

· 非线性科学丛书 ·

主编 彭仕政 蔡绍洪

系统协同与自组织过程 原理及应用

彭仕政 蔡绍洪 赵行知/著

贵州科技出版社

·非线性科学丛书·

主编 彭仕政 蔡绍洪

系统协同与自组织过程 原理及应用

彭仕政 蔡绍洪 赵行知/著

贵州科技出版社

非线性科学丛书

主编 彭仕政 蔡绍洪

系统协同与自组织过程原理及应用

彭仕政 蔡绍洪 赵行知/著

贵州科技出版社出版发行

(贵阳市中华北路 289 号)

贵州智通激光照排中心排版

贵阳经纬印刷厂印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 10.875 印张 273 千字

1998 年 7 月第 1 版 1998 年 7 月第 1 次印刷

印数:1~1000 册

ISBN 7-80584-811-4/O·027 定价:22.80 元

内 容 简 介

由多个子系统经某种机制构成的系统中存在特定的协同作用。本书清晰地给出了系统协同理论中的基本概念,阐述了自组织过程的普遍性,以及协同理论研究的基本方法、自组织过程的随机概率描述以及非平衡相变及其触发机理。本书适合于对非线性理论感兴趣的理、工科师生、工程技术人员和社会科学研究人员阅读参考。

前 言

事实上,不管我们怎样去看待一个你想集中思考的系统,它都是由大量更低层次的子系统依据某种关系协同发生的复杂系统,那么,这些子系统究竟是通过怎样的合作才在宏观尺度上产生层出不穷的时间、空间或功能结构的呢?这正是我们的目的所在。自组织过程使得系统内一种状态突变到另一种状态,这样的自组织过程是如何发生发展的呢?特定元件和子系统的特定的组织形式构成高层次的复杂系统,从而使得它具备了特定的功能,这一过程本身就是一个特定的自组织过程,是子系统间通过特别的合作机制协同发展起来的。

生物体的产生,不言而喻是鬼斧神工的天作之力使得原本是无机原子的子系统逾千逾万年的漫漫演变,以致演化出了如人类大脑这样不可思议的有机结构。人类在制造各种装置时依据特定的需要设置了特殊的边界条件,例如:需要家用电冰箱制冷、保鲜,冰箱就果然满足了这种要求,认认真真地尽职尽责,而生物或生物组织或生物器官的形成过程,却是一系列的自复制过程,显然,在自组织系统和人造装置之间并不存在不可逾越的鸿沟,自组织过程始终满足着协同作用的要求。

但是,电视机的图像会由于电视信号不知什么时候一个小小的扰乱而面目全非,门外突然开过一辆汽车,也会使得你的电视机发生噪噪的杂音,图像也会出现扰动和变化。随机发生的扰动,对系统的自组织过程产生影响,这种影响甚至大到连电视机上的图像都会消失,这一现象固然由于电视机自身的品质决定的,但随机出现的信号涨落,则是能使电视机上的图像突然变坏甚至完全破坏的原因。因此,对任何协同现象存在的系统,噪声的影响实在是不可忽略的。

协同系统可经历连续或不连续的转变而显示出相变理论中的对称破缺、临界慢化和临界涨落现象。从更普遍的观点看,动力系统理论和协同理论都是探讨系统时间演化的。在探讨系统的动力学过程时各种各样的分岔现象表现出了协同作用过程中确定性的和随机性的奇异现象,协同系统的非平衡相变则表现出比热平衡系统的相变具有丰富得多的复杂性和多样性,并且包含着各种各样的振荡和空间结构的混沌。在绝大多数的非平衡相变中,样品的几何条件在对系统产生完全不同的结构上起着决定性作用。非线性和噪声不仅会使完全不同基底的子系统实现协同作用,而且会使系统在协同过程中有新的有序出现。这就是在新施加控制下系统所获得的各种可能的状态。在多数情况下,一些噪声或其分量必然会对系统形成一种相干状态。因此,协同理论需要随机方法来研究这些由多个子系统组成的系统。

涨落在系统的协同作用过程中是至关重要的,只有计入涨落才能恰当的处理转变区域。为了计入涨落,必须采用跨越子空间和含时序参量来研究随机情况。分岔,引入了随机力的影响。

