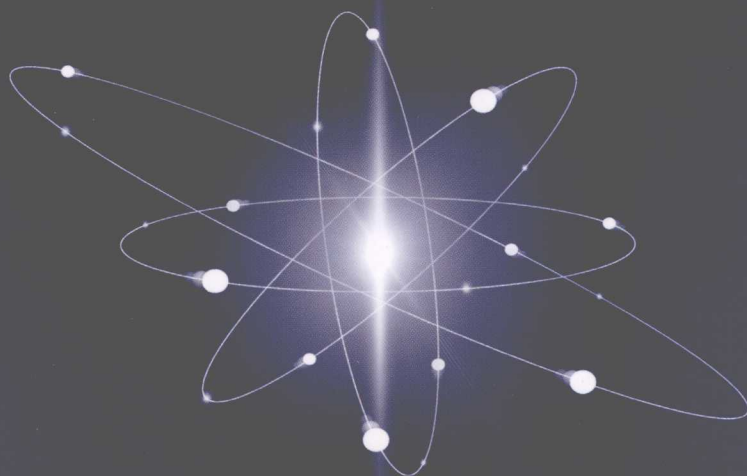


系统科学 与 工程导论

顾凯平 霍再强 侯 宁 李际平 编著



中国林业出版社

北京市市属市管高等学校人才强校计划项目资助

系统科学与工程导论

顾凯平 霍再强 侯 宁 李际平 编著

中国林业出版社

图书在版编目(CIP)数据

系统科学与工程导论/顾凯平等编著. —北京: 中国林业出版社, 2008. 6
ISBN 978-7-5038-5237-4

I. 系 … II. 顾 … III. ①系统科学②系统工程 IV. N94

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第074372号

中国林业出版社·环境景观与园林园艺图书出版中心

策划、责任编辑: 吴金友 于界芬

电话: 66176967 66189512

出 版 中国林业出版社(100009 北京西城区德内大街刘海胡同7号)

网 址 [www. cfph. com. cn](http://www.cfph.com.cn)

E-mail [cfphz@public. bta. net. cn](mailto:cfphz@public.bta.net.cn)

发 行 新华书店北京发行所

印 刷 三河市富华印刷包装有限公司

版 次 2008年8月第1版

印 次 2008年8月第1次

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 22.5

字 数 570千字

印 数 1~3000册

定 价 45.00元

前 言

20 世纪以来的相对论、量子论和遗传基因的双螺旋结构这三大发明,开辟了人类认识自然的新纪元,奠定了化学、分子生物学、核物理和凝聚态物理学、天体物理学、电子学和光子学的理论基础。20 世纪在技术上的伟大成就,如计算机、卫星、因特网、转基因等为 21 世纪人类文明的新跃升奠定了技术基础。我们正处在科学技术成为第一生产力,科学思想成为重要精神力量的时代。在新世纪,信息广泛和快速的传输,促进经济全球化,社会各部分都处于非线性的强相互作用之中,处在快速变革和发展之中。一方面产品的构成包括多种技术的综合集成,内部构造和制造过程越来越复杂,另一方面,社会系统中的错综复杂关系,人与环境的关系也呈现越来越复杂的局面。复杂性和不稳定性已成为普遍的日常现象。

当今时代的特点是系统性、复杂性、快速的变化性。复杂的程度是空前的,人类首次有能力制造出多得让人目不暇接的资讯,密切得个人无法单独处理的相互关系,以及快得让人无法跟上的变化步调。

当今时代的复杂性已远远超出我们目前能够认识的程度,如产品的复杂性、生物的复杂性、网络的复杂性,而更为重要的是社会的复杂性。世界的关联程度是空前的,世界经济一体化的出现,东南亚金融风暴的迅猛席卷,我们必须要认真对待这个关系密切、联系复杂的世界,或称为联系密切的世界系统。世界的变化速度是空前的,而且有时变化的轨道还是跳跃的。

而人类面临的大部分问题是不能处理周遭日趋复杂的系统所致。美国著名的科学家 Jay . Forrester 认为,许多严重的公共问题,从都市的日益恶化到全球生态的威胁,都肇因于原先立意甚佳的政策,这些问题实际是处在一种复杂的系统中;这类系统会诱使政策的制定者试图在解决这些问题时,误将重点放在治疗问题的症状,而非根本病因上。这样虽然能够产生短期效益,但就长期而言,病因恶化,药也不得不越下越重,从而造成更严重的问题。

1983 年壳牌石油公司的一项调查显示,1973 年名列《财富》杂志“500 大企业”排行榜的公司,到了 80 年代却有三分之一已经销声匿迹了。如果高死亡率不只是那些体制不良的企业才会面临的威胁,而是所有企业都会面临的问题,怎么办? 这是因为,组织的智障妨碍了组织的学习和成长。企业未来唯一持久的优势,是有能力比你的竞争对手学习得更快更好。我们人类的思维存在一些基本的智障,而现在,我们人类正着思维方式的一次脱胎的变化,这就是系统思考。

