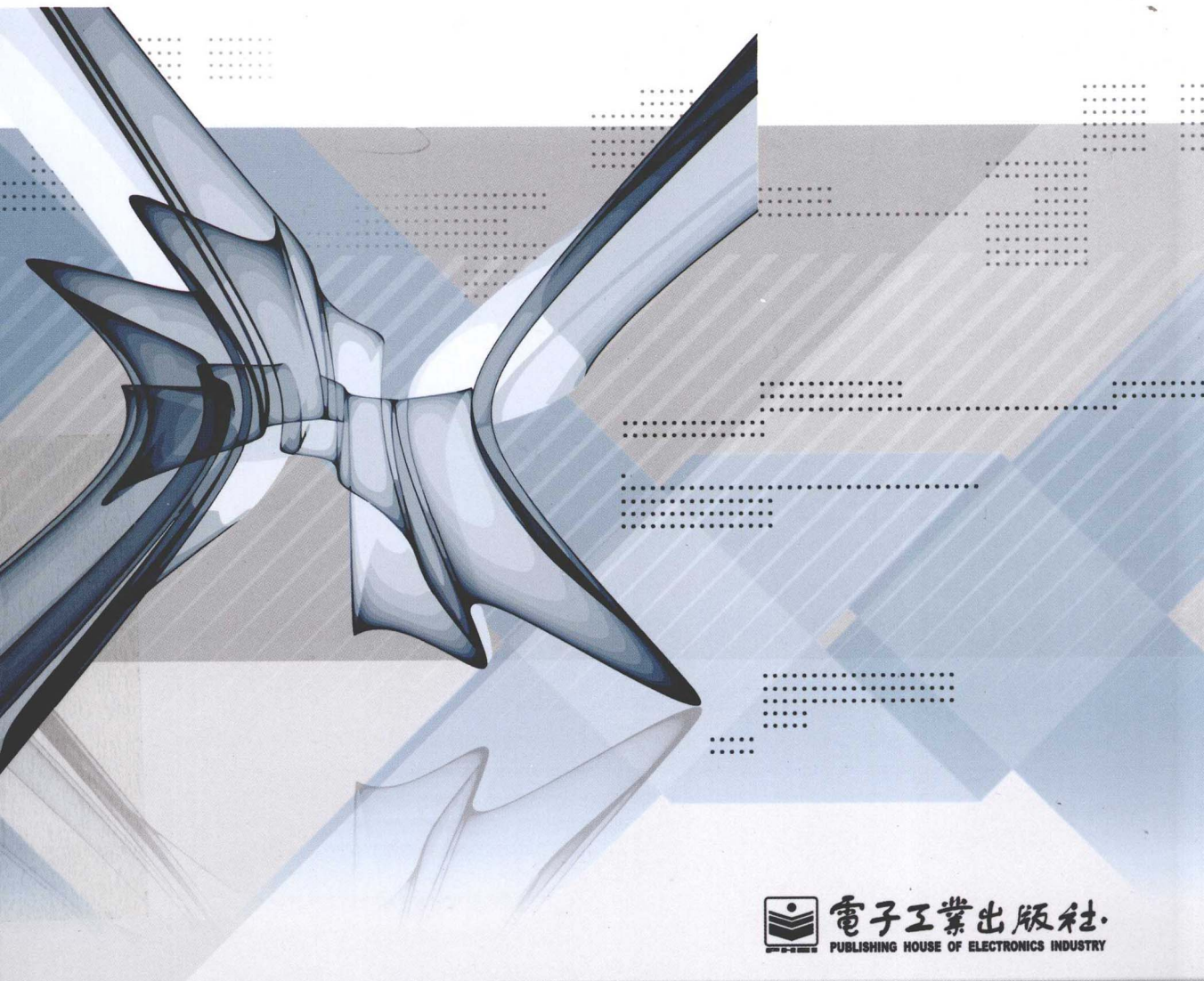


<http://www.phei.com.cn>

机电液一体化系统 建模与仿真技术

高钦和 龙勇 马长林 管文良 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

机电液一体化系统建模与仿真技术

高钦和 龙 勇 马长林 管文良 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书针对机电液一体化系统的建模与仿真问题,对典型物理系统建模与仿真、多系统协同仿真、一体化数字仿真、实时视景仿真、分布式交互仿真等关键技术进行了详细论述。内容涉及系统仿真实理论与算法,机械、液压、电控系统的建模与仿真,机电液一体化系统数字仿真软件平台与协同仿真系统、视景仿真系统、分布式交互仿真系统的实现等,并论述了机械系统动力学分析软件 ADAMS、液压系统仿真软件 AMESim、控制系统仿真软件 MATLAB、分布式仿真平台和视景仿真软件 Vega Prime 等多领域专业仿真软件的应用与集成,最后给出了一个综合应用实例,详细阐述了机电液一体化系统建模与仿真的实现问题。

本书系统性强、层次清楚、内容丰富,具有较强的实用性和参考价值,可作为大专院校相关专业的研究生、本科生教材或参考资料,也可供从事系统仿真和机电液一体化系统设计分析方面的广大科技人员阅读。

