

---

中图分类号: U651

编号: 10060 14-0425

学科分类号: 630.5025

密级:

天津理工大学研究生学位论文

# 基于 Petri 网的集装箱码头生产 物流系统分析

(申请工程硕士学位)

学科专业: 物流工程

研究方向: 港口物流

作者姓名: 付小庆

指导教师: 仲伟仁 副教授

秦方 高级工程师

2014 年 2 月



**Thesis Submitted to Tianjin University of Technology for  
the Master's Degree**


**Analysis of Container Terminal  
Production Logistics System  
based on Petri Net**

By  
**Fu Xiaoqing**  
Supervisor  
**Prof. Zhong Weizhu**  
**Qin fang**

**Feb. 2014**

## 独创性声明


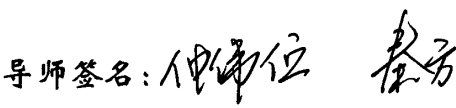
本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津理工大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 签字日期：2014 年 2 月 26 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津理工大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津理工大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编，以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复本和电子文件。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名： 导师签名：

签字日期：2014 年 2 月 26 日 签字日期：2014 年 2 月 26 日

---

## 摘 要

随着经济的全球化发展,港口集装箱物流业得到了迅猛的发展,港口码头作为主要的经济腹地,对于发展港口地区经济,提高人民生活水平有着重要的贡献,近年来,我国港口货物吞吐量逐年增长,2011 年全国货物吞吐量达到 100 多亿,集装箱吞吐量已达到 1.62 亿 TEU<sup>[1]</sup>,港口物流业蓬勃的发展趋势为港口物流业的发展带来巨大的机遇,同时也使港口物流业的竞争更加激烈,这不仅要求港口码头在基础设施上要不断的更新设备,而且在码头生产作业环节上更要不断提高。基础设施作为一种硬件设施在改善起来只需要投入一定的资金即可,但是生产作业作为一种软环境,在改善和提高上却需要一定的方法和技术。本文主要以码头物流生产作业为研究对象,对其进行研究。研究的主要内容有以下几个方面:

### (1) 集装箱码头生产作业主要流程

本文主要从集装箱港口码头的物流生产作业类型的角度出发,分别对卸船、装船、提箱、集港四个方面的物流生产作业流程进行研究。通过考虑每个工艺所涉及的对象、对象所发生的动作,以及发生动作的先后顺序,将工艺中的对象活动联系起来,建立主要的生产作业流程图。

### (2) 对 Petri 网建模研究

本文主要分析了 Petri 网建模的方法, Petri 网建模技术可以将复杂的离散动态事件,通过直观简单的图形展示出来,而且能够有效的描述并发、冲突、同步等现象,是一种描述动态离散事件的有效建模方法,本文主要分析了 Petri 网的建模方法和建模技术,并研究了 Petri 网的分析方法。对于实现 Petri 网对集装箱码头的生产作业的工艺流程建模提供了理论基础。

### (3) 应用 Petri 网建模

通过结合 Petri 网的建模技术和方法,对集装箱码头四个主要的生产工艺进行建模,在详细描述集装箱码头四种生产工艺的流程基础上,通过 Petri 网的建模技术,应用 Petri 网的元素对应关系,将流程中的对象的状态与 Petri 网中的库所对应起来,对象的动作与活动内容与 Petri 网的变迁对应起来,并且考虑了每个对象与活动的优先程度,从而建立 Petri 网模型,并且对模型进行特性分析。分析结果显示,该模型具有活性、有界性和可达性。

**关键词:** 集装箱码头; Petri 网; 集装箱码头生产物流

---

## Abstract

Along with the globalization of economy development, The port container logistic has been development. As a main economic hinterland, container terminal has important contribution to development the regional economy, and improve people's living standard. The development of information technology greatly promoted the development of port logistics. National port cargo throughput keeps increasing year by year. The national port cargo throughput have been more than 100 billion and the national container terminal have been 1.62 billion at the end of 2011. Vigorous development trend of port logistics industry has brought enormous opportunities for development of port logistics industry. But it has make the port logistics industry more competitive. It not only requires companies of ports to constantly update its equipments, but also improves their production operation. Infrastructure as a kind of hardware facilities you also just need to put a certain amount of money, but as a kind of soft environment, production operation in improvement and enhancement needs certain methods and techniques. This thesis mainly research port logistics production. The main content of the research has the following several aspects:

### (1) Mainly production process of container port logistics

This thesis mainly takes up research from the perspective of the container port logistics production. including production process of unloading, production process of loading, production process of picking up container, production process of collecting container. Consider the object, the action of object, and action sequence. Establish the main production flow chart.

### (2) The study of Petri net modeling technology

In this thesis, we analyzed the Petri net modeling method and Petri net modeling technology. which has a great advantage on the analysis of discrete dynamic events. It can show the dynamic and complex events through intuitive and simple graphical display and can effectively describe the concurrency, conflict, the phenomenon such as synchronization which is a kind modeling method, of description of discrete and dynamic event. This thesis mainly analyzed the Petri net modeling methods and modeling techniques and studied the analysis method of Petri nets. Improve the theoretical basis for Petri net modeling of container terminal production.

### (3) The application of Petri net modeling

By combining Petri net modeling technology and method, builded the Petri modeling of the mainly four production process of container terminal. Base on the basis of four kinds of

---

production process of container terminal, build the corresponding relationship between object of production process and place of Petri net and object movement and the change of Petri nets, and consider the priority of each object and activities, so as to establish a Petri net model, at the end considered the feature of model, the results showed that the modeling have activity boundedness and accessibility.

**Keywords:** Container terminal ; Petri net ; Production logistics

# 目 录

<b>第一章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义与目的	2
1.3 集装箱码头物流作业系统国内外发展现状	3
1.4 Petri 网系统国内外研究现状	6
1.5 研究内容和技术路线图	8
<b>第二章 集装箱码头作业系统分析</b>	<b>10</b>
2.1 集装箱码头概况	10
2.2 集装箱码头物流作业系统设备构成	15
2.3 集装箱码头作业系统管理	17
<b>第三章 PETRI 网研究分析</b>	<b>22</b>
3.1 Petri 网的基本概述	22
3.2 Petri 网的行为性质	25
3.3 Petri 网的分析方法	26
3.4 Petri 网的建模技术	29
<b>第四章 集装箱码头生产物流分析</b>	<b>34</b>
4.1 集装箱码头生产物流要素构成	34
4.2 集装箱码头生产物流系统作用	35
4.3 集装箱码头生产物流系统特点	35
4.4 集装箱码头生产物流内部网络分析	36
4.5 集装箱码头生产物流作用流程分析	36
<b>第五章 基于 PETRI 网的集装箱码头生产作业建模分析</b>	<b>45</b>
5.1 基于 Petri 网的集装箱码头生产作业建模思想	45
5.2 基于 Petri 网的集装箱码头生产作业建模步骤	45
5.3 基于 Petri 网的集装箱码头各物流生产作业建模	46
<b>第六章 结论与展望</b>	<b>56</b>
6.1 研究结论	56
6.2 研究展望	56
参考文献	57
发表论文和科研情况说明	60
致 谢	61

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

自古以来港口就是物资转运和物资存储的重要腹地，在促进社会经济发展中扮演着重要的角色，全球大概有 35 个国际化的城市中，其中有 31 个是由于拥有港口而发展起来的，而经济排名前 10 名的城市也几乎都是港口城市<sup>[1]</sup>。港口物流作为物流业的核心方面，在连接全球生产、国际贸易以及相关物流活动中起着关键性的作用。对于优化产业结构，促进国民经济的发展，提高国家的整体竞争力有着重要的作用<sup>[2]</sup>。集装箱作为港口运输货物的主要载体，由于其在运输以及搬运过程中杜绝和减少了货损、货差，确保了货运质量，提高了货物运输的效率和质量。因此，被广泛应用于港口物流运输中，并且在全球迅速发展起来。近年来我国主要港口的集装箱吞吐量逐年递增，具体情况如下图 1.1 所示：

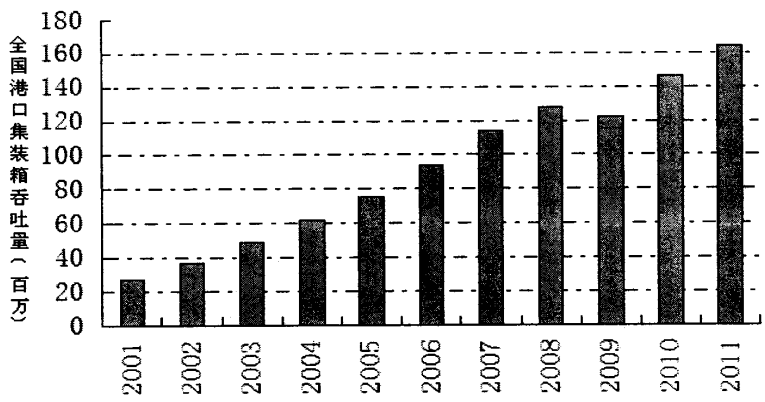


图 1.1 2001-2011 年全国港口集装箱吞吐量增长趋势图

Fig 1.1 2001-2011 national port container throughput growth trend chart  
数据来源：中国港口年鉴



人类消费需求日益个性化、多样化的发展趋势，给物流业带来了极大的挑战，所谓挑战与机会并存，在港口物流业活跃发展的今天，港口间的贸易往来越来越频繁，我国的经济贸易、文化以及各个方面也得到了很大程度的提高，但是相比国外港口物流业的发展我国的物流业起步较晚，还处于初级的发展阶段，各方面还不太完善，从我国的大型港口来看，虽然有些港口已采用信息化运作模式，但是总体上的信息化程度不高，港口设施相对来说也比较陈旧，且比较薄弱，管理水平低，缺乏有效的管理方式，特别是港口与港口之间，港口与各个运输网络之间的协作性差等等，这样问题大大的影响了港口生产物流的运作效率。

Petri 网是一种以图形化建模为主的理想的建模方式，自 1962 年德国的 Carl Adam Petri 最早使用 Petri 网进行网络结构模拟通信系统以后<sup>[1]</sup>，Petri 网就以其简单、直观、易于理解的特性在各大领域广为流传，Petri 网不仅能够较好的表达离散事件动态系统的静态结构和动态变化，还能够较好的对于系统中并发、同步行为的活动能够实时给予控制。而且从组织结构、控制和管理的角度来描述系统，高度抽象了实际系统的作业活动。Petri 网通过采用图形化的描述方式，直观而简洁的反应系统中各个要素的动态过程。并且将不同模块的作业活动统一起来，进行协调运作，是离散事件动态系统建模的良好的方法。因此采用 Petri 网方法进行集装箱码头物流生产作业系统的建模研究，对于实施集装箱码头物流生产作业环节控制，以及今后的管理都有其积极的意义。

## 1.2 研究意义与目的

港口生产物流是带动社会经济发展，提高人们生活水平的主要驱动力，我国水路集装箱运输起步于 20 世纪 70 年代，但是多年来由于我国港口粗放型的经营模式，使得大多数港口技术进步较慢，目前我国很多港口由于设施设备不完善，缺乏一定的管理经验，很多港口无法实现全面而科学的管理，在集装箱码头作业过程中，经常出现作业步骤不规范，作业过程繁琐，遗箱漏箱，延误工时等现象，加之港口码头集装箱货物的多样性，以及集装箱进出口箱量时间的不平衡性，船舶的抵港时间的不平衡，到港船型的不平衡等等许多问题，使得集装箱码头在内部管理和生产作业控制方面存在较大的难度，各环节作业配合不协调，使得集装箱码头作业效率低下，这极大的影响了港口集装箱的整体生产运作效率。本文通过使用 Petri 网建模方法，对码头集装箱生产物流的主要环节进行建模研究，分析码头作业流程的各个环节的关键动作，建立 Petri 网模型，直观而清晰的展现码头的作业环节，优化控制港口集装箱码头作业流程，达到提高码头集装箱生产作业的整体效率。

如何对集装箱码头生产物流动态系统进行建模，才能更加精确的反应集装箱生产运作的动态过程。Petri 网作为一种描述离散事件动态系统的静态结构和动态运动过程的利的建模工具，能够很好的描述系统流程中相关的资源和动作的相互关系。通过简单直

观的图形建模以及特有的数学分析方法,直观,准确的表现事物的整个运动过程,本文通过采用 Petri 网对集装箱码头生产作业的四个主要作业过程(装船、卸船、提箱、集港)进行建模,并通过关联矩阵对其进行分析,优化集装箱生产作业环节,从而提高集装箱生产作业效率。

### 1.3 集装箱码头物流作业系统国内外发展现状

集装箱码头物流作业是指集装箱从到达港口码头(运进闸门)到运出闸门(运出港口)这段时间内所涉及的物流活动。集装箱码头的物流作业主要包括装船、卸船,提箱,集港等作业,所涉及的区域主要包括码头前沿,堆场,和闸门,国内外学者对集装箱码头的研究主要集中在对各个区域节点的作业环节的研究。主要包括泊位的分配,岸桥调度,堆场区位的选择,以及连接各个区域节点的集卡水平运输路线的选择研究,和集装箱码头物流作业系统的整体研究。

#### (1) 泊位分配

Chen C Y, Hsieh T W (1992)采用时空网络模型研究了码头泊位的分配问题,它主要考虑了船舶的到港、离港时间,并采用分支定界的方法对其进行求解<sup>[3]</sup>。A.Imai (1997)主要以船舶在港口的总逗留和船方因排队而引起的不满意度达到妥协为目标函数,研究了港口的泊位分配问题<sup>[4]</sup>。之后 A.Imai (2005)又提出了连续泊位下的动态调度方法。Liang 和 Mi (2007)提出了泊位分配和岸桥调度的多目标优化模型,他将第一个目标设定为船舶服务时间以及滞留时间达到最小化,第二个目标则是最小化岸桥的作业时间的标准差。采用阶段遗传算法对此问题进行解答。我国学者沙梅(2009)在泊位数量动态变化情况下研究了泊位的配置问题并建立了泊位资源配置模型<sup>[5]</sup>。柴志刚(2009)为解决码头的泊位问题提出了一种均衡理论模型,该模型综合考虑了船舶的靠泊位置,靠泊时刻,以及装卸速度<sup>[6]</sup>。张佳运(2011)也研究了集装箱码头连续泊位的动态分配问题<sup>[7]</sup>。

从上述对港口泊位分配问题的研究我们可以看出,学者对于集装箱码头泊位系统的分配更加的深入和全面,从刚开始的静态模型下的泊位分配到离散化动态泊位模型的提出再到连续性动态模型下的泊位分配,从仅仅考虑单一的目标约束到多目标约束的提出,使港口船舶泊位分配问题的研究更加的具有价值。此外研究港口泊位的方式也发生了很大的提高,随着信息技术的发展,为解决码头泊位分配问题也提供了新的探索方法,仿真技术的应用,使码头泊位问题的研究更加的生动化,真实化,将抽象的问题转化成了现实的可观测的问题。

#### (2) 岸桥调度

早在 1989 年 Daganzo 就建立了岸桥调度的混合整数规划模型,该模型以每个泊位的岸桥数量和服务顺序为研究内容,通过采用精确算法和近似算法对模型进行了求解。<sup>[8]</sup>。Peterkofsky (1990)也进一步研究了该问题,以多艘船舶作业为对象,通过以延误

惩罚最小为目标函数,建立了规划模型<sup>[9]</sup>。Kim&park (2004)采用提出了单条船舶作业的岸桥调度模型,该模型将所有岸桥全部完成作业的时间最小作为目标函数。并采用分枝定界法来求解该模型<sup>[10]</sup>。我国学者葛盼盼(2009)也通过研究岸桥的作业时间最短为目标,研究岸桥调度问题,该问题主要考虑了同一轨道的岸桥不能相互交叉,岸桥之间应该保持一定的安全距离等问题,通过采用自适应遗传算法和传统遗传算法对此问题进行解答<sup>[11]</sup>。秦进(2013)则建立了面向多艘船舶的集装箱码头岸桥统一调度和卸船任务分配问题的混合整数规划模型,该模型以岸桥的使用费用和船舶的停靠费用最低为目标函数,通过双层模拟退火算法解答了该模型<sup>[12]</sup>。

在研究岸桥调度问题上许多学者主要针对岸桥数量,岸桥作业时间,等问题展开了讨论。应用多种统计方法对该问题进行建模,计算。岸桥调度是港口进口物流货物的首任作业,岸桥作业的快慢直接影响后续作业的高效顺利进行。

### (3) 水平运输调度问题

德国学者 Steenken D. (1993) 运用启发式算法研究了集装箱码头跨运车的路径安排问题,并采用仿真技术对各种情况下集装箱码头跨运车的运行情况进行了模拟<sup>[13]</sup>。Evers J.J.M.等(1996)研究了集装箱码头的自动导航小车车流控制系统<sup>[14]</sup>。与之相关的荷兰学者 Duimkerken M.B.和 Evers J.J.M. (1999)也研究了集装箱码头的自动导航小车协调车流控制系统<sup>[15]</sup>。Ebruk.Bish(2001)<sup>[16]</sup>以船舶在港时间最短为目标函数运用启发式算法,对集装箱码头集卡的分派问题作出了研究,此研究主要研究了非自动化港口环境下集卡的分派问题。Sgouridis Sgouris P (2003)运用仿真模型,研究了中等规模集装箱码头的全跨运车的运输调度问题。Etsuko nishimura(2005)<sup>[17]</sup>和 Akio imai 则通过分析集卡静态情况下与集卡动态情况下的调度问题,从而建立了集卡动态路径优化模型。我国学者也对集卡调度问题做出了定量的研究。杨静蕾(2006)主要以集装箱卡车行走的最短路程为目标函数,提出了集装箱物流路径的优化模型<sup>[18]</sup>。张海霖(2006)研究在多阶段性和动态性情况下集疏运系统的调度问题,并通过决策规划方法解决了此问题<sup>[19]</sup>。刘德鹏(2006)研究了集装箱码头交通网络的最短路线问题,并应用 EM-plant 仿真技术模拟了集装箱码头作业的动态作业过程<sup>[20]</sup>。魏众(2007)研究了集装箱码头搬运设备的集成优化调度模型,他通过过滤集束搜索算法对该模型进行求解,最终确定了最优的装载集装箱的顺序<sup>[21]</sup>。上述学者主要研究了水平运输过程中集卡的分派问题,集装箱车辆的路径选择问题,集装箱码头自动导航小车车流量的控制问题的研究,该研究也是集装箱水平运输过程中主要解决的问题,集装箱码头水平运输系统的合理调度,不仅保证了集装箱码头整个作业管理顺利,有条不紊,高效进行,而且也节省了各种集装箱运输车辆的数量和运输成本。

### (4) 堆场优化问题

Amborski & Krzysztowf (1984)应用数字仿真研究了堆存区运作规划问题,他指出存储区的仿真有两个关键问题,事件的同步化,车辆移动的优化,而最终所要达到的效果是

