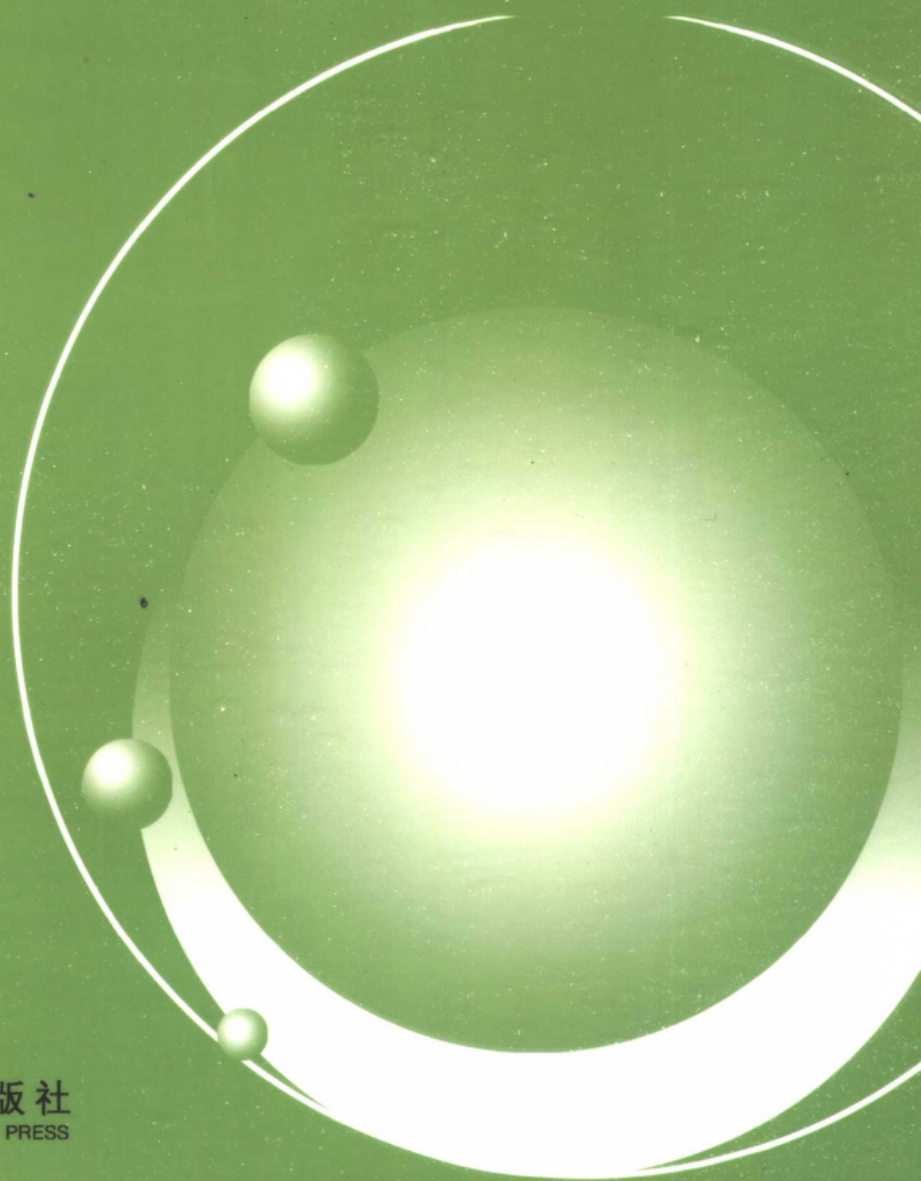


陈森发 编著

复杂系统建模 理论与方法



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

复杂系统建模理论与方法

陈森发 编著

东南大学出版社

内 容 提 要

本书较系统地介绍了复杂系统的理念、复杂系统建模的基本理论方法和途径,初步构建了复杂系统建模的理论体系。书中将复杂系统建模方法划分成基于智能技术的复杂系统建模、离散事件动态系统建模、定性建模、非线性动力学系统建模、其他复杂系统建模方法五大类并对其进行了较深入的研究。本书既展示了作者及其研究生近几年的研究成果,又涵盖了国内外同行的最新资料,有一定的深度,注重理论联系实际。

本书既可作为高等院校理工科系统工程、管理科学与工程、自动控制专业博士研究生、硕士研究生的教学用书或参考书,也可供从事系统理论、系统分析、系统调度、应用数学、智能控制的研究人员以及大专院校理工科系统工程、管理科学与工程、自动控制专业高年级学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统建模理论与方法/陈森发编著. —南京:东南
大学出版社,2005.4
ISBN 7-81089-423-4

I. 复… II. 陈… III. 系统建模 IV. N945.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 104303 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 扬中市印刷有限公司印刷
开本:787mm×1092mm 1/16 印张:16 字数:410 千字
2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷
印数:1~3000 册 定价:40.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向发行部调换。电话:025-83795801)