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

机电液一体化系统建模与仿真技术/高钦和等编著. —北京:电子工业出版社,2012.5

ISBN 978-7-121-16949-6

I. ①机… II. ①高… III. ①机电一体化—液压控制—系统建模②机电一体化—液压控制—系统仿真
IV. ①TH137-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 088540 号

责任编辑:桑 昀

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

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:490 千字

印 次:2012 年 5 月第 1 次印刷

印 数:3 500 册 定价:49.00 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 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

随着机电一体化技术的不断发展，机电液一体化系统在工业生产、工程机械、航空航天、军用武器等领域的应用越来越广泛，并且日趋复杂化、集成化和智能化，对系统的设计、优化与使用提出了更高的要求。传统的设计分析方法已不能满足这些要求，而现代仿真技术的发展为这类系统的研究提供了新的技术途径和手段。

本书面向典型的机电液一体化系统，围绕该类系统在设计和使用中的性能分析、系统优化、视景模拟及训练仿真系统开发等多个方面，详细论述了典型物理系统建模与仿真、多系统协同仿真、一体化数字仿真、实时视景仿真、分布式交互仿真等关键技术，并阐述了机械系统动力学分析软件 ADAMS、液压系统仿真软件 AMESim、控制系统仿真软件 MATLAB、分布式仿真平台和视景仿真软件 Vega Prime 等多领域专业仿真软件的应用与集成。在内容选取上，注重知识的系统性和针对性，注意建模方法、仿真软件与仿真实例的紧密结合，以及经典数字仿真技术与一体化仿真、虚拟现实、分布式交互仿真等现代先进仿真技术的有机结合，有丰富的应用实例，内容新颖实用，技术方法先进，应用广泛。

全书共分为 7 章，第 1 章系统仿真技术概述，第 2 章连续系统的建模与仿真基础，第 3 章仿真软件与机电液系统仿真基础，这 3 章知识是开展机电液一体化系统建模与仿真的基础理论与方法；第 4 章机电液一体化系统的数字仿真技术，第 5 章机电液一体化系统的视景仿真技术，第 6 章机电液一体化系统的分布式交互仿真技术，这 3 章内容是系统建模与仿真技术在机电液一体化系统仿真中的高级应用；第 7 章机电液系统建模与仿真实例，该章围绕建模与仿真技术的综合应用问题，给出并分析了一个典型机电液系统的建模与仿真实例，可供读者借鉴和参考。

本书第 1~3 章由高钦和、管文良编著，第 4 章由马长林编著，第 5~6 章由龙勇编著，第 7 章由高钦和、龙勇、马长林共同编著，全书由高钦和统稿。

本书在编著过程中，在资料收集和技术信息交流上得到了国内同行的大力支持，参阅了大量相关技术文献，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，时间仓促，书中难免有一些疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 著 者
2012 年 3 月

目 录

第 1 章 系统仿真技术概述	1
1.1 系统、模型与仿真	1
1.1.1 系统	1
1.1.2 系统模型	1
1.1.3 系统仿真及其分类	3
1.1.4 系统仿真工具	4
1.2 计算机仿真的概念及其过程	4
1.2.1 计算机仿真的概念	4
1.2.2 计算机仿真的一般过程	5
1.2.3 计算机仿真的作用	7
1.3 系统仿真技术的研究内容	7
1.3.1 仿真计算机	7
1.3.2 建模方法学	8
1.3.3 仿真算法	8
1.3.4 仿真软件	9
1.4 系统仿真技术的应用与发展趋势	9
第 2 章 连续系统的建模与仿真基础	12
2.1 数学建模与仿真算法	12
2.1.1 数学模型的作用	12
2.1.2 数学建模的原则	13
2.1.3 数学建模的途径	13
2.1.4 连续系统的数学模型	14
2.1.5 仿真算法	16
2.2 连续系统仿真的数值积分法	17
2.2.1 基本的数值积分公式	18
2.2.2 误差分析、稳定性分析与步长控制	24
2.2.3 积分方法的选择	27
2.2.4 刚性系统的仿真算法	28
2.2.5 实时系统的仿真算法	31
2.3 连续系统仿真的离散相似法	32
2.3.1 离散相似法的基本思想	32
2.3.2 面向微分方程的离散相似法	33
2.3.3 面向传递函数的离散相似法	39
2.3.4 离散相似模型的精度分析与补偿	47

