

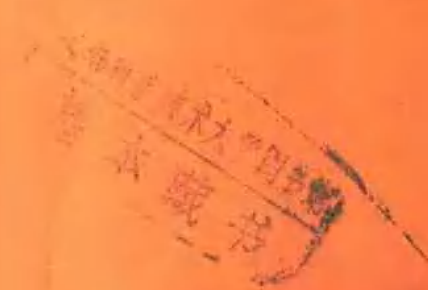
· 852114

58

7717

• 高等学校教学用书 •

系统优化技术基础



GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

系统优化技术基础

北京钢铁学院 邱夏陶 编

冶金工业出版社

高等学校教学用书
系统优化技术基础
北京钢铁学院 邱夏陶 编

*
冶金工业出版社出版
(北京北河沿大街西便院北巷10号)
新华书店北京发行所发行
冶金工业出版社印刷厂印刷

*
787×1092 1/16 印张 12 1/2 字数 298千字
1988年5月第一版 1988年5月第一次印刷
印数00,001~2,900册
ISBN 7-5024-0183-0
TK·1(课)定价2.10元

前 言

最优化技术是同系统工程的概念紧密相联的。随着系统工程这门学科的研究和发展,最优化技术已在各个科学技术领域中被广泛地用来解决多变量的系统问题。通过系统分析,建立模型以及相应的数学方法,使整个系统达到综合最优。

系统工程是在二十世纪中期才开始兴起的一门边缘科学。在四十年代中,出现了“系统工程”(Systems Engineering)一词,这是对当时一些工程实践中卓有成效的新观点、新方法的命名。它是把自然科学中某些思想、理论、方法等根据系统总体协调的需要,将其有机地联系而成的一门新兴科学。自此,在国际上系统作为一个研究对象,引起了各个领域的专家们的注意。

当前,由于技术和经济的不断发展和增长,笔者深感高等院校一些工程专业的学生,应具备系统工程的有关基础知识,以便从系统总体出发来观察和处理问题。《系统优化技术基础》就是为这一目的而编写的一本教材。鉴于系统优化技术涉及的知识面非常广泛,而本书的篇幅有限,故只能对有关系统优化技术的基本知识作一简要介绍。本书主要内容包括两部分:前一部分主要讲述系统和系统工程的一般概念,系统分析和决策分析的概念、内容和步骤等;后一部分为系统优化技术的数学准备、系统方法论中的最优化技术和图与网络分析。

为使读者便于查阅外文资料,在一些专业名词第一次出现时,将其英文术语在括号内注出。

由于本人水平有限,文中不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正,不胜感谢。

邱夏陶

一九八七年二月

3006/17

目 录

第一章 系统概念与系统工程	1
§ 1-1 系统的概念.....	1
§ 1-2 何谓系统工程.....	3
§ 1-3 系统工程的发展过程.....	7
第二章 系统分析	10
§ 2-1 系统分析的基本概念和作用.....	10
§ 2-2 系统分析的要素和步骤.....	11
§ 2-3 系统目的分析和确定.....	13
§ 2-4 系统模型化和最优化.....	14
§ 2-5 系统评价.....	17
第三章 决策分析	20
§ 3-1 决策的类型与方法.....	20
§ 3-2 一般决策问题.....	22
§ 3-3 风险型情况下的决策.....	24
§ 3-4 完全不确定情况下的决策.....	33
§ 3-5 效用理论.....	35
§ 3-6 多目标决策问题.....	39
§ 3-7 决策过程.....	50
第四章 系统理论的数学基础知识	54
§ 4-1 状态变量和行为变量.....	54
§ 4-2 向量和向量空间.....	55
§ 4-3 行列式.....	57
§ 4-4 矩阵.....	58
§ 4-5 线性变换.....	60
§ 4-6 微商和积分.....	61
§ 4-7 随机事件与概率.....	63
§ 4-8 集合论.....	66
§ 4-9 模糊集.....	72
第五章 最优化技术	74
§ 5-1 线性规划.....	74
§ 5-2 整数规划.....	119
§ 5-3 非线性规划.....	134
§ 5-4 动态规划.....	147
§ 5-5 大系统优化.....	156
第六章 图与网络分析	171
§ 6-1 图的基本概念.....	174
§ 6-2 树.....	176
§ 6-3 图的矩阵表示.....	179
§ 6-4 最短路径问题.....	182
§ 6-5 最大流量问题.....	188

第一章 系统概念与系统工程

§ 1-1 系统的概念

系统一词的英文是System, 俄文是Система, 都源于拉丁文。如果从语源上分析, 拉丁文中“syn”是“在一起”的意思, “histemi”是“放置”的意思, 两个词连成一起就变成英文“System”、俄文“Система”一词, 就是有条理、有秩序地“放在一起”的意思。系统这一概念来源于人类的长期社会实践, 但是由于受到科学技术早年历史的影响, 系统这个概念一直没有受到应有的重视。在美国直到二十世纪四十年代才开始在工程设计中应用了系统这一概念, 到了五十年代以后才把系统的概念逐步明确化、具体化, 并在工程技术系统的研究和管理中得到了广泛的应用。

