

系 统 工 程

沈泰昌 主编

上

一九八四年

编 辑 说 明

科技管理干部进修教材和参考书是为满足科技管理干部在职培训编写的，主要供第二期科技管理函授进修班试用。

该套教材和参考书是由中国科学学与科技政策研究会、中国科协现代管理知识讲师团组织有关专家编写的。

在各教材和参考书之间，某些部分的内容有交叉。在尽量避免重复的同时，为保持各教材的系统性与完整，个别交叉的章节内容仍给予保留。

《系统工程》一书是在原教材《系统分析与管理决策》的基础上修改编写成的。参加编著的作者有：北京工业学院沈泰昌（第一、三、五、八章），中国社会科学院情报所王兴成（第二章），中国人民大学李国纲（第四、八章），邓志刚（第五章），中国军事科学院朱松春（第六章），航天工业部第一研究院梅相岩、赵之林（第七章），北方交通大学张宗溥和中国军事医学科学院武林（第九章）。朱松春同志帮助审阅了书稿，由沈泰昌同志主编。

我国对科技管理领域的研究时间还较短，教材的内容有不够成熟的一面，为满足进修急需，较匆促的编写了这套教材，难免缺点和错误，敬请有关专家和各方面读者批评指正，以便今后进一步修订和提高质量。

教材编辑组

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 系统的概念.....	(1)
第二节 系统工程的概念.....	(3)
第三节 系统工程在我国的理论研究与应	(7)
第二章 系统科学与系统方法	(11)
第一节 系统科学的兴起.....	(11)
第二节 系统方法的原则.....	(16)
第三节 系统方法的地位和功能.....	(25)
第三章 数学准备知识	(32)
第一节 集合论.....	(32)
第二节 概率论.....	(44)
第三节 线性代数.....	(65)
第四节 模糊数学.....	(86)
第四章 系统分析	(102)
第一节 系统分析的特点和应用.....	(102)
第二节 系统分析的基本要素.....	(108)
第三节 系统分析的主要作业.....	(114)
第四节 系统分析在经营决策中的应用.....	(129)
第五章 系统模型和模拟方法	(146)
第一节 系统模型及其形式.....	(147)
第二节 线性规划模型及其解法.....	(158)
第三节 随机模型及其解法.....	(201)

第四节	统计模型及其解法.....	(221)
第五节	系统模拟.....	(240)
第六节	模拟技术.....	(260)
第七节	模拟技术在大系统中的应用.....	(265)

第一章 概 述

第一节 系统的概念

一、系统的定义

半个世纪以来，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”（System）一词源自古希腊语，有“共同”和“给以位置”的含义。根据Webster辞典的说明“System”是“有组织的和被组织化了的全体”。当今，我们把极其复杂的研制对象称为“系统”，即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体，而且这个“系统”本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分。

系统具有输出某种产物的目的，但它不能无中生有。也就是说，对于输出必有输入经过处理才能得到，输出是处理的结果，代表系统的目的，处理是使输入变为输出的一种活动，一般由人与设备分别或联合担任。输入、处理、输出是组成系统的三个基本要素，加上反馈就构成一个完备的系统。其框图如下图1—1。

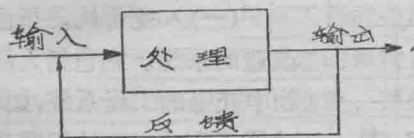


图 1—1

二、系统的特征

从系统的定义可以看出系统具有集合性、相关性、目的性和动态性这四大特征。

(一) 集合性：系统必须由两个以上元素组成的全体。一个元素构不成系统。

(二) 相关性：系统的各元素不仅都为完成某种任务而存在，而且任一元素变化也都会影响其它元素完成任务。例如火箭系统的总重量发生变化，就会影响动力装置，发射设备的改变。

(三) 目的性：就整个系统来说都是以完成某种功能、作用为目的。有着确定的目标。例我们设计一个机床，就为的是加工出、以至高效率的加工出工件。

(四) 动态性：系统不仅是只作为状态而存在，而且具有时间性程序。

将这四大特征简化后示于图 1—2。就构成了系统的全过程。

三、系统的分类

(一) 人造系统。指由人类设计和改造的系统。它包括人们从加工自然物中获得的工程系统，如工具、设备、武器等和由一定的制度、组织、程序构成的社会系统及科学体系等系统。