第 3 章 仿真软件与机电液系统仿真基础	53
3.1 MATLAB/Simulink 仿真软件基础.....	53
3.1.1 MATLAB 简介.....	53
3.1.2 Simulink 的特点与模块库.....	54
3.1.3 MATLAB 在仿真中的应用.....	60
3.2 通用物理系统建模方法.....	69
3.2.1 确定系统基本物理变量.....	70
3.2.2 选择独立的特征变量.....	70
3.2.3 推导数学模型.....	70
3.2.4 物理系统的数学模型通式.....	71
3.3 机械系统的仿真.....	72
3.3.1 机械系统的建模.....	72
3.3.2 机械系统仿真实例.....	75
3.4 电路系统的仿真.....	81
3.4.1 电路系统的建模.....	81
3.4.2 电路系统仿真实例.....	84
3.5 液压系统的仿真.....	87
3.5.1 液压系统的建模.....	87
3.5.2 液压系统仿真实例.....	89
第 4 章 机电液一体化系统的数字仿真技术	93
4.1 机电液一体化系统的联合仿真.....	93
4.1.1 多领域系统联合仿真技术.....	93
4.1.2 多领域系统建模与仿真方法.....	94
4.1.3 多领域系统联合仿真特点.....	96
4.2 基于 ADAMS 的机械系统动力学仿真.....	97
4.2.1 ADAMS 软件概述.....	97
4.2.2 机械系统动力学建模分析理论与 ADAMS 软件.....	98
4.2.3 基于 ADAMS 机械系统动力学仿真分析方法.....	105
4.3 基于 AMESim 的液压系统仿真.....	110
4.3.1 AMESim 软件概述.....	110
4.3.2 AMESim 的液压仿真基础.....	111
4.3.3 AMESim 软件的使用方法.....	119
4.3.4 基于 AMESim 液压位置控制系统仿真.....	121
4.3.5 基于 AMESim 的典型机液耦合系统仿真.....	124
4.4 基于 Simulink 的机电液一体化系统集成化仿真平台.....	129
4.4.1 机电液一体化系统中的参数关联分析.....	129
4.4.2 基于 Simulink 的集成化仿真平台框架.....	131
4.4.3 软件间的组织协同仿真方法.....	132
4.5 关于联合仿真的几个问题.....	136
4.5.1 积分步长不协调的问题.....	136

4.5.2	代数环问题	136
4.5.3	提高机液耦合系统联合仿真速度的途径	138
第 5 章	机电液一体化系统的视景仿真技术	143
5.1	视景仿真技术	143
5.1.1	视景仿真的定义	143
5.1.2	仿真动画、视景仿真与虚拟现实技术的关系	144
5.2	机电液一体化系统与视景仿真	147
5.2.1	一体化装备技术进步与仿真需求	147
5.2.2	视景仿真在一体化装备中的应用	148
5.2.3	视景仿真应用于装备仿真研究的意义	149
5.2.4	一体化装备视景仿真的发展方向——分布式虚拟现实	149
5.3	三维模型建模技术	150
5.3.1	三维视觉建模	150
5.3.2	典型视觉建模方法	153
5.3.3	视景建模的关键技术	154
5.3.4	专用几何建模工具	163
5.3.5	MultiGen Creator 建模的特点	169
5.3.6	Creator 基本建模模块的功能	170
5.3.7	模型定义与模型数据库	171
5.3.8	建模的具体实现	172
5.3.9	FLT 格式及其应用程序接口 (API)	173
5.3.10	各种格式到 FLT 格式的归一化	174
5.3.11	几何建模的基本流程	177
5.4	三维模型驱动技术	178
5.4.1	OpenGL	178
5.4.2	OpenGVS	180
5.4.3	OpenGL Performer	180
5.4.4	VTree	181
5.4.5	Vega/Vega Prime	181
5.5	基于 Vega Prime 的模型驱动技术	182
5.5.1	Vega 的主要特点	182
5.5.2	Vega Prime 的主要特点	182
5.5.3	Vega Prime 的基本模块	183
5.5.4	Vega Prime 仿真的基本流程	187
第 6 章	机电液一体化系统的分布式仿真技术	189
6.1	分布式仿真技术	189
6.1.1	分布式仿真的产生	190
6.1.2	分布式仿真的发展历程	190
6.1.3	DIS、HLA 和 TENA 的比较	194
6.2	机电液一体化系统与分布式仿真	197

6.2.1	一体化装备分布式仿真的难点	197
6.2.2	一体化装备分布式仿真的一般特点和基本要求	198
6.2.3	一体化装备的分布式仿真研究领域	199
6.3	几种类型的一体化装备分布式仿真体系结构	199
6.3.1	基于串行通信协议的分布式仿真体系结构	200
6.3.2	基于网络协议的分布式仿真体系结构	202
6.3.3	基于 DIS 的分布式仿真体系结构	207
6.3.4	基于 HLA 的分布式仿真体系结构	209
6.3.5	基于 TENA 的分布式仿真体系结构	214
第 7 章	机电液一体化系统建模与仿真实例	219
7.1	概述	219
7.1.1	仿真对象分析	219
7.1.2	仿真的设计思路——一体化仿真	221
7.1.3	仿真的研究方法——多领域协同仿真	221
7.1.4	仿真的运行环境——一体化仿真引擎	222
7.2	基于 HLA 的一体化仿真引擎	224
7.2.1	引擎的设计目标	224
7.2.2	基于 MDA 的仿真引擎开发	225
7.2.3	引擎的 HLA OMT 开发过程	228
7.2.4	引擎的对象模型设计与 FOM/SOM	230
7.2.5	引擎的联邦成员设计	233
7.2.6	引擎的类 Web 服务设计	237
7.2.7	仿真引擎的开发流程	240
7.2.8	仿真引擎的主要服务	241
7.2.9	仿真引擎的 RTI 接口设计	244
7.3	调平系统建模与仿真	249
7.3.1	调平系统分析	249
7.3.2	调平控制策略的仿真分析	250
7.3.3	调平系统的一体化仿真设计	254
7.4	举升系统建模与仿真	256
7.4.1	举升系统分析	256
7.4.2	举升系统的协同仿真	256
7.4.3	基于 Simulink 的多级液压缸建模	257
7.4.4	基于 AMESim 的举升液压系统仿真模型	261
7.4.5	基于角度反馈的举升过程仿真实现	262
7.5	机动设备的视景建模与驱动	264
7.5.1	视景仿真的基本流程	264
7.5.2	视景仿真的工具选择	265
7.5.3	基于 Creator 的车辆三维建模	266
7.5.4	基于 MFC 框架的 VP 视景仿真驱动	277
	参考文献	289

