

第2章

第2章

耗散结构论

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：

- ✓ 非平衡热力学中平衡态、非平衡态、对称性、序等基本概念以及最小熵产生原理
- ✓ 耗散结构论概要
- ✓ 耗散结构的形成条件
- ✓ 耗散结构论的哲学思想

复杂性科学
基础

静止的世界 演化的世界

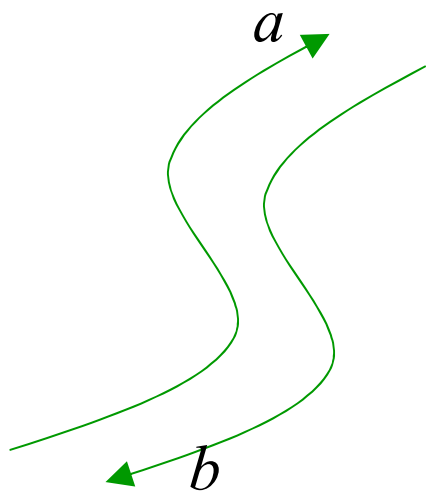
2.1.1 牛顿力学中时间的可逆性

牛顿力学

$$F = m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}$$

时间反演对称

已知过去，预知未来



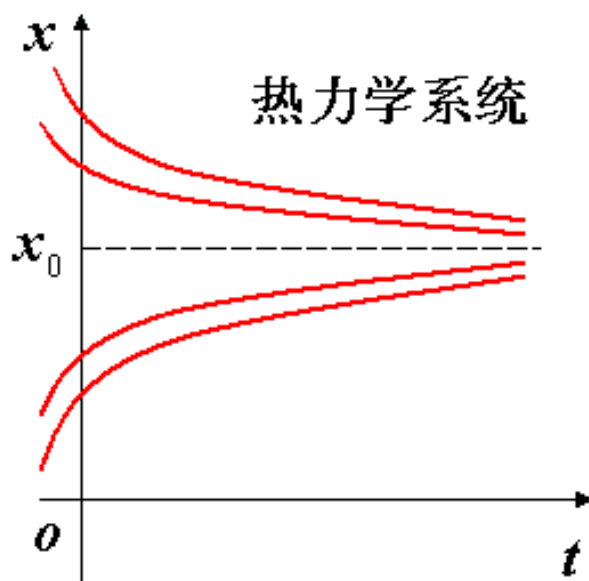
可逆轨迹

基本方程是时间反演对称

无论时间向前，向后一样

2.1.2 热力学中时间的不可逆性

- 热力学第一定律（能量转换和守恒定律）
- 热力学第二定律（能量传递方向的规律）



时间的不可逆性：

初始温度不均匀的金属棒，随着温度传递，达到温度平衡后，永远不会回到初始状态

世界上没有后悔药！

2.1.2 热力学中时间的不可逆性

➤ 热传递过程傅立叶方程

$$\partial T(x, t) / \partial t = -\lambda \partial^2 T(x, t) / \partial x^2$$

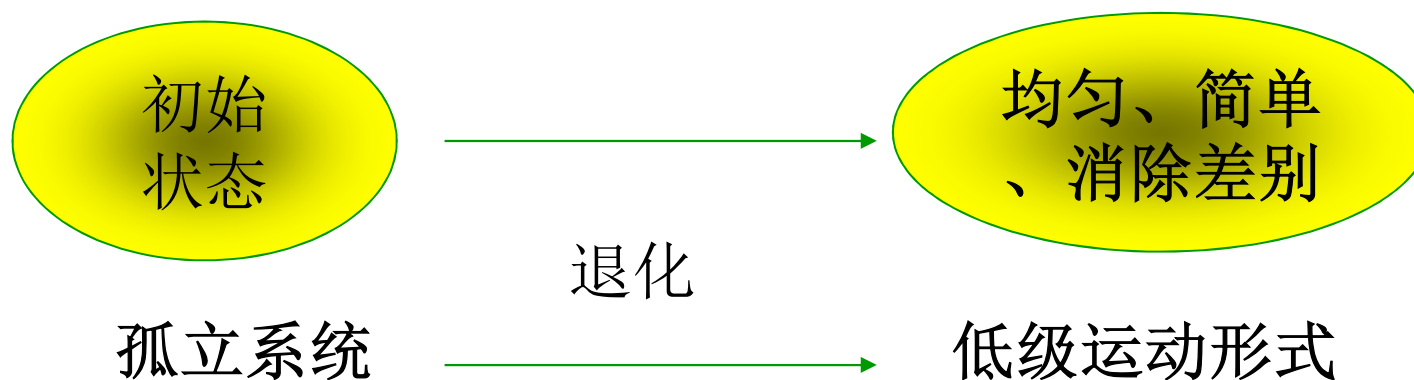
对方程时间反演 $t = -t$

则有

$$\partial T(x, t) / \partial t = \lambda \partial^2 T(x, t) / \partial x^2$$

显示该方程具有时间反演的不对称性

2.1.3 两种时间箭头之间的矛盾



可逆与不可逆、有无时间箭头问题，反映了存在于物理学中动力学与热力学之间的重大间隙。同时，时间箭头也构成了物理学、化学等研究无生命的科学与生物学、社会学等研究生命的科学的基本问题。

