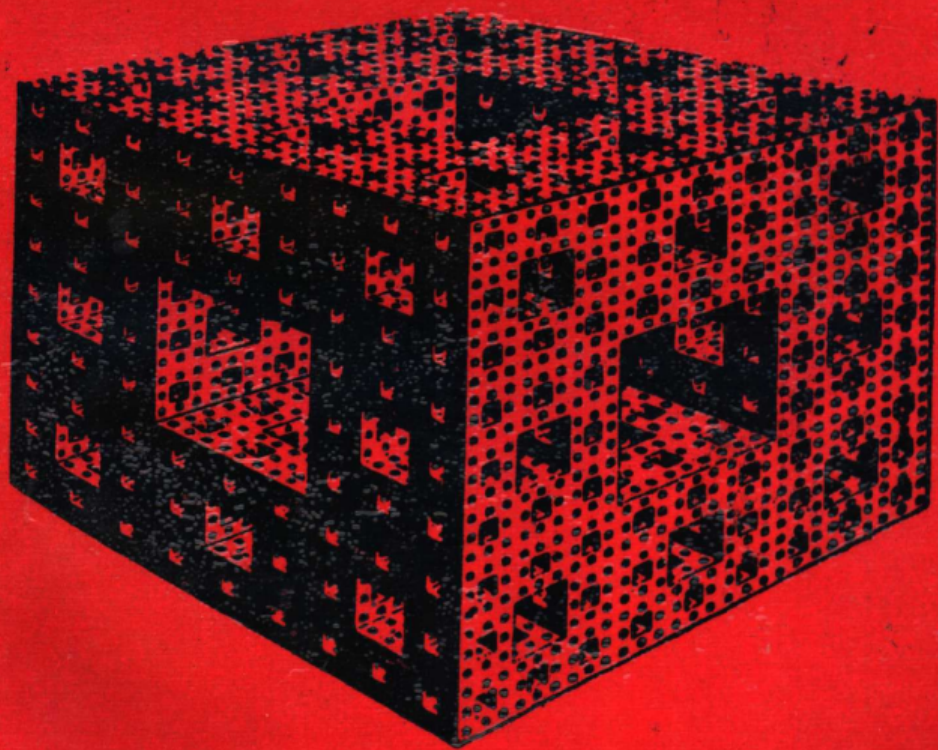


系统自组织概论

XITONG ZIZHUZHI GAILUN

张彦 林德宏



南京大学出版社

系统自组织概论

张彦 林德宏

南京大学出版社

1990·南京

责任编辑：李曾沛

系统自组织概论

张彦 林德宏

南京大学出版社出版

(南京大学校内)

江苏省新华书店发行 江苏阜宁印刷厂印刷
开本 850×1168 1/32 印张 10.375 字数 268千
1990年4月第1版 1990年4月第1次印刷
印数 1—1500

ISBN 7-305 00560-6

N 4

定价 2.65元

前 言

我们正处在科学日新月异的时代。本世纪60年代末70年代初，一批关于进化机制的自组织理论相继诞生，人们的认识开始从平衡态到非平衡态、从简单到复杂、从混沌到有序、从线性到非线性、从组织到自组织推进，形成了“探索复杂性”这个当代科学最具革命性的前沿。

自组织问题的研究已经形成一股蔚为壮观的世界科学的潮流。本书把尚属比较分散的进展（耗散结构、协同、分维、混沌等）用系统的方式组织起来，深入浅出地提炼出最为核心的概念和内容，并从科学史、科学方法、科学思想、自然观等诸多方面，阐明这门科学的地位和意义、由来和发展。作为应用，本书围绕着社会经济系统自组织，论述了新科学思维对改善宏观和微观经济学基础产生的重要影响。

本书信息量大，知识面广，资料翔实，语言生动，既可作为一般读者的入门向导，又可以作为教科书和各方面研究人员的参考书。我们愿此书能有力地推动这门新崛起的科学在我国普及，有力地推动这门科学的研究、应用和教学在我国蓬勃展开。

