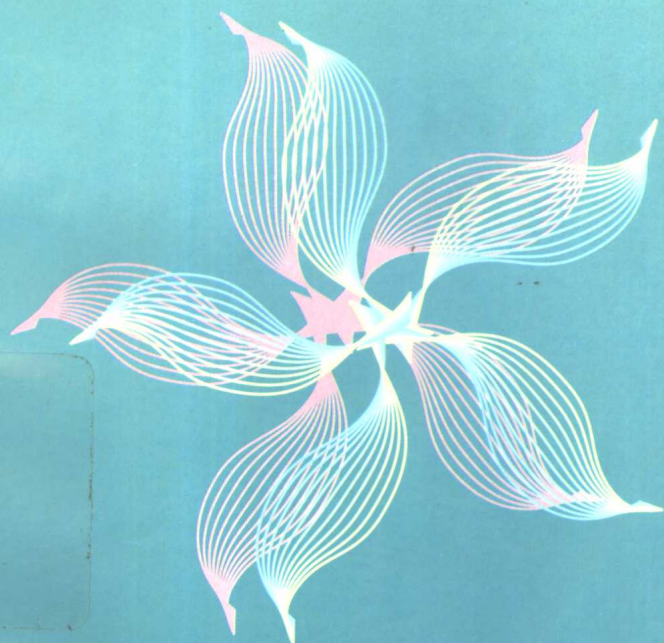


人工生命理论 及其应用

刘健勤 著



冶金工业出版社

人工生命理论及其应用

刘健勤 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
1997

内 容 提 要

人工生命是近年来在美国、日本等发达国家中兴起的一门新兴前沿学科,被认为是跨世纪的重大研究课题。本书共分七章,内容包括人工生命理论、遗传算法、遗传编程、进化策略、适应度计算、进化动力学、非线性系统辨识和人工生命在工程技术中的应用。该书重点在于通过遗传操作和创发机制的分析,着重阐述人工生命理论框架中进化策略、进化算法和进化动力学三个方面的内容,并从创建模和演化算法两个层次着手加以讨论。

本书适合作为计算机、信息工程、自动控制、工业自动化、机械电子等专业研究生和大学生的教材,也可供工程技术人员作为科研参考书。

图书在版编目(CIP)数据

人工生命理论及其应用/刘健勤著. —北京:冶金工业出版社,1997.7

ISBN 7-5024-2076-2

I. 人… I. 刘… II. 人工合成-生命-概论 IV. Q81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 09204 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑:杨盈园 封面设计:李 心 责任校对:侯 珏 责任印制:李玉山
中国人民警官大学印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1997 年 7 月第 1 版,1997 年 7 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;6.875 印张;181 千字;209 页;1-1000 册

13.00 元

前 言

自然界这个宏大的系统随着时间之箭饱经了沧海桑田般的变迁,其间最为奇妙和壮观的现象莫过于生命。人类探索生命奥秘的努力包含了生物学、医学、系统科学等许多学科的工作。人工生命是通过人工方式分析、建模和构造具有仿真生命特征的系统的科学,它是继人工智能、神经网络之后又一门新兴的交叉性前沿学科。在美国、日本等国,该领域的研究已形成高潮,人们希冀通过带有遗传、进化和生态特征的算法和系统获得具有高度自适应性的非线性机制,自然选择机理的优化效果无疑为那些计算机算法的研究者提供了启示,遗传算法、遗传编程、进化计算均以生物对象的某些机理为蓝本。生物混沌学等认识的深化也对人工生命系统的创发性解释提供了有力的工具。人工生命这个学科历经了十年,已在国际学术界获得了独立学科的地位。1996年5月在日本奈良举办的第五届人工生命(Artificial Life V)国际会议是人工生命学科在第一个十年时间坐标点上的里程碑。目前该学科在理论、方法和技术研究的同时,已逐渐走向针对实际对象的应用领域。相对于地球上出现原始生命以来漫长的历史进程,人工生命学科显得是那样地年轻;但是在面临世纪之交这个时刻,它又是那样地充满着活力和希望。

