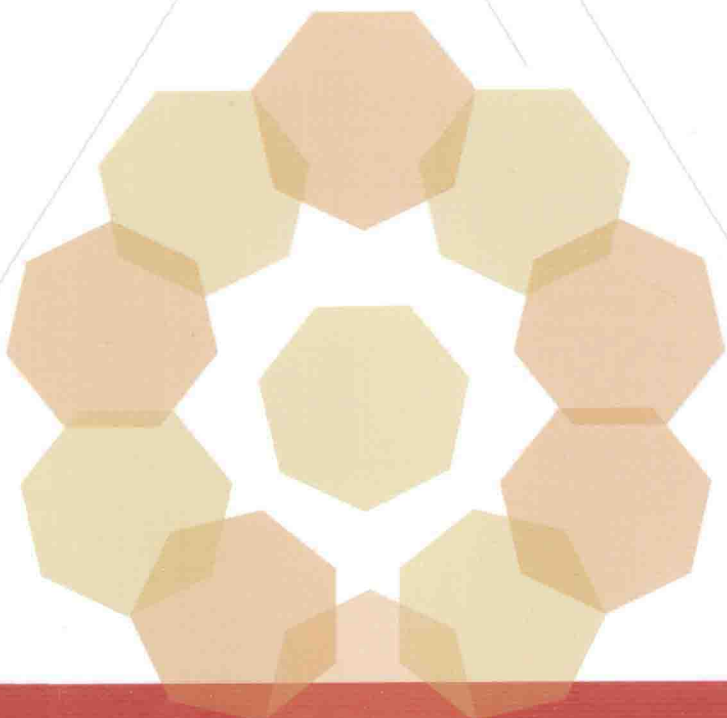




创优系列·管理科学与工程



# 生产物流系统 建模与仿真

Modeling and Simulation for  
Production and Logistic System

王建华 黄贤凤 编著

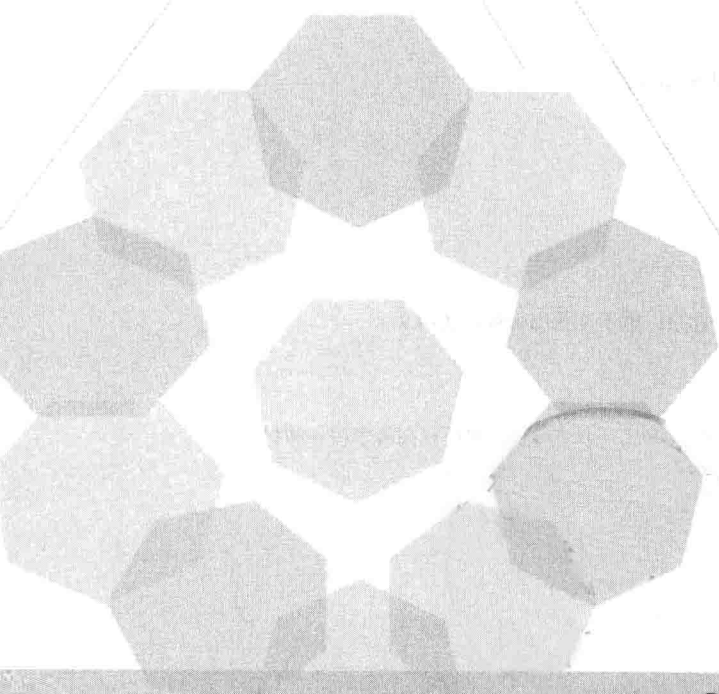


电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



创优系列·管理科学与工程



# 生产物流系统 建模与仿真

Modeling and Simulation for  
Production and Logistic System

王建华 黄贤凤 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书在论述系统建模与仿真基础理论的基础上,以一个完整的车辆生产物流系统案例作为研究对象,阐述系统建模与仿真技术在采购、生产、物流和销售过程中的应用。全书共分为三个部分,第一部分介绍系统建模与仿真,尤其是离散事件系统建模与仿真的一般理论和概率统计基础知识,第二部分介绍仿真平台 Witness 的特点和建模过程,第三部分介绍车辆生产物流系统整个运作流程的建模与仿真的实战技术和方法。

