

基于 元胞自动机的 交通系统 建模与模拟

Models and Simulations
of Traffic System Based
on the Theory
of Cellular Automaton

贾斌 高自友 李克平 李新刚 著



科学出版社
www.sciencep.com

基于元胞自动机的交通系统 建模与模拟

Models and Simulations of Traffic System Based
on the Theory of Cellular Automaton

贾 斌 高自友 李克平 李新刚 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在介绍元胞自动机的基础理论和交通流理论的基础上,系统地阐述了元胞自动机模型在交通系统建模与模拟中的应用。

本书在理论研究方面不仅可以对解决当前我国城市交通问题提供一定的理论支持,而且可为广大工程技术人员对交通流的建模与分析提供参考。

本书可作为高等院校交通运输工程等专业研究生教材和高年级本科生选修教材,也可供从事交通流理论及其相关研究的科技工作者及交通软件开发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于元胞自动机的交通系统建模与模拟/贾斌等著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-020465-3

I. 基… II. 贾… III. 自动机-应用-交通运输-系统建模 IV. U. -39

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第160156号

责任编辑:童安齐 庞海龙/责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年10月第一版 开本: B5(720×1000)

2007年10月第一次印刷 印张: 21 1/2 插页: 2

印数: 1—2 000 字数: 416 000

定价: 50.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈海生〉)

前 言

交通运输系统是人类生活、社会经济活动的重要组成部分。良好的交通运输系统是人们日常生活、企事业等正常运转及促进经济飞速发展的必不可少的基本条件。然而，目前我国各大城市都被交通拥堵问题所困扰，究其直接原因大致可以归纳为以下两点：一方面，由于经济的发展使得人们出行需求显著增加，现有交通运输网络已不能够满足这些交通需求；另一方面则是交通设施设置不合理，交通管理措施不能够适应现代交通的发展等。

近几年来，我国部分城市大规模、高强度、高标准交通建设使交通状况有所改善，但交通拥堵仍不时发生，而现有的许多交通资源又未获得充分利用，有些道路的设计通行能力还远远没有达到，有些高架路变成了停车场，有的立交桥则多次重建。虽然从 20 世纪 80 年代开始，国内部分城市相继从国外引进了先进的交通管理控制系统（如 SCOOT、SCATS 系统等），但由于国内的混合交通流特性与国外的单纯机动车流特性差别很大，特别是在交叉路口混合交通流情况下，机动车、自行车、行人相互干扰，致使通行能力严重下降，许多在国外行之有效的交通管理措施在我国并没有收到预期的应用效果，“水土不服”的问题非常严重，具体表现在假设条件过于理想、处理手段过于简单，大多数规划方案和控制系统的存在机理不清、基础不牢的内在缺陷，因而难以从根本上达到缓解和预防城市交通拥堵的目的。这些问题，究其学术上的原因，是对交通行为和交通流的内在演化机理缺少深入研究。可见，如果缺乏先进的理论指导，单纯依靠修建道路等交通设施和采用传统的管理方式来解决城市交通问题，不仅成本高昂、资源浪费、环境污染严重，且效果有限。为实现城市交通的畅通，发达国家普遍采用了高科技投入与多学科领域专家合作研究相结合的办法，设计、建设和管理与其国情相适应的科学的城市交通系统。随着我国经济建设的飞速发展，如何利用科学的手段来缓解和预防城市交通拥堵已是当务之急。其中首要的工作是深入研究并揭示交通拥堵产生的内在机理，只有这样，才有可能实现从“治标”到“治本”的转化，为城市的可持续发展提供基本保障。因此，对交通流理论的研究就必不可少。

交通流理论的研究目标是建立能描述实际交通一般特性的交通流模型，寻找交通流动的基本规律，以揭示交通拥堵产生的机理。根据研究方法的不同，可以将各种交通流模型分为微观车辆跟驰模型和元胞自动机模型，以及宏观连续模型和中观气体动力学模型。元胞自动机模型是在 20 世纪 80 年代提出，20 世纪 90 年代得到迅猛发展的一种新的交通流动力学模型。人们把元胞自动机理论应用于交通

