

独创性申明

秉承祖国优良道德传统和学校的严谨学风郑重申明：本人所提交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人的研究成果。与我一同工作的同志对本文所论述的工作的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并已致谢。

本论文及其相关资料若有不实之处，由本人承担一切相关责任

论文作者签名：刘 超 05年 03月 25日

保护知识产权申明

本人完全了解西安理工大学有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间所取得的所有研究成果的知识产权属西安理工大学所有。本人保证：发表或使用与本论文相关的成果时署名单位仍然为西安理工大学，无论何时何地，未经学校许可，决不转移或扩散与之相关的任何技术或成果。学校有权保留本人所提交论文的原件或复印件，允许论文被查阅或借阅；学校可以公布本论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他手段复制保存本论文。

（加密学位论文解密之前后，以上申明同样适用）

论文作者签名：刘 超 导师签名：傅卫平 05年 3 月 25日

论文题目：基于 OOTPN 的自动化立体仓库
出入库调度问题的研究

学科名称：机械制造及其自动化

作者姓名：刘 韬

签名：刘 韬

指导教师：傅卫平 教授

签名：傅卫平

答辩日期：2005 年 3 月

摘要

在现代物流系统中，自动化立体仓库作为物流系统的枢纽和核心，正越来越广泛的应用于制造和流通等领域。自动化立体仓库的出入库调度及其优化问题对提高自动化立体仓库的运行效率具有重要作用，因此，对它的研究具有重要的理论意义和工程应用意义。在总结了自动化立体仓库出入库调度的主要研究方法的基础上，本文就自动化仓库的出入库调度问题开展了如下研究工作。

1. 针对自动化立体仓库出入库调度问题的特点，对几种建模分析方法进行了分析比较，引出了适合于自动化立体仓库调度建模的面向对象的赋时 Petri 网(OOTPN)方法。介绍了面向对象的建模方法和 Petri 网的数学理论基础，为自动化立体仓库的建模及分析做准备。

2. 运用面向对象的赋时 Petri 网建立了自动化立体仓库出入库调度的模型，并在此基础上对自动化立体仓库调度运行的死锁问题进行了分析，给出了系统不会发生死锁的充分条件。此外，还分析了模型的 Petri 网特性，并给出了可用于自动化立体仓库控制分析的含有信息位的 OOTPN 模型。

3. 为了研究调度规则对自动化立体仓库出入库调度运行效率的影响，运用遗传算法对自动化立体仓库出入库调度的规则进行分析和优化。

4. 以 VC++6.0 作为编程工具，编写仿真程序进行仿真验证，实现了整个自动化立体仓库出入库调度流程和遗传算法的优化，最后给出了仿真结果与分析，仿真结果表明，优化后的调度规则能明显提高系统的综合利用率。

关键词：自动化立体仓库、调度、OOTPN、遗传算法

**SUBJECT: Study on the Loading and Unloading
Schedule of Automatic Storage/Retrieval
System Based on the OOTPN**

SPECIALITY: Mechanical Engineering and Automation

CANDIDATE: Liu T.

SIGNATURE: *Liu T.*

INSTRUCTOR: Fu W.P.(Professor)

SIGNATURE: *Fu Weiping*

ABSTRACT

In modern logistics systems, automated Storage/Retrieval System(AS/RS) as the key part, is applied in many fields. The problem about the optimization of scheduling of loading and unloading warehouse is an important part of the research on the warehouse. After summarizing the main methods of the research about scheduling of loading and unloading warehouse, this paper provides the different method of modeling.

First of all, the paper summarizes several modeling methods of the warehouse, and an object oriented modeling method and Petri net(OOTPN) modeling method is introduced. Then the paper explain the math foundation of these two methods.

In the second, a model based on the OOTPN of the warehouse scheduling is established. Then the paper analysis the deadlock problem of the warehouse scheduling, and give full condition which the deadlock will not happen. Furthermore, the paper analysis the Petri net character of the model and at last, give an OOTPN model of the warehouse scheduling within information place.

Thirdly, in order to study the effect of the schedule rules to the warehouse running efficiency , the paper uses the genetic algorithm to encode the scheduling rules, then analysis and optimize the rule codes.

Finally, using the VC++6.0 as the programming tools, the simulation program is coded and realizes the optimization of the warehouse scheduling with the method of genetic algorithm. The simulation result indicate that the optimized rules can enhance the loading and unloading efficiency of the warehouse.

Keywords: Automatic Storage/Retrieval, Scheduling, OOTPN, Genetic Algorithm

1 绪论

1.1 课题的背景及意义

1.1.1 选题的背景

自从 1963 年美国的 Kitchens of Saro Lee 公司推出了世界上第一座计算机控制的自动化仓库以后，随着物流技术日益被人们重视，对自动化立体仓库的研制和技术交流活动也在不断加强^[1]。

物流（Logistics）是指物资实体的物理流动过程，即物资场所（位置）的转移及时间占用，其核心是“实物流动”。而物流系统是指在一定的时间和空间里，由所需位移的物资（包括包装设备、搬运装卸设备、运输设备、仓储设备、人员和通讯联系等若干相互制约的动态要素）所构成的具有特定功能的有机整体。物流系统的目的是实现物资的空间和时间效益，在保证社会再生产顺利进行的前提条件下，实现各个物流环节的合理衔接，并取得最佳的经济效益^[2]。

在现代物流系统中，自动化仓库作为物流系统的一个核心和枢纽，是物流系统实现物流合理化的关键所在，在国民经济中有着举足轻重的地位。通常，一种产品要从原材料做成成品，再把成品作为商品，送到消费者手中，需经过两个基本物流环节：前者是物流生产过程（如：加工流水线，自动生产线），后者是把商品送到消费者手中的物流流通过程。基于上述两个基本物流环节，目前立体仓库系统主要有两大应用领域：其一是各种自动化生产线中的在线立体仓库系统（如 CIMS 中的在线立体仓库系统）；其二是各种物资配送中心（如超市配货中心等）。而货物从一个地方转移到另一个地方，单件运输是不经济的，成批和大量的组织运输有助于减少成本。而货物的等待就必须由仓库来实现。自动化立体仓库在物流中就充当这样一个货物储存的角色^[3]。

在第五次国际物流会议上，美国产业界人士明确指出，当前美国全部生产过程中只有 5% 的时间用于加工制造，95% 的时间则用于搬运、储存等物流过程。而中国 1999 年全社会物流费用支出约占 GDP 的 20%。因此，无论是在流通领域还是在制造领域，对自动化仓库作业方式调度的研究都已成为了研究的热点。

1.1.2 自动化立体仓库的调度问题

调度 (Scheduling) 是指在满足各种约束条件的情况下调配资源、合理安排作业顺序，以达到运行成本最小的目的。寻求合理调度方案的过程实际上就是对任务的作业顺序进行组合优化的过程，因此，有时候调度问题也被称为排序问题^[4]。

自动化立体仓库是集物料搬运和仓储科学为一体的一门综合科学技术工程，由于它具有节约劳动力，作业迅速准确，提高保管效率，降低物流费用等优越性，因此受到了广泛的重视。它是工厂物流、柔性制造系统和计算机集成制造系统中不可或缺的重要组成部分，其智能化管理在提高企业竞争力和满足客户服务等方面已经越来越成为一个重要的因素。为了保证整个仓库的性能指标最优，就要对它的各子系统进行调度，使其能够协调运转。因此自动化仓库的调度问题就成为一个重要的研究课题。

自动化立体仓库调度的主要作用是根据具体仓库的巷道堆垛机和出入库传输系统等设备的实际位置及运动状态等信息，按照一定的调度规则对所有的任务链路进行动态生成并进行实时跟踪管理和动态调度，以达到对储运设备的高利用率和实时避免并发任务的调度冲突。

以生产企业的周转型立体仓库为例，为了保证制造系统各个生产阶段的供需要求，立体仓库作为整个工厂元器件的供应基地，提供快速的保障供应能力^[5, 6]。此类自动化仓库包括货物的自动存取系统(高层固定货架, 多层水平旋转货架等)、货物的自动分拣系统、货物的自动输送系统和多个出 / 入库台。其中输送系统作为连接存取系统和货物储存系统的桥梁部分，其

运输效率和顺序直接关系到整个仓库的出入库效率。此外，输送设备的调度结果受到整个企业的中、长期生产计划的影响，调度过程必须考虑库存水品、预测和资源需求，以便对长期资源进行优化。调度也需要考虑货物的重量、需求频率以及存储空间的利用率等因素，并且还要根据设备故障和交货期变更等突发事件实时修改。所以可以知道，优秀的调度策略以及各种设备资源的合理使用对于自动化立体仓库的运行效率影响极大，这也是目前许多学者都在研究的重要课题。

1.1.3 课题的意义

自动化仓库是物流系统的重要组成部分。随着自动化立体仓库的广泛应用，人们对立体仓库出入库调度的合理性、实时性以及自动化立体仓库的智能化要求也越来越高。我国对物流系统的研究虽然已经取得了一定的进展，但由于起步较晚，对自动化仓库调度的研究就比较少，而且用面向对象的赋时 Petri 网来研究自动化仓库的出入库调度问题还很罕见。因此，通过对自动化立体仓库出入库调度问题的研究不但能够优化自动化立体仓库的调度策略，提高其利用率，使得系统物流更加合理，而且通过使用面向对象赋时 Petri 网这种方法，也为其它领域类似问题的解决提供了参考。

1.2 相关领域的国内外研究概况

1.2.1 自动化立体仓库的分类和发展概况

1. 自动化立体仓库的组成

自动化立体仓库是一种新型的仓储技术，又称为自动存储/检索系统 (Automated Storage/Retrieval System, AS/RS)，它是物料搬运和仓储科学中的一门综合科学技术工程。它以高层货架为主要标志，以成套先进搬运设备为基础，以先进的计算机控制技术为主要手段，以此组成高效率的物流、大容量的合理的存储，以适应现代化生产的需求。典型的自动化立体

仓库由货物储存系统、货物存取和输送系统、控制和管理等三大系统所组成,还有与之配套的供电系统、空调系统、消防报警系统、管理信息系统等。如图 1-1 所示。货物存储系统由立体货架的货格(托盘或货箱)



图 1-1 自动化立体仓库示意图

组成,它是货物存取的目的地。货物存取和输送系统承担货物存取、出入仓库的功能,它由有轨或无轨堆垛机、出入库输送机、装卸机械组成。管理和控制系统一般采用计算机控制和管理,它是自动化立体仓库进行物资管理、帐务管理、货位管理及信息管理的中心。

2. 自动化立体仓库的分类及发展趋势

自动化立体仓库是一个复杂的综合自动化系统,作为一种特定的仓库形式,分类方法有很多,例如:按建筑形式分类、按货架构造形式分类、按仓库容量分类等等。其中,按照自动化仓库与生产连接的紧密程度可以分为独立型(离线型)、半紧密型和紧密型(在线型)立体仓库。

美国学者 J. A. White 将仓储技术(包括立体仓库)的发展分为五个阶段:人工仓储技术阶段、机械化仓储技术阶段、自动化仓储技术阶段、集成自动化仓储技术阶段和智能自动化仓储技术阶段。智能自动化仓储技术虽然还处于初级发展阶段,但它将是今后自动化存储技术的发展方向。

随着自动化技术和信息技术在自动化立体仓库中广泛运用,自动化立体仓库的发展将呈现以下趋势:

- ①仓储作业管理自动化水平将会逐步提高。
- ②智能技术将会获得应用。
- ③仓库作业向柔性化发展^[7]。

1.2.2 自动化立体仓库的调度问题的研究现状

国内外学者目前对自动化立体仓库调度问题进行了广泛的研究并取得了一定的进展。美国学者 Linn.R^[8]于 1990 年提出将专家系统的思想应用到立体仓库的控制中,经过十多年的发展,专家系统已成功的应用于自动化立体仓库的控制领域。Kim.Byung 等^[9]提出了一种基于调度和控制系统的混合智能 Agent 结构并将其应用于 AS/RS 的货位拣选问题,仿真也证明这种方法可以优化立体仓库的货物库存。Donald .Tepas^[10]引入了一种知识信息系统来对辅助决策立体仓库中的调度问题并得到了应用。

在国内,山东工业大学的田国会、刘常有等针对自动化仓库的实际运行过程,提出了影响仓库运行效益的若干优化调度问题,并分别采用 Petri 网、时态逻辑、模拟退火、遗传算法、神经网络等方法进行仿真研究^[11]。剡昌锋等^[12]运用遗传算法对自动化立体仓库的调度问题进行了研究,研究表明该方法能够得到可行的调度策略并使系统达到较好的性能指标。徐心和^[10]等建立了自动化仓库输送系统的面向对象的着色 Petri 网 (OOCPN: Object-Oriented Colored Petri Nets) 模型,然后讨论了该过程的死锁问题,并给出了死锁避免的最大允许反馈控制策略。事实上, OOCPN 模型简洁、使用范围广,通过数据仓库来抽取和存储决策所需数据,使得该系统具有良好的实时性和准确性。

但是,目前大多数学者都是针对自动化仓库输送系统的调度进行建模分析或仅仅只是对货位分配进行优化,还没有对整个自动化仓库的出入库调度过程及调度规则进行建模分析。在国内的几大查询网站,如中国学术期刊网、google 等,以关键字“自动化立体仓库建模、Petri 网”进行搜索,并没有找到关于用 Petri 网对自动化立体仓库的出入库调度过程建模并对调度规则进行优化的相关文章。

1.3 本课题的研究内容

本课题主要是针对自动化立体仓库的调度问题进行研究,研究的对象

是巷道式生产型立体仓库。在线型仓库对系统实时性和效率要求比较高，一旦出现“死锁”或是其它异常状况将会影响整个生产车间的工作效率。此外，如果对系统运行的调度策略考虑不周也易于导致系统在实际调度中出现瓶颈。因此，对自动化立体仓库的调度建模仿真是非常有必要的。本文将采用一种复合建模技术——OOTPN (Object-Oriented Timed Petri Net) 对自动化立体仓库的调度进行建模分析，论述 OOTPN 用于自动化立体仓库调度建模分析的可行性并对调度规则用遗传算法进行优化，最后通过仿真程序进行离线仿真验证。

通过对 AS/RS 出入库调度问题的建模分析及相应调度规则的优化，可以得到更加合理的调度策略，这就有利于有效的调度货物，减少货物的库存时间和周转时间，使仓库的利用最大化。本文主要的研究内容是：

①针对目前对 AS/RS 调度算法的一些不足，采用 OOTPN 对 AS/RS 调度进行建模，得到一个不含信息位且易于扩展的、模块化的 AS/RS 调度的 OOTPN 模型；然后通过该模型分析 AS/RS 调度过程中可能出现的“死锁”问题，最后，还给出立体仓库的含信息位的 OOTPN 模型，为 AS/RS 的控制提供依据。

②通过制定合理的调度规则，实现预先规避“死锁”；同时对立体仓库的货位进行优化配置以提高存取效率，并调度规则要保证货架的稳定性。

③运用遗传算法对自动化立体仓库的调度规则进行编码，运用遗传算法的变异、遗传和杂交等特性对调度规则进行优化，得到一个优化的规则集；并以系统综合效益最优为目标寻找最优的调度规则。

④用 VC++6.0 对所得到的模型和优化算法进行编程和仿真，验证本模型的模块化思想和模型的可行性；最后还通过仿真计算得到一组优化的调度规则集。

1.4 本章小结

本章简要介绍了物流和自动化立体仓库调度问题在物流系统中的地位和作用，然后讨论了自动化立体仓库出入库调度问题的研究现状，最后还指出本文将采用一种面向对象的 Petri 网来对自动化仓库建模并对调度规则用遗传算法进行优化。

2 自动化立体仓库建模方法及 Petri 网

根据系统特性的不同可将工程系统分为连续系统和离散系统：连续系统是指系统的状态随时间连续变化的系统。离散事件系统和连续系统不同，它所包含事件的发生过程在时间上和空间上都是离散的。

要理解一个 AS/RS 系统所必须的条件或评价一个 AS/RS 系统的优劣，最好是建立模型来表示 AS/RS 各个子系统的运行——包括物料流和信息流。自动化立体仓库的出入库调度过程具有典型的离散事件系统特征，而且在调度运行过程中的各个事件也都属于离散事件。在该类系统中，各事件以某种顺序或在某种条件下发生，并且大都属于随机性的（或是由于随机的输入，或是由于系统元素的属性值作随机变化），因此不能用研究连续系统的方法去研究。

本章将要给出自动化立体仓库的建模结构体系，同时还要介绍一些离散事件系统建模常用的方法。

2.1 自动化立体仓库的建模结构体系

本文所讨论的是巷道式生产型立体仓库的出入库调度问题，因此所建立的也是生产型立体仓库的模型。立体仓库的结构（如图 1-1）主要由货架区、堆垛机、出/入库台和出入库缓冲区四部分组成。货架区由多排立体货架组成，在每一巷道内有一台堆垛机负责两排货架上的货物存取，在巷道口各有一出/入库台，出/入库台与出/入库缓冲区相连。整体布置采用同端出入库方式，货架采用单元货架形式，出/入库台每次可容纳一个托盘。

生产车间或外部企业的货物被送到自动化立体仓库后，自动化立体仓库的上位机将会按一定的规则把货物分配到各个巷道中，此时若入库台空闲，则货物直接进入入库台等待堆垛机入库，否则，将把货物送入缓冲

区等待。堆垛机从入库台上取得货物并把它放置到相应货位，然后取出要出库的货物运到出库台，出库货物经由出库台进入出库缓冲区，等待运走。

由于货物到达和离去事件的发生时刻及时间间隔都是离散的、随机的，堆垛机服务的开始和结束时刻的也是随机的；此外，堆垛机可能发生故障等等，这些事件都体现了自动化立体仓库的离散性，因此在建模的时候就需要将到达、离去和故障等事件描述出来并记录事件发生前后系统性能参数的变化，为后面的系统仿真打下基础。

