

XIETONG XUE

协同学

[西德] H. 哈肯 著



原子能出版社

协 同 学

引 论

物理学、化学和生物学中
的非平衡相变和自组织

〔西德〕H. 哈肯 著

徐锡申	陈式刚	陈雅深	张本爱	译
王光瑞	张家泰	黄家溥		
	章扬忠	徐锡申	校	

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书阐述了协同学的基本概念和原理。详细介绍了处理自组织问题的一般研究方法和数学工具，并且还具体讨论了在各种学科领域的大量应用。

Hermann Haken

Synergetics

协 同 学

引 论

物理学、化学和生物学中
的非平衡相变和自组织

〔西德〕H. 哈肯 著

徐锡申 陈式刚 陈雅深 张本爱 译
王光瑞 张家泰 黄家溥

章扬忠 徐锡申 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本787×1092 1/32 ·印张 14 1/2 ·字数308千字

1984年2月第一版·1984年2月第一次印刷

印数 1—6000 ·统一书号: 15175·500

定价: 1.80元

第二版序

有几件事促成了本书第二版的出版。首先，在不到一年的时间内第一版已经售缺。对这个跨学科的新研究方法表示欢迎的教授和学生，已对本书给以极好的评论和热情的响应。这也反映在本书目前已被译成俄文和日文。

我利用这次再版的机会，把最引人兴趣的一些新近进展包括进去。因此，我增加了整个新的一章来论述决定论性力引起的不规则运动的混沌性，这是极度吸引人和迅速发展着的领域。目前已发现从物理学到生物学的各种相当不同的领域中都有这类现象。此外，我还增加了论述形态发生模型的解析处理一节，采用的是本书中所发展的序参量的概念。值得一提的是，在新增加的内容中，我们还对超短激光脉冲的突然发生问题做了一个完整描述。不用说，第一版的少数小的印刷错误或其它错误已经改正。

对于在编入这些新增加的内容方面提供过帮助的人，我愿向他们表示感谢。

H. 哈肯

斯图加特，1979年7月

第一版序

从萌芽状态，或者甚至从混沌状态，自发形成具有充分组织性的结构，这是科学家面临的极度吸引人的现象和最具有挑战性的问题之一。这类现象涉及到我们观察动植物生长时的日常生活经验。只要想象一下长得多的时间尺度，就把科学家引向进化问题，并最终引向生命物质的起源问题。当我们试图在某种意义上解释或理解这些极端复杂的生物现象时，一个自然的问题是，在无生命世界的简单得多的系统中是否可能出现自组织过程。

近年来，越来越清楚地看到，物理系统和化学系统中存在大量的例子：具有充分组织性的空间结构，时序结构或时空结构从混沌状态产生出来。此外，如在生物体中那样，这些系统的功能作用只有靠进入系统的能量（和物质）通量才能维持。与为了具有特定结构和功能而设计出来的人造机器不同，这些结构是自发地发展起来的，它们是自组织的。使许多科学家惊奇的是，当大量的这类系统从无序状态变为有序状态时，它们的行为显示出引人注目的相似性。这一点有力地表明，这类系统的功能作用遵循同样的基本原理。在这本书中，我们想要解释这类基本原理和基础概念，并介绍用来妥善处理它们的数学工具。

这本书是给想学习这些原理和方法的物理学、化学和生物学方面的学生们作为课本用的。我们试图在可能的情况下以初等方式来介绍数学。因此，大学微积分课程的知识差不多就够了。现今，大量的重要数学结果被隐藏在复杂的专门名词下面。我虽然尽可能地避免它，但是，一定数量的技术

用语还必须采用。我在引进它们的地方加以解释。顺便提一句，很多方法不仅可应用于自组织系统，而且也可应用于其它问题。为了使课本达到完备的目的，书中包括这样一些章节，它们要求读者有更多一些的耐心和更深厚一些的数学基础。那些章节标以星号。其中一些章节包含最近的结果，它们对于研究工作者可能也是有用的。

物理系统、化学系统和生物系统所需要的基础知识，一般来说，不是很专门的。相应的章节这样来安排：某一学科的学生仅需读“他的”章节。然而，最好能浏览一下全书其它章节，以便能够感受到所有这些系统互相之间是多么类似。我把这个学科称为“协同学”。一方面是由于我们所研究的对象是许多子系（通常属于相同种类或者几个不同种类）的联合作用，以产生宏观尺度上的结构和功能。另一方面，这里又有许多不同的学科进行合作来发现支配自组织系统的一般原理。

