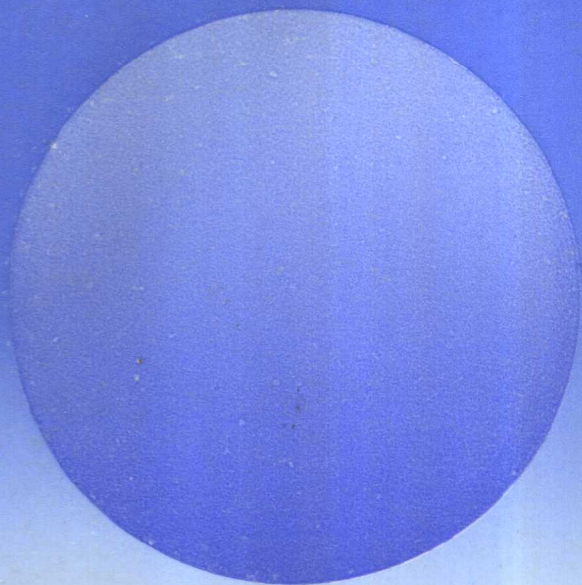


● 研 究 生 用 书 ●

PRINCIPLES AND
APPLICATION
OF SYNERGETICS

华中理工大学出版社



吴大进 曹 力 陈立华

协同学原理和应用



协同学原理 和 应 用

吴大进 曹 力 陈立华

华中理工大学出版社

Principles and Applications of Synergetics

• 研究生用书 •

协同学原理和应用

吴大进 曹力 陈立华

责任编辑 杨志锋

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 12.375 插页: 2 字数: 294 000

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数: 1-1 000

ISBN 7-5609-0412-2/O·69

定价: 2.74元

内 容 简 介

协同学是跨学科的研究领域，旨在寻求支配生命和无生命系统自组织的普适原理。本书系统地介绍协同学的原理、应用和新进展。叙述序参量方程的推导和解序参量方程的方法，并给出其在物理学、材料科学、生物及生态学、工程及信息科学、经济学和社会学中的应用。

Abstract

Synergetics is an interdisciplinary research field, which aims at identifying the universal principles governing the self-organization of both animate and inanimate systems. This book systematically presents the principles, the applications and the latest development of synergetics. The book deals with the derivation of the order parameter equation and the methods of solving it. Their applications are introduced to such disciplines as physics, material science, biology and ecology, engineering and information sciences, economics and sociology.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节，是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材，才能使学生学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识，为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自1978年招收研究生以来，组织了一批学术水平较高、教学经验丰富的教师，先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行，更多的则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践，不断修改、补充、完善，已达到出书的要求。因此，我校决定出版“研究生用书”，以满足本校各专业研究生教学需要，并与校外单位交流，征求有关专家学者和读者的意见，以促进我校研究生教材建设工作，提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主，还有教学参考书和学术专著，涉及的面较广，数量较多，准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发，根据各门课程在教学过程中的地位和作用，在内容上求新、求深、求精，每本教材均应包括本门课程的基本内容，使学生能掌握必需的基础理论和专门知识；学位课教材还应接触该学科的发展前沿，反映国内外的最新研究成果，以适应目前科学技术知识更新很快的形势，学术专著则应充分反映作者的科研硕果和学术水平，阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上，应条理清楚，论证严谨，文字简炼，符合人们的认识规律。总之，要力求使“研究生用书”具备科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些，但由于研究生的培养工作为时尚短，水平和经验都不够，其中缺点、错误在所难免，尚望校内外专家学者及读者不吝指教，我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

陈 珽

1989.11.

序

协同学(Synergetics) 是一门跨越自然科学和社会科学的横断学科, 它研究系统从无序到有序转变的规律和特征。该学科是德国著名理论物理学家H.哈肯于本世纪70年代创立的。由于协同学建立在一些十分普遍的原理上, 这使人们能够利用它来理解极不相同的系统在宏观尺度上所经历的质变, 因此得到了广泛应用。

我们曾为华中理工大学和华中师范大学许多专业的研究生讲授过协同学课程, 并编写了《协同学原理和应用》讲义。本书就是在该讲义的基础上, 吸收了协同学近年来的新进展修改、补充而成。

