



**Cellular Automata
Theory Research and
Simulation Applications**

元胞自动机 理论研究及其仿真应用



段晓东 王存睿 刘向东 编著



科学出版社

元胞自动机理论研究 及其仿真应用

Cellular Automata Theory Research
and Simulation Applications

段晓东 王存睿 刘向东 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书基于元胞自动机的基本理论基础系统阐述了元胞自动机的理论问题及其在各种复杂系统仿真中的应用。本书在理论方面主要对 GF(2) 元胞自动机理论、元胞自动机复杂行为度量方法进行了论述；在应用方面主要对元胞自动机的反问题研究、元胞自动机规则挖掘和基于元胞自动机的网络数据传输模拟、疾病传播、音乐生成等领域进行了详细介绍。

本书可供研究元胞自动机理论及应用、复杂性科学的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

元胞自动机理论研究及其仿真应用/段晓东, 王存睿, 刘向东编著.
—北京: 科学出版社, 2012
ISBN 978-7-03-034191-4

I. ①元… II. ①段… ②王… ③刘… III. ①自动机—研究
IV. ①TP23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 082492 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 柏连海
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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年5月第一版 开本: B5 (720 × 1000)

2012年5月第一次印刷 印张: 14

字数: 271 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

随着人类社会探索自然领域的不断深入，建立在数学模型基础上的计算与仿真已逐渐成为继理论科学与实践研究后对理论和实践方法进行补充与扩展的“第三种科学”。从哥白尼的《天体运行论》、牛顿的《自然哲学的数学原理》到爱因斯坦的《相对论》，直至现代航空学、气候建模、地震预测、纳米材料等，数学建模与计算已从简单的数学方程演化到了高维、动态等复杂模型与高性能计算。特别是现代信息技术变革提供的新平台，已使计算和仿真逐渐渗透到了自然与社会科学的诸多领域。

20世纪50年代，Stanislaw M. Ulam 和 von Neumann 为了研究机器自我复制的可能性，提出一种元胞自动机（cellular automaton）的离散动力系统模型，由此元胞自动机理论就登上了历史的舞台。它用简单的规则表达更为一般类型的规律，给计算与仿真领域带来了一场新的变革。元胞自动机不仅是研究与仿真复杂系统行为的最初理论框架，也是人工智能的雏形。元胞自动机既可以完成乘除法运算，可以求素数、求平方根、计算 π 值，甚至可以求解偏微分方程。多维元胞自动机能产生更高的复杂度，并能与真实世界联系起来，例如流体湍流、晶体生长规律、金融市场涨落，还有自然界中的雪花、树叶、贝壳、生物色素沉着等都可用元胞自动机来模拟。

本书对元胞自动机的理论和仿真应用进行了介绍，内容涉及物理、化学、生物学、社会学、医学、地理学等多个方面，同时对元胞自动机的发展历程进行了介绍，并给出元胞自动机在模拟多种复杂系统时的实验案例和数据分析。本书力求深入浅出，以读者能够深入理解元胞自动机的建模思想为目的，供读者参考与讨论。目前元胞自动机理论还在快速发展之中，许多应用也还属于探索阶段，尽管本书在编著过程中已经尽量做到严谨，但难免会产生纰漏，希望能够“抛砖引玉”，不妥之处欢迎读者批评指正。

本书的研究内容有的已经在国际、国内学术会议进行交流，有的已在相关学术期刊发表。研究成果的获得是作者所在课题组全体同事和研究生们几年来共同努力的结果，特别是研究生田晓东、于鑫、高红霞、刘霞、马艳准和闫帅等参与了本书内容的研究工作，并为此做出了贡献。书中引用了大量文献，在此向原作者表示深深的谢意。同时也要感谢国家自然科学基金项目（项目编号：61040054）、辽宁省科技计划项目、中央高校基本科研业务费专项基金项目、国家民委项目的大力支持。