2.1.3 两种时间箭头之间的矛盾

达尔文的进化论：

生物系统总是从简单、单一和均匀向复杂、多样和不均匀演化。

——进化

静止世界图象



演化世界图象

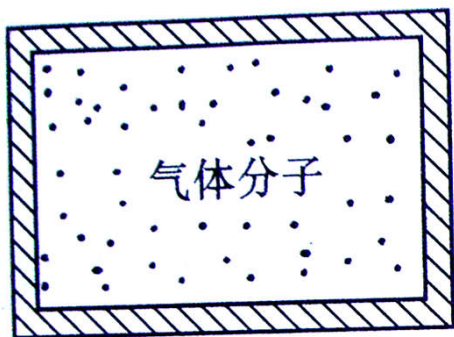
退化的时间箭头



进化的时间箭头

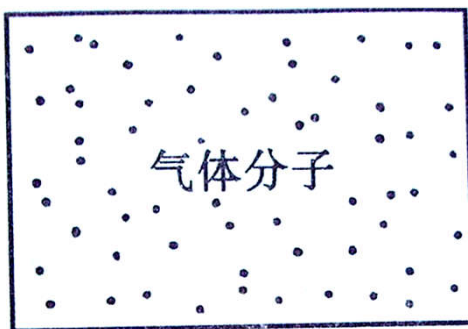
2.2.1 孤立系统、封闭系统和开放系统

- 热力学以大量微观粒子（分子、原子、中子等）组成的“宏观系统”作为研究对象。



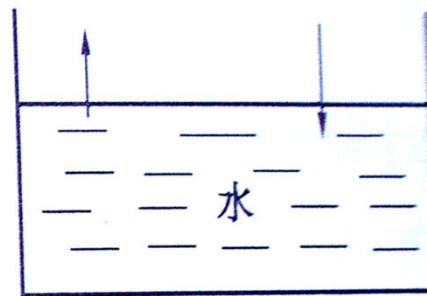
(绝热壁)

孤立系统（不受外界影响的系统，系统内部发生的过程是自发的）



(导热壁)

封闭系统（系统与外界之间有能量交换（做功、传热））



(开口容器)

开放系统（与外界既有能量交换又有物质交换）

2.2.2 平衡态与非平衡态

➤ 系统状态

- 系统状态是指从系统中可以识别、观测到的特征、状态与态势等

➤ 系统参量

- 宏观参量是由大量分子的集体作用而产生的平均效应决定的

2.2.2 平衡态与非平衡态

➤ 平衡态

- 系统的参量随时间变化达到一种不变的状态(定态)
- 没有外界影响
- 具有空间的均匀性

➤ 非平衡态（不具平衡态的任一特征）

- 状态参量不随时间变化，达到定态
- 定态系统内不存在物理量的宏观流动

2.2.2 平衡态与非平衡态

➤ 对称性和有序

- 事物某种属性经过一定的变换仍保持不变的属性，称为对称性
- 事物之间或者内部各个要素之间关系具有的一定的次序称为序
- 对称性越高，有序度越低

“人有悲欢离合，月有阴晴圆缺”

- 平衡态比非平衡态更无序，具有更多对称性

2.2.3 熵和不可逆性

➤ 熵的概念的提出

- 热力学系统处于平衡态时，均匀排列的概率占压倒性多数，而相对不均匀排列几乎不存在

（盒子均匀分布粒子的概率大于不均匀分布的概率）

- 为什么（p.23）

2.2.3 熵和不可逆性

➤ 熵的概念的提出

■ 热力学中的物理量

熵

$$S = k \ln W$$

其中， k 为波尔兹曼常数， $k=1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ；
 W 为热力学几率

■ 均匀分布对应于最大的热力学几率 W_M

$$S_M = k \ln W_M$$

2.2.3 熵和不可逆性

- 熵的概念是克劳修斯直接从热力学第二定律引入的
- 孤立系统熵增加的过程是不可逆的
 - 一个孤立系统会自发地从非平衡态发展成为平衡态
 - 决不会自发地从平衡态返回非平衡态

