

高等学校试用教材

系统工程

西安交通大学汪应洛 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校试用教材

系统工程

西安交通大学汪应洛 主编

机械工业出版社

系 统 工 程

西安交通大学 汪应洛 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $12 \frac{3}{4}$ · 字数 307 千字

1986年6月北京第一版·1986年6月北京第一次印刷

印数 00,001—15,700 · 定价 2.20 元

*

统一书号: 15033·6273

前 言

本书是根据1983年4月在杭州召开的机械工业管理工程类专业教材编审委员会制订的教学计划和《系统工程》课程教学大纲编写的。

系统工程是在二十世纪中期才开始兴起的一门边缘性工程技术。它把自然科学和社会科学中的一些思想、理论、方法等根据系统总体协调的需要,有机地联系起来。当前,由于科学技术的进步,以及现代管理科学的迅速发展,作为高等学校管理工程专业,需要从系统总体出发来观察和处理问题,需要具备系统工程的有关知识。《系统工程》这本书就是为这一目的而编写的一本教材。

本书内容共分五章。第一章主要阐述系统和系统的概念,系统工程的发展过程和应用情况;第二章阐述系统分析与系统设计的概念、内容与方法;第三章阐述系统模型和仿真的基本方法;第四章阐述决策分析的基本理论和方法;第五章阐述战略研究的意义、内容和方法及其举例。

本书第一章、第五章由西安交通大学汪应洛编写;第二章由哈尔滨工业大学姚德民编写;第三章由上海机械学院赵永昌编写;第四章由西安交通大学陶谦坎编写;汪应洛担任主编。

本书由中国科学院学部委员、上海交通大学张鍾俊教授担任主审。上海交通大学系统工程研究所王浣尘副教授、中国科学院系统科学研究所副研究员顾基发以及上海机械学院的车宏安、肖承忠同志参加了审稿会。机械工业部教材编辑室的责任编辑出席了会议。

本书为高等学校机械工业管理工程类专业的试用教材。也可作各级管理人员、技术人员和企业领导干部的培训教材和自学参考书。

系统工程涉及的知识面非常广泛。但限于我们的水平,书中不妥和错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

目 录

第一章 系统与系统工程	7	§ 3-1 系统模型	65
§ 1-1 系统的概念	7	§ 3-2 模型的构造	66
§ 1-2 系统的分类	3	§ 3-3 系统工程中常用的一些模型	67
§ 1-3 系统工程是一门新兴的边缘 科学	4	§ 3-4 系统仿真	108
§ 1-4 系统工程的发展过程	9	第四章 决策分析	120
§ 1-5 系统工程的应用	12	§ 4-1 决策分析的基本概念	120
第二章 系统分析与系统设计	16	§ 4-2 决策分析的类型	120
§ 2-1 系统生命周期的概念和阶段 划分	16	§ 4-3 风险型决策分析	124
§ 2-2 系统分析的意义和概念	17	§ 4-4 灵敏度分析	135
§ 2-3 系统分析的要素和步骤	19	§ 4-5 信息的价值	136
§ 2-4 系统环境分析	21	§ 4-6 效用理论	140
§ 2-5 系统目标分析	28	§ 4-7 多目标决策	146
§ 2-6 系统结构分析	33	§ 4-8 决策辅助系统	165
§ 2-7 系统模型化和最优化	39	第五章 战略研究	169
§ 2-8 系统评价	42	§ 5-1 战略研究的重要意义	169
§ 2-9 系统设计	50	§ 5-2 战略研究的内容	169
§ 2-10 系统设计步骤及实例	56	§ 5-3 战略研究的方法论	177
第三章 系统模型与仿真	65	§ 5-4 战略研究应用举例——某省能源 基地发展战略的研究	182
		参考文献	197

第一章 系统与系统工程

§ 1-1 系统的概念

半个多世纪以来，在国际上“系统”作为一个研究对象引起了很多人的注意。“系统”吸引了众多领域的专家从事研究和应用，并逐步形成了一门新兴的学科。

系统这一概念来源于人类长期的社会实践，但是由于古代科学技术不发达，系统这个概念一直没有受到应有的重视。人类认识现实世界的过程，是一个不断深化的过程。在古代，由于缺乏观测和实验手段，科学技术理论又很贫乏，所以对很多事物只能看到一些轮廓的表面现象，只见森林，不见树木。随着科学技术的进展，理论丰富了，工具也有了，认识逐步深化了，但受到世界观局限性的影响，往往又只看到一些局部现象而不能纵观整体，以致只见树木而不见森林。只有当认识不断深化，在对个体，对局部有了更多、更深的了解以后，再把这些分散的认识联系起来，就又看到了事物的整体，以及构成整体的各个部分之间的相互联系，而形成了科学的系统观。

