



普通高等教育“十二五”规划教材

# 机电系统仿真技术

曹岩 主编

田建辉 房亚东 副主编

JIDIAN XITONG  
FANGZHEN JISHU



化学工业出版社

013063928

TH-39  
234



普通高等教育“十二五”规划教材

# 机电系统仿真技术

曹岩 主编

田建辉 房亚东 副主编



JIDIAN XITONG  
FANGZHEN JISHU



北航

C1665059



化学工业出版社

北京

TH-39

234

013083828

本书内容主要包括：计算机仿真技术及应用，机电系统仿真与虚拟样机，机械系统的建模和结构分析，ADAMS 概述和零件建模，施加约束，施加载荷，起重机的建模与仿真，送料机构的建模与仿真，蜗轮蜗杆传动的建模与仿真，锻压机的建模与仿真，收割机传动装置的建模与仿真，传送装置的建模与仿真，急回机构的建模与仿真，弯锯机构的建模、仿真与优化，颚式破碎机的建模、仿真与测试等内容。

本书可作为机械设计制造及其自动化、机械设计及理论、机械电子工程等专业的研究生、本科生高年级教材，也可作为高等职业学校、高等专科学校、成人院校的机电一体化、数控技术及应用、机械制造及自动化等专业的教材，还可作为相关工程技术人员的参考资料或培训教材。

# 机电系统仿真技术

主编 曹岩

副主编 宋亚东 魏重田

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机电系统仿真技术/曹岩主编. —北京：化学工业出版社，2013.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-17564-9

I. ①机… II. ①曹… III. ①机电系统-系统仿真-高等学校-教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 122654 号

责任编辑：高 钰  
责任校对：宋 玮

文字编辑：吴开亮  
装帧设计：史利平

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 280 千字 2013 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：25.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

计算机仿真技术是以多种学科和理论为基础,以计算机及其相应的软件为工具,通过虚拟试验的方法分析和解决问题的一门综合性技术。仿真科技作为信息时代除理论推导和科学试验之外的第三门新型科研方法,其技术及相关产品广泛应用于工业产品的研究、设计、开发、测试、生产、培训、使用、维护等各个环节。

机电系统仿真设计包括仿真与设计两个方面,它们是相辅相成、互相促进的。机电系统的设计过程要用到设计对象的不同原理及方法,机电系统的仿真过程一般是借助于软件进行操作,不同的软件其主要功能及其仿真对象不尽相同,比较常用的仿真软件有 MATLAB 科学计算软件,ADAMS 动力学仿真软件,ANSYS 仿真分析软件等。本教材重点介绍基于 ADAMS 的机电系统仿真技术。

本教材在编写上具有如下特色。

- 作为机械专业的专业课教材,突出专业性,重点讲解机械专业课相关的高级理论、技术、工具和应用。内容选择尽量集中凝练,突出关键内容,以期以点带面,除了通过课程学习使学生掌握核心的、必需的高级专业知识外,还能对以后的知识和学习起到辐射作用。

- 突出实用性和实践性,注重理论与实践的结合,将知识的阐述与功能强大的专业工具以及工程应用结合在一起,使学生除了具有高级理论知识之外,更具有对工程问题的解决方法、手段和能力。

- 突出综合性,从工程应用的实际出发,从多个角度和层面分析工程问题,并注意内容组织的系统性。

- 突出先进性,体现专业领域的最新发展。

- 编写方式的渐进性,强调通俗易懂,由浅入深,并力求全面、系统和重点突出;除正文内容外,各章都附有思考与练习题。

本书可作为机械设计制造及其自动化专业、工业工程专业的研究生、本科生教材,也可作为高等职业学校、高等专科学校、成人院校的机电一体化、数控技术及应用、机械制造及自动化等专业的教材,还可作为工程技术人员和管理人员的参考资料或培训教材。

本教材得到西安工业大学研究生教材建设项目立项支持。本教材由曹岩教授主编,负责内容规划和通稿;由田建辉、房亚东博士担任副主编,负责内容校对。第 1~4 章由田建辉编写;第 5、6 章由孙瑜编写;第 7~10 章由杜江编写;第 11~16 章由曹岩编写。在本教材的编写过程中,蕾蕾、周爱玲、吴雨佳、穆倩等参与了资料的收集、整理和编写工作。