2.2 离散事件系统建模方法

离散事件系统的模型一般可以用流程图描述，建模时需根据具体系统模型的真实内涵，充分反映临时实体在系统中历经的过程、永久实体对临时实体的作用，以及它们之间的逻辑关系。用于离散事件动态系统模型建模和分析的方法有很多，其中常用的有时态逻辑方法、排队网络方法、极大代数法、专家系统方法、遗传算法方法、Petri 网方法等。

2.2.1 时态逻辑

基于时态逻辑方法研究离散事件动态系统是近年来提出的新方法。时态逻辑包括两个基本的时态算子：“o”(next)，“U”(until)。由其可定义其它的时态算子： \diamond (eventually)， \square (always)，U(unless)，P(precedes)等。关于这一形式系统中的语言、项和公式的定义以及相关的证明系统见文献[13]。

采用时态逻辑方法可以对离散事件过程的复杂逻辑关系给出简洁、明了和详细的描述，既不需要抽象的定理或规则，又不需经过严密且繁琐的推导过程，易于计算机实现和实际应用。对于多过程的并发系统，可采用模块化规范和模块化判定的方法，能有效的降低判定过程的复杂程度。这是其它离散事件动态系统研究方法难以做到的。

2.2.2 排队网络

排队网络分析方法是在随机过程基础之上发展起来的一种数学方法，因为资源的有限性和需求的随机性是排队现象存在的基础。排队系统由队列和服务台两个基本要素组成。Solberg^[14]将排队网络理论用于离散事件动态系统的建模。其模型假定服务台具有指数型时间分布，排队的对象都是同一类型。通过排队网络模型，可以分析系统的服务时间、服务效率等指标。

排队网络模型通常都没有考虑系统的实际布局情况，服务时间也都是标准分布，没有考虑系统具体设备间的特定关系，因此通常只适用于对系统进行定性分析。

2.2.3 极大代数法

极大代数是 G. Cohen^[15] (1985) 等人提出的。以极大代数为工具，将所研究的离散事件动态系统视为确定性系统，根据系统的运行关系建立一系列事件发生时间的状态方程、分析其特征值，得出系统的运行周期、利用率等指标。但是，当系统规模增大，方程维数也会增大，因此该方法对复杂系统的应用受到限制。

2.2.4 专家系统

所谓专家系统，就是一种在相关领域中具有专家水平题解能力的智能程序系统，它能运用领域专家多年积累的经验与专门知识，模拟人类专家的思维过程，求解需要由专家才能解决的困难问题。专家系统的基本组成如图 2-1 所示。目前大多数专家系统由六部分组成：

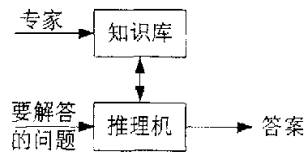


图 2-1 专家系统的基本组成

人机接口、知识库、推理机、综合数据库、方法库、解释系统。

2.2.5 遗传算法

遗传算法是美国密执安大学的 J. H. Holland 教授于 1975 提出的, 该算法是一种基于自然选择和自然遗传学机理上的参数搜索算法。一般的遗传算法包含三个基本算子: 选择、交叉和变异。交叉就是将种群中的个体随机进行配对, 然后按照一定的方式进行交配, 从而得到新个体的过程。交叉是遗传算法中非常重要的一步, 对算法有着较大的影响。目前用于求解组合优化问题的交叉算子主要有 PMX 算子、non-Abel 交叉算子、启发式交叉算子等。变异的作用是防止算法的过早收敛, 从而找到全局最优解。

目前, 关于遗传算法的应用实例已经有很多^[16,17,18], 但是具体而言, 利用遗传算法求解离散系统调度问题的一般过程通常如下: ①制订遗传编码方案; ②产生初始种群; ③计算群体个体的适应度值; ④使用选择、交叉和变异等遗传算子产生新一代种群, 直到进化过程结束, 产生调度问题的近似最优解。

2.3 Petri 网方法

模型是对系统的抽象, 选择合适的建模语言建立系统模型对仿真优化是非常关键的。因为建模语言的优劣直接决定了所建立模型的性能并影响着研究者对系统性能的评估。图示化方法对用户来说最容易使用和理解, 而 Petri 网作为一种图形化表示的过程建模语言, 不但能够图形化表示模型, 而且还具有强大的数学分析基础, 因此是一种比较理想的建模方法。

2.3.1 Petri 网简介

Petri 网是由德国的 Carl Adam Petri^[12]在 1962 年提出的, 它是一种适用

于多种系统的图形化、数学化建模工具，由于 Petri 网对带有并发性、异步性、分布性、非确定性、并行性系统的有力描述，已成为目前最有前途的建模工具。近年来，Petri 网技术已获得极大的发展，各种各样的网系统已经被开发出来。例如条件/事件网，库所/变迁网，有色网系统，赋时网系统等。这些网系统的开发极大的扩展了 Petri 网对复杂系统的建模能力。

条件/事件网由条件和事件组成。条件由圆圈代表，事件由方框代表，如图 2.2 所示。库所/变迁网是条件/事件网的连线上增加权重的概念形成的。以上两种网系统中，如果库所中有托肯，则托肯代表相同的资源。但是在有些应用中，需要托肯表达不同的现实世界的对象。为了实现这一

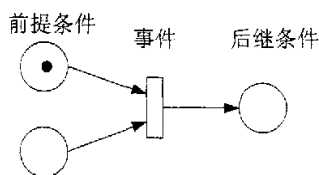


图2-2 Petri网的示意图

目的，有色系统被引入对托肯进行着色，每个弧有一个标记，指明何种托肯从一个库所流到一个变迁多少数量。赋时 Petri 网 (Timed Petri Nets) 系统能表达时间概念。在这种模型中，变迁需要一定的时间才能完成。有一个最短时间和最长时间，变迁将在此段事件内被激发，随机的完成。

2.3.2 Petri 网的数学基础^[11,12,13]

1. Petri 网的基本术语

①资源

系统中发生变化所涉及的与系统状态有关的因素，包括原材料、产品、人员、工具、设备、数据及信息等。

②状态元素

资源按其在系统中的作用分类，每一类存放一处，则该处抽象为一个相应的状态元素。

③位置 (库所)

状态元素又称库所。它不仅表示一个场所，而且表示在该场所放了一定的资源。

④变迁

资源的消耗、使用及产生对应于位置（库所）的变化，网论中将此变化叫做变迁。

⑤条件

如果一库所只有两种状态，有标记和无标记，则称该库所为条件。

⑥事件

涉及条件的变迁称为事件。

⑦容量

库所对储存资源的数量限制称为库所的容量。

2. Petri 网的定义及其图形表示

一个五元组 $N = (P, T, I, O, u_0)$ 是一个 Petri 网 iff (当且仅当):

① $P \cup T \neq \phi$

② $P \cap T = \phi$

③ $I \subseteq P \times T, O \subseteq T \times P$ (“ \times ”为笛卡儿积)

其中, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 是有限状态集, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 是有限变迁集, I 为变迁的输入弧集, O 为变迁的输出弧集, u_0 是 N 的初始标识。

I 也即从一个变迁 t_j 到一组位置 $I(t_j)$ 间的映射。当 $(P, t) \in I$ 时, 位置 P 称为变迁 T 的一个输入位置, T 称为 P 的一个输出变迁。 O 也即从一个变迁 t_j 到一组位置 $O(t_j)$ 间的映射。当 $(t, P) \in O$ 时, 称 P 为变迁 t 的一个输出位置, t 为 P 的一个输入变迁。

一个变迁的输入或输出是一个位置袋。袋是广义的集合。在袋中允许一个元素重复出现。对于一个变迁 t_j , 输入位置 P_i 的重数 (multiplicity) 是指 P_i 在 t_j 的输入袋中出现的次数 $\#(P_i, I(t_j))$ 。同样, 对于一个变迁 t_j , 输出位置 P_i , 的重数是指 P_i 在 t_j 的输出袋中出现的次数 $\#(P_i, O(t_j))$

$\forall x \in P \cup T, \cdot x = \{y \mid (y, x) \in I \cup O\}$ 是 x 的输入集;

$x' = \{y \mid (x, y) \in I \cup O\}$ 是 x 的输出集。

Petri 网结构中包括有位置和变迁。与此对应, Petri 网图中有两类结点。用小圆圈表示一个位置, 用短线表示一个变迁节。我们称小圆圈为位置, 短线为变迁。用有向弧(带箭头的曲线)连接位置和变迁。一个变迁的多重输入, 由它的输入位置指向它的多重弧来表示。多重输出由变迁指向位置的多重弧来表示。一个 Petri 网图是一个多重有向图。

Petri 网 N 的一个标识 (marking) u 是托肯 (标记) 在 N 中各个位置的分布情况。“托肯”是 Petri 网的本原概念之一, 标记分布或者说是驻留于 Petri 网的位置内。当 Petri 网运行时, 托肯的数目和所在位置都在发生变化。标记是用来规定 Petri 网的运行的。Petri 网 N 的标识 u 是位置集 P 到非负整数集 N 的一个映射函数, $u: P \rightarrow N$ 。标识 u 也可以用一个 n 维向量 $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 来表示, 其中 $n = |P|$, $u_i \in N$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。向量 u 给出了 Petri 网的每一个位置里的托肯的个数。在 Petri 网中, 托肯用小圆点 \bullet 表示, 画在表示位置的小圆圈内。若小圆圈内标识有两个小圆点 \bullet 或数字 2 则表示该位置中有两个托肯。

3. Petri 网的运行法则和状态空间

Petri 网的运行由网中托肯的数目和分布情况来控制。托肯留驻在位置里, 而 Petri 网的运行是由变迁的引发 (firing) 来引起的。一个变迁的引发, 即从它的各个输入位置移走标记, 而将产生的新标记分配到它的各个输出位置中。

一个变迁只有当它使能 (Enabled) 的时候才能引发。在 Petri 网 N 中, 如果对于每一个 $P_i \in P$ 都有

$$u(P_i) \geq \#(P_i, I(t_j))$$

则称变迁 t_j 是使能的。

在 Petri 网 N 中, 当变迁 t_j 使能时, 它可以引发。引发一个使能的变迁 t_j , 产生一个新的标识 u ,

$$u(P_i) = u(P_i) - \#(P_i, I(t_j)) + \#(P_i, O(t_j))$$

在 Petri 网的连续运行过程中，产生两组序列：标识序列 u_0, u_1, \dots, u_{k+1} 和点发的变迁序列 $d = s_0, s_1, \dots, s_k$ 使得 $u_i[s_i > u_{i+1}, i=0, 1, \dots, k$ 称标识 u_1, \dots, u_{i+1} 是从初始标识 u_0 可达到的。变迁记号可以扩展为 $u_0[d > u_{i+1}$ ，表示从 u_0 开始经 d 中的变迁连续点发而到达标识 u_{i+1} 的运行过程。定义 N 的可达集 $R(N, u_0)$ 为所有能从 u_0 可达的标识之集合。

4. Petri 网中事件间的基本逻辑关系

①顺序（先后）关系：该变迁在情态 C 不能触发，它的触发只有在前一个变迁触发后的后继情态 C' 时才能发生，如图 2-3(a)。

②并发关系：在情态 C ，当变迁触发后，前一个位置里的托肯可以流向两个或两个以上的位置（库所），如图 2-3(b)。

③冲突关系：相互冲突的两个事件在情态 C 各自都有发生权，但不能作为一步同时发生，所以必须选择一个发生事件，如图 2-3(c)，2-3(d)所示。

④合并关系：两个以上的变迁同时触发，且都流向同一个位置（库所）。

除以上关系外，Petri 网中还有合并关系、紊乱关系（并发与冲突同时存在）、死锁关系和优先关系等，这里不一一列出，各个关系具体定义可以查看文献[19]。

5. Petri 网的性能指标

①有界性

在 Petri 网 N 中，如果对任何 $u \in R(N, u)$ ，都有 $u(P_i) \leq I$ ，则我们称位

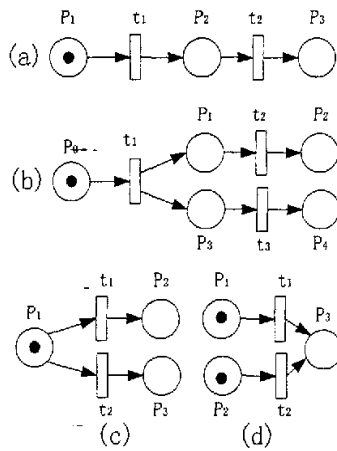


图2-3 (a) P1和P2顺序发生
(b) P1和P3同时得到托肯
(c) (d)中t1、t2事件会发生冲突

置 P_i 是安全的。如果一个 Petri 网的每一个位置都是安全的，我们称这个网是安全的。安全性对于 Petri 网来说是十分重要的性质。如果一个位置是安全的，这个位置中的标记不是 0 便是 1。这样，这个位置就非常容易实现。安全性是有界性的一种特殊情形。

在 Petri 网 N 中，如果对任何 $u \in R(N, u)$ ，都有 $u(P_i) \leq k$ ，我们称位置 P_i 是 k -安全的或有界的。如果一个 Petri 网的每一个位置都是 k -安全的，我们称这个网是 k -安全的或有界的。

② 守恒性

若用 Petri 网模拟资源分配系统时，资源用托肯表示，在网的运行之中，托肯既不会增加也不会减少，即托肯数保持为一个常数。

在 Petri 网 N 中，如果对任何 $u \in R(N, u)$ ，都有

$$\sum_{P_i \in P} u'(P_i) = \sum_{P_i \in P} u(P_i)$$

则称这个网为严格守恒。如果存在一个权向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ($n = |P|$)， $w > 0$ ，对于任何 $u \in R(N, u)$ ，都有

$$\sum_{P_i} w_i u'(P_i) = \sum_{P_i} w_i u(P_i)$$

则称这个网是关于权 w 守恒的。显然，一个严格守恒的 Petri 网是关于权 $w = (1, 1, \dots, 1)$ 守恒的。

③ 活性

在一个 Petri 网中，死锁就是一个（或一组）变迁不能引发。一个变迁如果没有死锁，就说它是活的。在 Petri 网 N 中，如果存在 $u \in R(N, u)$ ，使得 t_j 在 u 中是使能的，则称 t_j 在标识 u 下是潜在可引发的。如果变迁 t_j 在任何 $u \in R(N, u)$ 下都是潜在可引发的，那么称 t_j 在标识 u 下是活的。一个变迁是活的，那么总可以调度 Petri 网，使它从当前的标识达到一个这样的标识，在后一个标识下，这个变迁可以引发。

例如,考虑有两个不同的资源 q 和 r 和两个进程 a 和 b 的系统。假设进程 a 首先需要资源 q , 然后需要资源 r , 最后把两个一起释放。进程 b 也类似, 但它首先需要 r , 然后需要 q 。图 2-4 用 Petri 网描述这两个进程和资源分配的情况。当执行了 t_1, t_4 , 这时进程 a 占有 q 而需要 r , 进程 b 占有 r 而需要 q 。这时这个系统是死锁的, 没有一个进程能进行下去。

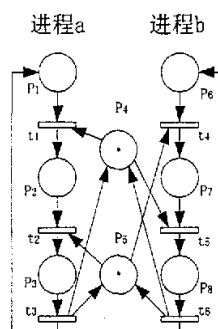


图2-4 两个进程 (a 和 b) 和两个资源 (P_4 代表 q , P_5 代表 r) 的资源分配问题

④可达性和可覆盖性

可达性问题: 已知一个带标识 u 的 Petri 网 N 以及一个标识 u , 是否有 $u \in R(N, u)$?

可达性问题在以 Petri 网为模型的离散事件系统控制理论中起着非常重要的作用, 它揭示了系统是否可以通过触发变迁达到当前的情态。

可覆盖性问题: 已知一个带标识 u 的 Petri 网 N 和一个表示 u , 是否有一个可达的标识 $u \in R(N, u)$, 使得 $u \geq u$?