本书由大连市人民政府资助出版。

作者

2011年12月

于大连民族学院

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 元胞自动机的发展历史	1
1.2 元胞自动机的主要应用	2
参考文献	5
第二章 元胞自动机基础	8
2.1 元胞自动机概述	8
2.1.1 自动机	8
2.1.2 元胞自动机及有关定义	10
2.1.3 元胞自动机的组成	15
2.2 元胞自动机的分类	19
2.2.1 元胞自动机空间维数分类	19
2.2.2 元胞自动机空间构型分类	20
2.2.3 元胞自动机动力学演化行为分类	21
2.2.4 元胞自动机其他分类	30
2.3 元胞自动机的研究方向	31
2.3.1 元胞自动机正问题研究	31
2.3.2 元胞自动机反问题研究	32
2.4 元胞自动机的特征及理解	33
参考文献	35
第三章 几种典型的元胞自动机	36
3.1 生命游戏	36
3.2 蚂蚁规则	39
3.2.1 Langton 蚂蚁	39
3.2.2 普适蚂蚁规则	40
3.3 自我复制元胞自动机	42
3.4 概率元胞自动机	44

3.5	随机行走模型	45
3.6	沙堆模型	46
3.7	传播模型	48
3.8	退火模型	50
3.9	格子气元胞自动机	51
	参考文献	52
第四章	GF(2)元胞自动机理论	53
4.1	GF(2) 元胞自动机	53
4.1.1	Galois 域	53
4.1.2	GF(2)元胞自动机的定义	54
4.2	GF(2)元胞自动机矩阵模型及 K 环定理	55
4.2.1	GF(2)元胞自动机的矩阵模型	55
4.2.2	GF(2)元胞自动机的 K 环定理	58
4.3	基于向量空间理论的线性元胞自动机分析	59
4.3.1	计算特征矩阵的初等因子	59
4.3.2	计算初等因子对应的环结构空间	61
4.3.3	综合所有初等因子计算环结构空间	63
4.4	多吸引域元胞自动机	65
4.4.1	多吸引域元胞自动机	66
4.4.2	基于多吸引域元胞自动机的模式分类	68
4.5	小结	69
	参考文献	69
第五章	元胞自动机行为复杂性研究	71
5.1	元胞自动机与复杂性	71
5.1.1	复杂性理论	71
5.1.2	混沌的边缘与涌现	72
5.1.3	来自混沌的边缘的思考	74
5.2	元胞自动机演化行为复杂性度量	75
5.2.1	熵	75
5.2.2	元胞自动机与熵	76
5.2.3	元胞自动机演化行为度量	77
5.3	Langton 参数与元胞自动机复杂性	79
5.3.1	Langton 参数	79

5.3.2	Langton 参数与元胞自动机动力学行为研究	80
5.4	组合规则熵与元胞自动机复杂性	85
5.4.1	组合规则熵的定义及性质	85
5.4.2	组合规则熵与 Langton 参数	88
5.4.3	组合规则熵与元胞自动机动力学行为研究	91
5.5	δ 参数与元胞自动机复杂性	95
5.5.1	δ 参数	95
5.5.2	δ 参数与元胞自动机动力学行为研究	95
5.6	元胞自动机混沌特性研究	98
5.6.1	Devaney 意义下的混沌	98
5.6.2	初等元胞自动机的混沌特性研究	99
5.6.3	一类随机元胞自动机的混沌特性研究	100
5.7	小结	105
	参考文献	105
第六章	元胞自动机反问题研究及应用	107
6.1	元胞自动机反问题研究介绍	107
6.2	元胞自动机反问题研究工具	108
6.2.1	遗传算法	108
6.2.2	粒子群算法	111
6.2.3	蚁群算法	114
6.3	全局计算问题规则挖掘	117
6.3.1	元胞自动机密度分类问题	117
6.3.2	元胞自动机同步问题	121
6.4	准周期三行为规则挖掘	123
6.4.1	元胞自动机准周期三行为	123
6.4.2	元胞自动机准周期三行为规则挖掘结果	123
6.5	模式识别规则挖掘	126
6.5.1	元胞自动机两阶段分类原理	127
6.5.2	元胞自动机两阶段分类器演化	128
6.5.3	元胞自动机两阶段分类器模式分类结果	131
6.6	加密问题元胞规则挖掘	133
6.6.1	基于元胞自动机的伪随机数发生器	133
6.6.2	基于元胞自动机的伪随机数发生器实验结果	134
6.7	城市元胞自动机规则挖掘	136