本书可作为高等院校工业工程、物流管理、工商管理、制造工程等专业的本科生或研究生的仿真课程教材,也可作为相关工程技术人员进行仿真学习和研究的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

生产物流系统建模与仿真 / 王建华, 黄贤凤编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.9  
(华信经管创优系列)

ISBN 978-7-121-24302-8

I. ①生… II. ①王… ②黄… III. ①企业管理—物流—生产管理—系统建模—高等学校—教材  
②企业管理—物流—生产管理—系统仿真—高等学校—教材 IV. ①F273.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 209631 号

策划编辑: 王二华

责任编辑: 王二华

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19 字数: 457 千字

版 次: 2014 年 9 月第 1 版

印 次: 2014 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

经济全球化的发展使得企业之间的竞争日趋激烈，企业运作效率的提升对其生存和发展起到了重要的作用。为了提升系统效率，研究者对生产制造系统中人、机、料、法、环的合理配合和管理体系进行了全面的研究，创造出很多广为应用的理论和方法。基础工业工程的动作研究和工时分析对生产过程的动作进行分解和标准化，人因工程的人机配合试图寻求最佳的人机结合面，泰勒科学管理从人的自身需求出发设计有效的管理激励措施，丰田精益生产方式从消除浪费角度设计和改善系统的运作效率，六西格玛管理采取 DMAIC 循环方式设计系统产出质量改善方案，供应链与物流管理中的博弈和协调理论寻求系统整体效率提升途径。

现有管理理论及其应用极大地提升了企业运作管理水平和效率，为现代人们日益多样化的生产、生活和娱乐需求提供了丰富的资源。但是，随着信息和网络技术的发展，企业之间的关系逐步走向了全球化的竞合关系，企业需要持续不断地寻求新的方法和途径去研究和改善自身的运作系统，以获得相对竞争优势。系统建模与仿真（System Modeling&Simulation, SMS）技术是一种建立在系统组成对象之间精确的交互关系和详细运作数据基础之上、对实际系统行为的准确表述和仿真实验的方法，通过仿真实验能够评估、分析系统的运作效率，识别关键约束因素，辅助提出有效的系统改善方案。在系统集成度越来越高的现代企业竞争环境中，作为一种新型管理决策分析工具，系统建模与仿真技术获得了越来越多的企业的关注和应用。

随着计算机软、硬件技术的发展，尤其是各种各样基于离散事件系统建模理论开发出来的商业仿真软件的不涌现，使得系统建模与仿真技术的掌握和使用变得更加容易和广泛。但是，系统建模与仿真需要使用仿真软件来描述实际运作系统中的各种关系和数据，而实际系统中对象之间的关系多种多样，如何从看似杂乱无章的车间、工厂、供应链中包含的成千上万个机床、操作工人、行车、叉车、仓库等要素之间整理出有规律的行为规则，并采取计算机语言来加以描述和形成可运行的软件程序，对于管理人员或计算机编程人员来说都是一项挑战。因此，近年来很多高校的工业工程、物流管理、工商管理、制造工程等专业都开设了相关的课程，很多企业为了应用仿真技术提升竞争力都在进行仿真应用项目的导入和推进。

总体来看，生产物流系统建模与仿真技术人员需要具备四方面的条件。首先，需要具备基本的概率统计知识，能够理解实际系统中随机性存在的普遍性并能够进行随机模型的构建；其次，需要具备使用离散事件视角识别实际生产物流运作行为规则的能力，认识到不同表象形式下的生产物流系统均是一些发生在离散时刻点的事件导致系统状态变化的排队系统，从而能够归纳和总结出有效的运作规则，以便于构建仿真模型；再次，需要掌握系统建模的编程技能，虽然当前系统建模与仿真软件的操作性和易用性非常高，但是仍然需要通过案例训练以便具备将不同机加、装配、运输、采购、销售过程中的规则转变为计

