

上海市高等学校本科教育高地建设项目（海关物流）



**Practical System  
Simulation Modeling and  
Analysis with Flexsim**

秦天保 周向阳 编著

Qin Tianbao Zhou Xiangyang

# 实用系统仿真建模与分析 ——使用Flexsim

清华大学出版社

# **Practical System Simulation Modeling and Analysis with Flexsim**

秦天保 周向阳 编著

Qin Tianbao Zhou Xiangyang

## **实用系统仿真建模与分析 ——使用Flexsim**

清华大学出版社  
北京

Flexsim 是美国 Flexsim Software Products, Inc 开发的产品和注册的商标。本书附带的 Flexsim 评估软件、模型中来自于 Flexsim 软件自带的模型、来自于 Flexsim 软件自带模型的照片图片, 以及任何直接引用 Flexsim 用户手册的文字版权属于 FlexSim Software Products, Inc. Copyright © 1987—2008 FlexSim Software Products, Inc. All rights reserved.

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

#### 图书在版编目(CIP)数据

实用系统仿真建模与分析: 使用 Flexsim/秦天保, 周向阳编著. --北京: 清华大学出版社, 2013. 2  
ISBN 978-7-302-31322-9

I. ①实… II. ①秦… ②周… III. ①离散系统(自动化)—系统仿真—应用软件 IV. ①TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 012464 号

责任编辑: 庄红权

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 沈 露

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈: 010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 11.25 字 数: 270 千字

附光盘 1 张

版 次: 2013 年 2 月第 1 版 印 次: 2013 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 1~4000

定 价: 28.00 元

---

产品编号: 048915-01

生产制造、物流、服务等诸多行业中的许多决策问题都具有随机因素,适合用系统仿真方法解决。由于传统的仿真建模方法非常复杂,严重阻碍了仿真技术的应用。近年来,随着现代可视化建模的仿真软件包的出现和普及,仿真技术的使用门槛大大降低,已到了可以在企业中大规模推广应用的时机了。

目前亟需培养能够将仿真实理论和仿真应用相结合的仿真人才,以满足社会需求。本书将系统仿真的基本理论与现代仿真软件包的应用相结合,通过应用介绍理论,通过理论加强应用,使得读者能够在基本仿真实理论知识的武装下,利用现代仿真软件包进行实际仿真建模。

本书主要研究离散事件系统仿真,系统地介绍了离散事件系统仿真的理论基础,并通过 Flexsim 这一先进的仿真软件介绍这些理论方法的实际应用。本书关注的应用领域主要包括物流、生产制造、服务行业,当然,对其他行业也有参考意义。

本书的组织基本上按照仿真项目研究的步骤展开。第 1 章介绍仿真的基本概念。第 2 章通过小案例介绍 Flexsim 建模的基本操作以及排队系统的特征(排队模型是最基本的仿真模型)。第 3 章介绍输入数据采集与分析(即输入建模),重点是概念模型和随机变量的分布拟合。第 4 章介绍随机数和随机变数的生成机制。第 5 章介绍仿真输出分析。第 6 章介绍 Flexsim 建模的一些较高级的技术。第 7 章介绍模型校核与验证的方法。第 8 章介绍仿真优化的方法。第 9 章通过较大的案例详细介绍仿真在物流、供应链等领域的典型应用。附录 A 介绍了仿真需要用到的一些概率统计相关知识。附录 B 介绍 Flexsim 中常用建模对象的用法。

书中许多章节配有实验题目,每个实验用时约 40 分钟,各章还配有习题。

此书采用的 Flexsim 软件版本是 Flexsim 5.1.2 版,实际上从 Flexsim 4 及以后版本的界面和编程逻辑差异不大,故其内容适用于 Flexsim 4 以上版本。

这本书的写作得到上海市高等学校本科教育高地建设项目(海关物流)和上海市重点学科建设项目资助(S30601),还获得上海海事大学研究生教材建设项目资助。本书 9.3 节由周向阳博士编写,其他所有章节由秦天保编写。

本书附带光盘一张,包含如下内容:

- (1) Flexsim 5.1.2 评估版软件(需要购买正式版的用户可以和作者联系)。
- (2) 书中例子所涉及的模型。

另外,本书附有 ppt 讲义以及部分习题和实验题的答案模型,可免费赠给教师上课使用。需要的教师(仅供教师)可以与秦天保联系索取,E-mail: qtbgo@163.com。

