

《林业工作研究》资料

系统动力学原理

(I)

顾凯平 曲春宁编著

林业部政策研究室

一九八七年七月

前 言

决策是领导的首要任务，是管理的核心内容。在我国决策科学化，是比生产技术现代化更迫切的课题。决策要有科学理论的指导，要有现代技术为其服务。被人们称为“政策实验室”的系统动力学就是一门在本世纪五十年代开始发展的，既能充分发挥领导者创造性思维作用，又能应用现代系统论，控制论、信息论等科学理论为领导者决策服务的软科学。它对那些系统庞大、结构复杂，而又数据不足的部门，更有特殊的优势。林业大概就是这类部门的典型代表。系统动力学不仅在林业机关的决策和政策分析中，而且在林业局、林场的经营方案设计、计划和规划中也有用武之地。

本讲义适合一切对系统动力学有兴趣的初学者。只要有起码的数学和计算机知识即可学习，应用。只有很少一部分涉及了较深一些的数学理论，是供从事系统动力学理论或教学工作的同志研究参考的，初学者不看无碍。

目 录

第一章 系统动力学概论	(1)
§1—1 系统动力学简史及发展动向	(1)
§1—2 系统动力学的研究对象	(3)
§1—3 系统动力学的相关理论	(7)
§1—4 系统动力学的研究方法	(9)
§1—5 系统动力学的特征和应用	(11)
第二章 因果反馈环	(16)
§2—1 因果键	(16)
§2—2 因果网络与反馈环	(17)
§2—3 反馈系统及其分类	(21)
§2—4 复杂反馈系统	(25)
第三章 流程图	(32)
§3—1 系统动力学模型的基本构成元素	(32)
§3—2 积量与率量	(35)
§3—3 辅助变量	(37)
§3—4 信息和信息流	(38)
§3—5 系统的简单描述方法	(38)
第四章 系统动力学建模的数学基础及数学表述	(53)
§4—1 积量与率量关系的数学基础	(53)
§4—2 率量方程的几种基本形式	(53)
§4—3 辅助变量方程的数学表述	(61)
第五章 延迟及其表述	(66)
§5—1 延迟的一般概念	(66)
§5—2 指数延迟的阶次	(69)
§5—3 延迟计算的数学基础	(74)
第六章 DYNAMO语言	(89)
§6—1 DYNAMO语言简介	(89)
§6—2 DYNAMO语言的基本规则	(91)
§6—3 方程式语句	(93)
§6—4 函数	(98)
§6—5 仿真时间间隔DT的选择	(110)
§6—6 命令语句和仿真控制变量	(114)
§6—7 DYNAMO语言程序设计	(117)

第七章 一阶系统.....	(140)
§7—1 系统行为的多样性.....	(140)
§7—2 一阶正反馈系统.....	(141)
§7—3 一阶负反馈系统.....	(147)
§7—4 S型增长系统.....	(154)
第八章 二阶系统.....	(167)
§8—1 二阶正反馈系统的指数增长特性.....	(167)
§8—2 简单二阶负反馈系统的振荡.....	(171)
§8—3 有辅助回路的二阶负反馈系统.....	(176)
§8—4 系统动力学中的“阶”与微分方程中的阶的一致性及线性系统与非 线性系统的区分.....	(186)
第九章 系统动力学的建模综述.....	(197)
第十章 案例.....	(204)
案例一 黄热病模型.....	(204)
案例二 坎贝 (Kaibad) 高原鹿群增长模型.....	(211)

第一章 系统动力学概论

§ 1—1 系统动力学简史及发展动向

系统动力学(也有人译作系统动态学)的原文是SYSTEM DYNAMICS,缩写为S.D.,最初是由美国麻省理工学院(MIT)的J.W.福瑞斯特(Jay W. Forrester)教授1956年在福特基金会,史隆基金会的赞助下研究出的一种独树一帜的新颖研究方法。

系统动力学是系统科学中的一个分支,是分析研究复杂的信息反馈系统的新兴学科。它基于系统论,吸取了控制论、信息论的精髓,沟通了自然科学和社会科学的横向联系,是一门交叉性、综合性的新学科。

五十年代后期,系统动力学逐步发展成为一门新的学科。初期它主要应用于工业企业管理,研究诸如生产、销售等情况的波动,市场股票与市场增长的不稳定性给经济带来的后果,因此其早期的称呼为工业动力学(Industrial Dynamics)。其后,系统动力学的应用范围日益扩大,在军事系统、空间开发、人口问题、城市规划、环境污染与生态平衡、医学、生物学以及工程技术等领域都取得了卓著的研究成果。很快,其应用已几乎遍及各类系统,深入到各个领域。

在六十年代有一批论著问世,代表这一阶段的理论与应用研究成果与水平。J·W·福瑞斯特教授发表的《工业动力学》(Industrial Dynamics, 1961)已成为本学科的经典著作。它阐明了系统动力学的原理与典型应用。《系统原理》(Principles of systems, 1968)一书侧重介绍系统的其本结构。《城市动力学》(Urban Dynamics, 1969)则总结了美国城市兴衰问题的理论与应用研究成果。

