

系统动力学与干旱区 生态—经济系统仿真

陈正江 著



西安地图出版社

系统动力学与干旱区 生态—经济系统仿真

何立群 著



高等教育出版社

国家重点基础发展规划项目(G19990435)

系统动力学与干旱区 生态—经济系统仿真

陈正江 著

西安地图出版社

责任编辑:左 霞

封面设计:陈正江

系统动力学与干旱区生态—经济系统仿真

陈正江著

西安地图出版社出版发行

(西安市友谊东路 334 号 邮政编码 710054)

新华书店经销 陕西文源彩色印刷厂印刷

850×1168 毫米,1/32 开本 7.0 印张 165 千字

2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月第 1 次印刷

印数:0001~1000

ISBN 7-80670-197-4/K·80

定价:25.00 元

前 言

系统动力学是系统科学(System Science)的一个分支,是一门研究信息反馈系统,并通过计算机进行系统仿真试验的新学科。

系统动力学于1956年由美国麻省理工学院的福瑞斯特(Jay W. Forrester)教授始创,早期主要用于工业企业管理,称为“工业动力学”(Industrial Dynamics),但它对信息反馈系统独特、实用的研究方法很快使这种方法得以扩展到城市、社会、资源、环境、人口等众多的领域,成为一门广泛应用的方法论科学。特别是70年代初,福瑞斯特教授将该方法成功地应用于世界问题的研究(福瑞斯特—麦多斯世界模型),建立了世界范围内的人口、生产部门、资源、环境、污染等方面错综复杂关系的模型,一度引起世界范围内知识界的轰动,从而使这种方法为更多的人所了解,并将它的应用扩展到有关系统研究的诸多领域。

世界干旱区面积约占全球陆地面积的25%,除少数发达国家外,大都贫瘠、荒芜,生态环境每况愈下。所以,干旱区的生态环境与经济发展一直是人们关心的一个问题。我国的“西部大开发”战略,首要问题就是要解决西部生态环境与经济矛盾的矛盾问题。本研究基于一个国家科学基金项目——“绿洲动力学模型及承载能力研究——以玛纳斯绿洲为例”,并获得国家重点基础发展规划项目(973)——“中国西部干旱区生态环境演变与调控研究”(G19990435)的支持,目的是运用当代系统科学的观点,剖析干旱区绿洲生态—经济巨系统的结构与内部反馈机制;探索绿洲生态系统对人口及经济承载能力的计算方法;揭示绿洲兴衰演替同人类经济与社会活动之间的关系;并通过建立典型绿洲的系统动力学模型,试验和选择人为科学干预的策略与方法。

本书共分九章:第一章至第五章主要讲述系统动力学的原理

与方法,包括系统动力学的产生背景,系统动力学方法原理,系统动力学分析、研究、解决问题的主要过程与步骤,DYNAMO 语言,系统的典型结构及其行为等;第六章至第九章介绍了系统动力学在干旱区绿洲生态—经济系统研究中的应用,包括干旱区及绿洲生态—经济系统分析,绿洲动力学模型(以玛纳斯绿洲为例)建立中主要的系统问题及主要的子模型。最后,就应用模型进行干旱区生态—经济系统仿真试验的有关内容—包括产业结构调整、投资能力估算、人口与经济发展动态、人民生活水平、投资政策试验、资源、环境承载能力等进行了详细介绍。

本书在编写过程中,得到了西北大学城市与资源学系、中国科学院新疆生态与地理研究所同志们的大力支持,硕士研究生邹秀萍、张婷协助整理文稿并进行了文字校对,在此一并致谢。

陈正江

2002年8月于西北大学

目 录

第一章 系统、系统科学与系统动力学	(1)
第一节 系统的概念	(1)
第二节 系统科学及其发展概论	(10)
第三节 系统动力学产生的背景及其基本概念	(21)
第二章 系统动力学原理与方法	(31)
第一节 信息反馈系统	(31)
第二节 系统模型和系统的模拟	(36)
第三节 系统的结构与描述	(41)
第三章 系统动力学分析、研究、解决问题的主要过程与步骤	(48)
第一节 系统分析	
——建模目的与系统边界	(48)
第二节 系统框图	(51)
第三节 系统因果关系图	(52)
第四节 系统动力学流图	(55)
第五节 系统因果关系图与系统流图建立实例	
——一个城市水环境污染分析模型	(63)
第六节 编写系统动力学方程	(68)
第七节 系统仿真	(68)
第八节 系统动力学模型的检验	(69)
第四章 DYNAMO 语言	(74)
第一节 DYNAMO 语言概述	(74)
第二节 语言基本规则	(77)
第三节 DYNAMO 方程	(81)
第四节 DYNAMO 函数	(84)

