

土木工程系统工程

(上册)

成都科技大学水利系施工组

1987.12

编 者 的 话

“系统工程学”这门新兴的学科正在我国传播，引起国民经济各个部门的重视。相对于其他部门而言，在土木工程中，诸如水利、工业与民用建筑、铁道和交通等部门，注意研究应用系统工程学组织管理生产才仅仅是开始。特别是如何结合我国的实际，结合土木工程的特点，在实际应用中对系统工程加以推广仍然是个重要的课题。

教育是科技普及传播的媒介，也是科技发展和提高的栋梁。为了让土建类专业的大学生和科技工作者掌握系统工程的基本理论，加速社会主义建设，特编写了这本“土木工程系统工程”作为加修课和短训班的教材。

在编写中，笔者注意了将系统工程学的基本理论与土木类专业的实际应用问题相结合；注意了全书各章间的相互联系；同时也注意了自学和复习的方便。因此，在内容的安排上，既有应用示例，也有必要的基本概念和基本理论，且各章后附有复习思考题，重点章节后还附有习题，供读者练习，以便知识到手。

这本教材在编写过程中，得到不少同志的关心和支持，兄弟院校及有关业务部门提了不少宝贵的建议，并提供了不少有用的资料，编者对此至为感谢！鉴于编写这门新教材还是初步尝试，经验不足，不当之处在所难免，望读者批评指正。倘使这本教材在使用中日臻完善，能为四化作出点滴实际的贡献，正是笔者和读者共同的愿望。

编 者

1981年11月

目 录

第一章	概论	1
第一节	系统工程学的形成和发展	1
第二节	系统工程的基本内容和理论基础	3
第三节	系统工程在土木建筑工程中的应用	8
第二章	系统分析、设计和评价	12
第一节	系统分析的基本知识	12
第二节	系统分析设计的步骤	14
第三节	梯级系统的协调和平衡	19
第四节	系统的指标和评价	27
第五节	系统分析方法及实例	45
第三章	随机分析和概率决策	58
第一节	随机事件的运算关系和概率的定义及其基本性质	58
第二节	概率的计算	61
第三节	事件发生原因的概率分析	65
第四节	决策和决策树的应用	66
第五节	确定性多阶段决策过程与马尔科夫决策过程	79
第四章	线性规划	94
第一节	线性规划的任务及其数学模型	94
第二节	线性规划的基础知识	96
第三节	线性规划的应用示例	104
第四节	骨料料场选择利用的合理规划	113
第五节	单纯形法的电算方法	122
第五章	非线性规划	136

第一节	非线性规划的几个重要概念	136
第二节	间接最优化法(解析法)	146

第一章

概

论

第一节 系统工程学的形成和发展

系统工程学是本世纪中期逐步形成的一门新兴边缘学科。它的出现是生产组织管理现代化、科学化的重要标志。这门学科的形成虽然还不到半个世纪，然而利用系统的思想指导人类的社会实践和生产活动却已有几千年的历史了。早在春秋战国时期，孙臏用系统思想谏齐王与田忌赛马，以弱胜强。宋真宗时江渭用系统方法建官使施工组织取得了多、快、好、省的效果。建成于公元前250年，驰名中外的都江堰水利工程可谓利用系统思想，系统方法指导生产实践的辉煌典范。秦蜀太守李冰父子和川西广大劳动人民，利用岷江出峡谷入平原的有利的天然地形，根据长期的治水经验，建成了以都江堰、飞砂堰和宝瓶口三大水工建筑物组成的防洪、排砂、灌溉和漂木等综合利用的水利枢纽。由于这座古代的水利枢纽的合理布置，又经过若干年代的逐步优化，起到了自动调节流量，“分四六，平潦旱”的作用。保证了枯水期外江分流四成，内江灌溉受水六成；而汛期内外江的分流比例恰好相反，内江分流四成，外江排洪六成且排砂七、八成。这样，不仅解决了“枯干”、“洪淹”的矛盾，而且解决了灌渠既要引水又要防淤的矛盾。“分四六平潦旱”是决策论的雏型；“深淘滩、低筑堰、遇弯截角、逢正抽心……”的治水经是朴素的运筹学思想，它根据灌区不同的用水要求，在灌渠内增设渠堰分流引水体现了应用“网络图”得到准确的数量分配，逐步调优达到最佳目标的效果。足见在古代人们对应用系统方法于生产实践活动就有了较完整系统的思想。