前 言

随着社会和经济的迅速发展,系统科学工作者面临的研究对象也越来越复杂,迫切需要复杂系统建模的理论和方法作指导。1990年,钱学森先生提出用综合集成讨论厅建模法来处理复杂巨系统问题,独树一帜,但这仅仅是万里长征的第一步。复杂系统的特点是:高阶次、多回路、非线性、多时标、层次性、开放性、不确定性、病态结构等。以什么方式来进行综合集成,仍然是一个有待于进一步探讨的难题。对此,国内外的科学工作者,在不同的领域默默地做着不懈的努力,从不同的角度提出了一些方法。从表面上看,这些方法似乎彼此关系不密切。受苗东升教授关于系统整体涌现性的论述的启迪^[1],并以此为线索,作者把不同的关于复杂系统建模的理论和方法联系起来,并引用近几年国内外学者的最新研究成果,加以整理,编写出这本书,希冀为建立处理复杂系统的理论贡献出自己绵薄之力。

本书共6章,第1章介绍系统的有关概念、复杂系统建模的理念和系统建模的一般方法。第2章到第6章,介绍复杂系统建模的理论和不同建模方法。本书第4章由张文红编写,其余由陈森发编写,全书最后由陈森发统一定稿。

书稿的整理,得到东南大学系统工程研究所博士生胡晓龙、何宽、亓霞、郜振华、吴国富、周振国、韩莹、唐磊、喻瑛、张毅华、孙燕、陈淑燕、陈胜、黄鹏的大力协助,得到东南大学系统工程研究所硕士生林刚、黄怀友、狄娟、华冬冬、周静、丁丽、王红霞、马小勇、顾杰的大力协助,书中图的绘制得到蒋小瑛女士的大力协助,书的出版得到东南大学出版社社长宋增民教授和副编审戴丽女士的大力支持。借此机会,作者对他们一并表示衷心的感谢。

复杂系统建模的理论和方法的研究是21世纪国内外一个崭新的研究领域,很多内容都处于国际前沿,在此,作者仅抛砖引玉。由于时间仓促,书中倘有不妥或疏虞,恳请读者不吝赐教。

陈森发 张文红
2005年2月18日

目 录

1 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 系统及有关概念	(2)
1.2.1 系统	(2)
1.2.2 系统的分类	(2)
1.3 复杂系统的特点	(3)
1.4 复杂系统建模的理念	(5)
1.4.1 涌现的理念	(5)
1.4.2 复杂系统建模的理念	(6)
1.5 广义模型的概念	(12)
1.5.1 集成模型	(12)
1.5.2 控制论模型	(12)
1.5.3 分层模型	(13)
1.5.4 智能模型	(14)
2 基于智能技术的复杂系统建模	(15)
2.1 概述	(15)
2.2 神经网络建模	(16)
2.2.1 神经元的数理模型	(16)
2.2.2 分层网络模型和 B-P 学习算法	(19)
2.2.3 神经网络在城市交通信号灯系统建模和控制中的应用	(21)
2.2.4 Hopfield 模型	(25)
2.3 基于 Agent 的建模方法	(27)
2.3.1 概述	(27)
2.3.2 关于 Agent 的理念	(27)
2.3.3 Agent 的基本结构	(28)
2.3.4 MAS 组织结构模式	(29)
2.3.5 复杂系统实时仿真的多线程模型	(31)
2.3.6 复杂系统多 Agent 分布仿真平台	(34)
2.3.7 多 Agent 在区域交通信号灯协调优化中的应用	(39)
2.4 基于 CGP 的建模方法	(44)
2.4.1 概述	(44)

2.4.2	CGP 模型	(45)
2.4.3	CGP 模型的应用实例	(46)
2.5	遗传算法	(47)
2.5.1	概述	(47)
2.5.2	遗传算法的改进及其应用	(49)
2.6	粒子群优化算法	(51)
2.6.1	概述	(51)
2.6.2	粒子群优化算法	(51)
2.6.3	粒子群优化算法在车辆路径优化中的应用	(52)
2.6.4	粒子群优化算法和遗传算法的对比	(57)
2.7	蚁群优化算法	(58)
2.7.1	基本原理	(59)
2.7.2	系统模型及其实现	(60)
2.7.3	蚁群算法的实际应用	(61)
3	离散事件动态系统建模	(67)
3.1	概述	(67)
3.2	极大代数建模方法及其应用	(67)
3.2.1	极大代数法	(67)
3.2.2	极大代数法在串行生产加工系统建模中的应用	(68)
3.3	基于 Petri 网建模方法	(73)
3.3.1	概述	(73)
3.3.2	Petri 网在建模中的应用	(74)
3.3.3	Petri 网的分层递归建模方法	(77)
3.3.4	面向对象的 Petri 网建模	(82)
3.3.5	模糊 H 网	(86)
3.4	任务/资源图建模法	(90)
3.4.1	任务、边、资源及其参数	(91)
3.4.2	任务图模型	(92)
3.4.3	资源图模型	(93)
3.5	基于知识的建模方法	(94)
3.5.1	基于知识的离散事件仿真模型	(95)
3.5.2	知识基离散事件仿真模型的实施	(97)
3.5.3	应用举例	(98)
3.6	基于系统理论形式化的建模方法	(100)
3.6.1	建模形式化研究回顾	(100)
3.6.2	系统建模的形式化描述	(101)

