

系统动态学

○ 李一智 编著
○ 林義和

中南工业大学出版社

系统动态学

林羲和
李一智 编著

中南工业大学出版社

系 统 动 态 学

李一智 林曦和 编著

责任编辑 熊 超

中南工业大学出版社出版发行

长沙潇湘印刷厂印刷

湖南省新华书店经销

1192 1/32 印张:5.625 字数:150千字

1987年1月第一版 1987年1月第一次印刷

印数: 0001—1000

ISBN 7-81020-002-X/N·001

统一书号: 17442·011 定 价: 1.10元

前 言

系统动态学 (System Dynamics)，我国有人译名为系统动力学，本书取名为国家教委管理工程类专业教材委员会所确定的学科名，本书的内容亦基本按此委员会会议初定的教学基本要求进行编写。本书可作为管理工程类专业研究生和本科生使用的教材，更可作为从事经济管理、社会系统等领域系统分析、系统决策和高层管理者的参考书。

由于 Micro-DYNAMO 软件我们使用时间不长、经验不多，未能更多地列举实例。但是，我们的实践表明，关键还在于掌握好它的基本原理、概念、方法和软件的上机操作，这是本书力图阐明的，并附录有实验指南。若要针对你面临的系统，设计好动态仿真模型，则必须首先深入掌握该系统本身的业务内容，对此，系统动态学本身不大可能提供帮助，而要依赖与该系统相关的广博的知识和经验。

本书收入的某地区国民经济模型等实例，虽然在技术鉴定时获得好评，但仍只能作为一种案例。

本书绪言、第一、二、三、四章由李一智编写，第五、七、八、九章由林羲和编写，第六、十章由两人合写。最后由李一智总编。实验指南等附录由研究生曾菊芳协助编写。由于时间仓促、编者水平有限，错误不当之处难免，敬请读者指正。

为了读者更好掌握本学科内容，我们备有Micro-DYNAMO软盘一片，5 $\frac{1}{4}$ "双面双密，其中配合本书实验指南，录有有关实验的文件。此软件适用于 IBM-PC/XT 微型机， $\geq 128\text{KB}$ RAM。需要者可与出版社联系。

编者 1986年6月

目 录

绪 言	(1)
第一章 导 论	(4)
§ 1—1 系统管理概念	(4)
§ 1—2 系统动态学的产生和发展	(5)
§ 1—3 系统动态学的特点	(8)
§ 1—4 系统动态学模型概述	(11)
第二章 系统的因果链和反馈回路	(13)
§ 2—1 系统的因果关系	(18)
§ 2—2 系统的反馈回路	(19)
§ 2—3 正反馈回路	(20)
§ 2—4 负反馈回路	(22)
§ 2—5 系统因果反馈回路举例分析	(24)
第三章 系统动态学流图	(26)
§ 3—1 系统动态学流图的概念	(26)
§ 3—2 流位变量与流率变量	(29)
第四章 系统的典型结构及其行为	(35)
§ 4—1 正反馈系统	(35)
§ 4—2 负反馈系统	(38)
§ 4—3 系统中的延迟现象	(51)
第五章 DYNAMO 软件	(58)
§ 5—1 DYNAMO 语言	(58)
§ 5—2 DYNAMO 语言的基本规则	(59)
§ 5—3 数学运算	(63)
§ 5—4 计算顺序和时标	(65)