图 1—2

(二) 自然系统。指由自然物形成的系统，如太阳系、生态系统等。

(三) 复合系统。指由人造系统和自然系统相结合的系统，如农业系统、企业系统和武器系统等。

(四) 开放系统。指系统内部与外界环境有交换的系统，如企业系统就与社会有物质、能量、信息的交换。

(五) 封闭系统。指与外界环境无任何形式交换的系统。

系统工程所研究的对象是人造系统和要改造的自然系统。

第二节 系统的概念

系统工程是一大门类工程技术。目前正在发展完善之中，它不仅为人们提供了一套现代化的管理方法，同时也能促进工程活动本身获得最佳效果。

一、系统工程的定义、分类和特征

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。这里，比较明确地表述了三层意思：系统工程属工程技术，主要是组织管理的技术；是解决工程活动全过程的工程技术；这种技术具有普遍的适用性。

系统工程的基本原理，就是用搞工程的办法搞组织管理。它以系统为对象，把要组织和管理的事物，用概率、统计、运筹、模拟等方法，经过分析、推理、判断、综合，建成某种系统模型，进而以最优化的方法，求得系统最佳化的结果。亦即经过工程的过程，使系统达到技术上先进、经济上

合算、时间上最省、能协调运转的最优效果。它又是解决工程活动全过程的工程技术，而且这门技术具有普遍性。因此，它表现出：

(1) 用最优的方法使系统达到最佳的特征；

(2) 系统工程这门技术离不开具体的环境和条件，离不开事物本来的性质和特征，即与系统本身所在学科密切相关。因此，依据学科不同，有着很多的类别，著名的科学家钱学森指出，目前，大体有以下十四类专业：

系统工程的 专业	专业的特有学科基础
工程系统工程	工 程 设 计
科研系统工程	科 学 学
企业 " "	生产力经济学
信息 " "	信息学、情报学
军事 " "	军 事 科 学
经济 " "	政 治 经 济 学
环境 " "	环 境 科 学
教育 " "	教 育 学
社会(系统) "	社会学、未来学
计量系统工程	计 量 学
标准系统工程	标 准 学
农业系统工程	农 事 学
行政系统工程	行 政 学
法治系统工程	法 学

(3) 它着眼于整个的状态和过程，而不拘泥于局部的、个别的部分，它表现出系统最佳途径并不需要所有子系统都是最佳的特征；

(4) 系统工程包含着深刻的社会性，涉及到组织、政策、管理、教育等上层建筑因素；

(5) 系统工程的精华在于它是软技术，即在科学技术领域，由重视有形产品转向更加重视无形产品带来的效益。如某种产品尽管采用的是廉价原料，由于充分发挥技术的作用而可能成为价值很高，价格也相当昂贵的东西。

二、系统工程的产生与发展

本世纪三十年代末，英国面临德国的侵略，一批科学家研究雷达系统的运用问题，创造了“运筹学”一词来命名这个应用科学的新分支。二次大战期间，运筹学逐步推广到军事决策和战争指挥，著名的大西洋潜艇战役和北非登陆战役，都借助于运筹学取得了胜利。一般认为，这就是系统工程的萌芽。

本世纪四十年代初，美国贝尔电话公司首先创造了“系统工程”这一学科名称，在发展微波通讯网络时，初步运用了系统工程的方法。以后，贝尔公司和丹麦哥本哈根电话公司在电话自动交换机的工程设计中运用了系统方法。

四十年代，美国研制原子弹的曼哈顿计划，是系统工程方法成功的实践。1940年，爱因斯坦等科学家提出研制原子弹的建议，美国总统罗斯福采纳后，请理论物理学家奥本海默来组织领导这项军事科研生产计划。他动员了一万五千名科学家和工程师，组织各种专业的科技人员进行全面合作。