第五节	准确度与计算间隔 ΔT 的选择	(93)
第六节	输出控制	(95)
第七节	高级 DYNAMO	(97)
第五章	系统的典型结构及其行为	(103)
第一节	一阶系统	(103)
第二节	二阶系统	(127)
第六章	干旱区生态—经济系统	(137)
第一节	生态系统	(138)
第二节	干旱区生态系统及其基本类型	(140)
第三节	绿洲与绿洲生态—经济系统	(142)
第四节	绿洲生态—经济系统的一般反馈结构	(148)
第七章	绿洲生态—经济系统 SD 模型研究	
	——以玛纳斯绿洲为例	(151)
第一节	玛纳斯绿洲的自然环境与经济发展条件	(151)
第二节	绿洲动力学的建模实践	
	——以玛纳斯绿洲为例	(157)
第八章	玛纳斯绿洲经济、人口发展的一般态势及其调控研究	
	——生态—经济系统 SD 仿真实验(一)	(179)
第一节	绿洲国民经济发展的基本态势	(179)
第二节	种植业结构变化对绿洲经济的可能影响	(184)
第三节	不同积累率的影响	(187)
第四节	区域投资政策	(188)
第五节	人口发展趋势及其控制	(194)
第九章	玛纳斯绿洲土地资源承载力	
	——生态—经济系统 SD 仿真实验(二)	(199)
第一节	玛纳斯绿洲的生物生产能力	(199)
第二节	玛纳斯绿洲人口承载力	(201)

第一章 系统、系统科学与系统动力学

第一节 系统的概念

一、系统、要素与环境

“系统”，至少在知识界，已成为人们常用的科学概念之一。这一概念也是人们在长期的社会实践中逐步形成的。据说，古希腊的哲学家德谟克利特就写过一本叫做《世界大系统》的书。在马克思、恩格斯的著作中，系统的概念被经常提到^{[1]~[3]}。

但是，“系统”真正作为一个科学概念被人们研究却是 20 世纪 20 年代以后的事。20 世纪 40 年代，在美国工程设计中开始应用这一概念，20 世纪 50 年代以后，系统概念的科学内涵才逐步明确，并在工程技术系统的研究和管理中得到了广泛应用。

撇开一切具体系统的具体形态和性质，可以发现一切系统都具有以下几个共同点，这也就是系统所具有的同构性：

1. 系统是由两个以上要素(或部分、环节)组成的整体,单个要素不能组成系统；

2. 系统的各要素之间,各要素和整体之间,整体和环境之间,都存在一定的有机联系,从而在系统内部和外部形成一定的结构和秩序；

3. 系统整体具有各个组成部分所不具有的新功能,没有统一功能的要素集合原则上不是一个系统；

4. 系统和要素的区分是相对的,一个系统只有相对于构成它的要素而言才是系统,而相对于由它和其他事物构成的较大系统

而言,则是一个要素或子系统。同样地,一个要素只有相对于由它和其他要素构成的系统而言才是要素,而相对于构成它的要素而言,则是一个系统;

5. 系统存在于一定的环境之中,系统和环境之间与存在一定的物质、能量与信息联系,在某些情况下,也可以将环境看作是系统所从属的更大系统。

根据以上系统所具有的同构性,我们可以给系统下一个简明的定义:

系统是由两个以上要素构成的集合体,其各个要素之间存在着一定的联系和相互作用,形成特定的整体结构和适应环境的特定功能,它从属于更大的系统^[17]。

系统是由要素组成的,离开了要素就谈不上系统。要素是系统的最基本的成分,因此,也就是系统存在的基础。一般地,系统的性质,是由要素决定的,有什么样的要素,就有什么样的系统。所谓“物以类聚,人以群分”就是这个道理。要素在构成系统,决定系统时,各种要素之间要形成一定的结构。毫无结构的要素随便堆积,是构不成系统的。

要素以一定的结构形成系统时,各种要素在系统中的地位和作用是否相同?一般地说,在简单的、由相同要素组成的较低层次的系统中,各个要素的地位是平等的,作用是相同的。但是在复杂系统中,情况就不同了。在这种系统中,要素各不相同,它们所处的地位和作用也有很大差别。在这里,有些要素处于中心地位,支配和决定整个系统的行为,这就是中心要素。例如,一个国家的首脑机关或首脑人物,一台计算机的 CPU,一个城市的供水、供电系统,干旱区生态环境系统中的水资源系统等等。还有一些要素处于非中心、被支配地位,例如,一个商店的商品,一个杂技团的动物和道具等等。但是,系统的中心要素和非中心要素并不是固定不变的,在一定条件下也可以转化。杂技团的动物在杂技场上表演

