

· 非线性科学丛书 ·

主编 彭仕政 副主编 伍 进

耗散结构与非平衡相变 原理及应用

蔡绍洪 彭仕政 赵行知 伍 进/著

贵州科技出版社

·非线性科学丛书·

主编 彭仕政 副主编 伍进

耗散结构与非平衡相变 原理及应用

蔡绍洪 彭仕政 赵行知 伍进/著

贵州科技出版社

非线性科学丛书

主 编 彭仕政 副主编 伍 进

耗散结构与非平衡相变原理及应用

蔡绍洪 彭仕政 赵行知 伍 进/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 13.125 印张 329 千字

印数:1 - 1000

1998 年 4 月第 1 版 1998 年 4 月第 1 次印刷

ISBN7 - 80584 - 759 - 2/O·026 定价:28.80 元

内 容 提 要

耗散结构理论是本世纪六七十年代才创立和发展起来的一门非线性系统科学,它是关于宏观非平衡系统自发形成时空有序自组织结构的理论。在各门类自然科学和社会科学中都有着广泛的应用前景。

本书系统地介绍了耗散结构理论的基本思想、基本原理、基本概念、研究方法及其在某些方面和领域中的应用,着重分析和阐述了热力学稳定性理论、非线性动力学及分支点理论的分析方法,重点讨论和介绍了非平衡相变临界涨落理论的随机方法、常用模型及近期的一些研究成果。

本书的论述由浅入深、循序渐进,力求简明清晰,说理透彻,适合对非平衡非线性有序现象感兴趣的各类读者,可供物理学、化学、数学、生物学、哲学和经济学等专业的科学工作者、大专院校师生阅读,可作为各学科领域中的科学工作者学习耗散结构理论基础的入门书,也可作为大学本科生和研究生的选修教材及参考书。

序

耗散结构理论是比利时普瑞高津(I. Prigogine)教授为首的布鲁塞尔(Brussel)学派于本世纪六七十年代创立和发展起来的一门边缘学科。它主要是研究远离平衡的非线性系统在一定的耗散条件下从无序到有序转变的规律和特征,即非平衡相变的自组织过程,是一门横跨自然科学和社会科学的横断学科。由于它所研究的复杂系统中的非平衡、非线性现象是各种不同学科中的共同现象,因而尽管这一理论建立的时间还不长,但已引起广大科学工作者的很大兴趣,在自然科学和社会科学中的许多领域都展现出了广阔的应用前景。物理、化学、生物、生态、医学、气象,以至哲学、经济、管理等领域都采用了它的思想、方法及其研究成果。耗散结构论与协同论、突变论并称为现代科学方法论的新三论。普瑞高津因其创立和发展了这一理论而荣获1977年度的诺贝尔奖。

耗散结构理论的建立,使人们对自然界有了—个比较完整的认识:在平衡态附近,发展过程主要表现为趋向平衡,并伴随着无序的增加和结构的破坏。而在远离平衡的条件下,发展过程可以经受突变,导致新结构的形成和有序的增加。宏观有序结构的形成和维持至少需要两个条件:系统必须维持在远离热力学平衡区,系统中必须存在某些非线性动力学机制。为了能与在平衡条件下形成的平衡结构(如晶体)相区别,故把这种在开放的和远离平衡的条件下,在与外界环境交换物质和能量的过程中,通过能量的耗散和内部的非线性动力学机制来形成和维持的宏观时空有序结构称为耗散结构。

非平衡态热力学稳定性理论是耗散结构关键的理论基础,它指出了在远离平衡条件下出现自组织有序结构的可能性。而宏观非线性动力学理论和半微观的随机涨落理论,则是考察和研究非

平衡相变自组织的具体过程、特性及发展的有力工具。耗散结构理论研究中的许多成功思想和方法,值得广大科技工作者尤其是哲学工作者借鉴和学习。

本书作者,是贵州省近年来在非平衡理论方面较活跃的中青年学者。他们悉心研读了大量有关著述,对非线性科学理论进行了充分深入的研究、归纳和分析,并将所得著成此书。本书理论系统性较强,不仅较完整而且颇有心得地阐述了耗散结构和非平衡相变原理,还融入了作者近年来在耗散结构理论和非平衡相变临界性质等方面研究的部分获奖成果以及作者在涉及哲学、社会及经济方面的研究。全书语言流畅、叙述清晰、深入浅出、层次分明、信息量大,从而增强了本书的知识性和可读性。