2.4 复合建模技术

传统建模技术 (如排队网络法、极大代数法等) 的主要不足就是描述视图的单一性以及系统在分析、设计和实施阶段存在模型的转换, 导致信息的丢失, 从而不能全面描述问题领域的各种现象。目前, 一些研究者和建设者试图采用将多种开发模型应用到系统的开发实践中, 如近年来新出现的面向对象的建模方法, 可以支持三种观点的建模, 即: 功能建模、对象建模和动态建模, 在一定程度上弥补了单项模型的不足, 但是由于这三种建模技术描述的对象所使用的描述工具不同, 没有统一的标准和规范,

使三种模型之间缺乏一致性和可比性，给系统的分析设计带来一定难度。研究统一建模语言的概念和语言对系统建模和解决目前模型的不足有一定的意义和参考价值。这种集成模型不仅可以代表目前常用的几种建模观点，而且可以从不同的视图反映问题领域的现象，并将大大简化建模的工作环节，使系统分析设计员可以完整的理解问题领域。

在下一章中，文章将会介绍一种复合建模语言——面向对象赋时 Petri 网，并用这种建模语言来建立自动化立体仓库出入库调度的模型。

2.5 本章小结

本章介绍了自动化立体仓库运行的体系结构并简要说明了离散事件动态系统建模的一些方法，最后还给出了 Petri 网的建模方法及其数学理论基础，指出其在离散事件系统建模方面的优势。

3 AS/RS 出入库调度系统的 OOTPN 模型

本章将通过建立 AS/RS 出入库调度系统模型，描述出该系统的行为和特性，为下一步的调度优化分析打下基础。这一章将会用一种面向对象的赋时 Petri 网（Object Oriented Timed Petri-Nets, OOTPN）的建模方法来建立 AS/RS 出入库调度系统的运行流程的 OOTPN 模型。

3.1 OOTPN 的建模方法

复合建模技术已成为分析离散事件动态系统的发展趋势之一，它将多种建模技术相结合来建立模型，发挥各种建模技术的优点，消除局限。其中最典型的是将 Petri 网建模技术与面向对象建模方法相融合^[20]，其核心是将面向对象的概念引入到 Petri 网技术中，按 OO 方法对 Petri 网进行扩展，使复合模型既有易于理解的图形描述方式，又能保持 Petri 网的分析和验证能力，时间概念的引入更使得这种建模方法能够对所建立的模型进行定量分析。

3.1.1 面向对象（OO）思想^[21]

1. 面向对象的概念

面向对象是指一种着眼于对象的方法，也就是把现实世界模型化的一种方法。面向对象是不以控制为中心，而是以事务（对象）的行为为中心来考查问题的一种体系。所以，其基本思想是通过采用封装、继承、消息通信等原则，使问题域的复杂性得到控制。

面向对象方法的主要术语有：对象（Object）、类（Class）、方法（Methods）和消息（Messages）。

①面向对象模型中的建模元素“对象”是对问题事务的完整映射，它包

含了事务的数据特征（属性）和行为特征（对属性的操作）。

②类则是具有相同属性和操作的一组对象的抽象集合。对象是类的一个实例，每个对象均有其唯一标识。类由“类说明”和“类实现”两大部分组成。类说明统一描述类的属性（数据）、应遵守的规则以及可执行的操作等，类一共有三种声明形式：私有的（Private）、保护的（Protect）、共有的（Public）。类实现是实现类说明功能的详细过程和方法，它往往由系统开发人员研制，用户不必了解，这也是面向对象方法的信息隐藏性。

③方法是指在对象中被定义的过程，即对类的某些属性进行操作以达到某一目的的过程。它是与类的属性封装在一起的。一个类的共有方法可以用于许多领域，即可以重复使用。

④消息是对象间唯一的接口方式。即当多个对象联系在一起，进行一个处理时，便要使用到消息。面向对象中就是通过“消息传递”，激活所需类的“方法”的过程。

2.面向对象方法的主要技术

①封装。封装是把数据结构同操作数据的函数（方法）组合在一起，因此它使数据和过程实现了一体化。它限制了类的属性（数据）和方法的可访问性，使各类成为了独立的模块，减少了数据传递误操作的可能，提高了系统的可靠性和可维护性。模块性的优点也使得系统开发的效率大大提高。

②继承。在面向对象的方法中，类是按一定的层次组成起来的，称为类层次，即通过类层次把类进行体系化。面向对象方法规定子类集成父类的数据和方法，即子类可以照样使用父类定义的内容。因此在生成新类时可以只定义与父类不同的数据和操作。继承性使系统自然形成了清晰的层次结构并大大提高了代码的可重用性。

③消息传递。消息传递是指示对象做什么的唯一手段。在面向对象的方法中，由于只有通过“消息”才能使对象进行某种操作，因此可以防止对象被错误的使用。

④动态编联 (Dynamic Binding)。它是指允许一个操作有多个可实现的版本 (多态性), 对于使用哪个版本实现不必规定, 可以直到运行时根据所给定的参数值再选用。

3. 面向对象的设计过程

①标识组成系统对象的对象类, 即对所研究的现实世界进行分析, 找出组成它的各种对象, 并加以分类;

②定义每一类对象的属性和操作;

③具体实现对象的结构;

④描述类结构图, 或是编程实现系统;

面向对象方法的最大优点就是: 将系统中的各种对象归类。这种抽象与分类符合人们对客观世界的认识习惯。同时, 给出了类中对象的属性与操作 (方法)。使模型转化为应用程序非常方便。

3.1.2 OOTPN 的定义及其优点

OOTPN 建模方法由于引入了 OO (面向对象)、P (Petri 网)、T (时间) 这三个概念而非常适用于 AS/RS 出入库调度的建模和分析工作。

1. OOTPN 的定义

面向对象赋时 Petri 网的定义如下:

$$\text{OOTPN}=(P_M, T_t, K)$$

式中, P_M 是系统中各物理对象的赋时 Petri 网子网模块 $P_{Mi}(i=1, 2, \dots, m)$ 的集合, 其定义与普通 Petri 网相似; T_t 为连接 P_M 子网模块之间输入输出库所的过渡变迁 $T_{ij}(i, j=1, 2, \dots, m, i \neq j)$ 的集合, K 为确定过渡变迁如何发生的判别规则集 $K_{ij}(i=1, 2, \dots, m)$ 的集合。对象子网模块 P_{Mi} 则是一个 7 元组, 即:

$$P_{Mi}=(P, T, F, C, w, u_0, \text{Time})_i$$

式中的 P, T, w, u_0 与经典 Petri 网中的定义相同, C 是 Petri 网中位置、

托肯和变迁的颜色集, Time 是表示 Petri 网模型中延时变迁的时间延迟, $F = (P \times T) \cup (T \times P)$ 为流动关系有向弧的集合。

在 OOTPN 模型中, 各个独立的 Petri 网功能子网模块被封装起来, 然后通过过渡变迁 T_i , 按一定的规则 K 联系起来, T_i 确定了系统中各个物理对象之间的协作与交互关系。由于系统中物理对象间的关系可能非常复杂, 使得过渡变迁的触发条件和相应的顺序也变得非常复杂, 判别规则集 K 中的规则 K_j 作用于相应的过渡变迁之上, 用来确定其触发条件及顺序。

在制造系统中存在着物质流和信息流, AS/RS 系统也属于制造系统范畴, 因此也存在着这两种流关系。在 OOTPN 中, 把 Petri 网的位(库所)分为两大类, 即资源位(Resource Place)和信息位(Information Place)。资源位表示资源状态, 资源位中的托肯表示制造系统中的被加工对象及资源的状态, 它在 Petri 网中的流动表示系统中物流及资源状态的变化; 信息位的托肯表示系统中传递的信息, 它的流动用来描述信息流。

2. OOTPN 建模方法的优点

用 OOTPN 建模方法建立的单元模型具有 Petri 网的特性, 能够描述 AS/RS 出入库调度问题中存在的并发、异步、协同、冲突、分布式、非确定性、资源共享等现象, 它克服了面向对象方法定义不够精确的缺点。同时, Petri 网可以通过严密的数学方法对系统的动态性质进行分析, 从另一方面弥补了 OO 模型分析验证手段的缺乏。

同时, 由于 OOTPN 考虑了时间因素, 使得该模型能够对单元性能作定量分析。通过与控制规则的结合, 其分析结果可作为单元控制与调度研究的依据。时间概念的引入大大加强了 Petri 网的分析能力。如果没有时间概念, Petri 网就只能描述系统的状态及其相互转化关系, 即系统具有哪些状态, 哪些状态是可达的, 状态之间通过哪些行为可以互相转化, 转化的条件是什么, 而无法描述这些行为发生的时刻、需要的时间等一系列对系统性能分析至关重要的属性。引入时间概念后, 变迁被分为瞬时变迁和延时变迁两种。瞬时变迁在满足触发条件后立即触发, 不需消耗时间。延时变

迁在满足触发条件后还要经过一段时间后才能完成触发。

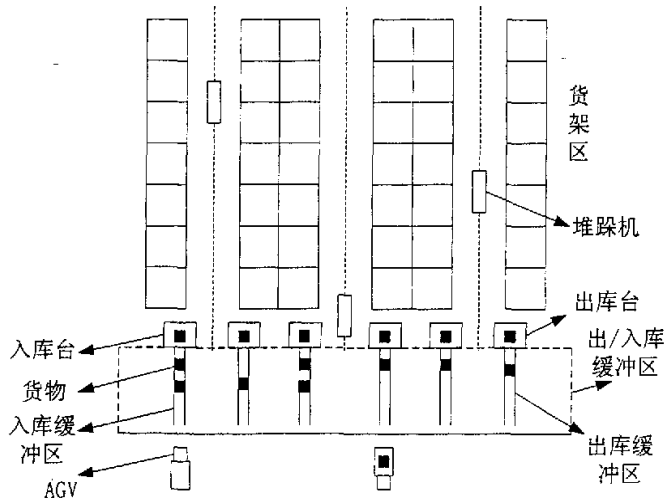
此外,OO特性的引入使得OOTPN模型具有了模块化和可继承的特性,所建立的模型易于修改和维护,并使已建立的模型具有重用性,在模型原型发生变化和重构时,能够在已有模型的基础上根据新单元的配置快速构造新的OOTPN模型。可以说,OOTPN方法打破了经典Petri网难以分析较大规模系统的局限性。

3.2 AS/RS 的 OOTPN 模型

用 OOTPN 模型描述自动化立体仓库的出入库调度是因为该模型不但可以直观的表达自动化立体仓库出入库的运行流程,而且 Petri 网本身的数学分析特点也有利于分析自动化立体仓库出入库过程中的各项性能。

3.2.1 AS/RS 的出入库调度模型

本文针对巷道式生产性立体仓库的出入库调度问题进行讨论,如图 3-1 所示。立体仓库的结构主要由货架区、堆垛机、出/入库台和出入库缓冲区四部分组成。货架区由多排立体货架组成,在每一



巷道内有一台堆垛机负责两排货架上的货物存取,在巷道口各有一出/入库

台，出/入库台与出/入库缓冲区相连。整体布置采用同端出入库式，货架采用单元货架形式，出/入库台每次可容纳一个托盘。出库缓冲区和入库缓冲区采用货格式出/入库，即出/入库缓冲区均被分为许多货格，出/入库缓冲区内货格的容量就是缓冲区的容量。缓冲区采用输送带出/入库，例如，当入库缓冲区空闲且该入库缓冲区内有货物时，则该队列中排队最前的一个货物靠自重进入入库缓冲区，后面的货物依次向前递进一格，缓冲区内的货物排队顺序可以通过分拣设备改变。

生产车间或外部企业的货物由输送设备送往上位机分配好的巷道（即货物到达立体仓库后一旦分配到相应的巷道中就不再转换巷道，分配巷道的规则可以有很多种），此时若入库台空闲，则货物经由缓冲区直接进入入库台等待堆垛机入库；否则，货物将滞留在入缓冲区中等待。堆垛机从入库台上取得货物并把它放置到相应货位，同时又取出要出库的货物运到出库台，出库的货物由出库台进入缓冲区，等待运走（由于出库比较简单，因此货物的队列不需改变）。由于立体仓库一旦运转，所有的出/入库任务都要经由堆垛机来完成，此时堆垛机的效率就成为制约整个自动化立体仓库工作效率的重要因素。因此，如何有效的调度堆垛机，并使系统在运行过程中不出现死锁状态，就是自动化立体仓库需要解决的重要问题。货物的到达和离去运输由输送设备来完成。为简化分析，本文不研究外部输送设备的输送调度问题，并假设立体仓库的出入库缓冲区容量有限，货物从缓冲区到出/入库台的时间忽略不计，货物分配到每个巷道的概率相同。

3.2.2 AS/RS 出入库调度 OOTPN 模型的建立(无信息位)

自动化立体仓库中的设备资源、货物资源、规则集都可视为相互独立的对象，利用面向对象抽象聚合的方法就可以得到独立的对象类。在 OOTPN 中，一个对象类实际上是一个 Petri 网的子系统，而对象类的属性可以用库所、颜色集和 Token 集来综合表示；操作则可以用变迁的触发来

表示。因此，通过对系统各资源的抽象聚合就可以得到系统的类图，并能进一步建立起对象类间的关联、继承和派生等关系。

由于 OOTPN 的信息位主要与 AS/RS 的控制系统有关，而本文主要讨论的是 AS/RS 出入库调度规则的优化，以及对 AS/RS 出入库调度设备的效率和可靠性进行分析，因此在这里建立的是不含信息位的 AS/RS 出入库调度的 OOTPN 模型。具体的建模过程如下：

1. 按照面向对象的技术对构成 AS/RS 出入库调度系统的设备单元进行聚合分类。自动化立体仓库中的对象按功能可分为四类，类及类之间关系的结构图如图 3-2 所示：

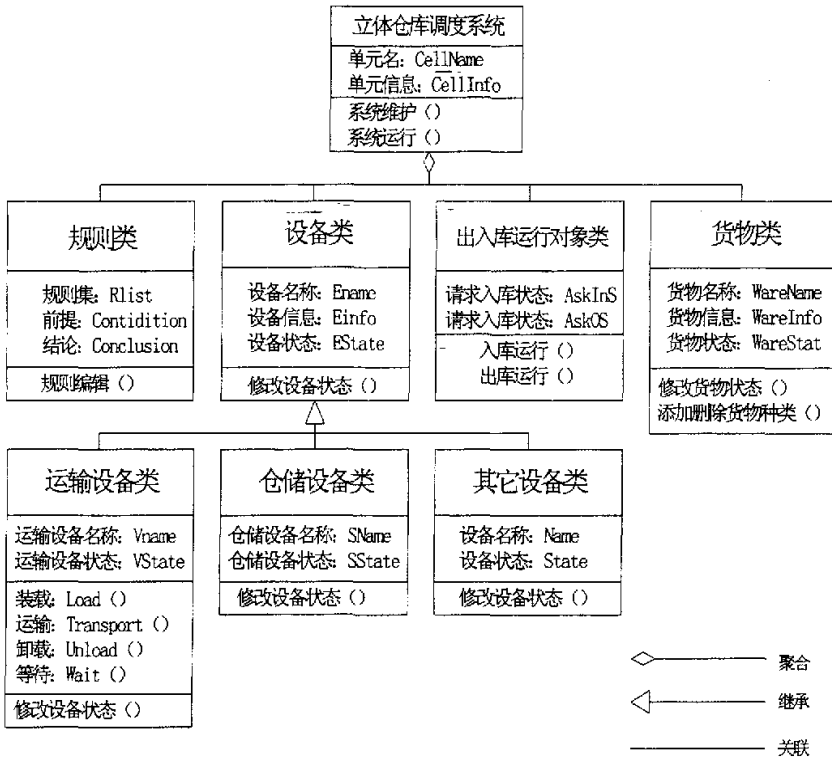


图3-2 AS/RS的结构类图

①设备对象类：这是实现系统功能的载体，具体又可以派生出搬运设备类、仓储设备类、检测设备类等。而搬运设备类可进一步派生出堆垛机对象类；仓储设备类也可以派生出出/入库台对象类、货位类。所有设备都具有名称、忙闲状态等属性，并且都有修改设备状态的操作。

②货物类：这是系统中各个设备进行运输和存取的对象。其数据属性有货物的体积、权值等；而它的行为特征有：入库或出库时的等待状态，处于输送设备中的运输状态，库存状态等。

③出入库运行对象类：这些对象实例的共同活动是货物请求出/入库，若设备空闲，则立即执行出/入库操作，否则货物进入缓冲区等待。

④规则类：规则类由一系列调度规则组成，共同的属性是规则的前提和结论，对应的操作是对调度规则的选取。

图3-2的类图给出了自动化立体仓库中各个对象类的属性及其对应的操作（函数），并且还表明了对象类间的抽象聚合关系。

2. 定义对象类中的 Petri 网关系

在上述对系统分类的基础上，根据 Petri 网的定义就可以得到各对象类的 Petri 网关系：

①设备的不同状态可以用库所 P 表示，并用着色托肯来区别不同的设备，同一设备类中的不同设备也可以用托肯的编号来区分。例如，堆垛机设备对象类的状态分为忙、闲和故障，其状态可分别由 3 个库所 $P_{忙}$ 、 $P_{闲}$ 、 $P_{故障}$ 来表示，以托肯是否在库所中来判断堆垛机的当前状态，堆垛机对象类被赋予颜色 E ，并以 E_i 来区分不同的堆垛机。堆垛机忙、闲转换时的状态改变可分别由变迁的触发来表示，延时变迁的触发延时由时间 $Time$ 控制。

②货物的不同状态也可以由库所 $P_i(i=1, 2, \dots, m)$ 表示，其数据属性则通过着色托肯集和托肯的编号表示。例如，如果货物的等待入库库所（入库缓冲区）中如果有托肯，则代表这个库所中有货物资源处于等待入库状态，不同的货物可以通过赋予不同的颜色来区分。

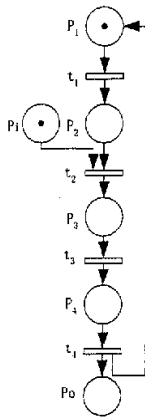
③出入库运行对象类中，货物请求出入库及等待的状态可以用 $P_i(i=1,$

2, ..., m)表示。操作的执行则由变迁的触发来表示。例如货物在出库时如果可以出库, 则出库变迁触发, 代表货物的托肯就由货位库所中转移到堆垛机库所中, 其状态也由闲变为忙。

④规则类实际上是一个规则队列, 可以通过一系列着色的编号托肯来对应表示, 而托肯队列就是规则队列 (如入库缓冲区中货物的队列实际上就是货物资源托肯在入库缓冲区库所中排队)。调度规则的优化也可以通过规则队列的优化来实现。

3. OOTPN 设备资源通用模型的建立

在对 AS/RS 设备资源分类及其 Petri 网定义的基础上, 为每类设备资源建立 OOTPN 模型, 所建立的模型要能够反映资源的属性和行为 (操作)。在模型中要确定模型的输入、输出位, 因为输入、输出位是 OOTPN 模型中各个 Petri 网对象模块 (代表不同的资源设备类和流程) 与其它 Petri 网模块发生关系的位, 它是该 Petri 网模块与其它模块发生交互关系的接口。例如图 3-3 所示的输送设备模块的通用 OOTPN 模型。