笔者于1994年9月至1995年9月在日本理光(RICOH)公司作为客座研究员,从事人工生命理论和进化计算算法的研究。回国后在中南工业大学信息工程学院为研究生开设了相关课程。在国际上,人工生命方面的著作和书籍多偏重于学科的某些方面,而全面反映学科理论框架和知识体系的尚不多见;目前国内还未见到有关人工生命的教材和书籍。有感于此,笔者根据学科发展并结合所从事科研项目的体会,撰写了《人工生命理论及其应用》一书,在整个体系安排上突出了人工生命理论、系统、算法和应用这四个主要方面,并反映了笔者对该学科见解,其中有关进化计算理论、遗传编程的软件工程方法、人工生命技术在系统辨识和矿建涌水量分析等方面的应用反映了笔者近年来的研究成果。

全书共分七章,第一章为概论,介绍人工生命学科的由来、发展过程、特点及发展趋势,以使读者了解前沿领域的课题和研究方向;第二章是人工生命的生物学基础,力图给出其必要的生物学背景知识;第三章强调了遗传算法的算法功能,并辅以实例分析;第四章着重探讨遗传编程的编程技术和软件设计方法,并引入了软件工程的编程风格和策略;第五章介绍了进化计算的计算体系和有关理论要点,集中阐述了进化计算的理论框架和主要技术范畴;第六章主要讨论人工生命中的核心问题——建模及进化动力学机制,其中包括了创发性、生物混沌学等方面在国际上的最新研究成果,并结合笔者科研实践给出分析实例;第七章通过两个应用实例探索人工生命技术在应用中所应采取的策略和方法。人工生命具有广泛的应用前景,笔者希望由此抛砖引玉,从而不断拓展人工生命这个新兴学科的应用范围。

蔡自兴教授和沈德耀教授对本书的工作给予了热情鼓励和推荐,并提出了宝贵的建议,在此表示衷心的感谢。

刘健勤

1996年11月1日

目 录

1 人工生命概论	1
1.1 建造人工系统的科学意义.....	1
1.2 布鲁克斯(Brooks)学派对传统人工 智能的挑战.....	3
1.3 人工生命的学科范畴和历史.....	4
1.4 人工生命学科的基本框架.....	8
1.5 人工生命研究的实例	12
1.6 小结	15
2 人工生命的生物基础.....	16
2.1 生命系统的内涵和特征	16
2.2 生物的遗传和进化	18
2.3 遗传机理分析的要点	19
2.4 生命系统的结构性和进化特点 ...	21
2.5 雷内·托姆对生物的数学描述方式 ...	24
2.6 生物学前沿领域的某些进展	25
3 遗传算法.....	28
3.1 人工生命的仿生特点和编程风格 ...	28
3.2 遗传算法的概念和特点	29
3.3 遗传算法研究的发展概况	31
3.4 遗传算法的结构分析	33

3.5	采用遗传算法的问题求解实例	38
3.6	遗传算法的数学分析	41
3.7	遗传算法的编程环境及算法研究概况	53
3.8	遗传算法的应用特点	57
3.9	小结	63
4	遗传编程	66
4.1	遗传编程的概念和特点	66
4.2	遗传编程的数据结构和编程特点	71
4.3	遗传编程的软件工程分析	76
4.4	遗传编程算法的自适应机理分析	102
4.5	遗传编程研究的发展趋势	104
4.6	遗传编程算法在程序设计方面应注意的问题	107
4.7	小结	110
5	进化计算	111
5.1	概述	111
5.2	进化计算的形式化描述	115
5.3	进化计算在求解优化问题中的最优性	117
5.4	进化计算体系的性质及过程性分析	120
5.5	进化计算算法的谓词构造方式	130
5.5.1	基于谓词的逻辑程序设计的特点	130
5.5.2	进化计算中个体的谓词逻辑表达结构	131
5.5.3	谓词进化算子与约束网络	134
5.6	进化计算的选择策略与信息论测度判据	136
5.7	进化策略、进化编程和共同进化	142
5.8	小结	144
6	人工生命系统中的模型及其动力学分析	146
6.1	生命系统的数学模型	146