进入七十年代,系统动力学经历了两次严峻的挑战走向世界,进入蓬勃发展时期。

第一次挑战是在七十年代初,拥有来自26个国家75名科学家的罗马俱乐部(The club of Rome)在研究世界面临人口增长,能源、资源日渐枯竭,污染加剧问题时,感到当时一些惯用的方法难能胜任。于是寄希望于系统动力学方法。在1970年6、7月间,经过前后一个月酝酿和召开学术讨论会,俱乐部成员对福瑞斯特教授提出的世界模型的雏型(WORLD I)感到兴趣并受到鼓舞。于是罗马俱乐部提供财政支持,在麻省理工学院成立了一个由福瑞斯特教授的学生D·米都斯(Dennis Meadows)教授为首的国际研究小组担负世界模型的研究任务。作为最初的研究成果,J.W.福瑞斯特发表了《世界动力学》(World Dynamics, 1971),D·米都斯发表了《增长的限制》(The Limits to Growth, D.H. Meadows et al, 1972),《趋向全球的均衡》(Toward Global Equilibrium, Dennis L. Meadows et al, 1974)等著作阐述其研究成果WORLD-I和他们对未来世界发展的观点。他们研究了世界范围内人口、自然资源、工业、农业和污染诸因素的相互联系,制约和作用以及其产生的后果的各种可能性。他们的基本观点是:迄今世界范围指数式增长的势头不能再持续下去,世界的发展,将逐渐过渡到某种均衡发展的状态;由于工业化伴随了人口的膨胀、资源短缺和污染的增长,因此从长远的战略观点看,目前不发达国家按西方先进国家的模式所进行的工业化的努力未必是明智的。这些论著引起了一场令人瞩目、旷日持久的论战,系统

动力学正是在这一番论战中，加速壮大成熟起来的。

第二次挑战几乎是在同一时期J·W·福瑞斯特教授主动去接受研究美国全国模型的新任务。从1972年开始，历时十一年，耗资约六百万美元，完成了一个方程数达四千的全国系统动力学模型，该模型把美国的社会经济问题作为一个整体加以研究，解开了一些在经济方面长期存在的，令经济学家们困惑不解的疑团，诸如，七十年代以来通货膨胀，失业率和实际利率同时增长等问题。其最有价值的研究还在于揭示了美国及西方国家经济长波(Long Wave)形成的内在奥秘。他们的有关论述在1983年10月的意大利佛罗伦斯的“长波，衰退与革新”的国际会议上受到重视。由于在全国模型与长波理论研究方面取得的成就，使系统动力学这一门新兴学科在八十年代里，在理论与应用研究两方面都取得了飞跃性发展，达到了更加成熟的水平。

系统动力学问世30年来，为学术界、教育界、政府团体日益重视。它作为一个分析系统、设计系统的定量工具，增强了人们认识复杂系统的实际能力。目前国际上每年召开一次系统动力学学术会议，促进国际间的学术交流和推动系统动力学在各国的发展。1987年6月在上海召开国际系统动力学会议，它将会推动系统动力学在我国更迅速地发展。

系统动力学方法在林业部门的应用发展也很快。例如近年来，系统动力学已用于几个斯堪的那维亚国家林业和森林工业的计划。最大的成果可能是1974年开始的“社会和林业”计划，这个计划是瑞典、芬兰和挪威的研究小组合作进行的。此外，芬兰研究者建立了他们本国的林业部门模型。在丹麦，用系统动力学方法描述红杉林分的发展。在挪威，研究了有关造纸工业生产和存储波动的系统动态模型等。在我国，北京林业大学、哈尔滨工业大学、中南林学院等也正在进行有关方面的研究工作。

在系统动力学的教学与人才培养方面，目前世界上已有一百多所较著名的院校讲授系统动力学课程并开展科研工作。我国的一些院校已成立了系统动力学教研室和研究室，进行系统动力学理论与应用研究，讲授系统动力学原理与社会经济动力学课程。

系统动力学在我国的发展虽然较晚，但是随着发展系统动力学必须的软件和相应的硬件的引进和配套，特别是在微型计算机上已经能够用系统动力学的方法仿真模拟，我国系统动力学的科研、教学、应用、学术交流等已经有了迅速的发展。

§ 1—2 系统动力学的研究对象

系统动力学是处理信息反馈系统的动态行为的方法论。作为其研究对象的实际系统，一般都是一些高阶次、非线性、多重反馈的复杂系统。何为系统？何为反馈？何为复杂系统？

一个由相互区别、相互作用的各部分有机地联结在一起，为同一目的而完成某种功能的集合体称为系统。而系统中的各部分称为元素。

系统动力学中的系统一般包括三类构成要素：物质、信息和运动（可以包括人及其运动）。系统可分为天然系统和人工系统，如海洋、河流、森林等可以认为是天然系统，而通过人为规定的组织、制度等建立起来的各种管理系统、经济系统，人类对自然现象和社会现象认识改造所形成的科学系统、技术系统等都属于人工系统。系统有边界，边界以内为构成要素，边界以外为环境，边界随研究的目的和范围人为划定。如果我们研究中国的森林资源系统，必须把我国疆土内的林地、植被等元素包括在系统内，而把气候、人为的干涉、林业资金等元素视为系统的外界。如果要研究中国森林资源—经济系统，系统内不仅要包括森林资源等元素，还应包括人及资金等元素，在该系统内存在着人对森林的经营活动，资金的周转情况，以及各种信息在系统内的传输，上述的这些物质、信息和运动组成了中国森林资源—经济系统。又如我们如果研究一个林场的森林资源—经济的活动情况，则可将林场的森林资源、其它固定资产、职工、资金等看成一个系统，在系统内通过人的作用，使资金、信息流通，从而使系统中的物发生相互作用，达到某一目标。这就是一个林场的资源—经济系统。