朴素的系统概念，在古代的哲学思想中得到了反映。古希腊的唯物主义哲学家德谟克利特（Democritus 约公元前 467~370）就曾论述“宇宙大系统”，他在物质构造的原子论基础上，认为世界是由原子和虚空组成的，原子组成万物，形成不同系统层次的世界。古希腊的伟大学者，亚里士多德（Aristoteles 公元前 384~322）关于整体性、目的性、组织性的观念，关于构成事物的“四因”（目的因、动力因、形式因、质料因）的思想，以及关于事物的种属关系的思想等，可以说是古代朴素的系统观念。我国春秋末期思想家老子就曾阐明自然界的统一性。用自发的系统概念考察自然现象，这是古代中国和希腊唯物主义哲学思想的一个特点。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，把宇宙作为一个整体系统来研究，探讨其结构、变化和发展，以认识人类赖以生存的大地所处的位置和气候环境变化规律对人类生产和生活的影响。如在《晋书·天文志》中记载了出现于殷周之际的盖天说，曾直观地认为“天圆如盖，地方如棋局”。认为“浑天如鸡子，天体圆如弹丸，地如鸡子中黄，孤居于内，天大而地小”。西周时代，就出现了用阴阳二气的矛盾来解释自然现象，产生了“五行”观念，认为金、木、水、火、土是构成世界大系统的五种基本物质要素。在东汉时期张衡提出了“浑天说”。现代耗散结构理论的创始人 I. 普里高津（I. Prigogine）在《从存在到演化》一文中指出：“中国传统的学术思想是着重于研究整体性和自发性，研究协调和协和”。但是，当时却缺乏对这一整体各个细节的认识能力，正如恩格斯在《自然辩证法》中指出：“在希腊人那里——正因为他们还没有进步到对自然界的解剖、分析——自然界还被当作一个整体而从总的方面来观察。自然现象的总联系还没有在细节方面得到证明”。^①直到十五世纪下半叶，近代科学开始兴起，近代自然科学发展了研究自然界的独特的分析方法、包括实验、解剖和观察，把自然界的细节从总的自然联系中抽出来，分门别类地加以研究。这就是在哲学史中出现的形而上学的思维方法。十九世纪上半期，自然

^① 《马克思恩格斯选集》第三卷，第468页，人民出版社1972年第1版。

科学取得了伟大的成就，特别是能量转化、细胞和进化论的发现，使人类对自然过程的相互联系的认识有了很大的提高。恩格斯早在1886年就对系统的哲学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。必须先研究事物，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”。^①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，而是过程的集合体”。^②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，它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。马克思、恩格斯的辩证唯物主义认为，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所形成的统一整体。这也就是系统概念的实质。当然，现代科学技术对于系统思想的发展是有重大贡献的。社会实践活动的规模日益扩大和日趋复杂，要求系统方法不仅能定性，而且能定量，促进了系统方法的定量分析与定性分析相结合，成为一套具有数学分析、能够定量处理系统各组成部分之间关系并与定性分析有机结合，相辅相成的科学方法；其次在于为量化系统方法的实际应用提供了强有力的计算工具和信息处理的枢纽——电子计算机。

总之，系统思想是进行分析与综合的辩证思维工具，它在辩证唯物主义那里取得了哲学的表达形式，在运筹学、控制论、各门工程学和社会科学等学科那里获得了定量与定性结合的表述手段，在系统工程那里获得了丰富的实践内容。

一、系统的定义

系统 (Systems) 是具有特定功能的、相互间具有有机联系的许多要素 (Element) 所构成的一个整体。在韦氏大辞典 (Webster 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”。一般系统论的创始人，L. V. 贝塔朗菲 (L. V. Bertalanffy) 把“系统”定义为“相互作用的诸要素的综合体”。美国著名学者阿柯夫 (Ackoff R. L.) 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。

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，而这些特性或行为是它的任何一个部分都不能做到这一点。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，如果硬把系统拆开，那么它将失去其原来的性质。

在物质世界中，一个系统中的任何部分可以被看成一个系统，而每一个系统又可以成为一个大规模系统中的一个部分。在现代社会，人们倾向于把事物看成一个大的系统整体的一

^① 《马克思恩格斯选集》第四卷，第240~241页，人民出版社1972年第1版。

^② 《马克思恩格斯选集》第四卷，第239~240页，人民出版社1972年第1版。

部分，而不是把整体拆开成许多互不联系的局部。这是一种综合的思想方法，即系统方法。

二、系统的特性

一般系统都具有下述特性：

1. 整体性 系统是由两个或两个以上的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。系统具有集合性，它是为达到系统基本功能要求所必须具有的组成要素的集合。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，但作为整体都不具有某种良好的功能，也就不能称之为完善的系统。系统是一个复杂的整体，为了便于管理和控制，往往把系统整体分解成一个多层次结构，使系统具有阶层性，即系统要素及其相互关系在功能分布和执行中的位置和从属关系。为了保证系统的整体性，还必须充分注意系统的各个层次和各个组成部分的协调与连接，并按照系统整体目标，提高系统的有序性，尽量避免系统的“内耗”，提高系统整体运行的效果。

