



高等院校理工类规划教材

系统科学概论

XITONG KEXUE GAILUN

郭玉翠 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



高等院校理工类规划教材

系统科学概论

郭玉翠 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

当今系统科学思想正以空前的广度和深度向人类几乎所有的知识领域渗透,以其跨学科性、综合性和普适性影响并促进着当代学科的发展,同时,系统科学又把从其他横断科学中吸收过来、提炼出来的一些基本概念,诸如系统、结构、层次、信息、控制、反馈、分岔等合理利用和发展,使其在一个和谐的框架中运行,并且从不同学科所出现的问题出发,去说明系统观点的必要性,从而又显示出它与其他学科不同的一些特点。本书深入浅出地讲述了系统科学的基本理论、基本思想和基本方法,力图使读者得到科学思想和方法论方面的启迪。

本书共分7章,包括:系统、系统论的起源和发展,钱学森的系统科学思想,系统论的应用——信息与控制、系统科学与复杂性、复杂系统及其特征、复杂系统建模、复杂系统的计算机建模方法。本书可以作为大学生、研究生以及各界希望学习系统科学人士的入门书。

图书在版编目(CIP)数据

系统科学概论 / 郭玉翠编著. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2020.6

ISBN 978-7-5635-6056-1

I. ①系… II. ①郭… III. ①系统科学—概论 IV. ①N94

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第081985号

策划编辑:彭楠 责任编辑:王晓丹 左佳灵 封面设计:七星博纳

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路10号

邮政编码:100876

发行部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:12.25

字 数:302千字

版 次:2020年6月第1版

印 次:2020年6月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-6056-1

定价:32.00元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

作者的初衷是为初学系统科学的大学生、研究生和其他各界人士编写一本入门级的书。缘起于 2007 年,当时北京邮电大学准备申请建设“系统科学”国家一级学科,并在这个领域招收硕士研究生和博士研究生。招生就要上课,作者从那时候开始便萌生了给“系统科学”专业研究生写一本入门级教材的想法,在得到了相关领导和同事的支持后,便开始了写作之旅。当前在我们的语境中,系统、系统科学可谓是高频词,但如果要回答“什么是系统?”“什么是系统科学?”这样的问题还是会被难住,虽然大家的共识是“系统科学”是一门新兴的综合性、交叉性学科,但是它包含的内容太丰富了,从古代亚里士多德的名言“整体大于部分之和”到维纳的控制论,再到冯·诺依曼的计算机体系结构和香农的信息论……直到贝塔朗菲关于一般系统论的代表著作《一般系统理论:基础、发展与应用》于 1968 年发表,系统科学作为一门科学的学术地位才被确立。20 世纪后期发展起来的耗散结构论、突变论、协同学、混沌学、分形理论,以及以研究复杂性为目标的复杂性科学都为系统科学的发展注入了新的内容和活力。

如今,系统科学思想正以空前的广度和深度向人类几乎所有的知识领域渗透着,并以其跨学科性、综合性和普适性影响并促进着当代学科的发展。可以说,人类社会的方方面面,如政治、经济、文化、军事、生态、管理等,都要从系统科学中寻找理念、思想和方法,同时,系统科学又把横断科学提出的一些基本概念,诸如系统、结构、层次、信息、控制、反馈、分岔等合理吸收过来、提炼出来,作为丰富和发展自己的养料,使其在一个和谐的框架中运行,并且从不同学科所出现的问题出发,去说明系统观点的必要性,从而又显示出它自身与其他学科不同的一些特点。

可以说,系统科学包罗万象,正如我国著名科学家钱学森院士所说:“不管哪一门学科,都离不开对系统的研究。系统工程和系统科学在整个 21 世纪的应用价值及其意义可能会越来越大,而其本身,也在不断发展,现在的系统科学已经上升到研究复杂系统,甚至是复杂巨系统了。像人的大脑、互联网等,就是复杂巨系统。这在国外也是科研领域的一个热门,叫‘复杂性科学研究’。”作为给初学者写的书,作者只希望从三千弱水中取得一瓢来滋润和培养 21 世纪系统科学人才和复合型人才。

本书分为 7 章,分别讲述系统、系统论的起源和发展,钱学森的系统科学思想,系统论的应用——信息与控制、系统科学与复杂性、复杂系统及其特征、复杂系统建模、复杂系统计算机建模的方法。本书力图体现以下几个方面。

(1) 系统科学的典型思维方法,即整体性和联系性思维方法,融合和跨越学科领域来思考

和解决问题,促进思维方式、分析方法、理论概念甚至科学问题的迁移和创新。

(2) 适应科学发展的复杂性思维方式。整体视角和还原视角的融合、从线性到非线性的认识、从确定性到非确定性的描述等。用数学结构描述现实世界,再从现实世界提炼数学结构,并通过实验和实践来检验两者的关系。

