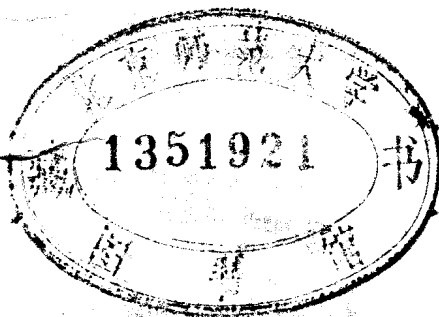


JY11/63/05

非平衡系统的自组织

[比] G. 尼科利斯 著
I. 普里戈京

徐锡申 陈式刚 译
王光瑞 陈雅深



科学出版社

1986

内 容 简 介

本书讨论非平衡系统中导致耗散结构的跃迁现象,自组织问题等,以及自组织对建立化学模型和生物模型的应用。

本书可供物理、化学、生物学和社会学方面有关研究人员和研究生阅读。亦可供有关专业大学生参考。

G. Nicolis & I. Prigogine

SELF-ORGANIZATION IN NONEQUILIBRIUM SYSTEM

John Wiley & Sons, 1977

非平衡系统的自组织

G. 尼科利斯
〔比〕 I. 普里戈京 著

徐锡申 陈式刚 译
王光瑞 陈雅深

责任编辑 张邦固

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1986 年 5 月第一次印刷 印张: 19

印数: 0001—2,850 字数: 432,000

统一书号: 13031·3154

本社书号: 4640·13—3

定价: 4.45 元

1991/63/05
作者为中译本写的序言

为本书中译本写这篇序言,对我们来说,是一件很愉快和很荣幸的事。非平衡现象这门学科最近十年里经历了惊人的进展。我们两人先后访问过中国,许多中国同事也访问过布鲁塞尔,这使我们非常高兴地看到中国科学家在这个领域方面的巨大兴趣和积极活动。中译本的出版肯定将使这些概念能够为中国更加广大的研究工作者和教师们所理解。

本书的中心题目是,在远离热力学平衡的某些种类系统中出现导致耗散结构的跃迁现象。这个事实使自组织问题处于一个很特殊的地位。一方面,对这些跃迁现象的分析需要求解非线性唯象发展方程,这就提出了分歧理论中一些很有趣的问题,本书第五章至第八章中对此进行了讨论。但自从英文版出版以来,又取得了另外一些进展,就次级分歧的分析而论,尤其是这样。这些新结果体现在专为中译本所写的附录 I 和附录 II 中。

非平衡跃迁现象第二个迷人方面,与歧点附近的涨落行为有关。通过提出有序的微观起源问题,这样的研究扩大了分歧理论的唯象框架。这个分析的天然工具是本书第九章至第十二章中所发展的概率方法。自从英文版出版以来,正是这个领域取得了惊人进展。因此,我们为这个中译本再增加了两个附录,概括了这些新结果。看来出现的一个最吸引人的结论是,非平衡系统中的分歧与平衡相变之间存在深远的类似之处。此外,看来分歧好象暗示了涨落的概率分布性质上有一个深刻的变化。这类问题导致概率论一个新的迄今尚未

被探索过的方面。

本书最后部分讨论了自组织对建立化学系统和生物系统模型方面的应用。实验发现,化学中的持续振荡和花样形成对理解非平衡现象是重要的一步,因为它提供了实验室中注意观察有序和相干性出现的详细情况。然而,最引人注目的还是生物学上的应用。耗散结构的一切基本性质,例如长程序,空间相干性,适应和调节,记忆和历史等都符合我们对生物序所具有的直观概念。最近十年来,在涉及酶和遗传水平的调节,胚胎发生中的花样形成,进化和群体动力学等各种各样问题中,好些工作都贯彻了这个观点。

在回顾非平衡跃迁和耗散结构的基础和应用这两方面时,我们有这样的印象,现在正处于一个广泛发展的真正开始阶段,大部分主要问题尚有待于解决。我们深信中国科学家的参与研究,将有助于这个事业的成功。

G. 尼科利斯 I. 普里戈京

1980年9月于布鲁塞尔

(徐锡申译)

自
类
中

符 号

拉丁符号

- $\mathfrak{A}_\rho$ 反应 ρ 的亲合势
- ✓ $A, B, \dots$ 反应序列中的初始产物和最终产物
- D_i 组元 i 的扩散系数
- $\mathcal{D}_i$ 非线性主方程形式体系中组元 i 的扩散频率
- d_i 组元 i 的扩散频率
- ✓ E 内能
- e_v 单位体积的内能
- ✓ F 自由能;生成函数
- f 约化生成函数
- J 广义流
- K_{eq} 平衡常数
- k 波数
- k_p 速率常数
- l 特征长度
- L_{kl} 唯象系数
- L 反应扩散系统的线性化算符
- ✓ P 熵产生;概率分布
- ✓ S 熵
- s_v 熵密度
- s 生成函数表示中的独立变量
- ✓ T 温度;振荡周期
- ✓ V 体积

