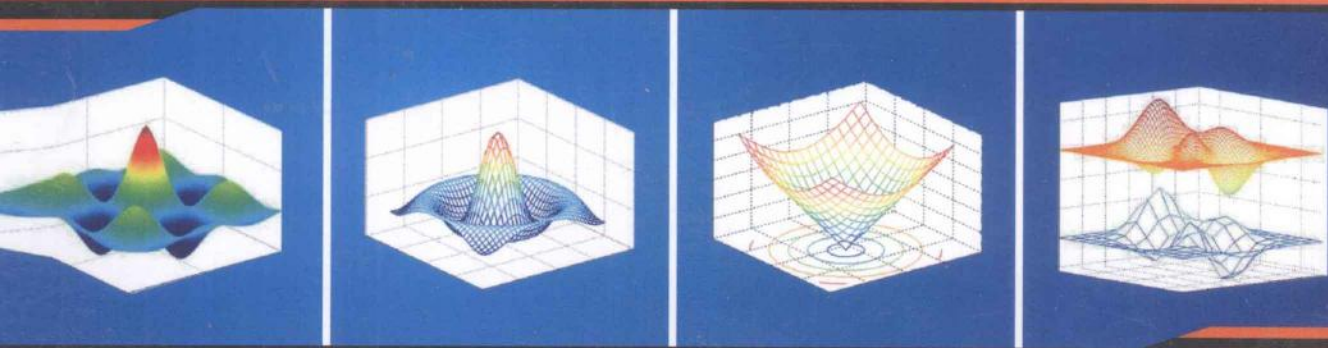


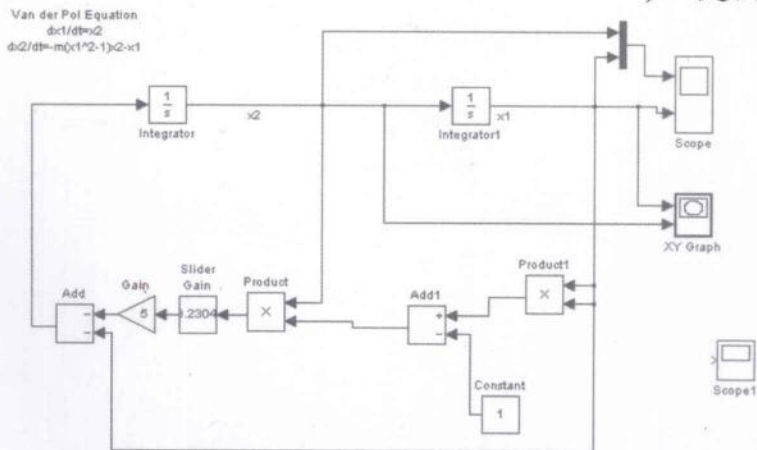
高等学校规划教材 · 计算机科学技术  
PROGRAMMING TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION



# 计算机仿真实用教程

—— 基于 MATLAB/Simulink 7.x

卢健康 主编



西北工业大学出版社

高等学校规划教材·计算机科学

# 计算机仿真实用教程

——基于 MATLAB/Simulink 7. x

主 编 卢健康

副主编 高 扬

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 全书共分为13章:第1章概述了系统建模与仿真的基本理论,第2章是学习 Simulink 所需要的 MATLAB 基础知识;第3章介绍了系统模型的理论知识及其 M 文件表述方法;第4~8章分别介绍了 Simulink 入门与实例演示、Simulink 模型的创建方法、Simulink 模块库、Simulink 模型的仿真运行方法和 Simulink 中的信号操作;第9章是 Simulink 系统建模和仿真举例;第10和11章分别叙述了 Simulink 仿真的调试技术和子系统技术;第12章介绍了几个高级仿真技术与 S 函数技术;第13章介绍了用于电气和机构系统仿真的两个专业工具箱,并通过实例说明了其具体用法。

本书是为非电类尤其是机械或机电类相关专业的硕士生或高年级本科生学习系统建模与仿真知识而编写的,亦可作为一般读者了解计算机仿真的基本知识和学习 Simulink 的教材,还可作为科技工作者和教师等相关人员学习和应用系统仿真技术解决实际问题的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

计算机仿真实用教程:基于 MATLAB/Simulink 7. x/卢健康主编. —西安:西北工业大学出版社,2013. 5

ISBN 978-7-5612-3674-1

I. 计… II. ①卢… III. ①计算机仿真—高等学校—教材 IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 101884 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:18.25

字 数:442 千字

版 次:2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

定 价:39.00 元

# 前 言

计算机仿真是系统建模与仿真的主要内容。它目前已经发展成为与理论研究和科学实验并列的第三大科研方法,是分析和综合各类工程系统或非工程系统的重要手段,同时也是解决工程技术实际问题的强大工具。而 MATLAB/Simulink 软件已经成为其中功能最强大的仿真软件之一。因此,基于 Simulink 软件的计算机仿真技术已成为许多理工科专业硕士生甚至本科生所应该掌握的重要技术基础知识。

笔者已经为硕士生开设“MATLAB 语言与运动控制系统仿真”课程多年,2007 年以来又在此基础上连续开设了 6 届“系统建模与仿真实验”课,颇受学生欢迎,选修人数很多。选课的学生绝大多数不是控制、电气、电子或通信这样的电类专业学生,而是以机械和机电类为多数的非电类专业学生;而市面上的系统仿真类课程教材基本上都以电类专业学生为主要对象,难以适应非电类专业学生的教学需要。在此背景下,笔者参考许多同类教材和文献资料编写了相应的讲义用于教学,本书就是在该讲义修订版的基础上根据多年的教学实践积累修编完善而成的。