§ 5—5	Micro DYNAMO 软件	(69)
第六章	系统动态学方程	(70)
§ 6—1	流位变量方程	(70)
§ 6—2	流率变量方程	(72)
§ 6—3	辅助变量方程	(73)
§ 6—4	增补变量方程	(75)
§ 6—5	初值变量方程	(77)
§ 6—6	常数方程	(78)
§ 6—7	表方程	(79)
§ 6—8	列车变量方程	(79)
第七章	Micro DYNAMO 中的函数	(83)
§ 7—1	常用数学函数	(83)
§ 7—2	表函数	(87)
§ 7—3	逻辑函数	(90)
§ 7—4	随机函数	(93)
§ 7—5	测试函数	(94)
§ 7—6	延迟函数	(97)
第八章	系统动态模拟模型的输出与运行	(105)
§ 8—1	Micro DYNAMO 的命令语句	(105)
§ 8—2	系统动态模型的建立和上机调试	(113)
§ 8—3	模型的修正与再运行	(117)
第九章	系统动态学在企业管理中的应用	(119)
§ 9—1	企业系统仿真	(119)
§ 9—2	零售部门的子模型	(120)
§ 9—3	批发部门的子模型	(130)
§ 9—4	工厂部门的子模型	(130)
§ 9—5	模型的完成与运行	(136)
第十章	社会经济系统动态仿真案例	(137)

§ 10—1 地区国民经济模型与分析·····	(137)
§ 10—2 设备更新问题示例·····	(148)
参考文献·····	(154)
附录 I 实验指南·····	(155)
附录 II 错误信息表·····	(171)

绪 言

系统动态学 (System Dynamics) 是面向各类经济系统和社会系统的复杂性并以系统结构、自动控制和信息传递等知识为基础, 由美国麻省理工学院 (MIT) Sloan 管理学院教授 Jay W. Forrester 所开发的一项系统管理的新概念和方法。

传统的管理是一种藉助于历史经验来处理经济、社会系统的过程; 藉助于对所遇环境的观察、对人际间和集团间信息的侦察、以及对彼此行动的相互影响的分析, 来建立各自特有的管理概念、策略和行为。传统管理的有效性在较大程度上取决于经理人员的素质。在过去的年代里, 由于处理的系统对象并不十分复杂和社会化, 也由于科学技术的不足, 对所遇到的大量因素无法通过数量化来进行系统分析, 因而传统管理显示出很大的优点。随着经济、社会系统的日益复杂以及科技水平的日益提高, 传统管理的优点也必然日益逊色。现时, 传统管理的缺陷可以概括为: 第一、缺乏一些普遍原则, 用以搜集、鉴别和选取对我们有效的信息, 因而往往在面临着爆炸性的信息面前无所适从; 第二、缺乏对信息进行有效组构和处理的方法, 用以构成能表达真实系统行为的模型; 第三、不同的人运用相同的信息, 往往产生不同的甚至相反的结论。

自泰勒的科学管理发展到以运筹学为主的管理科学以来, 传统管理的上述缺陷不断得以消除; 在西方, 行为科学和系统论在管理领域中的流行, 都是旨在消除传统管理的缺陷和丰富管理科学。

半个多世纪以来, 管理科学虽然已有相当发展, 但仍不足

以用来解决大型系统或高层管理的决策问题。以运筹学为主的管理科学虽然为管理学提供了科学基础，经济计量学也为经济系统分析提供了科学依据，但是它们都不足以为一般管理人员广泛接受；而且，运筹学和经济计量学的分析方法，往往变为严谨的数学逻辑的追求、数据统计检验的要求，而忽略了问题的本质——解决面临系统的现实问题以获得满意的决策。因而所谓最优解也就往往成为一种数学上的理想解，对现实问题失去实际意义。

所以，近来，人们普遍认为，管理科学必须面对现实，系统地搜集和分析资料、数据，既要尽可能地进行数量分析，更要接纳许多不可量化的因素（Intangible factors），不拘泥于“最优解”的追求，而应追求对现状有所改善的满意解。这些就是今天系统管理的观念。

系统观念的重要性已逐渐被确认。一个企业是一个系统，要达到企业的目标，不应该只是个别地去考察企业的生产、储备、供销、财务、人事等部门，而应该着重考察各个部门之间的相互关系、企业与其周围环境之间的关系，使企业内部、企业内外都能协调运行，以达到企业系统的整体目标。