2.2.3 熵和不可逆性

- 对于开放系统热力学第二定律

$$dS = dS_e + dS_i$$

其中， dS 为开放系统的熵；

dS_e 表示熵流，反映系统与外界之间熵的交换

dS_i 表示系统内部熵产生，不能为负

即 $dS_i \geq 0$ 或 $dS \geq dS_e$

- 系统能量必须守恒，熵不必守恒

2.2.4 最小熵产生原理

➤ 最小熵产生原理

热力学第二定律指出 $dS_i \geq 0$ ，即熵产生率必不能为负

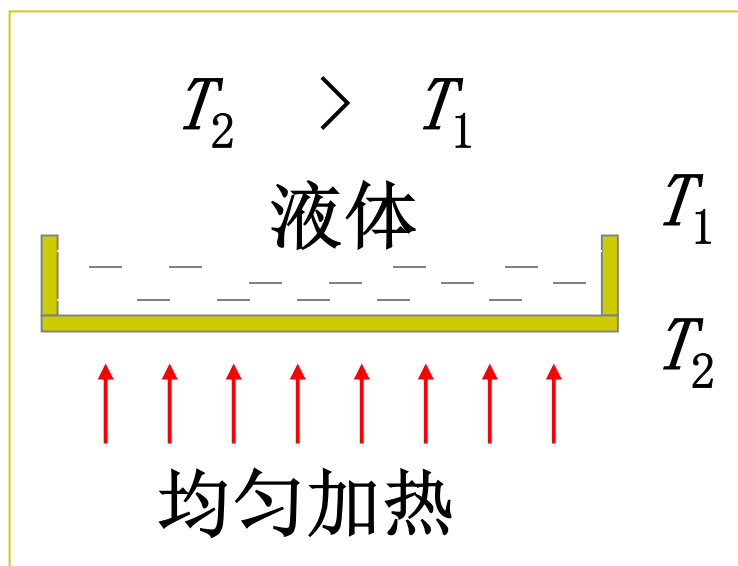
平衡态：熵极大

非平衡态：只要将非线性条件维持在线性区内，并且系统达到定态，这时熵产生率必定比非定态时小。此即**最小熵产生原理**，它表明：

热力学系统总是朝平衡态或尽可能靠近平衡态的目标演化，即朝着无序、均匀、低级和简单的方向发展。

2.3.1 自组织现象——某一系统中自发形成的时空有序结构或状态

1、贝纳德对流



2.3.1 自组织现象——某一系统中自发形成的时空有序结构或状态



贝纳德对流形成正六边形的对流格子

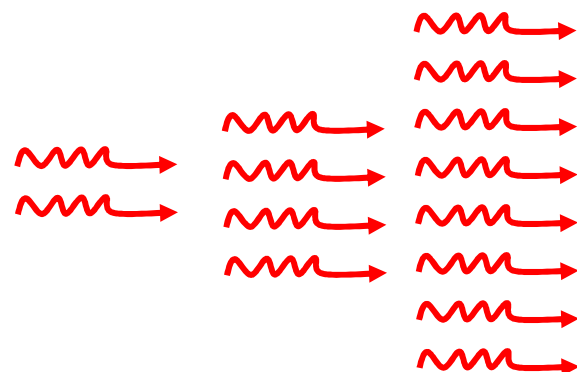
2.3.1 自组织现象——某一系统中自发形成的时空有序结构或状态

2、激光

自然光——频率、相位、偏振方向不同

激光——同频率、同相位、同偏振方向

受激辐射



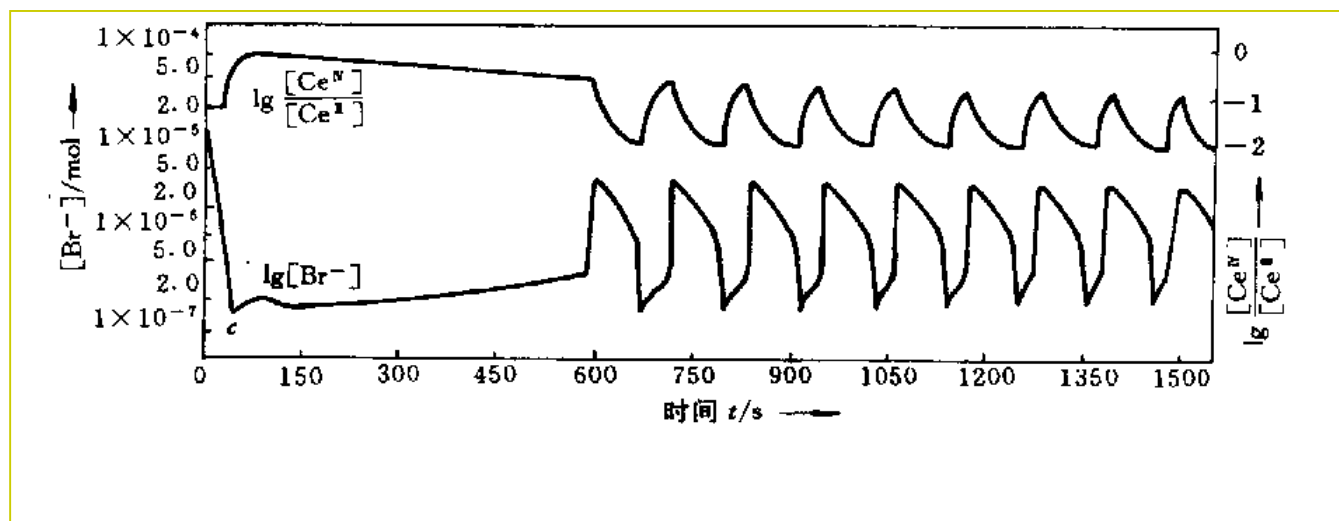
