

系统思考和 系统动力学的 理论与实践

——科学决策的
思想、方法和工具

HITONG SIKAO HE HITONG DONGLIHUE DE LILUN YU SHIJIAN
KEXUE JUECE DE SIXIANG FANGFA HE GONGJU

张波 袁永根 编著

中国环境科学出版社

系统思考和系统动力学的理论与实践

——科学决策的思想、方法和工具

张 波 袁永根 编著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

系统思考和系统动力学的理论与实践: 科学决策的思想、方法和工具/张波, 袁永根编著. —北京: 中国环境科学出版社, 2010.8

ISBN 978-7-5111-0288-1

I. ①系… II. ①张… ②袁… III. ①系统思考
②系统动力学 IV. ①N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 092882 号

策划编辑 徐于红
责任编辑 俞光旭
责任校对 尹芳
封面设计 玄石至上

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2010 年 8 月第 1 版
印 次 2010 年 8 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 19.75
字 数 450 千字
定 价 80.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

自从 1956 年美国麻省理工学院 (MIT) 教授福瑞斯特 (Jay W. Forrester) 创建系统动力学以来, 它在改进人类思维方式, 帮助人们理解复杂系统, 以及如何进行科学决策方面取得了惊人的进展和成绩, 使得人们能够在动态复杂性日益增加的世界中, 进行有效的学习和正确的决策。系统动力学领域最为卓著的成果是 20 世纪 70 年代初由罗马俱乐部提供财政支持, 福瑞斯特教授的学生梅多斯 (Dennis Meadows) 教授为首的国际研究小组开发的 WORLD III 模型以及以此为基础出版的《增长的极限》一书。该研究表明: 全球经济不可能无限制增长, 会受到人口增长、资源和能源短缺、生态系统破坏以及环境污染等因素的制约; 人类要想实现可持续发展, 必须建立和谐发展的模式, 人与人之间要和谐, 人与大自然之间也要和谐。这一观点已经被愈来愈多的国家和人们所接受。福瑞斯特的学生彼得·圣吉 (Peter M. Senge) 在系统动力学基础上创建了系统思考、五项修炼和学习型组织, 也在世界范围内产生了巨大影响。另外, 系统动力学在国家、地区、城市、行业和企业等规模的决策应用, 在经济、社会、环境和机械领域的研究也有相当丰富的成果, 以至于每年一次的国际系统动力学年会都有数以百计的论文发表。最近十几年, 系统动力学的理念已经开始向中、小学教学领域推广, 目的就是为了提高学生的思维模式、学习能力和创新能力, 为 21 世纪培养具有系统思考能力的人才。

近几年, 科学决策在我国受到愈来愈多的重视。科学决策必须要建立在以下四个基础之上: ①要对决策的问题有清晰的认识; ②要用正确的思维方式分析问题, 并用科学的方法和有效的工具制订解决问题的方案; ③要有真实的数据和信息作依据; ④要有能快速检验决策方案正确性的工具。系统思考能够提供正确的思维方法, 系统动力学及其模型既是制订正确解决方案的有效方法, 也是快速检验决策方案效果的工具。

系统思考要求人们立足于以下三个方面观察和理解问题: ①整体地看问题; ②动态地看问题, 即用运动的观点看问题; ③具有对复杂问题的分析能力。而用定性的因果环图表达和分析问题, 为系统动力学建模打下基础。用系统动力学方法建立定量模型, 通过模拟计算实现对系统结构产生的系统行为的正确理解, 通过模拟试验找出科学解决问题的正确方案, 正是系统思考的正确方法。

人对复杂系统的处理能力包括分析能力、综合能力和解决问题的能力:

(1) 人具有对复杂系统的分析能力, 能正确把握系统包含的要素及其之间的相互关系, 建立系统的结构模型, 如因果环图和栈/流图。但是, 由于人脑受到各种条件的限制, 因此人很难综合得出复杂关系的最终演变结果, 在感受事物动态行为的综合能力方面较弱。

