

“21世纪中国高等教育人才培养体系研究计划”项目



计算机

仿真技术

郝培锋 崔建江 肖文栋 编著



01010
10101

01010



NEUPRESS
东北大学出版社

计算机仿真技术

郝培锋 崔建江 肖文栋 编著

东北大学出版社

内 容 简 介

系统仿真最早起源于军事系统和控制系统的模拟,所以在以往的教材中,都有很深的“控制系统”的烙印。在当前科学技术发展阶段,几乎所有的理工科专业(甚至包括多数文科专业)都要应用到仿真技术,所以编写宽口径的系统仿真教材,并在国内理工科高校开设相应的“系统仿真技术”课程都是相当重要、相当迫切的。很多专业没有开设过新型的“系统仿真”课程,但从事各个领域研究的研究者可能都或多或少地需要系统仿真的知识,所以从本科生阶段就开设这样的课程,将为学生今后的工作打下良好的基础。

本书可以配合各种工程、理论研究用的教材进行学习和科研,特别是当前普遍关心的模型化处理方法的研究,使用仿真技术的方法,将各个关键环节连接起来,提高生产和研究的层次。本书充分介绍了“系统仿真”领域的内涵和新成果,读过本书后,大学生、研究生与科研工作者肯定会有很大收获。

本书可以作为高等学校高年级学生的教学和毕业设计用书,同时,后面的几章内容是专门为研究生和高层次的研究者设计、编写的,对于研究理论及工程中实际问题具有重要的参考价值。

© 郝培锋 等 2003

图书在版编目(CIP)数据

计算机仿真技术 / 郝培锋, 崔建江, 肖文栋编著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2003.7
ISBN 7-81054-908-1

I. 计… II. ①郝… ②崔… ③肖… III. 计算机仿真 IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 057571 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 东北大学印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm × 260mm

印 张: 11.125

字 数: 278 千字

出版时间: 2003 年 7 月第 1 版

印刷时间: 2003 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘 莹

封面设计: 唐敏智

责任出版: 杨华宁

定 价: 18.00 元

前 言

近年来,国外已经有了适用面较宽的仿真教材,国内虽然也出现了一些新型的仿真教材,但仍然存在两方面问题:

① 侧重定性说明,概念性东西居多,没有介绍具体的解决仿真问题的方法(包括现在成熟的仿真软件的介绍),学生只是了解了仿真的概念,但没有具体解决问题的思路。另外,仅仅从概念上介绍仿真,没有可以重复的实例,学生不可能透彻理解仿真概念。所以,目前缺少既有良好的概念阐述,又充分介绍仿真工具的教科书。

② 过分侧重控制系统的仿真。控制系统的仿真技术比较成熟,而目前系统仿真更有前景的方向包括:仿真模型的建立(仿真的基础)、仿真算法(核心)、仿真软件及应用(工具)、虚拟现实(仿真结果的显示)、实时与半实物仿真(仿真系统的工程应用)等,这些内容在一般的教科书中目前都鲜有体现。

鉴于此,本书被列入21世纪初中国高等教育人才培养体系研究计划和教育部“十五”重点规划教材。立足建设“宽口径”的系统仿真教材,为理工科各行各业的仿真应用打下良好的基础。

本书的第1,2章以仿真系统的基本概念为主线,由浅入深地逐步过渡到计算机仿真技术的核心内容。通过对该内容的深入理解,配合逐层次深入的习题和教学光盘,使大学生掌握基本的计算机仿真技术和方法。第3,4章分别以前两章的基础概念为出发点,更加深入、详细地介绍了仿真系统中两类主要系统——离散事件仿真系统和连续系统——的建模、仿真,使学生在具体进行计算机仿真的理论、实际工程等科研活动中,进一步加深对基本概念的理解,并提高实际运用仿真技术和方法的能力。第5,6,7,8章内容将主要针对研究生和具有一定仿真技术知识及具有实际仿真工程经验的研究者,以现代仿真技术关注、研究的主流为着眼点,将模型校验、面向对象的仿真技术、最新的仿真平台和定性仿真方法介绍给从事计算机仿真技术应用和研究的广大学者、工程技术人员。第9章是具有前沿性的科普知识讲座,简单地介绍了虚拟现实技术的基本原理和应用技术,通过本教材,将现代新技术传授给学生。

本书配备计算机教学光盘,将书中的大多数例题和关键性内容都以实际仿真系统为蓝本,进行同步教学,具有更好的教学效果。

编 者

2002年9月于沈阳

目 录

1 计算机仿真技术基础	1
1.1 从现实问题开始	1
1.2 系统及其分类	3
1.3 系统模型的概念及其分类	6
1.4 计算机仿真中的系统建模	10
1.5 计算机仿真的定义	12
1.6 计算机仿真技术发展概要	14
思考题	16
2 系统模型建立的方法论	18
2.1 系统与建模	18
2.2 系统建模的方法论	25
2.3 系统辨识	28
2.4 系统建模的实践	31
思考题	40
3 连续系统数值积分	41
3.1 连续系统数值积分法基本原理	41
3.2 Runge-Kutta 积分法	46
3.3 线性多步法	49
3.4 数值积分法稳定性分析	52
3.5 数值积分法的选择与计算步距的确定	54
思考题	58
4 离散事件系统仿真	59
4.1 概 述	59
4.2 仿真实例	59
4.3 离散事件仿真的基本要素	61
4.4 离散事件仿真模型的设计与实现	62
4.5 随机数与随机变量的产生	73
4.6 输入数据的分析	78
4.7 仿真的输出分析	84
4.8 离散事件仿真语言	94

