

系统工程学

SYSTEMS ENGINEERING

张延欣 吴 涛 编著
王明涛 孙在东



气象出版社

图书在版编目(CIP)数据

系统工程学/张延欣,吴涛等著. —北京:气象出版社,
1997. 1

ISBN7—5029—2256—3

I. 系… II. ①张…②吴… III. 系统工程学
IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 24775 号

系统工程学

张延欣 吴 涛 编著
王明涛 孙在东

责任编辑:苏振生 终 审:周诗健

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路 46 号 邮编 100081)

北京市宏远兴旺印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:12.75 字数:320 千字

1997 年 1 月第一版 1997 年 1 月第一次印刷

印数:1—3000 册

ISBN 7—5029—2256—3/Z · 0148

定价:16.50 元

内 容 简 介

本书首先介绍了系统、系统理论、系统工程的有关概念以及系统分析方法论；然后着重介绍了系统工程的重要内容，包括系统分析常用方法以及线性规划、网络分析、系统仿真、系统评价和决策分析等；最后介绍了系统工程的几个应用案例。

本书可作为高等学校管理类及工程技术类专业的教材，也可作为各级管理人员、工程技术人员学习系统工程的参考书。

前 言

系统工程是在系统论、控制论、信息论、运筹学和现代管理科学的基础上发展起来的一门新兴交叉学科，其应用遍及工业、农业、交通运输、建筑、邮电、国防、科学技术和社会经济等各个方面，对社会、经济、技术的发展产生了广泛而深刻的影响。

当前，在我国经济向社会主义市场经济过渡的进程中，企业所面临的市场千变万化，竞争日趋激烈，遇到的问题涉及众多复杂的因素。作为未来的经营管理人才和专门技术人才的大学生，亟需掌握系统工程的有关知识，具备正确地运用系统工程思想和方法研究和解决问题的能力。本书就是为此目的而编写的一本教材。

本书是在原有教材的基础上，吸收国内外有关研究成果，结合编者十多年的教学实践，经过反复修改、充实和提高，编写而成的。本书具有如下特点：

1. 突出了对在系统工程实践中具有重要指导意义的系统思想和系统理论的论述，较系统地阐述了系统分析的方法论。

2. 在具体内容安排上，既注重学科理论体系的完整性，又考虑到一些专业因学时限制不开设运筹学课程，而保留了线性规划和网络分析的内容。

3. 加强了实践应用环节。在第九章给出4个应用案例，从教学的实际需要出发还在各章配有思考练习题，以供教学时参考。

本书的编者有：张延欣（第一、九章）、吴涛（第二、三、

六章)、王明涛(第七、八章)、孙在东(第四、五章)。本书由张延欣、吴涛统编定稿。

在编写本书的过程中,参阅了许多著作和文献资料,在此谨向有关作者表示深深的谢意。

系统工程是一门尚在不断发展和完善的学科,许多理论问题还有待进一步探讨,也由于编者学识有限,本书中不足之处望广大读者批评指正。

编者

1996年6月

目 录

前 言

第一章 系统与系统工程	(1)
§ 1-1 系统的概念	(1)
§ 1-2 系统理论概述	(11)
§ 1-3 系统工程	(25)
思考练习题	(44)
第二章 系统分析	(45)
§ 2-1 系统分析概述	(45)
§ 2-2 系统目标分析	(60)
§ 2-3 环境分析	(68)
§ 2-4 系统结构分析	(76)
§ 2-5 系统模型概论	(86)
思考练习题	(96)
第三章 系统分析常用方法	(97)
§ 3-1 直接分析建模法	(97)
§ 3-2 状态空间法	(106)
§ 3-3 投入产出分析法	(117)
§ 3-4 层次分析法	(125)
§ 3-5 德尔菲法	(135)
思考练习题	(141)
第四章 线性规划	(144)
§ 4-1 概述	(144)
§ 4-2 线性规划的单纯形算法	(153)
§ 4-3 线性规划的对偶问题与灵敏度分析	(173)
思考练习题	(190)
第五章 网络分析	(194)
§ 5-1 概述	(194)

