

控制科学与工程研究生系列教材

建模与仿真

王红卫 编著

本书的出版得到了高等学校优秀青年
教师教学和科研奖励基金的资助

科学出版社

2002

内 容 简 介

建模与仿真是当今现代科学技术研究的主要内容,其技术已渗透到各学科和工程技术领域。本书以一般系统理论为基础,介绍了适用于任何领域的建模与仿真的一般理论框架和方法。主要内容包括三个部分:一是建模理论,介绍了建模方法论、模型的简化和建模的一般系统理论;二是仿真的基本方法,介绍了随机数的产生、离散时间和连续时间模型的仿真、离散事件模型及其仿真策略和系统仿真结果分析;三是建模与仿真的学科前沿,如基于 Agent 的建模方法及 Swarm 仿真、离散事件系统的建模工具——Petri 网和分布建模与仿真。

本书可作为高等院校系统工程、计算机科学、控制科学、工业工程、管理科学等专业学生的教科书。对于从事建模与仿真工作的专业技术人员,本书也是一本很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

建模与仿真/王红卫编著. —北京:科学出版社,2002

(控制科学与工程研究生系列教材)

ISBN 7-03-009866-8

I. 建… II. 王… III. ①建立模型-研究生-教材 ②系统仿真-研究生-教材 IV. ①O22②TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 079703 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年3月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2002年3月第一次印刷 印张: 18

印数: 1—2 500 字数: 333 000

定价: 27.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

名誉主编 陈太一 保 铮 王 越 陈 珽

主 编 费 奇 孙德宝

编 委 (按姓氏笔画)

万淑芸 王红卫 王永骥 齐 欢

关治洪 李昌禧 黄心汉

序 言

随着社会经济和科学技术的飞速发展,服务于人类社会进步的控制科学与工程学科面临着严峻的挑战。计算机技术与网络通信技术的迅速普及,为控制科学与工程的发展提供了理想的舞台。可以预见,本世纪初叶将会是控制科学与工程发展的黄金时代,各行各业都将渴望着那些掌握控制科学与工程技术的人才加盟。

面对现实的挑战,控制科学与工程发展的最大困难莫过于系统的复杂性不断提高。惯用的针对简单大系统的控制理论遇到了难于逾越的障碍。如何拓宽思路,运用处理复杂问题的手段来解决复杂系统的控制问题,是一个具有革命性的挑战。智能与复杂系统理论的出现,将控制科学、系统科学与系统工程紧密结合,是克服目前所遇困难的理想途径。为此,培养具有控制理论和系统科学与系统工程理论基础的专业人才成为当务之急。

华中科技大学(原华中理工大学)在 20 世纪 50 年代设立了控制科学与工程的相应专业,60 年代开始培养研究生,在 70 年代末 80 年代初,作为我国首批硕士学位和博士学位点,开始大量地培养研究生,在长期的科学研究与教学活动中积累了丰富的经验。在 90 年代完成了控制科学一级学科博士点和系统科学博士点的基本建设,为 21 世纪初建立控制科学与工程和系统科学与工程相结合的人才培养结构奠定了组织基础。

