

Theory

of

Practical Cellular

Automaton

李学伟 吴今培 李雪岩◎著

实用

元胞自动机导论



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

014033899

TP23
27

实用元胞自动机导论

Theory of Practical Cellular Automaton

李学伟 吴今培 李雪岩 著



北京交通大学出版社

· 北京 ·



北航

C1721610

TP23/27

内 容 简 介

元胞自动机运用简单的、局部规则的、离散的、自下而上的建模方法,借助计算机可以把系统中各个因素之间的非线性关系转化为可执行的程序,去模拟复杂的、全局的、连续的系统。所以,元胞自动机目前已成为研究动态复杂系统的有效手段,在越来越广泛的学科领域内获得应用。

本书首先系统地阐释了元胞自动机的思想基础、工作原理、建模方法及复杂性分析,然后探讨了元胞自动机与遗传算法、神经网络、智能体 Agent 的沟通、交互和渗透,最后介绍了元胞自动机在经济、城市交通管理和疾病传播领域的典型应用。

本书内容新颖、可读性强,充分反映元胞自动机跨学科、交叉性的研究思路,理论性与实用性兼顾。本书可作为信息科学与工程、人工智能、系统工程、复杂性管理、经济管理、交通运输专业的高年级本科、研究生公共选修课的教材,也适合从事相关专业的师生、科研工作者参考。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

实用元胞自动机导论 / 李学伟, 吴今培, 李雪岩著. — 北京: 北京交通大学出版社, 2013. 7

ISBN 978 - 7 - 5121 - 1539 - 2

I. ① 实… II. ① 李… ② 吴… ③ 李… III. ① 自动机 - 研究
IV. ① TP23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 168717 号

责任编辑: 陈跃琴

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010 - 51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者: 北京泽宇印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170 × 235 印张: 21.75 字数: 352 千字

版 次: 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5121 - 1539 - 2/TP · 750

印 数: 1 ~ 2 000 册 定价: 58.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010 - 51686043, 51686008; 传真: 010 - 62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。



前 言

今天，人类对于外部世界的认识，已经达到了惊人的高度：宏观，远及亿万光年的宇宙；微观，深入于层子、夸克的神奇世界。所有这些光辉的科学成就，无一不是人类运用其智慧和思维，对于客观世界中的信息进行加工的结果。然而，科学对自然和社会的探索，不是我们已经认识了多少，而是还有多少没有认识。相比之下，人类对于自身的了解，特别是对于生命和智慧本质的认识，却还处于相当幼稚、肤浅的阶段。

20 世纪 50 年代，计算机之父冯·诺依曼创立了元胞自动机，成功地解决了机器的自我复制问题，成为人工生命科学的先驱。人工生命不是由碳水化合物有机形成的自然生命，它关注的是在计算机中仿真或“创造”生命。人们是否相信科学技术总有一天会创造出有生命特征的机器来？这个问题不断地吸引着众多不同领域的科学家们，成为他们的最富诱惑力的研究课题，也是对于现代科学技术的最重大挑战之一。

元胞自动机是由大量元胞组成的，元胞间局部相互作用从而产生了整个系统的行为特征，由于该行为特征不等价于元胞个体行为特征的线性迭加之和，所以无法用传统的数学方程或回归统计进行分析。随着计算技术的高度发达，人们发现元胞自动机利用简单的、局部规则的、离散的方法，借助计算机可以把系统中各个因素之间的非线性关系转化为可执行的程序，去模拟复杂的、全局的、连续的系统。所以，元胞自动机方法目前已成为研究动态复杂系统的有效手段，同时包括初等元胞自动机在内的基于简单规则的系列方法也将成为研究复杂系统科学的实用工具，在越来越广泛的学科领域内获得应用。

本书内容由三个部分组成：

第一部分（第 1~4 章）系统地阐释了元胞自动机的思想基础、工作原理、建

模方法及复杂性分析,为试图深入理解元胞自动机的读者提供基础性的理论知识;

第二部分(第5~7章)分别探讨了元胞自动机与遗传算法、神经网络及智能体 Agent 的相互沟通、交叉和渗透,可以起到取长补短、相得益彰的效果。

第三部分(第8~9章)是元胞自动机的应用领域,这里主要介绍它在经济领域、城市交通管理和疾病传播方面的一些典型应用。最后在结语中展望了元胞自动机未来的发展前景。

本书可供高等学校从事信息科学与工程、人工智能与计算机科学、系统工程与复杂性管理等相关专业的师生及科技人员参考。

本书的研究成果是作者所在团队的教师和研究生们几年来共同努力的结果,特别是博士研究生赵云结合自己的研究课题参与了本书第4章和第9章的撰写;苟娟琼博士,李捷博士和朱明皓博士参与了第8章的撰写;窦水海、冯运卿、韦功鼎、邱荷婷等博士生进行了校对工作;李雪梅教授阅读了全书并提出了修改意见。没有他们的辛勤劳动和贡献,此书是不可能问世的,在此向他们表示衷心的感谢。

在全书撰写过程中,作者参考和引用了大量的国内外相关的论文著作和研究报告,可以说没有前人的科研成果,是不可能形成这样一本书的。在此对所涉及的专家学者表示衷心的感谢。另外,还要感谢北京交通大学出版社有关领导及本书的责任编辑陈跃琴,是他们的鼎力相助才让本书得以顺利出版。

