

复杂系统的模型

主讲人: 肖人彬

人工智能与自动化学院

rbxiao@163.com

教学重点

重点掌握几个内容:

- ✓元胞自动机模型(离散模型)
- ✓自组织临界性模型(沙堆模型)
- ✓复杂网络模型
- ✓综合集成研讨厅模型



教学重点

三个世界:

- ✓现实世界
- ✓逻辑世界
- ✓ 计算机世界

两重映射:

- ✓建模(现实世界→逻辑世界)
- ✔计算(逻辑世界→计算机世界)



教学重点

认识世界:

✓现实世界→逻辑世界→计算机 世界

改造世界:

✓计算机世界→现实世界



7.1 元胞自动机模型 7.1.1 元胞自动机的创立

- ➤ 元胞自动机(cellular automata,CA)是20 世纪40年代末期最早由波兰数学家乌拉姆和 曼特拉泡利斯在创立蒙特卡罗方法后不久提 出来的
- ▶ 计算机之父冯•诺依曼建立元胞自动机理论, 证明至少有一种自我繁衍的元胞自动机存在

7.1 元胞自动机模型

7.1.1 元胞自动机的创立

- ▶ 20世纪80年代初,S.Wolfram研究了一系列简单的一维元胞自动机规则,即Wolfram规则,80年代末,又提出了著名的FHP模型
- ▶ 元胞自动机是模拟复杂结构和过程的一种计算机模型。元胞自动机方法和相关建模技术是描述、认识和模拟复杂系统行为的强有力工具

7.1 元胞自动机模型 7.1.2 一维元胞自动机及Wolfram规则

▶ 元胞自动机是由细胞阵列和演化规则所组成的离散动态系统,将模型空间以某种网络形式划分为许多单元,每个单元称为元胞或格位

> 每个元胞的状态以离散值表示

7.1 元胞自动机模型 7.1.2 一维元胞自动机及Wolfram规则

》一个元胞机由元胞格点网和一组状态转换规则(演化规则)构成,每一个元胞被赋予一个初始状态

▶ 如果给定一组演化规则和初始状态,就可以研究系统随时间的演化过程

第7章

■ 7.1 元胞自动机模型

7.1.2 一维元胞自动机及Wolfram规则

ightharpoonup 最简单的元胞自动机规则是在指定时间t,每个格位i 只取两种可能的状态 $s_i(t)=0$ 或1,只考虑最邻居格位的一维规则为

 $S_i(t+1) = f(S_{i-1}(t), S_i(t), S_{i+1}(t))$

Wolfram规则

即时间t+1的状态 $s_i(t+1)$ 取决于时间t的三元组 (s_{i-1}, s_i, s_{i+1}) ,其中,f表示某种离散函数

■ 7.1 元胞自动机模型

7.1.2 一维元胞自动机及Wolfram规则

一元胞自动机演化规则是局部的,对指定元胞的状态继续更新需要知道其邻近元胞的状态,一般只取邻接的元胞构成邻居。

对于一维规则二值状态三邻居而言,每组元胞的三邻居可能组态的二进制分别为

111, 110, 101, 100, 011, 010, 001, 000

上式中每组态的值表示每个可能的元胞自动机规则,则共有256条规则

7.1 元胞自动机模型 7.1.2 一维元胞自动机及Wolfram规则

> 这256条规则可用8位二进制数表示。

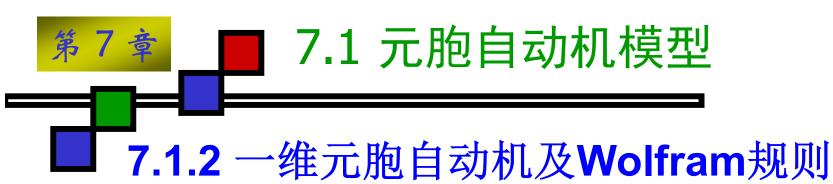
》这样的8位二进制数对应的十进制数即为该规则的编码数。例如,规则110的8位二进制码为

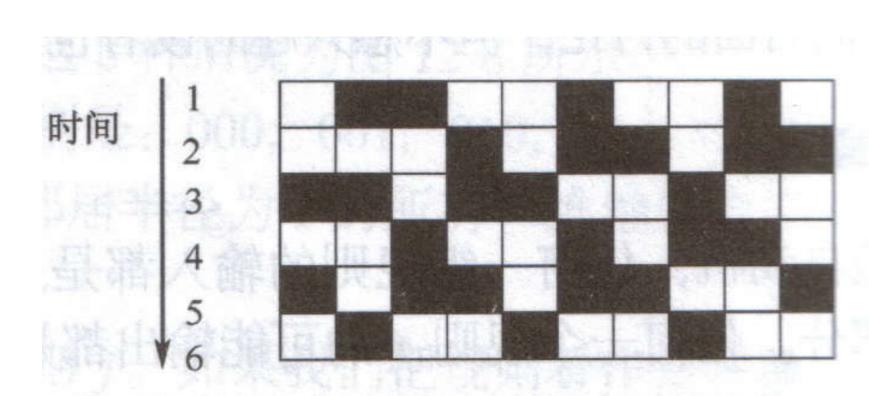
01101110

7.1 元胞自动机模型

7.1.2 一维元胞自动机及Wolfram规则

- ▶ 上述256种演化规则分为4类
 - 经有限时步,几乎全部初始状态都演化成单值均匀状态,如规则132、203、224
 - 演化到不随时间变化的定态,或周期性循环状态,如规则208
 - 演化到非周相图形,演化到混沌状态,如状态150、 151
 - 演化到持续不断的复杂结构