算机语言的能力；最后，需要具备对仿真结果的统计分析能力，根据仿真实验结果能够分析系统的运行状态和统计系统绩效，并据此识别出系统瓶颈和提出改善方案。

有鉴于此，本书采取理论和实践相结合的原则进行编写，将全部章节布局为三大部分。第1章到第4章为系统建模与仿真基础理论部分，主要介绍仿真基本概念、仿真过程中涉及的概率统计知识及离散事件仿真模型设计方法。第5章至第7章为仿真软件基本操作部分，通过对两个独立案例的建模和仿真过程，对仿真平台 Witness 进行了简明扼要的阐述。第8章至第18章为车辆生产物流系统建模与仿真实战技能部分，根据作者多年的企业仿真项目实践经验，设计了综合制造企业生产物流系统典型运作过程的车辆生产物流系统案例为建模与仿真对象，通过分系统建模与仿真及最后的系统集成建模与仿真，详细介绍了对生产物流系统建模与仿真过程中涉及的系统分析、模型设计、实验结果分析及改善方案形成的相关内容。

本书由江苏大学王建华、黄贤凤编著，具体分工为：黄贤凤撰写第1~4章，王建华撰写第5~18章，最后全书由王建华统稿。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中难免有不足与疏忽之处，敬请读者批评指正，也希望与同行们进行更多的交流和探讨（联系邮箱：[jiannywang@163.com](mailto:jiannywang@163.com)）。本书电子资源网址为：[www.iescm.com/SimuBook](http://www.iescm.com/SimuBook)，该网址提供本书的全部模型、表格和 PPT 电子文档。本书中插有二维码，读者可以扫描查看相关多媒体资源和章节自测题。另外，本书配有在线题库，教师可以在线出题，形成试卷，需要者请发邮件至上述邮箱。

编著者

# 目 录

第 1 章 系统建模与仿真概述	1
1.1 系统模型	1
1.1.1 系统	1
1.1.2 模型及其分类	1
1.1.3 建立模型时应遵循的基本原则	2
1.2 系统仿真	3
1.2.1 系统仿真及其分类	3
1.2.2 实施仿真的方法	4
1.2.3 仿真的适用性	5
1.2.4 仿真应用领域	7
1.2.5 仿真的发展阶段	8
1.2.6 系统仿真的一般步骤	9
1.3 离散事件系统	12
1.3.1 离散事件系统的定义	12
1.3.2 离散与连续系统示例	12
1.4 离散事件系统基本术语	14
1.5 系统绩效指标	15
1.6 系统变量	16
1.6.1 决策变量	16
1.6.2 反应变量	16
1.6.3 状态变量	16
思考题	17
第 2 章 概率统计基础	19
2.1 概率统计的基本概念	19
2.1.1 确定事件和随机事件	19
2.1.2 随机变量与概率	19
2.1.3 连续型随机变量的概率分布函数	20
2.1.4 离散型随机变量的概率分布函数	20
2.1.5 随机变量概率密度函数	20
2.1.6 随机变量的数学特征	20
2.2 系统仿真中常用的随机分布	21

2.2.1	离散分布	21
2.2.2	连续分布	25
2.2.3	经验分布	34
2.3	仿真输入模型的构建	36
2.3.1	收集数据	37
2.3.2	利用直方图识别数据分布	39
2.3.3	参数估计	41
2.3.4	拟合优度检验	42
2.3.5	选择无数据的输入模型	44
	思考题	45
<b>第 3 章</b>	<b>随机变量的产生与检验</b>	<b>47</b>
3.1	伪随机数发生器的要求	47
3.2	伪随机数产生方法	49
3.2.1	平方取中法	49
3.2.2	线性同余法	50
3.2.3	加同余法	52
3.2.4	二次平方同余法	52
3.3	随机变量的产生方法	52
3.3.1	反变换法	53
3.3.2	拒绝法	60
3.3.3	正态分布随机发生器	61
3.4	随机数的检验	64
3.4.1	科尔莫戈洛夫-斯米尔诺夫检验法基本原理	64
3.4.2	科尔莫戈洛夫-斯米尔诺夫检验均匀分布	64
3.4.3	科尔莫戈洛夫-斯米尔诺夫检验正态分布	65
	思考题	66
<b>第 4 章</b>	<b>仿真模型设计与实现</b>	<b>68</b>
4.1	排队系统概述	68
4.1.1	到达模式	69
4.1.2	服务模式	69
4.1.3	服务台数目	69
4.1.4	系统容量	69
4.1.5	排队规则	70
4.2	事件调度法	71
4.3	排队系统事件例程分析	72
4.3.1	单队列单服务台系统事件例程	72
4.3.2	单队列多服务台系统事件例程	74