最后特别指出,作为一门新兴的交叉学科,需要不断面对新的知识,研究新的问题,但由于作者学识水平有限,书中不当之处在所难免,我们真诚地希望专家和读者不吝赐教。

李学伟

二〇一三年三月

第 2 章

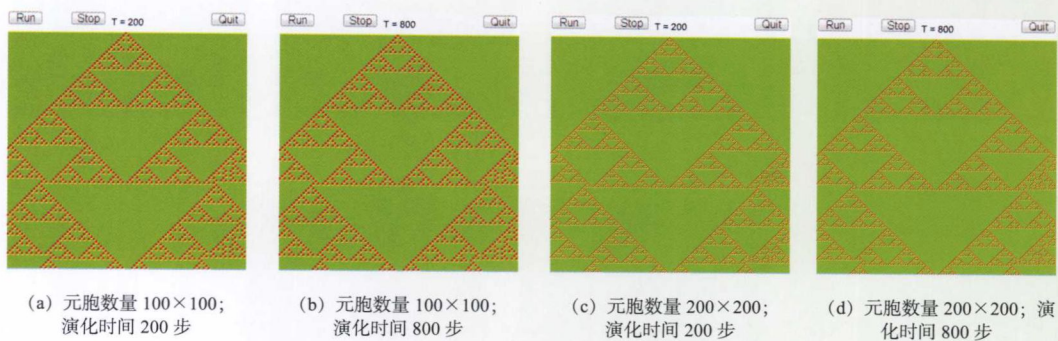


图 2-13 90 号规则演化结果

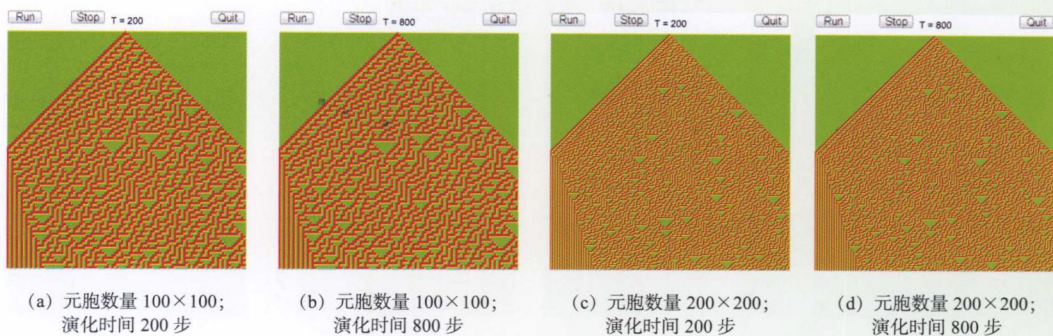


图 2-14 30 号规则演化结果

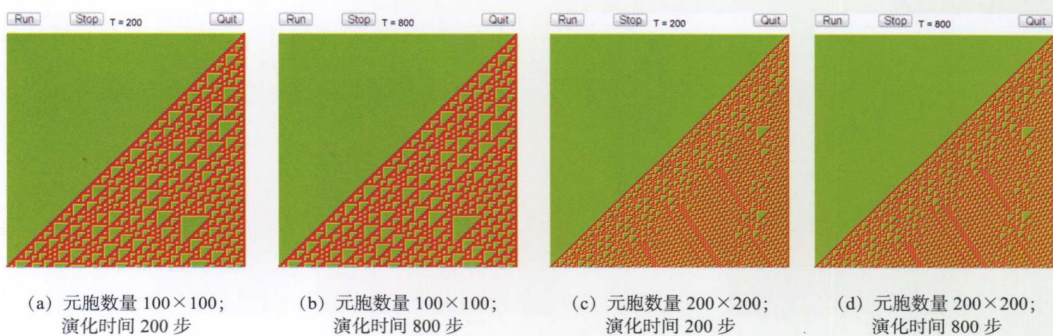


图 2-15 110 号规则演化结果

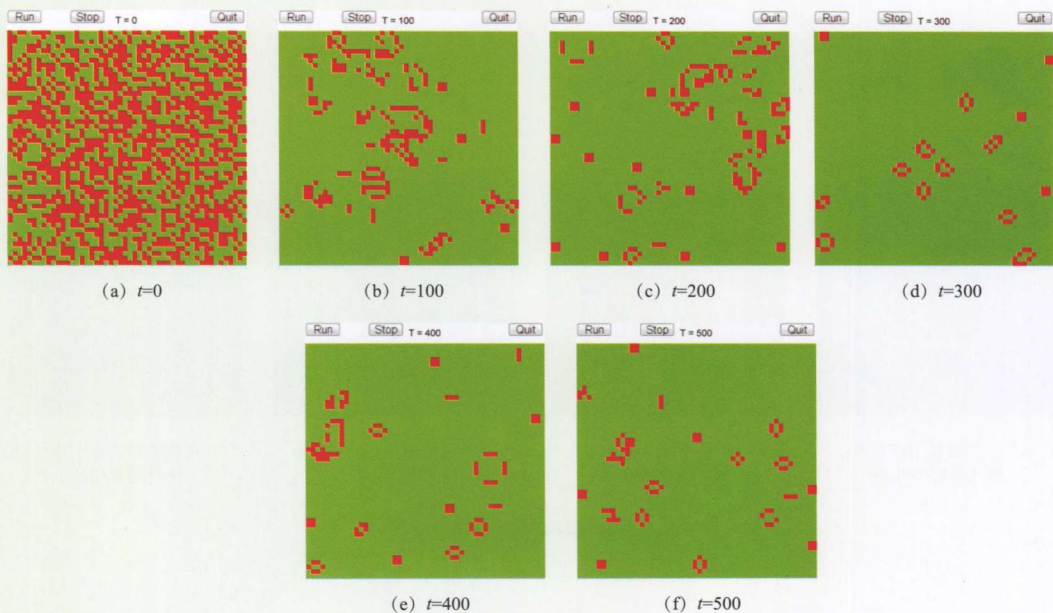


图 2-16 生命游戏演化图像

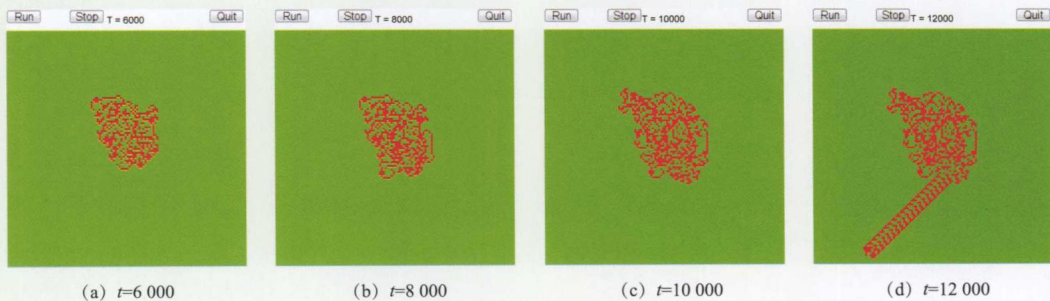