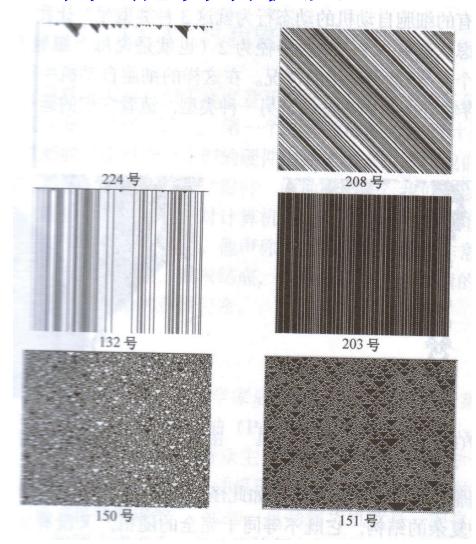


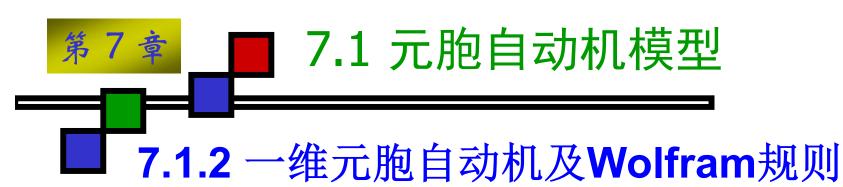


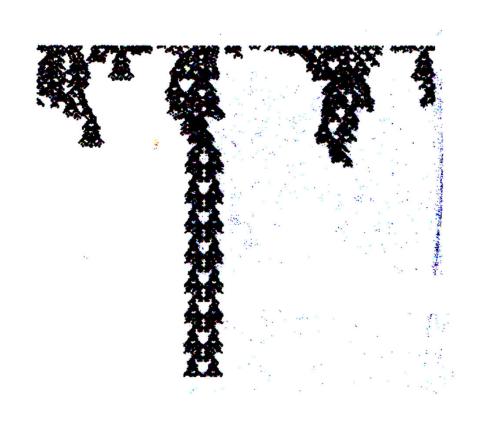


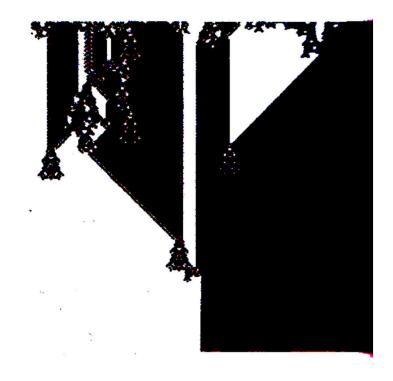
第7章 _ **■** 7.1 元胞自动机模型

7.1.2 一维元胞自动机及Wolfram规则









7.1 元胞自动机模型 7.1.2 一维元胞自动机及Wolfram规则

一元胞自动机的行为模式随着参数值而变化,其规律为

固定行为→

周期行为 →

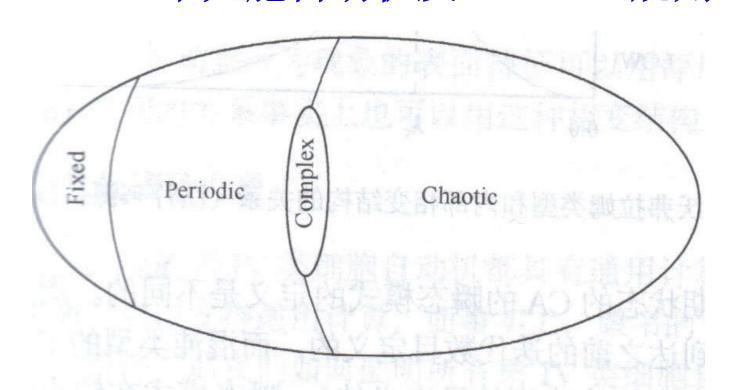
复杂行为→

混沌行为

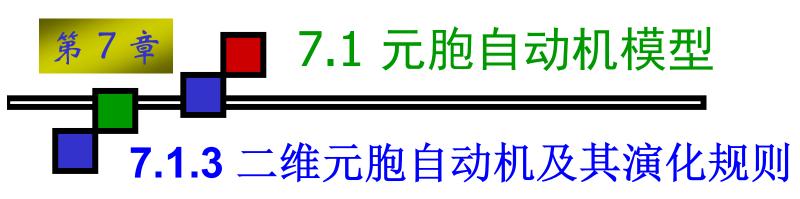
第7章

7.1 元胞自动机模型

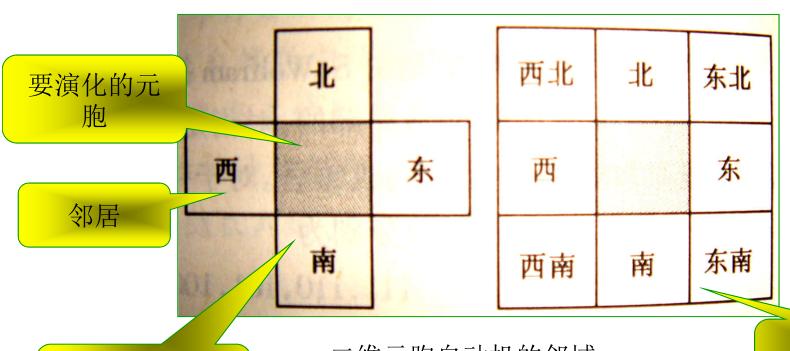
7.1.2 一维元胞自动机及Wolfram规则



1 表示细胞自动机的规则空间(图片来源: Langton 从左至右依次为: 固定、周期、复杂和混沌



> 二维元胞自动机的邻域与边界条件



冯•诺依曼邻域

二维元胞自动机的邻域

莫尔邻域

第7章 7.1 元胞自动机模型

7.1.3 二维元胞自动机及其演化规则

➤ 生命游戏(Game of Life)

规则

每个细胞有两种状态——存活或者死亡,每个细胞只与以其自身为中心的细胞产生互动。

规则1: 当细胞为死亡状态,若周围有3个存活细胞,则该细胞变成存活状态(模拟繁殖)。

规则2: 当细胞为存活状态,若周围有2个或3个存活细胞,保持原样。

7.1 元 胞 自 动 机 模 型

7.1.3 二维元胞自动机及其演化规则

> 生命游戏(Game of Life)

若周围有3个以上存活细胞,该细胞变成死亡(模拟 极度拥挤);

若周围有低于2个一下存活细胞,该细胞死亡(模拟人口稀疏);

