



系统建模与仿真

(上册)

□ 郭齐胜 董志明 李亮 曹军海 单家元 编著 □



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书得到总装备部 1155 人才工程专项经费资助

系统建模与仿真

(上册)

郭齐胜 董志明 李亮 曹军海 单家元 编著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

系统建模与仿真 / 郭齐胜等编著. —北京: 国防工业出版社, 2007.7

总装备部研究生教育精品教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 05061 - 5

I. 系... II. 郭... III. ①系统建模—研究生—教材②系统仿真—研究生—教材 IV. N945.12 TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 027491 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 340 千字

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 63.00 元(上、下册)

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

随着计算机技术的发展,系统建模与仿真技术得到了非常广泛的应用,正成为继理论研究和实验研究之后第三种认识客观世界和改造客观世界的重要手段。系统建模与仿真是很多学科专业研究生必须掌握或了解的技术。系统建模与仿真内容非常丰富,怎样精心选择并科学组织是教材编写中面临的一个重要问题。

本书的编写以培养高素质人才为指导思想,坚持系统性、科学性、新颖性和实用性的原则,以建模—仿真—仿真可信度评估为主线,以系统建模方法和仿真算法为重点,主要内容包括概念建模和常用的数学建模方法、常用的系统数学仿真方法和半实物仿真方法、先进的分布交互仿真和仿真可信度评估方法,旨在为研究生提供一部高水平的精品教材。

本教材的主要特色有以下几点。

(1) 面向需求。从“符合仿真方向研究生培养目标及系统建模与仿真课程教学的要求”出发,取材合适、深度适宜、层次分明、条理清楚。

(2) 体系科学。从仿真科学与技术学科的高度,阐述系统仿真的理论、方法及其应用。内容包括:建模(概念建模、数学建模)、建模与仿真(面向过程建模与仿真、面向对象建模与仿真、面向 Agent 建模与仿真、定性建模与仿真、定性定量建模与仿真)、仿真(半实物仿真、分布交互仿真)和仿真可信度评估四大部分,还附有常用的数学变换、思考题和仿真实验。

(3) 内容新颖。注重吸收和反映系统仿真学科国内外研究的代表性先进成果和研究动态。除介绍系统仿真的经典内容外,还有概念建模、面向 Agent 的建模与仿真、定性建模与仿真、定性定量建模与仿真、分布交互仿真、模型 VV&A 和仿真可信度评估等新内容。

(4) 注重实用。贯彻理论联系实际的原则,几乎每种理论和方法都有例题,便于学生系统掌握本门课程的内容。

本书由郭齐胜设计框架结构,郭齐胜、董志明、李亮、曹军海和单家元共同编写。编写过程中直接引用了郭齐胜等编写的《系统建模》和《系统仿真》中的部分章节内容,在此对这两部书的其他作者表示感谢。

因作者水平有限,不妥之处在所难免,欢迎提出宝贵意见和建议。

编 者

目 录

(上册)

第1章 绪论	1
1.1 系统与模型	1
1.1.1 系统	1
1.1.2 模型	7
1.2 系统建模	11
1.2.1 建模过程的信息源	12
1.2.2 建模的途径	13
1.2.3 模型的可信度	15
1.2.4 建模的一般原则	16
1.2.5 建模的一般过程	18
1.2.6 模型文档	21
1.3 系统仿真	22
1.3.1 仿真的依据	22
1.3.2 仿真的定义	26
1.3.3 仿真的分类	27
1.3.4 系统仿真的定义	30
1.3.5 系统仿真的一般过程	31
1.3.6 系统仿真技术的应用	33
1.3.7 系统仿真技术的特点	35
1.3.8 仿真系统	36
1.4 系统建模与仿真技术	37
1.4.1 系统建模与仿真技术的含义	37

