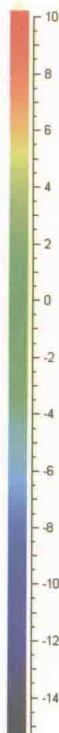
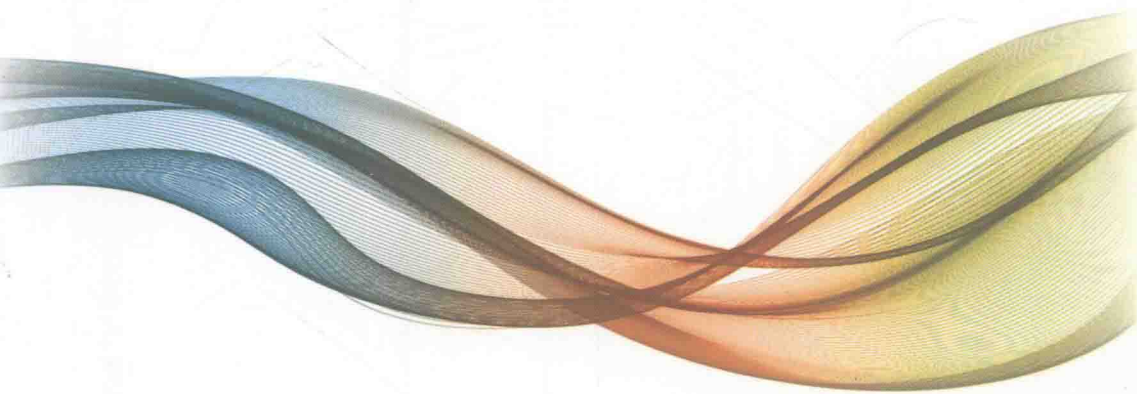


军队“2110工程”三期建设教材

军事系统 建模与仿真

彭鹏飞 任雄伟 龚立 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

军队“2110 工程”三期建设教材

军事系统建模与仿真

彭鹏飞 任雄伟 龚立 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以军事系统建模与仿真实论为基础,介绍了军事系统概念建模、仿真建模、仿真系统设计的一般理论和方法。主要内容包括三个部分:一是军事系统建模与仿真的基本理论;二是军事实体模型和作战模型的描述与设计方法;三是军事仿真系统的分析与设计。

本书可作为军事院校系统工程、计算机科学、控制科学、管理科学等专业学生的教科书。对于从事军事系统建模与仿真工作的专业技术人员,本书也是一本很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

军事系统建模与仿真/彭鹏飞,任雄伟,龚立编著. —北京:
国防工业出版社,2016.1
ISBN 978-7-118-10505-6

I. ①军... II. ①彭... ②任... ③龚... III. ①军事
系统-系统建模②军事系统-系统仿真 IV. ①EO

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 014321 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市鼎鑫印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18¼ 字数 412 千字

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

军事仿真技术的广泛运用促进了仿真科学理论的发展与完善,形成了仿真建模、仿真系统和仿真应用三个层次的理论体系,为仿真技术的进一步发展提供了理论支撑和前沿探索,计算机技术的发展也为军事系统建模与仿真提供了新的方法和手段。军事问题的建模与仿真是军事科学研究的重要内容,是军事领域中使用最为广泛的一种研究手段,广泛应用于作战训练、战法研究、装备论证与发展规划。

本书以军事系统建模与仿真理论为基础,介绍了军事系统概念建模、仿真建模、仿真系统设计的一般理论和方法。主要内容包括三个部分:一是军事系统建模与仿真的基本理论;二是军事实体模型和作战模型的描述与设计方法;三是军事仿真系统的分析与设计。