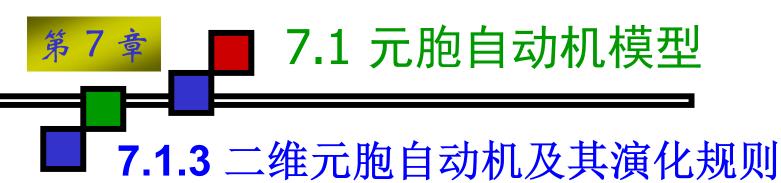
这个游戏也叫康威生命游戏、细胞自动机、元胞自动机

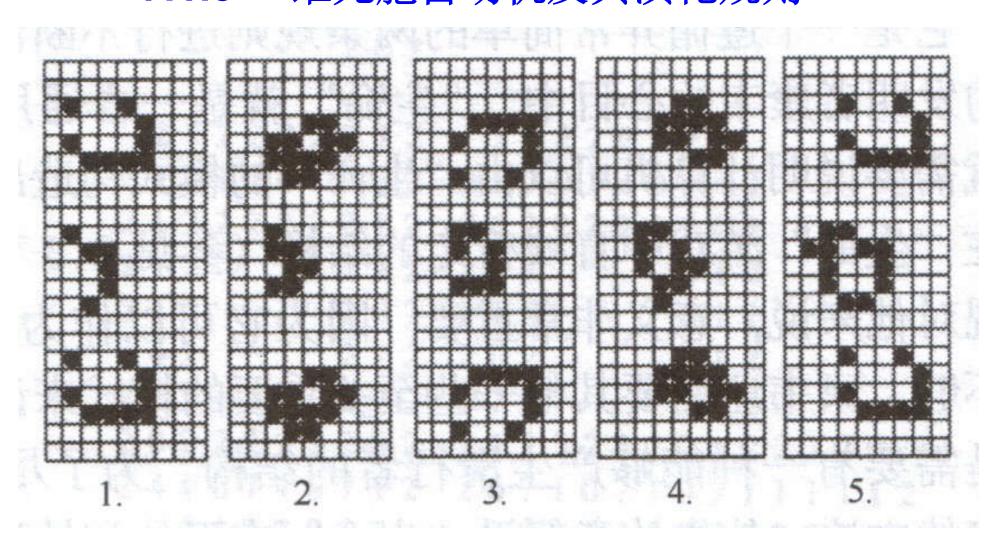
https://www.cnblogs.com/lfri/p/9733883.html

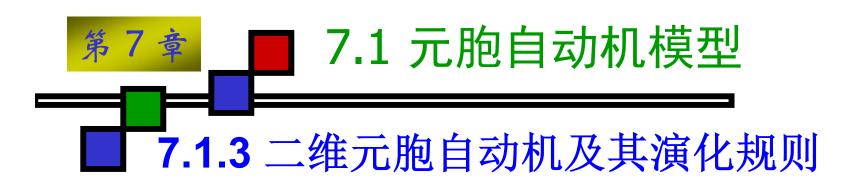
7.1 元胞自动机模型

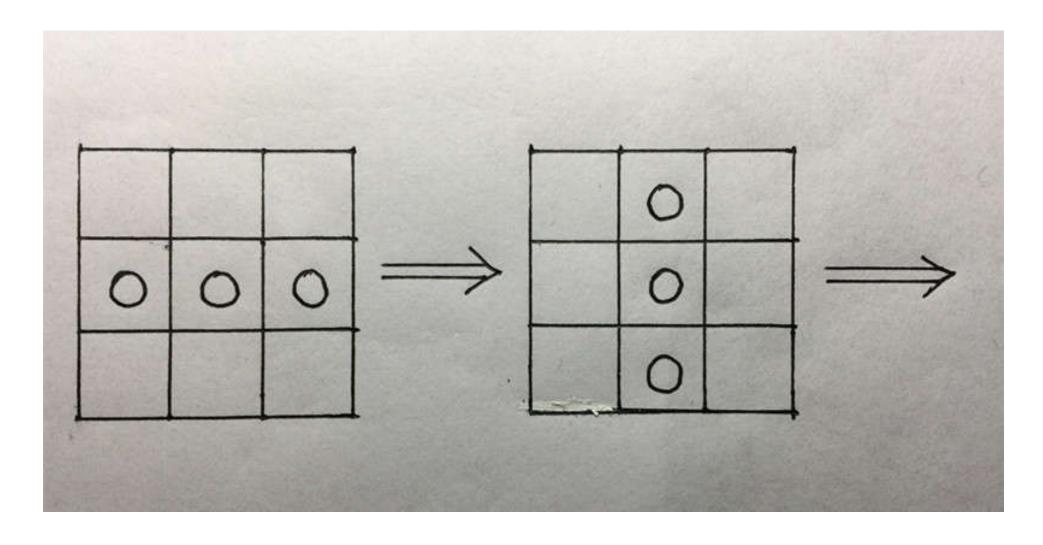
7.1.3 二维元胞自动机及其演化规则

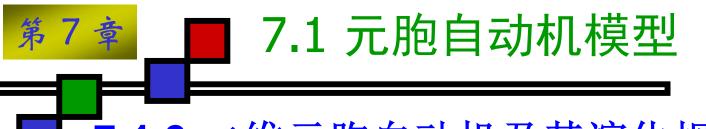
- ▶ 脉冲星: 它周期为3,看起来像一颗爆发的星星
- ▶ 滑翔者:每4个回合它会延右下方移动一格,虽然细胞 早就不是原来的细胞,但它能保持原来额形状
- ▶ 轻量级飞船:它周期为4,每两个"回合"向右走一格
- > 滑翔者枪: 它会不断的产生一个有一个"滑翔者"
- 繁殖者:它会向右进行,留下一个接一个的"滑翔者枪"