研究复杂系统、复杂性科学将是 21 世纪的系统科学和工程的主要研究方向,同时 21 世纪科学的最主要特点也将是研究复杂性,调控复杂性。

当今任何有意义的成就大都不可能是一个领域的知识所能力及的。学科的交叉、知识的交叉已成了当今时代知识体系的特点。当今科学发展的趋势至少有两个:一个是从定性到定量的深入发展,另一个是多学科交叉综合的不断突破。这一现象的背后,体现的是世界

在本质上的统一性。以前提出的各门科学都是从各自的角度提出来的,没有从全面的角度看,从系统的角度看。人们越来越多地感到各门类的知识领域背后应该有一些共同的规律而支配,就好像在物理学领域物理学家在寻找四种力的统一,寻找规范场一样。对一切系统,是否应由一些统一的理论支配?正如普朗科所说:“科学是内在的整体,他被分解为单独的整体不是取决于事物本身,而是取决于人的认识能力的局限性。实际上存在着从物理到化学,通过生物学和人类学到社会学的联系的链条,这是任何一处都不能打破的链条。”这就是系统科学。

当前所有的社会实践几乎都是一项系统工程,胡锦涛主席 2005 年在两院院士大会上指出,要用系统科学和系统工程的思想和方法来解释和落实科学发展观。这对系统科学和系统工程界提出了更重要的任务。同时,不同专业的人员学习系统科学、系统工程看来也是绝对必要的。很多学科知识在当前的实践中遇到了新的问题,使很多传统理论受到挑战。例如传统经济学面临诸多的挑战,譬如经济学中本来讲报酬递减,现在提出了报酬递增论,路径依存,把正反馈引进经济学。管理领域的新理论也必须要用到系统思考,人类面临的动态性复杂,在过去以直线思维,片断思考,事件层次来总结的某些理论将被以动态性复杂观点、结构层次思考得出的新理论而替代,这就是以系统的观点更深刻地认识各类学科理论的成果。

人们学习系统科学、学习系统思考、学习系统工程方法论将是时代提出的要求。

本书除了有一些人们较为熟悉的系统工程技术外,还加上了大量的系统科学、系统工程最新的理论内容和技术方法,以供读者了解系统科学与工程的前沿知识领域。该书可以作为大学系统科学、系统工程、决策科学、决策支持系统等课程的教材,在职人员的培训教材,也可供各级领导学习系统思考方法论的读物,也可供其他专业人员学习使用。

本书第 8 章的部分内容和第 9 章由霍再强教授撰写,第 10 章部分内容 by 刘音、李际平教授、刘娜博士撰写,其余部分由顾凯平教授撰写。侯宁博士、刘伟华同志作了大量的文书工作。特在此表示感谢。

编者

2007 年 10 月 28 日

目 录

前言

第一章 系统科学概论	(1)
第一节 系统科学的形成与发展	(1)
第二节 近代科学的最新发展对系统科学的贡献	(3)
第三节 系统的特征与系统论的基本原则	(17)
第四节 系统的分类	(29)
第五节 系统科学的体系结构和重要地位	(31)
第二章 系统思考	(35)
第一节 组织学习的智障	(35)
第二节 从啤酒游戏看系统思考	(38)
第三节 系统思考的微妙法则	(45)
第四节 系统思考是看世界的新视野	(49)
第三章 系统工程及其发展与演化	(56)
第一节 系统工程及概论	(56)
第二节 系统工程方法论的发展与演化	(57)
第三节 国内外系统工程状况及启示	(60)
第四章 系统分析	(68)
第一节 霍尔系统工程方法论概要	(68)
第二节 系统分析方法论概述	(70)
第三节 发现问题或确定结构	(74)
第四节 利用统计方法发现主要因素——主成因分析法	(80)
第五节 大系统的综合方法之一——系统的可靠性	(85)
第五章 价值和评价	(93)
第一节 价值和评价的概念	(93)
第二节 矩阵评价法	(97)
第三节 投资项目经济评价方法	(103)
第四节 投资方案的比较和选优	(113)
第五节 设备更新评估	(120)

第六章 项目管理—时间管理	(124)
第一节 网络图的绘制	(124)
第二节 网络中的各种时间参数及其确定	(126)
第三节 网络计划的优化	(129)
第四节 甘特图	(132)
第七章 系统模型	(134)
第一节 系统模型概述	(134)
第二节 数学模型的特点与分类	(136)
第三节 结构模型	(138)
第四节 模糊集理论简介	(147)
第五节 模糊模型	(153)
第六节 统计类预测模型	(164)
第八章 决策科学	(179)
第一节 决策科学概论	(179)
第二节 效用理论	(188)
第三节 卡尼曼前景理论	(193)
第四节 单目标离散系统随机型决策	(198)
第五节 先验概论的修正与不完全情报	(206)
第六节 单目标连续系统随机型决策方法	(208)
第七节 不确定型决策	(215)
第八节 多目标决策	(218)
第九节 层次分析决策方法	(222)
第十节 对策论	(228)
第九章 决策支持系统	(236)
第一节 决策支持系统的形成和发展	(236)
第二节 决策支持系统	(239)
第三节 决策支持系统的开发	(243)
第四节 决策支持系统开发工具	(252)
第五节 决策支持系统的新发展与新领域	(256)
第六节 决策支持系统的应用	(270)
第十章 系统模拟	(276)
第一节 系统模拟概述	(276)
第二节 随机函数与随机数的产生	(279)
第三节 离散系统模拟技术	(282)

