

耗散结构论、协同论及其应用

北京现代管理学院信控系科学研究所

北京现代管理学院系统信息控制科学系

一九八六、十一

内 容 摘 要

耗散结构理论和协同论都是系统论的重大发展。耗散结构理论是在非平衡热力学和非平衡统计物理学发展过程中出现的一个科学假说。它把普通系统论推进了一大步，从理论上说明了远离平衡态的系统要从无序向有序的方向发展，第一必须保持其开放性，第二必须从外界不断地耗散物质和能量，摄取负熵流，抵消自身产生的熵。所以耗散结构论认为，一个远离平衡的开放系统，在外界条件变化达到某一特定阈值时，量变可能引起质变，系统通过不断地与外界交换能量和物质，就可能从原来的无序状态转变为一种时间、空间或功能都稳定有序的状态。协同论也是从解决非平衡态中有序结构的形成开始的，它导源于现代物理学、应用统计学和动力学。研究和比较不同领域中多元系统元素间合作效应的理论。哈肯认为：“协同学一词是从希腊文来的，意思是协同作用的科学。即是关于系统中各个子系统（要素）之间相互协同的科学。”协同论揭示了不同系统存在着的从无序走向有序，从不稳定走向稳定和都具有目的性的相似特征。协同理论认为：所谓系统的目的或目标，就是在给定的环境中，系统只有在目的点或目的环上才是稳定的，离开目的点和目的环，系统就不稳定，系统自己总是要拖到目的点或目的环上才罢休，即系统的自组织过程。

耗散结构理论和协同论，就方法论来看，主要是运用数学模型，依靠突变论方法来完成对系统的定量研究，并用数学方程去刻画变量之间的联系，用递推公式去反映系统的动态变化。找出影响系统状态变化发展的因素作为控制变量，研究如何把这些因素当做杠杆，发挥系统内子系统之间的协同作用，以防止突变势态的出现，引导

或控制系统向人们所希望的良性循环，稳定有序的发展，从而达到预期的目标。

目 录

第一章 耗散结构理论.....	1
一、耗散结构和耗散结构理论.....	1
二、物理学中的耗散结构.....	3
三、化学反映中的耗散结构.....	6
四、生物化学的耗散结构.....	1 6
五、生态系统进化与耗散结构.....	1 8
六、生物社会与耗散结构.....	2 1
七、小结.....	2 3
第二章 协同学.....	2 5
一、哈肯和协同学.....	2 5
二、协同学的概念.....	2 8
三、协同学研究的主要内容.....	3 9
四、协同学应用举例.....	9 0
第三章 附 录.....	1 0 5
一、突变理论.....	1 0 5
二、系统论	1 0 6
三、信息论.....	1 0 7
四、控制论.....	1 0 9
编后说明	1 1 0

第一章 耗散结构理论

一、耗散结构和耗散结构理论

耗散结构理论是比利时布鲁塞尔学派领导人普利高津 (I. prigogire) 教授在 1969 年“理论物理与生物学”的国际会议上, 以论文“结构、耗散和生命”形式发表。出发点是针对非平衡统计物理的发展, 远离平衡的开放系统, 包括力学系统、物理系统、化学系统、生物系统及社会、经济系统。当任何系统与外界交换物质和能量时, 且在外界条件达到一定“阈值”时, 可能从原有的无序的混乱状态, 转变为一种在时间上、空间上和功能上的有序状态。这种在远离平衡情况下所形成的新的有序结构称“耗散结构”。耗散结构理论就是研究耗散结构的性质、形式、稳定和演变的规律的科学。

耗散结构理论的研究对象是开放系统, 而宇宙中各种系统, 不论是有生命的、无生命的, 实际上无一不是与周围环境有着相互依存和相互作用的开放系统, 因而这一理论涉及范围之广, 在科学史上是罕见的。无论物理、化学、生物、地学、医学、农学、工程技术、以至文艺、经济等领域, 都可以应用它的研究成果。由于耗散结构理论“协助人类解决了科学上一项最扰人而又似是而非的问题”, 即所谓达尔文和克劳修斯的矛盾——进化和退化的矛盾问题, 因而被誉为“七十年代化学领域的辉煌成就之一”, 普利高津也因此成就在一九七七年被授予诺贝尔化学奖。美国著名未来学家托夫勒在《第三次浪潮》一书中指出, 这一理论“直接打击了第二次浪潮的假说”, 是第三次浪潮引起的“思想领域的大变动”的重要标志之一。他在给普利高津的新著《有序来自混沌》写的前言中

