



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

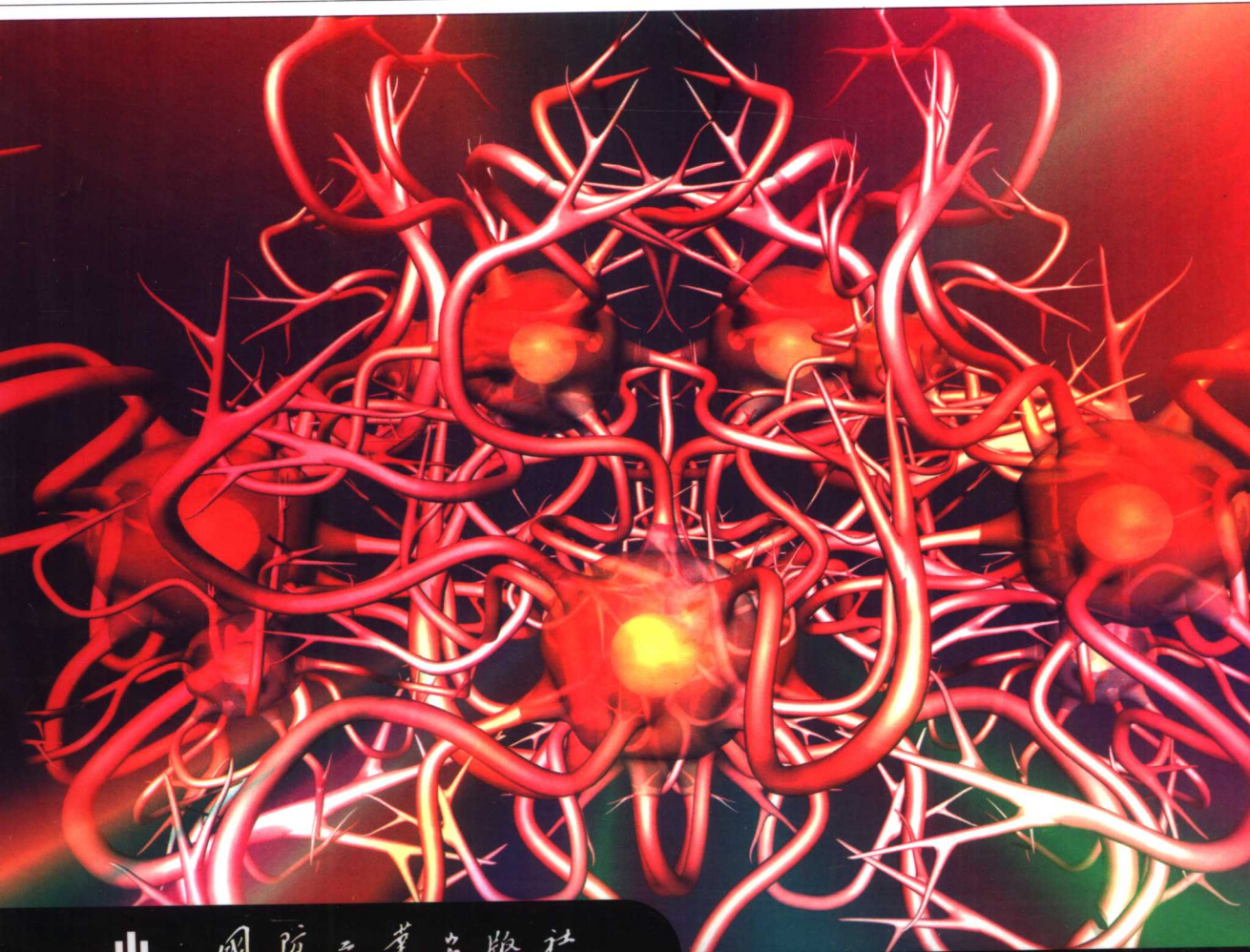
复杂性人工生命

研究方法导论

薛惠锋 主编

吴晓军 肖强 副主编

薛惠锋 吴晓军 解丹蕊 肖强 编著



国防工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

复杂性人工生命 研究方法导论

薛惠锋 主编

吴晓军 肖强 副主编

薛惠锋 吴晓军 解丹蕊 肖强 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

复杂性人工生命研究方法导论/薛惠锋主编. —北京:
国防工业出版社, 2007. 1
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 7-118-04868-2

I. 复... II. 薛... III. 生物模拟—研究方法—高
等学校—教材 IV. Q811.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 137683 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12½ 字数 277 千字

