

XIANDAIHUA ZHISHI WENKU

现代化知识文库

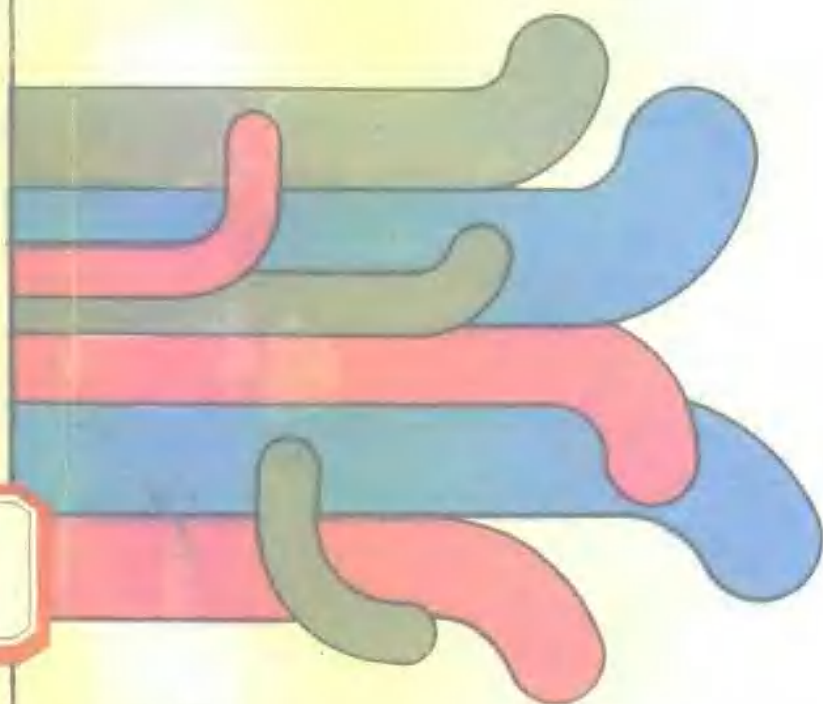
4

系统动力学：

政策实验室

● 知识出版社
上海

XITONG DONGLIXUE·ZHENGCE SHIYANSHI



351290



现代化知识文库

倪海曙 主编

系统动力学：政策实验室

严广乐 杨炳奕 黄海洲 编著

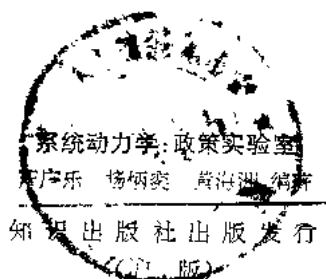


知 识 出 版 社

上 海

内 容 提 要

系统动力学是一门沟通自然科学和社会科学等领域的横向学科。本书从理论和应用两个方面叙述了系统动力学处理实际系统问题的基本原理、思想和方法,介绍了系统动力学的孕育、诞生和成长过程以及系统动力学在国内外取得的重大研究成果。本书对系统理论工作者、理工科大专院校师生、各类管理和研究人员等有一定的参考价值。



(上海市北路650号 邮政编码 200335)

本书由上海发行所经销 常熟新华印刷厂印刷

开本: 50×1025毫米 1/32 印张5.5 字数126,000

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

印数: 1—1,500

ISBN 7-5015-5465-X/F·77

定价: 2.70元

总 序

社会主义现代化建设需要知识，需要在不断更新中的现代化知识。

人类的知识是不断发展、不断更新的。现代的社会，文化科学突飞猛进，人类知识的更新速度空前加快；假定19世纪的知识更新周期是80~90年，现在已缩短为15年，而某些领先学科更缩短为5~10年。知识体系不断更新，人的知识结构也必须不断更新，进学校求得适用一辈子的知识的“一次教育”已经成为陈旧的观念。这样，不断地进行更新知识的再学习，也就成为现代人生活和工作的需要。“活到老，学到老”这句格言有了新的含义。现在，好些国家已经在研究和推行“终身教育”，又称为“知识更新教育”，它的主要方法是提供对最新知识的深入浅出的介绍，以便自学。现代化的人才要由实行全面的终身教育来造就。