1.4.2	系统建模与仿真技术体系	37
1.4.3	系统建模与仿真技术研究与应用中值得关注的 若干焦点	40
1.5	本书的结构	52
第2章	概念建模	55
2.1	引言	55
2.2	概念建模现状	56
2.3	概念建模过程	59
2.4	概念建模方法	60
2.4.1	基于实体—关系的概念建模方法	60
2.4.2	基于面向对象的概念建模方法	61
2.4.3	基于本体的概念建模方法	66
2.5	常用概念建模语言	69
2.5.1	基于UML的概念建模	69
2.5.2	基于XML的概念建模	71
2.5.3	基于IDEF的概念建模	75
2.6	概念模型在仿真中的应用	78
第3章	基于系统辨识的建模方法	81
3.1	系统辨识概述	81
3.1.1	系统辨识的定义	81
3.1.2	系统辨识的有关概念	82
3.1.3	系统辨识的基本过程	84
3.1.4	系统辨识方法	85
3.2	模型参数辨识的最小二乘法	86
3.2.1	最小二乘原理	86
3.2.2	最小二乘整批算法	87
3.2.3	最小二乘递推算法	92
3.3	模型阶次的辨识方法	100
3.3.1	Hankel 矩阵法	100
3.3.2	行列式比(或积矩阵)法	103

3.3.3	信息准则法	104
3.3.4	最终预报误差准则法	107
3.3.5	小结	108
3.4	闭环系统辨识	109
第4章	基于人工神经网络的建模方法	113
4.1	人工神经网络简介	113
4.1.1	人工神经元模型	113
4.1.2	人工神经网络的分类	116
4.1.3	人工神经网络的工作过程	118
4.1.4	人工神经网络的学习方式	119
4.1.5	人工神经网络的学习规则	120
4.1.6	人工神经网络的几何意义	122
4.1.7	人工神经网络建模的特点	124
4.2	BP网络	124
4.2.1	BP网络结构	124
4.2.2	BP学习算法	125
4.2.3	BP算法的计算步骤	129
4.2.4	BP算法示例	130
4.2.5	BP算法的不足及其改进	133
4.2.6	BP网络工程应用中的若干问题	135
4.3	反馈式神经网络	140
4.3.1	连续型 Hopfield 网络	141
4.3.2	离散型 Hopfield 网络	149
4.4	人工神经网络应用示例	154
4.4.1	人工神经网络用于 CGF 智能行为建模	154
4.4.2	人工神经网络用于规则搜索	159
第5章	基于灰色系统理论的建模方法	166
5.1	引言	166
5.1.1	灰色系统的概念与基本原理	166
5.1.2	几种不确定性方法的比较	168

5.1.3	灰色系统理论在横断学科群中的地位	169
5.1.4	灰色系统建模基础	170
5.2	GM(1,1)模型	181
5.2.1	灰色微分方程	181
5.2.2	GM(1,1)模型的建立	182
5.2.3	模型精度的检验	184
5.2.4	GM(1,1)模型群	190
5.2.5	GM(1,1)模型的适应范围	192
5.3	GM(1,1)模型的修正模型	193
5.3.1	残差 GM(1,1)模型	193
5.3.2	残差均值修正 GM(1,1)模型	197
5.3.3	尾部数列 GM(1,1)修正模型	199
第6章	随机变量模型的建模方法	202
6.1	引言	202
6.2	分布类型假设	202
6.3	分布参数估计	205
6.4	分布假设检验	208
第7章	基于层次分析法的建模方法	216
7.1	引言	216
7.2	基本层次分析法	217
7.2.1	层次分析法的步骤	217
7.2.2	递阶层次结构的建立	217
7.2.3	构造两两比较的判断矩阵	219
7.2.4	单一准则下元素相对排序权重计算	220
7.2.5	判断矩阵的一致性检验	221
7.2.6	计算各层元素对目标层的总排序权重	223
7.3	群组层次分析法	226
7.3.1	引言	226
7.3.2	群组决策综合方法	226
7.4	灰色层次分析法	228

7.4.1	步骤	228
7.4.2	示例	232
7.5	模糊层次分析法	242
7.5.1	引言	242
7.5.2	方法描述	243
7.5.3	应用	245
第8章	连续系统的建模与仿真	248
8.1	引言	248
8.2	微分方程的机理建模方法	249
8.2.1	建模步骤	249
8.2.2	建模示例	250
8.2.3	非线性系统模型的线性化	255
8.3	状态空间模型的建模方法	262
8.3.1	根据物理学定律直接建立状态空间模型	262
8.3.2	由微分方程建立状态空间模型	267
8.3.3	由传递函数建立状态空间模型	275
8.3.4	状态方程的标准化	281
8.4	面向结构图的模型	283
8.4.1	典型环节的选择	283
8.4.2	面向结构图的系统方程描述	285
8.5	数值积分法	287
8.5.1	常用的几种数值积分法	287
8.5.2	误差、收敛性与稳定性分析	301
8.5.3	数值积分法的选择与计算步长的确定	306
8.6	离散相似法	315
8.6.1	基本原理	316
8.6.2	保持器的类型	317
8.6.3	离散相似法的步骤	319
8.6.4	离散相似法的精度与稳定性	320
8.6.5	用数字补偿器提高离散相似法的精度和稳定性	322