由于作者水平和经验有限,疏漏在所难免,不当之处,恳请读者提出宝贵意见,我们会在适当时机进行修订和补充,在此深表谢意。

编者

2013 年 5 月

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	001
1.1 系统概念及分类 .....	001
1.2 模型概念及分类 .....	002
1.3 数学模型建立过程及特点 .....	003
1.4 模型研究与计算机仿真 .....	006
1.5 计算机仿真技术现状与未来 .....	007
思考题.....	009
<b>第 2 章 计算机仿真技术及应用</b> .....	010
2.1 模拟仿真与混合仿真 .....	010
2.2 连续系统仿真技术 .....	013
2.3 离散事件系统仿真技术 .....	014
2.4 仿真语言与先进仿真技术综述 .....	015
2.5 仿真输出结果分析与评估 .....	017
思考题.....	018
<b>第 3 章 机电系统仿真与虚拟样机</b> .....	019
3.1 机电系统的基本概念和组成 .....	019
3.2 机电系统仿真设计原理和主要内容 .....	020
3.3 虚拟样机技术的研究范围 .....	021
3.4 虚拟样机相关技术 .....	023
3.4.1 虚拟样机建模技术.....	023
3.4.2 多领域、多学科分布式协同仿真技术.....	024
思考题.....	029
<b>第 4 章 机械系统的建模和结构分析</b> .....	030
4.1 机械系统组成 .....	030
4.2 自由度 .....	031
4.3 刚体运动方程 .....	032
4.3.1 力系的简化.....	033
4.3.2 刚体的运动微分方程.....	034
思考题.....	034
<b>第 5 章 ADAMS 概述和零件建模</b> .....	035
5.1 ADAMS 概述 .....	035
5.2 在 ADAMS 中建模和仿真的步骤 .....	036
5.3 坐标系 .....	036
5.4 几何建模工具 .....	037
5.5 典型零件建模过程 .....	044

880	思考题	048
<b>第 6 章</b>	<b>施加约束</b>	<b>049</b>
880	6.1 约束命令简介	049
890	6.1.1 约束分类	049
890	6.1.2 常用运动副	049
190	6.1.3 指定约束	050
190	6.1.4 凸轮机构	051
190	6.1.5 定义机构的运动	052
290	6.2 约束的施加	052
390	6.3 典型零件的施加约束过程	055
390	思考题	057
<b>第 7 章</b>	<b>施加载荷</b>	<b>058</b>
780	7.1 作用力的类型	058
780	7.2 作用力的类型	059
890	7.3 典型零件施加载荷过程	062
990	思考题	066
<b>第 8 章</b>	<b>起重机的建模与仿真</b>	<b>067</b>
990	8.1 模型分析	067
101	8.2 创建模型	067
201	8.2.1 启动 ADAMS 并设置工作环境	067
301	8.2.2 创建长方体	069
301	8.2.3 创建圆柱体	070
301	8.2.4 创建倒角	072
401	8.3 创建约束	075
501	8.4 创建力	076
601	8.5 仿真分析	080
701	8.5.1 模拟仿真	080
701	8.5.2 对 bucket 分析	081
811	8.5.3 保存	083
111	思考题	083
<b>第 9 章</b>	<b>送料机构的建模与仿真</b>	<b>084</b>
111	9.1 模型分析	084
111	9.2 曲柄滑块机构模型创建	084
211	9.2.1 启动并设置工作环境	084
311	9.2.2 创建机构模型	086
311	9.2.3 创建约束	087
411	9.3 测试模型	087
511	9.3.1 模型仿真	087
611	9.3.2 施加载荷后的测试	088
811	9.3.3 设置驱动力矩, 测量滑块的位置和速度	088

850	9.3.4	后置处理	088
910	9.3.5	系统优化设计	091
940		思考题	092
	<b>第 10 章</b>	<b>蜗轮蜗杆传动的建模与仿真</b>	093
940	10.1	模型分析	093
970	10.2	创建模型	094
130	10.2.1	启动 ADAMS 并设置工作环境	094
170	10.2.2	创建蜗轮	094
180	10.2.3	创建蜗杆	095
220	10.3	添加约束和驱动	096
230	10.3.1	创建旋转副	096
260	10.3.2	创建啮合点	096
270	10.3.3	创建齿轮副	097
320	10.3.4	创建旋转驱动	097
330	10.3.5	进行啮合点的坐标轴旋转	098
370	10.4	仿真验证	099
380	10.4.1	测量蜗轮旋转角度	099
380	10.4.2	仿真模型	099
420		思考题	101
	<b>第 11 章</b>	<b>锻压机的建模与仿真</b>	102
430	11.1	锻压机的机械结构的分析	102
470	11.2	锻压机的机构模型的创建	102
470	11.2.1	ADAMS 的启动和环境的设置	102
510	11.2.2	模型创建	104
570	11.3	添加约束——创建旋转副与平移副	105
680	11.4	机构仿真分析	105
690	11.4.1	速度仿真	106
730	11.4.2	扭矩仿真	107
780		思考题	110
	<b>第 12 章</b>	<b>收割机传动装置的设计与仿真</b>	111
780	12.1	模型分析	111
830	12.2	创建模型	111
830	12.2.1	启动 ADAMS 并设置工作环境	111
880	12.2.2	创建模型	113
890	12.3	添加约束和施加载荷	115
920	12.3.1	创建旋转副	115
980	12.3.2	创建平面副	116
980	12.3.3	施加驱动	117
990	12.4	仿真分析	118
990	12.4.1	仿真	118