图 2-20 “Langton” 蚂蚁演化过程

第 3 章

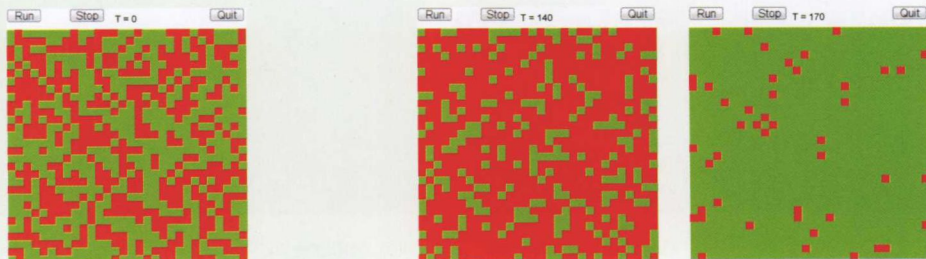


图 3-2 元胞空间初始状态（深色，基本面投资者；浅色，技术面投资者）

图 3-3 演化结果

第 5 章

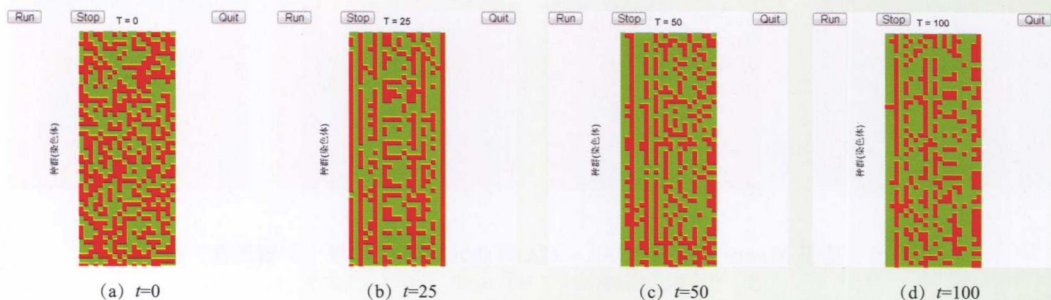


图 5-7 LG-CGA 算法元胞演化状态

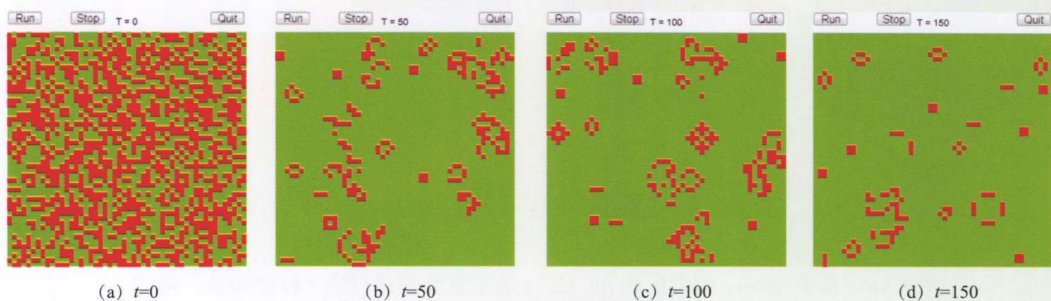


图 5-9 元胞自动机生命游戏演化

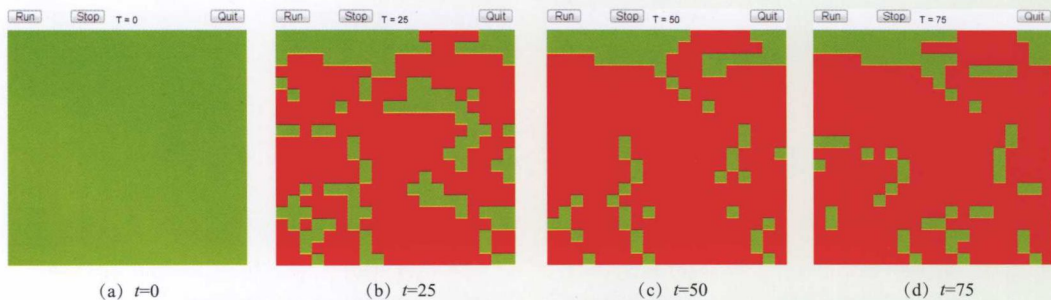


图 5-12 基于 Von Neumann 型邻居的 SA-CGA 算法元胞演化过程 (种群数量: 400)