8.7	转移矩阵法(时域离散相似法)	322
8.7.1	系统的离散状态空间模型	322
8.7.2	典型环节的离散状态空间模型	326
8.7.3	矩阵指数的计算	329
8.7.4	举例	332
8.8	增广矩阵法	333
8.8.1	增广矩阵法的基本思想	333
8.8.2	典型输入作用下的增广矩阵	334
8.9	置换法	338
8.9.1	图斯汀置换法的推导	338
8.9.2	性质	340
8.9.3	举例	340
8.10	根匹配法	341
8.11	时域矩阵法	346
8.12	仿真算法的几个问题	350
8.12.1	病态方程的仿真算法	350
8.12.2	实时仿真算法	351
8.12.3	仿真算法的选择与比较	354
8.13	基于数值积分法(面向方程)的连续系统仿真	355
8.14	基于离散相似法(面向结构图)的连续系统仿真	356
8.14.1	系统的数学模型	356
8.14.2	系统的仿真模型	357
8.14.3	编程技巧问题	358
	仿真实验	364
F.1	面向方程的数值积分方法仿真	364
F.2	面向结构图的离散相似法仿真	366

第 1 章 绪 论

1.1 系统与模型

1.1.1 系统

1. 系统的定义

“系统”是一个内涵十分丰富的概念,是关于“系统”研究的各个学科所共同使用的一个基本概念,是系统科学和系统论研究的一个重要内容。

G. 戈登(G. Gordon)在《系统仿真》一书中写道:“系统这个术语在各个领域用得很广,很难给它下定义。一方面要使该定义足以概括它的各种作用,另一方面又要能简明地将定义应用于实际。”正因为很难用简明扼要的文字准确地对“系统”一词加以定义,故在国内外学术界出现了从不同角度对系统进行的种种不同定义。这里给出一种普遍能接受的定义。

系统是由互相联系、互相制约、互相依存的若干组成部分(要素)结合在一起形成的具有特定功能和运动规律的有机整体。

应当指出,这里的系统是广义的,大至无垠的宇宙世界,小至原子分子,都可以称为系统。

图 1-1 所示的是一个电炉温度调节系统。在该系统中,给定温度值与温度计所测量到的实际温度进行比较,得到温度的偏差,该偏差信号被送到调节器中控制电炉的电压,从而实现控制电炉温度的目的。

图 1-2 所示为商品销售系统。在这个系统中,各部门之间既互相独立,又互相联系,经理部负责各个部门之间的协调,并作出最终决策,以期使整个系统获得最大效益。

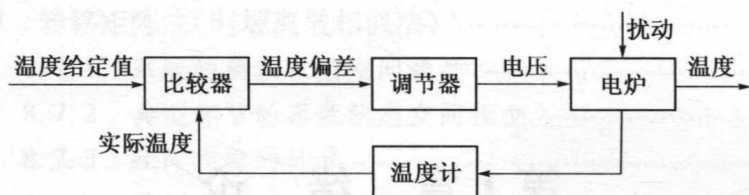


图 1-1 电炉温度调节系统

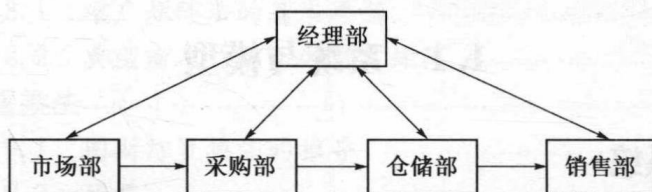


图 1-2 商品销售系统

2. 系统的特性

上述两个系统的物理性质、功能和构成截然不同,然而它们却具有以下共性。

1) 系统是实体的集合

所谓实体是指组成系统的具体对象。例如,电炉调节系统中的比较器、调节器、电炉、温度计,商品销售系统中的经理、部门、商品、货币、仓库等都是实体。系统中的各个实体既具有一定的相对独立性,又相互联系构成一个整体,即系统。