甚至认为，这一理论“可能代表了下一次科学革命”。

耗散结构的原因在于开放系统中的能量、物质流动与转换。普利高津指出，一个系统形成耗散结构至少需要四个条件：

1. 系统必须是一个开放系统。热力学告诉我们，一个孤立系统自发地趋于无序，代表系统无序程度的物理量——熵自发地趋于极大。而只有开放系统，通过与外界交换物质和能量，从外界引入负熵流来抵消自身的熵增加，使系统的总熵逐渐减少，才有可能从无序走向有序。

2. 系统必须处于远离平衡状态。一个孤立系统达到的不再随时间变化的状态，称为热力学平衡态，例如温度处处相同的系统就处于热平衡态。宇宙如果处于热平衡态则称为“热寂”。此时系统处于熵极大的混乱无序状态，不可能产生新的有序结构。耗散结构理论进一步证明，系统即使处于离平衡态不远的近平衡区，并与外界有物质和能量的交换，其自发趋势也还是回到平衡态，而不会产生新的有序结构。系统只有远离平衡态，才有可能形成新的稳定有序的结构。在这个意义上，普利高津得出了“非平衡是有序之源”的结论。

3. 系统内部各个要素之间存在着非线性的相互作用。普利高津说：“对于形成耗散结构必须的另一个基本特性，是在系统的各个元素之间的相互作用中存在着一种非线性的机制。”通过非线性相互作用使各个要素（子系统）之间产生协同作用和相干效应，才能使系统从无序变为有序。否则，即使有负熵流的流入，也不可能使系统向有序转化。非线性的相互作用要用非线性方程来描述。非线性方程存在着多重解或分支解，其中有的解是稳定的，有的解是

不稳定的。这说明系统演化可能出现不同的结果，从而产生系统演化的复杂性和多样性。这种复杂性和多样性可以用数学中的随机微分方程和分支点理论来计算。

4 涨落导致有序。系统的演化可能有几个分支解，那么系统怎样才能跃迁到一个稳定有序的解上去呢？普利高津指出，“在耗散结构里，在不稳定之后出现的宏观有序是由增涨最快的涨落决定的。因此，这个新型的有序可以叫作‘通过涨落的有序’”。涨落是指系统中某个变量和行为对平均值发生的偏离，它使系统离开原来的状态或轨道。系统处于不同状态时，涨落起着迥然不同的作用。当系统处于稳定状态时，涨落是一种干扰，它引起了系统运动轨道的混乱，导致了无序，此时系统具有抗干扰的能力，它迫使涨落逐步衰减，使系统又回到原来的状态或轨道。如果系统处于不稳定的临界状态，涨落则可能不仅不衰减，反而会放大成为“巨涨落”，使系统从不稳定状态跃迁到一个新的有序状态。这就是耗散结构理论强调的“涨落导致有序”。

二、物理学中的耗散结构

生物体，即使是最简单的生物体，都需要向外界吸取食物、阳光和能量，有其特定的组织、机体活动，对外界有各种感观与反应，因此，它是一种耗散结构。社会经济组织也是一个开放系统，各种能源、资源的开发与转换，形成的社会结构与运动，（例如一个城市就是一个明显的开放系统，它从外界进入食物、燃料、建筑材料等等，同时又送出制成的产品和废料）也是一种耗散结构，而物理系统不象生物和社会组织那样，明显的是一种开放系统，与周围环

境交换物质和能量。一个开放的物理系统，也不一定出现耗散结构。事实上，一个开放系统可能有三种不同的存在方式：

1. 热力学平衡态：这里指已经经过流动并清除了温度和浓度的差别，熵增加到一个新的较大的值，从而达到了一致。对于孤立系统，分子处于完全无序状态，熵极大，并由玻尔兹曼有序性原理可得：配容数 P 和热力熵的关系为 $S = K \log P$ ，

这里 K 是玻尔兹曼常数。这一关系明确地指出熵增加表示分子无序的增加。如配容数增加所反映的一样，例如，有一个可渗透的隔板分成相等的两部分的容器，如图 1—1 所示。

