

第6章



# 第6章

## 复杂系统与复杂性科学概述

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：

- ✓ 复杂系统基本概念
- ✓ 复杂系统的分类
- ✓ 复杂系统理论
- ✓ 复杂性研究
- ✓ 复杂性科学概念、分类以及研究方法

复杂性科学  
基础



### 6.1.1 什么是复杂系统

- 一般认为，复杂系统是由众多存在复杂相互作用的组分（或子系统）组成的，系统的整体行为（功能或特性）不能由其组分的行为（功能或特性）来获得
- Highsmith描述复杂系统的公式
$$\text{复杂行为} = \text{简单规则} + \text{丰富关联}$$
- 复杂系统不满足叠加原理
- 非线性是构成非线性系统的充要条件，而非线性只是构成复杂系统的必要条件，尚不是充分条件

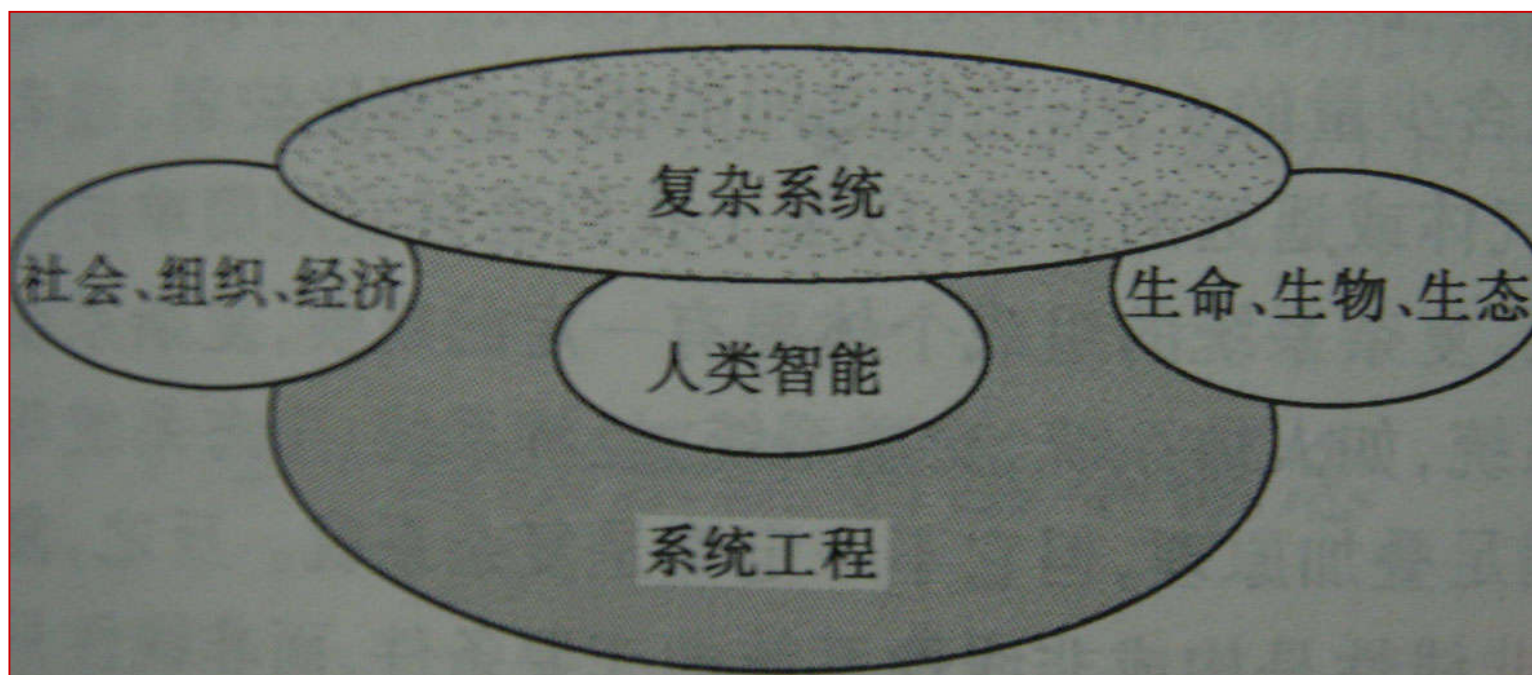
### 6.1.2 复杂系统的研究对象

- 包括自然现象、物理现象、生物现象、生命现象、生态现象、社会现象、经济现象
- 不关心系统组分由哪些物质组成，而只关心组分的功能、行为及组分间的相互关系
- 尽管组分间发生相互关系的规则比较简单，但通过规则的迭代性重复，使系统整体产生复杂的行为