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 自组织理论的形成	(11)
§ 2.1 平衡态热力学	(11)
§ 2.2 线性热力学	(13)
§ 2.3 非线性热力学和耗散结构理论	(20)
§ 2.4 化学反应动力学	(25)
第三章 自组织理论的发展	(32)
§ 3.1 协同学	(32)
§ 3.2 超循环理论	(40)
§ 3.3 突变理论	(54)
§ 3.4 混沌动力学	(65)
§ 3.5 分数维几何学	(76)
第四章 复杂性的科学	(88)
§ 4.1 复杂系统和复杂性	(89)
§ 4.2 守恒系统和耗散系统	(92)
§ 4.3 吸引中心和平庸吸引子	(99)
§ 4.4 奇异吸引子和混沌运动	(103)
§ 4.5 概率描述和势曲线	(119)
§ 4.6 相关和涨落	(125)
§ 4.7 分叉和对称性破缺	(131)
§ 4.8 热力学第二定律和选择原则	(139)
第五章 科学发展观	(150)
§ 5.1 存在的物理学	(150)
§ 5.2 演化的物理学和发展问题	(154)
§ 5.3 时间的再发现	(157)
§ 5.4 不可逆性的起源	(164)
§ 5.5 宏观演化的微观基础	(168)
§ 5.6 关于热寂说	(177)

§ 5.7 运动和发展	(186)
§ 5.8 新的综合	(193)
第六章 普里高津的科学思想	(198)
§ 6.1 经典科学传统	(199)
§ 6.2 对经典科学传统的两次批判	(204)
§ 6.3 普里高津评牛顿纲领	(211)
§ 6.4 从存在到演化	(217)
§ 6.5 从简单性到复杂性	(228)
§ 6.6 决定性与随机性	(235)
§ 6.7 从旁观者到参与者	(238)
§ 6.8 新的思维方式	(247)
第七章 社会经济系统的自组织	(268)
§ 7.1 机械均衡论的遗产	(269)
§ 7.2 熵与经济过程	(271)
§ 7.3 非均衡理论	(275)
§ 7.4 非线性经济学	(279)
§ 7.5 计划与市场的博弈	(283)
§ 7.6 计划与市场的结合	(289)
§ 7.7 组织创新的动力	(297)
§ 7.8 熵经济观与发展战略	(302)
附录一 人口的非线性分析	(309)
附录二 全球学派	(312)
参考文献	(313)
主要人名译名对照	(318)
后记	(325)

第一章 绪 论

过去三个世纪，科学在人类历史上写下许多壮丽篇章。在有些关头，科学似乎近于功德圆满，自然定律驰骋的疆域似乎已尽收眼底，但是每每这个时候总有一些事情出了差错。于是方案又必须扩大，待探索的疆域又变得宽广无际了。

差不多一百年前我们曾有过这种经历。当时正值牛顿纲领高奏凯歌，人们普遍感到物理学大厦行将落成的时候，几朵飘来的“乌云”引起一场科学革命，自然科学跨入了相对论和量子力学的新时代。

直到最近，在科学史上20世纪记载下来的最激动人心的一页仍是这场革命。若是一位物理学家被问及什么已经知道，什么尚不清楚，他会立刻回答，真正的问题仅存在于基本粒子层次和宇宙学层次上，而与宏观层次有关的问题已经不会再有什么重大发现了。可是这种乐观的论调近来再次受到怀疑：就在我们周围这个世界上，一些基本问题远未解决。

宏观世界最显著的特征是演化：一切皆流，无物常驻；除去永恒的流动，永恒的创生和消亡之外，再也找不到任何永恒的东西了。面对人类赖以生存的地球表层这个活生生的世界，探索“积极的本原”的任务不期而然地落到现代科学家的肩上。

热力学过程代表自然界存在的一类基本演化。和这类演化相联系的过程我们举目可见：摩擦生热；水往低处流；热量从温度高的地方流到温度低的地方，等等。众所周知，热力学在社会文化中的突出贡献是通过热力学第二定律建立了“熵”的概念。熵是一个能够明确刻划事物发展趋势的函数，它表达了无序性的增