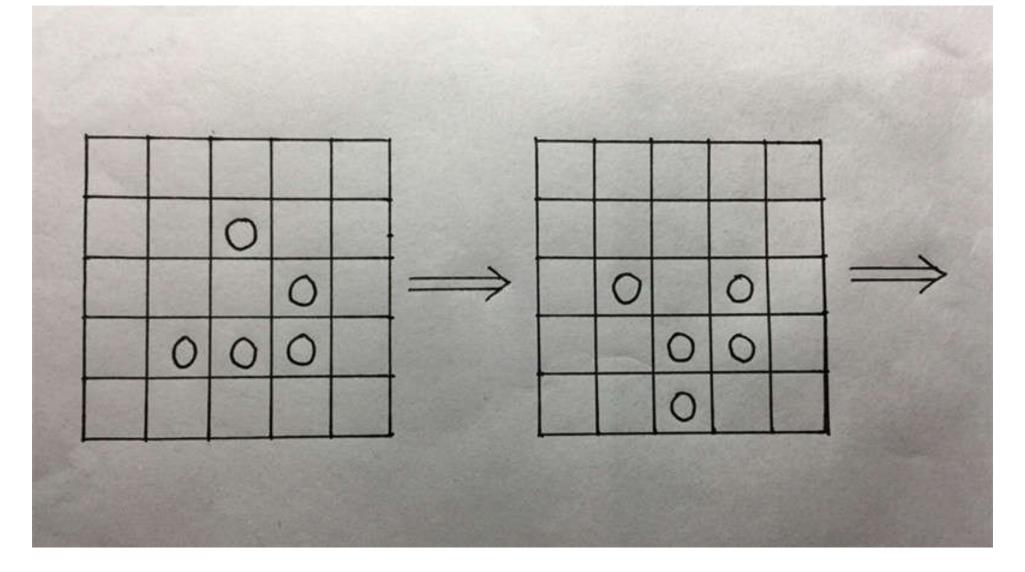








7.1.3 二维元胞自动机及其演化规则





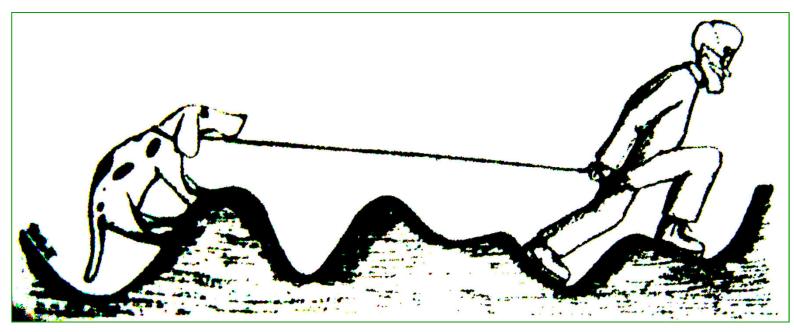
7.2 自组织临界性沙堆模型

■ 7.2.1 1/f 噪声——时间中分形的发现

- 1/f噪声将是一种合成现象
- 大型系统的不同音阶以某种协调的方式作用在一起

> 苏珊的狗模型

简单的开放非平衡系统



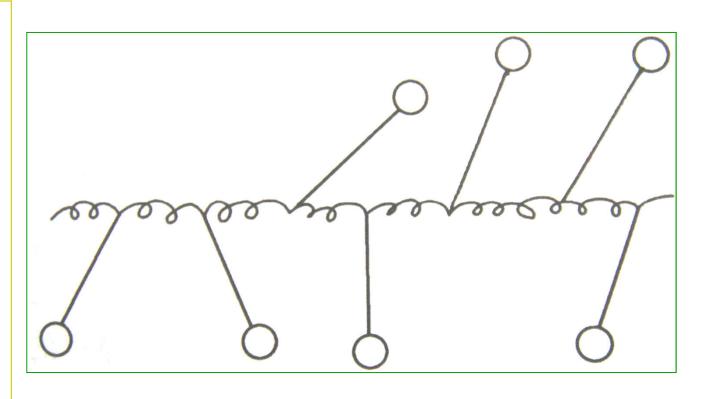
第7章

■ 7.2 自组织临界性沙堆模型

■ 7.2.1 1/f 噪声——时间中分形的发现

> 耦合摆及其自组织临界性

和摆连在一 起的弹簧会 慢慢张紧, 存储能量。 由于摆不断 增加的不稳 定性,就会 有多米诺效 应而导致链 式反应—— 单个的摆可 能会导致其 他摆振动



一条链上的耦合摆



7.2 自组织临界性沙堆模型

■ 7.2.1 1/f 噪声——时间中分形的发现

> 耦合摆及其自组织临界性

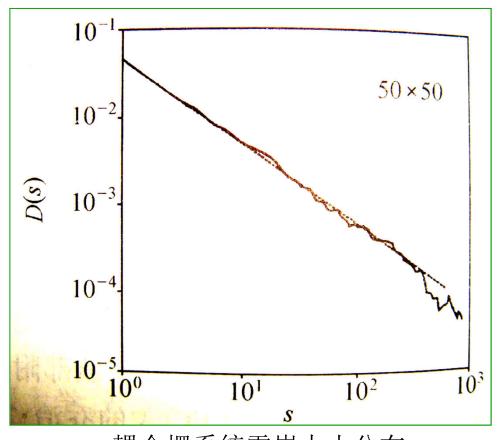
x轴表示雪崩的大小

y轴表示某种大小的雪崩的 数量

大小为s的雪崩的数量服从 一个简单的幂次规律为

$$D(s) = s^{-\tau}$$

其中,幂次τ表示曲线的斜率,近似等于1.1



耦合摆系统雪崩大小分布



7.2 自组织临界性沙堆模型

7.2.2 幂次定律与临界现象

- > 自然界中许多复杂现象都服从幂次定律
- > 经济学方面,也存在幂次规律
- > 人口城市分布方面也存在幂次规律

幂次定律

$$N(s) = s^{-\tau}$$

两边取对数

$$\log N(s) = -\tau \log s$$

线性关系,斜率为τ

自组织临界系统演化到复杂的临界态时,没有受到任何外界作用的干预 自组织过程发生时经历了一个非常长的暂态时期 雪崩时间遵从一种称为古登堡一里特幂次定律的统计规律



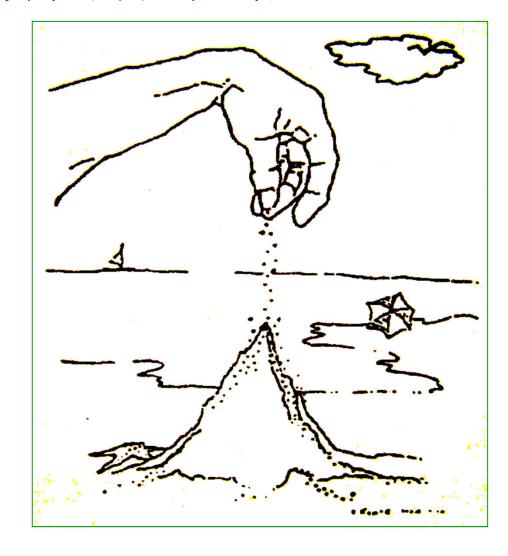
Ⅰ 7.2 自组织临界性沙堆模型

■ 7.2.3 自组织临界性的沙堆试验

> 沙堆试验

不断往沙堆上加沙 粒,可以使沙堆的 斜率增大

当沙堆的斜率增大 到一个临界值时, 会发生沙粒的下滑





▮ 7.2 自组织临界性沙堆模型

7.2.4 自组织临界性沙堆模型及其元胞自动机模拟

- 》沙堆的斜率增大到一个临界值时,会发生沙粒的下滑,一粒沙下滑所触动的范围可以是小区域的,也可以引起大面积滑坡,这称为雪崩
- > 对临界斜率的沙堆继续加沙子时引起的滑坡范围的

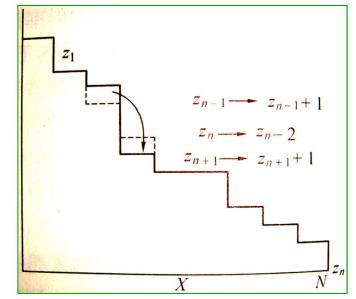
大小具有何种分布?