思考题	97
5 面向对象的仿真.....	99
5.1 面向对象的概念与技术	100
5.2 面向对象的仿真概述	104
5.3 基于 C++ 的面向对象仿真软件设计	109
6 定性仿真方法介绍	118
6.1 定性仿真方法的产生和发展	118
6.2 Kuipers 定性仿真实理论	121
6.3 Kuipers 定性仿真实例	129
6.4 定性仿真的应用现状	140
6.5 定性仿真发展前景	142
7 仿真模型的校核、验证与认可.....	145
7.1 仿真模型的校核、验证与认可的基本概念.....	145
7.2 系统模型校核与验证的一般策略	147
8 仿真系统平台的选择	150
8.1 仿真软件达到的要求	150
8.2 仿真语言的分类	150
8.3 仿真语言的选择	152
8.4 常用仿真软件介绍	153
8.5 一些仿真软件或与仿真相关的网址	157
9 虚拟现实技术基础	158
9.1 虚拟现实技术基础	158
9.2 虚拟现实硬件技术	162
9.3 虚拟现实软件技术	165
参考文献.....	170

1 计算机仿真技术基础

1.1 从现实问题开始

日常生活中，在您身边，经常会遇到使您为难的问题。尤其是在工作中，许多事先没有想到或想到了却无法预测结果，或无法事先演练的事情是非常麻烦的。不妨举个实际例子，看看问题是如何出现的。

【例 1.1】 在某浴池供水系统中，将烧到一定温度的热水和具有一定温度的冷水混合，配成温度适当的洗浴用水。浴池营业的初始阶段，根据经验或感觉测试混合后洗浴水的温度并控制其温度变化，由于存在很大偏差，所以顾客意见非常多。因此，需要设计一个能自动控制冷、热水流量的装置，以便控制水罐中流出的水温。假设供水装置中的混合水罐不存在热量散失问题，同时进入水罐中的热水、冷水在某种搅拌装置作用下，能够均匀混合，配成温度适当的洗浴水。

现在的问题是如何设计这种冷、热水配比方案，才能使水罐中流出的水的温度达到顾客满意程度，从而为装置的制造提供实验数据，并能事先模拟装置运行的效果。在开展这项工作过程中，大致采取了以下几个步骤。

① 对背景进行了详细了解，明确了进行研究的目的。详细了解项目内容，主要是对研究课题进行问题的提取，即找出问题的条件、课题的目的、解决课题时存在的问题以及如何从问题的详细资料中提取问题关系的变量与数据表示等。在深入调查后，得出如下分析内容：问题涉及的主要物理对象有 4 项，即水罐、冷水入口、热水入口、水罐出水口等；研究的目的是如何控制冷、热水的流量，使水罐出水口的水温达到理想温度。如图 1.1 所示。

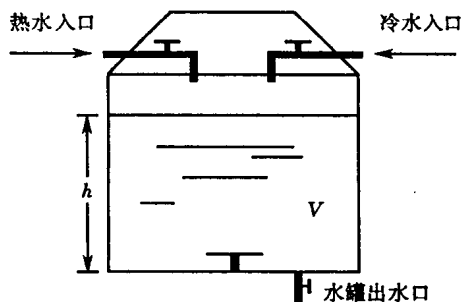


图 1.1 浴池供水系统的储水罐

② 用表格形式反映背景分析的内容，整理出研究中相关的客体及其参数。如上所述，问题中涉及的主要客体为水罐、冷水入口、热水入口、水罐出水口等。它们都有一定的量纲，其中有些因素可以引起水罐中水温变化，将所有内容整理清楚，以便于对问题进行求解。水温控制系统如表 1.1 所示。

表 1.1

某浴池水温控制系统

系统名称	研究客体	客体量纲	影响因素
水温控制系统	混合水罐	体积	对注入冷、热水的控制
	冷水入口	流速、温度	
	热水入口	流速、温度	
	水罐出水口	流速、温度	

③ 利用上面对项目内容的列表, 设计出相应的变量, 以便建立系统中属性间的关系。如表 1.2 所示。同时, 收集研究对象中相关的温度及常用的水罐参数等。

表 1.2

某浴池水温控制系统属性间关系

研究客体	客体量纲	量纲符号
混合水罐	高度、截面积、体积	h, S, V
冷水入口	流速、温度	$F_1(t), c_1$
热水入口	流速、温度	$F_2(t), c_2$
水罐出水口	流速、温度	$F(t), c(t)$