### 6.1.2 复杂系统的研究对象

- 组分与组分间非线性、并行、分散地相互影响着，因此作为整体会产生特殊的行为及现象，然后整体的行为再反馈给各个组分，称这种情况为**涌现特性**
- 系统的行为受每个组分及其相互作用的影响，不能独立地描述整个系统，而且系统的行为也是不可预测的

### 6.1.2 复杂系统的研究对象



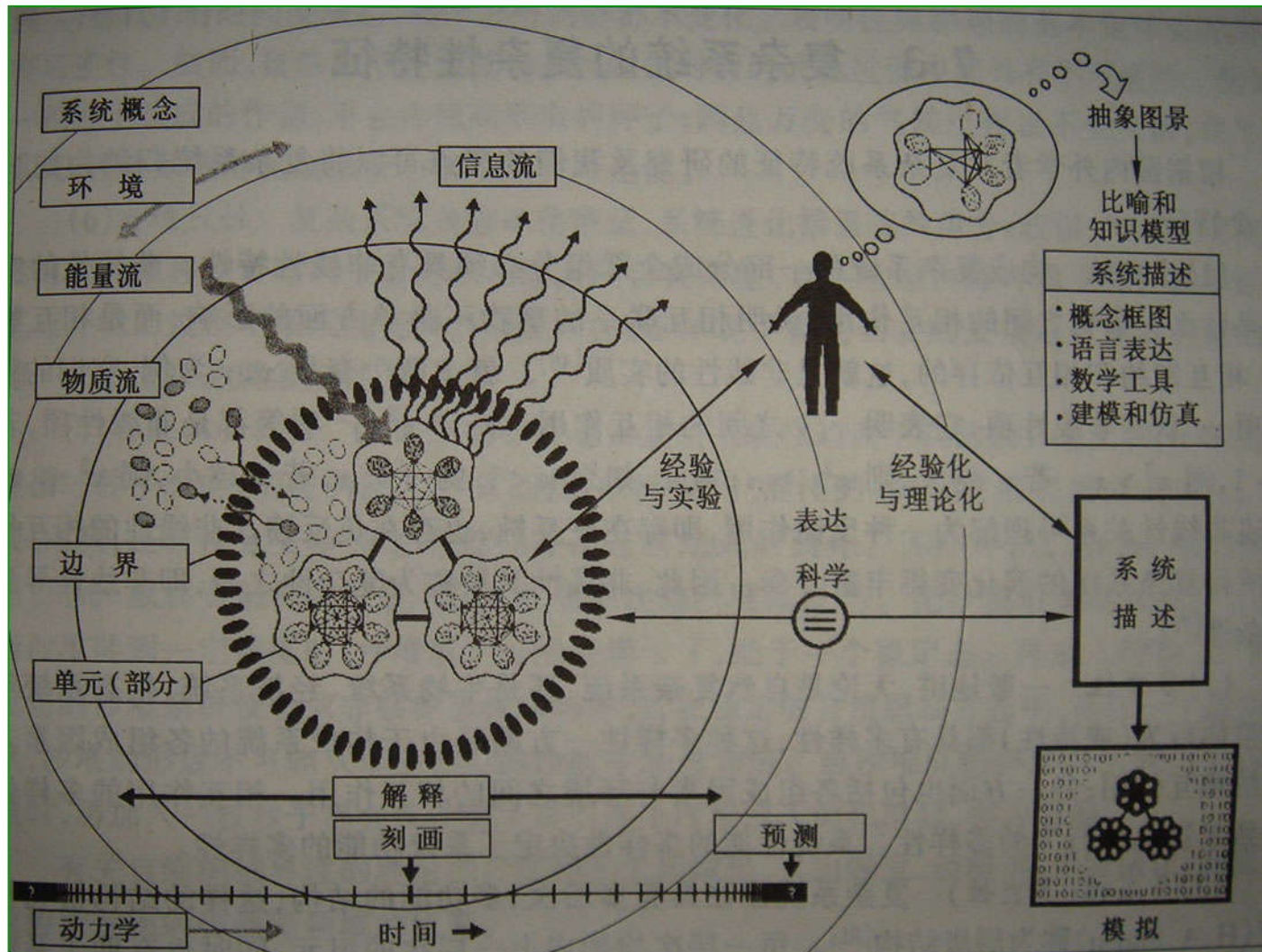
从系统工程到复杂系统



## 第6章

# 6.1 复杂系统的基本概念

## 6.1.3 复杂系统的描述问题



### 6.1.3 复杂系统的描述问题

复杂系统有别于一般简单系统的关键在于：组成系统的部分之间的相互作用、相互联系的含义不同（非同质、多层次结构、强非线性相互作用）



### 6.1.4 复杂系统的特征

- 非线性
- 多样性
- 多层性
- 涌现性
- 不可逆性

### 6.1.4 复杂系统的特征

- 自适应性
- 自组织临界性
- 自相似性
- 开放性
- 动态性

### 6.2.1 多体系统、有机系统、控制系统

- 多体系统（**many-body system**）是由少数几类彼此之间仅由几种关系耦合在一起的大量组分组成的系统
  - 广泛存在于物理、生态、政治和社会经济等领域
  - 组分错综复杂，具有多样性
  - 相互作用的多样性以及组分的数量都是多种复杂性的来源

### 6.2.1 多体系统、有机系统、控制系统

- 有机系统（**organic system**）是由许多高度特化的、相互联系紧密的、不同种类的组分组成的系统
  - 有机系统易于进行功能描述，其中组分的功能是通过在维持系统处于期望状态中的作用加以定义和刻画的
  - 典型的是生物体系统

### 6.2.1 多体系统、有机系统、控制系统

- 控制系统（**cybernetic system**）是把多体系统和有机系统的复杂性结合起来的系统，如神经网络
  - 人是一个如此复杂和统一的控制系统，以至于许多人都 unwilling 研究由人组合起来的系统