本书是在阅读了大量有关文献的基础上,进行较长时间的深入研究、归纳和分析后得到的一些认识,不成熟和不完善在所难免。作者认为其中有些观点和阐述不一定完全正确,这正是一门尚在不断走向成熟的学科和理论的生命力所在,也是使得更多的学子投入其中的魅力所在。

在本书的撰写和出版过程中,得到很多专家学者的支持和帮助、鼓励,并提出了许多宝贵意见和建议,特别是贵州省物理学会理事长、贵州大学教授黄润荣先生给予了热情的关怀、鼓励和支持,使著者获益匪浅。此外,本书还参考和借鉴了许多学者的研究思想、观点和方法,其主要文献均列于文后。在此,一并致谢。

作 者

目 录

第一章 系统协同的基本概念	(1)
一、系统及其所处状态	(2)
1. 系统和外界	(2)
2. 平衡态与非平衡态	(5)
二、物质系统的相变过程	(7)
1. 平衡相变	(8)
2. 非平衡开放系统	(9)
三、临界现象与自组织过程	(13)
1. 平衡相变的热力学规律	(13)
2. 物质系统的涨落	(17)
3. 临界点的理论及其发展	(21)
4. 连续相变理论的发展	(22)
5. 组织与自组织	(25)
四、控制参量与序参量	(28)
1. 控制参量	(28)
2. 序参量	(29)
3. 标度律	(32)
五、噪声与随机性	(37)
1. 噪声	(37)
2. 随机性	(42)
第二章 自组织的普遍性	(44)
一、物理学中的自组织现象	(44)
1. 流体的非稳定现象	(45)
2. 激光现象	(57)

二、化学及生物系统中的自组织现象	(60)
1. 化学领域中的自组织现象	(60)
2. 生物系统内的自组织现象	(62)
3. 形态形成和演化	(64)
三、计算网络的自组织	(65)
1. 计算机网的自组织, 并行计算	(66)
2. 由不可靠元件构成的可靠系统	(67)
四、生态和社会系统的协同现象	(67)
1. 生态系统中的协同现象	(67)
2. 社会系统的协同现象	(69)
五、自组织的普遍特点及描述	(70)
1. 自组织系统的共同特征	(70)
2. 系统协同和自组织过程的一般数学描述	(73)
第三章 系统协同中的基本方法	(78)
一、描述系统的基本思路	(79)
1. 系统的描述及其模型	(79)
2. 激光系统的描述	(80)
3. 化学系统的描述	(83)
4. 生态系统的描述	(85)
5. 非线性阻尼振子的模拟	(87)
6. 复杂系统的演化及描述	(90)
二、系统演化的动力学过程	(94)
1. 非线性过阻尼振动	(94)
2. 非平衡相变与对称破缺	(99)
3. 二维极限环振荡	(103)
三、系统运动的涨落随机因素	(107)
1. 涨落的因素及随机力	(107)
2. 随机动力学方程的讨论	(109)

3. 涨落对系统演化的影响	(112)
四、自组织与支配原理	(113)
1. 组织与自组织现象	(113)
2. 组织过程的描述与绝热近似方法	(116)
3. 自组织过程与支配原理	(119)
4. 一般自组织系统的序参量方程的导出	(122)
第四章 自组织过程的随机概率描述	(126)
一、广义朗之万方程与福克 - 普朗克方程	(126)
1. 布朗运动与广义朗之万方程	(126)
2. 运动过程的概率描述	(131)
3. 福克 - 普朗克方程的导出	(133)
二、福克 - 普朗克方程的定态解	(137)
1. 福克 - 普朗克方程与概率流连续性	(137)
2. 福克 - 普朗克方程的定态解	(138)
三、福克 - 普朗克方程的含时解	(142)
1. 线性系数的简单含时解	(143)
2. 一般情况的含时解	(146)
3. 各项积分法求解	(148)
四、概率演化方程中的支配原理	(151)
1. 福克 - 普朗克方程中快参量消去	(151)
2. 与平衡相变的类比	(153)
3. 随机变量概率运动的主方程	(155)
4. 主方程中快参量的绝热消去	(159)
5. 随机变量概率方程的关系	(160)
第五章 噪声对自组织过程的影响	(165)
一、分岔现象	(167)
1. 叉形分岔	(169)
2. 霍普夫分岔	(171)

