

*Practical System Simulation Modeling and
Analysis with Flexsim (2nd edition)*

实用系统仿真建模与分析

—— 使用 Flexsim

(第2版)

秦天保 周向阳 编著

清华大学出版社

配套学习光盘



实用系统仿真建模与分析

—— 使用 Flexsim

(第2版)

*Practical System Simulation Modeling and
Analysis with Flexsim (2nd edition)*

秦天保 周向阳 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统介绍离散系统仿真建模与分析的理论基础,采用仿真软件 Flexsim 以及大量案例,介绍仿真理论方法的实际应用。全书的组织基本上按照仿真项目研究的步骤展开。本书的主要特色是理论和应用结合得非常紧密,注重可操作性和实用性,帮助读者加强基础理论的同时,提高动手建模解决实际问题的能力。

本书可供高等院校物流、制造等专业本科生和研究生阅读,也可供各行各业的仿真工作者参考。

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.--2 版.--北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-42452-9

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(2015)第 307079 号

责任编辑:赵 斌 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨 艳

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

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13.25

字 数:318 千字

(附光盘 1 张)

版 次:2013 年 2 月第 1 版

2016 年 2 月第 2 版

印 次:2016 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:32.00 元

产品编号:067573-01

生产制造、物流、服务等诸多行业中许多决策问题都具有随机因素,适合用系统仿真方法解决,但是传统上由于仿真建模非常复杂,严重阻碍了仿真技术的应用。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,已经可以在企业中大规模推广应用了。

目前急需既了解仿真实论,又能够应用现代仿真软件包进行实际动手建模的仿真人才。本书将系统仿真的基本理论与现代仿真软件包的操作相结合,通过操作介绍理论,通过理论强化操作能力,使读者能够在基本仿真实论知识的武装下,利用现代仿真软件包进行实际仿真建模。

本书主要研究离散系统仿真,系统介绍离散系统仿真的理论基础,并通过 Flexsim 这一先进的仿真软件介绍理论方法的实际操作和应用。本书关注的应用领域主要包括物流、生产制造、服务行业,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以及它们与仿真软件的关系。第 5 章介绍仿真输出分析。第 6 章介绍 Flexsim 建模需要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。第 10 章介绍流体建模(连续系统建模)。最后,附录 A 介绍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;附录 C 介绍 Flexsim 全自助多媒体仿真实验平台和教师教学资源包。本书许多章节配有实验题目,每个实验用时约 45 分钟,各章还配有习题,所有实验题和习题都附有答案。

相对于本书第 1 版,第 2 版的主要改动有:采用 Flexsim 7.3.6 版进行讲解,Flexsim 7.3.6 评估版可以使用 30 个实体建模(以前版本只能使用 20 个实体);第 2 章补充介绍了故障建模、标签、仪表板的用法,还增加了组合器、分解器、分类输送机、堆垛机的用法介绍,有了这些实体的知识,读者基本上就能够建立一些接近实际的模型了;第 3 章采用更加简明的实体流程图进行概念建模,补充了更多 ExpertFit 中拟合优度检验的内容;第 5 章修改细化了仿真重复次数确定的方法,并介绍如何用 Excel 进行操作,大幅增加了 Flexsim 中仪表板和性能指标定义相关的内容;重写了第 8 章,以反映

新版 Flexsim 的特征；重写了第 9 章库存系统仿真的内容，以反映新版 Flexsim 的特征；增加了第 10 章，介绍流体建模(连续系统建模)；增加了附录 C。

本书的编写由上海海事大学秦天保和北京创时能公司周向阳博士共同完成，周向阳编写了 9.3 节，其他所有章节由秦天保编写。本书采用的 Flexsim 软件版本是 Flexsim 7.3.6 版。

本书附带光盘一张，包含如下内容：

- (1) Flexsim 7.3.6 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；
- (3) 书中所有实验题的答案模型。

另外，本书附有 PPT 讲义，可免费赠给教师上课使用，需要的教师可以与秦天保联系索取(仅供教师)，E-mail: qtbhappy@163.com。

编者

2015 年 9 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	7
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	18
2.2.4 更多建模技术	22
2.3 Flexsim 的基本概念	27
2.4 系统仿真典型性能指标	29
2.5 案例：物料搬运系统建模	31
2.5.1 基本模型	31
2.5.2 添加操作员和运输机	32
2.5.3 路径网络建模	36
2.6 案例：物料搬运系统扩展建模	40
2.7 排队系统基础	43
2.7.1 排队系统的特征	43
2.7.2 排队系统的符号表示	44
2.7.3 排队系统稳态性能测度	45
2.7.4 利特尔法则	45
2.8 离散系统仿真模型组成元素	46
2.9 离散系统仿真时间推进机制	48
2.10 理解 Flexsim 模型的流程	49
2.11 习题	49