6.7.1	城市元胞自动机	136
6.7.2	基于蚁群算法的规则挖掘	137
6.7.3	城市元胞自动机转换规则挖掘	140
6.8	复杂元胞自动机规则挖掘	142
6.8.1	基于组合规则熵的元胞自动机规则的挖掘算法	142
6.8.2	复杂元胞规则挖掘结果	142
6.9	小结	144
	参考文献	144
第七章	元胞自动机在仿真领域的应用	146
7.1	元胞自动机在网络数据传输模拟中的应用	146
7.1.1	网络数据包传输的元胞自动机模型	149
7.1.2	一种 P2P 网络流媒体服务模型的 CA 模拟	152
7.1.3	使用元胞自动机对模型的模拟	155
7.2	元胞自动机在模拟流行病传播中的应用	158
7.2.1	禽流感传播的元胞自动机模拟	158
7.2.2	基于元胞自动机的传染病传播模型	162
7.2.3	使用元胞自动机模型对 SARS 疫情的模拟	170
7.3	元胞自动机在音乐作曲中的应用	170
7.3.1	元胞音符映射	171
7.3.2	基于 Java MIDI 的音乐生成器实现	174
	参考文献	175
附录		177
A.	生命游戏的 C 语言代码	177
B.	兰顿蚂蚁的 C 语言程序	178
C.	传播模型的 C 语言程序	180
D.	BPSO 的元胞自动机准周期三行为	182
E.	元胞自动机演化熵及组合规则熵	201

第一章 绪 论

1.1 元胞自动机的发展历史

元胞自动机是由数学家 Stanislaw M. Ulam 与 von Neumann 于 1948 年提出的,最初用于模拟生命系统所特有的自复制现象,是描述自然界复杂现象的简化数学模型^[1]。

20 世纪 40 年代末,“现代计算机之父” von Neumann 曾提出了这样一个问题:“自我复制的机器是否存在?”他的问题可进一步阐释为:“自动机以什么样的逻辑组织构成才能满足自组织和自复制的要求?”在接受了他的同事,氢弹的发明者之一的数学家 Ulam 的建议后, von Neumann 开始设计基于元胞的自动机。他从逻辑数学的角度出发;将递归和自动机概念有机结合,构造了一个具有 29 个状态、以 5 个元胞为邻域的能自我复制的系统,这个系统就是最早的元胞自动机模型。von Neumann 指出,这种离散的模型可以通过一定的设计实现自我复制和一些通用计算。这种具有计算能力的自动机的诞生揭开了元胞自动机研究的序幕。1964 年, Codd 对 29 状态的元胞自动机进行了简化,利用 8 状态 2 维 von Neumann 型元胞自动机,建立了同样具有自我复制和通用计算能力的元胞自动机模型^[2]。由于元胞自动机模型的实现需要数量庞大的元胞单元,以至于其物理实现难以完成^[3],因此,早期的元胞自动机主要集中于理论方面的研究^[4]。

在 von Neumann 逝世后的长达 10 多年的时间内,这一开创性的研究几乎完全停止。1970 年,英国数学家 John Conway 编制了一个名为“Game of Life”的游戏程序。它虽然仅有几条简单的规则组合,但却能产生无法预测的延伸、变形和停止等复杂的模式。这种意想不到的奇妙现象吸引了一大批学者对此进行研究,最后终于证明了这个程序与图灵机等价,也就是说给定适当的初始条件,它能够模拟任何一种计算。时至今日,该模型仍然是认识和探索复杂性的典型范例^[5]。