(2) 计算机具有综合和快速计算的能力, 通过对人所建模型的综合运算, 计算出系统的动态变化行为, 较好地弥补了人脑的短处。

(3) 人脑与电脑的结合能够建立解决复杂系统的计算机模型，通过综合计算和决策试验，快速选择出正确的决策方案。

因此，在世纪交替之际，人类在应对所面临的社会、发展、生态环境的各种问题和挑战时，采用系统思考的方式对决策问题建立系统动力学模型是很好的科学决策方法。本书阐述了系统思考和系统动力学的基本概念和理论，建模过程的技术要点和系统动力学软件 STELLA 的使用教程，精选了涉及经济、社会、环境保护和企事业单位重大决策等领域的若干案例，其中很多案例是作者多年研究和实践的成果，它们对组织和个人进行科学决策具有较大的启发与帮助。本书的 STELLA 软件使用教程能够引导学习者一步步经历建模和模拟工作的全过程，不仅能把握问题的原委和掌握使用系统动力学软件的技巧，更能使学习者学习建模的相关技能，从而正确、快速地建立解决复杂问题的系统动力学模型。

当然，由于作者的水平和能力所限，书中难免出现遗漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2010年7月2日

目 录

第一篇 系统思考

第1章 系 统.....	3
1.1 系统的组成.....	3
1.2 系统的若干概念.....	3
1.3 研究问题的方法.....	4
第2章 系统思考.....	5
2.1 系统思考的发展历程.....	5
2.2 系统思考的应用范围.....	5
2.3 五项修炼与学习型组织简介.....	6
2.4 学习系统思考的现实意义.....	8
2.5 系统思考与传统思考的区别.....	9
2.6 系统思考对象的复杂性.....	12
2.7 系统思考的基本模式.....	15
2.8 系统思考的学习实验室.....	27
2.9 系统动力学与系统思考的关系.....	30

第二篇 系统动力学及其模型构建技术

第3章 表述系统结构的基本构造块.....	35
3.1 栈.....	35
3.2 流.....	38
3.3 转换器.....	40
3.4 连接器.....	43
3.5 图形函数.....	43

3.6 用转换器替代栈的难点	43
3.7 构造块和结构的数学背景	45
第 4 章 栈/流图的功能简介	47
4.1 栈和流	47
4.2 基础结构	48
4.3 反馈环	49
第 5 章 流的共性模块	52
5.1 组合型模块	52
5.2 消耗型模块	53
5.3 生产型模块	55
5.4 伴生型模块	56
5.5 调节栈型模块	57
第 6 章 通用基础结构——系统基模的基础结构	59
6.1 一阶线性	59
6.2 S 形增长	60
6.3 超越与崩溃	62
6.4 振荡	64
第 7 章 建模过程与技术要点	67
7.1 建模的目的	67
7.2 建模过程概要	68
7.3 建模过程的技术要点	84

第三篇 系统动力学软件使用教程

第 8 章 增强型交互式模型	95
8.1 增强型交互式模型背景介绍	95
8.2 增强型交互式模型概述	97
8.3 开始模拟	97

8.4 策略干预	99
8.5 高层结构图	100
第 9 章 建立模型	101
9.1 引言	101
9.2 结构图	101
9.3 绘制模型图	104
9.4 建模与模拟	105
第 10 章 用户界面/模型分析特性	116
10.1 创建控制面板	116
10.2 输入方式	116
10.3 输出方式	119
10.4 模型的检验和分析工具	120
10.5 其他有用特征	123
第 11 章 STELLA Research 的功能	126
11.1 数组变量	126
11.2 子模型	129
11.3 图的压缩	131
11.4 完成模型	131
第 12 章 高级功能	132
12.1 模型中插入图片或动画的方法	132
12.2 建立模型与其他应用软件间的链接	133
12.3 STELLA 模型与 Excel 电子报表之间的动态链接	138
第 13 章 内置函数	140
13.1 引言	140
13.2 测试输入	141
13.3 数学函数	143
13.4 三角函数	145

13.5 逻辑函数	147
13.6 统计函数	147
13.7 会计函数	149
13.8 离散函数	151
13.9 时间周期函数	153
13.10 数组函数	158
13.11 特殊函数	160