	12.4.2 仿真结果 .....	119
	思考题 .....	123
<b>第 13 章</b>	<b>传送装置的建模与仿真 .....</b>	<b>124</b>
	13.1 启动 ADMAS 并设置工作环境 .....	124
	13.2 创建模型 .....	126
	13.2.1 创建连杆 .....	126
	13.2.2 创建滑块 .....	126
	13.2.3 创建地面 .....	127
	13.3 添加约束 .....	127
	13.3.1 添加旋转副 .....	127
	13.3.2 添加平移副 .....	127
	13.4 仿真分析 .....	128
	13.4.1 设置参数 .....	128
	13.4.2 仿真结果 .....	129
	13.4.3 添加扭矩及仿真 .....	130
	思考题 .....	131
<b>第 14 章</b>	<b>急回机构的建模与仿真 .....</b>	<b>132</b>
	14.1 模型分析 .....	132
	14.2 启动并设置工作环境 .....	132
	14.2.1 启动 ADAMS .....	132
	14.2.2 设置工作环境 .....	133
	14.3 创建机构的各个部分与连接关系 .....	135
	14.3.1 创建偶合的两构件 .....	135
	14.3.2 建立连接关系 .....	136
	14.3.3 建立曲柄机构 .....	136
	14.3.4 建立机架 .....	142
	14.3.5 建立滑块 .....	142
	14.4 创建驱动并保存 .....	144
	14.5 仿真 .....	145
	思考题 .....	151
<b>第 15 章</b>	<b>弯锯机构的建模、仿真与优化 .....</b>	<b>152</b>
	15.1 工作环境设置 .....	152
	15.1.1 启动 ADAMS .....	152
	15.1.2 设置工作环境 .....	152
	15.2 几何建模 .....	153
	15.2.1 点的创建 .....	153
	15.2.2 创建连杆与滑块 .....	154
	15.3 施加约束 .....	156
	15.3.1 在联合构件建立旋转副 .....	156
	15.3.2 在两构件间建立旋转副 .....	156



15.3.3	在两构件间建立平移副	157
15.4	施加驱动并设置驱动方程	158
15.4.1	施加驱动	158
15.4.2	在驱动上增加函数关系	159
15.5	仿真	159
15.5.1	测试模型	159
15.5.2	运动仿真	161
15.6	后处理	161
15.7	优化模型	162
15.8	保存文档	162
	思考题	162
<b>第 16 章</b>	<b>颚式破碎机的建模、仿真与测试</b>	<b>163</b>
16.1	模型分析	163
16.2	曲柄连杆机构模型创建	164
16.2.1	启动并设置工作环境	164
16.2.2	创建机构模型	165
16.2.3	创建约束	168
16.2.4	检验模型	169
16.3	测试模型	171
16.3.1	模型仿真	171
16.3.2	施加载荷后的测试	172
16.3.3	设置驱动力矩, 测量摇杆的位移和速度	172
16.3.4	后置处理	174
	思考题	174
	<b>参考文献</b>	<b>175</b>

# 第 1 章

## 概论

### 1.1 系统概念及分类

在自然界和人类社会中，可以说任何事物都是以系统的形式存在，每个所要研究的问题对象都可以被看作一个系统。

一般系统论的创始人贝塔朗菲把系统定义为相互作用的诸要素的综合体。美国著名学者阿柯夫认为，系统是由两个或两个以上具有自身独立特征而又相互联系的任何种类的要素所构成的集合。韦氏字典中则指出，系统是有组织的或是组织化的总体，以及构成总体的各种概念、原理和规则的相互作用及相互依赖诸要素的集合。我国学者钱学森等人提出，系统是相互作用和相互依赖的若干组成部分（元素）结合而成、具有特定功能的有机整体。

上述定义表明了系统所包含的三层含义：一是系统是由各个要素组成的；二是各要素之间相互联系和相互作用，而且它们之间的关系是对立统一的；三是系统整体具有不同于部分的特定功能。可见，系统是由若干个相互联系、相互依存、相互作用的要素所组成的具有特定功能的有机整体。

辩证唯物主义者将哲学的表达思想用于系统，在运筹学和其他学科中得到了定量的表达。系统观又叫整体观，等价于集合体。系统根据不同的性质，可分成以下几种不同的类型。

① 自然系统和人造系统。自然系统是依据自然规律，不以人的意志为转移而形成的系统，如生态系统。人造系统是为了达到人类所需要的目的而由人类设计和建造的系统，如通信系统。

② 实体系统和概念系统。实体系统是以矿物、生物、能源、机械等实体形式表现的系统。概念系统是由概念、原理、原则、方法、制度、程序等观念性的非物质实体所组成的系统。

③ 封闭系统和开放系统。封闭系统是指该系统与环境之间没有物质、能量和信息的交换，由系统的界限将环境与系统隔开，因而呈一种封闭状态。开放系统是指系统与环境之间具有物质、能量与信息交换的系统。

④ 静态系统和动态系统。静态系统是系统状态不随时间变化的系统。动态系统是系统状态变量随时间而改变的系統。

⑤ 对象系统和行为系统。对象系统是指按照具体研究对象进行区分而产生的系统（如企业的经营计划系统、生产系统、库存系统等）。行为系统是指完成目的行为的系统，行为

系统一般需要通过组织体系来体现,如社会系统、经济系统以及管理系统。

⑥ 控制系统和因果系统。具有控制功能和手段的系统,为了达到特定目的而向对象施加的必要的动作由控制装置自动完成时,称为自动控制系统。因果系统是由输入决定输出的系统,肯定是开放系统。