3.6.3	系统描述的层次	(103)
3.6.4	离散事件仿真的形式理论	(104)
4	定性建模	(106)
4.1	基础知识	(106)
4.1.1	有关概率论和模糊数学的基础	(106)
4.1.2	精确量、模糊量的转化	(108)
4.1.3	模糊度量	(111)
4.1.4	处理不确定性的方法和原则	(111)
4.2	定性因果关系	(113)
4.2.1	因果关系模型的定性建立方法	(113)
4.2.2	故障诊断中的不完全因果模型逻辑方法	(117)
4.3	归纳推理定性建模	(120)
4.3.1	GSPS 理论基础	(120)
4.3.2	归纳推理定性建模	(126)
4.4	结构模型化技术	(130)
4.4.1	引言	(130)
4.4.2	解释结构模型法	(131)
4.5	系统动力学建模	(140)
4.5.1	系统分析	(141)
4.5.2	结构分析与因果分析图	(141)
4.5.3	模型格式化	(143)
4.5.4	仿真实施与政策分析	(148)
4.5.5	模型检验与评估	(149)
4.6	定性建模的其他方法	(149)
4.6.1	基于量空间(Quantity Space)定性建模	(150)
4.6.2	基于非因果类定性物理建模	(150)
4.6.3	基于定性因果关系建模	(150)
4.6.4	利用状态转换概率定性建模	(150)
5	非线性动力学系统建模	(151)
5.1	准备知识	(151)
5.1.1	自组织理论	(151)
5.1.2	混沌理论	(153)
5.2	全域建模法	(158)
5.2.1	全域建模法原理	(158)
5.2.2	一阶线性全域建模法	(159)

5.2.3	高阶多项式全域建模法	(162)
5.2.4	正交多项式全域建模法	(164)
5.3	局域建模法	(168)
5.3.1	零阶局域建模法	(168)
5.3.2	一阶线性局域建模法	(170)
5.3.3	高阶局域建模法	(173)
5.4	基于小波网络的非线性系统建模法	(174)
5.4.1	概述	(174)
5.4.2	小波及小波变换的概念	(176)
5.4.3	小波神经网络预测模型	(176)
5.4.4	实际应用案例	(178)
5.5	基于GMDH的混沌时间序列建模法	(178)
5.5.1	试探自组织原理	(179)
5.5.2	GMDH的结构	(180)
5.5.3	GMDH的算法	(182)
5.5.4	GMDH算法的改进	(183)
5.5.5	GMDH在混沌时间序列建模中的应用	(185)
6	其他复杂系统建模方法	(190)
6.1	概述	(190)
6.2	元模型建模	(190)
6.2.1	问题的提出	(190)
6.2.2	元模型的理念	(190)
6.2.3	元建模结构	(191)
6.2.4	元模型建模技术	(191)
6.2.5	案例	(195)
6.2.6	小结	(196)
6.3	综合集成法建模	(196)
6.3.1	概述	(196)
6.3.2	专家群体的互动过程	(198)
6.3.3	综合集成研讨厅体系的链接结构及其分析	(201)
6.3.4	小结	(206)
6.4	分形建模方法	(207)
6.4.1	基本思想	(207)
6.4.2	应用案例	(208)
6.4.3	小结	(210)

6.5	元胞自动机	(211)
6.5.1	元胞自动机的理念	(211)
6.5.2	元胞自动机的一维模型	(213)
6.5.3	元胞自动机的二维模型	(218)
6.6	图形建模方法	(222)
6.6.1	复杂系统建模存在的问题	(222)
6.6.2	基于图形的建模支持系统	(223)
6.6.3	系统的总体结构	(224)
6.6.4	系统的功能及特点	(225)
6.6.5	小结	(228)
6.7	复杂适应系统理论及其应用	(228)
6.7.1	CAS 理论产生	(228)
6.7.2	CAS 理论的基本观点和概念	(229)
6.7.3	CAS 理论的主要特点	(232)
6.7.4	从个体到全局——回声模型	(234)
6.7.5	CAS 理论的实现——SWARM 的功能和应用	(237)
6.7.6	CAS 理论的进一步发展	(240)
参考文献		(241)

1 绪论

1.1 概述

系统在自然界和人类社会中普遍存在:太阳系是一个系统,国家是一个系统,学校是一个系统,工厂是一个系统,家庭是一个系统,人体是一个系统。系统这一术语在报纸、杂志、领导的讲话中日益增多。最近几年,在学术刊物和书籍中,出现大系统、巨系统、复杂系统、复杂巨系统等名词,可见复杂系统理念及对其进行建模的理论和方法,已开始受到人们的重视,这方面的研究正逐步深入。

复杂系统的研究是1999年4月2日由美国《科学》(Science)杂志出版的《复杂系统》专辑而兴起的,它的出现与复杂性问题研究有密切关系。复杂性问题的提出起源于奥地利,1928年贝塔朗菲在他写的《生物有机体系统》论文中首次提出复杂性的问题^[2]。在此之前的若干年,怀特海(Alfred North Whitehead)在他的《有机体的哲学》论文中,也曾提出类似的观点。此后的20年,在这方面做出较大贡献的有:麦卡洛克(McCulloch)和皮茨(Pitts)的神经网络,冯·诺伊曼的元胞自动机和复杂性,维纳的控制论。中国科学院外籍院士、诺贝尔经济学奖获得者H. A. Simon(中文名:司马贺)1969年在他的著作《人工科学》的书中,用整整一章的内容讨论了复杂性的构造^[3]。1984年,美国新墨西哥州洛斯阿拉莫斯国家实验室,汇聚了一批著名的科学家,在距它约55 km的圣菲,建立了圣菲研究所(Santa Fe Institute,简称SFI)。从20世纪90年代开始,SFI致力于复杂性科学的研究工作。