加。甚至现代哲学界还有不少人被该定律表面上的消极含义所迷惑，抛出了带有浓烈悲观主义色彩的所谓熵世界观。

达尔文及其追随者很快引入了一种对立的^①思想：至少在生物系统中不用如此悲观；生物正在变得具有更多的、而不是更少的组织性。生物学过程代表了自然界存在的另一类基本演化。世界是个不断组织起来的世界，大量天然机构，包括人都是大自然的杰作。

达尔文学说建立之后，总的来说没有人再对进化这个事实表示怀疑了。达尔文在评论拉马克时曾说过：“他的卓越工作第一次唤起了我们注意有机界和无机界的一切变化大概都是法则作用的结果，而不是神灵干涉的结果。”^①那么有机界演化所依据的法则是什么？它和无机界演化的法则能否统一起来？对于这些问题，迄今我们所知道的充其量不过是冰山裸露在海面上的一角。我们到处看到逐渐组织起来的^②空间，却无法说明，细胞之间怎么会以难以置信的准确度相互配合，在正确的时间正确的地点完成自己的使命，从而使发育成为可能。

但是我们必须把认识与生命的特征联系起来。只要想想文明的进步、生产力的提高、社会的发展，我们就不难想像这是一个多么重要的问题。事实上，与生物进化相比较，文化和社会变化的一个最引人注目的地方就是经历的时间较短。所以，从某种意义上讲，任何一个在文化和社会事务上有兴趣的人，都应该比自然科学家更关心进化问题。

自组织问题就是进化问题。它的核心是，为什么在自然界中有大量系统会自发形成具有充分组织性的有序结构？由此可见，固然今天对一般人来讲，“自组织”还是一个新概念，其实它并不陌生，自组织只不过是生物进化、科学进步、社会发展的同义

^① 达尔文：《物种起源》第三分册，生活·读书·新知三联书店，1956年版，第584页。

词。科学家从一大类由低级到高级的转变过程中抽象出一个能够准确概括它们共性的概念——自组织，然后以它为核心进行系统的研究，以便改变长期以来我们对之知之甚少的局面。所以自组织不是一个小问题，也不是一个一般问题，而是一个科学上早就解决的大问题。

可能有人会问，照此说来，自组织问题不是早有人提出来了吗？它不管如何重要，也算不上新发现。的确，自组织问题和我们的生活息息相关。鱼从哪里来？猴子如何变成人？人为什么有自我意识？类似的问题，我们从孩提时代就遐想过。但是对这些问题的认识由浅入深却经过了漫长历程。在达尔文之前，对进化的提问多半凭直觉，自组织问题只是若明若暗的一闪念，谈不上系统地思考。达尔文之后，对进化的认识提高到观察事实的水平上，至于进化的起因、条件、途径这类更高级的问题尚处在未知领域。由于这个缺陷，活力论到20世纪仍相当盛行。活力论认为物理学现在不能、将来也永远不会解释生命现象，因为生物学现象只服从生物学规律，而生物学规律又不能在物理化学的基础上加以解释。

真正的转变发生在20年前。1969年能够对进化机制作出某种解释的第一个科学理论——耗散结构理论问世了，从此对进化的研究才在基础理论的水平上蓬勃开展起来。所以从严格意义上讲，自组织问题又不等同于进化问题，它意味着要对进化的内在机制予以揭示，这是在现代系统自组织理论诞生之后才成为可能。因此，自组织问题的明确提出代表着人类探索自然奥秘的一次新飞跃。

在科学发展的历史进程中，物理学始终占据着主流。物理学原理和定理主要是在研究无生命特征的物体和现象中发现的，它是否足够来解释以生命为特征的进化现象呢？关于这个问题，还原论和活力论的对抗由来已久。自组织理论有力地支持不同于两者的第三种观点：随着对进化本质的逐步认识，有发现新的物理