注: 当个体目标函数值大于等于 16 时, 元胞显示为红色

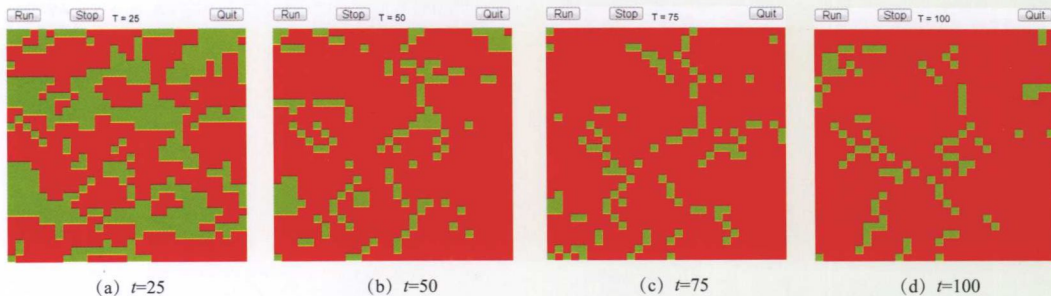


图 5-13 基于 Von Neumann 型邻居的 SA-CGA 算法元胞演化过程 (种群数量: 900)

注: 当个体目标函数值大于等于 16 时, 元胞显示为红色

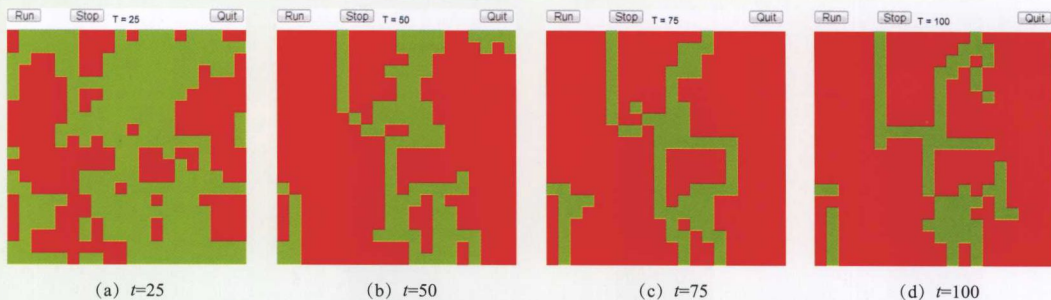


图 5-15 基于 Moore 型邻居的 SA-CGA 算法元胞演化过程 (种群数量: 400)

注: 当个体目标函数值大于等于 16 时, 元胞显示为红色

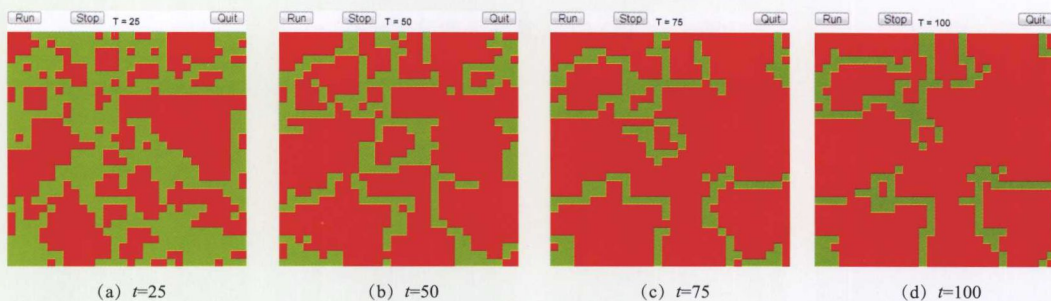


图 5-16 基于 Moore 型邻居的 SA-CGA 算法元胞演化过程 (种群数量: 900)

注: 当个体目标函数值大于等于 16 时, 元胞显示为红色

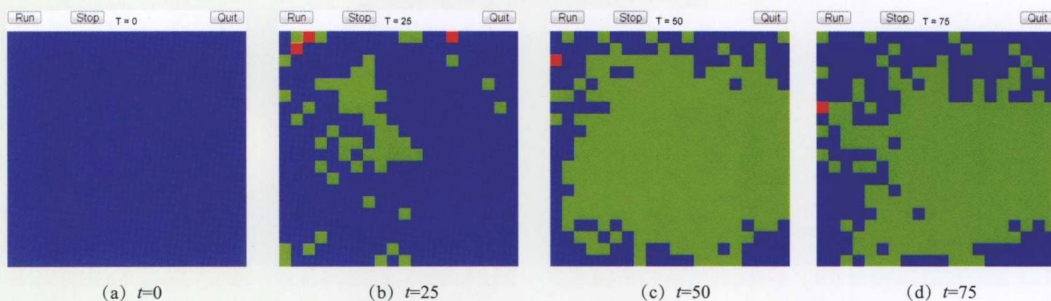


图 5-18 基于扩展 Moore 型邻居的 SA-CGA 算法元胞演化过程 (种群数量: 400)