在20世纪80年代初,钱学森先生发表了《系统科学、思维科学与人体科学》的论文。1990年,他及其合作者在《自然》杂志又发表了《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》的论文。1991年1月,在中国科学院张焘等同志的倡议下,得到一批老科学家的热情支持,由周光召院长主持,举行了“复杂性科学学术讨论会”,引起许多研究者的兴趣。1994年9月,在北京香山又举行题为“开放复杂巨系统方法论”的学术会议。1997年1月,再次在北京香山召开题为“开放复杂巨系统的理论与实践”的讨论会。这3次会议有力地推动了复杂性科学的研究。

到目前为止,中国已经有一些单位专门组织力量,对复杂系统进行探索。例如,中国科学院下设的复杂系统工程学开放研究实验室,进行复杂系统建模理论与方法论研究。上海大学系统分析与集成专业,以复杂系统为对象开展研究。复旦大学智能信息处理开放实验室,以复杂系统的信息处理为核心研究内容,积极地进行探索。

复杂系统和简单系统的主要区别是什么?把多位学者的看法综合起来,就是:高阶次、多回路、非线性、多时标、层次性、开放性、不确定性、病态结构等。本书认为复杂系统与简单系统的本质区别应是复杂系统具有涌现性,并以此为核心内容贯穿全书。

1.2 系统及有关概念

1.2.1 系统

系统是指相互联系又相互作用的元素之间的有机组合。这里所指的系统是广义的,它包含所有的工程系统及非工程系统。电气、机械、机电、声学系统都是工程系统,而经济、交通、管理、生物系统都是非工程系统。

任何系统都存在 3 个方面需要研究:实体、属性、活动。

实体:组成系统的具体对象元素。

属性:实体的特征(状态和参数)。

活动:对象随时间推移而发生的状态变化。

对于工厂系统而言(图 1.1),系统的实体是工厂的部门、订单和产品;其属性是部门类型、订单数量、各部门的设备数量;其活动则是各个部门的计划、采购、装配和销售过程。

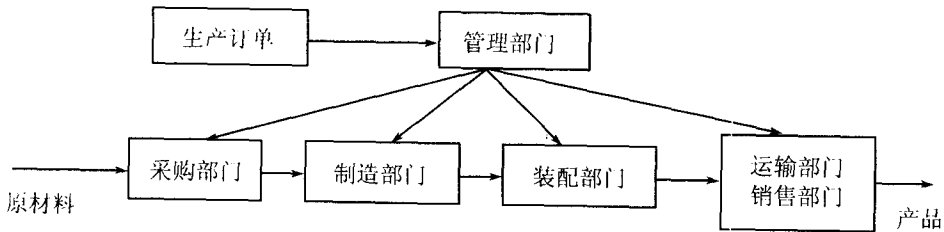


图 1.1 工厂系统

由于组成系统的实体之间相互作用而引起实体属性的变化,通常用“状态”的概念来描述。研究系统就是研究系统状态的改变,即系统的演化。

研究系统除了研究系统的实体、属性、活动外,还应研究系统的环境。环境是指对系统的活动结果产生影响的外界因素。自然界的一切事物都存在着相互联系和相互影响,而系统是在外界因素不断变化的环境中演化发展的。因此,环境因素是研究系统时必须考虑的,而对开放的非工程系统更是如此。

1.2.2 系统的分类

由前面论述的定义可知,系统是一切事物存在方式之一,可以说是包罗万象。若讨论所有的系统分类方法,涉及太多的学科。因此,本书仅介绍与后续内容有关的系统的分类方法。

1) 按照系统的规模划分

(1) 小系统:构成系统的子系统数目若为几个、十几个,则称为小系统。如一台测量仪器可视为一个小系统,这类系统用传统的数学、物理学、化学可以很好地描述。

(2) 大系统:构成系统的子系统数目若为几十个、上百个,则称为大系统。如一个仅考虑产品生产的普通工厂可视为一个大系统,它可以用控制论、信息论或运筹学的部分内容加以研究。

(3) 巨系统:构成系统的子系统数目若为成千成万个、上百亿个、上万亿个,则称为巨系统。例如激光系统、因特网系统,它可以用耗散结构理论和协同学来研究。

2) 按照系统内的子系统之间的关联程度划分

(1) 简单系统:系统内的子系统间的关联程度比较弱,称为简单系统。例如一个由几个人的松散联合构成的团队,可视为简单系统。又如,贝纳尔流作为物理系统,微观组分的数量级为 10^{23} ,比人的大脑多12个数量级,是一个巨系统,但由于微观组分(子系统)的关联程度低,它仍然属于简单系统。