具有自组织特征

2.3.1 自组织现象——某一系统中自发形成的时空有序结构或状态

3、化学中的B-Z反应

化学溶液颜色的周期性变化 ——时间周期

化学振荡



化学钟

时间有序结构

2.3.1 自组织现象——某一系统中自发形成的时空有序结构或状态

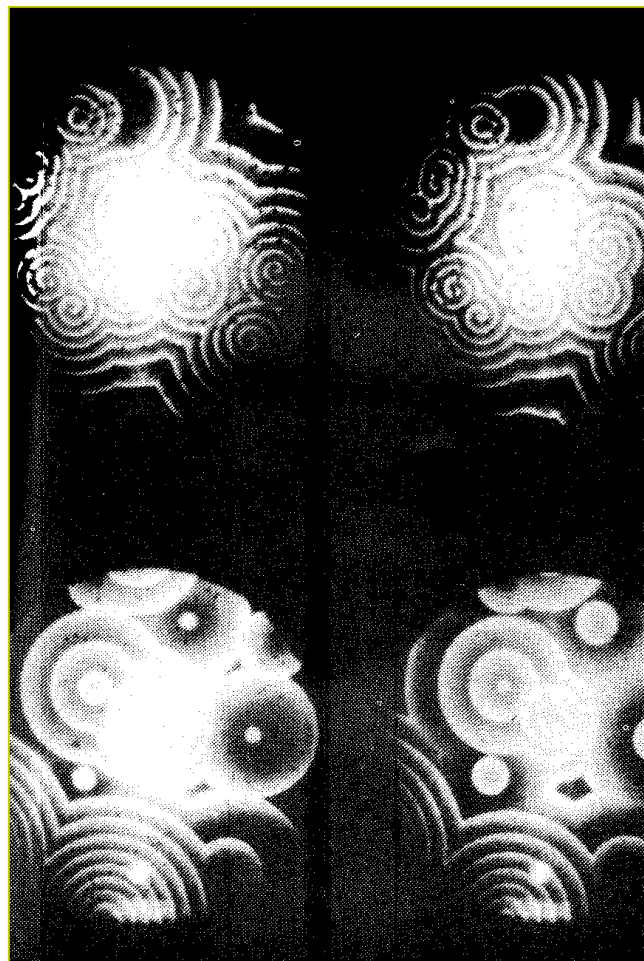
3、化学中的B-Z反应

化学波

信息由中心向外传播
空间对称性发生破缺

具有自组织特征

非对称性——
生命的基本特征



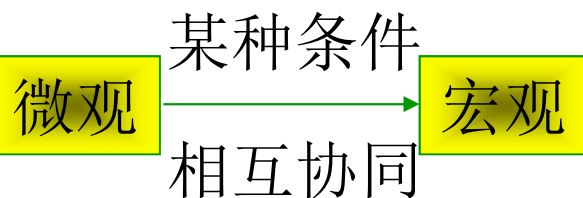
2.3.1 自组织现象——某一系统中自发形成的时空有序结构或状态

4、生物界昆虫

蜜蜂低等昆虫

令人叹为观止的精美
蜂窝

蜜蜂群的自组织现象



2.3.2 耗散结构论大意

- 耗散结构理论研究一个开放系统由混沌向有序转化的机理、条件和规律
- 当外界条件或系统的某个参量变化到一定的临界值时，通过涨落发生非平衡相变，就有可能从原来的混沌无序状态转变为一种时间、空间或者功能有序的新状态
- 这种宏观有序结构，需要不断的与外界交换物质和能量，以形成或者维持新的稳定结构

2.3.2 耗散结构论大意

- 这种需要耗散物质和能量的有序结构就称为耗散结构
- 系统在一定条件下能自发地产生的组织性和相干性称为自组织现象
- 耗散结构论——非平衡系统的自组织理论，研究耗散结构的形成条件和机理、稳定性及其演变规律