6.2	生命系统中的混沌机制·····	149
6.3	人工生命模型与进化动力学·····	153
6.3.1	引言·····	153
6.3.2	元进化的创发性·····	155
6.3.3	元进化的分析方式·····	156
6.3.4	非线性动力学的基本概念·····	157
6.3.5	模仿比赛模型·····	158
6.3.6	全局耦合映射·····	161
6.3.7	共同进化下进化动力学的一个简单示例·····	163
6.3.8	一个简单的细胞模型·····	165
6.3.9	EMCM 模型 ·····	167
6.4	人工生命对生命科学的作用·····	175
6.5	小结·····	176
7	人工生命技术的应用 ·····	178
7.1	遗传编程在信号分析中的应用——系统辨识实例 ·····	178
7.1.1	引言·····	178
7.1.2	系统辨识的非线性方法·····	179
7.1.3	混沌动力学系统辨识的遗传编程方法·····	182
7.1.4	小结·····	190
7.2	基于进化计算的矿建涌水量分析·····	190
7.2.1	引言·····	190
7.2.2	Q-S 辨识的进化算法概貌·····	191
7.2.3	基于进化计算的辨识算法·····	192
7.3	人工生命分析方法在污水生化处理过程建模中的应用 ···	197
	结束语·····	200
	参考文献·····	201

1 人工生命概论

1.1 建造人工系统的科学意义

生命现象的奥秘和生物的智能行为一直被科学家们所关注,早期的研究者有巴甫洛夫等。从 20 世纪 40 年代以来,视觉神经生物学取得了较大的进展,例如海贝尔(D. H. Hebel)和威塞尔(T. N. Wiesel)于 1963 年,哈特林(H. K. Hartline)、格兰尼特(Granit)和沃尔德(Wald)于 1967 年分别获得了诺贝尔医学与生理学奖。实验神经生理学的工作试图从构成生物系统结构的神经元等角度,对生物个体的动态特性做出刻画。在神经科学和脑科学日益受到人们重视的同时,自 70 年代以来非线性科学和复杂系统理论得到了很大的发展,普利高津由于“耗散结构理论”而获诺贝尔奖,1991 年法国学者皮埃尔·吉勒·德热纳,因为研究系统中有序现象而创造的方法(他所提出的方法可推广至较为复杂的物质形式)获得了诺贝尔物理学奖。试图揭示系统复杂行为的理论还有哈肯创立的“协同学”;诺贝尔化学奖获得者 M. 爱根的“超循环”理论;雷内·托姆的“突变理论”以及“混沌学”等。从抽象意义上讲,这些工作都是研究复杂系统如何通过各部分之间的相互作用而产

生从无序到有序、从简单到复杂的非线性过程的。这类似于生物系统的进化过程和智能系统的学习过程。人类对生命系统的认识程度随着技术手段的改进而得到不断的提高。DNA 双螺旋结构的实验使得基因理论达到了分子生物学水平,遗传学、基因工程等为生命科学的研究提供了有力的工具。爱德华·刘易斯、埃里克·威斯乔斯和克里斯蒂安·努斯莱因·伍尔哈德,由于在控制早期胚胎发育的重要遗传机理方面的杰出研究工作而荣获 1995 年度诺贝尔生理学 and 医学奖^[1]。尽管他们在研究中所采用的实验对象是果蝇,但其遗传性状适于遗传学研究的生命形式,实验所揭示的原理性结论有助于解释在人这种高等有机体中发生的先天畸形现象。

为了探讨生命现象中的进化特征和自适应机理,就需要研究在漫长的生物进化历史中,个体或物种所具有的能保持远离热平衡状态的耗散结构性质的非线性动态机制。纵观生物进化历程,可以认为遗传和变异是重要的生命现象。采用计算机等手段对遗传操作和进化机理的仿真研究有助于对生命系统特点和规律性的分析和理解。