我要感谢Springer出版社的Lotsch博士，他建议我把《现代物理评论》(Rev. Mod. Phys. [1975])上我的一篇论文“远离热动平衡系统中的和非物理系统中的合作现象”扩充改写出版。在写作这个“增补本”的过程中，最终逐渐形成一份完全新的原稿。我想使物理学、化学和生物学方面的学生们更容易理解这一领域。在某种程度上，这本书和我的前述论文互为补充。

我的同事和朋友们，特别是W. Weidlich教授，几年间与我进行过许多富有成效的讨论，我愿意向他们表示感谢。我的秘书U. Funke夫人和我的合作者A. Wunderlin博士，他们对我写作本书提供了巨大的帮助，我愿向他们表示深切的感谢。A. Wunderlin博士很仔细地核对过公式，其中很

多经过重新计算，制作了许多图，并对如何改进原稿提出过许多有价值的建议。U. Funke 夫人尽管行政事务工作很忙，仍精确地绘制了大部分图并几次正确地抄写了原稿（包括公式在内）。她的主动精神和不倦地努力，不断地鼓舞着我去完成这本书的写作。

H. 哈肯

斯图加特，1976年11月

目 录

1. 目的.....	1
1.1 有序和无序：一些典型现象.....	1
1.2 一些典型问题和困难.....	15
1.3 我们将如何进行.....	19
2. 概率论.....	22
2.1 研究对象：样本空间.....	22
2.2 随机变量.....	25
2.3 概率.....	26
2.4 分布.....	28
2.5 连续随机变量.....	31
2.6 联合概率.....	34
2.7 数学期望和矩.....	36
2.8 条件概率.....	37
2.9 独立随机变量和相依随机变量.....	39
2.10* 生成函数和特征函数.....	41
2.11 一种特殊的概率分布：二项分布.....	42
2.12 Poisson分布.....	46
2.13 正态分布(Gauss分布).....	48
2.14 Stirling公式.....	51
2.15* 中心极限定理.....	51
3. 信息论.....	53
3.1 一些基本概念.....	53

* 标题上带有*号的节，初次阅读时可以略去。

3.2*	信息增益: 一个演示性的推导	59
3.3	信息熵和约束	62
3.4	物理学的一个例子: 热力学	69
3.5*	研究不可逆热力学的一种方法	74
3.6	熵——统计力学的灾祸?	84
4.	或然性	87
4.1	Brown 运动的一个模型	87
4.2	随机走动模型和它的主方程	94
4.3*	联合概率和路径·Марков过程·Chapman- Колмогоров方程·路径积分	100
4.4*	怎样运用联合概率·矩·特征函数·Gauss 过程	108
4.5	主方程	111
4.6	细致平衡系统主方程的精确定态解	113
4.7*	具有细致平衡的主方程。对称化, 本征值和 本征态	116
4.8*	求解主方程的Kirchhoff方法	120
4.9*	关于主方程解的定理	124
4.10	随机过程的意义。定态, 涨落, 复现时间	125
4.11*	不可逆热力学的局限性和主方程	130
5.	必然性	131
5.1	动力学过程	132
5.2*	相平面中的临界点和轨道。再谈极限环	141
5.3*	稳定性	151
5.4	关于分歧和稳定性的例子和练习	159
5.5*	静态不稳定性的分类, 或对Thom突变理论 的初级探讨	167

6. 或然性和必然性.....	183
6.1 Langevin方程: 一个例子.....	183
6.2* 热库和随机力.....	190
6.3 Fokker-Planck方程.....	198
6.4 Fokker-Planck方程的某些性质和定态解.....	207
6.5 Fokker-Planck方程的含时解.....	215
6.6* 用路径积分法解Fokker-Planck方程.....	221
6.7 相变类比.....	225
6.8 连续介质中的相变类比: 与空间有关的 序参量.....	235
7. 自组织.....	240
7.1 组织.....	241
7.2 自组织.....	245
7.3 涨落的作用: 可靠性或适应性? 开关.....	252
7.4* Fokker-Planck方程中快弛豫变量的 绝热消去.....	255
7.5* 主方程中快弛豫变量的绝热消去.....	258
7.6 连续介质中的自组织. 数学处理方法概要.....	259
7.7* 对于非平衡相变的广义Гинзбург-Ландау 方程.....	261
7.8* 对广义Гинзбург-Ландау方程的高 阶贡献.....	269
7.9* 非平衡连续系统的标度理论.....	273
7.10* 软模不稳定性.....	277
7.11* 硬模不稳定性.....	282
8. 物理系统.....	284
8.1 激光中的合作效应: 自组织和相变.....	284