随着人类社会和科学技术的发展，特别是近百年来人类进入了电子时代，近半世纪以来又进入了原子和宇航时代。人类在生产实践和科学

实验中遇到的矛盾和问题越来越多、越来越复杂。生产组织管理技术经历了一个由科学管理到管理科学的新时代。科学管理现代生产的鼻祖是美国的泰勒(F. W. Taylor)，他用科学的方法研究现代生产过程中人和设备、材料的科学管理使用。1911年他发表了“科学管理法”一书，虽然包含了生产系统的概念，但更多局限于局部生产的挖潜、革新。最早在工程设计中利用系统方法的是丹麦哥本哈根电话公司埃尔朗(A. Erlang)和贝尔电话公司的莫利埃(G. Molina)首先在电话交换机的开发中采用的。二次世界大战出于军事的需要，把大规模的系统作为研究对象，推导出系统中不同类型的数学模式去解决各种繁难的问题，促进了运筹学的产生。1945年美国在国防系统中建立了德兰公司在各种系统开发中取得了大量的成果，为战后美国在国防系统的开发和宇航事业以及电力、通讯、交通、水资源系统的开发奠定了坚实的基础。直到1957年古德(H. Goode)和R. E. Machol合著的“系统工程学”(systems Engineering)问世，人们才把这类技术领域称为系统工程学。1969年“阿波罗”登月计划的按期实现是系统工程学应用于科技领域内的杰出成果。这一成果引起人们对系统工程学的普遍关注和极大的兴趣。近十多年来系统工程不仅在工程设计、企业管理，而且在环境保护、资源开发、交通运输、生态平衡、文化教育、消费商业以及行政管理和经济组织等方面都被广泛采用。

系统工程学是近代科学技术发展的客观要求和必然结果。第二次世界大战以来，在资本主义自由竞争日益尖锐的情况，即使生产效率很高，整个生产系统的方针、计划、方案以及相应的政策不对，仍然得不到最好的效果，仍然要在竞争中失败，这就对管理工作的更加系统化、更加科学化提出了更全面的要求。随着科学技术的发展，为社会科学与自然科学的相互渗透，管理学家、数学家和物理学家的密切配合提供了条件。

电子计算机为大系统进行数字分析提供了手段，这一切是系统工程学的形成和发展的历史条件。

六〇年代美国电子工程师学会 (IEEE)，设立了系统工程科学委员会，从1964年起美国一些大学分别开设系统工程学课程，成立有关系、专业和研究中心，相继每年美国都要举行系统工程学年会，出版专刊。以后又成立了美国系统工程学会 (ORSA)。现在美、苏、日、英等国均有专门的机构从事系统工程的研究。七十年代中美国已有系统工程师十七万五千多人，日本有十一万人。目前美国每年培养系统工程的大学毕业生3000人，硕士研究生1600人，博士研究生200~500人，这些专业人才中分别担任工业企业、国防科研、设计机构和政府机关中的重大项目的大系统的规划、设计和决策工作。

1979年我国成立了系统工程学会，同年十月在北京召开了系统工程学术讨论会，有120个单位参加，会上提出了100多篇论文，我国著名科学家钱学森主持了讨论，后又担任中国系统工程学会的理事长。与此同时，中国科学院也成立了系统工程研究所，一些重点高等院校也相继设立有关系统工程的专业并设立有关课程。可以预见，随着我国对系统工程学的研究、应用及其教育的发展，对提高我国生产企业的科学管理水平，促进四个现代化必将产生积极的推动作用。