- P_1 : 设备空闲
- P_2 : 设备调整完毕准备装载运输
- P_3 : 装载完毕, 设备准备运输
- P_4 : 货物被运达目的地, 等待卸载
- P_i : 货物到达运输设备处
- P_o : 货物到达目标位置设备空闲
- t_1 : 设备开始调整
- t_2 : 设备开始装载货物
- t_3 : 设备开始运输
- t_4 : 开始卸载货物

图3-3 运输设备类的OOTPN模型

该模型中 P_i 和 P_o 分别就是该模型块的

输入位和输出位。虽然具体设备的具体 OOTPN 模型各不相同, 但是基本功能均与图 3-3 差不多。具体的设备类可以根据其属性和行为具体定义其

库所和变迁的含义。

4. 过渡变迁的定义

过渡变迁是模型中不同模块间输入位和输出位之间发生的变迁，它确定了各模块间的协作关系和交互方式。在 AS/RS 出入库调度的模型中，一些过渡变迁的触发凭借 Petri 网的有关特性即可确定，如图 3-4 (a) 所示。而另一些变迁的触发则需要在模型中引入相应的判别规则。这种单凭 Petri 网的特性不能确定而需要引入判别规则的情形称之为冲突，相应的判别规则称为冲突判别规则。OOTPN 模型中的冲突按照具体情况可以分为三种：

①过渡变迁之间存在的冲突，即两个或多个过渡变迁具有相同的输入位，必须确定输入位触发哪个过渡变迁，这种情况与一般的 Petri 网中的冲突是一致的。例如，当入库任务和出库任务同时发出时，堆垛机选择进行哪一个操作时就会发生这种冲突，可以用入库优先、先申请先服务等判别规则来解决冲突，如图 3-4 (b) 所示。

②触发过渡变迁的位中的托肯之间的冲突，在这种情况下，过渡变迁的输入位中的托肯数大于触发变迁所需的托肯数，需要确定由哪些托肯来触发相应的变迁。例如，当缓冲区中的货物进入系统或是离开系统时通常会发生这种冲突，可以应用货物的优先权或是先到先服务等判别规则来解决该种冲突，如图 3-4 (c) 所示。

③触发过渡变迁的位之间的冲突，在这种情况下，相应的变迁可由不同的输入位来触发，如图 3-4 (d) 所示，过渡变迁 T_i 可由输入位 P_0 或 P_1 来触发。这时，解决的方法是把该过渡变迁转化为对应不同输入位的多个过渡变迁。图 3-4 (d) 中的

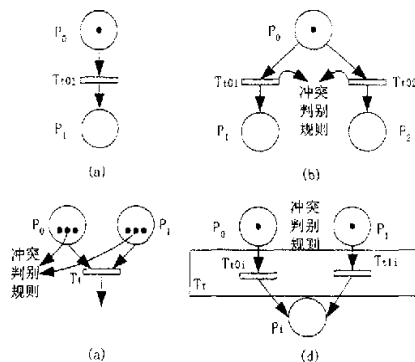


图3-4 过渡变迁及冲突判别示意图
 (a) 不存在冲突 (b) 过渡变迁间的冲突
 (c) 触发过渡变迁的位中的令牌之间的冲突
 (d) 触发过渡变迁的位之间的冲突

T_i 转换为对应输入位 P_0 的 T_{i0} 和对应输入位 P_1 的 T_{i1} ，确定哪个过渡变迁优先触发即可。当多个货物竞争输送设备或缓冲设备时常发生这种冲突，可应用最短运行时间、货物优先权判定等规则来解决冲突。

5. 构造整个 AS/RS 出入库调度系统的 OOTPN 模型

根据对系统的分类以及对象类 Petri 网关系的定义，用过渡变迁将 AS/RS 中的各个 Petri 模块连接起来就构成了整个立体仓库出入库调度系统的 OOTPN 模型，如图 3-5 所示。该模型可分为四个对象模块：缓冲区模块、入库模块、出库模块和堆垛机故障模块，而缓冲区模块又可以分为入库缓冲区模块、出库缓冲区模块和出库等待模块。各个模块间相互独立，通过过渡变迁联系起来。例如 T_{in1} ：判断货物进入缓冲区，即进入入库缓冲区模块； T_{in4} ：判断货物进入入库台，即进入入库模块； K_{in1} ：入库台被占用；货物进入缓冲区； K_{in1} ：入库台空闲，货物进入入库台。这里的 T_{in1} 、 T_{in2} 就是过渡变迁，而 K_{in1} 、 K_{in2} 则是判断这些过渡变迁发生的规则，余下皆类似。对各对象模块内的库所及变迁的含义如下：

P_c 表示货物由生产车间送到自动化立体仓库， P_{AGV} 表示 AGV 空闲， t_{in} 表示 AGV 将货物送到，货物准备进入立体仓库。 P_{in} 表示货物到达立体仓库后在等待进入入库台或是缓冲区。

入库缓冲区模块 P_{M1} ： P_{11} ：货物准备进入入库缓冲区； P_{12} ：货物在入库缓冲区中排队等待入库； P_{13} ：货物准备离开入库缓冲区； P_{14} ：入库缓冲区空闲； t_{11} ：入库台被占用，送货物入缓冲区； t_{12} ：入库台空闲，货物进入入库台； $Time_1$ 表示接到消息到开始到入库台的时间延迟。

出库等待区模块 P_{M2} ： P_{21} ：货物准备进入等待状态 P_{22} ：货物等待出库； P_{23} ：货物准备离开出库等待区； t_{21} ：货物状态变为等待状态； t_{22} ：堆垛机空闲，货物进入堆垛机； $Time_2$ 表示货物等待堆垛机到来的时间延迟。

出库缓冲区模块 P_{M3} ： P_{31} ：货物准备进入出库缓冲区； P_{32} ：货物在缓冲区

载货物;

出库模块 P_{M5} : P_{51} : 货物正从出库货位装载到堆垛机中; P_{52} : 货物在被堆垛机运输出库中; P_{53} : 货物到达出库台, 等待出库; t_{51} : 接到出库指令且空闲堆垛机与所要出库货物在同巷道内, 装载货物; t_{52} : 装载完毕, 堆垛机开始运货物出库, 货位空闲; t_{53} : 将货物从堆垛机卸载到出库台; 堆垛机故障处理模块 P_{M6} : P_{61} : 堆垛机准备维修; P_{62} : 堆垛机修理中; P_{63} : 堆垛机准备投入使用; t_{61} : 堆垛机故障, 开始维修; t_{62} : 修理完毕; $Time_6$ 表示堆垛机的维修时间。

其它的库所和变迁的含义是: P_{pin} : 入库台空闲; P_{pout} : 出库台空闲; P_w : 有货位空闲可用; P_e : 堆垛机空闲可用; P_b : 缓冲区空闲; M_0 : 立体仓库收到出库指令, 判断堆垛机空闲否; P_{AGV} : 外部 AGV 空闲; P_{out} : 货物出库完毕。

在本模型中, P_{in} 、 P_{out} 、 M_0 这三个库所作为自动化立体仓库调度系统和外界设备的接口, 可以根据调度需要增加或减少变迁和库所, 而整个模型则可视为一个封装的独立模块, 故而可对其独立进行研究。

特别需要指出的是, 出库等待区是一个虚拟的模块, 其库所、变迁和流关系在图 3-5 中均用虚线条表示。因为若等待出库的货物对应的堆垛机忙, 则上位机认为该货位的货物进入了“出库等待区”, 实际上该货物的物位置仍然是在立体仓库的货位中。

在该模型中, P_{11} 和 P_{14} 分别是入库缓冲区模块 P_{M1} 的输入位和输出位; P_{31} 和 P_{34} 分别是和出库缓冲区模块 P_{M3} 的输入位和输出位; P_{41} 和 P_{45} 分别是入库模块 P_{M4} 的输入位和输出位; P_{11} 和 P_{14} 分别是出库模块 P_{M5} 的输入位和输出位。 T_{in1} 、 T_{in2} 这两个过渡变迁之间存在着冲突, 也就是货物到达立体仓库后是直接入库还是在入库缓冲区中等待, 它可由缓冲区资源的最大可用度 (即缓冲区的最大容量) 规则来判定。堆垛机在判断应当出库还是

入库时存在托肯间可用性的冲突，它可以通过入库优先或出库优先这一判定规则来解决。

3.3 对 AS/RS OOTPN 模型的分析

AS/RS 出入库调度的 OOTPN 模型建立起来后,就需要对所建立的 Petri 网模型按照 Petri 网的分析方法进行分析,并在所建立模型的基础上对系统的综合性能进行分析。

3.3.1 Petri 网分析技术^[22]

Petri 网不但能对系统可能发生的各种行为进行模拟,而且还可以通过一定得 Petri 网分析技术,对系统的有界性、守恒性、可达性、可覆盖性和活性等性能进行分析。目前已经提出的 Petri 网的分析技术主要有两种:可达性树和矩阵方程。

1. 可达性树

可达性树 (Reachability Tree) 表示 Petri 网的可达 (标识) 集。举一个例子,考察图 3-6 的带标识的 Petri 网,其初始标识是 $(1, 0, 0)$ 。在该

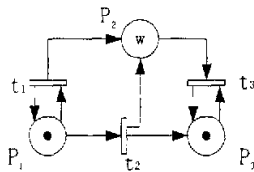


图3-6 一个带标识的Petri网

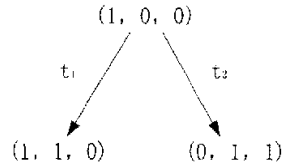


图3-7 构造可达性树的第一步

标识下,两个变迁 t_1 和 t_3 是使能的。因为要考察整个可达集,我们可以用由变迁节的引发产生的标识在可达性树上确定新的结点,画一条弧从初始标识指向新的标识,并用所引发的变迁节作为这条弧的标识 (图 3-7)。这

个（部分）树给出了从初始标识立即可达的所有标识。

然后，可以进一步考察新标识中可达的标识。从标识 $(1, 0, 0)$ ，我们可以再引发 t_1 （得出 $(1, 2, 0)$ ）和 t_2 （得出 $(0, 2, 1)$ ）。从 $(0, 1, 1)$ ，我们可以引发 t_3 （得出 $(0, 0, 1)$ ）。这就产生出图 3-8 的树。对新的 6

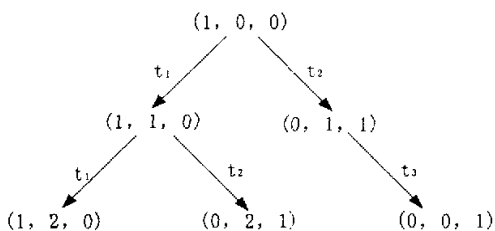


图 3-8 构造可达性树的第二步

个标识，我们再重复上面的做法又可以得到一个新的树。

如果把上面过程重复下去，任何一个可达的标识最终都能一一列出来。然而，这样得出的可达性树就会是无限的。可达集中的每一个情况都会出现在可达性树上。因此，对于任何具有无限可达集的 Petri 网，它的可达性树也是无限的。即使是一个具有有限可达集的 Petri 网，也有可能存在无限的可达性树（图 3-9）。这个树代表所有可能的变迁节引发序列。从这个树的根开始的每一条路，对

应着一个合法的变迁节序列。如果想要可达性树的分析方法可用，就必须把树的规模限制在有限的规模内。

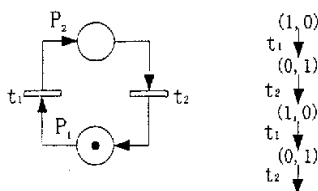


图 3-9 有无限可达性树的简单 Petri 网

常用的手段是把可达性树简化为有限的表示法。考察从标识 μ 开始而终结于 $\mu' (\mu') > \mu$ 的一个变迁节引发序列 σ 。除了在某些位置里具有“额外的”标记外， μ' 和 μ 是相同的，即 $\mu' = \mu + (\mu' - \mu)$ 且 $\mu' (\mu') > \mu$ 。由于变迁节的引发不会受额外的标记的影响，序列 σ 可以再次引发。假设引发 σ 后产生

标识 μ'' ，因为这个引发序列的效果是在标识 μ' 上加以 $\mu' - \mu$ 。所以，我们有 $\mu'' = \mu' + (\mu' - \mu)$ 或 $\mu'' = \mu' + 2(\mu' - \mu)$ 。一般的，我们可以引发变迁节序列 σ 任意数(n)次，以产生标识 $\mu' + n(\mu' - \mu)$ 。因此，对于从序列 σ 的引发中增加了标记的位置可以简单的重复 σ 若干次，来得到任意多个标记。

用一个专门的记号 ω 表示这种重复中所得到的标识数为无限多个。可以把 ω 看成是“无限大”，而它代表的意思是标记数为任意大的。对任意常数 a ，规定 $\omega + a = \omega$ ； $\omega - a = \omega$ ； $a < \omega$ ； $\omega' \leq \omega$ 。这些运算只对符号 ω 有定义。这对于构造可达性树是必要的。树中的每一个结点都关联着一个广义的标识，广义是指位置中的标记数可以是一个非负整数或是符号 ω 。把树的结点分类为边界点、端点、复制结点或内部结点。边界点是未被算法处理过的结点，算法处理后，将变为端点、复制结点或内部结点之中的一种。规定初始标识为可达性树的根、算法开始，起初把它作为一个边界点。只要边界点还存在，算法就对它们一一处理下去。

构造可达性树的算法的一个十分重要的性质是：它是能够终止的。为了证明这一点，我们必须指出，算法不可能一直继续下去不断的产生新的边界点。为此，给出三条引理和一个定理，具体证明参见文献[23]。

引理 3.1 在每个结点都只有有限个直接后继元的无限有向树中，存在着一条从根结点开始的无限有向路。

引理 3.2 任何一个非负整数的无限序列中，都有一个非降的子序列。

引理 3.3 任何由广义非负整数（即非负整数加上符号 ω ） n 向量构成的无限序列包含着一个非降的子序列。

定理 3.1 Petri 网的可达性树是有限的。

2. 矩阵方程分析法简介

矩阵方程也是一种 Petri 网的分析技术，因为 Petri 网 (P, T, I, O, u_0) 的另一个定义是用两个矩阵 D 和 D^* 表示输入和输出函数。每个矩阵有 m 行(每行对应着一个变迁节)和 n 列(每列对应着一个位置)。定义： $D^*[j, i] = \#(P_i, I(t_j))$ ， $D^+[j, i] = \#(P_i, O(t_j))$ 。 D 定义了各变迁节的输入，而 D^* 定义了各变迁节的输出。

一个 Petri 网的矩阵定义形式 (P, T, D^-, D^+) 同标准形式是等价的, 只不过是把它改成向量和矩阵的术语。设 $e[j]$ 是一个除了第 j 个分量为 1 以外, 其余都是零的 m 维向量。变迁节 t_j 用这个单位 m 维向量来表示。这样, 当

$$\mu \geq e[j] \cdot D^-$$

时, 在标识 μ 下, t_j 使能。而如果 t_j 是使能的, 在 μ 下引发 t_j , 就得到

$$\begin{aligned} d(\mu, t_j) &= \mu - e[j] \cdot D^- + e[j] \cdot D^+ \\ &= \mu + e[j] \cdot D \end{aligned}$$

其中, 定义矩阵 $D = D^- + D^+$ 。

对于一个变迁节引发序列 $s = t_{j_1} t_{j_2} \dots t_{j_k}$, 有

$$\begin{aligned} d(\mu, s) &= d(\mu, t_{j_1} t_{j_2} \dots t_{j_k}) \\ &= \mu + e[j_1] \cdot D + e[j_2] \cdot D + \dots + e[j_k] \cdot D \\ &= \mu + f(s) \cdot D \end{aligned}$$

向量 $f(s) = e[j_1] + e[j_2] + \dots + e[j_k]$ 称为序列 $s = t_{j_1} t_{j_2} \dots t_{j_k}$ 的引发数向量。

可以证明, 非负整数向量 $f(s)$ 是矩阵方程

$$\mu' = \mu + x \cdot D$$

的一个解。其中是 μ 初始标识, 而 μ' 是任何可达的标识。若 μ' 可以从 μ 到达, 则上述方程存在着非负整数解, 如果没有这样的解, μ' 就不能从 μ 到达。

3.3.2 AS/RS 出入库调度 OOTPN 模型的 Petri 网分析

本文对 AS/RS 出入库调度的 OOTPN 模型的 Petri 网分析采用的是可达性树的方法, 这是因为矩阵方法的矩阵 D 不能够完全恰当的反映出 Petri 网的结构, 而且引发向量中缺少序列信息会导致方程解的不唯一, 多元矩阵方程的计算也比较复杂, 而本文只是对 Petri 网做定性分析, 因此用可达性树方法更加简单一些。关于 Petri 网的有界性、守恒性、可达性、可覆盖性和活性的概念在第二章 2.3.2 中已经给出, 此处就不赘述。

1. AS/RS 出入库调度 OOTPN 模型 Petri 网的有界性分析

对于一个 Petri 网，当且仅当符号 ω 不出现在它的可达性树时，它是有界的。若符号 ω 出现，则 Petri 网无界。

在图 3—5 给出的模型中，记模型的库容量为 C ，输入变迁节 t_{in} 的输入次数 n_i 可以通过限制运行时间来控制（系统运行时间不可能是无限），而且可以知道输出任务量 n_o 无论如何不可能大于 C （因为出库任务量不可能大于库容量）。因为 $n_i < \omega$ ， $n_o < C < \omega$ ，所以可以推知本模型的可达性树中不存在 ω ，所以可以知道该 Petri 网模型是有界的。由于并非所有的位置的界都是 1（堆垛机位置 P_e 的界就大于 1），因此，该模型并不安全，本 Petri 网模型可能会出现死锁。因此就需要优化调度规则以规避死锁，这将是后面要讨论的问题。

