

高等学校教材

模型与算法

杨浩 编著

12-43

北方交通大学出版社
<http://press.njtu.edu.cn>

085

V945.12-43
Y27

高等学校教材

模型与算法

杨 浩 编著

北方交通大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从系统模型构建与算法设计相结合的角度,阐述系统建模的基本原理和方法,介绍了主要的应用数学模型及其算法设计的基本方法,特别是对新兴的现代启发式算法(遗传算法、神经网络算法、模拟退火算法和禁忌算法)的原理和设计进行了专门的介绍。全书共5章,包括模型理论、模型构造方法、算法分析、算法设计和启发式算法。

本书可作为高校运输规划与管理或其他管理工程专业硕士研究生的教材或教学参考书,也可供从事规划、设计、管理等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模型与算法/杨浩编著. —北京:北方交通大学出版社,2002.10
高等学校教材
ISBN 7-81082-084-2

I. 模… II. 杨… III. ①建立模型-高等学校-教材②计算方法-高等学校-教材 IV. ①022②0241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 077136 号

责任编辑:郭利平

印刷者:北京瑞哲印刷厂

出版发行:北方交通大学出版社 电话:010-51686045 62237564

北京市西直门外高粱桥斜街44号 邮编:100044

经 销:各地新华书店

开 本:850×1168 1/32 印张:7.5 字数:180千字

版 次:2002年10月第1版 2002年10月第1次印刷

印 数:1000册 定价:18.00元

前 言

模型是研究和解决现代社会中复杂系统工程问题的重要工具和方法,模型方法的掌握和运用,不仅需要自然科学和社会科学方面的广泛知识,而且需要丰富的实践经验,以及综合运用各种知识、经验、主体感悟和创造所形成的整体素质和能力。模型和算法相结合,是运用计算机解决实际问题的强有力的现代应用技术的重要组成部分,也是高级研究和技术人才素质培养的重要一环。因此,本书的指导思想是:在模型和算法研究领域尽可能概括和总结前人的研究成果,启迪思路,努力使系统建模及其算法领域的知识系统化,并且同现代最新科技工具——电子计算机的应用紧密地结合起来,以期培养和锤炼理论与实践相结合的科学素质和能力。

在模型和算法的理论和应用领域,无论在内容和方法上都在继续发展和不断完善,不少问题还有待人们深入研究。因此,书中可能存在某些不妥之处,行文中的疏漏和错误也在所难免,诚恳希望有关专家和广大读者批评指正。

作 者

2002 年 8 月

目 录

第 1 章 模型理论	(1)
1.1 关于模型	(1)
1.1.1 模型的概念	(1)
1.1.2 模型的本质	(2)
1.1.3 模型的分类	(3)
1.2 数学模型	(6)
1.2.1 数学模型的特点	(6)
1.2.2 数学模型的分类	(7)
1.2.3 数学模型的评价和应用	(12)
1.2.4 常用的单因素变量模型	(14)
1.3 模型方法的基本特征	(15)
1.3.1 模型方法的综合性	(16)
1.3.2 模型方法的创造性	(17)
1.3.3 模型方法的实践性	(21)
1.4 模型在系统开发中的作用	(22)
1.4.1 模型的作用	(23)
1.4.2 系统工程开发中的模型应用	(26)
1.5 系统模型化过程	(26)
1.5.1 模型发展过程中的范畴辩证	(27)
1.5.2 模型化过程的构造方法论	(28)
1.5.3 系统模型的结构化方法论	(29)
1.5.4 模型化过程的规范化方法论	(30)
1.5.5 系统模型研究简例	(32)