④ 根据相关原理, 建立水罐中水流速度和水温度变化表示式

$$\frac{dV(t)}{dt} = F_1(t) + F_2(t) - F(t),$$

$$\frac{d}{dt} [c(t)V(t)] = c_1F_1(t) + c_2F_2(t) - c(t)F(t).$$

水罐出水口水流速度与水位关系的表示式 (k 为实验参数)

$$F(t) = k \sqrt{h(t)} = k \sqrt{\frac{V(t)}{S}}.$$

⑤ 根据实际情况的要求, 建立合理的水流、温度及储水温度数学关系。

⑥ 根据水流、温度及储水温度数学关系, 变换成计算机可以识别的数学关系。

⑦ 选择合适的实验平台。选择合适的实验平台, 编制适应上述关系的计算机软件, 进行模拟出口水温变化时输入水流变化的计算机实验, 给出相应的实验数据。分析实验结果, 得出控制水温变化的研究结论。详细内容请参考本书的多媒体教学系列之一 (光盘)。

虽然这是一个比较简单的计算机仿真实例, 但从中也可以粗略地体会到, 对于一个研究对象, 要解决的问题总是这样的, 即对于一个未知的或不定的结果进行预先演示或计算, 找出尽可能好的解决方案或几组最优数据, 从而为更合理地处理实际问题提供更多的经验。其中有一个描述问题关系的式子, 称为“模型”的数学表示形式, 是仿真中的核心内容, 在 1.2 节的讨论中, 将给出其严格定义。

实际上, 研究的背景不同, 进行仿真的步骤有很大区别。仿真总是要表示研究对象某个方面的特点, 而不仅仅是一部分数学表达式的组合。在仿真过程中, 所有模型中的因果关系一直与时间有关, 同时由于模型描述的是实际系统某个方面的行为特性, 所以往往可以事先识别这种因果关系。

1.2 系统及其分类

1.2.1 系统的概念

人们在研究或观察事物时,总是将视线划定在某个范围内。这个范围中的各个环节或部分相互关联,不可分割。如例 1.1 中的问题求解过程,它们是一个整体,缺少其中的任何一个步骤,都会对整个过程产生影响,类似于这种体系的过程称为系统,它是人们对所研究对象的总体认识。因此,对于系统的定义是广义的,即人们在长期的实践活动中所认识或意识到的物质世界间的事物(包括思想等意识形态)存在的那种相互关联、相互制约的关系,且是为了某种目的、按照某种规律不断运行的整体,对象的运行常常由时间驱动,这就构成了一个系统。

所谓工程系统,是指由相互关联的部件组成的一个整体,以便实现某种目的。如电力拖动自动控制系统,由执行部件、功率变换部件和检测部件等组成,用它来完成转速、位移,或其他参数控制的某种目的。同样,电力、石油、化工、机械、钢铁、军事、天文等,也都存在着各自的系统。

【例 1.2】 连铸中漏钢预报系统结构如图 1.2 所示。包括热电偶、补偿导线、模/数转换、计算机、预报系统软件、报警装置等。

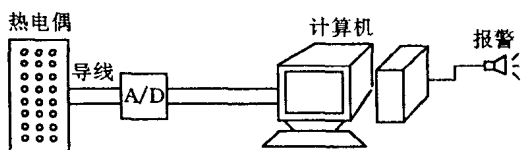


图 1.2 连铸中漏钢预报系统结构图示

科学计算机系统,如交通管制系统、通讯系统、计算机网络、计算机集成制造系统(CIMS)、军事自动化指挥系统(C³I)等,其主要特点是高新技术、复杂信息、人工干预等。

自然系统主要是指一些自然生成的系统,如宇宙、物质世界、人类、原子、细胞等,其特点是按照某种自然规律,循环往复地生成或灭亡。

思想体系,如哲学、宗教等。另外一类也可以包括在其中,即人们日常生活中的一整套活动,如完成一项任务的过程等。

子系统是所研究整体系统中可以分裂出的较小系统。如整个自然界构成一个大系统,而其中的生物圈则构成整个大系统中的一个子系统。

综观这些构成系统的过程或体系,其中总是存在着一些基本要素,这些要素可以分为 3 项内容:与研究内容相关的事物,称为系统的实体,一个系统中实体可以有多个;系统中实体的属性,而一个实体也可以有多个属性;可能引起系统发生变化的任何过程,称为系统的行为。

系统的状态是指对某个时刻系统中上述 3 种要素的描述方式。研究系统就是研究系统在

进程中状态的不断变化。

【例 1.3】 例 1.2 连铸中的漏钢预报系统，系统的实体包括热电偶、模/数转换、计算机、预报系统软件、报警装置等。系统的属性包括电压、温度、报警等。而预报系统中的行为包括数据采集、模/数转换、预报软件的计算、信息传输等。当预报软件识别出其中一组热电偶温度信号状态的变化符合报警特征时，则通知报警系统进行报警。表 1.3 是几个系统的例子。