人类认识日新月异，各门科学的新分支层出不穷，边缘性、交叉性学科随着发展，形成了人类知识结构的综合化和整体化的新趋向。因此，现代化社会不仅需要“专才”，而更需要“通才”，也就是具有新的知识结构的科学人才。现在许多成就卓著的科学家，极少是只限于一门专业的，他们往往在边缘性、交叉性学科领域中以博识多才取胜。当然，一个人不可能通晓一切知识的细节；但是，如果知识深广，视

野开阔，就可以具有融会贯通、触类旁通的创造能力。我国的现代化事业正需要成千上万这样的通才。

《现代化知识文库》就是为了提供知识更新的学习材料而出版的。它将系统地、全面地、通俗地介绍从自然科学到社会科学各个部门的最新成就，特别是边缘性、交叉性学科的新进展以及它的难题和解决的方向。《文库》的有些内容在国内还是第一次作系统介绍，希望它的出版对正在探索科学文化新境界的读者有所帮助。

这套文库将不断补充新的选题，分辑出版，每辑 10 本。编著者大多是中年科研人员，由老一辈的著名科学家担任缩审。从内容到文体都将按照客观情况的发展不断更新。

知识就是力量，我们的工作希望得到大家的支持和帮助。

《现代化知识文库》编辑部

1982 年 5 月

前 言

伽俐略在比萨斜塔上证实了自由落体定律，居里夫人在实验室里发现了放射性元素镭、客观世界的许多定律和发现都是依靠实验手段来完成的。然而，客观世界中还存在着一大类难以用具体试验来解决的问题，比如彩电的寿命，地下矿藏的形成，物价改革的决策选择，城市发展的趋势分析，等等。对于这些问题，虽然有时基于历史经验的思维模拟方法可以提供一点帮助，但是思维模拟常常是不明确、不完善和不全面的，很容易坠入决策陷阱中去。系统动力学作为一门分析研究信息反馈系统的综合性新学科，提供了一个认识和解决实际系统问题的实验室。

系统动力学自 1956 年创始以来，已经得到了很大的发展，其应用范围已遍及社会、经济、教育、商业、金融、企业、政治、军事、医学、生物等众多领域，并取得了显著的成果。但是，在国内系统动力学的发展起步比较迟，有关的（尤其是中文的）文献资料很少。写作本书最主要的目的，就是要为对系统动力学理论与应用感兴趣的系统理论工作者、大专院校师生以及各类管理人员和研究人员提供一本参考读物，以促进系统动力学在我国的普及和发展。

本书共有七章，其中第一章由黄海洲执笔，第二章和第七章由杨炳奕执笔，第三、四、五、六章由严广乐执笔。第一章介绍系统动力学诞生、成长的背景和过程；第二章介绍系统动力学的基本原理和特点；第三章和第四章介绍系统动力学分析和研究问题的基本方法和步骤；第五章和第六章介绍系统动力学模型的几个应用实例以及国内外系统动力

学的一些主要的重大研究成果；第七章叙述有关系统动力学学科本身的思考和展望。

本书注重理论与应用相结合，力求浅显易读，尽可能避免高深的数学证明和推导。

本书中的错误和不足之处敬请读者不吝指正。

编著者

1989年6月于上海

目 录

前言	1
第一章 系统动力学的孕育、诞生、成长	1
1. 从伽俐略到福雷斯特(1)	2. 必要的张力(5)
3. 成功的综合(8)	4. 挑战与发展(11)
5. 实验与推广(15)	
第二章 系统动力学的问题、思想、方法	16
1. 问题(16)	2. 思想(23)
3. 方法(28)	
第三章 系统动力学的构模	31
1. 思维模拟与决策陷阱(31)	2. 系统观和方法论(34)
3. 构模原理与步骤(40)	4. 构模的基本工具(44)
5. 模型的基本模块(53)	
第四章 DYNAMO: 思维模型的计算机实现	64
1. 历史与简介(64)	2. 时间机构及计算顺序(66)
3. 方程类型(67)	4. 函数(74)
5. 注释与输出(84)	
6. 高级 DYNAMO(87)	
第五章 系统动力学模型的示范与案例	100
1. 污染净化模型(100)	2. 库存模型(109)
3. 捕食与被捕食模型(125)	
第六章 系统动力学模型: 政策实验室	130
1. 从现实系统到模型系统(130)	2. 世界动力学模型(135)
3. 美国国家模型(141)	4. 中国国家模型(149)
第七章 思考与展望	157
1. 关于系统动力学范式的再思考(157)	2. 系统动力学的地位及与相关学科的关系(162)
3. 系统动力学展望(165)	
参考文献	167