2.3.3 稳定性及分岔理论

单摆初始摆角 $\theta = 0^\circ$

或者 $\theta = 180^\circ$

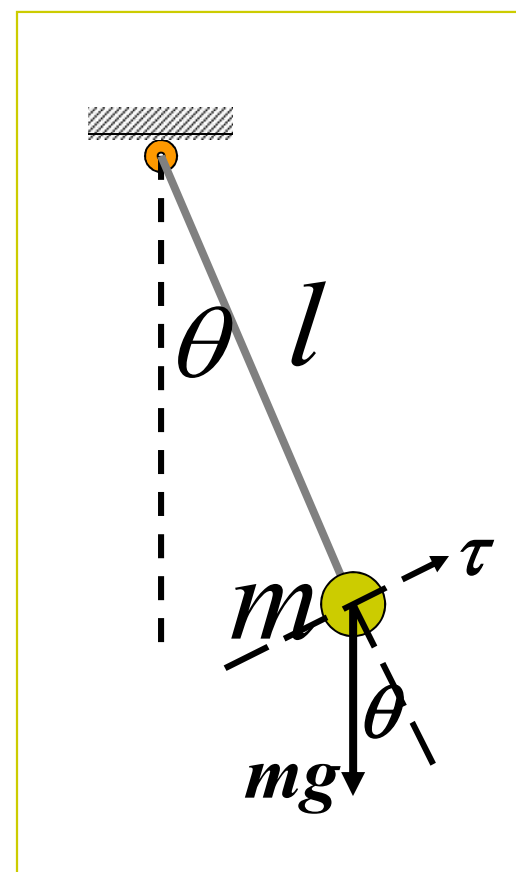
无外力迫使它离开

则永远停留在初始位置

称为平衡状态

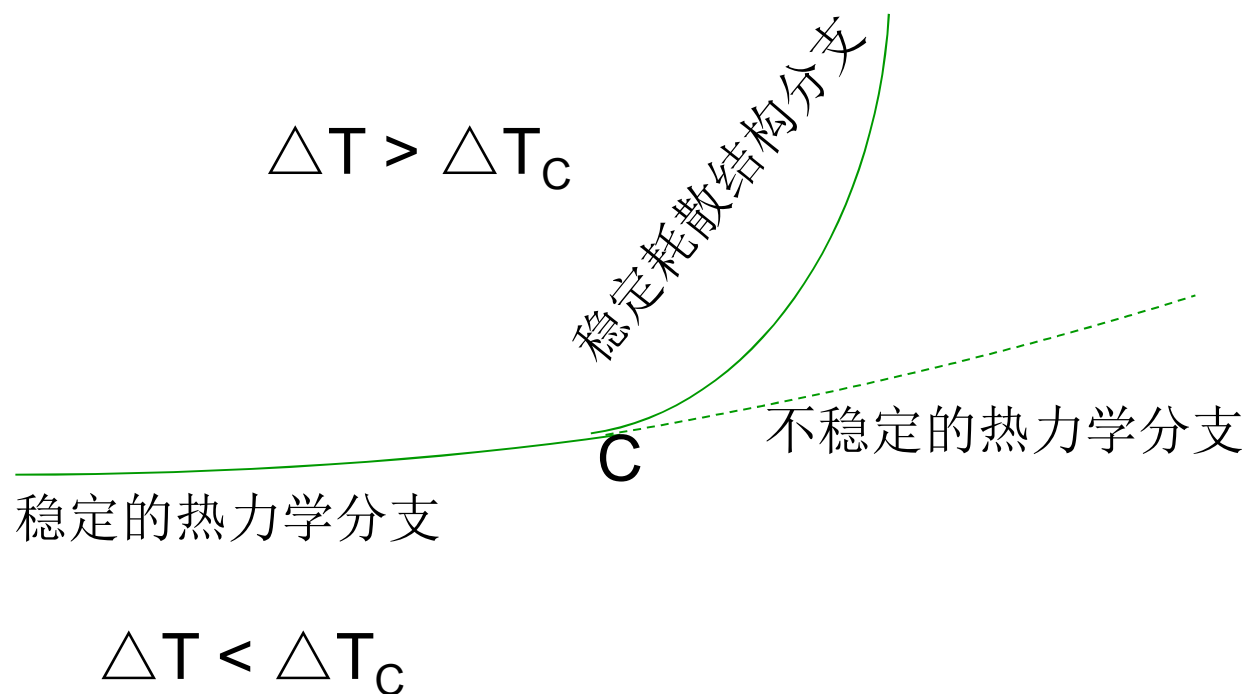
$\theta = 0^\circ$ 稳定的平衡

$\theta = 180^\circ$ 不稳定平衡



2.3.3 稳定性及分岔理论

► 热力学分支与耗散结构分支



2.3.3 稳定性及分岔理论

➤ 稳定性与分岔

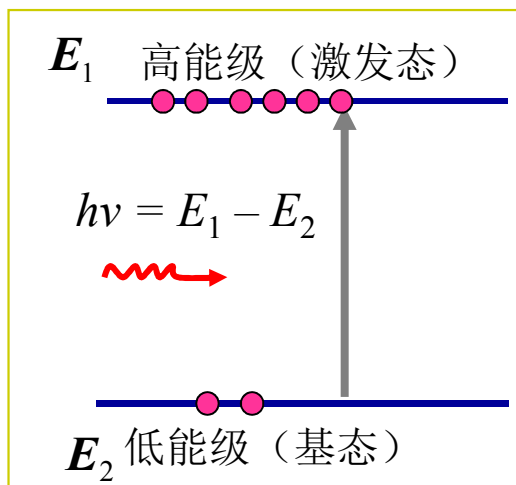
- 非平衡相变：热力学分支失稳使系统跃迁到耗散结构分支
- 非平衡相变必须在平衡条件下产生，且宏观结构发生突变

