

普通高等教育管理科学与系统科学类教材

SYSTEM DYNAMICS

系统动力学

(2009年修订版)

王其藩 著

上海财经大学出版社

普通高等教育管理科学与系统科学类教材

系统动力学

(2009 年修订版)

王其藩 著

 上海财经大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

系统动力学(2009年修订版)/王其藩著. —上海:上海财经大学出版社, 2009. 7

普通高等教育管理科学与系统科学类教材

ISBN 978-7-5642-0437-2/F·0437

I. 系… II. 王… III. 系统动力学-高等学校-教材 IV. N941.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 028504 号

☐ 责任编辑 宋澄宇

☐ 封面设计 张克瑶

☐ 版式设计 钱宇辰

XITONG DONGLIXUE

系统动力学

(2009年修订版)

王其藩 著

上海财经大学出版社出版发行

(上海市武东路 321 号乙 邮编 200434)

网 址: <http://www.sufep.com>

电子邮箱: webmaster@sufep.com

全国新华书店经销

上海第二教育学院印刷厂印刷

上海远大印务有限公司装订

2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

787mm×960mm 1/16 19.5 印张 436 千字

印数: 0 001~2 500 定价: 34.00 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、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的交叉性、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,并寻觅解决问题的对策。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,举例说明了系统动力学建模的主要过程,并介绍了两个系统动力学著名的应用实例——世界模型和中国全国模型。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很多新的修订和补充。

该书作者王其藩教授曾于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

2 系统动力学

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)主任,并且是国内几个重点大学的兼职教授,发表了很多有关系统动力学的文章、论著。

本人乐于为此书作序。

中国科学院院士 张钟俊
上海交通大学教授
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

(2009 年修订版)

系统动力学(System Dynamics,简称 SD)50 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,涉及其他系统学科及多种学科和领域。它在企业经营管理方面的应用自 20 世纪 50 年代始经久不衰;它还以 20 世纪 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 年代的美国国家 SD 模型与经济长波理论研究而驰名于世。

2007 年恰逢学科创建 50 周年的纪念庆典,2007 SD 第 25 届年会特地安排在学科的发源地——美国波士顿召开,由 MIT Sloan 的 SD Group 组办。这是规模空前的盛会,与会者人数创新高,达到 591 人,来自 50 个国家和地区,其中学生占 28%。作为学会 2007 年的执行主席,本人和学科创始人 Forrester 教授分别先后在大会闭幕式上作了总结性发言,对 SD 在今后 50 年的发展作了展望。我们一致认为,作为一门学科,系统动力学还富有极大的潜力,能为人类文明的未来发展在许多方面继续发挥深远的影响和重要的贡献。

国际 SD 学会中国分会和中国系统工程学会 SD 专业委员会分别成立于 1990 年和 1993 年,目前后者挂靠在同济大学。SD 学科的总体发展状况已从 20 世纪 80 年代初、中期数量上的快速增长时期进入 90 年代末以来的质的提高阶段;全国现有会员 500 多人。迄今我国 SD 专业委员会已组织国际、国内学术会议十余次。我国学者在国内外刊物、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相关课程,已培养了数以百计的本科生、硕士生和博士生。在如此背景下,国内对于该学科教科书的需求日益增长,处于严重匮乏的境况。

本书此前均由清华大学出版社出版。第一版(1988)属于专著荣获 1990 年第五届全国优秀科技图书奖二等奖。前一修订版(增添了思考题、习题和实验,成为高校规划教材、教学用书)完成于 1993 年 3 月,一方面由于久未再版,存书早已告罄;另一方面,自第一版出版以来,

SD 的理论与应用研究又有了许多发展,因此修订再版十分迫切。从学术角度看修订的主要要求如下:首先,绘图建模法从 20 世纪 90 年代中期以后已逐渐普遍使用,并已完全替代了书写方程建模法,出现了各具特色的多种绘图建模的计算机专用模拟语言;其次,在理论与方法的研究方面侧重点有模型分析与简化技术、多种方法的混合建模等。

新修订版对 SD 的哲学观、基本理论与观点作了更准确的描述,对和基本理论相关的大部分章节作了仔细的修订;将原第 4 章改写为绘图建模语言的“Vensim 建模基础”,并把书中模型用 Vensim 重新构建,改写了相关章节;为便于读者深入掌握 SD 模型所隐含的变量间的数量关系,保留了原大部分模型的数量方程组。新修订版保留了原来的两个案例,世界模型用 Vensim 的流图描述;重新撰写了概论(第 1 章),增加许多史料,更清晰、全面地描述了学科发展的历史轨迹;根据最新学科前沿信息重新改写了末章(第 14 章)——学科的未来展望,较充分地阐述了学科发展前景;反复修改、校对了全书。全书重新打印、键入;在文字上亦重新加以校订,改正了原书中不易察觉的、细枝末节中的少量误差。