第四节	系统动力学模拟软件 Stalla 简介	(288)
第五节	人工神经网络	(292)
第六节	复杂适应系统模拟软件平台 Swarm 简介	(312)
第十一章	复杂网络	(328)
第一节	复杂网络基本概念	(328)
第二节	演化网络模型	(333)
第三节	度分布的计算与群集系数	(336)
第四节	加权网络	(338)
第五节	动态网络及网络的动力学过程	(341)
第六节	复杂网络的应用及常用软件	(343)
参考文献		(348)

第一章 系统科学概论

第一节 系统科学的形成与发展

一、系统的一般概念

何谓系统，由于思维角度不同，专业研究的侧重不同，所以对系统的内涵有不同理解，我们取之大家具有共识的定义。

钱学森对系统所下的定义是：“由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体，而这个系统又是它所从属的一个更大系统的组成部分。”

由以上定义可以概括出系统的若干概念：

1. 系统与要素的关系

系统是由两个或两个以上的组成部分组成的整体，这些组成部分我们亦称之为要素。要素既可以是物质性质的，也可以是思想、理念、概念、政策等抽象性性质的。

2. 系统的结构

系统中的诸要素相互作用、相互影响所构成的组织形式，这就构成了系统的结构。

3. 系统的功能

系统具有目的性或功能性。某部分要素之所以构成一个系统，是相对于某个(些)特定的功能而言。相对于其他功能，系统的组成要素，以及之间关系就要随之改变。因此，某个特定系统的认定是根据我们研究的目的不同而不同。

4. 系统的层次

系统可以划分成不同的层次，层次的划分具有相对性。任何所研究的系统是更高一级系统的组成要素，但任何一级系统的组成要素，又可以看成低一级的系统，它也有其组成要素。即所谓“向上无限大，系统变要素，向下无限小，要素变系统”。

5. 系统的环境与边界

一个系统以外的又与系统有关联的所有其他部分叫做环境。环境与系统的分界叫边界。系统的边界有的具有确定性，而有的却具有模糊性。

可以用图形来形象地描述系统以上的几个特点，如图 1-1 所示。

从以上定义看来，宇宙万物几乎都可以从不同的研究目的出发而划分成不同规模、不同类型的系统，我们处理任何问题均可以看作是研究一个系统。研究系统问题必然涉及到如何描述一个系统，这就是系统的模型技术。模型有定性模型、定量模型；或分为概念模型、实物模型、抽象系统。系统的描述是为了系统的开发、系统的管理、系统的控制、系统的发展、系统的评价等功能的实现，最终为了开发一个新系统或改善一个旧系统，这些就是本书要讲授的内容。

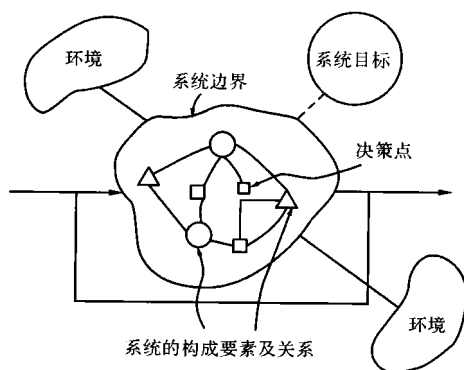


图 1-1 系统示意图

二、还原论(reducism)思维方法的局限及一般系统论的产生

美国著名的系统论学者拉兹洛认为，在西方科学史上，早期的科学思维既是整体的，又是思辩的，因而缺乏分析；近代科学是依靠经验的而又是还原论的思维方式达到的，它运用了分析方法。从古代的科学思维到还原论思维，是一次思维方式的转换。澳大利亚动物病理学教授贝弗里奇，是国内读者所熟悉的科学思想和科学方法方面的通俗著述家。他认为，过去 400 多年来卓有成效的科学方法都集中于各个孤立因素的研究，复杂现象和实体被击破成了它们的组成，再对这些组成的性质进行考察，这种程序被描述为还原主义方法。上面所说的“还原论”即“还原性研究方法”，它在现代科学发展中具有重大的科学方法论价值，分子生物学就是这种还原论方法的巨大成功。而且相对论、量子力学、基本粒子物理学所运用的方法，就其科学方法论归属来看，也是这种还原论研究方法。实际上，当今学科专业化，也正是“还原论”的研究方法的产物。但是，科学实践表明，这种方法无法说明复杂事物的性质。整体所具有的特征并不存在于分离的部分之中，统一体要比它的各个部分的简单集合包含更多的东西。贝弗里奇说：“传统的力学科学不顾及这种由组织化而实现的无形增加的某种东西，因而科学思维需要基本的重新定向以帮助我们理解系统的、有组织的整体和有意义的复合体的基本本质。这已经导致了新兴学科的出现。这门新兴学科具有深远的理论意义和实际应用价值。人们叫它‘一般系统论’、‘系统科学’，或者更通常的，简称‘系统方法’”。这里的“一般系统论”就是美籍奥地利生物学家冯·贝塔朗费(Von Bertalanffy L.)20 世纪 30 年代(1932 年)提出的。贝塔朗费认为分子生物学在物理化学和分子水平上的研究，确实加深了人们对生物本质的认识，但是“有机论”生物学的必要性反而更为明显，因为自我维系、繁殖和生长这些生命特性并不发生于构成生命体的分子或原子水平上，而只发生于生命体作为整体而存在的组织水平上。因此生物学研究不仅有分子或原子水平，而且也有较高的生命组织水平。他认为“还原论”的研究方法应用有两个条件：第一个条件是“部分”之间的相互作用不存在或微弱到对某些研究任务可以不予考虑的程度；第二个条件是描述部分的行为的关系式是线性的，可以通过部分过程相加来取得总体过程。