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(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

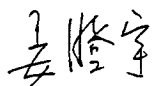
序

复杂性科学兴起于 20 世纪 80 年代,经过二十多年的发展已经蔚为壮观。不少优秀学者都乐意把 21 世纪称为“复杂性的世纪”或“复杂性科学的世纪”。近日,国务院发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》,其中又将“复杂系统、灾变形成及其预测控制”列为面向国家重大战略需求的十大基础研究领域之一。由此可见,复杂性研究的确具有重要的学科地位和研究价值。

由我校薛惠锋教授、吴晓军副教授等共同完成的《复杂性人工生命研究方法导论》一书,站在复杂性科学学科建设的高度,围绕人工生命方法这一主题,以大量研究文献及作者承担完成的重点课题为背景和依托,在其提出的“复杂系统的人工生命研究”统一理论框架下,有针对性地对五种典型人工生命方法进行了全面且有重点的探究。本书紧贴国内外学科动态,深入论述复杂系统和复杂性研究的实质,通过合理的分析比较提出了新的学术观点。在展开具体研究时,按照自动机网络、进化计算、蚂蚁算法、粒子群优化算法以及人工免疫系统这五个方面,层层推进,环环相扣,思路缜密,论证严谨。书末将复杂适应系统理论的启示与局限性进行了对比,结果引人深思。

西北工业大学是我国唯一一所发展航空、航天、航海工程教育和科学研究为特色的全国重点大学,注重工、理、管、文、经、法等学科的协调发展,鼓励基础学科和交叉学科的研究。《复杂性人工生命研究方法导论》一书的出版,标志着我校在发展基础学科、交叉学科的工作上又有了新的成果,作为学校校长,我感到十分高兴和欣慰。希望并祝愿薛惠锋教授、吴晓军副教授和他们的同事以及学生们再接再厉,在“十一五”期间拿出更多更好的作品,为学校的可持续发展和国家科学技术事业的进步继续贡献力量,发挥出不可替代的作用。

是为序。



2006 年 3 月

前言

本书从人工生命视角对复杂系统理论进行观察与剖析,焦点在于其中的方法。作为全新的领域,人工生命和复杂系统都是当前研究的热点,本书在经典方法的基础之上赋予其新的思考与阐述。

具有复杂性的系统就是复杂系统。但何谓复杂性?这个概念是如此之新、如此之复杂,“以至于还无人完全知晓如何确切地定义它,甚至不知道它的边界何在。”但它的气魄确实不小,试图解答“一切常规学科范畴无法解答的问题。”完全准确地把握复杂性中的概念或许还要假以时日,然而这并不妨碍我们对复杂性开展进一步的探索,以及对其方法论的进一步思考。基于这样的考虑,本书对近年来的相关研究成果加以整理、提炼、重组,在此基础上,试图更加深入和更为全面地认识复杂系统理论。

尽管复杂系统、复杂性等概念有所差别,但本书并未刻意加以区分。我们认为,复杂性是指复杂系统的复杂性,而复杂系统则是具有复杂性的系统,因此从本质上来讲,观察的主体仍旧是系统。所以,全书的组织遵循了系统研究中规则结构是否变化这一原则。尽管这是一个宏观的分类,但并不机械。比如元胞自动机,在最初的定义中符合结构与规则固定的原则,但后来也发展出各种各样极其复杂的元胞自动机模型,例如适应性元胞自动机,以及作者将元胞自动机应用于算法模型中的图的最短路以及 Voronoi 图的研究。在群体智能的研究中,我们很难确定遗传算法中的个体之间究竟具有怎样的结构或者什么样的变化规则,然而能够明确的是,它的灵活性介于网络动力学模型与复杂适应系统模型之间。

从非线性自组织理论到人工生命,是近年来从不同角度展开的对复杂系统的研究。有学者断言,人工生命研究方法已经构成复杂系统研究的主体。人工生命学科的提出,对开拓系统性思维具有非常重要的价值,它关注的是具有生命特征的系统。具体而言,人工生命模拟生命进化的机制以及生命本身,它重视生命活动所表达出的生命特征,而忽略其存在的具体形式。

人们惊叹于生命特征所具有的复杂性,而复杂系统理论所研究的正是系统的复杂性,它们在复杂性这个特征上归于统一。但应该说二者的研究有交集,并不完全相等。比如复杂系统复杂性的根源问题,虽然 Holland 指出适应性造就复杂性,但适应性并非复杂性的唯一途径。又如人工生命的研究目标也与复杂系统的复杂性研究并不一致。可以说,本书的组织结构是作为复杂系统理论与人工生命理论的交集而出现的。