第四篇 应用案例

第 14 章 城镇综合性大医院医疗资源配置仿真与决策研究	171
14.1 背景	171
14.2 模型与模拟	172
14.3 效果	181
第 15 章 麦芽糖醇项目的市场情景仿真与决策研究	182
15.1 项目来源	182
15.2 项目意义	183
15.3 模型与模拟	183
15.4 用户验收与评价	192
15.5 讨论	193
第 16 章 网络与通讯公司的赢利策略建模	194
16.1 案例背景	194
16.2 第一轮模拟与分析	195
16.3 第二轮模拟与分析	198
16.4 第三轮模拟与分析	201
16.5 小结	203
第 17 章 动力学结构的类同性——传染病传播和新技术扩散在 系统结构上的相似性	205
17.1 传染病动力学：传染模型	205

17.2 创新的传播：新思想和新产品的扩散模型	211
第 18 章 企业的业务增长模型	216
18.1 背景与问题	216
18.2 动力学假设	216
18.3 建模	217
18.4 建立模拟器	218
18.5 试验	219
第 19 章 天然气的勘探与生产模型	223
19.1 天然气的勘探与生产模型：参考模式	223
19.2 一步一步地重建天然气勘探和生产模型	224
19.3 天然气勘探和生产模型 1	224
19.4 天然气勘探和生产模型 2	226
19.5 天然气勘探和生产模型 3	229
19.6 天然气勘探和生产模型 4	231
19.7 天然气勘探和生产模型 5	234
19.8 天然气勘探和生产模型 6	237
19.9 用天然气模型进行策略探索	242
第 20 章 创新型公司	246
20.1 研究与发展 (R&D) 部	247
20.2 生产与市场部	249
20.3 财务与管理部	249
20.4 行为	251
20.5 创新型公司的发展	256
第 21 章 科学发展观、可持续发展、和谐社会与系统动力学	257
21.1 用系统动力学研究可持续发展	257
21.2 从人类发展史看可持续发展社会产生的必然性	270
21.3 可持续发展和可持续社会	270
21.4 可持续发展的政策	271

21.5 我国的可持续发展状况	271
第 22 章 一维水质模拟系统动力学模型构建	273
22.1 研究背景简介	273
22.2 一维水质模拟系统动力学模型构建	274
第 23 章 系统动力学的嵌入式开发方式	285
23.1 系统动力学嵌入式开发包	285
23.2 组件式 GIS 与系统动力学模型的集成	288
第 24 章 成功应用系统动力学的基本原理	289
附录 1 《第五项修炼》中 9 个基模的 STELLA 软件表述	291
附录 2 STELLA 软件的基本操作	299
参考文献	303

第一篇

系统思考

随着人类所处世界复杂性的与日俱增，系统思考能力已经成为人类非常重要的素质之一。要想准确地认识世界和改造世界，必须使自己炼就成一位熟练的系统思考者。本篇希望通过对系统思考相关问题的阐述，帮助立志涉足该领域的读者们理解系统思考的重要性并学会处理动态复杂性问题的本领。