此书出版对自然科学和社会科学在非线性理论方面的研究和应用有益。尽管本书亦有不足,疏漏难免,但我仍觉得应对作者的激情和勤奋给予鼓励和支持。同时还望本书成为引玉之砖,使更多的饱学之士能为社会奉献出更多更好的此类著作,以飨读者,进一步推动非线性理论方面的研究和应用。

黄润荣

1997年8月

前 言

久远的宇宙,本不是现在这样的构架。人类,原也非今天这样的丰采。地球,原来的样子是一派寂寞。巨大的时间长河,记录了地球漫长的进化历史。从原始地球的混沌初开,到丰富多彩生命形态的演变形成,揭示了生命物质的形成、生命的起源和进化是一个自组织问题,也是最吸引人、最富挑战性的问题。

世界是由物质组成的。任何物质总是处在一定的外界环境中,物质与环境一起构成了物质系统。物质系统因外界控制条件和内部协同机制的不同,可形成许多相,不同的相表现出不同的宏观行为。相与相之间在结构、功能、性态等方面的差异,是因其内部有序度和对称性的差别而引起的。外界控制和影响系统状态的量是控制参量和外场。相变是指当外场和控制参量连续变化到达某个临界值,引起系统内部对称性的破缺和有序度的突变,从而形成一种新的有序结构。这种新结构是在系统内部自发出现的,因此也称之为自组织结构。

近些年来,在物理、化学系统中存在着的时间、空间以及时空花样或功能结构不断引起人们的好奇和重视。这些功能结构及花样的出现和维持需要一定的理化条件,尤其是当这些系统与外界有一定的物质、能量或信息交换时,其形态花样或功能结构的有序性纯粹是自发出现的,表现出了很强的自组织行为。尽管各类系统大不相同,但自组织行为却呈现了极大的相似性,因而预示着进化过程遵循着某种特定的机制和共同的原理。这样的自组织系统可以在无限可分的某个层次上找到。对它们来说,总存在着一个能量和物质交换的奇点,一个涨落被极度放大的临界点。它们在这里会出现很好的自组织,产生出崭新的时空功能有序结构,即发生了相变。

相变现象普遍存在于各种物质系统中。广义而言,相变过程实际上是物质系统由一种恒定态向另一种恒定态的跃迁过程。相变不仅可发生在平衡态系统中(如气液相变、铁磁相变等),也可发生在非平衡系统中(如激光相变、贝纳对流等)。按背景状态之别,可将其分为平衡相变和非平衡相变两大类。相变现象中对两相过渡区的研究是人们最感兴趣的领域之一,而临界现象又是其关键所在。纷繁复杂的各种相变系统,不论其所含的物质或变量如何特殊,其临界行为都呈现出极大的相似性。

人们对平衡相变临界现象的认识比较早,从19世纪六七十年代对气液相变的研究开始,到20世纪六七十年代标度理论和重正化群理论的建立,这整整一个多世纪的时间,人们对平衡相变及其临界性质的研究已趋成熟。非平衡相变临界现象是本世纪70年代后才逐渐引起人们的注意的。由于非平衡相变更具普遍性,其广泛存在于各类自然和社会系统中(如物质、生物、生态、社会、国家、经济等系统),随着耗散结构理论和协同学理论的出现,人们对非平衡相变的研究迅速进入高潮。