20 世纪 80 年代,美国数学家 Stephen Wolfram 对元胞自动机的状态空间和半径进行简化,获得了具有组成单元结构的规则简单性、单元之间作用的局部性和信息处理的高度并行性等优点的元胞自动机^[6]。同时还提出了具有 2 个状态、半径为 1 的初等元胞自动机模型,并通过引入动力学系统的理论和方法对其进行了研究。Wolfram 对元胞自动机按照动力学行为进行了分类^[7-9],由此引发了国际学术界研究元胞自动机的热潮。

进入 20 世纪 90 年代,元胞自动机的发展进入了百花齐放的局面。以美国圣

达菲 (Santa Fe) 学派为代表的研究专家基于对元胞自动机的深入研究, 提出和发展了人工生命。同时, 人工生命的发展又为元胞自动机赋予了新的含义, 元胞自动机模型得到了科学界的重新认识和认可, 并再次成为了科学研究的前沿课题, 其理论和方法得到了进一步的提高^[10]。

进入 21 世纪, 随着计算机技术和演化计算 (evolution computation) 的发展, 元胞自动机的研究更是取得了长足的进步。2002 年 Wolfram 的 *A New Kind of Science* 更是将元胞自动机作为一种解释自然的新学科提升到一个更高的层次^[11]。

元胞自动机也是生命科学和计算机科学发展和交叉的结果。一方面它足够简单, 可以进行细致的数学分析; 另一方面它又能够表现出一系列复杂的现象。因此它可以作为复杂动态系统的建模方法, 为众多的物理、化学和生物系统提供仿真模型, 而且它的简单的结构可以被映射到 VLSI 环境中以进行有效的计算。随着计算机技术的持续快速发展, 元胞自动机这种易于在计算机体系结构上实现的模型会越来越受到人们的关注。

1.2 元胞自动机的主要应用

古代科学方法论本质上是整体论, 强调由整体把握对象。近代的还原论也发挥了重要的作用, 并在自然科学领域取得了巨大的成功。因为它遵循将事物分解为局部或低层次来进行研究的原则, 以解决局部或低层次问题为基础, 向整体或高层次问题推进。如果局部或低层次问题无法解决, 就将其继续分解下去, 直至问题解决。物理学、化学和生物学的许多原理大多按照这种方法论发展起来并获得了成功。但现代科学研究表明, 宇宙的许多奥秘来自整体性。例如, 为什么氢元素有易燃性, 氧元素有助燃性, 而水分子却失去了易燃性和助燃性? 为什么单个分子没有温度和压强, 而大量分子聚集起来却有了温度和压强? 为什么大城市能够不间断地保障食品、医疗、服饰和数千万居民的必需品供应? 诸如此类复杂问题向还原论提出了挑战^[12]。因此, 许多科学家认为还原论不能全面解决复杂性问题, 进而提出了复杂性研究。钱学森先生早在 20 世纪 80 年代就指出: “凡现在不能用还原论方法处理的, 或不宜用还原论方法处理的问题, 要用或宜用新的科学方法处理的问题, 都是复杂性问题, 复杂巨系统就是这类问题。”

现代科学家通过运用自组织、混沌、涌现和自适应等来研究系统复杂性, 结合计算机技术应用于复杂性研究的分析和计算, 相继提出了演化计算、元胞自动机等模型。元胞自动机作为复杂系统的离散模型, 是研究动力学相互作用与时空演化过程的重要实验方法。它开辟了一条探索基础科学研究与复杂性的新途径。与传统的方法相比, 元胞自动机能更好地模拟物理和化学过程, 如雪花形成、流

