



中国科学院规划教材·物流管理系列

物流系统建模 与仿真

李文锋 袁 兵 张 煜 编著



科学出版社

中国科学院规划教材·物流管理系列

物流系统建模与仿真

李文锋 袁 兵 张 煜 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一部关于物流系统建模与仿真技术的教材,内容包括物流系统基础知识、物流系统建模方法、物流系统仿真技术、仿真输入与输出数据分析、物流系统仿真软件、排队系统建模与仿真、库存系统建模与仿真、立体仓库系统建模与仿真、物流中心业务流程建模与仿真、供应链系统建模与仿真、港口集装箱堆场场桥作业调度的建模与仿真、汽车滚装码头物流系统建模与仿真等。

本书将系统建模与仿真实理论同物流系统特征相结合,从理论和典型案例方面描述了物流系统的建模思路与步骤,适合作为物流类及相关专业本科生和研究生学习物流系统建模与仿真技术的教材或参考书,也可作为物流领域科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

物流系统建模与仿真/李文锋,袁兵,张煜编著. —北京:科学出版社, 2010

中国科学院规划教材·物流管理系列

ISBN 978-7-03-029440-1

I. ①物… II. ①李…②袁…③张… III. ①物流-系统建模-高等学校-教材②物流-计算机仿真-高等学校-教材 IV. ①F253.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 215598 号

责任编辑:林 建 / 责任校对:张怡君

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏 杰 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 12 月 第 一 版 开本: B5 (720×1000)


2010 年 12 月 第 一 次 印 刷 印张: 19 1/4

印数: 1—3 500 字数: 380 000

定价: 32.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言



现代经济的发展水平，很大程度上取决于物流的水平。现代物流系统在实现实物流动过程的时间、空间和属性变换的同时，需要最大限度地满足用户需求、提升价值空间和降低成本。伴随中国经济的发展及全球经济一体化的进程，物流已成为制造业乃至整个工业的第三利润源泉和竞争力的基础支撑。随着物流业务的外包，物流服务专业化得以快速发展，物流业已成为服务业的重要组成。第三方物流服务已成为物流服务业的重要形态。

物流外包不是甩包袱，而是通过专业化服务来降低成本，通过整合资源来提升个性化服务。对于物流企业而言，高质量的物流服务则是其利润的保障，直接或间接地影响着企业的市场份额、客户满意度和忠诚度。在物流服务全球化、网络化和供应链集成化的发展背景下，物流服务活动规模越来越大，结构层次越来越复杂，这使得物流系统处在一个不确定的环境中，受多种条件约束和随机因素的影响，具有多目标、多因素、多层次的特点，是以离散事件系统为主的复杂混合系统。

20世纪40年代以来，系统仿真与优化一直是计算机应用技术的活跃分支并得到了飞速的发展，已成为复杂系统的辅助设计与分析的重要工具，是科学研究中除理论研究和科学实验外的第三种重要方法。而作为一类典型的多体动态复杂系统，物流系统的仿真与优化被认为是现代物流系统分析与规划的重要手段之一，得到了普遍的关注和重视。掌握物流系统的建模与仿真技术，对于设计和规划一个恰当的物流服务具有重要作用。

目前，随着物流理念逐步为人们所接受，物流活动正呈现诱人的价值空间，

不断有和物流系统建模、仿真与优化相关的书籍和软件推出。但是紧密结合物流系统的组成元素、特点和功能需求,以及物流一体化服务的发展趋势,从系统复杂性和工程实用性角度,运用面向对象和计算智能等方法,展开物流系统仿真与优化研究的文献并不多见。

本书围绕物流系统特征描述了系统的建模与仿真方法,试图从事件、活动、功能要素、系统等角度归纳出物流系统的建模过程和仿真的框架及方法,并通过实例结合 AnyLogic 等仿真软件进行展示和论述。全书共分 12 章。

第 1 章对系统的基本概念与思想进行了叙述,介绍了系统的构成要素及系统的分类,分析了物流系统的功能要素、基本活动、典型事件及其相互关系,以此作为物流系统建模与仿真的依据与基础。