耗散结构现象广泛存在于有机的或无机的、自然的或社会的各种系统中,这些系统的形态性质和构成虽然千差万别,但其自组织行为却表现出许多共同的特征。在一定的外界条件控制下,非平衡系统在远离平衡的非线性区会自发出现有序的自组织结构。这种自组织有序结构的形成是非平衡相变的产物。所谓非平衡相变是指非平衡系统由一种稳定的非平衡定态向另一种稳定的非平衡定态(或周期态)的跃迁过程,它广泛存在于各类物质系统中。如激光系统、流体系统、化学系统、生物系统、生态系统,甚至社会系统中,这些系统无论是物质结构,还是形态属性上,都存着巨大的差异。但它们的临界相变行为都表现出了极大的相似性,如对称破缺、序度突变、长程相干、弛豫慢化、临界巨涨落等。此外它们都是非平衡的开放系统,与外界有着物质和能量的交换。当其处

于接近平衡的线性区时,系统内的各种细致平衡与循环平衡维持着原状态(定态)的稳定性,内部的随机涨落和外界的各种微扰,都不会对其结构的稳定构成威胁。随着时间的推移,各种涨落和微扰都将逐渐地衰减直至消失,即不会破坏系统原有结构。但当控制外界条件使系统远离平衡而进入非线性区时,系统的稳定性将受到威胁,特别是当系统趋近于非平衡相变临界点时,系统原状态失稳,许多物理量出现了奇异性,最突出的是相关长度和弛豫时间趋于极大。这使得此时的各种随机小涨落和微扰都会相互影响和叠加,在幅度上不断加强,在尺度上不断放大,由此形式所谓的宏观“巨涨落”,推动系统由原定态跃迁到新的稳定态,从而完成非平衡相变。相变后所形成的新的有序结构具有一定的耗散性能,其结构的稳定需要不断地耗散外界提供的物质或能量才能维持。在临界点以上,这种新结构的状态是稳定的,不会被一般的小涨落和微扰所破坏。但是一旦外界供给的物质和能量低于某个临界值时,该有序结构将立即瓦解。从非平衡相变系统的以上这些共同特征可以看出,非平衡相变的临界行为并不依赖于具体的物质系统。

对于非平衡系统来说,由于其相变过程与平衡相变的情况有着巨大的差异,虽然人们已对非平衡相变现象作了大量的研究,但就目前而言,人们对非平衡相变临界现象及其特性的认识还不够成熟,有些论点还存在着争议,其临界理论还有待于深入地研究和完善。但有一点是明显的,这就是在非平衡系统中,非线性、相干增强、状态失稳、临界巨涨落、触发跃迁和有序耗散是形成非平衡自组织有序结构的关键。

本书的目的就是想把非平衡、非线性、相干放大、状态失稳、临界巨涨落、触发跃迁和有序耗散的思想,以及作者的一些研究思想、观点和方法,用通俗易懂、深入浅出、循序渐进的方法介绍给读者,并使之能尽快地进入较为深入的状态。对于远离平衡的开放

非线性系统,当其非线性不断加剧时,各种相干效应会不断地加强,并使系统原状态失去稳定性,这时各种随机小涨落在相干效应的作用下被不断放大形成巨涨落,从而触发和推动系统跃迁并进入到一个新的有序耗散稳定态。涨落的放大将导致物理的、化学的、生物的、生态的新结构和新有序的出现。这一思想同样也可运用到社会科学中。通过放大涨落会导致社会的演化。社会是一个极为复杂的系统,包含着数目巨大的分支,这些系统对涨落高度敏感,因而微小涨落在机会满足时会被放大,它于是对社会构成新的希望,亦或对社会造成威胁。希望,会使社会更新,世界更养好;威胁,会使我们这个本来就具有相当不确定和危险的世界更加不安。

因此,本书的第一、二、三章给出了耗散结构理论的基本思想、基本概念和热力学基础。它并不需要深厚的数学基础,你认真地读它,不管你的专业是理工科还是文史哲,你都可以从其中感受到耗散结构的思想,这无疑对你理解非线性系统远离平衡是产生稳定性有序新结构的源泉有所裨益。关于这一点,建议你最好仔细地读一读第四、五、六章的开篇,你就会对本书的整个面目有较深刻的认识。