在我们周围，系统比比皆是，有电气的，机械的，生物的，生态的，经济的，社会的，不胜枚举。大的系统如天体运行系统；涉及资源、人口、粮食、资产以及污染问题的世界社会—经济—生态系统；一个国家或一个区域的社会—经济—生态系统；涉及城市建设、人口、就业、交通、住房与社会福利的城镇系统；还有交通运输系统等等。小的系统诸如一个企业的生产、采购与销售的经营管理系统；飞机、船舶或汽车等机械系统；一棵树也可成为一个生物系统等等。

综上所述，我们可以得出形成系统的四个基本条件：

1. 系统的整体有一个总目标，各元素围绕这一个总目标而运动。
2. 每一个系统都有边界，边界内应有二个以上的构成元素。因此，我们研究某个系统，首先应探讨组成这个系统的元素是什么，确定出系统的边界。
3. 系统内每个元素有各自的功能，各元素之间有相互作用的关系。
4. 系统具有时间顺序。物质在系统内的运转称为物流，资金的运转称为资金流，信息的运转称为信息流。无论哪一种，我们统称为流。这些流要随时间迁移，沿时间轴流动，也就是说什么时间产生，其结果如何，这种结果会有什么发展，都是按时间顺序进行的。

根据系统这四个条件，我们在研究一个新系统时可以按下述步骤进行。

1. 明确系统的目标。
2. 确定组成系统的元素，划定边界。
3. 确定系统的各元素功能。
4. 确定系统的时间顺序。

例如对于一个企业的经营，首先要求确定企业的经营目标，根据这个目标确定组成系统的各个元素和系统边界，确定各元素的功能，根据企业现状的信息进行决策，然后执行决策，执行的结果又产生了新的状态，需将执行结果与目标比较后进行调节。以上的过程反复进行，使企业的现实状态逐步接近期望状态。

反复调节有一个时间顺序，经过 $t_1 - t_2$ 的时间，系统逐步达到或接近目标值。显然，小系统，简单系统达到目标值的时间短；大系统，复杂系统就长。如中国2000年的战略目标是工农业总产值翻二番，要达到这个目标值就需十几年的时间。又如在2000年我国的森林覆盖率要达到20%，而在第五个五年计划的森林资源清查时，我国的森林覆盖率为12%，这里就有一个差值，于是就产生需要决策的内容。我们研究中国森林资源—经济系统时，上述的20%的森林覆盖率就是目标值，这个系统的范围显然包括全国的森林资源、林业资金、参与消耗活动、经营活动、决策活动的人等元素，各元素之间又是相互作用相互关连的（如资源、资金政策之间彼此影响），并且要经过一段时间才能达到目标值。

什么是反馈呢？

反馈就是回输和回授。在系统动力学中，反馈是系统把输出的信息返送到原输入端，并对信息的再输出发生影响，引起控制的作用。因此，一般的系统模型可描绘如图1-2-1所示的情况。

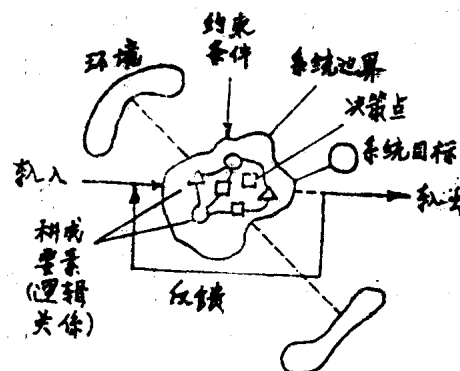


图 1-2-1 系统的一般模型

反馈可以从一个单元，一个子块或系统的输出直接联至其相应的输入，也可以经由媒介（其它单元或子块）甚至其它系统实现。

一个冰箱的制冷系统是人们所熟知的，为了维持冰室内的低温，由温度继电器与电机（电机运转，使液态制冷剂不断循环蒸发而导致低温的获得）联合组成运行系统。由前者检测冰室里的温度，并与给定的期望温度进行比较，然后把信息馈送到电机开关，控制电机运转，从而实现控制冰室温度的目的。在这里，温度继电器就是反馈器件，上述的信息馈送过程就是信息反馈作用（见图1-2-2）。

信息——决策——行为的反馈关系是系统动力学中最关键的基础部分。

什么是复杂系统？

系统有简单系统和复杂系统之分，凡是涉及到人类的社会活动（包括经济活动）的系统都属于社会系统。我们知道，二个以上的人集聚起来就成为集团。如果集团具有明确的目的

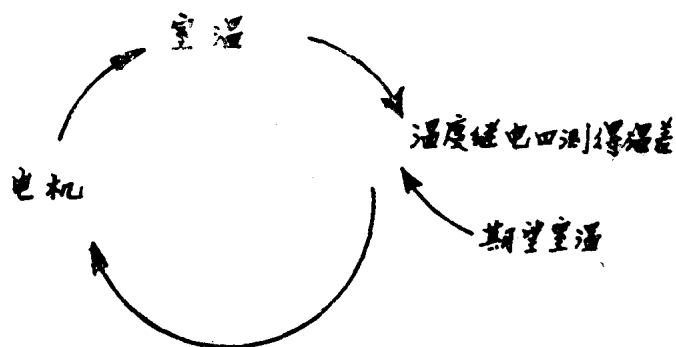


图1-2-2 冰箱致冷系统反馈过程

就成为组织。组织是社会活动的一种形态，如企业、研究院、宗教团体等都是社会组织。显然，人口系统，教育系统，资源经济系统，经济管理系统都属于社会系统，因为这些系统中人类社会经济活动是重要的构成部分。此外，人类活动还影响到自然界的生态平衡，所以包括了人的活动的生态系统也属于社会系统。这一点容易理解，例如城市建设，海洋捕捞，森林开发，工业污染，化肥农药的施用等都与生态系统有密切的关系。总之社会系统是涉及到人类社会及经济活动的大系统，是关系到人类生存和社会发展的重大问题的系统。显然社会系统是复杂系统。实际上，自然界、社会界的绝大部分系统都是复杂系统。