第 2 章从物流系统的建模原则和步骤入手,介绍了物流系统常见的建模方法。包括实体流图建模方法、活动周期图建模方法、基于 Petri 网的建模方法以及基于系统动力学的建模方法等,并给出了建模实例及其分析。

第 3 章介绍了物流系统仿真的基础知识,包括物流系统仿真的概念、特点。介绍了物流系统仿真的步骤、策略及仿真可视化技术。

第 4 章介绍了正确收集和处理数据的方法,包括如何对收集的数据进行分析和产生随机数序列的方法,以及对仿真输出的数据分析的方法。

第 5 章概要介绍了当前市场上流行的物流系统仿真软件。

第 6 章介绍了建模与仿真中经典的排队问题的基本概念和主要评价指标,通过单线系统和多线系统两个实例进行讲述。

第 7 章对物流系统建模与仿真中经典的库存系统的基本概念进行描述,并对库存系统常用控制策略进行了论述;从建模与仿真的角度分析了库存系统包含的基本要素和主要活动、进程。

第 8 章介绍了立体仓库系统建模与仿真的一般方法及思路。

第 9 章以物流中心为例,介绍了业务流程的概念、分类、特点和功能等基本概念,归纳总结出了业务流程分析、建模和仿真方法。

第 10 章从供应链系统概述及供应链结构模型与特点入手,对供应链系统进行描述,并介绍了供应链系统建模的原则和考虑因素。

第 11 章介绍了港口集装箱物流系统的基本知识,以堆场场桥作业调度为例,结合 AnyLogic 软件进行了细致的建模与仿真。

第 12 章针对汽车滚装码头的作业特点和堆场调度的需求,描述了一个汽车滚装码头堆场的智能调度决策系统仿真实例。

在本书的撰写过程中,李文锋教授、袁兵副教授、张煜副教授、博士生毕娅,以及硕士研究生吴薇、陈欢、钟叶、杨开宇、曹玉莲、梁晓磊、林红、张蕾、高海耀、匡家喜、吕媛媛等付出了大量的劳动,贡献了智慧。在本书的撰写

过程中，我们查阅了大量国内外与物流系统建模与仿真相关的参考文献和教材，进行资料的归纳整理，对包括港口在内的物流企业展开了多轮细致的调研，其中的实际案例丰富了本书的建模与仿真实例。在本书的规划和撰写过程中，我们先后召开了多次交流和研讨会，对内容进行斟酌、增删和修订，从而保证了本书的特色和新颖性，突出了可读性、可操作性和实用性。

尽管我们一直在追求物流系统建模与仿真技术的先进性和实用性，并力图做到全书的内容全面完整，切合本科教学特点，但是由于水平有限，加之物流系统的理念在不断更新，系统建模与仿真方法也在不断发展，书中内容难免有失偏颇。恳请各位老师和学生，以及使用本书的读者及时将意见反馈给我们，以便我们及时完善、修订和改正。如果本书能对你的工作和研究有所启发或帮助，起到抛砖引玉的作用，我们将倍感欣慰和荣幸。

在本书的编写过程中，科学出版社给予了大力支持，在此表示衷心的感谢。

作 者

2010年8月于武汉

目 录

前言

第 1 章

物流系统概述	1
本章学习要点	1
1.1 系统的基本概念与思想	1
1.2 物流系统基础	4
1.3 物流系统的结构	8
1.4 物流系统分析与评价	14
本章小结	20
习题	20

第 2 章

物流系统建模方法	21
本章学习要点	21
2.1 物流系统建模的原则	21
2.2 物流系统建模的步骤	22
2.3 物流系统建模方法概论	24

2.4	实体流图建模方法	26
2.5	活动周期图建模方法	31
2.6	基于Petri网的建模方法	39
2.7	基于系统动力学的建模方法	46
2.8	面向对象的建模方法	49
2.9	基于MAS的建模方法	54
	本章小结	59
	习题	59

第3章

	物流系统仿真技术	62
	本章学习要点	62
3.1	物流系统仿真的基本概念	62
3.2	物流系统仿真策略	66
3.3	可视化技术	76
	本章小结	79
	习题	79