人工系统是通过以包括计算机在内的人工方式来实现生物现象或智能行为过程仿真的一种手段。这里所涉及的“人工”概念的内涵,同人工智能中所说的“人工”具有逻辑同一性。建造人工系统的目的在于通过对行为的发生和操作过程进行仿真,探究相应机制的建模方法。该研究不仅有助于关于生命机理的理解,而且可为涉及自适应、自组织、自学习信号处理的工程技术开发和应用,提供理论依据和分析方法。

诺贝尔化学奖获得者福井谦一在《大自然的恩惠》一文中(该文曾发表在日本《蚁塔》杂志),引用夏目漱石《十夜梦》中的一个故事来阐述他对理论研究方法的见解。古时候,有个名叫运庆的人,在路上看到工匠正在雕刻,他觉得工匠的操作就象挖掘出材料中所藏的雕像那样容易。运庆回到家后,也模仿工匠去做,可是什么也没有雕出来。所以人类的智能活动有赖于知识,而专门领域的知识又多表现为模型或模式的信息方式。在科学研究中,人们通过实

验对客观对象的现象、过程和特性进行研究,建立并选择合适的模型。相应对象的建模在许多情况下是非常必要的,特别是在涉及大量统计信息的随机过程分析和非确定性推理的场合中就显得更加重要。如果我们在人工系统建造过程中获得的建模知识对生命过程的形式化描述有所帮助的话,我们的研究目的也就达到了。这也许就是该研究工作最直观的意义吧。

1.2 布鲁克斯(Brooks)学派对传统人工智能的挑战

费根鲍姆和麦克达克在其著作《第五代计算机:日本计算机和人工智能对世界的挑战》中,强调了知识推理的重要性。基于知识的系统开发是人工智能的一种重要工具,在专家系统应用中获得了较为灵活的效果。60年代末、70年代初,专家系统的成功使人工智能技术的应用达到高潮。但是从80年代中期开始显露出它的许多局限性。历时10年,耗资约540亿日元的日本第五代计算机计划于1992年结束。在研制可以直接实用化的时代的计算机方面,它并没有完成预期的目标。这说明研制人工智能系统的任务比人们原来乐观的估计要困难得多。在涉及处理现实世界问题方面,知识获取这个传统人工智能的“瓶颈”问题显得非常突出,以致于过多的规则和预先规定限制了系统的柔性和适应范围。例如,在计算机景物理解领域内,引入在特定对象类的约束集合方面的知识对处理方法的效果影响很大,如何增强处理方面的适应性,更是应用系统开发中的难题。如果象这样的问题得不到完善的解决,人工智能就很难摆脱“积木世界”的境地,也很难真正进入面向现场的领域,以获得在实际处理方面的较好的效果。在事实(数据)驱动和目标(概念)引导的双向混合推理方面,交互过程的作用是明确的。神经网络、知识工程、行为机制和现场学派等学术流派均是从不同侧面来反映其对客观事物的描述方式。神经网络的联想机制着重从大规模信息并行处理方面着手,模拟人类的形象思维(如图形符号识别)和联想记忆等。而知识工程(专家系统)则侧重于规则形式的知识表示和推理结构,以便实现语义层次的概念理解和经验性逻

辑分析。该过程在一定程度上模拟了人类在认知方面的抽象逻辑思维 and 决策功能。现场学派重视智能的行为、智能主体与环境的交互和感知与行为的联系等。行为机制学派强调系统对环境的感知、响应以及相应自组织动作的协调和操作,以布鲁克斯为代表的该学术流派是对传统人工智能强有力的挑战。布鲁克斯提出并实现的机器人系统主要是针对机器人的环境适应性,其结构中没有采用传统人工智能的知识表达方式,而是体现出较强的生物行为的主动特性和相应于环境所做出的自调整能力。布鲁克斯的 Genghis 系统是建造人工系统的一个成功范例,他们的研究成果曾获得 I J C A I(International Joint Conference on Artificial Intelligence)的计算机和思维奖。