2.12 实验	49
第3章 输入数据采集与分析	52
3.1 分布拟合的过程	52
3.1.1 建立概念模型收集原始数据	53
3.1.2 数据适用性检验	54
3.1.3 辨识分布类型	57
3.1.4 参数估计	58
3.1.5 拟合优度检验	59
3.2 经验分布	60
3.3 使用 ExpertFit 软件进行分布拟合	61
3.3.1 理论分布拟合——连续随机变量	61
3.3.2 缺乏样本数据的情况	67
3.3.3 理论分布拟合——离散随机变量	69
3.3.4 经验分布拟合——连续随机变量	73
3.3.5 经验分布拟合——离散随机变量	76
3.4 多变量与相关输入数据	77
3.5 习题	77
3.6 实验	77
第4章 随机数和随机变数的生成	79
4.1 随机数和随机变数	79
4.2 随机数生成器	79
4.2.1 线性同余生成器	80
4.2.2 素数取模乘同余生成器	80
4.2.3 随机数流	80
4.2.4 组合多重递推生成器	81
4.3 随机变数的生成	81
4.4 习题	82
第5章 仿真输出分析	83
5.1 概述	83
5.1.1 仿真输出分析的含义	83
5.1.2 估计性能指标的均值及其置信区间的方法	83
5.1.3 终止型仿真和非终止型仿真	84
5.2 终止型仿真输出分析	85
5.2.1 确定初始状态	85
5.2.2 确定仿真运行的终止事件	86
5.2.3 确定仿真重复运行次数	86
5.3 非终止型仿真输出分析	88
5.3.1 确定预热期	89
5.3.2 确定仿真运行时间长度	89

5.3.3 确定仿真重复运行次数	90
5.4 Flexsim 中的输出分析	90
5.4.1 终止型仿真的输出分析举例	90
5.4.2 非终止型仿真的输出分析举例	93
5.5 方案比较	95
5.5.1 概述	95
5.5.2 双系统方案比较	95
5.5.3 多系统方案比较	97
5.6 Flexsim 中定义性能指标的方法	99
5.6.1 在实验管理器直接定义性能指标	99
5.6.2 通过仪表盘定义性能指标	102
5.7 习题	105
5.8 实验	105
第 6 章 Flexsim 建模进阶	111
6.1 Flexsim 对象触发器执行次序(推动 vs 拉动)	111
6.2 Flexsim 脚本编程基础	114
6.2.1 Flexsim 脚本的一般规则	114
6.2.2 变量与数组	115
6.2.3 流程控制语句	115
6.2.4 操作符	117
6.2.5 基本建模函数	117
6.3 Flexsim 树结构	121
6.4 任务序列编程基础	121
6.4.1 创建任务序列 1	122
6.4.2 创建任务序列 2	123
6.4.3 创建任务序列 3	124
6.5 任务序列详解	126
6.6 消息编程	131
6.7 习题	132
6.8 实验	132
第 7 章 模型校核与验证	134
7.1 模型校核	134
7.2 模型验证	134
7.3 Flexsim 调试工具和技术	135
7.3.1 调试要点	135
7.3.2 使用模型单步执行功能和代码单步执行功能	135
7.3.3 查找对象	136
7.4 习题	136

第 8 章 仿真优化	137
8.1 仿真优化概述	137
8.2 仿真优化的步骤	137
8.3 习题	142
8.4 实验	142
第 9 章 系统仿真典型应用	143
9.1 库存系统仿真	143
9.1.1 库存系统概述	143
9.1.2 (s,S)库存系统仿真	143
9.2 系统仿真在集装箱码头堆场闸口规划中的应用	151
9.2.1 概述	151
9.2.2 系统体系结构	152
9.2.3 输入参数设定	154
9.2.4 结果分析	154
9.3 配送中心订单拣选流程仿真	157
9.3.1 问题陈述	157
9.3.2 模型建立	158
9.3.3 实验运行	160
9.4 习题	160
第 10 章 流体建模	161
10.1 基本概念	161
10.2 流体建模案例	162
附录 A 仿真用概率统计基础	169
A.1 概率论基本概念	169
A.2 常用分布及其典型用途	170
A.2.1 常用连续分布	170
A.2.2 常用离散分布	173
A.3 抽样与统计推断	175
A.3.1 总体与样本	175
A.3.2 参数估计	175
A.4 假设检验	178
附录 B Flexsim 对象参考	180
B.1 固定资源对象	180
B.2 移动资源对象——任务执行器	187
B.3 其他对象	190
附录 C Flexsim 全自动多媒体仿真实验平台	195
C.1 概述	195
C.2 实验项目	196
C.3 教学资源包	199
参考文献	201