可见系统论是“整体论”与近代“还原论”研究方法、思维方式的统一，它不是简单回复到古代直观朴素的“整体论”去，而是在近代“精密科学”的基础上，弄清楚局部细节后，

向整体论更高形态的发展，它是分析与综合的统一。正如拉兹洛所称：“今天，我们正目睹另一场思维方式的转换：转向严谨精细而又是整体论的理论。这就是说，要构成拥有它们自己的性质和关系集成的集合体，按照同整体联系在一起的事实和事件来思考。用这种集成的关系集合体来看世界就形成了系统观点。这是现代的思维方法，也是继原子论、机械论和未经协调的专业化3种思维方式之后的思维方式”。20世纪30年代美籍奥地利生物学家冯·贝塔朗费比较明确地认识到这一点，他开始所谓理论生物学的研究(1932)，把生物整体及其环境作为一个大系统来研究。冯·贝塔朗费由此而创立了“一般系统论”(general system theory)。一般系统论的基本原则可归纳为一是整体性原则，二是相互联系的原则，三是有序性原则，四是动态性原则。对前两点好理解，后两点如何理解呢？这来源于观察生物和生命现象。生物体有一个有条不紊的构造，而且能有目的地生长和演化，这看来是生命所特有的。生物一死，构造立即开始破坏，生长和演化也立即停止，转入分解。所以一般系统论的核心是后2条原则，它适用于生物体，但它适用于非生命系统吗？冯·贝塔朗费等人首先认识到这个生命特有的现象与物理学中热力学第二定律说的不同。根据热力学第二定律，在一个孤立系统中，系统的熵是增加的。什么叫熵？在物理学上熵是系统热力学几率的函数，或者说是系统无序化程度的量度。在一个孤立系统中，系统与外界无能量、物质(对社会系统，还有一个信息量)的交换。当系统内的物理属性不平衡，于是会通过分子无规则的热运动而逐渐达到均衡，即系统内处于均衡分布的热力学几率远大于不均衡分布的热力学几率，即系统的熵是增加的。在其过程中，各种形式的可用能量将转化为分子热运动能量，变为不可用能量。然而在生命体，由于系统是开放系统，通过生命体的特殊结构及功能，可以使系统的输入熵小于输出熵，即系统的熵减少，系统的有序能量增加。这就是著名的“开尔文与达尔文之争”。冯·贝塔朗费通过生物体的研究，得到了生物体的发展与热力学第二定律描述的非生命过程相反，即有序性原则。它的重要性是把生物与生命现象的有序性和目的性同系统的结构稳定性联系起来：有序，因为只有这样才使系统结构稳定；有目的，因为系统要走向最稳定的系统结构。这个概念当然与现代科学中的控制论有关，但由于生物和生命现象的高度复杂性，理论生物学家搞一般系统论遇到的困难很大。几十年来一般系统论基本处于概念的阐发，理论的具体展开和定量结果还很少。

第二节 近代科学的最新发展对系统科学的贡献

在生命领域，系统结构稳定性代表着有序性，系统将走向有序性，熵减少；而在无机领域，根据热力学第二定律，孤立系统中，系统将走向无序，即无序度增高，熵增加。作为系统科学的一般规律，对一切系统应具有普适性。二者如何统一？

一、耗散结构理论与开放发展型社会组织

生物生命系统中结构稳定性代表着有序性，但这个稳定性到底是怎么产生的呢？首先给出这方面线索的是比利时化学家、物理学家，布鲁塞尔学派的领导人普里高津(J. Prigogine)。他于1967年发现了远离平衡态的稳定结构，也就是所谓“耗散结构”，并于1977

年获得诺贝尔化学奖。他认为耗散结构就是一般系统论中要找的具有有序性的系统稳定结构。开放系统熵输出大于输入,系统保留的熵在减少,所以走向有序。布鲁塞尔学派的这些成就把理论生物学推进了一大步,使一般系统论的有序结构稳定性有了严密的理论根据。美国著名记者、未来学家阿尔温·托夫勒认为,这个理论的意义远不止于物理学和化学,它代表了一种新时代的思维,代表了现代人看事物、看待世界的总的观点的一种深刻变化。