为了适应非电类专业学生的知识结构和专业需要以及本课程学时较少(32~40 学时)的特点,本书在内容安排上有以下五个特色:

(1)与一般以 MATLAB/Simulink 软件使用为主的教材不同,用较大篇幅概述了系统建模与仿真的基本理论,主要安排在第 1 章,在后续章节中也结合具体内容有所介绍。这样做主要是考虑到绝大多数学生没有学过这些知识。

(2)与一般面向电类的仿真教材不同,不再深入地介绍系统仿真的各种算法和理论,只以让学生掌握 Simulink 软件这一仿真工具为主要目标。

(3)考虑到大多数学生未学过 MATLAB 软件,在第 2 章简要介绍了学习 Simulink 所需要的 MATLAB 基础知识。学过 MATLAB 的学生可以略读或跳过第 2 章,直接学习后续内容。

(4)由于非电类学生一般没有学过诸如“信号与系统”“自动控制原理”和“数字信号处理”等课程,有关系统的数学模型方面的理论知识较为欠缺,因此,在学习用 Simulink 建模与仿真的方法之前,首先在第 3 章介绍了系统数学模型的理论知识及其 M 文件表述方法,以此作为过渡知识,以便学生更好地理解后续的 Simulink 建模与仿真知识。

(5)为了使学生在较少的学时内能学到尽量多的实用知识,不仅在第 4~12 章详细叙述了 Simulink 从入门到进阶的通用性内容,还在第 13 章专门介绍了用于电气和机构系统仿真的两个专业工具箱,并通过实例详细说明了其具体用法。

本书由西北工业大学卢健康任主编并统稿,长安大学高扬任副主编。其中第 4~10 章由高扬编写,第 2.6~2.8 节由河南科技大学王斐编写,第 11.3 节、第 13.3 节与第 13.4 节由西北工业大学博士生苏士斌编写,其余各章节由卢健康编写。

西安电子科技大学博士生导师焦李成教授和西北工业大学博士生导师朱名铨教授积极推

荐本书的出版立项,国家级教学名师、西北工业大学博士生导师史仪凯教授和西北工业大学博士生导师史忠科教授也对本书的编写给予了热情帮助。在编写本书和初编及修订讲义的过程中,还先后得到西北工业大学教务处、机电学院及电工学教学团队有关领导和同志们的鼎力支持和热心帮助,硕士生靳艳敏、谢亚乐、孙建中、刘卫军、王文东、邢益巽、陈海标、敬瑞星和刘晓艳等人做了不少辅助性工作。另外,在编写过程中参考了不少相关的文献资料(未能在参考文献中一一列出)。在此,笔者对上述四位教授、参考文献资料的作者、促成本书出版的西北工业大学出版社有关领导与同志以及上述提供帮助的所有领导、老师、同志和学生一并致以诚挚的谢意!

由于笔者水平有限,加之时间仓促,书中一定存在不妥之处,敬请使用本书的读者不吝指正。

**编 者**

2013年1月

# 目 录

第 1 章 仿真技术概述	1
1.1 系统、模型与仿真的含义	2
1.2 系统仿真的分类	10
1.3 计算机仿真	12
1.4 仿真技术的应用	16
1.5 仿真技术的发展与展望	36
第 2 章 MATLAB 基础	39
2.1 MATLAB 产品体系	39
2.2 MATLAB 的操作界面简介	41
2.3 MATLAB 帮助系统用法简介	59
2.4 数值数组与向量化运算	67
2.5 MATLAB 中的单元、结构与字符串	81
2.6 M 文件与 MATLAB 程序设计简介	83
2.7 与 Simulink 相关的一些数值计算	89
2.8 MATLAB 的基本绘图功能	95
第 3 章 系统模型及其 MATLAB 表述	103
3.1 即时系统模型及其 MATLAB 表述	103
3.2 连续系统模型及其 MATLAB 表述	105
3.3 离散时间系统模型及其 MATLAB 表述	114
3.4 混合系统模型及其 MATLAB 表述	122
3.5 线性时不变系统模型的相互转换	124
3.6 MATLAB 中系统模型的连接	133
第 4 章 Simulink 入门与实例演示	140
4.1 Simulink 的功能与特点简介	140
4.2 实例演示——房屋热力学系统模型	141
4.3 双质量弹簧系统模型演示及其他模型实例	144
4.4 设置 Simulink 显示参数	145

<b>第 5 章 创建 Simulink 模型</b> .....	148
5.1 新建或打开模型 .....	148
5.2 模块操作 .....	148
5.3 模块连线操作 .....	153
5.4 模型说明 .....	155
5.5 模型打印 .....	157
<b>第 6 章 Simulink 的模块库</b> .....	158
6.1 模块库简介 .....	158
6.2 常用模块组 .....	160
6.3 连续模块组 .....	160
6.4 离散模块组 .....	161
6.5 非连续模块组 .....	162
6.6 逻辑运算与位操作模块组 .....	163
6.7 查表模块组 .....	164
6.8 数学运算模块组 .....	165
6.9 端口与子系统模块组 .....	167
6.10 信号通道模块组 .....	168
6.11 信号接收模块组 .....	169
6.12 信号源模块组 .....	169
6.13 用户自定义模块组 .....	171
6.14 专业模块库简介 .....	171
<b>第 7 章 Simulink 模型的仿真运行</b> .....	173
7.1 用 Simulink 模型仿真的基本步骤 .....	173
7.2 模型窗口的基本操作和参数设置 .....	174
7.3 影响仿真速度与精度的因素 .....	180
<b>第 8 章 Simulink 中的信号操作</b> .....	184
8.1 Simulink 信号的基础知识 .....	184
8.2 信号的显示 .....	188
<b>第 9 章 Simulink 系统建模和仿真举例</b> .....	192
9.1 连续系统的建模与仿真 .....	192
9.2 离散时间系统的建模与仿真 .....	195
9.3 混合系统的建模与仿真分析 .....	198