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,目的是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)。如一个工厂系统,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中进行研究的(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,最好建立一个实际系统的模型作为替代品来研究。

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、逻辑模型(凯尔顿等,2007),而逻辑模型又可以进一步分为符号模型、解析模型、仿真模型,如图 1-1 所示。

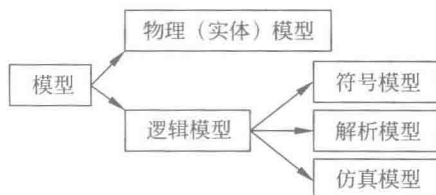


图 1-1 模型分类

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,可以建立物料搬运系统的实物模型,用于研究不同设施布局对系统性能的影响。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。它可以进一步分为符号模型、解析模型和仿真模型。

(1) 符号模型是利用一些图型符号诸如矩形、箭头等,来描述一系列的活动或要素间的相互关系的模型。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,易于理解。符号模型的缺点是难以利用它们对系统性能进行量化分析,也难以描述系统的动态特征。

(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,模型逻辑表达清晰,常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(或简单几率性)的问题,难以解决复杂动态随机系统问题。

(3) 仿真模型是指利用计算机建立的模拟真实系统运行的模型。仿真模型的优点是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。其缺点是模型逻辑难以清晰表达(隐藏于程序中),模型对许多决策问题难以求得确定的最优解。

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为连续系统仿真、离散系统仿真和混合系统仿真。

(1) 连续系统仿真:在这种仿真中,反映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,对其进行仿真即为连续系统仿真。

(2) 离散系统仿真:在这种仿真中,反映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、顾客接受服务后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的集合。图 1-2 展示了离散系统和连续系统状态变量取值是如何随时间变化的。

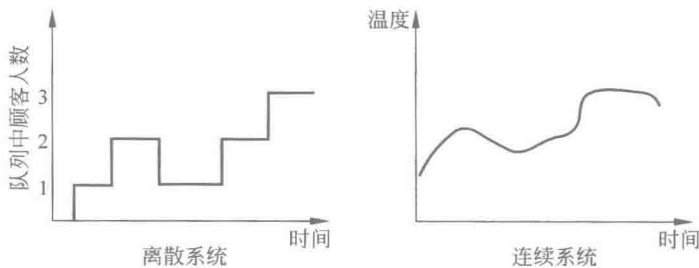


图 1-2 离散系统和连续系统

(3) 混合系统仿真:如果仿真所模拟的系统既有连续的部分,也有离散的部分,则称为混合系统仿真。比如液态包装奶的生产流程,在液态奶包装前,奶液处于管道和储液罐中进行各种处理,此为连续系统,在处理完成后包装到一个个小盒子里,后续储存、出库流程就属于离散系统。

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:如 VB、C、C++、Fortran 等。
- (2) 通用仿真语言:如 GPSS、SIMSCRIPT、SLAM、SIMAN 等。
- (3) 电子表格及其插件:如 Excel、@Risk(Excel 插件)、Crystal Ball(Excel 插件)等。
- (4) 可视化仿真软件包:如 Flexsim、Automod、Plant Simulation、ExtendSim、Arena、Simio、Promodel、Simul8、Witness、Anylogic 等。

最初,人们使用 C、Fortran 等通用程序设计语言开发仿真模型,由于这些语言并非专门为仿真的目的而设计,故开发仿真模型的工作量大而烦琐。之后,人们设计了一些专门用于开发仿真模型的程序设计语言,它们包含一些仿真特定的构造,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。

使得仿真走向广泛应用和普及的是可视化仿真软件包出现,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建仿真模型,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,可以利用形象的图标模块以搭积木式建立仿真模型,支持 2D 和 3D 动画。另外,还提供输入数据分布拟合工具、输出数据分析等模块,这些功能支持大大简化了建模过程。

目前,市场上已有大量的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,成为研究企业系统、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 等部分组成,3D 动画功能较强。