能源消耗要最少。Ky kim 和 K H kim (1998)<sup>[22]</sup>采用启发式算法,研究了堆场的集装箱分配问题。Mosca R (2000)运用人工智能的方法研究了码头和堆场的管理策略,同时通过建立规划模型验证了现行的模型的正确性<sup>[23]</sup>。Kim hwan-seong (2001)在预先给定集装箱堆场的布局、码头设备特征等基本假设的基础上,以集装箱码头工作时间最少,效率最高为目标函数建立了集装箱堆场垂直分配模型<sup>[24]</sup>。Ng WC (2005)<sup>[25]</sup>则在作业任务数量和作业任务预期时间已知的情况下研究了单台和多台场桥的作业顺序问题。K H kim (2006)<sup>[26]</sup>则针对集装箱码头堆场的倒箱问题进行了研究。杨军(2007)通过分析集装箱码头容量与不同装卸系统的关系,也提出了减少集装箱码头堆场面积的策略<sup>[27]</sup>。秦天保(2011)应用 Flexsim 仿真技术研究了集装箱码头堆场的道路规划问题<sup>[28]</sup>。周鹏飞(2013)通过建立出口箱随机双层规划模型,研究了不确定条件下集装箱堆场出口箱的具体箱位的选择问题,并通过应用启发式算法对该模型进行了求解,集装箱码头堆场箱位分配的优化是减少翻箱率,和提高装船效率的关键,通过此方法优化了堆场的预期的翻箱量,从而节约了龙门吊的作业成本<sup>[29]</sup>。

集装箱堆场的研究主要集中在集装箱堆场的箱区分配研究,堆场的合理布局,以及堆场的改善研究等等,堆场的堆存问题是集装箱码头所面临的难点问题之一,合理的堆场布局,箱区分配,对于减少倒箱率,节约堆场空间,提高作业效率,有效管理管理集装箱码头货物等都有重要的意义。

#### (5) 闸门

集装箱堆场大门是集卡将集装箱运进,或者运出堆场的主要通道,于越(2007)通过运用离散事件仿真模型对大门作业系统进行了研究,该研究主要运用仿真模型和启发式算法对所建模型进行求解,并且通过实际的案例对该方法进行了验证<sup>[30]</sup>。而金淳则对集装箱港口大门通道作业的调度问题进行仿真研究,主要针对港口大门服务系统在计划相应时间获取方面效率低的问题,提出了离散事件仿真测试方法<sup>[31]</sup>。张涛(2006)在离散事件动态系统方法下,运用排队网络理论研究了集装箱资源配置以及堆场大门的规划问题<sup>[32]</sup>。

#### (6) 集装箱作业系统研究

杨静蕾(2003)建立了集装箱码头桥吊,龙门吊以及集卡三节点配置的排队网络模型,从而研究了集装箱码头内部物流网络系统优化问题。并且应用仿真模型,真实的反映了系统运作的情况<sup>[33]</sup>。尚晶(2005)研究了集装箱码头物流网络资源配置问题,以港口建设和营运过程中成本费用最低为目标函数,建立了集装箱码头的多级排队网络系统模型,并且应用 WITNESS 仿真技术对建立的集装箱码头物流网络系统进行了模拟<sup>[34]</sup>。张海霖(2005)通过应用面向对象 Petri 网分析了集装箱码头的物流系统,流系统进行建模分析,他在对象子网和门变迁中融入决策规则,从而建立了集装箱码头物流系统的动态行为和控制模型,并在此模型基础上分析了模型结构的一些死锁和冲突等特性<sup>[35]</sup>。韩要稳(2007)提出了集装箱码头物流作业系统协调优化的总框架,分别从集装箱码头物流

作业的组织协调,能力协调以及信息协调三种途径对该系统作出了优化研究<sup>[36]</sup>。魏众(2007)主要从集装箱码头物流作业系统的作业流程集成,作业信息集成,作业管理集成三个方面研究了集装箱码头物流作业系统集成优化问题<sup>[37]</sup>。李肇坤(2010)研究了港口物流服务供应链,主要就供应商的选择,供应链的利益分配以及供应链绩效的考核,这几个方面做了深入研究<sup>[38]</sup>。罗勋杰(2010)在详细研究了集装箱码头各个子系统(海测物流子系统,堆场物流子系统,水平运输子系统,以及陆侧物流子系统)的相关作业优化问题之后,并对集装箱码头物流系统的整体问题进行了优化研究,研究了集装箱码头物流系统的整体优化问题,提出了基于作业全过程的生产成本管理控制优化模型和整体效率优化模型<sup>[39]</sup>。

#### 1.4 Petri 网系统国内外研究现状

自1962年Carl Adam Petri博士首次在他的博士论文《用自动机通信》中提出了描述事件和条件关系的方法,通过使用网状的结构来模拟通信系统,后来将这种方法用Petri网命名,并广泛传播开来,Petri网完全是从过程的角度出发为复杂的系统的描述与分析提供一种有效的建模工具,它能很好的描述并发、冲突、同步、资源争用等系统特性,并带有执行控制机制,同时还具有形式化步骤及数学图论性支持的理论严密性。20世纪60年代的Petri网的研究主要以孤立的网系统为研究对象,以寻求分析技术和应用方法为目标,到了20世纪70年代开始以网系统的全体为对象,开始了通用网论的研究,主要将网系统进行分类,并且研究各类网之间的关系,从而发展了以并发论,同步论,网逻辑以及网拓扑为主要内容的理论体系。20世纪80年代借助计算机的发展,Petri网理论进入了综合发展阶段,主要发展为理论与计算机辅助工具的开发为主要内容,通过计算机的强大的仿真模拟实现了Petri网的仿真实验。

目前Petri网已被广泛应用于各个不同的领域,分别有通讯协议的验证,计算机通讯网络性能评价,软件工程,形式化知识的推理和表达,以及柔性系统建模与控制等等。通讯协议的验证是Petri网应用最成功的领域之一,Petri网应用自己形式化的语言方式对通讯协议的正确性给予了验证;Petri网对计算机通讯网络性能的评价主要集中在企业内部生产控制局域总线方面而且在光纤局域网中也发挥着重要的作用;Petri网在软件工程方面的贡献主要体现在软件系统的建模和分析,用成熟的有色Petri网建模可实现大型软件系统的涉及,确认,仿真等等;通过应用Petri网可对离散的动态实际问题建立进行形式化的知识的表达和推理过程,并且能够应用Petri网中的顺序关系,并列关系,与或关系等等以及Petri网的分析方法对模型进行推理,验证;柔性制造对于现代制造业具有重要的作用,Petri网应用其自身建模的优越性可对柔性制造过程中的生产工艺,作业环节进行建模,分析,对作业环节进行控制。

近年来,Petri网在物流业的应用也极其广泛,通过Petri网的建模技术对物流环节中的作业流程进行优化,并实施有效控制,从而提高物流生产效率。

Jack (2000) 基于时间 Petri 网的方法对食物供应链的动态流程进行了建模研究, 并通过系统仿真方法对所建的模型进行了分析评价。Dong and Chen F(2001)利用 Petri 网的建模技术对生产供应网络的作业流程进行了建模分析<sup>[40]</sup>。Teo.chung Piau 等(2001)<sup>[37]</sup>则利用 Petri 网建模技术, 研究了企业设备和库存变化情况, 他认为合并行为会影响设备和库存成本的变化<sup>[41]</sup>。Chen H, Amodeo L, Chu F (2002)<sup>[42]</sup>和 Ams M, Fischer M, Kemper P, Tepper C(2002)<sup>[43]</sup>通过使用 petri 网建模方法, 对供应链进行了建模研究, 并对模型进行了评价。Wang R, Jia Y, Sheng Y, Gao L(2003)利用 Petri 网对供应链进行设计和优化<sup>[44]</sup>。Blackhurst J, Wu T, O'Grady P(2004) 则对不确定的供应链 Petri 网建模问题进行了研究建模<sup>[45]</sup>。B.M.Arteta (2004) 应用 petri 网研究了复杂企业系统的流程矢量空间问题<sup>[46]</sup>。

我国学者也进行了大量的研究, 刘恒江 (2002) 应用 Petri 网构建了集装箱空箱调运系统, 并利用 EXSPECT 仿真软件对该模型进行了分析<sup>[47]</sup>。陈思云, 刘天竹(2005)运用 Petri 网研究了仓储物流系统, 并通过仿真技术对其进行了研究分析<sup>[48]</sup>。王云鹏(2005)通过扩展 Petri 网对多式联运业务流程进行了建模和仿真研究, 找出了该多式联运业务的系统瓶颈, 并提出了优化方案<sup>[49]</sup>。刘小华(2006)根据物流配送行为的随机并发特点, 利用 Petri 网对物流配送系统进行了建模研究。并对此模型进行了优化研究<sup>[50]</sup>。程杰 (2007) 通过 Petri 网的相关理论知识, 着重对以铁路运输为主的第三方物流企业的业务流程进行研究, 并通过 Petri 网的建模技术对其进行建模建模, 仿真和优化研究。同时该论文还利用 Petri 网模型分析了电子商务环境下的第三方物流的采购流程<sup>[51]</sup>。张文诺 (2007) 主要以准时化生产环境下的东北某发动机制造企业为研究对象, 通过 Petri 网分层技术, 研究了该企业的生产物流流程, 并得出了汽车制造业的物流配送和生产协同运作流程解决方案<sup>[52]</sup>。王占中研究了基于 Petri 网的多式联运流程, 主要是以典型的多式联运流程为依据建立了多式联运 Petri 网模型, 并且对所建 Petri 网模型的特性进行了分析, 最后运用仿真技术对该模型进行了仿真研究<sup>[53]</sup>。戴顺南(2008)利用 Petri 网分析了企业物流的作业流程, 分别利用 Petri 网对企业物流流程中的采购流程, 生产流程, 销售流程三个内容, 进行了建模研究, 并对该流程进行了优化和改善研究<sup>[54]</sup>。王云鹏 (2008) 则通过 Petri 建模技术研究了我国某汽车制造企业的生产物流流程<sup>[55]</sup>。郭磊 (2010) 利用 Petri 网理论对冷链物流企业的配送流程进行了建模研究, 并通过 Petri 网的分析方法对该模型的特性进行了分析, 结果表明, 所建的模型是有效的<sup>[57]</sup>。叶姿琴 (2012) 研究了供应链环境下的港口业务流程, 主要以秦皇岛港口为例, 应用 Petri 网建模技术分析秦皇岛的供应链业务流程, 并提出了优化措施, 证明了模型的有效性<sup>[56]</sup>。薛晶晶 (2012) 研究了内陆集装箱的物流系统, 通过应用时间 Petri 网对内陆集装箱物流系统中的进口物流系统, 出口物流系统以及内贸物流系统的作业流程进行了建模, 仿真研究, 通过分析系统中的瓶颈所在, 实施了改进措施<sup>[58]</sup>。

## 1.5 研究内容和技术路线图

### 1.5.1 研究内容

本文主要对集装箱码头生产物流系统进行研究，集装箱码头生产物流系统是典型的动态离散事件，主要涉及作业包括：装船、卸船、集港、提箱，四种作业，涉及的物流作业区域包括：堆场，检查口，码头前沿。而 Petri 网又是离散动态事件建模的主要工具，因此本文主要采用 Petri 网对集装箱码头主要的生产物流系统进行建模研究，具体内容如下：

第一章：主要分析该课题的研究背景和现实意义，通过国内外学者对集装箱码头的研究分析，明确本文的研究定位以及研究内容。

第二章：以集装箱码头生产物流系统为研究对象，主要分析了集装箱码头的基本状况，包括码头设备，码头布局，码头生产作业特点以及港口码头生产作业管理。对于港口码头集装箱的生产作业环境进行了大致的描述。

第三章：Petri 网适合离散事件系统建模，可以将复杂，抽象的系统进行简单，直观的描述，在本章中主要分析了 Petri 网概念，Petri 网特点，Petri 网的基本类型等等，重点研究了 Petri 网的分析方法和建模技术。为明确如何应用 Petri 网技术建立集装箱码头生产作业模型，奠定理论基础

第四章：研究了集装箱码头生产物流系统构成要素，特点，以及内部网络。并且重点研究了集装箱码头生产作业中装船工艺、卸船工艺、集港工艺、以及提箱工艺的实施、控制流程，探讨用动态离散事件系统对其进行建模研究。

第五章：在该章中主要结合集装箱码头生产作业流程，应用 Petri 网分别对集装箱码头中所涉及的主要的生产作业环节进行建模研究。并且对所建立的 Petri 网模型应用 Petri 网分析特性进行模型的检验，从而验证模型的活性，有界性和可达性。

1.5.2 技术路线图

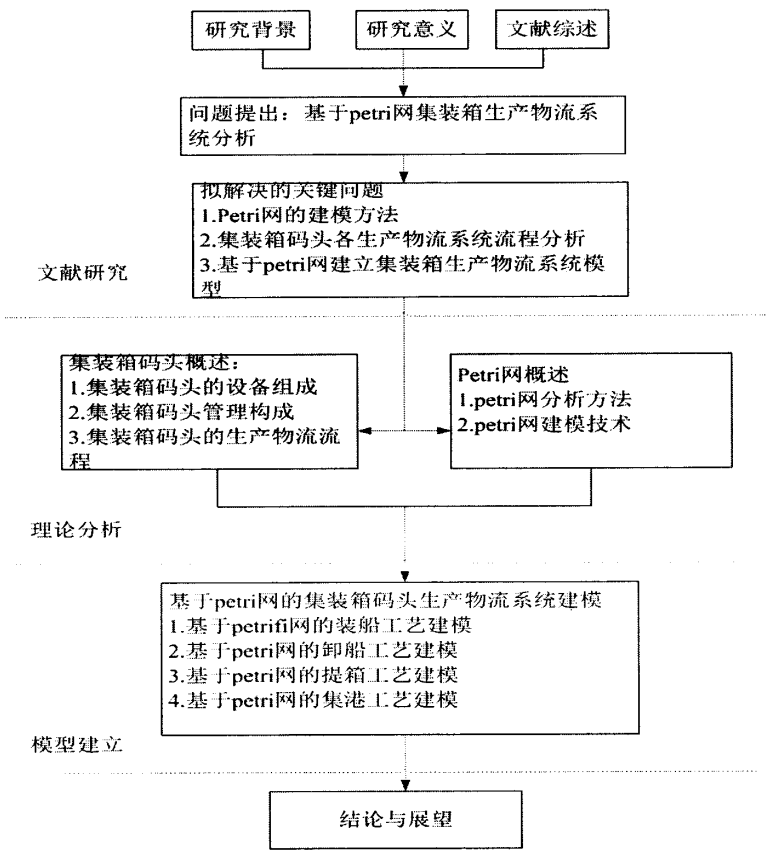


图 1.2 技术路线图

Fig. 1.2 Research Technical Road Map

资料来源：作者自绘



## 第二章 集装箱码头作业系统分析

### 2.1 集装箱码头概况

#### 2.1.1 集装箱码头功能

集装箱码头是货物运输系统的关键环节之一，大量货物的运输出口、进口都离不开集装箱码头，集装箱码头的功能主要有以下几点：

##### （1）连接水路和其他运输方式的枢纽

运输和中转是集装箱码头的主要功能，在现代港口物流活动中，运输是构成供应链服务的中心环节，而运输功能主要体现在集疏运上，包括公路运输，铁路运输，水路运输以及不同运输方式之间的转运，是一种对港口内外腹地具有辐射服务的运输网络。在发展国际贸易中起着举足轻重的作用，而港口完善和畅通的集疏运系统，是港口发展和赖以存在的主要外部条件，集疏运线路的数量以及运输方式的构成，和地理分布，是港口集疏运系统与腹地运输联系密切性的重要保证。直接决定着港口发展程度。现代的货物运输中，海运运输占有相当大的比例，国际集装箱的运输业主要以海运运输为主。码头作为连接海运与两岸大陆的重要节点，将海运过来的货物通过码头与陆运连接起来，从而实现了从发货人到收货人的整个运输过程，集装箱码头不仅实现了从海上运输到内陆运输的有效连接，也实现了与集装箱货物运输有关的货物，信息，单证，以及拼装，存储和转运，等业务，是集装箱成为多式联运方式的重要条件。

##### （2）提供集装箱堆存，作为转换集装箱运输方式的缓冲地

集装箱船舶大型化的发展趋势，改变了国际集装箱的海运格局，使集装箱港口运输业从原来单一的港到港的运输转变为以枢纽港为中转中心，干线与支线相结合的新的运输格局，在新的港口货物运输格局中，大型国际集装箱码头已经成为各个区域的国际货物转运的中心，集装箱码头内部每天都进行着一系列的生产作业活动，集装箱码头通过专业化的装载，卸载，转运，堆垛，存储等将需要出口以及进口的货物，通过外集卡车运送到堆场进行暂时的堆存，然后经过集装箱码头，通过集装箱船舶运送到世界的各个地方。集装箱船舶具有运量大，运费小，平均运距长的特点，是连接大洋两岸不同国家或者城市的重要枢纽，通过集装箱码头的装卸转运作业，将不同的运输方式有效的结合起来，有利的促进了集装箱船舶的规模化发展，使货物运输更加快捷、方便。

### 2.1.2 集装箱码头的基本特点

#### (1) 集装箱码头作业的机械化、高效化

在现代集装箱码头作业实施过程中,无论是堆场装卸,水平运输还是岸边装卸等均已基本实现机械化,专业的集装箱码头一般都有专门为运输集装箱船舶所停靠的泊位以及堆场,有专门的装卸设备,和自己的集卡车队,为了降低停运成本以及提高集装箱运输船舶的航行效率,集装箱码头往往通过昼夜不间断的快速、高效地作业。基本上已实现当天到港、当天离港。目前,国际较为先进的集装箱码头岸桥的作业效率已达 60TEU/h 左右,大大的提高了装卸效率,随着装卸机械和装卸工艺的不断改进,集装箱码头的装卸效率将会进一步的得到提高。

#### (2) 码头生产管理的计算机化、信息化

随着信息技术和计算机事业的快速发展,集装箱码头的作业效率得到了进一步的提升,大部分的集装箱码头在生产作业管理中,均已实现信息化,通过使用计算机管理,针对集装箱码头的装卸船计划,堆存计划,提箱以及其他的业务活动,对各项业务活动中所涉及的各项生产作业进行有效的计划,组织,指挥和控制,从而大大的避免作业中的重复和复杂的人工操作,从而大大的提高了集装箱码头的作业效率。与此同时,大多数集装箱码头也使用了 EDI 技术。通过采用 EDI 技术使货主以及货代,船公司和船代以及一关三检等口岸管理机构之间可以高效快速的进行信息的沟通和交换,大大提高了信息的交换效率,同时也实现了对货物的有效追踪。一些重要的运输单证,如舱单、船图、装箱单等已实现无纸化。码头生产管理的另一个趋势是智能化和自动化,国外一些先进的集装箱码头,如鹿特丹、新加坡等,已实现了堆场作业和检查口作业的自动化。