(2) 复杂系统:系统内的子系统间的关联程度比较高,并产生整体的涌现性,称为复杂系统。核苷酸、氨基酸和碳链分子构成的系统就是复杂系统,因为它们以某种形式排列并聚集起来,就能构成称为生命的东西。中国的人口接近13亿,即 1.3×10^9 ,比贝纳尔流低14个数量级,但由于系统内的子系统间的关联程度比较高,它就是一个典型的复杂系统。

3) 按照系统与外界环境的联系情况划分

(1) 孤立系统:孤立系统与外界环境之间没有任何物质、能量和信息的交换。随着时间的推移,其内部状态从有序趋向无序。系统的无序度是用熵来描述的,熵的变化大于零。因此,一个孤立系统的内部熵将随时间不断增加,最终熵达到最大值,此时系统趋向于无序。

(2) 开放系统:开放系统与外界环境之间不断进行着物质、能量和信息的交换。这种交换使它可能从外界环境输入负熵,从而使系统的总熵减小,或控制在某种缓慢的增长速度,其结果是增加了系统的有序性。这种自发的增加系统有序性的性质,称为自组织性,这类系统也称为自组织系统。而复杂系统是开放系统。

1.3 复杂系统的特点

“复杂系统”这一术语于1999年4月2日正式出现在美国《科学》(Science)杂志出版的《复杂系统》专辑上,编者Richard Callagher和Tim Appence对他们所指的“复杂系统”作了简单的描述:通过对一个系统的分量部分(子系统)的了解,不能对系统的性质作出完全的解释,这样的系统称为复杂系统。他们的意思,用通俗一点的话说:系统的整体性质不等于部分性质之和,这样的系统称为复杂系统。清华大学王正中教授把复杂系统的特点概括为^[2]:复杂系统往往具有病态定义的特征,即很难以一种数学形式来对它进行定义及定量分析;复杂系统的另一个难点是病态结构,系统结构很难从空间和时间上加以分割,很难确定系统的边界和水平。国防科技大学瞿继权博士和戴金海教授则认为^[4]:复杂系统是由多种类型的子系统组合而成的混合系统,包括连续系统和离散系统、非实时系统和实时系统等。中国科技大学朱六章先生认为^[5]:复杂系统通常具有系统结构的多层次性,子系统模型的多样性,相互关联的复杂性,目标的多重性,信息的不确定性,以及由此确定的处理方法的多途径特征。我国的著名科学家钱学森先生把复杂系统的性质概括为^[3]:开放性、复杂性、层次性。还有许多学者做过同类性质的论述,在这里就不一一列举。概括起来,这些学者认为复杂系统的特点是:高阶次、多回路、非线性、多时标、层次性、开放性、不确定性、病态结构等。在此基础上,本书将以上特点综合表述为复杂系统的特点就是系统具有涌现性。

1) 北京师范大学教授姜璐、谷可两位学者总结的三类复杂系统^[3]

系统科学面对各式各样的系统,采用的方法也略有所不同,从目前研究的情况来看,研究较多,有较多规范方法,已经取得一定成就的有三类系统,它们是非平衡系统、复杂适应性系

统、开放的复杂巨系统。这三类系统都包括大量的子系统,子系统在组成系统时,在系统整体层次都会涌现出新的性质。人们对这三类系统的研究所得的一些具体结果,就反映了人们从子系统构成的层次关系上研究复杂性的结果。

(1) 非平衡系统

非平衡系统多指由无生命子系统组成的系统,每一个子系统非常简单,多是分子、原子、离子等,子系统之间的相互作用一般也比较简单。人们采取远离平衡的自组织理论(耗散结构、协同学等),来讨论系统的演化。自组织理论是以物理学的统计物理为基础发展起来的,它要求系统满足统计物理的各态历经、局域平衡等基本假设。自组织理论讨论系统在远离平衡的开放条件下,由于系统内子系统之间的非线性相互作用,在达到某一阈值时,各子系统独立的运动将会被子系统协同的统一集体运动所代替,系统呈现出有序的结构。对此类系统的讨论表明,系统整体性质的涌现是所有子系统统一协同作用的结果,这种协同作用只有在某阈值条件下才能出现。一旦出现了整体的协同作用,也就标志着系统新性质的涌现。讨论这类系统的理论比较规范,有较强的数理基础,有较好的数学工具,得到了比较可信的成果。

(2) 复杂适应性系统

美国圣菲研究所以生物体为背景建立的复杂适应性系统模型,是近年来研究比较多的另一类系统,它将生物体的适应环境、生长繁殖、遗传变异等生物演化性质条理化、规范化,建立用计算机模拟的子系统的演化机制,使之类似生物体,进而研究由这样子系统组成的系统整体,在一定外界条件下的演化性质。这类系统的子系统与非平衡系统中的子系统(分子、离子等)不同,它具有一定的智能。计算机的使用给此类讨论带来很大方便,用计算机程序描写子系统的局域演化规则,给出对个体遗传、变异、学习、适应等的表述形式,大量子系统组成的系统的性质在计算机中就可显示出来,它可以反映种群的发展、稳定存在、消亡等各种复杂的行为,它在模拟生物种群、生态系统、经济系统等演化中取得较多成果。由于此类系统的子系统具有一定智能,因此不仅在解决实际问题方面有广泛的应用,而且对系统科学的发展也有很重要的意义,可以预计在此方面的研究今后会有更多。

