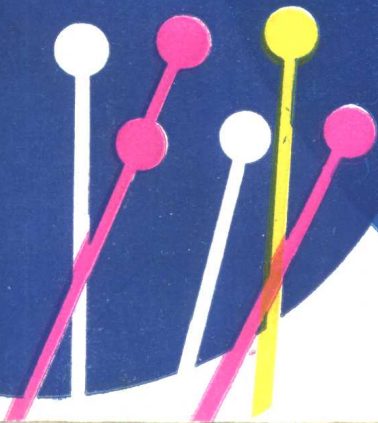


郭治安 等 编著

四川人民出版社

协同学入门

XIETONG
XUE
RUMEN



协同学入门

郭治安 等 编著



四川人民出版社

一九八八年·成都

责任编辑：庞学锋

封面设计：邱云松

技术设计：凌志云

协 同 学 入 门

郭治安等 编著

四川人民出版社出版(成都盐道街3号)

四川省新华书店发行

成都友谊印刷厂印刷

开本850×1168mm 1\32 印张12 插页2 字数 300 千

1988年6月第一版 1988年6月第一次印刷

ISBN7-220-00199-1/E·18

印数:1-1,620册

定价:2.80元

前 言

“协同学”是西德著名理论物理学家哈肯教授首先提出来的。这是一门系统科学理论，是研究由大量子系统组成的系统在什么样的条件下产生相变，以及相变的规律和特征的一门综合性学科。

20世纪60年代初期，哈肯教授在研究激光的过程中发现，激光是一种典型的远离平衡态时的由无序转化为有序的现象。这种从混沌无序到稳定有序结构的转变引起了哈肯的深思，促使他考虑在不同系统中是否存在着类似现象的问题。为了进一步探讨有序结构形成过程的普遍规律和共同特征，他以在不同条件下形成不同激光的特点为依据，进一步去寻求不同现象中这种转变的类似性。哈肯考察分析了许多不同领域中非平衡有序结构形成的现象，他发现在那些千差万别的学科中所出现的有序结构形成过程，与不同条件下激光的形成遵从着相同或相

F0008/06

似的数学方程。哈肯的认识由此产生了一个飞跃，他在概括了不同现象中有序结构形成的共同特点，即一个由大量子系统所构成的系统，在一定条件下，子系统之间通过非线性的相互作用产生协同现象和相干效应，使系统形成有一定功能的自组织结构，在宏观上便产生了时间结构、空间结构或时一空结构，出现了新的有序状态之后，他得出结论：“近几年，已经日益明显地看到，在物理、化学系统中有许多事例，说明在那里一些组织得很好的空间结构、时间结构或空一时结构是从无序状态中产生的。”“令许多科学家惊奇的是，为数很多的这类系统在从无序状态过渡到有序状态时，它们表现出惊人的类似的行为。这一点有力地表明，这些系统的功能服从一些相同的基本原理。”由此，在70年代初期协同学作为一门新兴综合学科便正式诞生了。

自从1977年哈肯的《协同学导论》问世以来，协同理论的发展和运用取得了很大的成就。它的研究范围也变得日益宽广，从自然科学系统直至社会科学系统，哪里有有序结构的形成，哪里就有协同作用，哪里也就有协同学的研究对象。对于相变后系统的有序结构而言，相变前的系统是无序的，也就是对于这种序来说，相变前的系统是混乱的。这样，不仅可以用协同学研究不同现象中有序结构的形成规律，而且也可以研究同一系统中出现的不稳定性序列。

事实上，各个不同学科是分别讨论自己研究范围内的协同问题，协同学则把不同学科共同存在的协同现象抽取出来作为自己的研究对象，用共同的数学模型去研究各个学科的不同问题。

70年代以来，国外出版的以定量计算为基础的《协同学丛

书》已达35卷之多。哈肯的《协同学导论》主要解决系统从无序到有序转变的一般方法和规律，1983年出版的第20卷《高等协同学》解决了从无序到有序以及从有序到有序的演化序列的统一描述。至此，协同理论达到了完善的地步。协同学处理问题的三部曲是：（1）丧失线性稳定性 （2）应用伺服原理