ΔV 体积元
 γ 运动恒量
 w_p 反应 p 的速度
 w_{ki} 单位时间的跃迁概率
 $X, Y, \dots$ 反应序列中的可变中间产物
 X 广义力

希腊符号

Θ 广义热力学势
 λ 分歧参量;多变量主方程中的元胞大小
 μ_i 组元 i 的化学势
 ν_{ip} 反应 p 中组元 i 的化学计量系数
 ρ 质量密度
 σ 熵产生密度
 Σ 表面
 ψ 累积量生成函数
 ω 本征值;振荡频率

目 录

作者为中译本写的序言	i
总论	1
第一部分 热力学基础	18
第一章 引言	18
1.1 一般评述	18
1.2 开系	23
第二章 守恒方程	26
2.1 处于力学平衡的开系	26
2.2 质量平衡方程	27
第三章 不可逆过程热力学: 线性区域	31
3.1 Gibbs 公式: 熵产生	31
3.2 唯象关系: 不可逆过程的线性区域	36
3.3 唯象系数的对称性质	40
3.4 非平衡定态	42
3.5 最小熵产生定理	43
3.6 不可逆过程的线性区域内有序行为的不可 能性	46
3.7 扩散	48
第四章 非线性热力学	51
4.1 引言	51
4.2 一般发展判据	52
4.3 发展判据和动力学势	54

4.4 非平衡态的稳定性。耗散结构	58
第二部分 自组织的数学方面: 决定论的方法	65
第五章 包含化学反应和扩散的系统: 稳定性.....	65
5.1 一般表述	65
5.2 Ляпунов 稳定性	67
5.3 轨道稳定性	69
5.4 结构稳定性	71
第六章 数学工具.....	73
6.1 引言	73
6.2 分歧理论	73
6.3 稳定性理论	74
6.4 突变理论	78
6.5 包含两个变量的均匀系	80
6.6 分枝过程, 分歧和极限环	89
第七章 简单自动催化模型.....	96
7.1 两个中间产物	96
7.2 三分子模型	99
7.3 标度变换, 定态和边界条件	101
7.4 线性稳定性分析	102
7.5 定态耗散结构的分歧: 一般纲要	113
7.6 分歧: 固定边界条件	117
7.7 分歧: 零流边界条件	122
7.8 第一级分歧邻近耗散结构的定性性质	124
7.9 递次不稳定性和次级分歧	130
7.10 与计算机模拟的比较	135
7.11 局域定态耗散结构	143

7.12	时间周期耗散结构的分歧	153
7.13	时间周期耗散结构的定性性质	161
7.14	周期几何形状中的行波	168
7.15	作为闭系的三分子模型	171
7.16	结束语	174
第八章	耗散结构和自组织现象的另外一些方面	175
8.1	引言	175
8.2	保守振荡	175
8.3	产生极限环的简单模型	181
8.4	多重定态和全或无跃迁	186
8.5	二维问题	196
8.6	含有两个以上化学变量的系统	212
8.7	耦合振荡器	214
8.8	多相催化和局域跃迁	217
8.9	含有光化反应的系统	220
8.10	反应扩散方程的一些其它分析方法	223
8.11	耗散结构的热力学方面	234
第三部分	随机方法	245
第九章	一般评述	245
9.1	引言	245
9.2	随机表述	246
9.3	Марков 过程	251
9.4	平衡极限	256
9.5	非平衡系统的涨落: 历史考察	261
第十章	涨落的生和灭的描述	264
10.1	生灭过程的主方程	264
10.2	生灭形式体系的局限性	266

10.3	生灭过程主方程的一些分析方法	268
10.4	矩方程	280
10.5	简单例子	285
10.6	含有两个随机变量的系统: Lotka-Volterra 模型	293
10.7	结束语	302
第十一章	扩散效应: 相空间描述和多变量主方程	303
11.1	涨落的局域描述的必要性	303
11.2	涨落的相空间描述	304
11.3	一个简单模型	306
11.4	主方程的近似解	311
11.5	涨落的分子动力学研究	314
11.6	讨论	316
11.7	简化至浓度空间中的多变量主方程	317
11.8	一个模型系统中的多变量主方程	322
11.9	三分子模型中的空间相关	330
11.10	临界行为	337
11.11	结束语	344
第十二章	涨落的“平均场”描述: 非线性主方程	349
12.1	引言	349
12.2	非线性主方程的推导	350
12.3	非线性主方程的其它性质和矩方程	354
12.4	极限环的出现	356
12.5	空间耗散结构的出现	361
12.6	多重定态跃迁和亚稳定性	365
12.7	非线性主方程的渐近解	370
12.8	结束语	374