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、相互制约的特定关系。例如，对于电子计算机系统来说，各种运算装置、控制装置、输入输出装置等各个硬件和操作系统、程序等各种软件都是构成要素，它们之间通过特定的关系，有机结合在一起，就形成一个具有特定功能的计算机系统。

3. 目的性 通常系统都具有某种目的，要达到既定的目的、系统都具有一定的功能，而这正是区别这一系统和那一系统的标志。

4. 环境适应性 任何一个系统都存在于一定的物质环境之中，因此，它必然也要与外界环境产生物质的、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各要素之间的变化。系统必须适应外部环境的变化。

§ 1-2 系统的分类

在自然界和人类社会中普遍存在着各种不同性质的系统。例如，宇宙中的太阳系是由许多行星和卫星所组成。在人类社会中则有社会经济系统、军事系统等。为了对系统的性质加以研究，就必须对系统存在的各种形态加以探讨。系统形态的分类是：

一、自然系统和人造系统

自然系统就是说它的组成部分是自然物（矿物、植物、动物）所自然形成的系统，像海洋系统、矿藏系统、生态系统等。

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，造出各种机器所构成的各种工程系统。

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，改造了的自然系统。随着科学技术的发展，出现了越来越多的人造系统。但是，目前应该引起重视的是，随着许多人造系统的发展，破坏了自然生态系统的平衡，造成严重的环境污染，甚至出现了威胁人类生存的局面。近年来系统工程愈来愈注意从和自然系统的关系中，探讨、研究人造系统。

二、实体系统与概念系统

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、程序等概念性的非物质实体所构成的系统称为概念系统，如管理系统、教育系统。

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物质基础，而概念系统往往为实体系统提供指导和服务。

三、动态系统和静态系统

动态系统就是系统的状态变量是时间函数，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行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。

§ 1-3 系统工程是一门新兴的边缘科学

用定量化的系统思想和方法处理大型复杂系统的问题，无论是系统的设计和组织建立，还是系统的经营管理，都可以统一地看成是工程实践。统称为系统工程。

一、在科学技术的体系结构中，系统工程属于工程技术

由于系统工程是一门新兴的技术，尚处于发展阶段，还不够成熟，至今还没有统一的定义。现列举国内外学者对系统工程所作的解释，为我们认识“系统工程”提供线索和参考。

1. 1978年钱学森同志指出：“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”。“系统工程是一门组织管理的技术”。

2. 1967年美国学者切斯纳（Chestnut）指出：“系统工程认为虽然每个系统都是由许多不同的特殊功能部分所组成，而这些功能部分之间又存在着相互关系，但是每一个系统都是完整的整体，每一个系统都要求有一个或一定数量的目标。系统工程则是按照各个目标进行权衡，全面求得最优解的方法，并使各组成部分能够最大限度地互相适应”。

3. 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”。

4. 1977年日本学者三浦武雄指出：“系统工程与其它工程学不同点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科学。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的方向把它们组织起来，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”。

由于国际学术界往往把系统分析（广义的）作为系统工程的同义词来理解。我们列举几个国家的大百科全书中对系统分析的解释作为参考。

《美国大百科全书》系统分析是研究相互影响的因素的组成和运用情况。这些因素及其相互的影响完全可能是抽象的，如使用数学方法；也可能是具体的，如运输系统、工业生产系统等。系统分析显著的特点是完整地而不是零星地处理问题，这就要求人们考虑各种主要的变化因素及其相互的影响，运用这种方法常常可以更好地、全面地解决问题。因此，系

统分析的意思就是用科学和数学方法对系统进行研究和运用。

美国《麦氏科学技术大百科全书》系统分析是运用数学方法研究系统的一种方法。

系统分析的概念是，对研究对象（系统）建立一种数学模型，按照这种模型进行数学分析，然后将分析的结果运用于原来的系统。

日本《世界大百科年鉴》系统通常是指作用于一个共同目的的两个以上要素的集合体，但它并不单纯是几个要素的集合，而是从输入到输出的整个过程。

系统分析是人们为了从系统的概念上认识社会现象，解决诸如环境问题，城市问题等复杂问题而提出的从确定目标到设计手段的一整套方法。系统分析还可以作为系统工程的同义词来理解。系统分析的用处是：通过明确一切和问题有关的要素同实现目标之间的关系，提供完整的资料，以便决策者选择最合理的解决方案。