第 1 章 系统仿真技术概述

科学实验是人类认识社会和改造自然的基本活动和有效手段。科学实验有两条重要途径：一条途径是在实际系统上进行实验，即实物实验或物理实验；另一条途径是利用模型完成实验研究，称之为“仿真”。简单地说，系统仿真就是建立系统的模型，并在模型上进行实验研究的一项活动。

1.1 系统、模型与仿真

1.1.1 系统

系统是指具有某些特定功能，相互联系、相互作用的元素的集合。它具有两个基本特征：整体性和相关性。整体性是指系统作为一个整体存在而表现出某项特定的功能，这种功能是不可分割的。相关性是指系统的各个部分、元素之间是相互联系的，存在物质、能量与信息的交换。在自然界与人类社会中存在着多种系统，既包含工程系统，如控制系统、通信系统等，也包含非工程系统，如股市、交通、生物系统等。

系统仿真所研究的系统，还应该具备两个特征：有序性和动态性。

一个系统以其特有的表征和内在特性区别于其他系统，主要表现在以下几个方面。

- (1) 实体——构成系统的具体对象。
- (2) 属性——描述实体特性的信息，常以状态和参数来表征。
- (3) 活动——系统实体随时间推移而发生的属性变化。
- (4) 环境——系统所处的界面状况，包括干扰和约束等。

组成系统的实体之间相互作用而引起的实体属性的变化，通常用状态变量来描述，系统仿真主要就是研究系统状态的动态变化。

除了研究系统的实体属性活动外，还需要研究影响系统活动的外部条件，这些外部条件称为环境。自然界的实体之间是普遍联系的，系统是在外界环境的不断变化中产生活动的，因此研究系统所处的环境是十分必要的。但是应该注意到，系统与环境的边界是不确定的，对于同一个系统可能因为研究目的的不同而不同。

1.1.2 系统模型

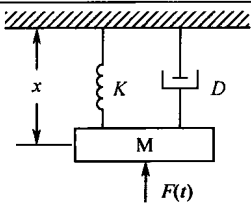
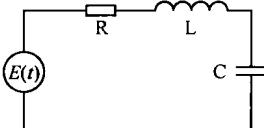
建立系统概念的目的在于深入认识并掌握系统的运动规律，不仅能定性地了解系统，还要定量地分析系统，定量分析的最有效的方法是模型法。一个系统，只有在其研究目的确定且对实体、属性、活动、环境做了明确描述后，才是确定的，才可能去考虑系统模型的建立。

系统模型是对系统活动的抽象描述，是为了一定的研究目的，对被研究的实际系统

特性进行简缩、抽象、提炼出来的原型的替代物。在任意时间，系统所有的实体、属性、活动和环境情况的信息集合称为系统在该时间的状态，可以表示系统状态的变量称为系统变量，系统存在许多可能的状态，而系统模型就是描述系统状态变化的关系。

之所以可以用模型来模仿实际系统，是因为各种系统之间具有一定的相似性，虽然很多系统的组成元素有差异，且组成元素的微观结构不尽相同，但通过一定的组织之后，都可以表现出几乎同样的行为。例如，机械系统与电系统的相似性比较，参见表 1.1。系统仿真的基础是相似原理，包括几何相似、环境相似、性能相似、感觉相似、逻辑思维方法相似等。

表 1.1 机械系统与电系统的相似性比较

系 统 表 征	机 械 系 统	电 系 统
系统实体		
系统属性	距离 x 外力 $F(t)$ 阻尼系数 D 速度 \dot{x} 质量 M 弹簧系数 K	电荷 q 电源 $E(t)$ 电阻 R 电流 \dot{q} 电感 L 1/电容 $1/C$
系统活动	机械振荡	电振荡
系统描述	$M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = F(t)$	$L\dot{q} + Rq + \frac{1}{C}q = E(t)$

模型可以分为实体模型和数学模型。实体模型，是根据系统之间的相似性而建立起来的物理模型。最常见的是比例模型，如风洞实验常用的翼型模型、建筑模型。数学模型是运用性能相似原理，用数学方程或符号描述系统性能的模式。

数学模型可以分为许多类型。按照状态变化，可分为动态模型和静态模型。用以描述系统状态变化过程的数学模型称为动态模型，而静态模型仅仅反映系统在平衡状态下系统特征值间的关系，这种关系常用代数方程来描述，参见表 1.2。按照输入和输出的关系，可分为确定性模型和随机性模型。若一个系统的输出完全可以用它的输入来表示，则称之为确定性系统。若系统的输出是随机的，即对于给定的输入存在多种可能的输出，则该系统是随机系统。

