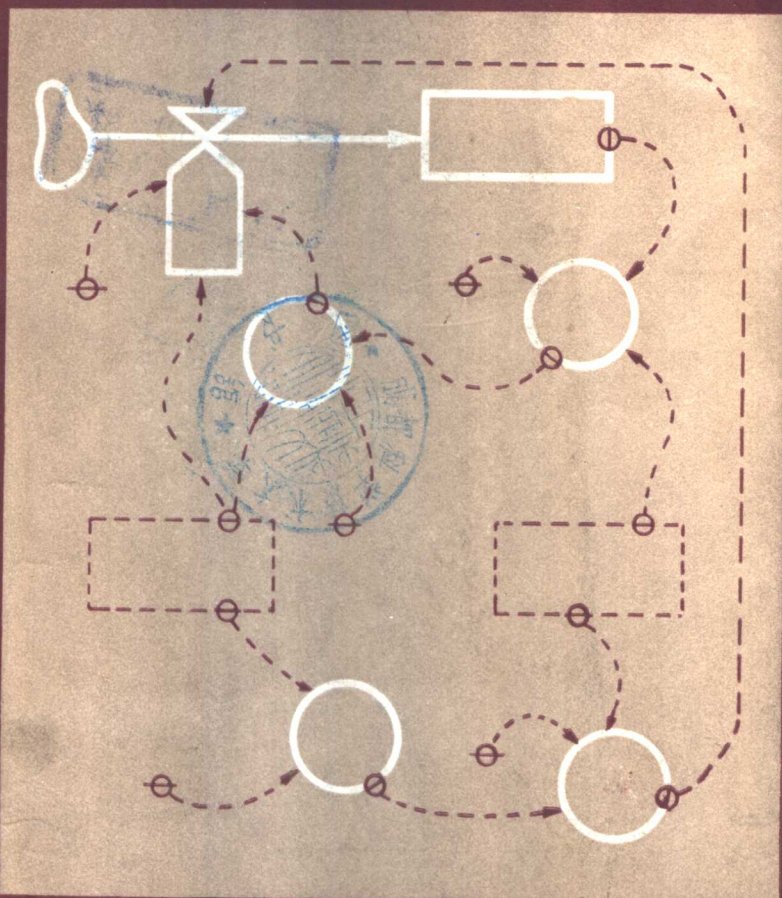


- 883262

系统动力学引论

王振江 编著



上海科学技术文献出版社

系 统 动 力 学 引 论

王 振 江 编 著

上海科学技术文献出版社

系统动力学引论

王振江 编著

上海科学技术文献出版社出版、发行

(上海市武康路2号)

新华书店经销

昆山亭林印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 9.75 字数 262,000

1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷

印数: 1—2,800

ISBN 7-30513-224-0 / Z·31

定价: 6.45元

《科技新书目》 174-248

前 言

20世纪80年代,举国上下正在为实现国民经济总产值翻两番而勤奋地工作。在这种形势下,被引进的系统动力学得到了发展,尤其是在经济发展战略研究中显示出它的内在活力。为广泛地推广与应用系统动力学,作者在科研、教学及实际应用的基础上,编写了这本《系统动力学引论》。

书中论述了系统动力学的学科体系,着重地讲述了系统动力学方法。本书阐述力求直观形象,多以图示辅佐加深效果,并列举出不同类型的例题,从而可以满足不同层次读者的多方位的要求。

本书在编写过程中 得到上海机械学院王其藩教授以及系统动力学教研室同志的热情指导与帮助 在这里表示衷心感谢。同时,上海工业大学经济管理学院的有关同志做了许多有益的工作,上海船舶设计研究院张玉珍同志也为此做了工作,并提出宝贵意见,在此,谨向他们表示感谢。