表 1.3

几个系统的实例

系 统	实 体	属 性	行 为
交通系统	汽车	速度、距离	驾驶
	驾驶员	年龄、性别	
	道路	路况	
银行系统	存折	存款额、余额	储蓄
	储户	年龄	
超市购物	顾客	购物单	付账
	商品	价格	

例子中的系统、实体、属性和行为并没有完全体现出来。事实上，如果对系统没有完全的分析过程，不可能给出系统的 3 种要素，特别是在研究系统的目的不清楚或不能确定系统研究内容的情况下，更是如此。

1.2.2 系统环境的概念

在某些情况下，系统外部因素的变化可能会对系统产生影响；同样，系统的某些行为也可能对本系统没有什么影响，而对系统外部的的事物有作用。像这样，系统外部的某些因素发生的变化称为在“系统的环境”中发生的。在建立系统概念的时候，一个很重要的步骤就是决定系统和其外部之间的边界，这主要取决于研究系统的那个侧面。

例如，在工厂的生产中，决定生产计划的有工厂之外的因素，如客户的订单。如果考虑到工厂原料供应问题，那么它也是一个环境因素，因为这时需要考虑货源供应问题。工厂这个系统必须考虑所有这些影响生产的因素之间的关系。同样，在银行系统中，储蓄利率有一个最大限制。当考察某一个银行的行为时，可以认为这种最大利率限制是一种环境限制因素。而研究的对象是整个银行系统时，则这种最大利率的限制就成了系统内部的一种限制。

发生在系统内部，且对系统有影响的一系列行为称为“内生”行为；而在系统外部对系统构成影响的行为称为“外生”行为。没有“外生”行为的系统，称为封闭系统；反之，称为开放系统。

1.2.3 系统中的随机概念

在研究系统特性的时候，还应该注意依赖于系统特征的行为性质，即系统对于这次行为的结果完全由系统的输入决定，则这种行为称为“确定的”。当行为的作用使系统的结果在可能的结果间随意变化时，这种行为称为“随机的”行为。

当不知道系统的确切结果时，具有随机随意性的这种行为可以被认为是系统环境的一个组成部分。然而，系统的随机输出总是可以通过概率分布的方式被描述出来，或者说，如果

系统某些行为的发生是随意的,那么它们就是系统环境的一部分。例如,工厂中工件在车床上的加工时间可以用概率分布的形式来表示,但是对工件的加工却是系统的“内生”行为。另一方面,加工过程中的停止供电行为很可能随时发生,这些是系统“外生”行为的结果。

如果系统行为是真正的随机行为,那么对这种随机性实际没有现成的解释方法。从某种意义上来说,还是可以找出实践中遇到的随机行为和过程相应的发生规律,可以用数学中概率统计的方法对这些行为加以研究。有时,也把那些需要太多细节或很麻烦才能解释清楚的行为也归为随机行为。例如,描述某楼房内电梯的使用状况时,到达某楼层重返电梯的人的行为可以与其离开电梯这个行为建立联系,这种联系就是这人在楼中逗留的时间。建立这类系统模型的过程中,大多数都把人们离开和重返电梯看做独立的随机行为。

1.2.4 连续系统与离散事件系统

飞机起飞或飞行时速度的变化是一个平稳的渐进过程,而过程中事件的发生总是不连贯的。例如,工厂中原料供应、产品的售出等都发生在连续时间中的某些特别时刻。

对于一个系统,如果系统状态变化的发生主要是在一段连续的时间过程中进行的,如机场系统,称为连续系统。而当系统状态的变化大多发生在不连续的某些时刻时,这样的系统称为离散事件系统。按照定义的概念,极少有能完全称为连续或离散事件的系统,即没有纯粹的连续或离散事件系统。在同一个系统中,研究的侧面不同,对系统的确认就不同,在这种情况下是连续系统,在那种情况时却可能是离散事件系统。例如,机场可以根据气候或飞行状况的变化,随时调整飞机的维护时间或次数等,从这方面来研究,这个系统中就含有离散的成分。而工厂系统中,虽然设备开始和停止工作的时刻是离散的,但是设备工作过程中的时间却是连续的。因此,在大多数系统中,常常是根据系统中什么样的行为占主导地位来进行系统连续或离散事件的定义。从总体上讲,连续系统总是以时间驱动系统状态的变化,而离散事件是以某些事件驱动的。

完整的航空系统也可以认为是离散事件系统。如果研究航空系统的目的是依据其常规日程表安排研究其起飞、降落的秩序,那么从这个方面研究空中交通管理的问题,有时就会出现偶然事件。如天气、机械故障等,使预定的航班或飞行线路被取消或改变。此时研究的航空系统就是典型的离散事件系统。

对于工厂的活动来讲,如果所研究的对象部分充分多,那么就不能用离散的变量表示这些部分的多少。这时,研究对象部分必须用连续的变量来表示设备的活动,使这种活动对系统的影响在一种连续情况下改变状态。使用这种技术建立的系统称为动力学系统。