全书共分8章。第1章是概述,主要介绍了系统、模型和仿真的基本概念,阐述了军事仿真的发展、应用和主要技术,对军事仿真支撑平台的体系结构进行了描述,介绍了典型军事仿真系统。第2章是模型的基本理论,主要介绍了模型和军事概念模型的建模方法、描述形式和描述方法,详细分析了军事概念模型的组成内容,并对仿真模型、HLA模型、基本概念模型进行了分析,阐述了模型校核、验证和确认的相关技术。第3章是模型设计,主要介绍了UML模型和XML模型的描述方法,分析了UML模型和XML模型之间的转换机制,阐述了基于XML的模型体系框架,给出了基于脚本和基于使命的作战模型设计方法。第4章是想定设计,主要介绍了想定和仿真想定的基本概念,阐述了仿真想定的结构、描述方法和军事想定定义语言,介绍了典型想定系统的组成,阐述了仿真想定的基本设计方法。第5章是仿真引擎,主要介绍了离散事件系统和并行离散事件仿真的基本概念,分析了用于离散事件的仿真引擎的模型及运行机制,对常见的用于军事仿真的HLA仿真引擎、VR-Forces仿真引擎和STAGE仿真引擎的组成、结构和工作机理进行了简要分析。第6章是数据记录器设计,主要介绍了仿真数据的记录、存储和回放的相关内容、格式和实现方法,并给出了数据记录器的实现方案。第7章是态势显示系统,主要介绍了地理信息系统的基本概念,以MapX为例解析了地理信息系统的描述方法,阐述了战场态势的模型与组织,探讨了战场态势显示系统的功能,描述了军标标绘和三维场景显示的关键技术及常

用驱动引擎。第8章是分布式仿真设计,介绍了分布式仿真系统的基本原理和设计方法,主要包括分布式网络通信的主要机制,消息中间件的数据分发模型和发布/订阅机制,数据分发服务的规范与实现,面向服务架构的基本概念和实现机理。

本书是作者长期从事军事仿真科研和教学工作的总结,可作为高等院校系统工程、计算机科学、控制科学、管理科学等专业学生的教科书。对于从事军事系统建模与仿真工作的专业技术人员,本书也是一本很好的参考书。

由于军事系统建模与仿真涉及领域众多,加之作者水平有限,书中不妥遗漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

目 录

第1章 概述	1
1.1 系统、模型与仿真	1
1.1.1 系统	1
1.1.2 模型	2
1.1.3 仿真	3
1.1.4 系统仿真的要素和活动	3
1.1.5 仿真的基本概念框架	4
1.1.6 仿真的一般步骤	4
1.2 仿真系统的分类	5
1.2.1 根据模型的种类分类	5
1.2.2 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类	6
1.2.3 根据系统模型的特性分类	6
1.2.4 军事仿真系统的分类与分层	7
1.3 仿真的发展与现状	9
1.3.1 系统仿真方法学的发展	9
1.3.2 计算机仿真技术的发展	10
1.3.3 军事仿真技术的发展	11
1.4 军事仿真的应用	13
1.4.1 战略分析、战略规划与战略决策	13
1.4.2 武器装备研制、应用与论证	14
1.4.3 军事作战训练	14
1.4.4 军事理论研究	15
1.5 军事仿真的主要技术	15
1.5.1 建模技术	15
1.5.2 仿真技术	18
1.5.3 仿真架构技术	20
1.6 仿真支撑平台的体系结构	23
1.6.1 网络通信层	23
1.6.2 基础资源层	23
1.6.3 仿真支持层	24
1.6.4 仿真应用层	25