在第n格位加一粒沙子的操作

$$z_n \to z_n + 1, z_{n-1} \to z_{n-1} - 1$$

当第n格位处斜率超过阀值z_c时,一 粒沙子的下滑可表示为

$$z_n \to z_n - 2, z_{n+1} \to z_{n+1} + 1$$
$$z_{n-1} \to z_{n-1} + 1$$



维沙堆模型的规则

第7章

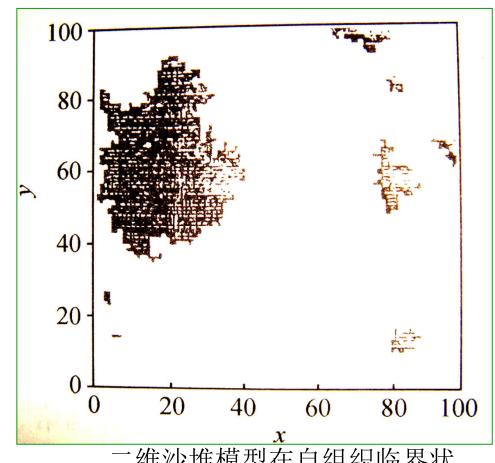
7.2 自组织临界性沙堆模型

7.2.4 自组织临界性沙堆模型及其元胞

自动机模拟

所形成的畴域对于畴域 中格位总数*s*具有负幂函 数律大小的分布

$$D(s) \sim s^{-\tau}$$

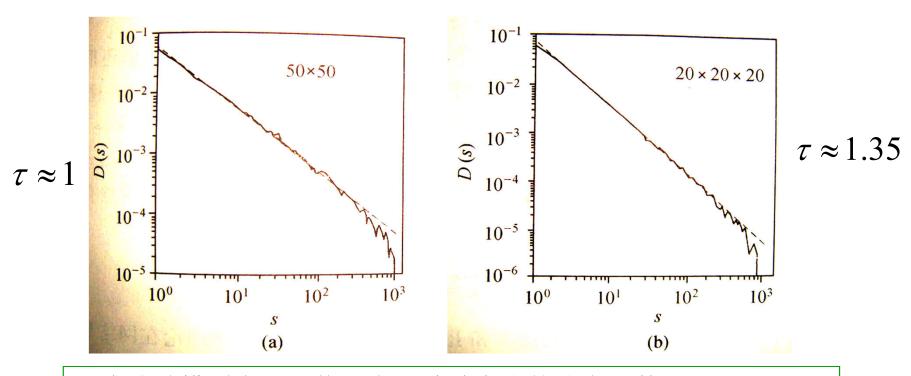


二维沙堆模型在自组织临界状 态下形成的各种大小畴域

第7章

7.2 自组织临界性沙堆模型

7.2.4 自组织临界性沙堆模型及其元胞自动机模拟



二维沙堆模型自组织临界态下畴域大小的分布函数 大s端偏离直线,是由于模型空间的有限性所造成的边缘效应

- > 从自然界到生物界乃至人类社会,网络随处可见
- ▶ 复杂网络是由节点和节点间的连线(边)组成,节点代表所研究系统的组成元素,边表示元素之间的关系(相互作用、相互关联)
- 复杂网络的拓扑结构往往可以描述复杂系统的共同的特征
- ➤ 复杂网络的研究主要集中在三种形式: 随机网络 (ER)、无标度网络(BA)和小世界网络(WS)

7.3 复杂网络模型

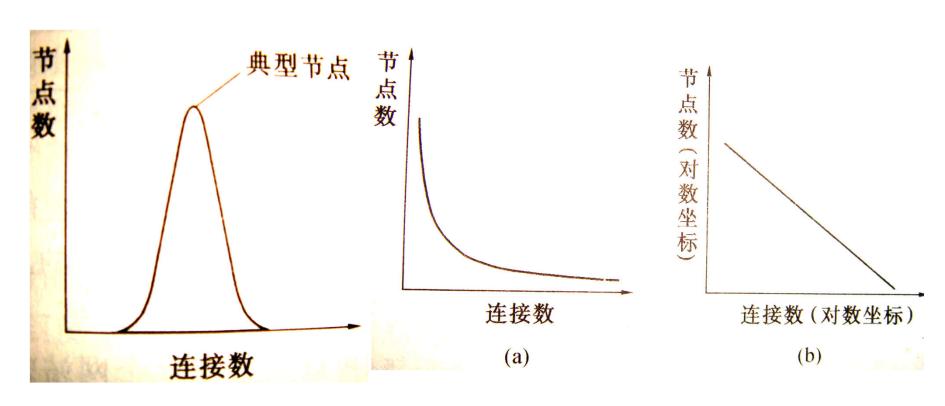
7.3.1 无标度网络及其幂次定律的发现

▶ 1998年,Barabasi和Albert合作开展一个描绘万维网的项目时,发现:万维网基本上是由少数高连接性的页面串连起来的,80%以上页面的连接数不到4。然而只占节点总数不到万分之一的极少数节点,却有1000个以上的连接

➤ 在计算恰好拥有k个连接的万维网页面的数字时,发现网页的连接分布遵循所谓的"幂次定律":任何 节点与其他k个节点相连接的概率与1/k成正比

7.3 复杂网络模型

7.3.1 无标度网络及其幂次定律的发现



节点连接数的钟型分布曲线

节点连接数的幂次定律分布



7.3 复杂网络模型

7.3.2 无标度网络的形成机制

- > 很多不同的系统中都发现了无标度网络结构
 - 社会网络
 - 电子邮件所连接的人际网络
 - 科学论文之间的引用关系所连接的网络
 - 商业领域、生物学领域(细胞中蛋白质交互网络)

无标度网络的一些例子

网络	节点	连接
因特网	路由器	光纤及其他物理连接
万维网	网页	连接地址
组织代谢	参与消化食物以释放能量的分子	参与相同的生化反应
蛋白质调控网络	协助调控细胞活动的蛋白质	蛋白质之间的相互作用
科研合作	科学家	合作撰写论文