由于复杂的大系统受到复杂的社会、经济和技术因素的影响，因此，分析过程中就必然夹杂决策者个人的价值观和对变化不定的未来的主观臆断或理性判断。这样，从方法论上看，系统分析不仅需要计算，还需要依据直观和经验进行判断。从这种意义来说，系统分析的方法既近似科学性，又有某种艺术性。

综上所述，系统工程是以研究大系统为对象的一门跨学科的边缘科学。它是把自然科学和社会科学中的某些思想、理论、方法、策略和手段等根据总体协调的需要，有机地联系起来，把人们的生产、科研或经济活动有效地组织起来，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、设计、制造和服务，从而达到最优设计、最优控制和最优管理的目标，以便最充分地发挥人力、物力的潜力，通过各种组织管理技术，使局部和整体之间的关系协调配合，以实现系统的综合最优化。

也有人对系统的分析、综合、模拟、最优化等，称为狭义的系统工程。为了合理的进行系统的研制、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。

系统工程在自然科学与社会科学之间架设了一座沟通的桥梁。现代数学方法和计算机技术，通过系统工程，为社会科学研究增加了极为有用的定量方法、模型方法、模拟实验方法和优化方法。系统工程为从事自然科学的工程技术人员和从事社会科学的工作人员的相互合作，开辟了广阔的道路。

系统工程是一门工程技术，但它与机械工程、电子工程等其它工程学的某些性质不同。各门工程学都有其特定的工程物质为对象，而系统的对象，则不限于某种特定的工程物质对象，任何一种物质系统都能成为它的研究对象，而且还不只限于物质系统。它可以包括自然系统、社会经济系统、经营管理系统、军事指挥系统等等。由于它处理的对象主要是信息，在国外有些学者认为系统工程是“软科学”。

系统工程作为一门工程技术，就是要改造客观世界，并取得实际成果，这就离不开具体的环境和条件，避不开客观事物的复杂性，必然要同时运用多种学科的成果，要综合运用各门学科和各种技术的一门跨学科的科学体系。

我国著名的科学家钱学森提出了一个清晰的现代科学技术的体系结构，认为从应用实践到基础理论，现代科学技术可以分为四个层次：首先是工程技术这一层次，然后是直接为工程技术作理论基础的技术科学这一层次，再就是基础科学这一层次，最后通过进一步综合、提炼达到最高概括的马克思主义哲学。在此基础上，他又进一步提出了一个清晰的系统科学

结构。系统科学是由系统工程这类工程技术，系统工程的理论方法（象运筹学、控制论、信息论这类技术科学），以及它们的基础理论——系统学所组成的一个新兴科学技术。

二、系统工程的理论方法

人类的历史，是一个由必然王国向自由王国不断发展的历史，社会劳动的规模日趋扩大，使人们对统筹兼顾、全面规划、整体观念等原则从朴素的、自发的应用，提高到科学的、自觉的应用，把它们从经验提高到科学理论。系统工程的理论基础包括运筹学、控制论等科学理论。

运筹学的具体内容包括规划论（线性规划、非线性规划、动态规划、整数规划等），排队论，对策论，决策论，储存论。

1. 线性规划 经营管理工作中，往往碰到如何恰当地运转由人员、设备、材料、资金、时间等因素构成的体系，以便最有效地实现预定工作任务的问题。这一类统筹规划问题用数学语言表达出来，就是在一组约束条件下寻求一个目标函数的极值的问题。如果约束条件表示为线性等式及线性不等式，目标函数表示为线性函数时，就叫线性规划问题。线性规划就是求解这类问题的数学方法。

2. 非线性规划 如果在所要考虑的数学规划问题中，约束条件或目标函数不全是线性的，就叫非线性规划问题。非线性规划就是求解这类问题的数学方法。

3. 排队论 是一种用来研究某种公用服务系统的数学方法，在这个系统中服务对象何时到达以及其占用系统的时间的长短事先都无从确知。这是一种随机聚散现象。它通过对每个个别的随机服务现象的统计研究，找出反映这些随机现象平均特性的规律，从而在保持较好经济效益的前提下改进服务系统的工作能力。

4. 对策论 用来研究对抗性的竞争局势的数学模型，探索最优的对抗策略。在这种竞争局势中，参与对抗的各方都有一定的策略可供选择，并且各方具有相互矛盾的利益。对策论在系统工程中得到广泛的应用。

5. 决策论 用在经营管理工作中，对于系统的状态信息，是根据这些信息可能选取的策略以及采取这些策略对系统的状态所产生的后果进行综合研究，以便按照某种衡量准则选择一个最优策略。决策论的数学工具有动态规划、马尔柯夫过程理论等。

6. 储存论 在经营管理工作中，为了保证系统的有效运转，往往需要对元件、器材、设备、资金以及其它物资保障条件，保持必要的储备。储存论就是研究在什么时间、以什么数量、从什么供应渠道来补充这些储备，使得保持库存和补充采购的总费用最少。