  - 对其他系统的刻画用“行为”表示就足够了，而对人的刻画用“行为”表示就不成，因为人有意向性行为

### 6.2.2 非平衡系统、复杂适应性系统、开放的复杂巨系统

- 非平衡系统：由无生命子系统组成的系统，每一个子系统非常简单，子系统之间的相互作用也比较简单
  - 采用自组织理论（耗散结构论、协同学等）来讨论系统演化
  - 讨论此类系统的理论比较规范，有较强的数理基础



### 6.2.2 非平衡系统、复杂适应性系统、开放的复杂巨系统

- 复杂适应性系统：以生物体为背景建立的复杂适应性系统模型
  - 具有一定的智能
- 开放的复杂巨系统：研究由人组成的最复杂系统演化问题的一类模型系统
  - 子系统为人
  - 具体采用人机对话的科学研讨厅体系

### 6.2.3 复杂自然系统、复杂工程系统、复杂社会系统

- 复杂自然系统：最早从研究自然界无生命系统中的复杂性开始
  - 贝纳德对流、激光现象、化学反应振荡等都是复杂自然系统
- 复杂工程系统：根据某种复杂系统模型设计制造出的工程系统或在设计过程中由于不确定因素而出现了预料不到的复杂性所产生的工程系统

### 6.2.3 复杂自然系统、复杂工程系统、复杂社会系统

- 复杂社会系统：社会泛指由于共同物质条件、经济条件、信息条件等而相互联系起来的人群、集团、公司、组织等
  - 人作为子系统参与其中

### 6.2.3 复杂自然系统、复杂工程系统、复杂社会系统

- 系统科学的发展是从研究复杂自然系统，到研究人造的复杂工程系统，再到研究复杂社会系统，即从研究自然物，扩展到研究人工物，再到研究人类社会发展过程



### 6.3.1 远离平衡的非线性自组织理论

- 耗散结构论和协同学都是研究开放的远离平衡条件下的非线性动力学系统的自组织理论
- 非线性动力学系统在开放条件下，和外界有物质、能量、信息的交换，当系统在序参量的作用下，远离平衡，在大量微观粒子自组织协同一致下，会在整体上涌现出新的有序结构——耗散结构
- 非平衡的非线性系统在一定条件下，可以通过涨落被放大（通常是微涨落被放大成为巨涨落），得以实现从无序到有序的转变，从低级有序到高级有序的进化

