

工业工程系列教材

G O N G Y E G O N G C H E N G

上海汽车工业教育基金会 组编

复杂系统的分析与建模

● 王安麟 主编

● 上海交通大学出版社 ●

复杂系统的分析与建模

上海汽车工业教育基金会资助
工业工程系列教材

复杂系统的分析与建模

主 编 王安麟
副主编 马立新 赵群飞

上海汽车工业教育基金会 组编

上海 交 通 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书以复杂管理科学与工程数字化为主线,从方法论和应用角度,简明易懂地介绍了复杂系统的分析与建模。本书在突出反映一些新的智能化、适应化、自组织化、进化方法和技术的同时,将描述复杂系统的动力学理论引入工程学。本书反映了管理科学与工程学科的最新动态和发展方向,适用于管理、工程类的本科与硕士研究生教学和研究过程。

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统的分析与建模/王安麟主编. —上海:上海交通大学出版社,2004
ISBN7-313-03617-5

I. 复... II. 王... III. ①工业工程—系统管理—系统分析②工业工程—系统管理—系统建模
IV. F402

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 100493 号

复杂系统的分析与建模

王安麟 主编

上海汽车工业教育基金会 组编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

上海锦佳装璜印刷发展公司 印刷 全国新华书店经销
开本:787mm×960mm 1/16 印张:15.25 字数:287千字

2004年2月第1版 2004年2月第1次印刷

印数:1-1500

ISBN7-313-03617-5/F·487 定价:22.00元

版权所有 侵权必究

总 序

作为市场经济产物的工业工程学科,在美国的发展已有100年的历史,它在西方国家的工业化进程中和改善经营管理、提高生产率等方面都发挥了很大的作用。近10多年来,随着商业竞争的加剧,国际市场和全球化制造态势的形成,企业和商家纷纷寻求进一步改善经营管理的方法,试图建立自己的核心竞争力,以便在剧烈的竞争中取胜。企业和商家的这些努力是与管理专家的研究结合在一起的,这样就大大地推动、丰富了工业工程和管理学科的发展和内容的更新。

虽然在上世纪三四十年代,交通大学等一些大学曾设立过与工业工程类似的学科,但解放后随着计划经济的实施,这个学科也就取消了。这样,这个学科在我国的研究和应用就停滞了30多年。改革开放后,在原机械工业部的积极推动下,我国从1989年开始引进工业工程的管理方法,并在一些企业试行,取得了明显的经济效果。西安交通大学、天津大学等高校率先于1992年开始招收工业工程专业的本科生。随后,我国一些大学陆续设立这个专业,至今全国已有70多所高等学校设有这个专业;这个专业的硕士生和博士生也在培养之中。但是,正由于我们起步较晚,无论在工业工程的应用还是人才培养等方面都落在先进国家的后面。

上海汽车工业(集团)总公司是一个现代化的大型企业集团,集团公司所属的许多生产厂不但拥有现代化的设备,而且也努力推行现代的管理方法。在实践中,他们深感缺乏既懂工程又懂管理的复合型人才。为了广泛普及现代的管理方法,公司的高层领导把员工的教育和培训摆到了重要的地位。他们除经常举办短期训练班普及现代管理知识外,还委托上海交通大学连续举办了几届“工业工程”专业工程硕士班。为了解决硕士班的教材,他们引进了部分国外最新教材,供上课老师和学生使用。

为了支持工业工程专业人才的培养,解决工业工程专业的教材问题,由上汽集团及所属企业捐资组建的“上海汽车工业教育基金会”,从2000年起就开始研究资助这个专业教材的编写和出版问题。经上海汽车工业教育基金会与上海交通大学出版社共同策划,并先后与上海交通大学、同济大学、东华大学、复旦大学、上海大学和上海理工大学等校工业工程系老师座谈、讨论,于2001年8月正式成立了“工业工程系列教材编委会”,制订了系列教材编写和出版计划。按照这个计划,系列教材共计14种,由2002年起分3年出版。基金会拨出专款资助

