

耗散结构与协同学

H S J G Y X T X



贵州人民出版社



数据加载失败，请稍后重试！

耗散结构与协同学

黄润荣 任光耀 编著

贵州人民出版社

责任编辑 唐光明

封面设计 钱大喜

技术设计 夏晓光

耗散结构与协同学

黄润棠、任光耀 编著

贵州人民出版社出版发行

(贵阳市延安中路9号)

贵州省新华书店经销 贵州新华印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 8.125印张 158千字

印数1—4,000

1988年1月第1版 1988年1月第1次印刷

书号：13115·90 定价：1.75元

ISBN 7-221-00098-0/O·03

目 录

绪 论	(1)
第一章 耗散结构的热力学基础	(17)
§1 经典热力学概述	(17)
§2 反应扩散方程和熵平衡方程	(25)
§3 线性非平衡区与最小熵产生原理	(30)
§4 非线性非平衡区与超熵产生	(35)
第二章 线性稳定性	(48)
§1 稳定性概论	(50)
§2 Lyapounov 稳定性理论	(52)
§3 线性(系统)稳定性原理及奇点分类	(62)
§4 极限环	(68)
§5 二分子模型与Hanusse 定理	(72)
§6 三分子模型的稳定性	(76)
§7 稳定性与分支	(85)
§8 三分子模型的分支解分析及特性	(88)
§9 次级分支	(99)
第三章 随机理论	(105)
§1 随机表述	(107)
§2 马尔可夫过程	(109)
§3 Master 方程	(111)

§4	生灭过程的 Master 方程	(115)
§5	生灭主方程解的某些分析方法简介	(118)
§6	分析方法——母函数法	(121)
§7	矩方程	(132)
第四章	相空间描述和非线性 Master 方程	(140)
§1	涨落的相空间描述	(141)
§2	相空间 Master 方程的近似解	(144)
§3	非线性 Master 方程的推导	(148)
§4	矩方程	(152)
§5	基本例子: Volterra-Lotka 模型	(153)
§6	自催化链反应式	(157)
§7	非线性 Master 方程渐近解的性质	(164)
第五章	化学和生物学中的自组织举例	(169)
§1	化学反应中的自组织	(169)
§2	解的振荡行为	(175)
§3	生物进化方程	(178)
第六章	协同学简介	(192)
§1	动力学方程	(192)
§2	郎芝万方程	(198)
§3	福克-普朗克方程	(201)
§4	对福克-普朗克方程的初步讨论	(207)
§5	福克-普朗克方程的含时解	(213)
§6	用路径积分方法解福克-普朗克方程	(219)
§7	与平衡相变的类比	(222)

§8	组织与自组织	(225)
§9	多维福克-普朗克方程中快弛豫参量的绝热 消去	(234)
§10	主方程中快弛豫参量的绝热消去	(237)
§11	激光系统中非平衡有序结构的形成	(238)
§12	其他应用的例子	(246)

绪 论

耗散结构理论是以比利时 I. 普利高津 (I. Prigogine) 教授为首的布鲁塞尔 (Brussel) 学派于本世纪七十年代创立和发展起来的一门边缘学科, 应用很广。力学、物理学、化学, 甚至社会、经济领域都借用了它的思想、方法和某些结果。I. 普利高津曾因创立和发展耗散结构理论和在化学上的成就而荣获1977年度化学诺贝尔奖金。

协同学是西德 H. 哈根 (H. Haken) 学派从他们的系统的一套激光理论抽象出并普遍化后形成的一门新学科。1977年 H. 哈根发表了他的专著《协同学》。1983年他又发表了专著《高等协同学》。协同学与耗散结构理论研究的对象相同, 但出发点和方法不完全相同, 各有特色。协同学也具有广泛的适应性, 在自然科学和社会科学的很多领域中都有它的足迹, 受到很多科学家的重视。H. 哈根曾因他对激光理论的贡献和创立发展了协同学而荣获1981年度美国富兰克林研究院的迈克尔逊奖。

1978年以来, 耗散结构理论和协同学在我国得到了广泛的传播, 现已引起了国内各方面学者的极大兴趣和重视。1978年8月在庐山召开的“中国物理学会年会”, 1979年8月在西安召开的“第一届全国非平衡统计物理学术会议”

(西安会议)，1980年7月在大连召开的“第二届全国非平衡统计物理学术会议”(大连会议)，1982年12月在昆明召开的“第三届全国非平衡统计物理学术会议”，以及1984年11月在桂林召开的“第四届全国非平衡统计物理学术会议”，都介绍和交流讨论了耗散结构理论和协同学的发展情况及研究成果。