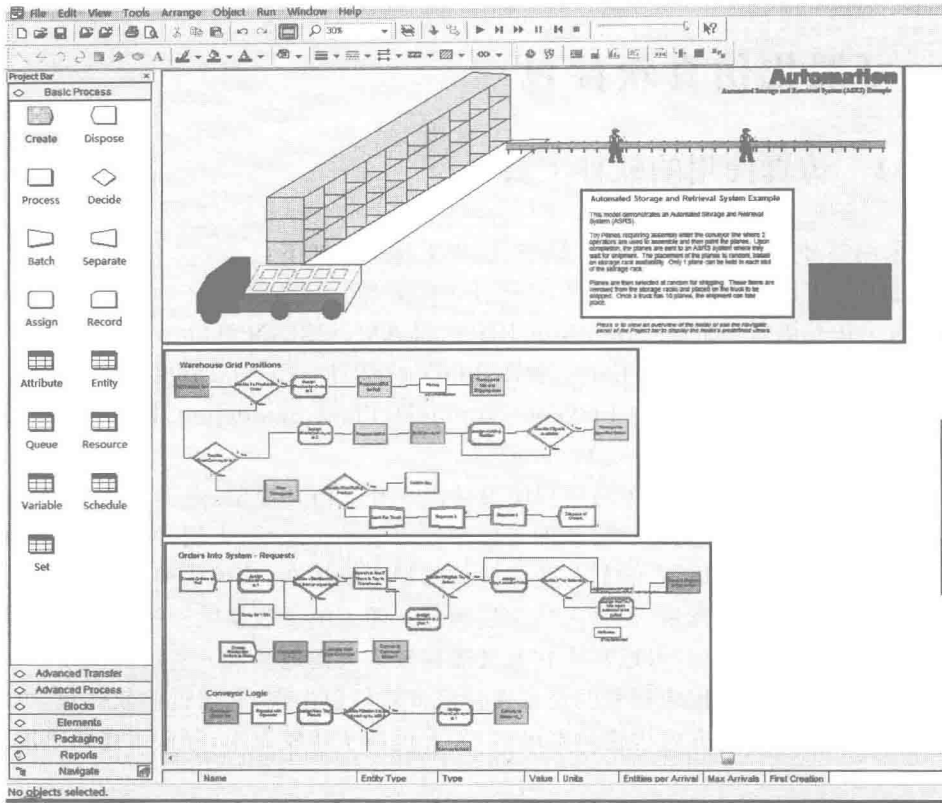


图 1-3 Arena 仿真软件的界面

AutoMod 采用内置的模板技术,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 为 AutoMod 仿真软件的界面。



图 1-4 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可视化建模而无须编写程序,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。