下面我们探讨一下复杂系统的特点。

我们经常所称的线性系统，是指系统中主要变量 x 随时间 t 变化的规律能用线性微分方程表述，例如说某一变量 x 的微小变化率 $\frac{dx}{dt}$ 正比于该变量本身即 $\frac{dx}{dt} \propto x$ ，那么这个系统称为线性系统。一般地说其微分方程为：

$$a_0(t) \frac{d^n x}{dt^n} + a_1(t) \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1}(t) \frac{dx}{dt} + a_n(t) x = R(t)$$

可用 $\frac{dx}{dt} = f(t) x + R(t)$ 形式表示的称为一阶线性系统。

如果一个表述式中有二个变量相乘或相除，则该系统就已经不是线性系统了。

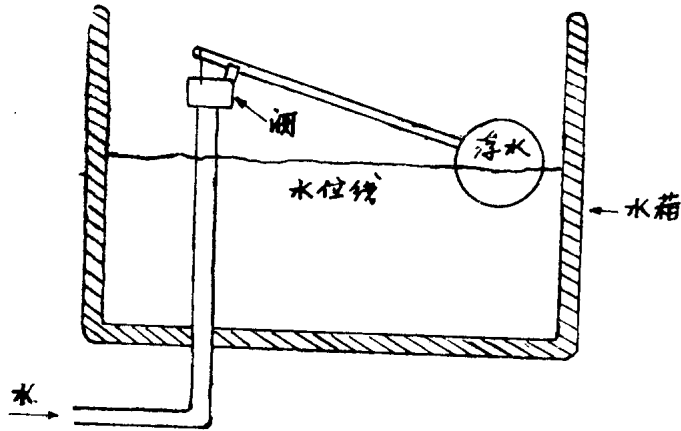
例如一棵树在某一阶段内的生长过程可以看成为线性系统。抽水马桶中水位的上升

$\frac{dx}{dt}$ 与原水桶中的水量也有线性关系，当水位越高，浮球上升越高，进水速度就越慢了。当水位

上升到一定的高度时，进水口完全堵塞，进水量为0值，这是一个线性系统(见图1-2-3)。

然而在一个森林系统中，林木的蓄积量的变化要受到许多因素的影响，要受造林或更新数量的影响，受现有林的生长量的影响，而现有林的生长又与林种、林龄、抚育、自然或人为的灾害有关，与人的经营水平和营林资金情况有关，而后二者又与林业政策有关。在这个系统内有不少的反馈关系，把这些因素都考虑进去时，显然已不是一个线性系统了。社会系统一般都是非线性系统。

另一方面，社会系统有多个状态，如果我们把每个状态变量看成一阶，则 n 个状态变量为 n 阶，实际上，有时在系统内实测到的某个状态变量在系统动力学中须看成数个状态量。如



卫生间浮子阀和水箱组成的系统

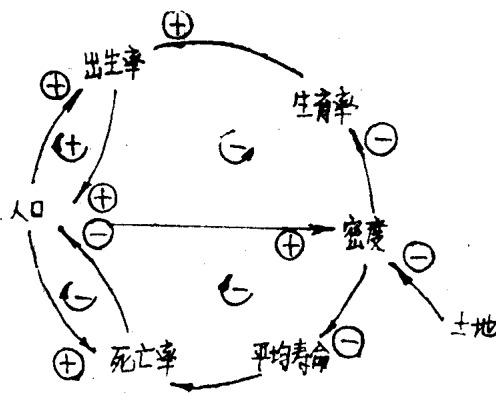
图 1-2-3

某林分蓄积量为 x ，某年生长量 $\frac{dx}{dt}$ 满足 $\frac{dx}{dt} = kx$ 。比例系数 k 就是该林分的生长率，它在不同生长期是不同的，如果我们粗略地认为在幼龄林期、中龄林期、成熟林期各视为常数，则该林分的蓄积量分化成幼龄林蓄积量、中龄林蓄积量和成熟林蓄积量，由一阶变成三阶了。社会系统往往是高阶的。一般在四阶以上就可称为复杂系统，前面我们提到的美国国家模型就有200个阶次。

在一个系统里，各元素之间是有机地通过物流、资金流和信息流而连接起来，形成一个个回路，即形成一个个反馈环。如果一个系统中的回路在3—4个以上时就算复杂系统了。

但要注意，某段时间内，系统中所有的回路中，总有一个或几个是起主导作用的回路。

例如，从生态学角度我们来研究人口增长的简化模型(见图1-2-4)。图中共有四个反馈回路，其中一个为正反馈回路，三个是负反馈回路。在不同的时间内分别由不同的回路起



资料来源: E. J. Kormondy, *Concepts of Ecology* (Englewood Cliffs Prentice-Hall, 1969) · P. 111.