本书编写时间仓促,又限于本人水平,如有缺点错误,敬请读者批评指正。

编著者

1987. 5. 15

目 录

第一章 绪论	1
§ 1 系统动力学——一门年轻的学科	1
§ 2 研究对象与方法	3
§ 3 面向问题—解决问题	4
第二章 基本概念	7
§ 1 系统	7
§ 2 信息	9
§ 3 反馈	12
§ 4 决策	14
§ 5 黑箱	15
§ 6 模型	15
第三章 系统反馈结构	19
§ 1 结构的概念	19
§ 2 因果相互关系分析	19
§ 3 流图	25
§ 4 结构体系	34
§ 5 信息反馈决策结构	35
第四章 DYNAMO 语言简介	39
§ 1 基本规定	41
§ 2 方程语句	44
§ 3 表函数	50
§ 4 控制语句	56
§ 5 其它语句与语句体内注释	71
§ 6 DYNAMO 函数	75
第五章 程序设计	91
§ 1 量纲分析	91

§ 2	算法	95
§ 3	选择计算步长	99
§ 4	程序布局	105
§ 5	程序设计中的几个问题	108
第六章	典型模型	113
§ 1	典型反馈结构及其行为	113
§ 2	指数增长模型	116
§ 3	指数衰减模型	122
§ 4	寻的指数增长模型	126
§ 5	寻的指数衰减模型	132
§ 6	S 形增长模型	135
§ 7	寻的波动衰减模型	142
第七章	模拟技术	149
§ 1	概述	149
§ 2	模拟运行模型	159
§ 3	文件管理	183
第八章	模拟实验	188
§ 1	计算机模拟实验概述	188
§ 2	模拟实验一: 总产值模型(基本型)	190
§ 3	模拟实验二: 总产值模型(再运行型)	200
§ 4	模拟实验三: 一阶库存模型	205
§ 5	模拟实验四: 二阶库存模型	207
§ 6	模拟实验五: 海藻与贝类生态模型	210
§ 7	模拟实验六: 固定资产模型	212
§ 8	模拟实验七: 世界模型	215
§ 9	模拟实验八: 生产销售模型	217
第九章	构模	218
§ 1	系统动力学方法的特色	218
§ 2	行动模型	223
§ 3	构模原则与思路	232

§ 4 有效性检验.....	235
第十章 示范与示例	241
§ 1 因果关联图.....	241
§ 2 老鼠模型.....	244
§ 3 流行性感冒传染模型.....	248
§ 4 世界模型.....	251
§ 5 生产销售模型.....	288
参考文献	301

第一章 绪 论

系统动力学已形成了它自己的学科体系,以它独具一格的方法揭示了许多人们关注的问题,赢得了政界、企业界、学术界的高度评价。目前,在宏观经济、微观经济、社会与人口、生态与环境、科技与教育、医学、生物学及工程技术等领域都有许多系统动力学的研究成果。

§1 系统动力学——一门年轻的学科

美国麻省理工学院 J. W. 福雷斯特(Jay W. Forrester)教授在福特基金会、史隆基金会的赞助下,于1956年创立了系统动力学。下面简介他本人的主要经典著作及其研究组的主要研究成果:

1. 工业动力学(Industrial Dynamics)。这本著作是福雷斯特教授的早期研究成果,于1961年出版,现在已是系统动力学的一部重要经典著作。这本书给出了一种针对工业企业管理的独树一帜的新颖的方法——系统动力学方法,结合典型应用详细地论述了它的基本概念和基本理论,以及构造系统动力学模型的方法和技巧。

2. 系统原理(Principle of Systems),1968年出版。在书中福雷斯特教授系统地阐述了系统动力学的基本概念、基本理论和方法。正文后附有大量的思考题,并有详细的题解,是一部初学者的有益教材。