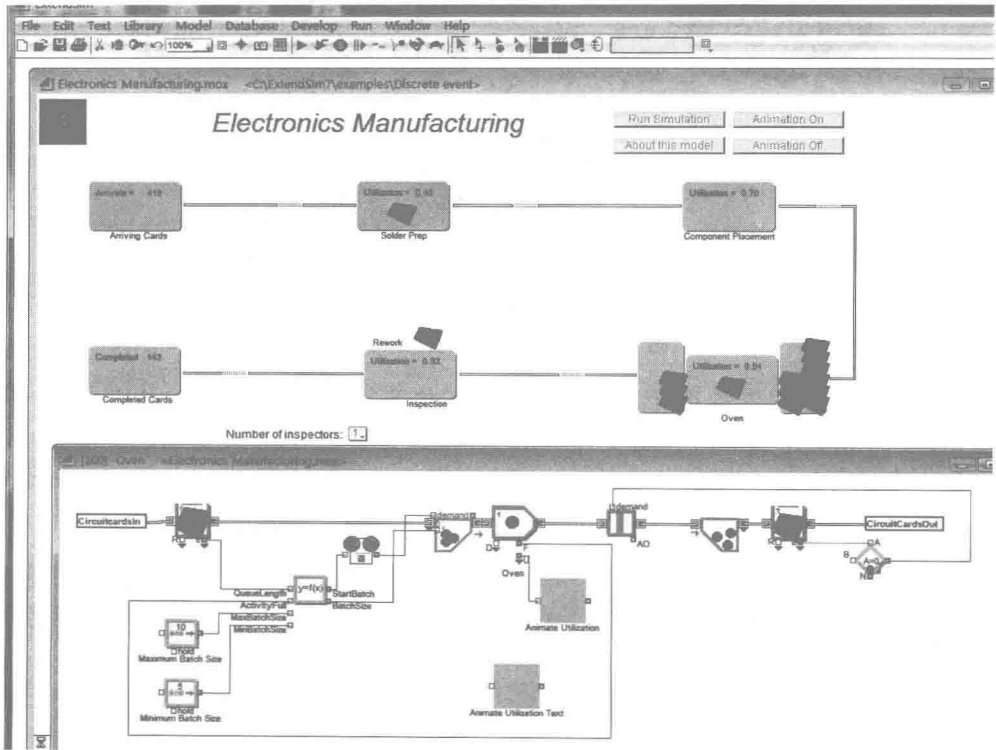


图 1-5 ExtendSim 仿真软件的界面

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 OpenGL 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。它支持离散系统和连续流体系统建模。

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,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 及以上版本支持 SKP 文件导入)等 3D 图形文件。

5. ProModel

ProModel 是由美国 ProModel 公司开发的系统仿真软件,用于生产、物流和服务系统

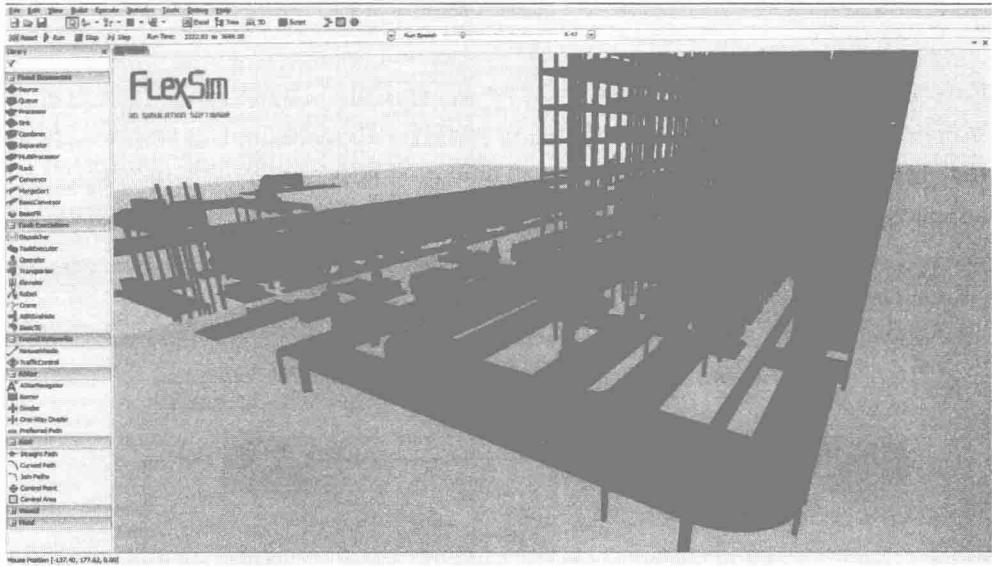


图 1-6 Flexsim 仿真软件的界面

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(entities)、位置(locations)、资源(resource)、到达(arrivals)、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。