图 1-2-4

主导作用。在前一阶段，正反馈回路起主导作用，人口增长呈指数、甚至于超指数增长。随着人口的急剧增长，密度急剧上升，因此有些人口学家认为，当密度大到一定程度，导致资源、能源枯竭，食物将减少，住房拥挤，污染加剧，会导致生育率和平均寿命的下降，于是使负反馈环起主导作用，导致人口增长的减缓。

从上面我们可以看出，复杂系统的定义就是高阶次、多回路、非线性系统。

复杂系统有下面一些特性：

1. 反直观性：对于简单的一阶系统，系统的变化趋势很容易直观估计，但对于复杂的系统往往很难从经验来估计，因为前一阶段的结果并不一定是后一阶段的原因，它可能是四、五个阶段前的原因引起的。如一片幼林，我们知道它的蓄积量大约呈指数型增长，但这片幼林从幼龄林开始到过熟林的整个生长过程中，蓄积量不可能永远按指数型增长，也许会出现“S”型的生长趋势。对于再复杂的系统，例如考虑了人的干预活动的系统，就不容易直观地估计了。林业管理系统中出现的各种政策失误的情况，往往需要几十年以后才能看到其危害性，这是由于它的高阶次、非线性引起的。

2. 对参数的不敏感性：由于非线性多重反馈环的作用，使系统对参数的变动是不敏感的，尤其是那些在寻找目标的负反馈环中的参数。

3. 对变更政策的抵制性：所谓政策是由于期望行为与实际行为之间存在差异，于是采用改变这种差异的对策。在系统动力学中就是改变系统中的某些参数或结构，以期得到期望的结果，由于系统对参数的不敏感性，因此往往变更政策并不能得到期望的结果。

4. 个别参数敏感性：尽管一般来说系统对参数具有不敏感性，但有个别参数却是敏感的，这往往是政策的杠杆作用点，稍一变化，系统就有很大的改观。我们往往在计算机的模拟中用改变这些参数的方法来预测系统的动态变化趋势。在一个系统中总可以找到个别特别敏感的参数，它们对制定政策影响很大。这些参数往往出现在正反馈环附近，延迟时间方面或某些正、负反馈环的交叉部分。模拟测试的重点目标是这些关键参数，否则一个一个地测试，将耗时巨大。

5. 长短期效果的矛盾：由于复杂回路的这些特点，往往某一政策参数在长期和短期的效应是不一致的。如经济学中的积累率取多大的问题，是30%呢？还是27%？还是25%？取的太低，在短期内，消费资金可多些，但对长期来说积累少了，影响长期发展。

明确了上述概念，我们对系统动力学的研究对象应该有了一个大体的印象。

§ 1—3 系统动力学的相关理论

由前两节的介绍我们看出，系统动力学是一种研究复杂功能系统的信息、控制和反馈过程的有效方法。自然，它离不开系统论、信息论、控制论的基本理论的指导。

一、系统理论

“系统”的概念早已存在，但是发展成系统科学、系统工程还是20世纪的事情。系统论、信息论和控制论的发展是紧密联系在一起。有些专家认为“系统工程就是按照系统科学的思想、应用信息论、控制论、运筹学等理论，以信息技术为工具，用现代化工程的方法去研究和管理系统的技术。”

系统动力学把一切被研究的对象都看成一个系统。系统有等级性、层次性，每个系统都

有自己的边界。边界以内，有若干子系统（或要素），它们在相互作用着，子系统又可进一步划分为小子系统……；系统的边界以外叫系统的环境，系统环境为系统生存和发展提供了必要的条件，并且对系统产生约束力。

系统理论强调整体功能，每一个系统有自己的目的，是一个活动着的整体。系统动力学着眼于系统全局的、宏观的动态行为。

每一个系统都有自己的结构，结构由“要素”和“相互关系”决定。一篇文章由字、句构成，字句之间有着严密的逻辑顺序关系。如果字、句不变，而将其逻辑关系打乱，文章也就不存在了。

每一个系统都有自己的特定功能。功能由结构决定。一个结构良好的系统其总体功能大于各个组成要素的功能之和。系统的结构不良，其总体功能也可能小于各部分功能之和。

系统的行为模式主要根植于系统内部的反馈结构与机制。

系统设计是系统理论的重要部分。它的一般步骤是：①确定系统的目标；②确定组成系统的各子系统；③建立各子系统的相互关系；④确定内部的控制机理；⑤建立系统的构造，或称为构架，由这个构造产生系统的行为。

系统理论的这些原理和方法都是系统动力学要遵循和采用的。

二、信息和控制理论

信息论，控制论是20世纪中期发展起来的新兴学科。控制论是关于控制系统的一般规律和控制过程的科学。控制论的主要思想是管理取决于从被管理对象所取得的信息，而信息的处理和传递方式的基础都是相同的。

福瑞斯特教授成功地把三十年代以来的反馈概念——控制论反馈系统概念、伺服系统的反馈控制等，应用于社会系统。使我们了解到如何利用情报，并通过系统构造来控制系统的行为。系统动力学的基本概念——信息反馈，系统的性质是决策者制定决策的信息基础。决策导致活动，活动又要改变系统的性质，系统变动后的新信息又产生了新的决策和变化。如此循环下去，就是信息反馈系统。

三、决策理论

决策理论又称决策科学，它是研究决策的规律和实现最优决策的方法的科学。它和研究现代领导活动规律的领导科学，与研究制定科技、经济、社会发展的战略科学，与研究制定政策的政策科学紧密相连。这几门都是正在形成过程中的学科，还不很成熟。