智能科学的最新发展体现出学科的综合性和交叉性等趋势。日本第五代计算机计划在大规模并行推理方面的贡献给人们留下了深刻的印象;非确定性信息处理、符号逻辑的语义推断等诸环节的综合,是建造人工系统应加以考虑的重要因素之一;信息处理的综合能力,也是生命系统的一个重要特征;智能信息处理系统的综合性机制,已成为人工系统研究者们努力探索的一个重点目标,同时也孕育着一个新学科的出现。

1.3 人工生命的学科范畴和历史

“人工生命”概念是 C. G. 兰顿(Langton)提出的,其英文为 Artificial Life(简称 AL)。他所给出的定义为:

“人工生命”是研究这样一个人造系统,该系统能演示具有自然生命系统特征的行为。通过在计算机或其它人工媒介中对类似生命的行为进行综合探讨,以便对关于生存器官分析的传统生物学起互补作用。生物学赖以存在的是经验性事实,地球上存在着由进化而得来的碳链生命,人工生命则通过将前者扩展出后者的范围的方式,在“生命之如其所能”^①的广阔图象中将“生命之如吾

① “生命之如其所能”的原文为“life-as-it-could-be”。

所知”^①加以定位,并以此为理论生物学做出贡献。

只有在“生命之如其所能”的广泛内容中考察如我们所知的生命,我们才会真正理解生物的本质。人工生命是相对于“生命如其所能”的研究而言,是较为新兴的使用综合性方法研究的领域。它是把生命作为物质组织的属性来考察,而不是被组织的物质属性。

生物学与生命的物质基础密切相关,人工生命则涉及生命的形式化基础。传统上,生物学从问题的顶层开始,把生存器官看作复杂生化机制来考察,由此向下进行分析化的工作——从器官、组织、细胞、细胞器和细胞膜,最后到达分子——其目的在于探求生命的机理。人工生命则从问题的底层开始,把器官作为简单机构的宏观群体来考察,由此向上综合地工作——将简单的、规则支配的对象构成大的集合,而且在其交互作用中的非线性得到类似生命的全局动力学的支持^[6]。

兰顿所给出的人工生命的框架性定义,随着研究领域的拓展,不断被丰富和发展。从方法学角度看,人工生命具有如下突出的特点:

- 1)自底向上的建模策略,属于数据驱动策略;
- 2)局部的控制机理,从而表现出并行操作特性;
- 3)简单的低层次表达单元,以适于计算机仿真;
- 4)创发的行为过程,反映了进化仿真的特点;
- 5)群体的动态仿真算法。

由于人工生命系统的这些特点,人工生命的理论和方法就有别于传统人工智能或神经网络的方法。通过将生命现象所体现的自适应机理在计算机中加以仿真,从而可以对涉及非线性对象的系统进行更加贴切的动态描述和动力学性能考察。

自从1987年兰顿提出人工生命的概念以来,人工生命研究已走过了近十年的历程^{[2]、[3]、[4]、[5]}。人工生命的独立学科的地位已被

① “生命之如吾所知”的原文为“life-as-we-know-it”。以上这两句话已成为人工生命中著名的格言。

国际学术界所承认。在 1994 年创刊并在世界著名学府麻省理工学院出版的国际刊物《人工生命》(Artificial Life), 是该研究领域内的权威刊物。网络方式下的电子信息板 ALIFE, 可提供该方面的一些信息^[4], 作为面向未来 21 世纪的前沿研究领域, 人工生命被认为是一项跨世纪的研究课题。

到目前为止, 人工生命学术界举办了四次里程碑式的国际学术会议, 这四次被称为 ALIFE 的学术会议构成了该学科发展轨迹在时间维上的重要坐标点。从理论的普适性、逻辑的简单性来看, 寻求事物的联系是探索自然奥秘的途径之一。在成功求解具体问题的基础上, 来整理和加工科学事实, 以形成理论, 理论框架内的思维发展又推动着知识的概括和概念的提出, 学科也得以崭新的面貌向前发展, 理论研究的成果又促进了具体应用研究工作的深化和提高, 人工生命正是如此发展起来的。