§ 5-2 网络图的绘制	(198)
§ 5-3 网络图时间参数的计算	(204)
§ 5-4 网络计划的优化	(220)
思考练习题	(232)
第六章 系统仿真	(235)
§ 6-1 系统仿真概述	(235)
§ 6-2 蒙特卡罗法	(239)
§ 6-3 系统动力学	(255)
思考练习题	(281)
第七章 系统评价	(282)
§ 7-1 概述	(282)
§ 7-2 系统评价指标体系	(286)
§ 7-3 系统综合评价方法	(295)
思考练习题	(319)
第八章 决策分析	(321)
§ 8-1 概述	(321)
§ 8-2 不确定型决策分析	(327)
§ 8-3 风险型决策分析	(331)
§ 8-4 贝叶斯决策	(341)
§ 8-5 效用与决策分析	(347)
§ 8-6 多目标决策	(351)
思考练习题	(361)
第九章 系统工程应用	(364)
§ 9-1 企业经营计划研究	(365)
§ 9-2 投资项目的评价和优化	(369)
§ 9-3 区域人口经济协调发展规划	(376)
§ 9-4 我国宏观经济最优控制模型	(386)
参考文献	(394)

第一章 系统与系统工程

在现代科学技术体系中，系统工程与系统科学占有重要的位置。它是本世纪中叶科学技术发展和当代科学思维方式发生革命性转变的最富有意义的成果之一。它的应用已广泛深入到工业、农业、国防、科学技术和社会经济各个方面，给科学技术和社会经济发展带来了广泛而深刻的影响。

§ 1-1 系统的概念

一、系统思想的形成与发展

“系统”的概念及系统思想来源于人类长期的社会实践，是人类社会实践的科学总结。系统思想的形成大致分为三个阶段。

1. 古代朴素的系统思想

人类很早就已经有了“系统”的概念和系统思想的萌芽，这主要表现为对整体、组织、结构、等级的认识。如我国古代天文学家为发展农牧业，很早就关心天象的变化，把宇宙看作一个整体，探讨它的结构、变化和发展，揭示了天体运行与季节变化的联系，编制出了历法和指导农事活动的二十四节气。我国古代医学家对人体的研究也很早就有了系统认识。我国古代著名的医学典籍《黄帝内经》根据阴阳五行的朴素辩证关系，把自然界和人体看成是由金、木、水、火、土五种要素相生相克、相互制约而组成的整体。《黄帝内经》和我国古代其他医学中的藏象、病机、气血、津液、经络等学说，以及在此基础上建立起来的辩证论治，都体现了朴素的系统思想。

我国古代劳动人民还把系统思想运用于改造自然的社会实践中。战国时期（公元前 250 年）秦国蜀郡太守李冰父子主持设计和修建的著名的都江堰水利工程就是一个典范。都江堰位于岷江上游的四川灌县，它由三大主体工程即“鱼嘴”岷江分洪工程，“飞沙堰”分洪排沙工程，“宝瓶口”引水工程巧妙结合而成，兼有防洪、灌溉、漂木、行舟等多种功能，充分体现了系统的整体观念和协调思想。即使用现代的观点来看，都江堰也不愧为一项杰出的系统工程。

古代朴素的系统思想还在古代哲学中得到反映。我国春秋末期的思想家老子就强调自然界的统一性。古希腊卓越的哲学家德谟克利特(Democritus)说过“世界是包括一切的整体”。古希腊著名学者亚里士多德(Aristoteles)进一步发展了朴素的系统思想，提出“整体大于各个部分的总和”的思想。他以房屋为例，说明一所房屋并不等于砖瓦、木料等建筑材料的总和，指出：“由此看来，很清楚，你可有了各个部分，而还没有形成整体，所以各个部分单独在一起和整体并不是一回事。”亚里士多德的这一思想后来成为一般系统论的主要观点之一。