为了培养具有控制科学和系统科学与系统工程理论基础的专业人才,我们组织了部分有经验的教师编著了这套面向研究生培养的系列教材,拟为研究生培养的新模式探索一条新路。

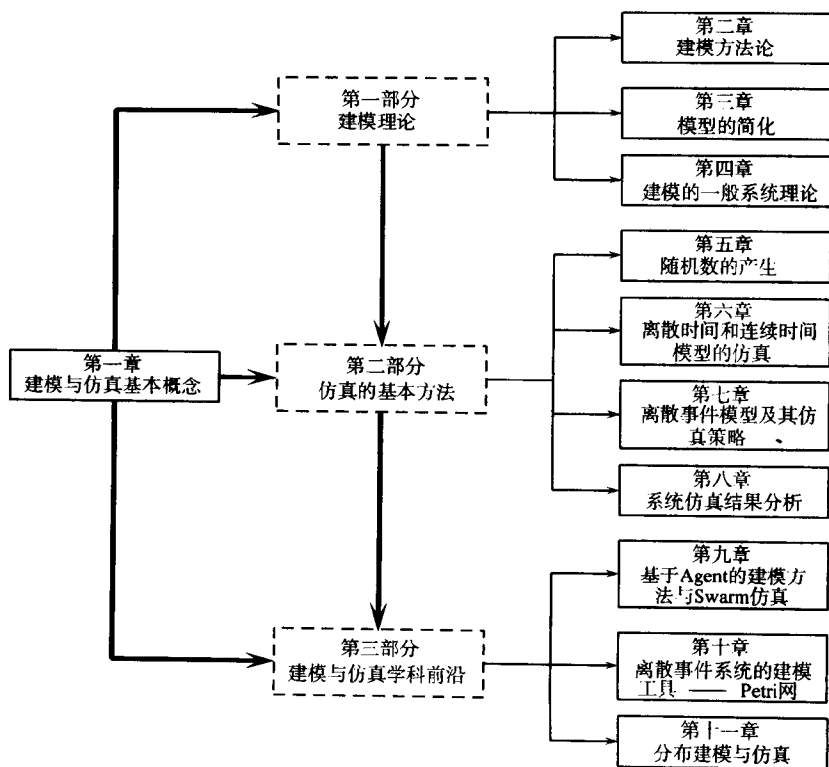
费 奇 孙德宝

2001 年 12 月于武汉喻家山

前 言

人类在科学和工程技术上所做的研究就是努力理解真实世界并掌握与真实世界发生联系的形式,而建模与仿真则是认识世界和改造世界的重要手段,它已成为现代科学技术研究的主要内容。建模与仿真技术已渗透到各学科和工程技术领域,如生物领域、航天航空领域、水利工程领域。虽然不同领域会有不同的数学模型和建模活动,但建模与仿真的方法和技术存在一定的共性。本书以一般系统理论为基础,讨论了适用于任何领域的建模与仿真的一般理论框架和方法,并从一般方法论这一层次出发,讨论建模与仿真的基本方法和技术。

本书内容主要包括三个部分:一是有关建模理论,介绍了建模方法论、模型的简化和建模的一般系统理论;二是有关仿真的基本方法,介绍了随机数的产生、离散时间和连续时间模型的仿真、离散事件模型及其仿真策略和系统仿真结果分析;三是有关建模与仿真的学科前沿,如基于 Agent 的建模方法及 Swarm 仿真、离散事件系统的建模工具——Petri 网和分布建模与仿真。全书的体系如下图所示,前八章是教学的基本内容,对于建模与仿真的学科前沿可结合最新文献资料安排



教学,并在教学中可适当安排仿真实验。第四章内容比较抽象,也可安排在第七章或第八章后进行。

第一章主要介绍了建模与仿真的基本概念,如建模与仿真的历史、定义、组成要素,模型的非形式描述,仿真的基本概念框架和仿真的发展趋势。

有关建模理论,第二章讨论了建模的一般方法论,包括基于一般系统理论的系统模型的形式化表示、传统建模方法学、基于计算机的建模方法学和用于复杂系统的结构建模;第三章讨论了模型的简化方法,包括模型描述变量的简化方法和动态系统的模型简化——集结法和摄动法;第四章用抽象的一般系统理论,讨论了在不同层次上的系统规范及其同态关系。

有关仿真方法,第五章讨论了随机数产生方法,包括 $[0,1]$ 均匀分布随机数的产生与统计检验方法和服从各种概率分布的随机数产生方法;第六章讨论了离散时间模型和连续时间模型的仿真及其仿真模型的描述;第七章讨论了离散事件模型及其策略,首先以杂货店模型为例介绍了离散事件模型,并讨论了基于事件调度和活动扫描的离散事件模型仿真策略与规范形式,最后对杂货店模型的建模与仿真过程进行了深入分析;第八章介绍了一些基本的系统仿真结果分析方法,包括终态仿真的结果分析方法、稳态仿真的结果分析方法和方差缩小技术。

有关建模与仿真的学科前沿,第九章介绍了当前学术界最为关注的基于 Agent 的建模方法及 Swarm 仿真,包括 Agent 的基本概念、基于 Agent 的建模方法、Swarm 系统和 Swarm 仿真实例;第十章介绍了一种离散事件系统的建模工具——Petri 网,包括它的基本原理、着色 Petri 网、层次 Petri 网和在混凝土施工系统中的应用;第十一章讨论了分布建模与仿真,包括分布式系统、分布仿真技术、分布对象计算技术和分布式交互仿真技术。