1.6.5	管理控制层	26
1.7	典型军事仿真系统	26
1.7.1	工程级仿真系统	27
1.7.2	交战级仿真系统	28
1.7.3	任务级仿真系统	30
1.7.4	战役级仿真系统	32
1.7.5	兵棋系统	33
第2章	模型	38
2.1	模型	38
2.1.1	模型的定义	38
2.1.2	建模过程	38
2.2	概念模型	39
2.2.1	概念	39
2.2.2	概念模型	39
2.2.3	概念模型建模方法	39
2.2.4	概念模型描述形式	40
2.2.5	概念模型描述方法	41
2.3	军事概念模型	42
2.3.1	军事概念模型的定义	43
2.3.2	军事概念模型建模方法	44
2.3.3	军事概念模型的描述	47
2.4	使命空间概念模型	48
2.4.1	CMMS 定义	48
2.4.2	CMMS 组成	48
2.4.3	CMMS 建模过程	49
2.5	主要军事概念模型	51
2.5.1	实体	51
2.5.2	动作	53
2.5.3	任务	55
2.5.4	交互	57
2.5.5	规则	58
2.5.6	事件	59
2.6	仿真模型	59
2.6.1	仿真模型的表示方法	59
2.6.2	军事仿真模型分类	60
2.6.3	模型框架	61
2.6.4	模型结构与数据分离	62
2.6.5	军事仿真模型重用	63

2.6.6	模型组合与集成	64
2.7	HLA 模型	65
2.7.1	HLA 的组成	65
2.7.2	HLA 对象模型	67
2.7.3	对象模型模板与面向对象的差异	67
2.7.4	对象模型模板(OMT)	68
2.7.5	联邦开发流程	69
2.8	基本对象模型(BOM)	73
2.8.1	BOM 的描述与划分	73
2.8.2	BOM 的模板组件	74
2.8.3	BOM 的架构	76
2.8.4	BOM 的数据交换格式	76
2.9	模型校核、验证和确认	77
2.9.1	校核、验证和确认(VV&A)技术	77
2.9.2	仿真系统生命周期 VV&A 过程模型	77
2.9.3	仿真系统 VV&A 标准/规范技术框架	77
2.9.4	VV&A 基本原则	78
2.9.5	VV&A 的要求	79
第3章	模型设计	80
3.1	基于 UML 的模型设计	80
3.1.1	UML 的架构	80
3.1.2	UML 的主要内容	81
3.1.3	模型驱动架构(MDA)	82
3.1.4	UML 建模工具	84
3.2	基于 XML 的模型描述	86
3.2.1	XML 概述	86
3.2.2	XML 的主要标准	87
3.2.3	DTD 和 XML Schema	88
3.2.4	XML Schema 语法	88
3.2.5	XML 文档解析	95
3.2.6	仿真模型标记语言	97
3.3	模型转换	98
3.3.1	模型转换概念	99
3.3.2	模型转换框架	99
3.3.3	UML 模型向 XML 模型映射	101
3.3.4	XML DTD 模型到 UML 类图模型的映射	104
3.3.5	XML 模型的转换	115
3.4	模型框架	122

3.4.1	仿真模型的重用	122
3.4.2	基于 XML 的模型体系设计	123
3.4.3	仿真实体模型的生成	128
3.5	作战模型设计	128
3.5.1	作战任务模型	128
3.5.2	基于脚本机制的作战模型	128
3.5.3	基于使命(Mission)机制的作战模型	135
第4章	想定设计	142
4.1	想定概述	142
4.1.1	基本概念	142
4.1.2	想定的分类	143
4.1.3	想定的组成	143
4.1.4	仿真实想定的内容	146
4.1.5	仿真实想定的开发过程	148
4.1.6	仿真实想定编辑工具	150
4.1.7	想定开发和执行过程	151
4.2	仿真实想定的结构	153
4.2.1	想定基本信息	153
4.2.2	作战环境信息	153
4.2.3	作战编成信息	154
4.2.4	作战任务信息	155
4.3	仿真实想定的描述方法	155
4.3.1	文本语言描述方法	155
4.3.2	结构化模板描述方法	156
4.3.3	形式化抽象描述方法	157
4.3.4	基于 XML 的描述方法	157
4.4	军事想定定义语言(MSDL)	157
4.4.1	想定标记语言	158
4.4.2	MSDL 的发展	158
4.4.3	MSDL 的组成	159
4.4.4	MSDL 的应用	161
4.5	典型想定系统	163
4.5.1	想定辅助生成工具	163
4.5.2	想定集成开发环境	164
4.6	想定设计	166
4.6.1	仿真实想定的结构设计	166
4.6.2	仿真实想定的组成	168
4.6.3	想定生成	173