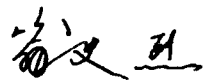
系列教材的编写和出版。我们对上海汽车工业教育基金会给予工业工程专业教育的支持表示感谢。

在确定系列教材的选题时,我们主要考虑了以下原则:一是特色,要有工业工程学科的特色,选题应确属工业工程学科的课程,对一些可与其他学科共用的教材则不再列入;二是精选,编写内容应精选该学科公认的、经典的基本原理和方法,以及先进的管理理念,对一些尚有争论的观点则不予论述;三是实践,遴选的编著者应对该课程有丰富的教学实践经验,并在教材中尽可能地反映企业解决工业工程问题的实际案例。经过认真研究,我们确定了下列选题:工业工程——原理、方法与应用,生产计划与控制,物流工程与管理,现代制造企业管理信息系统,以上为第一批;人因工程,质量管理,决策支持系统,复杂系统解析,工程管理的模糊分析,制造系统建模与仿真,以上为第二批;工程经济学,工作研究,项目管理,工业工程计算方法(暂定名),以上为第三批。

参加这套系列教材编写的是上面提到的这几所大学的老师们,他们都是相应课程的任课教师。他们根据自己教学过程中反复修改过的讲稿,又参考了国内外的相关文献,在较短的时间内完成了教材的编写。他们精选教材内容,配以实例讲解,使学生易于掌握;同时,他们也力图将最近几年,工业工程的最新研究成果做简要的介绍,使学生接触本专业的的前沿。但是,由于编写时间比较仓促,编写者们的经验又各不相同,本系列教材的质量和水平一定是参差不齐的,也一定会存在一些缺点,希望能得到读者的批评和指正。特别要说明的是,在我们筹划这套系列教材的时候,“高等院校工业工程专业教材编审委员会”组编的7种教材尚未出版,当我们的编者拿到这7种教材时,我们的第一批4本书稿已形成初稿,但编者们仍然会从中得到启迪。

在工业工程系列教材第一批教材正式出版之际,我们深感欣慰,并对辛勤工作的老师们表示感谢。祝愿工业工程学科在教育界、工程界同仁的关怀下茁壮成长。

工业工程系列教材编委会主任
中国工程院院士



2002年8月

前 言

计算机和信息技术的发展,要求教学突破传统的系统分析和解析方法的束缚,来解决更为复杂的理论和工程解析问题。传统的系统分析和解析方法,其方法论是以稳定或均衡系统为前提的;而实际的客观系统,用稳定或均衡理论无法说明和解析的现象却大量存在,我们把其称为复杂系统。例如,社会层次的复杂系统因为具有思维能力的人的介入而变得极其复杂。其中较为典型的例子有社会经济系统、金融系统、企业组织管理系统等。在这类系统中,因人的参与所产生的不确定性、投机性及主客体易位等特征赋予了额外的复杂性。

复杂系统涉及的范围很广,包括自然、工程、生物、经济、管理、政治与社会等各个方面;它探索的复杂现象从一个细胞呈现出来的生命现象,到股票市场的涨落、城市交通的管理、自然灾害的预测,乃至社会的兴衰等。由于各学科对复杂性的认识和理解都不一样,所以人们从避开术语上的争论出发,采用了“复杂系统”这个名词。概括起来,复杂系统都有一些共同的特点,就是在变化无常的活动背后,呈现出某种捉摸不定的秩序,其中演化、涌现、自组织、自适应、自相似被认为是复杂系统的共同特征。

复杂性科学是当前世界科学发展的热点和前沿,其研究与应用正在向各个学科渗透,成为受到众多学科领域科学家关注的交叉科学研究领域。复杂性科学与管理的结合是复杂性科学发展的一个重要方面,也正在成为一个新的学科交叉研究领域。有关研究与应用的兴起,已经引起越来越多的政治家、军事家、管理学家和企业高层管理者的兴趣和关注。复杂性科学是用以研究复杂系统和复杂性的一门交叉学科。虽然它还处于萌芽时期,但已被有些科学家誉为是“21世纪的科学”。