流的研究,采用离散的时空和状态变量,规定车辆运动的演化规则,并通过大量的样本平均来揭示交通运行规律。由于交通元素从本质上说是离散的,用元胞自动机理论来研究交通,就避免了离散-连续-离散的近似过程,因此其具有独特的优越性。与其他模型相比,元胞自动机模型在保留交通这一复杂系统的非线性行为和其他物理特征的同时,更易于计算机操作,并能灵活地修改其规则以考虑各种真实交通条件,如路障、高速公路出入匝道、驾驶员过度反应引起的随机慢化等。近年来,元胞自动机模型被物理学家、交通工程学家等广泛采用:一方面,通过交通流的建模,解释交通流的复杂现象与演化规律,揭示交通堵塞的成因;另一方面,基于元胞自动机模型开发交通仿真分析软件,如美国 Los Alamos 实验室的科学家开发的 TRANSIMS 系统,已成功用于多个城市交通分析和规划。

此外,为缓解当前的交通拥堵问题,城市轨道交通的运用越来越受到人们的重视,近年来在我国的大城市中得到快速发展。现阶段,我国轨道交通系统的基础理论与应用技术总体上还比较落后,尚未能完全掌握满足高速、高密度轨道交通所必需的、基于现代电子、计算机及通信技术的列车运行控制的系统理论、关键技术和系统集成方法,很多所需要的列车运行控制和调度指挥系统只能依赖引进。2000年,原国家计委开始将轨道交通车辆和列车运行控制设备列为国产化的重点,并提出了新建城市轨道交通列车运行控制系统的国产化率必须达到 70% 的要求。当前,在快速发展的轨道交通系统的建设中,存在大量急需解决的基础理论与关键技术问题。因此,深入开展轨道交通系统的相关基础理论研究,对于提高轨道交通效率,降低运行成本,推动公共交通优先战略的顺利实施,促进我国轨道交通的可持续发展具有重要的意义。

本书作者及其研究团队近年来构建了多种新的交通流模型,探讨了交通瓶颈处的车流演化复杂特性,首次将元胞自动机模型应用于轨道交通系统之中,并首次建立了元胞自动机模型的交通流状态和复杂网络之间的关系等。在这些研究的基础之上,目前已发表 SCI 检索论文数十篇,获国家技术发明专利两项,另有三项发明专利已经被国家专利局受理。

本书在介绍元胞自动机的基础理论和交通流理论的基础上,介绍了元胞自动机模型在交通系统建模与模拟中的应用,并系统地总结了作者近年来在元胞自动机模型研究方面的主要研究成果。

本书的结构如下:第一章讲述了元胞自动机模型的发展历史;第二章介绍了元胞自动机的定义、构成和特征;第三、第四章阐述了经典的元胞自动机模型及其分类;第五章介绍了道路交通流基本理论;第六章讲述了道路交通流中的元胞自动机模型,包括单车道元胞自动机模型、多车道元胞自动机模型、双向交通的元胞自动机模型以及多值元胞自动机模型等;第七章详细讨论了元胞自动机在交通瓶颈中的应用,包括匝道瓶颈、路口瓶颈等;第八章介绍了城市路网交通流中的元胞自动

机模型, 包括 BML 模型、NaSch 和 BML 耦合模型、元胞传输模型等; 第九章对公交线路系统的元胞自动机模型和轨道交通系统的元胞自动机模型作了介绍; 第十章对元胞自动机模型、交通流状态和复杂网络之间的关系做了介绍, 提出了一种采用复杂网络工具分析交通流时空复杂特性的新方法, 从而将交通网络的复杂性与交通流演化的复杂特性联系起来。

本书部分内容取自元胞自动机、交通流理论方面当前较为成熟以及最新的研究成果, 而更多的内容取自作者近年来的研究成果。

感谢中国科学技术大学的吴清松教授、上海大学的戴世强教授、北京航空航天大学的海军教授以及“大城市交通拥堵瓶颈的基础科学问题研究”国家 973 项目组全体成员在学术上的指导和帮助。感谢中国科学技术大学的姜锐副教授、北京交通大学的赵小梅副教授和龙建成博士在学术上的有益探讨和支持, 本书的部分章节正是作者与他们共同合作的研究结晶。感谢轨道交通控制与安全国家重点实验室(北京交通大学)在本书撰写过程中给予的多方面支持。此外, 田惠林女士在本书的文字校对等方面做了大量的工作, 在此表示衷心的感谢。