3. 鞍—结分岔	(171)
4. 临界分岔	(173)
二、随机力对非平衡相变的影响	(175)
1. 白噪声与色噪声	(175)
2. 噪声对非平衡相变的描述	(177)
3. 噪声对非平衡相变性质的影响	(179)
三、噪声诱发非平衡相变	(181)
1. 马尔萨斯—弗赫尔斯特非平衡相变过程	(181)
2. 再就业选择模式	(191)
四、随机力作用下双稳系统的非平衡相变	(199)
五、非平衡相变临界相关奇异性及巨涨落触发机理 ...	(204)
1. NPC 序参构型及相关函数	(206)
2. 涨落空间相关的临界奇异性	(209)
3. 涨落时间相关的临界奇异性	(210)
第六章 激光系统中的自组织过程及非平衡相变 ...	(212)
一、激光的物质基础与基本原理	(213)
1. 原子的能级结构与分布	(214)
2. 自发辐射与受激辐射	(218)
3. 粒子数反转与激活媒质	(227)
4. 谐振腔与激光放大	(231)
二、激光模型与基本激光方程	(235)
1. 热库耦合的激光振荡模型	(236)
2. 场的量子方程	(240)
3. 经典力学下的基本激光方程	(243)
4. 激光序参量的出现	(244)
三、单模激光系统	(245)
1. 方程的简化	(245)
2. 支配作用与绝热消去	(246)

3. 临界点邻域内的序参量方程	(248)
4. 单模激光的临界性质	(250)
四、多模激光系统	(251)
1. 多模激光演化方程	(252)
2. 分立谱的序参量方程	(252)
3. 连续谱的序参量方程	(254)
五、激光相变及关联函数	(257)
1. 理论值与可测值的对应	(257)
2. 场关联与势函数	(259)
3. 涨落相关函数与临界巨涨落	(263)
六、激光相变不稳定性及混沌	(267)
1. 激光的稳态相变	(267)
2. 激光中的不稳定性	(269)
3. 激光的演化与混沌	(273)
第七章 自组织临界理论模型及应用	(278)
一、非平衡自组织系统的规格化普适性描述	(278)
1. 自组织系统规格化模型的局域描述	(279)
2. 局域序参量的临界支配作用	(283)
二、自组织规格模型广义势的临界渐近形式	(291)
1. 广义势的一般结构	(291)
2. 广义势的同胚构成及其扩展	(293)
3. 广义势的临界渐近形式	(296)
三、非平衡自组织系统的临界耗散参量	(298)
1. 自组织系统的临界参考态及耗散参量	(299)
2. 耗散参量的临界变化趋势	(302)
3. 非平衡相变的临界耗散指数	(305)
四、非平衡相变与平衡相变的临界统一	(309)
1. 两类临界现象间的差异与相似	(310)

2. 参考态的临界相似关系与统一	(312)
3. 势函数的临界相似关系与统一	(312)
4. 相关函数临界相似关系与统一	(313)
5. 可标度性的临界相似关系与统一	(315)
6. 临界指数的联系与统一	(316)
7. 临界标度律的联系与统一	(317)
五、记忆形成的自组织过程	(319)
六、协同学理论建立过程中的思想方法	(325)
1. 普遍性——透过激光的启示	(326)
2. 子系统——自组织的基元	(327)
3. 序参量——矛盾的交点	(328)
4. 协同、竞争——统一性和斗争性的体现	(330)
5. 涨落——偶然转向必然的契机	(331)
6. 类比——开阔视野的“广角镜”	(332)
7. 博采众长——使用最新武器	(333)
参考文献	(335)

第一章 系统协同的基本概念

和伊·普瑞高津一样,赫尔曼·哈肯教授在研究了由大量子系统构成的自然科学系统和社会学系统后,于1977年提出了一门新的学科——Synergetics(协同学),Synergetics一词是从希腊文衍变而来的,意为协同作用的科学,在哈肯的研究中,则更强调这种相互协同的作用是发生在某一系统(不管是自然的,还是社会的系统)中各个子系统间。就这一点哈肯教授曾明确地指出,协同学的中心议题,就是“探讨是否存在支配生物界和非生物界结构和(或)功能的自组织形成过程的某些普遍原理”,而这个答案是肯定的。由不同成分组成的系统,在没有外界环境的特定干预下会自行组织起来产生其特定的结构和功能。不言而喻,生命现象是一种特定的自组织现象,生物细胞的分裂、变异、演化过程自然也就应该是一个自组织过程;社会——无论是人类社会还是动物社会,其发生、发展的过程,就其本质而言,也是一个自组织过程;进入现代社会,人类享受着极大的物质文明,电话、电视以及发烧友狂热追求的高级音响等等现代高级电子产品,其结构或功能的形成,仍然是各种装置以其自组织过程为基础的。有特定的自组织,就产生特定的功能。由此看来,在自组织系统和人造装置之间有着某种本质的联系,或者说,并无不可逾越的鸿沟。生物依据自身形成和发展过程中形成的一系列自组织过程不断地复制和繁衍,以这样的自组织过程作为科学研究的目标,研制出了大量的现代装置,这就出现了对生物自组织现象的研究从而进一步推进现代应用技术发展和社会科学进步的令人鼓舞的前景。

