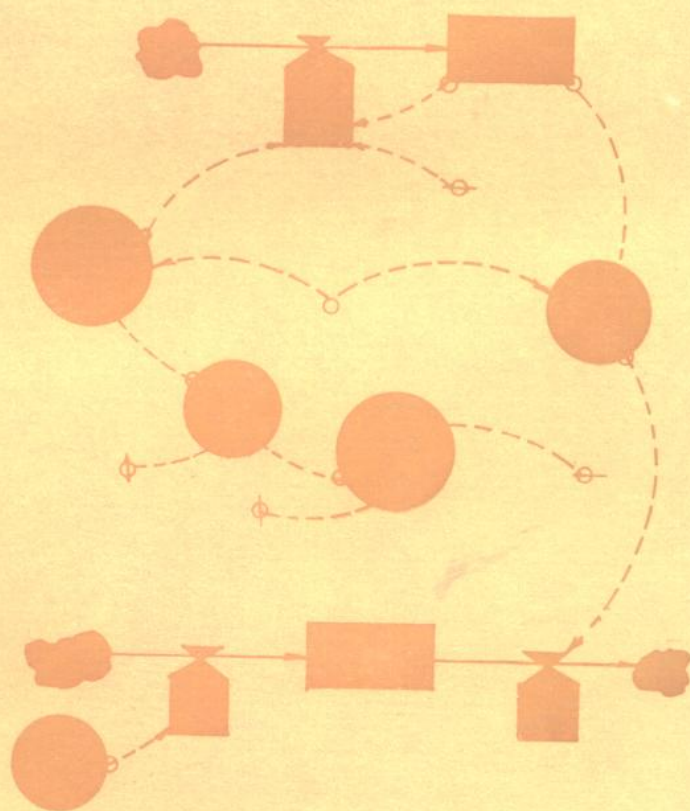


普通高等教育管理工程类规划教材

系统动力学

(修订版)

王其藩 编著



清华大学出版社

N94
W34
(2)

普通高等教育管理工程类规划教材

系统动力学

(修订版)

王其藩

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

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。修订版新增加的内容包括:混合图构模法、中国全国系统动力学模型的建立与应用、系统动力学的最新发展与展望等。

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,也可作为系统动力学和系统科学的研究人员、各类管理人员的参考书。书中附有大量模型实例和习题。图文并茂、阐述清晰,便于讲授和学习。

图书在版编目(CIP)数据

系统动力学 /修订版/王其藩著. —北京:清华大学出版社,1994

ISBN 7-302-01523-6

I. 系… II. 王… III. 系统动力学 IV. 0313

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 03945 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

责任编辑:魏荣桥

印刷者:北京昌平环球印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:19 字数:441 千字

版 次:1994 年 10 月第 2 版 1994 年 10 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-01523-6/F·98

印 数:0001—2000

定 价:11.80 元

序 言

《系统动力学》(修订版)一书是关于系统动力学(System Dynamics)的一本很好的教科书和很有价值的参考读物,可作为高等院校的教师、研究生及本科生进行“系统动力学”与“系统动力学理论与方法”课程教学的参考书,亦可作为系统动力学的理论与应用研究人员、厂家、企业、公司的高级管理人员和各级计委、经委与科委人员的参考、进修用书。可以预期该书的再版将进一步推动国内系统动力学理论与应用研究水平的提高。

系统动力学是一门分析研究信息反馈系统的学科,1956年由福瑞斯特(Jay W. Forrester)教授始创于美国麻省理工学院。

系统动力学是系统科学和管理科学的分支,是一门认识和解决系统问题交叉、综合性的学科,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,汲取控制论、控制理论与信息论的精髓,脱颖而出。系统动力学分析解决问题的方法是定性与定量分析的统一,以定性分析为先导,定量分析为支持,两者相辅相成,它从系统内部的机制、微观结构入手,剖析系统进行建模,借助计算机模拟技术,来分析研究系统内部结构与其动态行为的关系,并觅寻解决问题的对策。因此,系统动力学模型可视为实际系统的实验室,它特别适合于分析解决社会、经济、生态和生物等一类非线性复杂大系统的问题。