克劳斯·迈因策尔在其《复杂性中的思维》中指出:“复杂系统理论不是一种形而上学的过程本体论。它也不是一种传统哲学意义上的认识论信念。这种方法论的原理,为自然科学和社会科学中建构非线性复杂系统的模型提供了一种启发性的图式。如果这些模型不能够进行数学处理,其性质不能够进行量化,那么我们得到一种经验模型,这样的模型也许与数据符合,也许不相符合。而且,它力图在奥卡姆剃刀的意义最上最小程度地运用假设。因此,它是一种数学的、经验的、可检验的和有启发性的经济的方法论。而且,它还是一种跨学科研究纲领,结合了多种自然科学和社会科学。”

如何将描述复杂系统的动力学理论引入工程学,是工业工程管理学科的重

要方向。本书以工业工程管理的应用为主要背景,较为一般地论述其方法和技术。其内容为:分形理论、遗传算法、神经网络、元胞自动机、人工生命等分析方法。本课程的目标是向学生介绍自下而上自组织、自适应、自优化的复杂系统分析方法,使学生从宏观和微观方法论上进行综合和交叉,掌握构造更高层次系统的技术和方法。这作为跟踪世界发展动向,反映新领域、新知识、新成果、新资料、新方法是必要的。

本书第2章由上海电力学院马立新教授编写;3.3.3节、3.3.4节、4.3.1节、5.3.7节、5.3.3节、5.3.4节、6.3节由上海交通大学赵群飞副教授编写;其余各章由上海交通大学王安麟教授编写。本书在编写过程中得到上海交通大学胡宗武教授,以及上海汽车教育基金委员会的大力帮助和支持,在此一并表示感谢。

编 者

2003年11月

目 录

第 1 章 复杂系统的基本分析	1
1.1 复杂性	2
1.1.1 自然界的复杂性	2
1.1.2 复杂性的基本概念	2
1.2 工业管理过程的复杂性	9
1.2.1 从工业经济看工业管理的复杂性	9
1.2.2 从制造过程看工业管理的复杂性	9
1.2.3 工业管理的发展趋势——自组织化.....	10
1.3 复杂系统的控制与决策.....	14
1.3.1 复杂系统管理方法.....	14
1.3.2 复杂管理信息的集成化和智能化.....	16
参考文献	26
第 2 章 复杂系统的分形自相似分析与建模	27
2.1 复杂系统的自相似过程.....	27
2.1.1 什么是自相似.....	27
2.1.2 自相似的模拟.....	29
2.1.3 分形几何的特征.....	30
2.2 复杂系统的分形建模技术.....	32
2.2.1 分形几何的产生和意义.....	32
2.2.2 分形的定义.....	33
2.2.3 分维的计算.....	35
2.2.4 分形时间.....	37
2.2.5 分形几何学的应用.....	37
2.3 分形在工程系统中的自相似分析与建模.....	38
2.3.1 股票价格的预测模型.....	38
2.3.2 企业需求的预测.....	41
2.3.3 符合分形原理的企业供应链的管理.....	43