(3) 开放的复杂巨系统

开放的复杂巨系统是由我国研究人员为研究由人组成的最复杂系统演化问题而提出的一类模型系统。此系统中的子系统是人,其演化机制目前还不清楚,研究由大量演化机制还不清楚的子系统组成的系统的性质,当然非常困难。钱学森先生提出从定性到定量的综合集成方法,在方法论的层次给出了解决的办法,具体采用人机对话的科学研讨厅体系。目前在分析、讨论实际问题上取得一定效果,在理论研究上困难还较多,人工智能、思维科学、脑科学等方面的研究将会有助于开放的复杂巨系统问题的研究。

2) 美国学者欧阳莹之举出 3 个复杂系统的案例^[6]

(1) 多体系统(Many-body System)

多体系统是由少数几类彼此之间仅有几种关系耦合在一起的大量组分组成的系统。例如,一个由消费者和生产者形成的组织,或者一个由生物体组成的演化物种。组分之间的联系程度可以不同,但它们整体上不会消失。一个多体系统不是一堆沙子,其组分之间存在相互的联系,这样就有足够的整体性使之成为一个更大系统中的个体,就如一个铁架成为建筑物的一部分。另外,在理性选择和交际一行动理论中,社会可以看成是一个多体系统。

(2) 有机系统(Organic System)

有机系统是由许多高度特化的、相互联系紧密的、不同种类的组分组成的系统。有机系统易于进行功能的描述,其组分的定义和刻画是通过在维持系统处于所想状态中的功能作用来进行的,这样这些组分从整体上就从属于这个系统了。例如,生物系统或人体系统。

(3) 控制系统(Cybernetic Systems)

控制系统是把多体系统和有机系统的复杂性结合起来。例如神经网络,称为控制系统,也是复杂系统。

1.4 复杂系统建模的理念

1.4.1 涌现的理念

复杂系统的特点在于它具有涌现性^[1]。涌现的英语是 emergence,在中文文献中有的译为涌现,有的译为突现,两种译法各有所长。贝塔朗菲引进 emergence,意在强调非加和的整体特性是在系统形成时突然出现的,“如果我们可以把总和想像为逐渐构成的,那就必须把作为相互关联的部分总体的系统想像为瞬间形成的”(贝塔朗菲,1973),译作“突现”能反映了这一点。但在系统科学领域中,又有突变的概念(托姆,1989),两者仅是一字之差,而突变的意思是指系统从一种定态到另一种定态变化,是相对于渐变而言。为了避免与系统科学大量使用的突变概念相混淆,笔者认为在这里将 emergence 译为涌现更好些。一方面,把 emergence 译为涌现,能反映从低层次产生高层次特性的现象类似于泉水从地下“涌”出来,生动形象,加深了对“即使不了解低层次的机理,仍可直观考察高层次”这一特点的理解;另一方面,涌现在一定程度上也能反映贝塔朗菲强调的“瞬间形成”的特点。

那什么是涌现性呢?在客观世界的各个领域,特别是生命、社会、思维领域,普遍存在这样一类现象:诸多部分一旦按照某种方式形成系统,就会产生出系统整体具有而部分或部分总和所不具有的属性、特征、行为、功能等,一旦把整体还原为互不相干的各部分,这些属性、特征、行为、功能便不复存在。系统科学把这种整体具有而部分不具有的东西,称为涌现性(Emergent Property)。从层次结构的角度看,涌现性是指那些高层次具有而还原到低层次就不复存在的属性、特征、行为、功能。当然,新质的涌现不一定都伴随层次的提升,同一层次上一种新结构取代原结构的演化也会伴随不同质的整体涌现性的兴替,单层次的提升必定伴随原层次所没有的新质的涌现。

涌现是一种整体的现象和特性,整体的现象和特性不一定是涌现的。贝塔朗菲区分了累加性与构成性(非加和性)两种整体特征,把整体分为非系统总和与系统总和两种。整体的那些只需把部分特性累加起来即可得到的特性不是涌现性,只有那些依赖于部分之间特定关系的特征,即所谓构成性特征,才是涌现性。通俗一点讲,就是“ $1+1>2$ ”、“整体大于部分之和”、“多来自少”、“复杂来自简单”、“有生于无”等。

氧和氢的结合生成水,是一个化学方面的生动例子:氢元素有易燃性,氧元素有助燃性,化合为 H_2O 分子就失去易燃性和助燃性,这种不易燃性是 H 原子和 O 原子按照特定的化学键相互作用而涌现出来的。在整个人类社会的发展史中,有很多涌现性很好的案例。刘备有了诸葛亮,才能三足鼎立,如果把他们两人分开,则两人都一事无成;刘邦有了韩信、张良、萧何,