《系统动力学》内容充实、广泛,理论与实践紧密结合。全书约45万字共十四章,对系统动力学的理论与方法、建模原则、建模各主要步骤等方面都作了较详尽且系统的论述,并举例说明了系统动力学建模的主要过程和介绍了两个系统动力学著名的应用实例——世界模型与中国全国模型。该书还评述了系统动力学国内外发展的历史现状,并对其未来发展加以探讨。在再版时对该书作了许多新的修订和补充。

该书作者王其藩教授曾在1981—1983年间在该学科发源地美国麻省理工学院访问进修两年有余,被吸收为该校系统动力学研究中心的终身成员。回国后,王其藩教授从事系统动力学的理论与应用研究工作,致力于系统动力学国内外的学术活动,主持过国际系统动力学与全国系统动力学的学术会议,他历任国际系统动力学学会政策委员会委员、国际《系统动力学评论》杂志副主编、全国系统动力学学会筹委主任,并且是国内几个重点大学的兼职教授,发表了许多有关系统动力学的文章、论著。

本人乐于为该书作序。

中国科学院院士
上海交通大学教授 张钟俊
原中国系统工程学会副理事长
全国系统动力学学会筹委顾问

1993年8月 于上海交通大学

前 言

(第一版)

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,深入到各种领域,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。

本书共有十四章,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

1985年12月

• III •

修订版前言

本书原版脱稿于 1985 年底,然而近 8 年来系统动力学的理论与应用研究又有了许多进展。在运用数学理论对系统动力学原理、原则进行论证,系统动力学在非线性和复杂系统的非平衡、分岔、混沌等特性的研究等方面已取得丰硕成果。“系统思考”的发展日臻成熟,在建立崭新的学习型组织的运用中已开花结果。

在国内已成长了一支人数逾两千的教学、科研队伍;1987 年在上海召开了首届非欧美国举办的国际系统动力学会议;自 1986 年以来已先后召开了 4 次全国性的专业学术会议。在国内外刊物、会议上发表和出版的论文、专著、译著数以千计。许多高等院校设置了系列课程,已培养了数以百计的本科生、硕士生和博士生。

以上学术上的新发展与动向在修订版中已作了适当的反映,对一至五章、九章、十二章和十四章重新加以改写,并对某些内容作了适当删节,由原书的共 15 章改为 14 章。本书虽为专著,但为了能更好地用作高等院校的教学用书,在修订版的主要章节中增添了思考题、习题和实验。

在本书修订过程中,陈晓参加了五章、十二章部分内容的修订工作,金音参加了前四章修订的构思讨论,朱贞同学做了全部插图整理与部分誊写、打印工作,一并在内致谢。

中国科学院院士张钟俊教授为本书写序,在此表示衷心的感谢。

编著者

1993 年 8 月

目 录

序言	I
前言	II
修订版前言	V
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	3
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	6
§ 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	18
§ 2.5 系统动力学分析、研究、解决问题的方法、主要过程和步骤	25
习题与实验	27
第三章 系统动力学构模原理、方法与模型体系的演进	31
§ 3.1 构模基本原理	31
§ 3.2 动力学问题与系统动力学的规范模型	32
§ 3.3 构模的目的与系统的界限	32
§ 3.4 问题的确定与模型构思	34
§ 3.5 系统框图	37
§ 3.6 因果与相互关系回路图法	38
§ 3.7 流图法(结构图法)	41
§ 3.8 混合图	44
§ 3.9 图解分析法——速率与状态关系作图法	44
§ 3.10 模型体系的演进及其应用	46
第四章 DYNAMO 等模拟语言系列简介	48
§ 4.1 概述	48
§ 4.2 方程式的种类	49
§ 4.3 延迟、平滑和平滑函数	56
§ 4.4 函数	63
§ 4.5 输出问题	73
§ 4.6 准确度与计算间隔 DT 的选择	76
§ 4.7 高级 DYNAMO 与用于微机的 PD Plus, Vensin 等系列	78
习题	88
第五章 一阶系统	89
§ 5.1 概述	89
§ 5.2 一阶系统的数学描述	89