控制论是二十世纪前半叶从自动控制技术成长起来的技术科学，是系统工程的理论基础之一。现代控制理论及其应用在深度和广度上都得到很大的发展。人们对系统控制的属性——信息和反馈，逐步加深了认识。形成了现代控制理论，其研究对象是规模庞大、结构复杂的各种工程的或非工程的大系统。如综合性自动化的钢铁联合企业、铁路自动调度系统及区域电力系统等。

近年来，不少学者着眼于对结构复杂、功能综合，具有多个目标，且涉及技术、经济、社会，生态等诸因素的大规模系统的研究，人们设想采用分解与集结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，协调各个子系统的运行，以达到整个系统的最优运行。由于近年来微型计算机的发展，又出现了分散控制系统理论。

系统工程的发展与管理科学的发展关系十分密切。马克思曾经说过：“一切规模较大的直接社会劳动或公共劳动，都或多或少地需要指挥，以协调个人的活动，并执行生产总体的运动——不同于这一总体的独立器官的运动——所产生的某种一般职能”。^①这是说，有了职能的分工，在一切规模较大的系统中，都有“总体”，都有“协调”问题，都需要科学的管理。管理科学萌芽于本世纪初，在第二次世界大战时期有了较大的发展。在一个工业企业中，人、财、物、设备、任务和信息是六个主要的要素，进行科学的管理首先要认识这六个要素都要满足一定的制约，从而能动地求得在制约条件下系统的最优运转。通过六个要素，把一个复杂的生产体系管理好，需要科学，而这门科学正是千百年来人们生产实践经验的总结——现代管理科学。在二十世纪五十年代以后系统工程与管理科学都得到了很大的发展，而且相互渗透，相互促进，相继得到了广泛的应用和发展。

三、系统工程方法论

系统工程思考问题和处理问题的方法，一般叫作系统方法论，它是在深入研究系统的概念，系统的基本构成及其各种形态的基础上，把分析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。系统工程具有自己独特的方法论，它的方法体系的基础就是运用系统思想方法和各种数学方法，控制理论，以及电子计算机等技术工具来实现系统的模型化和最优化，进行系统分析和系统设计。同时，系统工程也具有自己独特的应用程序体系。美国学者H.霍尔（H. Hall）最先提出了“三维结构体系”，作为系统工程方法论的基础。

三维结构体系是由时间维、逻辑维和知识维组成的一个立体的、跨学科的系统。

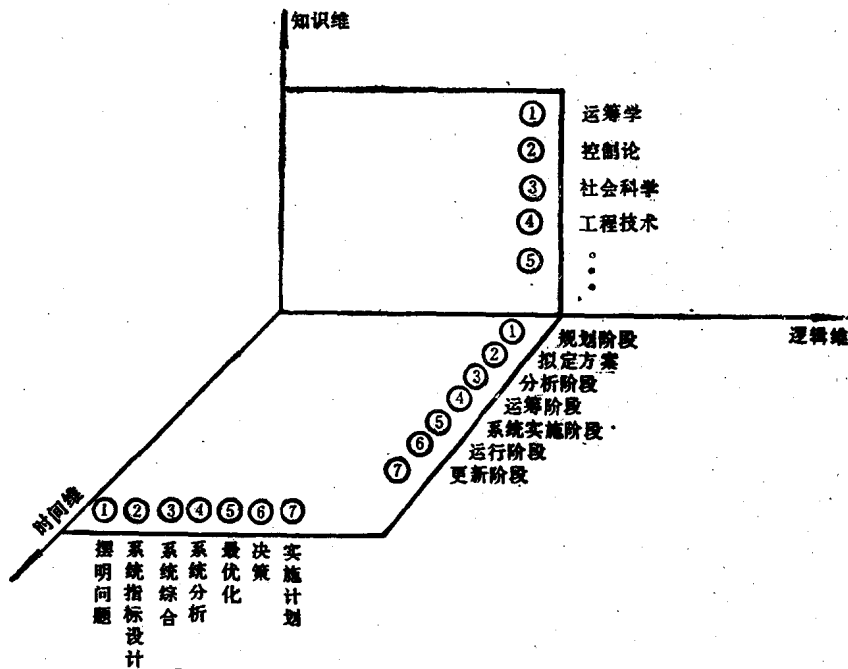


图1-1 三维结构体系简图

① 《马克思恩格斯全集》第二十三卷，第367页，人民出版社1972年第1版。

时间维 指系统从规划到使用、更新的全过程，按时间序列分成七个阶段：规划阶段（按设计要求提出目标和规划）；拟订方案阶段；系统分析阶段；运筹阶段；系统实施阶段；系统运行阶段；更新阶段（系统经过长时间运行后，进行更新换代或系统改造）。