根据数学模型，作为主要研究对象的动态模型又可分为连续系统和离散系统。连续系统的动态模型常用微分方程、状态方程或传递函数来描述，研究这些系统的性质实际上就是求解微分方程。离散系统是指系统的操作和状态变化仅在离散时刻产生的系统，包括离散时间系统和离散事件系统。离散时间系统使用差分方程、离散状态方程或脉冲传递函数进行描述，如计算机采样系统。离散事件系统的状态变化则是由事件驱动的，具有随机性，如交通系统、电话系统、通信网络系统等，常常使用各种概率模型来描述。

连续系统还可分为是集中参数的还是分布参数的，是线性的还是非线性的，是时变的还是时不变的，是时域的还是频域的，是连续时间的还是离散时间的，等等。

表 1.2 静态模型和动态模型的比较

模型类型		数学描述	备注
静态模型		代数方程	
动态模型	连续系统	微分方程，状态方程，传递函数	广义连续模型
	离散系统	离散时间系统	
		离散事件系统	概率模型

1.1.3 系统仿真及其分类

系统仿真是研究系统的一种重要手段，而系统模型则是仿真所要研究的直接对象。研究一个系统的目的是为了了解系统各组成实体之间的关系，或者是预示系统在一种新的工作策略下的执行情况。然而，由于许多系统不具有实际试验的可能性，这时就需要按实际系统建立系统模型进行研究，然后利用模型实验研究的结果来推断实际系统的工作，这种使用模型来研究系统的方法称为系统仿真，简称“仿真”。

1.1.3.1 按实现方式的不同分类

按照实现方式的不同，可以将系统仿真分为物理仿真、数学仿真和半实物仿真 3 大类。

1. 物理仿真

物理仿真是基于物理模型进行的仿真。它是指研制某些实体模型，使之能够重现原系统的各种状态。早期的仿真大多属于这一类。它的优点是直观、形象，至今仍然广泛应用。例如，为了研究飞机翼型，要建立翼型的比例模型，更重要的是，要在地面建立对空气中气流环境的模拟。但是为系统构造一套物理模型是一件非常复杂的事情，投资巨大，周期长，且很难改变参数，灵活性差。对于社会、经济、生物系统等，则根本就无法用实体做实验。

2. 数学仿真

数学仿真是基于数学模型进行的仿真。数学仿真把研究对象的结构特征或输入/输出关系抽象为一种数学描述来研究，具有很强的灵活性，可以方便地改变系统结构、参数；速度快，可以在很短的时间内完成实际系统很长时间的动态演变过程；精确度高，可以根据需要改变仿真的精度；重复性好，可以很容易地再现仿真过程。然而数学仿真也有其局限性，对于某些复杂系统可能很难用数学模型来表达，或者难以建立精确模型，或者数学模型过于复杂而目前无法求解，或者计算量太大而无法利用现有的计算资源进行仿真等。

3. 半实物仿真

半实物仿真又称数学-物理仿真或混合仿真。为了提高仿真的可信度或者对于一些难以建模的实体，在系统研究中往往把数学模型、物理模型和实体结合起来组成一个复杂的仿真系统，这种在仿真环节中存在实体的仿真称为半实物仿真。这样的仿真系统有飞机半实物仿真、制导导弹半实物仿真等，还有许多模拟器也属于半实物仿真。

在工程实践中，以上各种仿真方法往往用于工程中的不同阶段。在工程设计分析阶段，采用数学仿真，易于更改设计，具有灵活性和经济性。在部件、子系统研制阶段，

采用半实物仿真以提高仿真可信度和测试部件或子系统的功能。在最后定型阶段，为了验证全系统的功能特性，则需要进行物理仿真。

1.1.3.2 按仿真系统与实际系统时间尺度上的关系分类

按照仿真系统与实际系统时间尺度上的关系，又可将仿真分为实时仿真、欠实时仿真和超实时仿真3大类。

1. 实时仿真

实时仿真，仿真时钟与系统实际时钟完全一致。许多仿真应用需要满足实时性，需要实时操作系统或专用实时仿真硬件的支持。

2. 欠实时仿真

欠实时仿真，仿真时钟比实际时钟慢。当对仿真的实时性没有严格的要求时，仿真时钟比实际时钟慢不影响仿真的目的，采取欠实时仿真则可节约很多资金。

3. 超实时仿真

超实时仿真，仿真时钟比实际时钟快。当实际系统周期太长，若采用实际时钟就变得毫无意义，这时就要进行超实时仿真。对于大的、复杂的系统进行超实时仿真时，对计算机的计算速度要求非常高，如天气预报系统就需要超级计算机的支持。