第二节 系统工程的基本内容和理论基础

一、系统的概念和特征

为了弄清系统工程的内容得先弄清系统的基本概念和特征。系统这个名称对人们并不陌生。现代科学研究的工程学的系统与日常谈论的系统是相互联系的。日常谈论的也可以作为一种研究的系统，譬如一个部门、一个单位、一个建筑群、一个流域、一个区域的铁路线路、一个

区域的公路网、一幢建筑物、一座水利枢纽、一座水电站、一个车站枢纽、一个港口、一个工厂、小至一个仪表、一个分子、一个原子，大至一个国家、整个世界以至太阳系、银河系等都是系统。这些系统既是客观存在，也是为了生产、生活及研究的需要从不同的角度、不同的出发点人为划分的范畴。总之，凡具有特定的目标或特种功能的事物，由各种要素或单元构成的有机体或集合体都称为系统。在研究客观事物中，区别于自然系统有人工系统，在自然系统中有宏观的银河系、太阳系、大气循环系……等等；也有微观的分子系统、原子系统及原子核的核内系统等等，根据意识和存在的区别又有由物质构成的实体系统和思维构成的概念系统之分，根据事物的状态又有动态系统与静态系统之分，根据操作和控制又有操作系统和控制系统之分，根据生活的需要又有商业系统和消费系统之分，如此等等，不一而足。

从系统的形成和划分目的都在于便于研究、组织、管理。系统划分的种类很多，但具有如下共同的特征：

1. 目的性，系统的构成都是为了研究或达到确定的目的划分的范畴，为了探索太空的奥秘将宇宙分为银河系、太阳系，根据人类生活工作的需要将一个社会分为不同的单位和部门系统的划分都有确定的目的或目标。

2. 整体性及层次性，各种系统既是由各种单元、元素、单位的有机结合体，又具有层次结构联系。因此对系统进行研究，既要明确每个系统的范畴，又要剖析系统内部的层次，递阶分析。一个大系统，下面有子系统，二级子系统（孙系统），功能单位、部件、元件、元素等层次。一个铁路系统，又有各机务段，机务段又有各车站和各段线路，各段线路又有不同的桥、涵、洞、线组成，就一段线路又有路基、道碴、枕木、钢轨以及各种组合元件构成。同样一个水利枢纽根据它担负的不同的任

务由各种水工建筑物组成，每座水工建筑物又由各种结构和装置组成，各种结构和装置又由各种部件组成，各种部件又由各种元件、材料组成，如此等等。

3 系统的相对性和相关性，系统范围的大小，完全是根据研究的目的和需要来确定，譬如可以将同类的若干工厂作为一个系统，也可以将一个工厂作为一个系统，也可以将一个车间、一台设备、一种传动机构甚至一个零部件作为一个系统，不同的系统有不同的子系统、二级子系统、元件、材料和元素组成。任何系统、子系统、二级子系统、元件、元素都不是孤立存在的，而是相互联系、互相依存、互相制约的有机体，因此在研究各种系统时要具体分析其互相的依存关系、相互制约的条件，否则便不能正确掌握其内在联系，探索其内在的规律，在错综复杂的矛盾中，抓住主要矛盾，或把握矛盾的转化，达到寻求最优的规划、设计的方案和目标。

总之研究系统的特性，始终要注意系统内部的结构层次特征，也要注意系统外部联系、约束的特征，把握系统的外部环境与内部结构的联系，为了确定的目标把输入转换为输出。

二、系统工程的定义及其研究的任务

在初步弄清系统的概念后，人们亟需了解什么是系统工程。各国学者根据自己的体会和认识赋予系统工程不同的定义，其中较有代表性、较为全面的是1957年美国科学技术辞典给它下的定义：“系统工程是研究许多密切联系的单元所组成的复杂系统设计的科学。当设计复杂系统时，应有明确的预定功能和目标，并使各个组成单元之间及它们与系统总体的互相联系方面达到整个系统的最优目标。在设计过程中，同时考虑参予系统人的因素和作用。”从这个定义出发不难看出，人们要在社会、科学、技术、生产各个领域内达到预期的最佳效果，必须不是孤