(3) 典型分析方法。科学研究的方法——模型与仿真方法、观察、猜想、抽象化、模型化、数学化、实验和实践检验。不断在先验知识和近似模型之间区分新模式,引入新概念,并将它纳入一次又一次修改后的模型中,再进一步通过模型运行和模型试验结果分析去解释、阐明和开发被研究的复杂系统问题。

(4) 系统科学与世界以及其他学科的关系是从一般到特殊的关系。系统科学是关于科学思想和方法论的科学。其基本思想和方法是从具体系统中来,经过提炼形成一般概念与方法,再用到其他具体系统中去的。促进对具体问题的理解和解决,是学习系统科学的目的。

2018年2月28日,国务院学位委员会正式公布了《下达2017年动态调整撤销和增列的学位授权点名单的通知》,北京邮电大学“系统科学”一级博士点列在增列学位点名单中。今年(2019年)已经正式招生,我们的书稿作为讲义已经在研究生暑期学校中使用,效果很好。这些都是对作者的巨大鼓舞,但在把书稿交给出版社之际仍然诚惶诚恐,由于作者水平有限,虽然经过十余年的磨炼,书中仍会有很多不足,甚至错误,在此,作者恳请各位师友、学生、读者不吝赐教。

本书的出版要感谢北京邮电大学领导和同事们的支持。

郭玉翠
2019年10月

目 录

第 1 章 系统、系统论的起源和发展	1
1.1 系统、系统科学以及系统科学的研究对象	1
1.1.1 系统科学	1
1.1.2 系统及其实例	2
1.2 系统科学的起源和发展	8
1.2.1 系统科学的思想基础	9
1.2.2 狭义系统科学和广义系统科学	10
1.2.3 与系统科学有关的其他概念	11
1.2.4 系统科学的理论特征	12
1.2.5 系统科学方法	16
1.3 系统科学的社会意义和发展前景	19
1.3.1 系统科学和社会学	19
1.3.2 系统思维和健康	20
1.3.3 系统论和计算机	21
1.3.4 系统论和产品经理	21
1.3.5 系统论和游戏开发	21
1.3.6 策略模拟推演	22
1.3.7 学习系统论可以锻炼一个人的整体全局思考能力	23
第 2 章 钱学森的系统科学思想	25
2.1 钱学森系统科学思想的特点	25
2.2 钱学森系统科学思想和系统科学体系的发展历程	26
2.3 钱学森建立的系统科学体系	28
2.4 从系统科学到复杂巨系统科学	29
2.5 从工程控制论到系统科学体系	33
第 3 章 信息与控制	36
3.1 信息的定义	36

3.2 香农信息论	37
3.2.1 信息量的度量与计算	37
3.2.2 信息应用——熵	39
3.2.3 信息的传递——信息通道的容量问题	43
3.3 信息系统模型(通信模型)及信息论的发展	46
3.3.1 广义信息论	46
3.3.2 信息的“6+1”理论	47
3.4 控制与控制系统	49
3.4.1 控制论简介	49
3.4.2 控制与信息的关系	51
3.4.3 控制系统的数学描述	53
3.5 控制与管理	55
3.5.1 控制工作与控制的比较	55
3.5.2 控制工作的目的、作用及重要性	57
3.5.3 控制论的案例分析	59
3.5.4 控制论的其他应用领域	61
第4章 系统科学与复杂性	62
4.1 复杂性产生的根源	63
4.2 复杂性研究的历程	64
4.3 复杂性科学的研究方法	65
4.4 从线性到非线性	78
4.4.1 线性理论	78
4.4.2 非线性理论	80
4.4.3 耗散结构论	81
4.4.4 突变论	82
4.4.5 协同学	83
4.4.6 混沌动力学	85
4.4.7 分形理论	90
4.4.8 结语	93
第5章 复杂系统及其特征	96
5.1 复杂系统的基本概念	96
5.1.1 什么是复杂系统	96
5.1.2 复杂系统的研究对象	97
5.1.3 复杂系统的描述问题	98
5.2 复杂系统的复杂性特征	99
5.3 复杂系统的自组织特征	101
5.3.1 自组织的概念与特征	101