其实, 无产阶级的革命导师恩格斯早在1886年就对系统的概念作了精辟的论述。恩格斯在《路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结》一文中就曾指出: “旧的研究方法和思维方法, 黑格尔称之为‘形而上学’的方法, 主要是把事物当做一成不变的东西去研究, 它的残余还牢牢地盘踞在人们的头脑中, 这种方法在当时是有重大的历史根据的。必须先研究一个事物是什么, 而后才能研究过程。必须先知道一个事物是什么, 而后才能觉察这个事物中所发生的变化。自然科学中的情形正是这样。认为事物是既成的东西的旧形而上学, 是从那种把非生物和生物当做既成事物来研究的自然科学中产生的。而当这种研究已经进展到可以向前迈出决定性的一步, 即可以过渡到系统地研究这些事物在自然界本身中所发生的变化的时候, 在哲学领域内也就响起了旧形而上学的丧钟。”(马克思恩格斯选集第四卷第240~241页, 人民出版社, 1972年第一版)恩格斯还把这一认识上的飞跃称为: “一个伟大的基本思想, 即认为世界不是一成不变的事物的集合体。”(同上, 第239~240页)这里, 恩格斯所讲的过程的集合体, 正阐明了系统的哲学概念, 说明了系统中各个组成部分的相互作用和整体的发展变化。现代科学技术的贡献在于把系统这一概念具体化了, 并且提供了分析系统的理论和方法。

传统的分析方法往往是把一个事物分解成许多独立的部分来分别进行研究, 人们可以把问题分得很细, 然后进行深入的研究。但是这样的研究方法往往容易把事物看成是孤立的、静止的, 因而所得出的结论只能限制在一个局部的条件下。如果放到更大的范围来考虑, 那个结论就可能是片面的, 甚至是错误的。

系统工程认为, 应当把事物当作一个整体来研究, 把一个研究对象看作一个系统, 从系统整体来研究系统内部各组成部分之间的有机联系和系统外部环境的相互关系, 这就是综合的研究方法。

一、系统的定义

系统是具有特定功能的, 相互间具有有机联系的许多要素构成的一个整体。

在韦氏大辞典中, “系统”一词被解释为“有组织的或被组织化的整体; 结合着的整体所形成的各种概念和原理的综合; 由有规则的相互作用, 相互依存的形式组成的诸要素集合等等。”在日本的JIS工业标准中, “系统”被定义为: “许多组成要素保持有机的秩序, 向同一目的行动的东西。”美国学者R.C.阿柯夫教授(Ackoff)认为: 系统是由两个或两

个以上相互联系的任何种类的要素所构成的集合。因此，系统不是一个不可分解的要素，而是一个可以分成许多部分的整体。

一个系统是一个可以分成许多要素所构成的整体，但从系统功能的观点来看，它又是一个不可分的整体。但如果把系统拆开，它就将失去其原来的性质。

在物质世界中，一个系统中任何部分可以被看成为一个系统，而每一个系统又可以成为一个大规模系统中的一个部分。在系统的时代，人们倾向于把事物看成一个大的整体的一部分，而不是把整体拆开。这是一种综合的思想方法，它不同于传统的分析方法。

综上所述，一个形成系统的诸要素的集合，永远具有一定的特性，或者表现一定的行为，而这些特性或行为不是它的任何一个部分所能具有的。

二、系统的特性

一般系统都具有以下四种特性：

1. 整体性 系统由两个或两个以上可以相互区别的要素按照作为系统整体所应具有的综合整体性而构成。构成系统的各要素虽然具有不同的性能，但它们是根据逻辑统一性的要求而构成的整体。系统不是各个要素的简单集合，否则它就不会具有作为整体的特定功能。因此，即使每个要素并不都很完善，但它们也可以综合、统一成为具有良好功能的系统。反之，即使每个要素是良好的，但作为整体却不具有某种良好的功能，也就不能称之为完善的系统。

2. 相关性 系统内各要素之间是有机联系的，相互作用的。在这些要素之间具有某种相互依赖的特定关系。例如，对于加热炉系统来说，各种燃烧装置、排烟装置、仪表和控制装置、进出料机构、炉体结构等各个硬件和操作系统、温热制度等各种软件都是构成要素，它们之间通过特定的关系，有机地结合在一起，就形成一个具有特定性能的加热炉系统。

3. 目的性 通常系统都具有一定的目的性。要达到既定的目的，系统都具有一定的功能。

4. 环境适应性 任何一个系统都存在于一定的物质环境中，必须适应外部环境的变化。在研究系统的时候，环境往往起着重要的作用，必须予以重视。

三、系统的形态

在自然界和人类社会中普遍存在着各种系统。例如，太阳系是由某些行星和卫星等组成的。同样，在人类社会中存在着生产系统、消费系统等等。系统的形态大致可分类如下：

1. 自然系统与人造系统 自然系统是由矿物、植物、动物等自然物自然形成的系统，如矿藏系统、生态系统、海洋系统、气象系统等等。

人造系统是由人工造成的各种要素所构成的系统，如人类对天然物质加工，造出各种物质所构成的各种工程系统，以及各种社会经济系统、科学技术系统等等。

实际上，大多数系统是自然系统与人造系统的复合系统。如在人造系统中，有许多是人们运用科学力量，认识、改造了的自然系统。

2. 实体系统和概念系统 凡是以矿物、生物、机械、能量和人等实体为构成要素所组成的系统都是实体系统。凡是由概念、原理、原则、方法、制度、程序等观念性的非物质实体所构成的系统称为概念系统，如科学技术系统、管理系统、教育系统等等。

在实际生活中，实体系统和概念系统在多数情况下是结合的。实体系统是概念系统的

基础，而概念系统往往为实体系统提供指导和服务。

3. 动态系统和静态系统 动态系统，指系统中的状态变量为时间函数，即它的状态变量是随时间而变化的。而静态系统则是表征系统运动规律的数学模型中不含有时间因素，即模型中的变量不随时间而变化；它只是动态系统的一种极限状态，即处于稳态的系统。

4. 控制系统和行为系统 控制，就是为了达到某个目的给对象系统所加的必要的动作。控制对象要由控制装置操纵，使其符合规定的目的。因此，为了进行控制而造成的系统叫做控制系统。当控制系统由控制装置自动进行时，谓之自动控制系统。