---

<b>第 10 章 Simulink 仿真的调试技术</b> .....	200
10.1 调试器窗口简介 .....	200
10.2 模型的调试 .....	202
<b>第 11 章 Simulink 的子系统技术</b> .....	207
11.1 简装子系统的建立与操作 .....	207
11.2 精装子系统 .....	209
11.3 子系统创建实例 .....	217
11.4 条件执行子系统 .....	225
<b>第 12 章 Simulink 仿真技术进阶</b> .....	234
12.1 Simulink 仿真中的过零检测问题 .....	234
12.2 Simulink 仿真中的代数环问题 .....	238
12.3 S 函数技术简介 .....	241
12.4 Simulink 的高级积分器 .....	247
12.5 示波器模块的使用技术 .....	250
<b>第 13 章 电气和机构系统专业模块库及其应用</b> .....	255
13.1 SimPowerSystems 模块库简介 .....	255
13.2 一个模拟电路仿真实例 .....	260
13.3 SimMechanics 模块库简介 .....	265
13.4 SimMechanics 仿真实例 .....	270
<b>参考文献</b> .....	283



# 第 1 章 仿真技术概述

仿真(Simulation)是对系统进行研究的一种技术或方法。一般也称为系统仿真。它要求首先建立待研究系统的数学或者物理模型,然后对模型进行实验研究。更具体地来讲,所谓系统仿真,是以计算机为主要工具,通过在计算机(或其他形式的物理模型)上运行模型来再现系统的运动过程,从而认识系统规律的一种研究方法。

由于系统仿真以计算机为主要工具,系统仿真的主要内容是如何在计算机上建模与仿真,因此系统仿真技术通常也称为计算机仿真技术。它是以计算机科学、系统科学、控制理论和应用领域有关的专业知识为基础,以计算机为工具,利用系统模型对实际的或设想的系统进行分析、研究与实验的一门新兴技术。现代计算机仿真技术综合集成了计算机、网络、图形图像、多媒体、软件工程、信息处理、自动控制等多个高新技术领域的知识,是对系统进行分析与研究的重要手段。计算机仿真技术具有良好的可控性、无破坏性、安全、可靠、不受外界条件(如气象条件和场地空域)的限制、可多次重复、具有高效和经济性等特点,因而近年来发展非常迅速,已经成为当今众多领域技术进步所依托的一种基本手段。

计算机仿真在各种工程领域和非工程领域中已经有很多成功应用的范例,其成效十分显著,影响很大。例如在宇航工业中,有著名的“阿波罗”登月仿真系统。该系统包括混合计算机、运动仿真器、月球仿真器、驾驶舱、视景系统等,可实现在计算机上预先对登月计划进行分析、设计与检验,同时还可对宇航员进行仿真操作训练,从而大大降低了实际登月的风险。

在非工程领域,著名的例子有罗马俱乐部建立的“世界模型”仿真系统。该系统选择 5 个能影响世界未来发展的重要因素,即人口增长、工业发展、环境污染、资源消耗和食品供应,来预测世界未来发展的趋势并据此提出了“零增长方案”。尽管该模型仿真的最后结果引起了世界范围的广泛争论,但其研究方法却具有开创性。我国科学家建立的中国人口模型仿真系统也获得了很大的成功,在国内外学术界颇有影响。该仿真系统成功地预测了未来 100 年我国人口发展的趋势,为制定科学的人口政策提供了理论依据。

系统仿真方法的成功应用,迅速提高了这一方法在科学研究和技术开发中的地位,引起科学界和工业界的广泛关注与重视。人们逐步认识到,系统仿真已成为继理论分析和实物实验(或演习)之后,认识客观世界规律性的又一强有力的手段。它可以把复杂系统的运行过程放在实验室中进行或者在计算机上模拟,在辅助决策、最优设计、计划优化、管理调度、方案比较、规划制定、军事训练、人员培训、投资风险分析、辅助设计以及谈判策略确定等许多方面都有巨大的应用前景。

计算机仿真是系统仿真学科的主要分支。本章将首先概要介绍系统仿真涉及的基本概念和系统仿真的分类,然后在此基础上重点分析计算机仿真的定义、特点、作用与步骤,最后介绍系统仿真技术的应用及其发展历程和趋势。

## 1.1 系统、模型与仿真的含义

对“仿真”一词的含义,人们有不同的理解。一般认为仿真就是对系统模型的实验研究,对计算机仿真而言,就是仿真程序的运行。该程序表示对一个实际系统进行某种抽象后得出的模型,用该模型来研究这一系统所具有的一些特征。

系统、模型和仿真是系统仿真学科首先要关注的三个基本概念。

### 1.1.1 系统

仿真技术应用的对象是系统。系统通常定义为具有一定功能,按某种规律相互联系又相互作用着的对象之间的有机组合。仿真所关注的系统是广义的,它泛指人类社会和自然界的一切存在、现象与过程。