（3）求解序参量方程。协同理论正是沿着这条主线不断发展和完善起来的。《高等协同学》使用了动力系统微分方程理论的最新成果，研究了当控制参量不断变化时，微分方程的解如何失稳、如何进入了新的状态。《高等协同学》承袭了协同学的框架，突出了序参量的作用，侧重点放在把绝热消去原理开拓为适用面更加广泛的伺服原理上。从这个角度上讲，协同学出色的回答了其它理论所没有回答的问题，即系统的自组织是如何形成的。系统在相变前后，系统的控制参量只有量的变化但并没有质的改变，也就是说，系统在相变点形成怎样的结构，并非外界环境提供了什么信息或给出了什么指令，而是由于系统内部自行组织起来的。耗散条件，即输入给系统的熵小于从系统输出的熵，或者发展为超熵判据，说明了系统相变的外界条件，即控制参量必须达到阈值。协同学则通过数学语言生动说明，在临界点系统的诸参量并非位置等同的，那些为数极少的慢变量支配着数目庞大的快变量，快变量的变化服从于慢变量，慢变量——标志系统走向何处的序参量，却主宰着系统的演化进程，协同是在序参量支配下子系统统一步调的运动过程。因此，伺服原理的适用就标志着系统将走向更加的有序。

然而，尽管各种系统的演化序列有所不同，但却终将有序转变到混沌——即在一个自由度上出现无规则运动。系统从有序转变为混沌的过程，伺服原理失灵，也就是协同学的协同

支柱失效，因此在描述系统从有序到混沌的转变过程，协同学和其它理论采用了同样的办法。所以有人称协同学是有序化的理论。虽然哈肯教授认为混沌乃至湍流仍然是有序状态，仍然可以设法用序参量来描述，但这个问题现在并未解决。

协同学的发展和主要反映在《协同学丛书》之中。在《高等协同学》之后，理论发展的另一成就是，哈肯教授多年的宿愿是把适用于平衡态的信息理论开拓为描述非平衡相变的普适理论，即将出版的《信息和自组织理论》就是这一研究的结晶，这不仅使协同学的语言走向统一化规范化，使协同理论普适性更强，而且可与系统工程中的信息理论相衔接，为系统科学的逐步建立和发展迈出了可喜的一步。

应当说明，哈肯教授在写《协同学导论》一书中，曾用一章的篇幅介绍了信息理论，然而在建立自组织理论时，却发现当时的信息理论象概率论和熵一样是以平衡统计为基础的，而系统在发生非平衡相变时，恰恰各种微观组态不是等概率的，只有那些概率变大的组态最终主宰了系统，所以以普适性极强的信息理论描述自组织理论时遭到了失败。正象在耗散结构理论中企图用熵的变化来描述系统走向有序，但结果只作到了超熵判据，它对系统的非平衡相变过程并未给出描述。哈肯教授在研究了演化序列的一些问题之后，又回到了运用和发展信息理论的问题，使信息理论获得了新的活力。

近年来，协同理论已经引起了我国物理、化学、生物、地理地质、天文气象、系统工程、机械电器、思维科学、医学、自动化科学以及哲学界广大同志的关注和兴趣。协同学的应用和发展异常迅速，摆在我们面前的任务也越来越多，如何把协同理论应用到我们的工作中、为社会实践服务，是一个十

分紧迫的问题。

但国内目前尚无一部简明通俗而又有一定深度的著作，系统介绍协同学的基本概念、基本方法和基本应用。有鉴于此，我们不揣冒昧，编写了这部《协同学入门》。

本书的第一、二章介绍了协同学的主要概念和方法，第三、四、五、六章分别介绍了协同学的数学基础和理论框架，这是第七章自组织理论的预备知识。第七章自组织理论是协同学的硬核，比较系统地介绍了绝热消去原理的应用和序参量方程的求解，它是后几章应用部分的理论依据。第八、九、十、十一章分别介绍了协同学在激光和非线性光学、流体力学、建筑机械工程和电子工程、化学、生物化学和生物学、社会经济、交通运输等方面的初步应用，把重点放在协同学的处理和结果上，以期说明如何应用协同学的理论去解决实际问题中所存在的协同现象。

本书是广大自然科学和社会科学工作者，尤其是广大青年读者需要了解协同学理论的基础读物，也是深入学习、应用协同学的入门书。自1980年全国第二届非平衡统计物理学学术会上印发了“协同学导论”之后，在国内自然科学和社会科学的广大领域引起了强烈的反响，各个专业的同志们迫切需要一本入门书。编者在教学和各地讲学的实践基础上，结合同志们在学习过程中共同存在的跳跃性大入门难的困难，编写了这本书。本书的起点低，深入浅出的介绍了协同学的主要概念和方法，为深入了解协同学的理论和应用奠定了基础。