鉴于本书属于理论基础与方法范畴,故只能侧重此方面的修订,工作历经三年,分为两阶段;参加者有:我的博士后刘晓峰(负责重新制订和执行第二阶段的工作计划和用 Vensim 构建书中各章的模型——可从上海财经大学出版社网站 www.sufep.com 上下载,并参予部分章、节的校订和全书的编排工作)、林洁(担负第 2、3 章的键入和部分章、节的校对和格式编排);博士黄丽珍(担负第 12、13 章的键入);在学博士生李玲玲(担负第 5 章的大部分键入)、郑庆寰(担负第 5 章部分和第 6、7 章全部的键入等工作)、林莉(担负第 8、9、10、11 章的键入)、钟永光(负责制订和执行第一阶段的工作计划,担负查阅有关第 1 章的参考文献和第 1、14 章部分内容的撰写和键入);还有我从前的学生贾建国博士(撰写了 Vensim—PLE 使用说明——可从上海财经大学出版社网站 www.sufep.com 上下载),复旦大学的研究生袁晖(担负第 4 章的重新撰写和键入),学会秘书张丽琴(担负原各版本的序言、前言和参考文献键入)等。他们都努力做好所分担的任务,并参加部分校对工作。一并在此致谢。

复旦大学与同济大学教授
同济发展研究院院长
国际 SD 学会(2006 年当选)主席
王其藩
2008 年 10 月

前言

(1993 年修订版)

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应用中已开花结果。

在国内已成长了一支人数逾两千的教学、科研队伍;1987 年在上海召开了非欧美国举办的系统学力学会议;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改版中已作了适当的反映,对第 1~5 章、第 9 章、第 12 章和第 14 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,陈晓参加了第 5 章、12 章部分内容的修订工作,金音参加了第 4 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,一并在致致谢。

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

前言

(第一版)

系统动力学(System Dynamics)始创于1956年,在20世纪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(地区)中数以百计较著名的院校与科研机构讲授系统动力学的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。

2 系统动力学

本书共有 15 章,编写的主要目的是为了满足不同国内高等学院、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

目录

序言.....	1
前言(2009 年修订版)	1
前言(1993 年修订版)	1
前言(第一版).....	1
第 1 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.....	10
第 2 章 系统动力学理论的基本概念和构模主要过程与步骤	11
2.1 系统、模拟与模型	11
2.2 反馈系统.....	13
2.3 系统的结构与描述.....	19
2.4 系统动力学理论的基本观点及与其他学科的关系.....	25
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	32
习题与实验	35

2 系统动力学

第3章 系统动力学构模原理、方法和模型体系的演进	40
3.1 构模基本原理	40
3.2 动力学问题和系统动力学的规范模型	41
3.3 构模的目的和系统的界限	42
3.4 问题的确定与模型构思	44
3.5 系统框图	47
3.6 因果与相互关系回路图法	49
3.7 流图法(结构图法)	52
3.8 混合图	55
3.9 图解分析法——速率与状态关系作图法	56
3.10 模型体系的演进及其应用	57
第4章 Vensim 建模基础	59
4.1 概述	59
4.2 变量与方程	61
4.3 延迟、平滑和平滑函数	66
4.4 函数	73
4.5 输出问题	81
4.6 准确度与运行时间单位的选择	81
思考题	83
第5章 一阶系统	84
5.1 概述	84
5.2 一阶系统的数学描述	84
5.3 一阶系统的重要参数	85
思考题	90
5.4 正反馈系统	90
思考题	96

5.5 负反馈系统	97
思考题	102
5.6 负反馈系统的补偿特性	102
思考题	106
5.7 S形增长的反馈结构	106
思考题	114
5.8 一阶系统的另一有趣特性及其实例——污染的净化	114
第6章 二阶系统	118
6.1 二阶系统的描述及其行为模式	118
6.2 典型的二阶系统	119
6.3 捕食者—被捕食者问题	121
6.4 从系统动力学的角度看乘数—加速结构	123
思考题	126
第7章 简单系统的振荡	127
7.1 一阶系统行为的特点	127
7.2 二阶系统的振荡	130
7.3 二阶衰减振荡系统	137
7.4 三阶系统的振荡	139
习题与实验	141
第8章 系统动力学模型的建立	146
8.1 什么是状态变量	147
8.2 速率结构与方程	155
8.3 辅助变量结构与方程	167
8.4 建模举例	174
8.5 模型的参数	189