人工生命的这四次学术会议简要评述如下:

(1) Artificial Life — An Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, 1987 年 9 月, Los Alamos, New Mexico, U. S. A.。该会议被简称为 ALIFE。

本次会议的论文集共收录了 24 篇论文, 内容主要分布在: 人工生命研究的理论、生命现象的仿真、细胞自动机(简称 CA)、遗传算法、进化仿真等 5 个方面。兰顿发表了题为“人工生命”的开拓性论文, 他在文中提出了人工生命的概念, 并讨论了它作为一门新兴学科存在的意义。兰顿被公认为人工生命学科的创立者。这次会议标志着人工生命学科的诞生。该论文集也包括了理查德·道金斯(Richard Dawkins)的《The Evolution of Evolvability》等该学科的经典研究论文。

(2) Artificial Life I — The Workshop on Artificial Life, 1990 年 2 月, Santa Fe, New Mexico, U. S. A., 简称为 ALIFE I。

本次会议的论文集的扉页上登载了阿里斯谛德·林登梅耶(Aristid Lindenmayer)(1925~1989)生前的照片和怀念他的文字。阿里斯谛德·林登梅耶所创立的 L-system 已成为 AL 研究的

一种成功的工具,并对植物形态的计算机模拟工作产生了深远的意义,在计算机图形学方面也具有一定的实际应用价值。该论文集共收录了 31 篇论文,内容分为概貌、来源/自组织;进化动力学、开发、学习与进化、计算、哲学/创发、未来等 8 部分。其中兰顿的“Life at the Edge of Chaos”、约翰·R. 科赞(John R. Koza)的“Genetic Evolution and Co-Evolution of Computer Programs”属于经典之作,戴维·阿克雷(David Ackley)和迈克尔·利特曼(Michael Littman)的“Interactions between Learning and Evolution”对学习进化的交互关系做了较为深入的研究,具有较好的参考价值。

(3) Artificial Life III — The Workshop on Artificial Life, 1992 年 6 月, Santa Fe, New Mexico, U. S. A., 简称为 ALIFE III。

本次会议的论文集共收录了 26 篇论文,内容除涉及遗传算法、进化仿真、创发行为、适应度概貌图、群体动力学和混沌机制等 AL 经典内容之外,还讨论了机器人规划应用问题(克雷格·W. 雷诺兹)(Craig W. Reynolds)的《An Evolved, Vision-Based Model of Obstacle Avoidance Behavior》一文反映了该方面的成果)。科赞的《Artificial Life: Spontaneous Emergence of Self-Replicating and Evolutionary Self-Improving Computer Programs》和金子邦彦(Kunihiko Kaneko)与铃木俊二(Junji Suzuki)的《Evolution to the Edge of Chaos in an Imitation Game》这两篇论文可堪称杰作,分别从遗传编程算法和混沌学两个方面探讨了在 AL 研究中关键的创发机理。

(4) Artificial Life IV — The Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, MIT, Cambridge, Massachussetts, U. S. A., 1994 年 7 月。该次会议被简称为 ALIFE IV。

本次会议的论文集共收录了 56 篇论文,内容分为特邀报告、长文和短文 3 个部分,它覆盖了共同进化、遗传算子、进化与其它方法(如神经网络等)的综合、AL 算法、关于混沌边缘和分岔的研

究、AI 建模、鲍德温(Baldwin)效应、学习能力、进化动力学、细胞自动机、DNA 非均衡学说研究、人工生命在字符识别、机器人等方面的应用等较为广泛的内容。其中土居洋文(Hirofumi Doi)、和田健之介(Ken-nosuke Wada)和古泽满(Mitsuru Furusawa)的《Asymmetric Mutations Due to Semiconservative DNA Replication: Double-Stranded DNA Type Genetic Algorithms》一文介绍了“DNA 非均衡假说”方面的最新进展。