秦天保

2012年12月

第 1 章 系统仿真基础 .....	1
1.1 系统仿真的基本概念 .....	1
1.1.1 系统与模型 .....	1
1.1.2 仿真及其分类 .....	2
1.2 可视化仿真软件包 .....	3
1.2.1 仿真使用的软件工具 .....	3
1.2.2 常见可视化仿真软件包 .....	3
1.3 仿真项目研究主要步骤 .....	8
1.4 习题 .....	8
第 2 章 Flexsim 仿真入门 .....	9
2.1 排队系统仿真 .....	9
2.2 案例：带返工的产品制造模型 .....	9
2.2.1 模型描述 .....	9
2.2.2 建模步骤 .....	10
2.2.3 实验研究 .....	16
2.3 Flexsim 基本操作和概念 .....	20
2.3.1 Flexsim 基本操作 .....	20
2.3.2 Flexsim 基本概念 .....	22
2.4 系统仿真典型性能指标 .....	24
2.5 案例：物料搬运系统建模 .....	26
2.5.1 基本模型 .....	26
2.5.2 添加操作员和运输机 .....	28
2.5.3 更多建模技术 .....	32
2.6 排队系统基础 .....	36
2.6.1 排队系统的特征 .....	36
2.6.2 排队系统的符号表示 .....	37
2.6.3 排队系统稳态性能测度 .....	38
2.6.4 利特尔定理 .....	38
2.7 离散事件仿真模型组成元素 .....	39
2.8 离散事件仿真时间推进机制 .....	41
2.9 如何理解 Flexsim 模型的流程 .....	42
2.10 习题 .....	42

2.11 实验 .....	42
<b>第 3 章 输入数据采集与分析 .....</b>	<b>45</b>
3.1 分布拟合的过程 .....	45
3.1.1 建立概念模型收集原始数据 .....	46
3.1.2 数据适用性检验 .....	48
3.1.3 辨识分布类型 .....	50
3.1.4 分布参数估计 .....	51
3.1.5 拟合优度检验 .....	52
3.2 经验分布 .....	53
3.3 使用 ExpertFit 软件进行分布拟合 .....	54
3.3.1 理论分布拟合——连续随机变量 .....	54
3.3.2 缺乏样本数据的情况 .....	61
3.3.3 理论分布拟合——离散随机变量 .....	62
3.3.4 经验分布拟合——连续随机变量 .....	65
3.3.5 经验分布拟合——离散随机变量 .....	68
3.4 多变量与相关输入数据 .....	68
3.5 习题 .....	69
3.6 实验 .....	69
<b>第 4 章 随机数和随机变数的生成 .....</b>	<b>70</b>
4.1 随机数和随机变数 .....	70
4.2 随机数生成器 .....	70
4.3 随机变数的生成 .....	72
4.4 习题 .....	72
<b>第 5 章 仿真输出分析 .....</b>	<b>73</b>
5.1 概述 .....	73
5.2 终止型仿真输出分析 .....	75
5.3 非终止型仿真输出分析 .....	76
5.4 Flexsim 中的输出分析 .....	78
5.4.1 非终止型仿真的输出分析举例 .....	78
5.4.2 终止型仿真的输出分析举例 .....	81
5.5 方案比较 .....	83
5.5.1 概述 .....	83
5.5.2 双系统方案比较 .....	84
5.5.3 多系统方案比较 .....	85
5.6 Flexsim 中定义性指标的方法 .....	87
5.7 习题 .....	89
5.8 实验 .....	89
<b>第 6 章 Flexsim 建模进阶 .....</b>	<b>93</b>
6.1 Flexsim 对象触发器执行次序(推动 VS 拉动) .....	93

6.2	Flexsim 脚本编程基础 .....	97
6.2.1	Flexsim 脚本的一般规则 .....	97
6.2.2	变量与数组 .....	97
6.2.3	流程控制语句 .....	98
6.2.4	操作符 .....	100
6.2.5	基本建模函数 .....	100
6.3	Flexsim 树结构 .....	103
6.4	任务序列编程基础 .....	104
6.4.1	创建任务序列 1 .....	104
6.4.2	创建任务序列 2 .....	106
6.4.3	创建任务序列 3 .....	107
6.5	任务序列详解 .....	109
6.6	消息编程 .....	114
6.7	习题 .....	115
6.8	实验 .....	115
<b>第 7 章</b>	<b>模型校核与验证</b> .....	<b>117</b>
7.1	模型校核 .....	117
7.2	模型验证 .....	117
7.3	Flexsim 调试工具和技术 .....	118
7.4	习题 .....	119
<b>第 8 章</b>	<b>仿真优化</b> .....	<b>120</b>
8.1	仿真优化概述 .....	120
8.2	仿真优化的步骤 .....	120
8.3	习题 .....	124
8.4	实验 .....	124
<b>第 9 章</b>	<b>系统仿真典型应用</b> .....	<b>125</b>
9.1	库存系统仿真 .....	125
9.1.1	库存系统概述 .....	125
9.1.2	(s,S)库存系统仿真 .....	125
9.2	系统仿真在集装箱码头堆场闸口规划中的应用 .....	133
9.2.1	概述 .....	133
9.2.2	系统体系结构 .....	134
9.2.3	输入参数设定 .....	136
9.2.4	结果分析 .....	136
9.3	配送中心订单拣选流程仿真 .....	139
9.3.1	问题陈述 .....	139
9.3.2	模型建立 .....	140
9.3.3	实验运行 .....	142
9.4	习题 .....	142