➤ 从热力学分支失稳到耗散结构分支的突变

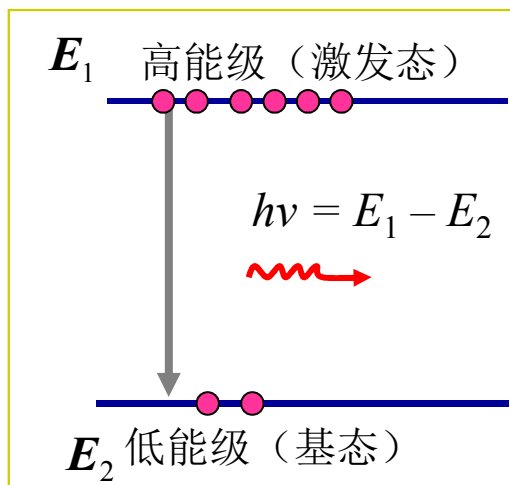
- 非线性的奇特作用，热力学分支失稳收敛到耗散结构分支上

2.3.4 激光中的稳定性与分岔问题

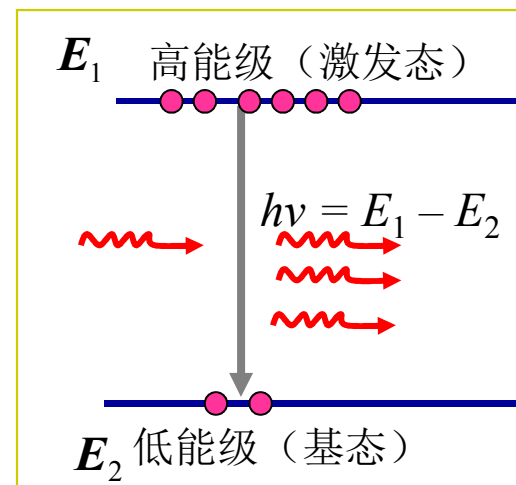
➤ 原子受激发光



受激跃迁



自发辐射



受激辐射

2.3.4 激光中的稳定性与分岔问题

➤ 激光产生的思想

- 利用光泵激发基态原子到高能态，系统偏离平衡态
- 光泵超过一个阈值，激发态原子数大于基态原子数，形势急剧变化，处于激发态原子逐次放大，产生相位一致、方向一致、相干性极好、强度很大的辐射场——激光

2.3.4 激光中的稳定性与分岔问题

➤ 激光中的稳定性与分岔问题

- 控制光泵强度增加大于光损耗系数时，热力学分支失稳，离开热力学分支的解的系统会自发地演化到有序的耗散结构分支上

原来，

神奇的激光

是这样出现的！

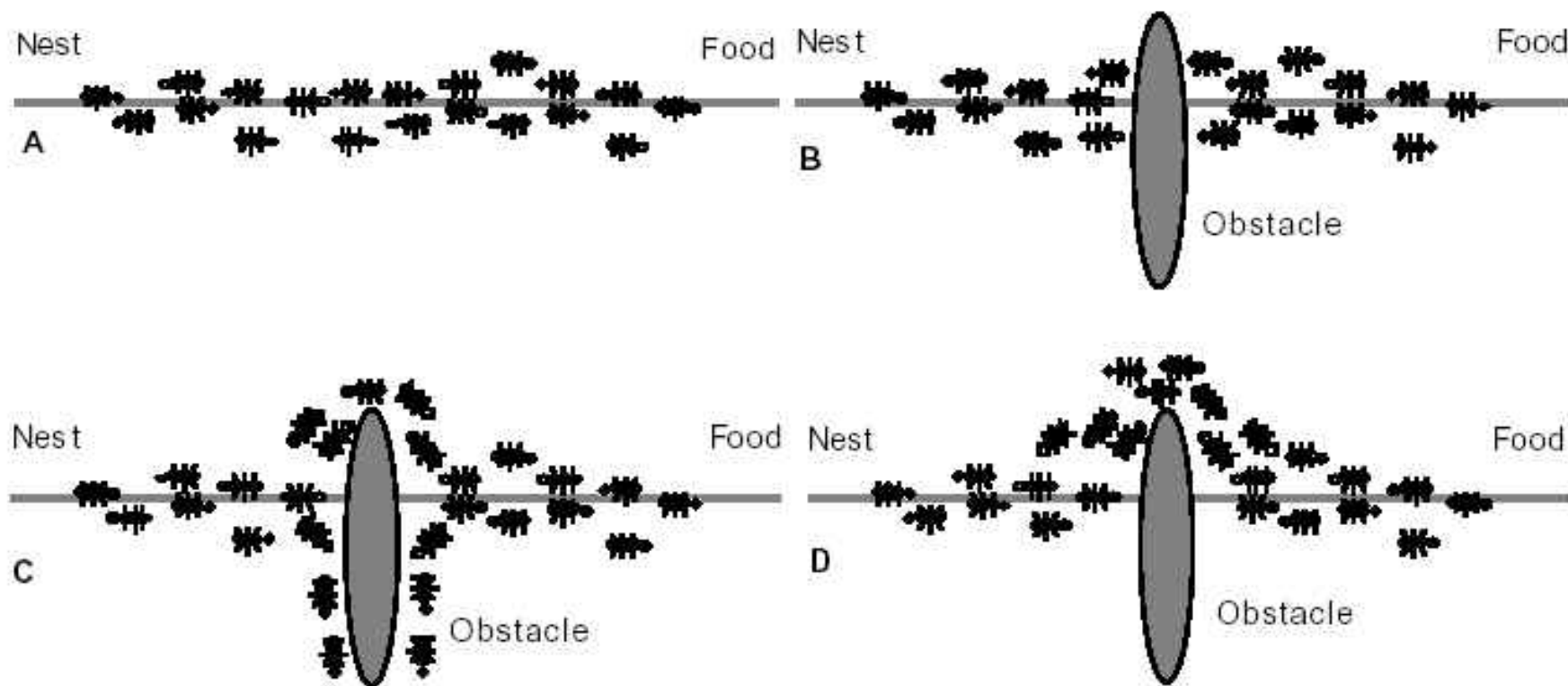
2.3.5 生物的进化与竞争

- 生物界竞争和发展是进化的时间箭头的典型代表
- 生物系统也是远离平衡态的开放系统
- 生物界自然法则
- 低等生物，通过分工与协作，在一定条件下，低级无序的相互作用能自发产生高级、有序的运动——群智能