5.3.2 自组织的条件	103
5.4 复杂系统整体的涌现性	106
5.4.1 涌现研究的概况	106
5.4.2 什么是涌现性	107
5.4.3 涌现性的来源	107
5.4.4 涌现现象的要点	109
5.5 复杂系统的演化	111
5.5.1 复杂系统的状态	111
5.5.2 复杂系统的演化	112
5.5.3 复杂系统的进化	113
5.6 复杂系统的分类	114
5.6.1 多体系统、有机系统、控制系统	114
5.6.2 非平衡系统、复杂适应性系统、开放的复杂巨系统	115
5.6.3 复杂自然系统、复杂工程系统、复杂社会系统	116
5.7 复杂系统研究方法论	117
5.8 复杂系统的研究进展	119
5.8.1 圣菲研究所的规则加计算机模拟演化方法	119
5.8.2 定性研究与定量研究相结合的方法	120
5.8.3 自上而下指导下的综合微观分析方法	120
5.8.4 人工生命、人工智能与专家智能相结合的方法	121
5.8.5 复杂系统与其他几类系统的关系	122
第 6 章 复杂系统建模	123
6.1 复杂系统建模与仿真的一般理论	123
6.1.1 模型概念、性质及分类	123
6.1.2 数学建模及其过程	125
6.1.3 仿真建模与系统仿真	126
6.1.4 系统建模与仿真体系结构	127
6.2 复杂系统建模与仿真	127
6.2.1 复杂系统研究是建模与仿真发展的动力源	127
6.2.2 支撑复杂系统建模与仿真的新理论	128
6.2.3 复杂系统建模的方法学进展	128
6.3 基于元胞自动机的建模方法与技术	129
6.3.1 基于元胞自动机的建模方法的原理	129
6.3.2 基于元胞自动机的建模方法的技术特点	130
6.3.3 典型应用	130
6.4 基于支持向量机的建模方法与技术	131
6.4.1 引言	131
6.4.2 方法原理	132

6.4.3	技术特点	132
6.4.4	典型应用	132
6.5	基于神经网络的复杂系统建模方法	137
6.5.1	神经细胞的结构、功能与模型	137
6.5.2	神经网络的结构、学习与逼近理论	139
6.5.3	基于量子神经网络的建模方法与技术	140
6.6	基于自组织理论的建模方法与技术	142
6.6.1	引言	142
6.6.2	基于 GMDH 建模的方法原理	143
6.6.3	基于 GMDH 建模的技术特点	143
6.6.4	基于 GMDH 建模的典型应用	145
6.7	面向对象的建模方法与技术	147
6.7.1	引言	147
6.7.2	方法原理	148
6.7.3	技术特点	148
6.7.4	典型应用	149
第 7 章	复杂系统的计算机建模方法	152
7.1	基于 Agent 的复杂系统计算机建模方法	152
7.1.1	Agent 的基本概念和认知模型	152
7.1.2	Agent 的分类	153
7.1.3	智能 Agent	154
7.1.4	多 Agent 系统	155
7.1.5	基于 Agent 的建模方法	156
7.1.6	面向 Agent 的系统分析	158
7.2	基于 Agent 的复杂系统建模工具	160
7.2.1	Swarm 建模平台	160
7.2.2	Swarm 的逻辑结构	161
7.2.3	Swarm 的仿真结构	163
7.2.4	Swarm 应用的例子	164
7.3	基于分形思想的复杂系统建模方法	168
7.3.1	基于复杂系统分形特征的系统建模方法	168
7.3.2	基于分形思想的复杂系统建模实例分析	169
7.4	基于计算智能逼近的复杂系统建模方法	172
7.4.1	基于模糊认知图的复杂系统虚拟实现	172
7.4.2	基于群智能优化算法的复杂系统建模思想	180
7.4.3	基于多智能体遗传算法的建模方法与技术	181
参考文献		184

第 1 章 系统、系统论的起源和发展

1.1 系统、系统科学以及系统科学的研究对象

系统是自然界和人类社会中一切事物存在的基本方式,各式各样的系统组成了我们所在的世界。系统是由相互关联和相互作用的多个元素(或子系统)所组成的具有特定功能的有机整体,一个系统又可作为子系统成为更大系统的组成部分。现代科学在从基本粒子到宇宙的不同时空尺度上研究各类具体系统的结构与功能的关系,逐渐形成了自然科学与社会科学的各门具体学科。系统科学的研究对象是系统自身,其目的是探索各类系统的结构、环境与功能的普适关系及其演化与调控的一般规律。

图 1.1 简明地说出了系统科学的构成和研究对象。

1.1.1 系统科学

系统科学是 20 世纪中叶开始兴起的以系统(特别是复杂系统)为研究对象的新型学科群的统称,是人类科学的一个新的维度。

用定义化的语言来描述,系统科学(系统理论)是以系统为研究和应用对象的一门科学。关于系统科学的研究范畴有很多种说法,一般有以下几种。

系统科学是研究系统的结构与功能的关系及其演化和调控规律的科学,是一门新兴的综合性、交叉性学科。它以不同领域的复杂系统为研究对象,从系统和整体的角度,探讨复杂系统的性质和演化规律,目的是揭示各种系统的共性,以及演化过程中所遵循的共同规律,发展优化和调控系统的方法,并进而为系统科学在科学技术、社会、经济、军事、生物等领域的应用提供理论依据。

系统科学是在数学、物理、生物、化学等学科基础上,结合运筹、控制、信息科学等科学技术发展起来的,并在工程、社会、经济、军事、生命、生态、管理等领域得到应用与发展。系统科学从系统的角度去研究不同类型的系统,以及系统中不同层次的共同规律。