#### (3) 码头设施的大型化、深水化

随着集装箱运输的发展,集装箱运量不断上升,为了降低集装箱船舶的运输成本,集装箱船公司都纷纷采用大型的集装箱船舶和集装箱专用的器械,与此同时,集装箱的大型化也要求集装箱码头的大型化,不同的集装箱码头陆续扩建或者新建大型的码头泊位,以便接纳更大的集装箱船舶的停靠,岸线泊位长度也得到延长,堆场及整个码头区域得到了扩建。目前,世界大多数集装箱大港的泊位水深的平均深度均达到-14 米以上,大多可接纳 5 000 TEU 以上的集装箱船舶在此停靠,有的还计划建造-20 m 以上的超级深水码头,以迎接 10 000 TEU 以上集装箱船舶的出现和挑战。上海港的洋山深水港工程已被引入我国“十五”计划的重点项目,该港口处于杭州湾口门东北海域,天然水深可达 20.25 米可建设深水泊位达 50 个,从而有望结束上海港无深水码头、不能全天候接纳 5 000 TEU 以上大型集装箱船的历史<sup>[59]</sup>。

### 2.1.3 集装箱码头具备的条件

#### (1) 具有供集装箱船舶安全靠离的水深,泊位以及岸壁

集装箱码头安全的水深、泊位以及岸壁是保证集装箱船舶进行安全作业的前提和先决条件,集装箱船舶进出港的水域主要包括航道、锚地、调头区等,为了保证集装箱船舶能够安全进港,码头的水域必须确保有足够的水深和宽度,集装箱码头的泊位是提供集装箱船舶停靠和进行集装箱装卸作业的主要场所,泊位水深必须保证满足最大集装箱船舶大的吃水要求。例如,3 000-4 000 TEU 集装箱船的吃水为-12.5 m,5 000 TEU 以上集装箱船吃水为-14 m。泊位的总长度取决于各航线集装箱船的到港频率,而每一泊位的长度则应视集装箱船舶的大小而定。目前,3 000-4 000 TEU 集装箱船要求的泊位长度为 300 m,5 000 TEU 以上的集装箱船舶的标准泊位长度为 350 m。

#### (2) 具有足够数量以及相当质量的集装箱专用机械设备

我国的集装箱码头大都基本已采用专业化,机械化的作业设备来进行集装箱货物的装卸,运输,以及存储,转运。目前,在我国绝大多数港口集装箱码头前沿的装卸船设备都采用龙门吊装卸桥,集卡则负责承担岸桥与堆场之间的集装箱货物的运输,轮胎吊则负责堆场内集装箱货物的装卸和搬运,除此之外集装箱码头根据码头集装箱的需求,有的码头还配备有跨运车,叉车,正面吊等装卸设备。集装箱码头不仅要保证集装箱码头配备有足够数量以及技术性能良好的装卸设备,还应该考虑集装箱码头在实施作业过程中的能力的配比,保证码头作业的高效,连续进行。

#### (3) 具有宽敞的堆场和必要堆场设施

港口必须有足够面积的堆场,为港口集装箱货物提供暂时的转运和堆存,以保证港口正常的吞吐能力,堆场几乎占据了集装箱码头的主要的面积,堆场为所有进出口的货物提供暂时的堆存场地,以方便发货人报关和码头配载后装船出运或者收货人报关后提运,从而防止进出口货物损坏,丢失,提高货物运输的质量,保证集装箱货物的高效,有序运行。此外,堆场也对进入码头的集装箱进行着调度管理作业,随着现今集装箱船舶的大型化集装箱码头业务的规模化发展趋势,对堆场面积的要求也更高。如一个 350 m 的标准泊位,其面积要求大致为  $350\text{ m} \times 500\text{ m} = 175\,000\text{ m}^2$ 。除足够的堆场面积外,集装箱码头还应该具有为堆场作业实施所配备必要的设施,如龙门吊行走线路及跨箱区作业转换地点、夜间作业的照明设施、冷藏箱区的供电系统、危险品箱的喷淋降温设备以及洗箱、熏箱的排污系统等。

#### (4) 具有先进的计算机生产管理系统

随着集装箱码头高效化、机械化、规模化的作业特点,为了提高集装箱生产的高效化,国内外各港口都相继开发了一些应用系统,港口 IOIS 技术,货运 EDI 服务系统,以及集装箱码头管理信息系统等等。港口的信息化发展,不仅方便了各个作业系统部门之间信息的共享与传递,为货主、船公司提供良好、及时和周到的服务。同时也为码头作业的顺利高效实施带来了很大的便利。为集装箱码头配备先进的计算机管理系统以及通过使用先进的管理手段和方法,提高集装箱码头的作业效率,已经成了集装箱码头的主要工作之一,现代集装箱码头大部分已将计算机生产管理系统作为码头建设的重点,

其核心是在满足当前生产需要的前提下，根据国际集装箱运输发展新趋势、新特点、新工艺、新技术不断提升和完善系统功能。

(5) 具有通畅的集疏运条件

港口集疏运系统是港口与外界相互连接，往外输运港口货物的交通运输系统，在港口集装箱运输系统中，码头处于一个非常重要的节点位置，以码头为中心点，向外辐射，通过各种交通运输线路，如公路，铁路，航空，水路等交通运输线路，将全国各个地方的集装箱汇集在码头，疏散出去，畅通的集疏运系统是港口与广大腹地相互联系的通道，是港口赖以存在和发展的主要外部条件，随着运输货物的多样化，以及码头规模的日益扩大，各大港口的集疏运系统会得到进一步的完善。

(6) 具有现代化集装箱专业人才

人才是各个行业最具核心竞争力的因素，集装箱码头在努力提高自己的硬件设施的同时，更应该加强专业人才的培养和引进，无论是先进的管理方法和管理模式，还是专业集装箱码头机械设备的应用、科学、高效的作业方法的实施，以及高效的集装箱服务方式，都需要有现代化的集装箱人士与之相应，没有国际集装箱运箱的专业知识和业务技能，就无法对先进的集装箱运输进行有效的管理，也就不能发挥集装箱码头应有的重要作用。

2.1.4 集装箱码头布局

集装箱港口主要由泊位，码头前沿，集装箱堆场，集装箱货运站，控制室，检查口，集装箱维修车间组成。基本的布局如图 2.1 所示：

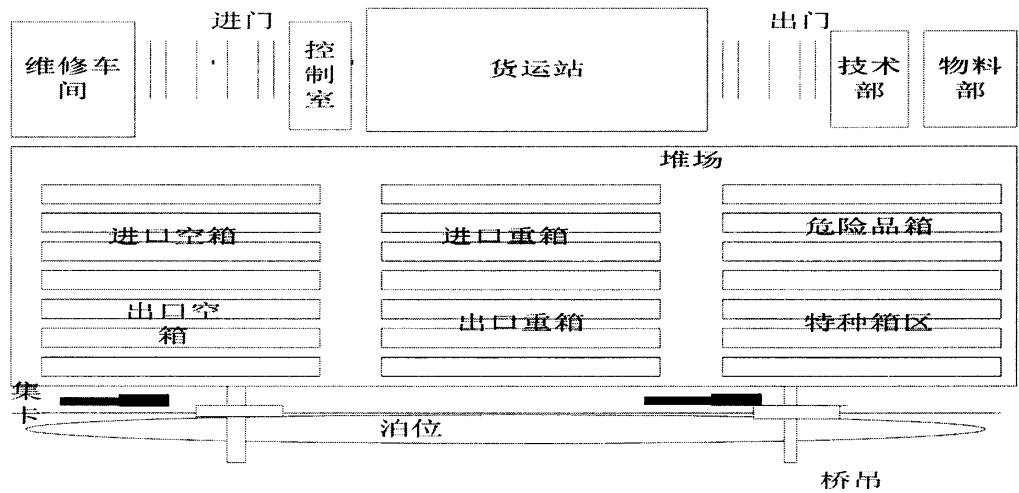


图 2.1 港口集装箱码头布局图

Fig 2.1 port container terminal layout

数据来源：作者自绘

(1) 泊位。泊位是指在码头内,为到港船只提供停泊靠岸,并且方便其进行装卸货物,补给燃料淡水的地方,主要指船舶停靠的岸壁线与对应水域构成的区域。泊位长度一般由停泊船只的大小决定。码头靠泊能力的大小一般由停泊船只的吨级分类,假如停泊船只的最大吨级为10000则称1万吨级泊位。泊位主要分为以下三个内容,泊位长度,泊位宽度,泊位水深。泊位长度主要是指码头岸线的长度,泊位宽度是指码头前水域的宽度。泊位水深则表示码头前沿水域的水深情况,泊位的长度、水深主要根据码头的种类,港口的类型,以及船只的大小来决定。世界上全集装箱专用码头泊位长度一般为300米以上。泊位水深一般为-11米以上船舶靠离港时,所需的岸壁线的有效长度一般为船舶长度的1.2倍<sup>[57]</sup>。

(2) 码头前沿。码头前沿是指沿码头岸壁线,从泊位岸壁到堆场之间的码头区域,主要包括停泊船舶的岸线,集装箱装卸桥作业区域等部分。码头前沿的宽度一般由集装箱桥吊的跨距以及所使用装卸的种类决定,宽度一般为30-60米,集装箱码头前沿一般除了安装集装箱桥吊和铺有桥吊轨道外,还备有高压低压电箱,吊桥电缆沟,供水设施,灯塔等。

(3) 集装箱堆场。主要是指集装箱的堆存区域。主要由两大部分组成,前方堆场和后方堆场。前方堆场又被称作出口箱区,位于码头前沿和堆场之间,它作为临时堆场,将将要出口的货物堆存在这里,船到港前预先堆放需要装船出口的集装箱。卸船时,为了加快集装箱货物的装卸,临时堆放需要卸船进口的集装箱,后方堆场是指对集装箱重箱进行交接、保管、堆存的地方。主要包括中转箱堆场、进口箱堆场、冷藏箱堆场、空箱堆场以及危险品箱堆场。集装箱堆场的大小主要由集装箱船舶的载箱量以及船舶的靠泊率决定。

在堆场区域内,一般都画有一个集装箱箱底大小的存放集装箱的格子,通常称之为场箱位。每个箱区的两端都标有对应的编号,通常称之为箱区号。对堆存在堆场上的集装箱一般都有唯一的编码标志,通常称之为场箱位号。场箱位号是由代表箱区号、行号、列号、层号共六位代码组成。

(4) 集装箱货运站。主要是用于拼箱货进行装箱和拆箱作业,指将集装箱货物装入或者取出,并对这些货物进行收发、交接、保管和储存的场所,俗称仓库。集装箱货运站的主要功能是装卸货,而不是用于货物的储存,集装箱货运站一般建于码头后方,靠近码头外公路或者铁路的地方,这样有利于运输的车辆可以直接进入货运站,而不必通过集装箱堆场。

(5) 控制室。控制室是集装箱码头监控、指挥中心,是码头控制中心实施指挥,控制以及调节督促集装箱的装卸作业的场所。控制室是码头生产作业的枢纽,其地理位置一般设置在码头操作或者办公楼最高的地方,可以看到整个码头的现场运作情况。控制室内一般配有各种电子监控设备用于监控码头作业现场的监控设备,另外还配有电子计算机系统、侧风仪及气象预报系统,是码头的中枢机构。

(6) 检查口。是集装箱码头的出入口。一般设在码头的后方。是划分集装箱码头内外职责的分界点,检查口主要负责集装箱与集装箱货物的交接,转移以及相关的单证的交接,检查有关箱号,铅封号,集装箱箱体,和货物的外表状况等,出入集装箱码头的箱子均必须在检查口进行检查,办理完交接手续才可允许出入。

(7) 维修车间。维修车间是集装箱码头的后方支持。主要负责对集装箱码头所有作业设备进行检查维修和保养工作,是保证集装箱码头各个机械设备正常,顺利作业的必备场所之一,是提高集装箱码头作业效率的重要保障。

## 2.2 集装箱码头物流作业系统设备构成

### 2.2.1 岸边装卸设备

岸壁集装箱装卸桥主要是集装箱码头用来装卸集装箱船舶货物的岸边设备之一。又称桥吊,装卸桥等。岸桥是集装箱码头的主要设备之一,体积庞大,价格昂贵,一般情况下一个泊位可配备 1-3 个岸桥,岸桥的数量决定了集装箱卡车的数量,由于岸桥的闲置成本比其他码头作业机械的闲置成本要高,所以在进行码头生产作业的过程中,应该以岸桥的实际情况为对象来安排其它的码头作业设备,因此岸边装卸桥的工作效率影响着集装箱码头的整体工作效率。

从框架结构上分,岸桥一般可分为 A 型和 H 型两种。A 型装卸桥的特点是自重轻,但是稳定性很差,轮压一般在 35 吨左右,所以不适用于大型集装箱的装卸,H 型装卸桥的特点是稳定性好,抗风能力强,且自重大,轮压一般为 38 吨,随着集装箱日渐大型化的发展趋势,目前大多数港口都采用 H 型岸桥来进行集装箱船舶的装卸装卸作业。

岸桥主要由门架、拉杆,和臂架三部分组成。臂架上悬挂着可以自动伸缩的小车,小车的升降机构可用来承载吊具和集装箱的重量,海侧臂架一般设计为可变幅式,当集装箱装卸桥在移动过程中或者停止作业过程中,为了保证船舶和码头前沿设备的安全性将海侧臂架仰起。集装箱装卸桥主要沿着与码头岸线平行的轨道行走。

岸桥的作业过程一般包括以下几个步骤:船靠码头前将岸桥移动到不影响船舶安全的靠泊安全尺码内,当集装箱船舶靠近码头后,将岸桥移动到具体作业的舱口位置,然后将集装箱船舶移动到待卸箱的正上方,之后放下吊具。卸船顺序一般由内档往外档,由上往下一层层卸船,装船的顺序与卸船的顺序刚好相反,从外档开始向内档,由下往上一层层装船。首先桥吊上的卸船吊具将准备卸船的集装箱挂好,将其吊起,然后小车沿着悬臂的方向移到陆侧方向,并缓慢的将集装箱放入到等待运输的水平运输机械上,最后松开扭锁装置,完成卸船。

### 2.2.2 水平运输设备

水平运输的机械设备一般是集装箱卡车，简称集卡，集卡分为内卡和外卡。内卡主要负责码头前沿和堆场之间的水平搬运。而外集卡主要是将进口的集装箱或者货物通过闸口输送到外围市区，或者将出口的货物通过闸口运进集装箱堆场。集卡是码头所有机械设备中数量最多且调度最为灵活的设备，通过集卡的水平搬运将港口码头前沿岸桥的装卸作业和集装箱堆场轮胎吊的装卸作业紧密的联系起来，为集装箱码头的作业活动起到重要的支撑作用。集装箱卡车的数量，行驶的路径，以及行驶的速度，都会影响集装箱搬运的效率，从而间接的影响岸桥的装卸效率和堆场轮胎吊的装卸的效率。因此合理的安排集卡的运输路线，实现集卡在运输过程中彼此不冲突，以及配置合理的集卡数量对提高码头装卸的整体效率有着重要的作用。

集卡车主要由挂车和牵引车两部分组成。牵引车本身没有装卸货物的能力，必须和挂车挂在一起才能进行集装箱的运输作业。常见的牵引车有平头式和长头式两种。平头式牵引车的发动机在驾驶室的下面，视线好，轴距和车长短，转弯半径小，但是平头式牵引车的机械振感强，舒适性很差。长头式牵引车，发动机在司机室的前面，司机的舒适感和安全感较好，机器的维修和检查也比较方便，但是轴距和车长长，转弯半径大。

挂车又称拖车或平板，其本身没有动力，仅仅是一个载箱的平台，按照挂车底盘的前后车轴的配置不同，可分为全挂车和半挂车。挂车底盘下前后都配有车轴的称之为全挂车，挂车底盘下前端没有配置车轴的，称之为半挂车。半挂车是集装箱码头常用的挂车种类。

挂车按照结构的不同可分为骨架式挂车和平台式挂车。挂车只有钢结构骨架，没有铺底板面的称之为骨架式挂车。它由底盘骨架组成，结构简单，重量轻，维修方便。平台式挂车不仅有钢结构骨架，而且骨架上还铺有底板面。平台式挂车除了有两条承重的主梁外还有若干条横向的支撑梁，这些支撑梁上铺有木板或钢板。

### 2.2.3 堆场装卸搬运设备

主要的堆场装卸搬运设备有：叉车、轮胎吊、正面吊。

#### (1) 叉车

叉车又叫铲车，是集装箱码头常用的一种集装箱装卸设备。主要用于集装箱装卸、堆码及短距离的搬运等作业。一般适用于小型集装箱码头货物的装卸运输以及堆垛作业。大型集装箱码头也会将其作为集装箱堆场作业的辅助性工具。集装箱叉车可以直接将货叉插入集装箱底部插槽内搬运集装箱，也可以使用其顶部起吊吊具将集装箱从顶部吊起从而卸载集装箱。叉车的通用性强而且灵活方便，可随时对集装箱进行装卸，转运，装卸成本很低，且价格便宜。

#### (2) 轮胎吊

轮胎吊是集装箱码头用来搬运、装卸或者堆码集装箱的设备，是集装箱堆场最常用的装卸设备之一，主要由门型支架、动力传动系统、起升机构、小车运行机构、大车运行机构、及伸缩式吊具等组成。轮胎式起重机较轨道式起重机灵活，方便，可以进行各种前后左右，包括旋转等运动。可以从一个堆场到另一个堆场，集装箱主梁上的小车沿着主梁轨道对集装箱进行装卸和堆码作业。但是轮胎式起重机，由于其体积规模、跨度没有龙门式起重机大，故其堆垛较小。轮胎式龙门起重机的跨距是指两侧行走轮中心线之间的距离，跨距的大小一般由所需跨越的集装箱的列数和底盘车的通道宽度决定，通常情况下轮胎式龙门起重机的跨距按照六列集装箱和一条底盘车道考虑。轮胎式龙门起重机的起升高度，取决于龙门起重机作业的堆码集装箱层数。目前，轮胎式龙门起重机的起升高度一般为 11-12 米。轮胎式起重机的起重量是根据额定量和吊具的自重来决定的，目前轮胎式起重机的起重量大概为 30.5 吨。

### (3) 正面吊

集装箱正面吊是负责将码头前沿的集装箱运输到堆场以及进行堆场的堆码和装装车作业。正面吊机动性强，作业效率高，可直接完成集装箱的搬运、堆码和装卸车作业，减少码头机械车的配备，而且灵活简单，易于操作。正面吊主要分为重箱正面吊运机和空箱正面吊运机，重箱正面吊运机一般可堆码 4-5 层集装箱，而空箱正面吊运机一般可堆码 7-8 层集装箱<sup>[3]</sup>。有较高的场地利用率。在正面吊上可加装木材和抓斗，可以用于吊运较重的集装箱货物或者木材等。正面吊的缺点主要是正面吊单机的工作效率很低，且轮压很大，对轮胎和路面的磨损都比较厉害。

## 2.3 集装箱码头作业系统管理

### 2.3.1 集装箱码头船务调度管理构成

集装箱码头物流作业系统管理主要包括以下几个方面，集装箱码头的船务调度管理、集装箱码头的箱务管理、集装箱码头的检查口业务管理、集装箱码头的货运站业务管理。

#### 1. 集装箱码头的船务调度管理

集装箱码头船务调度管理的主要内容可以分为以下两方面的内容：作业计划和作业控制。作业计划就是通过采用科学的方法来对未来的行动进行安排。而作业控制就是按照作业计划的标。准来考量作业计划的完成情况。船务调度管理可分为三个方面进行介绍，集装箱码头生产作业计划、集装箱码头生产控制以及岸边指挥员的工作。