本书首先回顾了系统理论发展的三个阶段,在此基础上指出复杂系统理论出现的背景以及特点。接着介绍了人工生命学科的产生、发展状况及其研究内容。最后将二者进行综合,提出一个研究框架,本书的组织结构正是围绕该框架展开的。

网络动力学的研究由元胞自动机开始,在研究过程中发现了简单规则之下所表达出的复杂的模式。这种模式给人以震撼性的启发,由此产生了人工生命学科,它所表现出的复杂性也引起了人们的关注。第 IV 类元胞自动机给 SFI 的研究者提供了一个特殊的灵感,那就是“混沌的边缘”,而利用元胞自动机来展开复杂系统的研究已经成为系统研究的前沿领域。对布尔网络与 L 系统的研究也说明了简单规则可能使系统涌现出复杂的特性,除此以外两者还具有其他的特性。近年来,相关学者在研究一个相互联接的系统时,发现“大部分节点只有少数几个联接,而某些节点却拥有与其他节点的大量联接”的系统具有不同于随机网络的新特性,这就是无尺度网络的由来。无尺度网络的出现揭开了自动机网络研究新的一页,随着越来越多的无尺度网络的出现及新特性的发现,其应用也将更为广泛。

归于群体智能中的遗传算法的出现,是并行智能算法研究中的一个里程碑。它不仅提出了一个在巨大解空间上的通用搜索算法,更为重要的是它表达了一种思想,而隐含于其中的个体的学习能力是其灵魂。这也从另外一个角度揭示了生命系统的伟大与神奇,更投射出其中的复杂。粒子群优化算法与蚂蚁算法也源于对生命系统的模拟,同样表现了简单的个体行为在群体上涌现出不可思议的结果,而此时系统也实现了某些目标上的优化。

很早以前人们就对生物体的免疫系统产生了浓厚兴趣,随着生物学研究的深入,其机理也逐步被人们掌握,以此为基础,模拟出了生物体的免疫系统,从而构造出人工免疫系统。除少数的系统优化以外,人工免疫系统的应用还受到一些限制。目前这些研究还只能作为人工免疫系统研究的起点。可以预见,人工免疫系统在复杂系统建模的研究中将发挥重要的作用。由此看来,将人工免疫系统归于群体智能仍属权宜之计。

复杂适应系统的出现,将复杂系统或人工生命研究带入了一个新的境界,它是站在遗传算法的肩膀上来审视系统整体。构成系统的主体在系统演化过程中进行学习、积累知识、不断进化,从而为现实研究中一个个毫无生命气息的个体注入了灵魂,使其具有了生命。在作者长达数周的观察城市形成模型的运行过程中,似乎看到了个体的成长,也感受到了当年 Langton 面对生命游戏所产生的恐惧。

扩展 Holland 的结论,可以说,生命的特征也可以造就复杂性。因此人工生命研究方法对复杂系统的研究也带有片面性,但无论如何,人工生命研究方法为复杂系统的研究提供了一种手段,以上述结构将这些手段介绍给读者是本书的目标,其价值也在于此。

在本书的研究过程中,西北工业大学资源与环境信息化工程研究所李懋、许振华、张力、蔡琳、张秋花、赵锋、寇晓东等同志做了大量的辅助工作,全书的付梓出版也凝结了他们辛勤的汗水。西北工业大学研究生院及自动化学院的领导始终关心着作者的研究工作,他们的支持也使本书得以尽快出版,在此表示衷心的感谢!

作者的研究工作以及本书的编写还得益于《系统科学》(许国志等著,2000)、《复杂——诞生于混沌的边缘》(沃尔德罗普著,陈玲译,1997)、《隐秩序——适应性造就复杂性》(霍兰著,周晓牧等译,2000)、《地理元胞自动机》(周成虎等著,1999)等著作非常重要的启发,在此对相关的作者表示敬意与感谢!