2.3.4 其他预测问题的应用·····	45
参考文献 ·····	47
第3章 复杂系统的元胞自动机自组织分析与建模 ·····	49
3.1 元胞自动机与自组织过程·····	49
3.1.1 什么是自组织过程·····	49
3.1.2 元胞自动机的自组织·····	51
3.1.3 模拟自组织过程·····	53
3.2 复杂系统的元胞自动机建模技术·····	55
3.2.1 “生命的游戏”·····	56
3.2.2 元胞自动机的基础·····	57
3.2.3 元胞自动机的自组织建模方法·····	64
3.2.4 元胞自动机的应用领域·····	67
3.3 元胞自动机在工程系统中的自组织化分析与建模·····	69
3.3.1 城市交通信号自组织控制模型·····	69
3.3.2 结构拓扑的自组织进化·····	75
3.3.3 股票市场投资行为的模拟·····	81
3.3.4 交通流中多自主体人员行为的模型·····	86
参考文献 ·····	91
第4章 复杂系统的遗传进化分析与建模 ·····	94
4.1 遗传算法与进化过程·····	94
4.1.1 进化算法的概述·····	94
4.1.2 遗传算法的决策机理·····	96
4.2 复杂系统的遗传算法建模技术·····	97
4.2.1 遗传算法的概貌·····	97
4.2.2 单纯型遗传算法·····	99
4.2.3 模式定理(schemata theorem)·····	104
4.2.4 遗传算法的有关操作规则和方法·····	106
4.3 遗传算法在工程系统中的进化分析与建模·····	111
4.3.1 财务规划问题的解法·····	111
4.3.2 非线性强制振动解的解法·····	113
4.3.3 无序加工调度·····	118

4.3.4 港口投资辅助决策	122
参考文献	127
第5章 复杂系统的神经网络自适应分析与建模	129
5.1 神经网络与自适应分析概述	129
5.1.1 什么是自适应过程	129
5.1.2 神经网络的适应性模拟	130
5.1.3 企业的自适应管理	131
5.2 复杂系统的神经网络建模技术	135
5.2.1 神经网络的概述	135
5.2.2 神经网络的主要特点	137
5.2.3 细胞元模型	139
5.2.4 神经网络模型	142
5.2.5 神经网络的学习	146
5.2.6 多层前向神经网络(BP网络).....	152
5.2.7 典型反馈网络——Hopfield网络	163
5.2.8 基于概率学习的 Boltzmann 机模型	168
5.3 神经网络在工程系统中的自适应分析与建模	174
5.3.1 非线性系统的识别	174
5.3.2 案例挖掘的神经网络决策	184
5.3.3 新产品和改型产品成本估计的模型	190
5.3.4 企业破产预测	194
参考文献	202
第6章 复杂系统的人工生命模型分析	204
6.1 复杂系统的人工生命分析	204
6.1.1 人工生命的特征	204
6.1.2 人工生命的自繁衍	206
6.1.3 人工生命的适应性	207
6.1.4 人工生命的自组织	209
6.1.5 人工生命技术的本质	211
6.2 人工生命的方法	212
6.2.1 人工生命的进化模型	212

6.2.2	L 系统与形态生成模型	218
6.2.3	人工生命的研究内容归纳	221
6.3	人工生命在工程系统中的分析与建模	224
6.3.1	金融证券市场分析决策中的应用	225
6.3.2	计算机动画	227
6.3.3	提速因特网	228
	参考文献	231

第 1 章 复杂系统的基本分析

我国著名科学家钱学森于 1981 年提出三个崭新的科学技术部门：系统科学，思维科学和人体科学。十多年来，他在这三个领域做了大量工作，并于 20 世纪 80 年代末总结和提炼出“开放的复杂巨系统”的概念。1990 年，《自然》杂志发表了钱学森教授和他的合作者的论文《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》，文中首次指出，对于自然界和人类社会中一些极其复杂的事物，可以用开放的复杂巨系统来描述。

克劳斯·迈因策尔在其《复杂性中的思维》著作中指出：“复杂系统原理主张物理的、社会的和精神的世界都是非线性的、复杂的。这个基本的认识论结论对于我们现在的行为和未来的行为，都有重要的影响”。“在自然科学中，从激光物理学、量子混沌和气象学直到化学中的分子建模和生物学中对细胞生长的计算机辅助模拟，非线性复杂系统已经成为一种成功的求解问题方式。另一方面，社会科学也认识到，人类面临的主要问题也是全球性的、复杂的和非线性的。生态、经济或政治系统中的局部性变化，都可能引起一场全球性危机。线性的思维方式以及把整体仅仅看作其部分之和的观点，显然已经过时了。认为甚至我们的意识也受到复杂系统非线性动力学所支配这种思想，已成为当代科学和公众兴趣中最激动人心的课题之一”。

