

# 雷达系统建模 与仿真导论

盛文 焦晓丽 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 雷达系统建模与仿真导论

盛文 焦晓丽 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书全面系统地介绍了系统建模与仿真的基本理论与方法,对系统建模与仿真的概念、连续系统仿真及方法、离散事件系统仿真及方法等方面作了全面的论述。结合雷达系统仿真应用,给出了雷达系统模型、目标特性数学模型及回波信号模型及分析。本书理论性和系统性强,具有很强的实际应用背景,是一本开展有关雷达系统建模与仿真方面理论研究和实际应用的教学和科研参考书。

本书可作为高等院校雷达、通信、电子技术及计算机等专业的研究生教材,也可供相关专业的科技工作者开展课题研究阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

雷达系统建模与仿真导论 / 盛文, 焦晓丽编著. — 北京: 国防工业出版社, 2006.1

ISBN 7-118-04181-5

I. 雷 ... II. ①盛 ... ②焦 ... III. ①雷达—系统建模  
②雷达—系统仿真 IV. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 112454 号

国防工业出版社出版

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 15½ 354 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 32.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422 发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535 发行业务: (010)68472764

# 前 言

20 世纪 80 年代以来,随着计算机技术的飞速发展,利用计算机进行建模、仿真与评估已在科学研究和工程实践领域得到了非常广泛的应用。通过数学建模与仿真方法的研究,可对现实对象和设计对象的本质特性进行全面分析,从而大大减少实物仿真费用,降低仿真风险,其获得的技术效果和经济效益是难以估量的。

在国防领域,计算机仿真技术已成为军事装备论证、发展、仿真实验和效能评估的一种重要手段。对于雷达等大型电子装备而言,由于实验手段的缺乏和测试上存在的困难,许多重要的技术参数只能靠“检飞”之类的手段进行估计,花费大而效率低,获得的数据也不全面,而通过仿真技术可在很大程度上解决这个问题。

系统建模与仿真传统上是机械及自动控制类专业的课程,通信及电子类专业的学生一般缺乏系统的理论课学习。在实际工作中,他们往往遇到系统建模与仿真方面的问题需要解决,但缺乏一本内容系统、全面的参考书指导。针对这种情况,本书系统地介绍了连续系统和离散系统建模与仿真的理论和方法,并给出了雷达系统常用的数学模型,为开展这方面学习和研究的人员提供理论指导。

本书主要讨论的是雷达系统建模与仿真的基本理论与方法。全书共 6 章,前 5 章从基本概念、基本理论和基本方法三个方面出发,较为系统地介绍了系统建模与仿真这个研究领域涉及的理论与应用问题,最后一章给出了雷达系统的一些基本仿真模型。从总体结构上来看,全书可分为四个部分。

第一部分(第 1, 2, 3 章)对系统建模与仿真的基本概念、仿真类型、仿真步骤及其应用发展作了较为详细的介绍。在对仿真所需的基本概率统计知识进行了简单回顾后,较为系统地介绍了随机变量模型确定及检验方法及随机数及随机变量的产生方法,并给出了不同数学模型之间的转换方法。特别地,在第 3 章中介绍了 Monte Carlo 仿真方法。

第二部分(第 4 章)系统地介绍了连续系统的仿真方法,对数值积分法和离散相似法的基本原理、实现方法及工程实践中涉及的积分步长选择、状态转移矩阵计算等问题进行了详细的论述,并给出了快速仿真和实时仿真算法。

第三部分(第 5 章)详细地介绍了离散事件系统的建模与仿真方法,对实体流图法、活动周期图法的运用给出了详细的示例,并对 PETTI 网和 EULER 网方法作了简单介绍,并给出了离散事件系统的仿真方法。

第四部分(第 6 章)介绍了雷达系统常用的数学模型。这些模型包括雷达目标特性、雷达天线性能、雷达回波、雷达接收机和雷达目标检测模型等,并可直接作为雷达系统建模与仿真的原型使用。结合前面几个部分介绍的知识,可有针对性地对雷达系统整体性能及各个方面进行仿真分析。

本书可作为雷达、通信、电子技术及计算机等专业的研究生教材,也可供相关专业的科技工作者开展课题研究阅读参考。

在本书的编写过程中，得到了闫世强教授的许多指导和帮助，同时教研室焦晓丽同志为本书收集了大量的参考资料，并对全文进行了整理。另外，揭莉莉老师负责了本书所有内容的文字校对以及公式、图表的输入和整理工作，在此向他们表示衷心的感谢。