以系统观念为基础、吸收自动控制理论和信息论的原理，开发的系统动态学，是目前管理科学的新分支，也是系统工程的新成就。系统动态学在系统分析方面具有如下优点：

（1）它能对系统内部、系统内外的因素的相互关系予以明确的认识和体现；

（2）它能对系统内所隐含的反馈回路予以明确的认识和体现；

（3）它能对系统进行动态发展及其趋势的考察；

（4）它能对系统设定各种控制因素，以观测当输入的控制因素变化时系统的行为和发展。这一优点对于高层决策者来

说，尤为重要，因为决策者不再凭直观或估量来审视控制因素变化而引起的系统变化；

(5) 它能对系统进行动态仿真实验，以考察系统以不同的组织状态、不同的技术——经济参数或不同的政策因素输入时所表现的行为和趋势。因此，系统动态学被誉称为“管理系统实验室”或“社会经济系统实验室”。

第一章

导 论

§ 1—1 系统管理概念

正如科学与其它领域中的每一个新的观念一样，系统的概念的形成，也经历了一段漫长的历史。今天，我们认识到，系统 (Systems) 是由相互联系、相互作用的若干要素按照一定的组织、秩序结合起来，且与外界环境发生关联的，具有特定整体功能的有机整体，它本身又是它所从属的更大系统的子系统或要素；对于我们研究的可控系统而言，系统还具有特定的目的 (目标)。可见，任何一个企业，都可当作一个系统；一个地区的社会、经济形态也可作为一个系统。

按照钱学森教授所言，“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的方法。”^[1] 系统工程作为组织管理的技术，表明管理科学的最新发展。系统愈复杂，愈要运用系统工程的方法去管理，系统工程方法将愈能显示其优越性。

赵紫阳总理在视察陕西省农业和水利时指出：“现在的问题是要用系统工程的方法，全面统筹，综合论证……。”

中共中央关于制定国民经济和社会发展第七个五年计划的建议指出：“以城市为重点的全面经济体制改革是一项艰巨而复杂的系统工程。”

这些指示表明，工程工程的实践将日益广泛，将更加被人们重视。所谓系统管理就是运用系统工程的思想，观点和方法

的决策过程,它包含决策系统的设计、决策系统的分析以及所研究系统的趋势分析和应采取的策略。按系统的观点,任何企业系统总可以看成是由人、物资、设备、财、任务和信息这六大要素所组成,形成物资流和信息流这样两股流,共同受经济规律和技术规律(条件)所制约。物流伴随有信息流,而后者控制前者。因此,任何管理上的决策都是来自信息反馈系统。企业或其它系统的功能子系统群,总是借助于信息子系统的作用,才能实现彼此之间的联系和运动,而显示系统的总体功能。可见,信息反馈系统是系统管理的特征;信息反馈失灵,就会导致管理混乱。

§ 1—2 系统动态学的产生和发展

随着系统工程的发展,在企业与其它经济或社会系统中提出了许多行之有效的系统分析方法。比如:费用—效果分析方法、运筹学的各种分析方法、经济计量学的分析方法(以各种经济函数和生产函数为主)、投入产出分析方法、解释性结构模型法(ISM)和层次分析法(AHP)等等。所有这些系统分析方法,有的是一种静态分析,有的太拘于数学上的严谨,有的只能适应于某些局部的应用。因此,任何一个分析方法总难以解决企业或其它系统所面临的系统管理问题,特别是高层管理的决策和控制。

任何一个学科分支的产生总离不开现实生活和生产的实践。系统动态学也是顺应现代企业系统和社会经济系统的实践而产生的。现代企业系统的特征可以表述为:

1. 现代企业系统的行为是动态的。不仅企业系统外部环境具有时变性,而且企业系统内部也总是处于动态平衡状态。
2. 现代企业系统的目标是多目标的。有体现企业全部经

济活动效果的经营目标，有满足社会需要的贡献目标，有体现企业经济利益的利润目标，有表征企业发展的战略目标，等等。

3. 现代企业系统所能有的资源是有限的。如何在有限的资源条件下尽可能发挥最大的效益，如何及时掌握信息这一软资源以协调、调整企业的生产经营活动，这些都是现代企业面临的问题。