§ 5.3 一阶系统的重要参数	90
§ 5.4 正反馈系统	94
§ 5.5 负反馈系统	101
§ 5.6 负反馈系统的补偿特性	106
§ 5.7 S形增长的反馈结构	110
§ 5.8 一阶系统的另一有趣特性及其实例——污染的净化	119
第六章 二阶系统	123
§ 6.1 二阶系统的描述及其行为模式	123
§ 6.2 典型的二阶系统	123
§ 6.3 捕食者—被捕食者问题	125
§ 6.4 从系统动力学的角度看乘数—加速结构	127
思考题	130
第七章 简单系统的振荡	131
§ 7.1 一阶系统行为的特点	131
§ 7.2 二阶系统的振荡	133
§ 7.3 二阶衰减振荡系统	141
§ 7.4 三阶系统的振荡	144
§ 7.5 结语	146
习题与实验	147
第八章 模型与方程的建立	151
§ 8.1 什么是状态变量	151
§ 8.2 速率方程	158
§ 8.3 辅助变量方程	169
§ 8.4 建模举例	175
§ 8.5 模型的参数	189
§ 8.6 方程的初始值	192
§ 8.7 查错	195
§ 8.8 构思模型与建立模型方程的原则	199
习题	201
第九章 复杂系统	204
§ 9.1 什么是复杂系统	204
§ 9.2 复杂系统及其行为的主要特性	206
§ 9.3 系统动力学有关社会经济与管理系统的—些重要观点	208
习题与实验	211
第十章 模型的调试与改进	214
§ 10.1 探索系统结构与其功能、行为关系的奥秘	214
§ 10.2 灵敏度与强壮性	219
§ 10.3 模型方程的精炼与重构	229
思考题	236
第十一章 模型正确性、有效性、信度与检验	238
§ 11.1 有关模型的信度与正确性的一些概念	238
§ 11.2 系统动力学模型的检验	240

§ 11.3 有关模型实用性与有效性的其他重要特点	243
§ 11.4 科研项目管理模型有效性、正确性分析	244
思考题	245
第十二章 模型实例	246
§ 12.1 系统动力学世界模型与罗马俱乐部	246
§ 12.2 我国经济增长的动力和障碍 ——中国全国系统动力学模型的建立与应用	257
思考题	263
第十三章 借助模型进行系统问题的研究与实验——决策分析	264
§ 13.1 调整参数以分析比较政策与方案	264
§ 13.2 变动结构以分析比较政策方案	270
§ 13.3 政策推荐及其评价问题	277
习题与实验	281
第十四章 系统动力学的特点、最新发展与未来展望	282
§ 14.1 系统动力学的五大特点	282
§ 14.2 系统动力学理论与应用研究的进展	283
§ 14.3 系统动力学未来展望	284
§ 14.4 结语	285
附录	286
附录一 DYNAMO 输出量幂次的符号定义与注释	286
附录二 系统的增益、相位关系	286
参考文献	288

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。它是系统科学和管理科学中的一个分支,它也是一门沟通自然科学和社会科学等领域的横向学科。

系统动力学理论的基本点鲜明地表明了它的唯物的系统辩证的特征。它强调系统、整体的观点和联系、发展、运动的观点。

从系统方法论来说,系统动力学的方法是结构方法、功能方法和历史方法的统一。

系统动力学研究处理复杂系统问题的方法是定性定量结合,系统综合推理的方法。按照系统动力学的理论与方法建立的模型,借助计算机模拟可以用于定性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。它最适用于研究复杂系统的结构、功能与行为之间动态的辩证对立统一关系。

系统动力学认为,系统的行为模式与特性主要地取决于其内部的动态结构与反馈机制。

由于非线性因素的作用,高阶次复杂时变系统往往表现出反直观的、千姿百态的动力学特性,已引起人们的重视。系统动力学正是这样一门可用于分析研究社会、经济、生态和生物等一类复杂大系统问题的学科。

系统动力学模型可作为实际系统,特别是社会、经济、生态复杂大系统的“实验室”。系统动力学的建模过程就是一个学习、调查研究的过程,模型的主要功用在于向人们提供一个进行学习与政策分析的工具,并使决策群体或整个组织逐步成为一种学习型和创造型的组织。