由于本书内容涉及面较广，很多问题有待进一步深入研究，加上编者本人水平有限，书中错误和不当之处，恳请读者批评指正。

作者

2005年8月

# 目 录

第 1 章 概述 .....	1
1.1 基本概念 .....	1
1.1.1 系统 .....	1
1.1.2 模型 .....	2
1.1.3 仿真 .....	4
1.2 系统仿真的类型 .....	5
1.2.1 根据模型的种类分类 .....	5
1.2.2 根据仿真计算机类型分类 .....	6
1.2.3 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类 .....	6
1.3 系统仿真的一般步骤 .....	7
1.4 仿真技术的应用 .....	8
1.4.1 仿真技术在系统设计中的应用 .....	9
1.4.2 仿真技术在系统分析中的应用 .....	9
1.4.3 仿真在教育与训练中的应用 .....	10
1.4.4 仿真在产品开发及制造过程中的应用 .....	10
1.4.5 仿真技术在 CIMS 中的应用 .....	12
1.5 仿真技术的发展 .....	13
第 2 章 概率统计基础 .....	17
2.1 概率统计基本概念 .....	17
2.1.1 确定事件和随机事件 .....	17
2.1.2 随机变量与概率 .....	17
2.1.3 概率分布 .....	18
2.1.4 连续型随机变量的分布密度函数 .....	18
2.1.5 随机变量的数字特征 .....	18
2.1.6 总体、个体、抽样及样本量 .....	19
2.2 离散事件系统仿真中常用的概率分布形式 .....	19
2.2.1 离散分布 .....	19
2.2.2 连续分布 .....	20
2.3 随机变量模型的确定 .....	26
2.3.1 分布类型假设 .....	26

2.3.2	分布参数估计	29
2.3.3	分布假设检验	31
2.4	随机数的产生	40
2.4.1	伪随机数	41
2.4.2	伪随机数产生方法	42
2.4.3	伪随机数序列的检验和确认	46
2.5	随机变量的产生	52
2.5.1	常用的随机变量产生方法	53
2.5.2	常用分布的随机变量产生	59
<b>第3章</b>	<b>数学模型及其转换</b>	<b>64</b>
3.1	系统模型的描述	64
3.2	常用数学模型	67
3.2.1	连续系统	67
3.2.2	离散系统	69
3.3	数学模型之间的转换	70
3.3.1	化连续状态方程为离散状态方程	70
3.3.2	化离散状态方程为连续状态方程	72
3.3.3	化微分方程为状态方程	75
3.3.4	化状态方程为传递函数	78
3.3.5	化传递函数为状态方程	80
3.3.6	化线性结构图为状态方程	83
3.3.7	化非线性结构图为状态方程	85
3.3.8	化线性结构图为传递函数	85
3.3.9	化传递函数为 $z$ 函数	87
3.3.10	化 $z$ 函数为传递函数	88
3.4	蒙特卡罗仿真	89
3.4.1	一般原理	89
3.4.2	概率收敛性	92
3.4.3	误差	92
3.4.4	特点	93
3.4.5	积分计算	93
3.4.6	蒙特卡罗仿真与常规数学仿真的比较	102
<b>第4章</b>	<b>连续系统仿真方法</b>	<b>104</b>
4.1	数值积分法	105
4.1.1	龙格-库塔法(R-K法)	105
4.1.2	亚当姆斯法	108

4.1.3	稳定性分析	110
4.1.4	积分步长的选择与控制	111
4.2	离散相似法	113
4.2.1	离散相似法的基本原理	113
4.2.2	Z域离散相似模型及其校正	117
4.2.3	状态转移矩阵 $e^{AT}$ 的计算	123
4.2.4	用离散相似法进行线性系统仿真	125
4.2.5	增广矩阵法	126
4.3	快速仿真与实时仿真	129
4.3.1	问题的提出	129
4.3.2	快速数字仿真算法	129
4.3.3	实时仿真算法	141
<b>第 5 章</b>	<b>离散事件系统建模与仿真方法</b>	<b>143</b>
5.1	基本建模术语	143
5.2	实体流图法	145
5.2.1	实体流程图	145
5.2.2	模型的人工运行	149
5.3	活动周期图法	151
5.3.1	活动周期图	151
5.3.2	模型的人工运行与规则	159
5.4	Petri 网方法	161
5.4.1	Petri 网的定义及其图示方法	162
5.4.2	网系统	163
5.4.3	Petri 网特性分布	166
5.4.4	小结	170
5.5	Euler 网方法	170
5.5.1	Euler 图与奇异 Euler 图	170
5.5.2	Euler 网	172
5.5.3	初级 Euler 网系统	173
5.5.4	高级 Euler 网系统	177
5.6	仿真策略	183
5.6.1	事件调度法	183
5.6.2	活动扫描法	184
5.6.3	三段扫描法	185
5.6.4	进程交互法	186
<b>第 6 章</b>	<b>雷达系统仿真数学模型</b>	<b>189</b>
6.1	概述	189