1.6 模型化过程的工程逻辑与工程设计	(36)
1.6.1 工程逻辑	(36)
1.6.2 工程分析	(41)
1.6.3 案例	(46)
第2章 模型的构造方法	(49)
2.1 直接分析法	(49)
2.1.1 线性规划模型	(49)
2.1.2 目标规划模型	(53)
2.2 系统动力学方法	(55)
2.2.1 概述	(55)
2.2.2 系统动力学模型	(57)
2.2.3 案例分析	(61)
2.3 概率统计分析法	(66)
2.3.1 基本概念	(66)
2.3.2 随机服务系统问题求解	(69)
2.3.3 解题实例	(71)
2.4 网络计划分析法	(72)
2.4.1 网络计划分析模型的结构	(72)
2.4.2 网络计划模型的优化分析	(80)
2.4.3 案例	(84)
2.5 状态空间分析法	(91)
2.5.1 基本概念	(92)
2.5.2 状态空间模型	(93)
2.5.3 系统的优化控制	(95)
2.5.4 自适应、自学习和自组织控制	(97)
2.6 模糊评价分析法	(98)
2.6.1 模糊数学概述	(99)

2.6.2	模糊评价模型的建模步骤与方法	(99)
2.6.3	应用案例	(103)
2.7	投入产出法	(104)
2.7.1	投入产出法概述	(104)
2.7.2	投入产出分析表与投入产出平衡方程	(105)
2.7.3	投入产出模型	(107)
2.7.4	应用举例	(109)
2.8	系统辨识方法	(112)
2.8.1	问题的提出	(112)
2.8.2	系统辨识	(113)
2.8.3	辨识算法的基本原理与等价准则	(116)
2.8.4	辨识的内容与步骤	(117)
第3章	算法分析	(124)
3.1	算法概述	(124)
3.1.1	算法的基本概念	(124)
3.1.2	算法设计的步骤	(127)
3.2	算法的复杂性	(131)
3.2.1	引论	(131)
3.2.2	算法复杂性指标	(131)
3.2.3	算法分析示例	(138)
3.3	最佳算法	(141)
3.3.1	引例	(141)
3.3.2	最佳算法	(144)
3.4	P类问题和NP类问题	(144)
3.4.1	难解性问题	(144)
3.4.2	P类问题与NP类问题	(146)
3.4.3	NP完全问题	(149)

3.4.4	求解 NP 完全问题的途径	(150)
3.4.5	启发式算法	(151)
第 4 章	算法设计的基本方法	(154)
4.1	穷举法	(154)
4.2	登山法	(156)
4.3	分枝与限界	(159)
4.4	分治法	(162)
4.5	动态规划法	(164)
4.6	递归方法	(167)
4.7	探索法	(169)
4.8	倒推法	(170)
4.9	回溯法	(172)
4.10	模拟法	(176)
第 5 章	启发式算法	(182)
5.1	神经网络算法	(182)
5.1.1	人工神经网络简述	(182)
5.1.2	BP 神经网络的基本原理	(184)
5.1.3	BP 神经网络的算法步骤	(185)
5.1.4	BP 算法举例	(186)
5.2	遗传算法	(195)
5.2.1	遗传算法概述	(195)
5.2.2	遗传算法的基本原理	(196)
5.2.3	基因算法的要素	(198)
5.2.4	GA 的局限性	(202)
5.2.5	算法举例	(203)
5.3	模拟退火算法	(208)

5.3.1	模拟退火简介	(208)
5.3.2	模拟退火算法的基本原理	(209)
5.3.3	模拟退火算法的步骤	(210)
5.3.4	模拟退火算法的要素设计	(212)
5.3.5	模拟退火方法存在的不足	(215)
5.3.6	算法举例	(215)
5.4	禁忌搜索算法	(217)
5.4.1	禁忌搜索算法简介	(217)
5.4.2	禁忌算法的主要步骤	(217)
5.4.3	禁忌算法的要素	(218)
5.4.4	禁忌算法应注意的问题	(220)
5.4.5	禁忌算法的缺陷	(222)
5.4.6	应用实例	(222)
	参考文献	(225)

第 1 章 模 型 理 论

1.1 关于模型

使用模型作为科学和技术的研究手段有着悠久的历史,最早是具象意义的原样模型,随后才发展了抽象意义的相似模型和数学模型。随着模型技术的不断发展,又形成和发展了模型方法论。在系统工程中,尤其是大规模、复杂的工程系统研究中,模型方法论是极为重要的科学方法论。