4.6.4	战术数据库	174
第5章	仿真引擎	178
5.1	离散事件系统	178
5.1.1	离散事件系统	178
5.1.2	离散事件系统模型	179
5.1.3	离散事件仿真模型的部件与结构	180
5.1.4	离散事件仿真的时间推进机制	181
5.2	并行离散事件仿真	182
5.2.1	并行仿真	182
5.2.2	并行离散事件仿真模型	183
5.2.3	时间同步机制	184
5.2.4	基于 GALT 的时间同步机制	185
5.2.5	负载平衡	186
5.3	仿真引擎	186
5.3.1	仿真引擎模型	186
5.3.2	并行离散事件仿真平台	188
5.3.3	标准仿真体系结构(SSA)	190
5.3.4	并行仿真系统建模方法	191
5.3.5	仿真引擎的数据交互	191
5.4	HLA 仿真引擎	192
5.4.1	HLA 仿真引擎的结构	192
5.4.2	HLA 仿真引擎的功能	194
5.5	VR - Forces 仿真引擎	196
5.5.1	VR - Forces 仿真系统结构	196
5.5.2	VR - Forces 类层次结构	196
5.5.3	VR - Forces 类工厂机制	197
5.5.4	VR - Forces API	197
5.5.5	VR - Forces 数据交互	198
5.6	STAGE 仿真引擎	198
5.6.1	仿真引擎的组成	198
5.6.2	仿真引擎的扩展	199
5.6.3	仿真引擎输出模型	202
第6章	数据记录器设计	207
6.1	记录内容及分类	208
6.1.1	DIS 记录数据	208
6.1.2	HLA 记录数据	209
6.2	数据记录	209

6.2.1	DIS 数据记录	209
6.2.2	HLA 数据记录	210
6.3	数据存储	214
6.3.1	数据记录格式	214
6.3.2	数据记录的内容	214
6.3.3	数据存储形式	215
6.3.4	HLA 数据存储	215
6.4	数据回放	215
6.4.1	回放要求	215
6.4.2	回放方式	215
6.4.3	DIS 回放	216
6.4.4	HLA 数据回放	217
6.5	数据记录器设计	218
6.5.1	HLA 记录器的实现	218
6.5.2	STAGE 中数据记录器的实现	220
第 7 章	态势显示系统	223
7.1	地理信息系统	223
7.1.1	基本概念	224
7.1.2	地理信息系统的分类	224
7.1.3	典型地理信息系统	225
7.1.4	MapX 空间数据结构和模型结构	227
7.1.5	MapX 的功能	229
7.1.6	MapInfo Professional	230
7.2	战场态势	232
7.2.1	战场态势的定义	232
7.2.2	态势图数据模型	232
7.2.3	战场态势的组织	233
7.2.4	COP 系统设计	233
7.3	战场态势显示系统功能	234
7.3.1	地图接口	234
7.3.2	GIS 地图管理	234
7.3.3	战场态势显示系统功能	234
7.4	军标标绘	236
7.4.1	军标	236
7.4.2	军标的标绘	237
7.5	三维场景显示	238
7.5.1	三维显示关键技术	238
7.5.2	OpenSceneGraph	239

7.5.3	三维引擎	241
7.5.4	三维地图	242
7.5.5	典型三维战场可视化系统	242
第 8 章	分布式仿真设计	243
8.1	分布式网络通信	243
8.1.1	实现网络通信的主要技术	243
8.1.2	Socket 通信机制	244
8.2	HLA/RTI	246
8.2.1	HLA 标准	246
8.2.2	RTI 软件组成	247
8.2.3	RTI 工作模式	248
8.3	消息中间件	249
8.3.1	数据分发模型	249
8.3.2	CORBA 机制	251
8.3.3	发布/订阅机制	254
8.4	OMG DDS 规范	256
8.4.1	DDS 规范	256
8.4.2	DCPS 模型	257
8.4.3	服务质量 QoS	261
8.4.4	通知机制	264
8.4.5	OpenDDS 的实现	265
8.5	面向服务架构(SOA)	267
8.5.1	面向服务架构(SOA)	267
8.5.2	Web 服务技术	269
8.5.3	仿真引擎的 Web 服务封装	271
8.5.4	Web 服务描述模型	272
参考文献		274