8.2	波模图象的激光方程.....	285
8.3	序参量的概念.....	287
8.4	单模激光.....	288
8.5	多模激光.....	293
8.6	连续多模激光·与超导性的类比.....	295
8.7	单模激光的一级相变.....	299
8.8	激光不稳定性谱系和超短激光脉冲.....	303
8.9	流体动力学中的不稳定性: Bénard问题和 Taylor问题.....	311
8.10	基本方程.....	312
8.11	阻尼解和临界解($R \leq R_c$).....	314
8.12	$R = R_c$ 邻近(非线性区域)的解。 有效Langevin方程.....	315
8.13	Fokker-Planck方程和它的定态解.....	317
8.14	阈附近Gunn不稳定性的统计动力学模型.....	322
8.15	弹性稳定性: 一些基本概念的概述.....	328
9.	化学系统和生化系统.....	333
9.1	化学反应和生化反应.....	333
9.2	无扩散和一个变量的决定论性过程.....	334
9.3	反应和扩散方程.....	339
9.4	两个或三个变量的反应扩散模型: Brussel 模型和Oregon模型.....	342
9.5	无扩散的化学反应随机模型·生灭过程。 一个变量.....	351
9.6	有扩散的化学反应随机模型·一个变量.....	358
9.7*	Brussel模型在软模不稳定性邻近的随机 处理.....	354

9.8 化学网络.....	369
10. 对生物学的应用.....	371
10.1 生态学, 群体动力学.....	372
10.2 捕食者与被捕食者系统的随机模型.....	377
10.3 进化过程的一个简单数学模型.....	378
10.4 形态发生的一个模型.....	379
10.5 序参量和形态发生.....	384
10.6 关于形态发生模型的几点评论.....	397
11. 社会学: 舆论形成的随机模型.....	399
12. 混沌性.....	403
12.1 什么是混沌性?	403
12.2 Lorenz模型。模型的提出和与实际的比较.....	404
12.3 混沌性是怎样出现的.....	407
12.4 混沌性和役使原理的失效.....	413
12.5 相关函数和频率分布.....	416
12.6 混沌运动的其它例子.....	419
13. 历史评述和展望.....	420
参考文献, 进一步的读物和注解	423

1. 目 的

为什么你应该读这本书

1.1 有序和无序：一些典型现象

让我们从日常生活中的一些典型观察开始。当我们把一个冷的物体与一个热的物体接触时，热交换终于会使两个物体得到相同的温度（图1.1），系统至少在宏观上变成完全均匀的。但是在自然界中决不会观察到相反的过程。因此过程只能向着一个唯一的方向进行。



图 1.1 不可逆的热交换



图 1.2 气体的不可逆膨胀



图 1.3 墨水滴在水中的扩散

若我们有一半空间充满气体原子的容器，移去活塞，气

体将充满整个空间(图1.2)。相反的过程则不会发生。气体不会把自己集中于刚好是容器一半的体积中。当我们把一滴墨水滴入水中时,墨水会扩散得愈来愈大直至最后达到一个均匀分布(图1.3)。相反的过程决不会被观察到。当一架飞机用烟在空中飞划出字母时,字母会愈来愈弥散而至消失(图1.4)。在所有这些情况中,系统发展到唯一的末态,称为热动平衡状态。原来的结构消失了,代之以均匀系统。当在微观上分析这些现象,考虑原子或分子的运动时,发现无序性增加了。



图 1.4 云的扩散

让我们用一个能量退降的例子来结束这类举例。考虑一辆关闭了引擎而仍在行驶的汽车。开始时汽车在运动,从物理学家的观点看来,它是具有一定动能的一个自由度的运动(向一个方向运动)。这些动能被摩擦力消耗掉,转变成热量(使轮子等发热)。因为热量意味着许多粒子的热运动,一个自由度上的能量(汽车的运动能量)被分配于许多自由度上。另一方面,显然我们不能通过仅仅加热轮子而使一辆车子走动。

在热力学领域,对这些现象有其特有的描述。那里有一个称为熵的量,它是对无序程度的一个量度。(唯象地得出的)热力学定律说:在一个孤立系统(即一个与外界没有接触的系统)中,熵总是向着它的极大值增加。

另一方面，当我们从外部操纵一个系统时，我们能够改变它的有序程度。比如考虑水蒸气的例子(图1.5)。在高温下，它的分子互不相关地自由运动。当温度降低时，它形成液滴，分子互相之间保持一个平均距离。因此它们的运动是高度相关的。最后，在更低的温度，在凝固点处，水转变成冰的晶体。现在分子完全以固定的秩序排列。在不同聚集态(也称为相)之间的转变是十分突然的。虽然始终包含的是同一类分子，但是三个相的宏观特征极为不同。大家都很清楚，它们的力学、光学、电学和热学的性质相差很大。