立的而是系统的、全面的规划、设计、评审、考察，不是静止的、机械的而是从发展和运动中去研究事物的内在联系，揭示其科学的本质，从而掌握事物的客观规律，能动地改进各项工作。

总而言之，系统工程是以系统最佳效果为目标，以控制论、信息论、运筹学等为基础，以电子计算机为手段与其它各类自然学科和工程学科相结合的边缘学科。它的任务不仅是系统的最优规划、设计、运行；而且担负对系统将要发生的情况、事件进行预测。为此在处理复杂系统结构时，面临着分清时空的矛盾，解决多目标和多方案的矛盾的问题，这就需要人们借助不同的方法和手段去解决、去评价。

三、系统工程的基本内容和理论基础：

系统工程的服务对象不同，形成名目繁多的系统工程，诸如环境系统工程、水资源系统工程、企业系统工程、化工系统工程、军事系统工程、教育系统工程、社会系统工程、商业系统工程等等。本书重点研究与土木建筑工程（工业与民用建筑、水利工程、铁道和公路工程）施工组织管理相结合的工程系统工程。无论哪一类系统工程包含的基本要素一般是相同的，应用的基础理论和方法是大体一致的。图 1-1 表示系统工程的基本要素，图 1-2 表示系统工程与各种学科及其理论基础的关系。