行为系统，是以完成目的的行为作为构成要素而形成的系统。所谓行为，就是为了达到某一确定的目的而执行某特定功能的一种作用，这种作用能对外部环境产生某些效用。

§ 1-2 何谓系统工程

系统工程无论在理论上还是在实践上都处于发展的初期，尚不够完善，同时又与其他许多科学处于相互渗透和相互影响的状态，人们对它的认识也很不一致。因此，目前还找不到一致公认的明确定义。

系统工程这个词来源于英文“*Systems Engineering*”，简称“SE”。

一、系统工程的定义

这里列举如下几个典型定义，为我们认识系统工程提供一定的线索与参考。

(1) 1967年H.切斯纳特(Chestnut)指出，“系统工程是为了研究由多数子系统构成的整体系统所具有的多种不同目标的相互协调，以期系统功能的最优化，最大限度地发挥系统组成部分的能力而发展起来的一门科学。”

(2) 1967年日本工业标准JIS规定：“系统工程是为了更好地达到系统目标，而对系统的构成要素、组织结构、信息流动和控制机构等进行分析与设计的技术。”

(3) 1971年日本学者寺野寿郎指出：“系统工程是为了合理地开发、设计和运用系统而采用的思想、程序、组织和方法的总称。”

(4) 1975年在美国的科学技术辞典中，将系统工程解释为：“系统工程是研究许多密切联系的元件组成的复杂系统的设计科学。设计该复杂系统时，应有明确的预定功能及目标，并使得各个组成元件之间以及元件与系统整体之间有机相联、配合协调，致使系统总体能达到最优目标。但在设计时，要同时考虑到参与系统中的人的因素与作用。”

(5) 1977年日本学者三浦武雄指出：“系统工程与其它工程不同之处在于它是跨越许多学科的科学，而且是填补这些学科边界空白的一种边缘学科。因为系统工程的目的是研制系统，而系统不仅涉及到工程学的领域还涉及到社会、经济和政治等领域，为了适当解决这些问题，除了需要某些纵向技术以外，还要有一种技术从横向把它们组织起来，这种横向技术就是系统工程，也就是研制系统所需的思想、技术、方法和理论等体系化的总称。”

(6) 1978年我国著名学者钱学森指出：“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科学方法。”

国内外学者及机关对系统工程所下的定义或解释还有许多，这里所列举的只是几个具有代表性的例子而已。

二、系统工程的本质

系统工程中“工程”的意义与机械工程、电气工程、热能工程等之中的“工程”的含义有所不同。目前系统工程的本质内容可以说是方法学或“意图”学，而不象机械工程、电气工程、热能工程那样是“运行”学。机械工程、电气工程、热能工程是以“伽利略—牛顿”的经典力学理论，“法拉第一麦克斯韦”的电磁理论，或“傅立叶、基尔霍夫、斯梯芬—波尔茨曼”的传热理论以及其它有关热力学的理论为背景，即以物质世界的运动规律的描述和应用为基础的、运行性的、操作性的学科。而系统工程则更强调人对客观规律的巧妙利用的方面，故可称之为“事”理科学，即方法学或“意图”学。由于它处理的对象是信息，在国外有些学者认为系统工程是一种“软科学”。当然，近代科学中的“物”理科学的部分也是它的必要的基础之一。

严格的科学体系往往是公理主义的。例如几何学、代数学、力学、电学、热学等，它们把全部知识归结为从实践中概括出来的若干基本定理、原理或公理，也就是绝大多数结论都可以由这些定理、原理、公理逻辑地推理而得到。系统工程目前还处于蓬勃发展的阶段，还没有完成其严格的体系。它从各种不同领域中引入了各种各样的概念，还没有来得及加以整理，加以公理化，甚至多少还有些混乱。它所吸取的数学理论的那一部分当然是严格的，从集合论出发的那些讨论也可以说是严格的，但是还有许多讨论仅是从一般人都能理解和承认的概念出发的——这些概念还没有被公理化。这些特点我们在研究系统工程时必须予以注意。只要我们把系统工程当作一片其地质结构尚未完全弄清的油田来开发，我们就不致因为在某个意想不到的地区喷出一股汹涌的原油而感到意外。它正是值得我们大加开垦的处女地。

系统工程作为一门独立的学科，具有它自己独特的思想方法、理论基础、程序体系和方法论。但是，当前系统工程还正在发展中，尚未形成完善的理论体系和方法论。系统工程思考方法通常叫作系统方法，是在对系统的概念、系统的基本构成及其各种形态作了深入研究的基础上，把对象作为整体系统来考虑、掌握、分析、设计、制造和使用时的基本思想方法。系统工程也具有自己独特的工作程序体系，虽然在实际运用时，由于对象不同，运用的人各异，所采用的具体程序步骤会各不相同，但其程序体系的一般原则仍具有普遍意义。

系统工程具有自己特点的方法论。它的方法体系的基础就是运用各种数学方法、计算机技术和控制理论来实现系统的模型化和最优化，进行系统分析和系统设计。从逻辑学的方法体系来讲，需要在理解上述各门学科的基础上来掌握系统工程的方法论，但是，从实践论的观点出发，则需要通过大量的社会实践，去总结供实际使用的各种方法和技术。系统工程的实践性是非常突出的。

综上所述，系统工程是以系统(特别是大系统)为对象的一门跨学科的边缘科学。它是根据总体协调的需要，把自然科学和社会科学中的某些思想、理论、方法、策略和手段等从横的方面有效地组织起来应用于人类实践，是应用数学方法和电子计算机等工具，对系统的构成要素、组织结构、信息交换和反馈控制等功能进行分析研究，从而达到最优设计、最优控制和最优管理的目标，以便最充分地发挥系统中的4M，即材料(Material)、设备(Machine)、人员(Man)、资金(Money)的潜力，以实现系统的综合最优化。