模型方法在现代科学技术发展中,对于观念、理论的革命或变迁起着十分重要的作用。20 世纪的四大模型,即粒子物理学的夸克模型、天体物理学的宇宙大爆炸模型、分子生物学的 DNA 双螺旋模型和地质学的板块模型,成为古典科学基础理论重建的重要表征。同时,模型方法在 20 世纪新的科学理论即系统论、控制论和信息论基础上,在对自然和社会的更高的认识层次上,例如系统的整体性、有机性、非还原性、非决定性和不可逆性等的认识和把握,对于支持新的科学范式的酝酿和发展,都起着不可替代的重要作用。

建立系统模型,利用模型来研究对象系统是系统工程方法的本质特点之一。

模型方法论研究模型的本质、概念、分类以及模型在工程开发中的地位。换言之,模型方法论是研究和指导运用模型的基本概念、原理和方法。

1.1.1 模型的概念

模型不是研究对象本身,而是对研究对象的一种抽象,它反映

现实中对象系统的主要特征,但它又高于现实,因而具有同类问题的共性。

由于研究目的不同,对于同一个对象系统,可以建立完全不同的模型,分别反映该系统的不同侧面;出于相同的研究目的,对于同一个对象系统,也可能建立不同的模型,反映不同的研究角度、考察因素和价值取向。

总之,模型一般具有如下特征:

- (1) 模型是对系统的抽象或模仿;
- (2) 模型由说明系统本质或特征的诸因素构成;
- (3) 模型集中地表明系统因素之间的相互关系。

在系统工程中,系统模型通常具有的表达形式为

$$V = F(X, Y)$$

其中: V —— 目标函数,描述系统的功能、品质或准则值;

X —— 可控变量(因素),有相应的约束条件构成一定的取值范围;

Y —— 不可控变量(因素),一般指系统外在的环境因素。

1.1.2 模型的本质

从系统概念上看,模型是系统中各种关系的表达形式。因此,建立模型要从状态和过程两个方面去寻求、把握和描述各系统要素之间的相互关系。所谓状态,是指事物在某个时刻所处的状况或表现形态。它是事物特性的描述和度量,事物的状态一般由一组变量来表征。所谓过程,则指事物状态的变化在时间上的持续和空间上的延伸。过程和状态两者紧密联系、不可分割,状态决定和影响过程,过程又决定和影响新的状态。状态和过程是相对的,一个事物在某个系统内可视为状态(或过程),而在另一系统内则可视为过程(或状态)。

从认识论上看,模型化的过程如图 1-1 所示。

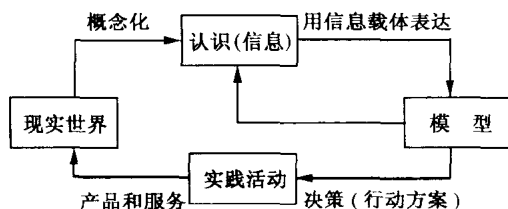


图 1-1 模型化过程示意图

在图 1-1 中,模型是作为认识与实践活动的中介。模型既可以理解为概念集合的表达系统,又可理解为创造实践的中间产品。模型既是认识的表达,又是实践活动的先导。模型参与认识世界和改造世界的不断的循环往复过程,既是认识不断深化的体现,又是实践活动不断拓展的体现。

从信息论上看,模型和认识之间存在密切的反馈关系。从已知信息可以加工产生出新的信息,相关信息的积累可以从量变产生质变,形成新的概念,促使认识深化,因此,模型的建立和完善不仅要注重对系统物质形态和能量形态的认识、把握和描述,而且也依赖于对系统相关信息不断的采集、积累和加工,这就是用模型研究问题的现实活动。因此也可把模型理解为概念集合的表达系统,或者说模型是思维形式的外在表现。

1.1.3 模型的分类

1. 原样模型

原样模型是在工程开发末期建立的一种具象实体,是具有实物形态的模型。它与目的工程在结构和过程方面基本相同。原样模型经过试验改进和完善后便是所要开发的目工程。例如,新产品的样机、新著作的原稿,都可认为是原样模型。

2. 相似模型

相似模型是根据不同系统间的相似规律(包括几何相似、逻辑相似和过程相似等)而建立的用于研究的模型。例如,地球仪、飞机风洞实验模型等都是相似模型;许多控制模型都可用一定的电子电路模型来模拟,这种电子电路模型也是相似模型。