3. 城市动力学(Urban Dynamics),1969年出版。这本书是福雷斯特教授研究和总结美国城市兴衰问题的著作。

4. 世界动力学(World Dynamics),1971年出版,1973年再版。这本书是福雷斯特的一部重要著作,在两年不到的时间里被

译成 20 多种文字,标志着系统动力学这门学科已从美国扩展到全世界,还标志着福雷斯特教授进一步把研究对象扩大到世界范围。这本书提出了“世界模型Ⅱ”,初步地研究了“全球性问题”: (1) 人口问题; (2) 工业化资金问题; (3) 粮食问题; (4) 不可再生的资源问题; (5) 环境污染问题(生态平衡问题)。还阐述了系统动力学方法的“人-机”功能互补的特点。人脑功能的优势在于人的经验、思维判断,在于人们对事物有敏锐的观察力和丰富的想象力。计算机功能的优势在于它的高速运算能力和巨大存贮容量,在于对众多交互作用的动态行为的追踪能力。系统动力学方法能够有效地协调、融合人脑和计算机功能的优势。

5. 增长的极限(The Limits to Growth)。这篇研究报告是在罗马俱乐部和大众汽车公司基金会的赞助下,以福雷斯特教授的学生 D. L. 米多斯教授(Dennis L. Meadows)为指导的国际研究小组于1972年完成的。这篇报告提出了更为细致的“世界模型Ⅲ”,系统地研究了“全球性问题”,阐述了他们对未来世界发展的论点。至今已先后被译成 34 种文字,发行 600 万册,在世界各地,尤其是在西方产生了强烈反响,许多国家的学术界和国际学术界都进行了热烈讨论。事实表明,这篇报告已经成为一个里程碑,世界注意力已经在认真考虑这个报告的基本论点了。

6. 美国全国模型 SDNM(System Dynamics National Model)。这个模型是在福雷斯特教授主持下,从 1972 年起历时 11 年,耗资 600 万美元完成的。模型中含有 300 多个状态变量,近 4000 个方程。这个模型在宏观经济和微观经济之间架起了桥梁,成功地研究了通货膨胀和失业等等社会问题,第一次从理论上阐明了西方经济学界长期争论不休的经济长波(Long Wave)产生的机制,并在 1983 年 10 月的“长波、衰退与革新”的国际会议上宣读了他们的初步研究成果。由于在美国全国模型与长波理论研究方面取得的成就,使得系统动力学这门年轻的学科无论是在理论方面还是在应用方面都取得了飞跃性进展。

目前,世界上已有 100 多所较著名的院校设置系统动力学课

程,开展教学与研究的工作。我国已进入了世界行列,发展迅速。

§2 研究对象与方法

系统动力学这门学科早期的研究对象是以企业为中心的工业系统。那时,福雷斯特教授把工程系统的反馈控制理论创造性地用于工业系统,研究它的信息反馈特性,并运用模型设计和计算机模拟技术来改善企业组织形式与生产策略。遂初名叫做“工业动力学”。

当迈开了由理论走向实际应用的步子后,从前一节介绍的几个主要成果就可以看到它的研究领域远远超出了工业系统范围,所以在1972年改称为现在的名字——系统动力学(System Dynamics)。顾名思义,系统动力学是以系统为研究对象,是以唯物辩证观为指导,运用系统概念和系统思路把所研究的系统问题构造成系统动力学模型,借助于计算机模拟技术进行定量研究。系统动力学解决系统问题的思考逻辑过程如图1.1所示。

系统动力学模型模拟是一种结构—功能模拟。根据唯物辩证法的观点:外因是变化的条件,内因是变化的根据,外因通过内因而起作用,因此系统动力学模型内部的信息反馈机制规定了系统的行为模式。这种模型模拟可以分析研究信息反馈结构、功能与行为之间的动态的辩证对立统一关系。可见,系统动力学又是一种从结构机制上认识与理解动态的系统行为的科学思维方法。