第四部分 化学和生物学系统中的控制机制 ... 376

第十三章 化学反应中的自组织 377

- 13.1 引言 377
- 13.2 Белоусов-Жаботинский 反应: 实验事实 377
- 13.3 机制 381
- 13.4 “Oregon 模型” 383
- 13.5 振荡行为 386
- 13.6 空间花样 391
- 13.7 Briggs-Rauscher 反应 392

第十四章 亚细胞水平的调节过程 394

- 14.1 代谢振荡 394
- 14.2 糖酵解循环 394
- 14.3 糖酵解振荡的空间异构模型 398
- 14.4 极限环振荡 410
- 14.5 外部扰动对极限环振荡的影响 412
- 14.6 在变构酶模型中时空组织的花样 416
- 14.7 环腺苷酸 (cAMP) 的周期合成 421
- 14.8 包含膜结合酶的反应 424
- 14.9 代谢振荡的生理学意义 427

第十五章 细胞水平的调节过程 431

- 15.1 引言 431
- 15.2 乳糖操纵子 432
- 15.3 β 半乳糖苷酶诱导的数学模型 434
- 15.4 全或无跃迁 436
- 15.5 分解代谢物抑制: 持续振荡和阈值现象 440
- 15.6 细胞分裂的控制 447
- 15.7 定量模型 450

第十六章 细胞分化和花样形成	455
16.1 引言	455
16.2 位置信息	456
16.3 与位置信息有关的机制	459
16.4 耗散结构与极性的出现	462
16.5 一个定量模型	463
16.6 位置的分化	468
16.7 应用	472
第五部分 进化和群体动力学	475
第十七章 进化的热力学	475
17.1 竞争的概念	475
17.2 生物出现前的进化: 一般介绍	475
17.3 生物出现前聚合物的形成	477
17.4 生物高聚物的竞争和超循环	481
17.5 作为稳定性问题考虑的进化	485
17.6 进化的反馈	489
17.7 简单反应网络中的能量耗散	490
17.8 一个生化实例	494
第十八章 生态系统	496
18.1 引言	496
18.2 基本方程	496
18.3 有序行为的例子: 昆虫社会的组织	501
18.4 生态系统的进化	504
18.5 结构不稳定性和复杂性的增加: 劳动分工	508
18.6 稳定性和复杂性	511
展望和结束语	513
1. 引言	513

2. 涨落化学·····	513
3. 神经网络和免疫网络·····	515
4. 抗癌免疫监视·····	519
5. 社会系统和认识论的方面·····	522
附录·····	525
0 数学问题 ·····	525
I 初级和次级分歧现象的一般表述 ·····	527
I.1 总情势·····	527
I.2 分歧解的解析结构·····	533
I.3 级联分歧·····	536
II 分歧的奇微扰 ·····	540
II.1 引言·····	540
II.2 重力场中的反应扩散方程·····	544
II.3 对称破缺和花样选择·····	549
III 主方程的渐近分析 ·····	550
III.1 引言·····	550
III.2 宏观极限·····	554
III.3 围绕决定论性轨道的涨落·····	556
III.4 临界涨落·····	560
III.5 与时间有关的行为·····	562
IV 不均匀涨落对分歧现象的影响 ·····	564
IV.1 反应和扩散之间的竞争, 空间相关的起源·····	564
IV.2 多变量主方程的渐近分析·····	569
IV.3 临界行为·····	572
IV.4 对称破缺分歧·····	577
参考文献 ·····	580

总 论

我们正处在自然科学知识取得巨大进展的时代。现在，我们能够探索的物理世界范围已经扩展到确实难以想象的程度。在微观尺度方面，基本粒子物理学揭露了涉及物理尺度为 10^{-15}cm 量级、时间为 10^{-22}s 量级的过程。另一方面，宇宙学把我们引向量级为 10^{10} 年的时间（宇宙“年龄”）和量级为 10^{26}cm 的距离（这是到事件视界的距离，即能够接收到其物理信号的最远距离）。最后，新近还发现了有关物理世界本质的许多新特征。

经典物理学曾经强调稳定性和持久性。现在我们看到，这样一种限定至多只能适用于极有限的方面。我们观察到任何地方，都可以发现导致多样化和增加复杂性的演化过程。物理世界映象的这种转变，使我们要去研究对这个新方面很可能是重要的那些物理与数学的分支。本书的主要目的就是对这些新分支作一入门介绍，使得对物理系统或生物系统中的自组织问题有更好的理解。