2. AS/RS 出入库调度 OOTPN 模型 Petri 网的守恒性分析

位置中的标记数可以用一个非负的权向量来记录。因为可达性树是有限的，可以对所有各个标识计算其各分量的加权和。如果得到的所有加权和都相等，这个网就是关于这个权向量守恒的，否则是不守恒的。

如果一个 Petri 网是守恒的，就必然存在这样的权向量 $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 以及加权和 s ，使得对于可达树中的每一个标识 $\mu(x)$ 都有

$$w_1\mu[x]_1 + w_2\mu[x]_2 + \dots + w_n\mu[x]_n = s$$

再加上约束条件 $w_i > 0$ ， $i=1, 2, \dots, n$ ，就可以得到了对权向量的全部限制。方程可解，结果就是权向量。

在图 3—5 所示的 Petri 网中，不考虑输入 P_{in} 和输出 P_{out} 这两个接口，整个网系统中所有的标记数既不会增加也不会减少，它只是在网系统中移来移去，因此，可以认定该 Petri 网系统是守恒的。

3. AS/RS 出入库调度 OOTPN 模型 Petri 网的可覆盖性分析

关于可覆盖性问题，我们希望确定对于一个已知的标识 μ' ，是否有一个标识 $\mu'' \geq \mu'$ 是可达的。这个问题可以通过对可达性树的观察解决。给定一个初始标识 μ ，构造出可达性树，然后搜索满足 $\mu[x] \geq \mu'$ 的结点。如果

找不到这样的结点, 标识 μ' 就不可能被任何可达的标识覆盖。如果找到了这样的结点, $\mu[x]$ 就结出了一个覆盖 μ' 的可达的标识。

对于图 7.3 给出的 OOTPN 模型, 以其中的 P_{M4} 模块为例, 标识 $(n, 0, 0, 0, 0)$ 可以通过触发 t_{41} 到达 $(n-1, 1, 0, 0, 0)$, 然后再触发 t_{42} 到达 $(n-1, 0, 1, 0, 0)$ 等等, 也就是说模块 P_{M4} 可以找到标识使得新的情态可达, 因此该模块满足可覆盖性。依此类推, 其它模块也满足可覆盖性, 所以该模型满足可覆盖性。

3.3.3 AS/RS 出入库调度 OOTPN 模型的死锁分析

可达性树可用来解决安全性、有界性、守恒性和可覆盖性等问题, 但一般来说, 它不能解决可达性和活性问题, 也不能确定一个引发序列是否可能。这是由于 ω 符号的存在而受到的局限。符号 ω 使某些信息丢失, 它抛弃了具体的数值, 而只告诉人们它们可以变成很大的数。因此, 需要用其它方法来分析 Petri 网的活性问题。

1. 死锁问题简介

在 Petri 网中, 死锁就是一个 (或一组) 变迁不能被引发。死锁是一种循环等待状态, 局部死锁会导致系统效率下降, 若不及时处理则会扩展到整个系统, 导致系统瘫痪^[24]。因此对系统中死锁状态的检测与控制是 AS/RS 系统仿真的一个重要问题。

Petri 网的活性研究具有非常重要的理论和应用价值, 也是 Petri 网理论工作者花费很大精力研究的问题。对一般 Petri 网的活性研究至今没有得到解决。基于 Petri 网人们研究了很多种方法来处理 AS/RS 出入库调度系统中的死锁问题, 大致可以分为以下几类:

- ①死锁预防方法
- ②死锁避免方法
- ③死锁校正方法
- ④综合法

2. 死锁分析

对自动化立体仓库出入库系统的 Petri 网模型而言, 规避死锁是评价模型优劣的一个重要标准。

Goffman^[25]给出了死锁发生的四个必要条件:

①互斥: 资源只能分配给某个确定的任务或是空闲, 资源不能同时为两个任务占据;

②非抢占: 资源不可抢占, 只能被占用它的任务自愿释放(堆垛机完成了相应操作);

③占用并等待: 占据某些资源的任务请求另外的新资源, 而这些资源为其它任务占据;

④循环等待: 存在一组资源请求 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 其中 P_1 等待 P_2 占据的资源, P_2 等待 P_3 占据的资源, \dots , P_n 等待 P_1 占据的资源。

由文献[24]可知, 制造系统总是满足前三个条件不发生, 而图 3-5 所示模型是针对制造系统中在线立体仓库的出入库调度建立的, 因此同样也满足前三个条件不发生。对于第四个条件, 可以根据文献[26]给出的死锁的充要条件和两个定理进行判断。

对本系统设备的符号定义如下: M_{ip} 是入库台设备; M_{op} 是出库台设备; M_e 是堆垛机设备; M_w 表示货位设备, M_b 表示缓冲区设备, M_{AGV} 表示 AGV 设备。具体证明过程如下:

①先找出本系统设备间的所有依赖关系: $M_b(t_{12}) \rightarrow M_{ip}$, 表示设备 M_b 在变迁 t_{12} 依赖于 M_{ip} ; $M_{ip}(t_{43}) \rightarrow M_e$; $M_{ip}(t_{43}) \rightarrow M_w$; $M_e(t_{52}) \rightarrow M_{op}$; $M_{op}(t_{54}) \rightarrow M_{AGV}$; $M_{op}(t_{31}) \rightarrow M_b$ 。

②判断是否存在循环依赖结构。由以上对系统的分析可知, 显然存在一个循环机构 $CDS = [M_b(t_{12}) M_{ip}(t_{43}) M_e(t_{52}) M_{op}(t_{31}) M_b]$, 即 M_b 在 t_{12} 依赖于 M_{ip} , 而 M_{ip} 在 t_{43} 依赖于 M_e , M_e 在 t_{52} 又依赖于 M_{op} , 最后, M_{op} 在 t_{31} 又依赖于 M_b 。这样就形成了一个循环依赖结构。

③判断是否会出现循环等待。由循环等待的定义可知, 若出现循环等

待, 那么所有参与循环依赖结构的资源, 都将消耗在它们的等待位置上。对本模型而言, 若所有 M_b 消耗在 P_{11} 中, 所有 M_{ip} 消耗在 P_{41} 和 P_{42} 中, 所有 M_e 消耗在 P_{51} 中, 所有 M_{op} 消耗在 P_{53} 中, 此时系统处于循环等待状态。

④得出系统死锁的充分必要条件。如果模型出现③中所述的情况, 由 Petri 网基本定义知, 必有 $n_b - n_{ip} - n_e - n_{op} = 0$ (n 代表设备数目)。由此可知, 如果 $n_b - n_{ip} - n_e - n_{op} = 0$ 不满足, 系统就不会出现死锁。所以, 该系统为活性的充分必要条件为 $n_b - n_{ip} - n_e - n_{op} < 0$, 或 $n_{ip} + n_e + n_{op} > n_b$ 即堆垛机和出入库台的 Token 数之和要大于缓冲区内等待货物的 Token 数, 也就是说立体仓库出入库系统对系统中的货物的处理能力要大于缓冲区内等待出入库的货物数, 此时系统不会出现循环等待。

以上证明得到了图 3-5 所示的系统不会出现循环等待的充要条件。由于该系统已经满足 Goffman 给出前三个条件不发生, 只要该系统满足上面经过证明推导所给出的条件, 系统就不会出现死锁。

3.3.4 自动化立体仓库出入库调度系统的性能分析

一般来说, AS/RS 出入库调度系统的性能分析主要从系统整体、运输设备和货物三个方面进行, 具体的指标有系统的总体调度运行效率、运输设备的运输时间、利用率、货物的滞留时间, 运行的成本等等。

对于 AS/RS 出入库调度的 OOTPN 模型来说, 引入时间参数后就可以对系统的单元进行性能评价。若延时变迁的时间参数是确定的, 性能指标的计算相应也比较简单。从单元模型的初始状态开始到其中止状态所耗费的时间, 就是系统总的运行时间。如果对资源位中代表货物的某个托肯进行跟踪, 就可以得到该货物的通过时间。对具体的运输设备来说, 记录代表其延时变迁的触发次数与相应的触发时间, 通过累计, 可以得到设备的运行时间, 和系统总的运行时间比较, 能够得出设备的利用率, 并进一步得到系统的生产率。下面介绍模型的几个基本性能指标。

①特定条件 C 成立的概率

$$PROB(C) = \sum_{j \in S_1} \pi_j$$

其中, $S_1 = \{j \in (1, 2, 3, \dots, s) : \text{标记 } M \text{ 满足条件 } C\}$, 就是说 $PROB(C)$ 为所有满足特定条件 C 的标记的稳态概率之和。

②资源位 P_i 托肯数等于 $k(i=1, 2, 3, \dots)$ 的概率

$$PRBO(P_i, k) = \sum_{j \in S_2} \pi_j$$

式中, $S_2 = \{j \in (1, 2, 3, \dots, s) : M_j(P_i) = k\}$, 这里 $M_j(P_i) = k$ 表示位置 P_i 的标记, 即托肯数为 k 。

③资源位 P_i 托肯数的期望值

$$ET(P_i) = \sum_{k=1}^K k PROB(P_i, k)$$

式中, K 是包含于任一可及标记中的 P_i 的最大托肯数。

④延迟变迁 T_t 的发送率

$$TR(t_j) = \sum_{j \in S_3} \pi_j F(M_i, t_j)$$

式中, $S_3 = \{j \in (1, 2, 3, \dots, s) : T_j \text{ 被 } M_j \text{ 使能}\}$ 。

⑤资源位 P_i 的平均等待时间

$$WAIT(P_i) = ET(P_i) / \sum_{t_j \in IT(P_i)} TR(t_j) = ET(P_i) / \sum_{t_j \in OT(P_i)} TR(t_j)$$

式中, $IT(P_i)$ 和 $OT(P_i)$ 为 P_i 的输入和输出变迁集合。

在图 3-5 所示的 OOTPN 模型的各个 Petri 网对象子网模型块中, 表示输送的延迟变迁的发送率就是该模型块所描述设备的生产率; 资源位中托肯数的期望值标识处于该为所描述状态的货物数, 进一步可知相应设备当前的货物队列长度和输送设备能力等指标; 单元中与延迟变迁相关的资源位的平均等待时间之和就是输送时间。如果对某项指标不满意, 可以调整模型的触发条件和控制规则来重新进行分析, 直到得到满意的效果。具体的仿真算法和仿真过程将在第五章中给出。

3.4 含有信息位的 AS/RS 出入库调度的 OOTPN 模型

Petri 网模型中的信息位表达了上位机与设备间数据的交互和设备间的信息传递。信息位中的托肯表示系统中传递的信息，它的流动用来描述信息流。因此，含有信息位的 Petri 网模型主要被用于对设备的控制建模与分析。含有信息位的 OOTPN 模型不但建立了单元模型，而且还确定了系统的控制逻辑。而本文的重点是对 AS/RS 出入库调度模型的规则进行优化，因此，在这里只是给出含信息位的 AS/RS 出入库调度的 OOTPN 模型，而不对其进行具体分析，模型如图 3-10 所示。

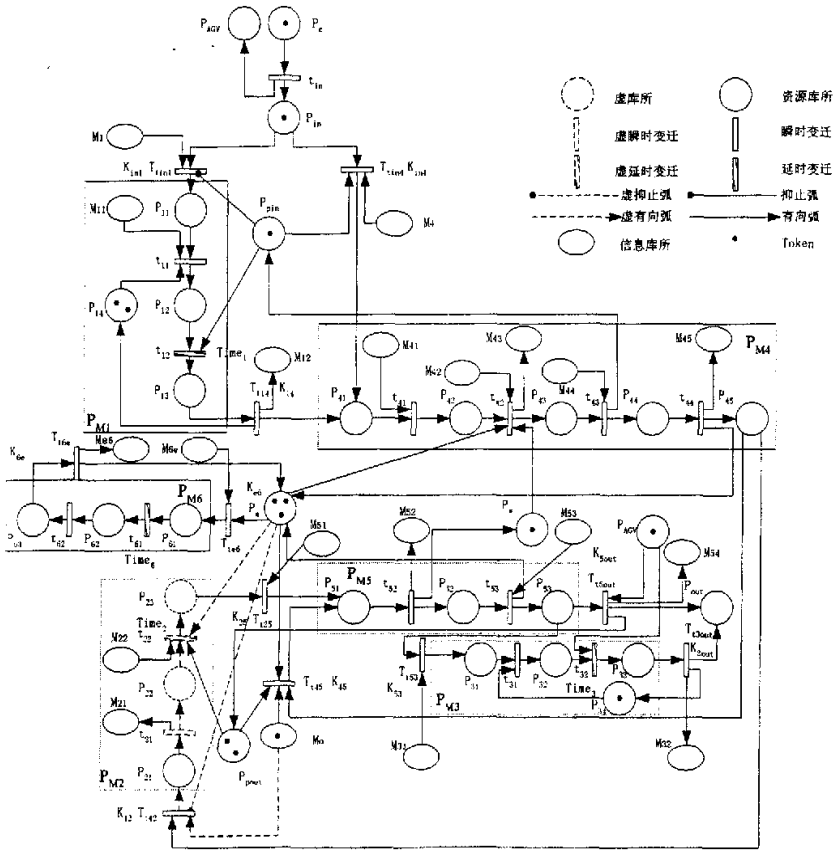


图3-10 立体仓库出入库调度系统的OOTPN模型（含信息位）

图 3-10 所示模型中的状态位、变迁、运行规则均与图 3-5 的 OOTPN 模型相同，在此只对信息位的含义进行说明如下：

M₁: 进入入库缓冲区指令；M₄: 直接入库信息指令；M₁₁: 装载货物指令；M₁₂: 卸载完毕，出库指令；M₃₁: 进入出库缓冲区；M₃₂: 出库完毕消息；M₄₁: 入库设备调整指令；M₄₂: 堆垛机装载指令；M₄₃: 入库台空闲指令；M₄₄: 堆垛机运输指令；M₄₅: 卸载指令；M₅₁: 装载指令；M₅₂: 装载完毕，堆垛机开始运输；M₅₃: 卸载指令；M₅₄: 出库完毕消息；M_{6e}: 堆垛机故障消息；M_{6e}: 故障修理完毕。

3.5 生产车间设备单元的 OOTPN 模型

生产加工车间与自动化立体仓库可以作为两个独立的模块来建模和分析，它们之间通过上位机联系起来。关于生产车间系统（主要指 FMS）的 Petri 网建模已经有很多例子^[19,20,21,22]。

本文按照 AS/RS 出入库调度系统模型的建模方法给出了一般的生产车间的 OOTPN 模型。

1. 设备资源分类

生产制造单元中的设备可以分为以下几类（见图 3-11）：

2. 建立设备类资源的通用的 OOTPN 模型

从图 3-11 可以看到，自动化仓库可以被看作生产车间的一个组成模块，通过

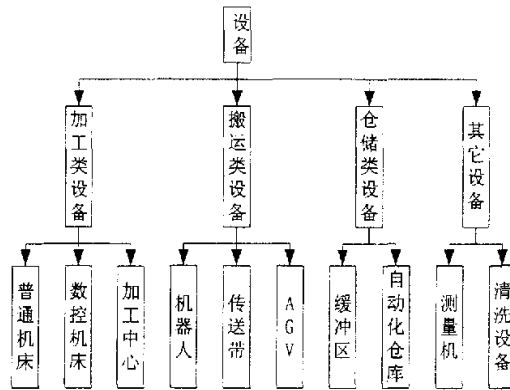


图3-11 生产车间设备的分类

相应的接口连接。根据所得到的类图就可以为每类设备资源建立的 OOTPN

模型，这里以加工设备类为例（见图 3-12）：

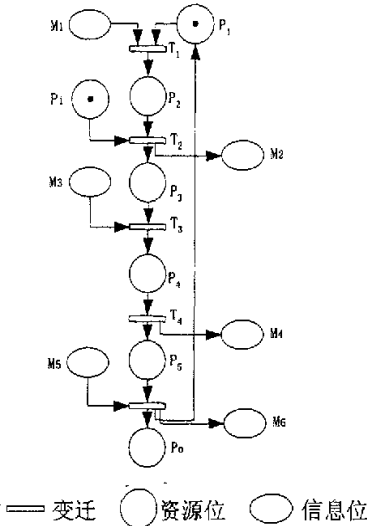


图3-12 加工类设备的OOTPN模型

T_1 —开始调整； T_2 —开始装载； T_3 —开始加工； T_4 —开始卸载； T_5 —设备状态置为空闲
 P_1 —设备空闲； P_2 —设备调整完毕等待装载； P_3 —设备装载完毕等待加工； P_4 —设备加工完毕等待卸载； P_5 —设备卸载完毕； P_0 —工件加工完毕离开
 M_1 —设备调整指令； M_2 —装载指令（发给装载设备）； M_3 —装载完毕信号（装载设备）； M_4 —卸载指令（发给卸载设备）； M_5 —卸载完毕信号（卸载设备）； M_6 —加工完毕信号
 其它的设备类如搬运类设备、缓冲区类设备等的模型均与此类似，这里就不一一列出。

3. 建立生产车间的 OOTPN 模型

本模型只是建立生产车间一般设备的 OOTPN 模型，具体的不同类设备及其数量是通过 Token 的染色实现，这样做的优点是可以大大简化系统模型，模型如图 3-13 所示。