系统动力学模型可以容纳决策者的思考,可以容纳他们所关心的最重要课题,可以容纳他们认为

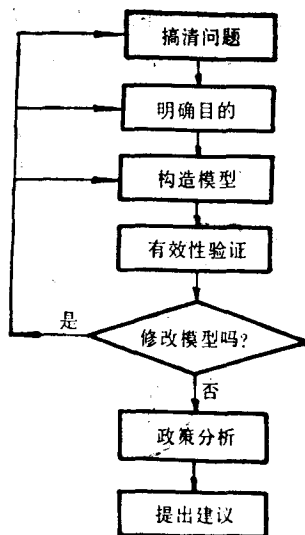


图 1.1

不可捉摸的却又是非常重要的因素。因而，系统动力学模型模拟就是一种战略与策略实验，是一种提高决策者战略眼光和领导艺术的可取方法。

系统动力学借助于 DYNAMO 语言和计算机模拟技术实现了模型、算法、程序设计与计算机模拟的一体化。因此，系统动力学方法是倍受人们欢迎的高效率的方法。

实践已证明，系统动力学对于处理高阶次、非线性、多重反馈的时变系统是得心应手的。

总之，系统动力学是系统科学的一个分支，是一门研究分析系统的应用学科，是一种认识与理解动态系统行为的科学思维方法。

§ 3 面向问题—解决问题

由于篇幅所限，不能够详尽地讲述系统动力学这门学科各个方面。本书在选材和编写上，想告诉有志从事系统动力学应用研究的读者怎样去面向系统问题，又如何去解决系统问题，做到既使读者具有一定的理论高度，又使读者掌握基本手段和方法。这种

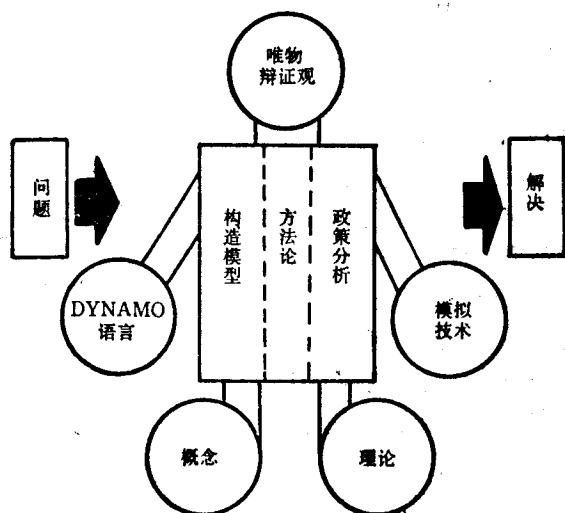


图 1.2

观点可用图 1.2 给出的拟人化的形象描述来说明:

1. 唯物辩证观和系统动力学方法论在面向问题—解决问题的整个过程中自始至终起着指导方针作用,它是灵魂,是支柱。

2. DYNAMO 语言和计算机模拟技术犹如左右手,是面向问题—解决问题的手段。

3. 概念和理论是属于系统动力学这门学科的理论部分,是指导人们行动的理论基础。

本书的结构大体上展现图 1.2 所示的框架。

第二章阐述系统动力学的基本概念:系统、信息、反馈、决策及模型等。

第三章侧重论述系统的反馈结构,又给出相应的直观描绘方法——因果关联图和流图,最后归纳出系统结构体系。

第四章较全面地介绍了 Micro—DYNAMO 语言。

第五章讲述程序设计中的几个问题。如量纲分析,选择计算步长,合理的程序布局等。在这一章里,还附带讲述了求解系统动力学模型所采用的算法——欧拉方法。

第六章陈述了 6 种典型反馈结构,它们是研究系统问题构造系统动力学模型时,最常见的、最基本的反馈结构。同时,还详细地阐述了它们所产生的系统行为模式。

第七章侧重于讲述 IBM—PC 微机系列上的 Micro—DYNAMO 软件系统及其模拟技术。这一章是为读者掌握系统动力学的计算机模拟技术而编排的。

在第八章中,为了加深读者对所学的基本理论的理解,掌握计算机模拟技术,介绍了 8 个模拟实验,每个实验各有特点。

第九章论述了构模问题。由于构模本身具有浓厚的技艺性,故在这一章里,既强调一般原则与思路作为行动指导;又强调亲身去参加构模实践,从中增长才智。

第十章是本书最后一章,向读者提供一些构模时依据性参考,其中有因果关联图、流图与程序。由于世界模型是一个经典模型,对它作了详细说明。

如果读者仅是想一般地了解系统动力学,可学习前四章,再参阅第十章。

对于大学的学生作为一门课程学习系统动力学,要讲授第一章~第九章的内容。教学时数可安排 30~50 学时(上机 2 个小时合 1 个学时)。如果有较好的上机条件,第八章模拟实验的内容,可在教学过程中穿插进行,这样做教学效果可能会好些。

假如读者想采用系统动力学方法实际问题,除了一般地学习之外,还要细读第六章、第九章与第十章,将会对你的工作大有帮助。

第二章 基本概念

世界科学发展出现了一个引人注目的新趋势：一方面专业和学科分工越来越细致、越深入、越新越多；另一方面学科的各个专业和学科之间又越来越相互渗透、相互融合而日益一体化。在这种科技形势下，系统动力学势必同系统论、信息论、控制论、计算机科学、数值计算、决策科学等学科发生相互渗透，相互融合。也就是说，系统动力学是一门认识和解决系统问题的交叉、综合性的新兴学科。这一新兴学科提出了新的概念，创造了新的方法。这一章仅阐述系统动力学的基本概念。

§1 系 统

“系统”这个词对人们来说并不陌生。我们经常会听到和看到各种各样的系统：自然界的海洋系统、生态系统、矿藏分布系统；社会中的生产系统、财贸系统、文教系统；人体内部的消化系统、呼吸系统、血液循环系统等等，它们都是客观存在的实体系统。还可看到密码系统、语言系统、软件系统等等则是概念系统。

作为系统动力学研究对象的“系统”，是现实世界形形色色的系统的抽象。系统被赋予确定的学术含义则是本世纪40年代以后的事情，因此关于系统一词的学术含义，有着各种稍有差别的提法。下面引用我国学者钱学森教授的提法：系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体，而这个系统本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分。我们把若干组成部分结合成的整体，称作为系统内部。这个整体以外的部分泛称为该系统的环境。在系统内部与其环境之间可以勾画出该系统的边界。图2.1和图2.2分别给出两个系统构成的直观描述。图2.1中， E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 表示系统的各个组成部分， E_1 与

E_1 、 E_2 与 E_3 、 E_2 与 E_4 、 E_3 与 E_4 之间的连线表示组成部分之间存在着相互关系。图 2.2 中描述了上述系统作为它所从属的更大系统的一个组成部分。

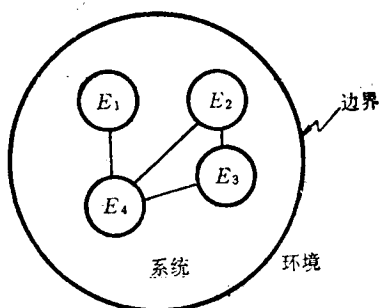


图 2.1

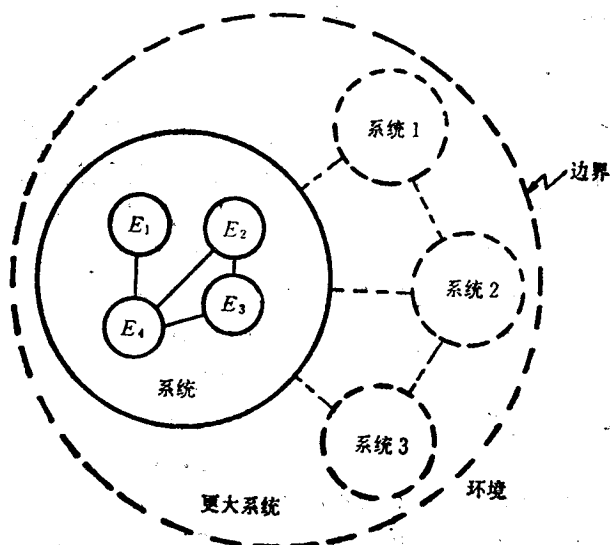


图 2.2

人们抽去了实际存在的实体系统或概念系统的具体的属性，考察和肯定了它们共同的系统方面的特征和性质。系统的这些共同性质已经为无数观察和实践经验所证实。下面是系统的基本性