系统科学研究主要采用系统论的原理和方法,并紧密结合近现代数学物理方法与信息科学技术等现代研究手段(科学计算、模拟、仿真等)。

我国系统科学的主要开创者和推动者钱学森曾提出系统科学体系层次的划分(系统论、

系统学、系统技术科学、系统工程技术),并认为系统论是系统科学的哲学层次,而系统学(systematology)是系统科学的基础理论。由此可见,系统学应是科学中的科学,基础中的基础。尽管如此,系统学目前似乎未被人们广泛认识,其自身也存在着许多问题,需要科研工作者们进一步研究和探索。

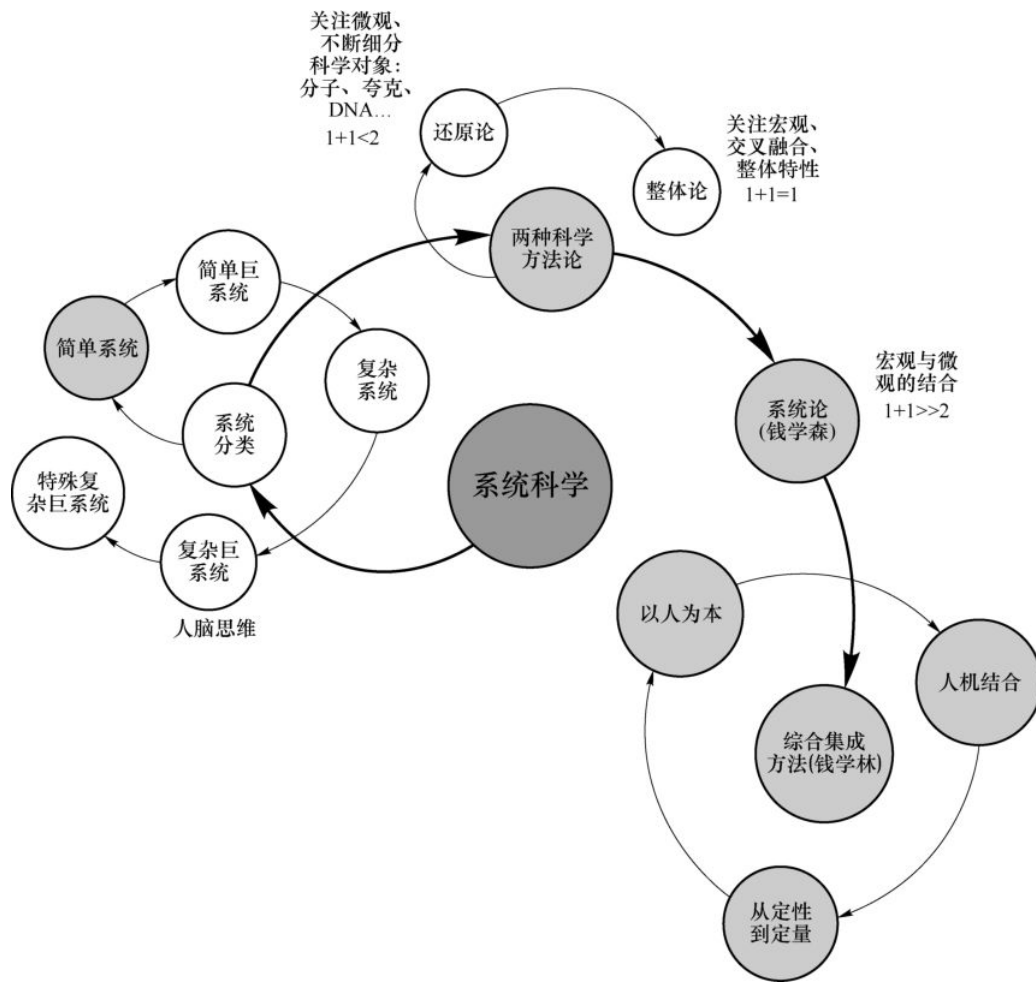


图 1.1 系统科学的构成和研究对象示意图

1.1.2 系统及其实例

系统是由相互联系、相互作用的要素(部分)组成的具有一定结构和功能的有机整体。英文中系统(system)一词来源于古代希腊文(σύστημα),意为部分组成的整体。它既可以指实在的物质系统,如水利系统、电力系统、人体系统、社会系统、信息系统、计算机系统等,又可以指抽象的精神系统,如形式化逻辑系统、神学体系等。系统科学具有重要的方法论意义。

系统具有整体性、关联性、等级结构性、动态平衡性、时序性等特征。系统理论的核心

是：整体不等于(大于)部分和。

下面是几个系统的例子,分别是热带雨林的食食物链系统(见图 1.2)、池塘的生态系统(见图 1.3)、生态农业系统(见图 1.4)、电信行业生态系统(见图 1.5)、城市系统(见图 1.6)。