决策论的发展主要起源于军事，自二次大战以后，由于国际军事的演变以及新武器的发展，仅依据军事家们的直观与经验做出正确决策的可能性越来越小。因此，必须研究高级指挥员在决策过程中的丰富经验及思考过程，这种决策过程的研究，逐渐发展成为决策理论。今天，这种决策理论不仅用于军事，而且用于社会各个层次问题的决定上。系统动力学模型要描述决策者的思考过程与决策过程，模仿决策的基本构造及系统在不同决策下的行为。

四、系统力学

系统动力学的理论基础之一是系统力学，根据古典流体力学的基本原理，并融合系统的概念之后，把社会系统中流动着的物质流体化，按照流的特点来把握系统的行为。流体在系统中流动，必然产生某种像液体在容器中一样的堆积现象，并可以定量化。信息通道也是用流来描述的。系统力学是系统动力学模型的基本支柱之一。当我们展示系统动力学流程图时，首先映入眼帘的是各种流、流的积累、控制流的阀门，宛如进入水网地带。

五、仿真与电子计算机技术：

仿真技术发展较早，早在计算机发明之前就有了，随着计算机的发展，仿真技术被人们重视了。五十年代，仿真技术已经在军事上得以应用，人们可以在很短的时间内，借助电子计算机的帮助，清楚地了解一个复杂系统的行为。近年来，仿真方法广泛地应用于科学、工程及管理。它是系统的基本技术手段。

社会系统的仿真运算，靠人工计算或其它简单计算器是不能胜任的。由于电子计算机的发明，可供大量、高速、重复、正确的计算及资料处理，带来了技术的巨大进步，国外称为“第四次产业革命”。近年来，由于微型计算机的诞生及普及，人类正在进入“信息时代”，计算机用于社会系统仿真并支持战略决策，将是“信息时代”的重要标志。

在以上五种理论和技术的基础上，通过系统动力学先驱们创造性劳动，形成了系统动力学这样一个横向的新学科。因此，系统动力学必然与工程和非工程的许多学科发生关系。它既吸取了许多学科的长处，又有自己的特点。

§ 1—4 系统动力学的研究方法

系统动力学的研究对象是复杂的、经常变化的大系统。不可能将这样的大系统的原型制造出来进行试验和观察。采用传统调查研究方法也只能触及其某一侧面或某一瞬间，不能从整体上反映其变化和发展。研究这样的大系统必须有特殊的方法。这个方法主要就是模型和模拟。

模拟又叫仿真，就是模仿，仿效真实的客观事物和过程。

要模拟就要有模型。模型是客观存在的事物或系统的代表、替代物。它描述客观事物或系统的内部结构、关系与法则。

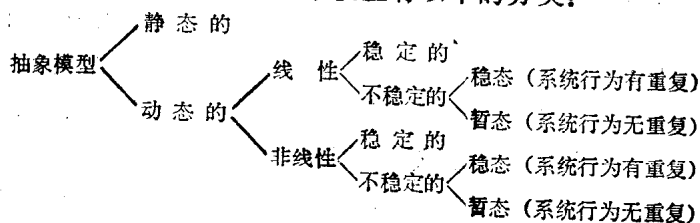
为了实现模拟，首先就要构造模型，模型的结构要仿效所要模拟的客观事物的主要构成部分。然后经过适当的处理手段使模型显示出该客观过程的基本动态行为。

模拟模型有许多种类，总的来看，可分为物理模型和抽象模型两大类。抽象模型有：思维模型、数学模型、描述性的模型等等。各类模型对客观事物描述的精确度是不完全相同的。下面分别讨论各种模型的特点：

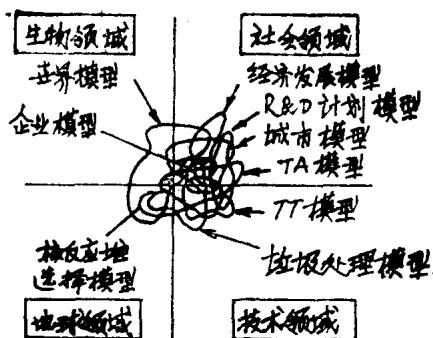
物理模型：最典型的是飞机、船舶模型，可分别放入风洞或水箱中进行实验。使用风洞将空气吹入洞里而试验飞机模型的空气动态性能；使用波浪水箱可以研究船舶在波浪冲击下的性能。又如微型化的河流模型（如美国密西西比河模型）用于研究减少河水泛滥的措施。某些河流主干的特性十分复杂，不可能直接进行真实的实验，只好依赖于模型实验。