3. 图形模型

图形模型可以表达非常丰富的内容,主要有:

- (1) 图画——一种可以示形的图形;
- (2) 草图——一种可以示意的图形;
- (3) 框图——一种可以表示系统的部分之间或部分与整体之间联系的图形;
- (4) 逻辑图——一种可以反映因素或对象间逻辑关系的图形,例如事故树、程序流程图、控制关系图等;
- (5) 工程图——一种可以反映物体确定的结构和顺序关系的图形,如建筑工程图、化工流程图、铁路站场配置图等;
- (6) 图论图——包括图论所定义的无向图 $G(V, E)$, 有向图 $G(V, A)$, 有标量图 $G(V, A)$, $f: V \text{ and/or } A \rightarrow D$, D 为某数据集。这些图与集合论、关系、拓扑、矩阵、代数方程紧密关联,对于强调概念的宏观问题和强调定量化描述的微观工程问题,都有很强的表达能力。

前三种图(图画、草图和框图)通常称为不严格图,因为没有严格的规范,作图常常需要附加文字说明,这种图使用比较广泛,常用于表达那些还不太清楚的问题,如描述效能、系统组态、宏观过程等。系统分析和设计人员常常借助于这些图形模型来开发、构造一个新系统的想像力和创造力,逐步引申出与之有关的问题和需要进一步探索的问题,使所要开发的系统变得越来越清晰、越来越具体。

后三种图(逻辑图、工程图和图论图)通常称为严格图,这些图

有严格确定的结构形式和规范。其中,逻辑图用于概念开发和系统逻辑关系的描述,在自动化系统和计算机设计中有广泛应用。工程图是形象和参数相结合的图形,主要用于作业级的工程和管理活动。图论图可视为各种抽象关系的图形描述,广泛应用于描述概念、结构、算法等问题,如描述系统的状态转移及各种流(如信息流、物流、作业流等),计划管理中的 PERT 图就是一种有向的有标量的图。借助于图论图,还可进行诸如最短路、最大流及流量分配等问题的优化计算。

4. 数学模型

数学模型是指运用数学符号和公式来表达来研究对象系统的结构或过程的模型。系统工程力求采用数学模型是因为数学模型是量化的基础,是科学实验的补充手段,是预测和决策的重要工具,是推进科技发展的依据。数学的抽象化、公理化的概念和方法,体系十分严谨。数学的丰富的想像力和思辨性,如弯曲的几何和非平直的空间结构,蕴含着普遍真理。总之,数学模型的推理计算、思维方法和想像力是科学发现的钥匙。数学的非物质的理性,对于纠正一般经验和常识所产生的偏见,获得对客观世界的新认识,都是其他方法难以比拟的。

值得注意的是,以往的工程技术常常把数学模型看做是最终模型,认为只有找到和建立数学表达式才能做出实体设计并进行优化,因此便把数学化和科学化等同起来。然而,把这种认识扩大到以研究工程开发为目的的系统工程领域,就不很确切了。由于工程开发问题有很大的复杂性、模糊性、无样本性和信息的不充分性,因此很难完全使用以数量关系为形式的经典数学工具来描述。这是因为,一个新的系统只有在系统概念上被充分研究并确立之后,其量化的衡量和计算才能给出有价值和有意义的实际内容。在发展新系统时,数学形式并不是所追求的目标,而只是具体化过程中的手段,数学化并不等于科学化。因此,必须十分警惕并防止

在系统工程活动中不加分析地生搬硬套传统工程技术中数学模型的倾向。另一方面,发展中的现代数学,又不断地为描述概念提供新的有效手段,却是应当认真学习和借鉴的。

1.2 数学模型

在传统的工程技术中,常把数学模型分为确定型和随机型,或者分为静态模型(用代数方程描述)和动态模型(用微分或差分方程描述)。在系统工程中,还要分为近代数学模型和经典数学模型。前者主要用于开发和描述概念,后者主要用来描述各类子系统,所以人们又将后者称为第一类工程数学,将前者称为第二类工程数学。