对系统的分析、综合、模拟、最优化等称为狭义的系统工程。为了合理地进行系统的

研制、设计、运用等工作所采用的思想、程序、组织、方法等内容，是广义的系统工程。

三、系统工程的方法论

系统工程方法论的基本特点归纳分述如下：

1. 研究方法上的整体化 把研究对象看作一个系统整体，同时，把研究过程也看作一个整体。人们把系统作为若干个子系统有机结合成的整体来设计，对每个子系统的技术要求都首先从实现整个系统技术协调的观点来考虑，对研制过程中子系统与子系统之间的矛盾或者子系统和系统整体之间的矛盾，都要从总体协调的需要来选择解决方案。同时，把系统作为所从属更大系统的组成部分来进行研究，对它的所有技术要求，都尽可能从实现这个更大系统技术协调的观点来考虑。这种实践体现了一种科学方法，它是组织管理“系统”的规划、研究、设计、制造、试验和使用的一种科学方法。例如，环境问题主要是由于能源使用而引起的，如果对环境标准进行一种更加严格的政策，这些问题可以减少，甚至逐步得到解决。然而由于技术方面的限制，推行过分严格的环保政策，将会大大增加投资，甚至引起社会正常职能的中断和混乱，造成经济困难，因此，能源、环境和经济是密切地交织在一起的，必须从全局出发来制订能源政策和能源利用的各种技术，以保证在促进经济发展的前提下，控制环境的污染，保护环境卫生。

基于系统整体化的概念，人们建立起一系列衡量系统效果的综合性指标，如价值/寿命、效能/成本比、造价/维护费用比和时间价值等。在实践中，某些技术措施从局部来看效果是好的，但从全局来看效果就不一定好；另外有些组织技术措施从局部来看效果不太理想，但从整体来看却有应用的价值。因此，只有根据整个系统的总目标来分析，才能作出科学的判断。

由于现代技术的迅速发展，有些设备的失效，往往不是由它固有寿命所决定的，而是由于技术的过时，外部条件的变化，或者要花费过高的维护费用而被淘汰。由开始使用到淘汰失效这段时间，称为它的价值寿命。

在设计和研制一个新的技术系统时，诚然要尽量采用新技术，以提高系统的效能，但同时还必须考虑到，为此而付出的代价（成本）。因而必须在满足所要求的技术性能范围内，通过效能/成本比这一指标来全面权衡。

随着科学技术日益发达，一般研制的大系统技术复杂，研制周期长，而且更新淘汰快。如果一项工程任务拖的时间越长，所付出的代价就越大，甚至一个系统研制了十几年，当它进入鉴定时，技术已经陈旧落后，失去了它的使用价值，这时所花费的全部人力、物力和资金就失去了原有的意义。于是在系统工程中，提出了时间价值这一综合性指标来衡量系统的效果。

总之，由于现代科学技术的复杂性和外部条件的频繁变化，用直观的传统方法和单凭个人的经验来组织管理一个大规模复杂系统的研制已经不行了。为了保证系统的整体性，就需要运用现代信息系统和系统工程的方法来统盘地考虑这个问题。

系统工程还要考虑把大系统的研制过程作为一个整体，即分析整个过程是由哪些工作环节所组成的，而后进一步分析各个工作环节之间的信息，以及信息的传递路线、反馈关系等，从而编制出系统研制全过程的模型，把全部过程严密地联结成一个整体，全面地考虑和改善整个工作过程，以便能实现综合最优化。

2. 技术应用上的综合化 系统工程致力于综合运用各种学科和技术领域内所获得的

成就，这种研究能使各种技术相互配合而达到整体系统的最优化。一般大规模的复杂系统几乎都是一个技术综合体。所谓技术的综合运用，并不是将各种技术进行简单的堆砌，而是从系统的总目标出发，将各有关的技术协调配合，综合运用。系统工程师对于系统环境的分析，对于各项技术理解的深入程度和运用能力，研究设备的完善情况，组织管理的效能以及系统工程师本身的经验和创造性才能等因素，决定了综合应用各项技术的能力和水平。人们常常可以看到，具有同样效能的工程系统，所采用的技术方案迥然不同，所花费的代价相差很大，这表明研究各种技术的综合应用是一门很重要的学问。

综合应用各项技术的另一个重要方面，是创造新型的技术综合体。但是，一个新型技术综合体的出现有时并不一定是某一基础理论的突破，而是综合应用各项技术的成果。例如，一个电子计算机控制的步进加热炉—热连轧机组和科学管理的生产系统，是当代先进的技术综合体，但这里并没有什么重大基础理论的突破，而只是综合应用自动控制技术、电子计算机技术、液压技术和管理科学的成果所获得的成就。

对系统的各组成部分之间的关系，越是揭示得清晰、深刻、精确，就越能得到最佳的综合应用成就。在研究综合运用各项技术的过程中，为了能把很多分析因素数量化，并能显示出那些不容易直觉观察到的各种因素之间的相互关系，我们将广泛采用概率论、数理统计学、模型和模拟技术、最优化技术等数学方法，并运用电子计算机进行数据处理和分析计算，从而能够作出最优决策，使人们能够深刻地、全面地把握所研究的对象，并高速地完成预定目标的各种系统工程任务。

当前出现的一个新的发展趋势是，一个大规模的复杂系统往往不是一个单纯的技术系统，而是涉及到许多社会的、经济的因素，构成一个复杂的社会-技术系统，或社会-经济系统，促使自然科学、技术科学和社会科学日益紧密地结合在一起。这就是系统工程在解决社会-技术系统时所表现出来的一个重要特点。