复杂系统以及人工生命是当前处于科学前沿的大论题,许多理论以及思想还处于探索阶段,加之作者水平有限,使本书在某些方面尚不成熟。如果此书能为读者带来一些启发,甚或为复杂性和人工生命的研究尽一份心智,作者将无限欣慰。如若能得到读者的批评指正,则更加感激不尽。

作者
2006年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复杂系统理论的诞生	1
1.1.1 系统论的三个阶段	1
1.1.2 复杂系统和复杂性	3
1.2 人工生命	4
1.2.1 人工生命的诞生	4
1.2.2 人工生命的研究内容	5
1.3 复杂系统的人工生命研究方法	7
1.3.1 具有生命特征的复杂系统	7
1.3.2 复杂系统的人工生命研究框架	8
参考文献	10
第 2 章 自动机网络	12
2.1 元胞自动机	13
2.1.1 元胞自动机的发展史	13
2.1.2 元胞自动机的定义	15
2.1.3 元胞自动机的结构与特征	16
2.1.4 元胞自动机的分类	21
2.1.5 元胞自动机研究与相关理论	26
2.1.6 几种典型的元胞自动机	28
2.1.7 元胞自动机的应用	34
2.2 布尔网络	37
2.2.1 布尔网络的相关概念与特征	37
2.2.2 布尔网络的实现	37
2.2.3 布尔网络的应用	39
2.3 L-系统	39
2.3.1 L-系统的概念与特征	39
2.3.2 L-系统的描述结构	39
2.3.3 L-系统的应用	42
2.3.4 L-系统与分形	42
2.4 无尺度网络	44
2.4.1 无尺度网络的由来与定义	44

2.4.2	无尺度网络的形成	45
2.4.3	无尺度网络的特性与优缺点	47
2.4.4	无尺度网络的应用	47
2.4.5	无尺度网络的发展前景	48
	思考题	49
	参考文献	49
第3章	进化计算	51
3.1	遗传算法简介	51
3.2	遗传算法的基本原理	52
3.3	遗传算法的基本理论	55
3.3.1	模式与模式理论	55
3.3.2	积木块	57
3.3.3	Walsh 模式变换	57
3.3.4	欺骗问题	59
3.3.5	隐并行性	59
3.3.6	收敛性	59
3.4	遗传算法的实施	60
3.4.1	编码	61
3.4.2	适应度函数	64
3.4.3	遗传操作	64
3.5	遗传算法的改进	67
3.5.1	分层遗传算法(HGA)	69
3.5.2	CHC 算法	70
3.5.3	混合遗传算法	70
3.5.4	并行遗传算法(PGA)	70
3.6	遗传算法的应用	71
3.7	其他进化计算	74
3.7.1	进化策略	74
3.7.2	进化规划	75
3.7.3	遗传规划	76
	思考题	77
	参考文献	77
第4章	蚂蚁算法	79
4.1	蚂蚁算法的理论基础	79
4.1.1	蚂蚁觅食的生态现象	79
4.1.2	人工蚁群与真实蚁群的联系	79
4.1.3	蚂蚁算法的基本原理	80

4.2	蚂蚁算法的实现原理	82
4.2.1	蚂蚁算法的模型描述	82
4.2.2	蚂蚁算法的实现步骤	83
4.2.3	基本蚂蚁算法的特点	84
4.3	蚂蚁算法的改进发展	85
4.3.1	Ant Colony System (ACS)	85
4.3.2	Ant-Q 算法	86
4.3.3	最大最小蚂蚁算法 (MMAS)	86
4.3.4	自适应蚂蚁算法	86
4.4	蚂蚁算法的应用	87
4.4.1	在路径优化问题中的应用	88
4.4.2	在最优树问题中的应用	90
4.4.3	实例研究——蚂蚁算法在交通平衡配流中的应用	91
4.5	总结	93
	思考题	94
	参考文献	94
第 5 章	粒子群优化算法	96
5.1	粒子群优化算法的原理	96
5.1.1	基本粒子群优化算法	96
5.1.2	粒子群优化算法的改进	98
5.2	粒子群优化算法的特点	102
5.2.1	粒子群优化算法与遗传算法的比较	102
5.2.2	粒子群优化算法与人工神经网络的比较	102
5.3	粒子群优化算法的典型应用	103
5.3.1	应用 PSO 的非线性系统辨识	103
5.3.2	粒子群优化算法在布局优化中的应用	106
5.4	粒子群优化算法的进一步研究	109
	思考题	110
	参考文献	110
第 6 章	人工免疫系统	111
6.1	自然免疫系统	111
6.1.1	免疫系统的基本概念	111
6.1.2	免疫应答过程	111
6.1.3	几种免疫元	112
6.2	自然免疫系统的隐喻 (metaphor) 机制	114
6.2.1	免疫网络	115
6.2.2	特异识别	116