第4章

	仿真输入与输出数据分析	80
	本章学习要点	80
4.1	仿真输入数据收集	80
4.2	仿真输入数据分析	81
4.3	随机数与随机变量	93
4.4	仿真输出数据分析	97
	本章小结	106
	习题	106

第5章

	物流系统仿真软件	108
	本章学习要点	108

5.1 AnyLogic	109
5.2 Flexsim	117
5.3 Arena	121
5.4 Witness	123
5.5 ExtendSim	124
本章小结.....	127
习题.....	127

第 6 章

排队系统建模与仿真	128
本章学习要点.....	128
6.1 排队系统概述	128
6.2 排队系统问题描述	135
6.3 排队系统建模	136
6.4 排队系统仿真	138
6.5 模型运行与结果分析	144
本章小结.....	146
习题.....	146

第 7 章

库存系统建模与仿真	147
本章学习要点.....	147
7.1 库存系统概述	147
7.2 库存系统问题描述	152
7.3 库存系统建模与仿真	155
本章小结.....	171
习题.....	171

第 8 章

立体仓库系统建模与仿真	172
本章学习要点.....	172

8.1 立体仓库系统概述	172
8.2 立体仓库系统问题描述	176
8.3 立体仓库系统设计	178
8.4 立体仓库系统输入数据拟合	182
8.5 基于 Flexsim 的立体仓库系统建模仿真	186
8.6 模型运行与仿真结果分析	192
本章小结	196
习题	196

第 9 章

物流中心业务流程建模与仿真	197
本章学习要点	197
9.1 物流中心业务流程概述	197
9.2 物流中心业务流程问题描述	201
9.3 物流中心业务流程建模仿真模型设计	206
9.4 物流中心业务流程建模仿真案例分析	213
本章小结	223
习题	223

第 10 章

供应链系统建模与仿真	224
本章学习要点	224
10.1 供应链系统概述	224
10.2 供应链系统建模理论	228
10.3 供应链系统问题描述	231
10.4 供应链系统建模与仿真	233
10.5 模型运行与结果分析	242
本章小结	245
习题	245

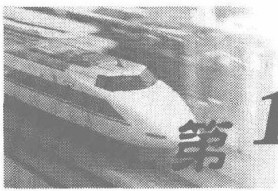
第 11 章

港口集装箱堆场场桥作业调度的建模与仿真·····	246
本章学习要点·····	246
11.1 港口集装箱物流系统概述·····	246
11.2 港口集装箱码头堆场·····	252
11.3 港口集装箱堆场场桥作业调度建模·····	254
11.4 场桥作业调度仿真·····	256
11.5 场桥作业调度案例仿真与分析·····	265
本章小结·····	267
习题·····	267

第 12 章

汽车滚装码头物流系统建模与仿真·····	269
本章学习要点·····	269
12.1 汽车滚装码头系统概述·····	269
12.2 汽车滚装码头堆场作业系统问题描述·····	272
12.3 汽车滚装码头堆场作业系统建模·····	275
12.4 汽车滚装码头堆场作业系统仿真·····	278
本章小结·····	290
习题·····	291

参考文献·····	292
-----------	-----



第1章

物流系统概述

本章学习要点

1. 理解系统的构成要素和离散系统的基本要素。
2. 熟悉物流系统的构成元素以及它们之间的关系。
3. 掌握物流系统的实体、属性、事件和活动之间的区别与联系。

1.1 系统的基本概念与思想

1.1.1 系统及其特性

对于系统，著名学者钱学森是这样表述的：“把极其复杂的研究对象称为系统，即由内部相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的，具有特定功能的有机整体，而且这个整体又是它所从属的更大的系统的组成部分。”物流系统作为一个完整的系统，具有一般系统的特性，包括整体性、关联性、目的性和环境适应性。同时物流系统作为从属于整个社会系统下的一个组成部分，与其他子系统之间既是相互作用和相互依赖的，又具有其独特特性。因此，研究物流系统时需要兼顾其一般特性及区别于其他子系统的特性。