经典力学在处理有关轨道的问题上曾经是非常成功的。经典力学的范围由于量子力学和相对论的建立而极大地扩充了。但是，甚至在适当地推广以后，动力学的标准表述对将来与过去之间仍不加任何区别。在时间上“向前”与“向后”的运动都是可能的。然而，不引进时间的方向，我们就不能以任何有意义的方式来描述演化过程。显然，需要有新的工具。

本书不打算讨论时间方向与动力学之间的关系，这是一个高度技术性的问题。这里只需指出：与时间方向有关的不

可逆性和动力学定律决不矛盾;相反地,任何时候只要达到了充分程度的“复杂性”,就可以从这些动力学定律得出不可逆的结果¹⁾。

且不管动力学,物理学中的演化观念是在十九世纪通过所谓热力学第二定律而引入的。人们注意到,从纯唯象的水平出发,在“可逆”过程与“不可逆”过程之间不得不作出根本区分。不可逆过程的一个例子是热传导,如果边界条件适当,它会导致温度的均匀分布。可逆过程的一个例子是忽略摩擦与能量损失的波传播。第二定律研究的正是可逆过程与不可逆过程之间的这种区别。它引入了一个新的函数——熵,不可逆过程使熵增加。

Clausius 对这个定律给了一个引人注目的表述,他说,“宇宙的熵是不断增加的”。根据这个说法,宇宙要趋向“热寂”。但是,这既不是我们现在观察到的目前阶段的宇宙情况,也不是迄今我们所了解到的它的过去所能推断出来的情况。如我们已经提到过的,我们已观察到的是不断趋向多样性的变化与趋向复杂性的演化。值得注意的是,通过第二定律引进物理学中的演化观念,几乎同时在十九世纪也在生物学²⁾ 与社会学³⁾中提出过。但是,如我们将要看到的,这个概念的解释在这些不同领域是完全不同的。

让我们简略地描述一下热力学发展的主要阶段。按照第二定律,一个孤立系统最终要到达“热力学平衡”状态,它对应

1) I. Prigogine, A. P. Grecos 和 C. George (1976), *Proc. Nat. Acad. Sci. (U. S. A.)* **73**, 1802 及 *Celestial Mech.*, 已送交。也请见 I. Prigogine 将出版的一本专著。

2) C. Darwin (达尔文)(1859), *The Origin of Species* (物种起源), John Murray, London.

3) H. Spencer(斯宾塞)(1904), *Study of Sociology* (社会学研究), Paul Kegan, London.

于熵最大。这个定律的最普遍表述既适用于平衡情况，也适用于非平衡情况。不过，十九世纪发展起来的经典热力学的大部分引人注目的结果，都是有关平衡情况的。著名的例子如 Gibbs 相律和质量作用律，它们已经成为物理化学方面每本入门教科书的组成部分。

这种情况可能有各种原因。非平衡曾被认为是一种扰动，它暂时地阻止出现与平衡有序相同的结构，生长一块美好的晶体，我们需要接近平衡的条件；要从热机得到好的效率，需要把诸如摩擦、热损失等不可逆过程减少到最低程度。由于 Onsager 发现了“倒易关系”¹⁾，情况已有了根本变化，它肯定了至少在平衡态附近，热力学方法能提供有用的信息。

这导致经典热力学的推广，它可以恰当地称为“线性非平衡热力学”，包括了不可逆过程的流（或速率）是“热力学力”（如温度梯度或浓度梯度）的线性函数情况的区域。线性非平衡热力学适用的一个情况是热扩散。当我们把温度梯度加到两种不同气体组成的混合气体上时，我们可以观察到一种成分在热壁上富集，而另一成分在冷壁上浓集。结果，熵一般地总是低于均匀混合情况。以后我们看到，Boltzmann 有序原理使低熵与有序联系，而高熵与无序联系。因此，我们这里有了“非平衡可能是有序之源”的一个例子，这个看法是 Brussels 学派所创立的新观点的出发点²⁾。

但是，在线性非平衡热力学框架内，我们实在谈不到什么新结构。我们所处理的平衡结构是由阻止系统达到平衡状态的约束条件所修正了的。这是我们学派从远离平衡的情况开

1) L. Onsager (1931), *Phys. Rev.*, **37**, 405.

2) I. Prigogine (1945), 博士论文, Bruxelles 自由大学, 对于新近历史的叙述见 I. Prigogine 和 P. Glansdorff (1973), *Bull. Acad. Roy. Belg. Cl. Sci.* **59**, 672.