例 1

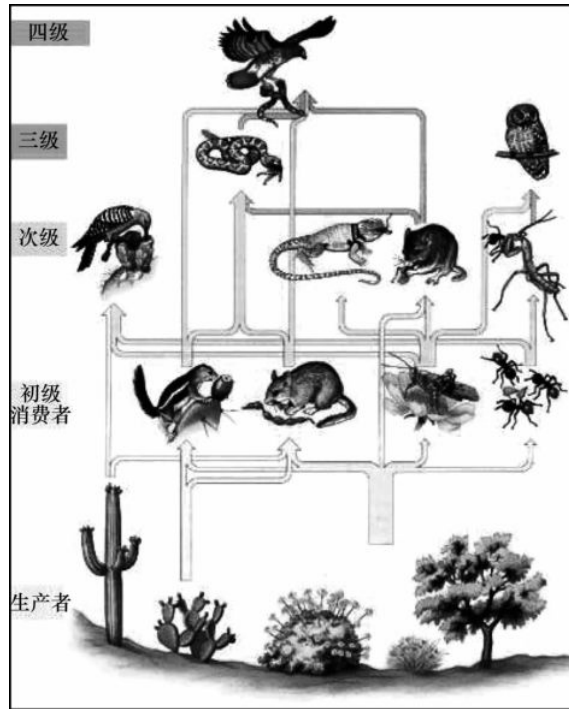


图 1.2 热带雨林的食物链系统

例 2

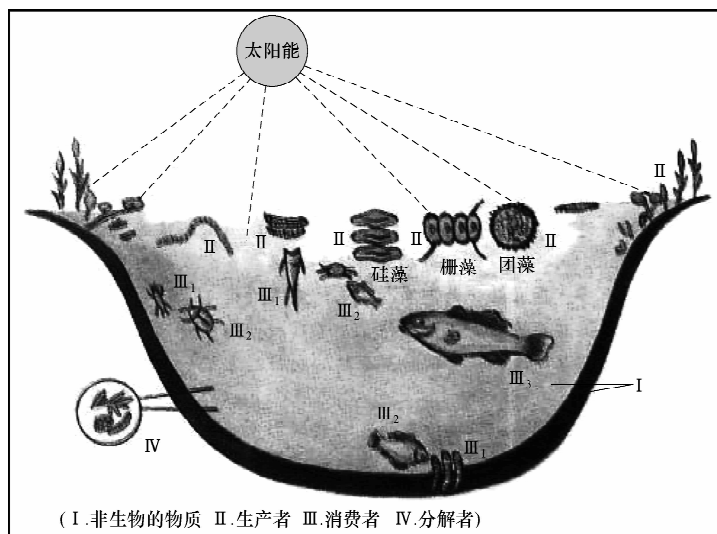
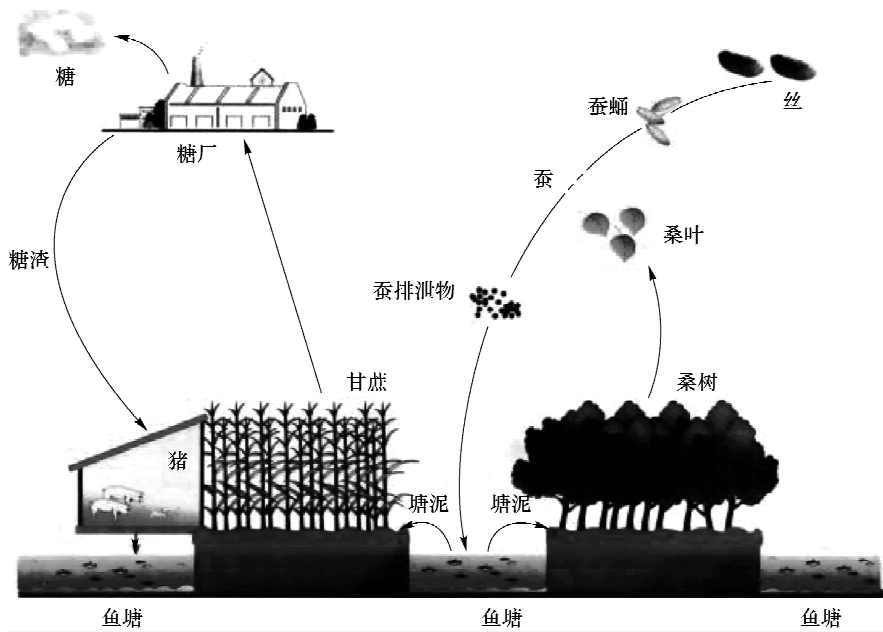