集装箱码头的生产作业计划是集装箱码头企业计划的具体执行计划，它主要以市场的需求情况以及企业的经营目标，来确定其吞吐量，在确保社会经济利益的前提下，结合各阶段生产具体情况，对各种工艺进行综合平衡化作业，在科学合理配置各生产要素



以及协调集装箱内外关系的前提下,规定了各阶段作业的具体任务和实施办法,以获得更好的经济效益。集装箱码头合理的生产计划安排不仅能够有效调动员工积极性和责任感,保证作业顺利有序的完成,而且对于日常生产运作,阶段成果核算都具有一定的指导作用。

集装箱码头生产作业计划的主要内容包括以下几个方面:

- (1) 安排船舶作业码头和泊位,并且确定码头的装卸工艺和流程。
- (2) 根据已经安排好的装卸工艺流程来安排集装箱的各个生产要素,并且确定每项作业的进度以及要求,确保作业的安全问题,以及相关的负责人。
- (3) 明确货方以及船方的相关要求,确定与各项作业有关的相关单位,并向他们提出相关要求。

集装箱码头生产计划在编制过程中应本着企业利益和社会利益相结合,安全科学,综合平衡的原则。

## 2.集装箱码头生产作业控制

集装箱码头生产作业控制即就是对集装箱码头生产作业进行指挥、监督和管理。码头生产控制的实施主要依据码头生产作业计划的内容,对码头各项生产经营活动实施指挥和控制,在确保作业活动协调、有序、平衡的前提下,保证生产作业计划的顺利完成。

码头生产控制的具体内容主要包括以下几点:

- (1) 以昼夜生产作业计划表为主要依据合理配置生产要素,编制工作人任务书。
- (2) 根据工作任务书,组织实施各项作业计划,统一指挥全码头与装卸有关的部门,协调港外有关单位配合。
- (3) 掌握各项作业进度,安排好车、船、箱、货的衔接,组织好集装箱的进港、堆存、中转和疏运等工作。
- (4) 参加码头生产调度会议,做好调度分析,掌握各项生产计划的完成情况,并分析其主客观原因。
- (5) 树立安全质量第一和为现场装卸生产服务的思想。

在码头实施生产控制的过程中,控制部门要围绕码头生产作业计划进行,首先应该对可能出现的不良的影响因素,提前做出防备,并及时采取有效的措施,在控制实施的过程中,如果要随时检查各项生产作业环节的实施情况,机械运转是否正常以及各作业环节衔接是否紧密,确保码头内部所有工作人员,物力配置以及生产作业活动正常有序进行,一旦出现问题,应该及时解决。

### 2.3.2 集装箱码头堆场堆放原则

码头堆场管理是指在遵循堆场总体安排原则的指导下,以确保码头正常作业提高码头正常作业效率为目的而进行的一系列堆场策划工作。目前我国港口在堆场管理方面主

要存在以下几个方面的问题:

- (1) 管理方法上的混乱, 没有系统的规划
- (2) 集装箱堆放混杂, 导致堆场的翻箱率很高, 影响集装箱的装卸效率。
- (3) 场地的利用率不高
- (4) 堆场的机械效率不高

1.出口箱的堆放原则:

(1) 有关出口箱的堆放应该根据船舶计划的靠泊位置以及作业路线来安排堆放出口箱, 应该尽可能的堆放在出口箱船舶将要靠泊的泊位, 便于集装箱装卸船运输, 提高装卸效率。

(2) 应根据出口箱卸港位置的不同, 箱型尺寸大小的不同, 以及吨级的不同将集装箱分开堆放。

(3) 集装箱码头在多个生产作业同时进行, 要着眼于集装箱码头的整体的生产效率, 在安排集装箱箱区时应该将船舶的泊位、机械设备分配、作业量以及作业路线等各种因素综合起来, 力求达到最佳的动态平衡。

2.进口重箱的堆放原则

(1) 在进行进口重箱堆放时, 也应该考虑船舶的计划靠泊位置, 以及作业的路线问题, 从而安排合适的箱区, 提高码头卸船效率。

(2) 应该确保不同型号的箱子分开堆放, 不同尺寸大小的箱子分开堆放, 空箱与重箱分开堆放, 同一位中有相同的提单号的, 可以安排到同一排, 在堆放的过程中一个位堆放完以后才可进行下一个位的堆放。应严格确保各种类箱型的集装箱堆放在计划的区域内。

### 2.3.3 集装箱码头堆场管理

1.空箱进场管理。空箱进场管理主要包括空箱通过检查口进场以及空箱卸船进场。空箱在通过检查口进场前, 如果该空箱是船公司指定用箱时, 堆场工作人员则根据不同箱型, 箱码, 按照出口船名和航次进行堆放, 如果该空箱为进口拆箱后返回码头堆场这种情况, 则应该按照不同的持箱人分开进行堆放。空箱卸船进场, 堆场计划员应该根据空箱的堆存计划, 根据箱型, 箱码大小分别安排堆放空箱, 在堆放空箱卸船时, 码头与船方必须事先办理设备交接手续。

2.空箱出场管理。空箱的出场也分为检查口出场和空箱装船出场两种途径, 空箱在通过检查口出场是货主或者内陆承运人应该向集装箱代理人提交书面申请, 集装箱代理人则根据出口的集装箱清单, 确定签发出场集装箱设备交接单以及进场集装箱交接单。空箱装船出场, 在空箱装船出场时, 码头箱务管理员应该根据空箱装卸清单代理出具的联系单或者船公司提供的出口装船指令, 来安排空箱的用箱计划,

3.冷箱管理进口冷冻重箱管理内容：（1）配载计划根据进口资料制作冷藏检查记录卡，填写内容：船名，航次，箱号，尺寸，要求温度，纸卡人姓名。（2）船舶指挥员在卸船前，检查制冷温度和箱体状况，要是发现异常应及时与外轮理货员和船方做好交接单签证，同时报告给控制室。（3）堆场指挥员在堆场发现箱体状况时，应及时报告给控制。（4）冷藏箱出场或拆箱，应提前一小时断电，指挥员填写拆箱日期，时间，出场温度。中转箱装船要注明船名航次。

4.出口冷冻重箱管理内容：（1）出口冷冻重箱进入检查口，检察员必须检查箱体的外表状况，以及箱体的 PTI 标贴，记录纸温度，设定温度以及装箱单要求温度三者是否一致等。（2）检查口人员根据装箱单内容制作冷藏箱检查记录单。（3）堆场指挥员将卡车司机带来的检查记录卡与实际箱号进行核定，无误方可卸下冷藏箱。（4）装箱时应提前一小时切断电源，记录装船日期，时间及出场温度，签名后交予控制室。（5）船舶指挥员按船图指挥桥吊司机装载。

5.集装箱码头危险品管理。凡经公司进出口的危险货物，都应该向货主，船公司或船代理事先向港务局申报。危险品在做交接时，需仔细检查箱体或铅封，并仔细核对箱号。出口危险品箱时承运人需附海上安全监督局的签署盖章，方可纳收，若发现残损则应拒收。危险品在装卸时，若是船公司申请港监的则按港监制定位置放置，若未申请则按船代或船方的制定位置放置。危险品在舱内移动时，则应对指定场地进行隔离，并派专人看管，危险品若是在码头拆箱时，需布置和落实安全和消防措施。

#### 2.3.4 集装箱码头检查口业务管理

检查口是集装箱进入码头堆场的主要通道，是所有的集装箱运输车辆必经之路。集装箱码头检查口业务的好坏直接影响着码头的生产运作好坏。集装箱码头检查口主要负责进出口货物，车辆的检查，验证，核实工作。包括两个方面，进场业务和提箱业务。进场业务，主要包括出口重箱进场，出口空箱进场，中转箱进场。提箱业务主要包括提进口重箱，提空箱，提中转箱，提退关箱，以及超期箱的疏运。在进行集装箱的交接时，必须在检查口办理交接手续，检查口工作人员除了审核有关的单证文件外，还应当验收集装箱箱体及集装箱的有关设备。并在集装箱设备交接单上注明交接情况。检查口工作人员在集装箱进出场过程中要仔细审核各种单证，确保单证上提供的信息和集装箱上的信息保持一致。与计算机上的信息保持一致。

#### 2.3.5 集装箱码头货运站管理

集装箱码头货运站主要是对集装箱码头货物进行储存，收发交接，防护的主要的场所。它不同于传统的件杂货库场，集装箱码头货运站比一般的件杂货库场的规模，面积，功能要小得多，除有完整的仓库外，还有一定面积的拆箱区，主要用于拆卸集装箱，集装箱货运站不仅具有保管堆放，存储集装箱的功能以外还承担集装箱代理人业务，对集

装箱及集装箱设备的使用，租用，调运保管，以及回收交接等行使管理权。

集装箱货运站的主要业务一般分为：仓库提货业务，拆箱提货业务和拆箱进库以及货运站库存管理业务四部分。在拆箱提货时，货主首先应该凭介各种手续提货单，申请拆箱提货业务，码头控制室根据作业申请单，将货物运送至拆箱区，码头货运站，安排所需的机械和工作人员。接着客户凭作业申请单和交货记录到码头制定区域提货。提货完毕后仓库员将出门证交予客户。最后在当日工作完成后仓库员应填写拆箱提货日报表，并且申请重新安排拆箱区的空箱。在拆箱进库时，货物站业务员安排需拆箱进库的集装箱，器械以及相关的工作人员以及仓位。拆箱时，仓库理货员对货物信息进行核实，检验，并在桩脚排上注明相关的物流信息，以便识别，当日工作结束之后，仓库员应填写拆箱进库的日报表；仓库提货业务，货主凭提货手续申请提货，并且在客户服务部及哦啊接相关费用。货运站业务员安排发货机械，相关工作人员。货主凭作业申请单和单第三联提货，仓库员在发货前核实各种信息，发货提货完毕后，货运站仓库员填制出门证，交予客户。最后在当日工作完成后，仓库填写仓库出仓日报表。

## 第三章 Petri 网研究分析

### 3.1 Petri 网的基本概述

#### 3.1.1 Petri 网的基本术语

(1) 资源：在系统状态变化的过程中与系统有关的因素，如原材料、半成品、产品、工具、设备，数据及信息等。

(2) 状态元素：主要是将资源归类后的抽象，具体的说就是系统中的资源按照其在系统中的作用，分别分为不同的类，而该类所处的位置我们将其抽象为一个相应的状态元素，一般用字母 P 表示。

(3) 库所：库所可以形象化的被描述成一个场所，在该场所中储存了一定数量的资源。

(4) 变迁：变迁主要用于描述修改系统状态的事件，表示资源的消耗、使用、及产生对应于库所的变化，例如常见的有描述计算机系统信息的发送，信息的处理，资源的存取等等现象。一般用字母 T 表示。变迁的发生往往受系统状态的控制，即当变迁的前置条件满足时，变迁有可能发生，当变迁发生时，变迁发生的前置条件必须满足，当变迁发生后，变迁的前置条件将可能不再满足，而后置条件则得到了满足。

(5) 事件：引起条件的变迁称为事件。

(6) 容量：库所中所能存储的最大资源数量，一般用字母 K 来表示。

(7) 拓肯：表示库所中相应的资源为可用的，或者该库所代表的状态已经达到。一般用带有黑色的小实心圆表示。

#### 3.1.2 Petri 网的基本概念

定义 1: 一个 Petri 网表示为一个三元组,  $PN=(P,T,F)$  若满足以下关系则称为有向网。

$$P \cup T \neq \emptyset$$

$$P \cap T = \emptyset$$

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

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

其中  $\text{dom}(F) = \{x | \exists y : (x, y) \in F\}$  为 F 的定义域,  $\text{cod}(F) = \{x | \exists y : (y, x) \in F\}$  为 F 的值域, 其中  $x, y \in X$ ,  $X = P \cup T$  为 PN 的元素, P 和 T 分别是 PN 库所中的的库所集和变

迁集,  $F$  是有一个由  $P$  元素和  $T$  元素组成的有序偶的集合, 称为  $PN$  的流关系,  $\emptyset$  表示空集。

定义 2: 广义随机 Petri 网是由 6 个元组描述的有向图  $PN(P, T, F, W, M, M_0)$  其中:

- (1)  $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$  是库所的有限集合,  $n > 0$  为库所的个数。
- (2)  $T = T_i \cup T_j$  变迁的有向集合, 它由时间变迁集合  $T_i = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  和瞬时变迁集合  $T_j = \{t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_m\}$  组成, 且  $T_i \cap T_j = \emptyset$   $m > 0$  为变迁的个数。
- (3)  $F \subseteq I \cup U$  为有向弧集, 其中  $I$  表示变迁输入弧的集合,  $I \subseteq P \times T$ ;  $O$  表示变迁输出弧的集合,  $O \subseteq T \times P$ ;  $F$  中允许有禁止弧, 禁止弧仅存在于库所到变迁的弧。
- (4)  $M: P \rightarrow N^+$  为 Petri 网的标识, 它为一向量, 其第  $i$  个元素表示第  $i$  个库所中的令牌数目,  $M_0$  为初标识表示系统的初始状态。
- (5)  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$  是与时间变迁相关联的平均点火速率, 时间变迁服从负指数分布,  $\lambda$  表示分布函数的参数, 瞬时变迁的平均激发速率为 0。

### 3.1.3 Petri 网的基本类型

Petri 网的基本类型主要有顺序关系、并发关系、冲突关系、抑或关系、死锁关系等。

#### (1) 顺序关系

顺序关系即就是任务按照先后次序, 一个接着一个的进行, 在下图 3.1 中  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  分别按照一定的先后顺序, 依次被执行。

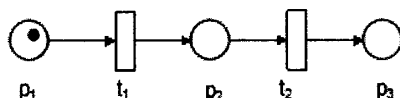


图 3.1 顺序关系

Fig 3.1 Order relationship

#### (2) 并发关系

多个任务同时执行, 或者以任意的次序进行, 称之为并行关系, 在下图 3.2 中  $p_2$ ,  $p_4$  各拥有一个拓肯,  $T_2$ ,  $T_3$  都有随时发生的可能。并且他们的发生是相互独立的。

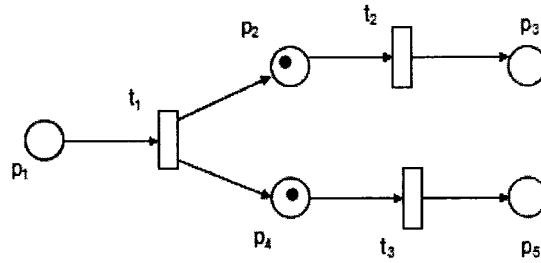


图 3.2 并发关系

Fig 3.2 Concurrent relation

### (3) 冲突关系

在下图 3.3 中， $t_1$ ， $t_2$  都能发生，但不能同时发生，他们共享  $p_1$  中的一个资源，这种现象被称为冲突，发生冲突的本质主要是系统的结构决定的，主要是由于外部资源的缺乏所引起的。

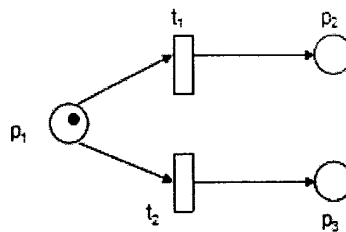


图 3.3 冲突关系

Fig 3.3 Conflict relations

### (4) 循环结构

循环结构是指一些任务反复多次被执行，下图 3.4 中， $p_1$  拥有一个拓肯，当变迁  $t_1$  被激发以后， $p_1$  消耗此拓肯，而  $p_2$  将得到该拓肯， $p_2$  得到拓肯后， $t_2$  就有被激发的可能，当  $t_2$  被激发以后， $p_2$  失去该拓肯，而相应的  $p_1$  又重新得到该拓肯，这样反复的执行下去，或者结束由  $t_1$  和  $t_2$  组成的循环，执行下一个流程。

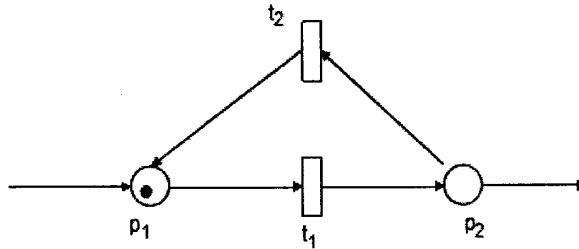


图 3.4 循环关系

Fig 3.4 recurrence relation

### 3.1.4 Petri 网的基本特点

**模拟性:** Petri 网用可视化的图形对离散事件动态系统的静态结构和动态结构进行了描述, 并从组织结构的角度出发来模拟系统的控制和管理, 而不涉及系统实现所依赖的化学和物理原理。

**客观性:** 能够精确描述事件之间所客观存在的依赖和不依赖的关系, 能够较好地描述有规则的行为特征的系统。

**描述性:** 能够用简单、直观的语言网来描述系统结构和系统行为; 能够很好的表达事物局部和整体之间的关系。

**流特征:** 适合描述以具有规则性的流动为行为特性的系统。包括能量流、信息流和物质流。

**分析性:** Petri 网的系统的动态行为与应用环境无关, 可以进行独立的研究, 并且可以按照特定的方式来分析和验证系统性质, 通过图形和数学等分析方法对系统进行检验, 并判断 Petri 网系统的可行性。

**基础性:** 网系统能够应用在各个不同的领域, 是解释和沟通不同领域的桥梁, 是这些领域共同的理论基础。

**融合性:** 网系统在描述同步并发的系统时, 可以解决各种不同的问题, 局部目标和全局目标间的冲突问题, 不同系统的事件之间的并发问题, 资源有限带来的限制问题, 不同机器和不同用户之间不同类型接口问题, 不同类型信息流的统一描述问题等。

## 3.2 Petri 网的行为性质

Petri 网的性质主要包括以下几个方面可达性, 有界性, 活性。

### (1) 可达性

可达性是研究任何系统动态行为的基础, 是离散事件动态系统分析和控制的基本



属性,若 Petri 网的一个初始的标识  $M_0$  通过不断地激发变迁最终得到一个新的标识  $M_n$ ,我们就可以认为该 Petri 网是从  $M_0$  到  $M_n$  可达的。按照迁移引发规则, Petri 网的可达性既取决于网结构的性质也取决于初始状态的标识。可达性主要用来验证系统是否能够按照预先设计的方案实现最终的状态,也就是在做生产调度的计划中,能否实现最终想要达到的目标。

### (2) 有界性

Petri 网的有界性是指在  $PN = (N, M_0)$  中,若存在一个非负整数  $K$ ,使得  $M_0$  的任一可达标识的每个位置中的标记数都不超过  $k$ ,即对  $\forall M \in R(M_0)$ ,都有  $k \geq M(p)$ ,则称位置  $P$  为  $k$  有界。如果  $k=1$  则称此 Petri 网是安全的,这种网的每个库所要么有一个标记,要么没有标记。Petri 网的有界性主要可以用来检验 Petri 网所描述的系统是否存在溢出的情况,保证一个位置上不会重复启动正在进行的操作,在 Petri 网中资源库所中的上限代表了该资源的容量,过程库所的上限则代表了该过程状态所处理的事件的最大数。