质:

1. 结构性:任何系统都具有特定的结构。结构是系统的诸组成部分在时空连续区上特定的相对稳定的排列组合方式、相互作用形式和相互联系规则,它们组成为系统的特定秩序。这种结构性是系统整体性和功能性的基础。

2. 相关性:任何系统的特定组成部分的变化,必然要依一定方式引起该系统中其它组成部分的相关变化。

3. 功能性:任何系统都由特定功能支持其存在。系统必然具有与环境相互作用的整体功能,也具有构成整体功能的部分功能。功能是系统存在的直接原因。在某种程度和意义上,功能体现了系统的“目的性”、“合目的性”和“环境适应性”。

4. 整体性:任何系统都是作为一个相对独立的整体存在于特定的环境之中。系统作为一个整体的功能有别于各个组成部分的功能,整体功能大于分部功能的叠加。

5. 层次性:任何系统都具有多层次的结构。层次划分的目的,是便于人们正确认识系统和研究系统。

6. 绝对运动性:在相互作用的系统之网中,任何有限系统都不可避免地处于运动与变化之中。任何一个系统在一定的微观层次或足够大的时间尺度上都是动态系统。

7. 变异性:任何系统在绝对运动的长流中,由于系统存在环境之中,总是要同环境有着物质、能量、信息交换,这种交换势必导致和促进系统的结构和功能的变化。

§ 2 信 息

一、系统的硬件要素与软件要素

我们辨认一个系统,是通过辨认它所传给我们的信息来达到的。信息和特定的物质与能量有密切关系,因此物质、能量和信息实在是构成一切系统的原始要素。从某种角度把系统的原始要素分为硬件要素——物质和能量;软件要素——信息。

物质可能是有生命的或无生命的,可以是固体、液体或气体。

物质的共同属性之一是具有一定质量（物理学意义上的质量），并占据一定空间。

能量是物体作功的能力。所谓作功，就是使物体产生运动，或改变物体的运动状态，或改变物体的形式。能量是物质运动的一般度量。自然界的一切运动过程都遵守能量守恒和转换定律。

物质和能量象砖石和混凝土构成各种各样的建筑物一样，构成了自然和人工的各种系统的硬件要素。

二、信息的基本特征

软件要素——信息——的含义是什么呢？

严格的信息定义目前尚没有统一的说法，比较通用的是：信息是现象与知识的中介，是事物运动状态或存在方式的直接或间接表述。更通俗的说法是：信息是指具有新内容、新知识的消息，如书信、情报、指令等。

我们暂且不去推敲信息的含义，从实践与经验来认识和理解信息的基本特征。这些特征是：

1. 信息来源于物质，来源于物质的运动。没有事物的运动，就没有信息。

2. 但是，信息又不同于物质本身。信息可以脱离产生它的物质而被传递和变换。

3. 传递信息需要能量，控制能量需要信息，信息和能量难解难分。但是，信息又在本质上不同于能量。

4. 信息具有知识的秉性，得到信息就意味着得到了某种知识，更确切地说是得到了某种粗知识，或元知识，或知识的毛坯。

5. 信息并不神秘，也不虚无缥缈。信息可以作用于人类和生物，可以被人类和生物的感官或人造机器所感知、取得、处理和利用。

现举库存系统（图2.3）作些说明。产品存入仓库再发往用户。产品入库和出库，保管员要在台帐上做好登录。台帐的数据就是信息。如产品的名称、数量这些信息是源于产品而又脱离产品而被记录、处理、利用和传递。保管员编制的库存报表，报表上的数据