

目 录

一. 退化与进化

二. 自组织现象和耗散结构

三. 开放系统的热力学第二定律

四. 远离平衡态的分叉现象

五. 涨落导致有序

六. 高级分支和混沌状态

"耗散结构"参考书

耗散结构理论由普利高津(I. Prigoging) 于1967年创立,他1977年获诺贝尔化学奖。 该理论中的许多概念,如开放系统、负熵流、 突变等,已成为研究自然现象和社会问题的 有力武器。

一. 退化与进化

箭

|头|

时 热力学: 孤立系 —— 能量退化 电物学: 开放系 —— 物种进化

退化 (克劳修斯)

3

二.自组织现象和耗散结构

自组织现象:在一定外界条件下,系统内部 自发地由无序变为有序的现象。 这种演化过程叫自组织过程。

- 1.自组织现象中的空间有序结构
- ▲无生命界:
 - ◆ 六角形的雪花;
 - 鱼鳞状的云:



◆贝纳德 (Benard) 对流 俯视图 Т₂ 、 大导热板 距离-----Q \Box $T_1 > T_2$, $\triangle T < \triangle T_C$ $T_1 > T_2$, $\triangle T > \triangle T_C$ $T_1=T_2$ 液体静止,热传导 液体对流传热 液体静止 出现宏观有序 稳定的非平衡态 平衡态 对称 对称 对称破缺

千千万万的分子被组织起来,参加一定方 式的宏观定向运动,使能量得到更有效的传递。

▲生物界

◆蛋白质大分子链由几十种类型的成千万个**氨** 基酸分子按一定的规律排列而成。

大脑是150亿个神经细胞有规律排列组成的极 精密极有序的系统。假定这种排列是随机形成的, 而且每一种排列有相等的概率,那么即使每秒进 行100次排列,也要经过10100亿年才能出现一次 特定的排列。 而地球年龄才几十亿年!

所以, 大脑神经细胞的这种有组织的排 列绝不是随机形成的。

◆树叶有规则的形状;



◆龟背的图案;



2.自组织现象中的时间有序结构

▲无生命界:

◆B - Z反应

苏, 1958 贝鲁索夫 (Belousov)

扎玻庭斯基 (Zhabotinski)

溴酸氧化反应:

柠檬酸+丙二酸, 铈(Ce) 离子催化。

应 浓 接近平衡 →生成物均匀、对称、无 序 态比例

(B)黄色) |无色| 周期交替 远离平衡 生成物 态比例 颜色

说明离子浓度出现了时间有序结构。

▲ 生物界

◆ 中华鲟回游,侯鸟迁移, ...

有生命界和无生命界都有共同规律可循。

自组织现象是与热力学第二定律的 从有序 ➡ 无序的时间箭头不一致的!

要将它们用物理学规律统一起来,必须抓住 孤立系统与开放系统的区别。

三. 开放系统的热力学第二定律

孤立系统进行自发过程 5 ↑。

这种由于系统内部经历的不可逆过程而引

起的熵变称为熵产生,用d,S表示。

孤立系统 $d_i S \ge 0$,开放系统则可能 dS < 0: 由克劳修斯等式和不等式有 $dS \ge \frac{dQ}{T}$

对可逆过程有 $dS = \frac{dQ}{T}$

当 dQ < 0 时, 必有 dS < 0。

对不可逆过程有 $dS > \frac{dQ}{T}$, 当dQ < 0 ,

且足够"负"时,仍可能 dS < 0。

所以, 要实现自组织, 系统必须开放。

对开放系统,除d,S外,还有与外界能量或

物质交换引起的熵变,称为熵流,用d_aS表示。

开放系统总熵变 $dS = d_i S + d_i S$

 $\mathbf{d}_{s}S<0$ — 负熵流, $\mathbf{d}_{s}S>0$ — 正熵流

若负熵流足够强,以至 $|\mathbf{d}_{s}S| > \mathbf{d}_{s}S$ 时,

 $dS = d_i S + d_a S < 0 \longrightarrow S \downarrow$ 有

- ∴ 开放系统可能因负熵流足够强而实现自组织。 例如贝纳德实验中,流体是个开放系统,
- 随着热量的流进流出,系统的熵在变化。

若流进流出的热量记作dO,则

流进的熵 $-\frac{dQ}{T_1}$ 流出的熵 -

因为 $T_1 > T_2$,所以

即流出的熵大于流进的熵。

若净流出的熵超过了系统内部的"熵产生", 系统的熵就减少,系统就从无序→有序。

人体是一个开放系统,吃饭、喝水就是为了 产生"负熵流"。

若为正熵流,则系统不会实现自组织。

对任意过程总有 $dS_i \ge 0$, \therefore $dS \ge d_{\alpha}S$

即系统经历任何一个过程后,其熵变永远不 会小于熵流 — 热力学第二定律的普遍形式。

四. 远离平衡态的分叉现象

- 1.平衡态热力学(经典热力学) 平衡态热力学主要研究平衡态的性质。 例如, 贝纳德实验中 $\Delta T = 0$ 的情形。
- 2. 线性非平衡态热力学(近平衡态热力学) 偏离平衡态很小的系统称为近平衡系统。