## 1.2 模型概念及分类

模型是对现实世界的事物、现象、过程、系统的简化描述,或其部分属性的模仿。在一般意义下是指模仿实物或设计中的构造物的形状制成的雏形,其大小可以分为缩小型、实物型和放大型。有些模型甚至连细节都跟实物一模一样,有些则只是模仿实物的主要特征。模型的意义在于可通过视觉了解实物的形象,除了具有艺术欣赏价值外,在教育、科学研究、工业建设、土木建筑和军事等方面也有极大的效用。随着科学技术的进步,人们将研究的对象看成是一个系统,从整体的行为上对它进行研究。这种系统研究不在于列举所有的事实和细节,而在于识别出有显著影响的因素和相互关系,以便掌握本质的规律。对于所研究的系统,可以通过类比、抽象等手段建立起各种模型,称为建模。

模型可以取各种不同的形式,按照模型的表现形式可以分为物理模型、数学模型、结构模型和仿真模型。

物理模型,也称实体模型,又可分为实物模型和类比模型。

① 实物模型是指根据相似性理论制造的按原系统比例缩小(也可以是放大或与原系统尺寸一样)的实物。例如风洞实验中的飞机模型、水力系统实验模型、建筑模型、船舶模型等。

② 类比模型是指在不同的物理学领域(力学、电学、热学、流体力学等)的系统中各自的变量有时服从相同的规律,根据这一共同规律制出的物理意义完全不同的比拟和类推的模型。例如在一定条件下由节流阀和气容构成的气动系统的压力响应与一个由电阻和电容所构成的电路的输出电压特性具有相似的规律,因此可以用比较容易进行实验的电路来模拟气动系统。

数学模型是用数学语言描述的一类模型。数学模型可以是一个或一组代数方程、微分方程、差分方程、积分方程或统计学方程,也可以是它们的某种适当的组合,通过这些方程定量地或定性描述系统各变量之间的相互关系或因果关系。除了用方程描述的数学模型外,还有用其他数学工具,如代数、几何、拓扑、数理逻辑等描述的模型。需要指出的是,数学模型描述的是系统的行为和特征,而不是系统的实际结构。

结构模型是反映系统的结构特点和因果关系的模型。结构模型中的一类重要模型是图模型,此外,生物系统分析中常用的房室模型等也属于结构模型,结构模型是研究复杂系统的有效手段。

仿真模型是通过在数字计算机、模拟计算机或混合计算机上运行的程序表达的模型。采用适当的仿真语言或程序,物理模型、数学模型和结构模型一般都能转变为仿真模型。关于不同控制策略或设计变量对系统的影响,或是系统受到某些扰动后可能产生的影响,最好是在系统本身上进行实验,但这并非永远可行,原因是多方面的。例如实验费用可能是昂贵的;系统可能是不稳定的,实验可能破坏系统的平衡,造成危险;系统的时间常数很大,实验需要很长时间;待设计的系统尚不存在等。在这样的情况下,建立系统的仿真模型是有效

的。例如,生物的甲烷化过程是一个绝氧发酵过程,由于细菌的作用分解而产生甲烷。根据生物化学的知识可以建立过程的仿真模型,通过计算机寻求过程的最优稳态值并且可以研究各种启动方法。这些研究几乎不可能在系统自身上完成,因为从技术上很难保持过程处于稳态,而且生物甲烷化反应的启动过程很慢,需要几周的时间,但如果利用仿真模型在计算机上仿真,则甲烷化反应的启动过程只需要几分钟的时间。

## 1.3 数学模型建立过程及特点

对于任何待求解的问题来说,一般都是从数学模型开始的,在讲述数学建模的过程之前,有必要对数学模型进行更进一步分类。数学模型可以按照不同的方式进行分类。

### (1) 按照模型的应用领域或所属学科分

如人口模型、交通模型、环境模型、生态模型、城镇规划模型、水资源模型、再生资源利用模型、污染模型等。范畴更大一些则形成许多边缘学科,如生物数学、医学数学、地质数学、数量经济学、数学社会学等。

### (2) 按照建立模型的数学方法或所属数学分支分

如初等数学模型、几何模型、微分方程模型、图论模型、马氏链模型、规划论模型等。

按第一种方法分类的数学模型着重于某一专门领域中用不同方法建立模型;而按第二种方法分类是用属于不同领域的现成的数学模型来解释某种数学技巧的应用。本书重点放在如何应用读者已具备的基本数学知识在各个不同领域中建模。