第 1 章 系 统

1.1 系统的组成

系统由元素和元素之间的关系组成，表达系统概念的示意图如图 1-1。

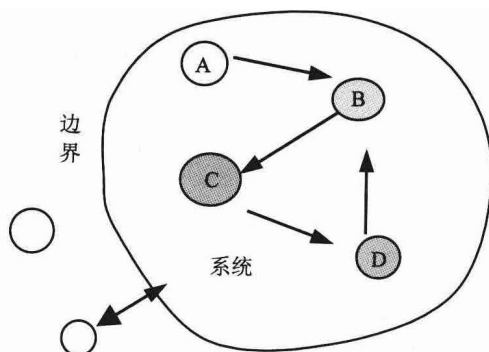


图 1-1 系统概念的示意图

1.2 系统的若干概念

➤ 系统的结构

系统的元素和它们之间的相互关系构成系统的结构。

➤ 系统的环境

系统之外所有同系统相关联部分的集合，称为系统的环境。环境对系统有影响；反之，系统对环境也产生影响。

➤ 系统的边界

系统与环境的分界线。

➤ 系统的行为

反映系统状态随时间的变化规律。

➤ 系统的目标

系统的目标会影响系统的行为，所以要重视目标，当然目标也要与环境相适应。

➤ 系统的功能

具有一定结构的系统在特定环境下所具有的能力。

4 系统思考和系统动力学的理论与实践

➤ 系统的状态变量

状态变量是能够描述系统行为或特性的一组变量，其值不能由人任意选择和指定，它反映了系统运作的结果。

➤ 系统的决策变量（又称控制变量、操作变量和设计变量）

决策变量是描述系统可以由人来选择和调节的一组变量。决策变量一旦确定，系统的状态变量或系统的行为就被完全确定了。

➤ 子系统

任何系统都可以按功能划分成若干个部分组成，每一部分称为子系统，它们是系统的次一级较小系统。所以，系统一般都有层次结构，最低层次的子系统就是元素。

➤ 大系统

指系统中所含的元素和关系很多。多只是相对而言，大系统解决问题的方法不一定复杂，如线性规划问题。

➤ 复杂系统

指系统中元素之间的关系呈非线性，具有反馈回路和延迟等特性，但是复杂系统的元素数量不一定很多。

1.3 研究问题的方法

1. 分析的方法

自从牛顿 1686 年发表《自然哲学的数学原理》，创立微积分和力学起，人们就开始使用分析的方法研究问题。分析的方法是从微观到宏观，从微观的角度分析问题，解释宏观现象，遵守“ $1+1=2$ ”的法则。例如，通过对导弹的受力分析可以确定它的整体运行轨迹。

2. 系统的方法

系统思想源远流长，但作为一门科学的系统论，人们公认是美国生物学家路德维希·冯·贝塔朗菲（Ludwig Von Bertalanffy）创立的。他在 1937 年提出了“一般系统论”的原理，奠定了这门科学的理论基础，他的论文《关于一般系统论》于 1945 年发表。1940 年贝尔电话公司创建“系统工程”用于微波通信网技术。1956 年美国麻省理工学院（MIT）的教授福瑞斯特（Jay W. Forrester）创建系统动力学，应用于经济、生物和思维领域，并和他的学生彼得·圣吉（Peter M. Senge）、约翰·斯特曼（John D. Sterman）共同创立了系统思考（System Thinking）。

系统论将研究对象看作一个整体（系统），关心其内部各组成部分之间的相互关系对整体行为的影响。因为整体（系统）的效果不一定等于各部分（子系统）效果之和（“ $1+1 \neq 2$ ”）。例如，足球队中每个队员都很优秀，但是他们之间的配合不好，也踢不好球。所以，系统的方法是从宏观到微观，从整体出发看问题。再如，用系统论的观点看中国社会的改革开放问题：热力学第二定律表述了“一个封闭的系统中，它的熵会不断地增加，熵达到最大值时，系统处于平衡状态。”对于一个国家而言，封闭意味着停滞不前。所以，邓小平同志提出的改革开放政策是正确的，它打破了中国的封闭状态，促进了中国与外国的交流，为中国的经济发展创造了良好的外部条件。

第 2 章 系统思考

2.1 系统思考的发展历程

美国麻省理工学院（MIT）的福瑞斯特（Jay W. Forrester）教授感到生物系统、人类社会和经济系统的复杂性，从研究技术问题转到研究经济领域的复杂问题，于 1956 年创立了系统动力学。他的学生彼得·圣吉（Peter M. Senge）和约翰·斯特曼（John D. Sterman）将它应用于经济决策领域时发现决策离不开人的思维方式，于是把系统动力学应用于思维模式的研究，建立了系统思考理论。后来，彼得·圣吉以系统思考为核心创建五项修炼（个人进取、心智模式、共同愿景、团队学习和系统思考），进而以五项修炼为基础建立学习型组织，而约翰·斯特曼（John D. Sterman）则以系统思考为基础建立了商务动力学（Business Dynamics）。

2.2 系统思考的应用范围

宏观经济分析：国家、地区、城市和产业发展分析；企事业单位的管理决策：业务流程重组、全面质量管理、战略规划、资源合理配置、财务分析、情景分析和人力资源规划等；教学：大、中、小学教学模式的改进。

例如，壳牌（Shell）石油公司在 1972 年遭遇世界石油危机时进行了情景分析。当时，大多数石油公司认为石油输出国组织的成立是一件单一的事件，而壳牌石油公司的管理者看到的则是供需互动基本模式发生根本转变的信号。一个由卖方市场主控的、不稳定的、高价格的、与需求变化迅速的年代即将来临。由于选择了多种经营策略，到 20 世纪 90 年代，壳牌石油公司从原来世界石油企业排名第七位上升到第二位。我国的首都钢铁公司在 20 世纪 80 年代也采取了多种经营的方式，而在当时其他国内钢铁公司都处于经营困境时，首钢却一枝独秀。