### 6.3.2 复杂自然系统的自组织临界理论

- 自然界的复杂行为反映了有许多分支（子系统）的大型系统会朝着均衡的临界态发展的一种趋势，这种方式偏离了平衡，而且微小的扰动可能导致大大小小的雪崩
- 大多数的改变是通过灾难性的事件而不是通过遵循一种平和渐变的路线来实现的
- 自组织临界性是目前所知道的产生复杂性的一种普遍机制，可作为一大类标度不变的复杂现象的普遍模型



### 6.3.3 复杂适应系统理论

- 1995年，霍兰《隐秩序——适应性造就复杂性》系统论述了复杂适应系统理论
- 复杂适应系统内部的个体是主动、活的实体，具有适应环境和其他个体的能力，这样的个体主体称为智能体（agent）
- 复杂适应系统的7个特性：聚集、非线性、流、多样性、标识、内部模型和积木
- 复杂适应系统的模型——回声模型

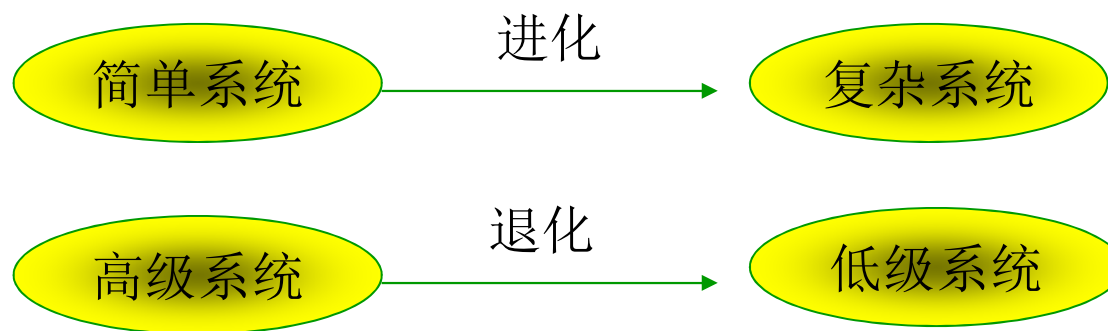
### 6.3.4 开放的复杂巨系统综合集成研讨厅的理论框架

- 人机结合、以人为主、从定性到定量的综合集成研讨厅（钱学森）
- 研讨厅问题求解过程是通过研讨厅成员之间及研讨厅与外界的信息交换来完成的
- 实质是把专家体系、信息与知识体系及计算机体系有机结合起来
- 综合集成方法是以思维科学为基础的

### 6.3.5 高度最优化容限（HOT）理论

- 主要针对复杂工程系统和生物系统，研究复杂工程系统稳健性与复杂性关系的理论（稳健性造就复杂性）
- HOT的思想本质在于通过工程设计或者生物进化来构造一个“精雕细作”的系统
- HOT中的高度最优化强调通过高度结构化、非通用的设计来实现，而容限则强调复杂系统中的稳健性是一个约束和受限量

### 6.4.1 复杂性的起源



传统的进化论无法分析大自然在进化中所呈现处的复杂性

非线性科学和复杂性科学正在揭示大自然和人类社会中不断进化过程中的各种复杂性

进化过程产生复杂性（适应性造就复杂性）

### 6.4.2 复杂性研究的历程

1928年，奥地利生物学家贝塔朗菲 整体论与还原论的关系

1948年，维纳《控制论》 时间不可逆问题

1969年，比利时科学家普利高津 有序与无序的关系

1969年，美国科学家司马贺 人工性和层次结构的复杂性意义

1981年以来，著名科学家钱学森 复杂巨系统及其方法论

1995年，美国霍兰教授 复杂性与适应性的关系

2002年，Carlson和Doyle 复杂工程系统的复杂性与稳健性的关系

### 6.4.3 复杂性的基本概念

- 复杂性必须依赖于它的建模系统所运用的语言
- 复杂性只存在于既不完全无序，也不是完全有序的中间状态，“复杂性：诞生于秩序与混沌边缘的科学”