奥本海默在执行计划的过程中，从整体出发，把研究课题逐级分解为大量小课题，组织相应的小组来负责各个课题的研究工作。同时，他非常重视各项课题之间的联系，注意它们的等级和层次，随时进行协调，使全部课题组合起来能够达到整个计划的最优结构。在生产原子弹材料的中心研究项目方面，奥本海默组织大家仔细研究，提出六、七个方案。为选择方案进行了热烈讨论，争论了两个月，相持不下。他确立了一项原则，首先保证按时完成任务，其它皆属次要。于是决定六、七个方案同时试用，在实践中比较优劣。一年后生产了一公斤铀。1944年5月，第一颗原子弹爆炸成功。这是大规模地组织起来顺利地完一项军事科研生产任务的著名实例，是系统工程方法的胜利。

现代科学技术具有高度综合性，需要各种技术相互配合，才能解决一些重大的课题。系统工程是随着解决这类综合性的复杂任务发展起来的。它通览全局，分清主次，掌握要点，建立模型，用数学方法和电子计算机，对各个环节和各种因素进行精确分析，采取科学决策。然后使用先进的技术工具进行适当的控制和管理，使整个系统运转起来具有良好的性能和最佳的效果。六十年代，美国阿波罗登月计划的实现，是正式运用系统工程的巨大成功。规模巨大的载人登月计划，参加的科学家和工程师等达四十二万人，投资三百亿美元，参加单位二万多个，历时十一年，完成全部任务，这是科技史上的伟大壮举。阿波罗飞船和土星5型运载火箭，有七百多万个零部件，在总系统下面，有众多的分系统，如飞船系统、火箭推进系统、燃料系统、飞行制导系统、轨道控制系统、通讯系统和测试系统等等。每个分系统下面又包含

无数小系统，这些分系统或小系统之间有着各种各样的相互联系和相互作用。在寻求总体最优化的过程中，系统工程的理论和方法得到了很大的发展，这个计划也充分体现了人的因素在系统工程中的主导作用。在整个计划的实施过程中，都是人指挥技术。阿波罗飞船最后登月成功，是依靠乘坐飞船的宇航员取得的。在飞船即将着陆的最后一瞬间，飞船内电子计算机失灵，休斯敦地面控制中心的技术员，及时发出了着陆指令，飞船才顺利完成登月任务。因此，阿波罗登月计划全面贯彻了系统工程的整体性原则、联系的原则、递阶的原则、动态原则和人的主导原则等，充分体现了总体最优化的精神。阿波罗计划的实现，这是系统工程的胜利，它标志着人们在组织管理的技术方面正在走向一个新的时代。

第三节 系统工程在我国的研究与应用

四十年代中，虽然在国外出现了“系统工程”一词，也在以后的实践中证明了这一技术是卓有成效的。但，正如许国志等同志指出：近年来，在我国的高等学校、研究机构和工业、农业、军事部门科学工作者的共同努力下，我国系统工程和系统科学的发展，已有了一个很好的局面，而且一年比一年好，逐步形成了一支确实具有中国特点的系统工程和系统科学研究队伍。钱学森同志就是这支队伍中的一个成员。

早在1954年的英文版《工程控制论》第18章中，钱学森同志就讲到用重复不那么可靠的元件组成高度可靠的系统的问题。这大大超出了当时自动控制理论的一般研究对象了，实

质上是系统学的问题。1955年钱学森同志在和许国志等一些同志讨论问题时，就表示了把运筹学和社会主义计划经济结合起来的想法。钱学森同志比较深刻地理解系统工程、运筹学、控制论的关系，理解系统工程永远牵涉到人的因素，他也远比许多人更早地触及系统学的研究领域，因而钱学森同志在探讨系统工程时，处于更有利的位置。当然，他努力学习马克思列宁主义和毛泽东思想，并用马克思主义哲学来指导科研工作，也探讨如何用科学技术的新成果去丰富、深化马克思主义哲学。所以他在吸取国外现代科学技术知识之后，能甩掉脚手架，站得比有些人高一点。