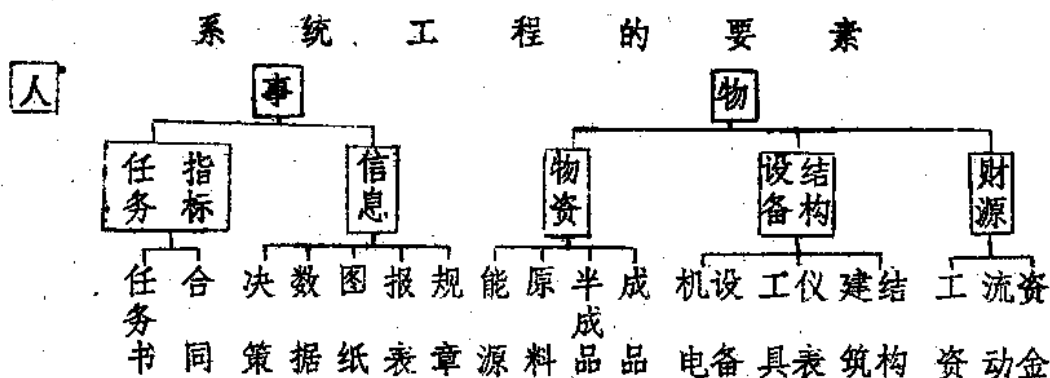


图 1-1 系统工程的基本要素

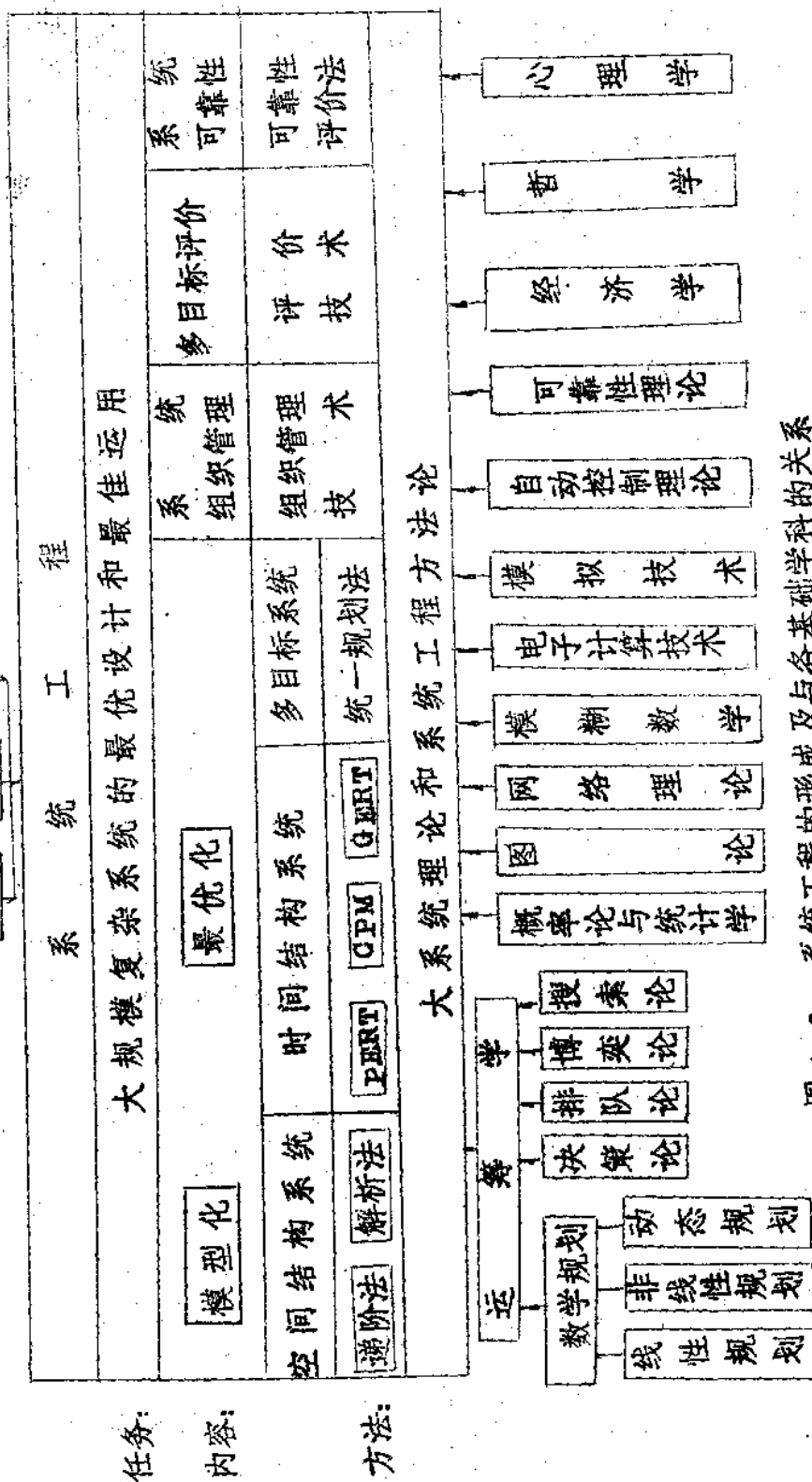
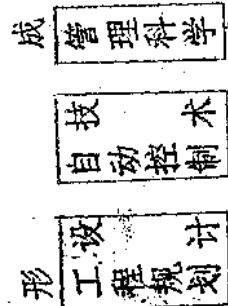


图 1-2 系统工程的形成及与各基础学科的关系

系统中六个要素：人、物资、设备或结构、财源、任务指标和信息，其中人是第一位的，使用人员的专业、文化、经验、技能都应搭配合理，避免人员不足或人员过多，更应避免学非所用、安排不合理的现象发生。对于物资和设备要有健全的管理机构，按任务按计划合理调拨、合理利用。财源控制应严格按照概预算进行经济、成本核算，对整个系统实现经济财务监督；必须根据各项具体的经济指标来评价，审核各阶段任务完成情况。所有这些都是应当围绕上级下达的任务或单位，部门之间签订的合同按质、按量、按时完成。要保证各项任务指标的完成，很大程度取决于千变万化的情况是否反应及时、准确，使领导情况明决心大，随时能作出适应外界情况变化的正确决策，所以系统是否能按最优方案实施，很大程度还取决于信息系统处理的好坏。总之，通过信息，掌握流通条件，促使生产过程物资、设备、劳力顺利地流通，实现人尽其才、机尽其力、物尽其用达到系统整体最优。

第三节 系统工程在土木建筑工程中的应用

众所周知，土木建筑工程包括：房屋建筑工程、水利工程、铁路工程、公路工程、桥隧工程、河港海港工程等等。系统工程与土木建筑工程施工组织管理相结合称为工程管理系统工程。