体以及湍流形成等难以解释的复杂现象，甚至还能逼真地反映大量相互作用个体形成的精细结构模式，图 1.1 是一幅利用元胞自动机演化出的雪花图像。元胞自动机是描述复杂性的比较有效的方法之一，也是复杂系统建模的一种重要方法。

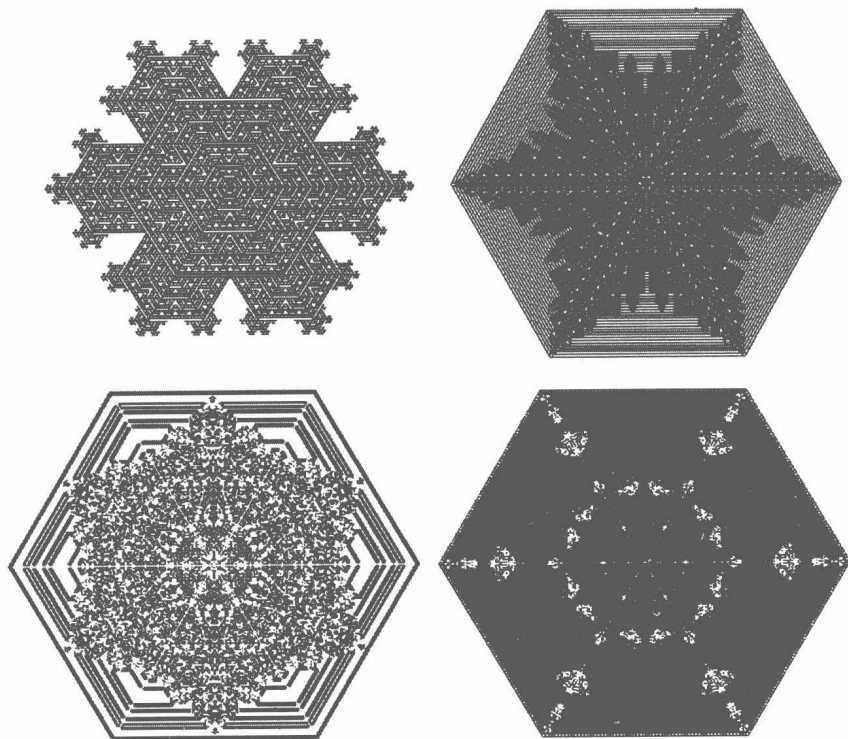


图 1.1 元胞自动机模拟雪花

目前，元胞自动机主要应用领域分为以下几个方面^[13-32]：

(1) 用于快速计算

下面这些性质是并行计算理想的前提条件，也是元胞自动机具有极高运算速度和效率的主要原因：

- 1) 包括将空间离散到相同的点集 x 。
- 2) 具有有限数量的可能状态 $f(x)$ 。
- 3) 全部个体在时间 $t = \Delta T$ 内并行更新， ΔT 是基本时间步长。
- 4) 个体之间为根据邻域位置有限数量的短期相互作用。
- 5) 全局的应用更新条件。

(2) 作为研究计算复杂性的替换形式

元胞自动机可以通过形式化语言进行描述，在这一领域已经进行了许多研究，图 1.2 给出了具有分形结构的 1 维元胞自动机模型。

(3) 用于模式识别

一些元胞自动机可以作为功能强大的模式滤波器：它们可以识别出隐含在大量噪声中的特定的特征。初始模式编码作为元胞自动机的状态，元胞自动机在演化过程中可对噪声进行过滤，最终系统会达到稳态，识别出特定的特征，图 1.3 给出了一种具有滤波特征的元胞自动机模型示意图。