### (3) 活性

在一个 Petri 网中必须保证网系统具有活性, Petri 网具有活性,表示任一变迁在系统的任何可达标识都具有潜在的发生权,在一个 Petri 网  $PN = (N, M_0)$  中,对于一个变迁  $t \in T$  在任意的标识  $M \in R(N, M_0)$ ,若存在一个变迁序列,该变迁序列的激发可以使任意的  $M \in R(M_0)$  进入到一个可达的状态  $M' \in R(M)$ ,  $M'$  使变迁  $t$  使能,这时我们就称该 Petri 网具有活性。

## 3.3 Petri 网的分析方法

Petri 网的主要分析方法有可达树、关联矩阵和状态方程。

### 1. 可达树

可达树分析法是分析 Petri 网性质的主要方法之一,每一个 Petri 网都对应一个可达树。可达树能够很好的描述 Petri 网中每个元素的相应的状态,通过用树的描述形式将 Petri 网模型中各个库所对应的状态信息展示出来,可以很好的反映所建的模型是否有界,重复,安全,死锁等问题。

在 Petri 网的可达树中首先给出一个初始标识  $M_0$ ,通过不同顺序的变迁激发,得到一组新的标识  $M_1 = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ ,新得到的标识  $M_1$  又通过不同顺序的变迁,产生另外一组标识  $M_i = (m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{in})$  以此下去,就形成了一个树形图。

定义 3. 可达树<sup>[61]</sup>

在定义可达树之前为了保证 Petri 网的有限性,首先给出一个记号  $\omega$ : 对于所有的正整数  $n \in N, n < \omega, n + \omega = \omega + \omega = \omega - n = \omega$

设 Petri 网  $PN = (P, T, F, M_0)$  可达树  $RMT(PN) = (V, E)$ , 其中结点集  $V$  记作  $N_w^m$  (包含  $\omega$

和  $m$  维非整数向量集合), 用  $T$  来标记弧集  $E$ , 可达树的构造过程如下列步骤所示:

- (1) 将初始标识  $M_0$  作为树根  $v_0$ , 并将  $v_0$  进栈  $stack$ ;
- (2) 标有  $M \in N_\omega^m$  的结点  $v$  位于栈顶, 若:
  - 1)  $\forall t \in T, \exists p: (p, t) \in F \rightarrow M(p) < 1$  则表示  $v$  没有后续结点, 将其出栈, 转作步骤 (3); 否则将作步骤 2)
  - 2) 若存在一个  $t \in T, \forall p \in P: (p, t) \in F \rightarrow M(p) \geq 1$  则表示  $v$  有后续结点  $v'$ , 其中弧  $(v, v')$  标以  $t$ , 标以下确定的  $M'$ ; 否则将  $v$  出栈, 转而作步骤 (3);
    - (a) 若树中存在标记  $M''$  的结点  $v''$ , 满足  $p \in P$ :  
 $M''(p) = M(p) + C(p, t)$   
 若  $M' = M''$ ,  $v'$  为一个叶子结点, 转步骤 2); 否则做步骤 (b);
    - (b) 若从根  $v_0$  到  $v'$  的路径上有标以  $M''$  的结点  $v''$  满足  
 $\forall p \in P: M'(p) \leq M(p) + C(p, t)$   
 则对所有满足  $M'(p) < M(p) + C(p, t)$  的  $p$ , 令  $M'(p) = \omega$ , 否则令  
 $M''(p) < M(p) + C(p, t)$   
 并将  $v'$  进栈, 转步骤(2);
- (3) 当栈  $stack$  为空时, 可达树  $RMG(PN)$  被确定, 结束; 否则转步骤 (2)

本文以下图 3.5 中 Petri 网模型为例, 通过上述建立可达树方法来建立具体的可达树。

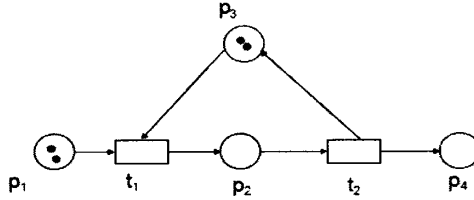


图 3.5 Petri 网模型图  
Fig. 3.5 Petri net model diagram  
资料来源: 作者自绘

由上图 3.5 分析得到的可达树如下图 3.6 所示

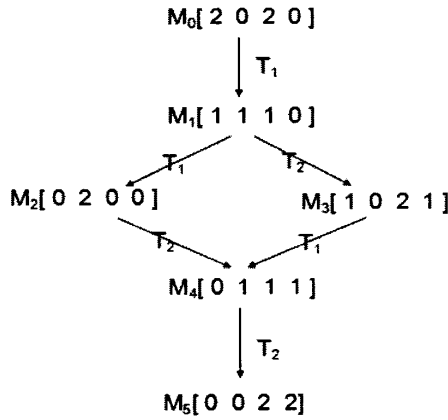


图 3.6 Petri 网可达树

Fig. 3.6 Petri net reachability tree

资料来源：作者自绘

## 2. 关联矩阵

关联矩阵一般是用来描述 Petri 网系统中的动态结构，主要用来分析 Petri 网中不依赖于初始标志，而仅和网结构有关的特性，如结构有界性，结构公平性，和可重复性等。

若对于一个有  $m$  个库所  $n$  个变迁的 Petri 网，则它对应的关联矩阵用符号  $C$  表示<sup>[62]</sup>，可以表示为：

$$C = C^+ - C^- = [C_{ij}]_{m \times n}$$

其中， $C_{ij}^+ = O(p_i, t_j)$  是从变迁  $t_j$  到库所  $p_i$  的有向弧的权系统。

$C_{ij}^- = I(p_i, t_j)$  是从库所  $p_i$  到变迁  $t_j$  的有向弧的权系统。

在用 Petri 网建模时人们一般习惯把权系统标注在所对应的弧上，便于分析，若权系数为 1 时则不用标注。若  $I(p_i, t_j) = 0$  或者  $O(p_i, t_j) = 0$  则表示  $p_i$  到  $t_j$  或者  $t_j$  到  $p_i$  没有对应关系，则不必画弧。

下列关联矩阵是上图 3.5 所对应的的关联矩阵方程

$$C^+ = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = C^+ - C^- = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3.状态方程

设  $PN = (P, T, F, M_0)$  为一个 Petri 网,  $C$  为  $PN$  的相关矩阵, 若  $M \in R(M_0)$ , 则存在  $n$  维的非负整数向量  $X$ , 使得

$$M = M_0 + C^T X$$

则将上式为 Petri 网的状态方程, 其中向量  $X$  称为变迁激发计数向量, 是一个  $n \times 1$  阶向量, 它给了 Petri 网  $PN$  中  $M$  从  $M_0$  可达的一个必要条件。但它不是一个充分条件。

## 3.4 Petri 网的建模技术

### 3.4.1 构建元模块

Petri 网中的主要元素包括库所、变迁、有向弧和拓肯。库所一般用圆圈表示, 变迁一般用粗线条或者矩形表示, 有向弧一般用带箭头的直线表示, 可以从库所指向变迁, 也可以从变迁指向库所, 拓肯则用一个实心的小黑点表示。库所一般用于描述系统中对象所处的状态, 而变迁则用来描述系统中对象所发生的动作, 即活动部分。有向弧则用来表示系统中对象的创建和撤销, 或者由于系统中对象动作的发生而导致了状态的变化路线, 托肯是一种短暂的组件, 用来模拟系统中的对象, 当变迁被激发时则库所中的某些对象就要被消耗, 拓肯数目减少, 而有些库所中则会得到一些拓肯。

在建立 Petri 网模型时最好先从一个对象类入手, 列出它可能的状态, 对于每一个状态, 画出一个库所, 接着对每一个可能的状态变化画出一个变迁, 变迁拥有从旧状态而来的输入弧和指向新状态的输出弧。

### 3.4.2 结合网

无论是哪一种建模方式, 自顶向下, 还是自底向上。它的实现都是要基于一种层次结构, 通过将较少的或者层次较低的网结构结合起来构成较大的, 或者层次较高的网, 又或是将层次较高的网通过分解成为一种简单的层次较低的网结构, 从而实现结合后或者分解后系统所应该达到的状态。

Petri 网的结合就是一种将较少的或者层次较低的网通过不同的熔合方式形成较高层次网结构的方法, 主要包括三种形成方式: 库所熔合、弧添加、变迁熔合。

#### (1) 库所熔合

库所熔合是一种用来模拟系统中子网之间的异步关系的简单而高效的方法, 因为系

统中的通讯是异步的，即就是系统中产生一个托肯的动作和消耗该托肯的动作不能同时发生，两个动作可以发生很多次也可以一次都不发生。当我们进行库所熔合的时候，可以将其中的一个库所看成主库所，其他的库所与它进行熔合，而那个库所将作为唯一可以初始化托肯的库所，其它库所仅作为熔合库所或是主库所的栓子。

如下图 3.7 所示就是一个简单的库所熔合示意图，在此图中左边的子网能为它的“发送的消息”库所产生托肯，而右边的子网通过“接收的消息”库所来消耗这些托肯。通过熔合的两个库所来完成子网之间的通信。

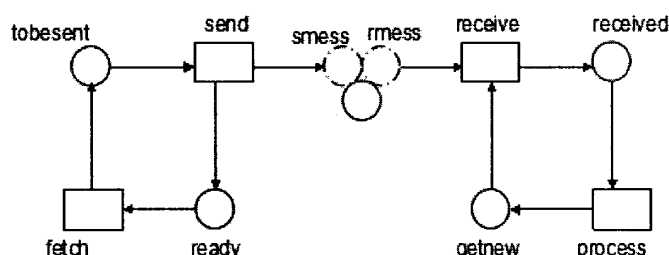


图 3.7 通过库所熔合实现的异步通信

Fig. 3.7the whole life of people

资料来源：系统工程 Petri 网-建模、验证与应用指南<sup>[63]</sup>

## (2) 变迁熔合

变迁熔合是用来合并对象类建模的一种最自然的方式，通过子网中的变迁熔合来可以模拟子网间的同步通信，当某一个对象产生一个动作时，对于不同的对象之间可能同时会有相对应的动作反应，而所有参与熔合的变迁在激活状态下产生的托肯也是参与熔合的所有变迁产生的托肯的和。如下图 3.8 所示的变迁熔合。

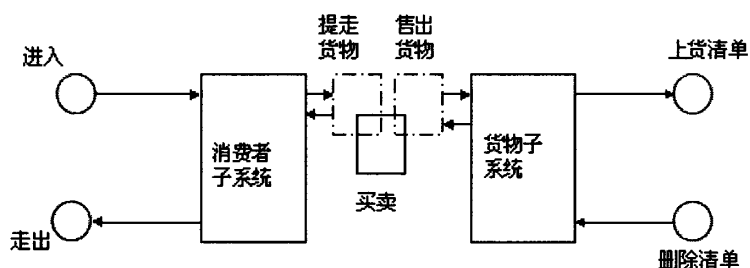


图 3.8 超市处理过程的分解

Fig. 3.8supermarket decomposition process

资料来源：系统工程 Petri 网-建模、验证与应用指南<sup>[63]</sup>

从上图 3.8 中我们可以看到当消费者子系统发生提货动作的时候，货物子系统也会发生售货动作，而且提货动作和售货动作是同时发生的，而这两个不同的动作我们是通过商品买卖这一动作将其熔合在一起的。

### (3) 弧添加

弧添加是另外一种描述同步通信的方法，弧添加主要有两种方式，一种是由子网的库所指向另一个子网的变迁的添加弧，该添加弧主要是限制了系统中变迁的出发，因为它要想发生就必须得到额外的拓肯。另一种是由子网的变迁指向另一个子网的库所的添加弧，又称输出弧，而输出弧则扩展了变迁的触发。具体弧变迁可见下图 3.9。

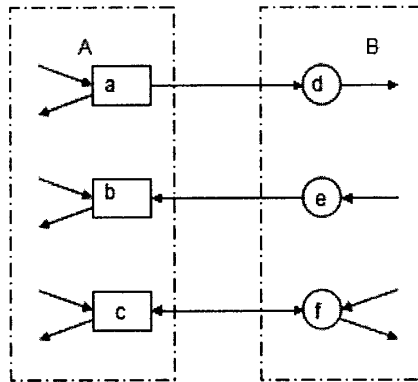


图 3.9 弧添加的三种方式

Fig. 3.9 Three ways of arc added

资料来源：系统工程 Petri 网-建模、验证与应用指南<sup>[63]</sup>

### 3.4.3 高级网

高级网主要是对基本的 Petri 网的一个拓展，主要针对比较复杂的动态离散事件的建模，这些扩展主要包括着色、优先级、时间。

#### (1) 着色

有色 Petri 网是高级 Petri 网建模的有效方法之一，它通过给 Petri 网中的标识着以不同的颜色，有效的区分了标识的类型，并且大大简化了 Petri 网模型的复杂结构，有色 Petri 网能够很好的描述异步并发的系统，尤其是对系统中不确定性的问题给予充分的描述，它能够对异步并发系统中每一步的各种可能性作出充分的描述和预测，有色 Petri 网不仅将 Petri 网系统中的物理结构及资源状态的初始分布情况有效的展示出来，同时也间接的展现出 Petri 网在引发规则的作用下异步并发系统的动态行为机理。此外有色 Petri 网通过应用强大的数学方法将 Petri 网中的情况进行分解，使系统更加具有层次化。

变迁在实施过程中会产生标识，而这些标记的值与变迁实施过程中消耗的标记值有关，与传统的 Petri 网不同的是，标记在产生过程中他的值始终是变化的，而传统的 Petri 网却不能够很好的区分两个标记，也就是说同一库所中的两个标记无法通过定义区分，因此为了解决这方面的问题，就产生了有色 Petri 网，有色 Petri 网就是将系统中对象所具有的特征和它所对应的的标记有效的结合起来，通过为其中的标识进行着色的办法将

传统的 Petri 网进行扩展, 这种办法是将 Petri 网中的每一个标识给定一个数值, 即颜色, 从而达到了对 Petri 网中的不同标识进行区分的目的。

在有色 Petri 网中托肯拥有很多种颜色, 托肯的颜色是有限的也可以无限的, 在 Petri 网的库所中都规定了一个允许的颜色集, 如果某个变迁产生的托肯的颜色在其后继的某一个库所中不被接受, 则这个变迁不能被触发。对于有色网的每一个变迁, 其消耗和产生的托肯的颜色之间都有一个关系, 如果一个变迁被触发, 则一定有它消耗的托肯满足前置条件, 而产生的托肯满足后置条件, 这些前置条件和后置条件都通过弧上的表达式来解释。

### (2) 时间

通常当我们想要对一个系统过程进行预想性能判断时, 我们就通过采用时间扩展的方法来建模, 采用时间扩展的方法, 即就是对 Petri 网中时间间隔或者时间延迟进行估计。该方法是将时间标记作为一个戳, 给每个托肯设定一个时间戳, 该时间戳指明最早可获得托肯的时间。该时间戳可以用一个实数来表示, 也可以用一个实数区间来表示, 比如一个标记为 1 的时间戳则表明该标记只有在时刻 1 之后其所对应的的托肯才能被变迁消耗, 当标记的时间戳早于当前的时间时, 该变迁才处于就绪状态, 变迁的就绪时刻是它的输入库所所包含的最早的可用标记的时刻, 标记的消耗按照最早时间原则进行消耗, 也就是说在一个变迁被激发时库所中拥有最早时间戳标记的那个库所将被最早消耗, 同理在变迁实施的过程中具有最早就绪时间的库所将被首先实施, 如果在一个系统中多个变迁有相同的就绪时间, 则系统会在实施过程中随意进行选择, 并且一个变迁的实施可能会影响另一个变迁的就绪时刻。

我们可以将 Petri 网对时间的处理看作系统的一个特殊的优先级, 任何事件发生想要发生变迁的时间以及这些事件的发生时间都将依赖于这些时间戳, 尤其当含有冲突事件的系统中, 时间戳可以有效的避免冲突的发生, 含有最早发生时间的那个事件会优先发生, 这样就会减少一部分冲突事件的发生, 而只有当冲突事件的发生时间相同时, 这时才会产生真正的冲突。

### (3) 分层

层次 Petri 网主要是用来解决复杂庞大的系统建模所经常用到的方法, 层次 Petri 网中有父网和子网之分, 父网就是网络模型的主系统, 而子网则是在父网模型主系统下所派生出来的系统, 或者是对父网的进一步细化。

在进行分层 Petri 网时, 可以通过自底而上的方式, 也可以通过自顶向下的方式, 若是采用自底而上的方式, 首先应该详细描述基本的组成部分, 然后逐步进行组合合并成更高一级的网模型, 以此方式, 逐渐完成模型的整个体系的构建。采用自顶向下的方式, 则应该先把握模型的主旨, 然后进一步细化网模型的功能, 不断的逐层进行细化, 直到最底层只包括库所和变迁, 则就完成了整个网模型的构建。

在复杂 Petri 网建模过程中, 分层法是必须的, 我们只有将复杂且庞大的网系统分

解成一个个更小的子网，才能更加直观简单的分析网模型，或者只有通过一个个更小的子网的建立，从而才能准确，完善的创建整个网系统，所以层次化的 Petri 网建模方法在高级网建模过程中是必不可少的。



## 第四章 集装箱码头生产物流分析

### 4.1 集装箱码头生产物流要素构成

集装箱码头的生产物流构成要素主要包括物质资源：码头前沿，桥吊，集卡，堆场，龙门吊，闸门，人力资源，以及信息资源。

#### 1.物资资源主要包括

码头前沿主要是为桥吊进行集装箱船舶货物装卸提供一定的场所。

(1) 桥吊。桥吊主要按照事先制定好的装卸船顺序单，把将要出口的集装箱从集卡装到指定的船舶上，或者将进口船舶上的集装箱卸载到集卡上从而运送到堆场。

(2) 集卡。集卡是连接码头前沿和堆场的重要枢纽，集卡主要负责把桥吊从进口船舶上卸载下来的集装箱货物，运输到堆场的指定箱区内，或者把将要出口的集装箱，从堆场箱区运送到码头前沿桥吊的作业位置下。

(3) 龙门吊。龙门吊主要负责堆场集装箱的装卸作业，将集卡上运过来的进口的集装箱卸载到指定的箱区位置上，或者将将要出口的堆场箱区内的集装箱装在到集卡上通过集卡运送到码头前沿。龙门吊在堆场内有其专门的行走轨道，可以在堆场之间灵活进行各堆场区域内集装箱的装卸作业。

(4) 堆场。堆场不仅是龙门吊进行装卸作业的场所，也是集装箱进行储存，中转的重要场所。

(5) 检查口。是集装箱货物进入，以及运出集装箱码头的出入口，主要负责集装箱货物的交接，以及相关证件的交接，和集装箱货物的审查的工作，是集装箱货物出入集装箱码头的必经之路，保证集装箱货物的安全出入，确保集装箱码头利益。