7.3 复杂网络模型

- 7.3.2 无标度网络的形成机制
- > 择优连接的"马太效应"
- 具有优先连接的特性并且持续增长的网络,会发展成无标度网络,并且节点的分布也遵循幂次定律
- 增长性和择优连接还解释生物系统中为什么会出现 无标度网络
- > 择优连接的机制常常是线性的
- 如果一个现存节点的连接数是其相邻节点连接数的2倍,那么新节点与它连接的可能性也是与邻近节点连接可能性的2倍

第7章 _ 7.3 复杂网络模型

- 7.3.3 随机网络与无标度网络的鲁棒性与脆弱性
- 网络中大部分节点发生瘫痪,对随机网络不可避免导致网络的分裂
- > 无标度网络不受节点瘫痪而丧失功能的影响
 - 因特网路由器随机失效节点高达80%,剩余的路由器还能组成一个完整的集群并保证任意两节点存在通路
 - 细胞内存在诸如突变和蛋白质出错等错误,但人 体却很少发生严重的后果

7.3 复杂网络模型

- 7.3.3 随机网络与无标度网络的鲁棒性与脆弱性
- 无标度网络对意外故障具有惊人的鲁棒性,本质上是由于这种网络具有非同质拓扑结构
 - 不重要的节点占多数,而重要集散节点只占少数
 - 无标度网络对集散节点的依赖性,导致集散节点的破坏而影响整个网络

Ⅰ 7.3 复杂网络模型

7.3.3 随机网络与无标度网络的鲁棒性与脆弱性

- 为了避免因恶意攻击带来网络的大规模破坏,最有效的方法就是保护好集散节点
- 随机网络由于其本身结构,使其大部分节点出问题时,网络处于瘫痪状态——随机网络的脆弱性
- 无标度网络非集散节点外的相当多节点出故障,网络不致受很大影响,但一些集散节点遭到协同攻击时,网络极易被摧毁——无标度网络的脆弱性

7.3 复杂网络模型

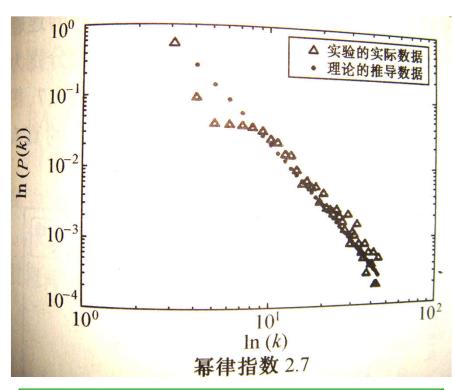
7.3.4 内部演化的无标度网络模型

- ➤ 无标度BA网络存在一定局限性
- > 内部演化的BA无标度网络模型算法
 - 增长性
 - 择优连接性
 - 算法
 - (1) 给一个具有 m_0 个节点, n_0 条边的初始网络
 - (2)按BA模型逐渐增加节点n个:每次增加一个节点,每个节点以m(m< m_0)条新边与已存在的网络节点按度优先连接原则连接
 - (3)在以上 m_0 +n个节点, n_0 +mn条边的网络基础上,每个时间间隔循环执行以下过程:

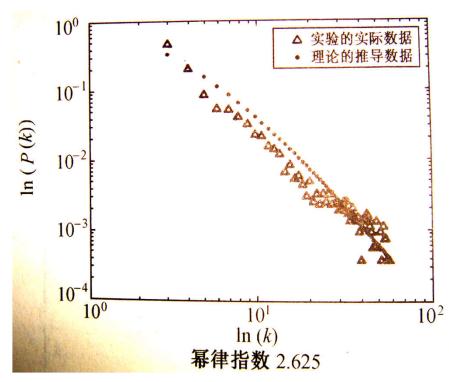
7.3 复杂网络模型

7.3.4 内部演化的无标度网络模型

> 数值模拟



N=10020, $q_1=1$, $q_2=4$, m=3情况下的数值模拟结果

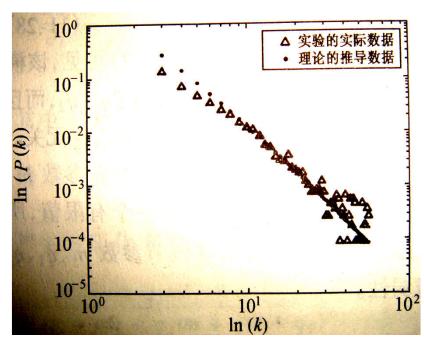


N=60020, $q_1=4$, $q_2=2$, m=3情况下的数值模拟结果

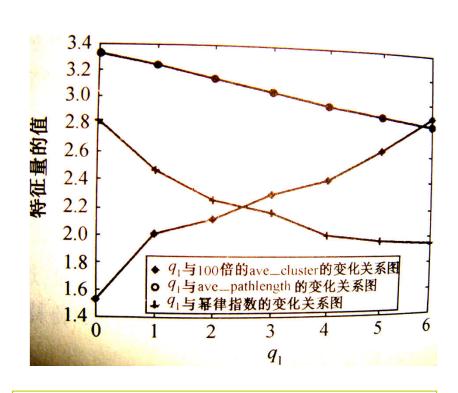
7.3 复杂网络模型

7.3.4 内部演化的无标度网络模型

> 数值模拟



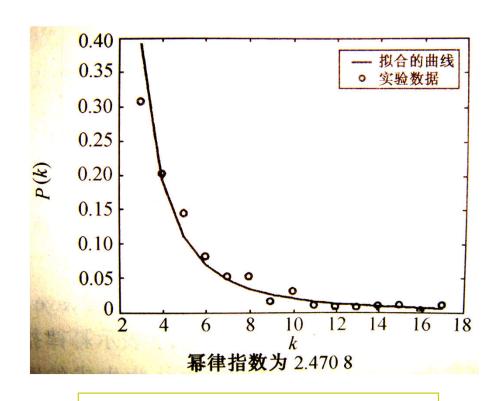
N=10020, $q_1=2$, $q_2=4$, m=2 情况下的数值模拟结果



