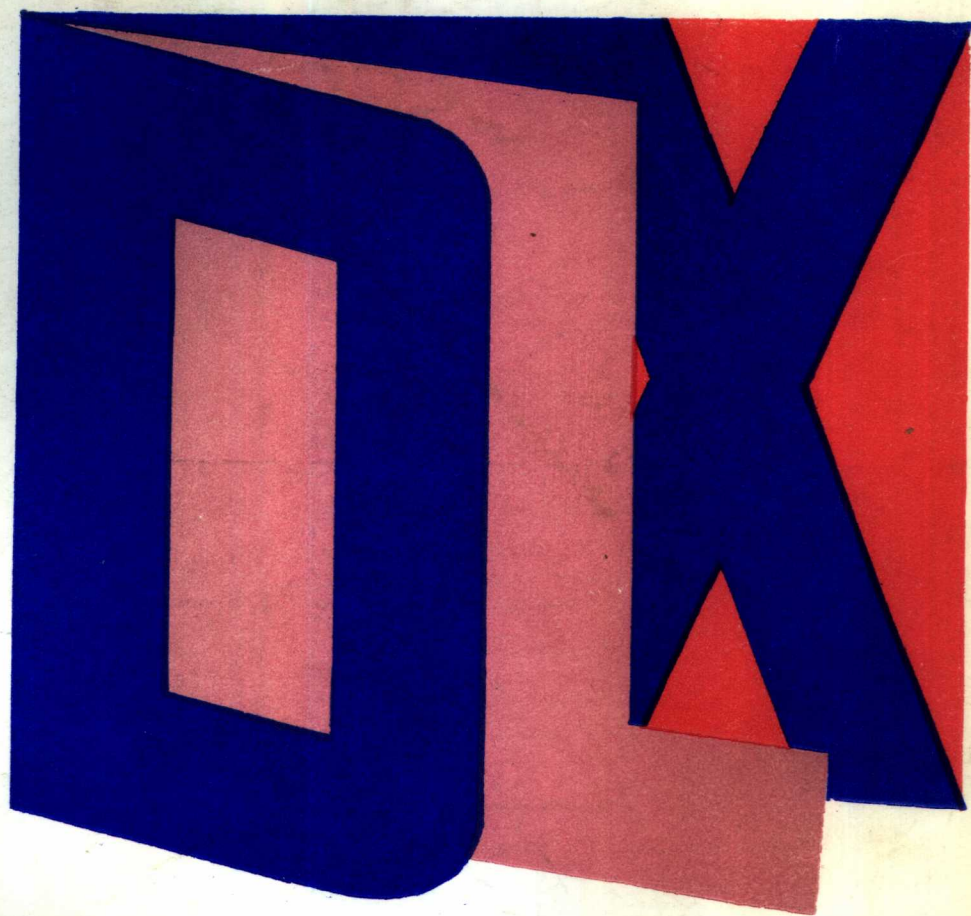


# 系统 动力学

*XI TONG*

*DONG LI XUE*

王其藩 编著



清华大学出版社



# 系统动力学

王其藩

清华大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要讲述系统动力学的理论、原理和方法，介绍了计算机专用模拟语言DYNAMO，和构造模型与建立方程的技术、调试和检验的方法，以及如何应用模型进行估计参数、决策分析等。

它是为高校经济、管理和系统工程等专业本科生编写的教学用书，也可作系统动力学和系统科学的研究人员、各类管理人员参考书。书中附有大量模型实例，图文并茂、阐述清晰，便于讲授和学习。

## 系 统 动 力 学

王其藩

★

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京昌平区振南排版厂排版

河北保定市科技印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

★

开本：787×1092 1/16 印张：17.5 字数：448千字

1988年4月第1版 1988年4月第1次印刷

印数：00001~6000 定价：2.60元

ISBN 7-302-00075-1/F·1(课)

## 序 言

系统动力学 (*System Dynamics*) 始创于1956年, 在50年代末成为一门独立完整的学科, 其创始人为美国麻省理工学院福瑞斯特 (Jay W. Forrester) 教授。

系统动力学是一门分析研究信息反馈系统的学科。它是一门认识与解决系统问题、沟通自然科学与社会科学的边缘学科, 是系统科学中的一个分支。

系统动力学从其诞生的初期开始就有其独立的发展体系, 有其自身的理论体系与科学方法。

早在50年代初, 福瑞斯特就对经济与工业组织系统进行了深入的研究。分析研究了这些系统的性质和特点, 从而得出了有关系统的信息反馈、基本组成等重要观点。

在应用方面, 系统动力学初期主要用于工业管理, 因此, 早期称为“工业动力学”。随着系统动力学的研究范围的不断扩大, 其理论与方法亦日臻成熟, 其应用范围几乎遍及各类系统, 伸入到各种领域, 远远超越“工业动力学”的范畴, 故改称现名。系统动力学在国际范围的发展已具相当规模, 目前世界上几十个国家中数以百计较著名的院校与科研机构讲授系统动力学课程或开展理论与应用研究工作。数以百计以系统动力学为主修方向的硕士、博士研究生已从各国毕业。迄今有关系统动力学的国际性学术会议已召开十余次。