4.4	仿真模型的 Excel 实现	74
4.4.1	SQSS 系统手工仿真的 Excel 实现	74
4.4.2	SQSS 系统仿真的 Excel 实现	76
4.5	仿真模型的 Matlab 实现	78
4.5.1	SQSS 系统仿真的 Matlab 实现	78
4.5.2	SQMS 系统仿真的 Matlab 实现	84
	思考题	89
<b>第 5 章</b>	<b>Witness 仿真系统建模基础</b>	<b>91</b>
5.1	Witness 用户界面	91
5.1.1	标题栏	92
5.1.2	菜单栏	92
5.1.3	工具栏	92
5.1.4	元素选择窗口	93
5.1.5	状态栏	93
5.1.6	用户元素窗口 (Designer Elements)	93
5.1.7	系统布局区	93
5.2	Witness 建模元素	94
5.2.1	离散型元素	94
5.2.2	连续型元素	102
5.2.3	逻辑型元素	106
5.2.4	运输逻辑型元素	111
5.2.5	图形元素	113
5.3	Witness 流程规则	117
5.3.1	输入规则 (Input Rules)	117
5.3.2	输出规则 (Output Rules)	118
5.3.3	劳动者规则 (Labor Rules)	119
	思考题	123
<b>第 6 章</b>	<b>流水线生产系统建模与仿真</b>	<b>125</b>
6.1	模型描述	125
6.2	系统分析	125
6.2.1	元素说明	125
6.2.2	系统运行时间	126
6.3	模型建立	126
6.3.1	定义元素	126
6.3.2	元素细节设计	129
6.4	运行模型	135
6.4.1	仿真运行工具栏	135



6.4.2	结果分析	135
6.5	系统规则和变量说明	138
6.5.1	Pull 规则语法结构	138
6.5.2	Pull 规则示例	139
	思考题	139
<b>第 7 章</b>	<b>座椅组装生产物流系统建模与仿真</b>	<b>141</b>
7.1	模型描述	141
7.2	系统分析	142
7.3	建立模型	143
7.3.1	元素定义	143
7.3.2	元素可视化设计	144
7.3.3	元素详细设计	145
7.4	仿真实验及结果分析	148
7.4.1	工序忙闲状态	148
7.4.2	系统平均库存水平	149
7.4.3	Labor 元素忙闲状态统计	149
7.5	系统规则和属性说明	149
7.5.1	Percent 规则语法结构	149
7.5.2	Percent 规则示例	150
7.5.3	系统属性 Pen	150
	思考题	151
<b>第 8 章</b>	<b>车辆生产物流系统概述</b>	<b>153</b>
8.1	车辆生产物流系统简介	153
8.2	车辆生产物流系统布局及流程简介	155
8.3	VPLS 运作流程基本特征分析	156
8.3.1	采购模块	156
8.3.2	下料模块	157
8.3.3	AE 机加焊接线	159
8.3.4	BCD 机加线	159
8.3.5	F 工件喷漆集放链	160
8.3.6	总装线作业特征分析	161
8.3.7	销售模块	161
8.3.8	叉车运输	161
8.3.9	AGV 运输	162
8.4	车辆生产物流系统绩效指标	163
<b>第 9 章</b>	<b>采购过程建模与仿真</b>	<b>164</b>
9.1	模型描述	164