复杂性科学是用以研究复杂系统和复杂性的一门交叉学科。虽然它还处于萌芽时期，但已被有些科学家誉为是“21 世纪的科学”。复杂性科学研究的复杂系统涉及的范围很广，包括自然、工程、生物、经济、管理、政治与社会等各个方面；它探索的复杂现象从一个细胞呈现出来的生命现象，到股票市场的涨落、城市交通的管理、自然灾害的预测，乃至社会的兴衰等，目前，关于复杂性的研究受到了世界各国科学家们的广泛关注。1999 年，美国《科学》杂志出版了一期以“复杂系统”为主题的专辑，这个专辑分别就化学、生物学、神经学、动物学、自然地理、气候学、经济学等领域中的复杂性研究进行了报道。由于各学科对复杂性的认识和理解都不一样，所以该专辑避开术语上的争论，采用了“复杂系统”这个名词。概括起来，复杂系统都有一些共同的特点，就是在变化无常的活动背后，呈现出某种捉摸不定的秩序，其中演化、涌现、自组织、自适应、自相似被认为是复杂系统的共同特征。

1.1 复杂性

1.1.1 自然界的复杂性

自然界在我们看来是个十分复杂的系统,在这个庞大的时空域里,存在着无数个变幻无穷的、奇妙的现象。在想象中,要去完全理解这个世界是极具挑战性的事。但是,在研究中,人们发现自然界中的复杂系统并不是完全无规律可循的,相反,它们都可以认为是由许多简单元素按照某种规则交互作用所形成的,而且这些规则也并不是与所有元素相关的,而是各规则只影响很小范围的本地元素,就连整个自然界也可认为是许多简单元素在这样的规则的相互影响下形成的平衡系统。就好像自然界中的食物链和空气成分一样,它们各自动态变化着,但却相互影响,保持着系统的稳定。它们表现出来的复杂现象都是大量元素在一些简单的规则驱动下交互作用的结果。

在这样一个世界里,我们就像一个个微小的分子或单元被吸收进一个十分纷繁的物质空间中,而整个空间所组成的系统在随着时间的流逝或空间位置的迁移千变万化,我们周围的一切,包括我们自己都在做着不停息的、无法捉摸的变化。这些变化经常是复杂的,或者说是毫无规律可循的,但是正是这些变化和变化的主体构成了一个整体上总是保持稳定的世界。在我们的想象中,事物是变化着的,而且是没有规律的,永不循环的,那么这些变化着的事物的集合怎么可能组成一个健强性的整体呢?

人们一直在寻求各种事物的变化规律,就好像有人企图知道圆周率 π 的值究竟到多少位以后开始循环的,可大家都认为 π 是无限不循环小数,它永远不会循环的。这就是说在一个系统中不可以只看其中一个事物的变化规律,因为有些规律是永远找不到的。但是,我们知道一个系统是由很多个体组成的,更重要的是这些个体之间是存在着各种交互作用的,那么我们为什么不从系统整体出发,通过确定个体之间的交互关系来了解整个系统的情况呢?

同时,我们还意识到在复杂系统及其变化规律的研究中,使用传统的思想和方法已经不能给我们比较满意的结果,要想更加深入地了解这些复杂系统,就必须从崭新的角度,应用更为灵活和具有泛用性的方法来处理这些复杂系统。

1.1.2 复杂性的基本概念

1.1.2.1 复杂性的哲学认识

1. 复杂性与简单性

按照传统的理解,复杂与简单只能相比较地把握。一种事物未被认识或一个问题未找到解决办法时被当作复杂的,一旦认识或找到解决方法后就成为简单的了。钱学森在评述这种观点时曾说:“有同志认为‘复杂性’只是人们在面对一个新问题、新领域时的初步感受,后来认识了,就不复杂了。从人认识事物的过程来讲,这也是正确的。由浅到深也就由‘复杂’到不复杂”,在这种被广泛接受的观点后面隐藏的根本哲学观点是,简单与复杂的划分纯属认识论范畴,不具有本体论意义。