第一章 系统动力学的孕育、 诞生、成长

1. 从伽俐略到福雷斯特

(1) 传统的自然科学方法以及伽俐略的变革

自然科学研究有其方法论基础，在一定的方法论指导下，自然科学必然沿着一定的方向探索。如果方法论正确得当，这种探索将使自然科学得到迅速发展；反之，则可能使自然科学研究停滞甚至倒退。

基于人们对世界的认识与探索，形成了古代的科学思想与方法、中世纪的科学思想与方法。在文艺复兴之前的传统科学思想与方法中，没有比亚里士多德的思想与方法更显得神圣与重要的了。

亚里士多德通过研究运动学、天文学、动物学，抽象并总结出有其特色的科学研究方法，这即是以演绎逻辑的方法来对自然世界进行研究，以获取科学知识。他认为论证是获取科学知识的主要认识方式与途径，演绎逻辑的三段论式是其论证的方法基础。

不容置疑，亚里士多德的演绎逻辑科学方法对古代以至中世纪科学的发展（甚至近代、现代的科学发展）都产生了极其重要的影响。演绎逻辑的方法对科学假说的形成与完善，对学科体系的形成与完善，甚至对整个世界体系的形成都产生了积极的作用，推动了自然科学的发展。

但遗憾的是，中世纪的科学界笼罩在宗教气氛中，亚里

士多德的思想被宗教化与神化了，整个自然科学处于被残酷扼杀的境遇之中。由于自然科学的思想方法被限制在演绎逻辑的框框之中，一些难以运用演绎逻辑方法的科学门类就无法得到发展。此外，为了完善学科的体系（公理体系及逻辑体系），不得不人为地加入许多“修正”与“限界”，在科学中加入了许多人为的臆想与猜测，使科学变得千疮百孔。为了保证学科的完整与正确，还人为地设置了许多禁区，这又极大地扼杀了科学发展的活力。托勒密的地心说即是一例。为了使托勒密的地心说体系保持完整，对其修正不断增多，以致到15世纪托勒密体系的圆圈增至80多个，超过了亚里士多德天球的数目。

15~16世纪的文艺复兴运动也对统治科学界的宗教产生了冲击波：哥白尼的日心说揭开了近代自然科学的序幕，是向神学发出的挑战书，是自然科学的“独立宣言”，其科学意义是无与伦比的。然而，作为向神学挑战的日心说从方法论上而言并未有太大的创新。是伽俐略借助望远镜观察天体得到的一系列重大发现，借助其力学思想以及天文学中的新发现，进一步捍卫与丰富了哥白尼的日心说。更重要的是，伽俐略创立了科学的实验方法，为自然科学的研究方法开辟了一个崭新的历史时期。

伽俐略发扬了意大利文艺复兴时期思想解放的传统，以实验事实为依据，坚信科学的结论必须经受实验的检验，通过实验检验的科学结论将是不以人的意志为转移的。伽俐略认为一个平凡的人只要找到真理，将会使一千个亚里士多德陷于困境。在归纳与演绎逻辑推理的问题上，他认为在实际的认识问题过程中归纳是先于演绎的。

伽俐略把自然科学的研究带入实验方法的新阶段，在他的实验方法中，理性的使用并没有被忽略，他以理性思维发现并指出亚里士多德关于自由落体运动的错误论述（物体的重量越大则下落速度越快），以著名的比萨斜塔实验来