### (3) 按照模型的表现特性分

① 确定性模型和随机性模型,取决于是否考虑随机因素的影响。近年来随着数学的发展,又有所谓突变性模型和模糊性模型。

② 静态模型和动态模型,取决于是否考虑时间因素引起的变化。

③ 线性模型和非线性模型,取决于模型的基本关系,如微分方程是否是线性的。

④ 离散模型和连续模型,指模型中的变量(主要是时间变量)取为离散的还是连续的。

虽然从本质上讲大多数实际问题是随机性的、动态的、非线性的,但是由于确定性、静态、线性模型容易处理,并且往往可以作为初步的近似来解决问题,所以建模时常先考虑确定性、静态、线性模型。连续模型便于利用微积分方法求解,做理论分析;而离散模型便于在计算机上做数值计算。所以,用哪种模型要视具体问题而定。在具体的建模过程中将连续模型离散化,或将离散变量视作连续,也是常采用的方法。

### (4) 按照建模目的分

有描述模型、分析模型、预报模型、优化模型、决策模型、控制模型等。

### (5) 按照对模型结构的了解程度分

有白箱模型、灰箱模型、黑箱模型。这是把研究对象比喻成一只箱子里的机关,要通过建模来揭示它的奥妙。白箱主要包括用力学、热学、电学等一些机理相当清楚的学科描述的现象以及相应的工程技术问题,这方面的模型大多已经基本确定,还需深入研究的主要是优化设计和控制等问题。灰箱主要指生态、气象、经济、交通等领域中机理尚不十分清楚的现象,在建立和改善模型方面都还不同程度地有许多工作要做。至于黑箱,则主要指生命科学和社会科学等领域中一些机理(如数量关系方面等)很不清楚的现象。有些工程技术问题虽然主要基于物理、化学原理,但由于因素众多、关系复杂和观测困难等原因,也常作为灰箱

或黑箱模型处理。当然，白、灰、黑之间并没有明显的界限，而且随着科学技术的发展，箱子的“颜色”必然是逐渐由暗变亮的。

那么，如何建立数学模型呢？建立数学模型可采用两大类方法：机理分析方法和测试分析方法。机理分析方法是根据对现实对象特性的认识，分析其因果关系，找出反映内部机理的规律，建立的模型常有明确的物理或现实意义。测试分析方法则是将研究对象视为一个黑箱系统，内部机理无法直接寻求，可以测量系统的输入输出数据，并以此为基础运用统计分析方法，按照事先确定的准则在某一类模型中选出一个与数据拟合得最好的模型，这种方法又称为系统辨识。工程实际中，通常把这两种方法结合起来进行建模，即用机理分析建立模型的结构，用系统辨识确定模型的参数。可以看出，采用哪一类方法建模主要是根据对研究对象的了解程度和建模目的决定的。如果掌握了一定机理方面的知识，模型也要求具有反映内部特性的物理意义，那么应该以机理分析方法为主；当然，若需要模型参数的具体数值，还可以用系统辨识或其他统计方法得到。如果对象的内部机理没掌握，模型也不用于分析内部特性，如仅用来做输出预报，则可以以系统辨识方法为主。系统辨识是一门专门学科，需要一定的控制理论和随机过程方面的知识。

建立模型要经过哪些步骤并没有一定的模式，通常与实际问题的性质、建模的目的等有关，通常建模过程要经过模型准备、模型假设、模型构成、模型求解、模型分析、模型检验、模型应用等几个步骤。

**模型准备。**要了解问题的实际背景，明确建模的目的，搜集建模必需的各种信息，如现象、数据等，尽量弄清对象的特征，由此初步确定用哪一类模型。总之，是做好建模的准备工作，情况明才能方法对，这一步一定不能忽视，碰到问题要虚心向从事实际工作的人员请教，尽量掌握第一手资料。

**模型假设。**根据对象的特征和建模的目的，对问题进行必要地、合理地简化，用精确的语言做出假设，可以说是建模的关键一步。一般地说，一个实际问题不经过简化假设就很难转化成数学问题，即使可能，也很难求解。不同的简化假设会得到不同的模型，假设做得不合理或过分简单，会导致模型失败或部分失败，于是就应该修改和补充假设；假设做得过分详细，试图把复杂对象的各方面因素都考虑进去，可能很难甚至无法继续下一步的工作。通常，做假设的依据一是出于对问题内在规律的认识，二是来自对数据或现象的分析，也可以是二者的综合。做假设时既要运用与问题相关的物理、化学、生物、经济等方面的知识，又要充分发挥想象力、洞察力和判断力，善于辨别问题的主次，果断地抓住主要因素，舍弃次要因素，尽量将问题线性化、均匀化，经验在这里也常起重要作用。写出假设时，语言要精确，就像做习题时写出已知条件那样。

**模型构成。**根据所做的假设分析对象的因果关系，利用对象的内在规律和适当的数学工具构造各个量（常量和变量）之间的等式（或不等式）关系或其他数学结构。这里除需要一些相关学科的专门知识外，还常常需要较广阔的应用数学方面的知识，以开拓思路。当然，不能要求对数学学科门门精通，而是要知道这些学科能解决哪一类问题以及大体上怎样解决。相似类比法，即根据不同对象的某些相似性，借用已知领域的数学模型，也是构造模型的一种方法。建模时，还应遵循的一个原则是尽量采用简单的数学工具，因为建立的模型总是希望能有更多的人了解和使用，而不是只供少数专家欣赏。