从科学方法论角度看,复杂性应是复杂性科学的首要概念,需要给出它的科学定义。复杂性研究的提出至少可以追溯到20世纪40年代末,明确提出建立复杂性科学这个科学任务也已十多年,不同学者基于不同的学科背景和研究对象,给出不同的复杂性定义。据约翰·霍甘提供的信息,塞思·劳埃德共收集了45种复杂性定义,如分层复杂性、算法复杂性、随机复杂性、有效复杂性、同源复杂性、基于信息的复杂性、时间计算复杂性、空间计算复杂性等。复杂性是现代科学中最复杂的概念之一,至今无法给出统一的定义是正常的,也许根本就不存在统一的复杂性定义。

我们认为,至少目前不必追求这种统一定义,应当容忍和接受不同意义下的复杂性,允许不同学科有不同的定义。多样性、差异性 is 复杂性固有的内涵,只接受一种意义下的复杂性,就否定了复杂性本身。定义的多样性无疑会增加不同学科之间交流的困难,但可以超越哲学思辩式的议论,开展具有可操作性的实证研究。这种研究成果多了,就可能概括出较一般的复杂性概念。

其次,应当区分不同层次上的复杂性。物理、生物、社会、意识这些现实世界的不同层次各有性质不同的复杂性,既不可以拿低层次的复杂性代替高层次的复杂性,也不可以拿高层次的复杂性否定低层次的复杂性,不可混淆不同层次的复杂性。纯粹物理系统的复杂性后于最低层次的复杂性,人的意识和人类社会具有的复杂性应属最高层次的复杂性。中间尚有各种层次的复杂性。不同层次的复杂性须有不同的定义,使用不同的研究方法。

复杂性研究的另一条思路,是先不考虑给复杂性概念下定义,针对具体的复杂系统类型分别进行研究。如钱学森划分出一类对象叫做开放的复杂巨系统,先研究一个个具体的开放复杂巨系统,如人脑系统、人体系统、社会系统、生物圈系统、地理环境系统等,再根据这些成果概括出开放的复杂巨系统理论。美国圣塔菲学者提出一类称为规则支配的复杂适应系统,如人体免疫系统、神经系统、经济系统、人工生命、可持续发展等,着重寻找解决若干实际复杂适应系统问题的理论和方法,再建立复杂适应系统的一元化理论。

需要指出,我们既要承认简单性与复杂性有定性性质或本体论的区别,又应

承认它们都是模糊概念,在各自的核心部分明确肯定(代表各自的本质规定性),在远离核心处又相互交叠、渗透,从典型的简单性到典型的复杂性是逐步过渡的,没有截然分明的界线。所以,无论圣塔菲的复杂适应系统,还是钱学森的开放复杂巨系统,都是模糊概念,不能苛求给它们划出明确的边界,一些系统能否应用他们的方法,需要灵活处理。

2. 何为复杂性

钱学森认为:“所谓‘复杂性’实际是开放的复杂巨系统的动力学”。即构成元素不仅数量巨大,而且种类极多,彼此差异很大,它们按照等级层次方式整合起来,不同层次之间往往界限不清,甚至包含哪些层次有时并不清楚。这种系统的动力学特性就是复杂性。

描述符合科学规范的复杂性统一定义较难。为了探讨复杂性同简单性之间的定性区别,苗东升在其《论复杂性》中对复杂性的根源做了以下考察:

源于系统规模的复杂性。系统组分的数目代表系统的规模,在一定范围内,规模增大不足以造成现有方法无法处理的复杂性。复杂性的形成需要足够的系统规模,规模巨大就会带来描述和处理的困难,小系统或大系统的方法无济于事。简单系统不存在源于规模的复杂性,具有足够规模(圣塔菲要求系统有中等规模,钱学森要求达到巨系统规模)是产生复杂性的必要条件,但不是充分条件,即使巨系统也不一定是复杂系统。

源于系统结构的复杂性。组分的多样性和差异性造成组分之间相互关系的多样性和差异性,是系统复杂性的根本源泉。对于产生复杂性,结构效应比规模效应要紧得多。因为组分的差异越大,把它们整合起来的难度就越大。特别地,等级层次结构是复杂性的主要根源之一,复杂性研究者几乎都强调这一点。只有元素和整体两个层次的系统必定是简单的,被当作非等级层次结构;在元素层次上不能完成全部整合任务,需要经过不同层次逐级整合才能最终形成系统整体,因而在元素与系统整体之间还有中间层次的结构,才是等级层次结构。复杂性只可能出现于等级层次结构的系统中。层次越多,越容易产生复杂性。把多样性或多个层次束缚在一起就是系统,它的词义隐含了复杂性来源于层次结构的观念。

源于开放性即环境的复杂性。封闭系统没有复杂性,复杂性必定出现于开放系统。家务机器人被当作复杂系统,其复杂性并非来自系统规模或结构,而是来自环境——家务劳动的多样性和极不规则性。但对外部环境开放也不是产生复杂性的充分条件。即使外部环境对系统的影响不能忽略,只要可以近似地当作对系统的干扰、摄动因素看待,或者系统行为可以归结为输出对输入的响应关系,就还是简单系统,用传统的封闭系统模型加摄动的方法,或者黑箱方法,足以有效地处理。只有当外部环境对系统的作用不再允许当作干扰、摄动,而是系统

自身特性的有机构成成分,封闭系统加摄动方法或者黑箱方法都失效,这种系统必然呈现某种复杂性。开放性也是复杂性的重要根源,系统与环境相互关系的复杂性是系统复杂性的重要表现。

源于动力学特性的复杂性。动力学因素可以忽略不计的系统,或者动力学因素可以作为静态模型的干扰因素来对待的系统,一定是简单系统。动力学过程可能产生无穷的多样性、差异性、丰富性、奇异性(包括分叉、突变、混沌等)、创新性,是产生复杂性的重要机制,复杂性只能出现于动力学系统,复杂性一定是某种动力学特性。动力学因素是产生复杂性最重要的物理学根源。但动力学因素也不是产生复杂性的充分条件,许多动力学系统(如经典控制论和运筹学处理的系统)还是简单系统。

源于非平衡态的复杂性。平衡态不可能产生复杂性,处于平衡态的系统都是简单的。非平衡态也不一定产生复杂性,所谓近平衡态的系统特性原则上可以使用平衡态的处理方法,或加以小的修正。复杂性只能出现于远离平衡态,在这种条件下系统通过自组织形成耗散结构,即自组织地产生出复杂性。复杂系统必定是处于平衡态的系统,耗散结构才具有最小的复杂性。物理化学层次的耗散结构还不可能具有生物复杂性,但只有具备了这种最小复杂性,才可能进化出更高级的生物复杂性。

源于不可积性的复杂性。保守的可积系统没有复杂性,复杂性只能出现于不可积系统。但弱不可积系统,即近可积系统,与可积系统没有定性区别,用可积系统加不可积性扰动的办法即可处理,这里也不可能出现复杂性。远不可积系统才是复杂性的来源,如果不可积性扰动达到使 KAM 环面基本破坏时,系统轨道就复杂得难以预测了。

源于不可逆过程的复杂性。可逆过程没有复杂性,还原论方法足以解决问题。复杂性只能出现于不可逆过程。但不可逆性也有差别,须加以区分。逻辑上说,应当存在近可逆过程,它的不可逆性微弱,可以作为扰动因素。即以可逆过程为模型,加上不可逆扰动,就能够获得真实过程的近似描述。真正的复杂性只能来源于远不可逆过程(物理学似乎尚未提出这种概念),是系统在不可逆过程中的动力学行为。