有时也会碰到这样的系统,按定义上讲是连续系统,但其中的信息或数据却在离散的时间点上取值,称为抽样数据系统。对这种系统的研究,包括确定离散样条数据对系统影响的问题,特别是专门研究基于基本样条信息对系统影响的问题。

对于一个确定的系统,如何定义其离散或连续的问题是一个重要的研究内容。因此,如何描述系统,而不是考虑系统本身的性质,就决定了系统是离散模型,还是连续模型等。正如后面要讲到的一样,由于仿真离散模型和连续模型在程序设计方法上存在差别,所以必须区别对待两种系统。实际应用中,系统的模型往往不像系统要求的那样复杂,考虑到这样一个普遍规律,建立系统模型时,必须准确地区分系统的类型,以便建立的模型可以精准地表示系统及其特性。

1.3 系统模型的概念及其分类

1.3.1 系统模型的概念

有时, 可以以实际系统为背景或在实际系统的环境中进行研究系统实验, 这能给研究工作带来方便, 但有时也会出现很多困难, 如经济问题、实验环境问题等。尤其是许多关于系统的研究是预研性质的, 即实际系统尚未建立起来, 同时还要预测系统未来的行为或初步结果。显然, 在这种情况下, 无法有现成的背景或环境进行实验。一种替代的方法是建立与原形一致的系统进行测试或实验, 但这样的代价通常较大, 且在时间上没有保证。倘若存在其他类似的系统, 很多情况下, 其实也是不可能进行像在实际系统下进行的实验工作那样。例如, 很难通过随意改变商品供求量的方法来研究商品经济系统的运行。因此, 多数系统的研究实际上靠的是对系统模型的研究。尤其是多数情况下, 研究的并不是系统的所有方面, 所以系统的模型没有必要是系统的完全替代品, 而是系统的简化形式。

出于某种目的集中反映所研究系统信息的载体就是模型。因为研究的目的决定了反映信息的特性, 所以建立系统模型就不是惟一的。同一个系统, 由于不同的研究人员对系统特性了解的程度不同, 所以建立的模型就有区别。即使同一个研究者, 随着他对系统了解的深入, 不同的阶段建立的模型也可能有变化。

得到系统模型的过程初步可以分为两个部分, 即建立系统模型的结构和量化结构中实体的属性。建立系统的模型结构就是确定系统的范围和系统的实体、属性、行为。量化系统的属性有利于建立系统行为过程中属性间量的交换和变化关系等。模型结构的建立和属性量化是一个过程的两个方面, 不可以独立地加以对待。很多时候, 它们是一个有机的整体, 没有模型结构, 就不能量化其中的属性; 同样, 不量化结构中的属性, 结构就是无意义的定义。

【例 1.4】 顾客到超市选购几种物品, 他首先拿购物筐; 若购物筐大小合适, 则选欲购物品; 然后到一个收银台排队等候付款; 付款后送回购物筐, 离开超市。

上述文字中包含了建立模型时的一些关键词, 它们是模型中必须反映的系统属性部分。表 1.4 所示关于超市购物系统的实体、属性、行为与上述文字有相同的作用。

表 1.4 超市购物系统的实体、属性和行为

系 统	实 体	属 性	行 为
超市购物	顾客	购物清单	到达、选物
	购物筐	大、小	排队、付款
	收银台	排队时的位置	离开超市

研究系统主要从 3 个方面, 即实体、行为和属性进行讨论。

在超市购物系统中, 应该注意的是, 作为一个整体概念, 超市并没有列在表示系统的列表实体中, 它仅仅起到确定系统与其环境间边界的作用。在系统描述时, 顾客到超市这个行为被认为是能够对系统产生作用的系统环境“外生”活动。相反, 如果研究的客体中包括了泊车设施对超市商业活动的影响, 那么所研究系统的边界内应该包括泊车位置这样的实体。这时, 顾客到超市来就取决于是否可以找到泊车空位。这样的活动中有两个行为过程: 一是汽车到泊车位置, 是系统的“外生”行为; 二是顾客进入超市, 是系统的“内生”行为。

系统中实体的属性与系统模型研究的主体有着密切的关系，决定着模型究竟包括了哪些研究内容，同时也决定着模型的形式。例如，超市购物系统的购物清单属于顾客的属性，因为究竟买什么、买多少商品都是由顾客自己决定的。如果不对所购的物品加以区别，同时对营业时间内顾客可能发生的拥挤影响超市的作用不加规定，那么这时建立的系统模型就不可能包括相关信息，相应的模型是一种形式。但是如果建立模型时，考虑了顾客所购物品的具体属性、个数等，同时也考虑了超市可能发生的顾客拥挤而规定进入超市最多顾客的数目限制，这时必须将超市中多数商品作为系统中新的实体，而将超市最多可以服务的最多顾客数作为新的属性。这样，就可以用一种方程的形式表示超市的购物系统，顾客购物的时间与超市内顾客的数目有关。顾客多，其购物所花费时间就可能长。