第1章 概述

人类在科学和工程技术上所做的研究就是努力理解真实世界，并能掌握与真实世界发生联系的形式。随着科学和工程技术的发展，人们认识自然和改造自然的能力和手段也不断增强。回顾科学和工程技术的发展历史，在计算机出现之前，科学研究中的绝大部分工作是利用数学手段或其他方法对事物或真实世界进行描述，这也就是建模活动。计算机的出现对科学和工程技术的发展产生了深远的影响，使人们能对复杂事物和复杂系统建立模型并利用计算机进行求解，这些手段和方法逐步形成了计算机仿真技术。建模与仿真成为当今现代科学技术研究的主要内容，建模与仿真技术也渗透到各学科和工程技术领域。随着仿真技术的发展，仿真技术应用领域已从传统的工程领域扩展到非工程领域。仿真法逐渐成为人类除解析法和实验法之外，认识世界的第三种方法。仿真技术在各领域的广泛运用也促进了仿真科学理论的完善，形成了仿真建模、仿真系统和仿真应用三个层次的理论体系，为仿真技术的进一步发展提供理论支撑和前沿探索。

军事仿真是从武器装备仿真发展起来的一个研究领域，泛指与军事有关的所有仿真技术、仿真系统或仿真方法。军事建模与仿真通过应用计算机及模型技术，对军事问题进行研究和分析，建立系统、过程、现象和环境模型，并在一段时间内运行模型，用于分析、测试人员训练和决策支持的过程，以揭示军事活动的基本规律。军事仿真技术能够形象地按照问题的需要描述战争过程，描述武器系统、人员、战术、技术和指挥等在一场假想的“战争”中的作用和表现，帮助人们思考可能发生的情况和应该采取的对策，分析在各种状态下的仿真结果。因此，军事问题的建模与仿真(Modeling and Simulation, M&S)是军事科学研究的重要内容，是军事领域中使用最为广泛的一种研究手段，广泛应用于作战训练、战法研究、装备论证与发展规划。

军事仿真具有安全、经济、可控、可多次重复、无风险、不受气候条件和场地空间限制等优点，能够模拟在一定战略、战役、战术任务背景下未来可能的作战方向、作战对象和作战任务。利用军事仿真系统所构建的虚拟战场环境，既可以进行军事理论、军事战略战法和军事训练的研究，又可以进行武器平台到平台、体系到体系的多次反复对抗作业，从而论证武器平台及装备体系的作战效能和进行新武器系统的概念研究、先期技术演示等。尤其是在军事训练和演习方面，利用作战仿真系统进行军事训练和演习，无需动用大量人员和装备，能够避免实兵演习所造成的人员伤亡、武器损耗等问题，同时还可以反复进行多次演练并记录其全过程，便于事后的分析研究，节省了军费开支。

1.1 系统、模型与仿真

1.1.1 系统

系统一词最早见著于古希腊原子论创始人德谟克利特(公元前460年至公元前370年)的著作《世界大系统》一书。该书明确地论述了关于系统的含义：“任何事物都是在联系

中显现出来的，都是在系统中存在的，系统联系规定每一事物，而每一联系又能反映系统的联系的总貌”。G. 戈登在其所著的《系统仿真》一书中，在总结前人思想的基础上，将系统定义为“按照某些规律结合起来、互相作用、互相依存的所有实体的集合或总和”。