注: 当个体目标函数值大于等于 16 时, 元胞显示为红色; 大于等于 12 且小于 16 时, 元胞显示为绿色; 小于 12 时, 元胞显示为蓝色。

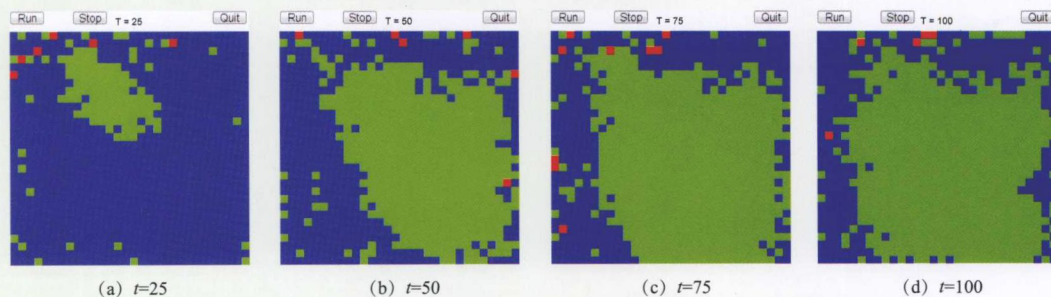


图 5-19 基于扩展 Moore 型邻居的 SA-CGA 算法元胞演化过程 (种群数量: 900)

注: 当个体目标函数值大于等于 16 时, 元胞显示为红色; 大于等于 12 且小于 16 时, 元胞显示为绿色; 小于 12 时, 元胞显示为蓝色。

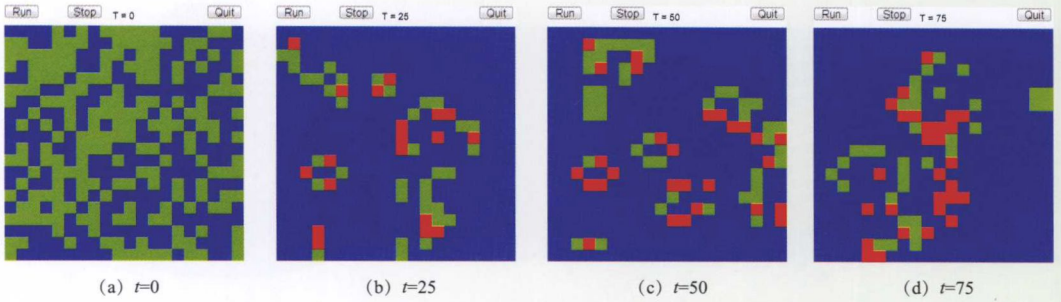


图 5-22 基于“生命游戏”的 ESA-CGA 算法元胞演化过程

注：当个体目标函数数值大于等于 12 且元胞状态为“生”时，元胞显示为红色；当个体目标函数数值小于 12 且元胞状态为“生”时，元胞显示为绿色；当元胞状态为“死”时，元胞显示为蓝色。

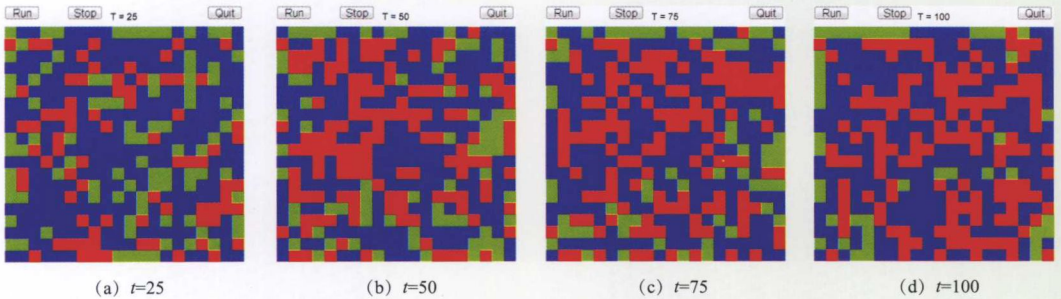


图 5-23 基于“规则 4”的 ESA-CGA 算法元胞演化过程

注：当个体目标函数数值大于等于 12 且元胞状态为“生”时，元胞显示为红色；当个体目标函数数值小于 12 且元胞状态为“生”时，元胞显示为绿色；当元胞状态为“死”时，元胞显示为蓝色。