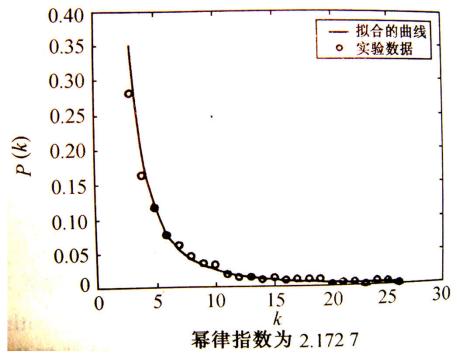
各特征量随 q_1 增大的变化曲线

7.3 复杂网络模型 7.3.4 内部演化的无标度网络模型

> 数值模拟



 q_1 =1的幂律函数曲线拟合图



 q_1 =3的幂律函数曲线拟合图

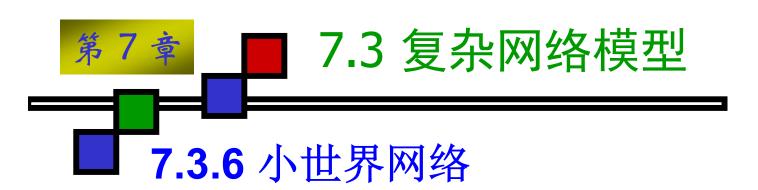
7.3 复杂网络模型7.3.4 内部演化的无标度网络模型

> 结论

- 现实中网络生长的动态演化过程——在BA无标度模型的基础上,网络节点在增长的同时网络内部也在演化
- 在BA网络改进模型中,引入了两个参数 q_1 、 q_2 ,通过理论分析,导出了这个内部演化的增长网络的度分布,仍然具有无标度网络的一般性质,BA网络是其一种特殊情形
- 内部演化的BA无标度网络模型比BA无标度网络更具有广泛的 实际背景,适当调整参数可以更真实地模拟与刻画现实中许多 复杂网络的演化及其特征

7.3 复杂网络模型 7.3.6 小世界网络

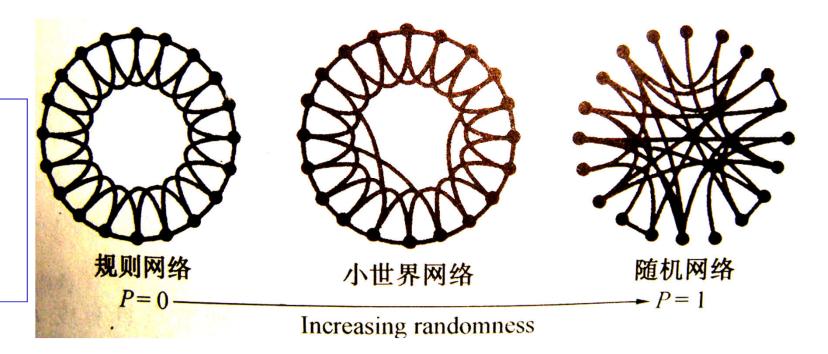
- ▶ 人与人之间的"六度分离"
- ▶ 1998年,Watts和Strogatz提出一种描述人类 社会网络的模型——小世界网络(WS)
- 小世界网络是介于规则网络和随机网络中间的一种网络形式,通过调节一个参数可以实现从规则网络向随机网络的过渡



规则网络

小世界网 络

随机网络



▮ 7.3 复杂网络模型

7.3.6 小世界网络

- > WS小世界网络模型算法
 - 从一个具有N个节点的环形规则网络开始,每个节点有k个邻点相连,以概率P随机地为网络的每条边重新连线,同时保证没有自连接和重复边,这个过程引入了PNk/2条长距离边,它们连接不属于邻点的一部分节点
 - 规则网络和随机网络的度分布、平均集聚程度与平均最短 路径是它们重要的几何性质
 - 规则网络的平均集聚程度高而平均最短路径长; 随机网络的平均集聚程度低而平均最短路径小
- > 对于无向无权网络的平均最短路径为

演化概率为P时节点*i*和节点*j*之间的最短路径

$$L(p) = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N+1)} \sum_{i,j}^{n} d(P)_{ij}$$

7.3 复杂网络模型 7.3.6 小世界网络

 \triangleright 网络的集聚程度可以用集群系数定量描述,对于任一节点i的集群系数 C_i 为

$$C_i = \frac{$$
包含顶点i的三角形个数
以顶点i为中心的三点组的个数

➤ WS小世界网络特性: 平均最小路径和平均集群系数 都随着演化概率的增加而减少

_____ 7.4 综合集成研讨厅模型

7.4.1 综合集成建模思想及其特点

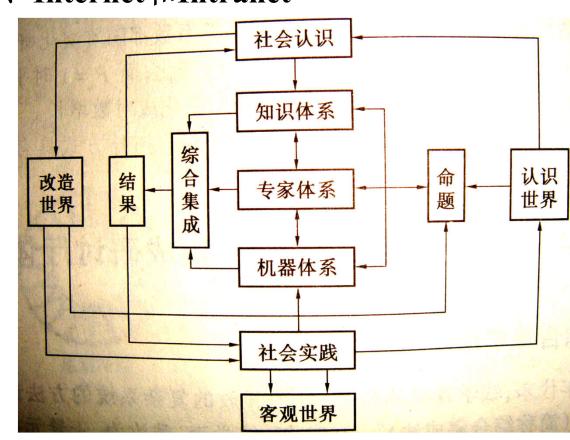
- ➤ 20世纪80年代末,钱学森提出,处理开放的复杂系统的方法论是"从定性到定量的综合集成方法"; 1992年,钱学森、戴汝为、于景元提出"从定性到定量综合集成研讨厅体系"
- 从整体上研究和解决问题的方法,采取人机结合以人为主的思维方法和研究方式,对不同层次、不同领域的信息和知识进行综合集成,达到对整体的定量认识



7.4.1 综合集成建模思想及其特点

> 综合集成研讨厅体系包括专家体系、计算机体系、 知识体系、Internet和Intranet

综合集成研讨厅简单框图



第7章 7.4 综

7.4 综合集成研讨厅模型

7.4.2 综合集成研讨厅体系的两个概念

- > Internet——基于问题的特殊专家及广义专家群体
 - Internet是充满链接的网络结构环境
 - Web页面之间的超链接结构蕴涵了关于超链接网页内容的丰富信息,几乎集成了人类自古至今各方面的经验智慧
 - Internet一方面为协助专家思考给专家个人提供重要的信息资源;另一方面通过搜索引擎、机器学习、文件分析和文本挖掘技术,获取亿万网络用户对所研讨主体的有代表性见解
 - 亿万网络用户通过www涌现出的群体智慧的具体体现
 - Internet可以理解为基于问题的特殊专家,和专家群体一起构成了综合集成研讨厅的广义专家群体