1.3.2 系统模型的分类

在实际应用中，关于模型的分类是多种多样的。概括起来，主要有物理模型和数学模型。系统模型的分类与关系如图 1.3 所示。

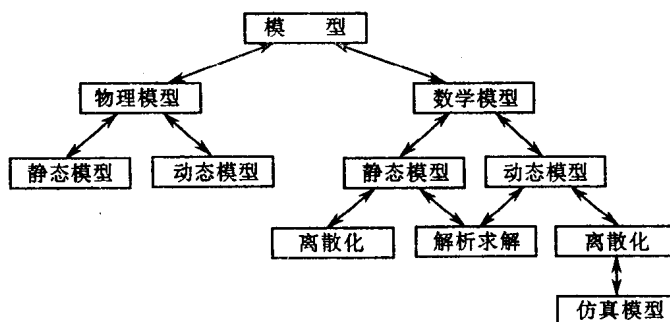


图 1.3 系统模型的分类与关系

1.3.2.1 物理模型

物理模型主要是基于相似性原理对系统进行的模拟，如机械、电子、水利、建筑等。在物理模型中，系统属性的表示常常是由诸如电压、振动、空间、受力、转轴的位置等来进行测量的。通过决定模型的物理定律反映系统行为。例如，直流电动机马达的转速与马达的电压有关。如果能用电压值表示汽车的速度，那么就可以用马达转轴的转速量测汽车行驶的距离，这时电压越高，汽车行驶速度就越快，在相同时间里，汽车行驶的路程就越远。这类模型也称为动态物理模型。

另外一类物理模型是静态物理模型，它是直接将所研究对象的形式进行按比例放大或缩小处理，如原子的结构模型、建筑中楼房的模型等。有时也称为立体模型，它的主要特点是所建立的模型看起来“很像”模拟的现实对象。

在设计飞机或舰船过程中，也用静态物理模型进行飞机在风洞中的飞行实验和船体在大型水池中的航行实验等。虽然风洞中的风是吹在飞机模型上的，水池中的船体模型也是被推动前进的，但其仍然被归为静态物理模型。这是因为实验中所研究的系统特性都是在一种人为的静态环境中进行量测的，所以实验的量测值不能直接转换成实际系统可以利用的设计参数，而必须应用大家熟知的相似性定律，将直观模型的量测值转换成适合于实际系统的实际

参数。

1.3.2.2 数学模型

数学模型是描述系统动态特性的数学表示式，表示系统变化过程中各变量间的逻辑和数理关系。

从模型的性质看，可以将模型分为静态模型和动态模型。静态模型描述的是系统处于平衡状态时，系统各属性间的量化关系；而动态模型的值可以在系统行为作用下，随着时间发生变化。

(1) 静态数学模型

系统静态模型给出了系统处于稳定状态时系统属性间的数学关系。这时，如果由于任何一种属性的改变，使系统的这种稳定态被打破，那么模型都能使所有的属性得到一组新值，但是不能表示出从旧值到新值的变化规律。

例如，超市中某种日用品的“供”与“需”处于平衡状态时，“供”与“需”同时受此种日用品的价格决定，即一个简单的市场模型指示何种价格时才会发生这种平衡态。

当价格较高时，对这种日用品的需求将比较低；相反，当价格较低时，需求将增加。若此日用品的需求量用 Q 表示，价格用 P 表示，则两者之间的关系可用如图 1.4 中的“需求”直线表示。另一方面，价格上升时，也希望此日用品的供应量随之增加，这是因为供货商把价格的上涨看做一次获取更多利润的机会。将供货量按价值计算记为 S ，在同一张图上，画出表示供货量与价格关系的“供货”曲线。若此种日用品的供需处于稳态，则价格将停留在图中两线的交点上，这是因为日用品的“供”与“需”大致相等。

因为假设上述关系都是线性的，所以完整的超市日用品供需关系模型可以表示成下面的数学形式

$$Q = a - bP,$$

$$S = c + dP,$$

$$S = Q.$$

最后一个模型对超市确定这种日用品的价格是非常有意义的，因为它表示超市在这种情况下，关于此日用品的进货与销售处于稳定状态，最大程度地获得利润。

正常情况下，模型所对应的市场情况是：当日用品价格上升时，需求量减少（供货量相对增加了），模型中系数 b 和 d 均大于零。图 1.4 画出了各系数为下面数值时的供需曲线图

$$a = 600, \quad b = 3000, \quad c = -100, \quad d = 2000.$$

可以用解析方法求解这种线性关系式。事实上，一般情况下，适合的超市物价由下式给出

$$P = \frac{a - c}{b + d}.$$

当此种日用品的价格确定后，如取 0.14，则相应的进货量为 180。

更一般地，如果日用品的需求关系是一种呈下降趋势的曲线（非直线）形式，供货量是

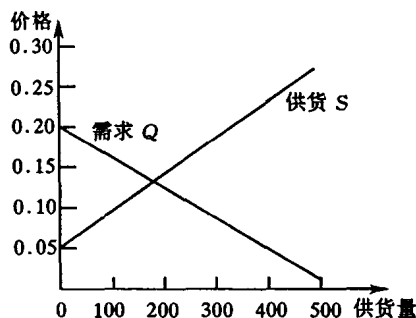


图 1.4 超市某日用品供需线性变化模型

呈上升趋势的曲线形式 (如图 1.5 所示), 那么使用普
通方程求解的方式不能得到这种关系的数学模型的解。
这时, 需要使用一种有效的数值计算方法, 求出模型
方程的数值解, 绘出曲线图, 找出对商家有利的日用
品价位。