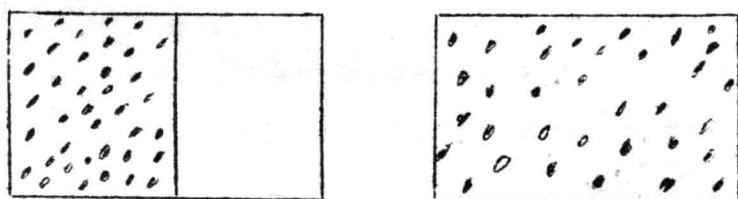


图 1—1 两室中分子的分布

N 个分子可以分成两组 N_1 和 N_2 ，其分法的数目为 P ，可由一个简单的组合公式确定：

$$P = \frac{N!}{N_1! N_2!}$$

(其中 $N! = N(N-1)(N-2) \cdots 3 \cdot 2 \cdot 1$)

其中量 P 叫做“配容数”。

从 N_1 和 N_2 的任一初值开始。我们发现在一个生物长的时间后，达到了平衡状态，除了小的涨落以外，分子在两个间隔当中平均地

分布 ($N_1 = N_2 = N/2$)，这时的状况相当于 P 的极大值，而且在变化的过程中 P 在增加。

2 “线性非平衡态”：特点是其可能的方式与平衡只有一点微小的差别，只是系统内部的温度和浓度保持有一点小小的不同。因而它保持近似的平衡。如通常的热传导和质量不均匀情况下的扩散。由于这种对平衡的偏离是足够小，所以我们可以用对平衡态加上一个小的修正来分析这种系统。该系统最后将不断向平衡态转移，系统向尽可能靠近分子完全无序的状态运动，因此，任何新的结构和组织都不可能出现。

3 “远离平衡态”：新的结构和新型的组织能够自发形成，形成耗散结构。因此，物理系统中的耗散结构是远离平衡态，存在“非线性”的机制下才可能出现。一个最突出的例子是盛于一平底容器中的液体从底部均匀地加热所产生的耗散结构。当缓慢地加热时，液体处于线性非平衡的第二种方式，热通过传导的方式在液体中通过。但是，当加热增强，达到完全确定的温度梯度时，对流的元胞非常规则。这对应于能量的转移由热量的传送变为宏观的对流时，分子处于高度有组织的情况。

玻耳兹曼有序原理赋予这种偶发事件的几率几乎为零，因此很清楚，它没有能力去描述这种现象。我们可以设想，总会有一些很小的对流作为是对平均状态的涨落，但是在低于温度梯度的某一临界值时，这种涨落将减弱和消失。反之，若高于临界值，涨落将放大并产生宏观对流。一种新的分子有序出现了，基本上对应于由于与外界交换能量而稳定的巨涨落。这种有序的特点是出现耗散结构。与平衡结构不同，耗散结构可以具有包含大量个体协作的相干状态。

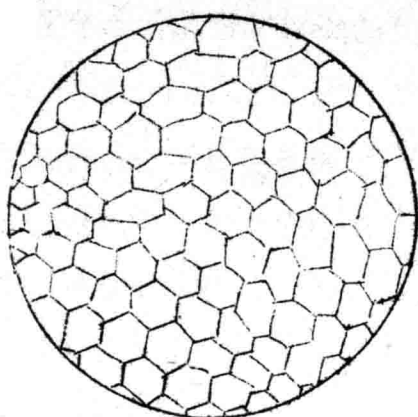


图 1—2 对流元胞的花纹。从上面观察由下边加热的液体

三、化学反应中的耗散结构

在化学反应中，可能出现的耗散结构将有更加丰富的图景。首先我们分析一下简单的化学反应。



这个方程说明，如果分子 A 与分子 X 碰撞，它们能起反应产生分子 Y 和 B。请见图 1—3

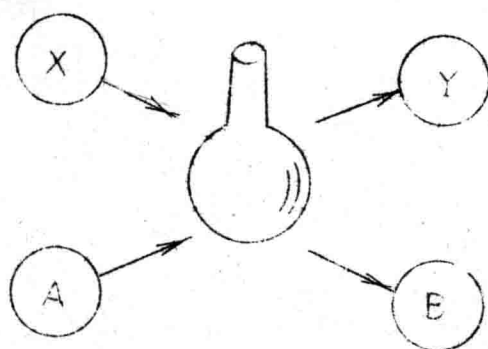


图 1—3 化学反应模型

化学动力学说明各种成分的浓度怎样由于化学反应而改变。例如，若我们有化学反应 (1-1)，我们会看到，以同样的速率，X 和 A 分子消失，Y 和 B 分子产生，这个速率与 X 和 A 之间产生碰撞的频率成正比。如果这一频率假定与 X 类和 A 类物质的浓度成正比。那么我们有：