P_{M1} 、 P_{M2} 、 P_{M3} 分别表示加工类设备单元，输送类设备单元和缓冲区类设备单元，各个具体的设备则通过颜色集来区分。AS/RS 模块前面已经分析过，此处只作为一个封装的模块参与。各个块中的状态位、资源位和变迁的含义此处不一一解释，仅对连接各个模块间的过渡变迁进行说明： T_{11} ：输送设备可以被缓冲区模块使用； T_{12} ：工件加工完毕后由输送设备运走（此处，工件作为一个输入位进入输送设备模块）； T_{13} ：缓冲区模块内的工件被空闲的运输设备运走； T_{14} ：AS/RS 模块内的货物被输送设备运走； T_{15} ：加工设备模块释放输送设备资源； T_{16} ：给缓冲区输送工件的输送设备完成任务后被释放； T_{17} ：完成对 AS/RS 模块的货物输送任务后释放输送设备资源；

T_{18} : 输送设备输送工件并根据目标指令将工件送往加工设备、缓冲区或是自动化立体仓库。

正如图 3-13 所示模型一样, 按照面向对象思想建模, 生产车间和立体

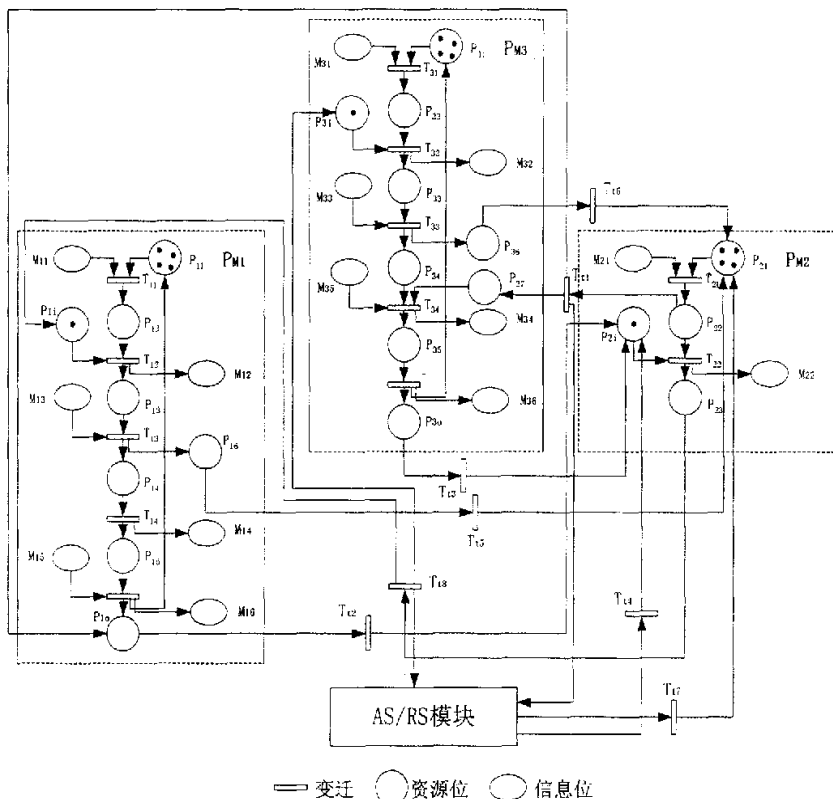


图3-13 生产车间的OOTPN模型

仓库可以作为两个独立封装的模块分别研究, 即使是模块内部也还可以进一步细分, 这样既方便模块的添加修改也有利于模型的分析。

3.6 本章小结

本章介绍了面向对象的建模思想和 OOTPN 的定义, 然后建立了自动化立体仓库的 OOTPN 模型 (无信息位), 并对该模型的 Petri 网性能和系统性

能进行了分析，给出了不出系统现死锁的条件。最后为了给自动化立体仓库调控制提供依据，还给出了含信息位的自动化立体仓库的 OOTPN 模型和一般生产车间的 OOTPN 模型。

4 AS/RS 出入库调度规则算法及其优化

在上一章给出了自动化立体仓库出入库调度的 OOTPN 模型，但图 3-5 所示的模型只是建立在简单的调度规则之下，效率并不高。事实上，好的调度规则不但可以提高系统的运行效率，而且还可以在设备资源减少的情况下避免死锁状况的出现。

4.1 调度规则优化算法的意义及方法

调度问题是指产品在制造过程中，在满足各种约束（如作业优先级、设备能力、交付日期等）的前提下，实现人力、材料、设备等共享资源的有效配置及使用顺序，以达到生产费用最低的目的^[27]。

1. 调度规则优化的意义

目前，求解调度的方法大致可分为两类：一类是基于模型的生产调度。这种方法的求解步骤是：首先，在定义调度问题的基础上建立调度模型（常用的有数学规划模型、控制系统模型等）；然后，基于该模型运用一定的调度算法进行求解。这类方法的特点是根据一定的性能指标进行寻优，对规模小、相对简单的问题能得到令人满意的最优解；但随着问题规模的增大，求最优解将变得不可行。另一类是基于规则的调度，这种方法完全根据一定的规则或策略来确定生产系统中的下一步操作。通过运用各种调度规则，能够为局限于规则覆盖范围内的问题产生合理的解决方案^[28]。这种方法的特点是不必进行大量的计算，有了合适的规则以后可以很快的生成调度方案。这种方法放弃了寻找最优解的努力，转而寻找可行解，其结果是建议性的，可用于指导实际系统调度。

2. 调度规则优化的方法

制造系统调度规则的优化方法有很多，常见的有以下几种：

专家系统：专家系统是一种基于规则的推理方法，它以规则集为基础，运用相应的推理机制，通过推理机推理得出优化的调度算法。由于专家的知识库本身就是由规则组成的，因此这是一种比较便利的优化方法。

启发式调度规则算法：启发式调度规则是人们为满足系统动态调度实时性要求而从具体生产实践中抽象提炼出来的若干经验方法和规则。通过评价启发式调度规则对系统性能的影响，将仿真与启发式调度规则相结合。但由于启发式调度规则自身缺陷使其不能充分发挥系统的柔性，从而限制了其进一步的应用^[29]。

遗传算法：基于规则的遗传算法就是将系统的规则集分类并进行编码，然后运用遗传算法的搜索优化方法进行优化。目前已有将该方法用于柔性制造系统调度的例子^[30]。

3. 调度规则的分类。

Panwalkar 和 Iskanader 总结出 113 条规则^[31]。我们将它们按形式分为 3 类：

①简单规则。是指在与工件、操作和机器相关的真实参数基础上直接做出选择判断。如：最短加工时间，先到先服务等。简单规则的应用最为广泛，常用的简单规则列入表 4-1 中。

序号	含义	简写
1	先进先出	FIFO
2	后进先出	LIFO
3	工件优先值	JP
4	供货期最优先	EDD
5	最短运行时间	SPT
6	最长运行时间	LPT

表4-1 常用简单规则

②复合规则。是将简单规则的组合形成新规则或是将新规则再加以组合，即采取“规则 1→规则 2→...”的形式。当第 1 规则处理结果无法提供决策依据时，调用第 2 规则；或者根据环境参数的不同，选用复合规则中的一个。

③启发式规则。考虑较复杂的情况，如：定时调度，预见未来变化等。无论哪类规则，在形式上都采用产生式结构，即 IF--THEN 结构：

IF <条件 1><条件 2> ... THEN<行动 1><行动 2>...

其中，<条件>可能是运行时间最短，利用率最低等；<行动>可能为选择工件上设备加工或运输，选择某一资源等。

4.2 基于遗传算法的调度规则算法

基于遗传算法和模型仿真方法相结合的调度规则决策方法起始于一个初始种群，即一个染色体集合，其集合大小就是群体大小，集合中的每一条染色体都代表一组可用于描述具体调度方案的规则组合。在每一代种群产生之后，可调用仿真模块以产生每个染色体的各单项性能指标值(总运行时间、系统生产率、平均运行时间和关键设备利用率等)，这些值将作为适应值计算时的基础数据。每一代种群的产生都需要经历选择、交叉和变异三种遗传操作过程，整个过程执行预先设定的次数之后，适应值最好的染色体被输出作为所选择的最佳规则组合。具体方法如图 4-1 所示。

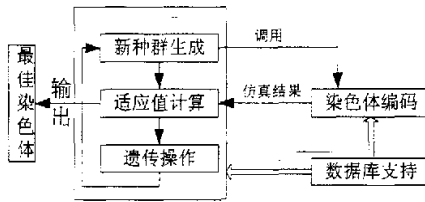


图4-1 基于遗传算法的规则决策方法

4.2.1 遗传算法（GA: Generation Algorithm）

遗传算法是由密歇根大学的 Holland 等创立的，其思想源于 Darwin 的进化论和 Mendel 的遗传学说。

用遗传算法解决调度问题时通常基于这样的思路：首先，将所有货物的每一步骤定义为一个操作，然后将所有操作的排列定义为一条染色体，染色体上的每一个基因代表一个操作，基因的排列顺序就是操作的实现顺序，随机产生的染色体通过进化达到最大程度的环境适应性。遗传算法可形式化描述如下：

$$GA=(P(0),N,I,s,g,p,f,t)$$

式中, $P(0) = (x_1(0), x_2(0), \dots, x_N(0)) \in I^N$, 表示初始种群;

$I = \{\text{编码}\}^N$ 表示编码长度方的染色体 (个体) 的全体, 也称位串空间;

N 表示种群中个体的个数也称种群规模;

s 表示选择策略;

g 表示遗传算子, 有选择算子 $O_s: I \rightarrow I$ 、杂交算子 $O_c: I \times I \rightarrow I \times I$ 和变异算子 $O_m: I \rightarrow I$

p 表示遗传算子的操作概率, 有复制概率 P_r 、杂交概率 P_c 和变异概率 P_m ;

f 适应函数;

t 表示终止准则。

具体而言, 利用遗传算法求解作业调度问题的一般过程包括:

- ① 制订遗传编码方案;
- ② 产生初始种群;
- ③ 计算群体个体的适应值;
- ④ 使用复制、交叉和变异等遗传算子产生新一代种群, 直到进化过程结束, 产生调度问题的近优解。

4.2.2 AS/RS 出入库调度系统遗传算法编码的实现^[32]

1. 编码方案

遗传算法主要通过对群体中的个体的操作来完成优化, 它只能处理以编码形式表示的个体。因此, 要使用遗传算法, 就需要将优化问题的解的参数形式转换成基因链码的形式。标准的编码方式包括浮点数编码、二进制编码、整数编码、混合编码等。由于自动化立体仓库出入库调度系统的调度规则根据不同运行阶段触发事件所对应的规则集不同, 因此, 本文采用了分段整数编码的方式构造染色体, 将每个染色体分段, 每段对应一个规则集, 如货物进入系统的顺序决策、货物选择货位 (实际上是分配货位)

决策和运输设备选择货物决策等。模型中的每个事件触发时规则的选用在染色体中用一个基因块来表示，而每个基因块允许取值为对应的决策点上可采用的规则编号。

图 4-2 所示为一个染色体编码示例，该染色体共分为七段，即按照 AS/RS 出入库流程中的

各个流程来分段。第一段表示货物进入自动化立体仓库系统的巷道分配规则(本系统一旦选定巷道后就不能更改,这是由

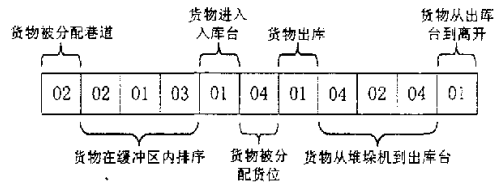


图4-2 编码示例

上位机根据 AS/RS 反馈的信息来实现的)。假设这种规则共有四类,则该基因块在 01~04 之间取值。第二段表示货物分配到具体的巷道后的排序规则,假设这种规则有三类,所以该位在 01~03 之间取值,该段中每个基因块对应一个独立巷道的入库缓冲区(这也就表示同一时刻,各个缓冲区的排队规则可以各不相同),三段基因块分别表示三个相互独立的入库缓冲区。第三段表示货物进入入库台的规则,在这里规则只有一个,就是排在最前面的货物进入入库台,所以该位取值 01,之所以加入这一段是为了是货物的整个出入库流程顺畅;第四段是入库货物选择货位,假设这种规则共有四类,则该基因块在 01~04 之间取值。前四段编码就表示了货物从到达立体仓库后一直到达货位的整个流程的所有调度规则。第五段是货物收到出库信息,准备出库的规则,这是一个过渡段,因此也只有一个规则。第六段是货物从堆垛机上到达出库台的规则,这里假设有四个规则,因此该基因块的取值应该在 01~04 之间,该段中每个基因块对应一个独立巷道的堆垛机。第七段是货物从出库台到缓冲区再到被输送设备运走,这也是一个过渡段,因此也只有一个规则。

图中各基因块可选的编码数可以随着规则的增加而增加,代码的长度也可以随着同类设备的增加而增加,但是相应的,计算量也会增加。

2. 生成初始种群

染色体由几部分构成，那么就要建立几个随机数生成器，每个随机数生成器都对应了一个规则集。由这几个随机数生成器生成预定数量的染色体，形成初始种群。根据上述的编码规则，所采用的随机数生成器如下：

- ①货物进入系统规则选择的随机数生成器—rand(4)。
- ②独立缓冲区内货物排序规则的随机数生成器—rand(5)。
- ③货物选择货位规则的随机数生成器—rand(4)。
- ④堆垛机选择出库货物规则的随机数生成器—rand(4)。

rand()为系统的本身自带的随机函数，它可根据系统时钟产生均匀随机数，其取值范围具体到本文，代表的就是相应的基因段可供选取的规则数。在第四段和第七段基因块，一个染色体生成时需分别调用四次 rand(4)。

3. 计算适应值

遗传算法在优化搜索中基本不用外部信息，仅以适应度函数为寻优依据。在具体的应用中，适应度函数的具体形式要根据求解问题而定。

本文中，遗传算法的目标是在既定的范围内（各种规则及其组合数量确定），求取一组能最大满足系统评价标准的规则组合，所设计的适应度函数是 D_j ， D_j 为每代中与第 i 个染色体所对应的系统评价指标值（由各单项指标计算得到，）。

新种群中的每一条染色体调用仿真模块进行仿真，从而获得每一条染色体（规则组合）所对应的各单项性能指标值（总工作时间、系统生产率、平均工作时间和关键设备利用率），仿真算法如下：

①确定新种群中各个体对各性能指标的隶属函数 b_{ij} 和决策矩阵 $B=[b_{ij}]_{m \times n}$ ，具体定义参见文献[32]。

②利用层次分析法（AHP）得到的权矩阵和决策矩阵的乘积确定适应

$$D = W \cdot B^T = (w_1, w_2, \dots, w_n) \cdot \begin{bmatrix} b_{11} & b_{21} & \dots & b_{m1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{1n} & b_{2n} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix}$$

度函数值。其中, B 是决策矩阵, W 是权重可达矩阵(权重向量, 通过 AHP 方法获得, 详见文献[33]), 由于在方案综合评判中考虑的因素较多, 且又是总体因素起作用, 所以根据层次分析法选择与最大评价指标对应的方案作为评价结果, 即 $D_L = \max\{D_i\}$ 。

4. 遗传操作(选择、交叉、变异)

遗传操作包括选择、交叉和变异三种类型, 它们顺序进行。

①选择操作。选择策略会影响到遗传算法的性能和结果, 常用的选择策略有比例适应度选择、基于排序的适应度选择、轮盘赌选择、随机遍历抽样选择、局部选择、锦标赛选择等。本文采用最简单常用的轮盘赌选择方法。在该方法中, 每个个体的选择概率与其适应值成正比。设群体大小为 n , 其中个体 i 的适应度为 f_i , 则该个体被选中的概率 P_i 为: $P_i = f_i / \sum_{i=1}^n f_i$ 。概率 P_i 反映了个体 i 的适应值在整个个体适应值总和中所占的比例, 占比例越大的个体, 所代表的基因结构被遗传到下一代中的可能性也越大。

②交叉操作。在遗传算法中, 交叉操作的作用非常重要, 一方面, 它使原来群体中优良个体的特性能够在一定程度上得以保持; 另一方面, 它使算法能够探索新的基因空间, 从而使新的群体中的个体具有多样性。典型的交叉算子包括一点交叉、两点交叉、多点交叉和多亲交叉等^[34]; 新一代中由交叉而来的个体数要受到交叉概率的限制, 概率过大, 不利于遗传算法的收敛; 概率过小, 寻优过程易陷于局部最优。本文选择最简单的交叉方式, 即一点交叉, 具体操作如下: 首先, 随机(rand (种群数))选择种群中的两个个体, 并随机(rand (染色体中基因个数))生成一个交叉点, 该交叉点把所选的两个个体分为前后两部分; 然后, 对这两个个体的前后两部分进行互换生成下一代中的两个新个体。

③变异操作。变异操作是为了避免寻优过程中陷入局部最优而设立的, 它以其局部搜索能力而作为交叉算子的辅助算子, 其基本步骤如下: 首先, 以事先设定的变异概率决定该代群体中的变异基因个数, 变异基因个数=变异概率×种群数×染色体中基因个数; 然后, 在群体中所有个体的码串范围

内随机确定需变异基因的位置，即 rand （种群数 \times 染色体中基因个数）；最后，随机更改需变异基因位的基因值。

常用的变异算子有基本变异、均匀变异、正态变异、非一致变异和自适应性变异等^[35]。本文采用均匀变异，其基本思想如下：

设 $i=(i_1, i_2, \dots, i_m)$ 是种群中的一个个体，根据随机选择，该个体的一个基因 i_k 需进行变异，则在该基因位所能取的最大、最小值区间随机地取一个值以代 i_k ，从而生成该个体的后代。这里需要注意的是：由于本文编码的特殊性，当选择个体中不同基因位进行变异时，对应的最大、最小值区间是不同的，如第 1、第 4、第 6 段中的最大、最小值区间是 $[1, 4]$ ，而第 3 段中最大、最小值区间是 $[1, 3]$ 。