<b>附录 A 仿真用概率统计基础</b> .....	143
A.1 概率论基本概念 .....	143
A.1.1 随机变量 .....	143
A.1.2 离散型随机变量的分布 .....	143
A.1.3 连续型随机变量的分布 .....	143
A.1.4 累积分布函数 .....	144
A.1.5 数学期望与方差 .....	144
A.2 常用分布及其典型用途 .....	144
A.2.1 常用连续分布 .....	144
A.2.2 常用离散分布 .....	147
A.3 抽样与统计推断 .....	149
A.3.1 总体与样本 .....	150
A.3.2 参数估计 .....	150
A.4 假设检验 .....	152
<b>附录 B Flexsim 对象参考</b> .....	154
B.1 固定资源对象 .....	154
B.2 移动资源对象——任务执行器 .....	162
B.3 其他对象 .....	165
<b>参考文献</b> .....	170

# 第 1 章 系统仿真基础

## 1.1 系统仿真的基本概念

### 1.1.1 系统与模型

在现实生活中,人们往往要对一些系统加以研究,如生产制造系统、物流系统、服务系统等,以评估或改进系统的性能。这里的系统是指为了完成某一目标而由一些相互作用的元素组成的整体(Schmidt and Taylor,1970)。例如,一个制造工厂系统,含有机器、操作员、运输小车、传送带以及存储空间等元素,这些元素相互作用,最终目标是产出产品。

许多情况下,难以直接对实际系统本身加以实验研究。例如,对一个运营中的集装箱码头,要对其不同的布局进行实验研究,以找出最优布局方案,是不可能真的在实际系统上进行研究的(成本过于昂贵)。而对一些计划建造的设施,由于实际设施尚不存在,也无法对实际系统进行研究。这时,只能建立一个实际系统的模型作为替代品来研究有关的系统。

**模型**是系统各元素交互关系的简化表示,这些关系包括因果关系、流程关系以及空间关系等。模型可以分为物理模型和逻辑模型(凯尔顿等,2007),而逻辑模型又可以进一步分类为符号模型、解析模型和仿真模型,如图 1-1 所示。

**物理模型**是实际系统的物理复制品或按比例缩放的实物模型,也称实体模型。例如,有人在仓库中建立了一个同比例的快餐店实物模型,用于对各种服务程序进行实验研究。人们还建立了物料搬运系统的实物模型,实际上就是各种设施的微缩版,可用于研究设施布局、车辆路径以及运输装置等各种不同方案对系统性能的影响。尽管物理模型在许多领域都有重要应用,但不是本书的讨论主题。

**逻辑模型**是指以图符、数学方程式或计算机程序等表达的反映现实系统要素间逻辑关系的模型。逻辑模型可以进一步分类为符号模型、解析模型和仿真模型。

(1) **符号模型**是利用一些图形符号,诸如矩形、箭头等,来描述一系列活动或要素间相互关系的模型。常见的符号模型有流程图、设施布置图等。符号模型的优点是容易制作、易

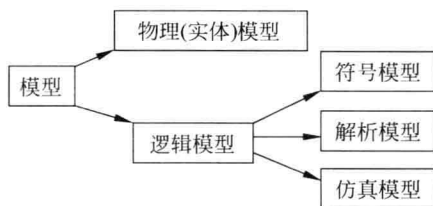


图 1-1 模型分类

于理解。符号模型的缺点是无法利用它们对系统性能进行量化分析,另外,符号模型也无法把握系统动态行为。

(2) **解析模型**(又称分析性模型)是一种利用数学方程式(含不等式)表达系统要素间关系的模型。它可以是简单的方程式,也可以是复杂的数学规划模型(由一个目标函数和一组约束方程组成)。解析模型的优点是形式规范,通常能够求得确定的最优解;但也有缺点,如解析模型通常只能解决静态的、规范性的、确定性的或简单机率性的问题,难以解决复杂动态随机系统问题。

(3) **仿真模型**指利用计算机系统建立的模拟真实系统运行的模型。仿真模型可以模拟和研究复杂动态随机系统。通过仿真模型进行实验通常比用实际系统进行实验成本低得多。