本书向我国各界有关学者介绍这两门学科的基本内容和发展概况。下面我们先利用一些具体例子说明耗散结构和协同学研究的对象，然后概述两门学科的基本思想和方法，以便读者阅读全书内容。

一、耗散结构理论和协同学研究的对象

看以下几个例子：

1. 伯纳 (Benard) 对流花样。下面加热的一杯液体，温度梯度小时没有对流，热仅靠传导方式传递。当温度梯度增加到某一阈值时，对流突然发生，并形成很有规则的对流花样。从上往下俯视，是许多正六边形，中心液体往上流，边缘液体往下流，或是相反。这是一种很有秩序的动态结构。对流开始前是一种稳定态。梯度达阈值时，原稳定态丧失稳定性，出现新条件下的新稳定态。失稳点叫做临界点。从分子角度看，临界点之前的定态相对于临界点后的新定态是混乱的，在临界点发生有序程度的突变。突变是自发进行的，称为自组织。有序对流花样靠供给的热流维持。

2. 激光。一个激光器，当外界泵入原子系统的能量未达阈值时，每个处于激发状态的原子都独立地无规则地发射光子，频率和位相都无序。光场系统处于无序状态，正如普通的一盏灯一样。当泵入能量达一定阈值时，激光器发射出单色性、方向性和相干性极好的受激发射光。频率和位相都有序。光场处于有序状态。与伯纳对流花样相同，这里也出现失稳、临界点、自组织、有序化，形成有序动态稳定结构，结构靠外界泵入能量维持。

3. 化学振荡。在许多化学反应中出现时空花样，这里给出贝洛索夫-扎包金斯基 (Belousov-Zhabotinski) 反应为例。将 $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 KBrO_3 、 $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$ 、 H_2SO_4 和几滴氧化还原指示剂混合搅拌后倒入试管中，便出现振荡。溶液颜色周期地由红 (Ce^{3+} 过多) 变蓝 (Ce^{4+} 过多)。花样是在反应物浓度达到阈值时出现。若继续供应反应物，花样可以维持。否则，随反应物变稀周期变长，最后花样消失。这里又出现失稳、临界点，形成动态稳定结构，结构靠供给反应物维持。

4. 以上几个例子属于原子、分子层次的，细胞层次有相似现象。在生理学的发展中，早已知道，一组相同的细胞会自发组织成为有确定边界的结构。例如由细胞组成盘基网柄菌 (*Dictyostelium discoideum*)。这是在细胞胚胎起源中细胞相互作用的有代表性的模型。又例如灰原菌 (*Dictyostelium*) 是由单细胞聚集而成的一个多细胞组织。

5. 地球层次有类似的动态有序结构。城市就是一种动态

有序结构。“一个恰当的例子是城市，只有当它是食品、燃料和其他日用品的输入中心，并且输出产品和废物的时候，它才能存在下去。”——G.尼柯里斯和I.普利高津。这里没有说到城市的形成过程。可以想象，原始人群在游荡过程中遇到一个食物丰富的地方，便定居下来，为了获取食物，维持生存，便自发分工，……逐渐形成有组织的较大集体。这是一种自发的组织。今天的城市已经过了很多次自组织环节。每一个环节类似对流花样中的临界点，临界点前的组织形式失稳，自发形成新的组织形式。

布居动力学中有些很有趣的例子。欧洲亚德里海中主要产两种鱼。一种鱼靠另一种鱼为食物而生存，两种鱼的数量成周期性变化，这是一种时间上的动态有序结构。

以上列举了流体力学、物理学、化学、生物和生态学以及社会各不同领域中的实例。可以从这些例子中看出很多共同的行为。

(1) 系统都是非孤立的，并且处于远离平衡的非平衡状态。

(2) 当某一参量增长到达一定阈值时，原定态失稳，出现临界状态，出现新的定态。过程是自发进行的，称为自组织。自组织在很多方面与平衡相变有类似之处，又叫做非平衡相变。