系统动力学在国内的发展起步较晚, 但近年来发展很快, 参加人员已逾三百, 几乎遍及各大省市, 形势十分喜人。然而在国内对系统动力学还存在一些误解与含糊的认识, 诸如“系统动力学即等于DYNAMO”, “系统动力学模型是非数学的”, 以及从学科定义的角度上看, 系统动力学在系统科学体系中与其他分支是什么关系等等。笔者力求在本书有关章节中阐述自己的观点, 以供读者参考; 并期望这些讨论将有益于促进系统动力学在国内的发展。

本书共有15章, 编写的主要目的是为了满足不同高等院校、科研与管理界需要的一本系统动力学教学、科研用书。本书内容力求充实、广泛, 理论与实践结合。

本书中的错误与不足之处敬请读者批评指正。

在本书撰写过程中, 得到上海机械学院工程系和系统动力学教研室的同志们的大力支持与帮助, 在此一并致谢。

王其藩 一九八五年十二月

# 目 录

## 序言

第一章 系统动力学概论 .....	1
§ 1.1 系统动力学及其发展简史 .....	1
§ 1.2 关于本书的使用说明 .....	4
第二章 系统动力学理论的基本概念与构模主要过程与步骤 .....	5
§ 2.1 系统、模拟与模型 .....	5
§ 2.2 反馈系统 .....	7
§ 2.3 系统的结构与描述 .....	12
§ 2.4 系统动力学理论的基本点及与其他学科的关系 .....	17
§ 2.5 系统动力学分析、研究、解决问题的主要过程和步骤 .....	23
第三章 系统动力学构模原理与方法 .....	25
§ 3.1 构模基本原理 .....	25
§ 3.2 动力学问题与系统动力学的规范模型 .....	25
§ 3.3 构模的目的与系统的界限 .....	26
§ 3.4 问题的确定与模型构思 .....	27
§ 3.5 系统框图 .....	30
§ 3.6 因果与相互关系回路图法 .....	32
§ 3.7 流图法 (结构图法) .....	34
§ 3.8 图解分析法——速率与状态关系作图法 .....	38
第四章 计算机模拟语言 DYNAMO 简介 .....	40
§ 4.1 概述 .....	40
§ 4.2 方程式的种类 .....	41
§ 4.3 延迟、平滑和平滑函数 .....	47
§ 4.4 函数 .....	53
§ 4.5 输出问题 .....	62
§ 4.6 准确度与计算间隔 DT 的选择 .....	65
§ 4.7 高级 DYNAMO .....	67
第五章 一阶系统 .....	77
§ 5.1 概述 .....	77
§ 5.2 一阶系统的数学描述 .....	77
§ 5.3 一阶系统的重要参数 .....	78
§ 5.4 正反馈系统 .....	82
§ 5.5 负反馈系统 .....	88

§ 5.6	负反馈系统的补偿特性	92
§ 5.7	S形增长的反馈结构	96
§ 5.8	一阶系统的另一有趣特性及其实例——污染的净化	104
<b>第六章 二阶系统</b>		<b>110</b>
§ 6.1	二阶系统的描述及其行为模式	110
§ 6.2	典型的二阶系统	110
§ 6.3	捕食者—被捕食者问题	112
§ 6.4	从系统动力学的角度看乘数—加速器结构	114
§ 6.5	等温放气过程的系统动力学模型	117
<b>第七章 简单系统的振荡</b>		<b>119</b>
§ 7.1	一阶系统行为的特点	119
§ 7.2	二阶系统的振荡	122
§ 7.3	二阶衰减振荡系统	130
§ 7.4	三阶系统的振荡	132
§ 7.5	结语	134
<b>第八章 模型与方程的建立</b>		<b>136</b>
§ 8.1	什么是状态变量	136
§ 8.2	速率方程	143
§ 8.3	辅助变量方程	154
§ 8.4	建模举例	160
§ 8.5	模型的参数	172
§ 8.6	方程的初始值	176
§ 8.7	查错	179
§ 8.8	构思模型与建立模型方程的原则	183
<b>第九章 复杂系统</b>		<b>185</b>
§ 9.1	什么是复杂系统	185
§ 9.2	复杂系统及其行为的主要特性	187
§ 9.3	系统动力学有关社会经济与管理系统的—些重要观点	189
<b>第十章 模型的调试与改进</b>		<b>192</b>
§ 10.1	探索系统结构与其功能、行为关系的奥秘	192
§ 10.2	灵敏度与强壮性	196
§ 10.3	模型方程的精炼与重构	206
<b>第十一章 模型真实性、有效性、信度与检验</b>		<b>218</b>
§ 11.1	有关模型的信度与真实性的一些概念	218
§ 11.2	系统动力学模型的检验	220
§ 11.3	有关模型实用性与有效性的其他重要特点	223