实际系统是所关注的现实世界的某个部分，它具有独立行为规律，是相互联系又相互作用的对象的有机组合。实际系统可能是自然的或人工的、现在存在的或是未来所计划的。实际系统不是孤立存在的，任何一个系统都将由于系统之外出现的变化而受影响。这种对系统活动产生影响的外界因素称为系统的环境。在定义一个系统时，应考虑系统所处的环境，并首先应划分系统与其所处环境之间的边界，系统边界包围系统中的所有实体。系统边界的划分在很大程度上取决于系统研究的目的，边界确定了系统的范围，边界以外对系统的作用称为系统的输入，系统对边界以外的环境的作用称为系统的输出。

对于一个系统来说都包括三个要素：实体、属性和活动。实体是指构成系统的具体对象，系统中的实体既具有一定的相对独立性，又相互联系构成一个整体。实体确定了系统的构成，也就确定了系统的边界。属性(也称为描述变量)是指对实体特征的描述，用特征参数或变量表示。活动是实体在一段时间内持续进行的操作或过程，活动定义了系统内部实体之间的相互作用，从而确定了系统内部发生变化的过程。

1.1.2 模型

构造一个真实系统的模型，在模型上进行实验是进行系统分析和研究的有效手段。为了达到系统研究的目的，系统模型用来收集系统有关信息和描述系统有关实体。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描述信息。

模型通常分为三大类：第一类是物理模型，就是对现实世界某个对象的一种物理描述，通常采用一定比例尺按照真实样子制作，沙盘模型就是物理模型的典型例子；第二类是数学模型，就是用数学表达式形式来描述系统的内在规律，由算法和数学方程组成，它通常是用模型的形式描述，如导弹飞行的空气动力学数学方程。

由于“物理模型”和“数学模型”不足以完成对世界的抽象和认识，因此需要增加第三类模型，有的描述为“模型的非形式描述”，有的描述为“概念模型”，有的描述为“过程模型”——用数据的或逻辑的方法对某种动态关系的一种表示，是一种与时间相关的模型。事实上，为描述“物理模型”和“数学模型”之外的模型，往往难于定义归纳。

模型的非形式描述，说明了模型的本质但不是细节，它帮助建模者随着对模型的深入研究，能保持对模型的完整形态有清晰的认识。非形式描述帮助用户和同行抓住模型的基本轮廓，并能想象模型在概念框架中如何进行工作。因此模型的非形式描述是与读者直观建立联系的最自然而有效的方法，也是模型与其他的世界联系的自然而有效的方法。模型的非形式化描述主要由模型的实体、包括参变量的描述变量、实体间的相互关系及有必要阐述的假设等组成。

系统模型只是系统某一方面本质的描述，本质属性的选取完全取决于研究的目的，对于同一个仿真对象而言，根据不同的研究目的，可以建立不同的模型。

1.1.3 仿真

系统仿真是建立在控制理论、相似原理、信息技术和计算技术等理论基础之上的，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的或者假想的系统进行实验，并借助于专家经验知识、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性的和实验性的科学。

仿真技术已经成为分析和研究各种系统，尤其是复杂系统的重要工具，它不仅应用于工程领域，还广泛应用于非工程领域。计算机仿真技术有着巨大的优越性，利用它可以求解许多复杂而无法用数学手段解析求解的问题，利用它可以预演或再现系统的运动规律或运动过程，利用它可以对无法直接进行实验的系统进行仿真实验研究，从而节省大量的资源和费用。

综上所述，“系统、模型、仿真”三者之间有着密切的关系。系统是研究的对象，模型是系统的抽象，仿真则是通过对模型的实验以达到研究系统的目的。

需要指出的是，模拟与仿真是当前研究领域内容易模糊的概念。模拟是对真实事物或过程的虚拟。仿真是利用模型复现选定的物理或抽象系统关键特性的过程，是一种重现系统外在表现的特殊模拟。目前二者的界限已经日趋模糊。书中出现的“模拟”与“仿真”并不代表特定含义，往往是习惯使然，模拟与仿真领域的两个核心概念是“模型”和“建模”。