6.2.3	克隆选择机制	117
6.2.4	免疫记忆	118
6.2.5	否定选择机制	118
6.2.6	抗体指令系统	119
6.3	人工免疫系统理论	120
6.3.1	人工免疫系统中的数学方法	121
6.3.2	人工免疫网络	123
6.3.3	克隆选择算法	127
6.3.4	否定选择算法	128
6.3.5	免疫进化算法	129
6.3.6	免疫系统模型	131
6.4	人工免疫系统应用	133
6.4.1	TSP 问题的求解	133
6.4.2	机器人技术	136
6.4.3	计算机安全	138
6.4.4	模式识别	138
6.5	人工免疫系统与进化算法和神经网络的关系	140
6.5.1	人工免疫系统与进化算法	140
6.5.2	人工免疫系统与神经网络	141
6.6	人工免疫系统现状与展望	142
	思考题	143
	参考文献	144
第 7 章	复杂适应系统	146
7.1	复杂适应系统的复杂性	146
7.2	复杂适应系统的基本概念	149
7.2.1	属性	150
7.2.2	机制	153
7.2.3	层次	156
7.3	复杂适应系统的特点	161
7.4	复杂适应系统的建模	164
7.4.1	个体如何向主体学习——刺激-响应模型	164
7.4.2	从微观到宏观——回声(ECHO)模型	168
7.5	SWARM 平台简介	170
7.5.1	SWARM 平台的背景	170
7.5.2	SWARM 的模型结构	171
7.6	复杂适应系统的典型应用	172
7.6.1	国会山保姆公司	173

7.6.2 人工股市	175
7.6.3 中心地理论	178
7.7 CAS 理论的启示及局限性	180
思考题.....	183
参考文献.....	183
附 西北工业大学资源与环境信息化工程研究所简介.....	185

第 1 章 绪 论

复杂系统就是具有复杂性的系统,是相对于牛顿时代以来构成科学事业焦点的简单系统而言的。它是现代系统科学进一步发展的产物,是非线性科学与自组织理论的凝聚和升华。生命特征是一大类复杂系统的共同特征,而人工生命研究方法,则构成了这类系统研究的主体。

1.1 复杂系统理论的诞生

归纳起来,系统观的发展经历了三个阶段。20 世纪 30 年代,以强调系统的整体性与目的性为特征的控制论在许多领域得到了成功的应用;20 世纪 70 年代兴起的耗散结构理论和协同学理论提出了第二个系统观,这个阶段强调了系统的随机性、自组织、非线性等特征;20 世纪 80 年代末期以来,以构成系统的个体与环境交互为重点的,以适应、进化、智能等生命特征系统的研究揭开了系统研究的第三个阶段,这个阶段所描述的系统是以适应性、复杂性等为特征。

1.1.1 系统论的三个阶段

贝塔朗菲提出“一般系统论”的概念,被认为是系统研究的开端。20 世纪 40 年代出现的一般系统论、运筹学、控制论、信息论是早期的系统理论,而同期出现的系统工程、系统分析、管理科学则是系统科学的工程应用,这是系统论的第一个阶段。

贝塔朗菲是理论生物学家,1937 年第一次提出了一般系统的概念。1945 年贝塔朗菲的《关于一般系统论》在《德国哲学周刊》上发表,明确提出一般系统论的任务“乃是确立适应于系统的一般原则”,并对系统的共性做了一定的概括,如系统的整体性、关联性、动态性、有序性、终极(目的)性等。贝塔朗菲提出的一般系统论认为,不能把分割的部分的行为拼加成整体,必须考虑各个子系统和整个系统之间的关系才能了解各部分的行为和整体。这些见解是深刻的、前瞻性的,对系统科学的形成和发展做出了奠基性的贡献,但它关于建立各种系统共同规律的探索,还是在定性描述和概念阐发上居多,深入的定量理论和方法较少。

运筹学则源于军事与战争的应用。20 世纪 30 年代末,由于战争的需要,研制了雷达系统。这个新的系统的有效运行,以及其他武器系统的分析和评价,引出了许多问题并逐一得到较满意的解决,从而出现了运筹学。莫斯认为,运筹学是“为决策机构对其控制下业务活动进行决策时,提供以数量化为基础的科学方法”,也有人认为“运筹学是一门应用科学,它广泛应用现有的科学技术知识和数学方法,解决实际中提出的专门问题,为决策者选择最优决策提供定量依据”。