学原理和定律的可能性。这些新原理和老原理并不矛盾，并可在一定条件下相互贯通。自组织理论说明物理学对于了解进化现象，有不可估量的潜力；没有它的帮助，我们就将始终停留在唯象的水平上，也不可能将对进化和退化的认识上升到统一的地步。

目前的状况在人类历史上是空前的，各门学科在专门知识不断增加的同时，又都强烈地朝着综合的方向前进。本世纪以来，系统论、信息论、控制论等学科的蓬勃兴起，大大改变了当今世界的格局。在这些横断科学所提倡的整体方法的指导下，人类对组织系统规律性的研究迈出了可喜的第一步。自组织理论与系统科学一脉相承，它特别重视整体和部分之间的动态关系，重视系统和环境的关系。自组织系统有三个主要特征：第一，它们是不间断同环境交换物质和能量的开放系统。第二，它们都是由大量子系统（或微观单元）所组成的宏观系统。例如最小的细胞（细菌莱氏支原体）的体积也是原子体积的 10^8 倍以上。第三，它们都有自己的演变历史。低层次的子系统或元素一旦形成组织，就会出现原有层次所没有的性质，像目的性、适应性、生长发育这些有机体的特性。自组织过程就是子系统之间关系升级的过程。自组织理论要从无生命世界、有生命世界乃至社会的许多全然不同的系统中，找到从无序到有序以及无序和有序相互过渡所共同遵循的规律，所以可以把它合理地称为动态的系统理论。

系统理论由静态模式向动态模式的变迁有其内在统一的逻辑。各种系统理论都是系统客体的“多棱镜”从不同角度折射的反映。可以说，系统的结构，系统要素的相互影响，相互影响的反馈，就是贝塔朗菲的一般系统论、申农的信息论和维纳的控制论，而系统形成动态的有序结构，系统的演化，就是自组织理论。

自组织理论的动态特征突出反映在由自组织过程表现出来的时间箭头上。生活中每个人都有自己的时间概念，各门学问也都离不开时间，历史上许多大学问家都对时间发表过议论。“光阴

似箭”、“时不我待”，自古以来就是不言而喻的。但是时间的本质是什么，科学却一直讲得过于简单。现代科学的一个主要迷惑之处就是使人确切地感觉到时间是被排除在科学之外，只要借助于一些永恒的、不需要涉及时间的基本定律就能够完全描述世界。人们往往欣赏物理学和化学在技术上武装了现代科学，却没有注意到作为一切自然科学基础的物理学，时间在其中被异化了，只有热力学是个例外。一切和热现象有关的过程都具有不可逆性，正的时间方向对应于熵的增加，过去和未来不一样。

能够如此强烈表达出时间方向的另一种过程就是进化。例如生命系统具有对时间方向性的感觉，在我们自己的生命中也存在着时间之矢。一切与组织性增加和复杂性提高有关的过程，经历长时间后都不可能重演。自组织理论作为进化机制理论，自然带来了对时间本质的新认识。现在按时间的作用，物理学已被划分成两大块：一是“存在的物理学”，其代表是经典力学、量子力学和相对论。二是“演化的物理学”，其代表就是热力学和自组织理论。两种物理学可以用英语中的时态加以区别：在存在物理学中没有时态，时间在其中仅作为一个“几何参数”出现。在演化的物理学中有时态，时间有过去、现在和将来之别。按这种分类，自组织理论是热力学的继续和发展。事实上，自组织理论正是热力学从平衡态到非平衡态经过一段曲折的历程发展而来的。

爱因斯坦曾经指出：“提出一个问题往往比解决一个问题更重要。”《人间喜剧》的作者巴尔扎克曾把提出问题看成是科学发现的起点，而生活的智慧就在于逢事问个为什么。但在所有重大的科学问题中，像自组织问题这样的大概绝无仅有。它姗姗来迟，不是无人问津，相反由来已久。究竟什么原因使物理学家对如此重要的一个问题熟视无睹呢？根本原因在于自组织问题的高度复杂性。例如，动物体内其有特别功能的器官和组织，包含有 10^{12} 个细胞甚至更多。这么多细胞在形态发育过程中准确地相互配合，需要有多么惊人的通讯本领。况且这一切都是自发的。在

