6] 李晓欧. 面向对象着色 Petri 网及其在 FMS 中应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 1995
- [7] Maria Pia Fanti, Guido Maione, Biagio Turchiano. Deadlock avoidance in manufacturing systems modeled by Petri net[A]. Proc of the 14th World Congress of IFAC[C]. Beijing, 1999. 157-162
- [8] V shio T. Maximally permissive feedback and modular control synthesis in Petri nets with external input places[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1990, 35(7): 844-848

(上接第 446 页)

### 参考文献:

- [1] Basar T, Olsder G J. Dynamic noncooperative game theory[M]. New York: Academic Press, 1982
- [2] Dorato P, Kestenbaum A. Application of game theory to the sensitivity design of optimal control[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1967, 12(1): 85-87.
- [3] 顾兴源, 陈文华. 基于对策论的鲁棒输出反馈控制器设计[J]. 信息与控制, 1991, 20(2): 16-20
- [4] Limebeer D J N, Anderson B D O, Hendel B. A Nash game approach to mixed  $H_2/H_\infty$  control[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1994, 39(1): 69-82
- [5] Limebeer D J N. A game theory approach to digital robust control[A]. Proc of 28th IEEE Conf on Decision and Control[C]. Tampa, 1989. 878-880
- [6] Basar T. Minimax control for the LTI plant with I-Bound Disturbance [A]. Proc of 11th IFAC World Congress[C]. Moscow, 1990. 472-479
- [7] 吴汉生. 一类定量微分对策理论中最优策略的算法及其收敛性[J]. 自动化学报, 1992, 18(2): 143-150
- [8] Daubechies I. Orthonormal based of compactly supported wavelets[J]. Comm Pure and Appl Math, 1988, 41: 909-996
- [9] 张成科. 基于小波分析的控制理论若干问题研究[D]. 上海: 华东理工大学自动化研究所, 1999