6.1.1	雷达系统基本概念 .....	189
6.1.2	雷达系统主要技术战术参数 .....	191
6.1.3	仿真数学模型 .....	192
6.2	目标特性数学模型 .....	192
6.2.1	目标雷达截面数学模型 .....	192
6.2.2	目标幅度起伏数学模型 .....	200
6.2.3	目标角闪烁数学模型 .....	202
6.3	雷达天线仿真数学模型 .....	205
6.3.1	普通雷达天线 .....	205
6.3.2	相控阵雷达天线 .....	213
6.4	雷达系统功能仿真主要数学模型 .....	230
6.4.1	雷达回波仿真数学模型 .....	230
6.4.2	接收机噪声仿真数学模型 .....	231
6.4.3	综合信干比 .....	231
6.4.4	雷达抗遮盖性干扰改善因子数学模型 .....	232
6.4.5	雷达目标检测和确认仿真模型 .....	238
参考文献 .....		239

# 第 1 章 概 述

随着人们认识自然和改造自然的能力和手段的不断增强,作为实践经验总结的科学和技术水平也有了迅猛的发展。从开普勒的行星运动三大定律,到牛顿的万有引力定律,再到爱因斯坦的相对论,利用数学手段对事物描述的理论越来越完善,而且研究的范围也越来越广。长期以来,人们已经充分认识到利用数学模型去描述所研究系统的优越性,并且逐渐地发展了系统研究和系统分析理论。但是,由于数学手段的限制,人们对复杂事物和复杂系统建立数学模型并进行求解的能力是非常有限的。电子计算机的出现,对科学技术的发展产生了无可估量和深远的影响。许多复杂的数学模型可以通过计算机来进行计算求解。由此,利用数学模型描述系统的特征并进行求解的手段逐步发展成为现代的计算机仿真技术。

仿真技术已经成为分析、研究各种系统,尤其是复杂系统的重要工具,它不仅用于工程领域,如机械、航空、航天、电力、冶金、化工、电子等方面,还广泛用于非工程领域,如交通管理、生产调度、库存控制、生态环境以及社会经济等方面。

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试验的系统进行仿真试验研究,从而节省大量的能源和费用。由于计算机仿真技术的优越性,它的应用领域已经非常广泛,而且也越来越受到普遍的重视。

## 1.1 基本概念

从一般意义上讲,系统仿真可以被理解为在对一个已经存在或尚不存在但正在开发的系统进行研究的过程中,为了了解系统的内在特性,必须进行一定的实验;而由于系统不存在或其他一些原因,无法在原系统上直接进行实验,只能设法构造既能反映系统特征又能符合系统实验要求的系统模型,并在该系统模型上进行实验,以达到了解或设计系统的目的。针对系统模型开展的实验活动称为仿真。由此可以看出,系统仿真本质上是由三个要素构成的,即系统、模型和仿真。系统是问题的本源,是系统分析的目的,仿真是解决问题达到目的的手段,而系统模型则是连接系统和仿真(目的和手段)之间的桥梁。

显然,系统仿真是一项社会实践活动。凡是包含系统、系统模型和系统仿真实验三个要素的活动都可以广义地理解为系统仿真活动。

### 1.1.1 系统

正如 G. 戈登(Gordon)在其所著的《系统仿真》一书中所说:“系统这个术语已经在

各个领域用得如此广泛，以致很难给它下一个定义。”系统这一词最早见著古希腊原子论创始人德谟克利特(公元前 460 年—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。”戈登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”。