### 1.1.2 仿真及其分类

**仿真**(计算机仿真、系统仿真)就是建立计算机仿真模型模拟现实的动态系统,在仿真模型上执行各种实验,以评估和改善系统性能。仿真可以根据所模拟的系统特性分类为连续系统仿真、离散事件系统仿真和混合系统仿真。

(1) **连续系统仿真**:在这种仿真中,反应系统状态的状态变量取值随时间连续变化。如温控系统的温度是连续变化的,它是一个连续系统,对其进行的仿真即为连续系统仿真。

(2) **离散事件系统仿真**:在这种仿真中,反应系统状态的状态变量取值随一个个离散事件的发生而在特定的时间点离散变化,系统的状态变化是由(往往是随机发生的)事件驱动的。例如,银行排队系统中状态变量有顾客排队长度、服务台忙闲状态等,它们都是随顾客到达、顾客服务完成离开等事件离散变化的,因此,银行排队系统是离散系统,对其进行的仿真即为离散事件系统仿真,或简称离散事件仿真、离散系统仿真。

在上面的定义中,系统状态是指与研究目的相关的刻画系统特征的状态变量取值集合。图 1-2 展示了连续系统和离散系统状态变量取值是如何随时间变化的。

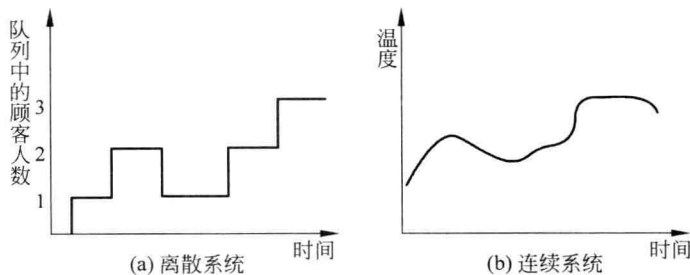


图 1-2 离散系统和连续系统

(3) **混合系统仿真**:所模拟的系统既有连续的部分,也有离散的部分。

由于绝大多数服务系统、物流系统、生产制造系统都是离散系统,所以本书主要研究离散事件系统仿真。

## 1.2 可视化仿真软件包

### 1.2.1 仿真使用的软件工具

可以采用多种软件工具建立仿真模型,这些工具总结如下。

- (1) 通用程序设计语言: VB,C,C++,Fortran 等;
- (2) 通用仿真语言: GPSS,SIMSCRIPT,SLAM,SIMAN 等;
- (3) 电子表格及其插件: Excel,@Risk(Excel 插件),Crystal Ball(Excel 插件)等;
- (4) 可视化仿真软件包: Flexsim, AutoMod, Plant Simulation, Extendsim, Arena, Simio, ProModel, Simul8, Witness, Anylogic 等。

最初,人们使用 C, Fortran 等通用语言开发仿真模型,工作量非常大,而且非常烦琐。之后,出现了专用的仿真语言,采用这种语言开发仿真模型大大降低了开发难度和工作量,但是仍然比较烦琐。随着电子表格软件统计功能的发展,电子表格成为很好的仿真平台,可以利用它及其插件较为方便地开发一些仿真模型。

而使得仿真走向广泛应用和普及的应该是可视化仿真软件包的出现,利用这些软件包,可以非常方便地利用图标以可视化方式构件仿真模型,大大提高了建模效率,降低了建模难度。

### 1.2.2 常见可视化仿真软件包

现代可视化仿真软件包通常具有友好的图形化用户界面、利用形象的模块搭积木式地建模、支持 2D 和(或)3D 动画,另外还提供输入数据分布拟合工具、结果输出等模块,这些功能支持大大简化了建模过程。

目前,市场上已有大量商品化的可视化仿真软件包,它们面向制造系统、物流系统、服务系统等领域,成为提高系统性能、提升企业竞争力的有效工具。下面简要介绍几种常用仿真软件(按字母顺序)。

#### 1. Arena

Arena 是美国 Rockwell Automation 公司的通用仿真软件产品,它提供可视化、交互式的集成仿真环境,可以与通用编程语言(如 Visual Basic, Fortran 和 C/C++ 等)编写的程序连接运行。Arena 提供内嵌 Visual Basic 编程环境 Visual Basic for Application(VBA),用户可以利用 Visual Basic Editor 编写 VB 代码,灵活定制各种复杂逻辑。图 1-3 所示为 Arena 仿真软件的界面。

#### 2. AutoMod

AutoMod 是 Brooks Automation 公司(该公司现已被 Applied Materials 公司收购)的产品。它由仿真模块(AutoMod)、试验及分析模块(AutoStat)、三维动画模块(AutoView)