图 1.3 池塘的生态系统

例 3



水陆交换系统——桑(蔗、蕉)基鱼塘模式

图 1.4 生态农业系统

例 4

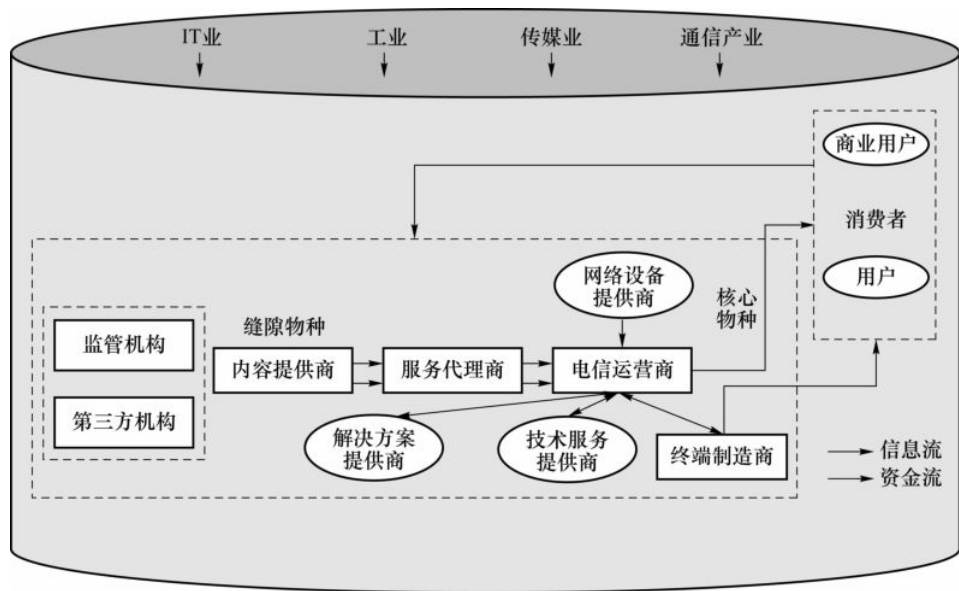


图 1.5 电信行业生态系统

例 5

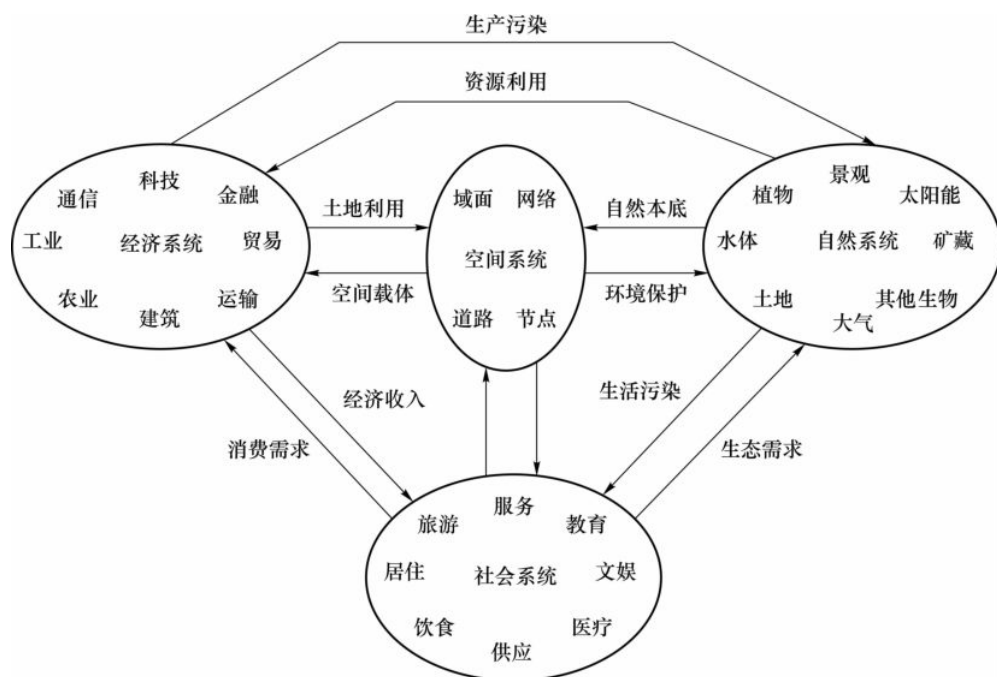


图 1.6 城市是一个开放的复杂巨系统

按照钱学森的观点,如图 1.7 所示,系统可进行以下分类:

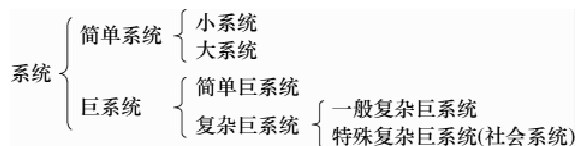


图 1.7 钱学森关于系统的分类

1. 系统的特征与类型

具体地说,系统具有以下主要特征。

(1) 行为整体性。系统具有整体突现性,整体大于(不等于)个体之和。

(2) 要素多元性。系统由两个以上要素构成,一般为多元系统,甚至是无限系统,比如,宇宙系统。

(3) 结构层次性。复杂系统由多个子系统构成,不同层次有不同涌现,同层内和层次间具有相互作用,例如,人体系统(图 1.8)。

(4) 功能有效性。元素、子系统对整体有贡献,使得整体的效率更高,在运动演化中形成特定的功能结构。

(5) 环境适应性。一般系统对它所处的环境具有依赖性,受环境约束。系统存在有效边界。

(6) 演化动态性。在特定的条件下,系统的结构形态会发生变化,会经历形成、发育、存续、老化、解体的过程。例如,青蛙生活史(图 1.9)。

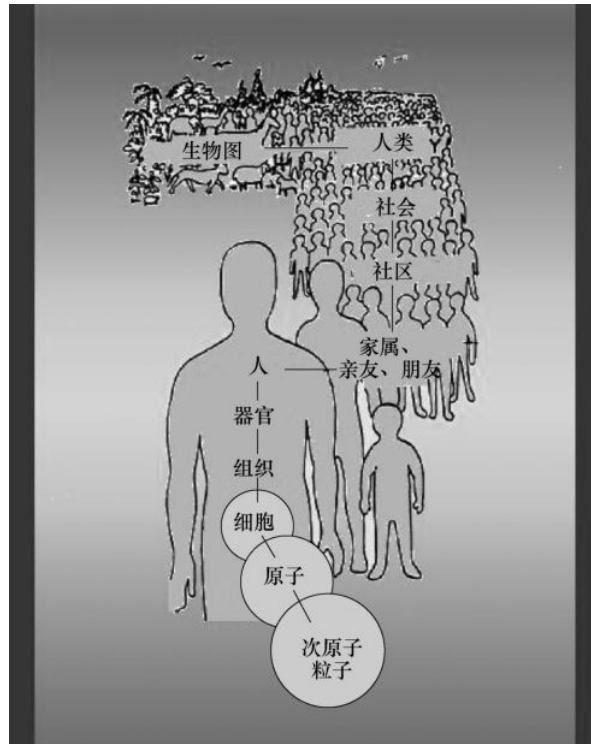


图 1.8 人体系统

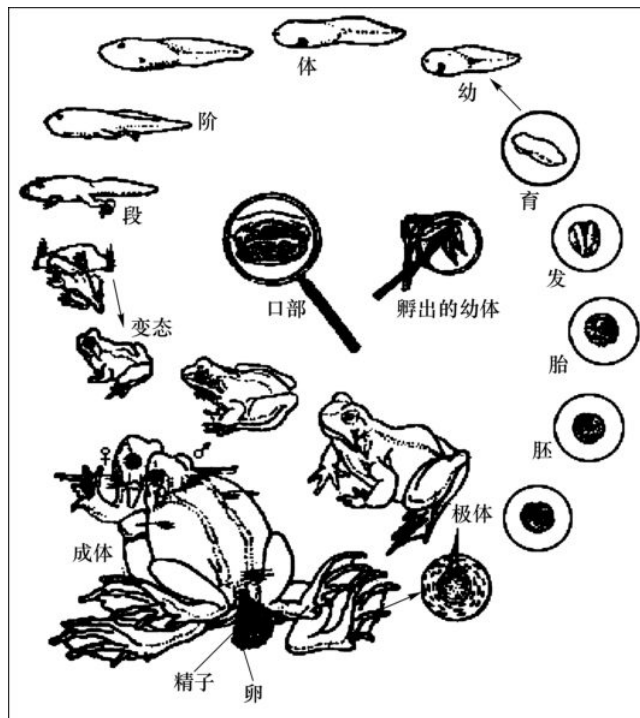


图 1.9 青蛙的生活史

系统类型的划分可以有以下几种形式：

按照形成过程，系统可以分为自然系统、人工系统和复合系统；

按照构成要素，系统可以分为实体系统和概念系统；

按照运动状态，系统可以分为静态系统和动态系统；

按照环境关系，系统可以分为孤立系统、封闭系统和开放系统；

按照功能目标，系统可以分为控制系统和行为系统；

按照规模大小，系统可以分为小系统、大系统和巨系统；

按照复杂程度，系统可以分为简单系统和复杂系统；

按照对象性质，系统可以分为农业系统、工业系统、金融系统、交通系统等。

简言之，按照人们认知的难易程度，系统可以分为3类，即简单系统(simple system)、随机系统(random system)和复杂系统(complex system)。

(1) 简单系统是指元素数目特别少，可以用较少的变数来描述的系统，这种系统可以用牛顿力学去加以解析。简单系统是可以控制的、可以预见的、可以组成的。在管理学中，这种系统一般出现在组织的初期，比如，一个班级，其中每个同学向着同样的目的，组成了一个简单系统。又如，一群人排成一列长队买票，这也是一个简单系统。

(2) 随机系统：其特征是元素和变量数很多，但其间的耦合是微弱的或随机的，即只能用统计的方法去分析它。热力学研究的对象一般就是这样的系统。这样的系统在社会中不多见，彩票是随机系统的一个典型例子。