本书有关科研工作的完成得益于国家 973 项目(2006CB705500)、国家杰出青年科学基金项目(70225005)、国家自然科学基金重点项目(70631001)、国家自然科学基金面上项目(70471088, 70501004)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0605)和科技部重大基础研究前期专项(2005CCA03900)的大力资助, 谨在此一并致谢。

由于作者学识有限及经验不足, 书中难免会有认识不到或疏漏之处, 恳请广大读者批评指正。

作 者

2007 年 6 月于北京交通大学

轨道交通控制与安全国家重点实验室

目 录

前言

上篇：元胞自动机的基础知识

第一章 绪论	3
§1.1 元胞自动机简要发展历程	3
§1.2 元胞自动机的应用概述	6
第二章 元胞自动机的定义、构成和特征	9
§2.1 元胞自动机的定义	9
§2.1.1 自动机	9
§2.1.2 元胞自动机的定义	10
§2.2 元胞自动机的构成	11
§2.2.1 元胞	12
§2.2.2 元胞空间	12
§2.2.3 邻居	13
§2.2.4 演化规则	16
§2.3 元胞自动机的特征	17
第三章 经典的元胞自动机模型	18
§3.1 Conway 和他的“生命游戏”	18
§3.1.1 “生命游戏”的构成及演化规则	18
§3.1.2 “生命游戏”中一些演化形态	19
§3.1.3 “生命游戏”中构形的分类	22
§3.2 Wolfram 和他的初等元胞自动机	23
§3.2.1 Wolfram 简介	23
§3.2.2 初等元胞自动机	24
§3.2.3 典型的 Wolfram 规则	25
§3.3 能自我复制的元胞自动机	31
§3.3.1 Von Neumann 的工作	32
§3.3.2 Langton 的自我复制环	33

§3.4	Langton 蚂蚁	36
§3.5	格子气自动机	37
§3.5.1	HPP 模型	37
§3.5.2	FHP 模型	38
§3.5.3	LGA 模型中的演化方程与宏观量	40
§3.5.4	LGA 模型中的边界条件	41
§3.5.5	LGA 模型的状态更新	41
§3.5.6	LGA 模型的缺陷	41
§3.6	研究颗粒流的元胞自动机	42
第四章	元胞自动机的分类	46
§4.1	基于维数的元胞自动机分类	46
§4.1.1	一维元胞自动机	46
§4.1.2	二维元胞自动机	47
§4.1.3	高维元胞自动机	47
§4.2	基于动力学行为的元胞自动机分类	48
§4.2.1	基于动力学行为的分类	49
§4.2.2	四类元胞自动机之间的区别	52
	下篇: 元胞自动机在交通领域中的应用	
第五章	道路交通流理论简介	57
§5.1	道路交通流理论研究的意义	57
§5.2	常用的变量及测量方法	58
§5.2.1	交通流量 q 和时间车头距 h_i	59
§5.2.2	速度 v 和密度 ρ	59
§5.2.3	占有率	60
§5.3	基本的交通实测现象与特征	61
§5.3.1	流量 - 密度关系图与回滞现象	61
§5.3.2	交通堵塞	62
§5.3.3	同步流和宽运动堵塞	64
§5.3.4	交通临界相变行为	65
§5.3.5	自组织现象	67
§5.3.6	混沌动力学行为	67
§5.3.7	交通流中的密度波	68
§5.4	交通流理论模型分类	68