(一)耗散结构理论

1. 自然界中的两种有序现象

自然界中的两种有序现象,一种是平衡结构或平衡有序,一种是非平衡结构或非稳定的有序。

在耗散结构理论提出前,物理学家主要研究了前一种稳定结构。如常见的物体的气相、液相、固相的相变,以及像晶体、雪花、铁磁体等有序结构物体。这一类结构的特点:在宏观上说是稳定的,对时间变换保持不变形;处于平衡态下;平衡结构的相变须在系统与环境的能量交换条件下进行,而维持不需要这种交换。这种稳定结构虽然在空间中展现了一定的规则型,但没有进一步发展的可能,平衡结构通常被视为一种“死结构”。

自然界还存在着一种非平衡的有序结构,最典型的例子是生命体,它们都表现出与平衡结构不同的另外一些特点:在非平衡或远离平衡的条件下形成;非平衡结构形成后仍需非平衡条件下维持;虽然系统处于非平衡和剧烈的变化中,但系统在一定的范围、一定层次和状态下保持着对空间和时间变换的整体稳定性。这类结构在与外界相互作用中得以维持,包含着进一步变化和合作的巨大潜力,包含着系统做功和能量转化的潜力,因此被称为一种“活”结构。能够对外做功并能够进行能量转化的系统,显然系统熵减少了,即其有序度增高。普里高津认为,生命现象表现出这种非平衡结构是普遍的,社会现象往往也是这类非平衡结构。由于非平衡结构是依赖系统不断的物质运动和能量耗损来维持的,所以这种非平衡结构又被普里高津称为“耗散结构”。

2. 耗散结构的典型试验

作为耗散结构的生命现象是非常普遍的,但由于其复杂性,难以控制、难以分析。如在无机领域选择一种便于控制的非平衡有序结构的实验是十分重要的。普里高津敏锐地注意到20世纪初法国物理学家贝纳德的对流实验。贝纳德对流实验装置是两块玻璃平板之间处于平衡态下的液层,当对下层玻璃加热形成上下玻璃温度差 ΔT ,即液层出现温差,处于非平衡态,当温差 $\Delta T > T_c$ (临界值)时,该液层突现一种整齐有序的对流状态。在玻璃表面将看到整齐排列的六角形元胞状结构,液流沿着六边形柱壁流上来,从中心流下去;或反向流动(图1-2)。这正是在开放系统中非平衡态下,系统在一定的条件下,由平衡态突变成非平衡稳定态,即一种有序态,系统的熵减少,有序度增加。

此后,人们发现越来越多的无机领域的非平衡有序现象,如激光现象、湍流现象、天空中的云街、化学中的B-Z反应。

B-Z反应是1958年苏联物理学家别洛索夫(Belousov)和扎包廷斯基(Zhabotinski)发现的。他们发现某些金属离子为催化剂的作用下,在某些有机酸的溴酸氧化过程中,铈离

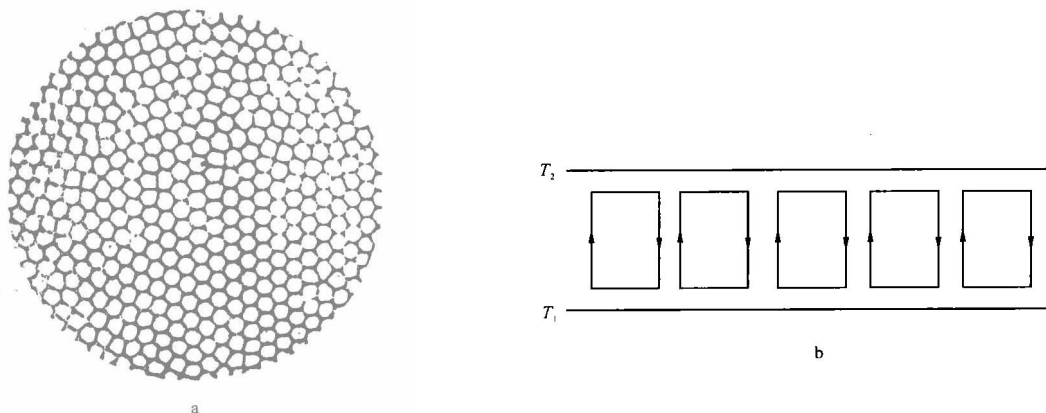


图 1-2 贝纳德流

子的浓度会随时间作周期变化，反应液将周期地在红色和蓝色间变化，称之为“化学钟”。在宏观上还能形成漂亮的花纹。他们还发现，在一定的条件下，系统中化学物质的浓度由均匀分布变成不均匀分布的稳定结构，系统的熵减小。

3. 开放系统是进化的基础

生命系统、社会进化现象和大量无机领域中出现的非平衡有序结构表明耗散结构是普遍的现象，复杂的系统中存在着与热力学第二定律相反的演化过程。这是否说明熵增加原理是错误的呢？

普里高津认为，热力学第二定律并没有错，它的条件内容是：在一个孤立系统中，系统的熵是增加的。而在一个开放的系统中，系统可以通过与环境的相互作用，以及系统内部诸要素之间的相互作用，使系统的有序度增加，使系统的熵减小。

在牛顿机械力学中(不考虑摩擦的理想状态)，时间与运动密切相关，但时间无方向性，运动是简单、可逆的，所以无法发现演化与发展问题。在热力学研究的“多体”的孤立系统中，时间具有方向性和不可逆性，状态有演化性，但是熵增加，退化趋势，未揭示进化和发展的机制。非平衡热力学和耗散结构理论，研究对象是“多体”开放系统，这时时间不仅不可逆，而其箭头指向了发展演化。