作为系统工程重要的基础学科——运筹学的研究在我国始于1956年，1958年以后全国各地不少生产部门在经营、组织、管理的挖潜革新中积极推广运筹学原理。1959年山东省动员了几十万人推广运用线性规划，在交通运输、物资调拨、基建工程等各个方面取得了显著的成绩。六十年代初以华罗庚教授为首的我国数学工作者又大力推广统筹法和优选法。统筹法其实就是关键路径法(CPM)和计划评审技术(PERT)，在土木建筑工程施工管理中推广成绩也十分显著，如在建筑工业部下属

的许多单位，山西太原铁路局、太钢、潘家口水库工程及四川成都龙泉区宝石口水库工程在运用统筹法组织施工也取得了明显的经济效益，加快了工程进度。然而着手应用系统方法较全面地解决施工组织管理中的问题现在才刚刚开始，这些方面的各条途径发展的前景是十分广阔的。譬如在施工组织设计和管理中就可以运用线性和非线性规划实现料场的合理规划，施工场地和交通线路布置设计的最优化，确定砂浆、混凝土、灌浆材料的最优配比，钢筋和各种金属材料的经济下料等问题；用存货理论确定仓库的最优容量和合理的供料方式；用网络分析确定各种管路（风、水、电、油）的最短敷设线路，安排最佳的施工工艺流程及施工进度计划实现均衡生产；用概率论和数理统计确定工程规划设计标准和进行质量控制；用决策论和动态规划等理论进行施工方案的选择和大系统的综合平衡，帮助领导在施工的全过程随时都能作出正确的决策。总之，在整个施工组织管理的系统中应保证劳动力的流动——劳力流，材料的流动——材料流，设备的流动——设备流以及信息的流动——信息流畅通无阻。要实施一个施工方案需要各种资源（劳力、材料、设备、资金），资源的流动需要决策，而决策的依据是各种信息，包括资源储量、技术条件、工程进展状况以及自然和社会因素的变化情况，决策机构经常在得到各种信息后进行综合平衡，权衡轻重利弊作出决策，明确各道工序、每个工种、每个单项工程的开工和完工时间，是提前还是拖后，是加快还是延缓，施工顺序是调动还是调整，各种资源是增添还是减少以及整个施工计划和施工方案随着外部条件（如降雨、洪水、高温、寒潮、地震以及材料、设备、能源、资金供应的增减或中断等）的变化是否需要改变。所有这一切都有赖于整个系统的资源流和信息流的密切配合。施工过程的工艺流程、各种资源流和信息流的关系如图 1-3。图中①→②表示任意一道工序。当技术条件送到后，根据外部条件的变