3. 管理科学化 一个复杂的大规模工程往往有两个平行过程，一个是工程技术过程，一个是对工程技术的控制过程。后一过程包括规划、组织、控制工程进度，对各种方案进行分析、比较和决策，评价选定方案的技术经济效果等，统称之为管理。管理工作对促进科学技术的发展，提高效率和合理利用资源等有着十分重要的意义。只有科学的管理，才能充分发挥技术的效能。由于现代化的设备系统具有高度复杂性和综合性，往往需要很多单位和大量各行各业的人员参加，并使用多种技术，投入巨额的资金、材料和设备，这就使得仅凭经验的、直观的、小生产方式的管理方法根本不能适应。管理不善将会大大拖延研制周期，使工程的质量得不到保证，甚至由于管理上的失策，而使工程任务受到重大损失。因此，管理的科学化成为系统工程极为重要的一个研究方面。

英国著名科学家贝尔纳把科学的组织和管理称为“科学中的科学”。他认为现在科学的发展、科学成果的应用以及科技人才的成长，都还没有达到应有的水平，主要问题就在于组织管理跟不上发展形势的缘故。

二十世纪中期的科学技术革命，为再一次根本改变世界的科学图景提供了可能性。在这一时期出现了两门具有重要意义的学科——控制论和系统科学。它们在现代科学发展中，正在发挥日益重大的作用。现代科学广泛应用的系统方法，是符合辩证唯物主义原理的，系统方法有利于科学地阐明并认清系统对象所具有的特征。系统方法的应用有可能导致某些学科的重大突破，并将在我国社会主义建设中显示出巨大的效果，创造出极大的物质财富。

§1-3 系统工程的发展过程

一、历史的回顾

社会实践的需要是科学技术发展的动因。系统工程作为一门学科，虽形成于本世纪五十年代，但系统工程方法的运用则可以追溯到两千多年以前。在古代工程技术杰出的事例中，如埃及的金字塔、中国的都江堰水利工程等，就已经运用了系统工程的某些概念，或者说孕育着系统工程的一些因素。如都江堰由“鱼嘴”岷江分洪、“飞沙堰”分洪排沙工程和“宝瓶口”引水工程这三项工程巧妙结合而成，分导了汹涌激流的岷江，使它驯服地有节制地灌溉成都大平原，还建立了控制流量和养护修理制度，至今仍发挥效益。其规划、设计、施工的科学水平和创见，按今天系统工程的观点来看，仍不愧是一项杰出的大型工程建设。但是由于封建制度的束缚，这些先进的思想和方法长期以来得不到发展。近代的系统工程可以说起源于美国。二十世纪以来，由于社会生产力的高度发展，现代科学技术活动规模的迅速扩大，工程技术复杂程度的不断提高，使自然科学、技术科学以及社会科学之间的整体性联系这一特点日益突出。五十年代中期，系统工程正是适应和加强这种整体性联系而创立的一门崭新的边缘学科。

(1) 本世纪四十年代开始，美国等国家为完成规模巨大的复杂工程和科研生产任务，开始运用系统观点和方法处理问题。这些社会实践的成果为系统工程理论体系的形成准备了条件。

(2) 由于军事上的需要，运筹学得到广泛的应用和发展，并在大规模军事系统中取得显著效果。它的任务是探索在一些确定的或不确定的条件下，使研究对象的目标函数具有最优解的方法和程序。运筹学的发展为系统工程提供了重要的理论基础。

(3) 四十年代末期，美国学者创立了控制论，此后，自动控制技术在深度和广度上都得到很大的发展。人们对系统的重要属性（信息和反馈）逐步加深了认识，由此形成的大系统理论成为系统工程的又一重要的理论基础。

(4) 电子计算机的出现为系统工程提供了强有力的运算工具和信息处理手段，并且促进了运筹学和大系统理论的广泛应用，成为实施系统工程的重要物质基础。

(5) 随着现代工业的发展，工业产品日益复杂化，产品零部件的数量日益增加，因此，重要的不仅是每个零部件的性能，更重要的是系统整体的可靠性，这就使系统工程显得更加重要。虽然系统工程来源于工程上的概念，但作为系统来考虑问题的思考方法不限于工程方面，而是通用于整个社会。例如现代城市建设涉及交通、能源、环境保护、消防、供排水系统等，必须把整个城市当作一个系统来考虑它的发展规划。因此，不论现代科学技术问题还是社会问题，由于涉及的技术领域日益复杂化，要解决一个领域里出现的问题，必须考虑其它有关领域的影响，必须充分发展各学科之间的协作，才有可能奏效。这是系统工程得到广泛应用和迅速发展起来的又一重要原因。

这个期间系统工程方面重要的成果之一是，创造了PERT确定型网络技术（计划评审技术）。把计算机用于计划工作，促进了整个系统研制进展，推广了它的应用。我国在六十年代初期也进行了开创性的类似试验，并在建筑施工、交通运输等方面也进行了推广（当时称之为“统筹法”）。

(6) 六十年代以后，对于复杂的大系统问题，人们设想采用分解与积聚两个过程而形成多级递阶控制结构。这种控制方式的基本思想，就是将整体控制问题分解成若干子系

统，然后按照整体控制目标，协调各个系统的运行，以达到整个系统的最优运行。

由于计算机的广泛应用，如何解决人一机关系就成为一个崭新的课题。人们在作出决定时往往带有思维过程中固有的模糊和不严格性，但计算机却只能接受确切的命令。这就需要研究消除“人-机”语言障碍的方法，否则再好的方案、理论和运算工具仍难于发挥作用。1965年美国学者查德(Zadeh)提出了“模糊集合”(Fuzzy Sets)的概念，奠定了“模糊理论”的基础。模糊集合理论给人的思维过程以一种严格的数学形式。由于人的智能有一种特殊的性质，使得它能在模糊的环境中进行推理，并对照需要精确和定量的数据，去作出只有不确切数据的决策。由于模糊数学的创立和发展，计算机模仿人的智能的能力也不断地发展。