1996 年 5 月,ALIFE V 在日本古城奈良举行,承办单位是日本著名研究机构国际电气通信基础技术研究所 ATR,该研究所位于 1985 年开始建设、预计 21 世纪初完成的关西文化学术研究都市,与位于日本东部的筑波科学城遥相呼应。自从兰顿决定组织关于人工生命的第一届国际会议以来,人工生命这门新兴学科走过了 10 年的历程。ALIFE V 可被认为是人工生命学科逐步走向成熟的一个标志。

1.4 人工生命学科的基本框架

人工生命系统中产生生命行为的结构一般多是在生物学知识基础上加以综合仿真,并辅以具有遗传和进化特征的模型及相应生态算法得到的。创发行为是人工生命中的关键概念之一;人工系统中各部分被作为一个行为来建模,并不一定需要构造某种全局性的控制器。创发性机制是由各部分间复杂的局部交互作用而仿真的,整个系统属于自底向上的、分布的、局部的单元所综合起来的非线性复杂系统。神经网络的生理学实验揭示了神经系统的联结和相关的神经元机理,人工智能在知识推理方面为人类推理的计算机模拟提供了有效的符号分析工具。但是单纯凭借某种单一的方式还难以解释行为的产生和操作,群体动力学的非线性约束是人工生命系统建造的有效因素之一。人工生命是在基于综合的观点下而展开研究的,正如兰顿所强调的,这是人工生命研究与生物学研究在方法上显著的区别之一。纵观各种人工生命系统,各种表现形式和算法仿真方式不尽相同。从其内在机理着手,人工生命

的学科框架由下列主要内容构成:

(1)生命现象的仿生系统。这种系统多以软件形式实现,简单的例子有人工虫、鸟群飞过障碍物的群体操作^[6]、鸟声模拟比赛等,模拟生物形态变化过程的工具有细胞自动机、L-系统^[7]等。德麦特里·特佐波勒斯(Demetri Terzopoulos)等的人工鱼演示系统^[8]较好地在一个仿真的物理世界中演示了自律运动、感知、行为和学习。ALIVE^[9]是一个比较完整的人工生命系统,其重点在于生物行为的动态仿真。尽管在某些演示系统中智能水平很低,但是其仿真机制对自适应、非线性的理解是很有益的,这种现象与人工智能发展初期关于某些简单游戏的计算机算法(例如 16 数码问题)的情况有些类似。

(2)生命现象的人工建模和仿真。这方面的研究包括形态方面的新陈代谢^[10]、多细胞人工生命的进化^[11]、自适应自组织建模^[12]、细胞分裂^[13]、人工食物链^[14]、人工生物化学^[15]、影响群体动态特性的拓扑学^[16]、食肉动物-被捕食动物^[17]和寄生虫-宿主物种^[18]等。这方面的研究与前面的那项研究不同,仿生系统一般是只针对某种生物的某种现象而言,各系统的内容比较零散,系统性也不强。人工建模则是针对生命系统的各个方面,研究内容大体上与生物学所获得的知识相对应,对生物学现象在人工系统中加以仿真描述,这种仿真描述需从数学角度将其定量描述形式做很大的简化和抽象。

(3)进化动力学。主要考虑生命系统这个复杂对象表现出的非线性动态特性,例如兰顿^[19]、金子邦彦^[20]、卡易·纳格尔(Kai Nagel)和斯蒂恩·拉斯缪森(Steen Rasmussen)^[21]等工作。创发性主要是通过混沌机制来研究的,共同进化也是进化动力学研究的重要内容之一。

(4)人工生命的计算理论。遗传算法、遗传编程和进化计算等构成了人工生命系统开发的有效工具。一般来说,遗传操作过程和进化计算机制是人工生命系统形式化描述的逻辑基础,其概貌由图 1-1 给出。从遗传算法和进化计算角度来研究人工生命的动态