控制论的创始人维纳把控制论定义为：“关于在动物和机器中控制和通信的科学”。控制论是在 20 世纪 30 ~ 40 年代蓬勃发展的自动控制技术和统计数学的背景下诞生的。从系统科学发展来说,控制论的诞生和发展具有特别重大的意义,因为控制论提炼出了包括生物系统和人工系统极为广泛的一大类系统的共性和规律,这一大类系统实质上也是系统科学研究的主要对象。在一定的意义上说,第一阶段的系统论是以控制论为核心的。

信息学是关于系统的信息传递和处理的科学理论,不仅仅包括香农的信息论,还包括电子计算机理论。香农信息论和电子计算机的诞生和发展,是对系统的信息传递和处理过程规律的研究取得根本性突破的里程碑。

对于系统科学研究的一大类系统,控制论从系统的外显的目的行为出发,把目的行为和信息的获取、传输和处理关联起来,构成了一个反馈控制模型;而香农信息论则撇开了所谓信息的语义,从信息的语法方面建立了传递信息的通信系统模型。冯·诺依曼计算机则实现了一种处理信息的“物理符号系统”,这是人类智能物化的伟大起点。这个阶段的理论被应用到自动控制、工程管理以及社会经济等许多领域,第二次世界大战期间以及战后的一系列重大工程和重大科学技术进步为系统思想提供了有力的支持,一时之间,谈论系统、谈论控制成为科学界的时尚,形成系统科学研究的第一个高潮。这一时期所谓的系统,是以机器为背景的,部分是完全被动的、死的个体,其作用仅限于接受中央控制指令,完成指定的工作。任何其他动作和行为,都被看作是只起破坏作用的消极因素(噪声),在应当尽量排除之列。这既保证了它在工程领域的成功应用,也决定了它在生物、生态、经济、社会这类以“活的”个体为部分的系统中必然遇到困难。

1969 年比利时物理学家普里高津提出了耗散结构理论,从热力学的角度分析产生有序结构的原则、条件及其动力学计算方法。他认为,开发并且远离平衡态的系统通过环境进行物质和能量交换,一旦某个参量变化达到一定的阈值,系统就有可能从原来的无序状态自发转变到在时间、空间和功能上的有序状态。

德国物理学家哈肯也于同年提出了协同学,指出一个系统从无序转化为有序的关键并不在于系统是平衡或者非平衡,也不在于离平衡态有多远,而是通过系统内部各子系统之间的非线性相互作用,在一定条件下,能自发产生在时间、空间和功能上稳定的有序结构,这就是自组织。哈肯还指出,系统在临界点附近的行为仅由少数慢变量决定,系统的快变量由慢变量(序参量)支配,就是所谓役使原理。

20 世纪 70 年代还有一些理论对系统科学的发展有重要的意义。艾根吸收了进化论思想和自组织理论,于 1979 年发表了“超循环理论”,把生命起源解释为自组织现象,提出了自然界演化的自组织理论——超循环。托姆于 1972 年发表了《结构稳定性与形态发生学》,对突变现象及其理论做出了系统深刻的阐述。

这个时代的系统具有两个新的特征:第一,元素数量极大,以至于“我推动你”的控制和管理方式已经成为不可能;第二,元素具有自身的另一层次的、独立的运动,使整个系统不可避免地具有统计性和随机性。第二代系统观拓宽了控制的概念,引申了随机性和确定性对立统一的思想,讨论了自组织涨落、相变等新的概念,对系统的理解深入了一大步。这是系统发展的第二个阶段。

20 世纪 80 年代以来,非线性科学和复杂性科学的兴起对系统科学的发展起了很大

的积极推动作用。

国际学术界在 20 世纪 80 年代形成了研究非线性科学的热潮,因为人们意识到非线性科学取得的成就昭示了对世界本质的认识又跃进了一大步。客观世界的一切事物,从根本上说都是相互作用体和相互作用的过程;非线性是数学概念,是相互作用的数学表达。一个系统不仅仅是其部分的总和,这意味着叠加原理失效,在数学上说就是非线性。非线性科学研究各门科学中有关非线性的共性问题。一切事务作为系统,无论是系统的内部结构或者是外显的系统功能,以及系统演化过程,都是相互作用的显示,因而也都是非线性的。特殊地,系统科学(尤其是基础理论层次)特别关心一个系统的性能怎样随时间变化,有没有稳定的终态;这在非线性动力学中就是有没有稳定的定常状态和分岔问题。非线性科学的成果极大地丰富和深化了系统科学和系统工程量化地发展。可以说,耗散结构理论和协同学正是在 80 年代吸收了非线性科学的成果,在理论上提高到一个新的高度;也可以说,非线性科学的进展推动了 80 年代后期复杂性研究的兴起。