(7)七十年代以来，系统工程的应用已远远地超出了传统工程的概念，进入到解决各种复杂的社会-技术系统和社会-经济系统的最优控制、最优管理阶段。以跨国的北欧电网为例，电网内部可调容量达4500万千瓦左右。在电网中有水电、火电和核电等各种能源形式。这样规模庞大、复杂的输配电网必须协调，发电、供电建设和最佳运行方式也需协调。而这种现代复杂的电力系统与电厂的设计，需要上百种专业的配合，需要综合考虑国家的自然地理、工业布局、能源条件、环境保护以及人口的状态和分布等复杂因素，然后作出最合理的规划和设计布局。这样庞大的系统，如果仅仅从一个专业技术角度去解决最优化，则不一定能使得电力系统总体的技术经济效果达到合理和最优。因此如何协调解决大系统的最优化，就是当代系统工程的任务。

当今的世界正进入一个信息化的时代，大量信息存在于系统之中，需要通过对信息的处理实现最佳选择。由于现代化社会有多种选择的可能性，要进行合理的选择就需要最佳的选择手段，这就是系统方法。当代大型计算机和通信卫星的应用，给系统工程带来了飞跃发展，使系统工程研究的范围也扩展到包括技术的、自然的以及社会的复杂大系统。

(8)七十年代以来，计算机在向巨型发展的同时，也向微型化发展，这是实现分散控制系统和分散信息处理非常重要的物质条件。出现了多级计算机管理、控制和信息处理系统。由于广泛采用微型计算机使系统机能分散，这就进一步提高了大系统的灵活性、扩展性，提高了系统的功能和效率。

近年来，系统工程的研究范围已由传统的工程领域扩大到工农业、交通运输、能源等部门的规划、布局、技术政策等以及城市建设、水利资源利用、环境生态系统、国民经济发展规划等社会经济领域。

目前，可以认为系统工程已经发展到了初步成熟阶段。但是系统工程尚在继续发展中，表现在它的应用领域不断扩大。如工业发达国家在发展系统化管理的进程中，出现了一个新的研究领域，人们称之为战略研究。即从全局、总体和长远的观点来研究大系统发展的战略方向，确定每一个阶段的战略目标，根据对未来的预测作出战略决策，制订战略规划，并研究今天的决策对未来的影响。

高度工业化和科学技术现代化的社会实践，突出了长远规划对完成目标的重要性，这就需要有能力来认识未来的需要，并能够客观地估价科学技术和经济的潜力及其对社会发展的影响。

开展战略研究必须进行科学技术预测、经济预测和社会预测等综合性的研究工作。

我国在六十年代初期就采用了计划评审技术，建立了总体设计组织，对大规模复杂系

统进行协调指挥，也取得了显著效果。六十年代中期在化工、炼油和电力系统中开始研究计算机在线控制。1977年开始推广系统工程的研究和应用，并着手培养系统工程专业的研究生。近年来，国内一些工业企业已着手试用计算机来建立管理信息系统。此外，在电力系统规划、能源规划、区域经济规划、人口控制理论等方面，也相继开展了研究工作。

总之，系统工程的发展，根据各个国家的具体情况，其发展道路亦有所不同。例如，美国就是从运筹学的基础上发展起来的，日本则是从美国引进系统工程的理论通过质量管理而发展起来的，而苏联则是在控制论的基础上发展起来的。尽管发展道路不同，但它们的目标却是一致的，即应用各种先进的科学技术和方法，谋求系统总体的最优化。

二、系统工程树

从学科的发展形成过程，我们可以将系统工程的科学来源表示为图1-1的形式。

这是一棵形象化的树。作为树干的系统工程的两个主根是系统论及运筹学。前者提供了系统观点对一般系统的构成与行动特征的描述。后者则从数学的角度，尤其是最佳化的方面提供了分析处理的工具与方法。信息论与控制论，对系统行为中的两个主要内容“信息流动”和“控制”进行了普遍性的探讨。英国学者图灵提出的图灵机的基本概念，对“自动化系统”的讨论有基础性的意义。计算机则是系统工程得以成长壮大的重要因素。