贝纳德现象中^①，原来液体中的分子仅仅在几个埃（1埃 = 10^{-10} 米）的尺度上“看见”自己的邻居；而在临界温差之上，分子的视野却骤然扩大了上千万倍，千万亿个分子遥相呼应，相互协调地合作表演，形成特定的美丽图样。这是不能不令人称奇的，更不用说有自我意识的人是怎么回事了。

关于生命和人流传着许多动人的传说。在《创世纪》的世界里，上帝创造了光、天、地以及活着的万物。西方流行着对上帝的信任，生命乃至人都可以归结于上帝的造化。当然科学是不能倚靠上帝的，它首先通过达尔文确认了进化这个事实，把神创论驱逐出去。而后当它试图洞察进化现象背后的物理化学的根源时，却遇到了难以想象的阻力。差不多本世纪以来大多数年代，人类智慧都没有对于生命的本质或起源这个更加高级的问题投射什么光明。

自组织理论的建立开创了新局面，这是吸取了各种现代数学形式的结果。按照马克思的说法，一切科学只有在成功地运用数学时才达到完善的地步。问题是，数学表达上的复杂势必给公众了解它带来了困难。为此，我们必须从符号、术语、公式的迷宮中走出来。薛定谔有一段话十分精彩：

有一种错误倾向，认为科学是和整个人类文化发展的脉络毫无关系的。其实不然，从科学发展史知道，那怕在当时是最先进的、深奥的和难于掌握的，离开了整个人类的文化脉络也都是毫无意义的。理论科学不知道，它的构造中被人认为是很得要领的那些重要方面，最终必定归于只能抓住有教养的公众的一些概念和词汇，并且成为一般世界图式的重要部分。……无论多么深奥的闲谈可能在其少数专门家的孤独的欢快中继续着，但在不久的将来，它一定要萎缩、僵化。^②

^① 贝纳德1900年以精确的方式证明在流体中非稳定性的突然出现，这是在物理系统中自发形成空间有序结构的最早实验成果。

^② 转引自《普利高津与耗散结构理论》，蒯墨华、沈小峰等编，陕西科技出版社，1982年版，第217页。

大凡一门新的基础理论，总要提出一些新概念。起初它们可能是陌生的，但一旦为公众所掌握，便可使人大开眼界，受益匪浅。自组织理论要走出专家的圈子，就要提炼出这些核心概念，并且用多数人能够听懂的语言加以阐明。自组织理论正在编汇一套特别丰富的科学词汇，诸如开放、非平衡、负熵、分叉和对称性破缺等等，其中有一些已经成为现代公众语言的一部分。细心读者很快会发现，这些概念至少对社会的、经济的或政治的现实过程有类比意义，诸如“革命”、“经济腾飞”、“技术高涨”、“观念更新”等等，当我们用涨落、相变、分叉和对称性破缺等自组织理论的语汇去思考它们时，便有了全新的深刻含义。

自现代系统科学建立以来，人们越来越重视，在科学发展上可以获得最大收获的领域是各种已经建立起来的部门之间的被忽视的无人区。另一方面，最近一百多年来，知识的各种各样的分支在广度和深度上展开，却使我们陷入一个奇异的困境。我们切身感受到，有必要把所有已知的知识综合成为一个统一体，我们现在还只是刚刚开始获得可靠的资料；可是，许多重要学科今天已经发展到如此充分，又使一个人想要掌握比一个狭小的专门领域再多一点知识，几乎成为不可能。对此，维纳的主张十分精彩：到科学地图上的这些空白地区去做查勘工作，只能由一群科学家来担任，他们每人都是自己领域的专家，但是每人对他的邻近的领域都有十分正确的了解。他们互相取长补短，才能在科学处女地上使那些由于跨学科而拖延下来的工作得到迅速发展。