在这个阶段,尽管理论上对于自组织、突变、分形等现象进行了分析与描述,但在具体问题的解决上并没有提供可供实施的方案,系统观需要进一步深化。

20 世纪 80 年代中期,国际科学界兴起了对复杂性的研究,一个突出的标志是 1984 年在美国新墨西哥州成立了以研究复杂性为宗旨的圣菲研究所。这是由三位诺贝尔奖获得者盖尔曼、阿罗、安德森为首的一批不同学科领域的著名科学家组织和建立的,其宗旨是开展跨学科、跨领域的研究。他们把注意力集中到个体与环境的互动作用上。而同时计算机技术的发展,为圣菲研究所集中于系统的数字模拟方向上的复杂性研究提供了保证,这个由多学科背景的科学家构成的团队,为通过对个体、环境相互作用下涌现现象的思考提供了条件。它从不同的角度揭示了复杂的本质,提出了“混沌边缘”的口号,创立了“人工生命”学科,圣菲研究所的研究成果已经成为复杂系统理论的旗帜。

1.1.2 复杂系统和复杂性

复杂系统与简单系统相比而言,两者具有根本性的不同。简单系统通常具有小规模的元素数量或者元素间具有简单的耦合作用,对由大规模元素构成的巨系统的研究,按照元素间的耦合作用则分为复杂巨系统和简单巨系统。这里所研究的复杂系统是指具有中等数目元素,相互之间具有较强耦合作用的系统,如组织中的细胞、股市中的股民、城市交通系统中的车辆或者司机等等。

进一步对复杂系统元素间的相互作用进行归纳,一般情况下元素具有一定的智能性、抽象性与适应性,因此也常常将该类元素称为“主体(Agent)”。主体可以按照各自的规则做出决策,随时准备根据接收到的信息修改自身的行为规则;对系统主体的理解是建立在主体的抽象性的基础之上的,即抽取其影响系统本质的特征进行描述,这也是主体得以存在的前提。在这些复杂系统中,主体往往只知道周围一部分主体的行为,但无法知道系统中全部主体的行为,因此复杂系统中的主体根据局部信息而非全局信息做出决策并修改自己的行为规则。

按照以上特征,可以归纳出复杂系统描述性的定义:复杂系统是由中等数目的元素构成,元素间具有较强的耦合作用,元素一般具有智能性、抽象性与适应性的特征。

(1) 复杂系统由中等数目的主体构成。系统所包含的主体是复杂系统的基本组织条件,其数量以及其相互之间的耦合强度是复杂系统分类的重要指标。按照钱学森等人对系统的分类(表 1.1),中等规模的系统以及个体间存在较强耦合作用的系统便称为复杂系统,如果系统规模巨大,则为复杂巨系统。

表 1.1 复杂系统的分类

耦合 \ 规模	小	中	大
	弱	强	更强
弱	简单系统	简单系统	简单巨系统
强	简单系统	复杂系统	复杂巨系统

(2) 复杂系统中的主体具有智能性与适应性。系统内部的主体能够根据环境的信息做出行为决策,调整自己的行为规则,或者发现新的规则。通过主体间相对低等的智能行为,系统在整体上显现出更高层次、更复杂、更智能协调的有序性。这是对系统科学中的层次性、反馈、涌现、自组织、目的性等概念的进一步发展。

(3) 复杂系统中主体的抽象性。无法利用智能性、适应性构造出一个完全真实的复杂系统,对复杂系统的理解与研究是建立在对系统中主体抽象的基础之上的。正是对复杂系统中主体的特征进行了抽象,从而产生了建立研究系统的模型,没有了抽象性,系统将无法理解,复杂系统也就失去了意义。

(4) 主体行为的局部信息。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,每个主体只可能从主体集合中一个相对较小的子集合中获取信息,处理“局部信息”,做出相应的决策。系统的整体行为,出自这些主体间的竞争、协作等局部的相互作用,这也是复杂性研究中的一个重要的理论。

从系统的角度讲,复杂系统一般具有开放性、不确定性、非线性、涌现性以及不可预测性,在这些特征的综合作用下,在更高的层次上表现出规律性;对复杂系统的预测是很困难的,往往存在“蝴蝶效应”。因此系统本身的演化又常常表现出反直觉的特征。

简言之,复杂性理论就是要研究解决复杂系统中的共性问题,即复杂性问题。复杂性科学是建立在系统科学的基础之上的,是对系统科学的发展和深化,而非线性科学中的许多理论和方法,是研究复杂性科学的有力工具,复杂性科学是对非线性科学的凝聚和升华。