本书共分三篇: 第一篇序参量方程的建立、第二篇序参量方程的解法、第三篇协同学的应用。这样安排突出了协同学处理问题的基本思想和方法。第一篇着重阐明绝热近似和精确消去以及两者间的关系, 较详细地介绍了哈肯等人近两年来对支配原理研究的新进展, 特别是通过一些例子, 使读者对协同学处理问题的程序了解得更具体。第二篇集中介绍了求解各种类型序参量方程最基本、最常用的方法, 包括哈肯的相变类比方法。最后一篇介绍了协同学在物理学、材料科学、生物及生态学、工程技术、社会科学和信息科学等领域中的定量应用。取材时, 考虑了既要包括各领域中有代表性的应用, 又能反映协同学的最新进展两方面的需要。

在编写时, 我们将所需要的专门数学理论作了扼要的介绍。故读者只要具有大学本科的数学基础, 即可顺利阅读本书。

本书的读者对象是物理、化学、生物、工程技术、社会科学等领域的研究生、科技工作者和高年级大学生。熊吟涛教授审阅了全稿, 并提出了许多宝贵意见, 谨致以衷心感谢。

协同学概述..... (1)

第一篇 序参量方程的建立

第一章 线性失稳和分岔..... (18)

§ 1.1 线性稳定性分析..... (18)

§ 1.2 线性失稳和分岔的基本概念..... (20)

§ 1.3 霍普夫分岔..... (22)

§ 1.4 锁频..... (24)

第二章 随机过程的描述和某些重要随机过程..... (26)

§ 2.1 随机过程·马尔可夫过程..... (26)

§ 2.2 布朗运动..... (32)

§ 2.3 几个重要的马尔可夫过程..... (41)

§ 2.4 伊藤随机积分和微分·斯特拉特洛维奇随机积分和微分..... (49)

§ 2.5 伊藤随机微分方程和斯特拉特洛维奇随机微分方程·伊藤公式..... (60)

第三章 绝热近似和精确消去..... (67)

§ 3.1 一维系统的支配现象..... (67)

§ 3.2	二维系统的支配现象	(71)
§ 3.3	支配原理	(72)
§ 3.4	n 维系统: 绝热近似	(78)
§ 3.5	n 维系统消去程序举例	(81)
§ 3.6	n 维系统: 精确消去快变量	(85)

第四章 连续介质的自组织系统

	广义金兹堡-朗道方程	(94)
§ 4.1	连续介质自组织系统的动力学方程	(94)
§ 4.2	模幅方程的推导	(96)
§ 4.3	广义金兹堡-朗道方程	(103)
§ 4.4	含高阶项的广义金兹堡-朗道方程	(107)

第五章 随机微分系统

§ 5.1	概述	(111)
§ 5.2	斯特拉特洛维奇随机微分方程的系统消去程序	(113)
§ 5.3	伊藤随机微分方程的系统消去程序	(129)
§ 5.4	斯特拉特洛维奇随机微分方程的绝热消去	(138)
§ 5.5	伊藤随机微分方程的绝热消去	(144)

第六章 福克-普朗克方程和主方程中快变量的消去

§ 6.1	福克-普朗克方程中快变量的绝热消去	(150)
§ 6.2	主方程中快变量的绝热消去	(155)

第二篇 序参量方程的解法

第七章 朗之万方程.....	(159)
§ 7.1 引言.....	(159)
§ 7.2 线性朗之万方程.....	(160)
§ 7.3 非线性朗之万方程.....	(163)
§ 7.4 多变量非线性朗之万方程.....	(172)

第八章 福克-普朗克方程.....	(176)
§ 8.1 福克-普朗克方程的推导.....	(176)
§ 8.2 单变量福克-普朗克方程的定态解.....	(185)
§ 8.3 单变量福克-普朗克方程的含时解.....	(189)
§ 8.4 多变量线性福克-普朗克方程的含时解.....	(196)

第九章 主方程.....	(202)
§ 9.1 主方程的 W 矩阵表示和 W 矩阵的分类.....	(202)
§ 9.2 宏观演化方程.....	(207)
§ 9.3 一步过程的概述.....	(209)
§ 9.4 线性一步过程·边界条件.....	(214)