第六章 道路交通流中的元胞自动机模型	70
§6.1 单车道元胞自动机模型	70
§6.1.1 NaSch 模型及其衍生模型	70
§6.1.2 巡航驾驶极限和自组织临界	73
§6.1.3 慢启动规则、亚稳态和回滞	75
§6.1.4 速度效应模型	81
§6.1.5 舒适驾驶模型和同步流	82
§6.1.6 三相交通流模型	89
§6.1.7 考虑减速限制的 CA 模型	93
§6.1.8 其他单车道 CA 模型	97
§6.2 多车道元胞自动机模型	97
§6.2.1 双车道 CA 模型	98
§6.2.2 多车道 CA 模型	112
§6.3 双向交通的 CA 模型	113
§6.4 混合交通中的偏析现象	118
§6.4.1 图形的获取	119
§6.4.2 偏析度量参数的定义	119
§6.4.3 数值模拟与分析	120
§6.5 多值元胞机模型	128
§6.5.1 BCA 模型	128
§6.5.2 EBCA 模型	130
§6.5.3 一般化模型	135
§6.5.4 模拟自行车流的随机慢化模型	136
§6.5.5 混合自行车流模型	141
§6.5.6 机非混行交通流模型	149
第七章 元胞自动机模型在道路交通瓶颈研究中的应用	161
§7.1 交通中的瓶颈现象	161
§7.2 匝道瓶颈研究	163
§7.2.1 以车库形式出现的入口匝道和出口匝道	164
§7.2.2 主道和入口匝道之间的相互作用	166
§7.2.3 加速道对交通系统的影响	174
§7.2.4 出口匝道系统的交通行为	180
§7.3 路口瓶颈的研究	190
§7.3.1 十字(或 X 型)交叉路口	190

§7.3.2	T 型路口	195
§7.3.3	环岛	198
§7.3.4	辅助信号灯	205
§7.4	其他典型交通瓶颈的研究	208
§7.4.1	道路缩减	208
§7.4.2	收费站	212
第八章	城市路网交通流中的元胞自动机模型	220
§8.1	BML 模型	220
§8.2	BML 的扩展和衍生模型	222
§8.2.1	车辆的非均匀分布	222
§8.2.2	不同的车辆最大速度	223
§8.2.3	立交桥	223
§8.2.4	失效的交通信号灯	223
§8.2.5	绿波同步	223
§8.3	NaSch 和 BML 的耦合模型	224
§8.4	元胞传输模型	228
§8.4.1	CTM 的路段模型	228
§8.4.2	CTM 的节点模型	230
§8.4.3	路段行程时间与行程速度的计算方法	232
§8.4.4	模拟基本步骤	234
§8.5	基于元胞传输模型的交通拥堵瓶颈的识别	234
§8.5.1	交通拥堵瓶颈概述	234
§8.5.2	模型参数的确定	236
§8.5.3	模拟结果及分析	239
第九章	其他交通系统中的元胞自动机模型	243
§9.1	公交线路系统的元胞自动机模型研究	243
§9.1.1	考虑到公交车承载能力的公交线路模型	243
§9.1.2	模拟结果和讨论	245
§9.2	轨道交通系统的元胞自动机模型研究	251
§9.2.1	固定闭塞控制系统	251
§9.2.2	移动闭塞控制系统	255
§9.2.3	列车延迟传播现象的模拟研究	259
§9.2.4	混合交通中节能优化的元胞自动机模型	263
§9.2.5	三线轨道交通系统的运输能力问题研究	266

第十章 元胞自动机模型、交通流状态和复杂网络	270
§10.1 复杂网络简介——小世界网络和无标度网络	270
§10.2 复杂网络与城市交通网络	272
§10.3 基于交通流状态构建网络模型	273
§10.4 交通流状态与网络模型的结构特性	275
§10.5 交叉口交通流状态	279
§10.6 同步流状态的复杂性特征	281
§10.6.1 模拟结果	282
§10.6.2 实测数据检验	287
附录一 交通流理论模型简介与对比	289
附 1.1 连续模型 (宏观模型)	289
附 1.2 气体动理论模型 (中观模型)	291
附 1.3 车辆跟驰模型 (微观模型)	292
附 1.4 元胞自动机模型 (微观模型)	295
附 1.5 不同模型比较及其之间的联系	295
附录二 TRANSIMS 系统简介及案例	297
附 2.1 什么是 TRANSIMS	297
附 2.2 TRANSIMS 与传统四阶段法的区别	297
附 2.3 TRANSIMS 整体框架	298
附 2.3.1 综合人口模块	298
附 2.3.2 出行行为模块	298
附 2.3.3 路径选择模块	300
附 2.3.4 微观模拟模块	300
附 2.3.5 尾气排放估计模块	300
附 2.3.6 选择与反馈模块	301
附 2.3.7 可视化输出模块	301
附 2.4 应用案例	302
附 2.4.1 输入数据	302
附 2.4.2 微观模拟模块输出结果	304
后记	308
参考文献	310
本书部分彩图	