2007 年 5 月 14 日，中国国务院总理温家宝在同济大学建筑与城市规划学院向师生们作即席演讲，他希望学生们经常仰望天空，学会做人、学会思考、学会知识和技能，做一个关心世界和国家命运的人。

美国加州大学伯克利分校的校长曾经对该校新生提出四项要求。他问新入学的学生，“你们到伯克利分校来学什么？”我认为“你们要学的是：第一，要建立系统思考这种崭新的思维方式；第二，要学会如何做人；第三，要学会如何做事；第四，要学好你们的课程。”

2.3 五项修炼与学习型组织简介

1. 五项修炼

(1) 个人进取 (Personal Mastery)

每个人要有目标地不断学习和创造性地学习。有目标和创造性这两点很重要，目标与现实的差距是产生创新的动力，如学生的学习模式（图 2-1）。

只有首先实现个人的学习才能进行有组织的学习。日本京都陶瓷公司的创办人兼社长稻森胜夫说：“不论是研究发展还是公司管理，活力的来源是‘人’，而每个人有自己的意愿、心智和思考方式。如果员工本身未被充分激励去挑战成长目标，当然不会成就组织的成长，生产力的提升和产业技术的发展。”身为管理者，他深信提供员工物质的富足和精神的福祉同样重要。

(2) 心智模式 (Mental Model)

心智模式是指人的经验，是人们对世界如何运作和行为的一种看法，深植于人们的心中。它有两面性，积极作用和消极作用。通常，一旦有了心智模式，就不再学习，一遇到问题就用头脑中已有的心智模式套用，这表明人们习惯于用经验来处理问题。它使人们看不到新的世界，缺乏创新的动力。

但是要改变人们的心智模式是相当困难的。例如，IBM 公司一直做大型计算机，当苹果 (Apple) 公司生产微型计算机 (电脑) 时，IBM 并没有太关注。后来，微型计算机在办公自动化和家庭中被广泛使用，销售量极大，IBM 才奋起直追，结果由于先期重视不足，失去了大量的市场利润；IBM 公司最初看不清软件发展的潜力，将软件外包给其他公司开发，微软 (Microsoft) 公司抓住了软件发展的良机，使 IBM 又失去了一次发展机会。IBM 就是由于自身的心智模式不正确而丧失了多次发展的机会。

(3) 共同愿景 (Share Vision)

共同愿景是指一个组织中大家共同愿望的景象，它不是一种想法，也不是一种抽象的东西。是“我们想要创造什么？”它会使人们的心中产生一种感召力量；同时，也使众人有一体的感觉，能为学习提供目的和动力（图 2-2）。

如 AT&T、福特和苹果电脑等公司，它们的共同愿景就孕育着无限的创造力。AT&T 公司的愿景是花 50 年的时间实现全球电话服务网络；亨利·福特 (Henry Ford) 想要使普通大众都拥有汽车；苹果电脑公司的乔布斯 (Steven Jobs) 希望电脑能让个人更具有力量。这些公司的良好发展证明了共同愿景的魅力。

所以，共同愿景 (FVTR 法) 与传统方法 (FRTO 法) 的不同之处在于：传统方法只解决现实问题，但对长期来说不一定有利。而共同愿景是为了解决长远问题而去改变现

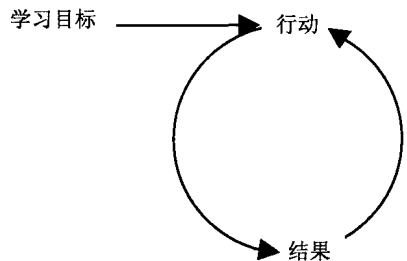


图 2-1 学生的学习模式

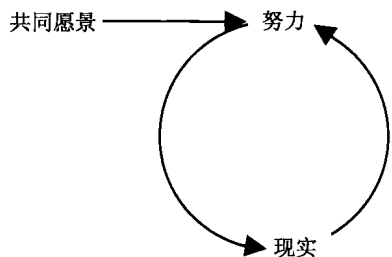


图 2-2 共同愿景