要稍加强调的是:在科学和文化方面,近些年来掀起了一场范围广泛的关于重新考虑时间的论争,这个问题的重要性在于时间是无所不在的,而时间的地质性、社会性和个人性等等却在不同程度上规划出了系统的特性,我们因此讨论了时间方向与进化问题。这就不能不把时间在社会科学中所起的作用加以研究,至少,对于社会科学,时间在很大程度上还是空白。其实,每个社会都会表现出它自己特有的时间倾向,社会中的每一个人都会采用某种确定的时间视野去看待问题,这些时间视野的差别甚至会成为社会和政治冲突的起源,因为正是这种时间视野的差别导致了分歧、争论甚至战争。

非平衡态热力学的稳定性理论作为耗散结构理论的基础,指

出了远离平衡时系统出现自组织过程和耗散结构的可能性。要深入地了解这些过程出现分支、失稳、巨涨落,以及对称破缺的具体情况、特性及发展趋势,还必须详细考察系统的动力学行为,而宏观的非线性动力学理论和半微观的随机涨落理论则是耗散结构分析的有力工具。如果你希望在耗散结构理论上有较深刻的认识和理解,并把它提高到定量的程度,那么,第四章到第六章给出了较详细的描述,其中也融入了作者一些研究成果。

第四章讨论了用决定论的非线性动力学方法观察远离平衡系统可能出现耗散结构的问题。这一方法的主要思路是:系统的客观性质通过一组反应扩散方程来描述,针对具体过程给出相应的条件,然后对所建立的微分方程求解。非线性导致求这样的解很艰难,于是转而对这些方程作定性研究,作稳定性分析,求耗散结构的分支解,以判定系统的各种具体的性质。

这种决定论的方法是不充分的,它忽略了涨落的影响,于是,第五章着重讨论了非线性非平衡系统的随机过程的涨落理论,涨落的发生是绝对的,但又是随机的,它对平衡相变和耗散结构的形成有着至关重要的触发作用。这种涨落的发生,巨涨落的形成导致非线性非平衡系统出现新结构的机制不仅在自然系统中存在,在社会系统中,在社会人文学科以及法律、经济学科中,其作用也是完全一致的。因此,严格说来,随机过程及其中的涨落,是宇宙中触发新结构产生的触发器。

普瑞高津在耗散结构理论研究中采用了一些常用模型,对这些模型的深入分析和讨论有助于对各种耗散结构的性质及其形成机理的认识更为深刻,理解也更为透彻。同时,这种分析手段和方法对于运用耗散结构理论去观察和研究各个不同学科和领域中的自组织有序现象具有相当深刻的意义。这正是我们在第六章中所想做的。而在第七章中则是依据这些分析手段和原理给出了一些不成熟的应用,仅供读者参考。

本书是在阅读了大量有关著作的基础上,进行较长时期的深入研究、全面归纳和综合分析,形成了自己的一些观点和研究成果后写成的。其中难免会有些不成熟的东西,作者并不认为其中所述的观点和结论都一定完全正确(实际上其中的一些问题目前仍存在着争议),不当之处在所难免,意在抛砖引玉,还望广大读者提出宝贵意见。

在本书撰写和出版的过程中,得到了许多专家学者的支持和帮助,并提出了许多宝贵的意见和建议。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支持和鼓励,并在百忙中为该书作序,在此我们表示衷心的感谢!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,其主要参考文献都列于文后,在此我们一并致谢。

作 者

1997年10月

目 录

第一章 耗散结构理论的基本思想	(1)
一、耗散结构理论研究应用领域	(1)
二、时间方向与进化	(8)
三、非平衡是自发有序之源	(20)
四、线性区不可能形成新结构	(23)
五、耗散结构在非线性区形成和维持	(25)
六、系统的演化、分支、涨落及稳定性	(27)
第二章 耗散结构涉及的基本概念	(33)
一、物质系统的要素层次及复杂性	(33)
二、物质系统的结构、功能与涨落	(41)
三、物质系统的平衡、非平衡及稳定性	(48)
四、物质结构的对称、对称破缺与有序	(57)
五、物质系统的组织与自组织	(63)
六、物质运动的可逆、不可逆与内在随机性	(72)
七、物质系统的线性、非线性与混沌	(79)
第三章 耗散结构理论的热力学基础	(91)
一、经典热力学中的能量转换及耗散	(92)
二、熵的微观机制及波尔兹曼有序原理	(101)
三、非平衡有序结构及经典热力学面临的挑战	(110)
四、非平衡系统的描述方法及平衡方程	(121)
五、熵流熵产生, 广义力广义流及唯象系数	(128)
六、线性区的定态稳定性及最小熵产生原理	(134)
七、非线性区热力学稳定性判据及耗散结构	(140)
第四章 动力学稳定性分析及分支点理论	(154)