一个系统可以由若干个子系统构成，系统有如下特性：

(1) 系统的整体性：系统由两个或两个以上要素（或子系统）构成，各个组成部分既具有一定的独立性，又相互联系构成一个有机整体。

(2) 系统的关联性：系统功能的实现是各组成要素或子系统之间相互关联和

相互作用的结果。这表现在某个子系统接收输入而产生输出，而这个子系统的输出又往往成为另一个子系统的输入。系统的这种关联性表现为各子系统之间产生一定的物质流动、信息流动和信息反馈关系。

(3) 系统的目的性：系统以追求有序稳定结构为目标特性，这种目的性是系统自身存在的需要。如果系统不具备有序稳定结构，就不具有保持自身的能力，就会在外力和内力的影响下分解、崩溃。另外，设计和运行一个系统本身就具有目的性，即为了实现特定的功能和最优化。

(4) 系统的环境适应性：任何系统都有一定的边界和所处的环境，它与周围的外部环境产生一定的联系和相互作用，从环境接收各种影响（包括正常的输入和随机干扰），经过系统的转换，产生一定的输出，从而对外部环境发生一定的作用。由于外部环境及其影响是经常变化的，因此为了使系统达到最优化，必须对系统进行调节，使之适应环境的变化。

1.1.2 系统的构成要素

系统是相对于外部环境而言的，外部环境向系统提供资源、能量、信息等，

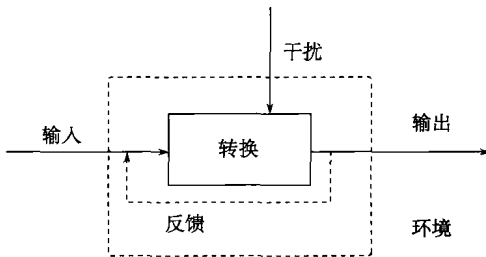


图 1-1 系统的一般模式

称为输入。系统应用自身所具有的功能，对输入的元素进行转换处理，形成有用产品，再输出到外部环境供其使用。因此，输入、转换、输出是系统的三要素。另外，由于外部环境的影响，系统的输出结果可能偏离预期目标，所以系统还具有将输出结果的信息反馈给输入的功能。系统的一般模式如图 1-1 所示。

按照一般系统的运作模式，在系统运行过程中，或当系统循环周期结束时，会有外界信息反馈回来，为原系统的完善提供改进信息，使下一次系统运行得到改进。如此循环往复，便可实现系统有序良性循环。

1.1.3 系统的分类

系统的分类方法很多，按照不同的分类方法可以得到各种类型的系统。从系统仿真研究的需要出发，系统可分为连续系统和离散系统、确定系统和随机系统、线性系统和非线性系统等。

这里从仿真实现的角度出发，按系统中起主导作用的状态变量的变化是否连续，将系统分为连续系统和离散系统。

1. 连续系统

连续系统是指系统的状态变量随时间变化而发生连续变化。例如，车辆行驶系统就是一个连续系统，因为它的位置、速度等状态变量都随时间而连续变化。这类系统的动态特性可以用微分方程或一组状态方程来描述，也可以用一组差分方程或一组离散状态方程来描述。究竟采用哪一种，这取决于研究者是对系统状态随时间连续变化的整个过程感兴趣，还是仅对某些时间点感兴趣，或者是所能得到的数据资料仅仅限于某些时间点。例如，在一些社会经济系统中，往往所能得到的数据也只有按月、季度，甚至是按年的。尽管这类系统实际的状态变化是连续的，但是也只能用差分方程和离散状态方程来描述。

不论是用微分方程还是用差分方程来描述，只要实际状态变化是连续的，都应该归为连续系统一类。有时为了区别，用差分方程描述的这一类系统，又称之为采样系统。

2. 离散系统

离散系统是指状态变量随时间呈离散状态变化的系统。在这类系统中，引起状态变化的原因是事件，通常状态变化与事件的发生是一一对应的。描述一个离散事件系统需要七个基本要素：实体、属性、状态、事件、活动、进程和队列。

1) 实体 (entity)