才能战胜项羽,如果他们不联合起来,则根本不是项羽的对手。人工生命的倡导者兰顿(1988)对生命的揭示,也是一个很好的说明,他指出:“生命是一种形式的性质,而非物质性质,是物质组织的结果,而非物质自身固有的某种东西。尽管核苷酸、氨基酸或碳链分子都不是活的,但是只要以正确的方式把它们聚集起来,由它们的相互作用涌现出来的动力学行为就是被我们称为生命的东西。”这是很有说服力的。组织在细胞中的分子同处于非细胞实体中的分子并无两样,但令人着迷的“生命力”或“活力”只能是物质分子按照细胞这种结构模式进行组织所带来的涌现性。诸如此类,不胜枚举。

1.4.2 复杂系统建模的理念

从前面的分析可知,复杂系统建模的任务就是建立系统的模型,以便描述系统的涌现性,即描述被研究对象何时、何处、出现何种涌现。

由涌现的理念,可以看到,这是一个崭新的理念,对其开展研究具有相当的难度。那么,对系统涌现性进行研究,建立模型,是否超出科学的能力范围?存在认识涌现现象的知识限制吗?在这个问题上西方学术界是有争论的,SFI曾就此举办关于“知识的限制”研讨会。提出“科学终结论”的人都把涌现看作超越科学能力的现象,霍根甚至把科学界现在提出研究涌现性问题本身当作科学终结的证据。作为辩证唯物论者,相信没有一种涌现性是人类原则上无法认识的,科学终将发现描述涌现性的有效方法。当然,也应看到问题研究的难度,由涌现产生的宇宙奥秘不可能在某一代学者手里全部揭示出来,只要人类存在科学就不会终结。本书根据 SFI 的以上论述以及现有的其他文献,整理和归纳出下面几种复杂系统建模方法。

1) 还原论的方法

采用还原论科学在把对象分解为它的微观组分后,进而分析和研究这些组分之间的相互作用,最后,用低层次事物的相互作用去说明高层次的问题。只要能用低层次组织的相互关系来解释高层次现象,就是在一定程度上描述系统的涌现性。

2) 多变量的联立方程组描述法

一般来说,反映系统宏观变量的方程都是描述整体涌现性的模型,多变量的联立方程组尤其有效。由庞加莱开创的非线性动力学揭示,动态系统的质的规定性是由它的稳定定态或吸引子表示的。系统的宏观整体特性可以通过研究它的稳定定态来把握。稳定定态就是系统的整体涌现性,只有形成系统整体时才会出现,一旦还原为部分这种定态就不复存在。系统定态不可能由元素或子系统性质推测出来。贝塔朗菲已意识到这一点,坚持用联立微分方程组定义他的一般系统,并据此讨论生长、竞争、机构化、中心化、果决性这些“大于部分之和”的涌现现象,得出一些启发性意见。因而,研究非线性动力学,也将是研究整体涌现性的一种方法,也是复杂系统建模的重要方法之一。

3) 基于演绎逻辑的方法

数学方法基于演绎逻辑处理涌现性,本质上是生成论的,也是研究整体涌现性的一种方法。这里的关键是建立数学模型,只要有了数学模型,就可以用演绎方法严格逻辑地预测系统可能发生的涌现行为。如果系统比较简单,能够建立它的演化方程,即可通过研究这种方程来了解它的涌现性。对于那些无法建立演化方程的系统,只要它们是在现实世界生存发展的,就一定存在稳定定态,通过定性的或半定性半定量方法,也可以对整体涌现性有所了解。因此,

在本书中安排了一章的定性建模的内容,作为复杂系统建模的理论和方法之一来讲解。

4) 简单巨系统的描述法

钱学森先生把现在通用的系统科学方法概括为两种:一是处理简单系统的方法,首先根据基本科学原理(通常是力学的或电磁的)建立各个环节的数学方程,再按照不同环节耦合为系统的方式进行综合,便得到描述系统整体行为的数学方程。钱学森先生称其为直接综合法,也就是前面介绍的还原论方法。它也包括唯象方法,即着眼于对系统宏观行为的观测结果,提出某种猜想,直接用适当的数学方程表示出来。控制理论和运筹学用的就是这种方法,几十年的发展证明其是成功的;二是简单巨系统,构成元素数量巨大,但“花色品种”很少,例如前面曾提到的贝纳尔流,微观组分数量级为 10^{23} ,就是典型的简单巨系统。这种系统的元素间相互关系简单,允许忽略其间的差异,把微观元素的相互作用简化为类似物质分子之间的随机碰撞。由于元素数量巨大,大数定律保证这种系统具有宏观整体的统计特性。统计特性是一种特殊的整体涌现性,在微观层次是看不到。基于概率论的统计综合法是把握简单巨系统整体涌现性的有效方法。自组织理论特别是协同学提供了成功应用的范例。

5) 从定性到定量综合集成法^[7]