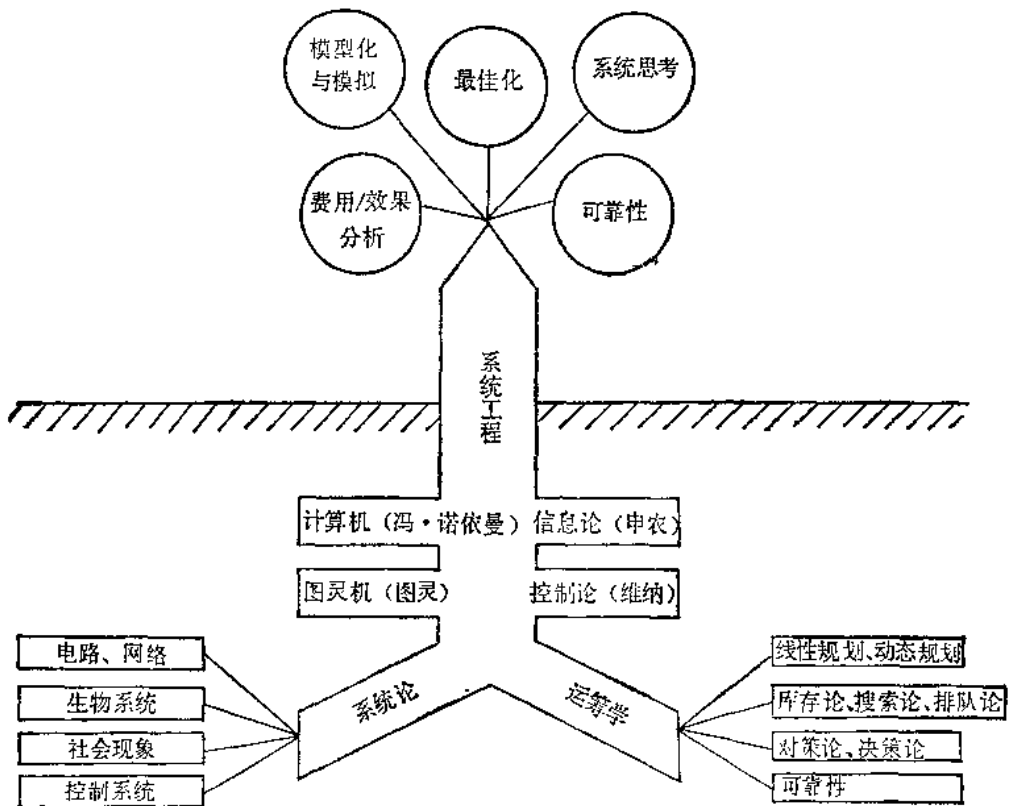


图 1-1 系统工程树

当前，在我国实现社会主义现代化的过程中，迫切需要从社会主义建设的整体出发，全面规划，统筹安排，力求用有限的资金和先进的技术，实现宏伟的四个现代化的历史任务。毫无疑问，积极开展系统工程的研究并广泛推广应用，具有十分重要的现实意义。

第二章 系统分析

系统工程的研究对象是组织化的大系统。这种大系统的特征之一是：在系统中存在着许多矛盾的因素和不确定的因素。因此，对于这样的大系统，如果不采取相应的措施就对其有关的重大问题进行正确的决策，是很难想象的。实践证明，要最优地进行系统设计，对系统有关的重大问题进行正确的决策，其关键步骤就是系统分析。所以说，系统分析在整个系统设计过程中起着极其重要的作用。

§ 2-1 系统分析的基本概念和作用

一、系统分析的基本概念

系统分析不同于一般的技术经济分析，它必须从系统的总体最优出发，采用各种分析工具和方法，对系统进行定性的和定量的分析；不仅是分析技术经济方面的有关问题，而且还分析包括政策方面、组织体制方面、信息方面、物流方面等各个方面的问题。系统分析没有特定的技术方法，因为系统分析方法必须随着分析对象的不同、分析问题的不同而不同。那么，究竟什么叫做系统分析呢？在这里，我们把它的基本概念作如下的叙述。

所谓系统分析，就是这样一个有目的有步骤的探索和分析过程，即为了给决策者提供直接判断和决定最优系统方案所需的信息和资料，系统分析人员使用科学的分析工具和方法，对系统的目的、功能、环境、费用、效益等进行充分的调查研究，并收集、分析和处理有关的资料和数据，据此建立若干替代方案和必要的模型，进行仿真试验；把试验、分析、计算的各种结果同早先制订的计划进行比较和评价，最后整理成完整、正确与可行的综合资料，作为决策者选择最优系统方案的主要依据。

由此可知，系统分析的目的在于，通过分析比较各种替代方案的费用、效益、功能和可靠性等各项技术经济指标，得出决策者定下正确决心所必需的资料和信息，以便最后获得最优系统方案。系统分析的目的可以用图2-1来表示。

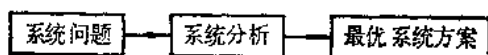


图 2-1 系统分析的目的

系统分析，实质上就是在明确系统目的的前提下，来分析和确定系统所应具备的功能和相应的环境条件；抓住系统的某些需要决策的关键问题，根据其性质和要求，相应地建立有关模型，再根据需要就有关模型进行仿真试验；将所得信息通过反馈，从而使系统设计所需的资料和信息不断完善和充实，以保证最优方案的选择。

系统分析的工具，主要是现代电子计算机，通过它来完成系统分析所需大量信息的收集、处理、分析、汇总、传递和贮存等任务。其方法主要是最优化方法，例如规划论、排队论等等。通过最优化方法来求解系统的各种模型的解，通过对解的评价，为系统设计方案的决定提供足够的信息和依据。

二、系统分析的作用

在说明系统分析在系统建立过程中的作用之前，先来看一下系统分析所处的位置是很有必要的。从图2-2系统建立过程的框图中可以看到，整个系统的建立过程可以分为三个阶段。在系统规划阶段中，主要的任务是定义系统的概念，明确建立系统的必要性。在此基础上明确目的和确定目标，同时，提出系统应具备的环境条件以及估计系统所需要的各种制约条件；最后制订系统开发计划书。计划书中除包含上述内容外，还有系统建成的期限，系统投资限额等内容。

第二阶段为系统设计阶段。在这一阶段中，首先是对系统进行概略设计，其内容主要是各种替代方案的建立。此后进行系统分析，分析的项目包括目的、替代方案、费用和效益、模型及评价基准等。在系统分析的基础上确定系统设计方案，据此对系统进行详细设计。

第三阶段为系统制造和运行阶段。首先是对系统的设计中一些与系统有关的关键项目进行试验和试制，在此基础上进行必要的改进，并进行工艺设计。然后正式投入制造、安装、调试，同时讨论系统运行方法和维护方法。最后根据已制订的运行、维护方法，投入运用，在运行的基础上讨论系统的调整和改进工作。