- 司马贺：系统有多复杂或多简单，关键取决于我们描述它的方式（分层复杂性）
- 欧阳莹之：复杂性概念可以用信息的术语予以量化（信息复杂性）



### 6.4.3 复杂性的基本概念

- 巴克：复杂性是临界性的结果，复杂性就是临界性
- 戴汝为院士指出：复杂性寓于系统之中（系统复杂性）
- 复杂性是一种矛盾的产物，是在宏观与微观之间、有序与无序之间、随机与确定之间、指数分布与幂律分布之间涌现的特定结构

### 6.4.4 复杂性的分类

➤ 结构复杂性:

在空间维由整合和区别生成结构复杂性

➤ 功能复杂性:

在时间维由整合和区别生成功能复杂性

➤ 组织复杂性:

组织复杂性是指组织的差异性，包括横向差异、纵向差异、空间分布差异三个方面

### 6.4.4 复杂性的分类

- 算法复杂性

利用计算工作量来度量系统的复杂性

利用信息量来度量系统的复杂性

- 确定性复杂性

确定性数学方程和吸引子；反馈过程；对初始条件的敏感性和分叉行为；确定性混沌和奇怪吸引子

- 集成复杂性（集聚复杂性）：研究系统的组成单元及它们之间的相互作用对系统整体涌现行为的影响

### 6.4.4 复杂性的分类

➤ 物理复杂性

自然系统中的复杂性：湍流、激光、厄尔尼诺现象、泥石流

➤ 生物复杂性

比前者复杂得多：生长性、适应性、智能性；个体差异性、种群多样性；复杂程度超巨性

➤ 经济社会复杂性

更加复杂，可能产生结构的不稳定性、突变性

### 6.5.1 复杂性科学的创立

- 20世纪30~40年代，提出研究方法的整体论
- 20世纪70年代以后，以耗散结构论、协同学、突变论、混沌学、分形理论、超循环理论、孤子理论等为代表的非线性科学取得重大成就，动摇了“确定论”（只要知道初始条件就可以决定未来的一切）
- 20世纪80年代以来，伴随着微计算机技术的发展，跨学科交叉研究试图在生命系统、免疫系统、人脑系统、经济系统等不同的复杂系统之间找出共性——复杂性（以圣菲研究所SFI为代表）

### 6.5.2 复杂性科学的概念

- 线性科学——系统论、信息论、控制论
- 非线性科学——耗散结构论、协同学、突变论、混沌学、分形理论
- 复杂性科学——研究复杂系统的理论
  - 探究复杂系统的复杂性（来源、表现），研究构成复杂系统在众多组分（子系统）之间及其与环境之间相互作用下，系统演化产生整体涌现性（特性、特征、行为、功能）的机理和一般规律的科学
  - 是一门多学科交叉的新兴科学
  - 建立了非线性、非平衡、复杂整体论的崭新思维模式



### 6.5.3 复杂性科学思想方法的启示

#### ➤ 把握整体

- 将复杂事物不是分解为组成部分而是将其作为一个整体来理解其复杂性的方法

#### ➤ 了解涌现

- 了解涌现作为一种世界观，指导我们不要试图强调计划或管理事情的重要性，而应该强调激发自组织过程的方法
- 启示：组织管理者要减少计划和控制，激发自组织

### 6.5.3 复杂性科学思想方法的启示

#### ➤ 了解相干环境


- 组织管理者要了解相干环境，应创造自组织产生的条件，创造信息凝聚而非仅仅是兴趣共享

#### ➤ 了解产生凝聚的能力

- 组织管理者最重要的不是组织的集体力量而是个人产生凝聚的能力

### 6.5.3 复杂性科学思想方法的启示

- 整体和部分的共同进化
  - 既不要只是自上而下，也不要只是自下而上
- 超级进化
  - 超级进化指进化过程即规则本身也在进化
  - 组织管理者应深入研究超级进化所带来的“规则在改变”
- 了解奇异性
  - 复杂世界里，预测是不可能的
  - 不要预测未来，最好的预测方式是去创造它

- 
- 复杂性与创造性思维，江南大学学报 (人文社会科学版)，2010年，第9卷，第2期
  - 复杂性科学的融贯方法论，科学技术哲学研究，2010年，第27卷，第1期