钱学森同志的系统科学思想，首先表现在他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。整个科学技术包括自然科学、社会科学、系统科学、思维科学和人体科学这六大部门。钱学森同志的系统科学思想也体现在他提出了一个清晰的系统科学结构。作为现代科学技术六大部门之一的系统科学，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、控制论和信息论这类技术科学，以及系统的基础理论系统学等组成的一个新兴科学技术部门。钱学森同志的系统科学思想还表现在：系统工程是组织管理的技术，也就是把传统的组织管理工作总结成科学技术，并使之定量数值化，以便运用数学方法；系统工程是一大类工程技术的总称而不是一个单一的学科，正如我们传统理解的工程是土木、机械、

电机等等工程的总称一样。于是便将“人各一词，莫衷一是”的情况澄清为“分门别类，共居一体”。这就给系统工程一个确切的描绘，并进而就整个系统科学体系，论述了系统工程在其中所处的地位。

人类认识现实世界的过程，是一个不断深化的过程，在真理的长河中，逐步前进。在古代，既少理论根据，又缺乏观测和实验手段，所以对许多事物，往往只能睹其外貌。犹如虽身处林海边缘，却只能望见一片“郁郁葱葱”。然而看到的却是林而不是树。随着科学技术的进展，道路通了，工具有了，可以深入林海，遗憾的是不知不觉地又只见树而不见林。认识是不断深化的，在对个体有了更多更好的了解以后，再回过头来，看到的就不仅是“郁郁葱葱”，而是“树密、根深、枝繁、叶茂”。许多文献中，在谈到系统工程之所以在本世纪中叶得到发展，往往归功于一些现代巨大研制项目的推动。这无疑是正确的。但是，钱学森同志却从上面谈到的这样一个认识过程吸取了营养来发展系统科学。贝塔朗菲认为生命科学的本质是“有机总体”，因而他主张，生物学的研究，不能单凭分析方法，更重要的是要从系统的角度出发，加以探讨。然而贝塔朗菲的早期工作，虚多实少。只有在普里戈金、哈肯、艾肯等人手中，用了更多、更深的物理、化学、数学的方法，方才取得了真正的进展。例如，钱学森同志认为，艾肯把生命起源、生物进化的达尔文学说，在分子生物学的水平上，通过巨系统高阶环理论，数学化了，提出了一个言之成理的自组织系统模型，并从这个模型推导出生物的一些生殖、遗传、变异、进化的性状。这就使得贝塔朗菲四十多年前提出的问题有了解决的明确途径。

钱学森同志吸取现代自然科学的研究成果，但绝不停留在这些已有的成果上面。他把这些成果作为建立系统科学的基础科学，一切系统的一般理论——“系统学”——的素材。他说：“我认为把运筹学、控制论和信息论同贝塔朗非、普里戈金、哈肯、弗洛里希、艾肯等人的工作融会贯通，加以整理，就可以写出《系统学》这本书。他还说：“我看，‘耗散结构理论’、‘协同学’……都是过往云烟，留下的将是系统学。当然创造耗散结构理论和协同学的普里戈金和哈肯是大有功劳的。”

正因为如此，中国社会科学院院长马洪同志根据我国经济和社会的发展，向系统工程学者提出了六项需要研究的重要课题。第一，系统工程学者要研究我国经济发展的战略问题；第二，应用系统工程学者研究计划经济和市场调节的关系；第三，要分析我国经济发展的内涵潜力；第四，要研究如何更好地贯彻调整、改革、整顿、提高的方针；第五，经济体制改革的总体设计如何运用系统工程的方法；第六，系统工程学者要加强对国民经济综合的、全社会的经济效益的研究。

实践证明，系统工程是现代化建设普遍行之有效的科学方法。赵紫阳总理在八三年三月接见陕西省和一些同志谈到水利、农业等问题说：“现在的问题，是要用系统工程的方法，全面统筹，综合论证。”

第二章 系统科学与系统方法

“十九世纪给我们提供了非亚里士多德逻辑学和非欧几里德几何学。二十世纪上半叶提供了量子力学和相对论。二十世纪下半叶则提供了一般系统论和理论控制论，它们都彻底改变了世界的科学图景和当代科学家的思维方式。”这是人们对一般系统论的高度评价。奥地利生物学家L·V·贝塔朗菲积极创导的一般系统论，试图集各种系统理论之大成，具有理论学科的特色，各国学者都注意研究它。目前，在许多国家蓬勃发展的系统工程，是一种组织管理的科学方法，几乎在一切管理领域广泛运用，收到了良好的效益，成为一门重要的应用学科。一般系统论、系统方法和系统工程，构成一门特殊的新兴学科——系统科学，这是二十世纪科学发展史上的伟大创举，它对现代科学和社会的发展正在产生深刻的影响。