(3) 新的定态相对于旧的定态更为有序，是无序到有序的突变，称为非平衡状态下的有序化转变。

(4) 通过临界点形成有序结构后，对称性降低，称为

对称破缺。

(5) 系统近临界点时，因涨落而偏离定态后，恢复至定态所需时间（弛豫时间）无限增长，称为“临界减慢”现象。

(6) 新的有序结构靠能量流和物质流来维持。I.普利高津把这种结构称为耗散结构。

不同学科领域，不同层次中有很多现象有类似的行为和共同的性质，这在相当长的时间内引起科学家的惊奇。

当我们考察的时间尺度扩大后，自然要提出发展演化问题。例如生命的起源与演化，社会的发展演化，恒星的形成与演化，等。发展演化长键中的各个环节可能就是自组织，形成非平衡有序结构。自组织形成有序结构是发展演化的基本形式。

人类对于生命的认识还很不够，尚有许多重大问题没有弄清楚。很多科学家都很重视生命科学。薛定谔在他的名著《生命是什么》一书中首先讨论了生命的热力学基础。他指出生命与非生命的区别在于前者具有更高的有序性及维持和发展这种有序性的能力，其原因在于生命系统能够主动地不断从环境吸取“负熵”，即用环境（物质和能量）的有序性（负熵）作原料制造自身的秩序之流，从而避免了衰退至原子混乱的平衡态。

生命系统是非平衡开放系统。不断从外界吸取富能物质，排出废物。物质在生命体内的分布极不均匀。

生命的确是高度有序的系统。空间结构有序，时间有

序。在 $1\mu^3$ 中上千个具有复杂反馈的化学反应必须在准确的时
间和地点按时序进行。不但时空有序，还有功能有序，毫不
混乱，混乱就意味着病态甚至死亡。

生命的维持，即使是最简单形式，也是一种连续不断的
新陈代谢和分子合成的过程。

高度有序的生命结构的形成经历了一个漫长的发展演化
过程。原始地球上是没有生命的。生命是怎样发生的？生命
起源和演化过程中的各个环节和伯纳对流花样的出现类似，
和激光有序光场的形成有相同之处，现在看来是比较肯定的
了。当然生命现象更加复杂。

1953年美国学者唐来·米勒设计了一个别出心裁的实
验，模拟了原始大气条件下氨基酸产生的可能过程。在抽空
并消过毒的玻璃器皿中通入 CH_4 、 NH_3 、 H_2O 和 H_2 ，连续进
行火花放电八天八夜，便生成了多种氨基酸和其他有机物，
其中有四种氨基酸（甘氨酸、丙氨酸、谷氨酸、天冬氨酸）
与天然蛋白质中的氨基酸相同。

现在认为生命起源和发展演化过程大致如下：

据推测，地球表面的原始大气由二氧化碳、甲烷、氮、
水蒸气、硫化氢和氨等组成。因紫外线照射，少量水蒸气被
分解为氢和氧。氢分子大量逃逸入宇宙空间，氧分子很快和
地面一些矿物结合成氧化物。紫外线长驱直入，雷击电闪，
火山喷发，陨石碰撞，宇宙线照射，等等。能源丰富，又有
原料，提供了无机物向有机物转化的有利条件。氨基酸、糖、
嘌呤、嘧啶、核苷酸、卟啉等简单有机物便不断产生。氨基

酸等简单有机物在一定条件下结合成复杂的有机物、蛋白质、核酸、脂肪、多糖等。复杂有机物进一步结合成生物大分子，之后又演化成单细胞生物。原始单细胞生物又分为两支，继续演化，一支是植物，演化成现在的种子植物和苔藓植物；另一支是动物，演化成现在的人类、鸟类和扁形动物。

生命的起源和发展演化的物理基础是什么？这是长期以来被关心的问题。耗散结构理论和协同学将会对生命科学作出贡献。

再讲讲生命科学中一个有趣的但至今没有彻底解决的问题，就是生物对手性的严格的选择性。

什么叫手性？一个物体具有手性（或手征），是说它与它的镜象不能通过旋转和平移而相互重合。有些生物分子具有互为镜象的异构体，彼此不能通过旋转和平移而相互重合。两种异构体的物理性质除旋光性外是完全相同的，化学性质则因反应物不同而异。若反应物没有手性，则两种异构体的化学性质完全相同。若反应物有手性，则两种异构体的化学性质不同。正如手套与手的关系一样，若手套不分左右，则戴在哪个手上都一样。若手套有左右之分，则戴在手上有适合不适合的问题。

手性分子的两种异构体生成与存在的概率没有理由说是不等的。氨基酸是手性分子。地球上以左手性氨基酸为主的生物和以右手性氨基酸为主的生物生成和存在的概率也没有理由不同。但是现在知道地球上的生物都是以左手性氨基酸为主的。就是说地球上的生物对手性的选择性是很严格的。