4. 非平衡是有序之源

系统的开放性反映了系统与环境的相互作用，开放性导致了系统内部的非平衡状态，内部的不平衡将会产生一定的涨落。在近平衡区涨落不大，系统将很快恢复平衡。例如一盆水，轻风徐过或滴入几滴水，系统内会出现波浪或局部压力梯度，但很快水面又恢复平静。但在远离平衡态的非平衡区，或称远平衡区，系统在整体上持续不断地处于巨涨落，系统中各子系统在微观上的自由度服从宏观上的流动变化的约束性，随着宏观流的充分变动，实现了系统可能完成结构突变的准备，而这种条件就是耗散结构形成的温床。

5. 分叉与非平衡

开放系统通过环境影响(或称外部控制参数)，使系统产生巨涨落后，进一步可能形成的便是耗散结构或称新的有序结构。耗散结构形成过程中系统状态的变化，可以如图 1-3 所示。横坐标是系统的外部控制参数 λ ，纵坐标 x 表示系统的不同状况。当控制参数不同，系统分别处于平衡态、近平衡态、远平衡态。在平衡态和近平衡态，系统的稳定状

态只有一种。在远平衡区,当参数超过临界值 λ_0 ,系统的稳定态发生分叉,出现二个稳定态,实际系统只能取其一出现。在贝纳德实验中,当耗散结构出现后,水流或者从下方沿六角形壁流上来,从六角形中央流下去;或者反之方向,每次只能取其一。因此我们称新的稳定状态为对称性破损。还可以有多级分叉。贝纳德实验是出现空间分叉的对称性破损,B-Z实验是时间分叉的对称性破损。

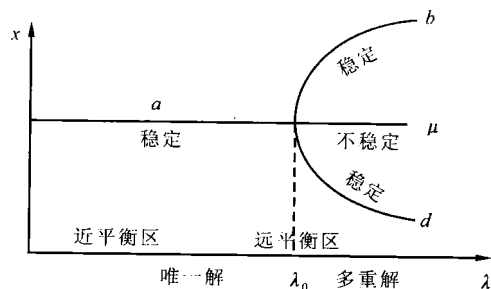


图 1-3 耗散结构形成的状态分析

在数学上讲,只有非线性微分方程才可能出现多重解,非线性方程的多重解,反映了系统的分化、分叉和复杂化。贝纳德实验显示了空间性分叉和对称性破损,B-Z实验反映如一种化学钟,是一种时间性对称性破损。

非线性微分方程,存在着高次项和交叉项的方程,因此反映着每一种变化对于未知数有双重或多重作用,这相应于现实系统中的子系统出现相干性和相互作用,各子系统自我多重作用。因此非线性相互作用是复杂系统内部的基本作用。耗散结构形成的基本条件是开放系统、非平衡和非线性相互作用。只有在这样的条件下,系统的外部控制又达到一定的条件下,系统才可能由平衡态突变成一种新的稳定有序结构,即耗散结构,系统熵减的过程,有序度增加的过程。

因此也可以说,耗散结构是指系统在非平衡条件下产生的,依赖物质、能量、信息不断输入、输出条件,来维持其内部非平衡相互作用有序结构的系统。

(二)耗散结构理论的社会实践意义

普里高津的这种关于物理化学试验的讨论,事实上是关于一般系统的进化发展的内部机制讨论。他所总结出的基本问题和原理,不仅对物理和生命现象有意义,而且对于社会和管理系统也有深刻重要的意义。正如托夫勒所说:“普里高津教授主要说的是物理和化学的反应,但有时也使人注意到社会上的同类现象,他把这些新的更复杂的系统叫做‘耗散结构’……普里高津认为,进化本身也可以看成是通过出现新的更高级的‘耗散结构’而逐步发展成为一个复杂多样化的生物和社会有机体的过程。因此,根据普里高津的见解,他的观点除了纯科学的意义外,还具有政治和哲学的共鸣。”

1. 耗散结构是研究社会现象的科学模式和方法

以往自然科学的成就巨大,但科学的概念无法研究和解释社会现象,如牛顿力学没有涉及社会问题,生物学中的进化论引入社会系统,导致了社会达尔文主义,给社会带来了不利的影响。而耗散结构理论使关于社会系统的存在和发展的认识和科学方法焕然一新。

普里高津认为社会系统首先是一个开放系统,只有在开放系统中,系统的熵才可能减少,社会的有序度才会逐步增高,即社会才能发展、进步。这就是为什么我国改革开放以来取得突飞猛进的发展的原因。又如,不能近亲通婚,大学教师队伍不能“近亲繁殖”等,就是保证系统的开放性,使信息、人才、资金、技术定向流动。系统是一个非平衡系统,社会系统才会发展。社会系统本身就是一个耗散结构系统。

2. 组织与管理系统中的熵观念

近几十年来,社会学越来越警觉,社会学和管理学中存在着熵和熵增加的问题。诺贝尔奖获得者弗雷德里克·索迪说:熵增加原理“最终控制着政治制度的兴盛与衰亡,国家的自由与奴役,设备与实业的命脉,贫困与富裕的起源,以及人类的物质福利”。