古代朴素唯物主义哲学思想虽然强调对自然界整体性、统一性的认识，包含了正确的整体观，但由于历史条件的限制，缺乏对这一整体各个细节的认识能力，所以对很多事物只能看到一些轮廓及表面现象，往往是只见森林，不见树木，因而其对整体性和统一性的认识是不完全的。

2. 机械论的整体观

15 世纪下半叶，由于近代科学的兴起，力学、天文学、物理学、化学以及生物学等学科逐渐从原来混为一体的哲学中分离出来，获得迅速的发展，产生了研究自然界的独特的分析方法，即实验、解剖与观察等，把事物分门别类地深入地进行研究。这种方法使得人类对自然界的各个细节的认识更加深刻了，促进了

自然科学的发展。但这种方法反映在哲学上，却形成了形而上学的思维方法。它敞开了事物的总体联系，把事物看作是彼此孤立的、互不相关的东西，认为简单的部分相加即为整体，往往只看到一些局部现象，而不能纵观全局，以致于只见树木，不见森林。

3. 辩证的系统思想

19 世纪上半叶，自然科学发展取得了伟大的成就，特别是能量转化、细胞和进化论的发现，揭示了客观世界的普遍联系，使人类对自然现象和过程的相互联系的认识有很大的提高。恩格斯指出：“由于这三大发现和自然科学的其他巨大进步，我们现在不仅能够指出自然界中各个领域内过程之间的联系，而且总的说来也能指出各个领域之间的联系了，这样，我们就能够依靠经验自然科学本身所提供的事实，以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画。”^①辩证唯物主义认为，物质世界是由无数相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用的事物和过程形成的统一整体。辩证唯物主义体现的物质世界的普遍联系及其整体思想，就是对系统思想的哲学概括。

现代科学技术对系统思想的发展作出了重大的贡献。本世纪 20 年代，奥地利学者贝塔朗菲（L. V. Bertalanffy）针对生物学的机械论和活力论之争，提出了一般系统论的思想，并于 1945 年正式发表了《关于一般系统论》的论文。一般系统论的创立，为系统思想由哲学概括发展成为科学理论奠定了基础。但一般系统论仍停留在定性的抽象描述阶段。定量分析的系统思想和方法的确立，源于二次大战时期发展起来的系统工程、运筹学、控制论和信息论等新兴学科，尤其是 60 年代以来耗散结构、协同学等理论的出现和发展，使系统的定量化研究逐步发展和完善，并逐步形成一门新的学科体系——系统科学。

①《马克思恩格斯选集》第4卷·人民出版社·1972年·第241—242页

综上所述，系统思想从辩证唯物主义中获得了思维的表达形式，从运筹学等现代科学中取得了定量的表达方式，并在系统工程实践中不断完善和发展，系统思想方法由朴素的整体观，逐步形成一种科学的思想方法。

二、系统的定义

系统一词来自拉丁语 *systema*，即“群”或“集合”的意思。

在韦氏（Webster）大辞典中，“系统”一词定义为“有组织的或被组织化的整体”，“是形成集合整体的各种概念、原理的综合”，是“以有规律的相互作用或相互依存形式结合起来的对象的集合”，等等。

一般认为，系统是由相互作用和相互联系的若干组成部分（要素）结合而成的、具有特定功能的有机整体。它包含三层意思：（1）系统必须由两个以上的要素所组成。要素是构成系统的最基本的单元，是系统存在的基础。（2）要素之间存在着有机的联系和相互作用的机制，从而形成一定的结构或秩序。（3）系统都具有一定的功能或特性，而这些功能或特性是它的任何一个部分都不具备的。这种新功能是系统内部的有机联系或结构所决定的。