生物分子手性的起源问题、生物对手性的严格选择性问题都未弄明白，应用耗散结构和协同学可能有助于解决这个问题。

综上所述，耗散结构理论和协同学研究非平衡非孤立系统中的自组织及形成的有序结构，这是发展演化的基础。从不同的侧面来讲，也可以说耗散结构理论和协同学研究非平衡非孤立系统中的临界现象、突变，或有序化或非平衡相变。自组织总是在组成系统的子系统间的协同作用或相互合作下发生，也可以说耗散结构理论和协同学研究非平衡开放系统中的协同作用或合作行为。

耗散结构理论和协同学是新兴的科学，正在迅速发展，其应用范围很广，并且正在不断扩大。I. 普利高津说：“这个领域的继续进展很可能会爆炸式的发生，以真正不稳定的形式发生。” H. 哈根说：“协同学将会对外表上极不相同学科的相互了解和进一步发展作出贡献。”“目前我们正在一座大山下，从两边挖一个隧道，这座大山一直把不同的学科分开着，特别是把‘软’科学和‘硬’科学分开着。”

二、耗散结构理论的基本思想和方法

对于以上提出的富有挑战性的课题，即非平衡开放系统中的自组织问题，人们首先想由牛顿力学、相对论或量子力学中去找解决的途径，结果不能成功。在牛顿力学、相对论和量子力学中，时间没有方向性，过去和将来是等价的，然

而不引入时间的方向性不可能描写自组织，更不能阐明演化过程，因为临界点前后系统的状态是完全不同的。以I. 普利高津为首的布鲁塞尔学派从经典热力学得到启发，从热力学第二定律出发，找到了解决问题的突破口。

1. 十九世纪确立的热力学第二定律，首先把演化概念引入到物理学中。热力学第二定律是对自发进行过程的方向的判断。一个孤立系统必定自发回归到熵极大的平衡态。按玻尔兹曼公式：

$$S = k \ln W$$

熵 (S) 是混乱程度的量度，或是无序的量度。高熵态相对无序，低熵态相对有序。平衡态的熵极大，所以平衡态是在给定条件下最无序的状态。可见“非平衡是有序之源”。但是孤立系统不可能自发向相对有序方向发展。的确，正如我们所举的例子一样，自组织都发生在非平衡开放系统中，在一定条件下产生有序结构，正如激光场和伯纳对流花样一样。

从熵的变化考虑，一个开放系统在时间间隔 dt 内熵的改变应由两部分组成：

$$dS = d_e S + d_i S$$

$d_e S$ 叫熵流，是因系统与外界交换能量和质量而引起的， $d_i S$ 叫熵生产或熵源，是系统内部的不可逆过程产生的。对于孤立系统，因为

$$d_e S = 0$$

热力学第二定律可写为： $d_i S \geq 0$ ，

对于开放系统则 $d_e S$ 是可正可负的，只要有

$$d_e S < -d_i S$$

则有

$$dS = d_e S + d_i S < 0$$

也就是说，负熵流可能使总熵减少，系统由相对无序状态向相对有序状态发展，而且到达

$$dS/dt = 0 \text{ 或 } d_e S/dt = -d_i S/dt$$

时，系统到达定态。也就是说，从原则上讲，只要给系统一个负熵流，就有可能得到一个稳定的有序构象。这就是对于开放系统的非平衡有序原理。这是布鲁塞尔学派创立和发展耗散结构理论的出发点。

2. 布鲁塞尔学派从“非平衡是有序之源”出发研究了非平衡态。处于非平衡态的系统中存在热力学“力”，以后简称力（密度梯度、温度梯度、化学亲和势、电势梯度等），和由力产生的热力学“流”，以后简称流（粒子流、热流、化学反应率、电流等）。用 \vec{J} 表示各种流， $\{\vec{X}_i\}$ 表示力的集合，则可将 \vec{J}_k 在平衡态附近按 $\{\vec{X}_i\}$ 展开：

$$J_k(\{\vec{X}_i\}) = \vec{J}_k(0) + \sum_i \left(\frac{\partial \vec{J}_k}{\partial \vec{X}_i} \right)_0 \vec{X}_i + \frac{1}{2} \sum_{i,m} \left(\frac{\partial^2 \vec{J}_k}{\partial \vec{X}_i \partial \vec{X}_m} \right) \vec{X}_i \vec{X}_m + \dots$$