上篇：元胞自动机的 基础知识

第一章 绪 论

“三个世纪以前，人们发现建立在数学方程基础上的规律能够用于对自然界的描述，伴随着这种新观念，科学发生了转变。在此书中我的目的是将要用简单的电脑程序来表达更为一般类型的规律，并在此种规律基础上建立一种新的科学，从而启动另一场科学变革。”著名的物理学家、数学家和计算机科学家 Wolfram 以这样的惊世之言开始了他的宏篇巨著《一种新科学》^[1]。Wolfram 在这里所指的三个世纪前那场发生在科学上的转变就是我们常说的“科学革命”，那场革命以哥白尼发表《天体运行论》为开端，经过伽利略和开普勒等人的推进，到牛顿出版的《自然哲学的数学原理》达到高潮。Wolfram 认为“传统科学”未能建立起解释宇宙复杂性的理论，靠数学方程做不到这一点。所以他要发动一场新的“科学革命”，革命的内容就是要用简单的电脑程序取代数学方程。Wolfram 所钟情的这种简单的电脑程序的核心基础就是我们将要介绍的元胞自动机。

元胞自动机 (cellular automata 或 cellular automaton, 简称 CA) 实质上是定义在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上，按照一定的局部规则，在离散的时间维度上演化的动力学系统^[2]。在元胞自动机中，空间被一定形式的规则网格分割为许多单元。这些规则网格中的每一个单元都称为元胞 (cell)，并且它只能在有限的离散状态集中取值。所有的元胞遵循同样的作用规则，依据确定的局部规则进行更新。大量的元胞通过简单的相互作用而构成动态系统的演化。不同于一般的动力学模型，元胞自动机不是由严格定义的物理方程或函数确定，而是由一系列的演化规则构成。元胞自动机相当于传统物理学中近距离作用的“场”，是场的离散化模型。元胞自动机的基本思想是利用大量的简单元件，通过简单的连接和简单的运算规则，在时空中并行地持续运行，以模拟出复杂而丰富的现象。

§1.1 元胞自动机简要发展历程

元胞自动机在科学研究与自然探索方面潜在的巨大优势诱使人们对其进行详尽的研究。元胞自动机的创始人是著名的计算机科学家 Von Neumann。他在 20 世纪 40 年代末参与了第一台数字计算机的设计，尽管 Von Neumann 的名字一直与当代串行计算机的体系结构联系在一起，但是，根据他的元胞自动机思想还建立了大型并行计算机的第一个适用模型。

为了构造出能够解决非常复杂问题的机器，Von Neumann 设想模仿人脑的行

为, 他的这一动机比当时仅仅考虑提高计算机性能的想法更富有雄心。他认为, 像大脑这样复杂的机体也应包含自控制和自维护机理。他的思想就是要排除数据和处理器之间存在的差异, 认为它们处在同样的基础上, 这引导他设想一种可以超出现有素材、构造自身的机器。随后, 他将主要精力集中于寻求与生物过程无关情况下自繁殖机理的逻辑抽象^[2]。

依据 Ulam 的建议^[3], Von Neumann 开始考虑在由元胞自动机构成的完全离散域的构架下处理这个问题。他认为, 每个元胞都具有其内在的状态, 并由有限数量的信息位组成; 这个元胞系统按离散的时间步进行演化, 类似于简单的自动机, 只要利用简单的规则, 就可以计算出元胞在新时刻的内在状态; 决定这个系统演化的规则对所有的元胞都是相同的, 并且某一元胞的状态随邻近元胞的状态而变化, 就像在生命系统中发生的过程一样; 元胞的活动是同时进行的, 同一时刻驱动每个元胞进行演化, 并且同步更新每个元胞的内在状态。Von Neumann 创立的这个完全离散化的动力系统(元胞空间)现在被称为元胞自动机。元胞自动机是研究复杂系统行为的最初理论框架, 也是人工智能的雏形。