的时候,它实际上就起着中心的作用。

生命早期形成的生物个体,结构相对简单,其构成要素处于平等地位的情况较多,所以,这些机体的部分受到伤害,其功能还会有其他部分取而代之,整个生命的活动也不至于停止。而生物进化后期形成的高等生物体情况就不同了,这种生物体所在的系统,结构极其复杂。譬如人体,其任一部分代替不了另一部分的功能。其中一部分受到伤害,对整个生命体来说几乎都是致命的。

系统的性质取决于要素的结构,而在一个动态结构的系统中,这种结构的优劣直接是由要素之间的协调作用体现出来的。优质的要素如果协调得不好,形成的结构就不一定是最优的;但是,质量差一些的要素,如果协调得好,则可能形成优异的结构,从而诞生出质量较优的系统,这在现实生活中是屡见不鲜的。如世界有许多热量充足的地方,却因为干旱少雨而沦为沙漠;有许多降水丰沛的地方,却因为寒冷潮湿而沦为沼泽;而另一些地方,热量算不上充足,降水也算不上丰沛,但却因为相对较多的降水和较少的蒸发而成为优良的牧场。军事装备优良的军队,如果军心涣散、兵无斗志,就不一定能打胜仗;相反,如果上下一心,军纪严明,斗志旺盛的军队,即使“小米加步枪”,也可能打垮敌人,纵横天下。因此,处理好要素与要素、要素与系统的关系,对于系统的功能和性质至关重要。

系统与环境同样也存在着密切的关系和联系。每一具体的系统都是时空上有限的存在。作为一个有限的存在,都有它外界的存在或环境。一般把一个系统之外的所有其他事物或存在,称为系统的环境。环境是系统存在与演化的必要条件,环境对系统的性质和演化方向起着一定的支配作用。系统的整体性是在系统与环境的相互联系中体现出来的,这种联系本身就是系统赖以存在的条件。

系统和它的环境之间,通常都有物质、能量和信息的交换。环

境的特点和性质的变化,往往会引起系统性质和功能的变化,反之,由于系统的作用不同,也会引起环境的变化。两者相互作用的结果,有可能使系统改变或失去原有的功能。因而,系统就要有一种特殊的功能,来适应环境的变化,保持和恢复原有的功能。这就是系统的环境适应性。例如,干旱区的生态系统或植物群落,与环境之间就有极强的适应性。

在系统研究中,如何处理系统与环境的关系,是一个十分复杂的问题。一般地说,研究封闭系统比研究开放系统简单些,研究简单的环境比研究复杂的环境简单些。当所研究的是无组织的简单关系时,在一定条件下,可以忽略系统与环境之间的相互作用,而视系统为封闭系统。如伽利略研究自由落体运动,牛顿研究万有引力,卡诺研究热机等等。在另一种情况下,可以只把那些与系统有联系的因素当作该系统的实际环境来研究。例如,在开放系统中,实际环境并不是该系统周围的全部事物,而是专指那些与该系统有物质、能量、信息交换关系的事物。因此,每一具体系统都有其具体的实际环境。另外,还可以把一系统和它的实际环境结合成新的闭合系统。例如,可以把生物和它的环境结合成一个更大的闭合系统——即生态系统进行研究。究竟如何处理系统与环境间的关系,应根据具体情况以及研究问题的目的、要求具体确定。

二、系统的特点

从系统的如上定义中,我们可以得出系统的如下特点:

1. 系统的普遍性特点

系统反映了物质世界最普遍的本质联系、存在方式或属性。恩格斯曾经用系统的思想对普遍联系的观点作了精辟的分析。他指出:“我们面对着的整个自然界形成一个体系,即各种物体相互联系的总体”^[1]。他根据当时自然科学资料,依照物质运动形式的固有区别和次序,把自然界概括为机械的、物理的、化学的、生物的四种基本运动形式,力图“以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联

系的清晰图画”^[2]。这表明在恩格斯看来,系统是自然界普遍的存在形式,系统是普遍的。

现代科学研究表明,物质世界普遍具有系统形式。整个自然界,从微观粒子到宏观天体,从无机界到有机界,从原生生物到人,都是由部分组成,具有一定层次和结构并与环境发生着关系。就物质世界而言,只要物质和能量存在着空间、时间上的不均匀,就存在着结构,就存在着秩序,因而也就存在着系统。例如,在微观世界,粒子的坐标和动量是不能同时准确测量的,但两个不确定量的乘积 $\Delta X \cdot \Delta P_x$ 却是确定的,这就是量子力学中著名的“海森堡测不准原理”。 ΔX 与 ΔP_x 是这个系统的要素,虽然每一个要素 ΔX 、 ΔP_x 都是不确定的,但整个系统的整体却体现出了确定的联系。处于自然环境中的系统,大到宇宙天体,小到基本粒子,其中各个部分都具有系统形式。