实践中, 很难得到这些模型中的相关精确系数。
通常, 通过观察某个时期的数据, 得到“供”、“需”
平衡点附近邻域内的模型斜率, 从而得到各种情况下
实际的商品价格。同时, 还要参考整个经济环境, 努
力使商品价格的确定与经济规律的变化相适应, 这样,
就能使建立的数学模型真正成为参与市场竞争, 可以
随着市场情况变化而有效地调节价格, 进行评定和预
测的工具。

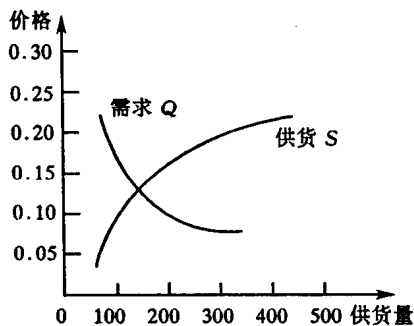


图 1.5 超市某日用品供需非线性变化模型

(2) 动态数学模型

① 连续系统模型。连续的动态数学模型的特质就是可以使系统属性的变化作为时间的函数。求解系统属性值的方法既可以是解析的, 也可以是数值计算的, 这主要依赖于模型的复杂程度。描述行驶中汽车车轮振动的方程就是一个动态数学模型的典型例子, 可以用解析的方法进行求解。习惯上, 这个方程写成

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = \omega^2F(t). \quad (1.1)$$

其中 $2\zeta = D/M$, $\omega^2 = K/M$, 方程的解可以写成 ωt 的表示式。图 1.6 表示的是时刻 $t = 0$ 时, 在稳定外力作用下, 汽车振动 x 的变化, 以及在突然外力作用下, 汽车轮胎的反应。图中画出了几个不同 ζ 时的解曲线。可以看出, ζ 小于 1 时, 汽车轮胎反应的振动呈波浪形。

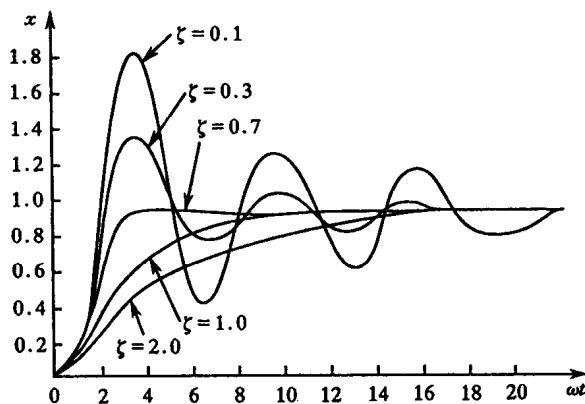


图 1.6 ζ 取不同值时汽车振动的变化形式对比

因子 ζ 称为“阻尼率”, 当运动呈摆动形式时, 摆动的频率由下式确定

$$\omega = 2\pi f.$$

式中:

f ——轮胎的转速。

假设一种情况下, 汽车振动的频率和阻尼是最佳的, 那么上述模型中 ζ , ω , M , K 和 D 的关系表示如何选择合适的弹簧、减震器来达到这种目的。

例如, 无摆动情况下, 需要的系数 $\zeta \geq 1$, 则从 ζ 和 ω 的定义可以推导出 $D^2 \geq 4MK$ 。

② 离散系统模型。离散系统模型分为时间离散系统和事件离散系统: 时间离散系统有时称为采样控制系统, 一般用差分方程、离散状态方程和脉冲传递函数来描述。此类系统的特质是连续的, 仅仅是由于某些情况下是在离散的时刻点上进行的采样过程, 所以也看成是离散系统(模型)。事件离散系统是一种用概率模型描述的随机系统, 系统的输出不完全由输入作用的形式描述, 往往存在可能的多种输出, 即系统的输入输出是随机发生的。常见的有库存系统、管理车辆流动的交通系统、排队服务系统等。

1.4 计算机仿真中的系统建模

本书主要研究利用数学模型进行计算机仿真的内容, 因此对数学模型的介绍是一个重点, 特别是工业过程和实际应用中动态数学模型的研究。

建立在科学工程方法基础上的人与外部世界的相互作用, 且对这种作用进行形式化描述或抽象描述的表示方法, 就是对系统的模型化。而建立数学模型的过程就是系统建模。根据研究对象的不同, 建模的过程、方法及困难程度也有很大差别, 甚至有的找不到可以准确描述系统的数学模型。因此建立数学模型也没有统一的模式, 第2章将主要介绍连续的动态数学模型的分类及其建立的方法学。这里只给出建立模型所应遵循的几条原则。