论证他自己的假说。为了克服塔不够高,物体下落过快,观察时间过短,难以得出明确结论的不足之处,他设计了斜面实验。由于可以通过人工控制斜面的长度与倾角,小球在斜面上滚动的速度与时间均可控制,易于观察。在这里,逻辑推理的方法弥补了实验条件的不足,从而使在斜塔实验中所不能解决的问题在书桌的斜面上即可解决,把自然科学的问题带到实验室中来了。

自伽俐略之后,大至天体运动、海洋潮汐运动,小至分子运动、微生物运动等问题,都被带进了小小的实验室中。科学实验方法的发展大大改变了人类自身理性认识以及观察、经验之不足,使人类的理性推理可建立在严密的实验基础之上。同时,克服了人类自身的生理以及人类个体生命的限制,也克服了人们在时间、空间跨度上认识能力之不足。伽俐略在自然科学方法上揭开了崭新的一页。

(2) 传统的社会科学研究方法以及福雷斯特的变革

自然科学中演绎的思维方法从占绝对统治地位让位于科学实验方法与理性思维并重的科学方法,这在16世纪即已实现。

相比较而言,社会科学中科学实验的方法则要推迟到20世纪。

社会科学的研究对象比自然科学更为复杂,这主要体现在以下几个方面:

- 自然科学中,许多现象都是可以通过实验来进行观察的。相对而言,社会科学中这种可以通过实验来进行观察的对象较少,观察的难度增大。自然科学中,由于各种度量衡建立得较早、较全,因而通过实验手段可以较方便地根据这些度量衡来进行度量、观测。有一些变量其量纲只是这些基本的度量衡的组合,因而也可通过对观察对象的测量来得出。相对而言,社会科学中度量衡不全,测量也就变得更加困难。此外,自然科学中,人的观测大多可置于研

究、观察对象之外，因而对观察对象的影响不大，观测精度较高。而包括人类自身的社会科学则由于观测者往往也是被观测对象，因而必然会大大降低观测的精度。社会科学的可观性比自然科学要差，其观测难度也较大。

- 自然科学中，许多实验可以控制在一定的条件下进行，如自由落体实验可以控制在高度可自由调节的斜面上进行，这样斜面上小球的下降速度与时间均可得到控制。相对而言，社会科学中可控性则较差，许多社会科学问题难以象自由落体运动转换为斜面运动那样容易实现对问题的控制。

- 自然科学问题具有较好的重构性，也就是说可以通过人工实验手段再现所研究的问题。但社会科学问题的可重构性则较差，一般难以通过人工手段重现所研究的问题。这主要是因为社会问题包括了研究者自身，研究者自身的观点、行为必然影响研究对象，这样重现一个包括研究者自身的研究对象就必然有较大的困难。

由于社会科学问题的能观性、能控性与可重构性比自然科学问题较差，因而在社会科学中创立并发展科学实验方法就必然较难。因为就理论上而言，研究对象的可观、可控与可重构性是把研究对象引入实验室的必要条件。可观性说明研究对象可以通过观测来测度。可控性说明研究对象可以通过一定的控制手段引入到实验之中使其易于研究。可重构性则说明研究对象可以通过人工手段进行再现。若无可观、可控与可重构性，则科学的实验方法就无从谈起。

社会科学自身所具有的困难使得社会科学的研究方法在 20 世纪以前仍基本上停留在传统的方法之上，也就是注重理性思维而忽视感性观察与认识，注重演绎推理而忽视归纳推理，注重定性研究而忽视定量研究，注重机械的因果决定论而忽视辩证的因果循环论。更为重要的是缺乏适合

于社会科学的科学实验方法，尽管出现过类似于封闭式的乌托邦实验，但从根本意义上而言，整个社会科学中没有科学的实验方法与手段。

美国麻省理工学院的福雷斯特教授在 20 世纪 60 年代创立了适用于社会科学的实验方法，实现了社会科学方法的变革。福雷斯特基于 20 世纪 50 年代发展起来的系统论、信息论、控制论、组织理论与计算机技术，创立了一门崭新的学科——系统动力学，这门学科实现了把社会科学问题带到实验室里来研究的梦想，并已成功地在实验室里研究了工业企业的生产、组织与管理问题、城市问题、世界的繁荣与衰退问题、国家的经济滞胀及人口增长等一系列社会科学问题。