1.1.2 国内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。50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,深入到各种领域。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60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70—80年代的壮大与成熟奠定了坚实雄厚的基础。

(2) 70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。70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,于是他们转向寄希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、本国和外国的政府部门的财政资助下,几乎倾其全组力量之半,历时11年,约耗资600万美元,完成了一个方程数达4000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,70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。

总之,系统动力学37年来经历了成长、发展和逐渐成熟的各个时期。其理论与应用研究遍及各类系统,涉及其他系统学科、各种学科与领域。在企业经营管理方面的应用自50年代始经久不衰,80年代初以来系统动力学与人工智能等新技术相结合,在进行新型管理思想研究、建立新型企业组织中发挥了重要作用。在过去的不同年代中,它还以60年代的城市动力学,70年代的世界动力学和始于70年代初,而得硕果于80年代的国家动力学与经济长波理论研究而闻名于世。80年代以来系统动力学在理论与应用研究两方面都取得了飞跃性的进展,进入了比较成熟的阶段。

(3) 学术交流、教学、科研与人才培养

迄今,国际性的系统动力学与相关的专业学术会议已召开20余次。80年代以来每年由国际系统动力学学会主持召开年会,1987年由我国学者组织了该年的年会。国际学会主办了国际《系统动力学评论》等刊物。系统动力学学术界已发表的论文、专著与译著数以千计。国际国内著名的高等院校均设置了系统动力学课程,美国麻省理工学院与我国的复旦大学设置了8门系列课程。在世界范围里已培养了不少以该学科为主要研究方向的博士、硕士研究生和本科生,他们成为推动学科发展的重要力量。

系统动力学引进我国的历史已逾十载,在理论与应用研究工作方面已取得引人瞩目的成果,为我国开放、改革十年的社会主义建设作出了贡献。这是我国数以千计的系统动力学工作者在各级领导与公众的支持下,兢兢业业共同努力奋斗的结晶。还特别值得指出的是,在过去十年中,在我国已成长了一支人数逾两千、老中青三结合、以中青年为主体,具有高中低三级的系统动力学教学科研人员队伍。

从国际37年、国内10年的学科发展史可见,系统动力学,无论是在理论还是在应用研究领域里都是一门十分有用的系统与管理学科。

§ 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、管理科学与系统科学研究人员和高级管理人员的参考读物。

本书的内容共计14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。最后一章是对系统动力学的特点、最新发展与未来展望。

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、十至十三章和第十四章。

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：脑力模型、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。

所谓脑力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。

脑力模型往往是模糊的、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。脑力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，简单直观的脑力模型就无能为力了。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。

借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。

物理模型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,亦无法用物理模型来做实验。因此,人们通常宁愿采用数学模型。和物理模型不同,在数学模型中,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。用数学模型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借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),一步步去计算模型的方程式,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型的模拟是极其繁琐,成本很贵的。

自本世纪 40 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 90 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,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。就世界模型而言,较知名的世界模型在 70 年代就出现了 7 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)的世界模型 *WORLD I* 与 *II* (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型 *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型 *FUGI* (1977 年,投入产出,最优化,系统动力学混合方法);和瓦斯利(Wassily)等的联合国世界模型(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《增长的极限》(*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 7 个月,国际应用系统分析协会(IIASA)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 6 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 等,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

诸单元的复合体”。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又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)。

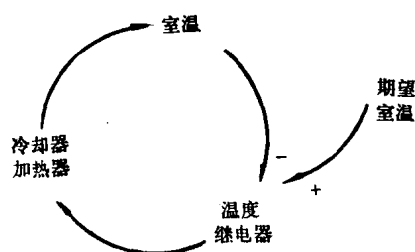


图 2.1 恒温系统

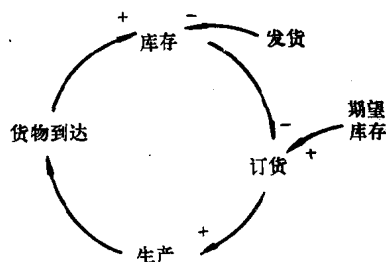


图 2.2 库存—订货控制系统

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。

(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