本书的主要编写人员如下:王红卫负责第一、二、六、七、十和十一章,王红卫和王亦鹏负责第三章,王红卫和刘琪峰负责第五章,刘振元负责第四和第八章,刘三妍和曾伟负责第九章。全文由王红卫统稿。

本书的出版得到教育部高等学校优秀青年教师教学和科研奖励基金的资助,并得到华中科技大学控制科学与工程系的资助和大力支持,在此表示由衷的敬意和诚挚的谢意。本书的出版也得到了华中科技大学系统工程研究所的支持,在此表示衷心的感谢。

另外,还要特别感谢研究生高飞、吴海滨、张凡和李琛,他们仔细地阅读和校对了本书的原稿,并提出了宝贵的意见。

由于作者水平有限,书中难免出现错误,敬请读者批评指正。

王红卫

2001 年 12 月于武汉喻家山

目 录

序言

前言

第一章 建模与仿真基本概念	(1)
1.1 引言	(1)
1.1.1 建模与仿真的作用和历史发展	(1)
1.1.2 建模活动	(2)
1.1.3 计算机仿真	(2)
1.2 建模与仿真的基本概念	(3)
1.2.1 建模与仿真的定义	(3)
1.2.2 实际系统	(3)
1.2.3 模型与建模关系	(4)
1.2.4 仿真关系	(6)
1.2.5 建模与仿真工作表示内容	(6)
1.3 模型的非形式描述	(7)
1.4 建模与仿真活动的组成要素	(9)
1.4.1 实际系统:行为	(9)
1.4.2 实验框架:有效性	(10)
1.4.3 基本模型:假想的完全解释	(10)
1.4.4 集总模型:简化	(10)
1.4.5 计算机:复杂性	(11)
1.5 仿真的基本概念框架	(11)
1.6 仿真的发展趋势	(13)
第二章 建模方法论	(17)
2.1 数学模型	(17)
2.1.1 数学模型的作用	(17)
2.1.2 集合、抽象与数学模型	(19)
2.1.3 数学建模的形式化表示	(20)
2.1.4 模型的有效性与建模形式化	(22)
2.1.5 数学模型的分类	(24)
2.1.6 系统描述间的关系	(27)

2.2 建模方法学	(29)
2.2.1 建模过程的信息源	(29)
2.2.2 建模途径	(30)
2.2.3 模型可信性	(31)
2.3 基于计算机的建模方法学	(32)
2.3.1 引言	(32)
2.3.2 全局性建模的基本思路	(34)
2.3.3 模型对象及其信息存储	(35)
2.4 解释结构建模	(41)
2.4.1 基本概念	(41)
2.4.2 结构建模(解释结构模型法)	(44)
第三章 模型的简化	(52)
3.1 模型描述变量的简化	(52)
3.1.1 淘汰一个或多个实体、描述变量或相互关系规则	(52)
3.1.2 随机变量取代确定性变量	(53)
3.1.3 粗化描述变量	(54)
3.1.4 归组实体及聚集变量	(54)
3.2 动态系统的模型简化——集结法	(55)
3.2.1 精确集结法	(56)
3.2.2 模态集结法	(59)
3.2.3 连分式集结法	(63)
3.2.4 链式集结法	(66)
3.3 动态系统的模型简化——摄动法	(71)
3.3.1 弱耦合模型	(71)
3.3.2 强耦合模型	(73)
第四章 建模的一般系统理论	(76)
4.1 时基、轨迹和分段	(77)
4.1.1 时基	(77)
4.1.2 轨迹和分段	(78)
4.2 系统规范的分层描述	(78)
4.2.1 观测框架	(78)
4.2.2 I/O 关系的观测	(79)
4.2.3 I/O 函数的观测	(81)
4.2.4 I/O 系统	(82)
4.3 从结构到行为	(87)