逻辑维 指系统开发时所经历的工作程序体系。包括摆明问题（收集有关信息，说明问题的征结所在）；系统指标设计（确定解决问题的目标及评价标准）；系统综合（拟订达到目标可能采取的各种策略与方案）；系统分析（制订模型，进行综合研究）；最优化（选定各个策略的参数，使之最优地满足评价目标）；决策（对所分析的多种方案进行分析比较，选择其中最优化方案作出决策）；实施计划（组织实施已定的决策方案）。

知识维 指实行各个工作程序所需要的各种专业知识。

系统工程方法论的基本特点可归纳如下：

1. 研究方法上的整体性

系统工程方法论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，把系统作为它所从属的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。

基于系统整体化的概念建立起一系列衡量系统效果的综合性指标，如效能/成本比、造价/维护费用比等。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。

近年来，很多统计资料说明，一个大系统在长期的运行过程中，它的运行和维护费用高得惊人。因此，在设计一个大系统时，就要充分考虑它的一次制造费用和今后长期运行中维护费用的适当比例，即要考虑系统生命周期成本以保证它的整体经济性。

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，以便能实践综合最优化。

2. 综合应用多种技术，形成新的技术综合体。

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。要求从系统的总目标出发，将各种有关的技术协调配合、综合运用。系统工程工作者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工作者本身的经验才能和创新意识等因素，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，具有同样效能的系统，所采用的技术方案迥然不同，所化费的代价相差很大，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。例如登月卫星、激光武器等都是当代新的技术综合体。但是，一个新型的技术综合体的出现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。阿波罗登月飞船的总设计师就认为，这项尖端技术就是综合应用各项技术的成果而创造的新型技术综合体。

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，往往把很多分析因素数量化，以便显示出那些容易直觉观察到的各种因素之间的相互关系，人们广泛采用线性代数、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，从而作出最优决策，使人们能够深刻地、全面地掌握所研究的对象，准确迅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并行的过程，一个是工程技术过程，一个是对工程技术的控制过程，这一过程包括规划、组织、控制和决策等，统称为管理。科学技术只有通过管理才能变成社会生产力，管理工作对促进科学技术的发展、提高效率、经济效益和合理利用资源等方面都具有十分重要的意义。只有科学的管理，才能充分发挥技术的效能。英国著名的科学家贝尔纳（Bernal）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要求。

§ 1-4 系统工程的发展过程

社会生产的需要，是科学技术发展的动力。系统工程作为一门科学技术虽形成于本世纪五十年代的西方，但系统工程的思想和方法的运用则可以追溯到古代。中华民族的祖先在大量社会实践活动中，在改造自然中，认识了自然界各种复杂的事物。在了解自然、改造环境的过程中，出现了许多充分体现系统思路的工程技术管理的事例。

一、朴素的系统概念在我国古代的自发应用

战国时代（公元前 250 年）秦国太守李冰父子主持修建了驰名中外的四川都江堰水利工程就是一例，工程包括三个主要部份，“鱼嘴”是岷江分洪工程，“飞沙堰”属分洪排砂工程，“宝瓶口”是引水工程，三个部份巧妙结合形成一个工程整体，根据今天的试验，工程在排砂、引水、防洪等方面都作了精确的数量分析，使工程兼有防洪、灌溉、漂木、行舟等多种功能。由于在渠道上设置了水尺测量水位，合理控制分水流量，使工程不仅分导了汹涌急流的岷江，而且化害为利，利用分洪工程，有节制地灌溉了四个县的几百万亩农田。该工程不仅在施工时期有一套管理办法，还建立了持续不断的岁修养护制度，每年按规定淘砂修堰，使工程经久不衰，至今仍能充分发挥它的效益。都江堰水利工程体现了非常完善的整体观念、优化方法和开放的、发展的系统思路，即使从现在的观点看，仍不愧是世界上一项宏伟的系统工程建设。

另一个典型事例是宋真宗时，皇城失火，宫殿烧毁，派大臣丁谓主持皇宫修复工程，丁谓经过统盘筹划，提出了一个施工方案，首先将皇宫前的大街挖成大沟，就地取土烧砖，省

去远处运土，然后把汴水引入大沟，用水路运输建筑器材，使工程能顺利进行。等到皇宫修复后，再把碎砖废土填入沟中，修复大街，使烧砖、运输建筑材料与处理废物等三项繁重的工程任务都最佳地得到解决，是“一举三得利”的最优方案。