2) 组成系统的实体具有一定的属性

所谓属性是指实体所具有的全部有效特性(如状态、参数等)。在电炉温度调节系统中,温度、温度偏差、电压等都是属性,商品销售系统中部门的属性有人员的数量、职能范围,商品的属性有生产日期、进货价格、销售日期、售价等。

3) 系统处在活动之中

所谓活动是指实体随时间推移而发生的属性变化。例如,电炉温度调节系统中的主要活动是控制电压的变化,而商品销售系统中的主要活动有库存商品数量的变化、零售商品价格的生长等。

各种系统,不论是简单的还是复杂的,总是由一些实体组成,而每一实体又有其属性,整个系统有其主要活动。因此,实体、属性和活动构成了系统的三大要素。

系统是在不断地运动、发展、变化的。由于组成系统的实体之间的相互作用而引起的属性的变化,使得在不同时刻,系统中实体与属性都可能会发生变化,这种变化通常用状态的概念来描述。在任意时刻,系统中实体、属性以及活动的信息总和称为系统在该时刻的状态,用于表示系统状态的变量称为状态变量。

系统并不是孤立存在的。自然界中的一切事物都存在着相互联系和相互影响。任何一个系统都将经常受到系统之外因素变化的影响,这种对系统的活动结果产生影响的外界因素称为系统的环境。对一个系统进行分析时,必须考虑系统所处的环境,而首先要做的便是划分系统与其所处的环境之间的界线,即系统的边界。系统的边界包含系统中的所有实体。

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,如果仅考虑商品库存量的变化情况,那么系统只需包含采购部门、仓库和销售部门即可。但如果要研究商品进货与销售的关系时,系统中还应包括市场调查部门,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。

根据研究对象与目的的不同,系统可大可小,而且系统本身也可以由一系列相互作用的子系统构成,子系统又可以由更低一级的子系统构成,并且系统和它的部分环境又构成一个更大的系统,这就是所谓的系统等级结构。

系统研究包括系统分析、系统综合和系统预测的三个方面。研究系统,首先需要明确研究目的,进而描述清楚所研究系统的三要素(实体、属性和活动)及环境。也只有在对实体、属性、活动和环境作了明确的描述之后,系统才是确定的。

对于系统的描述,一般可以分为三级,即行为级、状态结构级、结构分解级。行为级是最低一级,在这一级,系统实际上被视为黑箱。在系统与模型之间,如果在行为级等价,称为同态模型;如果在结构级等价,则称为

同构模型。同态意味着系统与模型之间行为的相似,但并无结构上的对应关系。在复杂系统仿真中,低级阶段是建立系统的同态模型,它可用来复现和预测系统的行为。高级阶段则是建立系统的同构模型,从状态结构级一直到结构分解级,用以认识系统运行的机理和规律。

同态模型代表的是与原型同态的系统,同构模型代表的是与原型系统同构的系统。

所谓同构系统是指对外部激励具有同样反应的系统。因此,对两个同构系统来说,只要给予相同的输入,就会得到相同的输出。

相同 A 和 B 同构的条件可以用下列方程来表示。

对任何时刻 t 来说,如果有

$$R_1A(t) = R_1B(t), R_2A(t) = R_2B(t), \dots, R_nA(t) = R_nB(t)$$

那么

$$Y_1A(t) = Y_1B(t), Y_2A(t) = Y_2B(t), \dots, Y_nA(t) = Y_nB(t)$$

这就是说,两个相同 A 和 B 具有相“匹配”的输入集和输出集(图 1-3)。

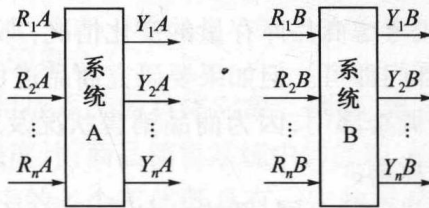


图 1-3 同构系统的输入输出关系

系统同态是指上述等价性弱化了的一类关系。换句话说,系统 B 是系统 A 的同态系统,是指系统 B 的输入信号集和输出状态集只与系统 A 中少数具有代表性的输入输出相对应。如果说同构系统的原型与模型的输入和输出之间存在一对一的关系,那么,原型系统和它的同态系统(模型)的输入输出之间存在着多对一的关系。应当指出,满足同构关系的原型系统和模型系统彼此之间是可逆的,而单纯满足同态关系的原型系统和它的模型系统之间也是可逆的。同构系统一定是同态系统,但反过来未必成立。