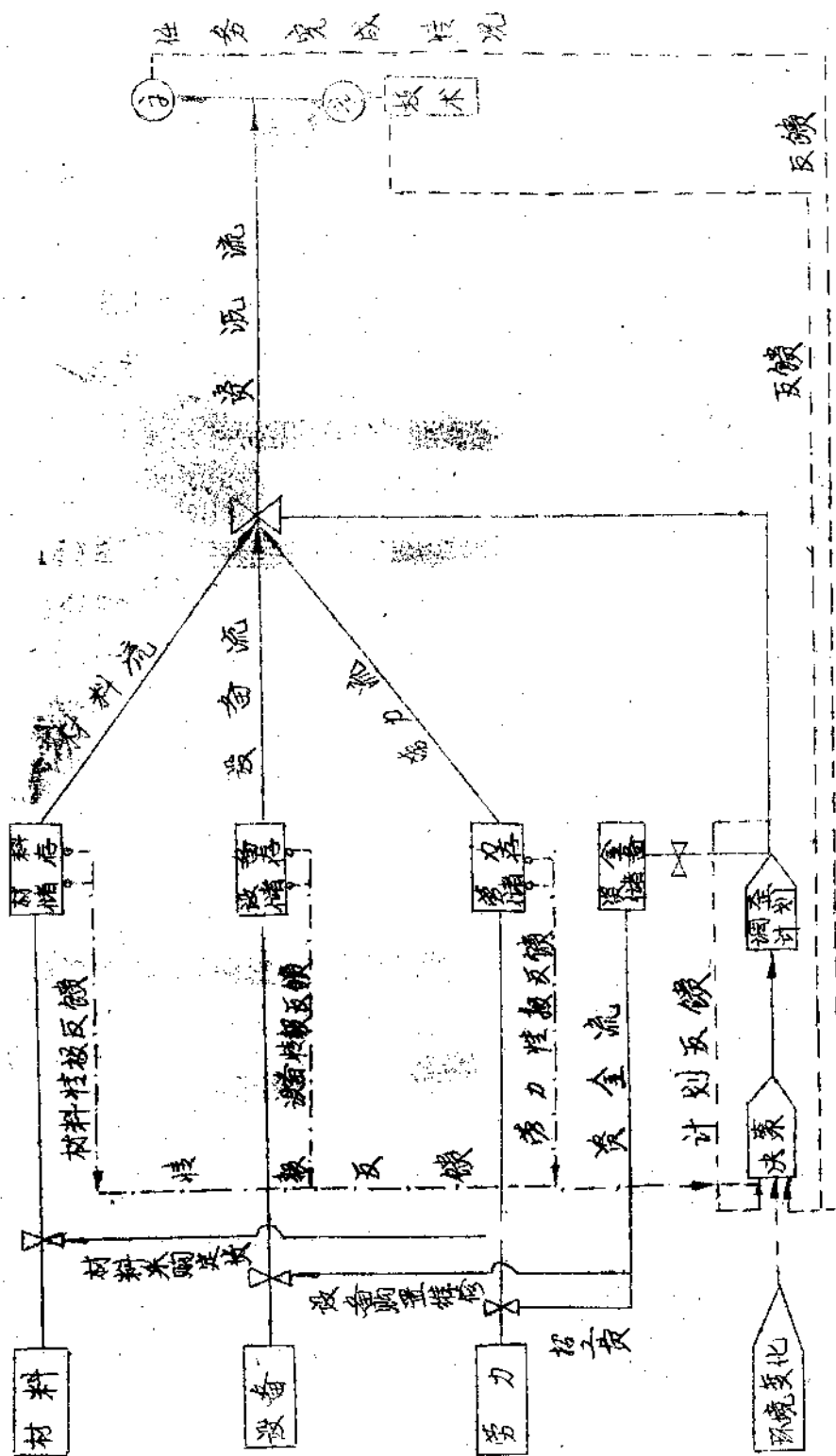


图 1-3 施工过程中资源流和信息流的关系

化和各种资源储存信息作出决策，对原始计划进行调整，调整后的计划反馈 (Plane Food back) 形成分析周期，直到决策满意再输出信息，控制操作各资源活门。于是按照电脑的指令，劳力、材料和设备则分配到相应的工序；而现金则流出，用以补充材料、劳力、设备的不足。在施工过程中，每个工种、每道工序、每个单项建筑和装置的完成情况，技术条件和各种资源的存量又不断反馈给决策，构成情报周期。整个施工系统就是在分析周期和情报周期的不断循环中进行调整、反馈、控制、实施以及达到最优的施工效果。

合理的施工组织管理机构，有利于保证生产系统资源流和信息流的畅通无阻，是推动工程顺利进行的前提，必要的规章、表报制度、管理制度、管理措施又是系统按优化设计完成任务的重要手段。先进的生产力必将推动生产关系的变革。系统工程学作为先进的生产力在我国的推广，必将促进我国现行施工组织管理机构的改革。系统工程学的应用和发展，必将加速四化实现的进程，而在四化的过程中，系统工程学也必将日臻完善。

本书第一章是系统综述，第七章是网络与进度计划，其余各章是讲述规划、决策的优化问题及其具体应用。各章在列举实例前，对基本理论都作了交待，有的部分对电算方法作了概略介绍，体现了理论与实际的结合。为了方便读者掌握各章的主要内容，各章后均附有思考题、习题及其答案。