2. 必要的张力

科学的发展离不开必要性与可能性。必要性所产生的张力是科学家们致力于某种研究与探讨的动力，可能性则为这种研究与探讨准备了成功的条件。

几个世纪以来，科学发展的浪潮对系统动力学的孕育已是千呼万唤了。

(1) 科学的分崩离析呼唤着新学科出世

自从科学从古希腊的包罗万象的哲学中分离出来以后，由于科学自身发展的需要，新的学科不断涌现，学科门类的越分越细使得科学家更适于集中精力从事专门研究，同时，也使得各学科自身的体系更加完善与系统。

(2) 自然科学与社会科学在知识体系与方法上的鸿沟要求尽早找到合适的填补方法

自然科学自从与哲学分离之后，由于生产的需要获得了飞速的发展，形成了门类众多的学科结构与体系。相对而言，社会科学形成独立学科体系比较晚，其学科结构也不

够齐全，知识体系也不够完善。自然科学与社会科学在方法上存在着较大的差异。自然科学注重数量方法，朝着精确化方向发展；注重实验方法，力求以实验手段来探讨问题，验证与证实假设；注重逻辑的方法，一般是归纳与演绎方法并举，先归纳后演绎。社会科学则注重定性方法，以定性方法来研究问题的机理与行为特征；难以进行实验，对假设或理论的检验只能基于社会的发展史实。有些理论或假设甚至是无法通过社会发展进程来检验的；社会科学也注重逻辑方法，但相对而言，演绎与归纳推理的应用程度均不及自然科学那么广。

(3) 缺乏有效的科学实验方法阻碍了社会科学的发展

如前所述，由于人的行为对研究对象的影响作用，社会科学不象自然科学那样能够容易地把研究对象孤立起来，通过人工的方式来模拟问题的背景，使之在实验室里模拟实际运行情况；社会科学问题中的某些具有较大的时间、空间跨度特征以及一些规模太大、结构复杂的问题，由于人类自身认识能力的限制难以进行研究。实践已经证明，要在一个孤立的小岛上实现乌托邦是不可能的。

社会科学由于缺乏科学的有效的实验方法，在很多方面都制约了其自身的发展，使得社会科学的理论与假设难以证实与检验，这样实际上制约与延缓了社会科学发展的进程。

(4) 经济学方面微观与宏观之间的分离亟需弥合

微观经济学与宏观经济学两者之间的理论基础与方法基础均存在着很大的差异，因此经济科学发展到今天，它呼唤着微观、宏观经济学之间的分离早日弥合，使经济科学的体系更加完善，逻辑体系更加严密，形成一门完整的科学。

事实上，在许多学科中，微观分析与宏观行为的研究都是相脱节的：一方面是严密的微观分析，另一方面是“唯象”的宏观行为研究，但到底微观机制是如何上升到宏观行为，

却大都不得而知。经济科学中的微观与宏观脱节是如此，早期物理学中的热力学与统计力学的脱节也是如此。

可见，科学的发展对系统动力学的孕育已是势在必行了。

一方面，科学的发展为系统动力学的孕育提出了强有力的需求，另一方面，科学的发展也为系统动力学的孕育准备了良好的温床。

在哲学上，从古希腊亚里士多德的整体论为主流，发展到18世纪的还原论占主流，再发展到20世纪贝塔朗菲的系统论。整体论、还原论特别是系统论考察研究对象的方法，为系统动力学从系统的高度、角度研究问题准备了充分的理论基础。

在思想方法上，尤其是在研究事物发生的因果律方面，科学的发展也为系统动力学的孕育准备了充分的条件。在否定与批判了事物发展规律的不可知论之后，牛顿通过研究线性系统，得出了机械决定论的观点，也就是说从已知事件开始的状态及其运动方式即可推出事件在整个历史发展过程中任一时刻的状态。机械决定论具体应用到历史学科之中，即成为历史决定论。