§ 11.4 科研项目管理模型有效性、真实性分析 .....	224
<b>第十二章 模型实例 .....</b>	<b>225</b>
§ 12.1 系统动力学世界模型与罗马俱乐部 .....	225
§ 12.2 美国全国模型的建立——系统动力学发展的新阶段 .....	236
<b>第十三章 藉助模型进行系统问题的研究与实验——决策分析 .....</b>	<b>241</b>
§ 13.1 调整参数以分析比较政策与方案 .....	241
§ 13.2 变动结构以分析比较政策方案 .....	247
§ 13.3 政策推荐及其评价问题 .....	253
<b>第十四章 系统动力学模型的参数估计问题 .....</b>	<b>258</b>
§ 14.1 模型与参数 .....	258
§ 14.2 随机动态模型 .....	259
§ 14.3 全模型估计 .....	263
<b>第十五章 系统动力学未来展望 .....</b>	<b>266</b>
§ 15.1 公元2000年中国的系统动力学 .....	266
§ 15.2 国际上系统动力学的未来发展 .....	268
<b>附录 .....</b>	<b>269</b>
附录一 DYNAMO输出量幂次的符号定义与注释 .....	269
附录二 系统的增益、相位关系 .....	269
<b>参考文献 .....</b>	<b>270</b>

# 第一章 系统动力学概论

## § 1.1 系统动力学及其发展简史

### 1.1.1 什么是系统动力学

系统动力学 (*System Dynamics*) 是一门分析研究信息反馈系统的学科。也是一门认识系统问题和解决系统问题交叉的、综合性的新学科。它是系统科学中的一个分支。它也是一门沟通自然科学和社会科学等领域的横向学科。

系统动力学基于系统论, 吸取了控制论、信息论的精髓, 它几乎经历了与控制理论等系统科学分支并行发展的过程。

从系统论方法论来说, 系统动力学是结构的方法、功能的方法和历史的方法的统一。

按照系统动力学的理论、原理和方法论分析系统, 建立系统动力学模型并借助计算机模拟技术可以定量地研究系统问题。

系统动力学的模型模拟是一种结构——功能的模拟。它最适用于分析研究信息反馈系统结构、功能与行为之间动态的辩证对立统一的关系。

系统动力学强调, 系统的行为模式主要根植于系统内部的信息反馈机制。

系统动力学模型是实际系统的实验室。经模型模拟以剖析系统, 获取更丰富、更深刻的信息; 进而觅寻解决系统问题的途径。系统动力学解决问题的过程实质上也是寻优过程, 其最终目的是寻找系统的较优结构, 以求得较优的系统功能。

系统动力学一个突出的优点在于它能处理高阶次、非线性、多重反馈复杂时变系统的问题。

系统动力学解决问题的独特一环就是建立数学的规范模型。从系统内部的微观结构入手进行建模; 借助计算机模拟技术以分析研究系统结构功能与动态行为内在关系以及解决问题的对策。系统动力学用于研究与规划复杂社会经济系统的未来行为和相应的长期 (50~100年) 战略决策尤其能发挥其独特的优点。

作为系统科学的一个分支, 系统动力学由于它能定量地分析各类复杂系统的结构与功能的内在关系, 能定量地分析系统的各种特性, 它可望成为促进系统论与系统学发展的有力工具。

### 1.1.2 国外系统动力学发展动向

#### (1) 历史的回顾

系统动力学的出现始于1956年, 创始人为美国麻省理工学院 (M.I.T) 福瑞斯特 (Jay W. Forrester) 教授。五十年代后期, 系统动力学逐步发展成为一门新的领域。初期它主要应用于工业企业管理, 处理诸如生产与雇员情况的波动, 市场股票与市场增长的不稳定性等问题。此学科早期的称呼——“工业动力学”即因此而得名。尔后, 系统动力学的应用



范围日益扩大，从民用到军用；从科研、设计工作的管理到城市摆脱停滞与衰退的决策，从世界面临人口指数式增长的威胁与资源储量日趋殆尽的危机到检验糖尿病的病理假设；从吸毒到犯罪问题。总之，其应用几乎遍及各类系统，伸入到各种领域。显然此学科的应用已远远超越“工业动力学”的范畴，所以改称为“系统动力学”。

在六十年代一批代表这一阶段的理论与应用研究成果与水平的论著问世。福瑞斯特教授发表于1961年的《工业动力学》(*Industrial Dynamics*)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基本结构。《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的成果。

可以认为，这一阶段是系统动力学成长的重要时期。它经过最初15年的发展后，在理论与应用两方面为其在七十一八十年代的壮大与成熟奠定了坚实雄厚的基础。

## (2) 七十年代以来的壮大与成熟

这是系统动力学经历两次严峻的挑战走向世界，进入蓬勃发展的时期。

第一次挑战。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*)困惑于世界面临人口增长与资源日渐枯竭的前景。鉴于当时一些惯用的工具难能胜任对此复杂问题的研究，于是他们转向寄望于系统动力学方法。在1970年6、7月间，经过一个多月的酝酿和召开学习讨论会，俱乐部的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。于是罗马俱乐部决定提供财政支持，在麻省理工学院成立一个由福瑞斯特教授的学生梅多斯教授(Dennis Meadows)为首的 国际研究小组担负世界模型的研究任务。这是系统动力学面临的第一次严峻考验与挑战。作为最初的研究成果福瑞斯特教授以WORLD I为基础发表了《世界动力学》(*World Dynamics*, 1971)，接着他指导下的小组先后发表了《增长的极限》(*The Limits to Growth*, Donella Meadows et.al., 1972)，《趋向全球的均衡》(*Toward Global Equilibrium*, Dennis Meadows et.al., 1974)等著作阐述其研究成果WORLD II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；由于工业化伴随来了人口膨胀、资源短缺和污染加剧，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。关于这一场争论学术上的是非问题，非本书之任务，仅在第十二章中略加介绍。简单说来，纵观那些众多的议论，在正常学术论争中却也夹杂着不少西方世界惯有的学派间的门户之见，甚至无端的人身攻击。这似乎是新兴学科在西方国家发展过程中的普遍现象。然而可以说，系统动力学正是在这一番论战中，加速壮大成熟起来的。