构成系统的各种成分称为实体，可分为临时实体和永久实体两类。在系统中只存在一段时间的实体叫做临时实体，这类实体在系统仿真过程中的某一时刻出现，在仿真结束前从系统中消失，其生命不会贯穿整个仿真过程；而永久驻留在系统中的实体称为永久实体，只要系统处于活动状态，这些实体就存在。临时实体常常具有主动性，又称为主动成分，而永久实体往往是被动的，又称为被动成分。例如，单机器加工系统中，工件是临时实体（主动成分），机器是永久实体（被动成分）。临时实体按一定规律出现在仿真系统中，引起永久实体状态的变化，又在永久实体作用下离开系统，从而使整个系统呈现出动态变化的过程。

2) 属性 (attribute)

实体的状态由其属性的集合来描述，属性用来反映实体的某些性质。例如，单机器加工系统中，工件是一个实体，它的属性包括材质、形状、颜色、到达时间、加工时间、离开时间等。在仿真建模中，只需要使用与研究目的的相关的一部分属性。

3) 状态 (state)

在某一确定时刻，系统的状态是系统中所有实体的属性的集合。

4) 事件 (event)

事件是引起系统状态发生变化的行为，它是在某一时间点上的瞬间行为，离

散事件系统可以看作是由事件驱动的。在上面的例子中，可以定义“工件到达”为一类事件，因为由于工件的到达，系统中机器的状态可能由“闲”变为“忙”，或者队列状态（即排队的工件个数）发生变化。工件加工完毕后离开系统的行为也可以定义为一类事件——“工件离开”，此事件可能使机器的状态由“忙”变为“闲”，同时生产线上“现有工件数”减一。

5) 活动 (activity)

实体在两个事件之间保持某一状态的持续过程称为活动，活动的开始与结束都是由事件引起的。在上例中，工件开始加工到该工件加工完毕后离开生产线可视为一个活动，在此过程中机器处于“忙”状态。

6) 进程 (process)

有序的事件与活动组成的过程称为进程。进程描述了其中的事件、活动的相互逻辑关系和时序关系。例如，一种物品进入仓库，经过在货位的存储，直到从仓库中出库，物品经历了一个进程。

事件、活动、进程三个概念之间的关系如图 1-2 所示。可以看出，事件是发生在某一时刻的行为，而活动和进程则是发生在某个时间段的过程。

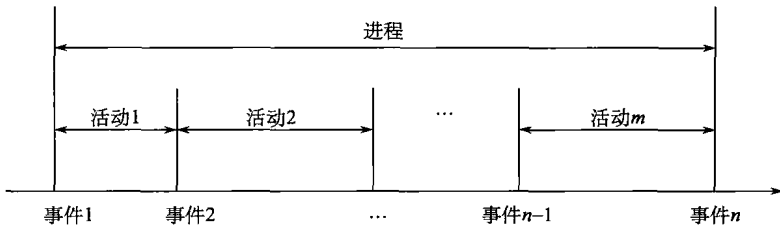


图 1-2 事件、活动与进程的关系

7) 队列 (queue)

队列就是处于等待状态的实体序列，一般遵循“先进先出”规则。在离散事件系统建模中，队列可以作为一种状态或者特殊实体对待。

1.2 物流系统基础

1.2.1 物流系统的基本概念

1. 物流系统的定义

学术界对物流系统的定义目前并未统一，这里介绍其中两种定义。

定义一：物流系统 (logistics system) 广义上是由两个或两个以上的物流功能单元构成的，以完成物流服务为目的的有机集合体。该定义高度概括了物流系统的构成要素及系统目标。

定义二：在一定的时间和空间里，物流活动所需的机械、设备、工具、节点和线路等物质资料要素相互联系和相互制约，并具有使物流系统总体功能合理化的有机整体。该定义基于系统的含义，将系统的内涵本质应用于物流领域，对物流系统的硬件要素及要素之间的关系做出了更加明确的说明。

2. 物流系统的目标

根据物流系统的定义可知，物流系统具有使系统总体合理化的功能目标，具体体现在优质服务、迅速及时、节约空间、规模适当、控制库存等五个方面，即5S目标，如图1-3所示。