1.1.4 系统仿真的要素和活动

建模与仿真是指构造实际系统的模型和在计算机上进行仿真的有关复杂活动，系统仿真有三个基本的活动，即系统建模(概念建模)、仿真建模和仿真实验，联系这三个活动的是系统仿真的三要素，即系统、模型(概念模型)和计算机(包括硬件和软件)。同时考虑三个基本部分之间的关系，即建模关系和仿真关系，如图 1-1 所示。



图 1-1 计算机仿真三要素及三个基本活动

建模关系主要研究实际系统与模型之间的关系，它通过对实际系统的观测和检测，在忽略次要因素及不可检测变量的基础上，获得实际系统的简化近似模型。仿真关系主要研究计算机的程序实现与模型之间的关系，其程序能为计算机所接受并在计算机上运行。

仿真建模实际上包含系统仿真中的“系统建模”和“仿真建模”两部分工作。传统上，“系统建模”这一活动属于系统辨识技术范畴，得到的是系统模型；仿真技术则侧重于“仿真建模”，即针对不同形式的系统模型研究其求解算法，使其在计算机上得以实现。至于“仿真实验”这一活动，也往往只注重“仿真程序”的检验，至于如何将仿真实验的结果与实际系统的行为进行比较这一根本性的问题，缺乏从方法学的高度进行研究。

1.1.5 仿真的基本概念框架

1984 年，Or n 提出“仿真是一种基于模型的活动”的概念，并给出了仿真的基本概念框架，主要包括三个方面的内容：仿真问题的描述（模型设计）、行为产生器（模型执行）和模型行为及其处理（模型分析）。图 1-2 表示了以上三个方面的具体内容及相互关系。

1. 仿真问题的描述

任何一个仿真问题都是由模型与实验两部分组成。在仿真建模方面，任何一个模型，不论采用什么样的建模方法，都由两部分组成：一个参数模型及一组参数，而参数值属于实验框架的内容。这样，模型参数与其对应的参数模型分开。仿真实验时，只需对参数模型赋予具体参数值，就形成了一个特定的模型，从而大大提高了仿真的灵活性和运行效率。

在仿真实验方面，实验也可分为两部分：实验框架及仿真运行控制。一个实验框架可以定义为一组条件，在该条件下，系统可被观测或被进行实验。具体地来讲，实验框架可由五个部分组成：输入变量、观测变量、初始条件、终止条件、输出（数据的采集及压缩）的具体说明。与传统仿真的区别在于：将输出函数的定义也与仿真模型分开。这样，当需要不同形式的输出时，不必重新修改仿真模型，甚至不必重新仿真运行。

2. 行为产生器

行为产生器是一套对模型进行实验的软件，比如连续系统仿真中的仿真计算程序。由它可以产生一组随时间变化的系统状态变量的数据（称为模型行为）。

3. 模型行为及其处理

模型行为有三种类型：点行为、轨迹行为及结构行为。在各种类型的仿真中可以获得轨迹行为，它通常被表示为一组系统中各种描述变量随时间推移而变化的数据。结构行为只可以从可变结构系统模型中获得，即这种系统模型的静态结构（指定义描述变量及其属性）及动态结构（指状态变量之间的动态关系）是可变的。点行为则是指模型行为的一种特定属性，如最小值、最大值等。一般来讲，常规的仿真软件并不产生点行为，它是对数据进行压缩后才能产生出来的。所谓对数据的压缩是指将某个描述变量的轨迹行为转变为更浓缩的形式。一般可分成统计数据压缩及解析数据压缩两种，前者是将轨迹行为转变为几个点行为，如最小值、最大值、取值范围、标准差等，后者则是将轨迹行为转变为曲线或某种解析形式。行为处理包括对行为进行分析及显示。