4 系统动力学

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	196
思考题	198
第9章 复杂系统	201
9.1 复杂系统的概念和特点	201
9.2 复杂系统及其行为的主要特性	203
9.3 系统动力学有关社会经济与管理系统的—些重要观点	206
习题与试验	209
第10章 模型的调试与改进	212
10.1 探索系统结构与其功能、行为关系的奥秘	212
10.2 灵敏度与强壮性	218
10.3 模型的精练与重构	231
思考题	239
第11章 模型正确性、有效性、信度与检验	240
11.1 有关模型的信度与正确性的一些概念	240
11.2 系统动力学模型的检验	242
11.3 有关模型实用性与有效性的其他重要特点	245
11.4 科研项目管理模型有效性、正确性分析	246
思考题	247
第12章 模型实例	248
12.1 系统动力学世界模型与罗马俱乐部	248
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	255
思考题	262

第 13 章 借助模型进行系统问题的研究与实验——决策分析	263
13.1 调整参数以分析比较政策与方案	263
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	275
思考题与实验	280
第 14 章 系统动力学的特点、最新发展与未来展望	281
14.1 系统动力学的五大特点	281
14.2 系统动力学理论与应用研究的进展	282
14.3 系统动力学未来展望	284
参考文献	292

第1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^[29]

系统动力学(system dynamics,简称SD)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的交叉性、综合性学科。它是系统科学和管理科学中的一个分支,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 with 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定性与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征,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 with 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 国际系统动力学的历史

国际系统动力学的创立与发展经过了以下几个重要阶段。

(1) 20 世纪 50~60 年代学科的诞生^[29]

系统动力学的出现始于 1956 年,创始人美国麻省理工学院(MIT) Jay W. Forrester 教授。20 世纪 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,故改称为“系统动力学”。

在 20 世纪 60 年代,一批代表性的理论与应用研究成果问世。Forrester 教授 1958 年在《哈佛商业评论》上发表了奠基之作^[1],1961 年发表的《工业动力学》(*Industrial Dynamics*^[2])——已成为本学科最权威的经典著作,它们阐明了系统动力学的基本理论、原理和典型应用。其《系统原理》(*Principles of Systems*, 1968)一书侧重介绍系统的基本结构,重点论述了在系统中产生动态行为的基本机理,系统结构和动态行为的概念和它们相互间的依存关系,书中所讨论的原理在系统的分析、决策和预测中具有普遍性和广泛的适用性。其《城市动力学》(1969)则总结了美国与西方城市兴衰问题的理论与应用研究成果。

如前所述,该学科在初期主要应用于工业企业管理领域,即便如此,其范围也是相当广泛的,涉及工业制造业,市场销售, R&D 项目管理,在管理控制、财务和金融方面的应用等^[15]。

从初期开始系统动力学就被运用于研究精密制造,电气和高档的电子器件等的工业制造业部门的管理问题;产品的用户多是工业和政府部门,被用于军用和工业设备中。涉及生产、分配、销售(包括生产商、批发商、零售商、雇员、客户;诸商各自的库存;并考虑到各环节间物质与信息传递的延迟以及商业广告的影响)整个系统的一体化管理,而且已初步提到“牛鞭效应”问题^[2,15]。

在项目管理方面,最先引人注目的是 R&D 系统动力学^[15]。当系统动力学在 MIT 诞生不久学生们就开始琢磨它在技术组织和 R&D 活动中的潜在应用;这在很大程度上是由于该学科本身和其最早的参与者都具有工程的背景。当时 80% 的斯隆管理学院研究生其本科学历背景为理工科专业,而且由于宽松的选课政策允许理工学院的学生去选修设在管理学院的系统动力学课程,所以使得有关 R&D 管理问题的研究生论文占有很高的比例。其内容涉及: R&D 项目的动力学问题;在整个有关 R&D 项目的组织中出现的现象和问题,尤其是资源在项目或部门间的分配问题;与 R&D 项目相关各方之间的相互关系。

同时,还应该指出,传统的项目管理方法一般假定项目能够按照项目开始时编制的“最优”计划进行,而忽略了返工的影响,导致对时间和成本的低估。但是由于项目均具有独特性,与之相关的各种信息是随着项目的展开不断完备的,因而在实际的项目运作中返工常常不可避免,其影响也是不可忽视的。这种影响往往是非线性的,在传统的网络图中难以表达,并且超