#### 2.人力资源

人是集装箱码头物流作业活动的主要实施者和控制者，作为码头物流作业系统的主体，对集装箱码头物流作业活动的顺利进行起着重要的作用。

#### 3.信息资源

随着信息化技术的发展，集装箱码头也逐渐采用信息化管理方式，以及智能化的作业模式，通过企业信息化管理方式将企业内部与企业外部所涉及的物力，财力，人力，技术等资源通过信息化的方式整合起来，通过实时掌控作业讯息，方便快捷的进行信息交流，从而实现快节奏，高效率的作业运转模式。

## 4.2 集装箱码头生产物流系统作用

集装箱码头是集装箱货物运输系统的集散站，作为集装箱运输系统的缓冲地，为集装箱货物提供堆存、仓储、转运的场地，随着信息化技术的发展，港口物流业也发生了突飞猛进的变化，集装箱码头作为水陆运输和陆路运输的连接点和枢纽，不仅在促进货物运转和输送方面起着重要的作用。而且也在很大程度上影响着集装箱码头的生产作业效率。一般而言，货物从发货地运输至目的地的全过程可分为两个阶段，动态运输和静态处理。据有关材料显示<sup>[60]</sup>，码头货物在整个过程中大约有 65%的时间处于动态运输而剩下的 35%则处在静态堆存，装卸，转运等状态下，而动态的运输所消耗的劳动力大约为 20%，静态处理所消耗的劳动则为 80%。因此要提高码头的生产力水平就必须尽力缩短货物在码头的储存、转运的时间，提高码头的工作效率。

## 4.3 集装箱码头生产物流系统特点

集装箱码头生产是港口码头业务的核心内容，集装箱码头物流具有以下特点：连续性，协作性，生产不平衡性。

连续性：港口集装箱作业为 24 小时不间断作业，港口集装箱物流承载着人类 80% 多的物质流通需求，随着人民生活水平的提高，人们对物质的需求愈加迫切，从而使得物质的流通更加频繁，顾客对物质的迫切需求以及日益激烈的竞争都促使港口集装箱作业迅速、准确、及时。此外集装箱物流不间断作业对于降低仓储，堆存成本具有很大的影响，同时可加快整个物流体系的运输效率。港口码头 24 小时不间断的作业，要求港口码头生产的各个环节，各个作业之间都必须在时间和空间上保持密切配合，同时各个码头，船舶，货物之间要保持一定的比例，任何一个作业的中断都将导致整个作业流程的中断，破坏其连续性和比例性，从而延缓生产，降低生产效率，为企业造成一定的经济损失。

协作性：集装箱码头是各个运输方式的枢纽和交汇点，是人们大部分物质的集结地，本身就是一个很复杂和庞大的系统。从外部组织来看主要包括：船公司、代理机构，外贸公司、港监、船舶供应、保险、公路、铁路、等部门。从内部来说集装箱码头主要涉及装卸机械、协调人员、堆场、机械维修人员、生产调度人员等等。共同的经济利益和统一的作业需求要求各个部门之间必须积极配合，紧密协作，只有各个部门各个环节紧密协作，才能实现集装箱码头货物的顺利且高效化流通，实现各自利益的最大化。

生产的不平衡性：港口生产的不平衡性是客观存在的，也是大多数运输企业所具有的一种共同的问题。由于货物到港的时间，数量以及种类等的不平衡性，造成了港口生产在工作上忙闲不均。货物多时，设备和人力不够，造成大量的货物堆存，船舶压港，

影响货物的流通效率。当货物少时，设备和人力得到闲置，造成了大量的浪费。此外造成边检，商检，抛锚检，运输工具的配合也造成了集装箱码头作业的不均衡现象，因此如何解决这种不均衡对于提高集装箱码头生产是非常重要的。

#### 4.4 集装箱码头生产物流内部网络分析

集装箱码头生产物流网络是以码头设施为主要节点，以各设施的功能作业为连接线，反应码头内部物流设施的功能点和功能点之间的相互关系，是码头整体运作方式的一般体现。主要包括岸边装卸作业、水平运输、龙门吊装卸作业、闸口进出等作业活动。主要如下图 4.1 所示：

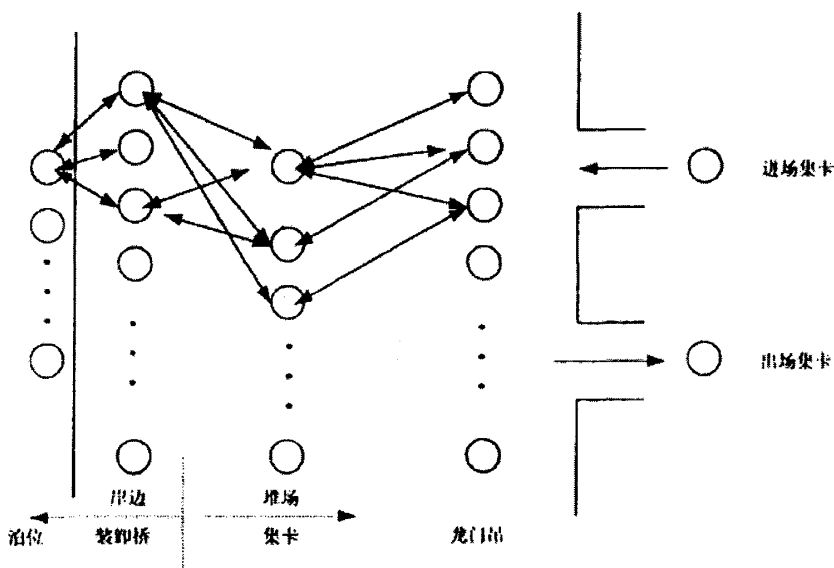


图 4.1 集装箱码头内部网络分布图

Fig 4.1 container terminal distribution within the network

资料来源：集装箱码头内部物流网络运作研究<sup>[33]</sup>

#### 4.5 集装箱码头生产物流作用流程分析

集装箱码头生产物流作业主要包括四个流程：装船工艺流程，卸船工艺流程，提箱工艺流程，集港工艺流程。

##### 1. 装船作业工艺流程

集装箱货物在出口之前，无论是哪种箱型的货物（整箱，拼箱或者空箱）一般都必

须事先移动到码头堆场以方便及时装船，集装箱码头在装箱之前必须做好准备工作，应该首先掌握出口集装箱的相关信息，拿到相关出口箱单证资料，装船之前的准备工作内容如下：

##### （1）出口箱进场期限

为了保证集装箱码头顺利进行装船作业，集装箱码头规定出口的重箱一般应该保证在集装箱装船前四天开始进场，到装船前 1 天截止，如果有某些出口箱的入港时间超过了规定的时间，则码头的工作人员应该根据具体的情况，对其进行安排是否允许进场。

##### （2）编制配载图

码头配载员根据装箱单、经海关确认放关的场站收据，以及预配船图来制作配载计划，预配船图必须在出口箱进入堆场的前一天由船公司或者船代理交至码头配载计划室，在制作船图时船方应该首先进行签字确认，而在配载工作结束以后，码头配载员则根据出口箱的箱位和制作的船图来编制装船顺序单，并将制作好的顺序单，一份发送至控制室，控制室作为指挥的依据，控制室将装船顺序单进行打印，自己保留一份，其余的交给现场的工作人员。

##### （3）堆场发箱

控制室向堆场工作人员发出发箱指令，堆场工作人员在进行发箱时，必须仔细核对箱号，核实无误后，指挥堆场机械发箱。发箱完成后则应该在装船顺序单上做注销记录。

##### （4）船边验箱及装箱

集卡将将要出口的集装箱运送至集装箱码头前沿，船边验货员需要核对箱型箱号，并且检查集装箱的铅封以及外表情况，核实完毕以后，岸边指挥员指挥桥吊将出口集装箱装入指定的船箱位，然后，外轮理货员需要记录下出口集装箱的实际船箱位，在装船结束后，船长在码头装卸作业上签字确认。

##### （5）工作结束

船边验货员将装船顺序单等其他相关单证交给岸桥指挥员，岸桥指挥员进行汇总，装船作业完成后，岸桥指挥员与外轮理货员办理交接手续，双方核对本次集装箱装船的箱数，箱号，以及残损单，核对无误后，双方均在装船顺序单上签字确认。然后进行下一班装船工作。主要装船工艺流程见图 4.2 所示：

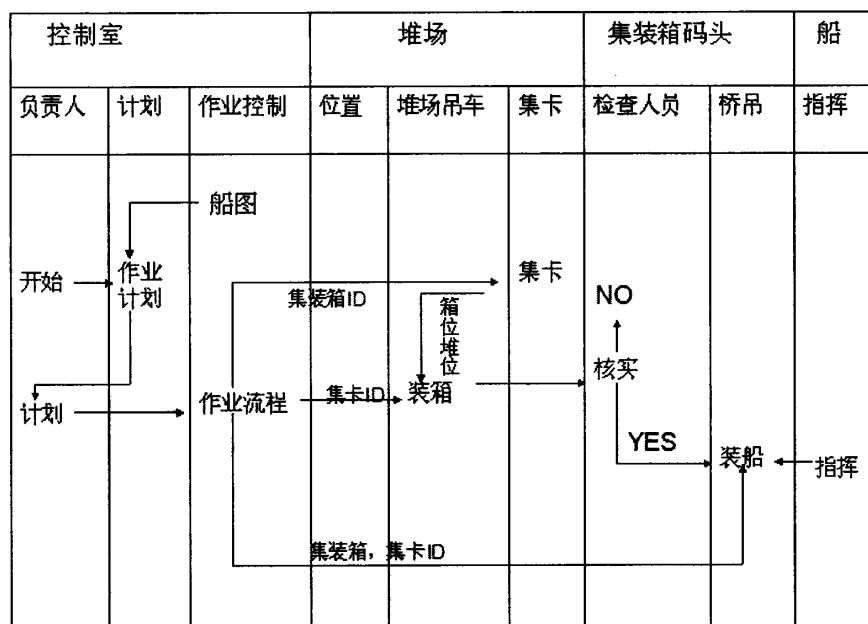


图 4.2 装船工艺流程图

Fig. 4.2 workflow of loading process in terminal

资料来源：作者自绘

## 2. 卸船作业工艺流程

在集装箱码头进行卸船工艺前，需要提前对进行卸船的相关事宜进行计划、安排。

卸船前的准备工作主要有以下几个方面

### (1) 进口资料的收集整理

为了保证集装箱船舶的顺利靠泊和卸货，船代理或者船公司应该事先规定的时间内向集装箱码头提供到港船舶的相关信息，以及进口集装箱的相关单证资料，以便为进口箱卸船作业做好充分的准备，对于远洋航线的定期班轮，要求船公司或者船代理应该在进口船舶到港前 96 小时，向集装箱码头提供有关进口集装箱货运单证资料。主要包括进口船图、进口舱单、集装箱箱号清单、冷藏箱清单、特种箱清单、危险品箱清单、捎带散杂货清单以及集装箱残损单等。对于近洋航线的船舶，则要求船舶应该在其抵港前 48 小时，向集装箱码头发送箱位和货物的具体信息。主要包括：船箱位、货名、提单号、重量、收货人、特种货物资料、整拼箱货情况、特种货物资料、合同号等。

如果进口箱中有危险品箱货物，船公司或者代理必须在口岸所在的港监局，申请办理货物载运申报单，手续，并将申请的货物再晕申报单，以及其他证件交与码头计划部门一份。

## (2) 制定船舶靠泊计划

船公司应该根据装运港发来的集装箱货运资料，预计进口船舶到港时间，将预计好的船舶到港时间发送至码头，通知码头做好卸船准备，与此同时，船公司也应该在相应的时间内，将有关进口的集装箱货运的相关资料送至集装箱码头，集装箱码头根据进口集装箱货运资料编制船舶昼夜计划以及船舶近期计划等。

##### (3) 进口集装箱货运资料的签收

集装箱码头单证管理员收到集装箱货运资料以后，应该仔细进行核实，确认签收，复印以后分发给相关作业部门。

##### (4) 编制卸船计划

码头计划员应该仔细认真的核对码头单证员发送过来的相关集装箱货运资料，之后根据船图以及计划靠泊方向来编制集装箱卸船的顺序单。编制的原则是从右后往前、由里往外、由上往下、依次进行编制。在编制过程中，应该仔细认真尽量及时的进行编制，以免出现差错。

##### (5) 安排堆场计划

进口箱在码头堆场合理是否，不仅影响卸船计划的顺利进行，也影响货主提箱的效率，因此码头指定合理的堆场计划，码头在制定堆场计划时必须充分考虑进口集装箱的箱量、箱型、交货地等因素制定合理的堆存计划。如果卸空箱，堆场在制定堆场计划时，还要考虑空箱集装箱经营人。

为了确保进口船舶在码头顺利卸货，在船舶到港前，码头堆场计划员，应根据码头堆场的实际情况，事先做好进口集装箱堆存计划，主要包括以下方面：

- a.不同尺寸大小的集装箱应该分开堆放
- b.空箱和重箱应该分开堆放
- c.同一提号的大型货箱集中堆放
- d.需要中转的集装箱单独堆放
- e.特种箱、危险品箱以及冷藏箱应该分别堆放在相应的特种箱堆场、危险品箱堆场以及冷藏箱堆场。

按照上述的堆存原则，堆场计划员最好在船舶作业开工前至少 4 小时，完成进口箱的卸船堆存计划。

完成了上述的各项准备工作，当船舶到达码头时，卸船作业正式开始，主要涉及以下相关作业内容：

##### (1) 核实计划

核实计划主要是指船舶到港后，岸边指挥员以及码头进口业务员向船方了解进口箱的实际情况，以及领取相关的到港相关资料。

##### (2) 开工准备

在开工前，综合控制员将卸船顺序单以及船图分别交于船边验箱员、堆场指挥员以及岸桥指挥员，外轮理货员。验货员和理货员应该仔细检查箱子的外表状况。

(3) 桥吊卸船及验箱

桥吊司机将进口船舶上的集装箱吊送至码头前沿的集卡车上， 船边验货员按卸船顺序单上列明的堆场计划箱位， 指挥集卡司机将集装箱堆放在指定的堆场位置。

(4) 堆场收箱

在卸船前，控制室的控制员指挥轮胎吊移动到指定的位置，准备卸载集卡运送来的集装箱，集卡将从桥吊处卸载过来的集装箱运送到指定的堆场位置，然后轮胎吊开始卸箱，轮胎吊在卸载完成以后，应该将实际的箱位以及箱号告知控制室文员，控制室文员将其进行整理。

(5) 复核和交接

进口箱卸船结束以后，各负责人应该认真核实相关的单证，做好验箱和交接工作。具体作业流程详见图 4.3 所示

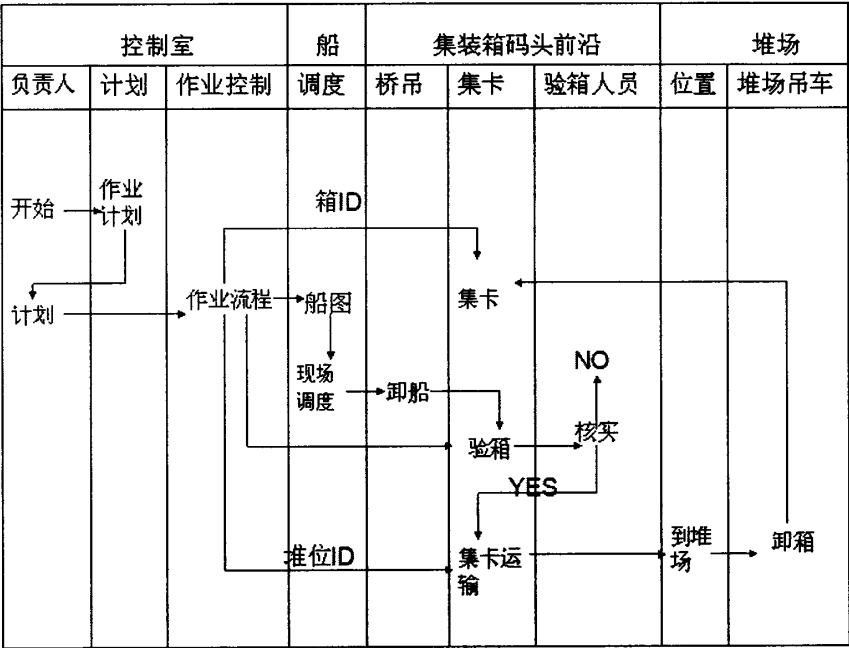


图 4.3 卸船工艺流程图

Fig. 4.3 workflow of unloading process in terminal

数据来源：作者自绘

3. 提箱作业工艺流程

为了防止进口货物在堆场过度积压或者集装箱在码头堆场闲置，加速集装箱的周转效率，一般情况下船公司会及时通知收货人到码头提货，收货人在接到码头的船公司的

收货通知后，需要凭相关证件到船公司换取费用账单，提货单以及交货记录两联，收货人则需要持这些单证以及其他相关证件办理完一关三检等其他手续之后，才可到码头办理提货手续。

##### 重箱提箱计划申请

##### (1) 码头提货申请

如果收货人要求进口集装箱整箱提运，则客户应持办理完一关三检的提货单以及设备交接单到集装箱码头业务大厅办理提运作业预约申请。码头受理台业务员在办理提货申请前，应仔细检查申请人的提货单手续是否齐全，核对无误后，作提箱预约，同时打印提箱凭证，交予申请人。

##### (2) 客户确认费用

客户凭借盖有收费确认章的小提单到客服办理提箱，客服人员核实提货单和 EIR，办理电脑提箱预约，并设定提箱的期限。

##### (3) 码头检查口办理手续

在整箱提运的当天，货主或内陆承运人凭“提箱凭证”“IC 卡”“设备交接单”到等相关凭证到检查口办理提箱手续，检查口工作人员确认无误后，打印提箱小票交集卡司机，集卡司机根据所提集装箱的堆场箱位到指定堆场提货。