在自然界和人类社会中，许多事物都与其他事物相互联系、相互作用着，因而几乎所有的事物都可以视为系统。人们在认识和改造客观世界的过程中，用综合分析的思维方式看待周围的事物，根据事物内在的、本质的、必然的联系，从整体的角度进行分析和研究，那么这类事物就被看作为一个系统。

在客观世界中，一个系统中的任何组成部分可以被视为一个子系统，而每一个系统又可以被视为一个更大规模系统中的一个组成部分。系统与环境是一对范畴。任何一个系统都处于一定的环境。

三、系统的特性

1. 集合性

集合性是指系统是由两个或两个以上可以相互区别的要素组成的集合体。如简单的制造系统，一般由工作机、操作者、工具、材料、图纸、工艺卡、电力等要素组合而成。复杂系统则是由许多要素、单元体和活动过程等组成的集合体。如一个工厂通常是由各种类型的设备、各种原材料、能源、生产过程、经营以及各类人员等要素或子系统组成的集合体。

2. 相关性

相关性是指系统内部要素之间的某种相互作用、相互依赖的特定关系。以电力系统为例，它可以分为发电、输电、变电、配电和用电等五个组成要素（或子系统）。电力系统生产的特点是产、供、销同时发生，电无法储存，因此，它们之间的相互联系和相互作用尤为密切，任何要素的变化都将影响到其他要素。比如，发电机出了故障就会影响用户用电及生产；而用电大户停止生产，也必将影响到发电，电厂这个分系统尽管有发电设备和生产能力，但也不能充分发挥作用。这些关系就形成一定的结构或秩序。某一要素如果发生了变化就意味着其他要素也相应地改变和协调。

过去由于人们在改造自然的过程中对系统的相关性认识不够，一味地向自然索取，结果使人们受到了大自然的报复和惩罚。例如 70 年代初期，埃及在尼罗河上游修建了一座大坝，即阿斯旺水库。水库修成后，曾给埃及人民带来了一定的效益，基本上控制了尼罗河的水灾，又可以获得廉价的电力。但是，由于在建设大坝时，没有考虑到可能出现的各种不良影响和后果，结果由于尼罗河的泥沙和有机质大量沉积到水库底部，从而使尼罗河下游两岸的农田失去了肥源，土壤日趋盐碱化，农作物大面积减产；由于尼罗河河口供沙不足，使河口三角洲平原由向地中海

中延伸变为向大陆退缩，结果使一些沿海工厂、港口国防工事有陷入地中海的危险；由于缺乏陆地的盐份和有机物，致使盛产沙丁鱼的鱼场毁于一旦；更为严重的是，由于大坝阻隔，使尼罗河下游原来奔腾不息的活水变成了相对静止的“湖泊”，从而为血吸虫和蚊子的繁殖提供了条件，使水库一带居民的血吸虫发病率高达80%~100%。这一切使埃及人民付出了沉重的代价，蒙受了巨大的损失。

3. 目的性

目的性是指系统有明确的目的或目标。系统工程的研究对象一般为人工系统，而人工系统都具有一定的目的性。例如，企业经营管理系统的目的就是在限定资源和现有运行机制的作用下，为了完成或超额完成生产经营计划，实现规定的质量、品种、成本、利润指标等。而一个生产技术系统的目的，则是实现某种技术要求，达到规定的性能、经济和进度指标等。

为了实现系统的目的，系统必须具有控制、调节和管理的功能。管理的过程就是使系统有序化的过程，使系统进入与其目的相适应的状态。

4. 阶层性

阶层性是指系统各组成要素之间具有层次结构。系统作为一个相互作用的诸要素的集合体，可以分解为一系列的子系统，并且这些子系统存在于一定的层次结构中。例如，生物系统是分层次的，从活的分子到多细胞个体，再到超个体的聚合体，层次分明、等级森严。又如，整个自然界犹如一座巨大的建筑物，其中各层次系统逐级地组织起来，成为越来越高级、越来越庞大的系统。