4.4 系统观测的同态关系	(89)
4.4.1 观测框架同态	(90)
4.4.2 I/O 关系观测同态	(90)
4.4.3 I/O 函数观测的同态	(91)
4.4.4 I/O 系统同态	(93)
4.5 结构同态和行为同态	(94)
4.6 建模形式化	(96)
4.6.1 系统的分类	(97)
4.6.2 微分方程形式化	(98)
4.6.3 离散事件系统	(99)
4.6.4 离散时间系统: 序列机形式	(99)
第五章 随机数的产生	(101)
5.1 $[0,1]$ 均匀分布随机数的产生	(101)
5.1.1 $[0,1]$ 均匀分布	(101)
5.1.2 产生均匀随机数的方法	(102)
5.1.3 线性同余法	(104)
5.1.4 伪随机数发生器的联合使用	(106)
5.2 $[0,1]$ 均匀分布随机数的统计检验	(107)
5.2.1 均匀随机数的随机性和均匀性检验	(108)
5.2.2 均匀随机数的独立性检验	(109)
5.2.3 矩检验	(111)
5.3 产生各种概率分布的随机数	(111)
5.3.1 求逆法	(111)
5.3.2 舍选法	(113)
5.3.3 组合法	(115)
5.3.4 经验分布法	(117)
5.3.5 近似法	(117)
第六章 离散时间和连续时间模型的仿真	(119)
6.1 状态变量	(119)
6.1.1 状态变量的基本概念	(119)
6.1.2 状态变量的仿真性质	(123)
6.2 离散时间模型仿真	(123)
6.2.1 时不变离散时间模型的仿真过程	(124)
6.2.2 离散时间模型的形式规范	(124)
6.2.3 离散时间模型的结构与行为	(128)

6.2.4 非自治离散时间模型	(129)
6.3 连续时间模型仿真	(130)
6.3.1 微分方程系统规范	(130)
6.3.2 积分法	(131)
6.4 离散时间和连续时间仿真模型的描述	(134)
6.4.1 污染模型	(134)
6.4.2 模型描述语言	(136)
6.4.3 模型描述语句序列分析	(138)
6.4.4 记忆函数仿真	(142)
第七章 离散事件模型及其仿真策略	(145)
7.1 离散事件模型	(145)
7.1.1 杂货店模型	(145)
7.1.2 概率模型的确定性表示法	(148)
7.1.3 杂货店模型的形式描述	(149)
7.1.4 同时事件	(151)
7.1.5 外部事件	(153)
7.1.6 离散事件系统的规范	(154)
7.2 基于事件调度的离散事件模型	(155)
7.2.1 基于事件调度的离散事件模型规范	(155)
7.2.2 计算机-用户模型	(157)
7.2.3 事件调度的仿真策略	(161)
7.3 基于活动扫描的离散事件模型	(163)
7.4 杂货店模型的建模与仿真过程分析	(166)
7.4.1 杂货店的基本模型	(167)
7.4.2 杂货店的试验框架	(168)
7.4.3 基本模型的有效简化和杂货店集总模型	(170)
7.4.4 杂货店基本模型与集总模型的同态关系	(172)
第八章 系统仿真结果分析	(177)
8.1 终态仿真的结果分析	(178)
8.1.1 重复运行法	(178)
8.1.2 序贯程序法	(179)
8.2 稳态仿真的结果分析	(182)
8.2.1 批均值法	(182)
8.2.2 稳态序贯法	(184)
8.2.3 再生法	(186)

8.3 方差减小技术	(188)
8.3.1 公用随机数法(CRN)	(188)
8.3.2 对偶变量法(AV)	(190)
8.3.3 控制变量法	(191)
第九章 基于 Agent 的建模方法及 Swarm 仿真	(193)
9.1 Agent 的基本概念	(193)
9.1.1 Agent 的定义	(193)
9.1.2 Agent 与对象	(195)
9.1.3 多 Agent 系统	(197)
9.1.4 Agent 的作用	(198)
9.2 基于 Agent 的建模方法	(200)
9.2.1 基于 Agent 的建模思想	(200)
9.2.2 面向 Agent 的系统分析	(201)
9.2.3 实现与仿真	(205)
9.3 Swarm 系统简介	(207)
9.3.1 Swarm 的思想	(208)
9.3.2 Swarm 的发展历程	(208)
9.3.3 Swarm 的建模思想和方法	(209)
9.3.4 Swarm 的体系结构和仿真结构	(210)
9.3.5 Swarm 的基本特征和 Java 接口	(211)
9.4 Swarm 应用实例	(215)
9.4.1 热虫(Heatbug)	(215)
9.4.2 供应链系统的建模与仿真	(217)
第十章 离散事件系统的建模工具——Petri 网	(222)
10.1 Petri 网的基本概念	(222)
10.1.1 Petri 网的基本定义	(222)
10.1.2 Petri 网的运行规则	(224)
10.1.3 Petri 网的分析技术	(225)
10.1.4 Petri 网的扩展	(227)
10.2 着色 Petri 网	(229)
10.3 层次 Petri 网	(231)
10.3.1 层次 Petri 网的基本定义	(231)
10.3.2 基于层次 Petri 网的建模过程	(233)
10.4 混凝土施工系统的仿真	(237)
10.4.1 混凝土运输浇筑系统总体模型	(237)