系统可分为生命系统与非生命系统、工程系统与非工程系统等。如电气、机械、化工、热力、光学等属于工程系统;经济、社会、交通、天气等属于非工程系统。

一般认为,系统是真实世界的一部分,是几个相互作用的分系统的集合。在这个描述中,隐含了递归的概念:一个系统由若干个分系统组成,而每一个分系统又是更低一层分系统的集合,如此直至无穷。若用分解的观点来看待系统,则集合论是研究系统的最好工具。系统的定义符合建立抽象集合结构的要求。这个集合结构总是可以用若干个同类结构的集合来替换,从而不断地使其具体化。

任何系统的研究都需要关注三个方面的内容,即实体、属性和活动。

- (1) 实体——组成系统的具体对象;
- (2) 属性——实体所具有的每一项有效特性(状态和参数);
- (3) 活动——系统内的对象随时间推移而发生的状态变化。

由于组成系统的实体之间相互作用而引起的实体属性变化,通常用“状态”的概念来描述。研究系统,主要就是研究系统状态的改变,即系统的进展或演化。

从边界的因素来看,系统的活动可分为:

- (1) 内生活动——系统内部实体相互作用产生的活动;
- (2) 外生活动——由于系统外部环境影响而产生的活动。

仅考虑内生活动的系统称为封闭系统;既考虑内生活动又考虑外生活动的系统称为开放系统。

任何系统都具有一定的结构,没有无结构的系统。作为系统论的一个基本范畴的结构,指的是系统内部各组成实体之间在空间(包括数量比例)或时间方面的有机联系与相互作用的方式或顺序。系统有序性愈高,结构愈严密。因此,任何系统所具有的整体性,都是在一定结构基础上的整体性,仅有实体,还不能组成系统,必须在实体的基础上,以某种方式和关系相互作用,才能形成系统结构。

系统与外部环境相互联系和作用过程的秩序和能力称为系统的功能。系统功能体现了一个系统与外部环境之间的物质、能量和信息的输入与输出的变换关系。系统的结构与功能是一对不可分割的范畴,系统的结构是完成系统功能的基础。结构与功能分别说明了系统的内部作用和外部作用。功能是一个过程,它反映了系统对外界作用的能力,是由系统的结构所决

定的,由系统整体的运动表现出来。

对于一个飞机自动驾驶系统,如图 1.1.1 所示,系统的实体是机体、陀螺仪及控制器。它的属性是航向、速度、陀螺仪及控制器特性等。它的活动则是机体对控制器的响应等。对于一个工厂系统,如图 1.1.2 所示,系统的实体是部门、原料、订单及产品。它的属性是原料类型、订单数量及各部门的设备数量。它的活动则是各个部门的生产过程。

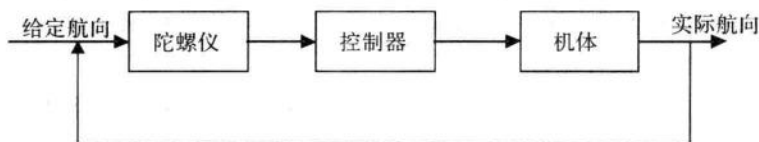


图 1.1.1 飞机自动驾驶系统

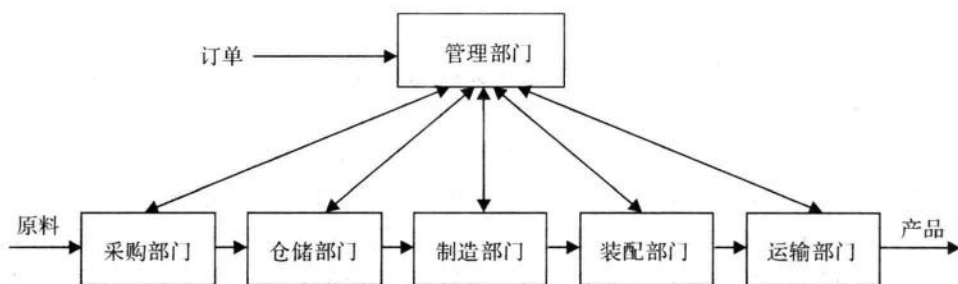


图 1.1.2 工厂系统

研究系统不仅需要研究系统的实体、属性和它的活动,还需要研究系统的环境。环境是指对系统的活动结果产生影响的外界因素。自然界的一切事物都存在着相互联系和相互影响,而系统是在外界因素不断变化的环境中产生活动的,因此,环境因素是必须予以考虑的。应该注意到系统与环境的边界是不确定的,它们随研究的目的不同而异。例如,对于工厂系统的订货问题,既可将其视为环境对生产产生的影响,也可将其纳入系统作为系统内的活动来考虑。

需要说明的是,一次具体的研究不需要也不可能关注一个实际系统的所有实体、属性、活动及环境,而只需要关注与研究目的有关的部分。

### 1.1.2 模型

“模型”的概念与“原型”对应。模型在科学方法论中被定义为人们为了特定的研究目的而对认识对象所做的简化描述。原型则是与模型相对应的被认识对象。就模型与原型的关系而言,可以把模型视为原型物质的或观念上的类似物。据此可以把模型分为实物模型和抽象模型两大类。实物模型是以某种程度上相似的实物去再现原型。它既可以是人工构造的,也可以是从自然界获取的,如地球仪、船模、动植物标本等。抽象模型则是原型客体在人们思想中理想化、纯化的抽象性再现,如理想气体模型、原子的行星模型、分子的空间结构模型等。