自组织理论改变了传统科学的思维方式，它强调要从世界的本身去研究世界。而西方科学从培根、笛卡尔、牛顿开始，一贯强调化繁为简、化整为零，今天我们遇到了这种方法的局限性。在自然界中发现料想不到的复杂性，促使人们对自然的看法经历着一个向着多重性、暂时性和复杂性的根本变化。系统科学以及自组织理论都是这一转变的产物。自组织理论是一门能够深刻描

绘大自然本身的科学，在探索复杂性这个方向上，以它的惊人发现，发展了一条新的科学思维的认识路线。拉兹洛评论说，当代非平衡态理论可能是建立具有严格科学性的跨学科进化变革理论的最好发源地：这个理论的基本概念可以从物理化学推广到生命科学甚至社会科学，可以对所有这些复杂系统的进化过程给出解释。

自组织理论作为一门开放系统的理论而独具特色。开放是系统从环境吸收负熵流而走向有序的必要条件，我们很容易从其基本内容中深刻地领会到这一点。但很少有人从科学理论发展的逻辑上也这样考虑。许多学者都习惯于把科学描绘成是由其内部逻辑所推动的，是出色地从其周围世界中孤立出来，按照自身的规律发展的。其实并非如此。科学不是一个“独立变量”，它是嵌在社会之中的开放系统，它自始至终受到其外部环境的有力影响。自组织理论就是一个样板。

首先，自组织理论是一个由众多数学分支和理论物理分支组成的群体。其中，每个分支都在探索复杂性这个方向上齐头并进；同时它们又不为自组织理论所专有。解决进化机制涉及到的令人难以置信的复杂性，决定自组织理论的体系结构和其他基础理论（经典力学、相对论和量子力学）相比有很大的不同，我们不能把它简单地归并为单一图式。自组织理论是以若干重要学派和代表人物的若干理论的共同体而出现。它们各具特色，分别解决了关于自组织机制的若干课题。

其次，自组织理论的阵营在不断扩大，我们可以把它看作是一个生于社会涨落的向有序态的飞跃。自组织问题经过几十年的量变积累和特定社会条件和历史背景的孕育，在70年代达到了一个起飞的临界点。首先是普里高津的耗散结构理论揭开了自组织理论的序幕。而后哈肯的协同学，艾根的超循环理论，托姆的突变理论相继建立。它们的重要性是从不同侧面揭示了在远离平衡条件下，开放系统自发进入有组织状态的可能性。在80年代，混

沌动力学和分数维几何学蓬勃发展起来，它们的重要性是发现系统在远离平衡条件下，还有可能进入一个特殊“有序”的混沌态。如果我们把这些新知识和原有的热力学知识综合起来，我们便得到了关于自然界发展的一幅比较完整的图景，从此物理学才由一门静态的科学转变为一门动态的科学。

现在我们在原则上已经有理由相信，在宇宙中复杂性进化后面有着一种普遍的、基本不变的过程。只要自组织的条件得到满足，生命就成为是可预言的，就像我们能预言贝纳德不稳定性或预言一块下落的石头一样。但这一切才仅仅开始。必须承认，我们离开一门成熟的理论还很遥远。耗散结构理论、协同学、混沌动力学等互相渗透已经明显表现出汇合的趋势，而且随着时间的推移，还将有更多的理论加入到这个行列中来。

自组织理论是当代科学最具革命性的前沿。它把物理学推进到非平衡热力学和非线性动力学的发展阶段，正在实现知识从动力学向热力学，从热力学到生物学的过渡，以便在基础水平上阐明进化和发展问题。自组织理论大大丰富和发展了辩证法，具有十分重要的哲学意义。它对复杂性研究的新方法和新原理已经迅速移植到自然科学乃至社会科学的各个领域。目前，世界各国的学者（包括不少物理学、化学、经济学的诺贝尔奖获得者）正在紧张地工作，大量评论性文章、研究论文和专著、应用成果等不断发表，已经形成一股蓬勃发展的潮流。