第十章 相变类比.....	(224)
§ 10.1 朗道的相变理论.....	(224)
§ 10.2 不连续自组织系统的相变类比.....	(229)
§ 10.3 连续介质中的相变类比.....	(239)

第三篇 协同学的应用

第十一章 光学双稳态和自脉冲不稳定性.....	(244)
§ 11.1 概述.....	(244)
§ 11.2 模型及定态解.....	(246)

§ 11.3	线性稳定性分析	(251)
§ 11.4	稳定性边界·参数区的分析	(257)
§ 11.5	扰动的非线性动力学——缀饰模方法	(259)
§ 11.6	自脉冲不稳定性	(265)
<hr/>		
第十二章	对流不稳定性	(272)
§ 12.1	基本方程和无量纲化	(272)
§ 12.2	线性稳定性分析	(277)
§ 12.3	序参量方程	(281)
§ 12.4	新相的结构——贝纳德胞	(286)
<hr/>		
第十三章	洛特卡-沃特拉模型	(290)
<hr/>		
第十四章	水螅形态发生的模型	(296)
§ 14.1	水螅形态发生的数学模型及计算机解	(296)
§ 14.2	模型的线性稳定性分析	(299)
§ 14.3	序参量方程	(305)
<hr/>		
第十五章	耿氏不稳定性	(309)
§ 15.1	基元效应	(309)
§ 15.2	反馈机制	(311)
§ 15.3	绝热消去·序参量方程	(312)
<hr/>		
第十六章	金属的热弹性不稳定性	(316)
§ 16.1	热弹性固体的动力学方程	(317)
§ 16.2	参考态及其稳定性分析	(320)
§ 16.3	序参量方程和声发射曲线	(326)
<hr/>		
第十七章	投资的非平衡理论	(330)

§ 17.1	充分就业及非充分就业模型及分析	(330)
§ 17.2	投资比例随时间周期性变化的模型	(333)
§ 17.3	运动方程	(336)
§ 17.4	线性稳定性分析	(340)
<hr/>		
第十八章	舆论形成的半定量理论	(343)
§ 18.1	概述	(343)
§ 18.2	模型	(344)
§ 18.3	$P(n, t)$ 的主方程和福克-普朗克方程	(345)
§ 18.4	主方程和福克-普朗克方程的定态解	(350)
§ 18.5	模型的社会含义	(355)
§ 18.6	朗之万方程和平均值方程	(359)
§ 18.7	模型代表的政治舆论演化过程	(362)
§ 18.8	平均值方程和福克-普朗克方程的含时解	(364)
<hr/>		
第十九章	协同信息	(372)
§ 19.1	引言	(372)
§ 19.2	申农信息的分解·协同信息	(374)
§ 19.3	协同信息变化的主要特征和可测性	(375)
<hr/>		
参考文献		(379)

协同学概述

什么是协同学?在协同学创始人哈肯(H. Haken)主编的协同学丛中是这样写的:“协同学是一门横断学科,它研究系统中子系统之间是怎样合作以产生宏观的空间结构、时间结构或功能结构的。它既处理确定论过程又处理随机过程。”这里所说的“空间结构、时间结构和功能结构”,就是文献上说的“自组织”。

哈肯在他的《高等协同学》一书中对协同学的任务作过这样的描述:“协同学处理由许多子系统组成的系统。不同系统的子系统可以是性质十分不同的,如电子、原子、分子、细胞、中子、化学元素、光子、器官、动物乃至于人。协同学研究子系统是怎样合作以形成宏观尺度上的时间结构、空间结构和功能结构的。特别集中注意力于下述情形:这些结构以自组织的方式出现。我们将研究支配这些自组织过程的原理,而不问子系统的具体性质如何。”

本章先就各学科中观察到的自组织现象作一简要介绍,接着阐明协同学的基本概念,指出将用到哪些数学工具,最后介绍几个产生自组织的新途径。

§1 自组织现象

一、流体物理和固体物理中的自组织

1. 贝纳德对流不稳定性

1900年贝纳德(Bénard)曾做过这样的实验。将流体层从下面加热,在上、下表面间维持一个温度梯度,示意于图1。在此引入一个无量参量 Ra ,称为瑞利(Rayleigh)数。对确定的流体和一定的流体层尺寸,它和温度梯度成正比,温度梯度等于零时, Ra 也等于零。