第二次挑战后，在接受研究世界问题的挑战不久，几乎是在同一时期，福瑞斯特教授又主动地去迎接研究美国全国模型的新挑战。从1972年开始，他们先后在数十家企业公司、本国和外的政府部门的财政资助下，几乎倾其全部力量之半，历时十一年，约耗资六百万美元，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。其最有价值的研究成果还在于揭示了美国与西方国家经济长波 (Long wave) 形成的内在奥秘。他们的有关论述在意大利佛罗伦司 (Florence) 1983年10月的“长波、衰退与革新”的国际会议上受到重视。自1983年秋他们开始进行全国模型与西方经济长波理论研究的总结工作。筹资二十余万计划在一年半内完成四本书。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进展,达到了更加成熟的水平。

### (3) 学术交流、教学、科研与人才培养。

迄今国际系统动力学会议已召开了十三次,每年交替在北美与西欧国家举行。这种专业性会议有力地促进国际间的学术交流和推动系统动力学在各国的发展。

1983与1984年分别在美国波士顿与挪威奥斯陆 (Oslo) 举行系统动力学国际会议。在波士顿来自各大洲的学者达200人,宣读论文百篇,学术气氛既浓厚又活跃,一派方兴未艾景象。1985年的国际会议已在美国的丹佛 (Denver) 召开。1986年的会议预定在西班牙举行。1987年的年会将首次在非欧美地区的亚洲,我国上海召开。

麻省理工学院的系统动力学组自建立以来,坚持把教学与科研、理论与应用结合起来,既推动了学科本身理论与应用的发展又培养了一大批人才。该组为本科生、硕士生和博士生开设系统动力学原理 I、II 与经济动力学等六门主要课程。系统动力学早已成为四种类型管理专业中的主修课之一。已毕业了数以百计的硕士与博士研究生。他们先后发表的论文代表了在各历史阶段理论与应用研究的水平。这些研究生毕业后分布于美国及世界各地,从而推动了系统动力学在其他国度的传播和发展。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。一些院校如美国佛蒙特大学 (Univ. of Vermont) 的商业学院,正在进行以系统动力学各课程为核心组织管理专业教育的尝试。另外在福瑞斯特教授的倡导与支持下,在美国剑桥已有人开始在中学作讲授系统动力学选修课的试验。

### 1.1.3 我国系统动力学发展现状

系统动力学在我国的发展起步较晚。比美国晚 25 年,比日本约晚 15 年,甚至比东南亚某些国家,如泰国晚了 5 年多。在七十年代以前,此学科在国内似乎闻所未闻,即使从资料中略知一、二者也很少。目前,不论是发展该学科的客观物质条件,还是专业队伍的学术水平与国外先进水平还有很大差距。发展系统动力学必需的软件与相应的硬件尚在引进或等待配套,虽然从事系统动力学的专业人员已初具规模,但多数尚处培训阶段。

交通大学与上海机械学院顾问教授杨通谊对系统动力学在我国的传播作了许多贡献。他于1980年6月参加了麻省理工学院系统动力学组举办的暑期学习班的学习。自1980年秋以来先后在上海、杭州等地做报告或撰文介绍系统动力学及其应用。杨教授还主持把福瑞斯特教授的著作《工业动力学》等译为中文的工作。1982年以来,北京、湖南、东北的一些高等院校和科研单位,如北京航空学院、北京环境保护科学研究所、清华大学等单位的同志们,先后开展了系统动力学的应用研究。许庆瑞、陶在朴和其他同志在国外进修了系统动力学,回国后积极推动系统动力学在国内的发展,做了许多有益的工作。另外,上海机械学院安排笔者在1981年秋至1983年底期间到麻省理工学院,在福瑞斯特教授的指导下进修系统动力学。1982年春完成了系统动力学的中国人口模型,接着完成了其他三项应用课

题与三项理论研究课题；共写了七篇论文与一篇技术报告，其中五篇已于1983与1984年的国际系统动力学会议上发表。同时，笔者还与几位美国教授合作主编《系统动力学的理论与应用》（英文）一书。

1983年先后经过黄山“公元2000年的中国”、厦门“预测理论与技术方法”等学术会议上的酝酿，12月份在上海召集了发展系统动力学应用研究的专门会议，国务院技术经济研究中心的李泊溪，杨通谊教授，上海机械学院的车宏安和未来学会等单位的同志们参加了会议，会议讨论并制定了应用系统动力学研究我国社会——经济——科技——生态问题的计划。