有了同构和同态的概念,对建立模型的方法就可以有更深入的理解。

所谓建立模型,就是给出原型的同构像和同态像。如果能够找到一个系统的同构像,模型当然相当精确。但是,这个目标不一定能够实现,即便实现了,也未必是最好的。因为,一则可能要付出更高的代价,再则对一个特定的系统来说,它有自己特定的工作环境,即环境对系统的激励作用是特定的,因而系统的输出状态响应也是特定的。这就是说,在特定的工作环境下,系统状态的各个状态变量在决定系统的性能方面并不是同等重要的。对应处在 n 为状态空间的原型系统 A,如果忽略那些不重要的状态分量,可以得到一个用 m ($m < n$) 的状态向量描述的相似系统 B(模型),而这样的系统对应实现研究目标来说已经足够了。一般而言,系统 B 与原型系统 A 之间的关系大都是同态的。

一个原型系统的比较理想的模型,应该是原型系统的比较好的同态系统。所谓好,就是从具体的建模目的出发,通过对系统的深入分析和研究,在弄清系统的特定工作环境的条件下,抓住决定系统性能的重要状态量。重要状态首先反映在概念模型之中。因此,建立概念模型是系统仿真的关键性阶段,它将在很大程度上决定模型与系统的相似程度。模型能否代表系统,须等到结果分析之后才能知晓。

3. 系统的分类

系统的分类方法很多,按照不同的分类方法可以得到各种不同类型的系统。根据本课程的需要,这里只列出如下几种分类方法。

1) 按系统的特性分类

可分为工程系统和非工程系统。

所谓工程系统是指人们为了满足某种需要或实现某个预定的功能,采用某种手段构造而成的系统,如机械系统、电气系统、化工系统、武器系统等。工程系统有时也称作物理系统。

所谓非工程系统是指由自然和社会在发展过程中形成的,被人们在长期的生产劳动和社会实践中逐步认识的系统,如社会系统、经济系统、管理系统、交通系统、生物系统等,非工程系统有时也称作非物理系统。

2) 按系统中起主要作用的状态随时间的变化分类

可分为连续系统和离散事件系统。

状态随时间连续变化的系统称作连续系统。

状态的变化在离散的时间点上发生,且往往又是随机的,这类系统称作离散事件系统。

3) 按对系统内部特性的了解程度分类

可分为白色系统、黑色系统和灰色系统。

内部特性全部已知的系统称作白色系统。

内部特性全部未知的系统称作黑色系统。

内部特性部分已知,部分未知的系统称作灰色系统。

4) 按系统的物理结构和数学性质分类

可分为线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统、集中参数系统和分布参数系统、单输入单输出系统和多输入多输出系统等。

5) 按系统内子系统的关联关系分类

根据系统的本质属性,从系统内子系统的关联关系角度可分为简单系统与复杂系统。

简单系统是指组成系统数量较少,因而它们之间的关系也比较简单,或尽管子系统数量多或巨大,但它们之间关联关系比较简单,则称为简单系统。按照子系统的数量级,简单系统还可分为小系统(子系统数量为几个、十几个)、大系统(子系统数量为几十个、上百个),以及简单巨系统(子系统数量成千上万、上百亿、万亿)。对于某些非生命系统,例如,一台测量仪器可视为一个小系统,这个类系统用传统的数学、物理学、化学可以很好地描述;一个仅考虑产品生产的普通工厂可视为一个大系统,可以用控制论、信息论和运筹学的部分内容加以研究。总之,研究这些简单系统可以将各子系统之间的相互作用直接综合为整体系统的功能。简单巨系统的子系统数量巨大,但子系统差别较少,因而反映出此类系统的子系统种类少,关联关系比较简单。例如,激光系统就是简单巨系统,中国的围棋也可视为简单巨系统。这类系统无法用研究简单小系统和大系统的方法解决,连巨型计算机也不够使用。对于这样的系统,由于子系统往往具有共同特点,因此可把亿万个分子组成的巨系统的功能略去细节,而用19世纪后半叶发展起来的统计力学进行概括处理。处理这种系统的理论近20年来发展很快,如耗散结构理论和协同学。