在我国的冶炼史上，古代的劳动人民一直在探索铜的优化冶炼方法，早在春秋时代，就已懂得铜、锡、铅按不同比例混合熔炼，可以得到不同功能的合金。在春秋时代的《考工记》中，就记述了在铜锡合金中，六种不同的锡含量，得到六种不同性能的合金，这是对系统结构不同则功能不同的深刻认识和运用。例如含锡 17% 左右的青铜，呈橙黄色，美观，音质也好，适于铸钟鼎。到明永乐年间（公元 1404 年左右），我国铸造了重达 40 多吨的闻名世界的大钟，音质特好，被认为是古代大钟合金的最佳比例。

我国古代的系统思想还充分反映在军事理论与活动方面，春秋时代的《孙子兵法》，从道、天、地、将、法五个方面来分析战争的全局，指出“凡此五者，将莫不闻，知之者胜，不知者不胜”。这里所讲的“道”，就是要内修德政，注重战争是否有理，有道之国，有道之兵，得到人民的支持，这是胜利之本。但战争除此因素外，还有天时、地利的客观条件。而将领的才智、威信状况，士兵是否训练有素，纪律、赏罚是否严明，粮道是否畅通等则是主观条件。《孙子兵法》从系统整体出发，对不同层次及系统与环境进行全面分析的思想，这是我国古代很全面、深刻的军事系统思想。

通过整理祖国古代系统思想及应用方法的成就，以及对古代许多伟大工程和管理经验的整理、研究，把历史信息与现代科学技术的信息相结合，为我们今天研究系统思想的发展规律提供了许多极有价值的历史资料，将有助于逐步建立具有我国自己特色的系统工程理论体系。并从中获得许多重要的启示和借鉴，促进现代的管理改革，对推动我国当前的社会主义现代化建设也是具有现实意义的。

二、系统工程的形成是现代科学技术迅速发展的需要

四十年代初，在美国等国家的电讯工业部门中，为完成巨大规模的复杂工程和科学研究任务，开始运用系统观点和方法处理问题。贝尔电话公司在发展微波通讯网络时首先应用一套系统的方法，并首先提出了系统工程这个名称。此后在工程系统和工业企业中广泛应用了系统工程的方法。

为满足军事的需要，大规模军事系统作为一种学科来研究，运筹学得到广泛的应用和发展。在二次大战前夕，英国面临着如何抵御德国飞机轰炸的问题，在发明雷达的基础上建立了世界上第一个有组织地、自觉地按照系统的观点、用系统工程方法分析和研究作战使用问题的小组。在二次大战期间，英、美两国在反潜、反空袭、商船护航、布置水雷等项军事行动中使用了系统工程的方法，并取得了良好的效果。四十年代，美国研制原子弹的“曼哈顿计划”，参加者有一万五千人，其工程技术装置极为复杂，他们运用了系统工程方法，因而推动了系统工程方法进一步的发展。从五十年代开始，以核武器和洲际导弹的出现为标志使系统工程方法的应用达到更高的水平，六十年代初，美国国防部长麦克纳马拉运用系统分析方法提出了美国国防新战略，取得了成效。五十年代后期，六十年代初期，美国为了改变空间技术落后于苏联的局面，而先后进行了北极星导弹核潜艇计划和阿波罗登月计划，都是系统工程在国防科研中取得成功的著名范例。通过这些社会——技术系统的实践，先后创造了“计划评审技术”（PERT）和“随机网络技术，又称图解评审技术（GERT），并把电子计算机用于计划工作，促进了整个系统研制工作的进展。电子计算机的出现和发展，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。六十年代以后，对于复杂的大系统问题，采用分解与协调两个过程而形成多级递阶控制结构，它的基本方法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，协调各个子系统的运行，以达到整个系统的最优运行。七十年代以来，随着微型计算机的发展，出现了分散控制系统和分散信息处理的理论和方法，实现了多级分散的计算机管理、控制和信息处理系统，这就进一步提高了大系统的灵活性、扩展性和可靠性。由于计算机的广泛应用，如何解决人——机关系，就成为一个崭新的课题。人们在作出决策时，往往带有思维过程中固有的模糊和不严格性，但计算机只能接受确切的指令。这就需要研究消除“人——机”语言障碍的方法，否则再好的理论和运算工具仍难发挥作用。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，它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。

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，从大型工程的应用进入到解决各种复杂的社会——技术系统和社会——经济系统的最优规划、最优控制和最优管理阶段。以跨国的北欧电网为例，电网内部全部可调容量达 $4500 \times 10^4 \text{ kW}$ 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、复杂的发电和输电系统，必须协调发电、供电和选择最佳运行方式。而这种现代复杂的电力系统的设计，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，然后才能作出合理的规划和设计。

此外，系统工程方法还广泛应用于研究社会经济规划，能源发展战略和能源规划，水资源的合理开发和利用，科学技术预测与发展战略，交通运输的规划、布局 and 合理调运等方面，并且都取得了显著的效果。