对于政治与经济的管理系统来说,管理的一系列活动不是无事找事自找麻烦,而是因为存在着要素间的许多互动是系统内部的增熵作用,系统内不断地产生“麻烦”,人员老化,设备陈旧,市场竞争加剧等。所有的宏观、微观调控,所有的管理活动,人类的建设活动,都是为了抵制和减少社会熵,增加社会和组织的有序度。

3. 非平衡是社会组织运动发展的起点

普里高津的“非平衡是有序之源”,这里的非平衡是指系统内部的差异性、分化性、不均等的状态。均等的状态、平衡的状态是系统内部控制功能下降,使系统走向混乱与无序,这种观点给我们理解和认识社会系统的进步与退化带来了很大启发。从耗散结构的观点来看,系统的平衡状态,处处均等的状态正是系统结构消失、功能丧失的表现,越是接近这个平衡态,系统的自主控制功能就越差,内部就越混乱。所以现代管理系统中,组织的各部分应当是多差异的,结构逐渐分化,功能才能逐渐复杂;管理者和被管理者的职责、权力、义务要分开;收入水平要合理分出档次,“共同富裕”的理想只能通过“一部分人先富起来”的非平衡发展过程才能实现。

4. 社会组织是通过流动而形成有序结构

为何非平衡会导致新的有序结构呢?其原因在于非平衡会导致系统内部的宏观流动,有了宏观的流动就可能形成系统中心的有序结构。这种情况在社会系统中看来比物理化学试验中看得更清楚。例如,资金平均到个人手里,什么也做不成,聚集起来就会引起借贷和投资流,结果是形成了银行、股市、证券交易所等社会功能组织;劳务缺乏和劳力过剩的区域之间形成劳务流,结果形成劳务市场、人才交流中心、职业介绍所等。

应当说明,系统科学强调的差异主要指局部特性和特色,而不是强调某种悬殊的差异性,否则会引起社会的激烈冲突,反而引起社会的混乱和不安定。

二、协同学理论

与普里高津同获1977年诺贝尔化学奖的德国物理学家赫尔曼·哈肯(Hermann Haken),从他的协同学理论(synergetics),也从另一个角度证明了系统从无序走向有序的过程。

德国物理学家哈肯在60年代由研究激光发射机理过程开始,而最终提出他的协同学理论。该理论认为有序结构的出现并不是非远离平衡态不可,系统可在热力学平衡态下,从无序状态产生有序结构。实际上系统的相空间中存在一个目的环。系统有序状态的点是随时间作往返振荡的,即在相空间有一个封闭的环,这个环就是系统的目的环。若考虑随机涨落,即在相空间的这种点或环就不那么清晰,有些模糊了。系统只有在目的点或目的环上才是稳定的,离开了就不稳定,系统自己要拖到点或环上才罢休,这就是系统的自组织。哈肯的贡献在于具体解释上述相空间的“目的点”与“目的环”是怎么出现的。哈肯打破了热力学封闭与开放的隔阂,甩开了经典热力学概念的牵制,指出一个系统从无序转变为有序的关键并不在此系统是平衡和非平衡,也不在于离平衡态有多远,而是由组成系统

的各个子系统,在一定条件下,通过它们之间的非线性作用,相互协调和合作,自发产生稳定的有序结构,这就是自组织结构。这样,在不违背热力学第二定律条件下,上述理论沟通了生命系统与非生命系统之间的内在联系,指出了两类系统之间并没有真正严格的界限,表现上的鸿沟是由相同的系统规律所支配。现代科学的这一成就正是通过系统规律把过去断开的链条开始联结起来进行研究,虽然在简单巨系统层次上进行,但其意义是重大的。另外要提一下, H. Frohlich 等人在 1967 年开始的工作,认为 Haken 的激光器理论也可以用于生命现象,因为活体中存在纵型的偏振动分支,通过代谢供给之能量,即环境供给其能量,当能量超过某一阈值时,形成强激励下的单模相干振动,出现长距离的相位相关,这正是活体具有极惊人的有序性的解释。他们从细胞膜的厚度和声波传播速度得出这种振动频率大约是 $10^{11} \sim 10^{12} \text{Hz}$, 又因为活体细胞膜上存在着由于膜两边钠离子和钾离子的浓度差异,而引起的 105V/cm 的 E 振动必产生电磁波,可算出电磁波是毫米波。A. Z. Smolyamskaya 和 R. L. Vilenskaya 用毫米波照射大肠杆菌,发现大肠杆菌合成菌素的活性与波长密切相关,有共振现象。在共振宽度仅 108Hz 左右出现活性高峰。Frohlich 应用厘米波辐照酵母菌,发现生长速度亦出现共振峰,共振宽度才 107Hz 。这些实验证实了 Frohlich 的设想,把协同学理论直接用于细胞繁殖现象(细胞重建不同于细胞分裂,二者都为细胞繁殖,阐明细胞重建的机制就需要系统学)。