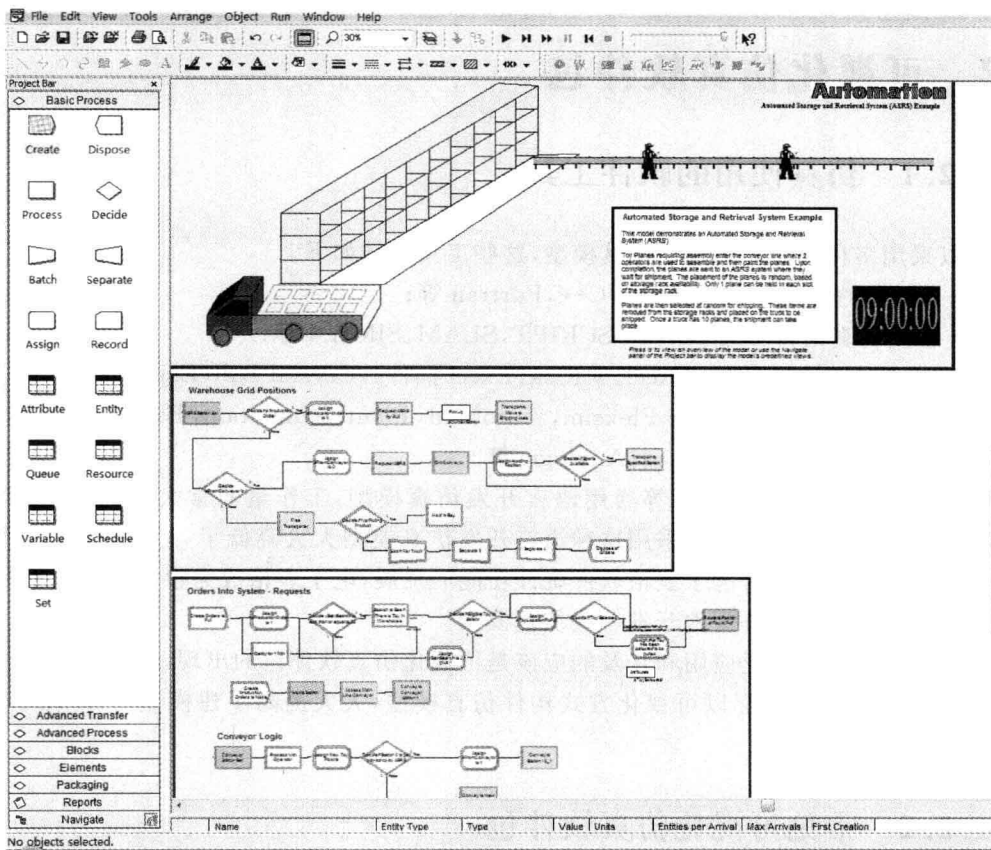


图 1-3 Arena 仿真软件的界面

等部分组成,3D 动画功能较强,适合于大规模复杂系统的计划、决策及其控制试验。

AutoMod 采用内置模板技术,提供物流及制造系统中常见的建模元素,如运载工具 (vehicle)、传送带 (conveyor)、自动化存取系统 (automated storage and retrieval system, AS/RS)、桥式起重机 (bridge crane)、仓库 (warehouse)、堆垛机 (lift truck)、自动引导小车 (automated guided vehicle, AGV)、货车 (truck)、小汽车 (car) 等,AutoMod 软件的主要应用对象是制造系统以及物料搬运系统,图 1-4 所示为 AutoMod 仿真软件的界面。

### 3. ExtendSim

ExtendSim 是美国 Imagine That 公司的产品,它采用 C 语言开发,可以对离散事件系统和连续系统进行仿真,且具有较高的灵活性和可扩展性。ExtendSim 不仅能够对实体流动进行可视化建模,而且对数据流动和控制结构也可以进行可视化建模而无需编写程序,这使得 ExtendSim 非常容易学习,对初学者的编程能力要求不高,其界面如图 1-5 所示。

### 4. Flexsim

Flexsim 是美国 Flexsim 公司的产品,它采用 C++ 语言开发,采用面向对象编程和 Open GL 技术,提供三维图形化建模环境,可以直接建立三维仿真模型,支持离散系统和连续流