近平衡 「外界作用小]系统不可逆响应小[

二者呈简单 的线性关系

非平衡 (宏观性质不 近平衡 系统 界条件下 的定态 随时间改变)

例如, 贝纳德实验中, $\Delta T > 0$ 但较小的情形。 普里高津指出:近平衡系统 $\frac{\mathbf{d}_{i}S}{\mathbf{d}t}$ 取最小值, 这称为最小熵产生原理。

这说明近平衡态是稳定的。对于近平衡系统, 只要外界作用不变,即使系统内有涨落,仍会 回到原非平衡定态, 而不可能出现自组织现象。

3.非线性非平衡态热力学(远离平衡态热力学)

外界的影响强烈, 它引起系统状态的变化 已不是简单的线性关系,有它自己特有的规律。 例如,贝纳德实验中 $\Delta T \geq T_c$ 时的情形。 这时,就有可能出现自组织现象。

下面用图线来表示以上的三种情况:

分叉现象 征 偏离平衡 远离平衡的非线性区 定 的线性区 心态的 稳定的 耗散结构分支 某个参 不稳定的 热力学分支 稳定的 热力学分支 稳定的 **衡** X₀ 耗散结构分支 (稳定的非平衡态)(对应某种时空有序状态) 控制参量

非平衡的不稳定态在一个细小的扰动下, 就可以引起系统状态的突变, 使状态离开(b) 线沿着另外两个稳定的分叉 (c) 或 (c') 发展, 这称为分叉现象。

19

五. 涨落导致有序

分叉现象表明,系统在临界点附近的微小 变化(涨落)可以从根本上改变系统的性质, 这叫突变现象。

自组织总是通过某种突变过程来实现的。

λ 。的存在是伴随耗散结构现象的特征。

系统处在不同状态,涨落的作用可以很不同:

C点附近 $\xrightarrow{\text{mrs}}$ 微观客体 $\xrightarrow{\text{#线性因素}}$ 宏观有 序状态 协同动作 (耗散结构)

不是任何涨落都能得到放大, 只有适应系统 动力学性质的那些涨落,才能得到系统中绝 大多数微观客体的响应,从而波及整个系统, 将系统推向新的有序结构 —— 耗散结构。 耗散结构形成的条件:

- (a) 开放系统
- (d) 正反馈
- (b) 远离平衡态 (e) 非线性抑制因素
- (c) 涨落

例如,假设某时刻在某个平衡态有如图 所示的涨落(涨落总是存在的):

是一个复杂的波形。

可以认为它是由许多 不同频率的正弦波按一 定比例叠加而成。 (傅立叶分析)

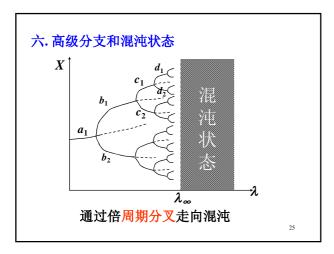
每一正弦分量称为一种涨落分量。

与平衡态或近平衡态不同, 在远离平衡态 的区域,涨落可以使系统的状态发生突变。 随着外界控制条件的变化,有的涨落分量很 快衰减掉, 有的涨落分量却得到放大。当放大 到了宏观尺度,就使系统进入某种有序状态。

某种医学理论认为病人服用或注射某些药物, 重要的不是起补偿作用,而是造成一种涨落。

例如,人体中有不少ATP(三磷酸腺苷), 但是冠心病人每次只要注射 20mg ATP就有明 显疗效。它是通过引起某种涨落使病人向健康 人转化,从而建立一种新的有序状态。

24



如贝纳德实验中,当ΔT 很大且继续加大时,会出现多种花纹的更替,最终走向湍流(混沌)。 高级分支现象说明在远离平衡态时系统可以 有多种可能的有序结构。高级分支会积累起各 次分支中产生的自组织本领,从而使系统的功 能变得丰富和完备起来,现出复杂的时空行为。 生命的进化和整个世界的发展也可以用高级分 支行为来说明。

当系统偏离平衡态足够远时,系统可能具 有的耗散结构也非常多。

由于涨落是无法控制和偶然的,所以此时系统 瞬时状态的不确定性很大,进入了一种无序态。 这种无序态不同于热力学中平衡的无序状态。 无序的时空尺度是宏观量级的,这种状态称为 混沌(chaos)状态。

27

耗散结构理论在近年来有了很大的发展, 而且在实践中已经运用。

◆ 美国有人研究东西部 人口的空间分布规律;



加拿大有人研究捕鱼的最佳方案;



◆ 荷兰有人研究能源的最低消耗方案...

28

定量的研究要提出<mark>物理模型</mark>,建立<mark>数学模型</mark>, 然后再解相应的微分方程组。

如果我们能弄清自组织现象的规律,自觉控制一些参数,使事物(有生命,无生命,自然界,社会)朝着我们所希望的耗散结构的方向发展,那么我们这个世界将会更加美好!

29

"耗散结构"参考书

《大学物理学》(第二册)张三慧主编 《耗散结构论》沈小峰、冯端 《非平衡系统的自组织》普里高津 《非平衡热力学和耗散结构》李如生 《物理学导论》上册,陈宏贲,周浩祥 《新概念物理教程》热学 赵凯华,罗蔚茵



一元一

30