模型方法是通过研究模型来揭示原型的形态、特征和本质的方法。在当代科学研究中,模型方法的重要性越来越为人们所认识,被视为科学研究方法的核心。

要进行仿真,首先要寻找一个实际系统的“替身”,这个“替身”就是模型。它不是原型的复现,而是按研究的侧重面或实际需要进行了简化提炼,以利于研究者抓住问题的本质或主要矛盾。这种研究对预测问题,以及因种种原因不可能在原型系统上进行实验的问题尤为重要。

### 1. 模型的建立

科学研究的绝大部分工作就是建立形式化的模型。科学家企图通过观察和实验,建立抽象的表示方法和定律。这些方法和定律是对现实世界中已被证明的假设进行形式化。这些“形式化”模型,只有在概括了实际系统的基本性质后才有可能被用来进行推论、分析、设计,从而在某种意义上给人们提供控制能力。

人与外部世界的相互作用,一般是由认识世界和利用与改造世界两个不同的步骤组成的。第一步,人们通过建立一种抽象的表示方法,来获得对自然的充分理解,产生一个现实世界的模型。这一步是认识和建立“形式化”模型的阶段,这个阶段是面向科学的。科学研究的目的是按照人类的意志,对现实世界进行控制。因此,就会有第二步,即分析和利用“形式化”模型的阶段。这后一步显然具有工程的特点。

人具有抽象思维的功能,从而有能力进行模式识别,进行综合、计算和记忆等。人所用的建模方法是各种能力在特定条件下结合的结果。但是,对于建模活动,人的能力是有限的。人的局限性对建模研究的发展产生影响,这就促使人们有必要去探求一些有益于弥补这些局限性的方法和工具。例如,测量仪器可以扩展人的传感能力。特别是计算机,它可在模型建立和模型利用方面发挥重要的作用。计算机仿真就是计算机在这方面作用的重要表现。

模型集中反映了系统的某些方面的信息。它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化。因此,模型描述可视为对真实世界中的物体或过程的相关信息形式化的结果。模型是对系统某些本质方面的描述,可采用各种可用的形式提供被研究系统的信息。模型在所研究系统的某一侧面具有与系统相似的数学描述或物理描述。尤其要注意的是,模型是按研究目的的实际需要和侧重面,寻找一个便于进行系统研究的“替身”。因此,在较复杂的情况下,对于由许多实体组成的系统,由于研究目的不同,对同一个系统可以产生相应于不同层次或不同侧面的多种模型,这就是系统模型的多样性。例如:一些模型反映了整个实际系统的部分属性,而另一些模型则提供了系统更全面的描述;一些模型包括了实际系统的全部组成实体,而另一些模型则强调了系统的某些侧面,忽略了另外一些方面,从而只包括实际系统的部分组成实体。这些现象表明,根据系统研究的实际需要,可对模型进行粗化(简化)或精化(详细化),也可以对模型进行分解或组合。

模型作为系统的原型在研究时的“替身”,在选择时,要以便于达到研究的目的为前提。所以,对模型描述通常应该注意以下六条原则:

(1)相似性原则。模型与所研究系统在属性上应具有相似的特性和变化规律,亦即“原型”与“替身”之间具有相似的物理属性或数学描述。

(2)切题性原则。模型只应该针对与研究目的有关的方面,而非系统的一切方面。亦即一个系统的模型不是唯一的,模型结构的选择应依据研究目的进行。

(3)吻合性原则。选择的模型结构,应尽可能对所利用的数据作合理的描述。通常,其实验数据应尽可能由模型来解释。

(4)可辨识性。模型结构必须选择可辨识的形式。若一个结构具有无法估计的参数,则此结构就没有实用价值。

(5)简单化。从实用的观点来看,由于在模型的建立过程中,忽略了一些次要因素和某些不可测变量的影响,因此,模型实际上已是一个被简化了的近似模型。一般而言,在实用的前提下,模型越简单越好。

(6)综合精度。它是模型框架、结构和参数集合等项精度的一种综合指标。若有限的信息限制了模型的精度,最有效的模型就应是各方面精度的平衡和折中。

## 2. 模型描述的三种层次

模型可以在不同的抽象层次上描述一个系统,一般来讲,存在着以下三种层次的描述:

(1)行为层次。在这个层次上描述系统,是将它看成一个黑盒,并且对它施加一个输入信号,然后对它的输出信号进行测量与记录。为此,至少需要一个“时间基”,它一般是一个实数的区间(连续时间),或者是一个整数的区间(离散时间)。一个基本的描述单位是“轨迹”,它是从一个时间基的区间到表示可能的观测结果的某个集合上的映射。一个“行为描述”是由这样一组轨迹的集合所组成的。这种描述也可称为系统的“行为”。通常,在仿真概念上,加到黑盒上的以箭头表示的某个变量被看成是输入,它不受盒子本身的控制;而另一个是输出,它指向表示系统边界以外的环境。

因为对实际过程的试验是处于行为层次上的,所以在这个层次的描述是十分重要的。同时,这个层次上的描述比起下面所要介绍的结构描述要简单一些。

(2)状态结构层次。在这个层次上描述的系统,是将它看成一个已了解内部工作情况的机构。这种描述通过在时间上的递推足以产生一种轨迹,即行为。能产生这种递推的基本单位是“状态集”以及“状态转移函数”。前者表示任意时刻所有可能的结果,而后者则提供从当前给定状态计算未来状态的规则。在状态结构层次上的描述比在行为层次上的描述更具有完整性,状态集将足以计算出系统的行为。