9.2	模型设计	165
9.2.1	建模元素定义	165
9.2.2	模型细节设计	165
9.3	仿真实验及结果分析	168
9.3.1	工序忙闲状态	168
9.3.2	系统平均库存水平	168
	思考题	169
<b>第 10 章</b>	<b>下料生产过程建模与仿真</b>	<b>170</b>
10.1	下料生产过程	170
10.1.1	下料生产过程系统描述	170
10.1.2	排料计划制定原则	172
10.2	模型设计	173
10.2.1	建模元素定义	173
10.2.2	模型细节设计	174
10.3	仿真实验及结果分析	182
10.3.1	工序忙闲状态	182
10.3.2	系统平均库存水平	184
10.3.3	Labor 元素忙闲状态统计	184
	思考题	185
<b>第 11 章</b>	<b>流水布局机加焊接作业系统建模与仿真</b>	<b>186</b>
11.1	模型描述	186
11.2	模型设计	187
11.2.1	建模元素定义	187
11.2.2	模型细节设计	188
11.3	仿真实验及结果分析	192
11.3.1	工序忙闲状态及工作负荷不平衡系数	192
11.3.2	系统平均库存水平	193
11.4	改善实验	194
11.4.1	模型修改	194
11.4.2	实验结果对比	195
	思考题	196
<b>第 12 章</b>	<b>成组布局机加焊接作业系统建模与仿真</b>	<b>197</b>
12.1	模型描述	197
12.2	模型设计	198
12.2.1	建模元素定义	198
12.2.2	模型细节设计	199
12.3	仿真实验及结果分析	206

12.3.1	瓶颈的理论分析	206
12.3.2	工序忙闲状态及工作负荷不平衡系数	207
12.3.3	系统平均库存水平	208
12.3.4	工人忙率	208
12.3.5	系统产能	209
12.4	改善实验	209
12.4.1	改善方案1——增加工序工人	209
12.4.2	改善方案2——增加瓶颈工序设备及工人	210
	思考题	210
<b>第 13 章</b>	<b>总装线建模与仿真</b>	<b>212</b>
13.1	模型描述	212
13.2	模型设计	213
13.2.1	建模元素定义	213
13.2.2	模型细节设计	214
13.3	仿真实验及结果分析	221
13.3.1	工序忙闲状态	221
13.3.2	系统平均库存水平	221
13.3.3	系统产能	222
13.4	改变随机性实验	222
	思考题	222
<b>第 14 章</b>	<b>车间物流系统建模与仿真——叉车输送</b>	<b>224</b>
14.1	叉车输送系统	224
14.1.1	叉车输送系统描述	224
14.1.2	叉车输送系统运行规则及数据	224
14.2	模型设计	226
14.2.1	建模元素定义	226
14.2.2	模型细节设计	227
14.3	仿真实验及结果分析	237
14.3.1	工序忙闲状态	237
14.3.2	系统平均库存水平	238
14.3.3	叉车忙闲状态统计	238
14.3.4	轨道状态统计	239
	思考题	239
<b>第 15 章</b>	<b>车间物流系统建模与仿真——AGV 输送</b>	<b>241</b>
15.1	AGV 输送系统	241
15.1.1	叉车输送系统描述	241
15.1.2	仿真目标	242

15.2	模型设计	243
15.2.1	建模元素定义	243
15.2.2	模型细节设计	243
15.3	仿真实验及结果分析	250
15.3.1	工序忙闲状态	250
15.3.2	系统平均库存水平	250
15.3.3	AGV 小车忙闲状态统计	251
15.3.4	轨道状态统计	251
	思考题	252
<b>第 16 章</b>	<b>车间物流系统建模与仿真——集放链输送</b>	<b>253</b>
16.1	集放链输送系统	253
16.1.1	集放链输送系统描述	253
16.1.2	仿真目标	254
16.2	模型设计	254
16.2.1	建模元素定义	254
16.2.2	模型细节设计	255
16.3	仿真实验及结果分析	262
16.3.1	工序忙闲状态	262
16.3.2	系统平均库存水平	262
16.3.3	集放链工作状态统计	262
	思考题	263
<b>第 17 章</b>	<b>销售配送系统建模与仿真</b>	<b>264</b>
17.1	车辆销售配送系统	264
17.1.1	车辆销售配送系统描述	264
17.1.2	销售配送系统运行规则及数据	264
17.1.3	仿真目标	265
17.2	模型设计	266
17.2.1	建模元素定义	266
17.2.2	模型细节设计	267
17.3	仿真实验及结果分析	271
17.3.1	工序忙闲状态	271
17.3.2	系统平均库存水平	272
17.3.3	卡车忙闲状态统计	272
17.3.4	收益或损失费用统计	273
	思考题	273
<b>第 18 章</b>	<b>车辆生产物流系统集成建模与仿真</b>	<b>274</b>
18.1	仿真模型集成主要步骤	274