##### (4) 码头堆场发箱

集卡司机到达指定堆场后，将发箱凭证交予堆场员，堆场员核实无误后，指挥轮胎吊司机发箱，并在发箱凭证上签字后，交还集卡司机。

##### (5) 码头道口出场交接

集卡装箱完成后，集卡司机驶至出场检查口时将堆场员签过字的发箱凭证交予出场业务员，出场业务员核实无误后，打印出场门票，并在出场设备交接单上进行交接确认，集卡出场

具体作业流程详见图 4.4 所示



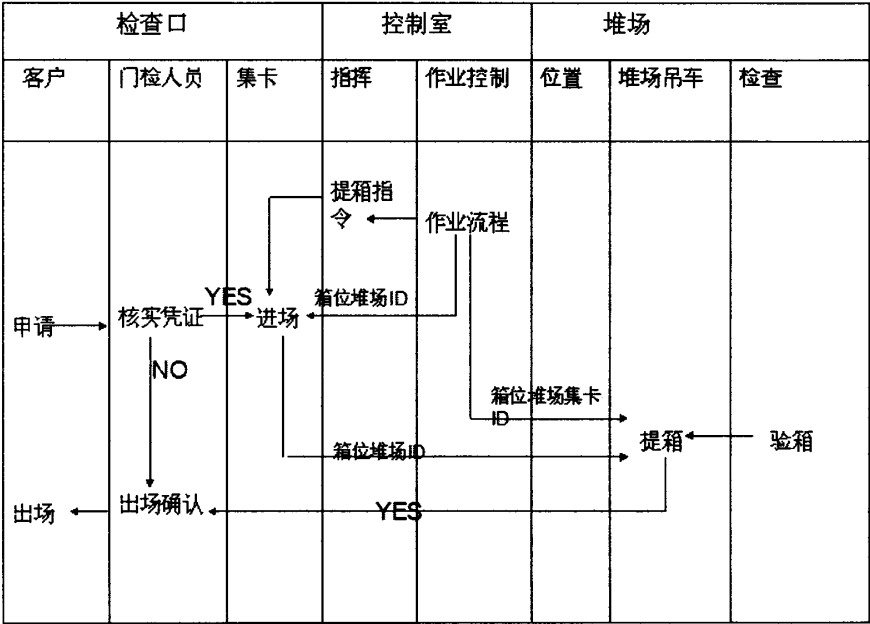


图 4.4 提箱工艺流程图

Fig. 4.4 picking up container process in terminal

数据来源：作者自绘

4. 集港作业工艺流程

集港即就是在集装箱进行出口作业之前，将集装箱顺利的运送至堆场，进行出场前的准备工作。主要涉及以下内容：

在集港之前，为了做好准备工作，集装箱码头必须预先收到需要出口集装箱的相关单证资料，集装箱码头要求船公司或者其船代理应该在出口箱装船的前八天提供出口用箱计划，预配箱清单以及出口装货清单等相关资料。

集装箱码头单证员在签收完上述单证以后，应该将用箱计划交于箱务管理员，将预配清单和装货清单交于配载计划员，如果有要求拼箱的货物则应该将出口装货清单寄于货运站。

(1) 拼箱货作业集港准备工作

拼箱货，一般由货运站业务员将同一卸货港，或同一航线的货物，统一安排拼装在同一个集装箱里边，将需要拼箱的货物在货运站进行装箱以后将其运送到集装箱指定堆场准备装箱。

货运站向集装箱堆场交箱时，应该向集装箱堆场提供装箱单，出口许可证，场站收据以及特种货物清单等相关资料。

(2) 整箱货作业装船准备工作

整箱货主要是指集装箱装载货物的容量达到其容量的 75%或者其箱重负荷达到 95%的货物,在进行整箱货装船时,托运人首先应该在船公司办理设备交接单,领取空箱,领到空箱之后,回到自己的仓库开始装箱,装箱完毕以后,运到集装箱的堆场等待装船,主要经过以下活动。

(3) 备箱发货

集装箱码头箱务管理员按照用箱计划,编制“空箱清单”清单上标有箱号、箱型、堆场位置、控制室积极做好备箱发运工作。

(4) 用箱申请

托运人持船公司签发的集装箱发放通知单,和集装箱设备交接单,在提空箱前一天,到码头受理台办理提运空箱作业申请手续,码头受理台受理后,将提运空箱作业申请交由计划调度,用以制作昼夜作业计划。并将相关资料交于控制员。

(5) 提运空箱

集卡司机需向检查口业务员交提箱凭证和设备交接单等资料,检查口业务员核实,确认完成后,承运人将集卡司机带入指定堆场进行提箱,堆场员核对提箱小票后,指挥堆场机器发箱。

(6) 出门交接

集卡司机接到空箱之后,开车驶向检查口,检查口工作人员核对箱号、车号、核对无误后,双方在设备交接单上签字,集卡司机离开。

(7) 编制单证

检查口业务员负责编制“空箱出场日报表”工作结束后交于控制员。

集港作业:

(1) 进场申请

一般来说普通出口重箱无需办理申请,在装船前四天直接进场即可,但是特种箱或者危险拼箱进场必须办理出口重箱申请,计划部门根据出口重箱进场作业申请编制昼夜计划,其余交于控制室。

(2) 重箱进场

集卡司机在进场时,应向检查口交验以下单证

A.装箱单

B.进场设备交接单

C.集装箱装箱证明书

检查口业务员需要仔细核对装箱单的相关内容,验箱员进行验箱,并和集卡司机签字确认,集卡司机进入堆场。

(3) 堆场卸箱

集卡司机驶入堆场指定位置,堆场员核实小票后,指挥堆场机械卸箱。同时在小票上签字确认。

(4) 驶出检查口

集卡司机卸完箱以后将进场小票交予出场检查口业务员。检查口业务员核实完成后，打印门票交予集卡司机带出。

(5) 编制单证和分发

出口重箱进场后，检查口业务员将相关的资料凭证分别交予统计部门，配载计划部门，以及船公司，以便进行出口计划安排。

具体作业流程详见图 4.5 所示

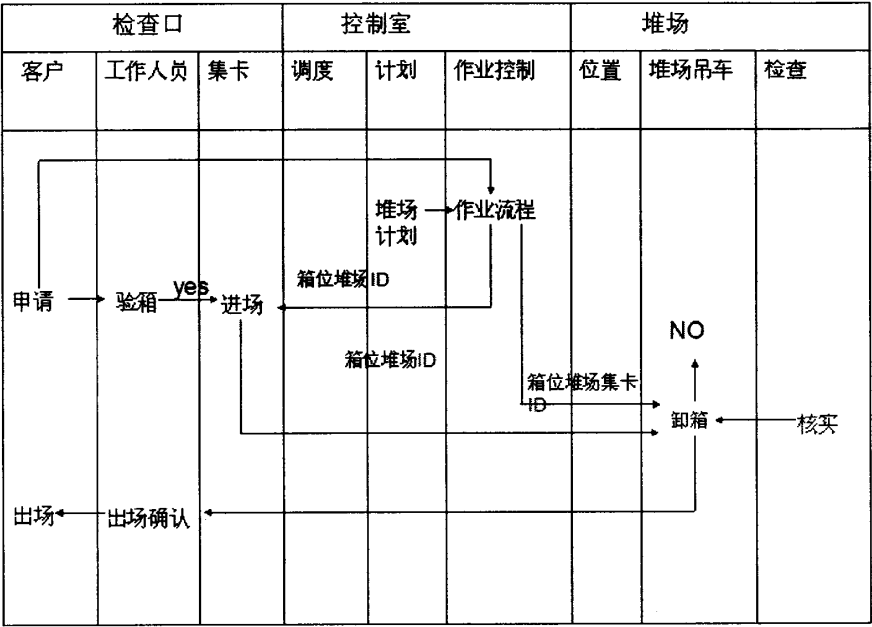


图 4.5 集港工艺流程图数据

Fig. 4.5 colleting container process in terminal

资料来源：作者自绘

## 第五章 基于 Petri 网的集装箱码头生产作业建模分析

### 5.1 基于 Petri 网的集装箱码头生产作业建模思想

Petri 网是一种形式化的简单直观的建模工具,有其自身的优点,它能够很好的描述动态离散事件,同时对于系统内同步,并发、冲突和顺序关系的活动能够很好地解决。通过直观,简单易懂的图形表示各个组合模型,它主要用于描述系统中对象所发生的变化,包括变化发生所需要的条件,变化之间的关系以及以及变化后发生的影响。

在 Petri 网模型中,一般用库所表示系统中资源的条件和状态,而用变迁则表示动作,操作等动态活动。库所中的托肯常常用来表示库所中的资源是可用的,或者表示库所中的条件已经达到,比如一个库所里面存在一个托肯时,则表示该状态已经达到,表明该库所所对应的变迁可以被触发。Petri 网中的一个变迁被触发,说明其前置条件得到满足,后置条件将要即将达到,因此变迁的触发表示一个状态的结束和即将开始。

集装箱码头的生产物流包括装船、卸船、提箱、集港等生产工艺,每个生产工艺都涉及堆场,检查桥,码头前沿 3 个物流作业区域,在我国除少数一些港口外,现存环境中的上述 4 种工艺基本上是独立的,每个生产作业流程都是一个动态的离散活动,每个生产作业环节的发生都要受到前置作业的影响,而每个生产作业内部之间也存在一些同步,并列等现象,因此本文主要根据各个活动中的关键动作为线索,将集装箱码头活动中的对象与 Petri 网建模过程中的库所对应起来,对象发生的动作与集装箱活动中的变迁对应起来,并考虑动作发生的先后顺序,对各个对象动作编号,发生较早的动作活动,用较小的数字标注,发生较晚的动作用较大的数字标注。然后通过变迁弧将系统中的库所和变迁依次连接起来。形成完整的 Petri 网系统。

### 5.2 基于 Petri 网的集装箱码头生产作业建模步骤

通过上述分析,本文通过利用 Petri 网来对集装箱码头物流生产作业系统进行建模研究,建模研究的主要步骤如下:

#### (1) 明确 Petri 网的事件和状态

应用 Petri 网建模过程中必须首先明确需要执行的事件和资源所处的状态, Petri 网的库所中的元素主要代表的是系统中的资源所处的状态,而变迁中的元素则代表的是动作和作业的实施,在对集装箱码头生产物流作业建模时我们首先应该明确哪些环节表示的是状态,而哪些环节表示的是活动实施的动作。并把表示状态的内容与库所对应起来,

并把表示动作的内容与变迁对应起来。

#### (2) 确定事件和状态的发生顺序

在明确了状态和动作之后，接下来就必须对这些状态和动作之间的顺序进行整理，明确事物的先后发生顺序，保证事件发生的合理性和有效性，库所和变迁的顺序安排必须遵循一定的逻辑顺序。

#### (3) 对模型进行检验

首先可以通过事件发生的规律对所建 Petri 模型进行主观方面的检验，若主观检验合理则可以再次通过 Petri 网的分析方法来对模型的有界性，合理性以及公平性等进行验证。

#### (4) 模型修改

当所建立的 Petri 网模型不能很好地发应这个流程的运行情况，或者各个元素之间不具有很好地逻辑关系，则应该对该模型进行修改，使其更加完善，知道所建模型能够准确合理的反应系统流程的运行状态。

### 5.3 基于 Petri 网的集装箱码头各物流生产作业建模

集装箱码头的生产物流作业主要包括装船，卸船，集港，提箱，四种主要生产工艺，装卸工艺是港口生产基础，是保证集装箱码头高生产作业效率的前提，本文根据第四章的各主要作业的流程图，并且结合 Petri 网的建模方法，建立四种工艺 Petri 网模型图如下所示，与此同时在每个生产作业 Petri 网模型建立完成以后，本文还会对所建模型的特性进行分析，通过应用 Petri 网的分析方法检验模型的活性，可达性和有界性等特性，发现模型中的潜在问题，从而进行修正，确保模型的正确性。

在前面章节里边我们已经对 Petri 网的行为特性进行了简单的阐述，主要包括活性、可达性以及有界性三个方面。活性是用来检查在应用 Petri 网建模过程中系统中所有的过程是否都能被执行，有界性则是检查一个库所中是否具有无数个托肯，从而确保系统不会出现溢出情况，保证一个位置上不会重复启动正在进行的操作，可达性则是反应系统中的任意一个标识是否能够到达另一标识。当模拟系统中的任务执行情况时，库所不变量能够构成一个任务执行的路径，因此利用库所  $p$  不变量可以检验系统中的可达性，有界性，活性。本章主要应用 Petri 网的分析方法中的关联矩阵，求解  $p$  不变量，从而来判断 Petri 网的以上特性。

## 1. 装船工艺的 Petri 网建模

通过结合第四章装船工艺流程，应用 petri 网建模技术可得到下图 5.1 装船工艺 petri 网模型

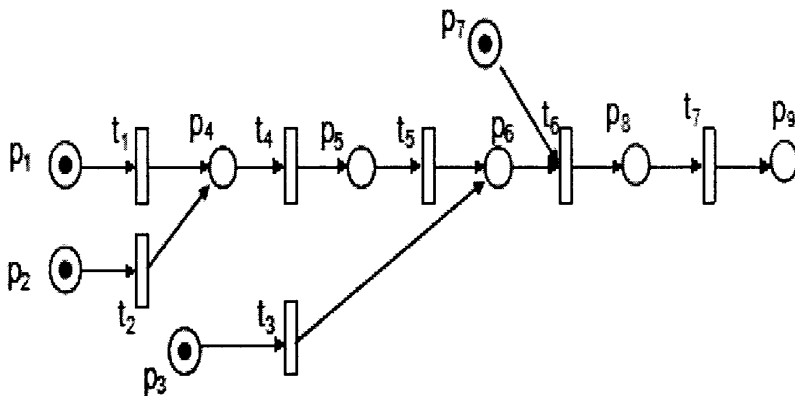


图 5.1 装船工艺 Petri 网模型  
Fig. 5.1 Petri net modeling of loading  
资料来源：自行绘制

P1: 箱集卡收到装船指令

P2: 轮胎吊收到装船指令

P3: 桥吊收到装船指令

P4: 堆场指定位置

P5: 集卡装箱完毕

P6: 码头桥吊指定装船位置

P7: 船指挥发出验箱指令完毕

P8: 验箱完毕

P9: 装船完毕

T1: 集卡驶向堆场

T2: 轮胎吊移向指定堆场装箱位置

T3: 桥吊移向码头指定装船位置

T4: 集卡在堆场装箱

T5: 集卡驶向桥吊指定装船位置

T6: 验箱

T7: 桥吊开始装船

通过应用 petri 网建模方法，本文建立了上述装船 petri 网模型，接下来本文通过应用 petri 网的特性分析中的关联矩阵分析方法来检验所建装船 petri 网模型的合理性，关联矩阵是一种用来描述 petri 网动态结构的方法，可以检验 petri 网的活性，有界性以及可达性等特征。具体检验方法如下所示。

## 2. 装船工艺的 Petri 网模型特性分析

$$\begin{aligned}
 C^+ &= \begin{bmatrix} & 1 & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & \end{bmatrix} \\
 C^- &= \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix} \\
 C = C^+ - C^- &= \begin{bmatrix} & 1 & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -1 & & 1 & & & & \\ & -1 & 1 & & & & \\ & & -1 & & 1 & & \\ & & & -1 & 1 & & \\ & & & & -1 & 1 & \\ & & & & & -1 & -1 & 1 \\ & & & & & & -1 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

由公式  $C^T \times X = 0$  可得到该方程有解，并由方程式组得到可行的 P 不变量：

$$X = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1]$$

由上述结果可以看见，Mn 是可达的，也就是说，上述图所描述的装船 workflow 网，从集卡，轮胎吊，桥吊收到装船命令的那一刻开始，系统中所有对象，通过相互之间的状态转换，最终以一种流的方式，到达了系统网的终点。

## 3. 卸船工艺的 Petri 网模型

同理通过结合上述第四章中卸船工艺流程，应用 petri 网建模技术本文可得到下图 5.2 所示的卸船工艺 petri 网模型。

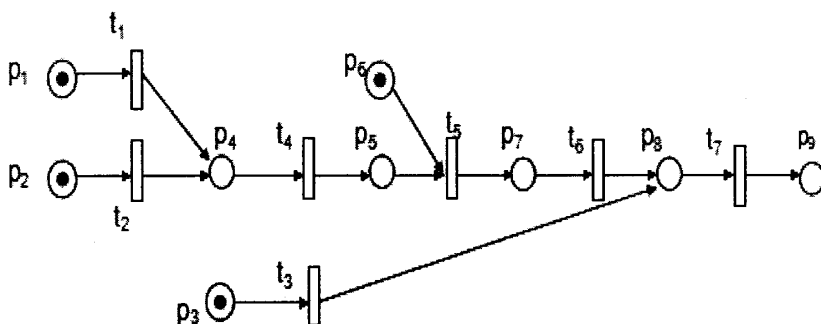


图 5.2 卸船工艺 Petri 网模型  
Fig. 5.2 Petri net modeling of unloading  
资料来源：自行绘制

P1:向桥吊发出卸船指令  
P2:向集卡发出卸船指令  
P3:向轮胎吊发出卸船指令  
P4:码头前沿指定卸船位置  
P5:集装箱卸到集卡上  
P6:桥边指挥发出验箱指令  
P7: 验箱完毕  
P8:堆场指定卸箱位置  
P9:卸箱完毕

T1:桥吊移向指定卸船位置  
T2:集卡驶向桥吊  
T3:轮胎吊移向堆场指定卸箱位置  
T4:桥吊卸船  
T5:验箱  
T6:集卡驶向堆场指定位置  
T7:轮胎吊卸箱

通过应用 petri 网建模方法，本文建立了上述卸船 petri 网模型，同理本文应用 petri 网的特性分析中的关联矩阵分析方法来检验所建卸船 petri 网模型有界性以及可达性等特征。具体检验方法如下所示。



## 4. 卸船工艺的 Petri 网特性分析

$$C^+ = \begin{bmatrix} & 1 & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & & 1 & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$C^- = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & 1 \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = C^+ - C^- = \begin{bmatrix} & 1 & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & & 1 & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & 1 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & 1 \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -1 & & & 1 & & \\ & -1 & & 1 & & \\ & & -1 & & & 1 \\ & & & -1 & 1 & \\ & & & & -1 & -1 & 1 \\ & & & & & -1 & 1 \\ & & & & & & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

与装船的特征分析结果类似，由公式  $C^T \times X = 0$  可得到该方程有解，并由方程式组得到可行的 P 不变量

$$X = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1]$$

同样由上述结果可以看见，Mn 也是可达的，也就是说，上述图所描述的卸船 workflow 从集卡，轮胎吊，桥吊收到卸船命令的那一刻开始，卸船网系统中所有对象，通过相互之间的状态转换，最终也以一种流的方式，到达了系统网的终点。

## 5. 提箱工艺的 Petri 网模型建立

通过结合第四章提箱工艺流程,应用 petri 网建模技术可得到下图 5.3 提箱工艺 petri 网模型。

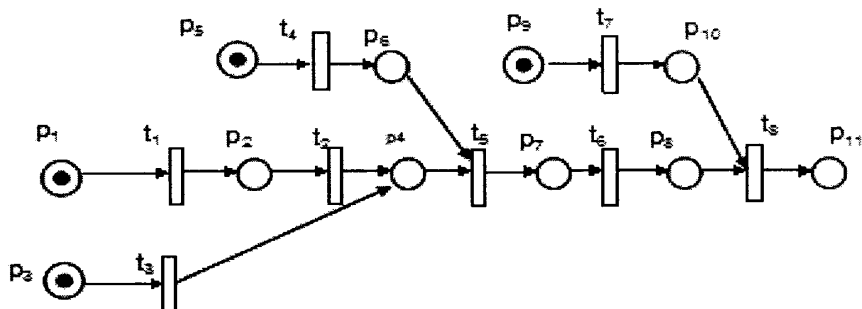


图 5.3 提箱工艺 Petri 网模型

Fig. 5.3 Petri net modeling of picking up container

资料来源: 自行绘制

- |                     |                 |
|---------------------|-----------------|
| P1: 客户发出提箱的申请       | T1: 检查口工作人员核实信息 |
| P2: 信息核实完成          | T2: 集卡驶向指定堆场    |
| P3: 轮胎吊接收到提箱指令      | T3: 轮胎吊移向指定堆场   |
| P4: 堆场指定提箱位置        | T4: 核实发箱信息      |
| P5: 堆场员发出核实发箱信息     | T5: 集卡接箱        |
| P6: 核实完毕            | T6: 集卡驶回道口      |
| P7: 接箱完毕            | T7: 核实信息        |
| P8: 到达道口            | T8: 集卡驶出道口      |
| P9: 出场业务员发出核实发箱信息指令 |                 |
| P10: 核实完毕           |                 |
| P11: 提箱完毕           |                 |