1984年春上海机械学院与上海交通大学分别成立了系统动力学教研室与研究室，开始了系统动力学的教学理论与应用研究，上海机械学院正式讲授系统动力学原理与社会经济动力学课程，并计划在两年内陆续讲授其他系统动力学的主要课程。还有一些院校也开设了有关系统动力学的课程。

1984年9月以来在全国各地先后举办了数次系统动力学的初级学习班，参加的人数在250人以上，据不完整的统计，到1985年底全国从事有关系统动力学的应用工作的，已超过300人。已完成与正在进行中的应用研究项目在60个以上。“长期发展趋势模型”（即系统动力学全国模型）的第一阶段任务已由上海机械学院等单位在1984年完成。系统动力学在东北海伦县的规划、“中国2000年的环境”总体模型的构造等项目中都获得了初步成果。

几年来在全国性的会议与刊物上发表的有关系统动力学的理论与应用研究的文章在10篇以上。

在1983年夏至1985年夏的三年期间，我国的系统动力学研究者与工作者，累计8人在国际系统动力学会议、教学与计算机模拟世界会议上，在专业会刊与其他国外杂志上发表了13篇文章。

我国国际系统动力学协会的成员逐年增加，中国分会可望在一、二年内成立。

## § 1.2 关于本书的使用说明

本书可作为高等院校教师、研究生及本科生进行“系统动力学”课程的教学用书，同时可作为系统动力学与系统科学研究人员和高级管理人员的参考读物。

本书的内容计十五章。第二、三、五、六、七、九章主要阐述系统动力学的理论、原理与方法。第四章介绍系统动力学的专用模拟语言DYNAMO，其中一至六节是基本的，第七节是高级DYNAMO。第八、十、十一、十二章讨论构思模型与建立方程的原则与技术，模型的调试与检验，并给出模型实例。第十三章讨论如何应用模型进行决策分析。第十四章讨论有关系统动力学模型的参数估计问题。最后一章是对系统动力学未来展望。

笔者建议读者可根据自己的需要与要求按下列选读本书的章节：

- ①初学者且希望成为具有一定的系统动力学的理论与应用水平者，可系统地学习全书；
- ②已具有一定理论基础，希望提高构模、调试、检验与使用模型的能力者可选读第八及十至十三章；
- ③只对系统动力学的基本理论、原理感兴趣者可选读第二、三、及五章；
- ④对于具有初步理论基础的模型使用者，可选读第十三章；
- ⑤对于已具有较强的理论基础与实践能力，希望了解如何提高系统动力学理论与应用研究水平者可选读第七、九、十四、十五章，及第四章的第七节高级DYNAMO。

## 第二章 系统动力学理论的基本概念 与构模主要过程与步骤

### § 2.1 系统、模拟与模型

#### 2.1.1 什么是系统?

系统动力学定义系统为：一个由相互区别、相互作用的各部分有机地联结一起，为同一目的而完成某种功能的集合体。

此定义与系统论中对系统的定义是相同的。系统论是系统动力学的基础，因此，两者对系统有相同的定义是不足为奇的。

从系统动力学的观点看，一个系统包含物质、信息和运动（可以包括人及其活动）三部分。系统动力学所研究的范围可大可小。其种类可分为：天然的或人工的；社会的或工程的；经济的或政治的；心理学的、医学的或生态的。

在我们周围，系统比比皆是，例如电气的、机械的、热力学的、生物的、社会的、经济的，不胜枚举。大的系统如天体运行系统；涉及资源、能源、人口、粮食、资产与工业化以及污染问题的全世界社会——经济——生态系统；一个国家或一个区域的社会——经济——生态和交通运输系统；涉及企业建设、人口、就业、交通、住房与社会福利的城镇系统等。小的系统诸如：进行生产，销售产品，维持库存，雇用与辞退工人的企业经营管理系统；包括有驾驶员（或无驾驶员）的机械、电子与液压设备的航天飞行器、或飞机或船舶或汽车系统；房屋的供暖空调系统。再小一点（或许更为复杂）的系统如动物的心脏、肺和血液循环的供氧生理系统等等。

#### 2.1.2 什么是模拟与模型?

“模拟”的主要特点就是模仿、仿效真实的客观事物和过程。

一般谈及模拟总是涉及到某种模型或简化的表达方式。模型是客观存在的事物与系统的模仿、代表或替代物。它描述客观事物与系统的内部结构、关系与法则。为了实现模拟，首先模型的结构要仿效所要模拟的客观事物的主要构成部分。然后经适当的处理手段使模型显示出该客观事物或过程的基本动态行为。模拟模型有许多种类：思维模型、物理模型、数学模型、计算机模型或者前述模型的组合。各类模型对客观事物给予一定精确度的描述。

所谓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。

思维模型往往是模糊的、不确定的、不完善的，其内容是变动的。其隐含的假设难以鉴别，它们来源于何种信息与经验并不清楚，其来历亦无法考证。思维模型不易用来与他人沟通，也难于有效地控制与处理。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。这是因为人的思维能力不可能处理高阶次、非线性、多回路的反馈系