根据这个定义，我们可以将一个理发馆定义为一个系统。该系统中的实体有服务员和顾客。顾客按某种规律到达，服务员根据顾客的要求，按一定的程序为其服务，服务完毕后顾客离去。在该系统中，顾客和服务员互相作用，顾客到达模式影响着服务员的工作忙闲状态和理发馆的排队状态，而服务员的多少和服务效率也影响着顾客接受服务的质量。我们也可以把实现电动机调速的各个实体定义为一个系统，称之为电动机调速系统。该系统包括电动机、测速元件、比较元件以及控制器等，它们相互作用以实现按给定要求调节电动机的速度。

在定义一个系统时，首先要确定系统的边界。尽管世界上的事物是相互联系的，但当我们研究某一对象时，总是要将该对象与其环境区别开来。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。

尽管世界上的系统千差万别，但人们总结出描述系统“三要素”，即实体、属性、活动。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，描述每一实体的特征；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

为了研究、分析、设计和实现一个系统，需要进行试验。试验的方法基本上可分为两种：一种是直接在真实系统上进行，另一种是先构造模型，通过对模型的试验来代替或部分代替对真实系统的试验。传统上大多采用第一种方法，随着科学技术的发展，尽管第一种方法在某些情况下仍然是必不可少的，但第二种方法日益成为人们更为常用的方法，主要原因在于：

(1) 系统还处于设计阶段，真实的系统尚未建立，人们需要更准确地了解未来系统的性能，这只能通过对模型的试验来了解；

(2) 在真实系统上进行试验可能会引起系统破坏或发生故障，例如，对一个处于运行状态的化工系统或电力系统进行没有把握的试验将会冒巨大的风险；

(3) 需要进行多次试验时，难以保证每次试验的条件相同，因而无法准确判断试验结果的优劣；

(4) 试验时间太长或费用昂贵。

因此，在模型上进行试验日益为人们所青睐，建模技术也就随之发展起来。模型可分为两大类，一类是物理模型，就是采用一定比例尺按照真实系统的“样子”制作，沙盘模型就是物理模型的典型例子；另一类是数学模型，就是用数学表达式形式来描述系统的内在规律。

一个系统可以定义为如下集合结构：

$$S = (T, X, \Omega, Q, Y, \delta, \lambda)$$

式中  $T$ ——时间基, 描述系统变化的时间坐标,  $T$  为整数则称为离散时间系统,  $T$  为实数则称为连续时间系统。

$X$ ——输入集, 代表外部环境对系统的作用。通常  $X$  被定义为  $R^n$ , 其中  $n \in I^+$ , 即  $X$  代表  $n$  个实值的输入变量。

$\Omega$ ——输入段集, 描述某个时间间隔内输入模式, 是  $(X, T)$  的一个子集。

$Q$ ——内部状态集, 是系统内部结构建模的核心。

$Y$ ——输出集, 系统通过它作用于环境。

$\delta$ ——状态转移函数, 定义系统内部状态是如何变化的。它是一个映射:  $\delta: Q \times \Omega \rightarrow Q$ , 其含义是: 若系统在  $t_0$  时刻处于状态  $q$ , 并施加一个输入段  $\omega: (t_0, t_1) \rightarrow X$ , 则  $\delta(q, \omega)$  表示系统处于  $t_1$  状态。

$\lambda$ ——输出函数, 它是映射:  $\lambda: Q \times X \times T \rightarrow Y$ 。输出函数给出了一个输出段集。

上面给出了系统模型的一般描述。在实际建模时, 要求不同, 模型描述的详细程度也不尽相同, 亦称为表示的水平不同, 具体地有:

(1) 行为水平 亦称为输入输出水平, 该水平的模型将系统视为一个“黑盒”, 在输入信号的作用下, 只对系统的输出进行测量。

(2) 分解结构水平 将系统看成若干个“黑盒”连接起来, 定义每个“黑盒”的输入与输出, 以及它们相互之间的连接关系。

(3) 状态结构水平 不仅定义了系统的输入与输出, 而且还定义了系统内部的状态集及状态转移函数。

上面我们从系统的定义出发给出了集合结构的模型描述形式, 显然, 这种描述太一般化了, 难以在实际中加以采用。人们在长期的研究与应用中, 创造出了适用于不同对象研究分析要求的模型描述形式, Orën 进行了总结, 将模型形式加以分类如表 1.1 所列。