(3) 复杂系统：其特征是元素数目很多，且其间存在着强烈的耦合作用。复杂系统由各种小的系统组成，例如，生态系统是由各个种群、各种生物组成的。生态系统是复杂系统的一个典型例子。当然，在管理学中，经常把一个公司看作一个复杂系统，它兼有简单系统和随机系统的各种特征。

系统科学所感兴趣的正是最后这种有组织的复杂系统。对于简单系统来说，传统的牛顿力学的分析方法已经能很好地解释这类系统行为了。而对于随机系统，由于其元素数目太多，必然使元素间的微弱耦合“失去”个性，从而可视为一种简单的系统，能够用统计方法去研究。由此可见，复杂系统并不是指单纯的元素数目特别多的系统，元素数目中等的系统如果具有复杂系统的特征，也可以构成一个复杂的系统。

2. 复杂系统的定义

复杂系统是具有中等以上数目的元素，并基于局部信息做出行动的智能性、自适应性的主体系统。复杂系统是一个很难定义的系统，它存在于这个世界的各个角落，因此，我们这样定义它：

(1) 它不是简单系统，也不是随机系统。

(2) 它是一个复合的系统，而不是纷繁的系统。

(3) 复杂系统是一个非线性系统。

(4) 复杂系统内部有很多子系统，这些子系统之间又是相互依赖的，子系统之间有许多协同作用，可以共同进化。在复杂系统中，子系统会分为很多层次，大小也各不相同(multi-level & multi-scale)。

由此可见，虽然复杂系统要有一定的规模，但复杂程度并不一定与系统的规模成正比，复杂系统中的个体一般来讲具有一定的智能性，例如，组织中的细胞、股市中的股民、城市交

通系统中的司机,这些个体都可以根据自身所处的部分环境通过自己的规则进行智能的判断或决策。

3. 复杂系统的特征

(1) 智能性和自适应性

这意味着系统内的元素或主体的行为遵循一定的规则,能根据“环境”和接收信息来调整自身的状态和行为,并且主体通常有能力来根据各种信息调整规则,产生以前从未有过的新规则。通过系统主体的相对低等的智能行为,系统在整体上显现出更高层次、更加复杂、更加协调的有序性。

(2) 局部信息,没有中央控制

在复杂系统中,没有哪个主体能够知道其他所有主体的状态和行为,每个主体只可以从个体集合的一个相对较小的集合中获取信息,然后处理“局部信息”,并做出相应的决策。系统的整体行为是通过个体之间的相互竞争、协作等局部相互作用涌现出来的。最新研究表明,在一个蚂蚁王国中,每一个蚂蚁并不是根据“国王”的命令来统一行动的,而是根据同伴的行为以及环境来调整自身行为的,从而实现一个有机的群体行为。

另外,复杂系统还具有突现性、不稳定性、非线性、不确定性、不可预测性等特征。

1.2 系统科学的起源和发展

系统科学发端于20世纪20年代,奥地利生物学家贝塔朗菲(Bertalanffy, Ludwig von)倡导的机体论就是一般系统论的萌芽,与此同时,英国军事部门的科学家们为研究和解决雷达系统的应用问题,提出了运筹学,这就是系统工程的萌芽。

20世纪40年代,美国贝尔电话公司在发展通信技术时,使用了系统工程的方法。美国研制原子弹的曼哈顿工程,是系统工程的成功实践。美国国防部设立的系统分析部,也在军事决策方面运用了系统方法。

20世纪50年代,系统科学的理论研究和教学工作得到了全面展开。贝塔朗菲等人创办了《一般系统论年鉴》,H. H. 古德和R. E. 麦克霍尔完成了专著《系统工程》。美国的麻省理工学院等院校开设了系统工程的课程。

20世纪60年代,系统科学在西方和苏联得到了广泛的传播。系统的理论研究取得了重要的成果,贝塔朗菲发表了著作——《一般系统论:基础、发展和应用》,使系统工程的应用取得了明显的效果。美国阿波罗登月计划的实现,就是一个突出的范例。

20世纪70~80年代,系统科学广泛应用于经济、政治、军事、外交、文化教育、生态环境、医疗保健、行政管理等领域,并取得了令人满意的结果。

20世纪80年代以后,非线性科学和复杂性研究的兴起对系统科学的发展起了很大的推动作用。进入21世纪后,系统科学作为新兴的交叉性学科,由于其关注复杂系统和复杂性的研究,已经成为国际上科学研究的前沿和热点。复杂系统的概念涵盖了物理、生物、社会经济与工程等许多具体的领域,系统科学着眼于对它们的性质和演化行为中具有共性的那部分基本规律的探索,成为21世纪科学发展的一个重要方向。欧美各国纷纷建立相关研究机构,制定研究路线图,努力推动相关研究的发展。