统。人们自发倾向于把一个复杂系统分割成子块，分别从子块得出局部结论，却忽视了更重要的子块间的相互作用与反馈作用。

藉助物理模型实现模拟是广为采用的模拟方法。例如，微型化的河流模型（美国密西西比河模型就是一例）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。再如风洞与波浪实验水箱，缩小尺寸木制的或其他材料制的飞机或船的模式，可分别放入风洞与水箱中进行实验。使用风洞，空气吹入洞里试验飞机模式的空气动态性能。利用波浪水箱可研究船模式在波浪冲击下的性能。

物理模式固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，既难于在实体上做实验，亦无法用物理模式来做实验。因此，人们通常宁愿采用数学模式。和物理模式不同，在数学模式中，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。用数学模式描述社会经济系统时，由于它的非线性与复杂性，根本不可能获得解析解。求解此类系统的唯一出路就是藉助一步步数值解的模拟技术。也就是按一定的时间间隔（例如，一秒钟间隔）。一步步去计算模式的方程式，从而获得表示系统内变量随时间变化的模拟结果，即模拟系统的动态行为。若上述计算是用手算进行，则显而易见如此数学模式的模拟是极其繁琐，成本很贵的。在16世纪，人们耗费许多时间进行数值模拟计算，制出航海图表。其所以值得那么做，是因为那时航海在贸易与争夺海上势力范围的极端重要性。

自本世纪四十年代以来，电子数字计算机模拟已取代手算模拟。在二次大战时，加法运算器降低了模拟成本，曾被用于设计雷达、炮塔和其他军事设备。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。也就是在二次大战期间，一些先行的科学家与工程师投身于能快速计算和满足模拟要求的电子设备的研究上，于是电子数字计算机应运而生。随着计算机的发展，其运算成本大约每两年降低一半，据预料如此降低运算成本的速度至少能持续至本世纪九十年代初。这一变化，意味着先前既希罕又昂贵的解决问题的模拟方法，如今已十分价廉，可以广泛采用了。

目前计算机模拟技术已十分流行，广泛地应用于物理科学、社会科学和经济领域中。比如说，核反应堆在事故情况下的特性，就是通过计算机模拟得出的。毋庸赘述，用真实的核反应堆或小型化的核反应堆模式来试验紧急事故，都是极其冒险的。由此可见计算机模拟技术的极端重要性。计算机模拟亦已用于气象预报，近些年来，气象科学家曾建立了不少描述热、污染物质和空气的流动以及湿度变化的模式，十分详尽，规模很大。其中一些气象模式，规模太大，所需计算机运算时间竟超过24小时，无法实现预报次日气象的目的。实践证明，目前唯有规模小一些的气象模式，才有实用价值。

计算机模拟技术已用于研究分析各种有趣的、重要的社会与经济问题。就世界模式而言，较知名的世界模式在七十年代就出现了七个。分别采用系统动力学，投入与产出，计量经济学，最优化方法，经典经济理论以及混合方法建模。诸如美国福瑞斯特(Forrester)与梅多斯(Meadows)的世界模式 *WORLD II* 与 *III* (1971, 1972年，系统动力学方法)；荷兰的汉斯(Hans)等的农业国际关系模式 *MOIRA* (1975年，计量经济学与最优化方法)；日本Yoichikava等的全球未来依存关系模式 *FUGI* (1977年，投入产出，最优化，系统动力学混合方法)；和瓦斯利(Wassily)等的联合国世界模式(1977年，投入产出方法)

等。其中福瑞斯特与梅多斯的系统动力学模型最引人注目，论述这一研究成果的《增长的限制》(*The Limits to Growth*, 1972)一书，是一本引起世界范围广泛讨论与论争的有关未来世界问题的论著。此书出版七个月后，国际应用系统分析协会(IASA)诞生于伦敦。此协会的活动促进了后来的各种世界模型的研究，刚才提到的其余六个世界模型都是在它的历届会议上发表的。

系统动力学模型是按照系统动力学理论建立起来的数学模型，采用专用语言 DYNAMO，借助数字计算机进行模拟，以处理行为随时间变化的系统的问题。

## § 2.2 反 馈 系 统

### 2.2.1 什么是反馈?

在2.1.1中已给出了“系统”的定义，以更加精炼的语句来描述就是“系统为相互作用单元的复合体”。系统内同一单元或同一子块其输出与输入间的关系称为“反馈”。推而广之，对整个系统而言，“反馈”则指系统输出与来自外部环境的输入的关系。反馈可以从单元或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——其他单元、子块，甚至其他系统实现。

换言之，所谓“反馈”就是信息的传输与回授。顾名思义，反馈的重点应在于“回授”即“反”字上。

顺便指出，上述中所谓“输入”系指相对于单元、子块或系统的外部环境施加于它们本身的作用。而“输出”则为系统状态中能从外部直接测量的部分。

我们周围的反馈现象比比皆是。比如，空调设备是人们所熟知的，为了维持室内的温度，需要由热敏器件组成的温度继电器与冷却（或加热）系统联合运行。由前者担负室内温度的检测并与给定的期望室温加以比较，然后把信息馈送至控制器，使冷却（或加热）器的作用在最大与关停之间进行调节，从而实现控制室温的目的。其中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。