18.1.1	用户自定义模组设计 .....	275
18.1.2	模型集成操作 .....	277
18.1.3	集成模型调整 .....	279
18.2	物流连接设计 .....	279
18.2.1	采购模组与下料和叉车物流模组的物流连接 .....	279
18.2.2	下料模组与叉车物流和流水机加模组的物流连接 .....	281
18.2.3	叉车模组与单元生产和总装模组的物流连接 .....	283
18.2.4	流水机加模组与集放链模组的物流连接 .....	284
18.2.5	单元生产模组与 AGV 模组的物流连接 .....	284
18.2.6	总装模组与 AGV 和集放链模组的物流连接 .....	285
18.2.7	总装模组与销售模组的物流连接 .....	286
18.3	仿真实验及结果分析 .....	287
18.3.1	产能分析 .....	287
18.3.2	成组车间改善及效果评价 .....	289
	思考题 .....	290
附录 A	科尔莫戈洛夫-斯米尔诺夫检验临界值 .....	291
	参考文献 .....	292

# 第1章 系统建模与仿真概述

现实系统表现形式多种多样，人们在实践和研究中总是希望通过一定的手段掌握系统的本质特性，了解系统组成要素之间的结构和相互关系，获取能够影响和控制系统运行状态的手段。为了实现对实际系统的理解和控制，有时需要通过构建数学公式来进行分析求解，有时需要通过绘制特定的图形进行分析，有时需要构建实际系统的物理结构模型来进行研究，有时则希望借助于计算机软件来进行实际系统内部结构和整体绩效的动态分析和求解。不论是采取数学公式还是计算机软件来对实际系统进行分析、研究或优化，都是在特定视角下对实际系统的抽象和建模。本章对系统建模与仿真的相关基础概念进行阐述，为后续章节内容的展开奠定概念基础。

## 1.1 系统模型

### 1.1.1 系统

系统仿真的研究对象是具有独立行为规律的系统。所谓系统是指相互联系又相互作用的对象有机组合。从广义上讲，系统的概念是非常广阔的，大到无穷的宇宙世界，小到分子、原子，都称为系统。

根据系统的物理特征可以将系统划分为两大类，即工程系统和非工程系统。

所谓非工程系统是指自然和社会在发展过程中形成的，被人们在长期的生产劳动和社会实践中逐渐认识的系统，如社会、经济、环境、交通、生物圈、血液循环系统等。

所谓工程系统是指人们为满足某种需要或实现某个预定的功能，利用某种手段构造而成的系统。工程系统的例子非常多，如机械、电气、动力、生产、物流系统等，更小一点的是汽车、自行车、铅笔等。

### 1.1.2 模型及其分类

模型是对相应的真实对象和真实关系中那些有用的和令人感兴趣的特性的抽象，是对系统某些本质方面的描述，它以各种可用的形式提供被研究系统的信息。模型描述可视为是对真实世界中的物体或过程相关信息进行形式化的结果。模型在所研究系统的某个侧面具有与系统相似的数学描述或物理描述。从某种意义上说，模型是系统的代表，同时也是对系统的简化。在简化的同时，模型应足够详细，以便从模型的实验中取得关于实际系统的有效结论。

由实际系统构造出一个模型的任务包括两方面的内容：一是建立模型结构；二是提供数据。在建立模型结构时，要确定系统的边界，鉴别系统的实体、属性和活动。提供数据要求能够使包含在活动中的各个属性之间的关系得以确定。