(3)分解结构层次。在这个层次上描述系统,是将它看成由许多基本的黑盒互相连接起来而构成的一个整体。这种描述也可称为网络描述,其中的基本黑盒称为成分,它给出了一个系统在状态结构水平上的描述。另外,每个成分必须标明“输入变量”和“输出变量”,还必须给出一种“耦合描述”,它确定了这些成分之间的内部连接及输入与输出变量之间的界面。人们可以进一步分解系统,从而获得更深一层的描述。

## 3. 数学模型及其作用

计算机仿真中采用的模型都是数学模型。“数学模型”是根据物理概念、变化规律、测试结果和经验总结,用数学表达式、逻辑表达式、特性曲线、试验数据等来描述某一系统的表现形式。数学模型的本质,是关于现实世界的一小部分和几个方面抽象的数学“映像”。这种系统允许对现实世界中的过程在不同的详尽程度上进行数学描述(“编码”)。这样,便可将各种不同的模型彼此联系起来,并将相互之间的关系隐含于数学之中。

数学模型无论是在纯科学领域,还是在工程上,都有其广泛应用。其作用主要体现在以下两个方面:

(1)深化认识。数学模型可帮助人们不断加深对现象的认识,并启发人们去进行有可能获得满意结果的试验。这种作用具有较多的“被动”性质。

(2)提高决策能力。数学模型的研究,能提高人们的决策和干预能力。这种作用具有“主动”性质。

数学模型是用符号和数学方程式来表示一个系统的。其中,系统的属性用变量表示,而系

统的活动则用相互关联的变量间的数学函数关系式来描述。也就是说,一个系统的数学模型,是由某种形式语言对该系统的描述。由于任何数学描述都不可能是全面的和完全精确的,所以系统的数学模型不可能对系统作完全真实的描述,而只能根据研究目的对它作某种近似简化的描述。

在以物理为基础的科学中,数学模型方法的实质是:首先对所研究的实体进行观察(特别重要的是实验观察),充分地占有观察材料,分析观察材料的各种发展形式,探讨这些形式的内在联系,利用研究者的知识、经验和见识,演绎出以假说形式提出的说明实体规律的理论;用数学语言陈述这个理论,建立实体的数学模型。大多数数学模型是数学方程(微分方程、积分方程或代数方程),它的解提供了实体运动规律的说明;通过新的观察来证实、修改或否定这种假说;经过证实的假说就成为严格的科学理论,它能普遍地、正确地说明实体的运动变化规律。在这类科学研究中,实验观察条件是极为严格的。由于观察过程以纯粹形态进行,因此,观察过程和观察结果具有可重复性。如果实验观察结果与数学模型的解是一致的,那么数学模型的唯一性和正确性就得到证实。

### 1.1.3 仿真

系统仿真是建立系统的模型(数学的、物理效应的或数学-物理效应的模型),并在模型上进行试验。例如,将按一定比例缩小的飞行器模型置于风洞中吹风,测出飞行器的升力、阻力、力矩等特性;要建一个大水电站,先建一个规模较小的小水电站来取得建设水电站的经验及其运行规律;指挥员利用沙盘来指挥一个战役或一场战斗;等等。这些都是模型上进行试验的例证。

系统仿真技术实质上就是建立仿真模型和进行仿真实验的技术。“仿真”的含义有不同的理解和解释。通常认为,系统仿真是用能代表所研究系统的模型,结合环境(实际的或模拟的)条件进行研究、分析和实验的方法。它作为一种研究方法和实验技术,直接应用于系统研究,是一种利用相似和类比的关系间接研究事物的方法。

#### 1. 系统仿真三要素与三个基本活动

系统仿真的过程可通过图 1.1.3 所示的三个要素间的三个基本活动来描述。

所谓“模型建立”,是通过对实际系统的观测或检测,在忽略次要因素及不可检测变量的基础上,用物理或数学的方法进行描述,从而获得实际系统的简化近似模型。这里应该注意模型的实验性质,即模型同实际系统的功能与参数之间应具有某种相似性和对应性,这一点应尽可能不被数学演算过程所掩盖。否则,仿真研究就成为一种数值求解方法。

仿真模型反映了系统模型(简化模型)同仿真器或计算机之间的关系,它应能为仿真器或计算机所接受,并能进行运行。例如,计算机仿真模型,就是对系统的数学模型进行一定的算法处理,使其在变成合适的形式(如将数值积分变为迭代运算模型)之后,能在计算机上进行数字仿真的“可计算模型”。显然,由于采用的算法引进了一定的误差,因此仿真模型对实际系统来讲是一个二次简化模型,故“仿真模型建立”有“二次建模”之称。

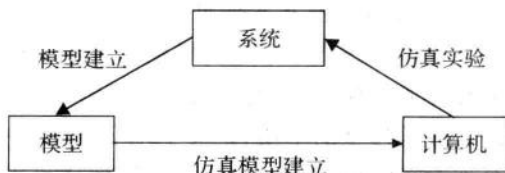


图 1.1.3 计算机仿真三要素和三个基本活动

“仿真实验”是指对模型的运行。例如,计算机仿真,就是将系统的仿真模型置于计算机上运行的过程。仿真通过实验研究实际系统的一种技术,通过仿真活动可以弄清系统内在结构变量和环境条件的影响。因此,为了使模型能够运行,需要设计一个合理、方便、服务于系统研究的实验步骤和软件。例如:

(1)为了深入研究和优化结果,需要进行探索性的多次运行。

(2)为了探索最佳状态,需要具有良好的人机交互能力,以保证灵活而方便地实现仿真模型的修改。

(3)为了增加可信度,应该能在条件允许的情况下,方便地在仿真模型中引入实际部件,从而实现部分的实物替代。

## 2. 系统仿真的依据——相似性原理

系统仿真最基本的依据是相似性原理。人们在认识世界的长期实践中发现:许多不同事物的行为与特性之间都存在着相似性现象。按照唯物辩证法来讲,任何现实存在的事物都是共性和个性的统一,矛盾的普遍性与特殊性的统一。共性寓于个性之中,特殊性当中存在着普遍性。相似性正是这一唯物辩证法基本原理的反映。众多科学家的发明或发现都用到相似性原理。从1638年伽利略论述的“威尼斯人在造船中应用几何相似原理”、1686年牛顿在其名著《自然哲学的数学原理》中讨论的“两个固体运动过程中的相似法则”,到1848年柯西从弹性物体的运动方程导出了集合相似物体中的声学现象与规律,再到1920年左右M. B. 基尔比切夫在其“弹性现象中的相似性定理”问题研究中使“相似性原理”得以逐步完善,可以说“相似性原理”是科技创新与应用的桥梁。

系统仿真中主要关注如下的相似关系:

(1)几何相似。在几何学中,相似性具有多种“等比”特性。按比例缩小的飞行器模型、一个战场的沙盘即属于几何比例相似。在“风洞实验”与“水池船舶实验”等问题的研究中也广泛应用着几何相似原理。同理,在实验科学研究中还常常应用“时间相似”“速度相似”“动力学相似”等原理。

(2)环境相似。在有人参与的仿真实验系统如虚拟现实,往往追求眼、耳、鼻甚至还有触觉器官的真实性。因此,“环境相似”就成为相似方式的重要环节。它可使得仿真系统更为逼真。另外,“气象实验室”“冻土工程实验室”显然也是应用了环境相似原理。环境相似已经成为现代仿真技术之一的“虚拟现实”的基本要素之一。

(3)性能相似。性能相似又称为“数学相似”,指的是不同的事物可以用相同的数学模型来描述其动态过程。如两个系统,一个是弹簧系统(属机械系统),另一个是RLC网络(属电气系统),其运动的物理本质完全不一样,但运动所遵循的微分方程在形式上却是相似的。正如恩格斯所指出的:“自然界的统一性,显示在关于各种现象领域的微分方程的‘惊人类似’之中。”图1.1.4给出了几种不同物理过程的性能相似实例。性能相似原理是计算机仿真所遵循的基本原则。

(4)思维相似。人的思维方式包括逻辑思维和形象思维,在模拟人的行为和仿真实验中,应遵循思维相似的原则。逻辑思维相似主要是应用数理逻辑、模糊逻辑等理论,通过对问题的程序化,应用计算机来仿真人的某些行为,如专家系统、知识库、企业管理ERP等。形象思维相似主要是应用神经网络等理论来模拟人脑所固有的大规模并行分布处理能力,以模拟人能够瞬时完成对大量外界信息的感知与控制的能力。

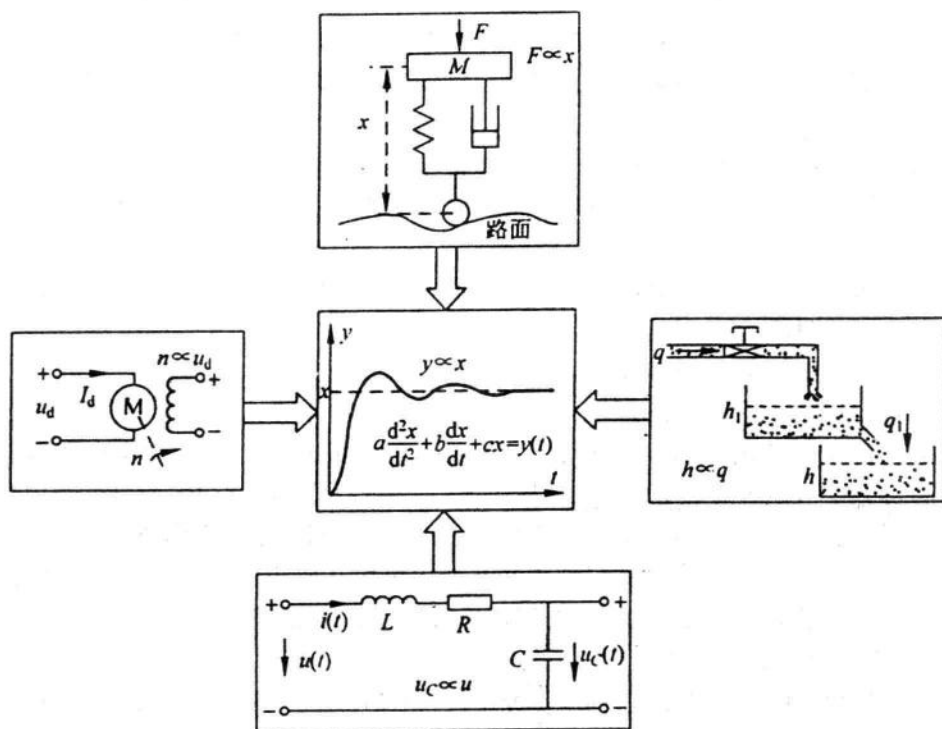


图 1.1.4 几种不同物理过程的性能相似实例

(5)生理相似。为了有效地对人体本身进行模拟,以推进现代医学、生物学、解剖学等的发展,生理相似理论已有长足的发展(如人体生理系统数学模型 Human),但是,由于人体生理系统是一个十分复杂的系统,甚至还有许多机理至今尚未搞清楚,所以生理相似理论还不完善,这也是当今仿真技术中一个重要的交叉学科。