变异操作完成之后，新一代种群就生成了。新种群中的每一个染色体可通过调用仿真模块开始新一轮进化过程，整个过程循环预定代数之后，适应值最大的染色体所代表的规则组合为所选定的调度规则组合。

5. 遗传算法的参数选择

在运行遗传算法程序时，需要对一些参数做事先选择，它们包括种群的大小、最大进化代数、交叉率和变异率等，这些参数对遗传算法的性能有很重要的影响。

①群体大小。一般说来，群体规模越大，群体中个体的多样性将越高，算法陷入局部最优的危险就越小；但群体规模太大，将会增加每次迭代的时间。从现有的文献可见，实际应用中群体个数在 20~100 之间取值可以满足问题的要求^[32]。

②交叉率。交叉率的选择决定了交叉操作的频率，频率越高，可以越快的收敛到最有希望的最优解域，因此一般选取较大的交叉率，但太高的频率也可能导致过早收敛，一般取值 0.4~0.9。

③变异率。变异率的选取一般受到种群大小、染色体长度等因素影响，通常取很小的值，一般取值 0.001~0.1。若选取较高的变异率，虽然增加了样本的多样性，但可能会因起不稳定。

4.3 本章小结

本章介绍了一般的优化调度算法，然后介绍了用遗传算法来对自动化立体仓库出入库调度系统的调度规则进行优化的步骤，并且还给出了规则的染色体编码方法和适应度值的计算方法。

5 AS/RS 调度系统模型的计算机仿真

仿真就是通过建立实际系统模型，并利用所建立的模型进行试验研究的过程^[36]。计算机仿真就是仿真程序的运行，该仿真程序表示了系统的抽象模型，可以用这个程序来研究实现系统的一些特征。本文在 3.2.2 已经给出了自动化立体仓库出入库调度的 OOTPN 模型，并在第四章分析了 AS/RS 出入库调度系统规则的优化算法，为了验证模型的可行性和并对调度规则进行优化，就必须要对所建立的模型和相应的调度规则进行分析，而对模型的计算机仿真正是一种经济、快捷的分析方法。

5.1 仿真介绍

5.1.1 系统仿真的基本概念及分类

组成系统仿真的基本要素有以下六个：实体、事件、成分、活动、进程和仿真钟，其具体定义见文献[37]。

系统仿真的目的是一一仿效实际系统的各种动态活动，并记录系统动态过程的瞬间状态，最终得到用户所关心的系统统计性能。根据模型的不同，系统仿真可分为物理仿真和数学仿真；而根据所研究系统的不同，系统仿真又可分为连续系统仿真和离散事件系统仿真。因为本文在第三章所建立的自动化立体仓库的 OOTPN 模型（图 3-5）是典型的离散事件系统模型，因此对该模型的仿真也属于对离散事件系统的数学模型进行仿真分析。

5.1.2 建模与仿真的关系及其优点

建模与仿真是指构造现实世界实际系统的模型和在计算机上进行仿真的有关复杂活动，它主要包括实际系统、模型和计算机等三个基本部分，同时考虑三个基本部分之间的关系，它通过对实际系统的观测和检测，在忽略次要因素及不可检测变量的基础上，用数学的方法进行描述，从而获得实际系统的简化近似模型。仿真关系主要研究计算机的程序，实际系统与模型之间的关系，其程序能为计算机所接受并在计算机上运行。

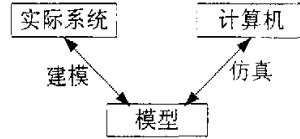


图5-1 建模仿真关系示意图

建模仿真的优点：①通过对充分而可信的仿真信息的分析，建模与仿真能为技术和管理决策提供依据；②从管理上看，仿真的根本效益可节省资源，因此，建模与仿真具有颇高的经济效益；③建模与仿真可弥补实际运行分析的不足；④建模与仿真是有效评估系统性能的重要方法。

5.1.3 离散事件系统的仿真方法^[38]

由于离散事件系统的仿真模型是一个数集，因此，对离散事件系统仿真就是对这些表示系统状态和性能的数据进行模拟和分析。

为了使仿真程序能够运行，首先要确定仿真钟的推进，离散事件系统仿真钟的推进方法有两种：下一事件步长法和固定增量法。除了确定仿真钟的推进外，还要确定仿真算法。目前常用的仿真算法有：事件调度法、活动扫描法和进程交互法。

5.2 自动化立体仓库 OOTPN 模型的仿真

5.2.1 OOTPN 模型的仿真算法

本文的仿真程序采用下一事件步长法来设置仿真钟，即通过下一最早发生的事件的触发时间来确定下一步应当执行的程序，这种方法只需在事件发生的时刻调用程序，程序运行时只需从一个时刻跳转到另一个时刻，从而可以大大缩短仿真程序的运行时间。此外，程序的仿真方法采用事件调度法，因为自动化立体仓库出入库调度本身就是一种事件触发的离散系统。此外，对于 Petri 网模型来说，变迁的激发过程等同于模型中托肯的流动过程，每一个变迁

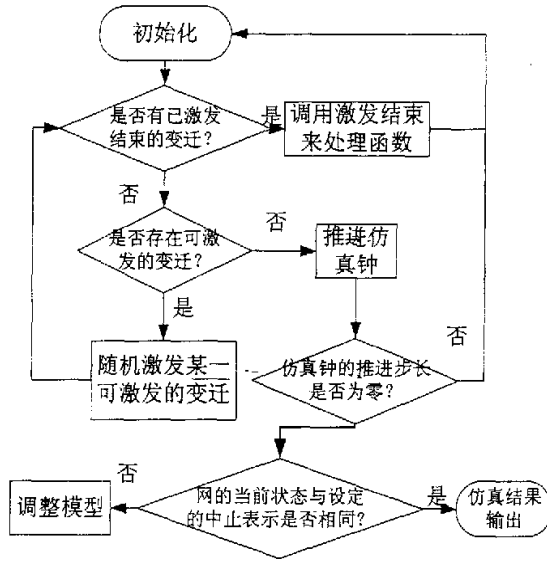


图5-2 仿真算法

的激发开始都将其前置库所中的相关托肯销毁，并且在该变迁中产生新的托肯；而在该变迁激发结束时，又会将变迁中的相关托肯销毁，并在其后置库所中生成新的托肯。根据这样的思路，采用最小下次事件（即将发生的下一事件就是与当前发生事件时间间隔最短的那个事件）推进原理，即选择各事件（变迁激发开始和变迁激发结束都可看成是仿真过程中出现的事件）中最小的时间作为系统仿真时钟的步长，来讨论仿真算法的具体实现方法。仿真算法如图 5-2 所示。但是在具体仿真运行时，针对本文所讨论

的自动化立体仓库模型（模型与实际的资源和设备相对应），托肯、库所要与具体的货物、设备资源对应起来，而变迁则应与相应的调度规则对应。

5.2.2 仿真语言的选择及程序实现

本文采用微软公司的 VC++6.0 作为仿真程序编写的开发环境^[46,47,48]。

VC++6.0 作为一种常用的编译软件，它是
以 C++ 语言为基础的，因此继承了 C++ 语言的面向对象的所有特性，这与图 3-7 所示的自动化立体仓库出入库调度的模型所具有的面相对象的特性是

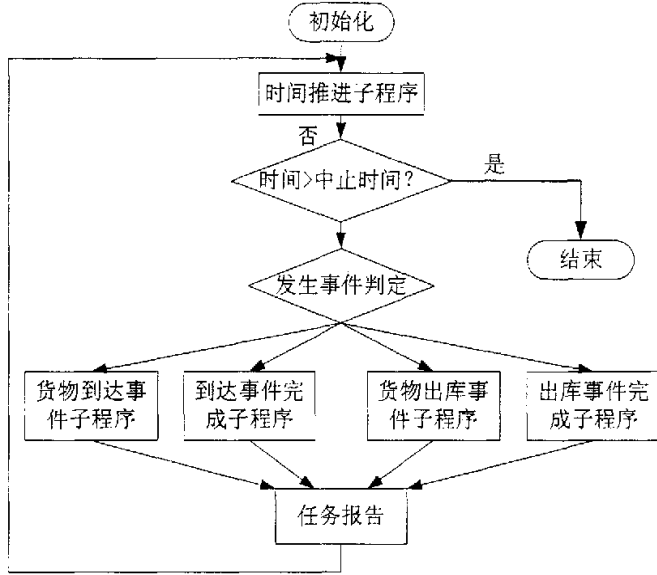


图5-3 出入库调度仿真的程序流程

一致的，这也就方便了仿真由模型向程序的转化。此外，VC++6.0 本身自带的强大的 MFC 类库也为程序的编译提供了便利。

通过第三章的分析可以知道，图 3-7 所示的 OOTPN 主要由四个事件组成，分别是：入库事件、入库完成事件、出库事件、出库完成事件。因此在仿真程序中，就分别由四个子程序来一一对应这四个事件的发生，然后通过仿真钟子程序的判断和跳转，使得程序在满足限定条件（仿真时间或仿真货物的批次等）的范围内进行运行。出入库调度仿真的程序流程如

图 5-3 所示。图 5-3 中的货物到达事件子程序、到达事件完成子程序、任务离去事件子程序、离去事件完成子程序的程序流程图如下：

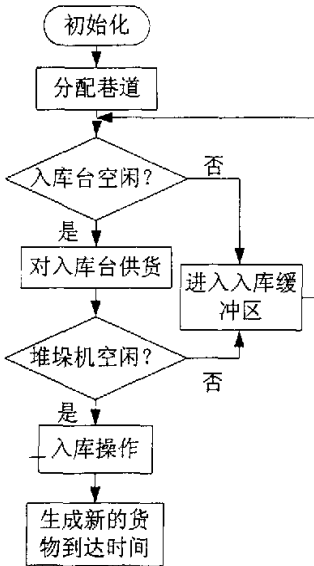


图5-4 入库事件子程序

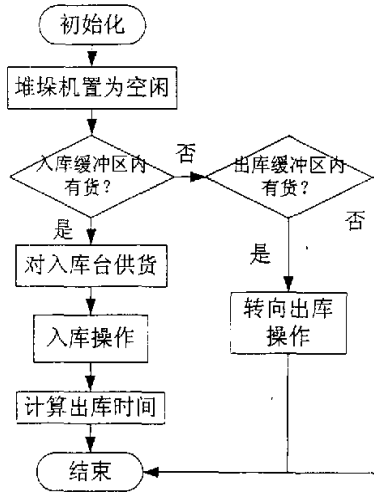


图5-5 入库事件完成子程序

在执行到达事件子程序前，首先要模拟货物的到达，即调用入库任务的生成函数生成货物到达的种类（在数据库中用货物编号区分）和数量，然后根据所到达货物的体积和数量计算任务量，即堆垛机一次入库的货物数（不同的任务批次货物数量不一定相同）。接着调用入库事件子程序，如果堆垛机空闲则进行入库操作，包括更新立体仓库的库存信息，计算入库任务完成时间并生成下一入库任务到达的时刻；如果堆垛机已经被占用，则任务在缓冲区内等待入库。当堆垛机执行完一次入库以后，调用入库任务完成事件子程序，堆垛机入库完成的时刻就被置为极大（程序中以 $1.0E+30$ 来表示），接着判断这个巷道的入库缓冲区内是否还有货物等待入库，如果有则堆垛机在当前时刻开始执行新的入库任务，没有则看出库缓冲区内是否有货物等待出库，同时进行事件的跳转（这里体现的是入库优先的原则）。

出库事件子程序与入库事件子程序的设计思路大致相同，但在初始化的时候设置了一个判断，即如果自动化仓库中没有货物可以出，则此时就要将仿真钟跳转到下一事件发生的时刻。由于采用的是入库优先原则，因此，出库事件完成子程序完成后首先要判断是否有货物等待入库，然后才

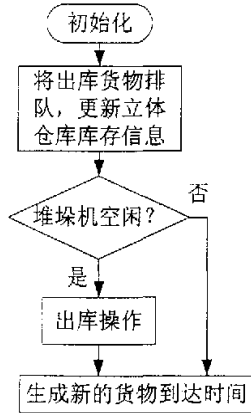


图5-6 出库事件子程序

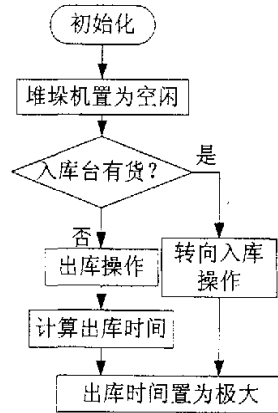


图5-7 出库事件完成子程序

是判断出库操作。

在本程序中，入库任务和出库任务到达时刻的生成都是由一个满足 $\lambda = 4.5$ 的指数随机变量发生器来生成的，具体算法可参见文献[39]。出入库调度过程中的数据（货位信息、堆垛机状态、出/入库台状态等）是由程序中定义的数组和数据库来中转和存储，程序运行所必须的初始化信息也是通过数据库来存储的。

5.3 AS/RS 出入库调度规则遗传算法优化的实现

5.3.1 遗传编码的程序实现

本文优化调度规则所用的遗传编码中，每一条染色体对应的就是自动化立体仓库出入库调度仿真运行一次时所采用的一组规则（每个基因段都

对应一个调度规则), 而每一个适应度值对应的就是仿真运行一次后得到的各项性能指标的加权

值。自动化立体仓库出入库调度系统的调度规则编码在 4.2.2 中已经给出, 这里重点介绍编码在程序中的实现。首先将各个基因段对应的规则分别编号。由于不同基因段对应的规则数目

不一定相同, 因此, 一条染色体中有几个基因段, 程序中就需要有几个不同的随机数生成器。此外, 在程序运行过程中, 当执行选择、交叉和变异等操作时, 要用不同的数组来存取各个基因段值。计算适应度值所需的权重可达矩阵的将在下一节给出。

5.3.2 用层次分析法计算权重可达矩阵

本文选取以下五条评价作为自动化立体仓库出入库调度系统的判别标准, 判别标准选取的方法可以参考文献 [32]。

B_1 —堆垛机的平均利用率;

B_2 —自动化立体仓库的货位利用率;

B_3 —入库货物滞留小于 4min 的比例;

B_4 —出库货物滞留小于 4min 的比例;

B_5 —紧急出库的货物数 (程序中以权值较高的货物来表示)。

首先, 根据文献[40]给出的不同标准两两比较的评分值标准, 本文两两比较的重要性的评分值见表 5-1。然后以系统的综合效益 (即堆垛机利用

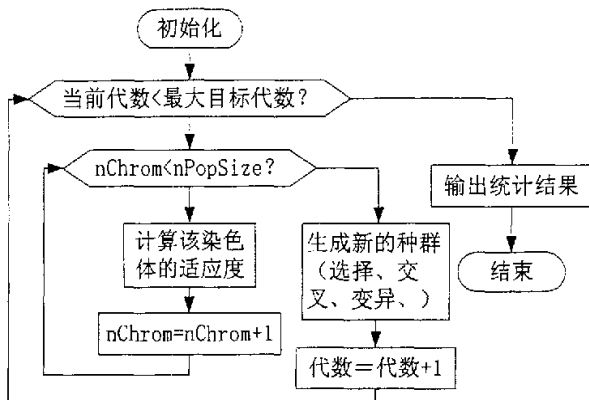


图5-8 遗传算法仿真程序流程图

率、货位利用率、出/入库缓冲区利用率以及出入库成本的综合评定)最优为目标对上面给出的五条准则的重要性两两进行比较,得到的判断矩

语言上的评价	评分值	语言上的评价	评分值
绝对重要	9	略微重要	3
重要得多	7	相同重要	1
很重要	5		

注:其余2, 4, 6, 8作为中间值

表5-1 两两比较的重要性

阵 R_A :

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
B ₁	1	2	4	5	7
B ₂	1 / 2	1	3	4	6
B ₃	1 / 4	1 / 3	1	2	4
B ₄	1 / 5	1 / 4	1 / 2	1	4
B ₅	1 / 7	1 / 7	1 / 4	1 / 4	1

然后根据求和法求得 $W_A = [0.4389, 0.2896, 0.1336, 0.0965, 0.0414]$ 。

5.3.3 AS/RS 出入库调度系统调度规则的优化分析

前面已经给出了遗传算法的算法流程图,本节将给一个算例。仿真是对是巷道式生产型自动化立体仓库的出入库调度及其调度规则的优化进行离线模拟,立体仓库共有8(行)×60(列)×6(层)=2880(个)货位,货位的编号采用联合货位编号法^[33],即货位编号的顺序与其出/入库台的距离长短相关,而货位编号的顺序同时也是货位信息表中货位编号索引的顺序,这样不但方便出库时优先考虑距离出/入库台最近的相关货物,而且还加快了出入库时对货位信息表的检索速度。自动化立体仓库每一货格的高度和宽度的规格是1.2m×1.5m;堆垛机水平速度=30m/min,垂直速度=10m/min,堆垛机每执行一次任务的取/放操作时间为10秒,仿真中止条件设定为仿真每运行一次,自动化立体仓库处理50个批次的入库货物。其中,各个基因段对应的规则集如下,规则集中规则的制定参见文献[27, 49]。

R_1 规则集(货物分配巷道的规则集): r_1 : 优先给等待货物较少的巷道分配;

r_2 : 随机分配; r_3 : 平均分配; r_4 : 若入库台空闲则分配货物,

否则平均分配。

R₂ 规则集 (货物在缓冲区内货物排序规则集): **r₁**: 先到先服务; **r₂**: 货物数量较多的任务优先入库; **r₃**: 权值高的货物优先入库; **r₄**: 体积大的货物优先入库。