10.4.2 拌和楼 Petri 网模型	(239)
10.4.3 汽车水平运输 Petri 网模型	(240)
10.4.4 起重机的 Petri 网模型	(242)
第十一章 分布建模与仿真	(244)
11.1 分布式系统	(244)
11.1.1 分布式系统的基本概念	(244)
11.1.2 分布式应用系统	(245)
11.2 分布式仿真技术	(247)
11.2.1 仿真系统分解	(247)
11.2.2 时刻、时钟和同步性	(250)
11.2.3 逻辑进程仿真	(254)
11.3 分布对象计算技术	(256)
11.3.1 分布对象技术的基本概念	(256)
11.3.2 分布式对象技术的主流技术	(257)
11.3.3 分布对象计算技术展望	(261)
11.4 分布式交互仿真技术(DIS)	(262)
11.4.1 分布式交互仿真的基本概念	(262)
11.4.2 分布式交互仿真的关键技术	(264)
11.4.3 HLA(High Level Architecture)体系结构	(269)
参考文献	(272)

第一章 建模与仿真基本概念

1.1 引言

1.1.1 建模与仿真的作用和历史发展

自从有人类以来,人们为了满足自身的基本需要,一直在同外部环境发生着联系。随着时间的流逝,人类所依赖的这种联系方式变得日趋复杂并多样化。人类在科学和工程技术上所做的研究就是努力理解真实世界并能掌握与真实世界发生联系的形式。随着科学和工程技术的发展,人们认识自然和改造自然的能力和手段也不断增强。回顾科学和工程技术的发展历史,在计算机出现之前,科学研究中的绝大部分工作是利用数学手段或其他方法对事物或真实世界进行描述,这也就是建模活动。计算机的出现对科学和工程技术的发展产生了深远的影响,使人们能对复杂事物和复杂系统建立模型并利用计算机进行求解,这些手段和方法逐步形成了计算机仿真技术。建模与仿真成为当今现代科学技术研究的主要内容,建模与仿真技术也渗透到各学科和工程技术领域。

建模与仿真这一领域的发展可分为两个阶段。其一是计算机出现之前,主要是在物理科学基础上的建模;其二是 20 世纪 40 年代计算机诞生以后,出现了计算机仿真技术,它的发展也促进了建模技术的发展,建模与仿真日益紧密,互不可分。简单的建模与仿真的历史发展可总结为表 1.1。

表 1.1 建模与仿真的历史发展

年 代	发展的主要特点
1600 ~ 1940	在物理科学基础上的建模
20 世纪 40 年代	电子计算机的出现
20 世纪 50 年代中期	仿真应用于航空领域
20 世纪 60 年代	工业控制过程的仿真
20 世纪 70 年代	包括经济、社会和环境因素的大系统仿真
20 世纪 70 年代中期	系统与仿真的结合,如用于随机网络建模的 SLAM 仿真系统
20 世纪 70 年代中期	系统仿真与更高级的决策结合,如决策支持系统 DSS
20 世纪 80 年代中期	集成化建模与仿真环境,如美国 Prisker 公司的 TESS 建模仿真系统
20 世纪 90 年代	可视化建模与仿真,虚拟现实仿真,分布交互仿真

1.1.2 建模活动

人类自从有了现代文明,就开始在科学工程方法基础上进行与外部世界的相互作用,也就是用“形式化”模型或者抽象的表示方法描述事物和外部现实世界。科学家们通过观察和实验,试图建立抽象的表示方法和定律,如开普勒的行星运动三大定律、牛顿的万有引力定律及爱因斯坦的相对论等。这些方法、定律是对现实世界中某些已经被证明正确的假设的形式化,由于它们抓住了实际系统的基本性质,人们有可能利用它们进行推理、分析和设计,也就是说为人们提供了控制实际系统的能力。因此,建模活动是具有特殊形式的人与外界的相互作用,它是由两个不同的步骤所组成:其一是模型的建立或形式化,产生出一个现实世界系统的模型,它是人类通过建立一种抽象的表示方法以获得对自然现象的充分理解;其二是对形式化模型进行分析与利用,以便掌握如何按照人类的意志对现实系统进行控制。