由于将系统工程学应用于土建工程中尚属初步尝试，加之编写水平有限，错误缺点在所难免，望读者批评指正。

第二章 系统分析、设计和评价

系统工程学研究生产过程的优化，是从生产系统的整体优化出发，既研究生产系统的全过程，同时又研究生产过程各个阶段的特殊矛盾，使局部、阶段的优化服从整体的优化，当局部和整体间发生矛盾，为了取得整体最优的结果须将局部调整符合整体的要求。处理局部和整体结构关系的过程就是系统分析、设计和评价的过程。

第一节 系统分析的基本知识

在进行分析、设计、评价系统以前需要弄清系统的基本概念和有关的基本知识。

一、系统的组成及反馈系统：任何大系统都有三个基本的组成部分，即输入、处理和输出，如图 2-1。

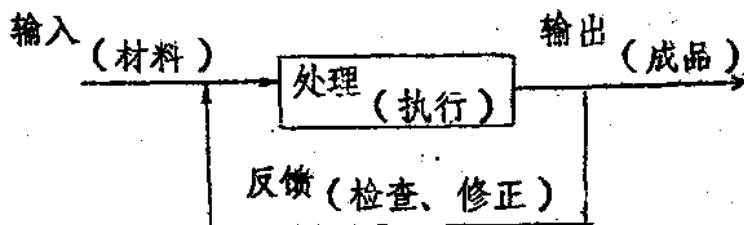


图 2-1 系统组成及反馈系统

就一个生产系统而言，把输入视为原材料供应，把处理视为设计、制造或施工过程，把输出视为出产品，对资料处理系统而言，设计的基本数据、资料是输入，分类、排队、计算、综合、比较和选择是处理，设计计算成果、图表是输出。在处理过程中，因外界条件变化的干扰不能反映实际情况，这时可通过检验，找出差异，修正计划，加强执行，这个过程称为反馈。反馈的过程就是在输出和输入量之间进行比较，力图保持二者间既定关系不断在变化的情况下取得新的平衡状态的过程。

二、系统分析和决策：所谓系统分析就是分析一个系统中起决定作用的基本问题，用逻辑思维的推理，借助数学模式或图表等科学方法，在已知的肯定或不肯定的条件下，找出各种可行方案，经过分析比较，确定符合预期目的的最优方案的一种决策手段。可以说系统分析的过程就是在已知的可行域内确定最优方案的优化过程。决策就是对复杂的事物作出判断，对各种比较方案进行选择，所以说决策是系统分析的核心。

三、可行域、可行方案、可行解：在构成系统的纷繁事物无不与外界有千丝万缕的联系。这些联系影响着系统内部事物的发展变化。这种影响构成对系统的各种限制、约束，这种约束构成系统的外部约束（环境因素）称约束条件。这些约束条件构成的范围称为系统的可行域，能在可行域内实施的方案称为可行方案，由可行方案建立的数学方程的解称为可行解。反之，在系统可行域范围以外的方案都是不可行的，都不属于系统分析研究的范畴。

四、决策变量和目标函数：系统分析的宗旨十分明确，就是确定规划、设计的最优方案，然而最优方案是通过各种决策因素比较选择确定的，这些决策因素在数学模式中用变量加以表达称为决策变量，由决策变量构成的函数关系称为目标函数。在可行域内目标凸函数的极值往往就是我们要确定的最优方案，此方案确定的方程的解就是最优解。

五、逻辑思维的推理：系统分析的逻辑推理系指分清系统外部联系和主次，确定系统的层次结构和因果关系。具体说来逻辑思维的推理表现在进行系统分析时应做到“六有”：即建立方案有条件，确定方案有目的，比较方案有对象，评价方案有指标，决策方案有程序，实施方案有方法。

六、霍尔（A. D. Hall）的三维结构：在系统分析中必须不同的阶段采用不同的步骤，综合运用各种科学技术知识去分析，霍尔将分析