三、超循环原理与超系统综合发展

耗散结构理论解决的问题仍属于简单的自组织及系统发展问题,但系统的进化是复杂的,它是一种从低级到高级的多个层次的持续发展和长久的进化,这就需要在更为复杂的系统中去寻找材料和模型。M. Eigen 和 P. Schuster 的“超循环”(hypercycle)理论是直接建立生命现象的数学模型。他们观察到生命现象都包含许多由酶的催化作用所推动的各种循环,而基层的循环又组成更高一层次的环,即“超循环”,也可以出现再高层次的超循环。达尔文的进化论研究的对象是生物或生命系统,它的进化选择机理的基本条件是生命体的新陈代谢、繁殖(自复制)和遗传变异(突变性)。而艾根(Eigen)的超循环理论揭示了在分子层次上,同样亦出现了对于生命现象所据为特征的代谢、自复制和突变性,这就导致了分子层次的进化过程。因此,超循环理论既是一种生命起源的理论,又是一般进化论的机理研究,而且它本身亦是自组织理论的最有力支持。

(一)超循环、生命与进化

1. 生命起源问题上的一个疑难

现代生物学可以分为两个水平上的研究,一个是细胞以上水平,另一个是细胞以下水平。前一个层次研究细胞如何经过多细胞分化、性分化,到植物、动物、人的演化和发展。由林奈开始的分类学,施旺、施莱登创立的细胞学,达尔文的进化论,群体遗传学、综合进化论而完满解决。后者由门德尔、摩根的遗传学开始,后经分子生物学的产生,逐渐发展。但不同分子如何经过发展演化而形成第一个细胞,即生命起源和诞生问题,这仍是一个谜。艾根称之为“分子进化”,而把前者称为“细胞进化”。

生命由细胞组成,千差万别的细胞生物内有惊人的统一性:统一的“遗传物质”——

核酸,同样的遗传密码——三联密码,同样的遗传方法——中心法则。这样,人们对于细胞进化提出这样一个问题:既然最初的细胞结构和遗传机器是统一的,那么如何形成了千差万别的生物世界呢?这主要是复制过程中基因的各种突变和在不同环境中的自然选择所造成的。但在细胞以下水平,多种多样的化学分子和化学反应,如何形成了统一的、综合的、复杂的遗传机器或统一的细胞结构?或者说生命的起源机制是什么?

2. 通过层次结构原理来实现进化

事物的发展进化是通过层次逐步实现的。诺贝尔经济学奖获得者西蒙(H. R. Simon)在探讨复杂系统进化问题时,讲了一个很通俗的故事:两个表匠坦普斯和霍拉各自组装由1000个零件组成的钟表。前者总是由第一个零件开始到第1000个零件,一气呵成完成。然而,中间经常有各种事情打断,于是半截松手散开,下一次又得重头开始;而后者设计了10个零件组成一个小组件,10个小组件组成一个大组件,10个大组件再最后组装成一个钟表。尽管中途仍有打扰,但已装成的小组件、大组件不会散开。结果,前者组装一个种表的时间是后者的4000倍。霍拉的中间层次稳定方法,使他节约了时间,生意越做越好。

艾根进行了同样的思考,他认为:分子向细胞进化应当是一个有中间层次的多阶段的过程;这个过程中应当存在着与细胞进化一样的达尔文自然选择作用,以使得劣势的分子系统被淘汰,优势的分子系统能够显露出来;为了实现统一的细胞机器,必须有一个特殊的选择机制,一旦分子出现了某种有价值的或优势结构,这个机制就可以永久保存,以进入持续发展的轨道。艾根称之为“一旦—永久选择机理”(once-forever selection mechanism)。这个一旦—永久选择机理,就是超循环组织作用结构。

(二)超循环机理

1. 达尔文系统进化的必要前提

艾根注意到,达尔文的自然选择机理的对象是生物或生命系统,它们有3个基本特征:①代谢作用:所有的生命系统都是通过新陈代谢来维持自身存在和结构的系统,代谢作用是生命的基本特征;②自复制:通过繁殖、遗传和自复制作用使生命系统维持在时空中存在和保持种族原有特征;③突变性:生命系统的复制中存在差异,有差异就会形成突变,突变性是发展进化的基础。但无论无机物分子或生物大分子,都不具有这3个特征,这样就很难在分子水平上进入达尔文选择进化的轨道。因此艾根设想,分子的进化过程中首先是形成了某种类似生物物种的“分子物种”,它虽然较为简单,达不到生命水平,但却具有代谢、复制和突变这3种基本特征,艾根将这种类似生物物种的分子称为“拟种”,拟种是大量相同或相似分子突变体的群体,这种分子突变体是通过三级化学循环而形成的,而这三级化学反应循环整体的结构就是一个超循环系统。

2. 超循环系统

三级循环分别是:反应循环、催化循环、催化超循环。

(1)反应循环是第一级化学循环。它是由底物在化学酶的催化作用下生成产物的化学反应过程(图1-4),反应是可逆的,由浓度高的底物向浓度低的产物方向进行。由于产物不断进入下一个反应,而底物又不断得到补充,这就使反应不停按箭头所指方向进行,由底物生成产物,而催化酶在催化酶、酶-底物复合物、酶-产物混合物三者之间循环。