相似性原理目前已逐步发展成为一门独立的边缘学科——相似理论,而且正在形成从基础科学的相似论与相似系统理论到应用科学的相似工程学。相似理论的发展,为相似工程的应用提供基础,主要表现在以下几个方面:

- (1)相似理论是从系统的角度而非个别现象出发来研究相似问题。
- (2)相似理论把相似性问题从概念明确提升到数值确定,把定性分析与定量计算结合起来。
- (3)相似理论论证了可变相似性,可进行相似性动态分析。
- (4)通过对不同系统间相似特性的研究,可找出系统之间的相互关系。
- (5)通过找出各种系统间存在相似性的原因,可研究相似性的形成过程和演变动力。

相似理论的基本原理包括同序结构原理、信息原理和支配原理等。这些原理反映了相似系统的形成和演变规律。系统仿真本质上就是依据相似规律人为地建立某种形式的相似模型去模拟实际系统,因此在仿真过程中应自觉地应用相似理论的这些基本原理。

(1)同序结构原理。同序结构原理认为,任何系统都有一定的序结构。序结构的规律性形成有序结构,其中包括空间有序、时间有序和功能有序。系统的序结构决定了系统的整体特



性。当系统结构存在共同性时,系统之间存在相似性,其相似程度的大小取决于系统序结构的共同性程度的大小。基于系统相似性的仿真模型应以某种形式并在一定程度上反映实际系统的空间序结构、时间序结构和功能序结构的规律性。

具体来说,空间有序表征系统组成要素的空间排列、组合和联系方式的规律性;时间有序表征系统要素随时间变化的运动规律;功能有序表征系统要素在相互作用过程中所表现出的各种功能发挥秩序的规律性。

以随机服务系统为例,顾客、队列和服务台等系统要素及其相互关系形成了该系统的空间序结构;顾客到达时间、排队等待时间和服务时间等形成了系统的时间序结构;系统的功能包括排队、对顾客的选择服务等,形成了系统的功能序结构。仿真就是首先用数学语言,然后用计算机程序描述该系统的序结构,由此形成的仿真模型如能反映相似理论的同序结构原理,则仿真模型与实际系统就具备了同序结构上的相似性。

(2)信息原理。相似理论的信息原理认为,系统的序结构的形成和演化与系统的信息作用相关。不同系统的信息作用存在共同性时,系统间会形成相似性。信息作用的内容、形式和信息场强度及其分布规律越接近,系统间的特性越相似。基于系统相似性的仿真模型应反映系统的信息作用规律,包括信息作用的内容、形式和信息场强度及其分布规律。

例如,在前述随机服务系统中,顾客到达的时间间隔的概率分布可以看成是系统的信息之一,对应不同的分布规律会产生不同的时间序结构。如果要对一个温度控制系统进行仿真,就必须把实际温度作为反馈信息,与规定温度进行比较,产生偏差信息,并将其转换成某种形式的控制信息,从而反映实际系统的功能序结构。多媒体仿真一般应具有听觉和视觉功能,因此必须考虑音响信息和图像信息的产生、传递和相互作用关系,相应地设计音响和图像发生系统,其仿真系统的空间序结构和功能序结构较一般仿真而言有所不同,且与实际系统具有不同性质和不同层次的相似性。

(3)支配原理。相似理论的支配原理认为,受相同自然规律支配的系统间存在一定的相似性。系统相似程度的大小取决于支配系统的自然规律的接近程度。基于系统相似性的仿真模型应该反映支配实际系统的自然规律。因此,应研究这些自然规律,并以某种形式体现在仿真模型中。例如,人口增长、种群繁殖及新产品和新技术的推广在一定条件下具有指数增长规律或阻滞增长规律,这些都可以用相同形式的微分方程模型表示,据此建立的仿真模型则可以反映出不同系统的相同的动态变化过程。

相似系统理论是相似理论中的重要内容和理论基础。它主要从系统角度,研究各种系统间普遍存在的相似性,各种性质的共同性及差异性,揭示自然界中存在的各种相似系统的形成原理和演变规律。

相似理论可以广泛地应用于科学实验中,小到分子原子,大到宇宙天体,相似理论可以帮助人们揭示事物间内在的联系及其动力学特性。

总之,相似理论是实验科学的基础,也是仿真实验所遵循的基本原则。

### 3. 系统仿真的含义

60多年来,随着系统仿真技术的飞速发展,系统仿真的概念已大大拓展。中国系统仿真学会对系统仿真的定义为:“建立系统模型(数学模型、物理模型或数学-物理模型),在模型上进行试验称为系统仿真。”我国著名系统仿真专家黄柯棣教授给出了更为广义的定义:“系统仿真是建立系统、过程、现象和环境的模型(物理模型、数学模型或其他逻辑模型),在一段时间内