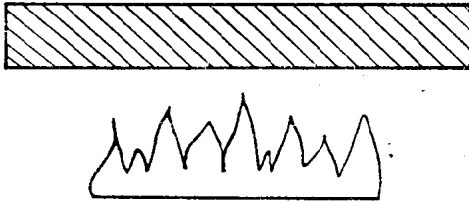


图1

首先,通过加热流体层下表面并维持上表面温度不变,使 Ra 由零逐渐增加。在小 Ra 情况下,热能通过热传导方式传递,流体保持静止。对应每一确定的 Ra ,流层处在相应的非平衡定态,热流自下而上通过流体,热流矢量不随时间而变。此时流体处于稳定的热传导态。继续加大 Ra ,奇特的现象出现了!Bénard首先发现当 Ra 达到一个临界值 Ra_c 。(称为临界瑞利数)时,热传导态失去稳定性,出现新的传热机制—对流。这就是Bénard对流不稳定性,简称Bénard不稳定性。它奇特之处在于下面两点:第一,当 Ra 稍大于 Ra_c 时,取代不稳定的热传导态的,是一幅美丽的对流空间结构:流体以图2的滚筒形式或以图3的元胞形式处

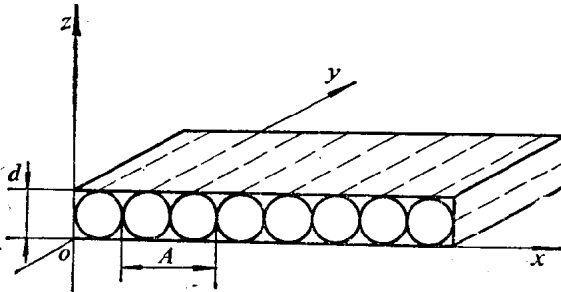


图2

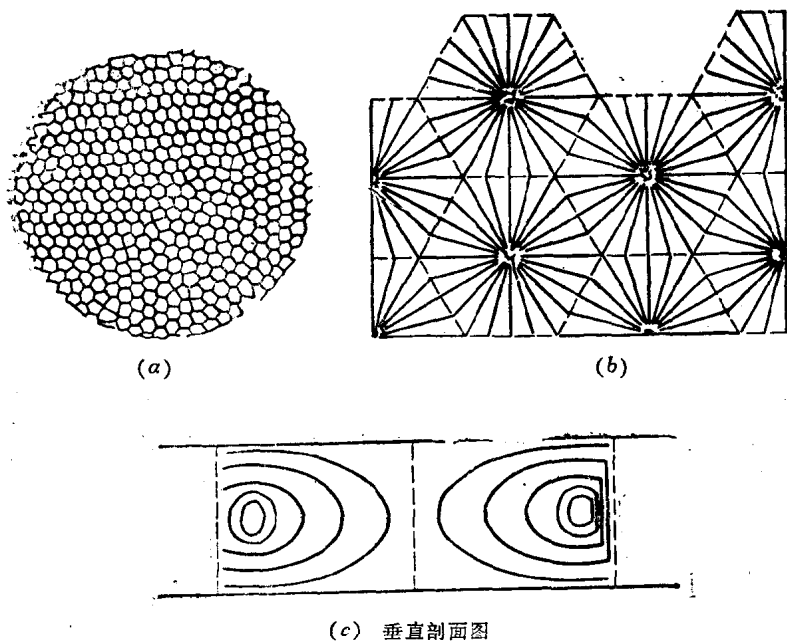


图3

于稳定的对流态。滚筒的对流情况如图中箭头所示。在元胞中，流体从六角胞中心向上沿各边向下流动。出现滚筒还是出现元胞视上边界是封闭还是敞露而定。流速大小和方向在空间作严格的周期分布，这种肉眼可见的空间结构，即是一种所谓的“动力学序”。第二，这种宏观尺度上的空间结构，并不是由仪器的相应结构所提供的，相反，热源输给流体的热能是无规则运动的能量。可见，空间结构的出现是内禀的，是一种当今正在寻求理解的自组织过程。

随着 Ra 的进一步加大，上述对流态会失稳，新的稳定波动结构、湍流结构等相继出现。在这么一个下热上冷的流体层的传热过程中，对应由小到大一系列临界瑞利数（上面只详细谈到第