**模型求解。**可以采用解方程、画图形、证明定理、逻辑运算、数值计算等各种传统的和近代的数学方法，特别是计算机技术。

模型分析。对模型解答进行数学上的分析,有时要根据问题的性质分析变量间的依赖关系或稳定状况,有时是根据所得结果给出数学上的预报,有时则可能要给出数学上的最优决策或控制,不论哪种情况,还常常需要进行误差分析、模型对数据的稳定性或灵敏性分析等。

模型检验。把数学上分析的结果转化回到实际问题,并用实际的现象、数据与之比较,检验模型的合理性和适用性。这一步对于建模的成败是非常重要的,要以严肃认真的态度来对待,当然,有些模型如核战争模型就不可能要求接受实际的检验了。模型检验的结果如果不符合或者部分不符合实际,问题通常出在模型假设上,应该修改、补充假设,重新建模,有些模型要经过几次反复,不断完善,直到检验结果获得某种程度上的满意。

模型应用。应用的方式取决于问题的性质和建模的目的,应当指出,并不是所有建模过程都要经过这些步骤,有时各步骤之间的界限也没那么分明。建模时不应拘泥于形式上的按部就班。

建模是利用数学工具解决实际问题的的重要手段。数学模型有许多优点,也有弱点。建模需要相当丰富的知识、经验和各方面的能力,同时应注意掌握分寸。下面归纳出数学模型的若干特点,以便在学习过程中逐步领会。

模型的逼真性和可行性。一般说来,总是希望模型尽可能逼近研究对象,但是一个非常逼真的模型在数学上常常是难以处理的,因而不容易达到通过建模对现实对象进行分析、预报、决策或者控制的目的,即实用上不可行。另一方面,越逼真的模型常常越复杂,即使数学上能处理,这样的模型应用时所需要的费用也相当高,而高费用不一定与复杂模型取得的效益相匹配。所以建模时往往需要在模型的逼真性与可行性、费用与效益之间做出折衷和选择。

模型的渐进性。稍微复杂一些的实际问题的建模通常不可能一次成功,要经过建模过程的反复迭代,包括由简到繁,也包括删繁就简,以获得越来越满意的模型。在科学发展过程中,随着人们认识和实践能力的提高,各门学科中的数学模型也存在着一个不断完善或者推陈出新的过程。从19世纪力学、热学、电学等许多学科由牛顿力学的模型主宰,到20世纪爱因斯坦相对论模型的建立,是模型渐进性的明显例证。

模型的强健性。模型的结构和参数常常是由对象的信息如观测数据确定的,而观测数据是允许有误差的。一个好的模型的强健性应该具有下述意义:当观测数据或其他信息有微小改变时,模型结构和参数只有微小变化,并且一般也应导致模型求解的结果有微小变化。

模型的可转移性。模型是现实对象抽象化、理想化的产物,它不为对象的所属领域所独有,可以转移到另外的领域。在生态、经济、社会等领域内建模就常常借用物理领域中的模型。模型的这种性质显示了它的应用的广泛性。

模型的非预制性。虽然已经发展了许多应用广泛的模型,但是实际问题是各种各样、变化万千的,不可能要求把各种模型做成预制品供人们在建模时使用。模型的这种非预制性使得建模本身常常是事先没有答案的问题。在建立新的模型的过程中甚至会伴随着新的数学方法或数学概念的产生。

模型的条理性。从建模的角度考虑问题可以促使人们对现实对象的分析更全面、更深入、更具条理性,这样即使建立的模型由于种种原因尚未达到实用的程度,对问题的研究也是有利的。

模型的技艺性。建模的方法与其他一些数学方法如方程解法、规划解法等是根本不同的,无法归纳出若干条普遍适用的建模准则和技巧。建模与其说是一门技术、不如说是一种艺术,是技艺性很强的技巧,经验、想象力、洞察力、判断力以及直觉、灵感等在建模过程

中起的作用往往比一些具体的数学知识更大。

模型的局限性。这里有几方面的含义。

第一，由数学模型得到的结论虽然具有通用性和精确性，但是因为模型是现实对象简化、理想化的产物，所以一旦将模型的结论应用于实际问题，就回到了现实世界，那些被忽视、简化的因素必须考虑，于是结论的通用性和精确性只是相对的和近似的。

第二，由于人们认识能力和科学技术包括数学本身发展水平的限制，还有不少实际问题很难得到有实用价值的数学模型。如一些内部机理复杂、影响因素众多、测量手段不够完善、技艺性较强的生产过程，像生铁冶炼过程，需要开发专家系统，与建立数学模型相结合才能获得较满意的应用效果。专家系统是一种计算机软件系统，它总结专家的知识 and 经验，模拟人类的逻辑思维过程，建立若干规则和推理途径，主要是定性地分析各种实际现象并做出判断。专家系统可以看成计算机模拟的新发展方向。