表 1.1 模型分类

模型描述变量的轨迹	模型的时间集合	模型形式	变量范围	
			连续	离散
空间连续变化模型 空间不连续变化模型	连续时间模型	偏微分方程	√	
		常微分方程	√	
离散(变化)模型	离散时间模型	差分方程	√	√
		有限状态机		√
		马尔可夫链		√
	连续时间模型	活动扫描	√	√
		事件调度	√	√
		进程交互	√	√

### 1.1.3 仿真

1961年, G.W.Morgenthater 首次对“仿真”进行了技术性定义, 即“仿真意指在实际系统尚不存在的情况下对于系统或活动本质的实现。另一个典型的对“仿真”进行技术性定义的是 Korn。他在 1978 年的著作《连续系统仿真》中将仿真定义为“用代表所研究的系统的模型作实验”。1982年, Spriet 进一步将仿真的内涵加以扩充, 定义为“所有支持模型建立与模型分析的活动即为仿真活动”。Orèn 在 1984 年在给出了仿真的基本概念框架“建模-实验-分析”的基础上, 提出了“仿真是一种基于模型的活动”的定义, 被认为是现代仿真技术的一个重要概念。实际上, 随着科学技术的进步, 特别是信息技术的迅速发展, “仿真”的技术含义不断地得以发展和完善, 从 A.Alan 和 B.Pritsker 撰写的“仿真定义汇编”一文我们可以清楚地观察到这种演变过程。无论哪种定义, 仿真基于模型这一基本观点是共同的。

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, 仿真是通过对模型的实验以达到研究系统的目的。

现代仿真技术均是在计算机支持下进行的, 因此, 系统仿真也称为计算机仿真。系统仿真有三个基本的活动, 即系统建模、仿真建模和仿真实验。这三个活动的是系统仿真的三要素, 即系统、模型、计算机(包括硬件和软件)。它们的关系可用图 1.1 描述。

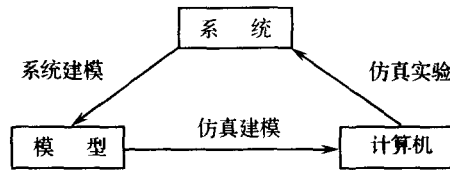


图 1.1 计算机仿真三要素及三个基本活动

传统上, “系统建模”这一活动属于系统辨识技术范畴, 仿真技术则侧重在“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(verification), 至于如何将仿真实验的结果与实际系统的行为进行验证(validation)这一根本性的问题缺乏从方法学的高度进行研究。

现代仿真技术的一个重要进展是将仿真活动扩展到上述三个方面, 并将其统一到同一环境中。在系统建模方面, 除了传统的基于物理学、化学、生物学、社会学等基本定律及系统辨识等方法外, 现代仿真技术提出了用仿真方法确定实际系统的模型。例如, 根据某一系统在试验中所获得的输入输出数据, 在计算机上进行仿真试验, 确定模型的结构和参数; 基于模型库的结构化建模, 采用面向对象建模(object-oriented modeling)方法, 在类库的基础上实现模型拼合与重用。

在仿真建模方面, 除了适应计算机软硬件环境的发展而不断研究和开发出许多新算法和新软件外, 现代仿真技术采用模型与实验分离技术, 即模型的数据驱动(data driven)。任何一个仿真问题可分为两部分: 模型与实验, 这一点, 现代仿真技术与传统

的仿真定义是一致的。其区别在于：现代仿真技术将模型又分为参数模型参数值两部分，参数值属于实验框架的内容之一。这样，模型参数与其对应的参数模型分离开来。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，现代仿真技术将实验框架与仿真运行控制区分开来。一个实验框架定义一组条件，包括模型参数、输入变量、观测变量、初始条件、终止条件、输出说明。前面已对模型参数进行了说明，除此之外，与传统仿真区别在于，将输出函数的定义也与仿真模型分离开来。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。

Orén 将上述思想加以总结，提出了现代仿真技术的概念框架(见图 1.2)。在这个框架中，“仿真问题描述”对应于图 1.1 中的“仿真建模”，其建模思想如前所述；“行为产生”对应于图 1.1 中的“仿真实验”，只是将仿真输出独立于行为产生；而“模型行为及其处理”相应于输出处理。