系统模型按结构形式分为实物模型、图式模型、模拟模型和数学模型，这些模型各具特点（如图 1.1 所示），可应用于不同的分析场合。



(1) 实物模型，是现实系统的放大或缩小，能表明系统的主要特性和各个组成部分之间的关系，如桥梁模型、电机模型、城市模型、建筑模型、风洞试验中的飞机模型等。这种模型的优点是比较形象，便于共同研究问题；缺点是不易说明数量关系，特别是不能揭示要素的内在联系，也不能用于优化。

(2) 图式模型，是用图形、图表、符号等把系统的实际状态加以抽象的表现形式，如网络图（层次与顺序、时间与进度等）、物流图（物流量、流向等）。当维数大于 2 时，该种模型作图的范围受到限制。其优点是直观、简单；缺点是不易优化，受变量因素数量的限制。

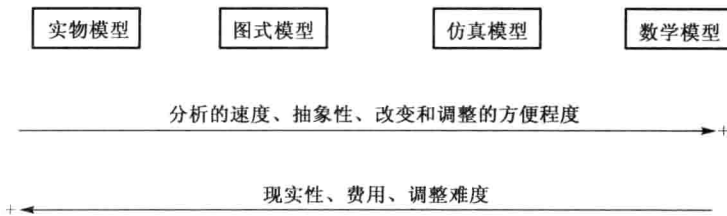


图 1.1 各种模型特性比较

(3) 仿真模型，用一种原理上相似、求解或控制处理容易的系统代替或近似描述另一种系统，前者称为后者的仿真模型（或模拟模型）。它一般有两种类型：一种是可以接受输入并进行动态仿真的可控模型，如对机械系统的电路仿真，可用电压模拟机械速度、电流模拟力、电容模拟质量；另一种是用计算机程序语言表达的仿真模型，如车站售票厅窗口数与服务水平关系的仿真、组装流水线投料批量与产出率的仿真等。一般情况下，为研究内部结构和相互关系复杂的系统的可控变量同系统响应变量之间关系，采取计算机仿真模型是一种有效的手段。

(4) 数学模型，是指对系统行为的一种数量描述。当把系统及其要素的相互关系用数学表达式的形式进行抽象表示时，就是运用了数学模型，如物理、化学中的各种数学表达式。数学模型一般分为确定型和随机型、连续型和离散型。

### 1.1.3 建立模型时应遵循的基本原则

#### 1. 清晰性

一个复杂的系统是由许多子系统组成的，对应的系统模型也是由许多子模型构成的。在子模型之间除了研究目的所必需的信息联系外，相互辐合要尽可能少，结构要尽可能清晰。

#### 2. 相关性

模型中应该只包括系统中与研究目的有关的那些信息。例如，对一个车间调度系统能

力进行仿真研究，只需要考虑运输设备的运输能力，而无须涉及输送设备的颜色和形状。虽然与研究目的无关的信息包含在系统模型中可能不会有很大害处，但是因为它会增加模型的复杂性，从而使得在求解模型时增加额外的工作，所以应该把与研究目的无关的信息排除在外。

### 3. 准确性

建立系统模型时，应该考虑所收集的、用以建立模型的信息的准确性，包括确认所应用的原理和理论的正确性及应用范围，以及在检验建模过程中针对系统所做假设的正确性。例如，在建立工厂设施规划与运输系统模型时，应该将运输工具视为一个三维实体而不能为一个质点，它的长度和宽度影响了运输通道的布局。

### 4. 可辨识性

模型结构必须具有可辨识的形式。所谓可辨识性是指系统的模型必须有确定的描述或表示方式，而在这种描述方式下与系统性质相关的参数必须有唯一确定的解。若一个模型结构中具有无法估计的参数，则此结构就无实用价值。

### 5. 集合性

建立模型还需要进一步考虑的一个因素，是能够把一些个别的实体组成更大实体的程度，即模型的集合性。例如，对物流与供应链系统的研究中，除了能够研究每个物流中心的物流细节和规律之外，还可以综合计算多个物流中心构建成一个供应链系统的效能。