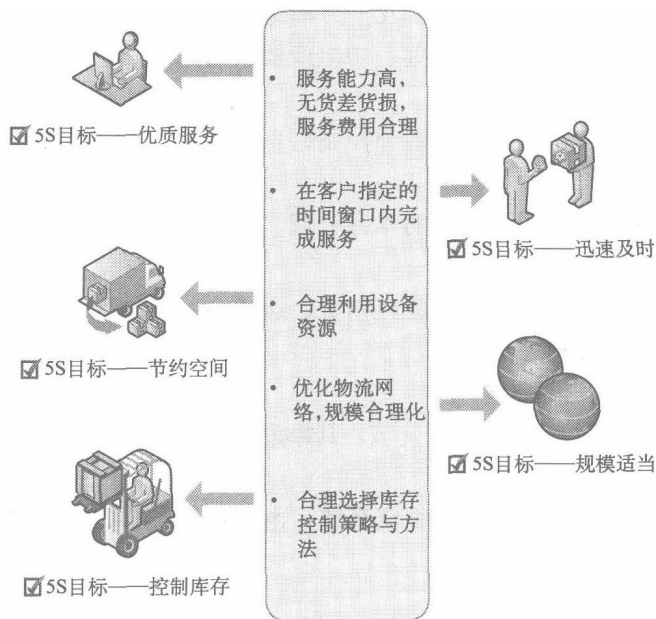


图 1-3 5S 目标

(1) 优质服务 (Service)：为客户提供可靠的服务，服务的可靠性包括服务能力高，无货差货损，且提供的服务费用在合理范围内。

(2) 迅速及时 (Speed)：服务时间符合时间窗口的要求，按客户指定的时间和地点迅速送达。

(3) 节约空间 (Space saving)：通过合理应用物流设施和机械，充分利用平面和立体空间，节约空间资源。

(4) 规模适当 (Scale optimization)：通过对物流网络的合理规划，物流规模的合理设计，以及物流设施的合理布局，使物流网络符合物流系统运作需求。

(5) 控制库存 (Stock control)：运用合理的库存控制策略和方法，有效控制库存量。

1.2.2 物流系统的分类

1. 按照物流业务性质分类

按照物流业务性质分类，物流系统可以分为社会物流系统和企业物流系统两种类型。社会物流系统又称为大物流系统，包括石油、天然气、粮食的储运系统，以及港口的储运系统、车站物资的调运系统等。企业物流系统可细分为生产企业物流系统、商业企业物流系统和物流企业物流系统。

1) 生产企业物流系统

生产企业物流系统一般由以下几个方面组成：

(1) 供应物流：包括原材料等一切生产要素的采购、进货、运输、仓储、库存管理和用料管理。

(2) 生产物流：包括生产计划和控制、厂内运输（搬运）、在制品仓储与管理等活动。

(3) 销售物流：包括产成品的库存管理、仓储、配送、运输、订货处理与客户联系等活动。

(4) 回收、废弃物流：包括废弃物资、边角余料等的回收利用，企业排放的无用物的运输、装卸和处理。

2) 商业企业物流系统

商业企业物流系统不涉及生产环节，其最重要的部分就是配送中心或物流中心。

3) 物流企业物流系统

物流企业物流系统即第三方物流系统，由运输系统、仓储系统、信息系统等组成。

2. 按照物流功能分类

(1) 仓储物流子系统：是指承担商品储运、保管职能的系统，通过时间变换帮助商品实现其价值甚至实现价值增值的物流系统。

(2) 运输物流子系统：是指承担着商品物流位移功能的系统，通过空间变换帮助商品完成市场价值交换并实现商品增值，完成商品由生产者向消费者转移的传递过程。

(3) 装卸搬运子系统：是指承担着货物装卸搬运职能的物流系统。装卸搬运子系统的装备水平和工作效率影响着企业的市场竞争力和经济效益。

(4) 包装及流通加工子系统：是指承担着货物包装和流通加工职能的物流系统。在物流领域对商品进行必要的加工和包装能够提高消费者满意度和对商品的认可度，在一定程度上可以起到促销的作用。

(5) 配送子系统：从客户的需要出发，依托现代信息技术，把选货、配货和送货结合起来，通过迅速、准确、周到的服务提高客户满意度并实现业务增值。