一临界瑞利数)，相应地可看到一系列的宏观上的空间结构、时间结构或时空结构。

还有一个类似结果的实验，在此顺带提一下。在两个同轴的圆筒之间充以流体，令两筒之一转动，即使没有温度差，当转速加大到一定值时，也会出现滚筒、波动乃至湍流等自组织状态，渐次代替转速小时的轴对称转动态。这类现象文献上称为泰勒不稳定性。由于它靠转速的增大而不是靠加大温度梯度来控制流体的状态，实验研究往往更加方便。

2. 耿氏(Gunn)振荡不稳定性

在某些固体材料中也有自组织现象。如在砷化镓(GaAs)样品上加上较小直流电压时，该样品上将产生一个遵从欧姆定律的恒定电流。电压一旦加至某一临界值，则这个直流的电导态将成为不稳定的。当电压稍过这一临界电压时，样品中将产生新的有规则的电脉冲，即所谓耿氏振荡。其定量的处理将在第十五章中叙述。

要强调指出的是，耿氏振荡和流体物理中的自组织具有相同特点，即宏观尺度上的时空结构和内禀特征，此时的脉冲输出不是象单电子过程那样由外加脉冲电压驱动，而是在外加直流电压下的一种非平衡合作效应。

此外，固体物理中的隧道二极管，这一典型的双稳装置，其运转机制也是基于类似的非平衡合作效应的。

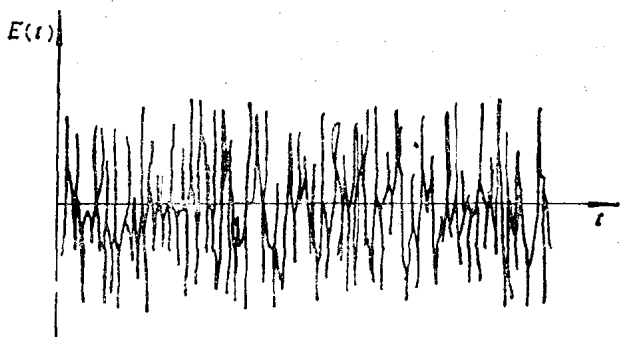
二、工程科学中的自组织

1. 激光工程中的自组织

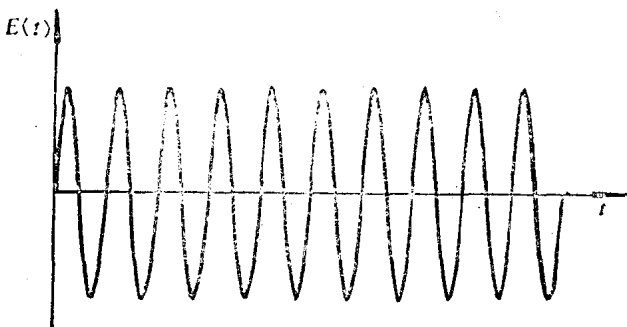
激光工程中也有许多生动的自组织现象。

首先是激光器在第一阈值的转变。把泵源的能量注入激光器时，在小的泵源功率情况下，激光器象一盏普通的灯那样发射出非相干光，原子独立而随机地各自辐射电磁波。其场强示意于图4(a)。当泵源功率增大到第一阈值时，将产生一个全新的现象，

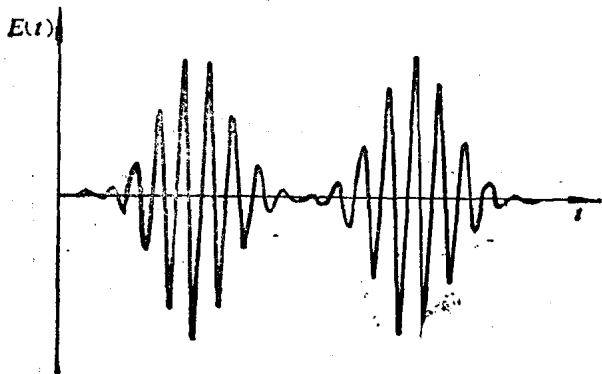
“似乎有一个未知的‘精灵’使得原子同步地振荡”。这时激光器



(a)



(b)



(c)

图4