源于非线性的复杂性。哲学家早已指出,事物发展变化的终极原因是相互作用,但相互作用有线性和非线性之分。线性意味着单一、均匀、不变,不具备产生复杂性的根源,线性系统都是简单系统,线性相互作用产生的是简单性,无法造就复杂性。非线性意味着无穷的多样性、差异性、可变性、非均匀性、奇异性、创新性。元素之间、子系统之间的非线性相互作用是系统产生复杂性的根本内在机制,复杂性只能出现于非线性系统。但非线性自身包含极大的差异性。弱非线性,或非本质非线性,仍然不可能产生复杂性,可以作为扰动因素处理,特别

是系统的局部性质,用线性模型加微扰的方法往往可以有效描述。只有强非线性,特别是本质非线性,才可能产生复杂性。

源于不确定性的复杂性。确定性连通简单性不确定性连通复杂性。首先是源于随机性的复杂性。但随机性也不是产生复杂性的充分条件,平稳随机过程属于简单系统,非平稳过程才可能出现复杂性。简单地宣布随机性是最大的复杂性,并无事实依据。物理系统随机性的规律一般只服从大数定律,仍属于简单性范围,可以用统计方法处理。生命系统、社会系统、意识系统的组分具有智能,组分之间有复杂的相互作用,只靠大数定律不能揭示其本质特征,宏观整体特性不能仅仅看作大量微观组分相互碰撞的结果,现在的概率统计方法不足以处理这类系统中的随机过程。例如,不可能从细胞特性出发通过统计综合获得人体系统的整体运动特性,不可能从个人特性出发通过统计综合获得社会系统的整体特性。另一种重要的不确定性为模糊性,它既是复杂性的来源,又是复杂性的表现或结果。札德的模糊集理论就是为处理复杂性而提出来的,他的不相容性原理认为,系统的复杂性超过一定阈值,描述的精确同描述的有意义互不相容,二者不可兼得。但目前的复杂性科学尚未涉足模糊性问题。

源于主动性、能动性的复杂性。作用者与被作用者、原因与结果界限分明的是简单系统。不同组分之间、系统与环境之间互为因果,互动互应(所有组分都既是被作用者,又是主动作用者),一连串的、相互交叉的、网络式的因果联系,才能产生复杂性。特别是当组分有一定的自适应能力时,在不断适应环境的行为过程中必然产生出整体的复杂性。圣塔菲的一个基本信念是适应性产生复杂性,所谓复杂适应系统就是在不断适应环境的过程中产生出复杂性的系统。

源于系统组分智能的复杂性。由非智能组分构成的系统(如耗散结构论和协同学研究的贝纳德流、固体激光器等),即使通过自组织这种主动过程产生出复杂性,一般也是较为初步的、低级的,总有办法对付,属于初级复杂性。由具有智能的组分构成的系统(如圣塔菲研究的CAS)能够辨识环境,预测未来,在经验中学习,以形成好的行为规则,使自身发生适应性变化,因而必定是复杂的。组分的智能愈高级,系统的复杂性也愈高级。组分智能是复杂性的重要根源之一。如地缘政治系统一般包含为数不多的组分,属于小系统,至多算作大系统,但由于组分是具有高级智能的主体,使得系统整体行为异常复杂多变,往往难以预测,一般属于开放的复杂巨系统。

源于人类理性的复杂性。以人作为构成要素的系统,其行为必须考虑人的理性因素的作用。尤其在竞争性系统中,博弈者的理性(智慧、谋略等)是产生复杂性的重要来源。但在完全理性(无限理性)假设下,复杂性的根源被抛弃了,博弈方都采取最大-最小策略,这种系统仍然是简单的,可按照运筹学处理。不完全理性即有限理性才可能产生复杂性。