随着科学技术水平的发展,利用模型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,从身边发生的自然现象到广阔无垠的宇宙奇观。但是,并不是随着时间的推移,一切难题就会迎刃而解。人可以看成为抽象思维的工具,他有能力进行识别和综合,也可以计算、记忆等。但是人的这些能力都有局限性,人们对复杂事物和复杂系统建立模型并进行求解的能力是非常有限的,这使人们对模型和形式化的期望大打折扣。这就导致人类寻求一些有助于克服这些局限性的“仪器”和“装置”,这“仪器”和“装置”就是对科学技术的发展产生了无可估量的和深远影响的电子计算机。

1.1.3 计算机仿真

计算机问世不久,人们就清楚地看到这种新机器给很多问题的求解带来了异常的生机,但最初计算机在人类的科学工程活动中的作用是有限的,它仅仅作为一部强有力的、高速的、不会说话的机器。随着计算机的日趋完善,许多复杂的模型可以通过计算机来进行计算求解,它在科学技术中的作用也与日俱增,并把模型求解的手段逐步发展成为现代的计算机仿真技术,这样才诞生“仿真”这个新词。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实验的系统进行仿真试验研究,从而可节省大量的资源和费用。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。

“仿真”一词的确切含义目前仍有争议,简单地说,多数人认为仿真就是程序的运行,该程序表示了一个抽象的模型,用来研究现实系统的一些特征。在这个意义

上,仿真活动可认为就是支持模型建立与模型分析的所有计算,它对科学工程方法中的模型建立阶段和模型分析阶段具有同等重要的价值。

1.2 建模与仿真的基本概念

1.2.1 建模与仿真的定义

建模与仿真是指构造现实世界实际系统的模型和在计算机上进行仿真的有关复杂活动,它主要包括实际系统、模型和计算机等三个基本部分(在下一节把它们展开为五个要素),同时考虑三个基本部分之间的关系,即建模关系和仿真关系,如图 1.1 所示。建模关系主要研究实际系统与模型之间关系,它通过对实际系统的观测和检测,在忽略次要因素及不可检测变量的基础上,用数学的方法进行描述,从而获得实际系统的简化近似模型。仿真关系主要研究计算机的程序实现与模型之间的关系,其程序能为计算机所接受并在计算机上运行。

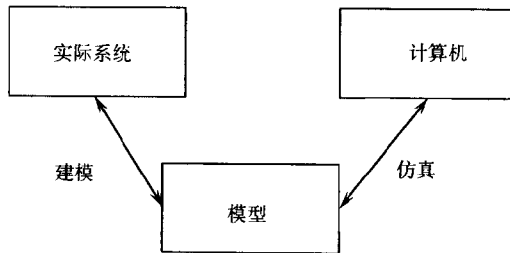


图 1.1 建模与仿真的基本组成与两个关系

1.2.2 实际系统

实际系统是所关注的现实世界的某个部分,它具有独立行为规律,是相互联系又相互作用的对象的有机组合。实际系统可能是自然的或人工的、现在存在的或是未来所计划的。例如,一个进销存系统是个人工系统,它包括经理部、市场部、采购部、仓储部和销售部等部门,各个部门相对独立又相互联系。总经理负责各个部门之间的协调,并负责主要的决策,使系统能够正常的运转,并使系统获得最大的利润。在刚开始建模时,对建模者而言,实际系统可表征为系统行为数据源,即以 X 对 T 曲线为主要形式的行为数据源, X 是实际系统中感兴趣的变量,如房间里的温度、大气污染物的浓度等, T 是时间轴,用秒、小时、日、月等度量,如图 1.2 所示。

对于一个系统来说,无论是大还是小,都包括三个要素:实体、属性和活动。实体是指组成系统的具体对象,系统中的实体既具有一定的相对独立性,又相互联系

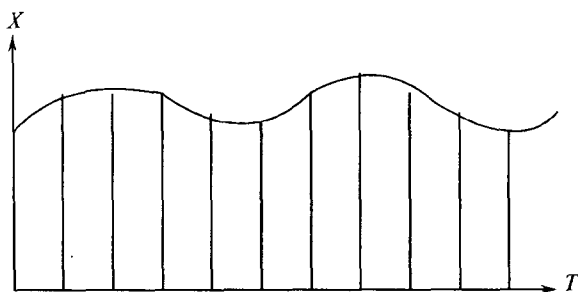


图 1.2 实际系统的一般表示

构成一个整体。例如,在进销存系统中,经理、部门、商品、仓库、职员等都为实体。属性是指对实体特征的描述,用特征参数或变量表示。例如,在进销存系统中,商品的属性包括生产日期、进货价格、库存数量、生产批号、销售价格等。活动是实体在一段时间内持续进行的操作或过程,例如进销存系统中某段时间库存商品数量的变化。