一、非平衡系统的动力学描述及反应扩散方程	(156)
二、动力学方程的定性理论及解的稳定性	(166)
三、李亚普诺夫稳定性理论及稳定判别法	(175)
四、线性稳定性分析及系统的奇点类型	(184)
五、非平衡系统的周期运动与稳定极限环	(199)
六、耗散结构分支与多级分支现象	(207)
第五章 非平衡系统的随机过程与涨落理论	(215)
一、非平衡系统的涨落及其随机表述	(217)
二、非平衡相变涨落的临界时空相关性	(227)
三、马尔科夫随机过程概率分布与主方程	(239)
四、主方程的解分析, 母函数与矩方程法	(252)
五、非线性区定态的分布偏移及涨落影响	(260)
第六章 耗散结构理论研究中的常用模型	(267)
一、非线性化学反应模型的热力学分析	(267)
二、Schlogl 模型的非平衡相变及其稳定性分析	(275)
三、Lotka-Volterra 模型的守恒振荡与涨落分析	(282)
四、三分子自催化反应的耗散结构模型	(293)
五、B-Z 化学振荡的时空耗散结构模型	(313)
六、生命进化模拟与生物进化方程	(323)
七、非平衡相变规格化模型及临界普适性	(333)
第七章 耗散结构理论的部分应用	(349)
一、经济发展战略确立的耗散条件	(349)
二、市场系统有序结构的耗散行为	(353)
三、期货市场的耗散动力学过程	(361)
四、电场中微粒形态发生的生物学意义	(366)
五、三分子自催化 NLE 模型的稳定性	(375)
六、可燃性气体临界燃烧爆炸模型	(394)

第一章 耗散结构理论的基本思想

耗散结构是比利时物理学家普瑞高津(I. Prigogine)于1969年在一次“理论物理与生物学”的国际会议上首先提出的一个概念。1971年普瑞高津与格兰道夫(P. Glansdorff)合著的《结构、稳定与涨落的热力学理论》，较为详细地阐述了耗散结构的概念及其热力学理论，并将之应用到流体力学、化学和生物学等方面，引起了人们的广泛重视。1977年普瑞高津和尼科里斯(G. Nicolis)在《非平衡系统的自组织》一书中对其研究成果进行了系统的总结，推动了耗散结构理论与非线性热力学的进一步发展。耗散结构的理论形式是以普瑞高津为首的布鲁塞尔学派二十多年来从事非平衡热力学统计物理研究结出的硕果。由于它揭示了物质系统变化过程中可逆与不可逆、有序与无序的矛盾及相互转化的机理和条件，同时还揭示了自然界物质系统如何从平衡到不平衡，从对称到非对称，从线性到非线性，从稳定到不稳定的演化和相反的演化，因此具有广泛的普适性。其思想方法不仅对自然科学，而且对社会科学都有着重要的参考和应用价值，同时为自然科学、生命科学和社会科学对复杂性的研究开辟了一条有希望的新通道。由于普瑞高津对耗散结构理论的杰出贡献，1977年获得了诺贝尔奖。

一、耗散结构理论研究应用领域

世界是由物质构成的，运动是物质的存在形式。自然界各种物质既有结构层次的不同又有运动形式的千变万化。自然科学的任务是研究自然界各种物质的形态结构性质和运动规律，不断探索新现象，揭示新规律，提出新概念，建立新理论。在现代科学发