1.1.4 系统仿真工具

计算机是一种最重要的仿真工具，已经发展出了模拟机、模拟数字机、数字通用机、仿真专用机等各种机型并用不同的仿真领域。

除了计算机这种主要的仿真工具外，还有两类专用仿真器。

(1) 专用物理仿真器，如在飞行仿真中用的转台，各种风洞、水洞等。

(2) 用于培训目的的各种训练仿真器，如培训原子能电站、大型自动化工厂操作人员和训练飞行员、宇航员的培训仿真器、仿真工作台和仿真机舱等。训练仿真器实际上是一种包括计算机、物理模型、实物在内的复杂仿真系统。

总之，系统仿真是以相似性原理、控制论、信息技术及相关领域的有关知识为基础的，以计算机和各种专用物理设备为工具，借助系统模型对真实系统进行实验研究的一门综合性高新技术。它利用物理的或数学的方法来建立模型，类比模拟现实过程或者建立假想系统，以寻求过程的规律，研究系统的动态特性，从而达到认识和改造实际系统的目的。系统仿真涉及学科领域，包括相似论、控制论、计算机科学、系统工程理论、数值计算、概率论、数理统计、时间序列分析等多种学科。

1.2 计算机仿真的概念及其过程

计算机出现之前，只有物理仿真，系统仿真附属在其他有关学科中。计算机的问世和发展，促进了计算机仿真技术的产生和发展。

1.2.1 计算机仿真的概念

数学仿真使用的模型是数学模型，其模型运行工具为计算机及其支撑软件，因此数学仿真也称计算机仿真。

1.2.1.1 计算机仿真的类型

按照所使用计算机的不同，计算机仿真又可以分为模拟计算机仿真、数字计算机仿真和混合计算机仿真。

1. 模拟计算机仿真

模拟计算机仿真，以模拟计算机作为仿真工具，简称模拟仿真。

2. 数字计算机仿真

数字计算机仿真，以数字计算机及其仿真支撑软件作为仿真工具，简称数字仿真。

3. 混合计算机仿真

混合计算机仿真，既使用模拟计算机，也使用数字计算机的计算机仿真，简称混合仿真。

目前，计算机仿真通常是指在数字计算机上进行的数字仿真。

1.2.1.2 计算机仿真的研究对象

计算机仿真的研究对象可以是实际的系统，也可以是设想中的系统。在没有计算机以前，仿真都是利用实物或者它的物理模型来进行研究的，即物理仿真。物理仿真的优点是直接、形象、可信，但模型受限、易破坏、难以重用。而计算机仿真是将研究对象进行数学描述，建模编程，且在计算机中运行实现，它易修改、可重用。

根据数学模型的性质，计算机仿真的研究对象可以分为两类。

1. 确定性的广义连续系统

确定性的广义连续系统包括连续时间系统和离散时间系统，这类系统的输出由输入决定（可用确定的函数关系来描述），其仿真思想和基本方法是相同的。因此，该类系统的仿真统称为连续系统仿真。

2. 随机性的离散系统

随机性的离散系统的状态变化（称为“事件”）只在离散的时刻发生，并且具有随机性，通常用概率模型进行数学描述。因此，该类系统的仿真称为离散事件系统仿真。

1.2.2 计算机仿真的一般过程

计算机仿真有三个基本要素：系统、模型、计算机。系统是仿真研究的对象，模型是系统的抽象，计算机是对模型进行实验研究的工具。联系着三要素的是三项基本活动：数学建模、仿真建模、仿真实验，如图 1.1 所示。

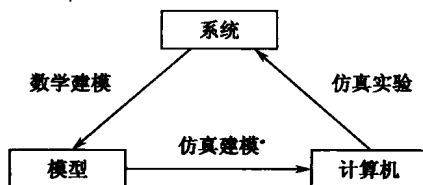


图 1.1 计算机仿真的三要素及其三项基本活动

计算机仿真的一般过程，如图 1.2 所示。

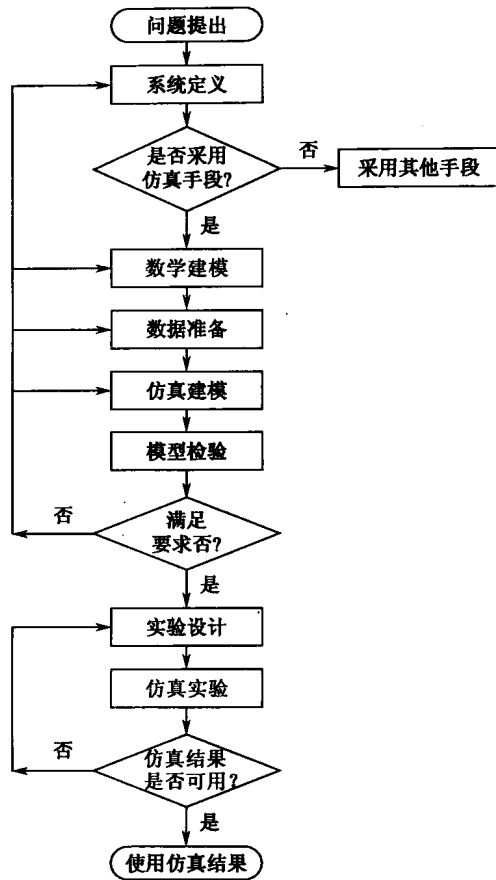


图 1.2 计算机仿真的一般过程

(1) 问题提出：描述仿真问题，明确仿真目的。

(2) 系统定义与仿真规划：根据仿真目的，确定仿真对象（系统的实体、属性、活动）及环境（系统的边界条件与约束条件），规划相应的仿真系统结构（实时仿真还是非实时仿真，纯数学仿真还是半实物仿真等）。