第2章

2.3 耗散结构论概要

群智能：蚂蚁觅食





最简单的物种方程为

$$\frac{dx}{dt} = kx - dx \quad (2-32)$$

其中 x 表示某物种个体数; k 表示增殖系数; d 表示死亡率。

讨论:

(1) $k < d$ (外界环境恶劣), 方程(2-32)的解为

$$x = x_0 e^{(k-d)t} \quad (2-33)$$

不论 x_0 多大, $t \rightarrow \infty$, $x \rightarrow 0$, 物种消亡。

(2) $k > d$ (环境优越), 只要 $x_0 \neq 0$ (可为任意小的正数), $t \rightarrow \infty$, $x \rightarrow \infty$, 实际物种从未出现无穷的情况。

因为上述方程没有考虑饱和因素(自然界资源有限), 考虑到饱和效应, $k \rightarrow k - \beta x$, 则有

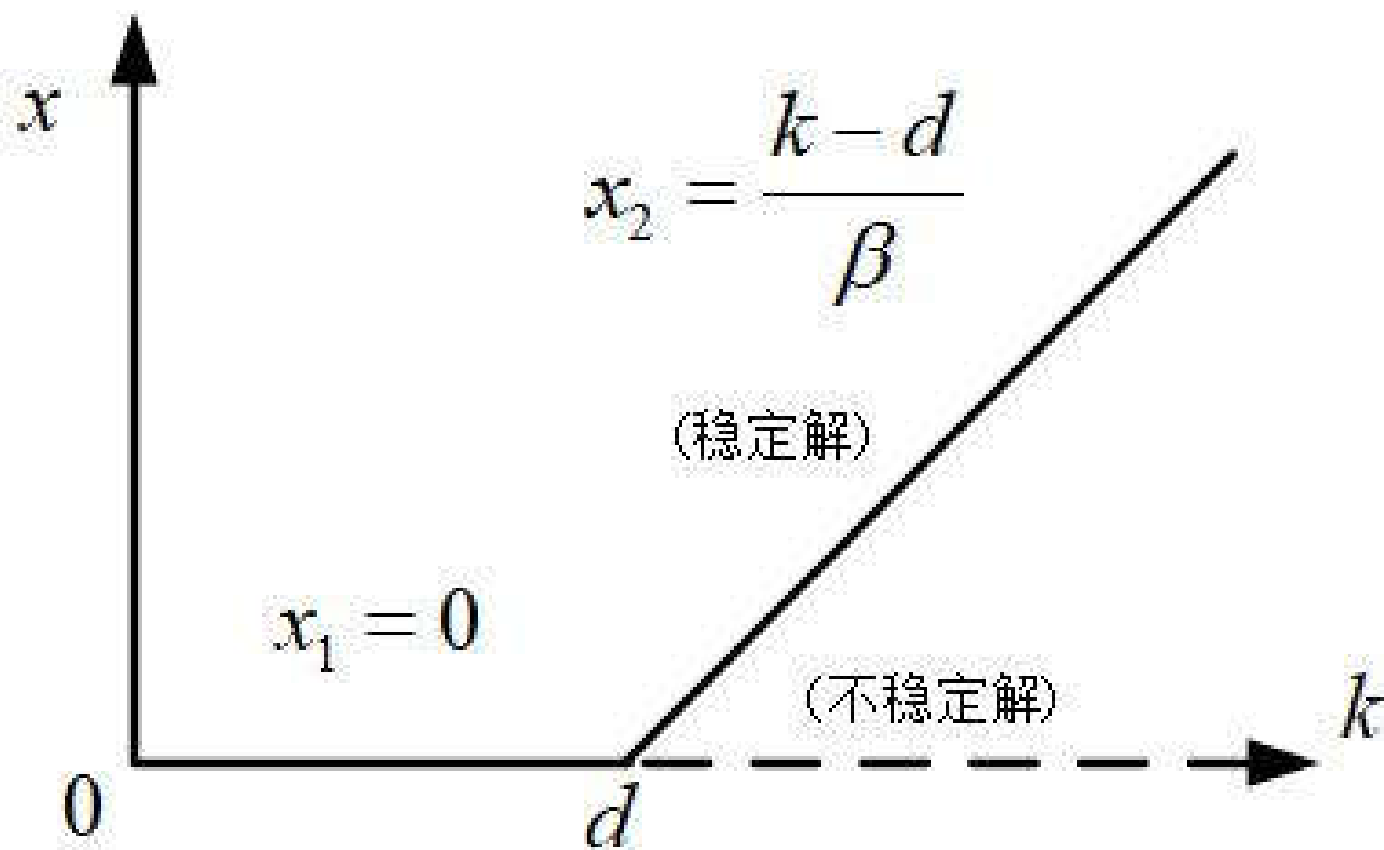
$$\frac{dx}{dt} = (k - \beta x)x - dx = (k - d)x - \beta x^2 \quad (2-34)$$