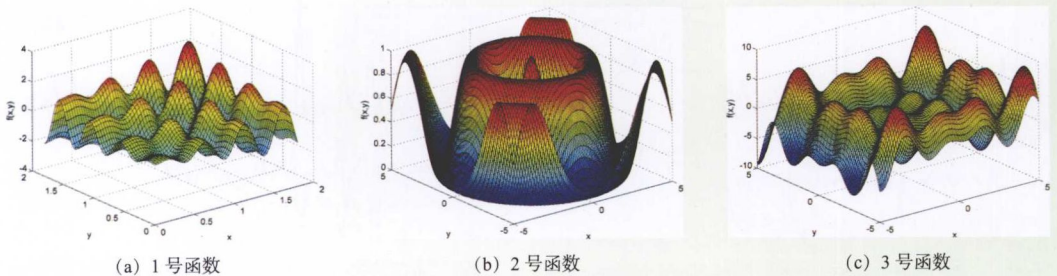


图 5-27 测试函数

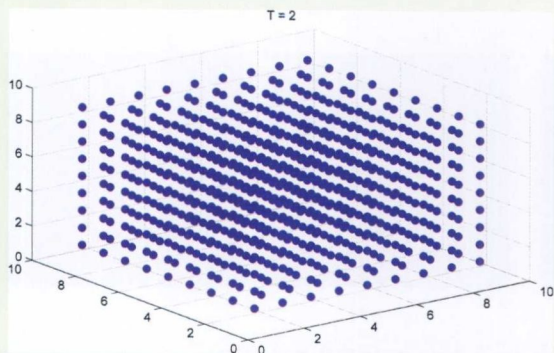


图 5-28 三维元胞空间

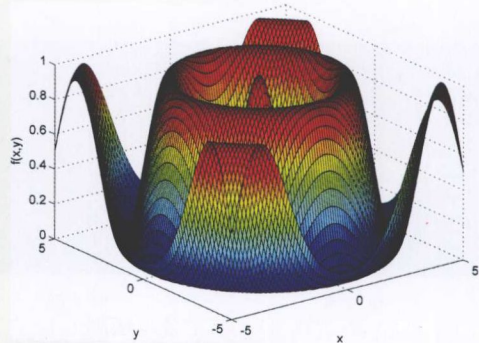
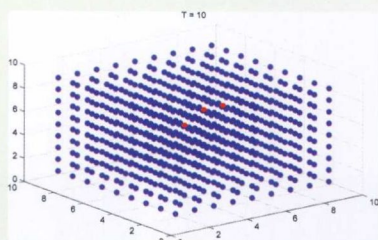
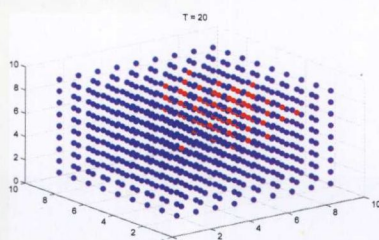


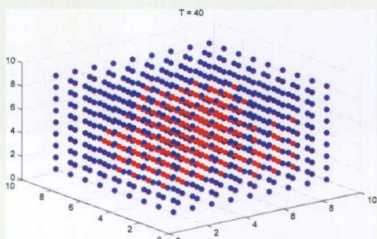
图 5-32 测试函数



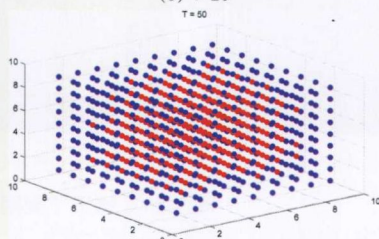
(a) $t=10$



(b) $t=20$



(c) $t=40$



(d) $t=50$

图 5-33 演化过程

第 6 章

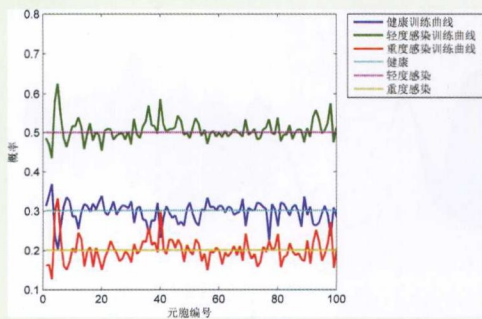


图 6-13 规则挖掘过程 (训练)

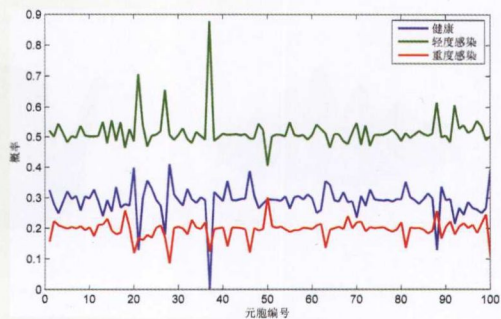


图 6-14 预测过程

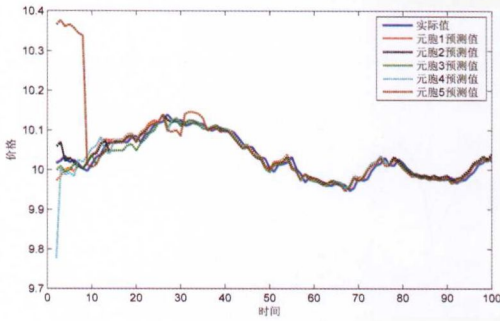


图 6-18(a) 价格实际值与预测值

第 7 章

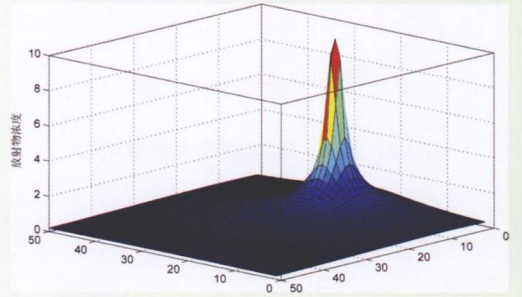


图 7-12 放射物浓度分布图 (元胞空间)