7.4.2 综合集成研讨厅体系的两个概念

- > 综合集成研讨厅体系中专家群体交互
 - 最具主动性、能动性的成员
 - 专家群体中的个人行为和判断随时间推移带有一定的动态 复杂性,这样就会影响周围其他人的思维判断
 - 专家和Internet的交互有两种:一种是Internet协助专家思考,为专家提供重要的信息资源;另一种是Internet为专家群体提供关于某个问题的www参与群体的认识和见解
 - 专家群体中个体之间的互动是动态复杂的,通过互动充分 发挥个人和群体创造性
 - 从系统角度用链接结构分析方法和计算方法理解群体智慧 在综合集成研讨厅体系中的涌现

7.4 综合集成研讨厅模型

7.4.3 专家群体的互动过程

- > 综合集成研讨厅体系理论认为,只有在seminar的自由、开放、反思的氛围中,才能使得求真的力量非常强大
- > 专家群体互动的障碍
 - 习惯性防卫
 - 跳跃性推论
- > 群体的有效互动
 - 反思式开放
 - 讨论
 - 深层次对话
 - 有效互动的技术



7.4.3 专家群体的互动过程

- > 专家群体的有效互动规范
 - 以反思探询为基础的反思式开放环境中的深层次对话和讨 论
 - 融入学习型组织的概念和方法
- > 专家群体的群体智慧
 - 研讨过程中,参与者毫不隐藏地摊出自己的假设和背后的 推理过程,反思自己的思考过程,检验他人发言的假设和 推理,并且鼓励别人也这么做
 - 专家研讨过程是知识产生的过程,也是群体智慧不断涌现的过程

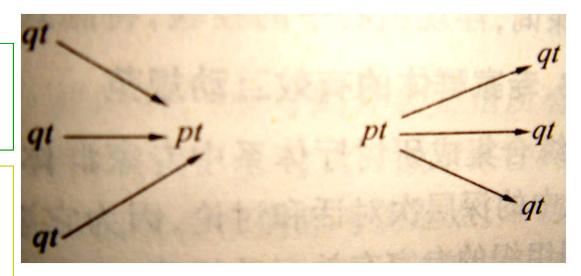
7.4 综合集成研讨厅模型

7.4.4 综合集成研讨厅体系的链接结构分析

> 综合集成研讨厅体系的链接结构

pt→qt表示专家的发言pt对以前的发言qt 有响应

专家每次发言为一个 节点,www参与者代 体关于问题的几种代 表性见解作为相应为相应为 量两个属性,每个个为 见解质量属性,一个为 见解响应属性



广义专家之间的链接关系

专家的发言响应或被响应作为有向边,整个研讨过程形成的整体链接结构可用有向属性图表示

7.4.5 综合集成研讨厅系统的实现技术

- > 综合集成研讨厅体系的实现需要解决的问题
 - 专家体系的建设涉及专家群体角色划分、专家群体不良思维模式的预防及纠正、专家个体之间的有效交互方式、研讨过程的组织形式等问题
 - 机器体系的建设涉及基本系统(包括软、硬件)框架的设计、功能模块和软件模块的分析与综合、软件系统开发方法的选择等问题
 - 知识/信息体系的建设涉及知识,尤其是定性知识和非结构 化知识的表达与抽取问题,知识的共享、重用和管理问题, 信息的获取和推荐等问题



7.4.5 综合集成研讨厅系统的实现技术

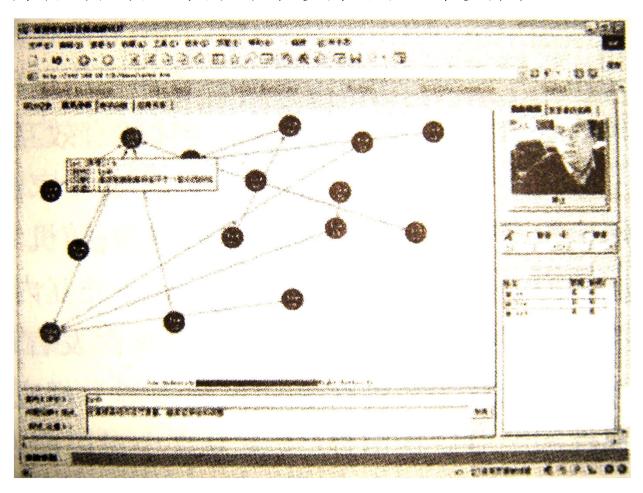
- > 综合集成研讨厅体系的研究成果
 - 综合集成研讨厅的模型
 - 基于www的广义专家与协作推荐技术
 - 研讨组织方法研究
 - 群体智慧的涌现及其可视化
 - 从机器智能到人机结合的群体智慧
 - 面向agent的系统开发方法
 - 基于AHP的定性意见集成方法
 - 可视化的模型集成工具



■ 7.4.5 综合集成研讨厅系统的实现技术

> 综合集成研讨厅雏形系统实现的一个实例

研讨环境运行界面



7.4 综合集成研讨厅模型

7.4.6 综合集成研讨厅模型总结

- ➤ Internet为专家提供资源,是基于问题的特殊专家, 与专家群体构成了广义专家群体
- > 综合集成研讨厅体系的专家群体中存在微妙的动态 复杂性,相互影响
- > 反思开放的有效深层次对话,自觉修正思维模式
- ▶ 广义专家群体的有效互动过程,个体层次上随机无序,但整体层次上导致充满链接的有效结构
- > 广义专家互动过程,类似www的一个网页
- > 综合集成研讨厅体系产生和涌现群体智慧,HWME 是一种应用群体智慧求解复杂巨系统问题的知识系 统模型



> 方格宇宙

》混沌边缘的复杂性探析,自然辩证法 通讯,2009年,第31卷,第2期



》经济金融中的自组织临界性,现代物理知识,2015年,第27卷,第3期

➤网络科学:网络化时代的思维范式, 科学,2018年,第70卷,第3期

第7章 阅读材料

- 》基于小世界网络的经穴相关性涌现计算,中国中医基础医学杂志,2017年,第23卷,第10期
- ▶网络视角下的唐诗,复杂系统与复杂 性科学,2017年,第14卷,第4期

第7章 阅读材料

- ▶一个科学新领域——开放的复杂巨系 统及其方法论,上海理工大学学报, 2011年,第33卷,第6期
- ▶钱学森系统科学思想的形成和发展, 上海理工大学学报,2011年,第33卷,第6期