物质世界不仅普遍以系统形式存在着,而且普遍以系统形式发展着。事物发展的系统特征主要表现为要素、层次、结构、环境等各种因素对事物整体发展的综合作用过程。也就是说,事物的发展变化总是通过整体的发展变化表现出来的,而整体的发展变化则是要素、层次、结构、环境诸因素共同起作用的结果。任何事物发生、发展和灭亡的过程都是这样:在事物发展的上升阶段,内部要素不断增长,层次性和结构的稳定性不断加强,与环境关系日益紧密;而在事物发展的下降阶段,作为其存在基础的各个组成部分就会停止增长并衰亡下去,层次和结构就要瓦解和破坏,原来与环境的关系就要减弱或中断,于是它作为一个整体也就无法存在下去了,旧事物就会被新事物所取代,而新事物又会重新开始它的系统运动过程。

总之,物质世界是普遍以系统形式存在并发展着的,科学就是不断揭示和不断总结物质世界的系统性,将分散的、片面的、不连续的科学发现、科学发明系统地、有机地联系起来。科学本身就是

关于客体系统性的知识。古代所以没有“真正的自然科学”，就因为那时人们对客观世界各个领域的系统性还缺乏认识，或者虽有某些认识，但是片面的、不系统的。18世纪，特别是19世纪以后，各门科学所以普遍发展成熟起来，并使“自然科学的系统化”成为必要，也正是由于人类在实践基础上日益全面地、深刻地认识了客观世界各个领域以及这些领域之间的系统性的结果。现在各门科学都在揭示物质世界系统性方面飞速前进，并在这个过程中不断完善自己，发展自己。

2. 系统的目的性特点

20世纪中叶，在系统科学中，控制论的创始人维纳，首先将目的范畴引入了控制论，并把控制系统的活动看成是具有目的性的行为。“目的”这一概念，是一个在哲学家和自然科学家中长期争论的问题，以往被理解成是与人的活动、人的意识、人的自觉能动性联系在一起的。然而它被维纳引入控制论以后，就获得了新的解释。

1943年，维纳同他的合作者罗森勃吕特、毕格罗共同发表的《行为、目的和目的论》一文，就是他们对目的概念首次作出控制论概念解释的代表作。在这篇论文中，他们明确要达到两个目的，其中之一是从控制论角度，强调目的这一概念的重要性。在对科学史和哲学史上关于目的概念的争论充分了解的基础上，他们撇开了因果性问题，把目的论的研究仅限于目的自身的探索。因此他们在行为分类中，把“目的”理解为“由反馈来控制的目的”。若一个系统具有这类“目的”，他就是一个具有目的性的系统。

维纳从控制论的角度对目的概念的理解，使目的这一概念的外延拓宽了，它不再同以往所理解的那样，只与人的意识、人的能动性、人脑的活动直接相联系。它可以用来说明通过反馈来调解自己行为的生物系统的目的性，也可以用来描述一般非生物系统所具有的目的性行为。所以控制论中应用的“目的”概念，表明了

一切控制系统活动的性质,是控制系统反馈调节效应的一种表述。

若一个复杂系统具有一定的层次性,而且每一层次都有各自的调节系统,通过它来控制各子系统的目的性行为,这就使得“目的”在复杂系统中也表现出了一定的层次性。对于这种复杂系统,由于环境和层次上的差异,使系统的目的和各子系统的目的会有所不同。从系统整体来看,它可能通过自身内部组织结构的变化,以适应环境的变化,从而达到确保其生存的目的。如某个生物系统或某个企业管理系统都可能具有这种目的性。另外,它也可能不断利用某些因素,来达到系统的既定目的。它还可能利用某些因素,来抵制外来的干扰,保证系统的某种状态不变,以此作为自己的目的。从系统的不同层次看,就有可能处在高层次的系统,其目的性表现为力求与环境相适应,处在低层次的子系统,则表现为有目的性的调节。