从对牛顿的机械决定论进行深入的研究并结合实际情况之后，人们发现现实世界并不象牛顿所描述的那样是确定性的。相反，现实中弥漫着不确定性，但这些不确定性并不是不可知的。通过对事物发生规律不确定性(随机性)的研究，玻恩创立了模糊因果律，也就是随机决定论。随机决定论的推出，丰富与发展了事物发展规律的研究成果与内容。

进一步考察事物发展规律之后，人们进而发现牛顿的单向因果关系只是在极少数极为简单的系统中才成立，对许多问题而言，存在着复杂的因果关系，原因与结果在许多时候是不可分的，原因是上一级的结果，结果又是下一级的

原因,并由此构成因果循环链,所有的因与果因素都由这条链联结在一起,循环因果论由此提出。这种循环因果论在现代许多科学家的著作与思想中都有体现,其中特别明显的是贝塔朗菲的一般系统论、哈肯的协同学、拉兹洛的系统哲学等等。

就具体方法而言,20世纪初,自爱因斯坦的相对论提出之后,在科学上形成了一系列突破,并形成了以“系统”为特征的新的学科体系。维纳创立的控制论考察了受控系统在外界控制作用条件下的运行,并且为在实验室里进行功能模拟创立了以“黑箱”为特色的新方法;香农创立的信息论为信息的编码与传递进行了理论上的准备,并对决策的信息基础作了有益的探讨;更为重要的是,贝塔朗菲提出的一般系统论以及后来形成的一系列系统理论,为有效地从系统的角度来研究与考察系统的运行与控制及系统内部机制的调节,准备了充分的条件。

就技术而言,20世纪初发明的电子计算机技术为复杂系统的研究提供了技术上的条件,因为计算机可以方便地处理复杂系统的数据收集与整理、运行机制分析与研究等等。

至此,系统动力学的诞生已是呼之即来了。

3. 成功的综合

综合就是创造,成功的综合其创造价值是无与伦比的。

科学的发展呼唤着为社会科学的科学实验提供有效的方法,科学的发展又为实施这种创造准备了充分的条件,但这并不是说系统动力学的诞生已经完成,或者说可自然地、容易地完成。成功地完成这一综合要求必须站在现代科学的前沿,深入洞察科学发展所提出的需求,深入研究满足这

种需求的实际上可能存在的条件,并充分地利用这些条件,只有这样才有可能完成这一艰巨的任务。霍雷斯特正是经历这样一个艰巨的过程之后,创造性地完成了这一重任。

霍雷斯特早年就学于麻省理工学院,主攻通讯工程,较早地接触了先进的通讯理论,具备了一些信息论方面的基础;二次大战中,他作为雷达工程师维修过当时先进的雷达。50年代维纳在麻省理工学院创立的控制论,对麻省理工学院乃至对整个科学界都产生了深远的影响。维纳是在考察二次大战后的通讯与自动控制技术之后,站在一个更概括的理论高度,抓住通讯与控制系统本身的结构必须适应它所接受与加工的信息这一统计性质,突破了传统的力学方法,摆脱了拉普拉斯决定论及机械的唯物论,根据自动控制系统随周围环境的某些变化来调整自己运动的特点,把控制论建立在统计的基础上,这样控制论中渗入了统计的、进化的观点。

信息论与控制论中都包含着一些系统的思想,系统论的提出总结、充实、完善了这些思想,系统论不单纯提出以系统的角度来考察、研究问题,而且对系统的结构、行为变化、系统的功能进化均有研究。霍雷斯特认真地吸取了这些思想与方法,使系统动力学的综合能够站在现代科学方法的前沿。

信息论、控制论、系统论的方法都是自然科学方法,要使这些方法应用到社会科学之中去,并完成社会科学研究方法上的突破,还必须深入研究社会科学,洞察社会科学所面临的问题,综合利用社会科学的基础与理论,霍雷斯特成功地完成了这一转变。

二次大战之后,霍雷斯特转到了麻省理工学院的斯隆管理学院,深入地学习了作为社会科学中的综合学科的管理科学,学习并研究了经济学、组织理论、管理决策理论等学科,意识到经济学中的微观经济学与宏观经济学的脱节,