$$\frac{DX}{Dt} = \frac{DA}{Dt} = -KXA = -\frac{DY}{Dt} = -\frac{DB}{Dt}, \quad (1-2)$$

这里 X、Y、A 和 B 代表各类分子率的浓度。K 是化学反应速率常数。当然，我们必须注意到相反的碰撞也可能发生：



如果化学常数对正反应是 K^+ ，对逆反应是 K^- ，那么我们有：

$$\frac{DX}{Dt} = \frac{DA}{Dt} = -K^+XA + K^-YB = -\frac{DY}{Dt} = -\frac{DB}{Dt} \quad (1-4)$$

现在在一个封闭或孤立的系学系统中，在这个系统中没有物质进出，对于有关的 X、Y、A 和 B，方程 (1-4) 只能通过下式导致平衡值：

$$\frac{X_{\text{平衡}} A_{\text{平衡}}}{Y_{\text{平衡}} B_{\text{平衡}}} = \frac{K^-}{K^+}. \quad (1-5)$$

这里全部正反应的比率等于逆反应的比率。方程 (1-5) 表达了前边提到的质量作用定律。然而，这样的系统可以通过例如注

入A或X和抽出B或Y的方式来调整其比例，驱使它任意远离这一化学平衡态，这是化学动力学从分子间的碰撞得到的结果。因此这导致在许多情况下可能产生非线性动力学方程，结果，可能出现耗散结构的多样性增加了。例如，考虑一种催化作用。这可能是一种加速某种化学反应的物质。有一个例子如图1—4所描述的。

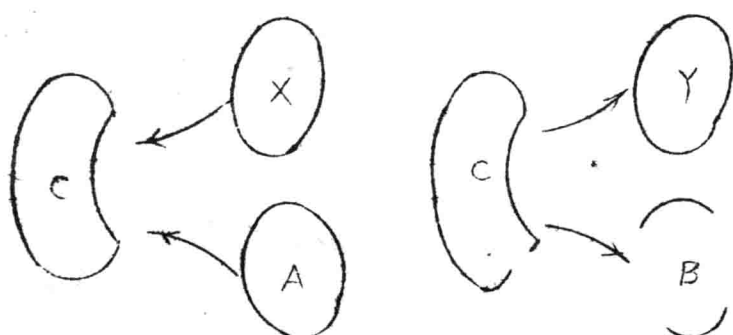


图1—4 催化的化学反应模型

在某些情况下人们说的“自催化”反应，指的是这样一种情况，即一个分子催化着产生该分子的反应。例如反应方式



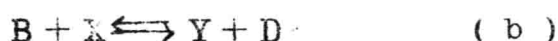
代表从一个X分子和一个Y分子开始，产生两个X分子。在这种情况下，化学速率方程由下式决定：

$$\frac{DX}{Dt} = KXY \quad (b)$$

在这种特殊情况下，当Y保持一定的浓度时，我们得到描述X按指数增加的著名方程。

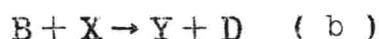
当一种物质，例如X产生另一种物质Y时，Y自己也产生X。

我们把这叫作“交叉催化”。这就是如下动力学方式中的一种情况，最近几年已经广泛地受到研究 (Lefever 1968a)：



这里X和Y现在是所有反应的中间分子，在这些反应中A和B变成D和E。在这个方式中，Y是在(b)步骤中从X产生的，但在同一时间内由于在步骤(c)中X和Y的碰撞使X的浓度增加。因此这个方式对应于称之为“交叉催化”的方式。