### 2.2.2 反馈系统与反馈回路

#### (1) 反馈系统

所谓反馈系统就是包含有反馈环节与其作用的系统。它要受系统本身的历史行为的影响，把历史行为的后果回授给系统本身，以影响未来的行为。

前节所介绍的空调设备就是这样一个系统。温度继电器与冷却器（或加热器）、泵、送风机（或辐射器）等一起组成一个反馈系统。图2.1描述了这一系统的反馈关系。

再如库存控制系统，也是一个反馈系统。发货使库存量减少，当库存低于期望水平以下一定数值后，库存管理人员即按预定的方针向生产部门订货，货物经一定延迟到达，然后使库存量逐渐回升。其反馈关系如图2.2所示。

上述库存信息反馈调节过程可简述如下：反映库存当前水平的信息经过订货与生产部门的传递最终以来自生产部门的货物的形式返回库存。

#### (2) 反馈回路

图2.1与2.2给出的恒温系统与库存订货系统都是简单的反馈系统。从图中可知它们都

形成闭合的回路（或称环），称之为反馈回路（或环）。

可见，反馈回路就是由一系列的因果与相互作用链组成的闭合回路或者说是由信息与动作构成的闭合路径。

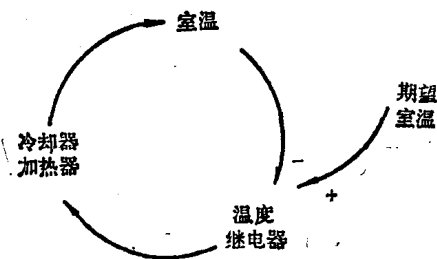


图 2.1 恒温系统

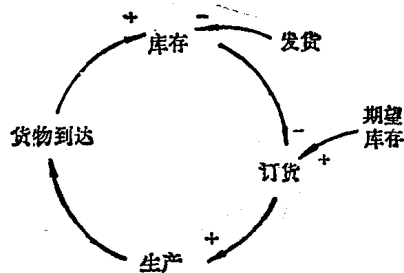


图 2.2 库存——订货控制系统

### （3）反馈回路和反馈系统

明确反馈系统的涵义后，可返回来再看一看什么是反馈系统。反馈系统就是相互联结与作用的一组回路；或者说反馈系统就是闭环系统。单回路的系统是简单系统；具有三个回路以上的系统是复杂系统。

反馈系统俯拾皆是，生物的、环境的、生态的、工业的、农业的、经济的和社会的系统都是反馈系统。

### 2.2.3 反馈的作用与反馈系统的分类

#### （1）反馈的作用

为了掌握系统的动态行为与系统内部结构的关系，首先要了解反馈的作用。为了弄清反馈的作用还得从讨论开环系统入手。

开环系统是相比于闭环系统（即反馈系统）而言，因其内部未有形成闭合的反馈环，像是被断开的环，故称为开环系统。

图2.1的恒温系统是闭环的反馈系统，若将系统中的温度继电器取走，则系统内闭环变为开环，由反馈系统变为无反馈的开环系统。于是，系统原来具有的恒温特性也就失去了。

前面已讨论过，图2.2的库存——订货系统也是一个闭环的反馈系统。系统中的库存缺货信息的收集与向生产部门提出订货的要求均由管理人员承担；假设系统中无管理人员或管理人员失职，则系统中失去反馈环节与反馈作用，处于无人管理状态，也就成为开环系统了，库存量就不可能保持在合理的水平。

汽车、机车和所需要的驾驶员（司机）构成具有反馈的闭环系统，汽车才能正常行驶；一旦失去司机，则失去了反馈与调节作用，变成开环系统，那就非出事故不可了。

在我们周围世界中，粗略地讲：诸如无人驾驶的汽车、机车本身，无人操作或无计算机控制的设备，人们所使用的闹钟和手表等等可视作开环系统。这些系统不能检测到自身的行为，不能对其行为作出反应，也不能作自我调整。另外，有一些系统，乍看起来似乎是开环的，其实只是反馈作用不强或不明显而已；只要仔细加以考察，就可以发现，它们本身或连同它们周围的环境还是组成一定的闭环系统的。例如老式的锅炉取暖系统，自动

化程度低，就这种系统本身而言是开环的，但是把锅炉操作人员与取暖系统管理人员划入系统，整个取暖系统就成为具有反馈作用的闭环系统。不难想像，要是一时锅炉无人管理，或调节装置失灵使系统变成开环，则锅炉或是烧得不够热或是烧过头，甚至过热使锅炉爆炸。再如空中的浮云、地上的沙漠与城镇，或河中的游鱼、江边的工厂与邻近的市区，似乎彼此之间都是不大相干、不存在反馈关系的系统；但是，若从生态环境的角度加以考察，可以发现它们各自都是生机勃勃，内部休戚相关的生态系统。

## (2) 反馈系统的分类

在分析反馈系统的行为与其内部结构的关系时，首先要区别反馈的种类。按照反馈过程的特点，反馈可自然地划分为正反馈和负反馈两种。

正反馈的特点是，能产生自身运动的加强过程，在此过程中运动或动作所引起的后果将回授使原来的趋势得到加强。

负反馈的特点是，能自动寻求给定的目标，未达到（或者未趋近）目标时将不断作出响应。

具有正反馈特性的回路称为正反馈回路；具有负反馈特点的回路则称为负反馈回路，（或称寻的回路）。分别以上述两种回路起主导作用的系统则称之为正反馈系统与负反馈系统（或称寻的系统）。