(3) 数学建模：根据系统的先验知识、实验数据及其机理研究，按照物理原理或者采取系统辨识的方法，确定模型的类型、结构及参数，对模型进行形式化处理，得到系统的数学模型，并对模型进行可信性检验。

(4) 仿真建模：根据数学模型的形式、计算机类型和仿真的要求，选择合适的算法，采用高级语言或其他仿真工具，将数学模型转换成能在计算机上运行的程序或其他模型，即获得系统的仿真模型。

(5) 仿真实验：根据仿真的目的，确定仿真实验的要求，如仿真运行参数、控制参数、输出要求等，对仿真模型进行多方面的运行实验，相应地得到模型的输出。

(6) 仿真结果分析：根据仿真目的和实验要求，对仿真实验的结果进行分析处理（整理及文档化）。根据分析结果修正数学模型、仿真模型或仿真程序，以进行新的实验。模型是否能够准确地表示实际系统，是需要不断地修正和验证的，它不是一次完成的，而是比较模型和实际系统间的差异，不断地修正和验证。

1.2.3 计算机仿真的作用

计算机仿真技术在许多复杂工程系统的分析和设计研究中越来越成为不可或缺的工具。系统的复杂性主要体现在复杂的环境、复杂的对象和复杂的任务等方面。然而只要能够正确地建立系统的模型,就能够对该系统进行充分的分析和研究。另外,仿真系统一旦建立就可重复利用,特别是计算机仿真系统的修改非常方便。经过不断地仿真修正,逐渐深化对系统的认识,以采用相应的控制和决策,使系统处于科学的控制和管理之下。归纳起来,仿真技术的主要作用如下所述。

(1) 优化系统设计。在实际系统建立以前,通过改变仿真模型结构和调整系统参数来优化系统设计,如控制系统、数字信号处理系统的设计经常要靠仿真来优化系统性能。

(2) 系统故障重现,发现故障原因。实际系统故障的再现必然带来某种危害性,是不安全和不经济的,利用仿真来再现系统故障则是安全的和经济的。

(3) 验证系统设计的正确性。

(4) 对系统或其子系统进行性能评价和分析。

(5) 训练系统操作员,如飞行模拟器,坦克模拟器等。

(6) 为管理决策和技术决策提供支持。

1.3 系统仿真技术的研究内容

系统仿真技术是以相似性原理、信息技术,系统技术及应用领域有关专门技术为基础,以计算机和专用设备为工具,利用系统模型对系统开展实验研究的一门技术性学科。

1.3.1 仿真计算机

计算机是进行系统仿真的主要工具,用于仿真的计算机可以是模拟计算机、数字计算机、混合计算机、并行多处理机系统等。

1. 模拟计算机

模拟计算机是利用具备各种数学模型特征的典型电路组成的基本运算部件,如加法器、乘法器、积分器等。这些基本运算部件的输入和输出都是电压,可以相互连接,以完成更为复杂的数学运算。模拟计算机是一种连续计算装置,它是把实际的系统物理量用电压量表示,通过各连续运算部件求解来描述系统动态特性的微分方程,它的输入和输出均为连续的电压量,因此,“连续”是模拟仿真的突出特点。20世纪50年代,是模拟计算机发展的黄金时期。

2. 数字计算机

数字计算机是用“0”、“1”断续变化的电脉冲数码串表示被运算量的数字式运算装置,主要由运算器、控制器、存储器、输入和输出设备5大部分组成。1946年提出的计算机 Von Neumann (冯·诺依曼)结构模型,奠定了现代计算机的发展基础。20世纪70年代末,使用全数字计算机的计算机仿真成为主流。

3. 混合计算机

混合计算机是将模拟计算机与数字计算机相结合构成的混合计算机。它有两种形式:

一种是在普通模拟计算机的基础上, 增加一些数字逻辑功能和存储元件, 使之成为混合模拟计算机; 另一种则是通过一个中间界面将一台数字计算机与一台模拟计算机连接起来, 组成一个新的计算机系统, 称为数字-模拟混合计算机。混合仿真综合了数字仿真与模拟仿真的优点, 克服了它们各自的缺点。但由于它涉及的器件较多, 价格比较昂贵, 应用场合受到限制。20 世纪 50 年代末, 混合计算机系统诞生, 20 世纪 60 年代到 20 世纪 70 年代中期, 混合计算机的发展进入鼎盛时期。

4. 并行多处理机系统

目前, 一般的仿真应用使用通用的计算机或工作站即可, 但是在时间要求苛刻、含硬件在回路中的实时仿真等场合, 需要使用专用仿真计算机, 如并行多处理机系统、高性能图形工作站, 而由于高速、宽带网络通信及分布式计算技术的发展, 使分布式计算环境成为仿真计算机平台的重要发展方向。