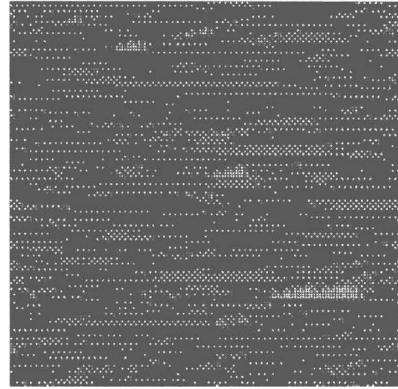
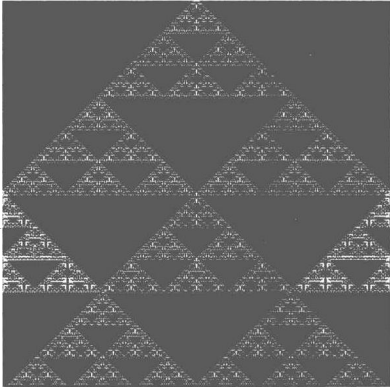


图 1.2 具有分形结构的 1 维元胞自动机模型 图 1.3 具有滤波特征的元胞自动机模型

(4) 作为独立的公式化模型的计算工具

这种情况下，元胞自动机被看作一种近似计算工具。例如，特定规则的元胞自动机可被用于求解微分方程，实际上，每一个微分方程的计算机求解过程都可以看作元胞自动机的模拟计算。只是出于计算需要，时间、空间和变量都被离散化，尽管元胞的状态较多、转移方程采用了特定的代数形式，虽然不具备元胞自动机典型的结构，但这些模型仍然可以看作是符合正式定义的元胞自动机。

(5) 作为实际物理现象的模型

在传统的数学建模中，习惯于构造连续性模型模拟物理现象，而元胞自动机将物理现象作为离散系统进行建模仿真。元胞自动机可作为微分方程的替代而不是近似，例如流体动力学中的模型，这些模型最初是应用 $N-S$ 方程并用微分方程模拟，但现在它们可以采用元胞自动机来进行表述，其模拟结果近似于 $N-S$ 方程的求解结果。

Wolfram 曾提到：元胞自动机的规则虽然简单，甚至用一句话就可以描述，但它却是“万能”的。因此，来自不同领域的专家，包括社会学、生物学、生态学、信息科学、计算机科学、数学、物理学、化学、地理、环境、军事学等等，对元胞自动机进行了深入的研究和探索，并取得了丰硕的成果。

在社会学中，元胞自动机可以用于研究经济危机的形成与爆发过程，以及个人

行为的社会性, 或者传播现象, 如服装流行色的形成、舆论的传播等社会现象。

在生物学中, 由于元胞自动机的设计思想来源于生物学自繁殖现象, 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、艾滋病病毒 HIV 的感染过程、自组织和自繁殖等生命现象的研究, 以及轰动一时的克隆技术的研究等。

在生态学中, 元胞自动机用于捕食者和被捕食者形成的生态中种群数量的动态变化过程的模拟, 元胞自动机展示出非常接近真实的仿真演化结果; 元胞自动机还应用于蚂蚁、大雁和鱼类等迁徙动物群体行为的模拟; 另外, 基于元胞自动机模型的生物群落的扩散模拟也是一个研究热点。

在信息学中, 元胞自动机用于研究信息的保存、传播、扩散的过程。另外, 2 维元胞自动机也大量应用于图像处理和模式识别中。

在计算科学研究中, 元胞自动机可以用来构建并行乘法器、素数过滤器、并行处理器、排序器和容错计算器等。元胞自动机具有自我复制能力, 具有强大的计算功能, 可以解决一些 NP 完全问题等。

在数学中, 元胞自动机可以用来研究数论和并行计算。

在物理学中, 除了格子气元胞自动机在流体力学上的成功应用, 元胞自动机还应用于磁场、电场等各种场效应的模拟, 以及热扩散、热传导和机械波的模拟。另外, 元胞自动机还可以用来模拟例如雪花等等的枝晶形成过程。