1.1.6 仿真的一般步骤

仿真本质上是一种知识处理的过程，典型的系统仿真过程包括系统模型建立、仿真模型建立、仿真程序设计、模型确认、仿真实验和数据分析处理等。

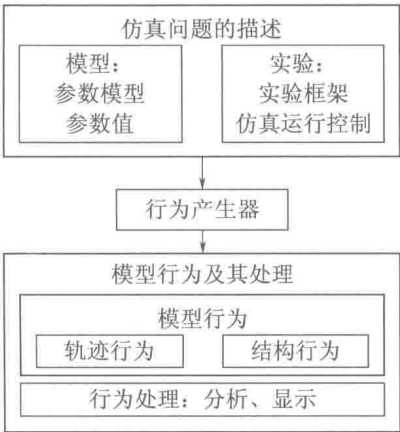


图 1-2 仿真的基本概念框架

系统仿真的一般步骤可用图 1-3 来描述。

(1) 系统建模。仿真是基于模型的活动，首先要对实际系统建立其模型。建模与形式化的任务是：根据研究和分析的目的，确定模型的边界，因为任何一个模型都只能反映实际系统的某一部分或某一方面，也就是说，一个模型只是实际系统的有限映象。另一方面，为了使模型具有可信性，必须具备对系统的先验知识及必要的实验数据。特别是，还必须对模型进行形式化处理，以得到计算机仿真所要求的数学描述。模型可信性检验是建模阶段的最后一步，也是必不可少的一步。只有可信的模型才能作为仿真的基础。

(2) 仿真建模。其主要任务是：根据系统的特点和仿真的要求选择合适的算法，当采用该算法建立仿真模型时，其计算的稳定性、计时精度、计算速度应能满足仿真的需要。

(3) 程序设计。即将仿真模型用计算机能执行的程序来描述。程序中还要包括仿真实验的要求，如仿真运行参数、控制参数、输出要求等。早期的仿真往往采用高级语言编程，随着仿真技术的发展，一大批适用不同需要的仿真语言被研制出来，大大减轻了程序设计的工作量。

(4) 模型确认。程序检验一般是不可缺少的。一方面是程序调试，更重要的是要检验所选仿真算法的合理性。

(5) 仿真实验。有了正确的仿真模型，就可以对模型进行实验，这是实实在在的仿真活动。它根据仿真的目的对模型进行多方面的实验，相应地得到模型的输出。

(6) 结果分析。以往，输出分析的方法学没有能够引起人们的足够重视。实际上，输出分析在仿真活动中占有十分重要的地位，特别是对离散事件系统来说，其输出分析甚至决定着仿真的有效性。输出分析既是对模型数据的处理(以便对系统性能作出评价)，同时也是对模型的可信性进行检验。

在实际的仿真时，上述每一个步骤往往需要多次反复和迭代。

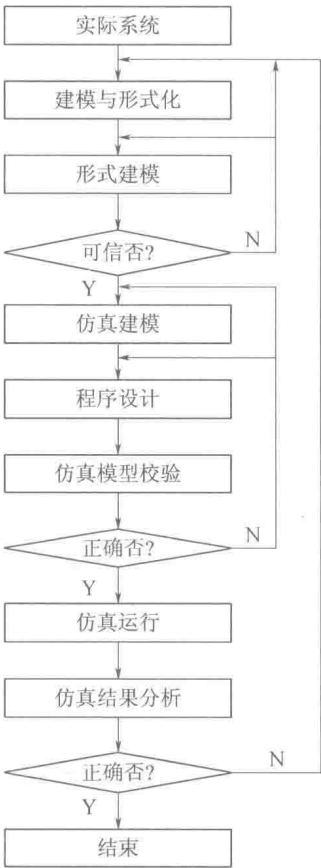


图 1-3 仿真的一般步骤

1.2 仿真系统的分类

可以从不同的角度对系统仿真加以分类。比较典型的分类方法是：根据模型的种类分类；根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类；根据系统模型的特性分类。

1.2.1 根据模型的种类分类

根据模型的种类不同，系统仿真可以分为三种：物理仿真、数学仿真和半实物仿真。

1. 物理仿真

按照真实系统的物理性质构造系统的物理模型，并在物理模型上进行实验的过程称为物理仿真。物理仿真的优点是直观、形象。在计算机问世以前，基本上是物理仿真，