物理模型虽然是可行的研究手段，可惜往往成本高，难于控制，笨重不灵巧，又不便使用。再则，某些系统如社会经济系统，既难于在实体上作实验，亦无法用物理模型来作实验。

按系统的行为方式分，抽象模型有以下的分类：



如果把我们将周围的世界分为如下四个大方面：社会领域、生物领域、技术领域和地壳领域。如图1-4-1所示。那么各类系统动力学模型在坐标系中的位置就可以确定了。



各种模型的位置

图 1-4-1

从图1-4-1中可以看出，经济发展模型仅属于社会领域，而企业模型则处于社会领域和技术领域之间；城市模型则处于生物领域、社会领域和技术领域之间。

按描述的方式分、抽象模型的主要类别有：

思维模型：是指人们头脑中对客观事物，周围环境的认识、判断与决策。它往往是模糊的，不确定的，不完善的，其内容是变动的，其隐念的假设难以鉴别；它们来源于何种信息与经验并不十分清楚，其来历亦无法考证；思维模型不易用来与他人沟通，因为直觉到的思维模型具有不确定和模糊的性质，难以用言词表述，也难于有效地控制和处理动态系统的行为。当人们面临复杂的系统与问题时，简单直观的思维模型就无能为力了，人们自发倾向于把一个复杂系统分割成许多子块，分别从每个子块里得到局部结论，却忽视了更重要的子块间的相互作用与反馈作用。例如对于一个国家的社会经济系统，其中有许多子块，工业、农业、交通运输、能源、科技、教育等，还有人口、污染等子块，实际上每个子块已经是一个很复杂的系统了，而且即使能对每一子块的主要问题认识 and 了解，但在子块间又有许多反馈关系和相互影响。例如高度机械化可能使工业产量增长，但同时又要引起就业率问题，工农业比例失调问题，能源、运输、污染问题等。显然简单的思维模型是解决不了稍微复杂一些问题的，对于一个复杂系统的认识不等于各个子系统的认识之和。

数学模型：它不用具体的物理器件，而是用数学符号与方程式描述系统内各组成部分的功能与彼此间的关系。

数学模型可以分为分析的、非分析的和图示的三类。分析的包括微分方程、积分方程、偏微分方程、积分变换级数等。非分析的包括代数的和几何的形式。在工程技术中，数学模型处于特别重要的地位，往往把数学模型的建立作为科学研究的基本工程，因为找到了数学模型才能进行实体设计。在运筹学中找到了数学模型也才能优化。因此，在传统科学中往往把数学模型化作为科学化的代名词。而在系统科学中，就大不一样了。因为在运用数学模型得出解析解时，往往要从解微分方程开始，而表示实际系统的微分方程往往不是线性微分方程。我们知道对于一般的线性方程求解已经是极困难了，对非线性微分方程一般是求

不出解析解的。因此对于社会经济系统，由于它的非线性与复杂性，要不就作许多假设使该系统线性化，使结果失真，要不就根本不可能获得解析值。

例如在外界条件稳定的情况下，一棵树的生长过程可以分段建立微分方程，求出其解析式表示的数学模型。然而我们知道，在实际系统中林木生长受自然因素、抚育措施等影响，而抚育措施又受人力、物力、财力等影响，而财力又受整个国民经济情况、国家投资、物价等影响，反过来林业经营情况又影响国民经济的发展，这里有反馈关系，而国家投资、物价、人力投入同时又受各种政策影响，显然对于这么一个社会—经济—资源系统，决不可能有一个简单蓄积量与时间关系的线性微分方程来描述，也不可能得出一个解析式来表示它们之间的非线性、极复杂的关系。唯一可行的方法是一步步地计算。从系统的初始状态出发，计算下一个短暂时间间隔后的状态，再由该状态计算出再下一个时间间隔后的状态，以此类推，逐步计算，最后获得系统在整个过程中的行为特性曲线。但是，使用这些逐步计算的方程却不能不经过所有的中间计算步骤，而直接计算出将来的状态。上述这一步步求解的过程就是我们讲的仿真（模拟）。为了对实际系统进行仿真计算而建立起来的模型称为仿真模型。

数学仿真模型它属于数学模型范畴。随着现代计算技术的发展，仿真模型的重要性越来越突出，这主要是因为仿真模型能够迅速和方便地给出模型所代表的实际系统动态行为，即随时间而变化的行为的有用信息。在计算机出现之前，这种仿真模型的模拟是极其繁琐的，成本是昂贵的，在16世纪，人们耗费许多时间（一些人甚至花了一生的时间）进行数值模拟计算，制出航海图表，其所以值得那么做，是因为航海在贸易与争夺海上势力范围的极端重要性。

自本世纪四十年代，电子数字计算机模拟已取代手算模拟。在第二次世界大战时，加法运算器降低了模拟成本，曾被用于设计雷达、炮塔和其它军事设备，但是其模拟成本仍然昂贵，只被应用于重要的军事工程的设计中。也就在第二次大战期间，一些先行的科学家与工程师投身于快速计算、满足模拟要求的电子设备的研究，于是电子数字计算机应运而生。随着计算机技术的发展，其硬件成本不断地下降而运算速度等性能不断地提高，在电子计算机技术的支持下，先前既困难又昂贵的解决问题的模拟方法，如今已十分简单和价廉，因而也就使模拟方法迅速发展、广泛应用了。

系统动力学就是应用模拟模型，逐步计算出每一小段时间间距后的一步步的结果。为了在计算机上运行，必须编成计算机所能接受的语言。高级通用语言都可以构筑仿真模型，如FORTRAN, BASIC、PASCAL语言等，而随着系统动力学的发展，用于模拟反馈系统专用语言DYNAMO语言也相应的发展起来，DYNAMO语言有许多种版本，使用DYNAMO语言编制仿真程序效率高，易于掌握，用户可以把主要的精力用于研究对象的模型构造上。

§ 1—5 系统动力学的特征和应用

应用系统动力学解决社会、经济问题有如下突出优点：

1. 系统动力学把物资、资金、信息，人的活动综合成一个个系统，既沟通了自然和社会科学两大领域，也使纷繁复杂的社会经济现象系统化，清晰化。

2. 系统动力学是过程导向的，它着重于系统内部的构造研究，通过认识事物的“内因”