在化学中, 元胞自动机可用来通过模拟原子、分子等各种微观粒子在化学反应中的相互作用, 而研究化学反应的过程。

在环境科学上, 有人应用元胞自动机来模拟海上石油泄漏后的油污扩散、工厂周围废水、废气的扩散等过程。

在军事科学中, 元胞自动机模型可用来模拟军事作战。在对抗模拟中, 除最著名的 Conway 的“生命游戏”之外, 元胞自动机还模拟了行刑队游戏、蜂王游戏、囚徒困境等对抗过程。

除此之外, 元胞自动机还在超大规模集成电路 (very large scale integration, VLSI), 密码学等方面得到了广泛的应用。可以说, 元胞自动机是计算机科学和多种学科共同发展和交叉的结果, 元胞自动机已成为模拟复杂现象的一个不可缺少的重要工具。

参 考 文 献

- [1] von Neumann J. Theory of Self-Reproduction Automata [M]. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1966.
- [2] Codd E F. Cellular Automata [M]. New York: Academic Press, 1968.

- [3] Jean-Luc Beuchat, Jacques-Olivier Haenni. Von Neumann's 29-State Cellular Automaton: A Hardware Implementation [J]. IEEE Transactions on Education, 2000, 43 (3): 300—308.
- [4] Parimal Pal Chaudhuri, Dipanwita Roy Chowdhury, Sukumar Nandi, Santanu Chattopadhyay. Additive Cellular Automata: Theory and Application [M]. IEEE Computer Society-Wiley, 1997.
- [5] Berlekamp E R, Conway J H, Guy R K. Winning Ways for Your Mathematical Plays [M]. New York: Academic Press, 1984.
- [6] Wolfram S. Statistical Mechanics of Cellular Automata. Rev. [J]. Mod. Phys, 1983, 55 (3): 601—644.
- [7] Wolfram S. Universality and Complexity in Cellular Automata [J]. Physica D, 1984, 10: 1—35.
- [8] Wolfram S. Undecidability and Intractability in Theoretical Physics [J]. Phys. Rev. Lett, 1985, 54: 735—738.
- [9] Wolfram S. Cellular Automata and Complexity [M]. Singapore: World Scientific, 1994.
- [10] Langton C. Computation at the Edge of Chaos [J]. Physica D, 1990, 42 (1): 12—37.
- [11] Wolfram S. A New Kind of Science [M]. Michigan: Wolfram Media, 2002.
- [12] 李曙华. 当代科学的规范转化—从还原论到生成整体论 [J]. 哲学研究, 2006, 52 (11): 89—94.
- [13] Ganguly N, Sikdar BK, Deutsch A, Canright G, Chaudhuri P Pal. A Survey on Cellular automata [R]. Technical Report, Centre for High Performance Computing, Dresden University of Technology, 2003.
- [14] 周成虎, 孙占利, 谢一春. 地理元胞自动机研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [15] Melanie Mitchell. Computation in Cellular Automata: A Selected Review, Nonstand Computation [M]. New York: Wiley, 1998, 95—140.
- [16] Bastien Chopard, Michel Droz. 物理系统的元胞自动机模拟 [M]. 祝玉学, 赵学龙, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [17] Niloy Ganguly. Cellular Automata Evolution: Theory and Applications in Pattern Recognition and Classification [D]. India: A Deemed University, 2003.
- [18] Chopard B, Droz M. Cellular Automata Modelling of Physical Systems [M]. Cambridge University Press, 1998.
- [19] Ermentrout G B, Edelstein-Keshet L. Cellular Automata Approaches to Biological Modeling [J]. Journal of Theoretical Biology, 1993, 160: 97—133.
- [20] Sarkar P. A Brief History of Cellular Automata [J]. ACM Computing Systems, 2000, 32 (1): 80—107.
- [21] Zhou T, Zhou P L, Wang B H. Modeling stock market based on genetic cellular automata [J]. Int J Mod PhysB, 2004, 18: 2697.
- [22] 韩筱璞, 周涛, 汪秉宏. 基于元胞自动机的国家演化模型研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1 (4): 74—78.
- [23] 柯长青, 欧阳晓莹. 基于元胞自动机模型的城市空间变化模拟研究进展 [J]. 南京大学学报, 2006, 42 (1): 103—110.
- [24] 李才伟. 元胞自动机及复杂系统的时空演化模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 1997.
- [25] 应尚军, 魏一鸣, 蔡嗣经. 元胞自动机及其在经济学中的应用 [J]. 中国管理科学, 2000, 8 (11): 271—278.
- [26] 余亮, 陈荣, 何宜柱. 元胞自动机与经济学应用 [J]. 系统工程, 2003, 23 (1): 90—93.
- [27] 张发, 宣慧玉. 基于元胞自动机的交通模型综述 [J]. 系统工程, 2004, 22 (12): 77—82.
- [28] 段晓东, 于鑫, 刘向东. 基于 P2P 技术的流媒体服务模型及其 CA 仿真 [J]. 计算机工程与应用,