其中 k 为增殖系数; d 为死亡率; β 为饱和系数。

讨论:

(1) 当 $k < d$ 时, 因为增殖数小于死亡数, 所以物种仍要被淘汰。

(2) 当 $k > d$ 时, x 不会到无穷, $x = 0$ 这个定态解不再稳定, 而是发展到一个新的定态 $x^* = (k - d)/\beta$ 是稳定的。这个新的定态解取决于资源和环境所能维持的物种数目。



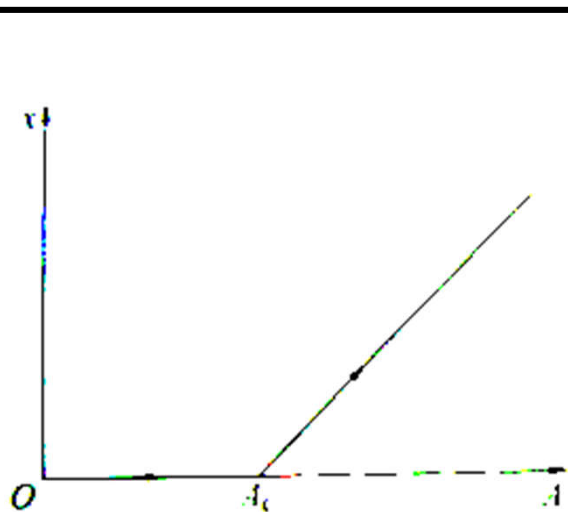
➤ 系统必须是开放系统

- 孤立系统熵达到最大值，系统达到最无序平衡态
- 开放系统与外界交换能量，引入负熵流抵消自身熵增加，从无序走向有序

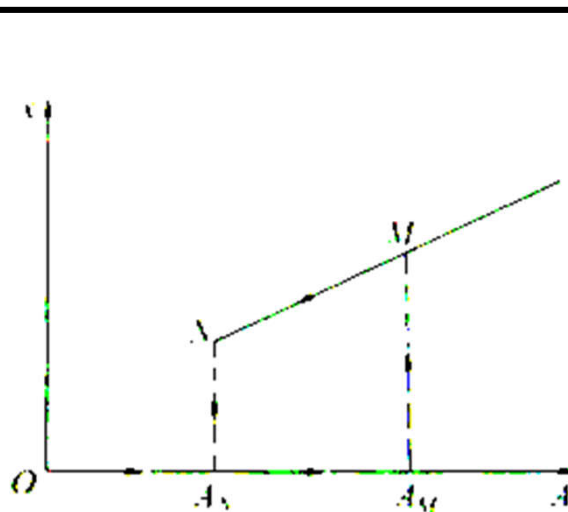
➤ 系统必须远离平衡态

- 非平衡是有序之源
- 耗散结构是一个“活”结构，只有开放系统在非平衡条件下才能形成

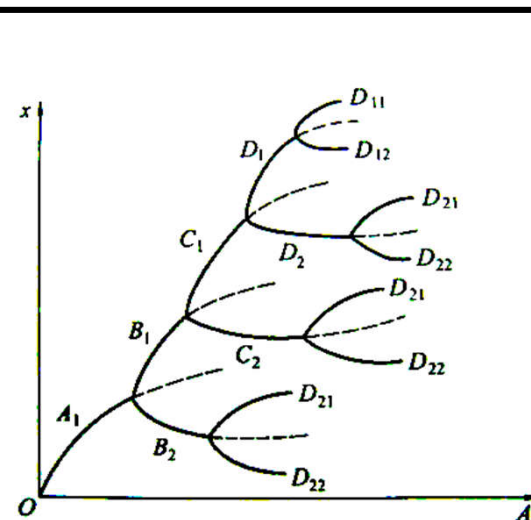
- 远离平衡态的开放系统总是通过突变过程产生自组织现象，即某种临界值的存在是形成耗散结构的一个主要条件



二类相变（连续相变）



一类相变（不连续相变）



高级分叉行为

➤ 正反馈

- 热力学分支失稳的重要条件
- 自我复制，自我放大机制

➤ 系统内部各个要素之间存在非线性的相互作用

- 系统各元素的非线性作用产生协同作用和相干效应，才能从无序变为有序
- 非线性产生饱和，才能稳定到耗散结构

➤ 涨落导致有序

- 系统中某个变量和行为对平均值发生的偏移，使系统离开原来的状态和轨道
- 系统稳定状态，涨落是一种干扰
- 系统不稳定临界状态，涨落引起系统跃迁到新的有序状态

■ 时间：可逆与不可逆

对称与非对称

■ 结构：平衡与不平衡

稳定与不稳定


有序与无序

■ 系统：简单性与复杂性

局部性与整体性

■ 规律：决定论与非决定论

动力学与热力学

- 
- 耗散结构理论视域下的大学生心理危机预防与干预机制研究，沈阳工程学院学报(社会科学版)，2014年，第10卷，第1期