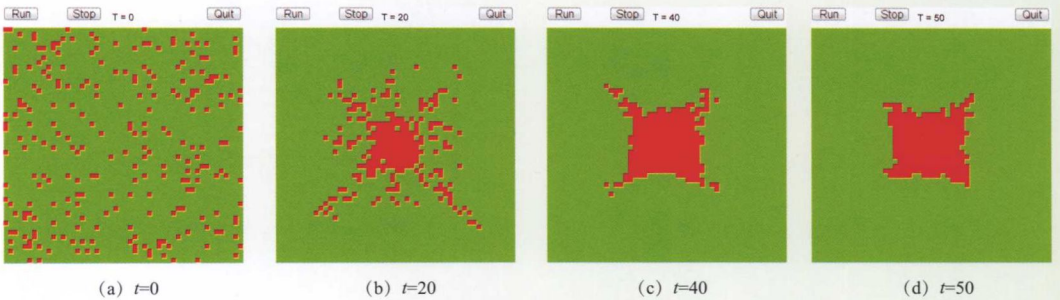


图 7-30 产业集群形成过程

第 8 章

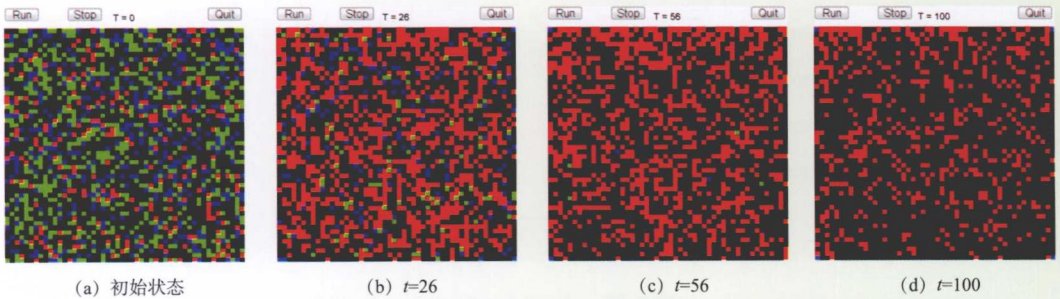


图 8-20 传染演化过程

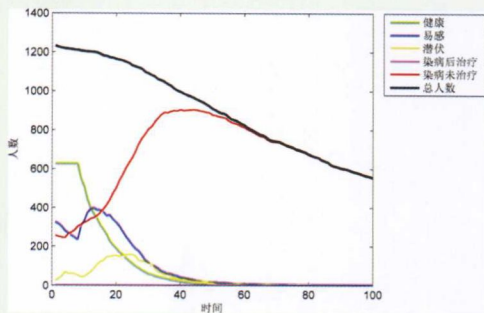


图 8-21 (a) 传染期间人数变化

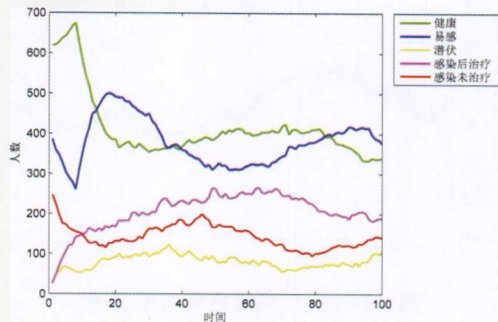


图 8-22 $\gamma = 0.1, \varepsilon = 0.1, \varepsilon' = 0.1$

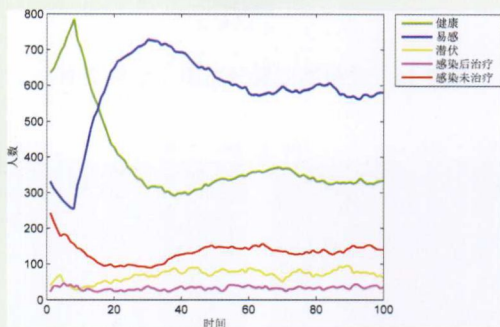


图 8-23 $\gamma = 0.6, \varepsilon = 0.1, \varepsilon' = 0.1$

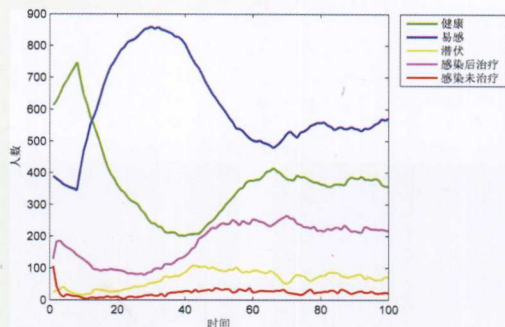


图 8-24 $\gamma = 0.1, \varepsilon = 0.6, \varepsilon' = 0.1$

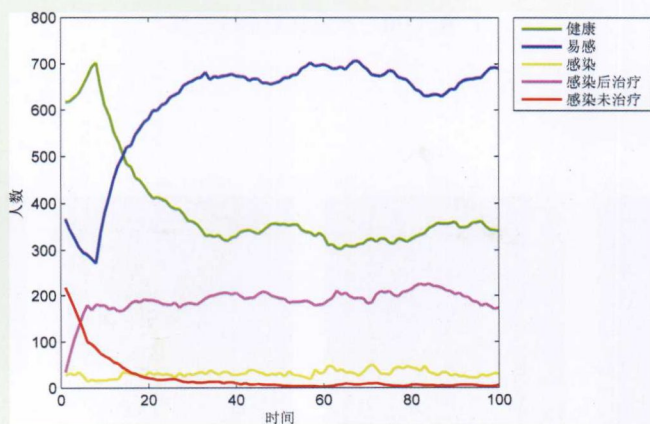


图 8-25 $\gamma = 0.1, \varepsilon = 0.1, \varepsilon' = 0.6$



北航

C1721610

目 录

第 1 章 元胞自动机的思想基础	1
1.1 复杂性形成的一种思维方式——复杂性思维	1
1.1.1 简单性与简单性原则	1
1.1.2 复杂性与复杂性思维	6
1.2 复杂性形成的一种计算模式——规则计算	15
1.2.1 计算复杂性	15
1.2.2 复杂性研究的两种计算模式	16
1.3 复杂性形成的一种离散动力学模型——元胞自动机	22
参考文献	25
第 2 章 元胞自动机的工作原理	26
2.1 元胞自动机的创立	26
2.2 元胞自动机的定义	30
2.2.1 数学定义	30
2.2.2 物理定义	32
2.3 元胞自动机的构成	33
2.3.1 元胞	34
2.3.2 元胞空间	34
2.3.3 邻居	36
2.3.4 演化规则	38
2.4 元胞自动机的工作过程	38
2.5 元胞自动机中的信息处理	41
2.6 元胞自动机的基本特征	43

2.7	三种经典的元胞自动机	46
2.7.1	沃尔夫勒姆的初等元胞自动机	46
2.7.2	康威的“生命游戏”	58
2.7.3	兰顿的“虚拟蚂蚁”	62
2.8	元胞自动机的哲学启示	67
	参考文献	71
第3章	元胞自动机的建模方法	73
3.1	计算机模型	73
3.2	元胞自动机模型	75
3.2.1	元胞自动机模型的抽象性	76
3.2.2	元胞自动机模型的适应性	77
3.2.3	元胞自动机模型的自组织性	78
3.2.4	元胞自动机模型的构成	81
3.3	元胞自动机的建模过程	82
3.3.1	确定被研究系统的性质	82
3.3.2	对系统进行格状分割	83
3.3.3	确定元胞的初始状态	83