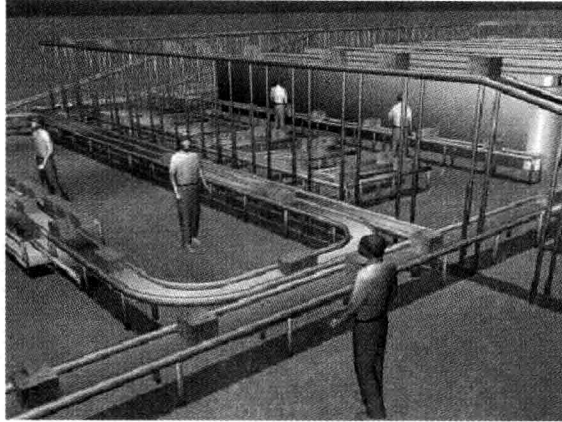


图 1-4 AutoMod 仿真软件的界面

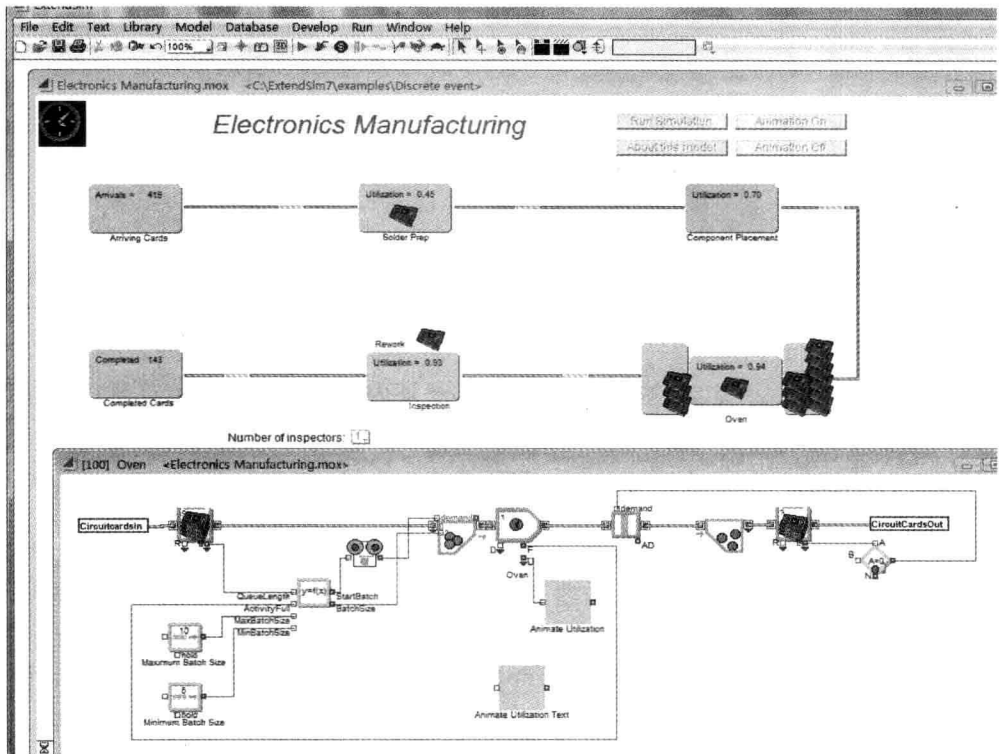


图 1-5 ExtendSim 仿真软件的界面

体系统建模。

Flexsim 提供了众多的对象类型,如操作员、传送带、叉车、仓库、储罐、货架等,通过设置对象参数,可以快速高效地构建制造、物料搬运、服务等系统模型。图 1-6 所示为 Flexsim 仿真软件的界面。