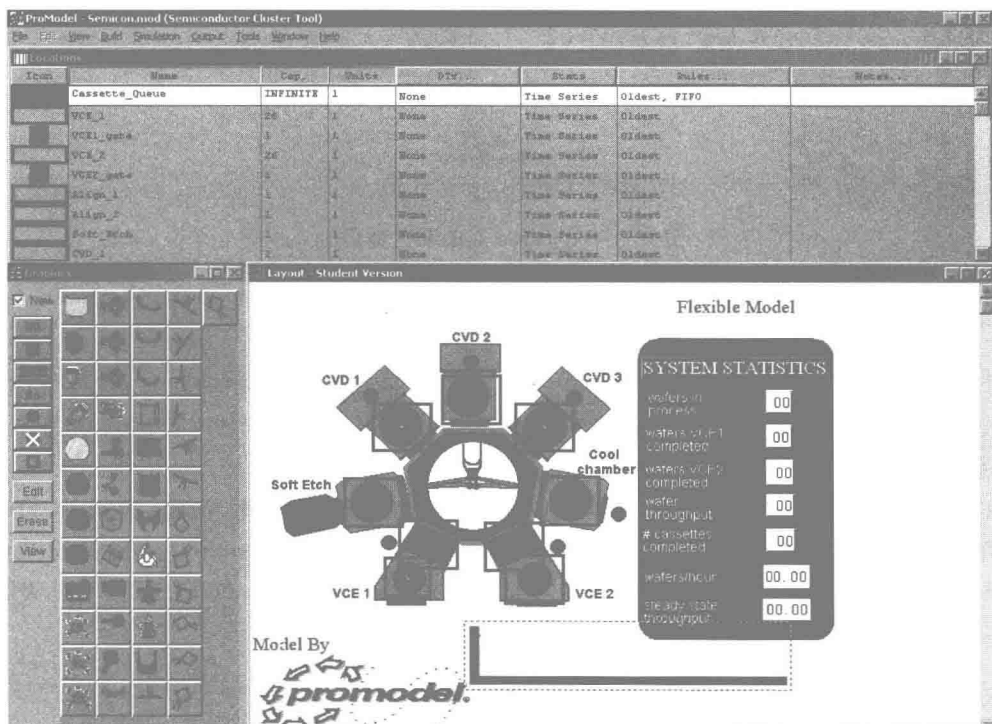


图 1-7 ProModel 仿真软件的界面

6. Witness

Witness 是英国 Lanner 集团开发的通用仿真软件,支持离散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 为 Witness 仿真软件的界面。

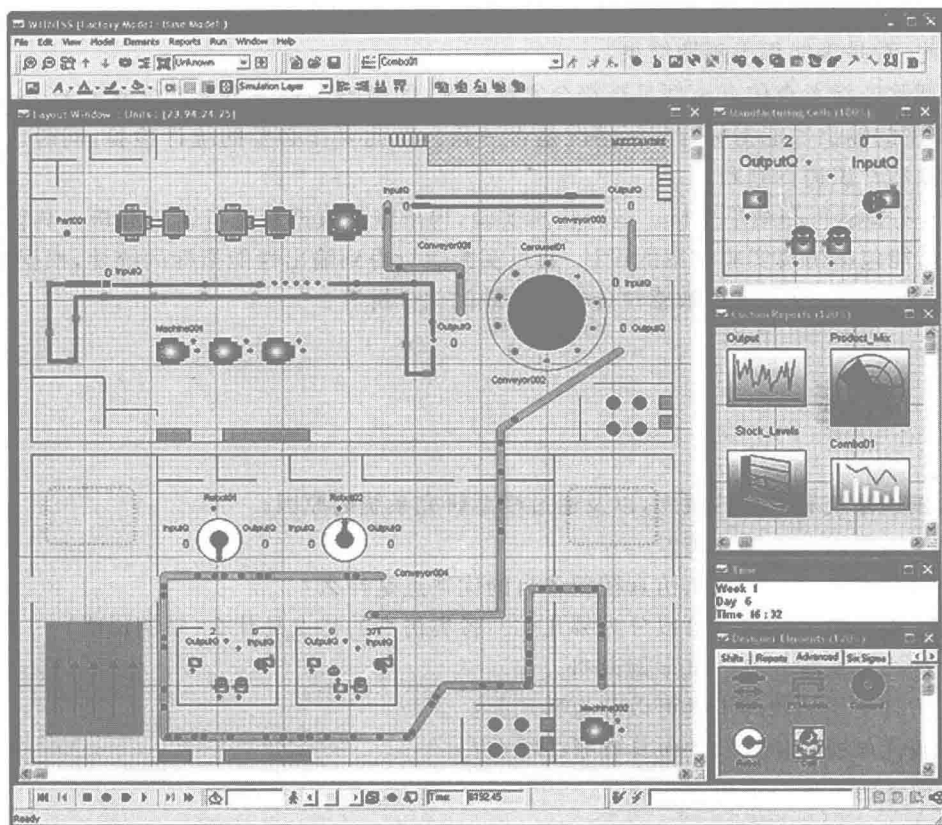


图 1-8 Witness 仿真软件的界面

实际上,市场上的仿真软件非常多,例如 Anylogic、Quest、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),理解系统运作流程,收集相关数据。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系统的行为,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,看是否能得出预期结果。

模型验证指考查仿真模型是否符合实际情况,如模型的输入分布与实地观察结果是否一致,模型的输出性能指标与实际情况是否一致。在此要作必要的统计检验,同时,也需要许多经验和常识进行判断。

(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. 阐述系统和模型的概念,以及通过模型研究系统的原因。
2. 模型可以分为哪几类?
3. 符号模型、解析模型、仿真模型各自的优缺点是什么?
4. 什么是仿真? 仿真可以分为哪几类? 各类仿真的特点是什么(举例说明)?
5. 什么是系统状态? 试举例说明。
6. 仿真使用的软件工具可以分为哪几类?
7. 现代可视化仿真软件包具有哪些特点?
8. 简述仿真项目的研究步骤。