1.2 人工生命

1.2.1 人工生命的诞生

生命现象的奥秘和生物的智能行为一直被科学家所关注,生物系统是一个典型的复杂系统。群体进化论、随机漂变等学说是基于生物学的理论学说,然而它所揭示的规律在自然科学和社会科学方面具有普遍性。进化、遗传、代谢等源于生物学的概念,已经具有了更为广泛的意义,实际上社会、经济、文化等系统也具有类似生物系统的特征,它们都是开放的、有序的、随机的、具有自组织自适应能力的复杂系统。于是利用生命科学来研究具有生命特征的复杂系统,即人工生命研究领域的出现也就成为必然。

20 世纪 70 年代和 80 年代,随着计算机速度的大幅度提高以及个人计算机的普及,在 Von Neumann、J. H. Conway、S. Wolfram 等人对元胞自动机研究的基础之上,C.

Langton 从当时流行的生命游戏中悟到了一大类具有生命特征的系统的存在,初步给出了这种系统的描述并命名为“人工生命”。

C. Langton 认为人工生命是研究那些具有自然生命现象的人造系统,“人工生命是这样的一个研究领域:致力于去抽象出生命现象的基本动力学原理,并把这些原理运用到别的媒体(例如计算机),使得它们进入到这些媒体实现操作和接受检验。除了为地球上已知的生命形式提供新的研究方法外,人工生命允许我们去探索更广泛的、可能的生命的领域”;“可以说人工生命的整体代表了一种尝试,这种尝试极大地提高了综合性方法在生物学研究中的作用”。T. Ray 也说,“人工生命用非生命的元素去建构生命现象以了解生物学,而不是把自然的生物体分解成各个单元,它是一种综合性方法而不是还原的方法”。

综上所述,人工生命是研究那些具有生命特征的人工系统。实际上,有许多系统符合这种要求,并且这些系统可以进行旨在表现生命系统原理以及组织的实验。同时,人工生命的许多研究致力于理解我们所知道的生命形式,以寻求得到生命形式(并不局限于某种特定的载体)的普遍特征。从这种意义上讲,人工生命的开拓者把地球上的生命仅仅看成是一种具有特定载体(蛋白质)的特定生命形式,地球上的生命进化也仅代表一种特定的进化途径。他们认为可以用别的物质来构造另类载体的生命形式,赋予它们生命的特征,使其具有进化、遗传、变异等生命现象,得到生命的普遍行为。特别需要指出的是,人工生命并非对于生命系统的模拟和仿真。人工生命也是一种生命,只是用不同的载体而已,而载体并不是最重要的。

自人工生命概念的首次提出,到现在只有短短的十几年历史,但它受到了越来越多的关注,吸引了系统科学、控制科学、计算机科学、人工智能、生物科学、机器人科学、经济学、哲学、人类学等众多领域的专家学者投入研究。如今,美国、日本和欧洲在这方面的研究最为活跃。1994 年在麻省理工学院创刊并出版了国际刊物《人工生命》(Artificial Life),它是该研究领域内的权威刊物。欧洲也很快响应了这一新领域的挑战,自 1991 年以来连续每两年举行一次关于人工生命的研讨会“欧洲人工生命会议”(European Conference on Artificial Life, ECAL),每次会议都有论文集出版。ECAL 已成为国际人工生命研究的重要论坛之一。日本奋起直追,其特点是把人工生命的研究和进化机器人的研究紧密地结合在一起,从 1996 年开始召开了多次 Artificial Life and Robotis 的系列国际研讨会。此外,IEEE 也曾召开内容基本相同的国际会议:Evolutionary Computation 及 Simulation and Adaptive Action Conference。1997 年 9 月在北京举行的“人工生命与进化机器人研讨班”是我国的第一次活动,2001 年 9 月国家自然科学基金委员会将“人工生命系统理论及其应用”列为基金委信息科学部“十五”期间优先资助的领域。到目前为止,国际人工生命学术界先后在美国和日本举办了 8 次里程碑式的国际学术会议,这些会议在时间维上成为该学科发展轨迹的重要坐标点。从上述频繁的国际学术活动,可以看出该领域研究具有的挑战性和所受到的关注。

1.2.2 人工生命的研究内容

十多年来,随着研究领域的不断拓展,人工生命学科不断丰富和发展,同时也影响了许多领域。从近 5 年来发表的论文来看,当前国际上关于人工生命的研究主要有如下几方面。