Flexsim 可以直接导入 3D Studio、VRML、DXF、STL 和 SKP(仅 Flexsim 5.0 及以上

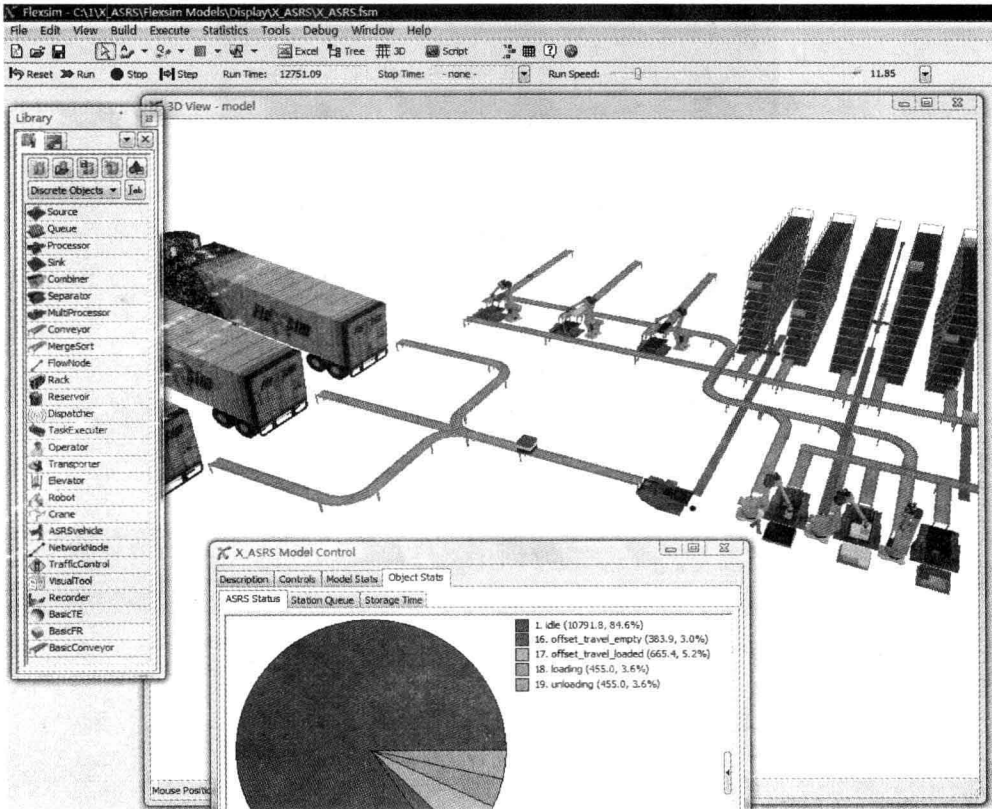


图 1-6 Flexsim 仿真软件的界面

版本支持 SKP 文件导入)等 3D 图形文件。Flexsim 还内置虚拟现实的浏览窗口,让用户添加光源、雾以及虚拟现实立体技术。

## 5. ProModel

ProModel 是由美国 PROMODEL 公司开发的离散事件系统仿真软件,用于生产、物流和服务系统建模。ProModel 提供二维图形化建模及动态仿真环境,并可以转化为三维场景。ProModel 中的主要建模元素包括实体(entity)、位置(location)、资源(resource)、到达(arrivals)、加工处理(processing)、路由(routing)、班次(shift)、路径(path networks)等。ProModel 仿真软件的界面如图 1-7 所示。

## 6. Witness

Witness 是英国 Lanner 集团开发的通用仿真软件,支持离散事件系统和连续流体系统建模。Witness 提供了丰富的模型单元,包括物理单元和逻辑单元。其中,物理单元用于描述系统中的工具、设备等,如工件(part)、缓存(buffer)、机器(machine)、传送带(conveyor)、操作工(labor)、处理器(processor)、容器(tank)、管道(pipe)等;逻辑单元用于表示系统中对象的特性及其逻辑关系等,如属性(attribute)、变量(variable)、分布(distribution)、班次(shift)、文件(file)、函数(function)等。图 1-8 所示为 Witness 仿真软件的界面。