张纪岳教授参加了本书的编写工作。

在此感谢钱学森、江仁寿等前辈的关怀和鼓励，感谢罗辽复、黄润荣、沈小峰、金百顺等教授的热情帮助，感谢四川人

民出版社同志的密切合作，没有他们的支持，本书就不可能这么快的问世。

由于编著者水平有限，缺点和疏漏在所难免，恳请同志们提出宝贵的批评意见。

编著者

一九八七年一月

目 录

前 言	(1)
-----	-------

第一章 引论

1.1 系统和有序	(1)
1.2 两种趋向	(4)
1.3 典型现象	(7)
1.4 平衡相变	(11)
1.5 非平衡相变	(15)

第二章 协同学的基本概念

2.1 协同理论的形成	(21)
2.2 协同学的基本概念	(23)
2.3 协同学与唯物辩证法	(31)
2.4 协同学与其它学科的关系	(43)

第三章 概率论初步

3.1 取样空间和随机变量	(47)
3.2 概率及分布	(49)
3.3 连续随机变量	(52)
3.4 联合概率	(53)
3.5 特性函数	(56)
3.6 条件概率	(58)
3.7 二项式分布和泊松分布	(60)
3.8 高斯分布	(65)
3.9 中心极限定理	(67)

第四章 随机论

4.1 布朗运动的随机过程	(69)
4.2 主方程	(75)
4.3 马尔可夫过程 C—K方程	(79)
4.4 联合概率与路径积分	(84)
4.5 在随机过程中一些定义的使用	(87)
4.6 主方程的物理图象	(89)
4.7 主方程 定态解	(91)
4.8 主方程 对称化时的本征值和本征态	(94)
4.9 主方程 克希荷夫求解法	(97)
4.10 主方程 有关求解的几个定理	(101)
4.11 随机过程中的几个概念	(102)
4.12 主方程 不可逆热力学极限	(107)

第五章 动力论

5.1 动力学过程	(108)
5.2 临界点和轨道	(116)

5.3 稳定性	(123)
5.4 关于二分岔和稳定性的讨论	(130)
5.5 突变论初步	(137)

第六章 随机论和动力论

6.1 朗之万方程	(151)
6.2 热源和随机力	(157)
6.3 福克—普朗克方程	(164)
6.4 福克—普朗克方程的定态解	(170)
6.5 福克—普朗克方程的含时解	(177)
6.6 福克—普朗克方程的路径积分解	(183)
6.7 相变类比	(186)
6.8 连续介质中的相变类比	(196)

第七章 自组织理论

7.1 组织	(202)
7.2 自组织	(206)
7.3 涨落的作用	(213)
7.4 绝热消去原理应用: 福克—普朗克方程	(216)
7.5 绝热消去原理应用: 主方程	(218)
7.6 连续介质中的自组织 数学方法概述	(220)
7.7 非平衡相变的广义金兹保—朗道方程	(221)
7.8 广义金兹保—朗道方程的高阶贡献	(231)
7.9 连续分布非平衡系统的标度理论	(235)
7.10 软模不稳定性	(239)
7.11 硬模不稳定性	(244)

第八章 激光和非线性光学

8.1 激光中的合作效应: 自组织与相变	(247)
----------------------------	---------

8.2 激光的模方程	(249)
8.3 序参量概念	(251)
8.4 单模激光	(252)
8.5 多模激光	(256)
8.6 连续多模激光与超导的类比	(258)
8.7 单模激光的一级相变	(261)
8.8 激光不稳定性的层次 超短激光脉冲	(265)
8.9 非线性波的相互作用	(272)

第九章 流体力学、建筑机械工程和电子工程

9.1 贝纳和泰勒问题	(276)
9.2 基本方程	(278)
9.3 阻尼解和边缘解	(279)
9.4 近 $R = R_c$ 的解(非线性区) 朗之万方程	(281)
9.5 福克-普朗克方程及其定态解	(283)
9.6 弹性不稳定性基本概念概述	(287)
9.7 耿氏不稳定性	(291)
9.8 隧道二极管	(296)
9.9 PN结的二次击穿	(298)

第十章 化学和生物化学

10.1 化学和生化反应	(304)
10.2 无扩散反应方程	(305)
10.3 反应扩散方程	(310)
10.4 布鲁塞尔子和俄勒哥恩子	(312)
10.5 无扩散化学反应的随机模型	(320)
10.6 扩散反应的随机模型	(325)
10.7 布鲁塞尔子软模的随机处理	(329)

10.8 化学网络	(334)
10.9 生态学、群体动力学	(336)
10.10 捕食者与被捕食者系统的随机处理	(342)
10.11 进化过程的简单数学模型	(344)
10.12 形态形成的模型	(345)
第十一章 社会、经济、交通管理	
11.1 舆论形成的随机模型	(349)
11.2 微观经济和宏观经济	(353)
11.3 交通运转和决策	(357)
主要参考文献	(365)
译名对照	(367)