Von Neumann 提出的第一个自我复制的元胞自动机是由二维方形网格组成的, 由数千个基本元胞构成的自繁殖结构, 每个元胞有多达 29 个可能的状态^[4]。演化规则依赖于每个元胞的状态及其四个最近邻元胞(即东南西北四个邻居元胞)的状态。因为其状态太多, 规则相当复杂, 只是部分的 Von Neumann 规则在计算机上得到了实现^[5]。限于当时的计算机水平, Von Neumann 关于元胞自动机的构想并没有引起足够的重视。

继 Von Neumann 的研究之后, 一些学者也遵循了同样的研究路线, 继续研究这个问题^[6]。其中, 标志性的工作是 1968 年 Godd^[7] 以及后来的 Langton^[8] 和 Byl^[9] 提出的能够自我复制, 并且使用仅仅具有 8 种状态的简单得多的元胞自动机规则。这类简化模型中, 放弃了 Von Neumann 规则中的计算通用性, 而保留了信息传递的指令(一种元胞 DNA, 执行这些指令, 可产生新的结构, 然后再完全按照这个结构进行自我复制, 参见图 1.1)。随后, 以 Langton 为首的一批科学家, 以元胞自动机为工具展开了对人工生命的深入研究, 通过计算机模拟来更加充分地认识真实生命和生存形式的特性^[10]。目前, 元胞自动机在人工生命领域中的应用已非常广泛。

为了寻找出能够导致复杂行为的简单规则, 1970 年数学家 Conway 提出了著名的生命游戏机(game of life)的概念^[11]。他设计了一个类似于棋盘的二维方形网格, 其中每个元胞可能是活的(黑色)或死的(白色)。生命游戏的规则极其简单, 主要有 3 条: ①生存: 对一个活的元胞, 如果它的邻居中有两个或三个元胞是活的, 那么该元胞将继续生存下去; ②死亡: 对一个活的元胞, i. 如果它的邻居中有四个或四个以上的元胞是活的, 那么该元胞将由于拥挤而死去, ii. 如果它的邻居中只有

一个或没有活的元胞，那么该元胞将由于孤立无援而死去；③繁殖：对一个空的元胞，如果它的邻居中有 3 个 (不能多也不能少) 活的元胞，那么该元胞将成为一个活的元胞。

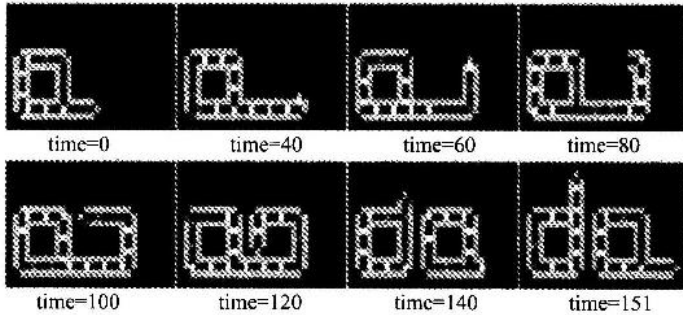


图 1.1 Langton 的自我复制环随时间的演化过程 [60]

尽管生命游戏的规则非常简单，但它具有出乎预料的复杂行为。从一定的初始构形出发，可以得到一些非常复杂的构形和动力学行为。其中最为著名的是 Conway 的滑翔机：一组具有特殊排列的元胞构形，随时间的演化，这些元胞可以沿着某一直线在元胞空间中运动。生命游戏提出后，受到了众多学者的关注，相应的研究越来越多 [12,13]，同时也发现了许许多多特殊的构形。图 1.2 是作者由“生命游戏”的软件模拟得到的，一个类似于鸟类迁徙的构形，随着时间的演化，这些构形会自右向左运动。此后，元胞自动机开始焕发出勃勃生机。