系统的层次结构，通常呈金字塔形，如图1-1所示。在塔的底部，通常是一些结构和功能相对简单的子系统，越往上越复杂，而占据塔顶的则是结构和功能相当复杂的系统。对于中间层次的系统来说，它既是独立的，又与上下层次的系统有着密切的

联系。相对上层，它只是要素或子系统，处于被支配和被控制的地位；相对下层，它又是系统，处于支配和控制的地位。

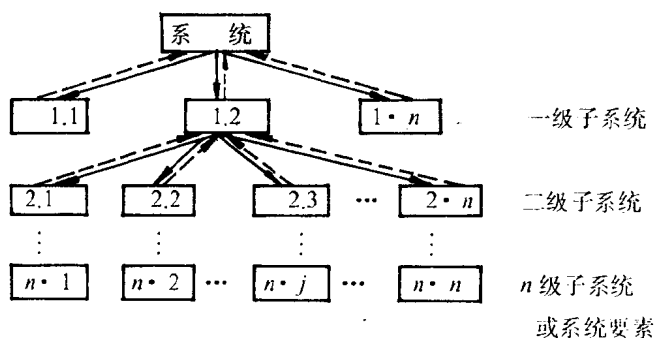


图 1-1 系统层次结构

5. 整体性

系统的整体性主要表现为系统的整体功能或特征，系统的整体功能或特征不是各组成要素功能或特征的简单迭加，也不是组成要素功能简单地拼凑，而是呈现出各组成要素所没有的新功能或特征。一般系统论的创始人贝塔朗非把这一特性概括为：“整体大于它的各个孤立部分之和”。意思是说，系统整体的特征跟组成它的要素的特征相比，好像是“新增加的”、“多出来的”。

系统的整体性具体可以从以下几个方面来理解：

(1) 系统整体联系的整体性。在系统中各个要素对整体的影响不是独立的，而要依赖于其他若干个要素的协同作用。也就是说，系统要素的性质和行为并非独立地影响系统整体的功能或特征，而是相互影响、相互协调地来适应系统整体的要求，实现系统的功能。因此，任何一个要素都不能脱离整体，要素的联系和作用也不能离开整体的协调。例如，人体的每个器官的性质和行为都会影响到人体系统的功能和行为，但它们并非独立地影响人体的功能和行为，而是相互影响的。如心脏对人体系统的影响又依赖于肺脏等。因此，人体的任何一个局部都不能脱离人体而独

立存在，否则其功能将不复存在。

(2) 系统功能的非加和性，即系统的整体功能不等于各要素功能之和。系统作为诸要素的集合体永远具有一定的特性，而这些特性不是它的任何一个要素所能具备的。系统是一个不可分割的整体。如果把系统分割开，那么它将失去其原来的性质。

(3) 构成系统的要素不一定都很完善，但可以构成性能良好的整体。反之，即使每个要素是良好的，但组成的整体不一定具有良好的整体功能，也就不能称为完善的系统。

系统之所以产生整体性或新质，是因为组成系统整体的各个部分或要素相互联系和相互作用，形成一种协同作用。只有通过协同作用，系统的整体功能才能显现。

6. 环境适应性

环境适应性是指系统适应外界环境变化的能力。所谓环境，是指系统的外部条件，也就是系统外部对该系统有影响、有作用的诸因素的集合。在一个大系统中，对于某一个特定的子系统来说，其他子系统就是它的环境。环境是一种更高级、更复杂的系统。

系统与环境是密切联系的，系统必然要与外部环境产生物质、能量的和信息的交换，外界环境的变化必然会引起系统内部要素的变化。系统必须适应环境的变化。能够经常与外部环境保持最佳适应状态的系统才是理想的系统，不适应外部环境变化的系统是没有生命力的。自然界一些系统本能地存在着适应外部环境的特性。生物进化过程就是系统不断适应外部环境的过程，适应者生存，不适应者被淘汰。同样，一个工业企业必须适应市场的变化，不断调整和完善企业的经营策略，只有这样，才能在激烈竞争的市场经济中生存和发展壮大。