R₃ 规则集 (货物由缓冲区进入入库台的规则集): **r₁**: 如果入库台空闲且缓冲区有货, 则给入库台供货, 排序最前者进入入库台。

R₄ 规则集 (入库货位分配规则): **r₁**: 距离巷道口近的货位优先被入库; **r₂**: 权值高的货位优先被入库; **r₃**: 底层货位优先被入库; **r₄**: 前列货位优先被入库。 **r₅**: 属性值高的货位优先被入库。

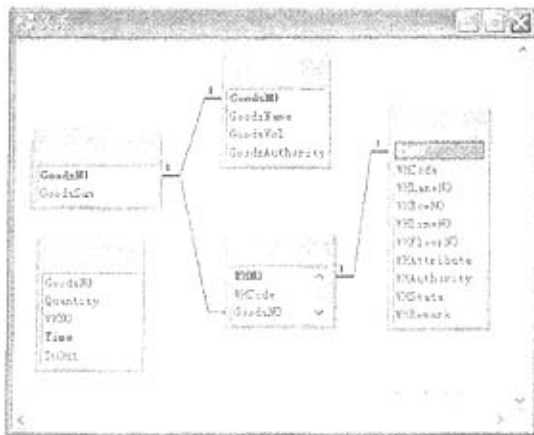
R₅ 规则集 (货物出库规则): **r₁**: 按照时间顺序对申请出库的货物进行出库。

R₆ 规则集 (货物在出库等待区的排队规则): **r₁**: 先申请的先出库; **r₂**: 货物数量多的货位先出库; **r₃**: 权值高的货物先出库; **r₄**: 权值高的货位的货物先出库;

R₇ 规则集 (离开出库缓冲区的规则): **r₁**: 按照先到先服务的规则出库。

以上各个规则集中规则的编号就代表了该段染色体基因将要选取的规则。事实上, 调度规则既可以修改, 也可以扩充。而规则集中的规则越多, 生成的染色体的多样性也就越好, 但同时也使得遗传算法不容易收敛到最优解。

仿真程序的数据支持是由“仓库管理系统仿真”数据库来完成的, 该数据库由 Access2003 编写, 数据库中各个数据表的关系如图 5—

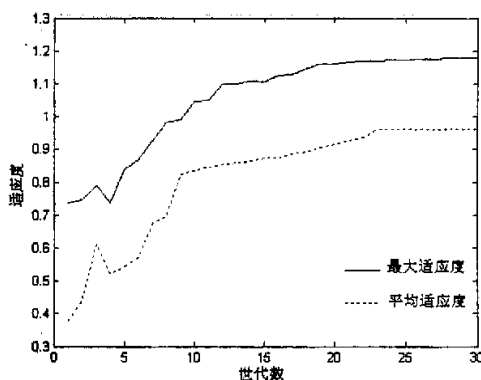


9 所示。StorageInfo 信 图 5—9 自动化立体仓库仿真数据库各数据表的关系图

息表存储了自动化立体仓库的库存信息；GoodsInfo 信息表存储了不同货物的编号、名称、体积等信息；InOutInfo 信息表记录了自动化仓库每一次出/入库的货物编号、数量、时间等信息；WHInfo 存储的是货位的编号、位置信息、忙闲状态等信息。

遗传算法参数的选取^[34]如下：种群大小（PopSize）=20；染色体长度（lChrom）=12；最大进化代数（MaxGen）=30；交叉率（PCross）=0.70；变异率（PMutation）=0.05。

仿真程序开始运行时，首先对表示规则组合的染色体进行初始化，生成一组表示自动化立体仓库出入库调度运行规则组合的染色体种群，然后，计算该种群中每一条染色体的适应度值（调用自动化立体仓库出入库调度运行的主程序，得到调度运行后的系统性能参数），接着经过选择、交叉和变异操作生成新一代染色体，计算新种群各染色体的适应度值，循环运行直到到达最大进化代数。历代适应度进行曲线如图 5-10 所示。



5-10 历代适应度进行曲线

由系统仿真的结果可以看到，随着世代数的不断进化，最终进化群体无论是最大适应度还是平均适应度都大于初始群体（适应度就是系统综合效益这一目标的量化表示，计算方法见 4.2.2 系统评价指标的计算公式），这说明最优秀的个体被保留了下来，并且最终种群内的染色体个体也优于初始种群（因为最终种群的平均适应度值>初始种群的平均适应度值）。染色体的最大适应度值由初始种群中的 0.737 上升到了最终种群中的 1.179，即最终种群中最优的调度规则调度运行所得到的系统的综合效益指

标比初始种群提高了 58.9%。

种群经过进化后，适应度最大的个体的染色体编码是 Chrom = 010100203130，适应度值 = 1.179，是在进化到第 28 世代得到的。该染色体所表示的具体含义是：货物到达自动化立体仓库后，被分配到等待货物较少的入库缓冲区；其中一个入库缓冲区按照单项入库任务货物数目的多少进行排序，其余三个则按照先到先服务的规则排序；如果入库台空闲，排在最前面的货物进入入库台；货物货位的分配规则是按照距离巷道口最近的空闲货位先入库的规则来执行；出库时，其中两个巷道优先对单项任务货物数目较多的货位出库，一个巷道则是按照货物申请出库时间的先后顺序来出库，还有一个是对权值较高的货位优先进行出库；最后，货物按照在出库缓冲区内排队的顺序依次离开自动化立体仓库。

通过遗传算法对调度规则优化仿真所得到的染色体是一个调度规则组合，表 5-3 列出了一部分通过仿真得到的表示规则组合的染色体。此外，规则集不但可以从一次仿真的结果中选取，也可以通过执行多次仿真来获得。适应度值最大的染色体编码所对应的规则组合并不是自动化仓库出入库调度的唯一规则组

染色体编码	适应度值
010100203130	1.179
210011301302	1.149
010133400112	1.132
100100210130	1.122

表5-3 不同规则染色体编码及其适应度值

合，由于自动化仓库运行状况的差异以及货物存取会因时间的不同而不同，在实际调度运行时，应根据自动化立体仓库的具体情况从最优规则集中选取合适的调度规则。

5.4 本章小结

本章首先介绍了离散事件系统模型的仿真方法，然后对图 3-5 所示的自动化立体仓库出入库调度的 OOTPN 模型及模型中调度规则的优化用 VC++ 进行计算机仿真，此外还用层次分析法分析给出了研究模型评价标准的权重可达矩阵，最后还给出了遗传算法对模型规则优化的一个算例。

6 总结与展望

6.1 本文总结

自动化立体仓库是现代物流系统的枢纽和核心,其出入库调度策略的优劣不但直接影响着自动化立体仓库的运行效率,而且还关系到整个物流系统运行的连贯性和合理性。因此,研究自动化立体仓库的调度问题对提高自动化立体仓库的出入库效率具有理论意义和实际工程意义。本文在总结了自动化立体仓库出入库调度主要研究方法的基础上,就自动化仓库的出入库调度问题开展了研究工作,有以下几个成果和结论:

1. 针对自动化立体仓库出入库调度问题具有离散性和事件驱动的特点,结合面向对象赋时 Petri 网(OOTPN)建模方法建立离散事件系统模型的优势,引入 OOTPN 建模方法并对该方法的模块性及数学理论基础进行了分析。

2. 运用面向对象的赋时 Petri 网,结合自动化立体仓库出入库调度问题的特点,建立了自动化立体仓库出入库调度的 OOTPN 模型,该模型具有良好的模块性和直观性,同时保留 Petri 网强大的数学分析基础,克服了专家系统以及排队网络等建模方法抽象、不易扩展的问题。接着,对模型的 Petri 网特性进行分析,证明了所建立的 OOTPN 模型是一个守恒、可达并且有界的 Petri 网。然后,在此基础上对自动化立体仓库调度运行的死锁问题进行了分析,给出了系统不会发生死锁的充分条件。此外,还给出了可用于自动化立体仓库控制分析的含有信息位的 OOTPN 模型。

3. 为了研究调度规则对自动化立体仓库出入库调度运行效率的影响并对出入库调度规则进行优化,本文运用遗传算法对自动化立体仓库出入库调度的规则进行分析和优化。通过对自动化立体仓库出入库调度规则的分类,采用一种分段整数编码方式对调度规则进行遗传编码,仿真结果表明

了这种编码方案简单可行。

4. 以 VC++6.0 作为编程工具, 编写仿真程序进行仿真验证, 实现了整个自动化立体仓库出入库调度流程和遗传算法的优化, 仿真结果表明优化后的调度规则能够提高系统的综合效益。

由于客观条件和自身能力的限制, 论文中还存在着一些不足和需要进一步完善的地方, 恳请各位老师斧正。

6.2 展望

在研究了自动化立体仓库出入库调度的建模以及调度规则的优化问题后, 作者认为在调度优化方面还有很多问题需要解决:

1. 调度算法的进一步完善。一个优秀的调度算法, 不但应该具备一个全面的调度规则集, 而且调度算法本身应当具有一定的智能, 即能够根据大量外部调度信息的反馈, 自主决定当前应当采用一种什么样的调度策略。例如, 近年来有人探讨了用智能 Agent 来对自动化立体仓库的调度和决策问题进行建模^[42], 该方法将货物和设备资源看作一个个智能的 Agent, 然后让这些 Agent 自主调度货物的出入库。

2. 由于自动化立体仓库的出入库调度问题涉及的数据信息量庞大, 因此应当引入数据挖掘技术, 通过对数据信息的分析处理, “挖掘”一些新的调度规则。同时还应当对数据库中各个数据信息表的关系做进一步的优化。

3. 调度的仿真程序应当进一步完善, 使之具有更好的交互性和实时性, 为仿真过程的监控提供便利。

致谢

值此论文完成之际，谨向给予我悉心指导、热情关怀和诚挚鼓励的导师傅卫平教授致以衷心的感谢！两年多来，无论是选题还是研究，无论是收集资料还是启发思维，我的每一步进展，一点一滴的收获都倾注着导师的大量心血。导师活跃而开阔的学术思想，丰富而扎实的学术知识，宽广而博大的学术襟怀，给我留下了深刻的印象。导师一丝不苟的治学态度以及生活上宽以待人的作风深深影响着我，必将成为我今后学习和工作的力量源泉。

此外，在攻读硕士学位期间，得到了课题组王雯老师、李德信老师、谢敬老师、原大宁老师和杨静老师的全力指导和关心，在此特别表示感谢。

在论文完成过程中，得到了吴树锋、相海军、李红、范立刚、李阳君等学友的大力帮助，在此表示衷心的感谢。

最后，感谢我的家人，在我完成论文期间，他们给予我关心、支持和理解。感谢所有关心和帮助过我的师长、同学和朋友们。

参考文献

- 【1】 汪兴民 编著。机械制造企业物资管理[M]。机械工业出版社，1980。
- 【2】 周溪召 等编著。物流系统工程。上海财经大学出版社，2003。
- 【3】 林志航，胡保生。计算机集成制造系统。西安：西安交通大学出版社，1997。
- 【4】 周国华。生产作业调度问题的软件计算方法研究。西南交通大学博士研究生学位论文，2003，4。
- 【5】 Krasacic P. Computer controlled conveying system and automatic picking. In: Proc of the 6th International Conf on Automation in Warehousing, 1984.
- 【6】 Farugui S. Automated warehouse design :a case study. In: Proc of the 4th International Conf on Automation in ware-housing,1982.
- 【7】 崔介何。物流学。北京大学出版社，2003。
- 【8】 Linn,R. and Wysk ,R.A., An Expert System Based Controller for AS/RS .International Journal of Production Research,Vol.32,No 2,PP 176-191,1990.
- 【9】 Kim.Byung-In,Heragu.Sunderesh.S,Graves.robert.J,Onge.Art.St. A Hybrid Scheduling and control system Architecture for Warehouse Management. IEEE Transactions on Robotics & Automation; Dec2003, Vol. 19 Issue 6, p991, 11p .
- 【10】 Donald .Tepas, Workware decision support systems: a comprehensive methodological approach to work-scheduling problems. Theor Issues In Ergon. SCI July-December ,2003,Vol 4.
- 【11】 田国会、刘长有、林家恒、常发亮、贾磊、路飞、李晓磊、 商允伟、李国锋。自动化立体仓库若干优化调度问题及其研究进展。山

- 东工业大学学报, 2001, 2:12-17。
- 【12】 剡昌锋, 吴黎晓, 胡赤兵, 芮执元. 自动化仓库在线调度问题的研究. 机械研究与应用, 2002, 12(4): 23-25。
- 【13】 田国会. 基于状态可达图的离散事件系统时态性质分析. 控制与决策, 1998, 13(1): 24-28。
- 【14】 汪自勤, 宋文忠, 冯纯伯. 离散事件动态系统 (DEDS) 的分析和优化——排队网络模型方法. 信息与控制, 1990, 1。
- 【15】 张小萍, 颜用年, 吴耀华, 荆明 编著. 现代生产物流及仿真, 清华大学出版社, 1998。
- 【16】 (美) Jerry Banks、John Carson 著. 离散事件系统模拟. 清华大学出版社, 1988。
- 【17】 Goldberg D E. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. MA: Addison Wesley, 1989.
- 【18】 曾茵莉, 王明哲, 廖晓昕, 沈轶. 基于规则的遗传算法. 控制工程, 2003, 7: 315-318。
- 【19】 袁崇义 著. Petri 网原理. 东南大学出版社, 1989。
- 【20】 吴芸. Petri 网与面向对象技术结合应用的发展. 计算机世界, 1995, 9: 131-147。
- 【21】 (美) Grady Booch 著. 面向对象分析与设计. 机械工业出版社。
- 【22】 蒋昌俊. 离散事件动态系统的 PN 机理论. 科学出版社, 2000, 8。
- 【23】 (美) J. L. Peterson 著, 吴哲辉译. Petri 网理论与系统模拟. 中国矿业大学出版社, 1989, 12。
- 【24】 徐刚, 吴智铭. 制造系统中的死锁问题. 系统工程理论与实践, 2004, 4(4): 106-122。
- 【25】 Goffman EG, Elphick MJ, Shoshani A. System deadlock. ACM Computing Surveys, 1971, 3:67-68.
- 【26】 王化冰. 多资源复合共享 FMS 的死锁研究. 计算机集成制造系统

- CIMS, 2000, 8(4): 70-73.
- 【27】 Roadammer F A, White K P. A recent survey of production scheduling[C]. IEEE Trans. On SMC, 1988, 18: 841-851.
- 【28】 龚宇. 具有机器自学习能力的车间调度系统[D]. 北京: 清华大学, 1996.
- 【29】 L. Yu, H. M. Shih, T. Sekiguchi. Fuzzy inference based multiple criteria FMS scheduling. Int. J. Prod. Res. 1999 37(10): 2315-2333.
- 【30】 高红, 熊光楞. 决策规则在仿真调度中的应用. 控制与决策, 1995 (3) 第 10 卷第 2 期: 114-118.
- 【31】 Grady Booch 著. 面向对象分析与设计. 机械工业出版社.
- 【32】 郑锋, 孙树栋, 吴秀丽. 基于遗传算法和模型仿真的调度规则决策方法, 计算机集成制造系统 2004 (7): 808-814.
- 【33】 汪应洛 主编. 系统工程理论、方法与应用 (第二版). 高等教育出版社, 1998, 5.
- 【34】 王小平, 曹立明 著. 遗传算法——理论、应用与软件实现. 西安交通大学出版社, 2002.
- 【35】 玄光男, 程润伟 著, 于歆杰, 周根贵 译. 遗传算法与工程优化. 清华大学出版社, 2004.
- 【36】 高梅梅, 吴智铭, 庞小红, 易耀华. 柔性制造系统分布式仿真的实现. 上海交通大学 2000, 34 (5): 604-607.
- 【37】 张小萍, 颜用年, 吴耀华, 荆明 编著. 现代生产物流及仿真, 清华大学出版社, 1998.
- 【38】 (美) Jerry Banks, John Carson 著. 离散事件系统模拟. 清华大学出版社, 1988.
- 【39】 顾启泰 编著. 离散事件系统建模与仿真, 清华大学出版社, 1999, 8: 18-19.
- 【40】 汪兴民 编著. 机械制造企业物资管理[M]. 机械工业出版社, 1980.

- 【41】 石柯, 覃小斌。面向对象的赋时 Petri 网的敏捷制造单元仿真。华中科技大学学报(自然科学版), 2002 年第 30 卷第 3 期: 13-15。
- 【42】 Byung-In Kim, Robert J. Graves etc. Intelligent agent modeling of an industrial warehousing problem. IIE Transactions(2002)34:601-612.
- 【43】 张映锋, 江平宇, 周光辉。基于遗传算法的 e-制造调度系统研究。计算机集成制造系统, 2004, 8: 955-961。
- 【44】 徐宗本, 张讲社, 郑亚林 编著。计算智能中的仿生学: 理论与算法。科学出版社, 2003, 5。
- 【45】 马俊, 孙小明。基于 Petri 网的生产系统仿真研究。机械, 2004 年第 31 卷第 4 期: 6-9。
- 【46】 李闽民等 编著。Visual C++6.0 数据库系统开发实例导航。人民邮电出版社 2002, 10。
- 【47】 刘刀桂、孟繁晶 编著。Visual ++实践与提高数据库篇, 2001。
- 【48】 David J. Kruglinski 著。Visual C++6.0 技术内幕。北京希望电子出版社, 1999, 5。

攻读硕士学位期间发表的论文

1. 刘韬, 傅卫平, 王雯, 李德信, 谢敬。基于面向对象赋时 Petri 网的出入库调度系统建模。机械制造及其自动化学术会议论文集, 2004 (已录用)。
2. 徐香玲, 傅卫平, 李德信, 谢敬, 刘韬。基于专家系统的自动化立体仓库出入库调度研究。物流技术, 2005, 2。