当然,系统的“目的”决非抽象或空洞的东西,它总是可以通过系统的活动而得到实现的。因此系统的目的与系统的行为是紧密相关的,可以说行为是系统目的得以实现的保证,目的是行为的向导,是行为最终结果的体现。正是基于这一点,维纳对控制系统的“行为与目的”进行了研究,其研究重点是客体(即系统与环境之间的关系),而把客体的特定结构和内在组织略去不谈。这就是说,重点研究给定的任何一个从环境中抽取出来的客体,研究该客体的输出对于输入的种种关系。所谓输出的就是客体使环境产生某种变化,输入则是客体以外的任何一个事件以任何一种方式改变该客体,即环境对客体的影响和作用。由此就可导出“行为”的广义定义。所谓行为就是一个客体相对于它的环境做出的任何变化。这种变化要么主要是客体的一个输出,要么它可立即追溯到某一输入。因此我们可以说,一个客体可以从外部深知的任何改变都可以称作行为。以上所述正是维纳等人在《行为、目的和目的论》一文中的思想,以及他们所给出的有关“行为”的定义。

3. 系统的整体性特点

系统的整体性作为系统各构成部分的统一,在系统科学中占有十分重要的地位。自从一般系统论创立以来,系统的整体性作为系统科学的原理被提了出来,贝塔朗非就曾指出:“普通系统论是对‘整体’和‘完整性’的科学探索”^[21]。

中国古代朴素的整体观念强调的是整体、和谐和协调。西周末年的史伯就有“和实生物,同则不继”之说,“和”即和谐,指各部分之间的有机联系,“和”则万物生。把酸、甜、咸、辣等不同味道有机地调和起来,就能做出美味的佳肴;把各种音响协调起来,就能成为绕梁三日的美妙音乐。而“同”即相同事物之间的简单相加,机械等同,仍然还是原来的事物,故“同则不继”。以后春秋时期齐国的晏婴对“和”与“同”又作了进一步的阐发。中国古代这一整体观念,对中医的整体辩证论治传统的形成曾起了积极的作用,并对后来哲学思想以极大影响。

耗散结构理论的创始人普利高津对此曾作了高度的评价:“中国传统的学术思想着重于研究整体性和自发性,研究协调和协同。现代科学的发展……,更符合中国的哲学思想”,他预言“西方科学和中国文化对整体性、协同性理解的很好结合,将导致新的自然哲学和自然观”。

19世纪,德国的哲学家黑格尔,从整体与部分的关系上论述了整体性的思想。他认为,世界上任何事物,无论在天上或是在地下,无论在自然界还是在精神世界都是在许多方面存在着内在联系的整体。例如一朵花,它有香味、形状、颜色等许多方面性质,但一朵花并不是各方面的机械凑合的堆积,作为一朵花的整体,这些组成部分彼此间是内在地、必然地联系着的。所以黑格尔关于整体性的理解与机械论的观点不同,强调它的内在的、必然的联系。

系统的整体性,实践中要求人们将面对的问题看作是一个不可分割的整体。这样,局部的、个别的利益就必须服从于整体的利

益。只要对整体有利的决策,局部的利益是不再考虑的。如在军事活动中,为了全局战争的胜利,局部有时可能要付出巨大的牺牲。下棋,只要博得全局的胜利,局部的得失是不能过分计较的。

4. 系统的层次性特点

系统的层次性包括等级性和多侧面性两重含义。等级性是指任何一个复杂系统,都可以从纵向上把它分为若干等级,即存在着不同等级的系统层次关系。其中低一级的系统是高一级系统结构的组成部分。系统结构的多侧面性则是指任何同一级的复杂系统,又可以从横向上分为若干互相联系和互相制约及各自相对独立的平行部分。

自然系统的等级性是极其明显的,宇宙就是一个存在无限等级层次的最大巨系统。现代科学把宇宙整体结构划分为三个基本层次,即宇观层次、宏观层次和微观层次。从太阳系到银河系以至河外星系的范围,属宇观层次,是相对论力学研究的主要领域;在太阳系以内的行星、地球及一般宏观客体系统的范围,属于宏观层次,是牛顿力学研究的主要领域;在分子以下到原子、原子核、粒子、夸克(或称层子)等领域,则属于微观层次,是量子力学研究的主要领域。

与物质运动的基本形式相联系,也可相应地划分为五种基本结构形式,即机械结构形式,物理结构形式,化学结构形式,生物结构形式、社会结构形式等。其中高级结构都包含着低级的结构形式,但又不能归结为后者的简单加和。以生物运动结构形式来说,又可分为七个结构等级层次,即亚细胞、细胞、器官、机体、群体——种、群落、生物圈。高级层次的结构,有着低级系统结构所没有的结构特征;而每个层次又都同样遵循着辩证法的普遍规律,以及生物运动规律和每个结构层次的特殊规律。

在社会经济系统中,人们更熟悉等级层次。在国家体制上,从全国到省市、县、区、乡,部队编制从军、师、团、营,到连队,几乎可