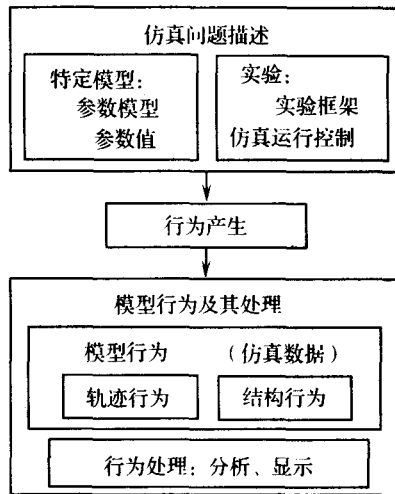


图 1.2 现代仿真的概念框架

## 1.2 系统仿真的类型

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；根据仿真所采用的计算机类型分类；根据仿真时钟与实时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，系统仿真可分为三种：物理仿真、数学仿真和半实物仿真。

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，基本上是人

理仿真，也称为“模拟”。物理仿真的缺点是：模型改变困难，实验限制多，投资较大。

对实际系统进行抽象，并将其特性用数学关系加以描述而得到系统的数学模型，对数学模型进行实验的过程称为数学仿真。计算机技术的发展为数学仿真创造了环境，使得数学仿真变得方便、灵活、经济，因而数学仿真亦称为计算机仿真。数学仿真的缺点是受限于系统建模技术，即系统的数学模型不易建立。

第三类称为半实物仿真，即将数学模型与物理模型甚至实物联合起来进行实验。对系统中比较简单的部分或对其规律比较清楚的部分建立数学模型，并在计算机上加以实现；而对比较复杂的部分或对规律尚不十分清楚的系统，其数学模型的建立比较困难，则采用物理模型或实物。仿真时将两者连接起来完成整个系统的实验。

### 1.2.2 根据仿真计算机类型分类

仿真技术是伴随着计算机技术的发展而发展的。在计算机问世之前，基于物理模型的实验一般称为“模拟”，它一般附属于其他相关学科。自从计算机特别是数字计算机出现以后，其高速计算能力和巨大的存储能力使得复杂的数值计算成为可能，数字仿真技术得到蓬勃的发展，从而使仿真形成为一门专门学科——系统仿真学科。

按所使用的仿真计算机类型也可将仿真分为三类：模拟计算机仿真、数字计算机仿真和数字模拟混合仿真。

模拟计算机本质上是一种通用的电气装置，这是20世纪50年代~60年代普遍采用的仿真设备。将系统数学模型在模拟机上加以实现并进行实验称为模拟机仿真。

数字计算机仿真是将系统数学模型用计算机程序加以实现，通过运行程序来得到数学模型的解，从而达到系统仿真的目的。

本质上，模拟机仿真是一种并行仿真，即仿真时，代表模型的各部件是并发执行的。早期的数字计算机仿真则是一种串行仿真，因为计算机只有一个中央处理器(CPU)，计算机指令只能逐条执行。为了发挥模拟计算机并行计算和数字计算机强大的存储记忆及控制功能，以实现大型复杂系统的高速仿真，20世纪60年代~70年代，在数字计算机技术还处于较低水平时，产生了数字模拟混合仿真，即将系统模型分为两部分，其中一部分放在模拟计算机上运行，另一部分放在数字计算机上运行，两个计算机之间利用模数和数模转换装置交换信息。

随着数字计算机技术的发展及其计算速度和并行处理能力的提高，模拟计算机仿真和数字模拟混合仿真已逐步被全数字仿真取代，因此，今天的计算机仿真一般指的就是数字计算机仿真。

### 1.2.3 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类

实际动态系统的时间基称为实际时钟，而系统仿真时模型所采用的时钟称为仿真时钟。根据仿真时钟与实际时钟的比例关系，系统仿真分类如下：

(1) 实时仿真，即仿真时钟与实际时钟完全一致，也就是模型仿真的速度与实际系统运行的速度相同。当被仿真的系统中存在物理模型或实物时，必须进行实时仿真，例

如各种训练仿真器就是这样，有时也称为在线仿真。

(2) 亚实时仿真，即仿真时钟慢于实际时钟，也就是模型仿真的速度慢于实际系统运行的速度。当对仿真速度要求不苛刻的情况下均是亚实时仿真，例如大多数系统离线研究与分析，有时也称为离线仿真。