非平衡热力学的一个重要的一般结果是，在化学系统中，只有在包含催化步骤时耗散结构才能出现。这一论述的重要性来自如下事实，即在实际上所有的生物化学反应中，同样在社会现象中，都有催化步骤。我们以后将回到这一点上来。让我们首先详细地考虑可能由方式(1-7)产生的耗散结构的类型。我们考虑一个简单的有限的情况，这里略去了(1-6)中的逆反应，所以我们有：



一个耗散结构的实例相当于出现空间的不均匀性。为了研究这种情况，让我们想象在两个并在一起的盒子中产生的反应，在这两个盒子之间有X和Y的扩散，可参见图1-5 (Lefever, 1968a)。

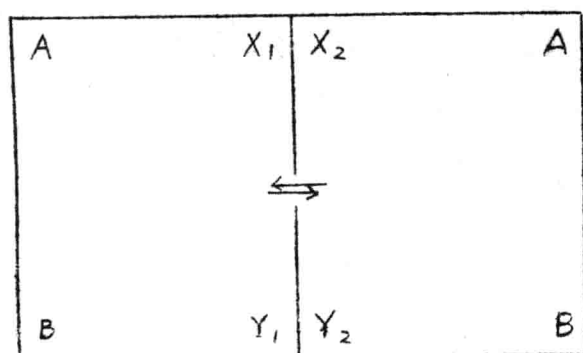


图 1—5 两个盒子的模型

对于盒子 1，我们遵循动力学方程：

$$\frac{DX_1}{Dt} = A + X_1^2 Y_1 - (B + 1) X_1 + D_X (X_2 - X_1) \quad (1-7a)$$

$$\frac{DY_1}{Dt} = BX_1 - X_1^2 Y_1 + D_Y (Y_2 - Y_1),$$

对于盒子 2，有：

$$\frac{DX_2}{Dt} = A + X_2^2 Y_2 - (B + 1) X_2 + D_X (X_1 - X_2) \quad (1-7b)$$

$$\frac{DY_2}{Dt} = BX_2 - X_2^2 Y_2 + D_Y (Y_1 - Y_2)$$

这里 $D_X (X_2 - X_1)$ 一项给出了由于 X_1 和 X_2 之间的浓度差， X 流进和流出盒子 1 时的量。容易证明一个可能的定态解是：

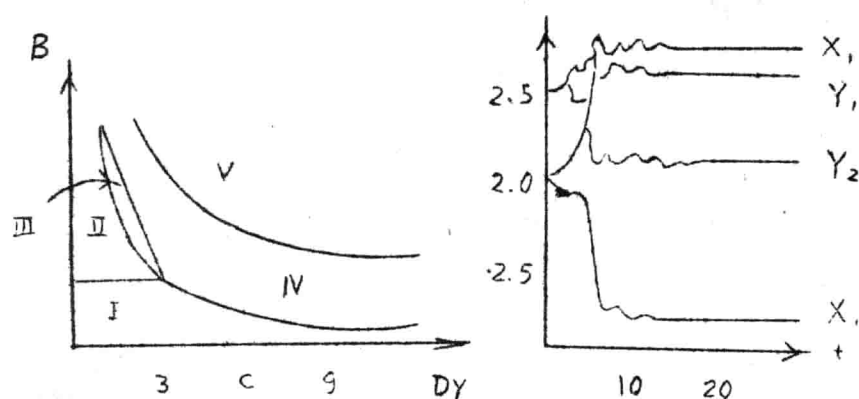
(这里 X_1 ， X_2 ， Y_1 和 Y_2 不随时间变化)

$$X_1 = X_2 = A, \quad Y_1 = Y_2 = B/A, \quad (1-7c)$$

这表明系统在图 1—6 (a) 区域 I 中呈现这一状态。在区域 II、III 和 V 中浓度随时间波动。最后在区域 IV，系统进到定态，在其中 $X_1 \neq X_2, Y_1 \neq Y_2$ 。

让我们更仔细地分析在这个区域中的情况，（见图 1—6 (b)）我们从均匀的状态 $X_1 = X_2, Y_1 = Y_2$ 开始。然后， Y_2 的一个扰动引起 X 产生的速率按方程 (1—6) 步骤 (c) 而增加，在区域 IV 的情况下，盒子 1 和 2 之间的扩散的“杠杆”效应不能阻止这种趋势。相反地，系统发展到一个新的状态，代表了两个领域产生的不同速率之间达到了动态平衡和两个盒子间均衡流动的情况。在这个过程中，系统在采取最后的不均匀分布之前， X 和 Y 的值有一个小的内部的涨落，正如所表明的一样，最后分布还会被 X 和 Y 的小涨落进一步地改变。浓度随时间的变化由图 1—6 (b) 所表示。在 Y_2 中小的内部涨落导致了逐步的放大。