4. 现代企业系统总是会经常面临着各式各样的政策因素。有其上层管理部门下达的，有当地政府和有关部门规定的，也有企业内部制订的政策因素。如何掌握、介入和协调有关的政策因素，使其与技术经济因素共同处于系统运动之中，是一个亟待研究解决的问题；因而派生出一个政策因素如何数量化的问题。

5. 现代企业系统总是开放性的。开放性体现在企业系统同外部环境有着相互联系和相互作用，也表现为企业系统总是朝着有序化发展、处于动态平衡之中。

上述各项特征导致企业系统管理的困难，因此必须开发一项新的系统管理的概念和方法。系统动力学就是在这种背景下产生的。系统动力学是运用系统结构决定系统功能的原理，将系统构成为结构、功能的因果关系图式模型（块），利用反馈、调节和控制原理进一步设计反映系统行为的反馈回路，再应用经济、技术原理和现代科技成果，最终建立系统的动态仿真模型，使用电子计算机对此模型进行模拟实验。这种系统动态仿真模型的模拟，应用在企业系统分析上的优点是：

（1）能够模拟企业系统发展的历史状况和今后的发展趋势；

（2）能够考察技术—经济参数的变化对系统行为的影响；

（3）能够考察政策因素的介入或变化对系统行为的影响。

响；

(4) 能够适应决策的目的设计仿真模型及其模拟方案，以辅助决策。

系统动态学的发展至今还只20多年的历史。最初是由美国麻省理工学院工业管理系的 Jay W. Forrester 教授于1956年在福特基金会 (Ford Foundation) 与斯隆基金会 (Alfred P. Sloan Foundation) 的赞助下开发的新技术。1961年他出版了《工业动态学》(Industrial Dynamics) 一书，算是该学科的第一本专著。以后，Forrester 教授为首的MIT系统动态学研究室广泛地开展了应用研究。1970年Forrester教授在罗马俱乐部会议上提出了用系统动态学研究的世界模型的初型，会后编出了“世界模型”第一稿，该模型包含人口、资本（工业和第三产业的）、农业、资源（含能源）和污染等五个子模块。该模型预报了世界资源的枯竭；1972年他的助手Meadows出版了《增长的极限》一书，引起了西方世界的关切。

整个70年代，这一新技术引起了世界许多国家的注意，并加以引进和应用。应用的领域已经涉及到企业系统管理，环境保护领域，城市发展与规划方面，国家和地方经济社会系统的发展规划方面，宏观经济控制方面以及各种技术项目的开发方面，等等。

我国是80年以后开始引进这一技术的。短短几年来，它的应用正在广泛渗透到各个领域。上海交大研究了“2000年的中国”模型和新疆经济、社会发展模型；除了黑龙江海伦经济发展规划应用了系统动态学模型以外，湖南株洲市和江西宜春市的经济发展规划分别由湖南省社科院和中南工业大学设计了各自的国民经济模型等。此外，一定还有许多未予披露的应用情况。我们相信，这一新技术在我国的应用必将结出丰硕的果实。

§ 1—3 系统动态学的特点

系统动态学的开发是莫基于下述学科与概念：

1. 系统分析的概念。面临一个要研究的系统，按照系统分析，首先要阐明所要研究系统的问题，接着要明确目标，再进行系统结构和功能的分析，开发系统概念，即是确定系统内部诸要素以及外生变量之间相关关系和相互作用性质的概念，通过相关因素分析建立系统结构和功能模型框架。系统动态学模型的建立同样要运用上述系统分析的部份步骤。