哈肯教授曾经很明确地指出:“协同学是研究由完全不同性质

的大量子系统(诸如电子、原子、分子、细胞、神经原、力学元、光子、器官、动物乃至人类)所构成的各种系统。”“研究这些子系统是通过怎样的合作才在宏观尺度上产生空间、时间或功能结构的。我们尤其要集中研究以自组织形式出现的那类结构,从而寻找与子系统性质无关的支配着自组织过程的一般原理。”这,就是本书想要达到的目的。

一、系统及其所处状态

1. 系统和外界

宇宙是物质组成的,自然界中的各种物质客体,小到微观基本粒子,大到日月星辰,从简单细胞,复杂到如人之大脑,无不以系统形式存在。系统都是由确定的子系统组成的,从哲学意义上讲,系统是无限可分的。任一系统都有其特定的环境,系统应是与环境有特定联系的客观综合体。系统由子系统构成,这些子系统可视为一些相互关联、相互制约、互相协同的元件、部件、元素,它们的协同作用形成特定的功能且能达到特定的目的。这些组成系统的大量下层次的客体称为子系统,一台计算机的子系统包括其各种驱动器、显示屏、鼠标等;激光系统的子系统是大量的激活原子和光子;一个城市系统的子系统是大量的工厂,市政设施,公路以及政府、市民。

系统总存在着一定的外部环境,不同的系统与外界关系不同,依据差别,系统被分为孤立系统、封闭系统和开放系统。孤立系统是与外界既无能量、物质交换,又无信息沟通的系统,是一种最单纯的系统,也是进行科学研究时最理想的系统;封闭系统与环境有能量交换但无物质流通,无信息交流;复杂的是自然界大量存在的开放系统。开放系统是与外界有能量、物质交换且有信息往来的系统,这里发生的行为往往是非线性的,这样的系统存在于自然

界,也存在于发展演化的社会和经济活动中。

严格地说,孤立体系是一种理想的体系。自然界中并不真实存在这样的系统,因为,任何系统总在不同程度上受到外界环境的影响,不可能脱离或没有环境。但为了研究的方便,在某一时间间隔内如果系统和环境的相互作用小到可以忽略不计或与我们所关注的系统行为无关,则这类系统可近似地看作孤立系统。如密封的刚性容器内的化学反应就几乎不受外界影响,其产生的反应热也由于容器器壁之隔热而不向外散失,则这样的反应系统是一个孤立系统,其所产生的行为可以用热力学第一定律描述。封闭系统与环境没有物质交换,但可以有能量交换,例如,在一个带有热壁的密闭容器中进行的放热或吸热的化学反应体系是一个封闭系统;忽略陨石和宇宙尘埃,地球在星系中也可视为是一个封闭系统,它接受太阳和其他恒星的辐射能量,同时向其周围环境包括其他行星进行辐射。热力学第一定律很好地描述了这类系统的宏观状况。自然界中大量存在的是开放系统。开放系统是一个与外界有物质交换,同时还有能量交换和信息交流的系统。一个连续流动型反应器内的化学反应体系是一个开放系统;生物体尤其是人,由于总是不断地和环境进行着物质、能量和信息的交流,因而生物体也是一个开放系统;发展演化和进步的社会经济系统大部分都是开放系统。简言之,开放系统具有普遍适用的含义,城市是一个比较复杂的开放系统,它源源不断地纳入各种各样的原材料、食品、设备和各种各样的商品,从自然环境中采取矿产的资源,同时又向环境排出大量的垃圾、废料、产品和废弃物。