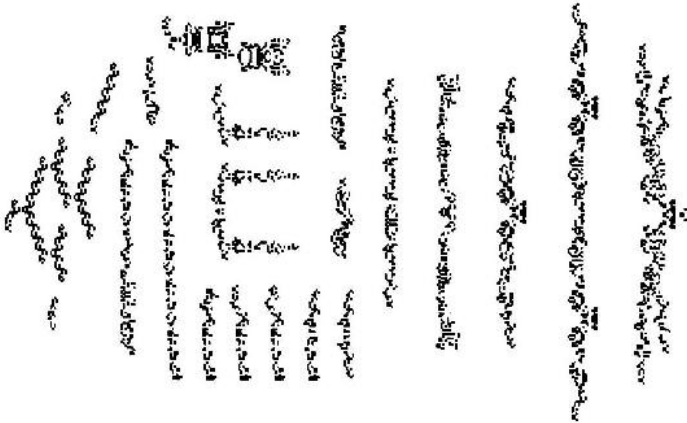


图 1.2 生命游戏中的一种类似于鸟类迁徙的构形

20 世纪 80 年代初，被誉为物理学界天才性人物的 Wolfram 开始把目光投向元胞自动机的研究。他先后详细研究了一系列简单的一维元胞自动机 (当今著名的 Wolfram 规则) 和二维元胞自动机 [1,14~27]。他注意到，元胞自动机是一个离散的动

力学系统,因而即使在非常简单的框架下,也可以显现出许多连续系统中遇到的行为。在大量的数值模拟和理论分析的基础上,Wolfram给出了元胞自动机的动力学分类方法,这对元胞自动机的研究是一个非常突出的贡献,Wolfram的成果有力地说明了元胞自动机是统计力学研究的一个重大课题。

在一系列的深入研究的基础之上,Wolfram在2002年出版了他的专著《一种新科学》。在他的著作中,Wolfram向自然选择学说作出挑战:对时间为什么单向流逝、怎样制造人造生物、股市如何涨落等问题给出了自己的解释;探索了树叶、树木、贝壳、雪花和几乎所有其他东西的形状为什么是其本身那个样子的问题,并给出了自己的答案。这些属于绝然不同的研究领域,看起来似乎风马牛不相及的问题,如何在Wolfram所谓的“新科学”下得到统一的解释呢?那就是元胞自动机。

Wolfram等人的研究作为元胞自动机的应用与发展打下了坚实的理论基础,此后元胞自动机得到了蓬勃发展。20世纪80年代中后期以及90年代初,在元胞自动机的基础之上发展出了格子气自动机(lattice gas automata, LGA)和格子-玻尔兹曼(lattice Boltzmann model, LBM)两种方法^[28~33],并很快成为计算流体力学领域的新宠。

从20世纪90年代起,元胞自动机在众多领域中的应用得到了迅猛发展。

§1.2 元胞自动机的应用概述

元胞自动机自产生以来,被广泛地应用到社会、经济、军事和科学研究的各个领域。到目前为止,其应用领域涉及生物学、生态学、物理学、化学、交通科学、计算机科学、信息科学、地理、环境、社会学、军事学以及复杂性科学等。下面我们将对元胞自动机在这些领域中的应用分别做简要介绍。

(1) 生物学领域:因为元胞自动机的设计思想本身就来源于生物学自繁殖的现象,所以它在生物学上的应用更为自然而广泛。例如,元胞自动机用于肿瘤细胞的生长机理和过程模拟、人类大脑的机理探索^[34]、爱滋病病毒HIV的感染过程^[35]、自组织、自繁殖等生命现象的研究以及最新流行的克隆(clone)技术的研究等^[36]。另外,元胞自动机还可以用来模拟植物的生长过程以及贝壳上的色素沉积图案^[1]。图1.3是元胞自动机模拟的植物生长的过程。

(2) 生态学领域:元胞自动机被用于兔子-草、鲨鱼-小鱼等生态系统动态变化过程的模拟,展示出令人满意的动态效果;图1.4是作者由“生命游戏”的软件得到的,元胞自动机成功地应用于蚂蚁的行走路径,大雁、鱼类洄游等动物的群体行为的模拟^[37];另外,基于元胞自动机模型的生物群落的扩散模拟也是当前的一个应用热点。

(3) 物理学领域:在元胞自动机基础之上发展出来的格子气自动机(LGA)和