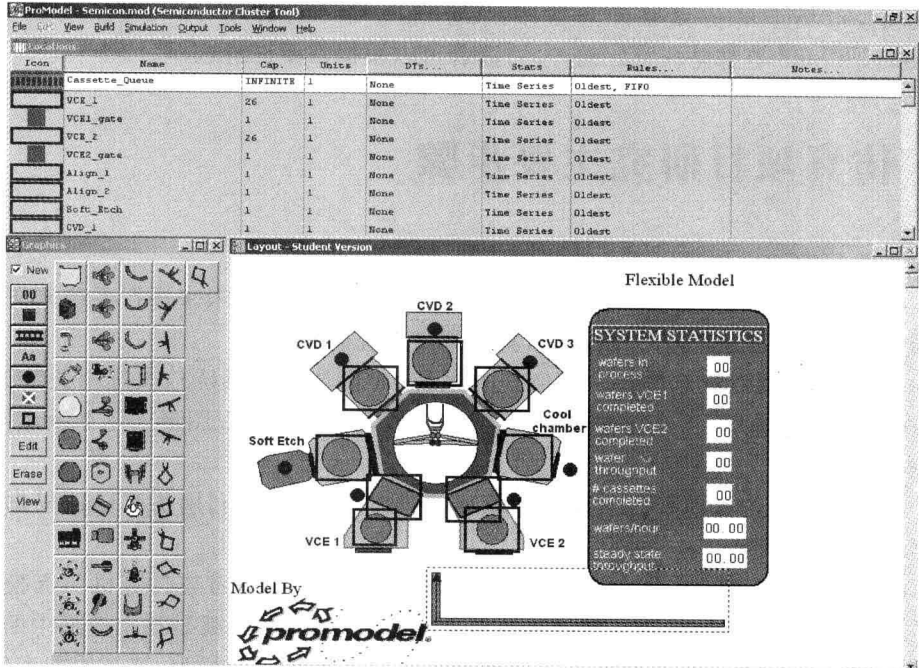


图 1-7 ProModel 仿真软件的界面

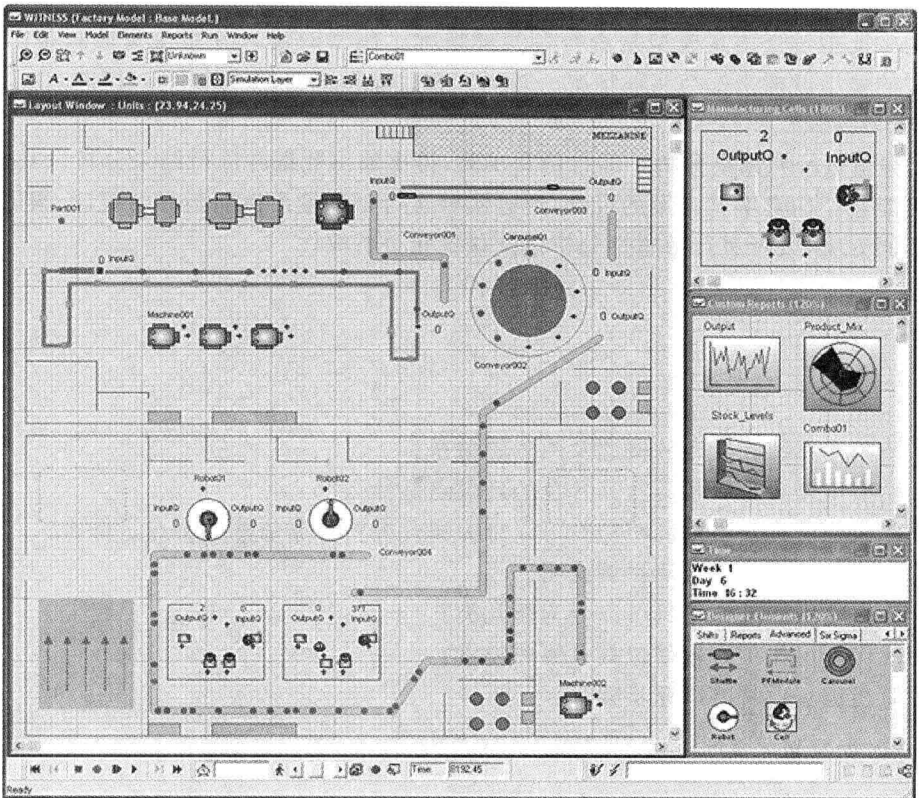


图 1-8 Witness 仿真软件的界面



实际上,市场上的仿真软件非常多,Anylogic,Quest,eM-Plant(现已改名为Plant Simulation),Simul8等都是非常好的产品,读者可以根据需要进行选择。

## 1.3 仿真项目研究主要步骤

仿真项目研究通常包含以下主要步骤。

(1) **定义仿真研究的目的。**通过明确仿真研究的目的可以使未来进行系统调研和建模时抓住重点,而不是面面俱到、浪费时间,甚至偏离系统研究方向。

(2) **收集数据、建立概念模型。**研究现有系统(或设计中的系统),收集相关数据,理解系统运作流程,在此基础上,建立系统的概念模型,概念模型通常以图形表示系统运作流程,便于理解和交流。

(3) **建立计算机仿真模型。**一旦概念模型通过审核,就可以利用仿真软件根据概念模型建立计算机仿真模型。

(4) **模型校核(verification)与验证(validation)。**模型校核是考查计算机仿真模型是否按照预先设想的情况运行,是否真实描述了概念模型。通俗地讲,就是找出模型中的各种语法及逻辑错误。可以考察输入参数在各种极端情况取值下的系统行为,并利用能产生“直观明显”结果的输入数据来检查系统是否产生应有的输出,以及利用一些熟悉的数据按照模型逻辑过一遍,看能否得出预期结果。

模型验证指考查仿真模型是否符合实际情况。模型的输入分布与实地观察结果一致吗?模型的输出性能指标与实际情况一致吗?在此要做必要的统计检验,同时,也需要许多经验和常识性判断。

(5) **实验运行和结果分析。**运行仿真实验,得出输出数据并进行结果分析。具体来说,这一步可能包括仿真实验方案的设计,通过实验运行得到输出性能指标的统计,根据实验输出比较不同方案,或者进行敏感性分析以及最优化分析等。

## 1.4 习题

- (1) 请阐述系统和模型的概念及两者的关系。
- (2) 模型可以分为哪几类?其各自的优缺点是什么?
- (3) 什么是仿真?举例说明仿真可以分为哪几类?各类仿真的特点是什么?
- (4) 什么是系统状态?请举例说明。
- (5) 仿真使用的软件工具可以分为哪几类?
- (6) 现代可视化仿真软件包具有哪些特点?
- (7) 简述仿真项目的研究步骤。