当对象属于复杂巨系统时,直接综合法(即还原论方法)和统计综合法均告失效。钱学森先生提出研究复杂巨系统的从定性到定量综合集成法,这是一种把握系统整体涌现性的方法。面对一个现实的开放复杂巨系统,不可能把它从环境中暂时孤立出来进行可控实验,无法把它分为许多部分分别加以研究,然后进行综合。但社会分工、学科划分本身就是对这个复杂巨系统的一种分解或还原。工作在复杂巨系统不同局部的人们、特别是相关领域的专家分别掌握了不同部门的科学知识,积累了大量局部感性经验,加上关于复杂巨系统的各种统计资料、数据,构成关于复杂巨系统整体定量认识的微观基础。按照实践论的原理,理性认识是从感性认识中涌现出来的,个体认识如此,群体认识也如此。一切有关开放的复杂巨系统宏观整体行为特性的理性认识,只能从上述零碎的感性认识中涌现出来。问题是如何使这种向来只靠人类大脑进行的认识系统的涌现行为,变成有现代科学知识体系和高新技术支撑的可操作的过程,以保证有关开放复杂巨系统行为特性的整体定量认识在此过程中最充分最有效的涌现出来。从定性到定量综合集成法提供了实现这种涌现行为的一种可行方法,所建立的体系被称为“从定性到定量综合集成讨论厅体系”。本书的后续内容,对该方法会做一定的介绍。

6) 基于主体(Agent)的复杂系统智能建模法^[8]

对于系统的整体涌现性,SFI 学派倡导的是生成论的研究方法。他们把能够呈现出涌现性的系统分为两类:一类是规则支配的系统,相信这类系统的涌现性可以用科学方法描述。简单而典型的例子是各种棋盘式游戏,如下棋,根据很少几条关于棋子合法行走的局部规则,可以下出(涌现出)无穷多种不可能从这些规则中预测的棋盘局势,一切有规则支配的系统都如此。SFI 的思路是,选择适当的主体(Agent)作为构件(Building Block),用计算机程序设计少数支配主体相互作用的规则,通过计算机仿真考察该模型的涌现行为。目的是建立一种概念框架,以便能够预测何时、何处出现涌现,出现什么样的涌现。生成论的涌现研究方法建立在归纳逻辑之上,所用模型是由计算机程序表示的,根据模型让系统在计算机上产生、演化,让宏观整体行为由下而上、自然而然的涌现出来,使研究者能够直接观察系统的生成、演化过程,从观察现象中发现规律,提炼概念,形成洞见,建立理论。这就是在复杂系统建模中,本书将智能

建模列入其中的原因。至于另一类系统,范围非常广阔,如伦理、诗歌等,虽然可以明显的观察到涌现现象,但不属于规则支配的系统,能否成为科学的对象,SFI 学者们仍然还在研究。

7) 复杂系统建模的途径^[9]

从方法论的角度来看,建立复杂系统的模型时,可以采用 3 种不同的基本方法,即演绎法、归纳法和演绎-归纳法,从而形成了两种基本的建模途径:

(1) 演绎-归纳建模

① 演绎建模。

根据有关系统的一般原理、定律、系统结构和参数的具体信息和数据,进行从一般到特殊的演绎推理和论证,建立面向组分(子系统)的模型。这样的方法,称为演绎法,所建立的模型,称为机理模型或解析模型。

演绎法适于组分(子系统)为白箱的情况,通常所建立的模型有唯一性。

② 归纳建模。

利用对实际系统的输入和输出的观测与统计数据,运用记录或实验资料,进行从特殊到一般的归纳推理和总结,建立系统的外部等效模型。这样的方法,称为归纳法,所建立的模型称为经验模型或外部模型。

归纳法适于系统为黑箱的情况,通常所建立的模型不是唯一的。

③ 演绎-归纳建模。

演绎-归纳建模法也称混合法。通常,它采用演绎法或专家经验,确定模型类别、维数及结构,然后用归纳法辨识模型参数。混合法适用于系统为灰箱的情况。

(2) 分解-联合建模

这种方法适于简单大系统建模。采用的方法是:首先,将系统分解为若干个子系统;其次,不计各子系统间的关联,分别用演绎、归纳法建立各子系统的模型,有的文献称之为分解建模;最后,建立各子系统间的关系模型,利用该关系模型将各子系统有机的组装起来,形成系统的总模型。这种建模方法也称为结构建模法。

8) 复杂系统建模的基本原则^[16]

(1) 模型众多性原则

1795 年,年仅 21 岁的德国青年数学家高斯(K. F. Gauss)解决了一个著名的问题,就是根据非精确观测的试验数据来确定行星椭圆轨道的参数。椭圆轨道在诸观测点中的位置这样选定,即使诸观测数据偏离椭圆轨道的偏差平方和达到极小值。这种数据处理方法就称为最小二乘法。在高斯以后相当漫长的一段岁月里,许多学者遵循高斯的思路,试图将最小二乘法推广应用于解决各种更加复杂的问题,都没有取得重大的进展和实质性的突破。

直到 20 世纪中叶,英国科学家 Y. R. 艾西比指出:“简单模型的时代已经过去了,对研制能够表现高级神经功能的装置发生浓厚兴趣的时代来到了。C. E. 申农于 1938 年对继电器网络以及马克·卡洛克和彼特斯于 1943 年对简单的类神经元组成的网络证明了,需要描述的机器的任何行为不是只能由某一个机器来实现,而是可以由无限多个机器来实现。从那个时候起,新的唯一模型的研究仅仅表明,模型的创建者还没掌握申农、马克·卡洛克以及彼特斯的研究工作的意义。”

1971 年,苏联科学家 A. τ. 依瓦赫连柯提出了模型众多性原则。1978 年,另一位苏联科学