展的历史进程中,出现了高度分化和相互渗透基础上的高度综合整体化趋势。一方面是学科的不断分化,随着人类对自然界的认识进入到更深的层次,自然科学也不断深入地研究各种自然事物及其运动的特殊矛盾。这就导致自然科学继续高度分化,使得原来的每一门学科又都分化出许许多多的分支学科。另一方面是学科的交叉与综合。每一门学科越是分化,对它的研究越深入,也就越来越暴露出它与原来认为和它毫无关系的其它学科之间的内在联系。每门学科内部各分支之间,出现了共同的统一基础,使原来分散的理论和概念愈来愈综合,不同学科门类之间的关系愈来愈密切,各门学科之间的相互移植、交叉和渗透,彼此横向整体化,便产生了许多边缘学科、横断学科、综合学科。耗散结构理论就是这一发展的典型代表。

1. 耗散结构所处的位置

现代科学的研究对象已遍及自然界的各个角落、各个层次和各种现象,人们对客观世界的研究越来越深入,越来越复杂,越来越细致,难度也越来越大,但却越来越基本,越来越逼近真实。在微观世界,人们的研究已深入到了质子和中子内部,深入到 10^{-15} cm 以下的更深层次,对物质基本结构的认识越来越深入清晰。在宏观世界人们的研究已扩展到 200 亿光年以内的宇宙空间范围,对整个宇宙的结构有了相当深刻的认识,并对宇宙的起源诞生与演化的探索也有相当的进展。人类的认识,已由宇宙诞生 200 亿年后的今天追溯到宇宙诞生之初的 10^{-44} s 的时间范围。在中观世界,人们对自然界中各种运动关系有了深入的了解,对各种复杂性的探索已逐步展开,并在许多方面取得了突破性的进展。人们研究所涉及的范围,从空间尺度上看小到 10^{-16} cm(电子半径上限)大到 10^{28} cm(观察所及的宇宙),从时间延续来看短到 10^{-23} s(共振态粒子),长达 10^{17} s(百亿年)。从物理运动的能量水平看

(以温度来计量),其顺序是:牛顿力学(常温)→热力学($\sim 10^2\text{C}$)→化学运动($\sim 10^3\text{C}$)→电磁力学($\sim 10^4\text{C}$)→核能($\sim 10^7\text{C}$)→亚核能($\sim 10^{13}\text{C}$)。由此可见人类对物质世界的纵向认识已相当深入。以量子力学和相对论的建立为标志的20世纪世界物理学革命,使人们从微观和宏观这两个认识方向上对自然奥秘的了解达到了前所未有的深度。然而人们对物质世界的横向关系的某些方面特别是层次之内、层次之间的复杂性关系和复杂运动还知之甚少,有待深入研究。目前物理学在探索世界奥秘的第三个方向,即量的变化导致物质运动由简单到复杂,从低级到高级的各种形态和阶段,直至生命和意识这个没有止境的发展过程的基本规律的认识上也取得了长足的进展,耗散结构论的出现为之作出了突出的贡献。并为人们在非平衡自组织有序及混沌现象,生命的诞生、运动、演化及生命复杂性的研究开拓了一条希望之路。

耗散结构理论的研究领域是物质系统的复杂性,即物质系统各层次或层次之间的非线性复杂关系。其研究对象是开放的非平衡自组织系统。着重考察在一定外界条件影响下的非平衡开放系统是如何通过自身的非线性相干反馈和协同作用,自发地形成宏观有序的自组织结构的。在非平衡系统中,系统自发地由一种状态跃迁到另一种新的有序状态的过程称为非平衡相变。非平衡相变所形成的宏观有序结构与平衡相变所形成的微观有序结构(如晶体)有着本质的不同,宏观有序结构是动的“活”结构,而微观有序结构是静的“死”结构。

2. 耗散结构所得结论

经典的热力学理论早已断定在平衡态条件下不可能出现任何宏观的动态有序行为,即在系统中不可能形成宏观有序结构。当系统处于开放条件下,即能不断地与外界环境交换物质和能量时,由边界条件维持的不随时间变化的状态通常不是平衡态而是非平衡定态。在定态,体系内不可逆过程引起的熵的增加正好为通过