通过应用 petri 网建模方法, 本文建立了上述提箱 petri 网模型, 与上述检验方法相同, 本文通过应用 petri 网的特性分析中的关联矩阵分析方法, 分析了所建提箱 petri 网的活性, 有界性以及可达性等特征。具体检验方法如下所示。

## 6. 提箱工艺的 Petri 网特性分析

$$C^+ = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$C^- = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & 1 \\ & & & & & & & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = C^+ - C^- = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & 1 & & & \\ & & & & 1 & & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & 1 \\ & & & & & & & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & & & \\ & -1 & & 1 & & & \\ & & -1 & & 1 & & \\ & & & -1 & & 1 & \\ & & & & -1 & & 1 \\ & & & & & -1 & & 1 \\ & & & & & & -1 & & 1 \\ & & & & & & & -1 & & 1 \end{bmatrix}$$

由公式  $C^T \times X = 0$  可得到该方程有解，并由方程式组得到可行的 P 不变量为：

$$X_1 = [1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1]$$

$$X_2 = [0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1]$$

同样由上述结果可以看见，Mn 也是可达的，也就是说，上述图所描述的提箱 workflow 从检查口收到提箱命令的那一刻开始，提箱网系统中所有对象，通过相互之间的状态转换，最终也以一种流的方式，到达了系统网的终点。

7. 集港工艺的 Petri 网模型建立

通过结合第四章集港工艺流程，应用 petri 网建模技术可得到下图 5.4 集港工艺 petri 网模型。

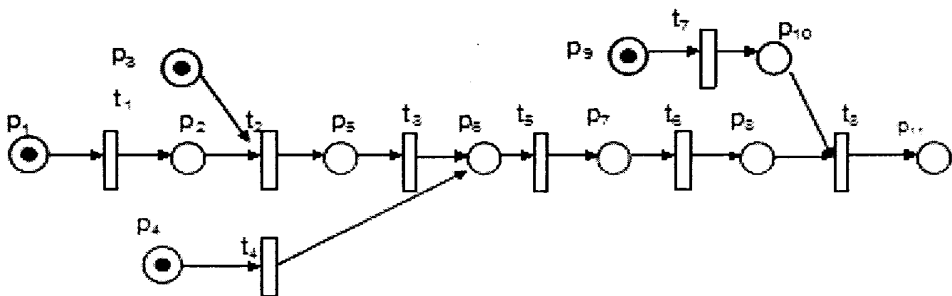


图 5.4 集港工艺 Petri 网模型  
Fig. 5.4 Petri net modeling of collecting container  
资料来源：自行绘制

- |                     |                  |
|---------------------|------------------|
| P1: 集卡司机发出的进场申请命令   | T1: 检查口业务员开始核实信息 |
| P2: 核实完毕            | T2: 验箱           |
| P3: 验箱员发出验箱指令       | T3: 集卡驶向指定堆场     |
| P4: 轮胎吊受到卸箱指令       | T4: 轮胎吊移向指定堆场区域  |
| P5: 验箱完毕            | T5: 卸箱           |
| P6: 指定堆场            | T6: 集卡驶回道口       |
| P7: 卸箱完毕            | T7: 核实信息         |
| P8: 道口              | T8: 集卡驶出道口       |
| P9: 出场业务员发出确认发箱信息指令 |                  |
| P10: 确认完毕           |                  |
| P11: 完成集港           |                  |

通过应用 petri 网建模方法, 本文建立了上述集港 petri 网模型, 接下来本文应用 petri 网的特性分析中的关联矩阵分析方法检验了所建集港 petri 网模型的合理性。主要包括活性, 有界性以及可达性等特征。具体检验方法如下所示。

### 8. 集港工艺的 Petri 网特性分析

$$\begin{aligned}
 C^+ &= \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & \\ & & 1 & & & & & \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \\
 C^- &= \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ & 1 & 1 & & & & & \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & 1 \\ & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \\
 C = C^+ - C^- &= \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & \\ & & 1 & & & & & \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & & & & & & & \\ & 1 & 1 & & & & & \\ & & & 1 & & & & \\ & & & & 1 & & & \\ & & & & & 1 & & \\ & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & 1 \\ & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & & & & \\ & -1 & -1 & & 1 & & & \\ & & & -1 & 1 & & & \\ & & & & -1 & 1 & & \\ & & & & & -1 & 1 & \\ & & & & & & -1 & 1 \\ & & & & & & & -1 & 1 \\ & & & & & & & & -1 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

由公式  $C^T \times X = 0$  可得到该方程有解, 并由方程式组得到可行的 P 不变量

$X1=[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1]$

$X2=[1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0]$

同样由上述结果可以看见， $Mn$  也是可达的，也就是说，上述图所描述的集港 workflow 网从检查口收到集港命令的那一刻开始，集港网系统中所有对象，通过相互之间的状态转换，最终也以一种流的方式，到达了系统网的终点。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 研究结论

近年来,随着港口物流业的飞速发展,港口集装箱物流也得到了显著的发展,本文通过应用 Petri 网的建模技术对集装箱码头物流生产作业进行研究,主要结论有以下几个方面:

(1) 对集装箱码头生产作业进行了研究综述分析,发现目前国内外研究对集装箱码头的生产运作主要围绕码头各个节点进行展开,主要包括:桥吊装卸,轮胎吊装卸,闸口出场,以及水平运输方面,而对集装箱码头的研究越来越偏向实践仿真方法的应用。而本文主要根据集装箱码头生产作业的不同种类,分别从装船,卸船,提箱,集港,四个部分进行了详细的分析,掌握每个环节的主要对象、各个对象的主要作业,以及其作业流向,建立了集装箱码头生产作业流程图,通过流程的分析和优化来提高集装箱码头的生产作业效率。

(2) 了解了 Petri 网的相关概念和定义,分析了 Petri 网的建模方法,和建模技术,应用 Petri 网元素的对应关系将集装箱码头实际生产作业中的对象与动作对应起来,应用 Petri 网建模技术,并且考虑了对象与动作之间的优先度与逻辑关系,从而建立了 Petri 网模型。通过对所建的网模型进行特性分析,计算出该模型的关联矩阵,并通过分析关联矩阵和库所不变量,检验了该模型的活性,有界性,和可达性等特性,认为该模型是可行的。

### 6.2 研究展望

由于相关的资料较少,个人学术水平和经验的限制,本文对集装箱码头物流生产作业环节的模型建立较为简单,不能全面多层次的体现 Petri 网对离散动态事件的建模优势,但是随着今后集装箱码头物流生产作业研究进一步拓展和深入,学者对于 Petri 网研究的逐渐发展, Petri 网在集装箱码头生产作业方面的应用将会更加的广泛和深入。

## 参考文献

- [1] 郭先登. 关于现代城市港口经济的研究[J]. 东岳论丛, 2009, 30(2): 60-66.
- [2] 施丽容. 港口物流服务供应链的构建及其管理初探[J]. 物流科技, 2007, 3: 35-36.
- [3] 袁崇义, Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 3.
- [4] Imai A, Nagaiwa K, Tat CW. Efficient Planning of Berth for Container Terminal in Asia [J]. Journal of Advanced Transportation, 1997, 31: 75-94.
- [5] 沙梅. 集装箱码头物流运营系统通用性建模与仿真[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2009, 6.
- [6] 张佳运, 卢刚. 集装箱码头连续泊位动态分配优化模型及算法[J]. 北方交通, 2001, (4): 127-128.
- [7] Daganzo C F. The Crane Scheduling Problem [J]. Transportation Research Part B, 1989, 23(B): 159-175.
- [8] Peterkofsky R I, Daganzo C F. A Branch and Bound Solution Method for the Crane Scheduling problem [J]. Transportation Research Part B, 1990, 24(B): 159-172.
- [9] Kim K H, Park Y M. A Crane Scheduling Method for Port Container Terminals [J]. Eur J Oper Res, 2004, 156: 752-768.
- [10] 葛盼盼. 集装箱码头物流优化调度关键技术研究[D]. 山东: 青岛大学, 2009.
- [11] 秦进, 倪玲霖, 王承娜, 缪立新. 集装箱码头岸桥调度优化模型及算法[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 184-192.
- [12] Steenken D, Henning A, Freigang S, Voss S. Routing of Straddle Carriers at A Container Terminal with the Special Aspect of Internal Moves [J]. OR Spectrum, West Germany, 1993, 15(3): 167-172.
- evers JJM, Koppers SAJ. Automated Guided Vehicle Traffic Control at A Container Terminal [J]. Transportation Research, Part A (policy and practice) 1996, 30 A(1): 21-34.
- [13] Duinkerken MB, Evers JJM, Ottjes JA. TRACES: Traffic Control Engineering System. A Case-study on Container Terminal Automation [J]. Proceedings of The 1999 Summer Computer Simulation Conference, SCS, San Diego, CA, USA, July 1999.
- [14] Ebru K. Bish, Thin — Yin Leong, Chung — Lun Li et al. Analysis of A New Vehicle Scheduling and Location Problem [J]. Naval Research Logistics, 2001, 48(5): 363-385.
- [15] Etsuko Nishimura, Akio Imai, Stratos Papadimitriou. Yard Trailer Routing at A Maritime Container Terminal [J]. Transportation Research E, 2005, 41(1): 53-76.
- [16] 杨静蕾. 集装箱码头物流路径优化研究[J]. 水运工程, 2006, 1, (1): 32-35.
- [17] 张海霖, 江志斌, 许泓. 集装箱港口集疏运调度系统作业模式的仿真分析[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(6): 1024-1030.



- [18] 刘德鹏. 港口集装箱物流系统的交通组织及设备的合理配置[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006,4.
- [19] 魏众. 集装箱码头物流作业系统集成优化调度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007, 3.
- [20] Kap hwan Kim ,Hong bae Kim .The Optimal Determination of the Space Requirement and The mber of Transfer Cranes for Import Containers[J].Computer &Industrial Engineering ,1998.35(4):427-430.
- [21] Mosca R ,Giribone P,Bruzzzone AG. Simulation of Dock Management and Planning in A Port Terminal [J].Enternational Journal of Modeling and Simulation ,IASTED,USA ,2002,20(2):153-157.
- [22] Kim hwan-seong ,Lee sang-hun ,Kwak kyu-seok.Allocation Model of Container Yard for Effectiveness of ATC Work in Automated Container Terminal [C].ICCAS 2002.International Conference on Control ,Automation and Systems ,Inst.Control ,Auto .&syst .eng,Taejon ,South Korea ,2001.
- [23] W.C.Ng,K.L.Mak .Yard Crane Scheduling in Port Container Terminals[J].Applied Mathematical Modeling,2005.29(3):263-276.
- [24] W.c.ng.crane Scheduling in Container Yards with Inter-crane Interference [J].European Journal of Operational Research ,2005.164(1):64-78.
- [25] Kap hwan kim ,Gyu-pyo Hong .A Heuristic Rule for Relocating Blocks [J].Computer&Operations Research ,2006.33(4):940-954.
- [26] 杨军. 减少集装箱码头堆场面积的策略探讨[J]. 物流科技, 2007, (6): 96-97.
- [27] 秦天保. 集装箱码头堆场的道路规划仿真研究[J]. 计算机工程, 2011, 37 (2): 13-19.
- [28] 周鹏飞, 李丕安. 不确定条件下集装箱堆场出口箱具体箱位优选[J]. 工业工程, 2013, 16(1): 25-30.
- [29] 于越, 金淳, 霍琳. 基于仿真优化的集装箱堆场大门系统规划研究[J]. 系统仿真学报, 2007. 19(13): 3080 — 308.
- [30] 张涛, 苗明, 金淳. 基于仿真优化的集装箱堆场资源配置研究[J]. 系统仿真学报, 2007. 19.
- [31] 金淳, 于越, 赵璐. 基于仿真优化的集装箱港口大门作业调度研究[J]. 系统仿真学报, 2008. 20(8): 1998-2002.
- [32] 张涛. 集装箱堆场系统规划研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006, 12.
- [33] 杨静蕾. 集装箱码头内部物流网络运作研究[D]. 上海: 上海海运学院, 2003, 6.
- [34] 尚晶. 集装箱码头物流网络资源优化配置研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005, 11.
- [35] 张海霖, 江志斌. 基于 R-OPN 的集装箱码头物流系统建模与分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 12.
- [36] 韩要稳. 集装箱码头物流作业的协调方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007, 12.
- [37] 魏众. 集装箱码头物流作业系统集成优化调度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007, 3.
- [38] 李肇坤. 基于供应链的港口物流服务若干关键问题研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010, 6.
- [39] 罗勋杰. 集装箱码头物流操作系统优化理论及建模方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010, 4.
- [40] Dong M, Chen F .Process Modeling and Analysis of Manufacturing Supply Networks Using Object Oriented Petri Nets[J].Robotics and Computer Integrated Manufacturing 2001.17(1):121-9.

- [41] Teo, Chung Piaw et al. Impact on Inventory Costs with Consolidation of Distribution Centers[J]. IIE Trans. 2001(3):99-100.
- [42] Chen H, Amodeo L, chu F. Batch Deterministic and Stochastic Petri Nets :A Tool for Modeling and Performance Evaluation of A Supply Chain[J]. Proceedings of The IEEE International Conference on Robotics and Automation ,2002(1):78-83.
- [43] Arns M, Fischer M, Kemper P ,Tepper C Supply Chain Modeling and Its Analytic Evaluation [J]. Journal of the Operational Research Society ,2002.53(8):85-94.
- [44] Wang R, Jia Y, Sheng Y, Gao L\_ Design and Optimization of Supply Chain Based on Petri Net[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003.9(10):868-872.
- [45] Blackhurst J, Wu T, O'Grady P. Network Based Approach to Modeling Uncertainty in A Supply Chain [J]. International Journal of Production Research, 2004.42(8):1639-1658.
- [46] B.M. Arteta, R.E. Giachetti. A Measure of Agility as the Complexity of the Enterprise System [J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2004.20(6):495-503.
- [47] 刘恒江. 基于 Petri 网的集装箱空箱调运仿真分析[J]. 交通运输工程学报, 2002, 09.
- [48] 陈思云, 刘天竹. 基于 Petri 网的仓储物流系统建模与仿真[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(3):444-446.
- [49] 王云鹏, 王占中, 赵颖, 钱小小. 基于扩展 Petri 网的多式联运流程研究[J]. 工业技术经济, 2005, 24(4):77-80.
- [50] 刘小华. 基于 Petri 网的物流配送系统模型研究[J]. 煤矿机械, 2006. 27(6):964-966.
- [51] 程杰. 基于 Petri 网的第三方物流企业业务流程优化方法研究[D]. 北京交通大学, 2007. 05.
- [52] 张文诺. 基于 Petri 网的汽车生产物流流程仿真优化研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007. 06.
- [53] 王占中. 基于 Petri 网的多式联运流程优化研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007, 6.
- [54] 戴顺南, 姜秀山, 王金旺. 基于 Petri 网的生产企业物流流程设计分析[J]. 物流技术, 2008. 27(1):88-91.
- [55] 王云鹏, 李善兴, 王占中. 基于 Petri 网的汽车制造业生产物流流程优化[J]. 吉林大学学报, 2008. 38(2):59-62.
- [56] 叶姿琴. 基于 Petri 网的港口供应链业务流程优化[D]. 河北: 燕山大学, 2012, 12.
- [57] 郭磊. 基于 Petri 网的冷链物流企业配送流程优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010, 6.
- [58] 薛晶晶. 基于时间 Petri 网的内陆港集装箱物流系统的建模与仿真[D]. 西安: 长安大学, 2012, 05.
- [59] 杨志刚, 王立坤, 周鑫. 国际集装箱码头事务、法规与案例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009, 5.
- [60] 陈戍源. 集装箱码头业务管理[M]. 大连: 大连海事大学, 1998, 8.
- [61] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社. 2000.
- [62] 张春娜. 基于 Petri 网的物流仓储系统建模与仿真[D]. 南京: 南京林业大学, 2007, 06.
- [63] Claude Girault ,Rudiger Valk .Petri Nets for Systems Engineering A Guide to Modeling ,Verification and Applications [M]. Publishing House of Electronics Industry .2005,6.

## 发表论文和科研情况说明

发表的论文:

- [1] 仲伟仁, 付小庆, 卢春荣.基于中小企业创业环境的政府作为评价方法研究[J]. 系统工程, 已录用, 2013, 12
- [2] Zhong weizhu ,Fu xiaoqing, Wang yaping.Petri net modeling: Container terminal production operation processing system analysis,2013ACCAHE(EI:20134416919798)
- [3] Zhong weizhu ,Fu xiaoqing,Wang yaping.LOPN-based BPR of container terminal production controlling system, 2013ICMSC(EI:20134316887971)

## 致 谢

转眼之间，两年半的时间已经恍然而过，茫然过，快乐过，伤心过，也成长了，从大学毕业的稚嫩，变得多了些思考，从做事莽撞，任性变得仔细认真起来，而这一切的一切都离不开我的家人，老师和朋友们。

首先感谢我的父母，是你们的辛勤劳动换来了我今天的一切，生为一个农村孩子，我懂得你们赚钱的不易，正是你们每天夜以继日，风里来雨里去的劳动换来了我们今天的美好生活，我只想说一句，爸爸妈妈感谢你们，我们会成为你们的骄傲！

感谢我的老师，仲伟仁老师，无论在学习上还是生活上，老师都给予了我们关心，两年半时间的相处，老师的大度和宽容深深影响了我，我知道自己说话做事莽撞，有时也会冒犯老师，但是老师永远也没有放在心上，我很感动也很感谢老师，谢谢老师给了我太多的宽容，我觉得这种人格品质将会伴随着我的一生，让我也以同样的方式来对待我的朋友，同事。

感谢我们宿舍的姐妹们，热心的学学，聪明的小杨，刻苦的建平，是你们在我遇到挫折的时候帮助我，劝导我。在我的学习中，你们也毫无保留的教给我许多方法，不仅使我在学习上获得了不少的知识，也使我的生活变得快乐而精彩，两年半的时间说来也快，转眼之间就要结束了，但是认识你们是我这两年来最开心的事情。感谢我的师姐亚平，从第一天来理工，就注定我们会成为最好的姐妹，可亲可敬的师姐在学习上给了我莫大的帮助，教会我许多东西，让我在学习上不再迷茫。感谢席菱，同为仲老师的研究生，很高兴能认识你，你喜欢读书，聪明，开朗，是你让我也热爱上了读书，书中自有黄金屋，愿我们活到老，学到老。感谢我的师妹雅婷，春荣，天天，你们是那么的可爱和热情，想起你们我的脸上都浮满了笑容，希望你们珍惜不易的研究生生活，好好学习，天天向上。

最后，对即将参加论文评阅和答辩的各位专家、教授、老师表示诚挚的谢意！

拙笔致谢，言犹未尽，愿诸位平安、幸福、健康、快乐！

付小庆  
2014 年 2 月