2. 信息反馈控制理论。控制论的信息反馈观点、自动调节原理以及反馈控制概念等都是系统动态学得以发展的基础理论，还应用到信息反馈过程中的信息传递的时间延迟 (delay) 和噪声干扰 (Noise) 等作用的原理。

3. 决策论。决策是根据某些政策的或事理的原则针对系统实际情况而作出的产生行动的决定。在做成决策的过程中，必须应用决策论的一些原理和方法，它们也是开发和应用系统动态学的基础知识。决策论也是我们对系统进行分析评价的理论基础。

4. 数字电子计算机模拟技术。计算机模拟技术的一些基本概念，如模拟模型的建立，该数学模型中的变量、参数和常数的处理，模拟总时间、模拟时间间隔（步长），模拟计算结果的存储和输出等等，同样是系统动态学所应用的基础知识。

系统动态学的研究方法大体可以表述为下列步骤：

(1) 阐明问题。针对要研究的系统问题，说明该问题提出的背景、它所涉及的系统范围、解决问题的途径以及必须掌握的基本资料和数据。

(2) 明确目标。根据系统问题的性质，拟订体现问题得以解决的目标，该目标一般是一个或一套指标体系。

(3) 建立系统结构和功能模型框架，绘出表达这一模型的因果关系、反馈回路的系统流图。这是系统动态学研究的核心步骤。一般，总是根据摆明的问题和确定的目标，将相关的系统要素从纵向和横向联系起来，建立一个足以解决问题的、并能表达系统诸因素之间的相互作用和信息反馈关系的模型(图)；还要考察一下这个模型应能反映系统的行为特点，比如时间的延迟，干扰作用。

(4) 建立数学模型——系统动态学方程。根据系统动态学流图，逐个环节用数学方程表示因素之间的数量关系，形成一套系统动态学方程。

(5) 模拟。将系统动态学方程及其所需的参数值送入计算机进行模拟计算，以此模仿系统的行为，求得模拟结果。

(6) 解释和分析模拟结果。解释模拟结果，并加以对比分析，看它是否符合系统的经济或技术原则，能否正确反映系统的行为，结果数据在经济和技术上是否可信和有规律，最终是否能解决所研究的系统问题。

(7) 修正再模拟。当模拟结果表明还不能使我们满意时，再根据结果检查、分析所发现的问题，反馈到上述各有关步骤，逐步修正、调整模型及其参数，再进行模拟，达到满意为止。

由上大体可以看到，系统动态学模型具有自身的特点：

第一，模型的结构取决于所要研究系统的系统结构，因而它是由若干模块组合起来，同时又可体现结构上的层次性。

第二，模型具有较大灵活性，必要时可以增删某些模块和因素。

第三，所组合的模块共同形成一个系统模型整体，因而模

型中某一相关变量或参数值改变时，会引起其它因素发生变化。

第四，它可以研究微观经济，更可研究宏观经济，取决于模型的制定；它既可用于研究系统变化过程和发展趋势，又可用于分析政策因素的作用。

系统动态学在美国发展过程中，已形成一个学派，同经济计量学学派在学术上展开了论争。根据我们初步工作的体会，在我国应该吸取各家之所长来弥补其所短。我们认为，当研究较大的国民经济系统时，应当将两者结合起来，尽量采用经济计量学的原理、数模来充实系统动态学方程。为了今后更好地将两个学科结合起来、而不是相互排斥，以解决我国的现实问题，现将两者的特点比较于表 1--1。

表 1--1 系统动态学与经济计量学比较

比较项目	系 统 动 态 学	经 济 计 量 学
研究对象	社会、经济系统；工程建设 项目分析	社会、经济系统
研究方法	系统的动态仿真	系统的统计、回归和预测
模型特征	强调系统要素的因果关系、 反馈回路	强调系统参数的历史数据、 拟合外推
输出结果	系统参数演变过程的全套数据	所确定的预测数据
功 能	主要适用于中、长期规划， 对系统进行趋势分析	主要适用于近、中期预测， 数据精确性较好