1.2.1 数学模型的特点

数学模型具有以下重要的特点。

1. 高度的抽象性

任何一门学科都具有一定的抽象性,数学则比其他学科具有更高的抽象性,这是数学方法区别于其他学科和方法的显著特点。数学方法不仅要抛开事物的次要属性,突出事物的本质属性,而且要舍弃事物的物质和能量方面的具体内容,只考虑其数量关系和空间形式,同时还要把这些数量关系和空间形式作进一步的抽象,加以形式化和符号化,以便能够进行逻辑推理和数值运算。这种高度的抽象性,实质是对事物认识上的高度概括和深化,对同类问题包含更多的经验和理解。

2. 高度的精确性

数学方法的高度精确性表现在三个方面:一是表达各种因素、变量和它们之间的关系相当明确、清楚;二是逻辑推演和运算规则十分严密;三是结论非常确定。数学方法可以处理多变量、关系复

杂的问题,可在有意义的范围内获得令人满意的计算精度,因此特别适合于揭示事物的量的规定性,成为定量研究的有力工具。

3. 应用的普适性

数学方法的高度抽象和精确,使之比任何一种科学方法的应用范围都更为广泛,或者说,任何一门学科的发展都必须引进和应用数学方法。可以说,目前只存在尚未运用数学方法的领域而不存在不能运用数学方法的领域。许多相同形式的数学模型可用于不同的实际问题,具有重要类比和借鉴意义。数学方法的形式化和公理化,使模型本身、计算过程和计算结果都便于交流,数学模型易变动,便于修改参数和改变计算关系,分析和求解问题速度快,求解成本低,特别是同计算机相结合时,这一特点更为突出。

所以,尽管数学模型缺乏直观性、形象性和实时感,但由于上述特点,一直是普遍使用的有效模型,而通常所说的模型化过程主要是指建立数学模型的过程。

1.2.2 数学模型分类

1. 数学模型分类

数学模型可按其定义和形式分类,如表 1-1 所示。

表 1-1 数学模型分类表

分类的定义	形 式
数学结构	非分析的(代数、几何的),图的,分析的
问题性质	确定与不确定的,静态与动态的,连续与离散的
解的形式	解析的,数值的
算法应用	经典工程数学的,运筹学的
系统工程 应用情况	系统结构的,过程的,性能的,任务的, 支援系统的,可靠性的,时间的,成本的,等等

2. 数学模型分类的基本原则

1) 按数学结构分类

按数学结构,数学模型可分为分析的、非分析的和图的三种。

所谓分析,是指无穷小量分析,即用无穷小量的概念研究函数依赖关系,常见的有微分方程、积分方程、积分变换级数等。

非分析包括代数和几何的形式。代数最初的含义是变换表达式和解方程,用符号系统表示一切量及其运算。现代代数则更加深化和抽象了上述概念,不仅把量的概念扩大到诸如矢量这样的领域,甚至更广泛地将其看做讨论对象。此外,集合、群、格等代数形式也越来越多地用来描述系统的结构、效能和评价等问题。几何与代数有着密切的关系,但着重于研究量的空间关系。现代解析几何已经实现了数与形的结合,用代数中关于量的概念来描述几何中量所表示的有广泛含义的抽象空间。

图论作为一门学科是在近代数学有了相当发展后建立的。图论中的图不是物体的形象图,也不是几何图,而是由点和点的有向或无向连线组成的表示各种关系的图。它既能表达非分析问题,也能表达分析问题,不但有很强的表达能力,而且有独特的运算形式,所以在系统工程中是一种被广泛使用的数学模型。例如,描述系统结构的结构树及决策树等树形图、状态图、博弈图等。图甚至还可以用来描述人的思维活动。

2) 按所研究问题的性质分类

按所研究问题的性质,数学模型可分为确定的和不确定的、静态的和动态的、连续的和离散的、线性和非线性的、宏观和微观的模型。

(1) 静态模型与动态模型

动态模型是用来描述系统处于过渡过程时各状态变量之间的关系,它们一般都是时间的函数;而静态模型则是动态模型处于稳态时的表现,或者说是用来描述过程处于稳态时各状态变量之间