在一个真实的系统中，代替两个分隔的盒子，空间效应存在于三维之中，浓度在整个系统中连续不断地变化，而不是具有两个简单的不同的值。数学的处理是更为复杂的，我们将不在这里讨论。让我们简单地描述几种可能出现的不同组织和结构，它们可以从方程 (1—6) 在计及扩散效应时得到。这样，我们就得到下列微分方程：



(a) 相图

(b) 与区域IV对应的扰动效应

图 1—6 两盒模型的特征

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= A + X^2 Y - (B + 1) X + D \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \\ \frac{\partial Y}{\partial t} &= BX - X^2 Y + D \frac{\partial^2 Y}{\partial r^2}, \end{aligned} \quad (1-8)$$

其中D是扩散系数。这里我们假定扩散是沿着单一的几何方向r发生的。这些方程总是有稳定解：

$$X = A, \quad Y = B/A. \quad (1-9)$$

这相当于整个系统是均匀的。然而，对于数量A，B以及扩散系数D的值的某一范围，这不是该系统所采用的稳定解，

可能有下面几种情况：

(1) 如果扩散系数很大，则系统将保持均匀，但可以从这个稳定态变为X和Y的浓度的持续振荡(Lefever和Nicolas, 1972)，这种类型的行为就是大家熟悉的“极限环”。如图1—7所示。

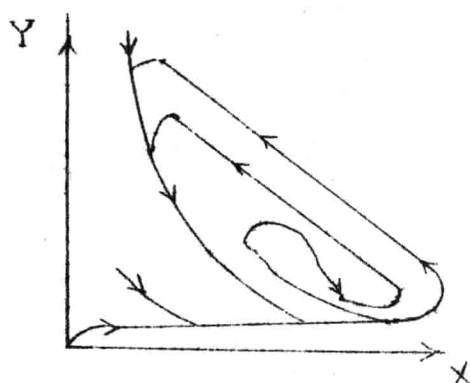


图 1—7 中间产物 X 与 Y 的稳恒定态振荡

无论初始状态如何，系统趋向一个唯一的完全确定的被约束所强加的周期解。在这种情况下我们可能被恰当地叫作化学钟的反应。

(2) 如果浓度不够高，系统不能维持均匀，于是得到一个对应于浓度波或稳定化学波的波传播的空间—时间组织，如图 1—8 所示 (HerschKowitz-Kaufman 和 Nicolis, 1972)。

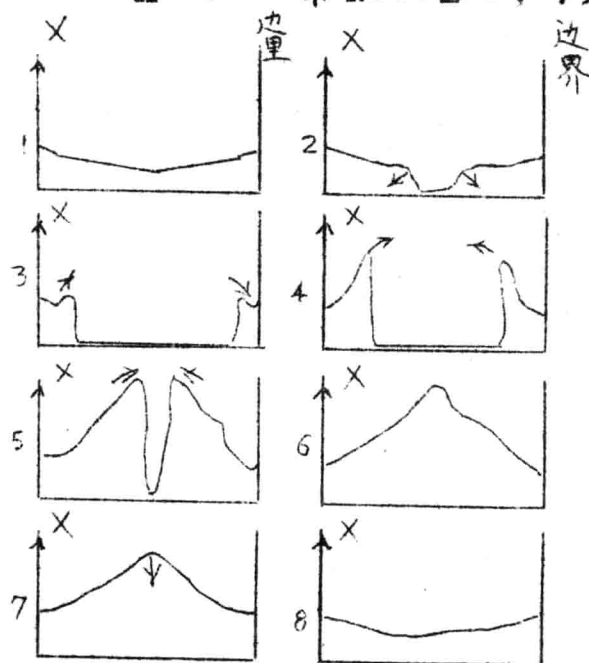


图 1—8 用 1—8 的顺序说明浓度波的重复传播(时间—空间分布)