实际系统不是孤立存在的,任何一个系统都将由于系统之外出现的变化而受影响。这种对系统活动产生影响的外界因素称为系统的环境。在系统建模的初始阶段,应考虑系统所处的环境,并首先应划分系统与其所处环境之间的边界。系统边界包围系统中的所有实体。系统边界的划分在很大程度上取决于系统研究的目的,例如在商品销售系统中,如果仅考虑商品仓库库存量的变化情况,那么系统只需包括采购部门、仓库以及销售部门就可以;但若若要研究商品进货与销售的关系时,系统中还要包括市场调查部门,因为商品销售状况及对进货的影响这部分职能是由该部门完成的。

1.2.3 模型与建模关系

构造一个真实系统的模型,在模型上进行实验成为系统分析、研究的十分有效的手段。为了达到系统研究的目的,系统模型用来收集系统有关信息和描述系统有关实体。也就是说,模型是为了产生行为数据的一组指令,它可以用数学公式、图、表等形式表示。模型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,是对系统某些本质方面的描述,它以各种可用的形式提供被研究系统的描述信息。模型描述可视为是对真实世界中的物体或过程的相关信息进行分析的结果,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。从某种意义上说,模型是系统的代表,同时也是对系统的简化。另一方面,模型应足够详细,以便从模型的实验中取得关于实际系统的有效结论。

由一个实际系统构造一个模型的任务一般包括两方面的内容:第一是建立模型结构,第二是提供数据。在建立模型结构时,要确定系统的边界,还要鉴别系统的实体、属性和活动。而提供数据则要求能够使包含在活动中的各个属性之间有确定的关系。在选择模型结构时,要满足两个前提条件:一是要细化模型研究的目的,二是要了解有关特定的建模目标与系统结构性质的关系。

一般来说,系统模型的结构具有以下一些性质:

1)相似性。模型与所研究系统在属性上具有相似的特性和变化规律,这就是说,真实系统的“原型”与“替身”之间具有相似的物理属性或数学描述。

2)简单性。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非可测变量的影响,因此实际的模型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。

3)多面性。对于由许多实体组成的系统来说,由于其研究目的不同,就决定了所要收集的与系统有关的信息也是不同的,所以用来表示系统的模型并不是惟一的。由于不同的分析者所关心的是系统的不同方面,或者由于同一分析者要了解系统的各种变化关系,对同一个系统可以产生相应于不同层次的多种模型。

在建模关系中,建模者最关注的是模型的有效性,它反映了建模关系正确与否,即模型如何充分地表示实际系统。模型的有效性可用实际系统数据和模型产生的数据之间的符合程度来度量,可用等式象征性地描述:

$$\text{实际系统数据} = ? \text{模型产生的数据}$$

模型的有效性用符合程度来度量,它可分三个不同级别的模型有效:

1)复制有效(Replicatively Valid)。建模者把实际系统看作一个黑箱,仅在输入输出行为水平上认识系统。这样,只要模型产生的输入输出数据与从实际系统所得到的输入输出数据是相匹配的,就认为模型是复制有效。实际上,这类有效的建模只能描述实际系统过去的行为或试验,不能说明实际系统将来的行为,这是低水平的有效。

2)预测有效(Predictively Valid)。建模者对实际系统的内部运行情况了解清楚,也就是掌握了实际系统的内部状态及其总体结构,可预测实际系统的将来的状态和行为变化,但对实际系统内部的分解结构尚不明了。在实际系统取得数据之前,能够由模型看出相应的数据,这就认为模型是预测有效。

3)结构有效(Structurally Valid)。建模者不但搞清了实际系统内部之间的工作关系,且了解了实际系统的内部分解结构,可把实际系统描述为由许多子系统相互连接起来而构成的一个整体。结构有效是模型有效的最高级别,它不但能重复被观察的实际系统的行为,且能反映实际系统产生这个行为的操作过程。