(因果关系)而了解事物的行为,这就大大减少了对数据的依赖。系统动力学模型中也有不少参数,但这些参数可以通过数据分析得到,也可以和人们的经验,创造和想象结合起来。

3.能够定性、定量结合。社会系统中往往存在一些难以捉摸的因素,如感觉、信念、态度、价值观念等,过去人们也承认这些因素对社会经济发展有影响,但在其它各种模型中往往因无法量化,而予以忽略。在系统动力学模型中,则可以对这种信息以充分考虑。例如“社会压力”就是这样的因子,它常常与技术经济关系一样影响着决策,在系统动力学模型中就可以将之量化并予以考虑。系统动力学选择模型变量的标准不在于它们是否易于量化,而取决于是否与研究的问题有关。将定性和定量信息结合起来的能力,使系统动力学的方法更适于广泛的应用。

此外,系统动力学采用的DYNAMO计算机仿真语言,将非线性或延迟这些很难用数学形式表达的现象,用该语言却很容易表述,即使是只受过有限数学训练的人也能掌握。

4.操作灵活,可塑性强。系统动力学模型是“积木型”的,很灵活,代换容易,在模拟过程中可以随时变换策略,这对政策分析中提出不同方案,进行分析比较和评价是十分方便有效的。

5.可以预测,也可以回测。系统动力学模型是动态模型,它不但可以对未来作出规划性和警告性预测,进行必要的改进,也可以回顾系统的历史行为。例如我们可以利用一个林业资源变化情况的模型,予测未来林业资源的趋势,也可以利用这个模型来回顾过去林业资源的状况。

由于系统动力学有以上优点,因此系统动力学不仅用于社会经济系统,如世界范围、国家级、地区级、城市级或者一个工厂、商店等企事业单位及某个部门;也可以用于生物、生态、医学、工程等系统。目前系统动力学广泛地用于研制计划、规划、政策及研究系统长期发展趋势等方面。

须特别指出,系统动力学在政策分析方面的应用较其它现代化方法有更大的优势。许多政策,特别是宏观政策,适应范围都是社会、经济等复杂大系统。作用的对象庞大,结构复杂,动态多变,而且往往要求即时迅速。作这样的政策分析,现有的科学理论和方法大多难以适应其要求。过去的政策分析方法重在对社会现象的调查、对比、分析,通过一个个有典型性、代表性的事例来对社会变化过程和特点进行假设和推论,至于政策实行的后果只有等实践来检验。政策的制定在很大程度上是依靠决策者的“聪明才智”和“丰富经验”。这种传统的政策制定方式往往看得很近,头痛医头,脚痛医脚,变化多端,预见性差,而且常有以偏概全,主观随意性大等问题。

现在依靠少数人的经验和独断去治理事业而期望成功的时代已经过去。各种政策方案都要有科学研究做依据,决策者所真正需要的是数据、事实、状态分析、发展趋势预测和能够影响这些发展趋势的可能政策措施及模拟试验结果。政策分析急需由传统型发展为科学型。

怎样实现这种转变?我们首先分析一下传统政策分析与一般科学实验活动在程序上的差别:

传统政策分析
第一步 观察和发现问题

科学实验
观察和发现问题

第二步 收集、积累信息	收集、积累信息
第三步 分析研究, 提出假设、方案	形成假设和推断
第四步	进行试验
第五步 作出决策	作出科学结论

由此可见, 传统型政策分析缺少实验、试验环节。

在系统动力学模拟模型中有许多参数和许多子构造, 这些参数或子构造往往与一些政策相对应, 改变参数或结构即等于改变某一决策或政策行为。由此可以知道这一决策或政策对系统行为是如何作用的, 如何影响的。为了科学决策, 决策者的战略构思和可能采用的策略方案, 也需先进行实验, 看一看未来若干年后实现的结果, 并且比较各种方案实行后结果的差异, 从而选择满意的方案, 废止那些不良的乃至有害的方案。此种实验, 无论对企业的、城市的、区域的、国家的决策者来说, 都是至关重要的。特别是现代社会中的问题, 往往涉及到大经济、大科学的战略问题, 此种决策关系重大。这种实验与物理的、工程的实验不同, 我们不能拿某个城市做环境实验, 或在全国范围进行某些政策实验, 并且进行若干年, 这无论在空间上和时间上都是不允许的。在我们的实际工作中总会遇到象育林基金提取比例, 营林森工投资结构, 以及包山到户、自留山、自留林等政策对林业生产的长远影响会怎样等问题, 能够产生什么样的效果? 如果作实验需要很多年的时间, 但如在计算机上模拟实际系统, 很容易看到其远景。社会系统或其它一些复杂系统的实验是在计算机上进行仿真实验, 所运用的理论和方法就是系统动力学。因此人们称系统动力学为“政策实验室”, 其意即在于此。

系统动力学的引入为我国各方面的政策分析提供了又一个可行的理论和手段。可以提高决策预见性, 克服盲目性, 促使决策逐步由经验型过渡到经验和现代科学手段结合的新阶段。

习 题

1. 为了一个共同的目的而一起运行的各部分组合被称为_____。一块手表是一个指示时间的_____。

(系统、系统)

2. 一个调节器与一台发动机相互连接成了一个以恒定转速输出功率的_____。

(系统)

3. 割草机是由若干个零部件组成的_____。

(系统)

4. 一个系统可以包括人及物质要素。一个研究试验室是由_____组成的一个开发新产品的_____。

(试验人员和设备、系统)

5. 财务报表是记入数据和读出数据的_____, 其中的数据是管理决策机构输入信息的一部分, 是作出决策的基础。

(系统)

6. 模型可以分为“静态的”或“动态的”模型。在工厂中, 一张机器平面布局图是一个_____模型。在风洞中来研究飞机性能和稳定性的仿形飞机是一个_____模型。