## 1.2 系统仿真

### 1.2.1 系统仿真及其分类

系统仿真是建立在控制理论、相似理论、信息处理技术和计算机初等理论基础之上的，以计算机和其他专用物理效应设备为工具，利用系统模型对真实或假设的系统进行实验，并借助于专家的经验知识、统计数据和信息资料对实验结果进行分析研究，进而做出决策的一门综合的实验性学科。

克里斯托弗在《基于实践方法的仿真建模手册》一书中将仿真定义为：“通过一个同实际系统具有相同行为的模型而进行的实际系统的动态表示。”鉴于计算机软、硬件的快速发展及系统仿真的主要实施载体为软件系统，可以认为系统仿真是为了实现特定的系统分析或优化目的，运用计算机软件构建实际系统组成要素及其行为规则的模型，并通过对模型进行大量的实验和统计分析，进而辅助决策的一项技术。

从广义而言，系统仿真的方法适用于任何领域，无论是工程系统（机械、化工、电力、电子等）还是非工程系统（交通、管理、经济、政治等）。

仿真分类有很多种分类方式，以下按照三个方面进行分类。



## 1. 静态和动态

静态仿真与时间没有关系，仿真过程中事件发生时间同仿真结果没有直接的影响。动态仿真中时间扮演着不可或缺的角色，各项事件的发生时间具有特定的规律。在 1.2.2 节介绍的浦丰投针仿真实验就属于静态仿真，其中投针的快慢同结果没有直接影响；而在对银行营业厅顾客服务效率的仿真实验中，顾客到达间隔是具有特定的规律性的，在不同时刻，顾客到达速率可能不同，队列队长可能不同，柜台开放数量可能不同等。

## 2. 连续和离散

在连续仿真中，系统状态随时间连续变化，如水库蓄水量、放水量以及出现降水和蒸发时水位的变化即属此类。而在离散仿真中，系统状态仅在离散的时刻点发生变化，如在制造系统中，零件会在特定的时间到达和离开，机器会在特定的时刻出现故障和被修复，工人会在特定的时间开始休息和复工。在有的模型中，既有连续变化的因素，也有离散变化的因素，这种模型被称为混合模型（Mixed continuous-discrete model），如在炼油厂，储油罐中的压力是连续变化的，但会在离散时间点上发生间歇。

## 3. 确定和随机

没有随机输入的系统仿真称为确定性仿真，如自动流水线上机械手作业节拍完全按照程序控制的时长来执行的过程。对至少具有一部分随机输入的系统进行仿真则称为随机仿真，如在银行顾客的到达时间与服务时间都是随机变化的、车间手工作业节拍的随机波动等。

### 1.2.2 实施仿真的方法

当前情况下通常所说的系统仿真都是借助于计算机软件来实现的，即计算机仿真，但是实施仿真的方法有很多，有的并不一定需要采用强大的计算机软、硬件。

#### 1. 手工进行仿真

仿真的出现和应用最早起源于手工仿真。在 1733 年前后，一个叫 Georges Louis Leclerc 的人[后来由于其在仿真方面的杰出才能而被封为蒲丰（Buffon）伯爵]描述了一个用来估计  $\pi$  值的实验：如果向一个画有平行线的桌子上投掷针，针的长度为  $l$ ，平行线之间的间隔为  $d$  ( $d \geq l$ )，则可得到针与平行线相交的概率为  $p = 2l / (\pi d)$ 。如果经过  $N$  次投针，有  $n$  次针同平行线相交了，则  $p = n/N$ ，那么  $\pi = 2l / (pd) = 2lN / (nd)$ ，也就是通过  $N$  次实验获得了  $\pi$  的估计值。

虽然这个实验看起来很简单，甚至觉得有点笨拙，但是却具有大多数仿真所具有的一些共性，为后来的仿真实验及其发展提供了研究框架。

(1) 目的明确：估计某个很难精确计算出的参数值，1733 年  $\pi$  值可能真的不好计算。

(2) 实验结果存在随机波动：仿真实验最后得出的估计值不可能准确无误，即会带有一定的误差，能搞清楚这个误差可能有多大就很不错了。



(蒲丰投针实验)

## 4 生产物流系统建模与仿真