1.4.1 构筑模块的思想

首先将对系统的描述组织成一系列模块, 这样做的目的是尽量简化系统中不同实体属性间的关系规则。每个模块代表系统的一个部分, 每个部分可以由一个或多个输入变量组成, 同时产生多个输出变量。系统作为一个整体, 可以由不同模块间相互交叉的关系组成, 相应地, 可以用简单的模块关系图表示系统。

图1.7对冷连轧计算机仿真系统中优化机部分的子模块进行了划分, 从功能、关系的紧密程度上, 等分成6个子模块。其中, 每个模块都可以作为独立部分进行研究, 同时, 由通过每个模块的输入输出进行模块间的相互联系。在这个过程中, 忽略了模块间另外的一些关系, 即不同的模块可能与模型库、数据库等都有联系, 但作为可以独立运行的封闭子系统, 每个模块也都有自己的运行规则。

【例1.5】 系统建模是对所研究对象某些感兴趣的特征建立的数学描述方式。在一个系统中, 有时研究的是整个系统, 有时研究的是系统的一个方面。所以在建立系统模型的时候, 有时是非常复杂的过程, 有时则比较简单。图1.7所示是一个建立冷连轧计算机控制系统中优化机部分的子模块划分。

1.4.2 相关信息的原则

模型中必须只包括那些确实与所研究系统的内容相关的主体。例如, 在工厂系统中, 研究的重点是比较不同的操作规程影响工作效率的问题, 这时就不能把如何雇用工人列入其

中。即使无关的信息对模型没有不利的影响,也应该将其从模型中清除,否则可能增加所建模型的复杂性,或者给求解仿真模型造成不必要的麻烦,这是人们不希望看到的现象。

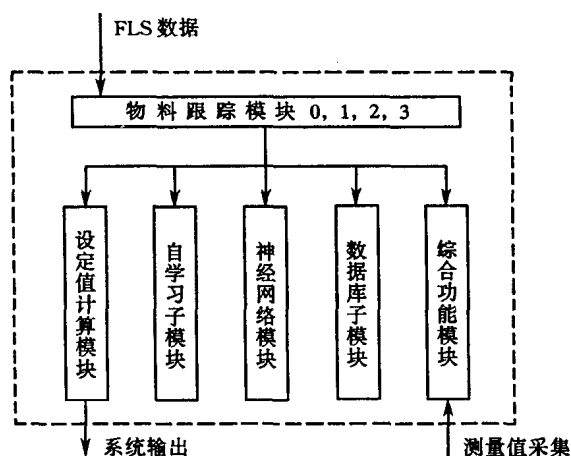


图 1.7 冷连轧计算机控制系统中优化机仿真系统模块

例如,图 1.7 讨论的关于冷连轧计算机仿真系统的设定值计算模块中,主要涉及的信息是各个力能参数、计算参数间的工艺和数学关系,而与轧制计划无关。如果增加此类内容,将增加模块建模的复杂程度,并会给设定值计算带来麻烦和产生不必要的误差。

1.4.3 准确数据的原则

在建立模型的过程中,收集准确、实际的数据是一个重要的步骤。例如,在航空系统中,有关飞机飞行状态的准确数据就是具体地描述机身在空中的方位和飞行参数。这时,飞机可以被认为是一块刚体,从而建立导航和飞机控制系统间的简单依赖关系。有时必须当做一个有弹性的飞行物,从而讨论其结构上可容忍的最大振动限度。负责飞机油料使用情况的机械师可以满足于一个简单的飞机航程与飞机状态的数学关系,但负责旅客旅行舒适程度的机械师应该更注意飞机在空中的振动情况,并得出有关飞机飞行状况的详细信息材料等。因此,研究对象中,尽可能多且切合研究内容的实际数据构成了计算机仿真建模过程必不可少的资料。只有依据从现场采集的各类准确过程数据,才能建立与现场情况一致的数学模型,同时为校验模型打下基础。

1.4.4 实体聚合的原则

另外一个重要因素是系统中独立实体纳入系统大实体的个数。工厂的总经理可能会对前述系统的描述感兴趣,而管理产品的部门经理可能会更多地考虑将商品经营的商场归结为他所关心的子系统内容。

在一些研究中,必须通过重新组合或细分,人为地构筑一些特殊的实体。例如,进行经济或社会学研究的工作者,会将人口作为社会系统中的一个实体部分,研究中的每个社会阶层都会作为独立的实体部分。

关于实体聚合的原则也可以用在系统行为的表示方法中。例如,导弹防卫系统的研究中,不必包括导弹每次发射时详细轨迹的计算资料,用一种统计方程的形式表示所有发射的