第一节 系统科学的兴起

系统科学虽然是二十世纪的产物，可是它与整个科学技术发展史一样源远流长。系统科学的思想渊源，可以一直追溯到我国古代的科学技术。

一、两个历史故事的启示

我国古代有一些著名的工程技术，卓越地体现了系统思

想，取得了很大的成功。

北宋时代，皇城火灾，宫殿焚毁，宋真宗派大臣丁渭主持皇宫的修复工程。丁渭经过仔细分析研究，提出了一个施工方案。他计划在皇城前的大道上挖土烧砖备料，把大道挖成河道后，引进京城附近的汴水，用船舶把其他建筑材料直接运入工地；等到皇宫修复后，把碎砖杂土填入河道，修复原来皇城前的大道。施工结果，工效极佳，这是历史上建筑工程的最优方案之一，贯彻了“最优化”原则，堪称系统思想的一次光辉实践。

明朝永乐年间，铸造了一个四十多吨重的大铜钟。当时的炼炉炉高仅一丈二尺，炼炉容量为二千多斤矿砂。这一世界闻名的大铜钟是怎样铸成的呢？聪明的冶炼工匠们采用了“群炉汇流”的工艺，在铸件周围建立一系列炼炉，总容量与铸件重量相等，炉群位高，铸型位低，各炉槽道作辐射状通向铸型。准备就绪，各炉同时升火冶炼，炼成时铜水一齐流向铸型，“万均铜钟”即被铸成。此外，还有采用“连续浇铸”工艺的，就是由多个炼炉一齐鼓风冶炼，然后依次连续浇铸而成。这是我国古代冶炼史上的著名工艺，它体现了整体性原则，成功地反映了系统思想的要求。

这两个历史故事启示我们，对任何一项工程技术，有一个全局的观点，即整体观点十分重要，这是其一。其二，每一项工程技术，都由几个施工步骤和工艺流程组成，必须注意每一步骤和流程之间的有机联系，进行合理安排，这就是联系的观点和运筹的观点。其三，这两项工程技术都包含了总体最优化的观点，这是评定工效的主要尺度，也是一项工程技术成败的关键。由此可见，我国古代成功的工程技术，早就

蕴含着丰富的系统思想。

随着社会的发展和变动,古代东方的文明传播到了西方。经过漫长而曲折的道路,近代科学技术又逐步发展成为现代科学技术,人们在宏观世界和微观世界两条战线上进军,客观事物的本质联系和内部规律进一步被揭示出来。现代社会的发展,迫切需要我们z从总体上去认识事物的特性,以便总体最优地去改造客观世界。

二、一般系统论的产生

一般系统论来源于机体论,这是一种与机械论相对立的生物学理论。贝塔朗菲认为,机械论的错误观点有三点:(1)简单相加的观点,这就是把有机体分解为各要素,并简单地相加来说明有机体的属性;(2)“机器”观点,把生命现象简单地比作机器,认为“动物即机器”、“人即机器”;(3)被动反应的观点,认为有机体只有受到刺激时才作出反应,否则便静止不动。贝塔朗菲认为,这种理论完全不能正确地解释生命现象。他总结了机体论发展的成就,提出了下列基本观点:(1)系统观点,一切有机体都是一个整体——系统;(2)动态观点,一切生命现象本身都处于积极的活动状态;(3)等级观点,各种有机体都按严格的等级组织起来。贝塔朗菲主张建立一种机体论的正确模式来取代机械论的错误模式,把有机体描绘成一个整体或系统,它具有专门的系统属性和遵循不能简化的规律。有机体是由能动的极其复杂的各个部分构成的,它完全不是被动的机械的东西,相反,却是具有高度主动性的活动中心。贝塔朗菲指出,生物系统是分层次的,从活的分子到多细胞个体,再到