1.3.2 建模方法学

模型是系统行为特性的描述, 一般情况下, 是与研究目的有关的系统行为子集的特性描述。模型建立的任务是要确定模型的结构和参数。根据具体情况, 建模方法的一般途径可以归纳为以下几步:

(1) 对于内部结构和特性清楚的系统(“白箱”), 可利用一些已知的基本定律, 经过分析和演绎导出系统模型;

(2) 对于内部结构和特性不清楚的系统(“黑箱”)或不很清楚的系统(“灰箱”), 若允许直接进行实验观测, 则可假设模型并通过实验数据对假设的模型加以验证和修正;

(3) 对属于“黑箱”, 但又不允许直接实验观测的系统, 则可采用数据收集和统计归纳的方法来假设模型。

实际上, 建模的有效办法往往不是单一地采用某一途径, 而是混合地采用多种途径。关键问题是如何“合理”地混合。一个满意模型的获得, 尽可能避免受建模者主观意志的影响, 这往往就要进行多次反复探索, 以提高其可信度。

随着仿真技术的日益发展和广泛应用, 仿真模型的 VV&A(校核、验证及确认技术)也成为复杂系统建模与仿真技术中的重要课题。

1.3.3 仿真算法

在建立系统的数学模型后, 需要将其转变成能够在计算机上运行的仿真模型。例如, 由于计算机只能进行离散的数值计算, 所以必须推导出连续系统的递推数学公式, 如求解微分方程的龙格-库塔算法。这实际上就是计算机仿真算法的设计, 即把数学模型转化为能在计算机上运行的仿真模型。

可见, 计算机仿真算法是将系统数学模型转换成仿真模型的一类算法, 在数字仿真模型中起核心和关键作用。通常这些仿真算法并不需要仿真人员去编制, 因为这些仿真算法往往已经内嵌于各种面向仿真用途的专用软件中了。但是对这些算法的了解无疑有助于用户更好地完成仿真任务。

仿真算法可以分为连续系统仿真算法、离散事件系统仿真算法等, 而连续系统仿真算法又可分为数值积分法、离散相似法等。此外, 仿真算法的研究还经历了从串行算法到并行算法的发展过程。目前, 连续系统与离散事件系统的非实时串行算法已经相当完

善,研究的重点是实时连续系统仿真算法、各类系统的并行仿真算法及定性仿真算法等。

1.3.4 仿真软件

仿真软件是一类面向仿真用途的专用软件,它可能是面向通用的仿真,也可能是面向某个领域的仿真。它的功能可以概括为以下几点。

- (1) 为仿真提供算法支持。
- (2) 模型描述,用来建立计算机仿真模型。
- (3) 仿真实验的执行和控制。
- (4) 仿真数据的显示、记录和分析。

(5) 对模型、实验数据、文档资料和其他仿真信息的存储、检索和管理,即用于仿真数据信息管理的数据库系统。

根据软件功能,仿真软件可分为以下3个层次。

(1) 仿真程序库,是一组完成特定功能的程序的集合,专门面向某一问题或某一领域。它可能是用通用的语言(如C++, Fortran等)开发的程序软件包,也可能是依附于某种集成仿真环境的函数库或模块库。很多这样的软件包是开放的,可以免费使用和扩展,如C++SIM, Mathtools (for MATLAB, C, C++, Fortran)等。

(2) 仿真语言,多属于面向专门问题的高级语言,它是针对仿真问题,在高级语言的基础上研制而成的。它不要求用户掌握复杂烦琐的高级语言,只需用户按照要求书写方程代码,而无须考虑数学模型到仿真模型的转换,这种代码往往更接近于系统本身的数学模型。最终,由机器自动完成由仿真语言到通用高级语言或汇编语言的转换,这样的语言有ACSL, Easy5等。

(3) 集成仿真环境,是一组用于仿真的软件工具的集合,包括设计、分析、编制系统模型,编写仿真程序,创建仿真模型,运行、控制、观察仿真实验,记录仿真数据,分析仿真结果,校验仿真模型等。它涉及许多功能软件,如建模软件、仿真执行软件、结果分析软件,各功能软件之间存在着信息联系,为了提高效率,必须将它们集成起来,加上方便的操作界面、环境,就形成了集成仿真环境。典型的集成仿真环境,如MathWorks公司的MATLAB/Simulink,就是一个集成的通用建模与仿真平台。

当前,仿真软件的发展十分迅速,其发展方向是建立智能化的建模与仿真环境、支持分布交互仿真的综合仿真环境等,将为仿真技术的应用提供更加方便、易用和功能强大的软件支撑。

1.4 系统仿真技术的应用与发展趋势

系统仿真技术是一门通用的支撑性技术,具有综合性强、应用领域宽、无破坏性、可多次重复、安全、经济、不受环境条件和场地空间的限制等特点;同时,它也是一门不断发展的高新技术,已成为现代实验工程和科学研究的主要技术手段,广泛应用于国防和国民经济的各个领域。

由于仿真技术在应用上的安全性,使得航空、航天、核电站等成为仿真技术最早的和最主要的应用领域。特别是在军事领域,新型的武器系统、大型的航空航天飞行器,