第三，还有些领域中的问题今天尚未发展到用建模方法寻求数量规律的阶段，如中医诊断过程，目前所谓的计算机辅助诊断属于总结著名中医的丰富临床经验的专家系统。

建模过程是一种创造性思维过程，除了想象、洞察、判断这些属于形象思维、逻辑思维范畴的能力之外，直觉和灵感往往也起着不可忽视的作用。当由于各种限制，利用已有知识难以对研究对象做出有效的推理和判断时，凭借相似、类比、猜测、外推等思维方式及不完整、不连续、不严密的，带启发性的直觉和灵感，去战略性地认识对象，是人类创造性思维的特点之一，也是人类比按程序逻辑工作的计算机、机器人的高明之处。历史上不乏在科学家的直觉和灵感的火花中诞生的假说、论证和定律。当然，直觉和灵感不是凭空产生的，它要求人们具有丰富的背景知识。对问题进行反复思考和艰苦探索，对各种思维方法运用娴熟，相互讨论和思想交锋，特别是不同专业的成员之间的探讨，是激发直觉和灵感的重要因素。所以，由各种专门人才组成的团队工作方式越来越受到重视。

建模可以看成是一门艺术，艺术在某种意义下是无法归纳出准则或方法的。一名出色的艺术家需要大量的观摩和前辈的指教，更需要亲身的实践。类似地，掌握建模这门艺术，培养想象力和洞察力，一要大量阅读、思考别人做过的模型，二要亲自动手，认真做实际课题。

## 1.4 模型研究与计算机仿真

不同的模型，其研究方法不同，模型的简化过程也不相同。针对不同的模型进行计算机仿真研究，根据不同的应用领域采用适合各自的方法进行模型简化仿真研究至关重要。例如，对一个模型进行结构强度方面的研究，建立模型时，只需建立相关的结构承力构件，对于一些不影响结构强度或影响结构强度非常小的配件，在计算机仿真过程中，可以进行简化并对其忽略；但如果研究的对象为模型的相关气动特性，此时小配件的存在会对气流压力分布产生重要的影响，那么在计算机仿真时，小配件在结构模型的建立过程中就非常重要，不可忽略。

计算机仿真是应用电子计算机对系统的结构、功能和行为以及参与系统控制的人的思维过程和行为进行比较逼真的动态性模仿，是一种描述性技术，是一种定量分析方法。通过建立某一过程和某一系统的模型来描述该过程或该系统，然后用一系列有目的、有条件的计算机仿真实验来刻画系统的特征，从而得出数量指标，为决策者提供有关这一过程或系统的定

量分析结果，作为决策的理论依据。计算机仿真用计算机科学和技术的成果建立被仿真的系统的模型，并在某些实验条件下对模型进行动态实验的一门综合性技术。它具有高效、安全、受环境条件的约束较少、可改变时间比例尺等优点，已成为分析、设计、运行、评价、培训系统（尤其是复杂系统）的重要工具。

计算机仿真早期称为蒙特卡罗方法，是一门利用随机数实验求解随机问题的方法。其原理可追溯到1773年法国自然学家 Buffon 为估计圆周率值所进行的物理实验。根据仿真过程中所采用计算机类型的不同，计算机仿真大致经历了模拟机仿真、数字-模拟混合机仿真和数字机仿真三个大的阶段。20世纪50年代的仿真机大部分是以电子模拟计算机为主机实现的，在部分特殊应用领域内也有以液压机、气压机或阻抗网络作为主要模拟设备的；60年代后，串行处理数字机逐渐应用到仿真之中，但难以满足航天、化工等大规模复杂系统对仿真时限的要求；从70年代初开始，数字模拟混合仿真机得到发展，从70年代末起，以数字机为主机的各种各样专用和通用仿真机得到普及和推广，高性能工作站、巨型机、小巨机、软件技术和人工智能技术取得引人注目的进展；在80年代，人们对智能化的仿真机寄予希望，在综合集成数字仿真和模拟仿真的优势的基础上，设计出在更高层次上的数字-模拟混合仿真机，在一些特定的仿真领域内，这种智能仿真机和高层次的数字-模拟仿真机都取得令人鼓舞的结果。随着计算机技术的飞速发展，在仿真机中也出现了一批很有特色的仿真工作站、小巨机式的仿真机、巨型机式的仿真机。20世纪80年代初推出的一些仿真机，如 SYSTEM10 和 SYSTEM100，就是这类仿真机的代表。现在，计算机仿真技术已经在机械制造、航空航天、交通运输、船舶工程、经济管理、工程建设、军事模拟以及医疗卫生等领域得到了广泛的应用。

传统的仿真方法是一个迭代过程，即针对实际系统某一层次的特性过程抽象出一个模型，然后假设态势输入进行试验，由试验者判读输出结果和验证模型，根据判断的情况来修改模型和有关的参数，如此迭代地进行，直到认为这个模型已满足试验者对客观系统的某一层次的仿真目的为止。计算机仿真技术和用于仿真的计算机（简称仿真机）都应充分反映上述的仿真的特点及满足仿真工作者的需求。为了建立一个有效的仿真系统，一般都要经历建立模型、仿真实验、数据处理、分析验证等步骤；为了构成一个实用的、较大规模的仿真系统，除仿真机外，还需配有控制和显示设备。