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，需要通过对其信息的处理，实现最佳选择。由于实现现代化有多种选择的可能性，然而要进行合理的选择，就需要有效的选择手段，这就是系统工程方法。当代电子计算机和通信卫星的应用，以及系统科学、运筹学、现代控制理论、信息论等理论方法的综合发展，推动了系统工程的飞跃发展，使系统工程研究的范围扩展到自然的、技术的和社会的复杂大系统。

三、系统工程的研究工作在我国的发展

系统工程在我国的发展始于五十年代中期，那时，我国有计划按比例的经济建设十分需要科学的组织管理技术。1956年，在中国科学院力学研究所建立了我国第一个运筹学教研组，1960年在中国科学院数学研究所成立了运筹学研究室，我国著名科学家华罗庚教授从六十年代初期就在我国大力推广“统筹法”，“优选法”，取得了显著的成就。在这同时，随着国防尖端技术科研工作的发展，我国在著名科学家钱学森教授的领导下，在工程系统的总体设计组织方面也取得了丰富的实践经验。导弹武器系统是现代化最复杂的工程系统之一，要靠成千上万人的大力协同工作才能研制成功。为把笼统的初始研制要求逐步变成许多研制任务的具体工作，再把这些工作最后综合成一个技术上合理、经济上合算、研制周期短、工程质量良好、能协调运转的实际系统，并使这个系统成为它所从属的更大系统的有效组成部分。这样复杂的总体协调任务不可能靠少数人来完成，因为他们不可能精通整个系统所涉及的全部专业知识，也不可能有足够的时间和精力来完成数量惊人的技术协调工作。因此在我

国防尖端技术科研部门建立了“总体设计部”对这种大规模复杂系统进行协调指挥，并且运用计划协调技术来组织总体研制工作并取得了显著成效。

从1977年以后，系统工程在我国的推广和应用出现了新局面，在全国科学技术长远发展规划中，把系统工程的理论和应用作为重点学科列入了规划，由教育部和原一机部负责组织规划的实施。先后在一些重点院校成立了系统工程研究所(室)，并招收了研究生及系统工程专业的本科生。1980年中国科学院成立了系统科学研究所。1978年，我国科技工作者利用系统思想提出了把运筹学和管理科学统一起来的见解，提出了系统工程是组织管理技术的思想。1978年，中国自动化学会成立了系统工程专业委员会。同时成立了中国管理现代化研究会，次年先后在天津和芜湖分别召开了系统工程学术交流会。1979年10月，中国科学院、社会科学院，有关中央各部，总参谋部，总后勤部，军事科学院，军事学院，国防科委和各军兵种的一百五十名代表，举行了系统工程学术讨论会，国务院和解放军有关领导同志十余人出席了会议的开幕式，这体现了党和政府对系统工程在四化建设中的作用十分重视。这次会上我国21名知名科学家联合倡议成立了中国系统工程学会。1980年下半年，先后在中央人民广播电台和中央电视台举办了全国性的系统工程广播讲座和电视讲座。在全国范围内举办了多次系统工程讨论班，通过各种类型的科学普及工作，使得不少领导干部和广大科技工作者已经认识到：系统工程同现代化建设各个领域的组织管理工作是紧密联系在一起。

系统工程的科学研究工作已逐步开展起来，从初期的传播国外的理论、方法和应用情况，综述国外的研究成果，现在已经进而独立开展系统工程理论和方法的研究，并且注意联系我国的四化建设，积极开展系统工程应用的研究工作，其中在能源系统工程、农业系统工程、军事系统工程、社会经济系统工程、人口系统工程等方面的研究工作均已开展，而且在有些方面已初见成效。

§ 1-5 系统工程的应用

系统工程的应用几乎遍及工程技术和社会经济的各个方面，现仅以十四个重要的方面简述如下：

1. 社会系统工程 组织管理社会主义建设的技術，叫做社会系统工程。它的研究对象是整个社会、整个国家，是一个巨系统。因此，它具有多层次、多区域、多阶段的特点。在处理方法上一般采用多级递阶结构和多阶段动态规划等方法。
2. 宏观经济系统工程 运用系统分析的方法研究社会经济系统的问题，如经济发展战略、经济战略目标体系、经济指标体系、计划综合平衡、投入产出分析、消费结构分析、价格系统、投资决策分析、经济政策分析、资源最优利用、国力分析、世界经济模型等。
3. 区域规划系统工程 运用系统分析的方法研究区域综合发展规划、区域投入产出分析、区域城镇布局和发展规划、区域资源最优利用、区域投资规划、城市规划、城市管理、公共交通管理等方面的问题。
4. 环境生态系统工程 研究大气生态系统、淡水生态系统、大地生态系统、森林与生物生态系统、城市生态系统等系统的分析，规划，建设，防治等方面的问题，以及环境检测系统、环境计量预测模型等问题。