3.3.4	确定系统的演化规则	84
3.4	股票市场投资策略演化模拟	85
	参考文献	94
第4章	元胞自动机的复杂性	95
	引言	95
4.1	自然界复杂性与形式语言	95
4.1.1	粗粒化描述与符号序列	95
4.1.2	形式语言和语法复杂性	97
4.1.3	形式语言与自动机等价性理论	99
4.1.4	元胞自动机通用计算与图灵机	101
4.2	元胞自动机演化位型复杂性	104
4.2.1	元胞自动机的语言复杂性	104

4.2.2	几类元胞自动机复杂性层次证明	109
4.3	元胞自动机的复杂性度量	118
4.3.1	熵与信息熵	118
4.3.2	元胞自动机与熵	120
4.3.3	元胞自动机演化行为复杂性度量	121
4.4	小结	123
	参考文献	124
第5章	元胞遗传算法	126
	引言	126
5.1	传统遗传算法	127
5.1.1	遗传算法概述与基本思路	127
5.1.2	传统遗传算法的计算流程	128
5.1.3	传统遗传算法的性能及自身存在的不足	131
5.1.4	小结	133
5.2	元胞遗传算法	133
5.2.1	遗传算法的元胞演化规则算法 (E-CGA)	134
5.2.2	自适应元胞遗传算法 (SA-CGA)	142
5.2.3	加入演化规则的自适应元胞遗传算法 (ESA-CGA)	155
5.2.4	改进 1: 基于保留精英策略的元胞遗传算法	160
5.2.5	改进 2: 引入自适应交叉算子的元胞遗传算法	163
5.2.6	改进 3: 三维元胞遗传算法	167
5.2.7	小结	173
5.3	自适应元胞遗传算法在动态环境下的应用	173
5.3.1	证券投资中的决策问题	173
5.3.2	问题提出	174
5.3.3	传统运筹学方法求解	175
5.3.4	自适应元胞遗传算法求解	177
5.3.5	小结	180
	参考文献	181

第 6 章 元胞神经网络	183
引言	183
6.1 人工神经网络的基本原理	183
6.1.1 生物神经元	184
6.1.2 人工神经元	185
6.1.3 神经网络的结构	188
6.1.4 神经网络的学习方法	188
6.1.5 神经网络的学习算法	190
6.2 元胞自动机与神经网络结合的可行性	191
6.2.1 为什么要结合?	192
6.2.2 结合思想: “帮助”和“取代”	193
6.2.3 小结	194
6.3 基于 BP 神经网络的元胞自动机规则挖掘 (BP-CA)	195
6.3.1 BP 神经网络及算法流程	195
6.3.2 BP-CA 算法	197
6.3.3 建模实例——疾病传染预测	198
6.3.4 小结	201
6.4 自适应元胞神经网络模型 (SCNN)	202
6.4.1 建模思想及理论基础	202
6.4.2 内生时间序列预测模型	203
6.4.3 外生时间序列预测模型	208
6.4.4 小结	213
6.5 元胞遗传神经网络 (CGNN)	214
6.5.1 构建网络	215
6.5.2 网络运行原理及演化步骤	215
6.5.3 计算机仿真	216
6.5.4 小结	219
参考文献	220