系统与环境的作用是相互的。一方面，系统不能脱离环境而独立存在。环境对系统有很大的影响，甚至在某种情况下会限制系统功能的发挥。另一方面，系统又可以通过输出对环境施加影

响。人类一方面不仅能够适应自然环境，另一方面还能够利用和改造自然环境，使其满足人类的需求。

四、系统的分类

系统不仅普遍存在，而且形态也是多种多样的。为了对系统进行研究，揭示不同类型系统之间的联系，人们按照不同原则将系统划分为各种类型。

1. 自然系统和人工系统

自然系统是指由自然物（矿物、植物、动物、海洋等）构成的系统，其特点是自然形成的。人工系统是指为了达到人类的某种目的，由人类设计和建造的系统。工程技术系统、经营管理系统和科学技术系统就是三种典型的人工系统。工程技术系统是由人们对自然物等进行加工，用人工方法建造出来的工具和机械装置等所构成的工程技术集合体。经营管理系统是人们通过规定的组织、制度、程序、手段等建立的经营与管理的统一体。科学技术系统是人们通过对自然现象和社会现象的科学认识，概括和总结研究出来的科学与技术的综合体。系统工程研究与处理的对象主要是人工系统和经人们加工了的自然系统，即复合系统。在这类系统中往往包括人的因素，是由人参与的复杂系统。

2. 实体系统和概念系统

实体系统是指以矿物、生物、能源、机械等实体组成的系统。其组成要素是具有实体的物质，如水电站、工厂和楼房等。概念系统是指由概念、原理、原则、方法、制度、程序等非实体物质所组成的系统，如经济管理体制、法律系统、教育体系、程序系统等。

实体系统与概念系统有时是交织在一起的，是不可分割的。如一座水电站是实体系统，而修建水电站的方案、规划和程序等则属于概念系统。所以，实体系统是概念系统的基础和服务对

象，而概念系统则是为实体系统提供指导、方案和服务的，两者是不可分的。

3. 封闭系统和开放系统

封闭系统是指与外部环境没有任何联系的系统，即系统与外部环境没有物质、能量和信息的交换。现实生活中任何系统都与外部环境有着各种各样的联系，不存在绝对的封闭系统。有时为了研究的方便，把某些与外部环境联系很少的系统，忽略其外部影响，近似地看作封闭系统，如自给自足的小农经济、闭关锁国的封建国家等。开放系统是指系统与外部环境存在着相互联系，有物质、能量、信息交换的系统。系统从环境中获得必要的物质、能量或信息，经过加工，转化成新的物质、能量或信息而输出。环境对系统的作用，一方面是给系统提供必须的物质、能量或信息；另一方面，对系统也会产生干扰和限制作用。因而，围绕系统在外环境影响下的行为方式和活动来认识、识别系统，是研究系统特性的有效途径。

4. 静态系统和动态系统

静态系统是指系统的状态和功能在一定的时间内不随时间而改变的系統。它没有既定的输入和输出，在系统运动规律的表征模型中不包含时间因素。如城市规划布局、企业平面布置等都属于静态系统。动态系统是指系统的状态随时间变化的系统。它有输入和输出及转换过程，其状态变量为时间的函数。如社会系统、企业生产系统和管理信息系统等都是动态系统。

5. 控制系统和行为系统

控制系统是指具有控制功能和手段的系统。所谓控制就是为达到一定目的给对象系统所施加的必要动作。控制对象要由控制装置操纵，使其达到规定目的。当控制系统由控制装置自动进行时，则称为自动控制系统。行为系统是以完成任务的行为为构成要素而形成的系统。所谓行为就是为达到某一确定目的而执行某特定任务的作用，这种作用对外部环境能产生一定的影响。区分