自组织理论一问世就受到我国学者的高度重视。钱学森早在80年代初就明确指出：“系统自己走向有序结构就可称为系统自组织，这个理论也可称为系统的自组织理论。”^①他认为当务之急是把贝塔朗菲、普里高津、哈肯、艾根、费根鲍姆等人的工作收集起来、组织起来，构成系统学。^②我们学者也纷纷跻身于这个

① 《自然杂志》，1981年第1期，第4页。

② 《系统理论中的科学方法与哲学问题》，清华大学出版社，1984年版，第17页。

研究领域，研究涉及数学、物理、化学、材料、气象、地质以及社会学、历史学、经济学、哲学等广泛领域。与此同时，我国学术界和国外的交流也日益频繁。普里高津、哈肯远涉重洋，几度访华。普里高津现是南京大学和北京师范大学名誉教授，哈肯现是西北大学和上海机械学院名誉教授。但从整体上讲，目前国内对这门科学的了解是和它的地位很不相称的，迫切需要把各方面资料综合起来，形成系统自组织理论的知识框架。

我们的时代是以多种概念和方法的相互冲击与汇合为特征的时代，这些概念和方法在经历了过去完全隔离的道路以后突然遭遇了，结果产生了蔚为壮观的进展。这种异乎寻常的发展带来了西方科学的基本概念和中国古典自然观的结合。李约瑟倾其毕生精力研究中国的科学和文明。正如他在巨著《中国科学技术史》中经常强调的那样，经典的西方科学和中国传统自然观长期以来是格格不入的。西方科学向来注重实体（如原子、分子、基本粒子、生物分子等），而中国自然观则以“关系”为基础（如天人合一、元气论，阴阳五行等），以表达由各种对抗过程的复杂平衡而造成的整体和谐。当作为胚胎学家的李约瑟由于在西方科学的机械论思想（以服从普适定律的惯性物质的思想为中心）中无法找到适合于认识胚胎发育的概念而感到失望时，他先是转向唯物辩证法，然后又转向中国思想。中国的思想对于那些想扩大西方科学范围和意义的科学家和哲学家，始终是个启迪的源泉。特别在今天，试图把分析对象从其周围环境完全隔离开来的传统作法已经接近了它的极限，人们纷纷把目光移向东方，以获取新的活力。自组织理论正在把强调实验及定量表述的西方传统和以“自发活性”为特征的中国传统有机地结合起来。任何一个立志于发扬光大中国的科学和文明的人，都会从自组织问题的研究中得到慷慨的回报。

第二章 自组织理论的形成

自组织理论作为演化的物理学，用一种动态的思想武装着物理学，这是与热力学的基本观点完全一致的。自组织理论就是热力学在现代的延伸和发展。

热力学诞生于工业和能源时代。热引起体积膨胀，因而燃烧可以做功。蒸气机的迅速推广大大激起了人们研究热的热情。热力学深刻地揭示了自然现象中热与其他形式的能量之间的相互联系，人们开始掌握自然界中运动形式转化所遵循的普遍规律。这把发展的观点、演化的观点第一次引入了物理学，成为“复杂科学”的起点。自组织理论的兴起引起人们重新考察和书写热力学的历史，这对追寻自组织理论的起源，认识它与牛顿理论、相对论和量子力学相比较而言的历史地位是特别重要的

§2.1 平衡态热力学

当亚当·斯密写作他的《国富论》并收集有关工业生产的前景和决定因素的资料时，瓦特正在同一所大学里对他的蒸气机作最后的改进。蒸气机在英国的迅速推广引起了研究热的机械效应的广泛兴趣。

1811年，傅里叶第一次对固体中热传播作出数学描述并因此获得了法国科学院奖金。傅里叶定律具有和牛顿力学定律一样的数学描述的简单性和严谨性，但它与牛顿的定律完全不同。傅里叶定律指出：热流(W)与温度梯度($\frac{\partial T}{\partial r}$)成正比。把它用于一个具有非均匀温度分布的孤立物体时，该定律描述了逐步实