总之，采用计算机对模型进行仿真研究，已经是现代社会中不可缺少的手段，并且在日常生活中将会越来越得到重视并深入应用。

## 1.5 计算机仿真技术现状与未来

计算机仿真技术是以多种学科和理论为基础，以计算机及其相应的软件为工具，通过虚拟试验的方法来分析和解决问题的一门综合性技术。仿真技术作为信息时代除理论推导和科学试验之外的第三门新型科研方法，其技术及相关产品广泛应用于工业产品的研究、设计、开发、测试、生产、培训、使用、维护等各个环节。随着仿真技术的发展，仿真产业俨然已经成为具有相当规模的新型产业，并广泛应用于国防、能源、电力、交通、物流、教育、航天航空、工业制造、生物医学、医疗、石油化工、船舶、汽车、电子产品、虚拟仪器、农业、体育、娱乐、社会经济运行、环境及安全科学等领域。

我国仿真产业发展状况如何呢？中国上海国际仿真工业展览会组委会曾历时两年做过一



次中国仿真产业发展现状的市场调查, 调查显示中国仿真市场存在如下特点。

① 科技含量高、市场潜力大、学术性强是目前中国仿真市场的主要特点。

② 仿真属于高科技领域, 企业主要集中在国内大中型城市。

③ 中国仿真市场目前主要销售市场仍然集中在国内。

④ 中国仿真企业普遍年轻。

⑤ 从事仿真技术的企业普遍抱着乐观态度, 对仿真行业市场容量扩大抱有信心, 目前需求主要是市场潜力开发及新技术知识产权的保护, 行业竞争一般。

我国著名的仿真界专家、中国工程院院士王子才教授的专著亦表明, 在先进分布交互仿真技术方面, 我国初步建成了分布交互综合仿真系统, 该系统是一个含有灵境技术的、开放的、支持分布交互仿真的支撑环境, 支持复杂系统设计、运行和评估, 并开始应用于实际系统的研制和开发工作。我国已自行研制了很多仿真系统, 如电力工业的大型电站仿真系统、交通运输仿真系统、石油化工过程仿真系统等。在民用工业中, 汽车仿真(图 1-1)、建筑仿真(图 1-2)等已经在日常生活中普遍应用, 尤其是近年来发展起来的虚拟现实(图 1-3)技术。虚拟现实是一种由计算机全部或部分生成的多维感觉环境, 给参与者产生各种感官信息, 如视觉、听觉、触觉等, 使参与者有身临其境的感觉, 能体验、接受和认识客观世界中

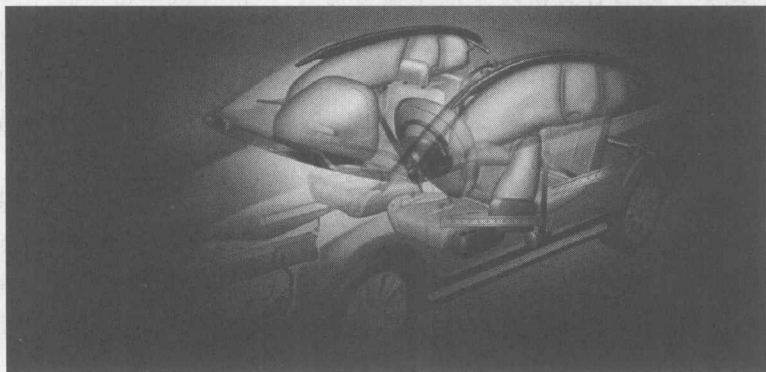


图 1-1 汽车仿真

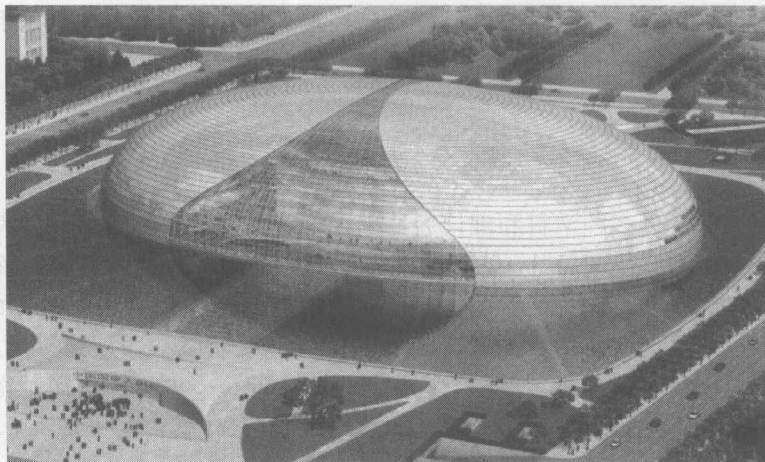


图 1-2 建筑仿真