由此可见，系统分析在整个系统建立过程中处于非常重要的地位。它的任务首先是要分析和确定系统规划阶段的有关项目，如对系统概念的定义、分析和确定，对系统目标进行分析和确定。在此基础上对概略设计中有关替代方案进行分析，根据分析结果，来决定方案，然后进行详细设计。因此，系统分析起到承上启下的作用，特别是当系统中存在着不确定的相互矛盾的因素时，更需要建立相应的模型和进行仿真试验，为进一步决策提供必需的信息和依据；尤其是对一些技术比较复杂的、投资费用比较大的、建设周期比较长的系统，系统分析是必不可少的一环。只有这样，才能保证获得最优的系统设计方案，以避免技术上的大量返工和经济上的重大损失。

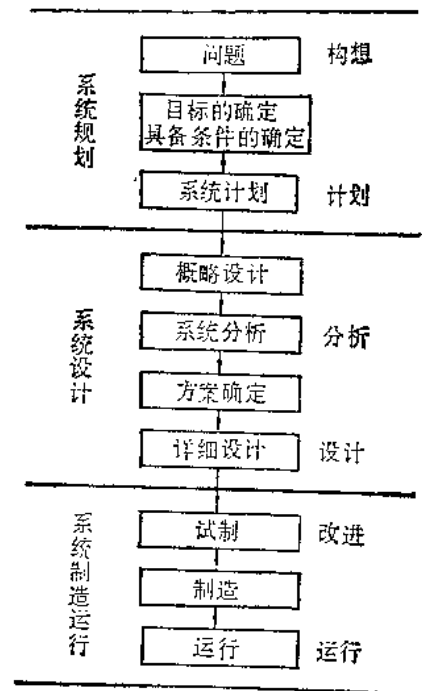


图 2-2 系统建立过程的框图

§ 2-2 系统分析的要素和步骤

一、系统分析的要素

系统分析的要素有目的、替代方案、费用和效益、模型、评价基准等。现分别说明如下：

1. 目的 为了正确获得决定最优系统方案所需的各种有关信息，对系统分析人员来说，最初的也就是最重要的任务就是要充分了解建立系统的目的和要求。系统的目的和要求既是建立系统的根据，也是系统分析的出发点。也就是说，只有当系统分析人员能正确地全面地理解和掌握系统的目的和要求，才能进一步来分析系统的目的和要求是否确切、完整

和合理。也只有这样，才能为今后的分析工作奠定良好的基础。

2. 替代方案 在概略设计阶段，可以制订出为达到同一目的的各种不同替代方案。例如，设计一个钢管生产的加热系统，可以设计斜底加热炉系统，也可以设计环形炉系统，在条件许可的情况下也可以采用快速加热炉的方案。一般情况下，当多种方案各有利弊时，究竟选用何种方案为最优，这就需要对这些方案进行分析和比较。

3. 费用和效益 建立一个系统，都需要有大量的投资费用，而一旦系统建成后就可以获得一定的效益。如果我们能把费用和效益都折合成货币形式比较，那么一般说来效益大于费用的设计方案是可取的，反之是不可取的。总之，在多数情况下，费用和效益的分析与比较是决定方案取舍的一个重要标志。

4. 模型 模型是描述实体系统的映象。在尚未建立实体系统的情况下，我们可以凭借一定的模型来有效地求得系统设计所需的参数，并据此确定各种制约条件。另外，根据需要建立的模型可以用来预测各个替代方案的性能、费用和效益，以利各种替代方案的分析和比较。总之，建立在系统分析时所必需的各种模型，是整个系统分析过程的重要一环。

5. 评价基准 所谓评价基准，就是确定各种替代方案优先选用顺序的标准。评价基准一般根据系统的具体情况而定。例如，在评价系统的费用 C 和效益 E 时，评价基准可以从下述三种基准中选用，即：

(1) 以各替代方案效益相同为基准，选择费用最小的方案为最优方案。即 $E_1 = E_2 = \dots = E_n$ 时，如 $C_i \rightarrow C_{\min}$ ，则方案 i 为最优方案。

(2) 以各方案费用相同为基准，选择效益最大的方案为最优方案。即 $C_1 = C_2 = \dots = C_n$ 时，如 $E_i \rightarrow E_{\max}$ ，则方案 i 为最优方案。

(3) 以效益费用比为基准，选择效益费用比最大的方案为最优方案。在一般情况下，为了取得最大效益，其费用也要相应地增加，但如果效益增加比费用增加来得快，则比率就大。如 $\frac{E_i}{C_i} \rightarrow \max$ ，则方案 i 为最优方案。

二、系统分析的步骤

系统分析的步骤可以概括如下：

1. 系统目的分析和确定 已如上述，该步骤之作用在于为今后的分析工作打下良好的基础，为模型化取得必需的信息。分析和确定对象系统的目的和目标，分析和定义系统需要的功能，进而以这些数据作出概略模型，进行仿真，据此研讨成功的可能性，借以得到模型化所需的概略技术条件。

2. 模型化 模型化是系统分析过程中比较重要、工作量比较大的一个步骤。模型化的作用是为对象系统建立所需的各种模型。根据不同目的可以作成各种不同模型。

3. 系统最优化 系统最优化的作用在于运用最优化的理论和方法，对若干替换模型进行最优化，求出几个替换解。

4. 系统评价 根据最优化所得到的替换解，考虑前提条件、假定条件和约束条件，在经验和知识的基础上决定最优解，从而为选择最优系统设计方案提供足够的信息。

以上具体步骤的流程框图如图2-3所示。