- 2005, 35: 152—155.
- [29] 于鑫, 段晓东, 刘向东, 周福才. 基于元胞自动机的流行病传播模型及模拟 [J]. 计算机工程与应用, 2005, 2: 205—209.
- [30] 田晓东, 段晓东, 刘向东, 张庆灵. 基于 BPSO 的元胞自动机准周期三行为研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2007, 4 (4): 25—31.
- [31] 段晓东, 高红霞, 刘向东, 张学东. 一种基于种群熵的自适应粒子群算法 [J]. 计算机工程, 2007, 33 (18): 222—224.
- [32] 刘向东, 张俊星, 焉德军, 何希勤. 一种具有随机邻居元胞自动机的混沌特性 [J]. 计算机科学, 2007, 34 (12): 200—203.

第二章 元胞自动机基础

元胞自动机 (cellular automata, CA) 是一种在时间和空间方面都离散的动力系统。散布在规则网格中的每一个元胞取有限的离散状态, 遵循一定的局部规则作出相应的更新。大量的元胞通过简单的相互作用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的物理方程或函数确定, 而是由一系列模型构造的规则构成的。凡是满足这些规则的模式都可以算是元胞自动机模型, 元胞自动机是这类模型的总称。

2.1 元胞自动机概述

要理解元胞自动机, 需要从自动机理论入手。下面将介绍自动机的基本概念——有限自动机, 引申到图灵机的基本原理, 进而对元胞自动机的定义组成进行详细剖析。

2.1.1 自动机

自动机 (automata) 的概念有两种含义^[1]:

1) 自动机是能够自动响应预先安排好的操作步骤, 即编码指令的设备; 或者说, 是具有生命特征的机器。

2) 离散数字动态系统的数学模型。根据存储带是否有限, 可将自动机分为有限自动机和无限自动机。有限自动机常作为数字电路的数学模拟, 也用来描述神经系统和算法; 而无限自动机主要用来描述算法 (如图灵机), 也可用来描述繁殖过程 (如元胞自动机) 等。

1. 有限自动机

有限自动机 (finite automata) 是一种控制状态有限、符号集有限的自动机, 是一种离散输入输出系统的数学模型^[2]。可将有限自动机设想成由一条划分为许多方格的输入带和一个控制器组成的机器, 如图 2.1 所示。

其中, 在输入带的每一个小格中可以容纳一个符号, 这些符号取自一个有限符号集 S ; 控制器具有有限的可能状态, 这些可能状态构成一个状态集合 Q ; 在每一时刻控制器仅处于唯一的一个状态 q ; 初始时控制器处在状态 q_0 。控制器从输入带中读入符号, 控制器根据其当前状态 q 和从输入带上得到的符号 a 来确定控制器的下一时刻的状态, 实现从状态 q 到状态 q' 的转移, 然后将读入头右移一格。控制