系统都具有确定的结构。结构是物质形态的普遍属性,是系统内各种要素或子系统的内在联系和组织方式。特定的结构确定系统的特定性质。物质系统的结构复杂多样,具有不可穷尽的变化,但若按其存在的形式来考虑,则可分为空间结构、时间结构和时空结构三大类。空间结构描述系统物质排布的广延性;时间结

构标志着系统的某些物质随时间变化的规律性和节奏性及其变化程序；时空结构则标志着物质系统运动的广延性和周期性，亦即空间结构随时间演进有节律地变化而形成的空间结构与时间结构的统一体。组成物质世界的各种系统，其结构是极为复杂的，但不管这些结构如何复杂和千差万别，却都可按其所处的状态将它们分为两类状态。一类是无序状态，另一类是有序状态。有序，是指物质系统内部的各种要素或子系统以及事物之间的有规则的联系或转化，有序态对应了系统的有序结构。所谓无序是指物质系统内部各种要素、子系统或事物之间混乱而无规则的运动状态和组合形式。以运动转化的无规则性，单个事物或单一要素在相应层次上是无所谓有序无序的。所谓有序，原则上讲就是物质或事物的排列、组合、运动转化有规可依，反之则为无序。晶体空间点阵的有规则排列，特定的排列确定特定的空间结构也就具有特定的性质和功能；行星围绕恒星有规则地运转，原子中电子在不同的轨道上运转，按不同的能级构成不同的壳层，原子又按某些特定的顺序和规则组成物质分子，等等，以至于一旦我们遵循这样的顺序和规则去构造分子，我们就可以得到所期望的物质，这恰恰是事物的有序所表现出的物质运动的客观规律性和物质世界的可知性。而如乌云密布、浓烟滚滚，一盘散沙、一堆垃圾，非晶态物质无任何次序的微观结构，气体分子的热运动，醉汉的脚步，以及与热运动相联系的布朗运动等等无规则状态或运动，都是无序的。

物质系统的有序具有多样性和多种表现形式。从空间、时间和功能上可将之分为空间序、时间序、时空和功能序。空间序是指事物在空间分布的规则。任何事物都有确定的空间分布，但这种分布并不是完全同一均匀的，而是按一定的方式排列和结合起来的，例如金属分子的空间结构，其结构点阵是按照一定的顺序结成的。时间序是指事物发展变化时时间的先后秩序或同时性。一切事物的发生和发展变化都是一个过程，在各种事物、各种运动的演

进过程中都有时间的确定进程,这种确定而有规则的进程就是时间序。而时空序则是指事物的时间序和空间序的统一体,任何事物总是在空间存在和运动。这些存在和运动又都是与时间紧密相联的。如树木的年轮是按时间和空间的顺序规则排列的,这种秩序就是时空序。功能序是指事物的功能发挥的规律性和秩序性。任何事物在发挥其功能时不是杂乱无章的,而是具有一定的顺序和规则,这就是物质系统的功能序。

2. 平衡态与非平衡态

具有一定结构的物质系统可处于平衡态。也可处于非平衡态,所谓平衡与非平衡是针对宏观热力学体系而言的。平衡态是指在没有外界影响(与外界既无能量交换,又无物质和信息交流)的条件下,物质系统的宏观性质既不随时间而变化,也不随空间变化的状态。不满足上述条件或情况的状态,则称为非平衡态。从微观方面看,系统处于平衡态时,组成系统的分子仍处于不停的不规则热运动中,但其产生的宏观效果不随时间改变,因而系统在宏观上即表现为平衡态。显然这种平衡是一种动态的热平衡。系统处于热动平衡时,其内部不再有严格意义上的宏观物理过程。例如,某一物质体系,若其内部温度各处均匀,并与外界温度相等,这个系统就达到了热力学平衡;若其内部温度不均匀且又与外界温度有差异,则系统是处于热力学的非平衡。

如果系统处于不变的外界条件下,经过一定时间后,系统将达到一个宏观上看来与时间无关的状态,且将长久保持不变,则这种状态称为稳恒态或定常态,简称定态。系统处于定态时,系统的宏观性质不随时间的变化而变化,但其内部却有可能出现某些“流”,如粒子流、热流等,因而,处于稳恒态的系统不一定是处于平衡态,但平衡态的系统却一定是处在稳恒态。例如,一根铜棒,如果其内部各点处温度都相同,则铜棒处于热平衡态;但如果将铜棒两端分别放在温度不同的两个恒温热源上,那么,经过一定的时间后,铜