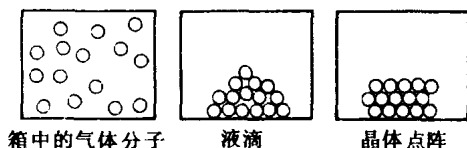


图 1.5 处于不同相的水

另一类有序发生在铁磁体(例如罗盘的磁针)中。当一块铁磁体被加热时，它会突然失去磁性。当温度降低时，这磁体会突然地重新获得磁性(见图1.6)。我们可以设想，从微观的原子层次看来，磁体是由许多(原子的)元磁体(称为自旋体)组成的。在高温情况，元磁体的指向是无规的(图1.7)，当把它们的元磁矩加起来时，会互相抵消，并不形成宏观磁矩。在临界温度 T_c 以下，元磁体排列成行，产生了宏观磁矩。因此，微观层次的有序是物质在宏观层次出现新特征的原因。从一个物相到另一个物相的变化称为相变。在超导体中观察到一种同样惹人注目的相变。在某些金属和合金中，在一定的温度以下，电阻会突然地完全消失(图1.8)。这种现象是由金属电子的某种有序排列引起的。还有许多这种

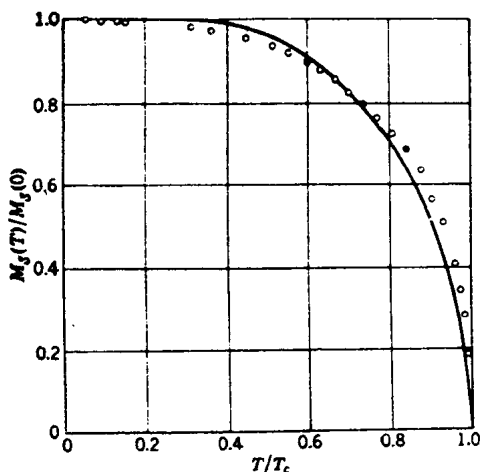


图 1.6 磁铁的磁化强度作为温度的函数(依照C. Kittel: *Introduction to solid state physics*, Wiley Inc, New York, 1956)

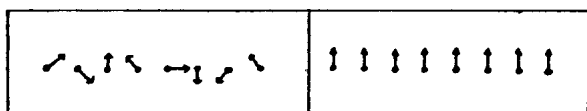


图 1.7 元磁体无规指向 ($T > T_c$) (左边);
元磁体排成一行 ($T < T_c$) (右边)

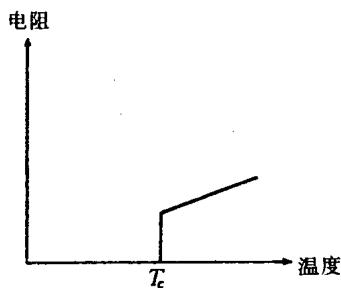


图 1.8 超导体的电阻作为温度的函数

相变的例子，它们经常显示出惊人的相似性。

尽管这是一个很有趣的研究领域，它却没有给我们提供解释任何生物过程的线索。生物体的有序和特有功能不是靠降低温度来获得，而是靠通过系统的能量流和物质流来维持。这里特别要指出，以化学能形式供应系统的能量——这个过程包括许多微观步骤——最终导致宏观尺度上的有序现象：宏观图样的形成（形态发生），运动少数自由度的等等。

从上述的物理现象与热力学定律来看，解释生物现象的可能性，特别是解释从混沌状态里产生出宏观层次上有序这种现象的可能性，似乎是没有希望的。它曾使一些有成就的科学家相信这种解释是不可能的。但是我们不要因某些权威的意见而泄气。让我们从另一个角度重新研究这个问题。汽车的例子告诉我们，不可能把很多自由度运动的能量集中到一个自由度上。但也要看到，在汽车的引擎中汽油的化学能首先基本上转变为热。然后，在汽缸中活塞被推向一个规定的方向，由此完成了多自由度能量向单自由度能量的转变。这里要注意到两个重要的事实：

1) 整个过程通过人造的机器而成为可能。在其中我们建立了完全确定的约束。

2) 我们从一远离热动平衡的情况出发。因而实际上推动活塞相应于在给定的约束下趋向热动平衡。

但是把这种机器作为生物系统的模型却不行，这因为生物系统是自组织的，而不是人为的。这使我们考虑能否在自然界发现远离热动平衡的系统（见上面2），它在自然的约束下动作。最近发现了一些这类系统，另一些是过去早已经知道的。我们叙述几个典型的例子。

一个处在自然系统和人造器件边缘上的系统是激光器。