第一章 引 论

1.1 系统和有序

我们所处的世界是一个由多层次物质所构成的统一整体。就人们对物质结构的认识来说，有夸克（层子）、基本粒子、原子核、原子、分子、宏观物体、地球、太阳系，星系，总星系等层次。这些物质从小到大其线度横跨43个数量级。仅就生物的结构，就有亚细胞、细胞、组织、器官、系统、个体、种群、群落、生态系统、生物圈等层次。只要仔细观察一下我们周围的世界，一切都在表明：层次世界的概念是具有普遍意义的。

从层次世界的概念出发，再来考查我们研究的对象——“物体”，会发现它们都是由下一层次的“物体”所构成的。一滴水，有 10^{20} 个以上的水分子。各个层次上的“物体”，在

构成上都有相似之处。因此，我们把所研究的对象都称为系统，而把组成系统的下一个层次的“物体”称为子系统。当然，系统和子系统是在相对的条件来说的。如果研究社会，人就是最基本的子系统。如果研究人，那么构成人的各个器官就是子系统。如果研究器官，构成它的大量细胞就是子系统，如果研究细胞，在细胞中进行生物化学反应的各种分子就是子系统。为了研究方便，把所研究的系统称为宏观世界，构成所研究系统的子系统称为微观世界。系统在宏观上的性质和变化特征，是由于子系统之间的不同的关联和协同方式所决定的。如水蒸汽，水和冰的不同状态，是由于在不同条件下水分子之间不同程度的耦合与协同所形成的。为了进一步探讨层次之间的联系和规律，根据系统存在的具体条件，将它分为三类：孤立系统、封闭系统和开放系统。孤立系统，是指系统和外界既无能量交换又无物质交换。当系统和外界联系弱到可以忽略的程度时，才将它视为孤立系统。因此孤立系统只是一种理想系统。封闭系统，是指系统和外界只有能量交换而无物质交换的系统。这只能是建立在经典理论基础上的近似描述。开放系统，是指系统和外界既有能量交换又有物质交换（甚至包括信息交换）的系统。这是自然界乃至社会界实际存在的大量系统的真实写照。

为了描述在不同条件下系统的演化规律和系统的宏观特征，可将系统分为有序状态和无序状态（简称有序和无序），或者称为有序结构和无序结构。当系统具有一定规律性的结构时，称为有序结构；有结构而无分布规律可循的称为无序结构，如一堆沙子，虽然沙粒没有一定的空间分布规律，但沙堆却具有一定的形状并占据一定的空间，这就是只有结构而无秩

序。系统的结构是构成它的大量子系统之间的组织状态以及相互联系的反映。系统结构分为空间结构、时间结构和时-空结构。这里所谈的系统结构的“规律”，是指（或者目前是指）系统的结构有无一定的周期性和重复性。晶体具有明显的空间结构和周期性。按它的特征可将它分为7个晶系 14 种点阵结构，微观上又分为32点群和230个空间群。生物的遗传物质，脱氧核糖核酸（DNA），具有十分复杂的双螺旋空间结构。系统在空间分布上的这种周期性和可重复性，就称它是空间有序。时间结构的有序，是指系统的结构或特性具有时间上的周期性。如多细胞生物体内具有一种特殊结构的生理系统，它推动和调节着生物的节律活动——生物学上称为时间结构系统。秋去冬来，春暖花开是这种节律的反映。树木的年轮是生长时间结构的反映。在生态学中，扑食者和被食者在数量上的变化关系也具有时间结构，如野兔数和山猫数的变化就具有时间上的周期性。当野兔增多时，山猫可因获得充足的食物便增多起来，山猫的增多要吃掉很多的野兔，这时又使野兔减少，野兔的减少使山猫得不到足够的食物，便因饥饿而减少，山猫数的减少，又使野兔数量增多起来。如此循环下去就出现了山猫和野兔的时间周期性振荡，象这种生态学中时间结构有序的例子在自然界广泛的存在着。同时具有时-空结构的有序系统称为时空有序，如化学振荡中著名的别洛索夫——扎布金斯基反应，将 $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_4$ 、 KBrO_3 、 $\text{CH}(\text{COOH})_2$ 、 H_2SO_4 和几滴试亚铁灵（氧化还原指示剂）相混合并搅拌、倒入试管后，立刻出现了蓝层（指示 Ce^{4+} 过多）和红层（指示 Ce^{3+} 过多）相间隔的空间有序结构，同时又出现了红层和蓝层交替转变的时间振荡，其振荡周期为30秒。