(3) 超实时仿真，即仿真时钟快于实际时钟，也就是模型仿真的速度快于实际系统运行的速度。例如大气环流的仿真、交通系统的仿真等。

根据系统模型的特性分类：

仿真基于模型，模型的特性直接影响着仿真的实现。从仿真实现的角度来看，系统模型特性可分为两大类：一类称为连续系统，另一类称为离散事件系统。由于这两类系统固有运动规律的不同，因而描述其运动规律的模型形式就有很大的差别，相应地，系统仿真技术也分为两大类：连续系统仿真和离散事件系统仿真。

### 1. 连续系统仿真

连续系统是指系统状态随时间连续变化的系统。连续系统的模型按其数学描述可分为：

(1) 集中参数系统模型，一般用常微分方程(组)描述，如各种电路系统、机械动力学系统、生态系统等；

(2) 分布参数系统模型，一般用偏微分方程(组)描述，如各种物理和工程领域内的“场”问题。

需要说明的是，离散时间变化模型中的差分模型(见表 1.1)可归为连续系统仿真范畴。原因在于，当用数字仿真技术对连续系统仿真时，其原有的连续形式的模型必须进行离散化处理，并最终也变成差分模型。

### 2. 离散事件系统仿真

离散事件系统是指系统状态在某些随机时间点上发生离散变化的系统。它与连续系统的主要区别在于：状态变化发生在随机时间点上。这种引起状态变化的行为称为“事件”，因而这类系统是由事件驱动的；而且，“事件”往往发生在随机时间点上，亦称为随机事件，因而离散事件系统一般都具有随机特性；系统的状态变量往往是离散变化的。例如，电话交换台系统，顾客呼号状态可以用“到达”或“无到达”描述，交换台状态则要么处于“忙”状态，要么处于“闲”状态；系统的动态特性很难用人们所熟悉的数学方程形式(如微分方程或差分方程等)加以描述，而一般只能借助于活动图或流程图，这样，无法得到系统动态过程的解析表达。对这类系统的研究与分析的主要目标是系统行为的统计性能而不是行为的点轨迹。

## 1.3 系统仿真的一般步骤

系统仿真的一般步骤可用图 1.3 来描述。

正如前面所述，仿真是基于模型的活动，首先要针对实际系统建立其模型。建模与形式化的任务是：根据研究与分析的目的，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像。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试验数据。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。

仿真建模是仿真过程的第二步。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、计算精度、计算速度应能满足仿真的需要。

第三步是程序设计，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。

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。这是仿真过程的第四步。

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。这是第五步。

仿真过程的第六步是要对仿真输出进行分析。以往，输出分析的方法学未能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。

上面，我们仅仅对仿真过程的主要步骤进行了简要说明。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。

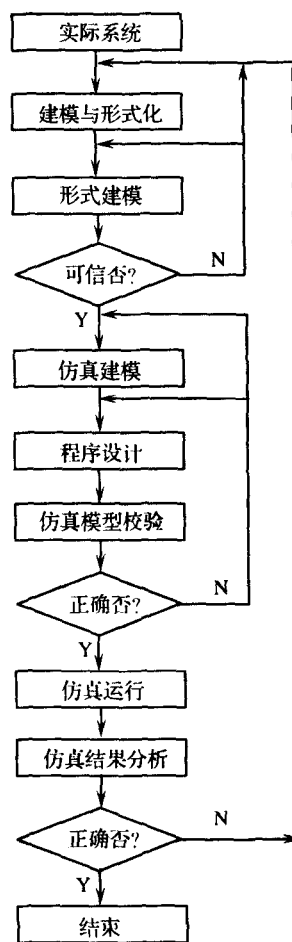


图 1.3 仿真的一般步骤

## 1.4 仿真技术的应用

仿真技术作为一门独立的学科已经有 50 多年的发展历史，它不仅用于航天、航空、各种武器系统的研制部门，而且已经广泛应用于电力、交通运输、通信、化工、核能各个领域。特别是，近 20 年来，随着系统工程与科学的迅速发展，仿真技术已从传统的工程领域扩展到非工程领域，因而在社会经济系统、环境生态系统、能源系统、生物医学系统、教育训练系统也得到了广泛的应用。仿真技术正是从其广泛的应用中获得了日益强大的生命力，而仿真技术的发展反过来使其得到愈来愈广泛的应用。

在系统的规划、设计、运行、分析及改造的各个阶段，仿真技术都可以发挥重要作用。随着人类所研究的对象规模日益庞大，结构日益复杂，仅仅依靠人的经验及传统技