### 1) 正反馈系统

前面说到，所谓正反馈系统就是正反馈起主导作用的系统。

正反馈回路的特点是，发生于其回路中任何一处的初始偏离与动作循回路一周将获得增大与加强。正反馈回路可具有诸如非稳定的、非平衡的、增长的和自增强的多种特性。

图2.3给出正反馈回路的例子。

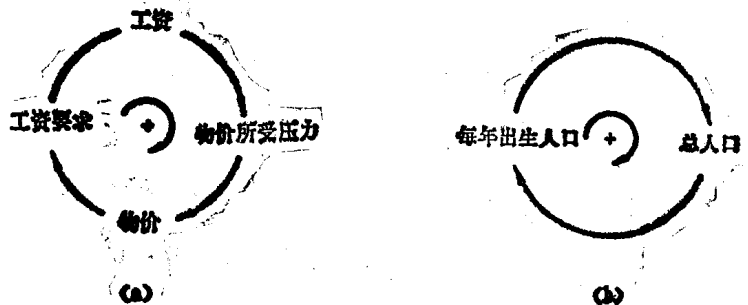


图 2.3 正反馈回路举例

这些正反馈回路的共同特点是，产生于回路中各元件的初始变化将反复不断地得到加强。图2.3(a)工资—物价回路粗略地表明了人们（特别是西方国家）所熟知的工资与物价相互影响与基本关系。当物价开始增长，人们逐渐感到实际生活水平的降低，就加强了对增加工资的要求；随之工资的普遍提高，产品的成本也增加了，生产产品的厂家与企业为了保证谋取足够的利润并弥补多付出的工资，转而提高物价，于是形成正反馈的增长过程。

图2.3(b)人口的自然增长过程，若不考虑意外与人为控制因素的影响，它也是呈正反馈的特点。



这两个正反馈例子都表现出正反馈回路的自增强、不稳定的特性。在实际系统中，就系统的产生的后果而言，正反馈回路可导致良性循环与恶性循环两类。这一特性在许多复杂的信息反馈的实际系统中多有所见。

## 2) 负反馈系统

图2.1的恒温系统和图2.4给出的系统就是负反馈系统的例子。因为这些系统都包含负反馈回路，它力图缩小系统状态相对于目标状态（或某平衡状态）的偏离。因此负反馈回路亦可称为稳定回路，平衡回路或自校正回路。

图2.4(a)是一个摆系统的负反馈回路。一旦钟摆受一推力而偏离其垂直的平衡位置，地球引力就产生了一个水平分力——恢复力，力图使钟摆升至一定高度后摆回垂直位置。在此分力的作用下摆在回程中，其速度逐渐增加，经平衡位置时速度达最大值，因此摆继续运动而产生超调，向另一方向摆动，摆的位置又上升至相应的高度；此间作用于摆的恢复力又力图将它拉回垂直的平衡位置，如此重复多次其摆动幅度逐渐减少，最终返回到目标位置——垂直平衡位置。

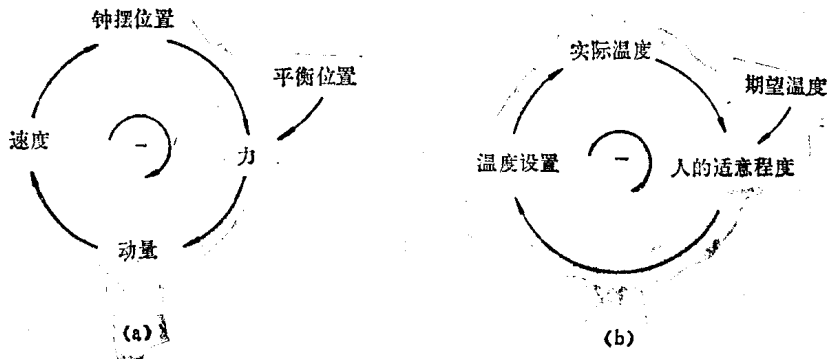


图 2.4 负反馈系统两例

地毯系统(见图2.4(b))的运动特性在某种程度上与钟摆系统相似，具有克服外来干扰力图恢复其目标状态的特性。当然它未必像钟摆那样发生振荡。经细心操作有可能避免地毯温度的不规律波动实现平滑调节。

上述两系统均属于负反馈系统（或称寻的系统）。

### 2.2.4 复杂反馈系统的特性

了解与掌握反馈系统的特性是用系统动力学分析研究系统问题的目的之一。

一般讲，对于简单的系统或者经简化的复杂系统，人们对其中问题简单、直觉的反应，对这些系统的行为与其内部结构的关系的直观分析与判断或许并不太难也不致于全然出错。

以一个简化的交通系统来说，系统由交通拥挤程度、扩建道路的压力与道路状况等变量组成，这是一个简单的负反馈回路，如图2.5所示。

对此简单系统的问题——交通拥挤的对策，人们容易作出直观的反应：增建新道路与改善道路的条件。如果说这一反应还是可取的话，那么对下面其它系统的问题的对策人们通常作出的直觉反应和判断多半是错误的。